

双相不锈钢



前言



关于双相不锈钢，最早由瑞典的阿维斯塔公司于20世纪30年代初启动相关制造实验。该公司在双相不锈钢的发展史上扮演了重要角色。现在，距离双相不锈钢的首次制造已经接近90个年头，今天能够为国际不锈钢论坛编写的双相不锈钢手册做序，让我感到十分荣幸。这本手册是很有价值的参考资料，它不仅为读者提供了相关知识，还指导读者针对特定项目，恰当地使用合适的双相不锈钢。另外，如果您还没有考虑使用双相不锈钢，那么这本手册也为您如何适当地选择双相不锈钢提供了充分指导。

这本手册涵盖了有关双相不锈钢的各种课题。不仅如此，书中还详细地介绍了双相不锈钢的多个用例，为开发双相不锈钢的其他用例提供了灵感。最后，书中对双相不锈钢的制造提供了极有帮助的指引，吹散了笼罩在双相不锈钢产品家族周围的多层迷雾。

公平地讲，双相不锈钢的使用尚未达到这个不锈钢产品家族的全部潜力。现代双相不锈钢综合了高强度、高耐腐蚀性以及稳定的可模锻性，因此面对需要免维护、长寿命的苛刻应用，双相不锈钢是选材时需要考虑的重点材料。

Bernard Heritier与Clara Herrera是国际不锈钢论坛长材产品委员会的主要成员，我要感谢二人对本项目做出的奉献。正是由于二人的技术能力和专业经验，才成就了这本内容详实、结构统一的手册。另外，我还要感谢国际不锈钢论坛的Jo Claes，感谢她高超的设计能力，让这本手册栩栩如生。

我们要把这本手册推荐给生产企业、材料指定机构、建筑设计者、OEM厂商以及批发商，我们相信这本手册将会帮助他们做出选材决定和实施市场开发活动。

Tim Collins
秘书长
国际不锈钢论坛

目录

前言

1 引言

2 材料标准和化学成分

材料标准

化学成分

3 耐腐蚀性

3.1 均匀腐蚀性

3.2 点状腐蚀和隙间腐蚀

3.3 环境致裂

3.4 疲劳腐蚀

3.5 摩擦腐蚀

4 物理性能

5 机械性能

5.1 抗张属性

5.2 温度范围

5.3 加工硬化

5.4 耐火能力

5.5 抗震能力

6 应用内容

6.1 艺术

6.2 建筑设计

6.3 桥梁

6.4 海岸工程

6.5 复原项目

6.6 隧道

6.7 运输业

6.8 化工行业

6.9 纸浆和纸张行业

6.10 石油天然气行业

6.11 核能行业

6.12 可再生能源行业

6.13 水源

6.14 多个市场

7 制造

7.1 成型

7.2 切削加工

7.3 焊接作业

7.4 质量控制

8 结语

9 参考资料

10 附录

1 引言

双相不锈钢是最晚出现的不锈钢产品家族，最初在20世纪30年代展开测试，20世纪70年代起开始批量生产（参考资料：1-1至1-6）。

双相不锈钢具有优秀的机械性能和耐腐蚀性能，因此面对高腐蚀环境下的高负荷应用，双相不锈钢是首选材料。现代双相不锈钢家族的开发最初只有几个等级，最具代表性的是UNS S31803，之后又出现了S32205，后者也被称为2205（EN 1.4462）。再后来，双相不锈钢的开发走向两个截然相反的方向：

- 一是能够满足非常恶劣环境下需求的、耐腐蚀性更强的“超级双相不锈钢”和“特超级双相不锈钢”等级。
- 一是能够满足较高强度需求但适合腐蚀性较低环境（通常是结构性应用）的“精益双相不锈钢”等级。

像其他不锈钢家族一样，双相不锈钢带来了低维护性和低生命周期成本。双相不锈钢具有高强度、高耐腐蚀性以及良好的加工性能，如果把这种不锈钢的各种特性都考虑在内，那么它们可以广泛用于各种新应用，例如，长期性建筑物（桥梁、泄洪闸等）和长期性设备（海水淡化工厂、水源和能源公用设施）。

双相不锈钢是对其他不锈钢家族的有益补充，尤其是奥氏体不锈钢。有时候，双相不锈钢应当是首选材料；有时候，双相不锈钢能够解决意料之外的腐蚀难题。这本手册将提供几个示例。

我们希望这本手册能够让您的项目考虑使用双相不锈钢。



Sluice gates at the Mont Saint Michel in France

2 材料标准和化学成分

材料标准

在许多产品和/或应用上，双相不锈钢等级在多个主要标准中都有提及，例如，EN标准、ISO标准、ASTM标准（[参见附录1](#)）。尽管UNS等级不锈钢数量相当庞大，但今天只有少数仍在批量生产。

化学成分

双相不锈钢的结构中包含约50%的铁素体（一种体心立方晶体结构）和50%的奥氏体（一种面心立方晶体结构）。为达成这种结构，铁素体相的稳定元素（Cr、Mo、Si、W等）被奥氏体相的稳定元素（Ni、N、Mn等）相抵消。铁素体/奥氏体的比率不仅取决于合金元素，而且取决于热处理工序。

双相不锈钢的分类依据是耐腐蚀性，而耐腐蚀性依赖的是合金元素。我们的惯常做法是，根据抗点蚀当量数（PREN）来区分双相不锈钢（[参考资料：2.1](#)）。下面将详细介绍抗点蚀当量数。

- 精益双相不锈钢等级（典型代表UNS S32304 -EN1.4362），抗点蚀当量数22-27，镍含量较低，不含或含有少量钼，非常适合不十分恶劣的环

境。

- 标准双相不锈钢（典型代表S32205（EN 1.4462）），抗点蚀当量数28 - 38，铬含量22%，钼含量3%，耐腐蚀能力居于中间范围。
- 超级双相不锈钢（典型代表S32520（EN 1.4507）），抗点蚀当量数39 - 45，铬含量25%，钼含量3.5%，氮含量0.22-0.3%。
- 特超级双相不锈钢，热点蚀当量数 >45，适合非常恶劣的环境，通常用于石油天然气行业。

说明：“PREN”指“抗点蚀当量数”： $PREN = Cr + 3.3Mo + 16N$ ，其中Cr、Mo、N分别指铬、钼、氮的含量，表示为重量百分数（[参考资料：2.2](#)）。[参见第3.2节](#)

今天出现了许多双相不锈钢等级，部分原因是申请专利的结果，部分原因是新需求的出现，需要开发新的钢材等级，还有部分原因是为了在石油天然气行业的使用。

[附录2](#)提供了双相不锈钢等级清单，[附录3](#)提供了不同标准之间的对应关系。



加拿大蒙特利尔市尚普兰大桥。
供图：加拿大基建公司

3 耐腐蚀性

双相不锈钢的铬、钼、氮含量高，因此在多种不同环境下都表现出高耐腐蚀性，例如，氧化性工业溶液、含有硫酸的溶液、有机酸、稀释矿物酸、热碱溶液等。

双相不锈钢结合了高强度与良好的耐腐蚀性（图3.1）。使用双相不锈钢，可以设计更轻便的组件，因此可以降低材料用量和制造成本。也因此，双相不锈钢被用于石油天然气应用、反应堆、化工槽罐、水处理设备、海水淡化工厂以及热交换器等。

3.1 均匀腐蚀性

均匀腐蚀或全面腐蚀，指在整个表面区域或者整个区域的较大部分，发生均匀的金属损失。当相关材料暴露于强酸（有机酸的腐蚀性低于无机酸）、热碱环境以及化工工艺使用的多种其他介质时，会发生均匀腐蚀。某些微量化学物质和杂质（例如，氯化物和氟化物）以及研磨固体也会增加腐蚀率。另外，也有些杂质会降低腐蚀率。在极端腐蚀性介质环境下，钝化膜可能没有能力阻止腐蚀侵蚀。因此，我们需要腐蚀率极低的材料，通常腐蚀率要低于0.1毫米/年。不锈钢腐蚀表格广泛介绍了各种化学物质的腐蚀能力，可以作为合金材料选择上的粗略指导。在现实工业条件下，许多因素都会增加腐蚀：充气、温度变化、启停条件、流量、杂质等。

必须指出的是，当存在均匀腐蚀时，不应使用抗点蚀当量数来对不锈钢进行预测或排位。例如，在高pH值介质环境下，钼不会增强耐腐蚀性。

含硫酸溶液在多个工业工序中都有使用。为

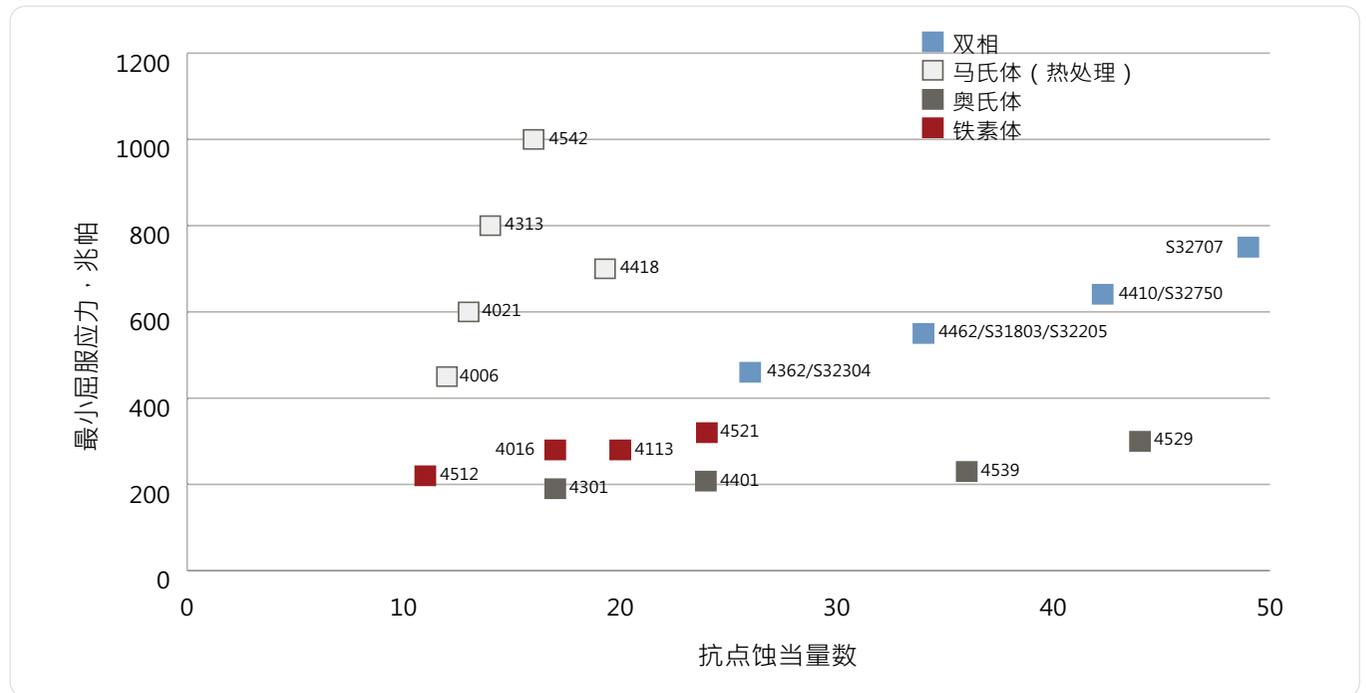


图3.1 最小屈服强度与抗点蚀能力（第3.2节）。
说明：等级编号指向EN标准，对于双相不锈钢的EN和UNS机械性能（马氏体属于热处理状态不锈钢），则分别属于EN 10088-3和EN 10088-2标准。

对抗酸性腐蚀和介质温度变化，必须选用双相不锈钢。精益不锈钢可用于苛刻程度较低的环境。随着酸性和温度的增加，标准双相不锈钢（S32205）可能是最佳选择，甚至在有些情况下，标准双相不锈钢要优于奥氏体不锈钢316LN或317LM。对于更加苛刻的环境，推荐使用超级双相不锈钢（图3.2）。

针对特定介质，为细化不同等级不锈钢的相对性能，实验室测试和工业经验是必要的。例如，纸

浆和纸张生产用间歇式和连续式蒸煮器已在使用碳素钢、不锈钢以及镍基合金等不同材料。在170°C条件下，实验室的腐蚀测试所测定的间歇式和连续式蒸煮器的最大腐蚀率如图3.3所示。对于该应用，双相不锈钢提供了优秀的抗均匀腐蚀性，其抗均匀腐蚀性甚至优于部分镍基合金。

在不考虑浓度的情况下，当温度低于100°C时，苛性碱（NaOH）或苛性钾溶液（KOH）等强

碱介质的腐蚀性并不很强。当温度更高时，则存在高蚀裂风险，此时推荐使用标准双相不锈钢（UNS S32205（EN 1.4462）或精益双相不锈钢。超级双相不锈钢的使用温度最高可达150°C。这种高温腐蚀性环境出现在碱金属的制造、石油精炼厂、纸浆和纸张的制造以及铝材加工。

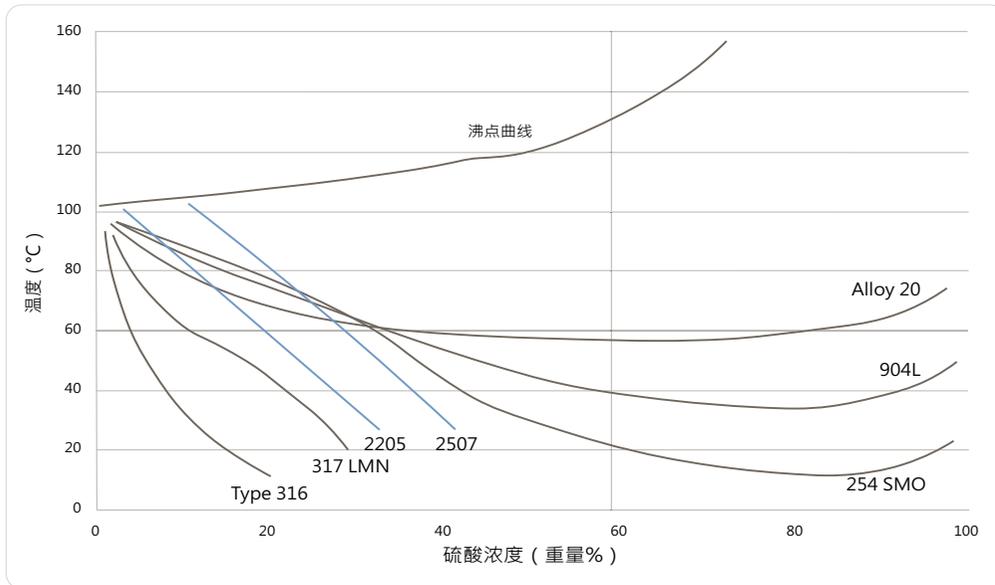


图3.2 不充气硫酸的腐蚀能力，0.1毫米/年（0.004英寸/年），ISO 腐蚀图（使用试剂级硫酸进行的实验室测试）。
来源：生产企业数据资料，254 SMO是奥托昆普钢铁公司的商标。

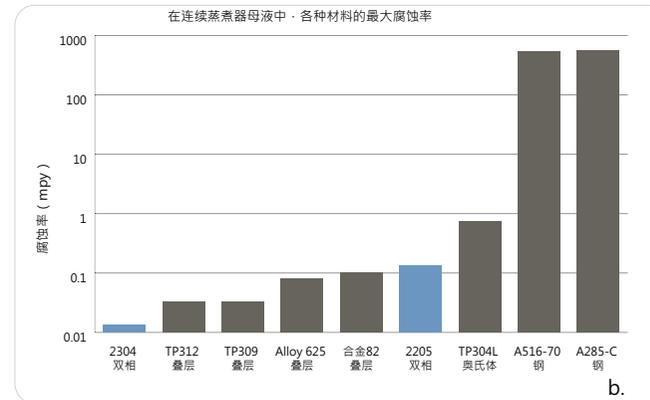
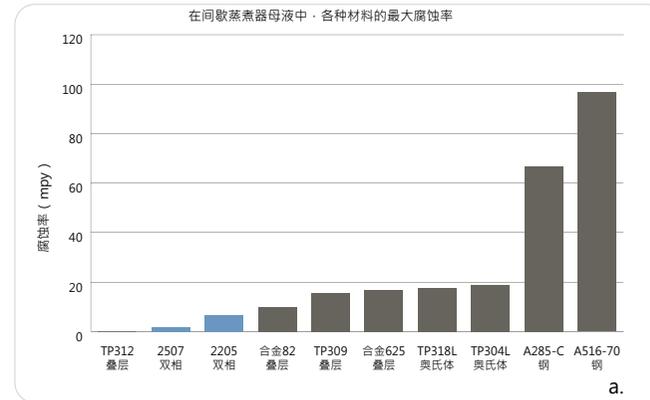


图3.3 实验室腐蚀测试测得的金属与合金的最大腐蚀率，测试温度170°C，测试用母液分别为：(a) 间歇蒸煮母液；和 (b) 连续蒸煮抽取母液（参考资料：3.5）。注意对数标尺。

在苛性碱和含硫苛性碱溶液（白液）中，即使温度达到 170°C ，双相不锈钢的均匀腐蚀度仍然低于 0.3 毫米/年。不过，硫化物的添加会增加双相不锈钢的腐蚀率，尤其是含有钼的双相不锈钢，例如 UNS S32205 (EN 1.4462) (图3.4和3.5)。

在造纸行业，硫化物是一种加剧腐蚀的因素（图3.6）。在利用木材生产纤维素的工艺中（卡夫制程），需要在一定压力下，将木片放在 170°C 环境下蒸煮，蒸煮母液中含有 20% 的碱，其中添加了硫化钠 (Na_2S)、碳酸钠 (Na_2CO_3) 以及微量的硫代硫酸钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)。

在熟化期间（熟化温度在 70°C 至 170°C ），工艺环境的化学成分发生了变化，除了多硫化物之外，还出现了有机杂质。在含有 20% 苛性碱、氯化物和硫化物的白液环境下，双相不锈钢家族表现出良好的耐均匀腐蚀性和耐应力腐蚀开裂性。

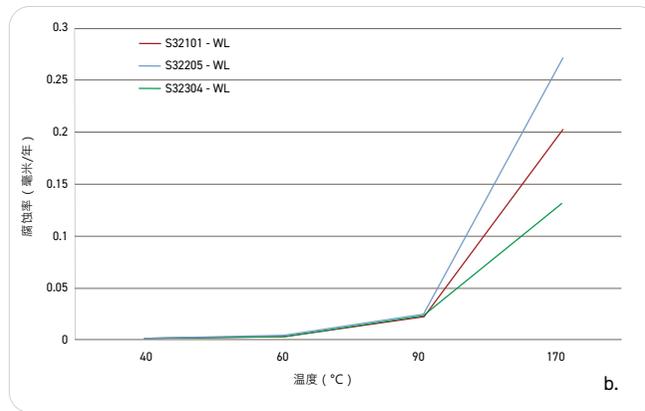
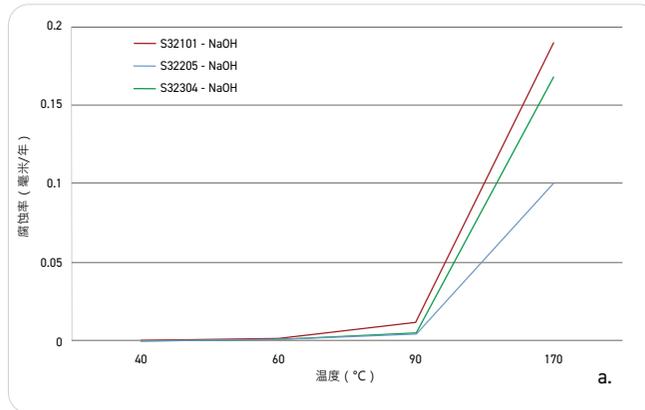


图3.4 不同温度下，部分双相不锈钢等级的腐蚀率，使用母液：(a) 3.75M NaOH ；和 (b) $3.75\text{M NaOH} + 0.64\text{M Na}_2\text{S}$ （白液）（参考资料：3.12）

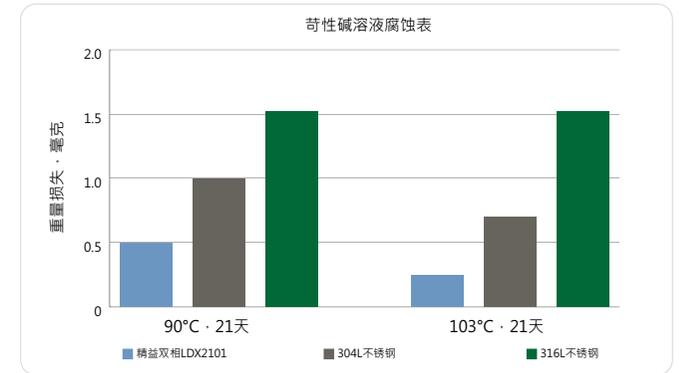


图3.5 白液中材料的腐蚀率（参考资料：3.13）

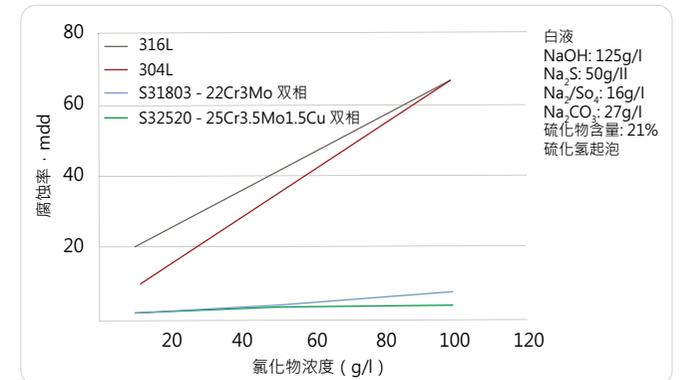


图3.6 白液腐蚀率——卡夫制程（参考资料：2.2）
纸浆和纸张行业的均匀腐蚀测试。样品接受热板煮沸效应测试。样品 140°C ，母液 80°C 。

3.2 点状腐蚀和隙间腐蚀

点状腐蚀是一种能够在金属上形成孔洞或空腔的局部化腐蚀。点状腐蚀难以预测和探测，也难以通过设计来预防，因此比均匀更具破坏性。

点状腐蚀严重依赖于钢材的化学成分，受到温度、氯化物含量、pH值以及是否存在氧化剂等不同参数的影响。

氯、钼和氮是影响点状腐蚀的重要元素。以下经验公式被广泛使用：

$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$$

百分比值为重量百分比。

抗点蚀当量数描述的是在含氯环境下，不锈钢对局部腐蚀的耐受力。

另外，还有考虑其他元素（例如，钨和锰）的公式。钨对抗点蚀能力具有正面影响，而锰则具有负面影响。

$$\text{PRENW} = \%Cr + 3.3 \times (\%Mo + 0.5\%W) + 16 \times \%N$$

$$\text{PRENMn} = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N - \%Mn$$

在增加铬和钼（对抗点蚀能力有正面影响）含量的同时，还要相应增加奥氏体稳定元素的含量，以保持50%铁素体/50%奥氏体的比率。不过，这会带来一个意外后果：在一定温度范围内，一些可能严重破坏不锈钢机械性能的金属间相可能会在短时间内形成（图5.2和图5.3）。在避免这些金属间相形成的过程中，高合金不锈钢等级（例如，超级双相不锈钢和特超级双相不锈钢）的加工工序、热处理以及焊接会受到诸多限制。尽管如此，这样做却是值得的，因为这些操作的成本远低于超级奥氏体或镍基合金。部分不锈钢家族的抗点蚀当量数排名如图3.7所示。

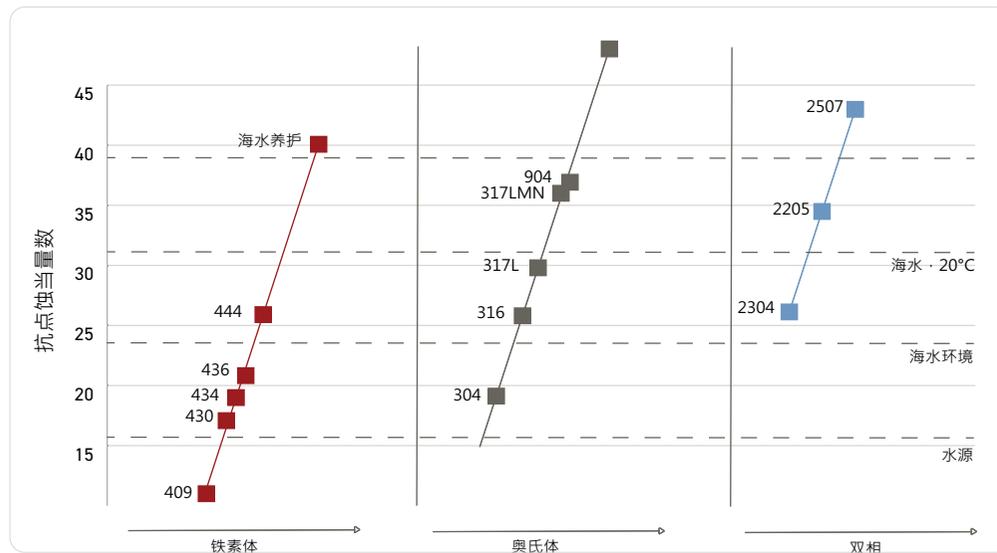


图3.7 抗点蚀当量数排名（参考资料：3.1和3.14）

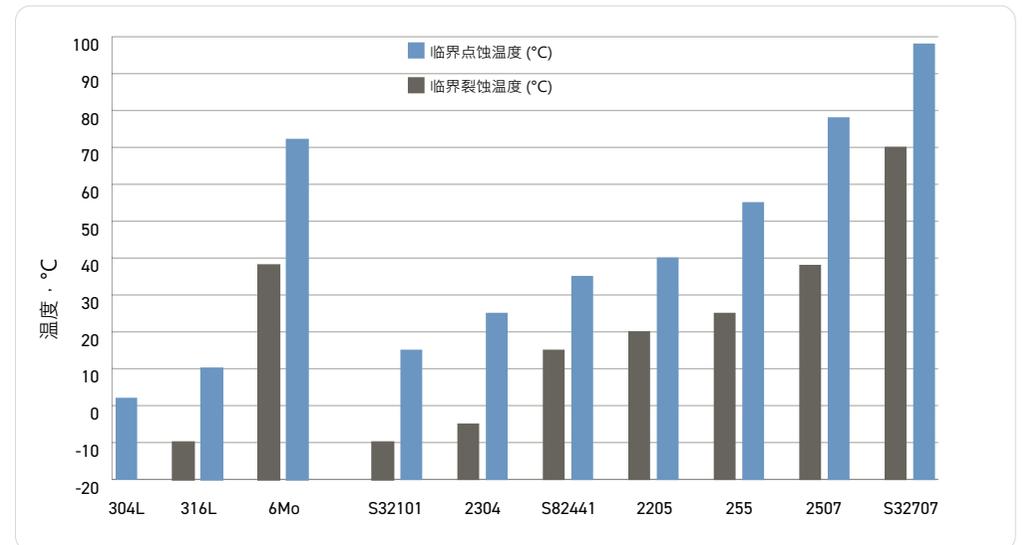


图3.8 奥氏体不锈钢和双相不锈钢的临界点蚀温度*和临界裂蚀温度*（根据ASTM G48标准，使用6%氯化铁进行评估）。（参考资料：2.1）

* 相关定义位于第10页

根据不同标准（例如，ASTM G48方法E或ASTM G150方法）的相关，可以通过计算临界点蚀温度（CPT），将点蚀进行量化。临界点蚀温度是发生点蚀时的最低温度（°C）。不锈钢的临界点蚀温度越高，抗点蚀能力越强。

隙间腐蚀是另一种局部腐蚀。隙间腐蚀发生在密闭空间、缝隙或裂隙内，这些位置难以接触周边环境。这种密闭空间既可能出现在两片金属之间，也可能出现在金属与非金属材料之间，例如，垫片、垫圈、联轴器、紧固头、搭接和夹紧位置。对于临界裂蚀温度（CCT），可以根据ASTM G48标准方法F或ASTM G78标准计算。

图3.8所示为6%氯化铁环境下，各种奥氏体和双相不锈钢的临界点蚀温度和临界裂蚀温度。相对于EN 1.4301/1.4307（304/304L）奥氏体不锈钢或大部分铁素体不锈钢，精益双相不锈钢表现出更好的耐腐蚀性能；在某些环境条件下，其耐腐蚀性能要等于或优于EN 1.4044（316）不锈钢。如果是更加苛刻的环境，例如，海洋环境或高温氧化含氯溶液，可以使用双相不锈钢S32205（EN 1.4462）或超级双相不锈钢，代替高合金奥氏体不锈钢。特超级双相不锈钢不仅具有高强度，而且相对于镍合金和高合金奥氏体不锈钢，特超双相不锈钢的临界裂蚀温度和临界点蚀温度也更高，因此适合恶劣的环境和苛刻的应用，例如，石油精炼厂、深水脐带缆、石化厂和化工厂、热带海水或尿素生产等（参考资料：2.1和2.2）。

3.3 环境致裂

“环境致裂”属于综合术语，其中包括应力腐蚀致裂、氢脆变、硫化物应力致裂、液态金属脆变以及疲劳腐蚀等。对于环境致裂能力，可以利用美国腐蚀工程师协会（NACE）TM0177标准进行测试。

应力腐蚀致裂

应力腐蚀是指在张应力、腐蚀性环境以及易腐蚀材料的综合作用下，形成的一种局部失效状态（图3.9）。这种综合作用力导致裂缝的出现和扩散，进而导致构件失效。应力腐蚀致裂不仅能够发生在60°C以上的含氯环境下，而且能够发生在100°C以上的浓缩碱溶液中。

铁素体不锈钢和双相不锈钢在含氯环境下，表现出较高的抗应力腐蚀致裂能力。双相不锈钢的抗应力腐蚀致裂能力要优于奥氏体不锈钢；在石油天然气、化工或纸浆纸张生产等氯化物应力腐蚀致裂风险比较高的工艺中，双相不锈钢能够替代奥氏体不锈钢。图3.10所示为不同的氯化物含量和温度给奥氏体不锈钢和双相不锈钢的抗应力腐蚀致裂能力所带来的影响。附件4提供了不同环境下，双相不锈钢和奥氏体不锈钢的部分抗应力腐蚀致裂能力数据。图3.11分别针对EN 1.4404（316L）和S32750（EN 1.4410）不锈钢，提供了在pH值（~5.5）无调整条件下，点状腐蚀、裂隙腐蚀以及应力腐蚀致裂条件、温度及氯浓度。相对于EN 1.4404，超级双相不锈钢S32750表现出更高的临界点蚀温度和临界裂蚀温度。不仅如此，相对于EN 1.4404，在较高温度和较高氯含量

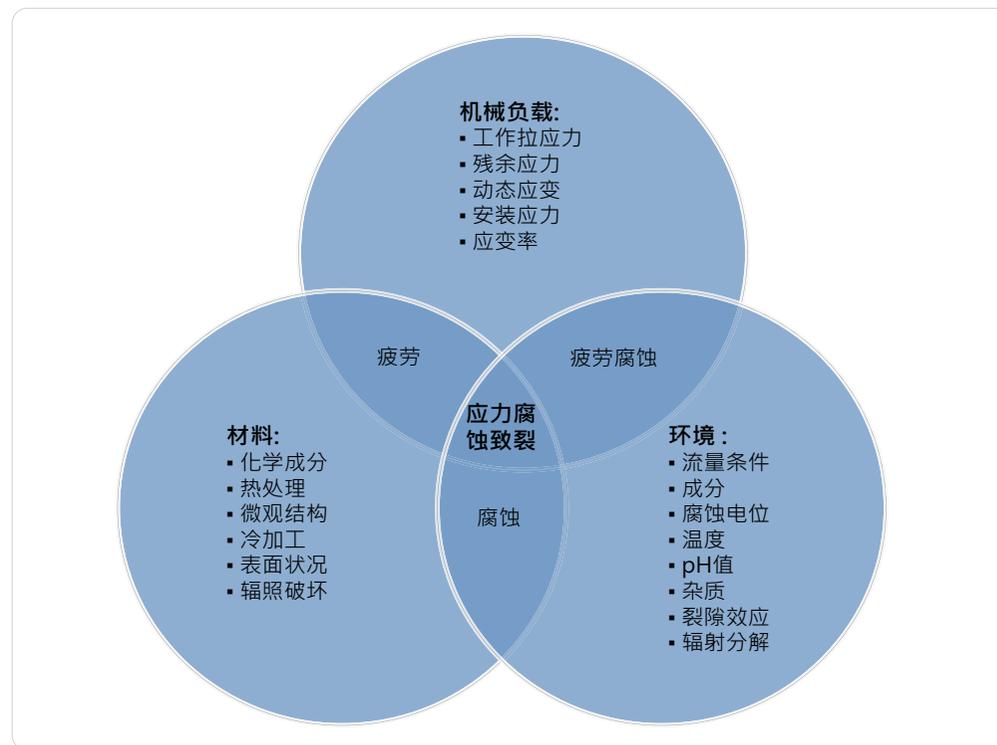


图3.9 造成应力腐蚀致裂的因素。（参考资料：3.15）

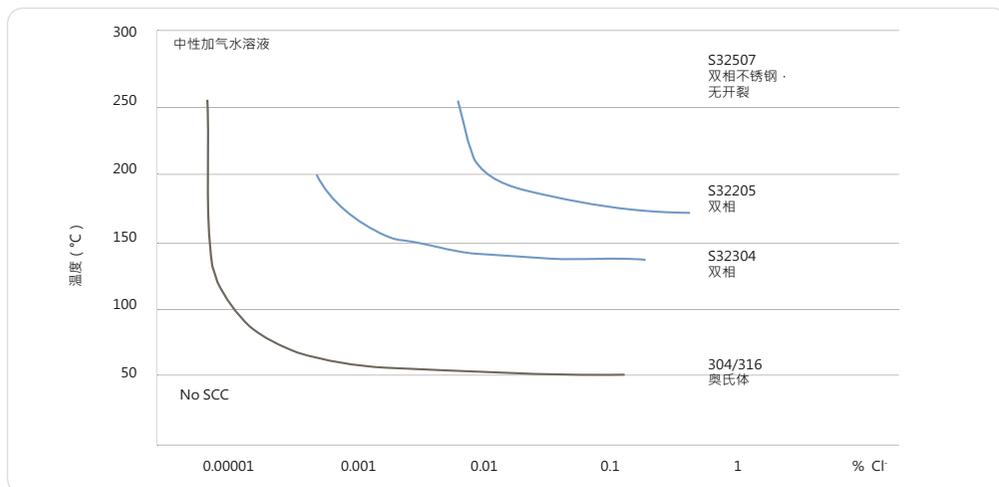


图3.10 氯化物含量和温度对于不同奥氏体和双相不锈钢的抗应力腐蚀致裂能力的影响 (参考资料: 2.2)

条件下, S32750还表现出更高的抗应力腐蚀致裂能力。S32750在85°C以下的10M氯溶液中没有发生开裂, 而EN1.4404的相应温度则在60°C以下。(参考资料: 3.16)

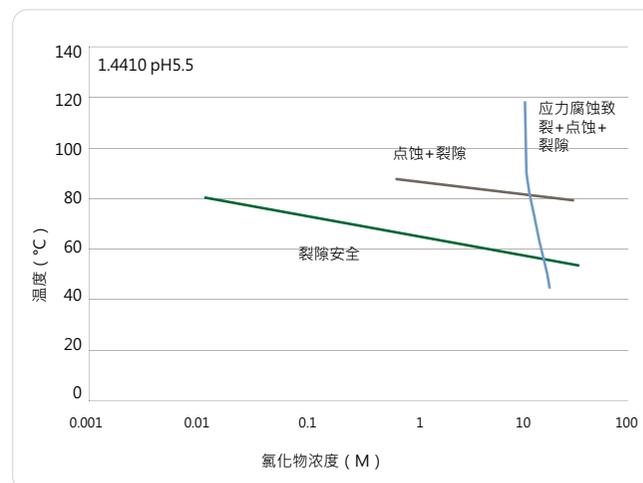
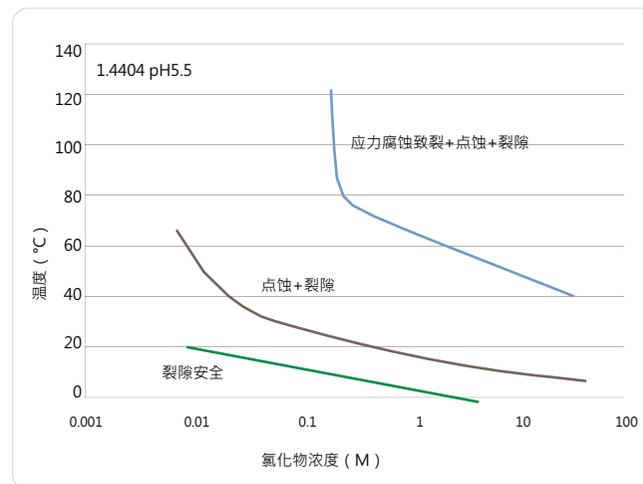


图3.11 奥氏体不锈钢EN 14404 (316L) 和超级双相不锈钢 EN 1.4410 (S32750) 的氯化物应力腐蚀致裂和裂隙性能比较 (参考资料: 3.16)

硫化物应力致裂

根据NACE的定义，硫化物应力致裂指“在有水和硫化物（H₂S）的条件下，由于张应力与腐蚀作用的共同作用而导致的金属开裂，属于氢应力致裂的一种形式”。硫化物腐蚀致裂的变量包括敏感金属、张应力、硫化氢以及水。在石油天然气行业，硫化物致裂非常重要，这是因为相关介质既含有氯化物，又含有硫化物（酸化作用）。关于在石油天然气生产中，在硫化氢环境下，抗硫化物应力致裂材料的选择、规范以及应用范围，NACE标准MR0175/ISO 15156:3 2015提供了指导。图3.12所示为双相不锈钢与奥氏体、马氏体以及镍基合金的性能比较。

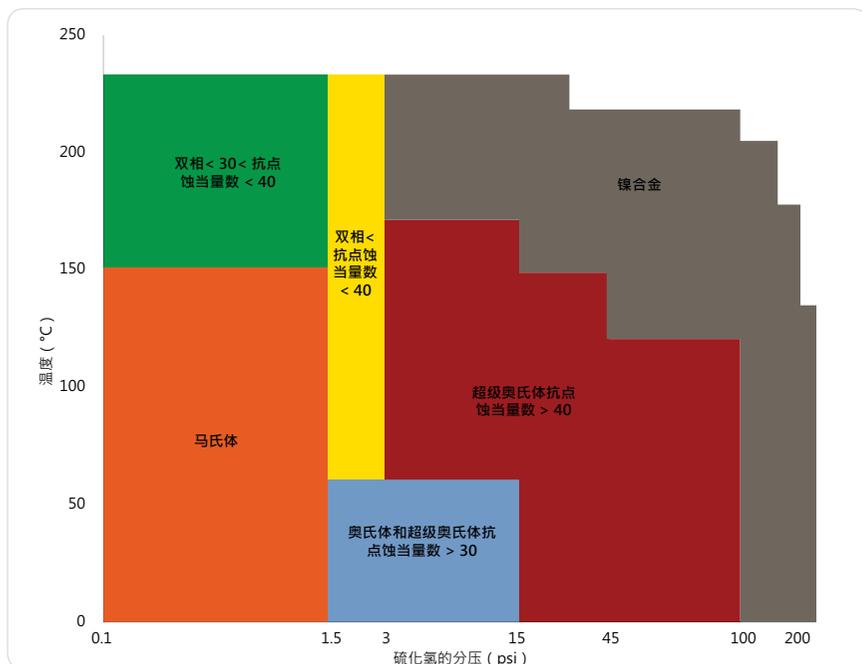


图3.12 在硫化氢环境下，不锈钢和镍合金的使用极限。
(参考资料: 3.17)

3.4 疲劳腐蚀

在腐蚀环境下，当材料暴露于交替性或周期性应力时，可能发生疲劳腐蚀。当双相不锈钢遇到高温、高载荷、低pH值以及氯化物、硫化物或二氧化碳时，抗疲劳腐蚀能力会下降。图3.13所示为在空气中和不同pH值（从中性到高酸性）环境下，双相不锈钢S32205（EN 1.4462）与标准奥氏体不锈钢在疲劳

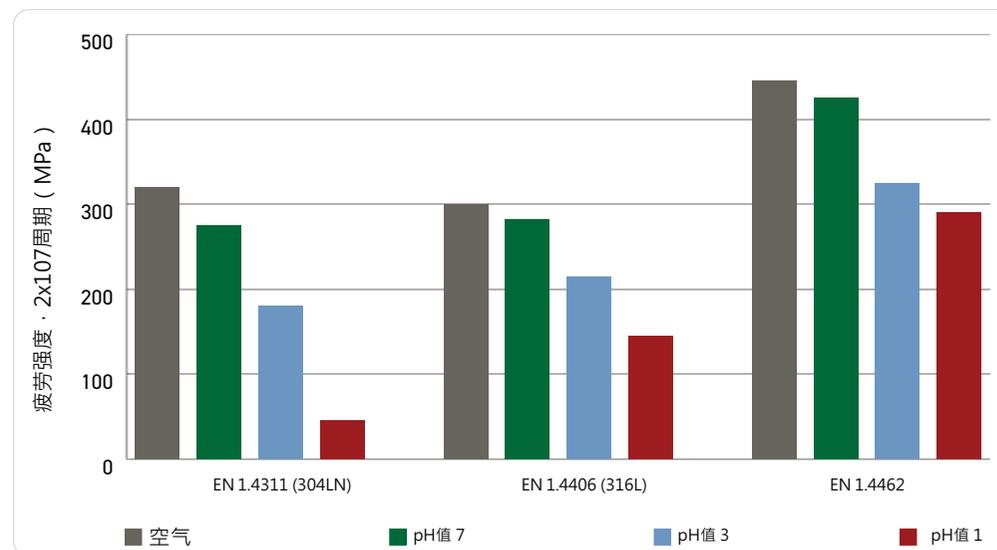


图3.13 通过旋转弯曲实验测得的部分不锈钢的疲劳强度，测试条件：40° C，100Hz，空气和3%NaCl溶液，各种pH值（参考资料: 3.18）

腐蚀测试中的表现。S32205表现出优于奥氏体不锈钢的性能。在海水条件下，双相不锈钢（S32205和S32304）的表现也优于奥氏体不锈钢（图3.14）。

在纸浆和纸张行业以及石油天然气行业，疲劳腐蚀是一个难题，这也是选用双相不锈钢的另一个原因。

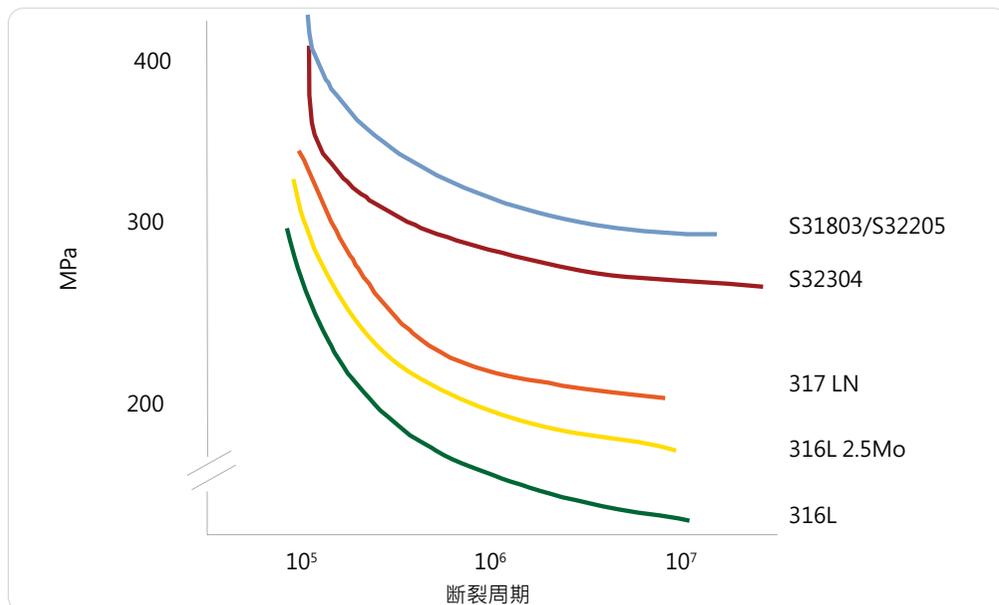


图3.14 部分不锈钢的抗疲劳腐蚀能力。使用合成海水和旋转臂测试。（参考资料：3.8）

对大部分不锈钢而言，它们在空气中的疲劳极限约为抗张强度极限（UTS）的50%。在海水中，马氏体和奥氏体的疲劳极限明显下降，而双相不锈钢却表现出与空气中相似的疲劳极限比例，即：接近抗张强度极限的40%（参考资料：3.20）。

3.5 摩擦腐蚀

摩擦腐蚀是造成材料损坏的一个众所周知的原因，许多行业都存在摩擦腐蚀，尤其是采矿业、湿法冶金行业、油砂行业以及水处理行业。

关于耐磨钢、双相不锈钢以及铁素体-马氏体不锈钢S41003（EN 1.4003）的摩擦腐蚀测试结果，如图3.15a和图3.15b所示。（参考资料：3.21）两种测试使用的介质一是酸性介质，一是碱性介质，二者都含有磨粒，分别代表了上述行业可能遭遇的条件。

当腐蚀构成主导性破坏机制时，双相不锈钢的耐摩擦腐蚀能力最佳。

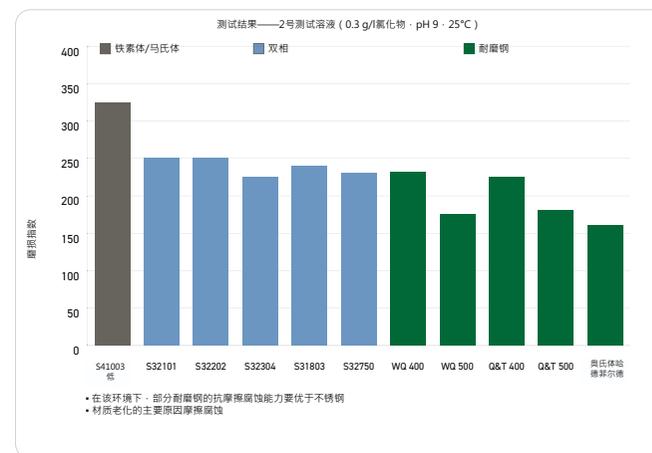
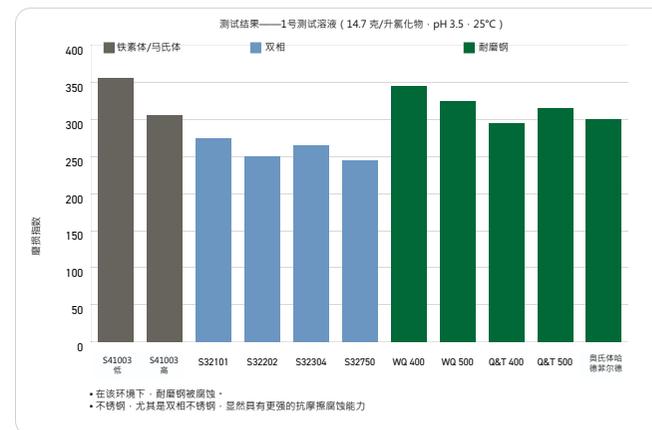
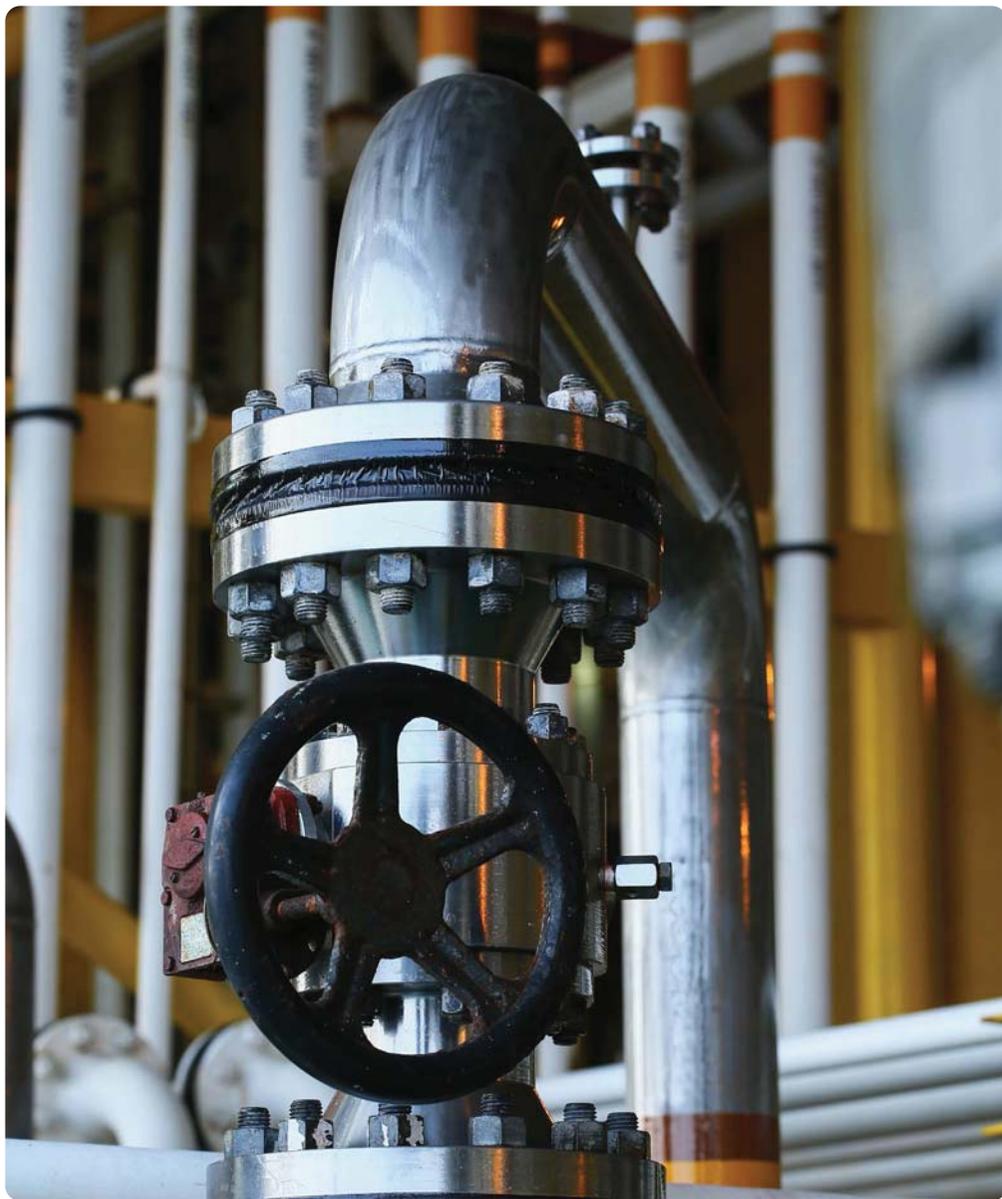


图3.15 双相不锈钢的耐磨能力与耐磨钢

说明：
 磨损指数越大，摩擦腐蚀越大
 WQ400：马氏体0.19%碳钢，水淬火至400HV硬度
 WQ500：马氏体0.30%碳钢，水淬火至500HV硬度
 Q&T 400：马氏体/贝氏体超低碳钢，淬火回火至400HV硬度
 Q&T 500：马氏体/贝氏体超低碳钢，淬火回火至500HV硬度



石油天然气生产过程中使用的双相不锈钢手动阀门

4 物理性能（参考资料：4.1）

不出我们所料，双相不锈钢的物理性能介于奥氏体与铁素体合金之间。这些物理性能在附录5中有介绍。

5 机械性能

5.1 抗张属性

奥氏体、铁素体以及双相不锈钢的应力应变曲线，以及S355钢（一种常见结构钢，屈服强度355MPa）的应力应变曲线，如图5.1所示。

双相不锈钢表现出更高的屈服强度和加工硬度，同时伸长率超过25%。相

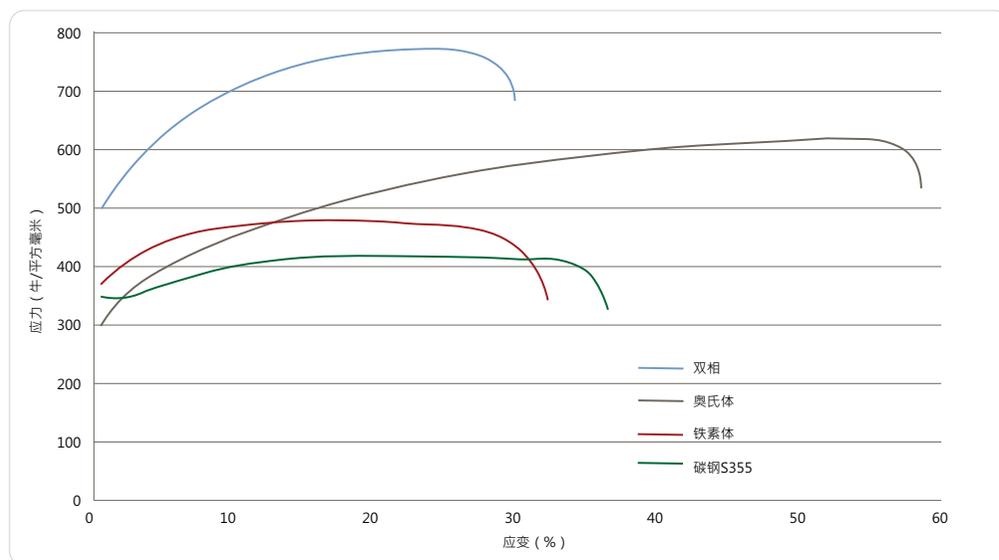


图5.1 不锈钢的典型应力应变曲线 (参考资料: 5.1)

钢材等级	ASTM				EN			
	UNS编号	屈服强度, 0.2% Mpa (ksi)	抗拉强度 MPa (ksi)	伸长度, 2" %	EN编号	弹性强度, R _{p0.2} MPa (ksi)	抗拉强度, R _m MPa (ksi)	伸长率, A ₅ %
2304	S32304	400 (58)	600 (87)	25	1.4362	400 (58)	630 (91)	25
2205	S32205	450 (65)	655 (95)	25	1.4462	460 (67)	640 (93)	25
2507	S32750	550 (80)	795 (116)	15	1.4410	530 (77)	730 (106)	20

表5.1 ASTM标准和EN标准规定的双相不锈钢板最小机械性能 (参考资料: 3.2)

关标准保证的是最低抗拉属性值。EN标准和ASTM标准分别为三种典型钢材等级规定了抗拉值，具体如表5.1所示。

这些数值都是相当保守的数值，要获得更高的强度等级，可以通过调整化学成分以及/或者采用适合的热机械加工工艺来实现。供应商往往会提供更高的性能数值。一个重要的案例就是双相不锈钢钢筋，这种钢筋必须达到的最小屈服强度是500兆帕 (参考资料: 5.2)。各建筑规范通过允许使用更高的应力等级，将冷轧成型的承重构件考虑在内 (参考资料: 5.1)。

关于长材产品的更详细介绍，参见附录6；关于扁材产品的更详细介绍，参见附录7。

5.2 温度范围

5.2.1 高温范围 (参考资料: 5.3至5.6)

当温度在约350° C至约1000° C之间时, 金属间相会析出 (如图5.2所示), 导致材料在室温下发生脆化。为避免高温范围 (约600-1000° C) 条件下的金属间相析出, 可使用快速冷却工艺。

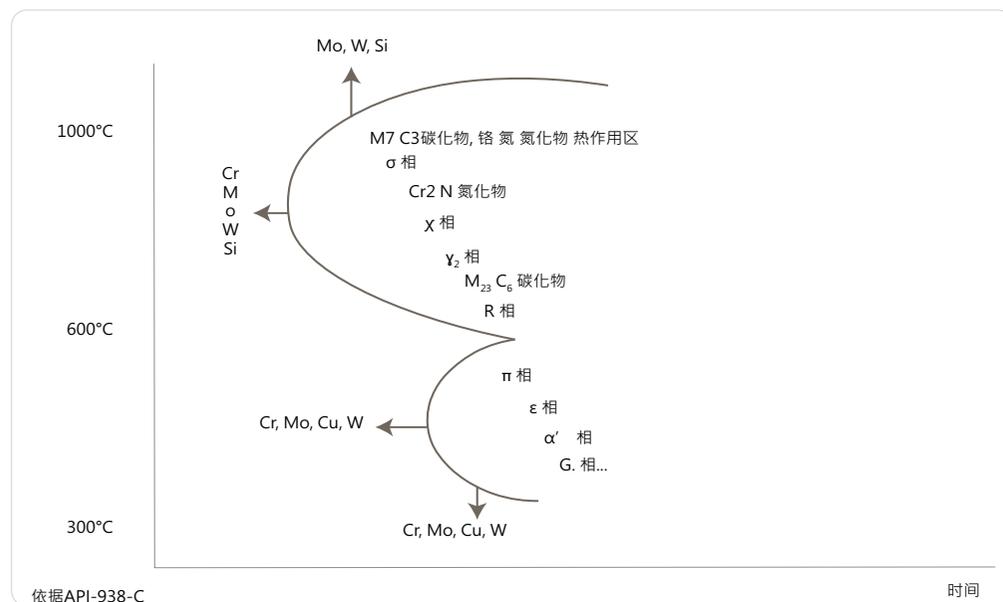


图5.2 合金元素对金属间相析出动力学的影响 (参考资料: 3.8)

相比之下, 低温范围 (约350-600° C) 金属间相的析出速度较慢, 通常不构成金属加工 (焊接、热处理等) 问题。不过, 对于250-350° C范围的工作温度 (通常发生在化工行业), 情况却有所不同。如果在这一温度范围停留数千小时, 再加上瞬变, 则可能发生低温析出, 因此设计者必须知道极限范围。如图5.2所示, 较高含量的铬、钼、铜和钨, 能够提高析出动力速度。因此, 一般认为, 精益双相不锈钢的耐低温析出能力要高于超级和特超级双相不锈钢。图5.3所示为部分常见双相不锈钢的耐低温析出能力。

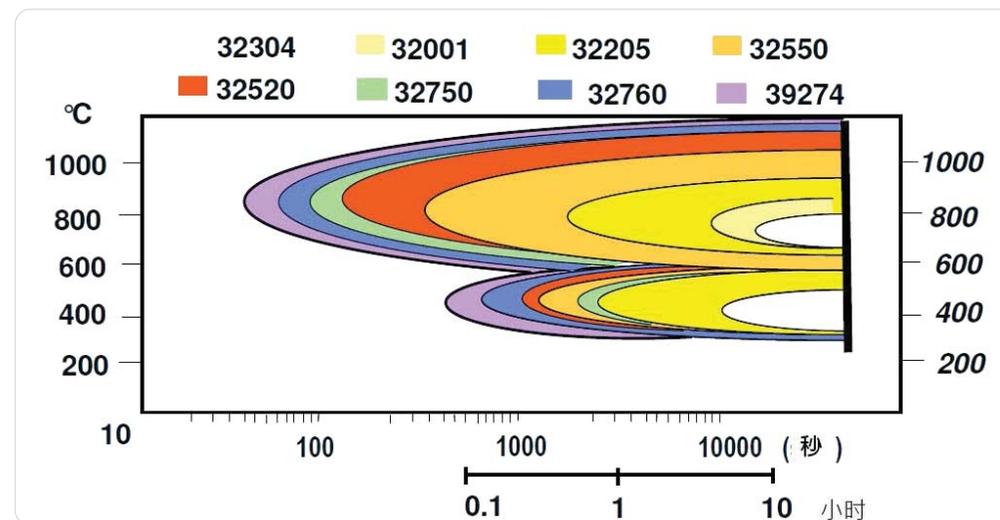


图5.3 部分双相不锈钢的温度/时间/变形动力学 (UNS指称) (参考资料: 2.2)

供应商通常能够提出一些建议。

压力容器规范已经规定了最高使用温度，具体如下：

- 欧洲规范EN 13455将最高使用温度限制在250° C以下。这是一个相当保守的规定。
- ASME标准第8号第1部分将大部分钢材的使用温度限制在316° C以下。这些规范都有一条警告消息：如果温度高于260° C，则钢材可能发生脆化。目前为止，还没有区别精益双相不锈钢和标准双相不锈钢的相关规范，但未来可能会有。

低温范围（参考资料：5.7至5.9）

不同于奥氏体不锈钢，双相不锈钢会随着温度降低发生韧脆转变，其证据就是耐冲击性的降低（通常使用夏比冲击值进行计量）。这限制了双相不锈钢的低温应用。至于双相不锈钢可以使用的最低温度，则通过最低所需冲击值进行设置。

不过，我们有许多调整办法，可以提高双相不锈钢在低温条件下的耐冲击能力：

- 通过化学成分调整，适度降低铁素体含量
- 优化锻造/热轧
- 优化热处理

双相不锈钢满足了各项国际标准的相关要求（例如，ASTM、NACE以及Norsok）；这些国际标准规定的最低夏比KV冲击值为-46° C条件下达到45J。

近年来，由于北极地区要求的使用温度低达-80° C，这带来了双相不锈钢的进一步优化，夏比冲击值要在-100° C条件下达到200J（图5.4）。通常情况下，焊缝性能决定了最低的使用温度。

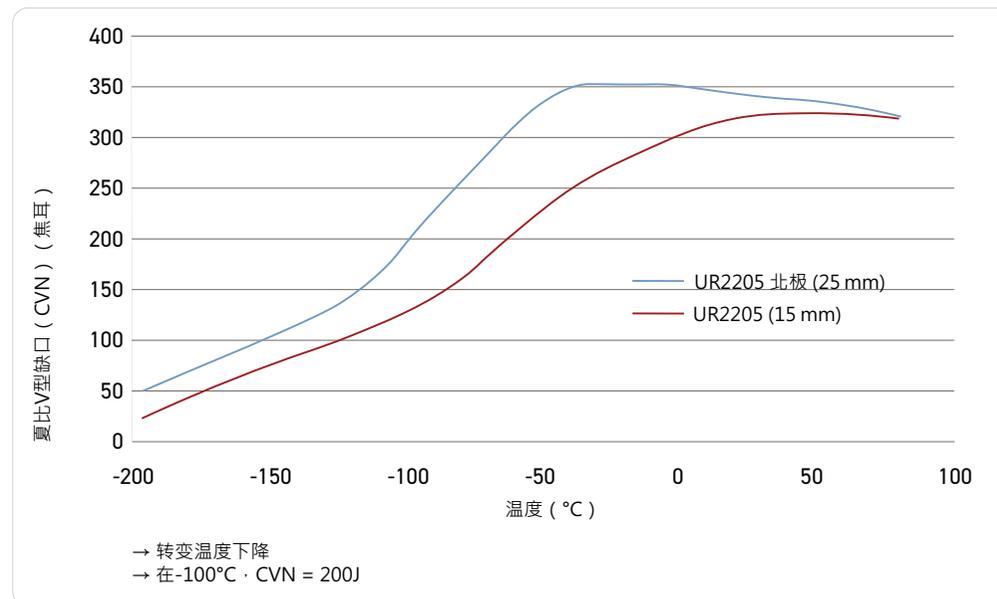


图5.4 针对低温使用优化的EN 1.4462双相不锈钢，其抗冲击性与温度的关系（参考资料：5.7）

5.3 加工硬化 (参考资料: 5.10至5.15)

加工硬化工艺,即通过冷变形来提高强度,是一种广为人知的工艺。加工硬化工艺被广泛用于在线材产品,通过应用类型来调整线材产品的机械性能。图5.5a和图5.5b所示分别为精益双相不锈钢和超级双相不锈钢的加工硬化

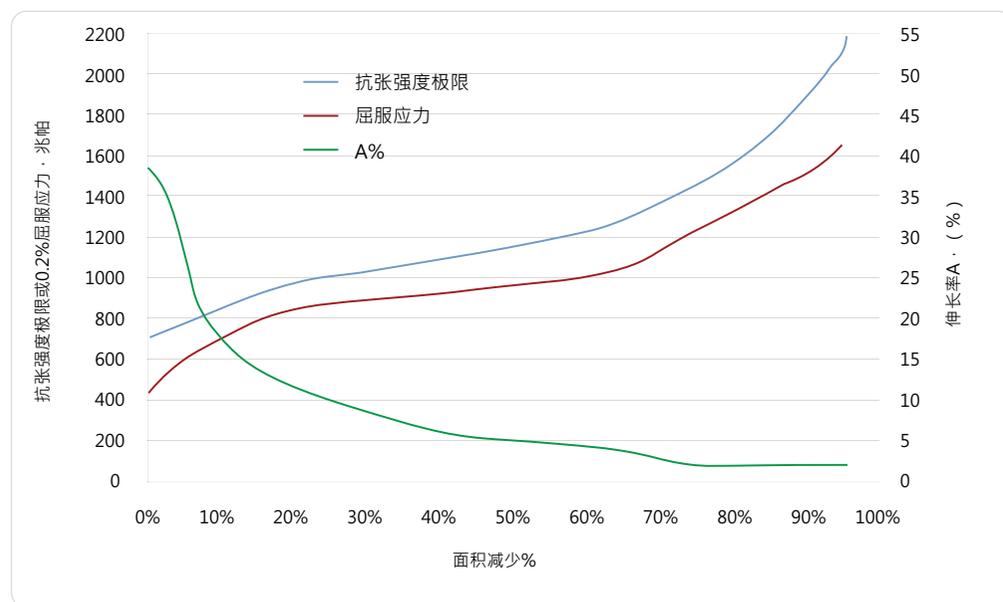


图5.5a 精益双相不锈钢S32202 (EN 1.4062) 的加工硬化曲线 (参考资料: 5.10)

曲线图。不出意外,随着残余伸长率的降低,强度随同变形稳步增加。超级双相不锈钢的抗拉强度等级高于精益双相不锈钢。

图5.6所示为奥氏体不锈钢 (304和316)、半奥氏体析出硬化不锈钢 (631 a.k.a 17-7PH) 以及双相不锈钢 (S32101、S32304以及S32205) 的加工硬化性能比较图。

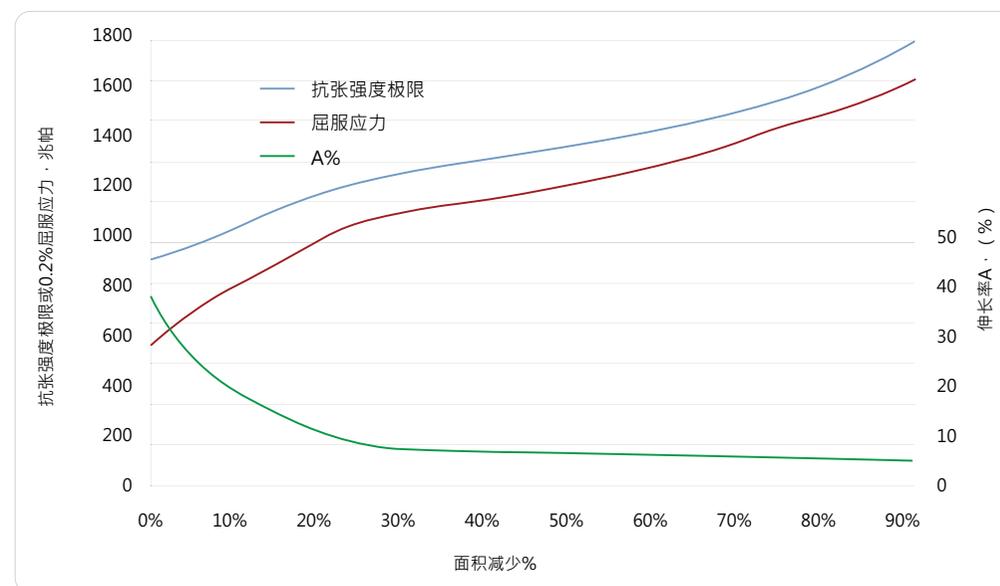


图5.5b 精益双相不锈钢S32750 (EN 1.4410) 的加工硬化曲线 (参考资料: 5.10)

虽然双相不锈钢没有达到奥氏体弹簧钢302 (EN 1.4310) 的强度等级,但对于那些同时需要高强度和高耐腐蚀性 (尤其是抗应力腐蚀致裂能力) 的应用来讲,双相不锈钢已经足够。

图5.7所示为双相不锈钢的载荷松弛度与时间的比较图。所谓“热处理”,指在380-400°C温度范围内,进行串联感应加热,加热时间为一分钟以下。这种松弛处理工艺是碳钢的典型处理工艺。必须指出的是,相对于顺磁性奥氏体不锈钢,部分铁磁性双相不锈钢的感应加热效率更高。

对于冷加工双相不锈钢在预应力和/或后应力混凝土中的表现,我们已有相关调查 (参考资料: 5.12至5.15)。调查结果表明,预浇预应力混凝土桩可以使用S32205双相不锈钢建造;建造时,采用250 ksi (1720兆帕) 低松弛钢绞线,建造工序与常规预应力钢丝加固相同。

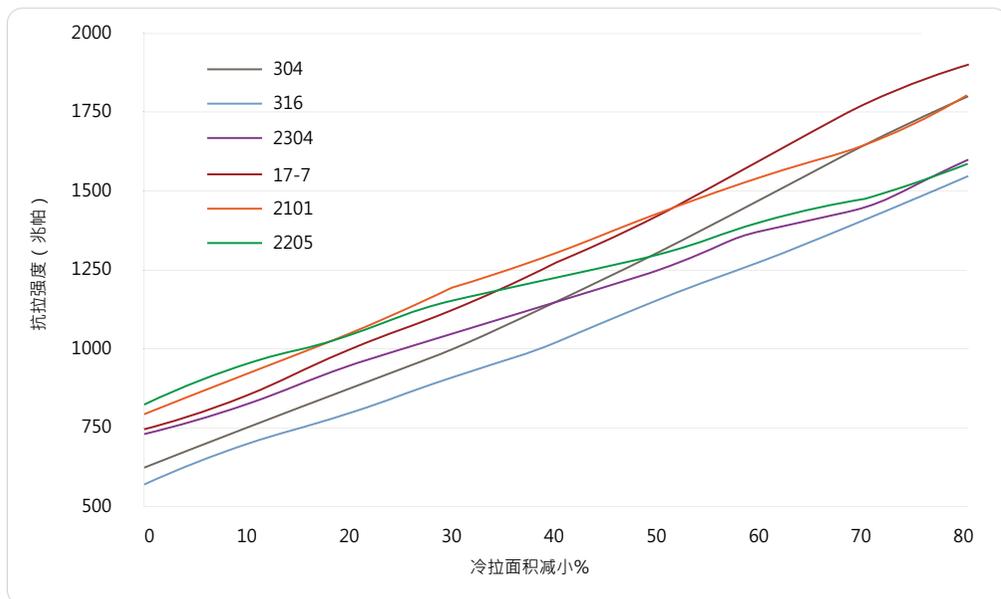


图5.6 部分不锈钢的抗张强度极限值比较 (参考资料: 5.12)

目前为止，虽然有关于预应力和后应力碳钢混凝土的长期性能问题以及钢索斜拉桥问题的报道，但出于成本考量，尚未开展双相不锈钢在这一应用领域的开发工作。

冷加工双相不锈钢现已有多项应用：10.9级紧固件（抗张疲劳极限 ≥ 1000 兆帕，屈服应力 ≥ 900 兆帕）、抗磨损腐蚀型材、承重构件（型材）、高强度钢筋（屈服应力 ≥ 700 兆帕）等。

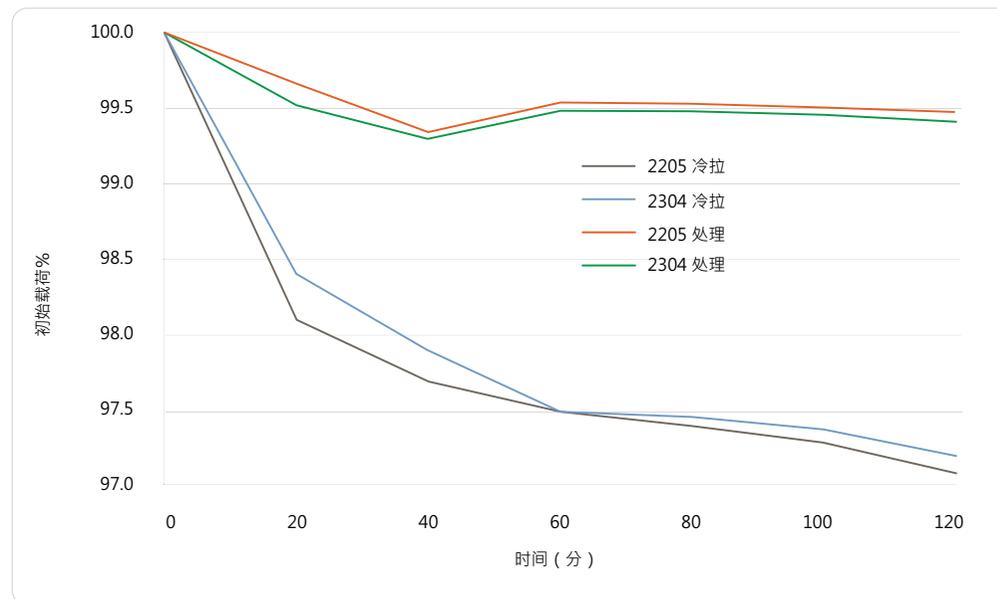


图5.7 双相不锈钢的载荷松弛 (参考资料: 5.12)

5.4 耐火能力 (参考资料: 5.16至5.18)

建筑规范都包含耐性能力要求，通常规定R120耐火要求，即：当建筑物遭遇ISO 843标准所定义的标准化热负荷时（即典型的纤维质火灾），必须能够承受至少120分钟后方可倒塌。

图5.8所示为碳钢、奥氏体不锈钢以及双相不锈钢的屈服强度随温度发生变化的情况，如图所示，在400-700 $^{\circ}$ C范围内，尽管双相不锈钢的强度相对于在室温下有所下降，但其仍然保留了最高的强度水平（兆帕）。

在所有温度条件下，双相不锈钢的强度都高于碳钢，并且S32205（EN 1.4462）在800 $^{\circ}$ C以下，一直保持着最高的强度水平。

双相不锈钢，尤其是精益双相不锈钢，因为其具有高强度和高耐腐蚀性（包括抗应力腐蚀致裂能力），现在是首选的不锈钢钢筋材料。另外，双相不锈钢还提供了更高的耐火能力。

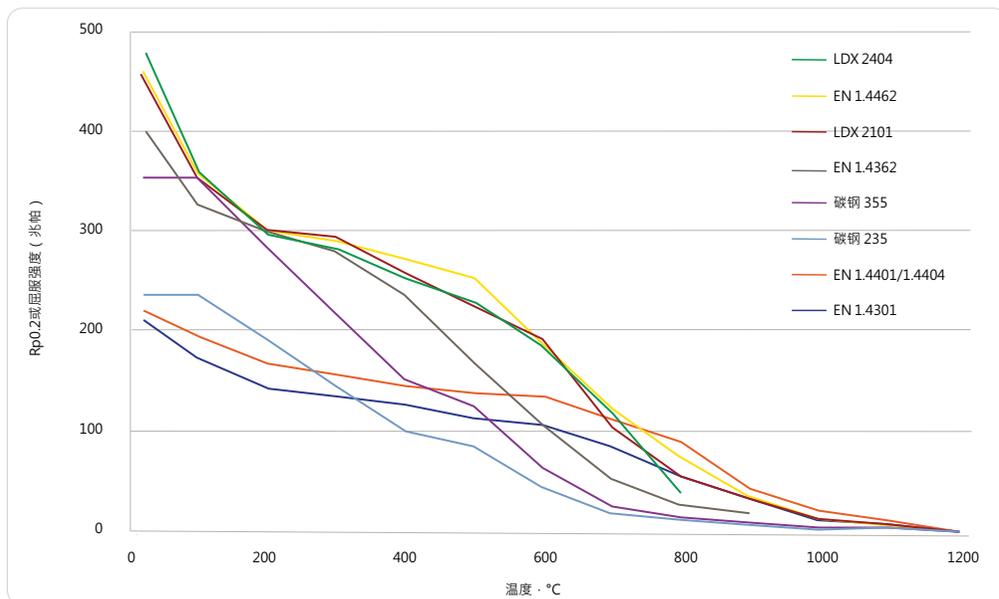


图5.8 奥氏体不锈钢、双相不锈钢以及碳钢的屈服强度与温度的关系 (参考资料: 5.17)

耐火能力要求不仅限于商业性建筑、办公建筑以及住宅。那些处理易燃液体、气体或危险性化学物质的行业，都要满足严格的耐火能力要求。在这一方面，不锈钢，尤其是双相不锈钢，能够发挥很大作用。一个众所周知的案例就是石油天然气钻探平台上使用的防爆墙（参见关于石油天然气行业的章节）。

5.5 抗震能力 (参考资料: 5.19)

地震造成的破坏效应分为三种：

- 对建筑物地基施加的横向作用力，这个作用力与地震仪征测得的加速度成正比（可能超过1倍重力加速度）。然后，建筑物可能发生倒塌。
- 对于重心没有位于对称轴上的非对称性建筑物，地震会产生扭转力矩；
- 对于非常高的建筑物，这会产生谐振效应

如果要设计只发生弹性形变的建筑物，这既不现实，也几乎不可能实现，有鉴于此，我们把重点放在设计一种既能够承受破坏，又能够在最大程度上保持直立性和功能性的建筑物。其中一个重点考量因素是让结构组件尽可能地吸收能量，即：结构组件既要具备足够的强度，又要具备高形变能力，不发生断裂。

在这一方面，奥氏体不锈钢和双相不锈钢非常合适。

建筑物固然是主要考量因素，但工业设备造成的后果也可能同样严重。关于大型储罐的抗震能力，已有相关分析结果发布（参考资料: 5.19）。

6 应用内容

本节介绍双相不锈钢在今天的部分应用。

艺术家、建筑师、设计者以及行业工程人员已经看到并且在利用双相不锈钢的各项优势。现在，建筑规范和法规已将双相不锈钢纳入结构应用的管理范围。通常从安装成本开始，双相不锈钢就已经是涂层碳钢的优秀替代材料。

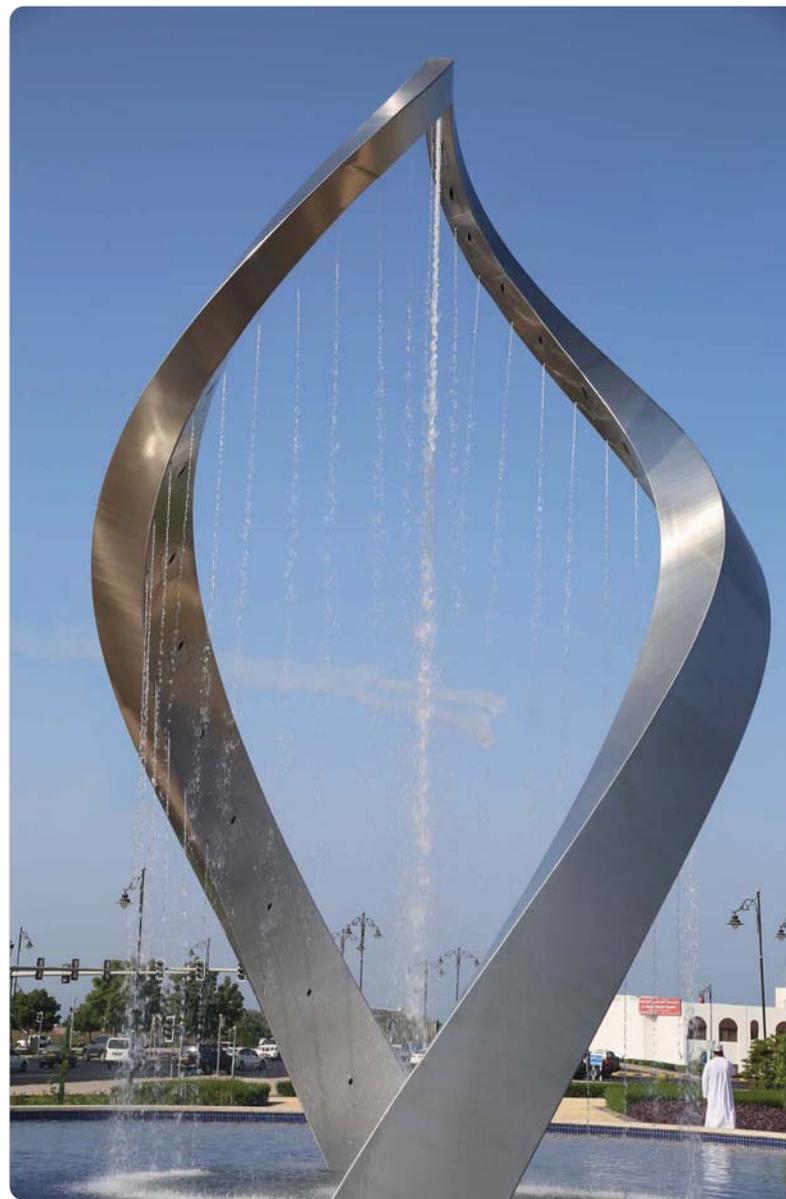
6.1 艺术

当艺术家在寻求获得高强度与高耐久度时，他们越来越多地使用双相不锈钢。以下是三个艺术作品案例。

《阿曼之门》（参考资料：6.1.1），艺术家Giles Rayner的雕塑作品，由两根相互交织的长牙形状构成。两根长牙由抛光不锈钢制成，相互扭转承接，长牙之间通过一块水幕墙沟通，水流则从长牙的内侧流下。这座雕塑高12米，下方是一处60米宽的椭圆形水池。水流从77个垂直喷口流出，象征竖琴。这座雕塑位于阿曼马斯喀特皇家歌剧院外的私人花园内。它由双相不锈钢S32205（EN 1.4462）制成，在炎热的沿海环境下，双相不锈钢提供了高强度、高表面光洁度以及高耐腐蚀能力。

这里要再次指出，双相不锈钢通常不会与其他不锈钢家族发生竞争。即使有，双相不锈钢也是做为有益补充，在同一个应用中同时使用双相不锈钢和其他不锈钢的情况并不鲜见。后文将提供一些例子。

《阿曼之门》，作者：Giles Rayner，地址：阿曼马斯喀特。
供图：archesoman.com





《维纳斯的升起》，作者：Ross Wolfgang Buttress，地址：布里斯班。
供图：David Sandison

《维纳斯的升起》

(参考资料: 6.1.2)，艺术家Ross Wolfgang Buttress的作品，他的灵感来自斐波那契数列和鹦鹉螺壳上交错的样条曲线。这座高23米纤的长雕塑位于澳大利亚布里斯班的袋鼠角公园内。它由不锈钢316 (EN 1.4404) 和双相不锈钢S32205 (EN 1.4462) 制成的钢管和条钢做成，设计使用50年后，仍将历久如新。



《跑步者》，作者：T. Papagiannis博士，地址：芝加哥。
供图：CS联合公司

《跑步者》

(参考资料: 6.1.3)

，高4.9米，长12米，T. Papagiannis博士的作品，位于芝加哥奥黑尔机场附近的高速公路交叉口。它表现的是五位跑步者，依次从远古走向现代，代表了芝加哥这座“行进中的城市”。该雕塑由双相不锈钢S32205 (EN 1.4462) 钢板做成，钢板厚2.25英寸 (57毫米)，使用水力喷射切割而成。五位跑步者分别重约3吨。这座雕塑尽管暴露在芝加哥冬季的严寒和路盐之下，但预计使用寿命却将超过1000年！

6.2 建筑设计

双相不锈钢能够提供更高的强度和耐腐蚀能力，因此扩大了不锈钢在建筑物中应用潜力。有关不锈钢（包括高强度双相不锈钢）的设计手册和设计指南已有出版 (参考资料: 6.2.1至6.2.8)。

本节将介绍几个应用双相不锈钢的著名项目。

斯德哥尔摩的水岸建筑

(参考资料: 6.2.1)



斯德哥尔摩的水岸建筑。
供图：奥托昆普钢铁公司

这是斯德哥尔摩市的会议中心大楼，外立面采用双相不锈钢 S32205 (EN 1.4462)，光洁度达到2E，由3500块Z形百叶窗组成。这些百叶窗不仅能够提供动态波浪效应和惊艳的视觉效果，还能在夏季减少日光摄入量，在冬季允许日光穿过并提供被动加热。该建筑荣获LEED金奖。

阿布扎比卢浮宫的光雨

(参考资料: 6.2.2)

阿布扎比卢浮宫由建筑师Jean Nouvel设计，其突出特点是双层编织穹顶，穹顶直径150米，阳光在室内形成斑点状花纹。水池、孔穴以及穹顶，形成了一个充满阳光、暗影以及动感的室内微气候。屋顶由8个互锁层组成，这些互锁层分别由铝和双相不锈钢制成。



卢浮宫，作者：Jean Nouvel，地址：阿布扎比。
供图：Liz Coughlan

屋顶共使用约300吨不锈钢。另外，这座建筑物还使用了250吨不锈钢钢筋。

多哈机场的屋顶 (参考资料: 6.2.3)

卡塔尔多哈机场为优雅、舒适以及智慧技术设定了新的标准。其最突出的特征之一是波浪状起伏的不锈钢屋顶 (35万平方米)。屋顶不仅要能够抗御热量、湿度以及盐腐蚀，还要提供低反射度，防止飞行员受到强光照射。双相不锈钢 (铬21.5%，镍3.7%，钼1.8%，氮0.17%) 被选为屋顶建造材料，因为双相不锈钢不仅满足了耐腐蚀性要求，而且提供了有利的强度重量比。专利的表面光洁度实现了低光泽度、统一的纹理外观以及低反射比。



卡塔尔多哈机场的屋顶。
供图: 哈马德国际机场

神圣家族大教堂

(参考资料: 6.2.4和6.2.5)

世界闻名的巴塞罗那神圣家族大教堂由Gaudí设计，从1882年起开始施工。现在，这座巨型项目终于接近完工 (计划在2026年完工)，这要归功于新技术和新材料带来的各种可能性，



神圣家族大教堂，作者: Antoni Gaudí，地址: 巴塞罗那。供图: 奥托昆普钢铁公司。

不锈钢正是其中的一种新材料。之所以选择双相不锈钢S32205 (EN 1.4462)，是因为这种材料具有的高耐腐蚀性和高强度，这些性能不仅能够保证建筑物的长期使用寿命，还能大量减轻塔楼上层结构的重量。预制构件使用钢筋、钢板和型钢制成，这样的预制构件便于装配，同时还可降低成本。

Gaudí的这一杰作将借助他生平从未见到的材料和技术来完成。有谁又能知道，如果有了现代材料和技术，他会设计出怎样的作品？

路易威登基金会 (参考资料: 6.2.6至6.2.8)

建筑师Frank Gehry为路易威登基金会设计的宏伟建筑，它是巴黎的一处博物馆，引人注目的是12个玻璃船帆，下面支撑的是纠缠在一起的钢制立柱、梁、拉杆等。该建筑物的节点、嵌入物、窗子的竖框和横楣以及排水沟檐槽共用去约1500吨双相不锈钢。



路易威登基金会，作者: Frank Gehry，地址: 巴黎。
供图: Daniel Rodet。

6.3 桥梁 (参考资料: 6.3.1至6.3.14)

世界上有数百万座桥梁, 仅美国就有60万座。还有更多桥梁在建设中。桥梁为不同地区和国家之间提供了沟通纽带。但是, 随着时间的推移, 桥梁的维护和/或替代成本却变得十分高昂。

生命周期成本核算不断表明, 如果能够尽量降低桥梁生命周期内的维护成本, 并且让桥梁的使用寿命超过一个世纪, 这将带来诸多益处。双相不锈钢不仅具有高强度, 还具有满足一切气候和气象条件的耐腐蚀能力, 因此双相不锈钢是一种极具吸引力的解决方案, 能够在无限时间里保持建筑结构的稳定性。相对于廉价的短期解决方案, 如果仅在关键位置使用双相不锈钢, 那么双相不锈钢带来的额外成本还不到10%。

下面几个案例说明了双相不锈钢在公路、人行道、铁路、铁路/公路/自行车混合道路上的使用情况。案例中提及的道路分别位于炎热和寒冷气候、内陆和沿海地区。

这些应用所使用的产品形式各异, 包括钢管、拉杆、钢筋、钢板、紧固件等, 为建筑设计师和土木工程师展现了双相不锈钢的广泛使用可能。

6.3.1 公路桥和铁路桥

香港昂船洲大桥 (参考资料: 6.3.6至6.3.8)。

这座交通繁忙的标志性大桥位于城市区域, 其设计可以抵御热带气象条件、城市污染、海上雾气、大风、台风、船舶撞击产生的意外载荷以及地震载荷。当年(2009年), 它是首座跨度域过1千米的钢索斜拉桥, 预期使用寿命120年。桥塔的上半部分、钢索斜拉式锚地以及桥塔的地基和下半部分, 都使用双相不锈钢板 UNS S32205 (EN 1.4462) 作为混凝土的外壳。



香港昂船洲大桥。
供图: 奥托昆普钢铁公司



加拿大蒙特利尔市尚普兰大桥。
供图: 加拿大基建公司

1.4362) 钢筋。

港珠澳大桥 (参考资料: 6.3.11至6.3.12)。

港珠澳大桥全长50千米, 共连接三座钢索斜拉桥、一座6.7米海底隧道以及三座人工岛礁。大桥建设历时9年, 估计建设成本200亿美元, 使用寿命100年,



港珠澳大桥

尚普兰大桥, 蒙特利尔 (参考资料: 6.3.9至6.3.10)。

新桥(2019年)是为代替腐蚀严重的旧桥而建, 新桥将抵御零下25°C至零上30°C的严酷冻融周期。新桥长3.4千米, 横跨圣劳伦斯河与海上航路, 每年通行车辆超过500万辆。优雅的桥身设计包含了多项创新成果, 例如, 桥梁施工大量采用预制构件, 桥身通行能力着眼于未来需求, 设有一条通勤铁路线、一条4车道高速公路, 另外还有自行车道和观景台。桥梁结构的关键位置使用了超过1.5万吨双相不锈钢S32304 (EN

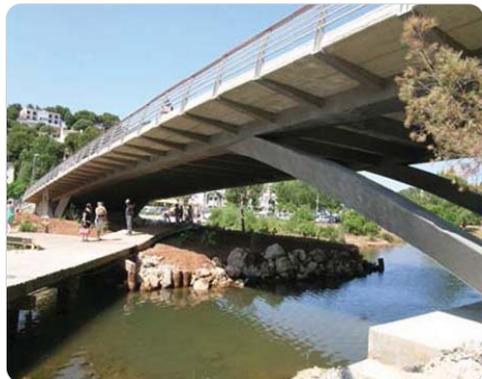
于2018年完工。大桥关键位置使用超过1万吨双相不锈钢。



得克萨斯州沃斯堡大桥

得克萨斯州沃斯堡大桥（参考资料：6.3.13）

这是世界上首座采用预浇构件建造的拱桥，共使用预浇构件12个。该桥于2013年完工。其创新特征是连接大桥上部和下部的承重斜吊杆。这些斜吊杆不仅提供了结构稳定性，还带来一定的结构性能。它们由双相不锈钢S32205 (EN 1.4462) 制成。整体设计具有非常高的结构效率，造型非常优美，还确保了长期耐用性。



梅诺卡岛卡拉—伽尔达纳大桥
供图：Pedelta

梅诺卡岛卡拉—伽尔达纳大桥（参考资料：6.3.14）。

这个案例是使用不锈钢大桥替代碳钢混凝土大桥。之所以选择双相不锈钢S32205 (EN 1.4462)，而没有选择碳钢，是因为双相不锈钢具有更高的机械性能和耐腐蚀能力。双相不锈钢的规定最低屈服强度是460兆帕，实测屈服强度是535兆帕，而碳钢的规定最低屈服强度仅有355兆帕。不锈钢结构使用8个分段现场装配，整体施工时间从2004年10月至2005年6

月。

在印度，未来将要建在腐蚀环境下（例如，沿海地区等）的铁路桥梁，可能需要依靠双相不锈钢（参考资料：6.3.15）

6.3.2 人行天桥

新加坡双螺旋桥（参考资料：6.3.16）

这座桥的桥身采用独特的双螺旋结构，桥长280米，桥上是人行步道，制造材料是双相不锈钢S32205 (EN 1.4462) 制成的钢管和钢板。之所以选择这个等级的双相不锈钢，是因为它在热带海洋气候环境下所具有的高强度和高耐腐蚀能力。该桥的生命周期成本将会低于碳钢桥。当夜晚降临，在光洁的不锈钢表面的映衬下，桥上的白色灯光尤显美丽。



新加坡双螺旋桥
供图：Christopher Fredrick Jones



巴斯科尔人行天桥
供图：法国钢铁工业公司

法国里昂巴斯科尔人行桥（参考资料：6.3.17）

这是一座由双相不锈钢建造的大桥，它所在的地区正在实施一处重点升级改造项目，它所在的位置还靠近新建的汇流博物馆，它的开启让船只可以穿行并进入码头。它是如此雅致、美观，而且无需任何维护。

德国迪琴根市通快人行天桥（参考资料：6.3.18）

这座人行天桥横跨交通繁忙的格林格大街，将德国迪琴根市通快集团总部的两处工作地点连接起来。这座桥使用轻薄、高强度、耐腐蚀的双相不锈钢S32205（EN 1.4462）建造，使用通快集团的激光切割技术进行切割。

这座桥的外形非常具有原创性，每个人都对它过目不忘，这也证明双相不锈钢的应用不仅限于非常大型的构造物。



德国迪琴根市通快人行天桥
供图：施莱希-伯格曼伙伴公司



圣地亚哥海港大桥
供图：Sherry V. Smith

圣地亚哥海港大桥（参考资料：6.3.19）

这是一座自锚式悬索桥，长168米，异常地美丽。曲线桥面由拉索支撑，拉索绑定到一根斜塔上，形成一种非常简洁但又引人注目的设计。这座桥的结构件、护栏、钢索以及连接件选用的是双相不锈钢S31803和奥氏体不锈钢317L。在海洋气候环境下，这座桥的预计寿命将在100年以上。

6.4 海岸工程

英国克罗默镇海堤

(参考资料: 6.4.1)

克罗默是位于北诺福克郡的一处海岸度假小镇，自维多利亚时代开始就已经存在。为防止海浪侵袭，该镇使用了混凝土海堤和原木防波堤。继2013年的一场大风暴之后，小镇必须开展大规模、高成本的维修工作，一方面要保持现实的防御水平，另一方面还要预见到100年内可能发生的海平面上升情况。该项目使用了超过300公吨双相不锈钢S32304 (EN 1.4362) 钢筋。



英国克罗默镇海堤
供图: Archant/Anthony Kelly

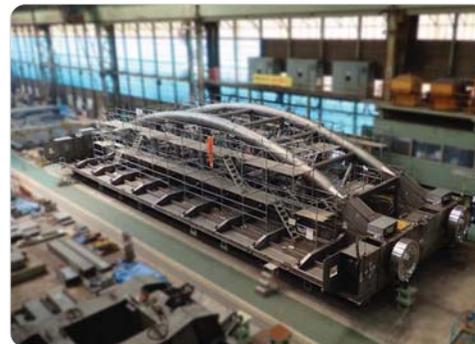


法国巴约讷市防波堤
供图: 尤基泰克公司

法国巴约讷市防波堤

(参考资料: 6.4.2)

此处防波堤建于20世纪60年代，保护巴约讷海港入口，防止风暴入侵。防波堤设有海堤和平台，其强度足以承受一台重型起重机。重型起重机代替了40吨重的混凝土块；混凝土块的作用是分散海浪涌入产生的能量，但已年久失修。最后，平台开始出现裂缝，于是人们使用高强度双相不锈钢S32205 (EN 1.4462) 钢筋（最小屈服强度750兆帕）进行修复，这显著降低了平台重量。最终只使用了130吨钢筋。



日本上平井泄洪闸
供图: 新日铁不锈钢株式会社

日本的防海啸泄洪闸

(参考资料: 6.4.3)

面对海啸造成的灾难，日本已经付出了沉重代价。福岛核电站事故是海啸造成的最近一次大型灾难。按照全国地震重建计划，以提高安全性和恢复力为目标，日本已经建成50多座水坝和泄洪闸。

新建的泄洪闸是巨型构造物。例如，新建的上平井泄洪闸高11米，比旧闸高出2米。由于使用了双相不锈钢SUS323L (S32304 / EN 1.4362) 和SUS821L1 (21%铬、2%镍、3%锰、1%铜、0.17%氮)，因此虽然高

度有所增加，但重量保持不变。

法国圣米歇尔山泄水闸 (参考资料: 6.4.4)



法国圣米歇尔山泄水闸。

圣米歇尔山是法国最著名的旅游胜地之一。这是一处位于海湾内的小岛，岛上有一座修道院，山顶有一个天使像。随着时间的推移，湾底开始逐渐堆积

淤泥，从而改变了地面景观。人们修建了水闸，涨潮时，将涌入的海水蓄积起来；退潮时，再将蓄水放出，这样，每天可以两次将淤泥冲入海中。共修建八处泄水闸，每个水闸使用24吨碳钢和6吨双相不锈钢S32205（EN 1.4462），之所以选择双相不锈钢，是因为它具有良好的耐腐蚀和耐磨损能力。

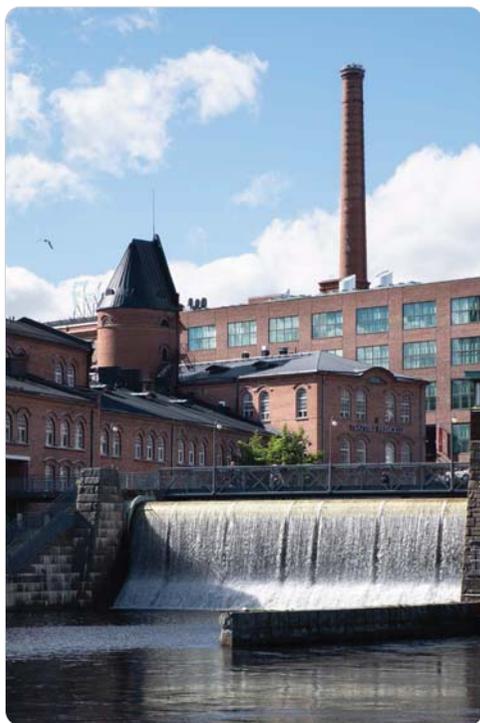
圣米歇尔山现已重返大海。

芬兰坦佩雷市河道泄水闸（参考资料：6.4.5）

湍急的坦默科斯基河从芬兰坦佩雷市中央穿行而过，运行着四座水电站。该市正在实施的一个修复项目，将把其中两条河道建成最高标准的河道，成为具有文化和历史价值的旅游胜地。过去100年来，一直管控这两条河道的建筑

物和设备已经到达使用寿命的终点。旧有的泄洪闸主要使用木材建造，仅开启闸门就要用去数个小时。

重建河道的设计寿命为200年。泄洪闸的所有主体构造部分都选用了双相不锈钢S32101（EN 1.4162），而没有使用碳钢。



芬兰坦默科斯基河的泄洪闸

摩纳哥海上扩建项目

（参考资料：6.4.6）

位于地中海沿岸的摩纳哥公国，正在向海上扩建自己微小的国土（仅有2平方千米），该国将在海上新建一处60万平方米的住宅和商业用城市，估计造价高达20亿欧元。该项目面临巨大的技术挑战：为建筑围墙，需要修建一条临时水坝；建设能够延续至少100年的混凝土墙；填补拦海造地形成的新空间，并且为新建多层住宅楼做好准备；尽量减少对海洋生命的影响等。为加固混凝土墙以及防止海水腐蚀，将要使用超过4000公吨双相不锈钢S32304（EN 1.4362）钢筋。



摩纳哥海上扩建项目
供图：布伊吉斯土木工程公司



摩纳哥海上扩建项目
供图：塞迪诺公司

6.5 复原项目

现在，对于需要高强度和高耐腐蚀能力的复原解决方案，双相不锈钢已是不可或缺的一环。以下是部分示例：

标志性的自由女神像（参考资料：6.5.1）于1886年在纽约安装，1981年进行了维修，维修时使用奥氏体不锈钢316L代替原先使用的铁制副框架。新的副框架使用高强度、高耐腐蚀性的双相不锈钢（UNS S32550）支承。奥氏体不锈钢和双相不锈钢相互补充，面对涉及氯化物、部分污染以及电耦合的腐蚀性条件，二者共同提供了解决方案。

雄伟的瓦萨战舰（参考资料：6.5.2）

于1628年8月10日下水，但在首航途中即告沉没。在海底沉睡了大约300年后，1950年代，这艘战舰再次被浮出水面，现在陈列于斯德哥尔摩的瓦萨博物馆。在必要维护工程中，其中一项是更换固定横梁使用的铁制螺栓。鉴于环氧树脂涂层的镀锌螺栓也被腐蚀，不得不使用超级和特超级弹簧载荷式空心螺栓代替。后者使得船身重量从16吨减至5吨。

教堂

还有一些遗产建筑修复项目，虽不引人注目但却意义重大，例如，

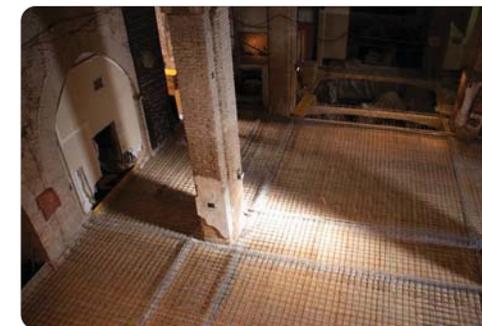


纽约自由女神像
供图：Pixabay素材网站上的Maurice LE BAIL



瓦萨战舰局部图
供图：瑞典国家海事博物馆Anneli Karlsson

西班牙圣卡塔利娜教堂（参考资料：6.5.3）和圣安东尼奥教堂（参考资料：6.5.4）的修复项目。这两个项



西班牙圣卡塔利娜教堂地面使用的
不锈钢钢筋
供图：塞迪诺公司

目都使用双相不锈钢钢筋加固建筑。

6.6 隧道

公路隧道面临非常严峻的侵蚀性环境，造成这种环境的因素有热量、湿度、排气污染物，当隧道靠近海洋或者通向隧道的公路是除冰公路时，进入隧道的车流还会带来氯化物。

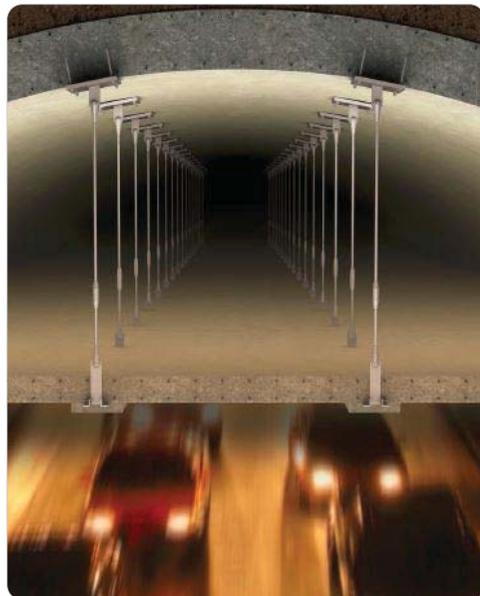
隧道必须防火，必须全时开放，另外还不能设置使用年限。因此，隧道需要的是耐久、免维护、防火的解决方案。（参考资料：6.6.1）

女王路隧道位于默西河下，连接利物浦与伯肯黑德。在女王路隧道改造项目中，隧道两侧新建的外挂板采用不锈钢框架支承，其中使用了奥氏体不锈钢EN 1.4301带钢和双相不锈钢EN 1.4462钢钩。双相不锈钢补充了奥氏体不锈钢，之所以选择双相不锈钢，是因为它具有较高的屈服强度（参考资料：6.6.2）。

在澳大利亚布里斯班市的南北旁通隧道，通风系统使用的是双相不锈钢悬挂拉杆支承。凭借多达100台喷气鼓风机，一旦发生火灾，烟气能够被迅速排出。（参考资料：6.6.3）



利物浦女王路隧道的衬层
供图：安肯公司



公路隧道天花板上的吊架
供图：安肯公司



霍尔默斯特兰地铁隧道的动态吊架
供图：桑德维克材料技术公司

铁路隧道

动态吊架

在挪威，霍尔默斯特兰地下火车站是该国正在兴建的高铁系统的一个组成部分。即使是露天车站，高速列车也会产生强大的压力、振动、噪音以及风力等问题，因此这个地下车站面临的新问题必须得到解决。

车站天花板由动态吊架提供支承，这些吊架由双相不锈钢空心钢筋制成。这些动态吊架能够在设计载荷之外，根据压力波和振动进行调整，提供阻尼效应。这些吊架的设计寿命是100年（参考资料：6.6.4至6.6.5）。

6.7 运输业（参考资料：6.7.1至6.7.7）

海运化工油轮（参考资料：6.7.1至6.7.4）

高强度双相不锈钢的使用，让槽罐重量减少了10%，降低了槽罐的初始成本，增加了可用有效负载。不仅如此，双相不锈钢的膨胀系数接近碳钢，有利于与周边钢制构造物的焊接。

化工油轮配备的是大型耐腐蚀槽罐或双层船体。在波涛汹涌的大海上运输大量腐蚀性化工产品，既要防止化工产品溢出，又要保护船员，这给槽罐的设计和选材带来了更多限制条件。尽管双相不锈钢不可能适合所有化工产品（参见耐腐蚀性一节），但使用双相不锈钢的情况已经越来越多。



Bow Sagami化学品运输船
供图：Manuel Hernandez Lafuente

烟道排气脱硫设备 (参考资料: 6.7.5)

原油燃烧会释放出有害的二氧化硫，大部分国家多年前就已经极大减少了这种污染物的排放。因此，多年前，烟道排气脱硫设备就已有安装，并且主要安装在发电厂。但是，相关规范却并不适用于船舶。国际海事组织已经加紧追赶，类似的法规将从2020年起适用于船舶。

船东必须遵守相关法规，在船上安装烟道排气脱硫系统，但船上空间有限，船只稳定性必须考虑在内。目前，替代方案是使用液化天然气，不过很快，液化天然气还可能被（绿色）氢气取代。

建设烟气排气脱硫系统的材料必须能够耐受燃烧热气形成的强侵蚀性环境，其中含有灰分、二氧化碳、二氧化硫，另外，往往还有高温海水。这里需要使用超级双相不锈钢和镍基合金。

油罐车

油罐车使用双相不锈钢的理由与化工产品运输船相同。相对于化工产品运输船，油罐车有效负载的增加能够降低更多的运输成本。



卡车上的双相不锈钢槽罐
供图: 技术冠军公司

铁路货车 (参考资料: 6.7.6)

现在，瑞典基律纳运输铁矿石的铁路货车使用双相不锈钢 (S32101 - EN 1.4162) 建造。增加的成本通过以下优势得到抵消:

- 长期来看，双相不锈钢的光洁表面能够让货车更好地卸货——即使是卸货难度较大的物资。
- 相对于碳钢，双相不锈钢更薄更轻，对于矿业运输而言，是符合成本效益的选择方案。
- 双相不锈钢具有良好的焊接性和成型性，是理想的建造材料。
- 对于所有外部加固件、钢筋以及货车底部或边缘位置使用的碳钢，双相不锈钢能够很好地兼容碳钢焊缝。



运输铁矿石的铁路货车车厢
供图: 克鲁纳铁路货车公司

公共交通 (参考资料: 6.7.7)

斯泰德勒公司是一家瑞典公司，该公司选用高强度双相不锈钢，建造轻型、耐腐蚀的有轨电车车厢（例如，照片中所示的巴西圣保罗市城市交通系统）。这种车厢使用寿命长，并且只需要极少维护。



使用双相不锈钢框架的有轨电车站厢
供图: 斯泰德勒公司

6.8 化工行业（参考资料：6.8.1至6.8.3）

双相不锈钢与其他不锈钢一起，被用于加工/生产各种化工产品：化肥、聚合物、药品等。

由于双相不锈钢的高耐腐蚀性和高强度，它们尤其适合重点工艺设备，例如：

- 压力容器；
- 热交换器；
- 冷凝器；
- 储罐；
- 蒸馏塔；
- 以及所有附属设备：软管、泵、阀门、管件、过滤器、紧固件、搅拌器等

参考资料3.3提供了化工产品及其所需耐腐蚀能力列表。

氯化物或氟化物、研磨性固体物质等杂质的存在，当然还有高温，都会增加介质的侵蚀性。



热交换器
供图：泰坦金属装配公司



压力容器

6.9 纸浆和纸张行业（参考资料：6.9.1至6.9.4）

纸浆和纸张行业竞争激烈，降低成本是重中之重。正因如此，该行业是最早认识到双相不锈钢价值的行业之一。

例如，双相不锈钢S32205（EN 1.4462）、S32304（EN 1.4362）以及S32101（EN 1.4162）可用于蒸煮器、压力容器以及母液槽罐，还可用于造纸机。对于漂白等侵蚀性更强的工艺环境，则需要使用超级双相不锈钢S32750（EN 1.4410）。

上述应用的开发都源于双相不锈钢的以下属性：低生命周期成本、高强度（因此带来重量减少）、高耐腐蚀性（尤其是抗应力腐蚀致裂能力）以及高表面硬度。高表面硬度对于抵抗木屑和纸浆的磨蚀（尤其是在蒸煮器内的磨蚀）具有重要作用。

今天，最合适的选材组合是奥氏体不锈钢、双相不锈钢以及超级奥氏体不锈钢组合，这几种不锈钢可以相互取长补短。



间歇蒸煮器
供图：美卓纸业有限公司

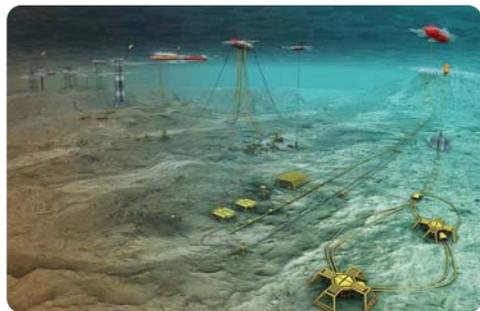
6.10 石油天然气行业（参考资料：6.10.1至6.10.9）

迄今为止，石油天然气行业是双相不锈钢的最大用户。

Norsok和NACE等标准（附录1）详细地规定了选材说明。根据压力、温度、氯化物浓度以及硫化氢含量，选材范围从碳钢、不锈钢（马氏体、奥氏体、双相、超级奥氏体），到镍基合金（图3.12）。

一般情况下，双相不锈钢被用于马氏体与超级奥氏体/镍基合金的中间应用。当面临巨大的压力和深度时，双相不锈钢的高强度具有重要作用。

随着海上石油勘探向着更深的海底前进，所涉及的压力也越来越高，环境也越来越苛刻，因此需要更高的耐腐蚀性（尤其是耐氯化物应力腐蚀致裂能力）和更强的机械性能。因此，人们开发了能够带来最低生命周期成本（包括组件失效风险成本）的超级和特超级双相不锈钢。特超级双相不锈钢在海底钻



油气田布局图
供中间：德西尼布图片库——保留一切权利

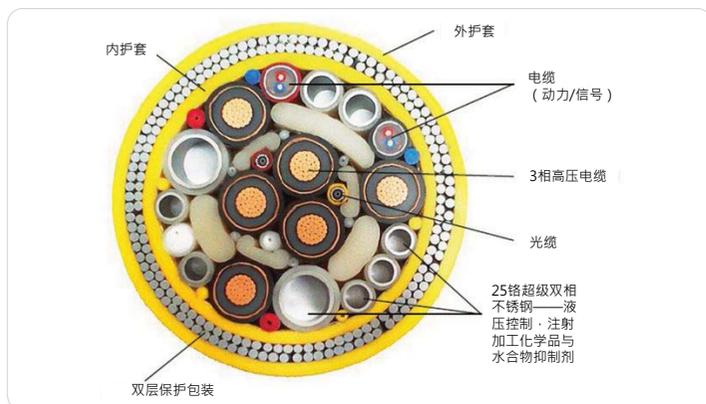


防爆墙
供图：机械工具工程公司

探中起到极为重要的作用。

如图6.10.1和6.10.2所示，双相不锈钢是石油天然气行业大量组件的指定材料。

除了表中未列出的附属设备（泵、阀门、管件、过滤器），还有脐带缆的保护层（用于磨损保护）和设计用于抑制石油天然气平台火灾和爆炸的防爆墙（如图所示）等应用。



脐带缆横截面（参考资料：6.10.9）

位置	应用	合金
上层	工艺管道 工艺泵 喷油泵 工艺阀门 分离器容器 歧管	2205 / 超级双相
	海水/废水管道 海水泵 海水阀门 海水过滤容器	超级双相
海底	柔性管	2003 / 2205
	出油管 收集管 歧管 阀门 集线器接头	2205 / 超级双相
	立管	超级双相
井下	油井管 钢丝绳 阀门	2205 / 超级双相

图6.10.1 双相不锈钢在石油天然气开采行业的应用案例（参考资料：6.10.8）

石油天然气行业的使用状况将材料的耐腐蚀性、作业温度（高温和低温）以及机械性能都推向极限。双相不锈钢的广泛使用表明这种材料具有非同一般的能力。

位置	应用	合金
精炼厂	原油脱盐装置	2205 & 超级双相
	脱氨塔, 稀薄/浓氢交换	2205
	氨回收单元, 有苛性碱	2205
	滤鼓 (存在应力腐蚀致裂风险)	2205
	淡水和盐水冷却器	2205
蒸气裂化厂	淡水冷却塔/冷却器	2101/2102/2205
	稀释蒸汽发生器	2205
	乏苛性碱氧化容器/管道	2205 & 超级双相
	酸性工艺浓缩物冷却器	2205 & 超级双相
芳香烃	精馏塔空气散热叶片/管道/容器	2205
	芳香烃/碳氢化合物分离单元, 再沸器、氢交换软管	2205
聚合物	聚丙烯管道、滤鼓、集尘器、干燥器以及旋转设备	2205
	弹性体料浆罐、容器、管道以及旋转设施	2205
	LLPDE挤压机进给轴	2205
	LDPE共聚物管道	2205
	弹性体挤压机滚筒和螺丝	2205
中间产物及其他流体	有机酸、硫酸、硝酸、磷酸、苛性碱、羰基化合物等, 在高温高压下产生的腐蚀作用	2205
	中间物储罐	2101/2102

图6.10.2 双相不锈钢在精炼厂和化工厂的典型用例 (参考资料: 6.10.8)

6.11 核能行业 (参考资料: 6.11.1至6.11.6)

核能行业有非常高的安全标准, 任何材料规格的变化都要经历很长一段时间。尽管如此, 双相不锈钢正在成为部分新建项目和退役项目的指定材料。

双相不锈钢具有的高耐应力腐蚀致裂能力, 确保了长期安全性 (长达150年), 而其高强度又可带来设计简化。不仅如此, 相对于奥氏体不锈钢, 双相不锈钢具有较低的热膨胀率和较高的热导率, 因此使用双相不锈钢, 还可获得

更好的热性能。在新建工厂, 双相不锈钢被用在核电站二级水冷回路的管道。

在退役项目中, 现在双相不锈钢是制作核废料存储盒的优选材料, 慢衰减放射性材料装入存储盒后, 可进行地质封存。一个例子是塞拉菲尔德堆燃料包筒仓 (Pile Fuel Cladding Silo), 它是世界上历史最悠久的核废料封存点, 共需要2200个双相不锈钢容器, 每个容器重1.3吨, 封存核废料至少500年。其他应用还有运输和存放核燃料的装运箱。

核废料容器
供图: 塞拉菲尔德公司

6.12 可再生能源行业 (参考资料: 6.12.1至6.12.10)

现在, 如何减缓气候变化是当今世界必须面对的最紧迫问题之一, 因此可再生能源产量将急剧增长。在需要高强度和高耐腐蚀性的地方, 双相不锈钢越来越受到青睐。

双相不锈钢生物气体储罐
供图: 伯格公司

生物质气体

生物质气体是细菌对生物质进行厌氧消化时产生的气体, 这种气体从有机废物中产生能量, 是一种非常有吸引力的工艺气体。农场、餐馆、废水处理厂以及其他产生合适有机废物的行业都能生产生物质气体, 这些生物质气体可以转化成为电能, 既可供本地使用, 也可出售给能源公用事业组织。还可转化成为热量, 用于现场

的干燥或供暖。（参考资料：6.12.2）

虽然奥氏体不锈钢通常是大部分设备的指定材料，但对于那些不仅需要高耐腐蚀性，还需要高强度的大型蒸煮器，双相不锈钢能够提供最佳解决方案。不仅如此，使用较轻的预装型材进行现场施工，还可降低成本。

生物质燃料（参考资料：6.12.3）

为减少对化石燃料的依赖，人们开始利用能量作物开发生物质乙醇和生物质柴油，这些开发工作在巴西和美国尤其显著。

虽然奥氏体不锈钢等级304L/304以及316L/316能够抵抗生物质燃料生产过程中带来的腐蚀性条件，但部分纤维质乙醇工艺（例如，生物乙醇工厂的预处理阶段）需要更高的耐腐蚀能力。因此，需要使用双相不锈钢S32205和超级双相不锈钢S32750，同时搭配超级奥氏体904L、含有6%钼的超级奥氏体不锈钢和镍合金C-276。不仅如此，当需要更高的抗侵蚀腐蚀能力时（例如，泵），也需要使用双相不锈钢和超级双相不锈钢。

相似情况也发生在生物质柴油工厂，生物质柴油工厂的预处理系统以及清洗和甘油去除工艺存在弱盐酸或弱硫酸，这里要使用双相不锈钢UNS S32205（EN 1.4462）和S32750。离心机可以使用317L/317和S32205制造。在生物质乙醇工厂和生物质柴油工厂，可以使用精益双相不锈钢S32101（EN 1.4162）制造大型槽罐（参考资料：6.12.4）。

太阳能电池板支架（参考资料：6.12.5）

在严苛环境下，双相不锈钢提供的性能要优于预涂层碳钢，更适合制作太阳能电池板支架。双相不锈钢提供了必要耐腐蚀能力并且无需任何维护，不仅如此，它还能提供更高的强度，从而可以减轻构造物的重量，降低成本和提高安装便利性。



双相不锈钢SUS821L1制作的太阳能电池板支架

供图：日本制铁不锈钢株式会社

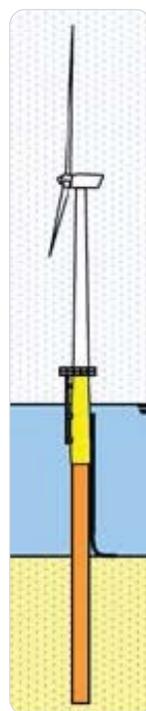
地热行业（参考资料：6.12.6至6.12.7）

输送热卤水的地热井口装置，可以使用双相不锈钢或超级双相不锈钢代替镍合金625。

海上/陆上风力涡轮机（参考资料：6.12.8至6.12.10）

之所以使用螺栓来坚固涡轮机组件，不仅是因为在海洋环境下，螺栓具有优秀的耐腐蚀能力，还因为螺栓具有优秀的机械性能，能够减轻重量、提高效率以及防止过早失效。

双相不锈钢UNS S32205（EN 1.4462）被用于制造托架，将单桩基础与过渡连接件连接在一起。之所以选择双相不锈钢，是因为在极寒、大浪、强风以及海洋环境等苛刻使用条件下，双相不锈钢表现出高机械性能（屈服强度 $> 355\text{MPa}$ ）和优秀的耐腐蚀能力。双相不锈钢的这些性能可在设计管状风电塔时考虑，使用双相不锈钢可以建造高达160米的风电塔。



使用单桩基础（橙）与过渡连接件（黄）的风力磨坊

6.13 水源

对于任何与水接触的材料，耐腐蚀性都是一个要件，无论是饮用水、废水，还是海水。由于双相不锈钢具有的高强度和高耐腐蚀性，它的应用越来越多：

小游艇（参考资料：6.13.1至6.13.4）

- 高质量游艇的船体使用寿命长，而且不需要任何维护。
- 吊艇柱（船上起重机）：吊艇柱通常使用钢板制成，然后再进行激光焊接。弯折过程中产生加工硬化，在没有新增成本的情况下，提高了材料强度。像其他不锈钢一样，双相不锈钢也可根据需求，提供不同的表面光洁度。
- 螺旋桨和船轴：现在，双相不锈钢是可供使用的部分材料。制造商看重双相不锈钢在高流量条件下具有的高耐疲劳腐蚀能力和良好的耐磨损和侵蚀能力。



吊艇柱（船上起重机）
供图：不锈钢结构公司

大型储罐（参考资料：6.13.5至13.6.9）。

除了水之外，大型储罐还可存储各种液体和腐蚀性化学品，既可能处于各种加工阶段的产品，也可能是等待运输的最终产品等。

图6.1至6.2所示为一个典型的20米直径、20米高储罐在30年间，不同建造方案的生命周期成本比较图。双相不锈钢S32304（EN 1.4362）的生命周期成本最低，原因如下：

- 碳钢需要昂贵的涂层，并且每隔几年，还要再次喷涂昂贵的涂层
- 高强度双相不锈钢可以减少储罐壁厚，因此相对于奥氏体不锈钢，它的重量更轻。轻型部件需要材料较少，运输、装配及焊接更方便。

不同的储罐尺寸和双相不锈钢等级，得出的结果相似（参考资料：6.13.8）

对于中小尺寸储罐，由于壁厚降低程度有限，因此铁素体不锈钢和/或奥氏体不锈钢仍然是首选。

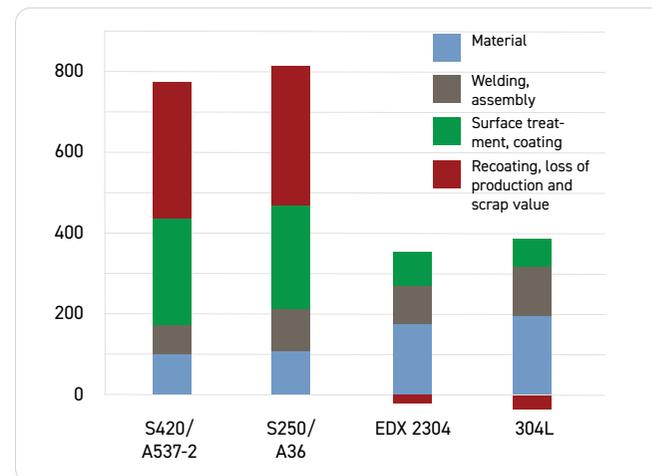


图6.1 双相不锈钢储罐的生命周期成本（参考资料：6.13.6）

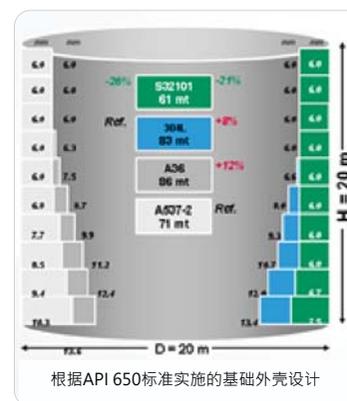


图6.2 双相不锈钢降低产品厚度（参考资料：6.13.7）

储罐使用的双相不锈钢带来以下结构效率：

- 不锈钢不需要任何腐蚀余度
- 在储罐底部，外壳的最低厚度对应不锈钢的设计强度
- 整体而言，双相不锈钢的使用显著降低了产品重量

废水储罐

(参考资料: 6.13.9至6.13.12)

当前正在进行的开发项目中, 使用双相不锈钢制作废水处理储罐获得大量关注, 一方面可以替代现有储罐(往往由碳钢加固混凝土制成), 一方面可以新建储罐。



废水处理厂
供图: 腐蚀研究所

饮用水储罐 (参考资料: 6.13.13)

这类储罐尺寸大很多, 主要由钢筋混凝土制成, 还带有涂层。随着时间推移, 材料发生变质, 于是需要昂贵的裂缝维修和防水处理, 但这些维修的持续效果并不长久。微生物的生成一直是个问题, 因此需要使用不会促进微生物生长并且对人类健康无害的材料。

在这些考量因素的引导下, 韩国使用双相不锈钢衬层改造了现有的水库, 该国使用的双相不锈钢等级是329LD (20Cr-2.5Ni-1.4Mo-N) 和329J3L (22Cr-5Ni-3Mo-0.15N)。双相不锈钢衬层在现场通过焊接进行(自动化)装配, 然后锚定到混凝土上。另外, 还使用了奥氏体不锈钢。未来, 双相不锈钢很可能成为优选材料。



左: 维修前的水库。右: 安装了双相不锈钢衬层的水库
供图: Moonchang

海水淡化厂 (参考资料: 6.13.14至6.13.17)

水源短缺是许多国家都存在的一个严重问题。海水淡化是减轻这一问题的有效解决方案。使用的工艺有两种:

- 多级闪蒸 (MMF) / 多效蒸馏工艺 (MED), 该工艺将水先蒸发后冷凝, 从而生成饮用水; 剩余的水是浓缩盐溶液, 即卤水。
- 反向渗透工艺 (RO) 和微咸水反渗透工艺 (BWRO), 该工艺在约60巴压力下, 让水通过渗透膜; 渗透膜可以截留盐离子。在该工艺中, 即使是无盐水也有一定的腐蚀性。

在这两项工艺中, 流入的海水必须过滤, 以清除固体物质; 生成的卤水必须安全地排入海水, 以免破坏生态系统。

所有工艺都需要使用高耐腐蚀性材料。超级奥氏体不锈钢 (例如904L和6%钼)、双相不锈钢S32205 (EN 1.4462)、超级双相不锈钢 (通常是UNS S32750 (EN 1.4410)) 以及钛在工厂各处都有使用。高强度和高抗疲劳腐蚀能力是额外的选材标准。

使用双相不锈钢的部分海水淡化场有: 利比亚的麦利塔海水淡化厂 (2004年)、阿尔及利亚的斯基克达海水淡化厂 (2005年) 以及新加坡的



以色列的反渗透淡化厂

星泉海水淡化厂 (2005年)。

热水器 (参考资料: 6.13.18)

家庭/机构用热水器和锅炉的热水罐越来越多地使用精益和标准双相不锈钢制成, 原因在于双相不锈钢不仅重量较轻, 而且还具有优秀的耐点蚀能力、耐裂隙腐蚀能力以及耐氯化物应力腐蚀致裂能力, 即使与涂层碳钢相比也不逊色。

6.14 多个市场 (参考资料: 6.14.1至6.14.3)

除了面向特定市场的应用之外,双相不锈钢还被用于虽不显眼但却具有核心意义的组件,这些组件在所有行业部门得到广泛使用:泵、阀门、拉杆、机械零件、配件、紧固件、锚定系统、过滤器、弹簧、结构型材等。

这些应用中使用的材料通常都含有双相不锈钢。当需要高强度和高耐腐蚀性,偶而还要增加耐侵蚀腐蚀性和耐疲劳腐蚀性时,双相不锈钢都是优选。

有些组件利用的是双相不锈钢冷加工带来的额外强度:紧固件(屈服应力等级接近1000兆帕)、通过钢板冷成型制成的结构型材、冷拉拔型材、冷拉拔棒材制成的部件、钢管等,在提高强度的同时,并没有降低耐腐蚀性,从而减轻了厚度、重量以及成本。

如果进一步提高性能组合的复杂程度,还可能带来最佳解决方案。由于双相不锈钢具有良好的导热属性,因此使用薄规冷加工钢板制成的超薄墙体,其导热率能够接近铁素体不锈钢。



阳台连接件
供图: Slabe



过滤用型材线材
供图: 尤基泰克公司



锚定系统:
供图: 哈芬集团



管件



阀门



潜水泵

7 制造

7.1 成型 (参考资料: 7.1.1至8)

冷成型

只要做好以下准备，双相不锈钢的冷成型并不困难：

- 强度较大，因此需要更加结实、更大功率的加工机器
- 回弹进程较大 (图7.1.1)
- 延展性低于奥氏体和铁素体不锈钢，在深拉成型作业时尤其明显。

今天，我们已经拥有冷成型能力更强的不锈钢等级。这种不锈钢大都依赖成分优化。

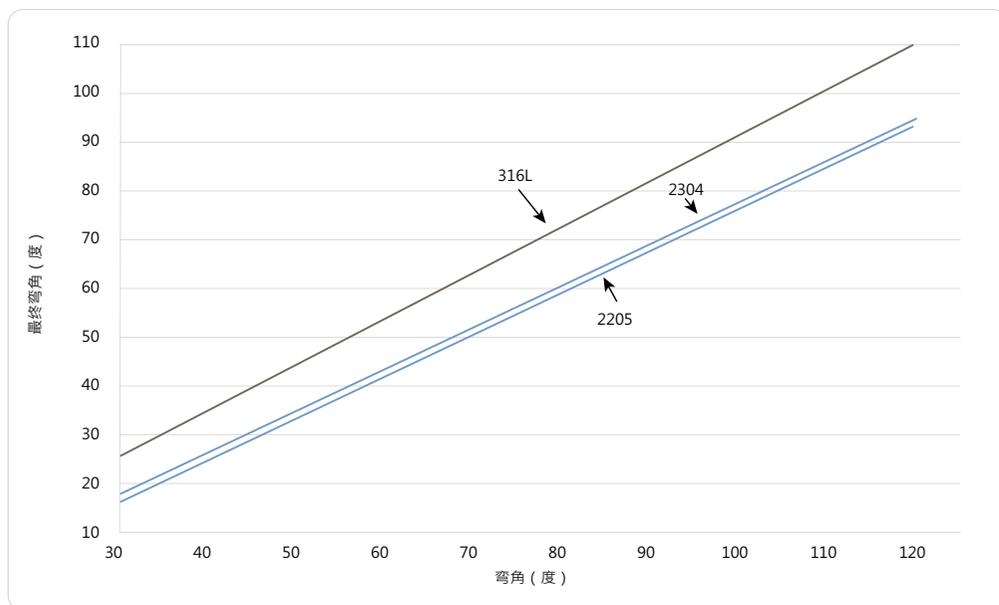


图7.1.1 双相不锈钢与316L不锈钢的回弹性能比较，钢板厚度2毫米 (0.08英寸)
(参考资料: 7.1.1)

热成型/锻造

为获得最佳的热工作业条件，需要很好地控制温度范围 (表7.1)，因为温度能够影响以下方面：

- 奥氏体/铁素体的相位平衡
- 氮化物的析出
- 当温度低于约1050° C时，金属间相会析出。

这些条件定义了一个操作窗口，如图7.1.2所示。合金元素，尤其是铬和钼，会借助低冷却率和低温，加速金属间相 (例如，西格玛相) 的析出；氮元素则会

UNS N°	EN N°	热成型温度范围, ° C	最低均热温度, ° C
S32101	1.4162	1100-900	950
S32304	1.4362	1150-950	980
S32205	1.4462	1230-950	1040
S32750	1.4410	1230-1025	1050
S32520	1.4507	1230-1000	1080
S32760	1.4501	1230-1000	1100
S30400	1.4301	1205-925	1040
S31600	1.4401	1205-925	1040

表决7.1 推荐的热成型温度范围
(参考资料: 7.1.2)

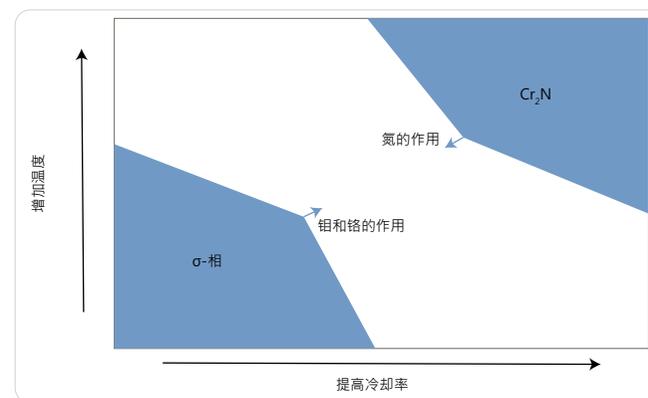


图7.1.2 双相不锈钢生产窗口示意图，利用温度和冷却率来定义 (参考资料: 7.1.6)

通过超高温度和快冷却率，诱发铁素体内部的氮化铬析出。因此，这个操作窗口对于精益双相不锈钢而言最宽，对于超级和特超级双相不锈钢而言最窄。

在实际操作中，必须注意首先确保热工作业 (轧制或锻造) 最后阶段的温度高于下限温度，随后进行快速冷却。

我们已知的一些特殊工艺：

相变诱发塑性 (TRIP效应)，在冷工作业期间，奥氏体相变成马氏体相。这会相应提高加工硬化率，预防早期断裂。为使相变诱发塑性效应发生，必须仔细平衡不锈钢的化学成分。在该材料中，相变诱发塑性效应会在一个广大的形变范围内提高应变硬化率，并且因此提高钢材的延展性。双相不锈钢出现相变诱发塑性效应的，会呈现出优秀的强度-延展性特征，最终抗拉强度超过1000兆帕，断裂伸长率超过60%。这种钢材可用于那些需要高成型性和高吸能性的应用 (图7.1.3)。能够从相变诱发塑性效应中获益的部分应用有：密集成型组件、汽车行业用组件、热交换器、泵组件、编带及弹簧等。

图7.1.4所示为产生相变诱发塑性效应的双相不锈钢与其他非不锈钢的性能比较图。

超塑性是许多材料 (例如，玻璃) 的熟知属性，超塑性在双相不锈钢中也有出现。超塑性的出现需要具有合适的温度条件和应变率条件。图7.1.5表明，经过冷加工的精益双相不锈钢，其伸长率可以超过1000%。

但是，由于超塑性的显现条件，尤其是低应变率的显现条件，目前这一成型工艺尚未得到开发。

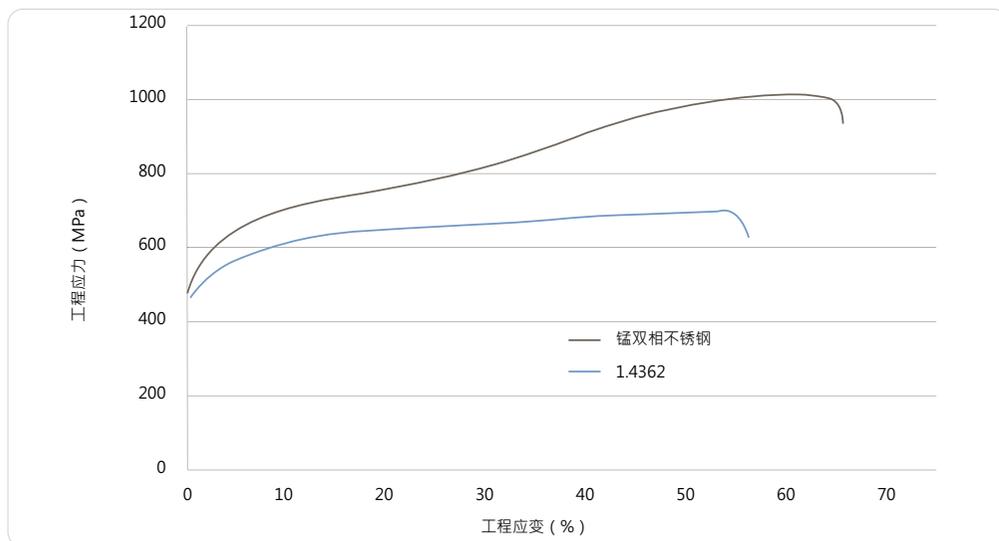


图7.1.3 标准双相不锈钢 (1.4362) 与TRIP改性不锈钢的应力应变曲线图 (参考资料: 7.1.7)

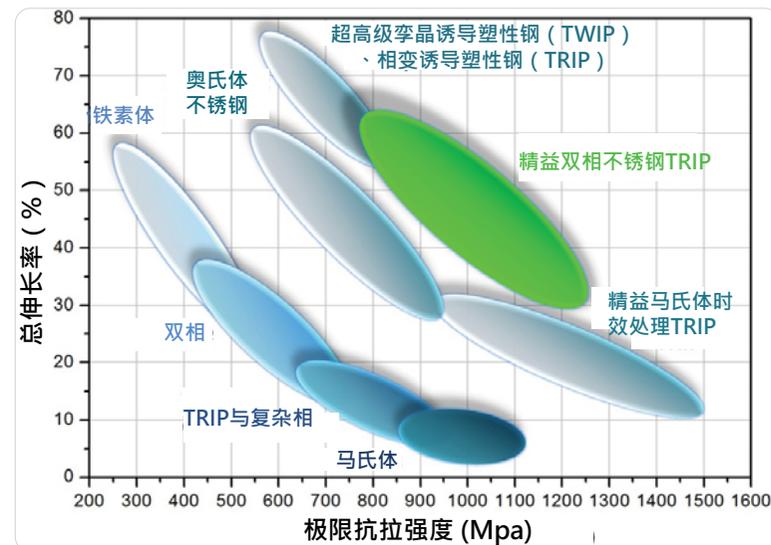


图7.1.4 不同等级钢材的总断裂伸长率与极限抗拉强度概要 (参考资料: 7.1.7)

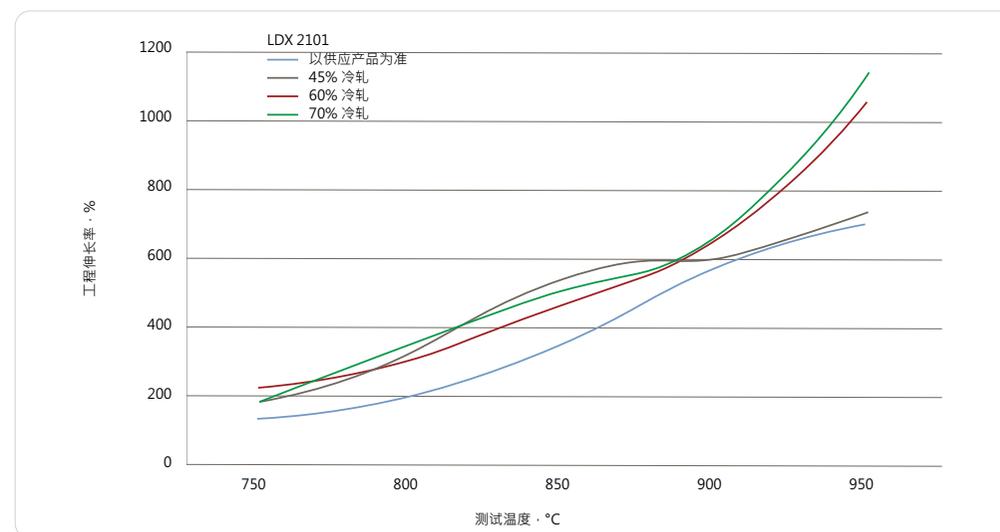


图7.1.5 精益双相不锈钢的超塑性伸长率 (参考资料: 7.1.8)

7.2 切削加工 (参考资料: 7.2.1至7.2.4)

所有棒材产品都要经过切削后,才能形成零部件。为获得所需形状,钢板往往都要经过钻孔和磨铣。切削加工能够显著升高成品零部件的成本,因此是一种重要的工艺特性。

在工程钢材、马氏体不锈钢以及奥氏体不锈钢中,具有改良切削加工性能的钢材已经被人熟知。但是,双相不锈钢的切削性能却直到最近才被人关注。

切削加工性能有两个重要参数:工具磨损性能和断屑性能。双相不锈钢的强度高,这导致其需要更高的切削力量,因此会加速工具磨损。

可以通过不同方式,提高切削加工性能

1. 通过调整钢材的化学成分,可降低钢材强度和加工硬度,同时又不会降低耐腐蚀能力。为此,可以增加镍和钼的含量,降低氮的含量,保持奥氏体/铁素体平衡不变,或者稍微提高铁的含量。
2. 优化硫含量。对于大部分不锈钢等级,EN 10088-1标准规定的最高硫含量

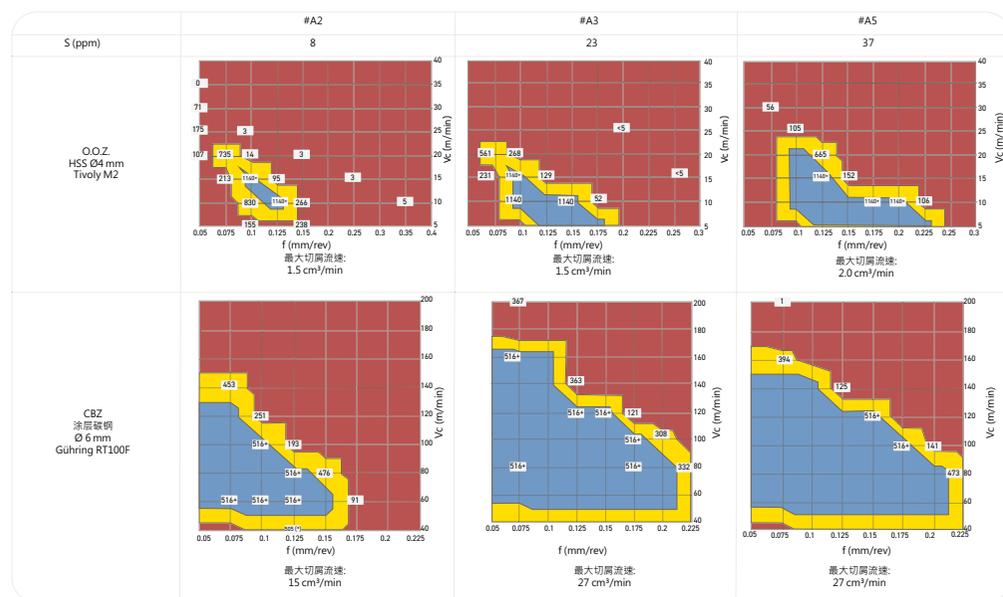


图7.2.1 高速钢与涂层碳钢切削工具的最佳断屑能力与硫含量之间的关系 (参考资料: 7.2.2)

为150 ppm。如图7.2.1 (参考资料: 7.2.2) 所示,不同良性断屑能力之间存在的大量差异(按照进料与通过深度图中的蓝色区域,对应的硫含量从7至37ppm)。相比之下,工具磨损率没有显著变化。即使硫含量远低于150ppm的限值,但是点蚀电位仍然出现显著下降(图7.2.2)。硫的含量越高,抗点蚀能力越低。不仅如此,硫含量的增加还会破坏抗冲击性能,尤其是在零下温度下的抗冲击性能(图7.2.3)。从这些结果可以看出,为确保良好的抗点蚀能力和良好的抗冲击性能,需要将硫含量控制在非常低的水平。因此,通过增加硫含量来改善切削加工性能的做法,并没有吸引力。

3. L低熔点的掺杂氧化物能够润滑硬质合金工具/钢材界面,这一点众所周知。虽然我们已开发出基于掺杂氧化物的、改良切削加工性能的工程钢、马氏体不锈钢和奥氏体不锈钢,但是同样的“配方”却不能照搬到双相不锈钢。尽管如此,我们已开发出拥有可控掺杂氧化物的双相不锈钢。如图7.2.4所示,在使用硬质合金工具进行的车削作业中,通过控制双相不锈钢S32304 (EN 1.4362) 的掺杂氧化物含量,它的切削加工性能得到显著提高。钻孔作业也提供了相似结

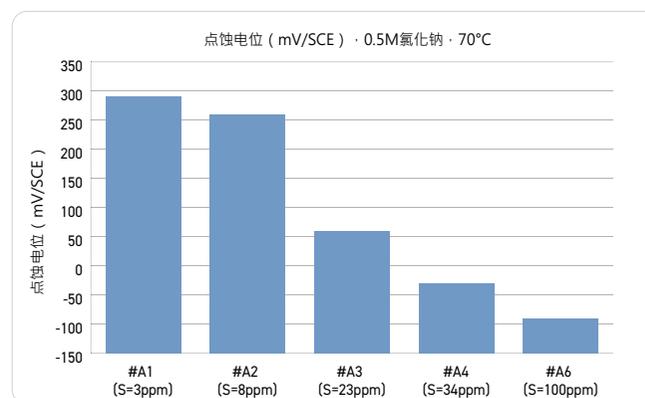


图7.2.2 抗点蚀能力与硫含量之间的关系

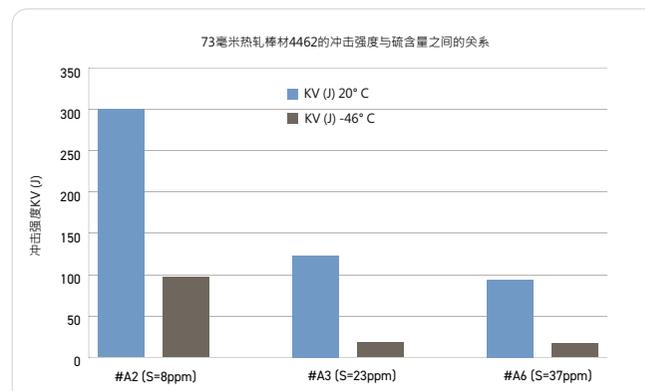


图7.2.3 冲击强度与硫含量之间的关系

果。不仅如此，断屑能力也有改善。公开数据表明，掺杂氧化物不会显著降低精益双相不锈钢的抗点蚀能力。目前来看，其主要不利点是在 0°C 以下，KV冲击值大幅降低。如果双相不锈钢利用氧化物来改善切削加工性能，这将限制其应用范围。

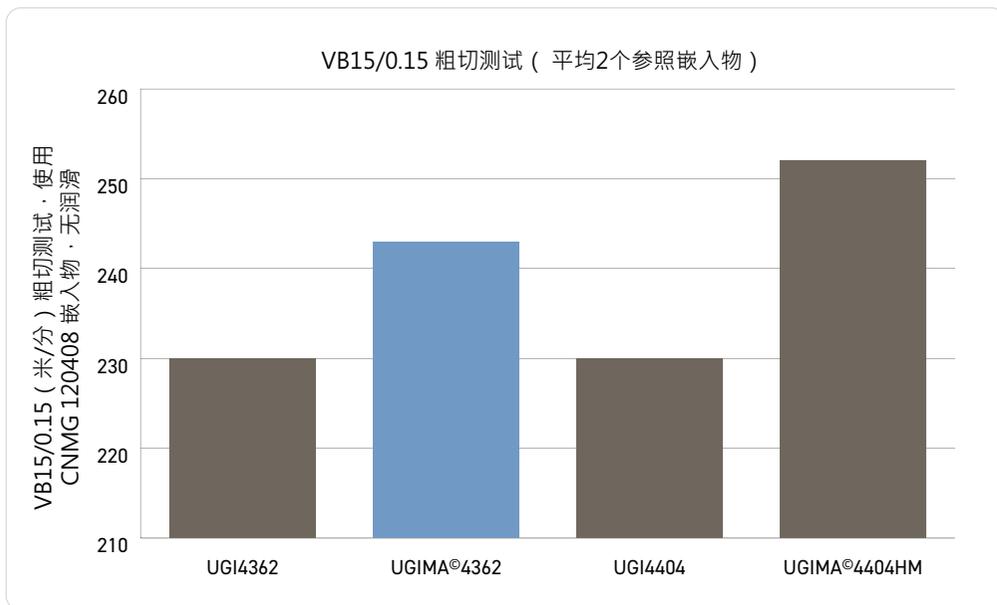


图7.2.4 通过控制掺杂氧化物，改善切削加工性能 (参考资料: 7.2.4)

7.3 焊接作业 (参考资料: 7.3.1至7.3.6)

双相不锈钢可以随时使用大部分焊接工艺进行焊接，最常用工艺是电弧焊。不同于奥氏体不锈钢，双相不锈钢对热裂不敏感，并且它的膨胀系数接近碳钢。

我们提供的焊接建议基于双相不锈钢的以下冶金学特征 (图7.3.1)：

- 双相不锈钢的固化全部发生在铁素体相。然后，随着温度下降，奥氏体形成。如果冷却率很高，则因此形成的铁素体相要多于相平衡状态下生成的铁素体相。另外，铁素体中氮的溶性会随着温度急剧下降，因此除非氮化物迁移到奥氏体，否则会导致铁素体相内氮化铬的不必要析出。通过选择适当的保护气体和焊料，可以提高铁素体向奥氏体的转化率。
- 约 1000°C 以下的冷却过程必须比较迅速，以避免金属间相、氮化物以及碳化物的析出，否则将会影响到不锈钢的抗冲击性能和耐腐蚀能力。低温亚稳分解十分缓慢，在焊接工艺中不予考虑。

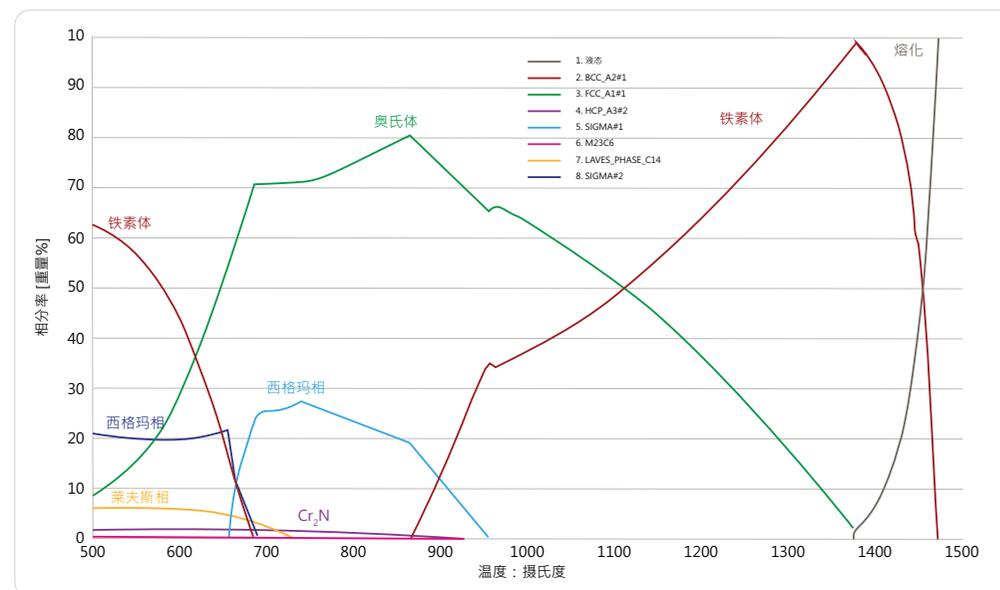


图7.3.1 22%铬双相不锈钢与温度之间的平衡相，使用Thermocalc计算 (版本: 2017a/TCFE 9)

因此，最佳焊接条件取决于待焊接钢板的厚度和化学成分。因此，必须使用以下规则设置焊接参数：

- 热量输入：要获得最佳数值，就需要在熔点以下缓慢冷却与（约）1000° C以下快速冷却之间达成妥协。
- 焊料的成分：焊料的镍含量通常高于基底金属，因此焊料会有助于奥氏体的形成。不过，焊料的氮含量却可能低于基底金属，这会降低抗氮化铬析出能力。
- 保护气体：保护气体可能含有部分氮，这有助于奥氏体形成。无论在任何情况下，都必须避免水汽和氢。
- 应当避免提前预热。必要时，应当将温度保持在约100° C。
- 对于精益和标准双相不锈钢，多层焊的最大层间温度通常是150° C；对于超级双相不锈钢，这个温度是100° C。
- 必须避免低温条件下（600-650° C）发生应力消除热处理。快速冷却过后，焊后热处理应当构成固溶退火。

应当避免使用无焊料的焊接工序，例如，点焊。

说明：对于相异金属的焊接（通常是奥氏体不锈钢或碳钢），按照常规操作。至于最合适的焊料，将取决于具体的合金组合。

焊接工艺	电极/焊料 AWS分类	直径 (英寸)	焊接位置	焊珠	推荐电流 (A)	电压 (V)	行程速度 (英寸/分)
SMAW	E-2209	3/32 & 1/8	3G-Up	根冠	50-60 80-95	20-24	4-6/7-9
GTAW	ER-2209	3/32	1G	根	100-120	16-18	5-8
GTAW & FCAW	ER-2209 + E2209T1-4	3/32 & 1/16	1G	根冠	100-120 190-210	16-18 28-30	5-8 17-22
SAW	ER-2209+ P100 Flux	3/32	1G	冠	350-400	30-32	30-40

图7.3.2 不同接头的推荐焊接参数 (参考资料: 7.3.1)

焊接工艺	保护气体	说明
GMAW	Ar+30 He+1 O ₂	短电弧焊会形成高凸面焊珠
	Ar+30 He+1 O ₂ (22Cr 双相) Ar+2 CO ₂ (超级双相)	喷射电弧焊
	Ar+30 He+1 O ₂ (22Cr 双相) Ar (99.996%) 用于超级双相不锈钢	脉冲电弧焊
GTAW	<ul style="list-style-type: none"> ■ 保护 - Ar+2% N₂ ■ 吹扫/根部气体—氩 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 通过气体吹扫，保持最高0.5%氧气 ■ 对于根部焊道，推荐使用氩+2%氮气作为保护气体 ■ 对于其他焊道，可使用氩气作为保护气体 ■ 必须为最初的两个焊道设置根焊道 <p>说明：根据ASME标准第9节，吹扫气体的更换并不构成核心变量。氮氢混合气体（90%氮气+10%氢气）成本较低，有时也可作为替代性根部保护气体。不过，是否使用，必须通过合格的工序验证。</p>
FCAW	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ar-20% CO₂ ■ Ar-18%CO₂-2%O₂ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 典型气体流速：20-25升/分 ■ 焊丝伸出长度：15-20毫米

图7.3.3 推荐焊接参数 (参考资料: 7.3.1)

7.4 质量控制 (参考资料: 7.4.1至7.4.2)

双相不锈钢的处理难度并没有明显超过马氏体或奥氏体不锈钢,只是装配参数需要更加密切的控制。

相关规范必须包含必要的测试作业。这些规范通常都以相关标准作为依据(参见附表1)。例如,ISO 17781标准和NACE MR0175/ISO 15156标准都规定了石油天然气行业应用的常见品控测试方法,这些测试方法属于最为苛刻的测试方法。另外,对于石油天然气行业,还可要求使用更加具体的标准,例如, Norsok M-630标准(适用于材料)和M-650标准(适用于供应商审批)。

常见质量控制要求:

1. 化学成分 (ASTM或EN)
2. 热处理参数
3. 机械性能: 硬度、抗拉测试、室温和(如果需要)零度以下的冲击测试(例如, Norsok标准规定了 -46°C)
4. 金相学检查: 铁素体在40-60%。不存在第三相,例如,西格玛相、气相、氮化物或碳化物 (ASTM A923)。
5. 腐蚀测试: 点蚀温度 (ASTM G48)。

另外,还有其他要求,例如,对于涉及硫化氢的石油天然气应用,还要求应力腐蚀致裂测试。

操作员的资格要求

装配作业必须由具备所需资格水平的操作员完成。对于焊接作业,这一点尤其重要。ISO标准和ASME标准都规定了资格审查程序。对于无损测试的操作员,也有相似的资格认证要求。

8 结语

现在，双相不锈钢被广泛用于各种应用，但它还远未实现自己的全部潜能。在大部分用途上，双相不锈钢都是其他不锈钢家族的有益补充，尤其是奥氏体不锈钢。

虽然高强度和高耐腐蚀性是双相不锈钢为人熟知的优势，但近年的开发工作又让双相不锈钢能够适应不同需求：北极地区使用、更高的耐腐蚀性、更高的机械性能、更高的导热能力（簿规）、更高的切削加工性能、更高的成形性能等。另外，还有其他产品工作，让我们拭目以待。例如，增材制造工艺（3D打印技术），未来可能生产出更高强度和更高耐腐蚀性的双相不锈钢部件。同时，还能提供不锈钢的常规性能，即：耐久性、低生命周期成本、百分百可循环性、美学性等。

希望这本手册对您的项目有所帮助。



韩国关东冰球中心细节图，使用精益双相不锈钢 329LD 包覆

9 参考资料

1. 引言

1. Peckner D., Bernstein I.M. “Handbook of stainless steels”, McGraw Hill (1977)
2. P. Lacombe, B. Baroux and G. Beranger «Les Aciers Inoxydables » Les Editions de Physique (1990)
3. Voronenko, B.I. “Austenitic-Ferritic stainless steels: A state-of-the-art review” Met Sci Heat Treat (1997) 39: 428. <https://doi.org/10.1007/BF02484228>
4. J. Charles: “Duplex families and applications: A review Part 1: From Duplex Pioneers up to 1991” Stainless Steel World (July/August 2017), p.1 worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Charles_Duplex_families_and_applications_A_review_Part_1.pdf
5. J. Charles: “Duplex families and applications: A review Part 2: From 1991 to nowadays” Stainless Steel World (September 2015) p.67 worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Charles_Duplex_families_and_applications_A_review_Part_2.pdf
6. J. Charles: “Duplex families and applications: A review Part 3: The lean Duplex grades” Stainless Steel World (October 2015) p.1 worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Charles_Duplex_families_and_applications_A_review_Part_3.pdf

2. 材料标准和化学成分

1. IMO A Publication: “Practical Guidelines for the fabrication of Duplex stainless steels”, 3rd Edition, (2014) ISBN 978-1-907470-09-7 imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/practical-guidelines/fabrication-series.php
2. J. Charles and P. Chemelle: “The history of Duplex developments, nowadays DSS properties and duplex market future trends” Proceedings of the Duplex Stainless Steel Conference, Beaune, (2010), p.29 pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html

3. 耐腐蚀性

1. IMO A Publication: “Stainless grades and properties” imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/steel-grades.php
2. NACE Publication: R. Francis “The corrosion of duplex stainless steels: A practical guide for engineers (2018)” ISBN 978-1-57590-369-9 store.nace.org/the-corrosion-of-duplex-stainless-steels-a-practical-guide-for-engineers-2
3. Sandvik Corrosion Tables materials.sandvik.fr/materials-center/corrosion-tables/
4. F.V. Adams, P. Olubambi, J.H. Potgieter and J. Van Der merwe: “Corrosion resistance of duplex stainless steels in selected organic acids and organic acid/chloride environments” Anti-corrosion Methods and Materials, (May 2010), 57(3), p.107 researchgate.net/publication/235312358_Corrosion_resistance_of_duplex_stainless_steels_in_selected_organic_acids_and_organic_acidchloride_environments
5. Nickel Institute Publication: “Stainless steels and specialty alloys for pulp, paper and biomass conversion” 2nd Edition, (2017) nickelinstitute.org/media/1810/stainlesssteelsandspecialtyalloysformodernpulpandpapermills_11025_.pdf
6. super-metals.com/applications/corrosion-resistance-of-duplex-stainless-steels/
7. British Stainless Steel Association: “Duplex stainless steels – A simplified guide” bssa.org.uk/bssa_articles/2-duplex-stainless-steels-a-simplified-guide-2/
8. J. Grocki “A primer for duplex stainless steels” Stainless Steel World Seminar (October 2012) steeltank.com/Portals/0/Pressure%20Vessels/SSWseminarOct2012/4%20A%20Primer%20for%20DUPLEX%20%20Corrosion%20Solutions%20presentation.pdf
9. F.W. Hoinard Les aciers inox Duplex (2014) Cefracor publication docplayer.fr/15144426-Les-aciers-inox-duplex.html
10. F. Busschaert, T. Cassagne, A. Pedersen and Stale Johnsen: “New challenges for

the use of duplex stainless steels at low temperature” Rev. Metall., 110 3 (2013) 185-197

metallurgical-research.org/articles/metal/abs/2013/03/metal110081/metal110081.html

11. Jamila Adem.; “Erosion-resistance of the 1.4062 lean duplex for mining industries” . Duplex World Seminar & Summit 2016, (October 2016), Düsseldorf
12. A. Bhattacharya;. “Stress Corrosion Cracking of Duplex Stainless Steels in Caustic Solutions” . Thesis: Georgia Institute of Technology, Atlanta. (2008)
13. Technical data datasheet of Associated Steel Corp.
associatedsteel.com/technical-data/duplex-stainless-steel-asc2250ldx-caustic-solution-corrosion-test-data/
14. J. Charles: “Past, present and future of the duplex stainless steels”
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Pastpresentandfutureoftheduplexstainlessteels.pdf
15. R. M. Magdowski; M. O. Speidel. Stress corrosion cracking of high nitrogen steels. Proceedings: High nitrogen steels - HNS 88. EDITED BY J Foot, J.; Hendry, A.; 1989. p.251-255
16. R. Pettersson et al.: Avoiding catastrophic corrosion failure of stainless steels (CORINOX). European commission report in press from RFCS-CT-2006-00022. (2009), p.92
17. From Ugitech S.A. (ugitech.com)
18. Outokumpu publication “Handbook of stainless steels” (2013)
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/outokumpu_stainless_steel_handbook.pdf
19. IMO A Moly review (1/2008)
imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php
20. J.Charles, and S . Bernhardson, S. Duplex Stainless Steels ’ 91 Conference (1990)
21. V.S. Le Manchet and A. Proust: “Abrasion-Corrosion resistance of stainless and wear-resistant steel for oil sands applications” NACE Conference and Expo

(2016) Vancouver

4. 物理性能

1. Euro Inox “Stainless Steel: Table of Technical Properties” Materials and Applications series Vol 5, ISBN 978-2-87997-242-8
worldstainless.org/what_is_stainless_steel/Mechanical_and_physical_properties

5. 机械性能

1. Steel Construction Institute publication: “Design Manual for Structural Stainless Steel” , 4th Edition (2017)
steel-sci.com/
2. ISSF Stainless steel rebar website: stainlessteelrebar.org (and additional refs on some bridges)
3. J. Baas: “Application limits for Duplex Stainless Steels at elevated temperatures in the process industries” Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
4. S. Cissé and G Passot: “Effect of ageing on lean duplex UR2202 properties for plates and welds” Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
5. D.S. Bergstrom and D.R. Hasek: Elevated Temperature Phase Stability of ATI2003® Mo-Containing Lean Duplex Alloy” Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
6. R. Bapat and P. Goswami: “Duplex stainless steels: A critical review of Metallurgy, Engineering codes and Welding practices” Stainless steel world Americas conference & Expo 2012 (October 2012)
7. S. Cissé and G Passot: “Duplex Stainless Steels for Arctic Applications” Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
8. A. Fajimi: “Low temperature application of duplex stainless steels” Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
9. R. Cordewener: “Impact values at low temp” Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
10. Ugitech S.A.: Work Hardening Curves of grades EN 1.4062 and EN 1.4410
11. Sandvik brochure “Stainless steels for springs and other demanding applications”

12. R. Moser, P. Singh, L. Kahn and K. Kurtis: “Durability of Precast Prestressed Concrete Piles in Marine Environment, Part 2. Volume 2: Stainless Steel Prestressing Strand and Wire” Final report. School of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, (June 2012)
13. D.P. Schuetz: “ Investigation of High Strength Stainless Steel Prestressing Strands” , M.Sc. Thesis, School of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, (May 2013)
14. P. Alvaro, L.F. Kahn and K. Kurtis: “Corrosion-free precast prestressed concrete piles made with stainless steel reinforcement: construction, test and evaluation” GDOT research Project N° 1134 Final report. Contract with Georgia Department of Transportation in cooperation with the US department of transportation federal Highway Administration, (March 2015)
15. Y. Wu and U. N. T. rmerger: “ Corrosion-Technical properties of high-strength stainless steels for the application of prestressed concrete structures” Materials and Corrosion, (2009), 60, N° 10, p.771 DOI: 10.1002/maco.20090527
16. AISC and SCI Guide 7 – Design Guide 27: Structural Stainless Steel p.113 aisc.org/Design-Guide-27-Structural-Stainless-Steel
17. H. Groth and Erik Schedin: “Austenitic and Duplex Stainless Steels in Fire” Proceedings of Nordic Steel Construction Conference 2012, Oslo (Nov 2012) researchgate.net/publication/287632825_Austenitic_and_Duplex_Stainless_Steels_in_Fire
18. G. Waller and D.J. Cochrane: “Stainless steel for durability, fire resistance and safety” Nickel Institute publication nickelinstitute.org/library/?opt_perpage=20&opt_layout=grid&searchTerm=fire&page=1
19. C. Tigerstrand and J. Sjoestroem: “DSS adds structural and cost efficiency to seismic design of storage tanks” Proceedings of the 8th International Conference on Duplex Stainless steels, 13-15 (October 2010), Beaune, France, p.1197 pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html

6. 应用内容

通用

1. Stainless Steel World: “A steel for all seasons: duplex expands its range” , (November 2014) worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Chater_Stainless_steel_world_A_steel_for_all_seasons_Duplex_extends_its_range.pdf
2. J. Chater “Playing-to-strength-duplex-gains-market-share-in-construction-and-transport” , Stainless Steel World, (November 2017)
3. C. Houska : “Duplex stainless steel revolutionizes structural design” The Construction Specifier, (April 2015) constructionspecifier.com/duplex-stainless-steel-revolutionizes-structural-design/1/
4. AISC and SCI Guide 7 – Design Guide 27: Structural Stainless Steel aisc.org/Design-Guide-27-Structural-Stainless-Steel
5. SCI: Design Manual for Structural Stainless Steel, 4th Edition, (February 2018) steel-stainless.org/designmanual
6. Deutsche Institut für Bautechnik publication “Sonderdruck 862: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30,3-6) (March 2018) edelstahl-rostfrei.de/publikationen/iser-publikationen/sonderdruck-862-allgemeine-bauaufsichtliche-zulassung-z-303-6-vom-5-maerz-2018-erzeugnisse-bauteile-und-verbindungsmitel-aus-nichtrostenden-staehlen
7. IMO A Publication “ Duplex Stainless steel” imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php

6.1 艺术

1. Arches of Oman, Muscat: “ISSF publication “Stainless Steel in Architectural Applications Volume 4” , p.6 worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Architectural_Applications_Volume_4.pdf#page=6
2. Venus rising Brisbane, Australia: “ISSF publication “Stainless Steel in

Architectural Applications Volume 2” , p.13

worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Architectural_Applications.pdf#page=13

3. The Runners, Chicago

csaeng.com/projects/view/the-runners

6.2 建筑设计

1. Euro-Inox publication “Innovative Facades in Stainless Steel” Building Series, vol. 19, p.34. ISBN 978-2-87997-372-2

worldstainless.org/applications/architecture-building-and-construction-applications/building-exterior/

2. IMO A Publication Molyreview issue 1, (2019) “Louvre Abu Dhabi: A rain of Light”

imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php

3. IMO A Publication Moly-grade stainless steel makes waves at Middle Eastern Airport (Roof of Doha airport) Moly Review (January 2009) p.4

imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php

4. Cedinox publication Acero Inoxidable N° 82, Junio 2018 Basilica de la Sagrada Familia

cedinox.es/es/publicaciones/revista-acero-inoxidable/

5. ISSF publication “Stainless Steel in Architectural Applications Volume 3” p.34 “La Sagrada Familia”

worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Architectural_Applications_Volume_3.pdf#page=34

6. IMO A Publication “Duplex rigging for glass sails” Moly review, issue1, (2015)

imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php

7. ISSF page “Fondation Louis Vuitton”

worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Built_to_Last/English/Fondation_Louis_Vuitton.pdf

8. ISSF Publication “Stainless Steel as an Architectural Material Volume III”

worldstainless.org/applications/architecture-building-and-construction-applications/

6.3 桥梁

1. IMO A web publication “Stainless steel in Vehicular, rail and pedestrian bridges” (March 2018)

imoa.info/stainless-solutions/archive/37/Vehicular-rail-and-pedestrian-bridges.php

2. C. Houska “More on duplex stainless steel and bridges “, The construction specifier, (May 2015)

constructions specifier.com/duplex-bridges/

3. EU Publication report “Application of duplex stainless steel for welded bridge construction in an aggressive environment” , (March 2009), ISBN 978-92-79-09948-9

op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ec2748d4-3269-43cd-9a34-3a0e1fba4e23/language-en/format-PDF/source-111268318

4. Euro Inox publication “Pedestrian bridges in stainless steel” ISBN 2879970849

bssa.org.uk/wp-content/uploads/2021/07/Pedestrian-Bridges-in-Stainless-Steel.pdf

5. N. Baddoo and A. Kosmac “Sustainable Duplex Stainless Steel bridges” Euro Inox publication

worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Sustainable_Duplex_Stainless_Steel_Bridges.pdf

6. K F. Hansen, L. Lauge and S. Kite: “Stonecutters Bridge – Detailed design” (January 2004) DOI: 10.2749/222137804796291719

worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/StonecuttersBridge_DetailedDesignShanghai2004Falbe_Hansen.pdf

7. Steel Construction Institute publication: “Stonecutters Bridge Towers” (2010)

worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Stonecutters_Bridge_Towers.pdf

8. G. Gedge: “Use of duplex stainless steel plate for durable bridge construction” (January 2007) DOI: 10.2749/222137807796119771

researchgate.net/publication/233632633_Use_of_Duplex_Stainless_Steel_Plate_for_Durable_Bridge_Construction

9. Champlain bridge, Montreal Nickel Institute magazine, Vol. 34, N° 2, (2019)

- nickelinstitute.org/media/4336/201912-case-study-champlain-bridge.pdf
10. Champlain bridge, Montreal Stainless Steel World online, 05 January 2016
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/NAS_to_supply_stainless_steel_bar.pdf
 11. Hong-Kong Macau bridge ISSF Publication: “Stainless steel in Infrastructure”
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Infrastructure_English.pdf
 12. Hong-Kong Macau bridge
en.wikipedia.org/wiki/Hong_Kong%E2%80%93Zhuhai%E2%80%93Macau_Bridge
 13. IMO A publication “Innovative bridge at Ft Worth, Texas” Moly-Review 1/2018
imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/
 14. Steel Construction Institute publication: “Cala Galdana Bridge” (2010)
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Cala_Galdana_Bridge.pdf
 15. Railway Bridges in India
apnnews.com/pamban-to-become-indias-first-railway-bridge-to-use-stainless-steel-structurals/
 16. Steel Construction Institute publication: “Helix Pedestrian Bridge” (2011)
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Helix_Pedestrian_Bridge.pdf
 17. ISSF Publication: Bascule pedestrian bridge in “Stainless steel as an architectural material”
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_as_an_Architectural_Material.pdf
 18. Trumpf bridge
structurae.net/en/structures/trumpf-footbridge
 19. IMO A Publication “San Diego” s new harbor bridge sails onto the skyline” MolyReview, (June 2012)
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/IMO_A_MolyReview_2_2012.pdf
 20. ISSF Publication: Bascule pedestrian bridge in “Stainless steel as an architectural material”
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_as_an_Architectural_Material.pdf

- Architectural_Material.pdf
21. Trumpf bridge
structurae.net/en/structures/trumpf-footbridge
 22. IMO A Publication “San Diego” s new harbor bridge sails onto the skyline” MolyReview, (June 2012)
imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/pedestrian-bridges.php
- ## 6.4 海岸工程
1. Sea Wall at Cromer
stainlesssteelrebar.org/applications/coastal-protection-at-cromer-uk/
 2. Bayonne breakwater
stainlesssteelrebar.org/applications/bayonne-breakwater/
 3. Tsunami-proof floodgates Japan (NSSC presentation)
 4. Sluices Mt St Michel
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/The_Mont_Saint_Michel.pdf
 5. Tammerkoski floodgate
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Tammerkoski_Floodgates.pdf
 6. Monaco extension
cedinox.es/es/publicaciones/noticias/Extension-de-Monaco-en-el-mar/
 7. Gårda Dämme floodgate, Gothenburg
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Gothenburg_Floodgates.pdf

6.5 复原项目

1. Statue of Liberty
imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/structural-restoration.php
2. IMO A Publication: “Super duplex to keep the Vasa safe”

imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/structural-restoration.php

3. Cedinox publication “Rehabilitacion – Iglesia de Santiago” Acero Inoxidable N° 76, Junio 2015, p.14
cedinox.es/export/sites/cedinox/.galleries/aplicaciones-arquitectura-pdf/Rehabilitacion-Iglesia-de-Santiago..pdf
4. Cedinox publication; “Rehabilitacion de Iglesia de Santa Catalina” Acero Inoxidable, vol. 83, december 2018, p.8.
cedinox.es/export/sites/cedinox/.galleries/aplicaciones-arquitectura-pdf/Rehabilitacin-de-Iglesia-de-Santa-Catalina-Sevilla.pdf

6.6 隧道

1. ISSF Publication “Stainless steels in tunnels”
worldstainless.org/applications/architecture-building-and-construction-applications/infrastructure/
2. Nickel Institute publication “Queensway Tunnel Refurbishment England” (May 2017)
nickelinstitute.org/media/2693/cs2-queensway-tunnel.pdf
3. ISSF publication “Slab suspension in a bypass tunnel”
worldstainless.org/applications/architecture-building-and-construction-applications/infrastructure/
4. S. Mead “How a new duplex stainless steel helped transform Norway’s rail infrastructure” Design Solution Journal, (February 2018)
connectingindustry.com/DesignSolutions/how-a-new-duplex-stainless-steel-helped-transform-norways-rail-infrastructure.aspx
5. Sandvik Publication
materials.sandvik/en/news-media/news-and-stories/archive/2016/10/sandvik-hollow-bar-brings-100-years-of-maintenance-free-service-to-norways-revolutionary-high-speed-railway/

6.7 运输业

1. IMOA “Safer seas with stainless steel”, Moly-review (032018)
imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/molybdenum-use-by-material/duplex-stainless-steel/duplex-stainless-steel.php
2. F. Neessen and P. Bandsma: Tankers – “A composition in Duplex stainless” Welding innovation, vol. 18, (2001) N° 3
jflf.org/v/vspfiles/assets/pdf/duplexstainless.pdf
3. J. Chater « Playing to Strength: duplex gains market share in construction and transport” Stainless Steel World, (November 2017)
4. H. Groth, B. Leffler and A. Bergquist: “Advantages and limitations of 2205 and other duplex stainless steels for the transportation of chemicals” Duplex Conference ‘97”, (21-23 October), 1997, Maastricht, The Netherlands
researchgate.net/publication/318860884_Advantages_and_limitations_of_2205_and_other_duplex_stainless_steels_for_the_transport_of_chemicals
5. J. Peultier, F. Barrau and J.P. Audouard: “Corrosion Resistance of Duplex and Super Duplex Stainless Steels for Air Pollution Control process Systems”, Corrosion 2005, 3-7 April 2005, Houston, Tx, USA. ©2005 NACE International Document ID: NACE-05316
6. Kiruna Wagon News: “Kiruna wagon modernises wagons with Duplex Stainless Steel for LKAB” (05 April 2018)
kirunawagon.com/archives/2651
7. Stadler SA datasheet: “Tramlink for EMTU Santos, Brazil” (2016)
stadlerrail.com/en/references/overview-references/

6.8 化工行业

1. G. Notten: “Application of Duplex stainless steel in the chemical process industry” 5th Duplex stainless steel world Conference, (1997) archived in stainless-steel-world.net
2. Heat exchangers: enerquip.com/heat-exchanger-blog/duplex-stainless-steel-makes-an-excellent-choice-for-manufacturers/

3. Proc. Int Conf. on Duplex Stainless Steels, (13-15 october 2010), Beaune Session IB “Process (Chemical) Industry” p. 167 - 249.
pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html

6.9 纸浆和纸张行业

1. A. Tuomi et al. : “Increased usage of duplex materials in manufacturing pulping equipment” Duplex America 2000 Conference proceedings, p.401.
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Tuomi_et_al_Increased_usage_of_Duplex_in_Pulp_and_paper.pdf
2. J. Chater: “The pulp and paper industry turns to duplex” Stainless Steel World, (October 2007), p. 70
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Chater_the_pulp_and_paper_industry_turns_to_duplex.pdf
3. Penn Stainless “Duplex Usage in the Pulp and Paper Industry” (August 2012)
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Duplex_usage_in_the_pulp_and_paper_Industry.pdf
4. Nickel Institute Publication: “Stainless steels and specialty alloys for pulp, paper and biomass conversion – A practical guide for mill engineers” Senior Editor Andrew Gardner 2nd Edition, (2017)
nickelinstitute.org/media/1810/stainlesssteelsandspecialtyalloysformodernpulpandpapermills_11025_.pdf

6.10 石油天然气行业

1. D. Zuili: “The use of stainless steels in oil&gas industry” Proceedings of the Duplex Stainless Steel Conference, Beaune, (2010), p575.
pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html
2. Norsok and NACE standards (see Appendix 1)
3. T. Cassagne F. Busschaert “Experience with Duplex stainless steels in Oil and Gas Production”, Duplex 2007, June 18-20, Grado, Italy ISBN 88-85298-60-5 tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20071106432/Experience-with-duplex-stainless-

4. atimetals.com/markets/energy/Pages/Oil+Gas.aspx#
5. World Oil Magazine: “Stainless steel umbilical tubing proves strength after 17 years’ subsea service”, vo 238, N° 5, (June 2017)
worldoil.com/magazine/2017/june-2017
6. IMO A newsletter (July 2008) “Lean Duplex Stainless Steel Flexible Flowlines for the Kikeh Offshore Oil Field”
imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php
7. API Technical report 938C “Use of Duplex Stainless Steels in the Oil refining Industry” 3rd Edition, (February 2015)
api.org/~media/files/publications/whats%20new/938-c_e3%20pa
8. R. Francis: “The corrosion of Duplex stainless steels: A practical guide for engineers”, NACE International Publication, (2018), ISBN: 978-1-57590-369-9
store.nace.org/the-corrosion-of-duplex-stainless-steels-a-practical-guide-for-engineers-2
9. Wikipedia: subseapedia.org/w/index.php?title=Umbilicals

6.11 核能行业

1. F. King: “Corrosion resistance of austenitic and duplex stainless steels in environments related to UK geological disposal “UK Nuclear decommissioning Authority, (2009)
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/King_Corrosion-resistance-of-austenitic-and-duplex-stainless-steels-in-environments-related-to-UK-geological-disposal.pdf
2. American Metal Market “Stainless steel waste boxes ready for Sellafield” April 09, 2018
amm.com/Article/3799585/Stainless-steel-waste-boxes-ready-for-Sellafield.html?Print=true
3. A. Backhouse: “Stainless Steels for the Nuclear Industry” Outokumpu Experience 2013, London
marketing.outokumpu.com/ext/webpage/show.php?p=165720a5c08034848fc7aee14024aa3ab462c9d

4. IMOA publication:” Duplex 2205: The new choice for nuclear power piping” Moly Review, (July 2010), p.8
imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php
5. US Areva (now called Orano) leaflet (NUHOMS® DOX Duplex Stainless Steel Canister Option”
us.areva.com/home/liblocal/docs/Catalog/AREVA-TN/ANP_U-542-V3-17-ENG_NUHOMS_DPX.pdf
6. Sellafield Magazine, issue 08, (January 2018), p.11
gov.uk/government/publications/sellafield-magazine-issue-8

6.12 可再生能源行业

1. REN21 report “Renewables 2018 Global status report” ISBN 978-3-9818911-3-3
ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/
2. The Steel Construction Institute Publication p.412: “Stainless steel tanks for biogas production » (2016)
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/power_generation/Stainless_steel_tanks_for_biogas_production.pdf
3. K. Osterman : “Stainless steels – Cost-efficient materials for the global biofuel industries” Nickel Institute technical Series N° 10 090
nickelinstitute.org/media/3877/ni-ko-biofuelstechdoc10090.pdf
4. IMOA Publication: “Strong sustainable storage tanks” Moly Review, (2/2017)
imoa.info/download_files/molyreview/excerpts/17-2/Storage_tanks.pdf
5. ISSF Publication: “New application Awards 2017” , p.24
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_New_Applications_Award_2017.pdf#page=24
6. I.O. Thorbjornsson et al : “Materials for geothermal steam utilization at higher temperatures and pressure” Proceedings World Geothermal Congress, (April 2015), Melbourne
researchgate.net/publication/303462143_Materials_for_Geothermal_Steam_Utilization_at_Higher_Temperatures_and_Pressure
7. M. Van Wijngaarden and J. Chater: “CalEnergy goes for duplex” Stainless Steel

- World (October 2006) p.54
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Duplex_references/Wijngaarden_and_Chater_CalEnergy_goes_for_duplex.pdf
8. IMOA Publication: “Lighter and safer offshore platforms” MolyReview, issue 1 (2018) p.3
imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/
9. J. Chater “Playing to Strength: duplex gains market share in construction and transport” Stainless Steel World, (November 2017)
10. altenergymag.com/story/2019/05/stainless-steel-lends-long-life-to-merkurwind-%0Dfarm-structure/30962/

6.13 水源

1. Hulls: J. Chater: “Running a tight ship: Stainless steel can be cost-effective for the construction of ships and boats” Stainless Steel World, October 2014, p.2 archived in stainless-steel-world.net
2. Propeller Shafts: clementsengineering.co.uk/technical/
3. Propellers: steelcraftpropellers.fi/en/propellers/
4. Davits: Laser welded square sections
stainless-structurals.com/blog/duplex-stainless-steel-marine-cranes/
5. Tanks: T. Snauwaert et al. “Duplex stainless steels in storage tanks” EU Publication” , December 2013, ISBN 978-92-79-34576-0 , DOI 10.2777/4944 publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a4313c3e-0c7f-4261-b08d-135dd4067af2/language-en
6. IMOA Publication “Strong sustainable water tanks” MolyReview 2/2017, p.1 imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php
7. P.-E. Arnvig: “New applications and experiences with Duplex Stainless Steels – the importance and challenge of standards” Proceedings of International Duplex Seminar and Summit (2016)
8. R. Cordewener ArcelorMittal Industeel “Duplex Stainless Steels for Storage Tanks – Focus on corrosion and Life cycle Cost” Proc. Stainless Steel World

- Conference and expo 2017
9. Institut de la Corrosion: RFCS Project “Lean Duplex Stainless Steel for Urban and Industrial Wastewater” started 01/09/2017 duration 40 months
institut-corrosion.fr/activities/research-and-development/projet-rfcs-duplexwaste/?lang=en
 10. ISSF Publication: “Stainless Steel in Sewage Treatment Plants” ISBN 978-2-930069-62-3
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_steel_in_sewage_treatment_plants.pdf
 11. Euro Inox Publication: “Performance of Stainless Steels in Waste Water Installations” ISBN 978-2-87997-040-0
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/WasteWater_Installation_EN.pdf
 12. Nickel Institute Publication “Giving Sewage the stainless steel treatment” Nickel Magazine, Vol.31 N° 2, p.10
nickelinstitute.org/about-nickel/water/
 13. Information from POSCO, Korea
 14. J. Olsson: “Stainless steels for desalination plants” Desalination 183 (2005) p.217.
 15. ISSF Publication: “Desalination in stainless steel”
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Desalination_in_Stainless_Steel.pdf
 16. ISSF Publication: “Reverse Osmosis Desalination Plant”
worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Book_of_New_Applications_2011_English.pdf#page=92
 17. E.D. Mackey and T.F. Seacord : “Guidelines for Using Stainless Steel in the Water and Desalination Industries
awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.5942/jawwa.2017.109.0044?tracking_action=preview_click&r3_referer=wol&show_checkout=1 American Waterworks Association
 18. Solar hot water tanks
sahotwater.com.au/red-circle-solar.htmlE.D. Mackey and T.F. Seacord : “Guidelines for Using Stainless Steel in the Water and Desalination Industries
awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.5942/jawwa.2017.109.0044?tracking_action=preview_click&r3_referer=wol&show_checkout=1 American Waterworks Association
 19. Solar hot water tanks
redcirclesolar.com.au/slit-systems-and-retro-fitting-to-existing-tanks
- ## 6.14 多个市场
1. Insulated Balcony connectors
slabe.fr/
ancon.co.uk/products/insulated-balcony-connectors/stc-steel-to-concrete-connectors
 2. Springs: materials.sandvik/en/materials-center/material-datasheets/strip-steel/sandvik-springflex/
 3. Valves and Pumps: archived in stainless-steel-world.net
 4. Laser welded profiles: stainless-structurals.com
 5. Anchorings
- ## 7 制造
- ### 7.1 成型
1. IMOA Publication “ Bending, Cold forming and springback of Duplex stainless steels”
imoa.info/download_files/stainless-steel/IMOA_Shop_Sheet_102.pdf
 2. IMOA Publication: “Hot forming and Heat Treatment of Duplex Stainless Steels”
imoa.info/download_files/stainless-steel/IMOA_Shop_Sheet_101.pdf
 3. H. Haenninen and J. Romu: “Trends in Forming and welding of Stainless Steels” Proc. 6th European Stainless Steel Conference, (June 2008), Helsinki. researchgate.net/publication/242272425_TRENDS_IN_FORMING_AND_WELDING_OF_STAINLESS_STEELS
 4. Euro Inox Publication “ The forming Potential of Stainless Steels” ISBN978-2-87997-211-4
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/FormingPotential_EN.pdf

5. A. Groth et al: “Forta FDX27 Duplex stainless steel for high strength gasket plate heat exchangers” J. Phys: Conf. Series 896 (2017) 012013 doi 10.1088/1742-6596/896/1/012013
researchgate.net/publication/320073320_Forta_FDX_27_-_duplex_stainless_steel_for_high_strength_gasket_plate_heat_exchangers
6. J.O. Nilsson, G Chai: “The physical metallurgy of DSS” Proceedings of the 8th Duplex Stainless Steel Conference, Beaune, (October 2010) p.369
pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html
7. C. Herrera, D. Ponge, D. Raabe “Design of a novel 1Gpa duplex stainless TRIP steel with 60% ductility by a reduction of austenite stability” Acta Materialia, Vol 59, issue 11, (June 2011) p.4653
doi.org/10.1016/j.actamat.2011.04.011
8. J. Tomu et al “Superplastic Forming of LDX2101 (EN 1.4362) Duplex Stainless Steel” Proceedings of European Conference on superplastic forming, (2004) Albi, France.
researchgate.net/publication/289531575_Superplastic_Forming_of_LDX_2101_EN_14162_Duplex_Stainless_Steel

7.2 切削加工

1. IMO A Publication: “Machinability of Duplex Stainless Steels”
imoa.info/download_files/stainless-steel/IMO_A_Shop_Sheet_103.pdf
2. N. Renaudot, E. Chauveau and M. Mantel: “Machinability of Stainless Steel Long products: How to deal with the Sulphur way?” Proceedings of the 8th Duplex Stainless Steel Conference, Beaune (2010), p.1233
pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html
3. N. Renaudot, E. Chauveau and M. Mantel: “1.4669, a new lean duplex stainless steel with improved toughness and machinability” La Metallurgia Italiana, (Sept 2012), Vol. 105, p.29
4. Ugima4362 Data Sheet, Ugitech SA.

7.3 焊接作业

1. R. Bapat and P. Goswami: “Duplex stainless steels: A critical review of Metallurgy, Engineering codes and Welding practices” Stainless steel world Americas conference & Expo 2012 (October 2012)
2. P.J. Cunat: “The welding of stainless steels” , Euro Inox Publication (2007)
worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_EN.pdf
3. L.M. Haldorsen: “Welding of duplex piping – Experiences and challenges” Duplex world seminar and summit (2016)
4. R. Pettersson, M. Johansson, E. M. Westin: “Corrosion performance of welds in duplex, superduplex and lean duplex stainless steels” Rivista Italiana della Saldatura vol. 66 (Jan. 2013), p.335
researchgate.net/publication/286677410_Corrosion_performance_of_welds_in_duplex_superduplex_and_lean_duplex_stainless_steels
6. IMO A Publication: imoa.info/download_files/stainless-steel/IMO_A_Shop_Sheet_105.pdf
7. F. Babish: “Welding practice of the duplex stainless steels SAF 2304 SAF2204 and SAF2507”
fr.slideshare.net/lalutrivandrum9/welding-duplex-stainless-steel

7.4 质量控制

1. A. Wensley “Developments in the Quality Assurance of Duplex Stainless Steel pressure Vessels for the Pulp and Paper industry” Stainless Steel World Conference, Houston, Tx (November 2001)
researchgate.net/publication/279181178_Developments_in_the_Quality_Assurance_of_Duplex_Stainless_Steel_Pressure_Vessels_for_the_Pulp_and_Paper_Industry
2. EMMUA Publication 218 “Quality requirements for the Manufacture and Supply of Duplex Stainless Steels”
eemua.org/Products/Publications/Digital/EEMUA-Publication-218.aspx

10 附录

附录 1 主要标准

1. ISO 15510 不锈钢标准——化学成分
2. ISO 17781 石油、石化以及天然气行业标准——铁素体/奥氏体（双相）不锈钢微观结构质量控制测试方法
3. ASTM A182 高温下使用的锻造或轧制合金或不锈钢管道法兰、锻造管件以及阀门和部件标准规范
4. ASTM A240 压力容器或一般性应用使用的铬和铬镍不锈钢厚板、薄板及带材标准规范
5. ASTM A270 无缝和焊接奥氏体及铁素体/奥氏体不锈钢卫生配管标准规范
6. ASTM A276 不锈钢棒材和异型材标准规范
7. ASTM A480 平轧钢和耐热钢厚板、薄板及带材一般性需求标准规范
8. ASTM A789 一般性使用无缝和焊接铁素体/奥氏体不锈钢配管标准规范
9. ASTM A790 无缝和焊接铁素体/奥氏体不锈钢管标准规范
10. ASTM A815 锻造铁素体、铁素体/奥氏体、马氏体不锈钢管件标准规范
11. ASTM A890 一般性应用使用的铸件、铁铬镍钼耐腐蚀双相（奥氏体/铁素体）不锈钢标准规范
12. ASTM A923 双相不锈钢（奥氏体/铁素体）中有害金属间相标准探测方法
13. ASTM A928 使用焊料焊接铁素体/奥氏体（双相）不锈钢管的电融合标准规范
14. ASTM A959 统一标准锻造不锈钢等级成分标准指南
15. ASTM A995 承压部件用铸件、奥氏体/铁素体（双相）不锈钢标准规范
16. BS 6744 201 年不锈钢棒材标准——混凝土加固——要求及测试方法
17. EN ISO 9445 连续冷轧不锈钢标准——尺寸和外形容限，第1部分：窄带材和切割长度；第2部分：宽带材和厚板/薄板
18. EN 10088-1 不锈钢标准——不锈钢清单
19. EN 10088-2 不锈钢标准——通用型耐腐蚀钢材薄板/厚板和带材的技术交付条件
20. EN 10088-3 不锈钢标准——通用型耐腐蚀钢材半成品、棒材、盘条、线材以及光亮产品的技术交付条件
21. EN 10028-7 压力设备用钢材制造的扁平材产品标准——不锈钢
22. EN 10216-5 压力设备用无缝钢管标准——技术交付条件——不锈钢管
23. EN 10272 压力设备用不锈钢棒材标准
24. EN 10296-2 机械和一般工程用焊接圆形钢管标准——技术交付条件——不锈钢
25. EN 10217-7 压力设备用焊接钢管标准——技术交付条件——不锈钢管
26. EN 10253 对焊管件标准——无特定检测要求的锻造奥氏体和奥氏体/铁素体（双相）不锈钢
27. EN 10297-2 机械和一般工程用无缝圆形钢管标准——技术交付条件——不锈钢
28. Vd T ü V WB418 铁素体标准——奥氏体轧锻钢，X2CrNiMoN22-5-3，材料号1.4462；带材、扁平材、法兰、异形材、棒材、无缝管、锻件
29. Norsok M630 管道材料数据表和元素数据表标准
30. NACE MR0175/ISO15156-3 石油和天然气行业标准——石油天然气生产中，硫化氢环境下使用的材料

附录 2

化学成分 (典型分析)

BACK ? ≡ ← →

	钢材等级	标准	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W	PREN
精益双相	S32001	1.4482	0.03	19.5-21.5	1.00-3.00	0.6	0.05-0.17	4.00-6.00	1.00	-	21-23
	S82012	1.4635	0.05	19.0-20.5	0.80-1.50	0.10-0.60	0.16-0.26	2.00-4.00	1.00	-	24-26
	S82122		0.03	20.5-21.5	1.50-2.50	0.60	0.15-0.20	2.00-4.00	0.50-1.50	-	24-26
	S32101	1.4162	0.04	21.0-22.0	1.35-1.70	0.10-0.80	0.20-0.25	4.00-6.00	0.10-0.80	-	25-27
	S32202	1.4062	0.03	21.5-24.0	1.00-2.80	0.45	0.18-0.26	2.00	-	-	25-28
	S32304	1.4362	0.03	21.5-24.5	3.00-5.50	0.05-0.60	0.05-0.20	2.50	0.05-0.60	-	25-28
	S82011		0.03	20.5-23.5	1.00-2.00	0.10-1.00	0.15-0.27	2.00-3.00	0.50	-	25-27
		1.4655	0.03	22.0-24.0	3.50-5.50	0.10-0.60	0.05-0.20	2.00	1.00-3.00	-	25-27
		1.4669	0.045	21.5-24.0	1.00-3.00	0.50	0.12-0.20	1.00-3.00	1.60-3.00	-	25-27
	S81921		0.03	19.0-22.0	2.00-4.00	1.00-2.00	0.14-0.20	2.00-4.00	-	-	27-28
	S82031	1.4637	0.05	19.0-22.0	2.00-4.00	0.60-1.40	0.14-0.25	2.50	1.00	-	27-28
	S82121		0.035	21.0-23.0	2.00-4.00	0.30-1.30	0.15-0.25	1.00-2.50	0.20-1.20	-	27-28
	S31500	1.4424	0.03	18.0-19.0	4.30-5.20	2.50-3.00	0.05-0.10	-	-	-	28-29
	S32404		0.04	20.5-22.5	5.50-8.50	2.00-3.00	0.20	2.00	1.00-2.00	-	29-30
	S32900	1.4460	0.08	23.0-28.0	2.50-5.00	1.00-2.00	-	1.00	-	-	30-31
	S32003		0.03	19.5-22.5	3.00-4.00	1.50-2.00	0.14-0.20	2.00	-	-	30-31
S82441	1.4662	0.03	23.0-25.0	3.00-4.50	1.00-2.00	0.20-0.30	2.50-4.00	0.10-0.80	-	33-34	
标准双相	S31803	1.4462	0.03	21.0-23.0	4.50-6.50	2.50-3.50	0.08-0.20	2.00	-	-	33-35
	S32205	1.4462	0.03	22.0-23.0	4.50-6.50	3.00-3.50	0.14-0.20	2.00	-	-	35-36
	S32950		0.03	26.0-29.0	3.50-5.20	1.00-2.50	0.15-0.35	2.00	-	-	36-38
	S32808		0.03	27.0-27.9	7.00-8.20	0.80-1.20	0.30-0.40	1.10	-	2.10-2.50	36-38
超级双相	S32506	-	0.03	24.0-26.0	5.50-7.20	3.00-3.50	0.08-0.20	1.00	-	0.05-0.30	40-42
	S32520	1.4507	0.03	24.0-26.0	5.50-8.00	3.00-4.00	0.20-0.35	1.50	0.50-2.00	-	40-43
	S32550	1.4507	0.04	24.0-27.0	4.40-6.50	2.90-3.90	0.10-0.25	1.50	1.50-2.50	-	38-41
	S32750	1.4410	0.03	24.0-26.0	6.00-8.00	3.00-5.00	0.24-0.32	1.20	0.50	-	40-43
	S32760	1.4501	0.03	24.0-26.0	6.00-8.00	3.00-4.00	0.20-0.30	1.00	0.50-1.00	0.50-1.00	40-43
	S32906	1.4477	0.03	28.0-30.0	5.80-7.50	1.50-2.60	0.30-0.40	0.80-1.50	0.80	-	41-43
	S39274	-	0.03	24.0-26.0	6.80-8.00	2.50-3.50	0.24-0.32	1.00	0.20-0.80	1.50-2.00	40-42
	S39277	-	0.025	24.0-26.0	6.50-8.00	3.00-4.00	0.23-0.33	0.80	1.20-2.00	0.80-1.20	40-42
特超级双相	S32707	-	0.03	26.0-29.0	5.50-9.50	4.00-5.00	0.30-0.50	1.50	1.00	-	49-50
	S33207	-	0.03	29.0-33.0	6.00-9.00	3.00-5.00	0.40-0.60	1.50	1.00	-	52-53

附录 3

ISO 15510:2010国际标准中不同双相不锈钢等级之间的对等性

BACK ? ≡ ← →

						
4460-312-00-I	X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	S31200			S22553
4480-312-60-J	X2CrNiMoN25-7-3	1.4481	S31260		SUS329J4L	S22583
4424-315-00-I	X2CrNiMoSiMnN19-5-3-2-2	1.4424	S31500			
4462-318-03-I	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	S32205, S31803	F51, F60	SUS329J3L	S22053
4162-321-01-E	X2CrMnNiN21-5.1	1.4162	S32101			
4062-322-02-U	X2CrNiN22-2	1.4062	S32202			
4362-323-04-I	X2CrNiN23-4	1.4362	S32304			S23043
4507-325-50-X	X3CrNiMoCuN26-6-3-2	1.4507	S32550			S25554
4507325-20-I	X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	S32520			
4501-327-60-I	X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	S32760			S27603
4410-327-50-E	X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	S32750			S25073
4658-327-07-U	X2CrNiMoCoN28-8-5-1	1.4658	S32707			
4477-329-06-E	X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	S32906			
4480-329-00-U	X6CrNiMo26-4-2	1.4480	S32900	329	SUS329J1	
4485-332-07-U	X2CrNiMoN31-8-4	1.4485	S33207			

附录 4

在实验室加速测试条件下，无焊接双相不锈钢和奥氏体不锈钢的抗应力腐蚀致裂比较（参考资料：2.1）

BACK ? ≡ ← →

钢材等级	304L型 316L型	3RE60	S32101 S32202	2205	超级双相	特超级双相
42% MgCl ₂ , 煮沸, 154 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■
35% MgCl ₂ , 煮沸, 125 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■
液滴蒸发, 0.1M NaCl, 120 ° C, 0.9 x Y.S.	■	■	■	■	■	■
灯芯测试, 1500 ppm氯化物 (氯化钠), 100 ° C	■	■	■	■	■	■
33% LiCl, 煮沸, 120 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■
40% CaCl ₂ , 100 ° C, 0.9 x Y.S.	■	■	■	■	■	■
25-28% NaCl, 煮沸, 106 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■
26% NaCl, 压煮器, 155 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■
26% NaCl, 压煮器, 200 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■
600 ppm Cl (NaCl) 压煮器, 300 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■
100 ppm Cl (sea salt + O ₂), 压煮器, 230 ° C, U型弯	■	■	■	■	■	■

■ 可预见的开裂

■ 可能发生的开裂

■ 未预见的开裂

■ 数据不足

附录 5

物理性能

BACK ? ≡ ← →

来自 EN 10088-1:2014-12 标准

钢材指称		密度 kg/dm ³	弹性模数,				平均热膨胀系数, 温度范围: 20° 至			导热率, 20° C $\frac{W}{m \cdot K}$	比热容量, 20° C $\frac{J}{kg \cdot K}$	电阻率, 20° C $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$	可磁化
名称	编号		20° C	100° C	200° C	300° C	100° C	200° C	300° C				
		GPa				$10^{-6} \times K^{-1}$							
X2CrNiN22-2	1.4062	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	480	0.68	是
X2CrCuNiN23-2-2	1.4669	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	13	475	0.8	
X2CrNiN23-4	1.4362	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	7.7	205	200	190	180	13.0	14.0	14.5	15	500	0.75	
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	15.0	13	500	0.8	
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	7.7	205	200	190	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	7.7	200	194	186	180	11.5	12.0	12.5	13	470	0.8	
X2CrNiMoCoN28-8-5-1	1.4658	7.8	197	189	178	168	12.5	-	13.5	12	470	0.8	
特异奥氏体—铁素体耐腐蚀性钢材													
X2CrNiCuN23-4	1.4655	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	是

附录 6 机械性能, 长材

BACK ? ≡ ← →

EN 10088-3:2014 不锈钢标准——第3部分: 通用型耐腐蚀钢材半成品、棒材、盘条、线材以及光亮产品的技术交付条件

钢材指称		厚度 (t) 或直径 (d)	硬度	0.2% 弹性强度	抗拉强度	断裂后的伸长率	冲击能量 (ISO-V)	抗晶间腐蚀能力	
名称	编号	mm	最大HBW	压强最小值	R_m^d MPa	最低 % (纵向)	非低KVJ (纵向)	交付条件	敏感条件
标准等级钢材									
X2CrNiN23-4	1.4362	≤ 160	260	400	600 to 830	25	100	是	是
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	≤ 160	270	450	650 to 880	25	100	是	是
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	≤ 160	260	450	620 to 880	20	85	是	是
特殊等级钢材									
X2CrNiN22-2	1.4062	≤ 160	290	380	650 to 900	30	40	是	是
X2CrCuNiN23-2-2	1.4669	≤ 160	300	400	650 to 900	25	100	是	是
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	≤ 50	260	450	700 to 900	25	100	是	是
		50 < t ≤ 160	260	400	680 to 900	25	100	是	是
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	≤ 160	290	400	650 to 900	25	60	是	是
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	≤ 160	-	400	650 to 900	25	60	是	是
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	≤ 160	290	450	650 to 900	25	60	是	是
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	≤ 160	270	500	700 to 900	25	100	是	是
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	≤ 160	290	530	730 to 930	25	100	是	是
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	≤ 160	290	530	730 to 930	25	100	是	是
X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	≤ 10	310	650	800 to 1050	25	100	是	是
		10 < t ≤ 160	310	550	750 to 1000	25	100	是	是

钢材指称		产品形式 产品形式	厚度	0.2% 弹性强度	抗拉强度	延伸率		冲击能量 (ISO V) KV2 >10毫米厚 - 最小焦耳		抗晶间腐蚀能力	
名称	编号		mm max.	最低 Rp0.2 兆帕 (纵向)	R _m Mpa	A80 <3毫米厚, 最低%, 纵向+横向	A ≥ 3毫米厚, 最低%, 纵向+横向	纵向	横向	交付条件	敏感条件
标准等级钢材											
X2CrNiN23-4	1.4362	C	8	450	650 to 850	20	20	-	-	是	是
		H	13.5	400				100	60		
		P	75	400	630 to 800	25	25				
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	C	8	500	700 to 950	20	20	-	-	是	是
		H	13.5	460				100	60		
		P	75	460	640 to 840	25	25				
特殊等级钢材											
X2CrNiN22-2	1.4062	C	6.4	530	700 to 900	20	20	-	-	是	是
		H	10	480	680 to 900	30	30	80	80		
		P	75	450	650 to 850	30	30	80	60		
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	C	8	450	700 to 900	25	25	100	60	是	是
		H	13.5								
		P	75	400	680 to 900						
X2CrNiCuN23-4	1.4655	C	8	420	600 to 850	20	20	-	-	是	是
		H	13.5					400	100		
		P	75	400	630 to 800	25	25				
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	C	6.4	530	700 to 900	20	30	-	-	是	是
		H	10	480	680 to 900	30	30	80	80		
		P	75	450	650 to 850	30	30	60	60		
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	C	6.4	500	700 to 900	20	30	-	-	是	是
		H	10	480	660 to 900	30	30	100	60		
		P	75	450	650 to 850	30	30	100	60		
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	C	6.4	550	750 to 900	20	25	-	-	是	是
		H	13	550	750 to 900	-	25	80	80		
		P	75	480	680 to 900	-	25	60	60		
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	C	8	550	750 to 1000	20	20	-	-	是	是
		H	13.5	530				100	60		
		P	75	530	730 to 930	25	25				
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	C	8	550	750 to 1000	20	20	-	-	是	是
		H	13.5	530				100	60		
		P	75	530	730 to 930	20	20				
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	P	75	530	730 to 930	25	25	100	60	是	是
X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	C	8	650	800 to 1050	20	20	-	-	是	是
		H	13.5	550	750 to 1000	20	20	100	60		
		P	75	550							

帮助

?	帮助页
≡	目录页
←	上一页
→	下一页
BACK	返回

关于国际不锈钢论坛 (ISSF)

国际不锈钢论坛 (ISSF) 是非营利研究与开发机构, 1996年成立, 是国际不锈钢行业的联络处。

成员有哪些?

国际不锈钢论坛 (ISSF) 有两类成员: 公司成员和附属成员。公司成员是指不锈钢生产商 (全能工厂和单轧厂)。附属成员是指国家或地区不锈钢工业协会。国际不锈钢论坛 (ISSF) 现在有65名成员, 分布在25个国家。这些成员的不锈钢生产量占总产品量的80%。

发展前景

不锈钢为日常生活提供可持续性解决方案。

更多信息

如需了解关于国际不锈钢论坛 (ISSF) 的更多信息, 请访问我们的网站worldstainless.org。

鸣谢

国际不锈钢联盟特别感谢以下企业和个人在编写本手册过程中给予的帮助:

Bernd Beckers (奥托昆普), Eric Chauveau (法国优劲特), Amélie Fánica (Industeel), Dominique Ferrière (法国优劲特), Luis Peiro Hergueta (阿塞里诺克斯), Mitsuo Ikeda (ISSF), Nina Lappalainen (奥托昆普), Carole Lecomte (安普朗), Didier Paul (Industeel), Nicolas Renaudot (法国优劲特), Benoît Van Hecke (国际镍协会), 以及其他等人的帮助和支持。

特别感谢Jo Claes (ISSF) 对该手册的精心设计。

感谢Gary Coates (国际镍协会)、Nicole Kinsman (国际铝业协会) 和 Luis Peiro Hergueta (Acerinox) 对该手册草案进行评议。

感谢钟绍良首席代表 (世界钢铁协会北京代表处) 对该手册进行中文翻译并校正。

联系我们

issf@issf.org

+32 2 702 89 00

声明

国际不锈钢论坛认为所提供信息在技术上是正确的。但对于因使用本手册所含信息导致的损失、损害或人身损伤的全部或部分责任, 国际不锈钢论坛及其成员、员工和顾问宣布免责。

worldstainless.org