

宋文杰 等编著



APPLICATION
TECHNOLOGY
OF 2205 DUPLEX
PHASE STAINLESS
STEEL IN KELA-2
PROJECT

2205

双相不锈钢

在克拉2工程中的
应用技术

石油工业出版社

2205 双相不锈钢

在克拉 2 工程中的应用技术

**APPLICATION TECHNOLOGY OF 2205 DUPLEX
PHASE STAINLESS STEEL IN KELA - 2 PROJECT**

宋文杰 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是在总结 2205 双相不锈钢在克拉 2 工程应用研究成果的基础上,参考和引用了一些国内外最新研究成果编写而成。本书的论述目标着眼于工程应用,不多涉及理论问题,主要包括 2205 双相不锈钢的组织转变行为、力学性能、耐腐蚀性能、现场焊接工艺,以及在克拉 2 工程中的应用和经验,并且介绍了 2205 双相不锈钢复合板的应用情况。

本书可为 2205 双相不锈钢在石油、天然气、化工等领域的工程应用提供指导,也可作为从事双相不锈钢研究的科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

2205 双相不锈钢在克拉 2 工程中的应用技术/宋文杰等编著.
北京:石油工业出版社,2007. 11

ISBN 978 - 7 - 5021 - 6269 - 6

I. 2...

II. 宋...

III. 不锈钢 - 应用 - 石油管道 - 管道工程 - 新疆

IV. TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 150418 号

2205 双相不锈钢在克拉 2 工程中的应用技术

宋文杰 等编著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:9 插页:2

字数:223 千字 印数:1—1000 册

定价:40.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《2205 双相不锈钢在克拉 2 工程中的应用技术》

编 写 组

组 长：宋文杰

副 组 长：罗世芳 王天祥 魏 斌

成 员：单 华 白真权 苑秀杰 宋中华 王景利

朱力挥 林冠发 张 强 尹成先 田希银

陈朝辉 李为卫 陈宏伟 赵国仙 李 斌

李平全 王胜雷 庄传晶 汤晓勇 刘 武

黄 锬 王金山 陈海生 吴 震 王海英

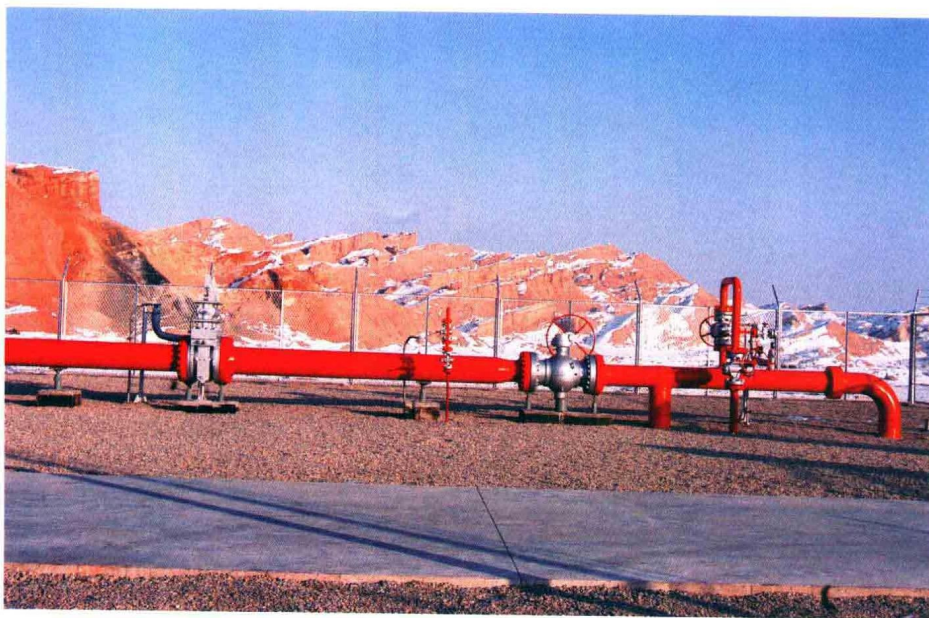


图1 2205 双相不锈钢现场集输管线



图2 2205 双相不锈钢现场管汇



图3 克拉2气田中央处理一厂俯瞰



图4 克拉2气田中央处理一厂低温分离器

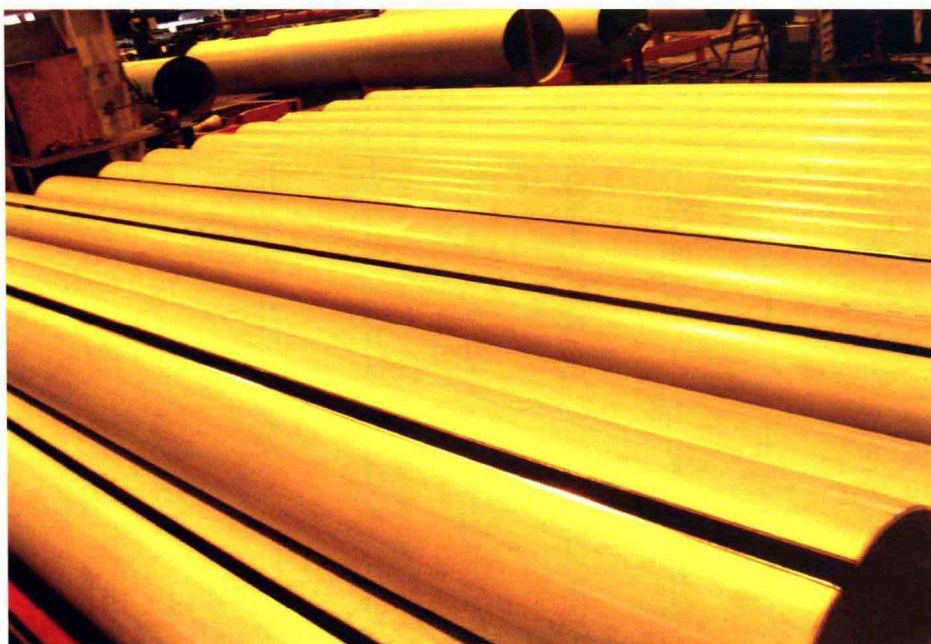


图 5 2205 双相不锈钢外防腐层



图 6 2205 双相不锈钢外防腐层工厂加工



图7 2205 双相不锈钢管线现场施工



图8 2205 双相不锈钢管线现场焊接

前 言

举世瞩目的西气东输工程规模宏大,具有重大政治和经济意义。克拉2气田是西气东输工程的主力气源地,探明天然气储量 $2840 \times 10^8 \text{m}^3$,是我国目前储量最大、特高丰度的大型整装优质气田。克拉2气田以其丰富而优质的天然气资源,促成了“西气东输”工程的建设,建成了横贯我国东西大陆4000km的能源大动脉,2004年12月1日,克拉2气田一次投产成功,12月30日,西气东输工程正式全线商业运营。

克拉2气田地层水 Cl^- 浓度高达100677mg/L,天然气中 CO_2 含量0.72%(摩尔分数),集气干线 CO_2 分压高达0.1MPa,最高工作温度80℃。由于克拉2气田苛刻的腐蚀环境和集输管网重要的战略意义,集输管道和站内接触原料气的部分设备和阀门选用了2205双相不锈钢,用量达到5226t,占全球2004年2205双相不锈钢产量的1/3。

2205双相不锈钢是当今世界最先进的高级耐腐蚀管材之一。2205双相不锈钢含有约22%Cr,5%Ni,3%Mo和0.15%N(质量分数,下同),金相组织是由约50%(体积分数)的铁素体(α 相)和约50%的奥氏体(γ 相)组成的双相组织。奥氏体的存在,降低了高铬铁素体钢的脆性,防止了晶粒长大倾向,提高了铁素体钢的韧性和可焊性。铁素体的存在,提高了Cr-Ni奥氏体钢的屈服强度,同时使钢具有抗应力腐蚀及焊接时热裂倾向小等特点。合金成分和显微组织特征决定了2205双相不锈钢是一种具有较高机械性能和优良的耐 Cl^- 和 CO_2 腐蚀性能的钢种,具有良好的抗均匀腐蚀、点蚀和应力腐蚀开裂的能力,而且价格较镍基合金便宜,故近年来在石油、化工、造纸和能源工业等领域中的用量急速增加。

克拉2气田在产能建设中,大量引进和使用2205双相不锈钢管材,是一次大胆选用新材料、新技术、新工艺的突破,引起了国内外的惊叹。克拉2气田集输管网工程采用2205双相不锈钢在国内是史无前例的。然而对于其相比比例的控制、韧性指标的确定以及脆性析出相的验收标准、不同腐蚀环境中各项性能指标的确定、焊接工艺和规范的制定等存在很多疑问,而且由于没有工程应用经验和研究成果可供参考,在工程建设初期,面临严峻的考验和挑战。

为此,中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司(以下简称塔里木油田分公司)和中国石油天然气集团公司管材研究所(以下简称管材研究所)的技术人员开展了大量的技术研究工作。研究了2205双相不锈钢在气田腐蚀环境中母材和焊缝的耐点腐蚀、应力腐蚀、晶间腐蚀、缝隙腐蚀和均匀腐蚀的能力,确定了正确的两相比比例和不同环境中的韧性指标以及脆性相的含量,并以此为依据建立了相对于不同环境的材料耐腐蚀性能推荐指标。2205双相不锈钢管材焊接工艺十分复杂,质量要求非常严格。焊接一道焊口,要经过在管内安放气体保护装置、充入氩气、排放氧气、氩弧焊、冷却、手工焊等10多道工序才能完成,焊接对风速、温度有严格的标准,各项指标必须控制在规定范围内,焊接全部在防潮棚内进行,一道大口径管材需要4~5h才能完成,焊口必须100%进行探伤检查。

管材研究所先后对2205双相不锈钢母材和焊缝的两相比比例、脆性析出相、各种韧性指标以及韧脆转变温度进行了大量试验研究,确定了现场环境中各种性能指标的参数,为油田现场订货和施工提供技术支持。塔里木油田分公司对这项工程也进行了精心准备,培训焊工,开展

焊前练兵;制作防潮棚,购置专用设备。严格进行质量检查,经过反复试验,终于攻克了这项世界级的焊接难题,管线焊接一次合格率达 98%,超过国际行业标准,成为 2205 双相不锈钢管材在油田应用的成功范例。这对于今后国内使用 2205 双相不锈钢具有重要的指导意义。

2205 双相不锈钢管材在克拉 2 气田的大胆选用,是中国管道建设的历史性突破,可保证气田集气管线安全使用长达 30 年而不用维修和更换,将国内管道防腐的水平和使用寿命提高到了一个新的水平。

本书以克拉 2 工程中 2205 双相不锈钢应用研究成果为基础,参考和引用了一些国内外最新研究文献,结合管材研究所在石油管工程领域多年的研究成果编撰而成。本书的目标是着眼于工程应用,不多涉及理论问题,主要包括 2205 双相不锈钢的组织转变行为、力学性能、耐腐蚀性能、现场焊接工艺,以及在克拉 2 工程中的应用和经验,并且介绍了 2205 双相不锈钢复合板的应用情况。

本书是关于 2205 双相不锈钢在国内石油天然气领域工程应用的第一本著述,它的出版对 2205 双相不锈钢在我国石油工业的应用具有重要参考价值。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 双相不锈钢概述	(1)
1.1.1 双相不锈钢的优点	(1)
1.1.2 双相不锈钢的缺点	(2)
1.2 国内外双相不锈钢的发展概况	(2)
1.2.1 国内外双相不锈钢的发展	(2)
1.2.2 22Cr 双相不锈钢在国内的发展	(3)
1.3 双相不锈钢在石油工业的应用	(4)
1.3.1 低浓度氯化物的环境	(5)
1.3.2 海水环境	(5)
1.3.3 酸性油气井	(6)
1.3.4 苛刻腐蚀环境	(6)
1.4 22Cr 双相不锈钢在新疆克拉2气田的应用	(7)
1.4.1 克拉2气田概况	(7)
1.4.2 克拉2气田的腐蚀环境	(7)
1.4.3 22Cr 双相不锈钢在克拉2气田的应用	(8)
第2章 双相不锈钢的成分、组织和转变	(9)
2.1 化学成分	(9)
2.2 22Cr 双相不锈钢组织分析	(10)
2.2.1 材料及分析方法	(10)
2.2.2 法兰组织	(10)
2.2.3 管道管体组织	(10)
2.2.4 板材组织	(10)
2.3 双相不锈钢中的相	(12)
2.3.1 正常的双相不锈钢金相组织	(12)
2.3.2 双相不锈钢的金属中间相	(12)
2.4 热处理对22Cr 双相不锈钢组织结构的影响	(13)
2.4.1 试验方法	(15)
2.4.2 原始板材的显微组织	(15)
2.4.3 固溶处理温度对显微组织的影响	(16)
2.4.4 时效处理温度和时间对脆性析出相的影响	(17)
2.4.5 固溶处理温度对显微硬度的影响	(18)
2.5 脆性相的消除方法	(19)
2.5.1 双相不锈钢的脆性	(19)
2.5.2 脆性的防止方法	(19)

2.6 双相不锈钢的焊缝组织	(20)
2.6.1 焊件母材的组织	(20)
2.6.2 焊缝中心组织	(20)
2.6.3 焊缝靠近融合线组织	(21)
第3章 22Cr 双相不锈钢的力学性能	(24)
3.1 概述	(24)
3.2 拉伸性能	(24)
3.2.1 拉伸试样	(24)
3.2.2 拉伸性能	(25)
3.2.3 拉伸断裂机理	(29)
3.3 冲击性能	(33)
3.3.1 冲击试样	(33)
3.3.2 冲击试验结果	(34)
3.3.3 关于韧脆转变温度	(34)
3.3.4 取样方向对冲击韧性的影响	(36)
第4章 22Cr 不锈钢的耐腐蚀性能	(38)
4.1 22Cr 双相不锈钢电化学腐蚀特点	(38)
4.1.1 试验方法	(38)
4.1.2 腐蚀溶液	(38)
4.1.3 表面除膜对极化曲线的影响	(39)
4.1.4 恒电位极化行为	(40)
4.1.5 HNO ₃ 溶液中腐蚀体系的电化学行为	(40)
4.1.6 对比分析	(42)
4.1.7 不同温度下的极化曲线	(42)
4.1.8 交流阻抗	(44)
4.2 抗均匀腐蚀性能	(47)
4.2.1 均匀腐蚀机理——两相的选择腐蚀问题	(47)
4.2.2 试验材质	(48)
4.2.3 试验设备和方法	(49)
4.2.4 试验结果与评述	(50)
4.3 耐孔蚀性能	(51)
4.3.1 孔蚀抗力当量值 <i>PRE</i> 和合金元素对孔蚀的作用	(51)
4.3.2 组织的影响	(55)
4.3.3 临界点蚀温度	(58)
4.3.4 点蚀实验的评定方法	(58)
4.3.5 恒电位法测量 <i>CPT</i>	(58)
4.3.6 动电位法测量 <i>CPT</i>	(58)
4.3.7 点蚀形貌	(59)
4.3.8 模拟溶液高压釜浸泡法	(61)
4.3.9 22Cr 双相不锈钢和其他不锈钢的耐孔蚀性能比较	(62)

4.4	耐缝隙腐蚀性能	(62)
4.4.1	缝隙腐蚀机制及缝隙腐蚀试验的评定方法	(62)
4.4.2	试验方法	(65)
4.4.3	试验结果	(65)
4.4.4	结论	(66)
4.4.5	几种双相不锈钢的耐缝隙腐蚀性能比较	(66)
4.5	耐应力腐蚀性能	(67)
4.5.1	应力腐蚀试样与试验方法	(68)
4.5.2	试验结果	(70)
4.5.3	试验结论	(71)
4.5.4	双相不锈钢在各种介质中的应力腐蚀敏感性	(71)
4.5.5	环境因素对应力腐蚀的影响	(74)
4.6	耐晶间腐蚀性能	(75)
4.7	抗腐蚀疲劳性能	(76)
第5章	22Cr 双相不锈钢的焊接	(77)
5.1	实验室焊接试验	(77)
5.1.1	试验材料	(77)
5.1.2	试验过程及结果	(77)
5.1.3	试验结论	(79)
5.2	焊接材料的优选	(79)
5.2.1	试验材料	(81)
5.2.2	试验过程及结果	(81)
5.2.3	试验结论	(81)
5.3	焊接保护气体和背面保护气体的选择	(82)
5.3.1	试验材料	(82)
5.3.2	试验过程及结果	(82)
5.3.3	试验结论	(84)
5.4	焊接方法介绍	(85)
5.4.1	双相不锈钢的工艺可焊性	(85)
5.4.2	双相不锈钢的使用可焊性	(86)
5.5	焊接工艺参数的选择及优化	(87)
5.5.1	试验材料	(88)
5.5.2	试验过程及结果	(88)
5.5.3	试验结论	(90)
5.6	焊缝组织的分析检测	(90)
5.6.1	侵蚀试剂的选择	(90)
5.6.2	相比例检测方法	(91)
5.6.3	焊缝的组织类别	(91)
5.6.4	焊接热影响区的相比例检测	(92)
5.7	焊缝超声波探伤衰减补偿试验	(93)

5.7.1	试样	(93)
5.7.2	反射体的加工	(94)
5.7.3	检测试验	(94)
5.7.4	试验结论	(95)
5.8	焊工培训	(95)
5.8.1	焊接不合格情况分析	(96)
5.8.2	不合格原因分析	(97)
5.8.3	改进措施	(99)
5.9	焊接接头抗腐蚀性能试验	(99)
5.9.1	试验要求	(99)
5.9.2	试样	(99)
5.9.3	模拟环境介质的腐蚀试验	(100)
5.9.4	FeCl ₃ 溶液的腐蚀试验	(103)
5.9.5	结论及建议	(104)
第6章	22Cr 双相不锈钢焊口内氧化层的去除	(105)
6.1	22Cr 不锈钢焊口内氧化层对腐蚀的影响	(105)
6.1.1	试样	(105)
6.1.2	腐蚀环境	(105)
6.1.3	试验装置与方法	(105)
6.1.4	试验结果	(105)
6.2	酸洗工艺	(106)
6.2.1	试验方案	(107)
6.2.2	试验设备	(108)
6.2.3	酸洗试验方案	(108)
6.2.4	试验流程	(109)
6.3	酸洗工艺研究	(109)
6.3.1	酸洗温度和时间的影响	(109)
6.3.2	氧化测定对酸洗工艺的影响	(109)
6.3.3	用 NH ₄ HF ₂ 代替 HF 的影响	(110)
6.3.4	酸洗溶液终点的确定	(110)
6.4	酸洗对材料表面成分和形貌的影响	(110)
6.4.1	酸洗造成的腐蚀失重	(110)
6.4.2	腐蚀前后试样 Cr 的分布对比	(113)
6.4.3	酸洗对材料表面形貌的影响	(115)
6.5	结论	(115)
第7章	22Cr 双相不锈钢复合板	(116)
7.1	国内外不锈钢复合材料的发展	(116)
7.2	生产工艺	(117)
7.2.1	以爆炸焊接直接生产不锈钢中板	(117)
7.2.2	利用“爆炸焊接坯+轧制”的方法,制造冷轧双面复合板	(117)

7.2.3 不锈钢复合板的热处理	(117)
7.3 复合板性能	(118)
7.3.1 力学性能	(119)
7.3.2 冷弯性能	(119)
7.3.3 其他与不锈钢复合板生产相关的国家标准、行业标准	(119)
7.4 爆炸复合板复合界面的微观组织	(119)
7.4.1 复合界面形态	(120)
7.4.2 复合界面的微观组织	(120)
7.4.3 复合界面两侧显微硬度测量	(122)
7.4.4 小结	(122)
7.5 复合板的焊接工艺	(123)
7.5.1 焊接特点	(123)
7.5.2 焊接工艺	(123)
第8章 22Cr 双相不锈钢的应用	(127)
参考文献	(129)

第1章 绪 论

1.1 双相不锈钢概述

双相不锈钢是含有铁素体和奥氏体两种组织结构的不锈钢,由于它结合了铁素体不锈钢耐氯离子腐蚀、高强度的特性以及奥氏体不锈钢的优良韧性和易焊接的优点,因而具有独特的机械性能和化学特性,被广泛应用于含有氯离子的加工业、石油化工、造纸、化肥以及海水的环境等。

双相不锈钢理想的组织是铁素体和奥氏体各占 50%,实际生产过程中,综合考虑各种合金元素的作用,通过调整各种元素的配比,来获得理想的组织和性能。母材中铁素体相比比例的范围为 40% ~ 60%,焊缝金属及热影响区中铁素体相比比例的范围控制在 30% ~ 60%。

根据两相组织的特点,通过正确控制化学成分和热处理工艺,将奥氏体不锈钢所具有的优良韧性和焊接性与铁素体不锈钢所具有的较高强度和耐氯化物应力腐蚀性能结合在一起,使双相不锈钢兼有铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢的优点。正是这些优越的性能,使得双相不锈钢作为可焊接的结构材料发展十分迅速,自 1980 年以来,已成为和马氏体型、奥氏体型以及铁素体型不锈钢并列的一个钢类。

1.1.1 双相不锈钢的优点

双相不锈钢的基本优点如下:

(1) 含铬量为 18% ~ 22% 的双相不锈钢在低应力下有良好的耐中性氯化物应力腐蚀性能。一般应用在 70℃ 以上中性氯化物溶液中的 18-8 型奥氏体不锈钢容易发生应力腐蚀破裂,在微量氯化物及硫化氢的工业介质中用这类不锈钢制造的热交换器、蒸发器等设备都存在着产生应力腐蚀破裂的倾向,而双相不锈钢却有良好的抵抗能力。例如含 18% Cr 的 00Cr18Ni5Mo3Si2 钢耐应力腐蚀的典型介质条件是: $\text{Cl}^- < 1000\text{mg/L}$, $T < 150^\circ\text{C}$, $\text{pH} \geq 7$, 或 H_2S 浓度约为 5000mg/L, Cl^- 浓度约为 30mg/L, $T < 150^\circ\text{C}$, $\text{pH} \geq 7$ 。

(2) 含钼双相不锈钢有良好的耐孔蚀性能。在具有相同的孔蚀当量值 ($PRE = \text{Cr}\% + 3.3\% \text{Mo} + 16\% \text{N}$) 时,双相不锈钢与奥氏体不锈钢的临界孔蚀电位相近。含 18% Cr 的双相不锈钢耐孔蚀性能与 AISI 316L 相当。含 25% Cr 的尤其是含氮的高铬双相不锈钢的耐孔蚀和缝隙腐蚀性能超过了 AISI 316L。

(3) 有良好的耐腐蚀疲劳和磨损腐蚀性能,在某些腐蚀介质条件下被用于泵、阀等设备中。

(4) 综合力学性能好,有较高的强度和疲劳强度,屈服强度是 18-8 型奥氏体不锈钢的 2 倍。

(5) 可焊性良好,热裂倾向小。一般焊前不需预热,焊后不需热处理,可与 18-8 型奥氏体不锈钢或碳钢等异种钢焊接。

(6) 含低铬 (18% Cr) 的双相不锈钢热加工温度范围比 18-8 型奥氏体不锈钢宽,抗力小,

可不经过锻造,直接轧制开坯生产钢板。含高铬(25% Cr)的钢则比奥氏体不锈钢热加工困难。

(7)与奥氏体不锈钢相比,导热系数大,线膨胀系数小,适合用作设备的衬里和生产复合板,也适用于制造热交换器的管芯。

1.1.2 双相不锈钢的缺点

双相不锈钢还存在如下缺点:

- (1)与奥氏体不锈钢比较,耐热性较低,一般控制在 300℃ 以下的工作环境中使用。
- (2)冷加工比 18-8 型奥氏体不锈钢的加工硬化效应大,在管、板承受变形初期,需施加较大的力才能变形,管、板所产生的内应力也较大。
- (3)存在中温脆性区(如 σ 相、475℃ 脆性),对热处理及焊接不利。
- (4)含 25% Cr 的双相不锈钢比奥氏体不锈钢热加工困难。

1.2 国内外双相不锈钢的发展概况

1.2.1 国内外双相不锈钢的发展

双相不锈钢的发展开始于 20 世纪 30 年代,1935 年在法国获得第一个专利。双相不锈钢已经发展了 3 代,第一代双相不锈钢以美国 20 世纪 40 年代开发的 329 钢为代表,其中含高铬和高钼,耐局部腐蚀性能好,但含碳量较高(0.1%)。第二代双相不锈钢,不论是 18Cr 型,还是 22Cr 和 25Cr 型,大多数属于超低碳型,并且含有钼、铜或硅等提高耐蚀性的元素。针对酸性油井管及管线用钢,瑞典开发出了 SAF2205,已纳入美国的 ASTM A789 和 A790 标准。日本有近 10 个厂家都在生产双相不锈钢,应用范围很宽,包括工业用水及海水热交换器、尿素高压设备和硝酸设备等。法国有 URANUS 系列,英国有 ZERON 铸钢系列,德国也有纳入标准的系列牌号。20 世纪 80 年代后期发展的超级双相不锈钢(Super DSS)是属于第三代双相不锈钢,牌号有 SAF2507,UR52N⁺ 和 Zeron100 等,这类钢的特点是含碳量低(0.01%~0.02%),含钼高和含氮低(4% Mo,0.3% N),钢中铁素体含量 40%~45%,此类钢具有优良的耐孔蚀性能,孔蚀抗力当量值($PRE = Cr\% + 3.3\% Mo + 16\% N$)大于 40。中国自 20 世纪 70 年代中期开始发展双相不锈钢,冶金部钢铁研究总院最早从事这方面的工作,00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈钢已纳入国家标准 GB 1220,GB 3280 和 GB 4237。20 世纪 80 年代初期,在分析国外双相不锈钢发展的基础上,研究了氮元素在改善双相不锈钢耐应力腐蚀和孔蚀的机制,并且结合国内各特殊钢厂生产含氮不锈钢的成熟经验,确定了以发展含氮双相不锈钢为主的研究方向,至今已有耐应力腐蚀、耐孔蚀与缝隙腐蚀、耐腐蚀疲劳和耐磨损腐蚀的简单双相不锈钢系列牌号。表 1-1 列出了国外双相不锈钢的主要代表牌号。

表 1-1 国外双相不锈钢的主要代表牌号

类别	标准	商业牌号	元素含量,%					
			C	Cr	Ni	Mo	N	Cu
低合金型	UNS S32304	SAF2304	0.03	23	4	0.1	0.1	0.2
	W. Nr. 4362	UR35N						
	SS 2327							