

# 2205 双相不锈钢焊接工艺及质量控制分析

张俊丰

(中国海洋石油集团有限公司能源发展装备技术公司 天津 300450)

**摘要:** 2205 双相不锈钢是目前应用最普遍的双相不锈钢。不同焊接工艺及质量控制措施对焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能的影响极大,为了提高焊缝合格率,给施工项目带来更大经济效益,本文以某海上石油平台的 2205 双相不锈钢工艺管线焊接作业为例,通过分析原材料和焊材的化学成分,采取合理有效的焊接工艺与质量控制措施。经无损检测结果得知,焊接合格率达到 100%,焊缝质量符合项目质量要求。

**关键词:** 2205 双相不锈钢; 焊接工艺; 质量控制

## 0 引言

双相不锈钢在室温下固溶体中奥氏体和铁素体约各占半数,兼有两相组织特征<sup>[1]</sup>。2205 双相不锈钢作为第二代双相不锈钢,广泛应用于石油天然气工业和海洋工程等领域。近年来,2205 双相不锈钢发展迅猛应用广泛,在双相不锈钢的应用中可以占到 80%左右<sup>[2]</sup>。因此,对 2205 双相不锈钢的焊接研究可以了解双相不锈钢的整体特性。2205 双相不锈钢焊接质量主要受不锈钢原材料、填充金属和气体保护等因素影响,通过对上述影响因素进行研究,能够确定 2205 双相不锈钢的最佳焊接质量途径。本文对 2205 双相不锈钢焊接工艺及质量控制进行分析。

## 1 2205 双相不锈钢化学成分与机械性能

双相不锈钢是不锈钢家族的重要组成部分,集耐腐蚀、高强度和易加工等优异性能于一体。双相不锈钢的金相组织为铁素体+奥氏体,两相约各占一半<sup>[3]</sup>,不但具有奥氏体不锈钢的良好塑性和韧性,还保留铁素体不锈钢的高强度和耐氯化物应力腐蚀性,因此,被广泛应用于石油化工和海洋工程等行业<sup>[4]</sup>。2205 双相不锈钢(00Cr22Ni5Mo3N, S31803)是应用最广泛的一种,密度均为 7.8g/cm<sup>3</sup>,线膨胀系数 13.5×10<sup>-6</sup>/℃,导热系数在 14~20W/(m·℃)范围内<sup>[5]</sup>。2205 双相不锈钢是一种含 N 的不锈钢, N 的存在能够提高 2205 双相不锈钢焊缝中奥氏体含量,强化焊缝腐蚀的能力, N 的质量分数在 0.14%和 0.2%之间,当 N 的质量分数大于 0.2%时,会导致焊缝奥

氏体的强度大于铁素体<sup>[6]</sup>。除含有 N 之外,2205 双相不锈钢还包括 C、Mn、P、Cr、S、Si、Ni、Mo 等化学成分,具体含量见表 1。

表 1 2205 双相不锈钢化学成分的质量分数 /%

化学成份	C	Mn	P	Cr	S	Si	Ni	Mo	N
最小	—	—	—	21.0	—	—	4.5	2.9	0.14
最大	0.03	2.0	0.03	23.0	0.015	1.00	6.5	3.5	0.2

2205 双相不锈钢属高强不锈钢,取决于产品形式及最终热处理,室温下的机械性能极限见表 2。

表 2 2205 双相不锈钢机械性能

序号	温度	机械性能参数	指标
1	室温	RP0.2/MPa	450
2	室温	RM0.2/MPa	620
3	室温	A5/%	25.5

## 2 2205 双相不锈钢焊接性分析

2205 双相不锈钢同时具有奥氏体相和铁素体相,具有良好的焊接性能<sup>[7]</sup>。对于 2205 双相不锈钢而言,热影响区的奥氏体相、铁素体相组织的均匀性和两相含量的平衡直接决定其焊接质量。

2205 双相不锈钢的焊接对油污、油脂、湿气、水分等污染敏感,会严重影响材料的抗腐蚀性及其力学性能,因此,要严格控制焊接材料的环境清洁。2205 双相不锈钢的焊接预热会降低焊接热影响区的冷却速度,一般情况下不采用预热。但由于 2205 双相不锈钢快速冷却可促使双相不锈钢组织铁素体化,

增大了腐蚀倾向的敏感性,焊缝冷却速度太快时,焊接可采用预热。

焊接热输入的大小,直接影响大焊缝和热影响区中铁素体的含量。在2205双相不锈钢焊接熔融到冷却过程中,金属从凝固点到1200℃为铁素体组织,1200℃到800℃温度区间铁素体中析出奥氏体,800℃到475℃温度区间可能析出氮化物、碳化物、 $\sigma$ 相等中间相,因此,必须严格控制热输入。热输入太大,Cr、Ni、Mo等合金元素会烧损,机械性能和耐腐蚀性能劣化,且焊接焊缝冷却速度慢,更容易析出氮化物、碳化物、 $\sigma$ 相等中间相;而热输入太小,则冷却速度太快,容易引起耐蚀性降低。当焊接工件较多时,应合理地安排焊接顺序,这样不仅可以提高焊接效率,还能保证焊缝层间温度。

### 3 2205 双相不锈钢焊接工艺

常用的焊接方法都适用于2205双相不锈钢的焊接。如:手工电弧焊(SMAW)、埋弧焊(SAW)、药芯焊丝气体保护焊(MAG)、钨极氩弧焊(GTAW)等<sup>[8]</sup>,适用范围如表3所示,具体使用哪种焊接方法应根据实际情况选择。在2205双相不锈钢的实际焊接中,通常选择钨极氩弧焊(GTAW)+手工电弧焊(SMAW)。

表3 常见焊接工艺的适用范围

序号	焊接工艺	用途	适用位置
1	手工电弧焊	异种钢、双相不锈钢	全位置
2	埋弧焊	双相不锈钢	平焊
3	药芯焊丝气体保护焊	异种钢、双相不锈钢	平焊、全位置
4	钨极氩弧焊	异种钢、双相不锈钢	全位置

由于2205双相不锈钢由铁素体和奥氏体两相组成,为保证焊接质量,应采取一定的焊接原则,主要包括:

(1) 在进行焊接前,做好待焊2205双相不锈钢的预处理工作,尽可能地减少焊接区域的污染;

(2) 合理选择焊接材料,保证焊缝与基材具有相似的性能和耐蚀性;

(3) 通常焊前不预热,但可作低温除湿( $\leq 40^\circ\text{C}$ ),焊后不热处理;

(4) 选用多层多道次焊接,层间温度要控制在100~150℃;

(5) 焊接热输入一般在0.5~2.5kJ/mm,以避免

焊接区域过度加热导致材料组织产生缺陷;

(6) 焊枪和焊道尽量保持不摆动焊接,定位焊要规范,避免盲目起弧对材料表面的擦伤,造成应力腐蚀麻点;

(7) 在焊接时,焊接顺序与奥氏体不锈钢顺序相反,应先焊接介质接触的焊道;

(8) 焊道层间要清理干净,一般采用角向砂轮机将焊道表面清理呈现银白色;

(9) 在焊接完成后,采用退火、固溶等对焊缝进行后处理,提高焊缝的性能和耐腐蚀性。

### 4 2205 双相不锈钢焊接质量控制案例分析

近年来,2205双相不锈钢已成为石油化工设备不可缺少的生产材料,尤其是被应用于海上石油平台的工艺管线上,用于石油、天然气生产及运输。在工艺管线焊接过程中,采用合理的质量控制措施是2205双相不锈钢管线焊接的关键,可以有效提高焊缝合格率,不仅提高了项目施工进度,同时又保证了焊缝质量,为企业带来了巨大的经济效益。下面以某海上石油平台的2205双相不锈钢工艺管线焊接作业为例,制定焊接质量的有效控制措施,从而提高焊缝的性能,保证焊接质量。

#### 4.1 焊接方法及焊材的选择

对于2205双相不锈钢的焊接,手工电弧焊焊接后,熔池熔液黏稠度较大,不适用于打底焊接,易造成未焊透。而全部采用氩弧焊会增加成本和耽误进度,综合考虑到施工的实际需要,本工程焊接工艺选取氩弧焊与手工电弧焊组合焊接(GTAW+SMAW),氩弧打底,手工电弧焊填充盖面。

由上文可知2205双相不锈钢的化学成分,主要有Cr、Mn、Si、Ni、Mo、N元素,其中,Ni、Mn、N是奥氏体形成元素,Cr、Mo、Si是铁素体形成元素。本工程工艺管线使用的2205双相不锈钢化学成分见表4。

根据相近成分原则,选择焊条和焊丝的化学成分要与母材相近。奥氏体含量稍占优势时,不仅可以满足焊接接头的力学性能要求,还可以提高耐蚀性能。因此,要做好焊材的选择。

首先,要对Ni、Mn、N元素进行分析。Ni元素能够保证焊缝在较高抗拉强度下的韧性,同时,降低脆性断裂的倾向;Mn元素能够保证焊缝化学成分和机械性能,并且提高焊缝的低温韧性;N元素虽然

表4 2205双相不锈钢管线化学成分

序号	化学成分	质量分数 /%
1	C	0.0160
2	Mn	0.6900
3	P	0.0260
4	Cr	22.5000
5	S	0.0050
6	Si	0.2400
7	Ni	5.4000
8	Mo	3.1000
9	N	0.1705

也是奥氏体形成元素，但是在焊接高温条件下，N元素会和Cr元素结合形成脆性相，降低焊接接头的耐腐蚀性。

其次，对P元素和S元素进行分析。P元素和S元素对焊接性能而言，属于有害元素。P元素增加焊缝金属的冷脆性，极大降低缺口冲击韧度；S元素增加焊缝金属的热脆性，极易导致焊缝热裂纹和气孔。

因此，为保证焊缝金属性能，焊材的化学成分中，Ni、Mn元素含量应比母材偏高，N、P、S元素含量应低于母材。本工程选用Sandvik22.8.3L焊丝和Sandvik22.9.3LR焊条，焊材的化学成分见表5。

表5 焊材化学成分

Sandvik22.8.3L 焊丝化学成分	质量 分数 /%	Sandvik22.9.3LR 焊条化学成分	质量 分数 /%
C	0.0130	C	0.0300
Mn	1.5100	Mn	0.7000
P	0.0190	P	0.0200
Cr	22.8900	Cr	22.8000
S	0.0005	S	0.0050
Si	0.4700	Si	0.7100
Ni	8.5500	Ni	8.8000
Mo	3.0200	Mo	3.1000
N	0.1550	N	0.1700

## 4.2 焊前准备

由于2205双相不锈钢对污染敏感，为保证焊接接头的抗腐蚀性能和机械性能，施工时需要做好成品保护工作，防止油污、油脂和水分对2205双相不锈钢的污染。本工程采用机械方法对2205双相不锈钢进行下料、坡口加工，坡口型式如图1所示，避免坡口氧化；尺寸、接头形式及装配间隙严格按照要求进行。

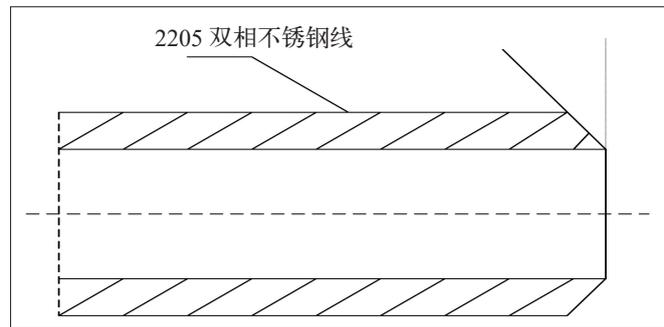


图1 坡口型式示意图

焊接前，坡口两侧用专用的不锈钢砂轮片打磨，同时将管口找齐，误差控制在1mm左右。由于2205双相不锈钢显弱磁性，为避免焊接磁偏吹现象的发生，切勿同一方向长时间重复打磨焊口，影响焊缝金属的熔合。2205双相不锈钢延伸率较小，为避免焊后产生焊接变形，影响管线焊接的直线度，应禁止带强力组对。组对完毕后，管道内部制作全程充氩保护装置，以采用焊接背面进行充氩保护工艺，避免焊缝根部氧化及产生气孔。通常情况下，2205双相钢焊前不需要采用预热，在低温或者湿度大的环境下，必要时可以采取预热。

## 4.3 焊接质量控制

### 4.3.1 定位焊

当工艺管线组对好后，采用较大的焊接热输入进行定位焊。为防止焊缝冷却速度过大，影响焊缝耐腐蚀性，应规定定位焊缝的最小长度。把钨针伸出长度到坡口根部，以保证根部能被焊透；调整好焊接管线的根部间隙，使焊丝可以在焊缝内部灵活摆动。起弧后钨针先在坡口根部一侧停留，熔化后送入第一滴铁水；断开焊丝摆动至另一侧坡口根部，熔化后再送入一滴铁水。利用焊丝拉扯住铁水，将两侧连接在一起，形成第一个熔池，再继续向前摆动。当长度达到要求时，将热量缓慢带至坡口外壁，迅速熄灭电弧，完成一次定位焊焊接。

### 4.3.2 多层多道焊接

由于2205双相不锈钢具有热膨胀系数低、导热性良好等特点，焊接接头不会产生较大残余应力和热裂纹。因此，为提高生产效率，可以适当采用较大线能量。由于线能量大，需要有足够的冷却时间，故应控制层间温度。当层间温度过高时，无法及时逸出的氢气会造成焊缝内部产生氢气孔。为了有效地控制层间温度，采用多层多道焊接。该焊接方式焊缝厚度薄，温度易于控制，保证了层间温度不至于过高。

氩弧焊打底施焊时,焊丝熔化时,为避免高温氧化或产生气孔,不得离开氩气保护区。焊枪运动与送丝速度相适应,确保不会咬边,每一个接头熔合要平滑。焊枪向已焊焊缝倾斜,倾角一般维持在 $35^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ,焊丝则向未焊部分倾斜 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间。焊接时焊枪瓷嘴直接压在坡口内,钨极伸出 $4 \sim 6\text{mm}$ ,端部离坡口根部 $1\text{mm}$ 左右。焊接引弧部位在焊接方向前 $10\text{mm}$ 左右引弧,引弧后先不加焊丝,待根部钝边熔化形成熔池后,即可填丝焊接。

手工电弧焊填充施焊时,全程采用斜拉锯齿焊接操作方式,手的动作要跟着焊条的角度不停变换,速度保持均匀,焊条尽量不做横向摆动,有效降低焊接的残余应力。填充焊道的每一层要做好压道和分布焊道,防止焊道成型差,两个焊道之间有“沟”的现象,咬边、未熔合等缺欠,使焊接饱满。最后填充焊道整体低于管线 $1\text{mm}$ 左右,不要低于太多,避免盖面焊接不便操作。

盖面焊时,一定要掐齐管线两侧的边线,尽量防止出现“咬边”的现象。焊接可采用锯齿形运条法,焊道中间速度稍快,坡口两侧边缘稍作停留,稍微上下颤动。焊条从一侧到另一侧时,中间的电弧稍抬一下,观察整个熔池形状。盖面时要保证焊缝边缘好,表面过渡才能圆滑。盖面接头起焊时,运用预热法施焊,对焊缝起焊处进行预热。然后压低电弧,在原电弧坑 $2/3$ 处连摆 $2 \sim 3$ 次,以达到良好熔合后转入正常焊接。

#### 4.4 焊接质量检查

对项目现场的2205双相不锈钢焊缝进行无损检测,其中,包括100%视觉检查(VT)、100%射线检测(RT)、100%渗透检测(PT)。检测结果全部合格,焊接合格率达到100%,可见,焊接质量控制措施是有效可行的。

## 5 结语

2205双相不锈钢具有良好的力学性能和耐蚀性能,但只有掌握了其焊接特性,并采用适合的焊接工艺和合理的质量控制措施,才能够获得合格的焊

缝。本文结合某海上石油平台的2205双相不锈钢工艺管线的焊接作业,得出以下结论:

(1) 氩弧焊与手工电弧焊组合焊接(GTAW + SMAW)适用于2205双相不锈钢的焊接,既保证了焊接质量,又提高了生产效率,满足工程使用要求。

(2) 对于2205双相不锈钢的焊接材料而言,主要考虑Ni、Mn、N、P、S元素对焊缝性能影响,选择化学成分要与母材相近的焊条和焊丝,保证得到良好性能的焊缝。

(3) 2205双相不锈钢焊接要采用多层多道焊接的方式,有效控制热输入与层间温度,避免焊缝内部产生氢气孔。另外,要正确设置氩气保护装置,防止焊缝根部被氧化,导致气孔缺陷的发生。

## 参考文献:

- [1] 王良,樊林,胡议文,等. 热处理工艺对S31803双相不锈钢组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报,2023,44(01):108-116.
- [2] 潘悦. 2205双相不锈钢及其焊接热影响区应力腐蚀行为及机理[D]. 北京:北京科技大学,2023.
- [3] 万夫伟,郭新芳,赵明,等. S32205双相不锈钢GTAW焊接工艺研究[J]. 焊接技术,2021,50(10):60-62.
- [4] 张心保,岳维恒. 2205双相不锈钢管焊接工艺及接头性能[C]//金属加工杂志社.“伊萨杯”先进焊接技术交流会文集,2021:165-168.
- [5] 周弋琳,陈阿静,赵德龙,等. 2205双相不锈钢焊接工艺及耐腐蚀性能分析[J]. 造船技术,2021(01):57-61.
- [6] 于守海. 2205双相不锈钢薄板GTAW和SMAW焊接接头组织性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [7] 赵猛. 2205双相不锈钢管道焊接接头组织与性能研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2020.
- [8] 孙丹丹. 双相不锈钢S31803的焊接工艺研究[D]. 南京:南京林业大学,2009.

作者简介:张俊丰(1976.11-),男,回族,天津人,高级技师,研究方向:焊接自动化。