

Inconel625复合管焊接工艺的研究

于彩霞 丁秀梅 闫旭奎

【摘要】以压缩机模块项目建造为背景，针对Inconel625复合管的特点，从其化学成分及力学性能入手，对焊接方法、焊前准备、坡口制备及焊接顺序等方面进行了阐述，并进行了Inconel625复合管的焊接试验。通过试验证明在该工艺条件下，能够获得高质量的焊接接头，达到满足项目相关技术要求的目的。

关键词：Inconel625复合管；焊接工艺；焊接性

1. 概述

复合层Inconel625是一种对各种腐蚀介质都具有优良耐蚀性的低碳镍铬钼铌合金。高合金化的Inconel625在大气、天然水、海水、中性盐和碱等弱介质中，基本上无明显腐蚀。在更苛刻的介质中，由于铬的存在，具有好的耐氧化性酸介质及抗高温氧化性，同时镍和钼的组合又耐原性酸介质。高铬、钼含量使该合金具有很好的抗点蚀和缝隙腐蚀能力，而铌的作用是保证合金在焊接过程中稳定而不会被敏化，从而防止随后出现的沿晶开裂。同样，高镍含量保证了不会出现氯离子应力腐蚀开裂。

本文以压缩机模块项目中的Inconel625复合管为例，重点研究了该种复合层的材料特性及焊接质量影响因素，从而为现场施工及检测提供参考。

2. Inconel625复合管的焊接性分析

Inconel625复合管（件）材料由基体（低温碳钢）+衬层（Inconel625材料）复合而成。压缩机模块项目中涉及复合管有API 5L B PSL1+ Inconel625复合层，管径168~356mm，壁厚8.74~15.27mm，Inconel625复合层厚度3mm。低碳钢 API 5L B PSL1与Inconel625的化学成分与力学性能分别如表1、表2所示。由表1和表2可看出，复合管是

由化学成分和物理性能有很大差异，焊接性也有较大区别的两种材料复合而成，焊接要综合考虑因素也随之增多。

（1）Inconel625材料焊接难点 主要包括以下几点：第一，焊接热裂纹。Inconel625 合金具有较高的热裂纹敏感性。热裂纹分为结晶裂纹、液化裂纹和高温失效裂纹。结晶裂纹最容易发生在焊道弧坑处，多半是沿着焊缝中心纵向开裂。液化裂纹多出现在紧靠熔合线的热影响区

表1 API 5L B PSL1与 Inconel625的化学成分（质量分数） (%)

型号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cb+Ta	Co	Mo	Fe	Al	Ti	Ni
Inconel625	0.10	0.50	0.50	0.015	0.015	20-23	3.15-4.15	1.0	8.0-10.0	5.0	0.40	0.40	58.0
API 5L B	0.28	—	1.2	0.030	0.030	—	—	—	—	—	—	—	—

表2 API 5L B PSL1与Inconel625的力学性能

型号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率 (%)
Inconel625	827	414	30
API 5L B	414	241	—

(HAZ)，有的还出现在多层焊的前层焊缝中。高温失效裂纹可能发生在热影响区（HAZ），也可能发生在焊缝中。各种裂纹有时是宏观裂纹，且宏观裂纹中常常伴有微观裂纹，但有时仅有微观裂纹。热裂纹发生是高温状态，常温下不再扩展。

第二，易氧化。Inconel625合金易于氧化，焊接过程中要求做好正面和背面双重保护，若氧化则会严重降低焊接接头的使用性能，同时氧化所形成的难熔的Cr的氧化物，会进一步使液态焊缝金属的流动性变差，造成焊缝的成形不良。

第三，液态焊缝金属流动性。Inconel625合金液态焊缝金属流动性差，不像低碳钢焊缝金属那样容易浸润展开，即使增大焊接电流也不能改进焊缝金属的流动性，反而起着有害作用，这是镍基合金的固有特性。焊接电流过大不仅会使熔池过热，增加热裂纹敏感性，而且会使焊缝金属中的脱氧剂蒸发，出现气孔；采用SMAW焊接时，过大的电流会使焊条过热并引起药皮脱落，失去保护效果。由于焊缝金属流动性差，不易流到焊缝两边，因此焊接过程采用摆动工艺，以获得良好的焊缝成形，摆动的距离不超过焊条直径的3倍。焊工在摆动到每道焊缝的极限位置时要稍停顿一下，以有足够的时间使熔化的焊缝金属填满，进而克服可能引起的咬边缺陷；同时，焊接时要尽可能采用短的电弧。

第四，热输入影响。采用高热输入焊接 Inconel625合金会产生

生不利的影响，在热影响区会产生一定程度的退火和晶粒长大。高热输入可能产生过度的偏析、碳化物的沉淀或其他有害的冶金现象，这就可能引起热裂纹或降低耐蚀性。

(2) 复合管的焊接难点分析 Inconel625合金与低温碳钢在化学成分上差异很大，在焊接过程中会产生合金元素稀释，以及由于成分的变化而导致的组织和性能变化。在物理性能如线膨胀系数、热导率等方面两者同样差异很大，焊接热量不易散出，易造成过热引起晶粒粗大；同时易产生较大的焊接应力，增加热裂纹倾向。

为了解决复合层稀释问题，要使用合金成分含量高的焊接材料，要尽量使用浅熔深的焊接方法，同时掌握必要的操作要领，避免合金元素的进一步稀释。

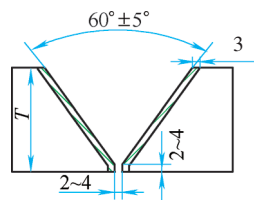
3. 焊接工艺设计

(1) 焊接方法及焊接材料的选择 根据Inconel625复合管的焊接性分析，为避免焊接过程中造成根部焊道Fe的稀释，要先采用钨极氩弧焊预堆3mm NiCrMo—3型焊材（见附图），之后采用钨极氩弧焊打底，填充、盖面层采用焊条电弧焊的焊接方法。

选用的焊接材料为 $\phi 2.4\text{mm}$ 的 UTP A 6222 Mo 焊丝、 $\phi 3.2\text{mm}$ 的 UTP 6222 Mo的焊条。焊接材料所对应的主要化学成分如表3所示。

4. 焊接工艺评定

(1) 焊前准备 Inconel625复合管可以采用机械方式制备坡



Inconel625复合管焊前预堆示意

口。因本次评定使用的管材壁厚小，提前预堆有效避免了Fe元素稀释，设计合适的坡口形式，同时提高焊接效率和减少Ni基焊材的消耗成本，所以决定采用附图所示的坡口形式。坡口加工完成后应进行外观检查，不得有裂纹和分层，否则应进行修补。坡口及其两侧各50mm范围内应用机械方法及有机溶剂进行表面清理，清除表面的油污、锈迹、金属屑、氧化膜及其他污物。

(2) 焊接顺序及焊道的布置 坡口内预堆采用氩弧焊的方法，为了保证焊接质量，至少预堆3mm；采用氩弧焊打底时为了保证根部焊道成形和避免焊条电弧焊填充时出现烧穿现象，打底焊至少要两层，焊缝厚度至少达到6.4mm后，再采用焊条电弧焊填充。

(3) 焊接参数 具体焊接参数如表4所示。

焊接过程中的注意事项如下：第一，打底焊道完成后应及时进行填充焊接，焊缝应尽量连续一次完成。若因故停焊，应采取防止产生裂纹的措施，缓慢降低焊缝温度。重新施焊前应检查确认无裂纹后，方可按原工艺要求继续施焊。

第二，在焊接收弧时一定要填满弧坑，在收弧处多停留一会，避免产生弧坑裂纹，如出现

弧坑裂纹，应立即打磨处理。

第三，为了保证Inconel625复合管焊接性，焊接热输入量的控制非常重要，焊接电流不宜过大，宜采用快速多道焊以减轻焊道过热，并通过多道焊的重新加热作用细化晶粒。多道焊时要控制层间温度，应采用小热输入施焊，尽量控制在1.8kJ/mm以下，多层焊层间温度<100℃，避免接头过热。

5. 试验结果与分析

焊接工艺评定采用 ASME Section IX 及 ASME B31.3 标准，各项性能试验按照标准及业主要求进行。试验项目包括无损检测、常规的缩减断面拉伸试验、弯曲试验、腐蚀试验、宏观与硬度试验。

(1) 无损检测 焊接结束后对试件进行外观检测，焊缝及热影响区未发现咬边、表面气孔、裂纹及夹渣等缺陷，焊缝余高0.5~1.5mm，焊缝与母材圆滑过渡；试件经射线探伤也未发现裂纹、未熔合、未焊透及夹渣等缺陷，焊接接头质量满足标准要求。

(2) 拉伸试验 将拉伸试样固定在WE—100型万能试验机上，然后对其施加拉应力，造成试样轴向伸长直到破断为止，是衡量材料强度的主要指标。拉伸试验结果如表5所示。根据试验结果，可看出拉伸试验结果满足规范要求。

(3) 弯曲试验 弯曲试验是考核材料承受变形的能力，将加工好的标准弯曲试样在WE—100型万能试验机上进行弯曲试验。按照规范要求取4个侧弯试

样用40mm的压头直径进行弯曲试验，弯曲角度180°，在弯曲后的试样表面无裂纹且在任何方向上无长度>3mm的其他缺陷，试验结果满足规范要求。

(4) 宏观及硬度试验 焊缝宏观断面检查发现焊缝完全焊透，无裂纹等缺陷。分别对焊接接头的焊缝金属、热影响区和母材的硬度进行测量，硬度试验结果如表6所示。

(5) 腐蚀试验 进行ASTM G 48 A类腐蚀试验，试验合格。

6. 结语

采用钨极氩弧焊预堆及打底、焊条电弧焊填充、盖面，配合UTP A 6222 Mo焊丝、UTP 6222 Mo焊条焊接Inconel625复合管，在合理的焊接工艺条件下，能够得到高质量的焊接接头。焊接工艺评定试验的各项性能指标均符合技术要求，基本掌握了Inconel625复合管钢的钨极氩弧焊打底，焊条电弧焊填充、盖面的管系焊接技术，为今后指导生产提供了宝贵经验。

表3 焊材的化学成分（质量分数） (%)

型号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
UTP A 6222 Mo	0.01	0.04	0.03	0.004	0.004	22.2	64.3	9.3
UTP 6222 Mo	0.02	0.36	0.4	0.005	0.006	22.7	63.6	8.8

表4 焊接参数

焊道编号	焊接方法	焊材型号	规格 φ/mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹
预堆	GTAW	UTP A 6222 Mo	2.4	120~150	15~16	80~125
根部	GTAW	UTP A 6222 Mo	2.4	100~120	14~15	60~80
填充及盖面	SMAW	UTP 6222 Mo	3.2	130~145	17~18	85~110

表5 拉伸试验结果

试件编号	拉伸强度/MPa	断裂位置
1	572	母材
2	565	母材

表6 硬度试验结果

取样位置	硬度值 (HV10)	
焊缝金属	155~231	
热影响区	179~261	
母材	254~330	

参考文献：

- [1]陆世英．超级不锈钢和高镍耐蚀合金[M]．北京：化学工业出版社，2012．

作者简介：于彩霞等，大连中远船务工程有限公司。

MW 20160419