

超高压蒸汽 A335-P22 材质在管道焊接中的应用

刘建国 王银飞 王健 田文冲

中石化第十建设有限公司, 山东 青岛 266555

[摘要]在石油化工建设中铬钼耐热钢管道向着大口径、高压输送方向发展,对管道的焊接质量和施工速度的要求也愈来愈高,传统的焊接方法已满足不了短平快施工进度需求,依据高压管道焊接施工特点,采用管道埋弧焊、全位置机动焊、手工气保焊、手工电弧焊进行填充、盖面的组合焊接工艺,结合不同的焊接方法容易出现的焊接质量问题,制定了一套适合 A335-P22 超高压蒸汽管道的焊接工艺和施工工序。该组合焊接施工工艺采用了多种焊接方法,既降低施工成本,提高焊接效率,保证了焊接质量。

[关键词]:耐热钢 P22; 管道下料; 焊接工艺; 管道热处理

DOI: 10.33142/ec.v6i12.10335

中图分类号: TG47

文献标识码: A

Application of A335-P22 Material for Ultra-high Pressure Steam in Pipeline Welding

LIU Jianguo, WANG Yinfei, WANG Jian, TIAN Wenchong

Sinopec Tenth Construction Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266555, China

Abstract: In the construction of petrochemical industry, chromium molybdenum heat-resistant steel pipes are developing towards large-diameter and high-pressure transportation, and the requirements for welding quality and construction speed of pipelines are becoming increasingly high. Traditional welding methods can no longer meet the needs of short and fast construction progress. Based on the characteristics of high-pressure pipeline welding construction, a combination welding process of pipeline submerged arc welding, all position motorized welding, manual gas shielded welding, and manual electric arc welding is adopted for filling and covering. A set of welding processes and construction procedures suitable for A335-P22 ultra-high pressure steam pipelines has been developed based on the welding quality issues that may arise with different welding methods. This combination welding construction process adopts multiple welding methods, which not only reduces construction costs, improves welding efficiency, but also ensures welding quality.

Keywords: heat resistant steel P22; pipeline cutting; welding process; pipeline heat treatment

引言

我公司承揽的某项目炼化一体化乙烯裂解装置超高压蒸汽管道焊接施工中,管道材质耐热钢 A335-P22,其设计温度为 535℃、设计压力为 13MPa。具有施工周期短,焊接任务量大,施工质量要求高的特点,其耐热钢 A335-P22 (化学成分 2.25Cr-1Mo) 国内 12Cr2Mo 属于低合金珠光体耐热钢,合金元素以铬、钼为主组织除珠光体、铁素体外,还有贝氏体。在高温条件下,具有抗氧化性和高温强度以及良好的耐热性能的钢,工艺性能良好,钢材的淬硬性和耐热裂纹倾向较为明显。结合超高压蒸汽管道焊接施工的综合特点,总结出一套行之有效的焊接施工流程,从管段的切割、坡口加工、焊口组对、点固焊、打底焊、工装制作、道间温度、外观检查等工序,在焊接工艺和技术措施焊接质量稳定、施工效率高、节省施工成本、劳动强度低等方面,焊接接头的各项指标都符合焊接施工工艺要求。

1 耐热钢 A335-P22 材质常温下化学成分和力学性能

耐热钢 A335-P22 材质常温下化学成分和力学性能见表 1、表 2。

耐热钢 A335-P22 材质在高温下具有较高的热强性和抗氧化性,耐腐蚀性、良好的塑性,焊接工艺性能较稳定,钢材具有淬硬性和再热裂纹倾向较为敏感,其材料的化学成分和力学性能见表。

表 1 A335-P22 材料的化学成分 (%)

项目	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
标准值	0.05-0.15	0.30-0.60	≤0.50	≤0.025	≤0.020	1.90-2.60	0.87-1.13
实际值	0.11	0.47	0.37	0.005	0.006	2.12	0.92

表 2 材料的力学性能 (%)

项目	屈服强度 Rp0.2 (Mpa)	抗拉强度 Rm (Mpa)	伸长率 A(%)
标准值	355	570	28.0

2 焊接材料的介绍

耐热钢 A335-P22 焊接材料的选择原则确保焊接材料中的主要成分 Cr、Mo、等主要合金元素含量稍高于母材合金元素,同时能够满足材料在室温下的强度和韧性要求,以及对高温强度和高温蠕变强度的要求,从而获

得焊缝金属所需要的综合性能。经过合金元素的对比分析，具体如下。

(1) 焊接材料从保证焊缝性能同母材匹配的原则出发，选用氩弧打底焊丝 CHG-62B3R，规格 $\phi 2.4\text{mm}$ ；选用焊条 CHH-407R，规格 $\phi 3.2\text{mm}$ 和 $\phi 4.0\text{mm}$ 。焊材的化学成分及熔敷金属的力学性能见表 3、表 4。

(2) 根据耐热钢 A335-P22 材质的焊接特性，结合以往的国内外焊材使用的实际效果，埋弧焊焊丝选用进口奥钢联伯乐 T Union SA Cr2Mo SC，规格为 $\phi 2.4\text{mm}$ 。焊剂 UV420 TTR，规格 10-60 目。

3 焊接操作要点

3.1 手工钨极氩弧焊

(1) 耐热钢打底焊接时，结合材质的焊接工艺要求焊前需要的对焊口进行电加热，由于管道含有多种合金成分，同时焊口受热的影响有一定的温度，为了更好地便于焊工施焊，在相关标准规范允许的前提下，降低预热温度，保证打底焊接的填充焊丝充分熔化及背面焊缝过烧，避免产生焊接缺陷。

(2) 在引燃电弧后，坡口钝边两侧熔化焊丝要顺着坡口送到熔池位置，利用电弧高温将焊丝熔化。尽量缩小电弧在高温停留的时间，然后电弧摆到上坡口，再向熔池送进焊丝熔化金属，连接形成起始焊缝，然后焊枪电弧做左右摆动，在两边稍作停留，焊丝均匀地断续地送进熔池，焊丝始终处于氩气保护区。

(3) 在焊缝接头处要打磨成斜坡形状，在斜坡后 10mm 处重新引燃焊接电弧，待电弧移动到焊缝接头部位能充分熔化，接头处熔合良好；焊接过程中如要暂停焊接或要更换焊丝，应注意电弧要在停弧部位多停留一段时间，防止弧坑缺陷。

3.2 焊条电弧焊

(1) 由于母材、焊材的合金元素含量高，液态金属的流动性较差，因此焊接时应特别由于液态金属流动性差，焊条电弧焊时，严格按照焊接工艺规程范围内选用适当焊接电流，以保证根部良好的熔合和内壁成型。焊条的引弧电流过小，易粘焊条；但焊接电流过大，则造成熔池不清，易形成夹渣缺陷。

(2) 焊接过程中，注意焊条的摆动幅度，焊层厚度不超过焊条直径为宜，焊道宽度以焊条直径的 3 倍为宜，严格控制焊接热输入，因为焊接热输入对焊缝冲击韧度有很大影响，切勿使用较大的焊接参数。收弧时待熔地填满后再坡口一侧收弧，防止缩孔和裂纹产生。

(3) 超高压管道焊接随着多层多道的增加，为减少焊接应力与变形，宜采用两人对称焊接。同时，焊接中应将每层焊道接头错开 30~50mm，接头聚集局部过高的温度影响施焊质量。

3.3 埋弧焊

(1) 在耐热钢厚壁管道焊接过程中，为了获得高质量的焊缝，需要采取合理的焊接工艺和技术措施是保证焊接质量的前提条件，严格控制热输入量，多层多道焊，使晶粒细化，如果采用较大的热输入量，使晶粒粗大，形成偏析，液化相似及热裂纹的倾向增大。

(2) 焊接过程中由于焊丝偏离的焊缝，造成未能充分熔化底层焊缝和母材，过大的焊层厚度，焊接速度和焊接电流不匹配，熔深不够。焊接时通过观察焊丝对位校准仪观察焊丝的位置，随着多层多道焊和焊丝延伸长度的变化而调整。

(3) 管道埋弧焊在焊接过程中，覆盖在熔池上的焊剂厚度不均匀，焊丝和焊剂熔化后气体来不及逸出，熔池凝固残留在焊缝中。焊接前对焊剂严格按照要求进行烘烤，对于重复使用的焊剂要筛除渣壳和杂质，按照相关的标准添加一定比例的新焊剂，对于焊剂颗粒度的大小要根据焊接参数的大小及时调整，避免产生气孔的。

4 焊前准备

4.1 坡口形式

超高压蒸汽 A335-P22 管道坡口的加工应按照设计要求选用标准的坡口，在以往的耐热钢管道坡口加工中，采用常规坡口的形式单 V 型，但对于厚壁管道坡口的加工及尺寸，依据管道固定口全位置机动焊焊接特点，在减少焊缝填充金属，便于焊工操作，减轻劳动强度，提高焊接效率和焊接质量等原则。当管道壁厚 ≤ 35 时，采用 V 型坡口 60° ，管道壁厚 $\geq 35\text{mm}$ 时，采用双 V 型坡口 $68+12^\circ$ ，坡口形式示意图。

表 3 大西洋耐热钢焊丝化学成分 (%)

项目	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	MO
规范	0.07-0.12	0.40-0.70	0.40-0.70	≤ 0.010	≤ 0.020	2.30-2.70	≤ 0.020	0.90-1.20	0.90-1.20
实测值	0.088	0.52	0.60	0.003	0.019	2.34	0.072	0.91	0.94

表 4 大西洋耐热钢焊条化学成分 (%)

项目	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	MO
规范	0.07-0.12	0.40-0.70	0.40-0.70	≤ 0.010	≤ 0.020	2.30-2.70	≤ 0.020	0.90-1.20	0.90-1.20
实测值	0.072	0.74	0.35	0.0049	0.0069	2.25	--	--	1.04

表 5 大西洋耐热钢埋弧焊焊丝及焊剂化学成分 (%)

项 目	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	MO
焊丝 T Union SA Cr2Mo SC	0.05-0.15	0.80-1.45	≤0.35	≤0.025	≤0.025	2.2-3.00	-	≤0.35	0.90-1.20
焊剂 UV420 TTR	≤0.15	≤1.20	≤0.50	≤0.010	≤0.020	1.50-2.30	-	≤0.35	0.70-1.20

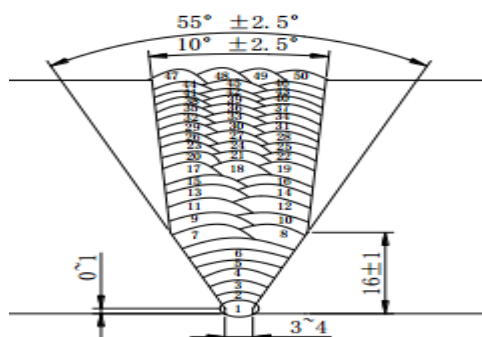


图 1 坡口形式

4.2 机加工

管道切割及坡口加工宜采用机械方法,坡口加工后应进行外观检查,坡口表面不得有裂纹、分层和夹渣等缺陷。由于 A335-P22 耐热钢具有淬硬倾向,坡口加工采用机械加工。坡口加工后应进行外观检查,坡口表面不得有裂纹、分层等缺陷。



图 2 管段切割



图 3 坡口加工

5 焊口组对

(1) 焊口组对前,应采用砂轮机将坡口及端部内外两侧 20mm 范围内去除影响焊接质量的氧化皮。

(2) 定位焊方式选用过桥定位焊缝,定位焊缝应采用评定合格的焊接工艺。焊口点固前使用大功率气焊火焰对点固点进行预热至 200℃ 以上,采用钨极氩弧焊点固,焊口点固焊接与正式焊接的焊接工艺和技术措施相同,点固焊采用 10mm-20mm 点固块。点固点应均匀分布,为了降低焊接应力和焊接变形,定位焊缝应平滑过渡到母材,经检查符合焊接工艺要求再进行根部打底焊接。

6 焊前预热

(1) 预热温度: ≥180℃; 加热方式: 火焰或电加热; 预热的范围为焊缝两侧各不小于焊件厚度的 5 倍,且不小于 100mm。靠近焊缝坡口处暴露的母材表面上测取温;当管壁厚小于等于 50mm 时,测温点为正对焊工工件表面,

距坡口边缘 4 倍壁厚且不超过 50mm。当工件厚度超过 50mm 时,要求测温点应位于至少 75mm 距离的母材或坡口任何方向上的相应位置。条件允许时,温度应在加热面的背面上移开热源一段时间,使母材厚度上的温度均匀后测定温度。

(2) 采用红外线测温仪或热电偶对焊口的预热温度进行测量,并做好记录。对预热温度低的焊口,重新加热到要求温度后再进行焊接。当采用钨极气体保护焊打底时,焊前预热温度可按规定的下限温度降低 50℃。



图 4 坡口焊前预热



图 5 温度检测

7 钨极氩弧焊打底焊接

(1) 耐热钢打底焊接时,结合材质的焊接工艺要求焊前需要的对焊口进行电加热,由于管道含有多种合金成分,同时焊口受热的影响有一定的温度,为了更好地便于焊工施焊,在相关标准规范允许的前提下,降低预热温度,保证打底焊接的填充焊丝充分熔化及背面焊缝过烧,避免产生焊接缺陷。

(2) 在引燃电弧后,坡口钝边两侧熔化焊丝要顺着坡口送到熔池位置,利用电弧高温将焊丝熔化。尽量缩小电弧在高温停留的时间,然后电弧摆到上坡口,再向熔池送进焊丝熔化金属,连接形成起始焊缝,然后焊枪电弧做左右摆动,在两边稍作停留,焊丝均匀地断续地送进熔池,焊丝始终处于氩气保护区。



图 6 GTAW 焊接过程



图 7 焊枪加长瓷嘴

(3) 在焊缝接头处要打磨成斜坡形状,在斜坡后 10mm 处重新引燃焊接电弧,待电弧移动到焊缝接头部位能充分熔化,接头处熔合良好;焊接过程中如要暂停焊接或要更换焊丝,应注意电弧要在停弧部位多停留一段时间,

防止互坑缺陷。

(4) 打底设备采用高频引弧装置，便于焊接过程中在收弧处熔池缓慢降温，同时将弧坑填满，可以延迟保护气体时间，避免弧坑出造成焊接缺陷，钨极氩弧焊打底封底一层，填充一层增加焊缝的强度和厚度，防止热焊层电弧击穿打底层和增加根部焊缝的宽度。



图 8 外部成型

图 9 内部成型

8 多种焊接方法填充、盖面

8.1 手工电弧焊接

(1) 焊条电弧焊填充时，道间温度控制在 280—320℃ 之间，为防止产生热裂纹和减少热影响区粗晶脆化，需选择小的线能量，以减少高温停留时间，但采用小参数，焊缝冷却速度快。该种钢的焊条层间温度 300℃ 温度下，操作性能较好，熔滴过渡及铁水流动性和飞溅都明显改变。



图 10 双人对称焊

(2) 通过实际操作试验发现，由于母材、焊材的合金元素含量高，液态金属的流动性较差，因此焊接时应特别由于液态金属流动性差，安装对口时应适当加大对口间隙（3—4mm），焊条电弧焊时，严格按照焊接工艺规程范围内选用适当焊接电流，以保证根部良好的熔合和内壁成型。焊条的引弧电流过小，易粘焊条；但焊接电流过大，则造成熔池不清，易形成夹渣缺陷。因此，选择合适的焊接电流是保证焊接质量的关键。



图 11 道间温度

图 12 多层多道

(3) 为减少焊接应力与变形，较大的焊口，宜采用两人对称焊接。同时，注意不得两个同时在一处收头，以免局部温度过高影响施焊质量。焊接中应将每层焊道接头错开 10—15mm，同时注意尽量焊得平滑便于清渣。



图 13 水平固定口焊缝

图 14 盖满焊缝

表 6 极氬弧焊打底+焊条焊填充、盖面焊接工艺参数

焊接层次	焊接方式	焊材		电源极性	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	焊接速度 (cm/min)
		牌号	直径 (mm)				
1	GTAW	CHG-62B3R	Φ2.4	DCEN	90~120	8~16	5~10
2	SMAW	CHH407R	Φ3.2	DCEP	100~140	22~28	5~12
3-N	SMAW	CHH407R	Φ4.0	DCEP	120~180	22~28	8~15

(4) 焊接前，由于厚壁管的坡口角度都是 U 形坡口，坡口角度小，埋弧焊枪垂直于 12 点位置，而且又不能摆动，提前对移动式管道升降托持小车的角度进行调整，把焊枪进行轻微的转动方向前置，有利的保证坡口两层充分熔合。填充第一道焊接时，把埋弧焊枪从钟表方位 12 点偏前位置开始焊接，由于打底焊缝较薄，焊枪垂直 12 点焊接容易把焊缝击穿，底层填充焊接的电流，电压，焊接速度要稍快，随着焊接层数的增多，适当加大焊接参数，提高焊接效率。焊件旋转方向为逆时针，这样焊缝成形较好，也不至于使层间接头处过高。



图 15 焊接过程

图 16 填充层焊缝

(5) 在焊接过程中，管件在压紧式管道驱动器转动时存在一定的偏移，应及时手动微调焊枪离工件的距离大小，否则，易造成焊枪喷嘴接触焊件或电弧太长；要及时手动微调焊枪左右位置，使焊枪喷嘴始终对准焊缝坡口中心，否则，易造成焊偏或未熔合，焊接时及时从焊缝的渣壳的脱落和焊缝为金黄色或者银白色来判断焊层的温度，有效的控制层间温度及管道背面焊缝氧化。



图 17 道间温度控制



图 18 地线夹改进

(6) 盖面层焊接时, 由于坡口角度大或者错边, 需采用窄焊道, 焊层薄, 多层多道焊, 焊接电流与焊接速度适当降低, 应及时提高焊接电压, 增加焊缝的宽度, 由于管道埋弧焊接时电弧在焊剂下燃烧观察不到熔池, 焊工焊接时通过观察和听声音, 如果电弧燃烧的声音清晰均匀一致, 说明焊接参数合适稳定, 电弧燃烧的声音高低不一及熔池上的渣壳不规则, 电流与电压的配比不合适应及时调整, 更好地确保焊缝圆滑过渡, 所以焊工要加强理论与实践的学习运用确保焊接质量。



图 19 找平焊缝



图 20 盖面焊缝

表 7 钨极氩弧焊打底+埋弧自动焊填充、盖面焊接工艺参数

焊接层次	焊接方式	焊材		电源极性	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	焊接速度 (cm/min)
		牌号	直径 (mm)				
1	GTAW	CHG-62B3R	Φ 2.5	DCEN	90~130	16~24	6.5~15
2	GTAW	CHG-62B3R	Φ 2.5	DCEN	100~150	34~40	15~40
3~4	SAW	Cr2MoSC/UV420TTR-W	Φ 2.4	DCEP	220~260		
5~n	SAW	Cr2MoSC/UV420TTR-W	Φ 2.4	DCEP			

9 焊后热处理

耐热钢 A335-P22 管道当壁厚 $\leq 25\text{mm}$ 时 (根据业主会议要), 焊缝应一次连续焊完, 施焊完成或中断焊接时应立即进行后热, 重新焊接时对焊口进行预热, 焊接完成后进行 RT 检测, 无损检测合格后进行焊后热处理, 热处理完成后进行硬度检测, 硬度检测合格后进行表面检测及焊缝光谱检测。当壁厚 $> 25\text{mm}$ 时 (根据业主会议要), 焊缝焊接至 20mm 左右时停止焊接, 立即进行后热, 保温缓冷后进行 RT 检测, 重新焊接时对焊口进行预热, 焊接

完成后立即进行后热并保温缓冷, 然后进行 (TOFD)+UT+MT 检测, 检测合格后进行焊后热处理, 热处理完成后进行硬度检测, 硬度检测合格后进行表面检测及焊缝光谱检测。

9.1 层间温度

层间温度应控制在 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$; 层间温度测量位置: 12 点、3 点、6 点位置; 焊接过程中的层间温度不应低于预热温度的下限值。

9.2 后热处理

焊接完成以后, 若不能立即进行焊后热处理, 焊接完毕后应立即进行后热处理, 后热温度宜为 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$, 保温时间不应少于 30min 并保温缓冷。有预热无焊后热处理要求的接头, 焊后采取保温缓冷措施。

9.3 焊后热处理

A335 P22 铬钼钢管道母材厚度 $> 13\text{mm}$ 管道焊缝进行热处理, 热处理温度根据《石油化工钢制管道焊接热处理规范》SH/T3554-2013 定为 $700\sim 760^{\circ}\text{C}$, 最短保温时间 2 小时。升温至 300°C 后, 加热速度按 $5125/\delta$ ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) 计算, 且不大于 $220^{\circ}\text{C}/\text{h}$; 恒温期间各测温点的温度均应在热处理温度规定的范围内, 其偏差不得超过 50°C ; 恒温后的冷却速度应按 $6500/\delta$ ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) 计算, 且不大于 $260^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。冷至 300°C 后可自然冷却。



图 21 热处理过程

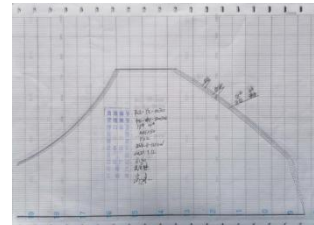


图 22 热处理曲线

10 焊缝检验

(1) 焊接完成后的焊缝外形尺寸符合设计要求, 当管道 DN50 及以下内部余高不大于 1mm, DN50~DN100 (包括 DN100) 余高不大于 1.5mm, 大于 DN100 余高不大于 2.5mm。焊波均匀, 焊缝成型美观。

(2) 焊缝表面无裂纹、未溶合、气孔、溶合性飞油、烧穿、未焊透, 焊道边缘与母材圆滑过渡, 咬边应符合规范要求; 氧气管线管件及焊接位置内壁焊缝应平滑, 无锐边, 毛刺及焊瘤。

(3) 焊缝射线检测要求

①焊缝检测在焊接完成 24 小时后且后热完成后进行。对于三通、弯头、法兰口等处焊缝, 若方便进行中心透照, 可以一次填充完成后优先选用 RT 检测。

②每名焊工焊接的合金钢管道, 其承插和焊接支管的焊接接头及其他角焊缝, 均采用磁粉检测或渗透检测方法检查焊缝的表面质量, 检测百分率为 100%。抽样检测的焊接接头宜覆盖现场不同管径的管道, 检测位置应由质量检查员、监理、业主根据焊工和现场的情况随机确定。

(4) 硬度检测比例

硬度检验应符合:管道焊接接头焊后热处理后应进行硬度检验,检验比例为 100%,每个接头的硬度检验应不少于 1 处,每处应包括焊缝、热影响区,每个部位测定不少于三点(取 3 个点的平均值)。硬度测定值的标准不超过布氏硬度 $\leq 241\text{HB}$ 为合格。

11 结束语

通过在超高压蒸汽耐热钢 A335-P22 管道的焊接施工中,采用钨极氩弧焊打底+焊条焊填充、盖面;钨极氩弧焊打底+熔化极气保焊填充、盖面焊接工艺;钨极氩弧焊打底+埋弧自动焊填充、盖面工艺;管道固定口全位置机动焊填充、盖面工艺;同时对管道使用机械切割、坡口加工、是保证焊接质量的前提条件。在焊口组对时配置的工装,焊前预热、道间温度、焊后热处理等方面,优化了焊接技术措施,使用以上焊接工艺,焊缝的内外质量都得到了全面的控制,其焊接接头的硬度、韧性等指标都符合标准要求。

在炼化一体化乙烯装置蒸汽裂解装置超高压蒸汽管线焊接及热处理施工中,常规焊接工艺低效率、高成本,难以满足高压管道短平快工程工期的需求。根据制定的焊接工艺和技术措施,预制工厂化,焊接全面自动化,管道

施工一体化的应用,有效的克服了超高压蒸汽管道焊接施工的难题,采用组合式焊接施工工艺,提升了高压管道的焊接效率,降低人工成本,减轻了劳动强度,优化作业环境,减少了焊接缺陷产生,实现流水化生产。共完成管道 19600 吋径,管道焊接一次合格率 99.2%,焊接质量都处于受控状态,该焊接施工工艺是传统手工焊的 4 倍,既保障了焊接质量,又加快了施工进度,圆满完成超高压蒸汽管道的焊接施工任务,取得良好的经济效益和社会效益,为公司承揽类似工程积累经验。

参考文献

- [1]刘素,潘金柱,李双锁,等.避免 A335-P22 厚壁管氩电联焊产生冷裂纹和再热裂纹的途径[J].石油工程建设,2010(3):14.
- [2]洪卫.厚壁 A335P22 钢管材的焊接[J].山西电力技术,2000(3):74.
- [3]陈祝年.焊接工程师手册[M].北京:机械工业出版社,2002.

作者简介:刘建国(1995.7—),毕业院校:中国石油大学(华东),所学专业:机电一体化技术,当前就职单位:中石化第十建设有限公司,职务:焊接主任技师,职称级别:高级技师。