

大壁厚P22铬钼合金钢管道焊接工艺控制要领

邓勇宾, 张源麟, 朱华, 陶学正, 王权尧

中国石油天然气第六建设有限公司 广西桂林 541004

摘要: A335 P22铬钼合金钢是2.25Cr-1Mo的耐高温用珠光体耐热合金钢, 具有良好的塑性, 抗高温、高压, 耐腐蚀、耐磨损及其他特殊物理、化学性能的特征; 其缺点是在焊接工艺中具有淬硬性和再热裂纹倾向。针对大壁厚A335 P22铬钼合金钢的特性研究更合理适用的焊接工艺和控制方法, 确保获得优良的焊接质量。

关键词: 铬钼合金钢; 高温; 高压; 焊接工艺

Welding process control essentials of P22 chromium-molybdenum alloy steel pipes with large wall thickness

DENG Yongbin, ZHANG Yuanlin, ZHU Hua, TAO Xuezheng, WANG Quanyao

China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract: A335 P22 chromium-molybdenum alloy steel is a 2.25Cr-1Mo high-temperature resistant pearlite heat-resistant alloy steel, which has good plasticity, high temperature resistance, high pressure resistance, corrosion resistance, wear resistance and other special physical and chemical properties. The disadvantage is that it has a tendency to harden and reheat cracks in the welding process. In this paper, the characteristics of A335 P22 chromium-silver alloy steel with large wall thickness are discussed to discuss more reasonable and applicable welding processes and control methods to ensure excellent welding quality.

Keywords: chromium-molybdenum alloy steel; high temperature; high pressure; welding process

1 序言

2022年某石化公司炼化一体化项目工程中300万t/a连续重整装置, 循环氢压缩机的超高压蒸汽进气工艺管线, 采用ASTM A335 P22铬钼合金钢材质, 主管道规格主要有DN400mm×60mm、DN300mm×48mm两种; 管道操作温度540℃, 设计温度545℃, 操作压力11.5MPa, 设计压力13.5MPa, 水压试验压力53.32MPa, 安装精度要求高, 焊接操作、变形控制、热处理质量控制难度大。通过总结多年对铬钼合金耐热钢的焊接操作和

质量控制经验, 探索出一套能够避免或降低焊接再热裂纹产生的焊接工艺和操控方法。

2 焊工资质审查

参加施焊的焊工应具备以下的资质要求。

1) 焊工应具备焊接特殊作业的操作证并在有效期内。

2) 焊工应按照TSG Z6002—2010《特种设备焊接操作人员考核细则》^[1]的有关要求, 取得相应项目的特种设备作业操作证, 并在有效期内。

3) 焊接项目应满足现场管道焊接要求允许的资

质范围内，管径和厚度满足表1和表2条件。

表1 手工焊管材对接焊缝试件适用于对接焊件焊缝金属厚度范围 (mm)

试件母材厚度 t	适用于焊件焊缝金属厚度	
	最小值	最大值
< 12	不限	$2t$
≥ 12	不限	不限

表2 手工焊对接焊缝试件适用于对接焊缝金属焊件外径范围 (mm)

管材试件外径 D	适用于管材焊件外径范围	
	最小值	最大值
< 25	D	不限
$25 \leq D < 76$	25	不限
≥ 76	76	不限

3 焊接准备工作

3.1 材料检验

A335 P22铬钼合金钢在材料验收、入库、保管和发放过程中严格执行材料制造标准和国家行业工程验收标准相关要求^[2]，认真核对材料质量证明文件，材料实物与符合要求，做好合格标记和识别色标。对管道组成件主体的关键合金部分采用光谱分析和管道表面磁粉检测方式进行复查。该装置工程用A335 P22铬钼合金钢管材由天长市康弘石油管材有限公司生产，符合ASME规范和供货要求。

3.2 焊接设备检验

焊接设备为ZXG系列直流弧焊机。焊机电源绝缘、接地良好，输出电极绝缘良好，焊钳夹持焊条方便、牢固可靠，电源参数调试正常。

焊枪导电部分导电良好，并能承受一定的过载流量，其他部分绝缘良好；电极夹持良好，拆装方便；喷出的氩气具有一定的挺度。

制备规格为50mm×50mm的一块试板，打磨直至露出金属光泽，手工钨极氩弧焊采用钨钨极，焊接极性为直流正接，焊接电流为150A，电弧电压为10~13V，焊接氩气流量为10~15L/min，氩气的纯度不应低于99.99%，瓶装压力低于0.5MPa时不得使用，钨极伸出长度为3~5mm。在试板上引燃电弧，弧长1~3mm，堆焊2mm的高度，然后提高电弧5~8mm，又压低电弧至正常焊接高度，反复几次后收弧，用砂轮机对试验点进行打磨，仔细观察试验点是否有气孔出现，如果没有气孔便说明氩弧焊枪和氩气达到焊接要求，可以正常焊接操作。

3.3 焊接材料检验

检查焊丝表面粗糙度，焊前应严格清除焊丝表面锈迹、油污等。

焊条不得受潮变质，焊芯无锈，药皮不得开裂脱落。焊条烘烤后，目测检查药皮是否脱落、开裂，颜色是否一致。如果在同一根焊条上的一端出现药皮膨胀且颜色与整体不一致或整根焊条出现膨胀，说明焊条烘烤温度过高或烘烤时间过久，造成焊条失效，应停止使用。

3.4 焊接材料领用

现场使用焊接材料必须出自焊接材料烘烤房，烘烤后由焊接材料烘培员记录发放，焊接材料领用由焊工本人持证领取，严禁由他人代领。

焊工持焊条领用单和焊丝筒领取焊接材料，每次领取焊条数量不超过3kg，在4h内用完，超过4h仍未用完的焊条需退回焊条房，重新领取烘干保温的焊条。焊工领取焊接材料时如实填写领用记录及焊接材料的使用部位（管道必须是完整的管道号且与现场施焊管道一致）。焊接材料保管员应做好发放回收记录，应将焊丝、焊条的型号与规格、发放单位记录清楚，便于追溯。

3.5 焊接材料选用

焊接材料的选用应根据所焊管材的化学成分、力学性能及使用和施焊条件进行综合考虑，焊接材料的选用必须慎重。选用的焊接材料应符合NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》要求^[3]，该项目工程所用焊接材料为四川大西洋焊接材料股份有限公司生产。丝选用型号为ER62B3R。焊条选用牌号为CHH407R。CHH407R是低氢钠型药皮的承压设备用钢专用低合金钢焊条，具有焊接性能好、飞溅少、脱渣容易及焊缝成形美观等优点，焊接时采用直流反接，短电弧操作，并可进行全位置焊接。

4 焊接工艺要求

焊接采用GTAW方式打底，SMAW方式填充、盖面。选用焊丝直径为2.5mm，焊条直径为3.2mm和4.0mm。

4.1 组对前检验焊接管材

对验收报验合格的P22管材，清除坡口及坡口端内外表面20~25mm内的油污、铁锈和污垢，直至露出金属光泽后做100%PT检测，组对前检查并清

理管道内杂物,保持管内清洁度。

按图样下料,下料切割和坡口加工全部采用机械加工,减少修磨工作,尽量避免坡口处金属的再次淬硬层。加工后要复测管口的圆度,尤其是内径测量,为后续组对工序提供帮助;同时还要对加工后的管件进行硬度复验,坡口表面硬度不得>241HBW。坡口形式如图1、图2所示。

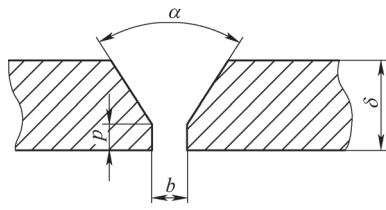


图1 V形对接坡口

注: α 为内坡口角度, b 为组对间隙, p 为钝边, δ 为厚度。

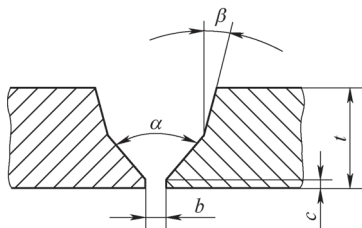


图2 U形对接坡口

注: α 为内坡口角度, β 为单边外坡口角度, t 为厚度, c 为斜边, b 为组对间隙。

4.2 管件组对要求

当管件组对时,内壁应齐平,内壁错边量不应超过2mm。当管子或管件不等厚时,内错边量超过2mm或外错边量超过3mm时,应对焊件进行加工,削磨到坡度为15°的坡形过渡,如图3所示。

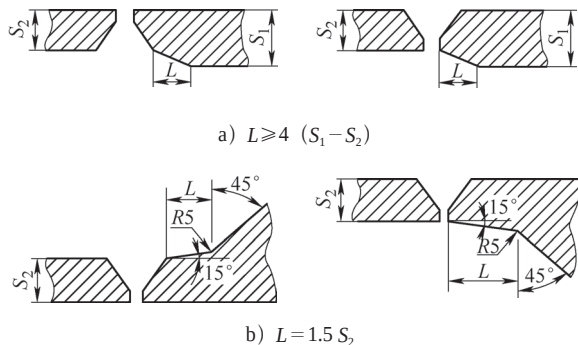


图3 内壁错边组对形式

(1) 堆焊 管道上焊接组对夹具材质为P22钢,或用焊条、焊丝在夹具上进行堆焊^[4]。

(2) 定位焊 定位焊采用与根部焊道相同的焊接方法和工艺,由合格的焊工担任定位焊的焊接。

组对时焊缝根部间隙应控制在2.5~3.5mm,把连接块放在两坡口中间,对定位焊部位用火焰均匀加热至200~350℃,进行搭桥式定位焊20~30mm。定位焊的焊缝长度、厚度、间距,应能保证焊缝在正式焊接过程中不开裂。

4.3 焊前预热

焊前预热采用电加热方式,预热温度控制在200~250℃。预热范围以对口中心为基准,两侧各不小于母材厚度的5倍,且≥100mm,加热区以外100mm范围内应保温(见图4)。现场管子管径为DN400mm、DN300mm,布置两个热电偶来监测温度,在坡口两侧距离各>100mm处用加热绳或加热带对管件缠绕并固定好,加上保温棉并用铁丝捆好固定,通电后加热。预热的目的主要有:①减缓焊后的冷却速度,有利于焊缝金属中扩散氢的逸出,避免产生氢致裂纹。②降低焊接应力,当接头整体预热后,可以减少焊接区域被焊工件之间的温度差从而降低焊接温度应力。③可以降低焊接接头的拘束度^[5]。

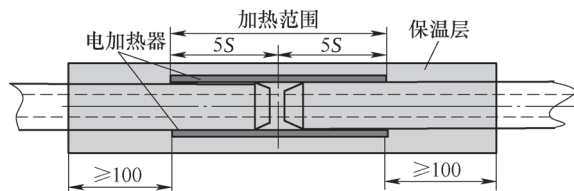


图4 焊接接头预热示意

注: S 代表母材厚度。

4.4 打底层焊接工艺及操作要领

焊接的气体纯度应在99.99%以上,且含水量应<20mg/L。氩气流量为12~16L/min,手工钨极氩弧焊采用钍钨极,焊接极性为直流正接,焊接电流为120~140A,电弧电压为10~13V,焊接的氩气流量为10~15L/min,焊接速度为4~6cm/min。

水平固定接头可从仰焊部位开始焊接,位置障碍的接头则从障碍部位开始焊接。手工钨极氩弧焊电弧引燃后,压低电弧并把电弧拉入坡口根部,使根部两侧钝边熔化形成熔孔,同时加入焊丝在电弧下使焊丝熔化形成液态金属把根部两侧熔孔连接形成熔池,向前均匀摆动,熔孔的大小尽量保持均匀。

当组对间隙大于焊丝直径时,电弧摆向其中一侧时焊丝跟上放入熔池;当焊丝离开熔池的一瞬间,视线可通过细小的间隙观察管内根部的焊缝成

形状态,以确保内部焊缝无咬边、未熔合、内凹、未焊透及焊瘤等缺陷,根部余高控制在 $0\sim 3\text{mm}$ 。焊丝的送进速度与电弧的熔化速度保持一致,焊接到定位焊部位收弧,然后对定位焊部位进行打磨清除干净,清除搭桥定位焊后才能再次引燃电弧焊接。另一侧仰焊部位接头也需打磨成斜面后再进行焊接,每一次焊接遇到定位焊部位都应先清理干净后再焊接,然后对前一段平焊收弧打磨成斜面至根部再进行焊接,其目的是保证最后平焊部位根部接头收弧处不产生内凹焊接缺陷,确保根部焊缝圆滑过渡。

4.5 填充及根部检测和焊后检测

由于管道壁厚大,所以采用分两次焊接和检测的方式控制质量。当焊接厚度达到 $12\sim 15\text{mm}$ 时,进行一次射线检测和表面PT检测(见图5、图6),便于发现、控制根部焊接质量;检测合格后再次进行预热、焊接,直至焊接完成,进行射线检测和TOFD检测。



图5 焊接 $12\sim 15\text{mm}$ 后准备第一次射线检测



图6 第一次射线检测后做PT检测

打底焊接完成后对焊缝进行温度检测,层间温度控制在 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$,并进行记录。填充时采用焊条电弧焊焊接,焊条直径为 3.2mm ,焊接电流控制

在 $85\sim 100\text{A}$ 之间,短弧操作。引弧应避免正仰焊(6点)部位,偏向5点或7点位置引弧,采用回熔法引弧焊接。运条向前的摆动弧度略大于常规运条速度,并且电弧在熔池两侧停留时间相对于熔池中间停留时间稍长一点,使熔池保持椭圆形的形状呈水平状态向前均匀移动。用小热输入快速焊接,既可以防止根部过烧氧化或者烧穿,又能保证焊缝两侧不咬边、夹渣,并且焊缝厚度应控制在 3mm 左右。每焊完一根焊条应对收弧处进行打磨处理,防止温度过高产生收弧裂纹。焊条在向前的运条过程中,仰角和倾角随管道的弧度随时都在改变。每层焊接完成后用砂轮机打磨焊缝并清理焊道,每焊接完一层都要对焊缝做层间温度检测并记录,以便控制层间温度。

管道多层多道焊接,每一层的仰焊部位引弧接头应避免重叠在一起,平焊部位的收弧接头也尽量错开。当焊接厚度达到 $12\sim 15\text{mm}$ 后停止焊接,同时对焊缝用保温棉包好,焊缝加热到 350°C 保温 30min 后缓冷至常温的后热措施。冷却 24h 后对焊缝进行根部检测,检测合格后再对焊缝及坡口两侧做表面PT检测,确保无缺陷后再对焊缝预热,开始填充和盖面焊接,继续用上述方法控制并记录层间温度。

表层焊缝控制在低于母材表面 $0.5\sim 1\text{mm}$,以便于盖面时焊缝两边的熔合线作为基准线,便于控制熔池的大小形状,确保焊缝外观成形良好。焊缝盖面焊接时应对焊道和热影响区清理干净后再焊接。盖面焊缝余高控制在不低于母材且不高于母材 3mm 。最后的一个收弧点收弧时要慢,弧坑要填满并打磨干净,清除收弧缺陷,焊缝表面圆滑过渡。焊接完成后再次做后热措施,再次冷却 24h 后对焊缝两侧表面 300mm 处全部打磨干净进行射线和TOFD检测。

5 焊后热处理

焊缝焊接完成后,若不能立即热处理,则立即均匀加热至 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$,进行恒温时间 $\geq 30\text{min}$ 的后热处理^[6]。

后热完成后对焊缝进行焊后热处理,热处理温度为 $700\sim 750^{\circ}\text{C}$, 300°C 以下不控温,热处理工艺要求见表3,降温至 300°C 以下缓冷。经热处理合格

(下转第113页)

断针焊缝预计耗时4h。优化前共发生断针18次，共计发生返工耗时144h（2×4×18h）。

3) 通过攻关，有效降低了搅拌头断针问题，提升了牵引梁焊接产品质量安全。攻关前，在牵引梁焊接过程中，每焊接10件产品就会发生一次断针问题，发生断针概率达10%，不仅降低了焊缝强度，还容易产生气孔、裂纹、夹渣等质量问题。

4) 通过对牵引梁焊接工装的改造，验证并规范了焊接参数，提升了搅拌头焊接寿命，制定一机专人操作规范，有效杜绝了牵引梁焊接过程中搅拌头断针问题发生。该方法可推广应用至后续批量生产的牵引梁焊接项目中，应用成效显著。

6 结束语

1) 牵引梁焊接采用整体压紧式工装替代压臂点压紧式工装，确保焊接过程中牵引梁不会发生位移，解决牵引梁焊接过程中发生的压深或沟槽质量问题。

2) 牵引梁焊接采用双面焊接代替单面焊接，有

效解决了焊接过程中变形问题。通过验证，确认搅拌头使用长度及最佳焊接参数，可为牵引梁焊接质量提供有力支撑。

3) 通过对搅拌头结构进行优化，搅拌头的针长调节范围由5~9mm缩小至8.5~9mm，可保证搅拌针焊接过程同轴度，提升搅拌头寿命，降低断针问题发生概率。

参考文献：

[1] 张欣盟，何广忠，韩凤武. 轨道客车铝合金车体制造搅拌摩擦焊技术的应用研究[J]. 金属加工（冷加工），2016（S1）：561-563.
[2] 陈玉华，胡煌辉，黄春平，等. 搅拌摩擦焊接技术[M]. 北京：机械工业出版社，2018：168-175.
[3] 孟腾逸，赖欧. 枕梁搅拌摩擦焊工艺研究与缺陷分析[J]. 新型工业化，2019（1）：58-61.
[4] 刘杰，杨景宏，王炎金，等. 35mm厚板铝合金搅拌摩擦焊焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报，2012，33（6）：105-108.

MW 20240412

（上接第109页）

后的焊缝不得再进行焊接作业，否则应重新进行焊后热处理。

表3 热处理工艺要求

规格/mm	升温速度/（℃/h）	降温速度/（℃/h）	恒温时间/h
DN400×60	≤85	≤108	2.5
DN300×48	≤106	≤135	2

6 结束语

本文经过现场对大壁厚A335 P22管道实际焊接情况进行分析，为避免或降低焊接冷裂纹产生，通过采取焊接前的坡口检查、定位焊、焊前预热、焊接过程中操作及层间温度控制的焊接热处理工艺；采用分两次焊接和焊后两次无损检测的方式，保证了管道焊接施工质量。现场施工时严格按照批准的施工方案实施，掌握焊接操作要领，焊接质量优良，无损检测均一次性合格，没有发现裂纹，达到了安全生产的要求。

参考文献：

[1] 国家质量监督检验检疫总局特种设备安全监察局.

特种设备焊接操作人员考核细则：TSG Z6002—2010[S]. 北京：中国标准出版社，2010.

[2] 中国石化集团公司工程建设管理部. 石油化工铬钼钢焊接规范：SH/T 3520-2015[S]. 北京：中国石化出版社，2015.
[3] 中国工程建设标准化协会化工分会. 现场设备、工业管道焊接工程施工规范：GB 50236—2011[S]. 北京：中国计划出版社，2011.
[4] 中国石油化工集团公司施工技术淄博站. 石油化工有毒、可燃介质钢制管道工程施工及验收规范：SH/T 3501—2021[S]. 北京：中国石化出版社，2021.
[5] 中国石油天然气集团公司标准化委员会石油石化工程建设专业标准化技术委员会. 中合金热强钢管道处理施工规范：Q/SY 06802—2017[S]. 北京：石油工业出版社，2017.
[6] 邓勇宾，朱华，胡建平，等. 1CR5Mo管道焊接工艺控制[J]. 金属加工（热加工），2019（S2）：50-52.

MW 20240312