

超高压耐热钢P22管道焊接与质量管控要点

王健

中石化第十建设有限公司 第一安装分公司

摘要：P22铬钼合金钢常用于石油化工乙烯装置超高压管道。本文选取P22管道典型焊接工艺，根据其母材和焊接材料特性，针对焊材选用、坡口加工、焊口组对、道间温度控制、焊接工艺参数、技术措施、操作技巧等关键环节制定质量控制措施，并成功应用于工厂化管道预制和管道固定焊口的焊接施工，有效地避免了施工中焊缝未熔合、气孔、夹渣等缺陷产生，获得良好效果，建议推广应用。

关键词：P22耐热钢；焊接特点；焊接工艺；技术措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.04.024

某石油化工工程乙烯装置高压管道主要材质为A335-P22铬钼合金钢，其中大口径厚壁管道较多，最大管径、壁厚为Φ610×76mm。随管径、壁厚的增加，焊接工作量增大，焊接难度也大幅度增加。项目施工周期

短、任务重，且施工所在地风雨多、环境湿度大，都为P22焊接施工带来了不利影响。本文在分析P22焊接的重点、难点基础上，选取焊条电弧焊和埋弧自动焊两种典型焊接工艺，制订了针对性的质量控制措施。

一、材料焊接性分析

(一) 母材化学成分及焊接性

(1) 化学成分分析

P22材料制造标准为ASTM A335，公称成分为2.25Cr-1Mo，合金元素含量近似于国内12Cr2Mo珠光体耐热钢。P22工艺性能良好，具有良好的高温持久塑性，能够在高温下持续运行，并有一定的耐腐蚀性。目前，P22已成为高温下运行设备及连接管道使用较多的耐热钢材料之一，广泛应用于火电、核电、石油化工装置等。

P22钢管化学成分见表1-1。

1) 铬元素和镍元素，能增大奥氏体钢的过冷度从

表1-1 A335-P22材质化学成分(%) SH/T3520-2015

化学成分	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
标准值	0.05-0.15	0.3-0.6	≤0.5	1.9-2.6	0.9-1.13	≤0.025	≤0.025
实测值	0.10	0.46	0.27	2.11	0.97	0.015	0.010

而细化组织起到强化作用，用以改善冲击韧性，降低冷脆转变温度，增加钢耐大气腐蚀能力。镍全部溶入铁素体中不形成碳化物，而铬部分溶于铁素体中，部分存在于渗碳体中，可提高渗碳体的稳定性，降低珠光体球化倾向，防止钢的石墨化。

2) 钼在合金钢中能提高钢的强度、硬度，细化晶粒，防止回火脆性和过热倾向，提高高温强度、蠕变强度及持久强度、可以提高塑性，减少产生裂纹的倾向，提高冲击韧性。

3) 硫在钢中常以硫化铁的形式存在，并呈网状分布在晶粒边界，因而显著地降低钢的韧性。铁加硫化铁的共晶温度较低(985℃)，而铁和硫化铁共晶已经熔化，从而导致加工时开裂，这种现象就是所谓“硫的热脆性”。硫的这种性质使钢在焊接时产生热裂纹。

4) 磷在钢中能全部溶于铁素体内。它对钢的强化作用仅次于碳，使钢的强度和硬度增加，磷能提高钢的抗腐蚀性能，而塑性和韧性则显著降低。特别在低温时影响更为严重，这称为磷的冷脆倾向。故它对焊接不利，增加钢的裂纹敏感性。

(2) 焊接性分析

由于P22中铬钼合金成分的添加，使其金属液体黏稠、散热能力降低，焊接过程中易出现冷裂纹、焊接变形、焊接残余应力等倾向。因此，焊前应进行预热，焊接完成后结合工艺技术要求，应及时后热或者进行焊后热处理。

与普通碳钢相比，P22具有较大的热膨胀和收缩特性，导热速度慢、凝结速度快，液态金属流动性差。因此，焊接过程中容易产生根部未焊透、未熔合、层间夹

渣、焊接裂纹等缺陷。焊接裂纹通常为具有延迟开裂的冷裂纹，多出现在热影响区或强度较高的焊缝中和焊缝中氢元素聚集区，具有穿晶开裂特性。

(二) 焊接材料特性

P22焊接材料选择时注重机械性能和化学成分的匹配。依据NB/T47014-2011标准要求，焊接材料应选用与母材化学成分相当，并要求熔敷金属抗拉强度不低于母材标准抗拉强度值下限。

一般来说，焊接材料中的Cr、Mo、Ni等主要合金元素含量均稍高于母材，以保证其焊接完成后同时能够满足焊接接头在室温下的强度和韧性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。同时，为降低焊缝氢致延迟裂纹倾向，应选择低氢型焊接材料。焊接前严格按照规范要求对焊条、焊剂进行烘干处理。

二、焊接工艺

目前，P22合金钢焊接中传统的焊接工艺，主要为钨极氩弧焊(GTAW)、焊条电弧焊(SMAW)。随着新型焊接工艺、焊接材料、焊接设备的创新研发，越来越多的新型焊接工艺也在开始逐步推广应用，并取得了良好的效果，例如埋弧机动焊(SAW)、全位置脉冲熔化极气体保护焊(GMAW-P)等。通过采用机动焊代替传统手工焊，在提高焊接效率及焊接质量、节约焊接材料、降低焊工技能水平要求、改善作业环境等方面具有一定优势。

结合项目的特点与P22合金钢施工经验，选择GTAW+SMAW、GTAW+SAW两种组合工艺，作为本次P22合金钢管道焊接工艺。焊接前，根据不同的焊接工艺选定相

应的合格焊接工艺评定，并编制专项焊接技术交底、焊接工艺指导书。

三、焊接材料

根据标准规范、焊接工艺评定，选用的氩弧焊丝为

CHG-62B3R，焊条为CHH407R，埋弧焊丝和焊剂为CHW-S8R/CHF603。上述焊接材料的化学成分详见表3-1、表3-2、表3-3。（NB/T47014、NB/T47018、大西洋焊材手册）

表3-1 氩弧焊丝CHG-62B3R化学成分(%) SH/T3520-2015

化学成分	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
标准值	0.07-0.12	0.40-0.70	0.40-0.70	≤0.010	≤0.020	2.30-2.70	≤0.20	≤0.35	0.90-1.20
实测值	0.094	0.61	0.59	0.003	0.017	2.52	0.084	0.11	0.93

表3-2 焊条CHH-407R化学成分(%) SH/T3520-2015

化学成分	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
标准值	0.05-0.12	≤0.9	≤1.0	≤0.03	≤0.03	2.00-2.50	0.9-1.20
实测值	0.077	0.622	0.343	0.013	0.016	2.210	1.043

表3-3 埋弧焊丝CHW-S8R化学成分(%) SH/T3520-2015

化学成分	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
标准值	0.05-0.15	0.80-1.45	≤0.35	≤0.015	≤0.020	2.20-3.00	-	≤0.35	0.90-1.15
实测值	0.10	1.00	0.15	0.007	0.013	2.47	0.058	0.18	0.95

四、坡口制备

(一) 坡口加工设备

由于施工现场管道壁厚尺寸较大，坡口制作采用火焰切割加工困难，且火焰切割后要坡口进行100%表面检测，因此，选用带锯机切割下料与数控坡口机设备联合进行坡口制作。机械加工一方面坡口制作精度得以保证，另一方面也减少了热加工对母材组织的影响。

当管壁厚度 $\delta \leq 25\text{mm}$ 选用便于加工的V形坡口；管壁厚度 $\delta > 25\text{mm}$ 选用焊接材料填充量少的双V形坡口。坡口制作完成后进行表面检查，不得有裂纹、分层等现象。

焊，当风速大于2m/s时不得进行气体保护焊。

(二) 坡口准备

组对前将坡口内外两侧最少20mm范围内铁锈、油漆、杂污等打磨清理干净，检查坡口制备的尺寸、角度、垂直度是否满足工艺要求，坡口垂直度偏差不得大于2mm。为减小焊接过程中的膨胀系数影响，应预留稍大的间隙，预留间隙3.5-4mm为宜，点固点不宜少于三处。

坡口组对时为避免坡口内部电弧损伤，可采用夹具或连接板点固。

(三) 其他要求

组对前，对管道材质、管径、厚度和焊条、焊丝型号进行确认，必要时可对母材和焊接材料进行合金验证。合金钢母材、焊材应与其他类型材料分开保存，做好色标。

点固位置的预热温度、焊接材料与正式焊接要求一致。

依据SH/T3520规范要求，铬含量小于2.25%的合金钢可不进行背面充氩气保护，当设计要求充氩气保护时，准备背面充氩气保护的工和和设备；并保证氩气纯度不低于99.99%。

六、焊接过程控制

(一) 打底焊接：钨极氩弧焊（GTAW）

在预热温度达到要求温度后进行氩弧打底焊接，依据规范SH/T3520氩弧打底的预热温度可比规定预热温度低50℃。

在焊接时电弧引燃后待坡口两侧钝边熔化形成熔孔，从管内侧紧贴熔孔送进焊丝，在钝边两侧各送进一滴铁水，通过焊枪横向摆动，使热态熔覆金属充分展开。

在完成打底层80%以前严禁拆除点固连接板，连接板拆除时不得使用锤击敲打或挤压，应用砂轮机切除后打磨圆滑，并注意不得伤及管道母材。由于打底层厚度相对薄弱，为提高焊接质量保障，因此，在第一层打底焊接完成后，应进行打底质量检查，如厚度不足，可采用氩弧焊增补一层热焊焊道。

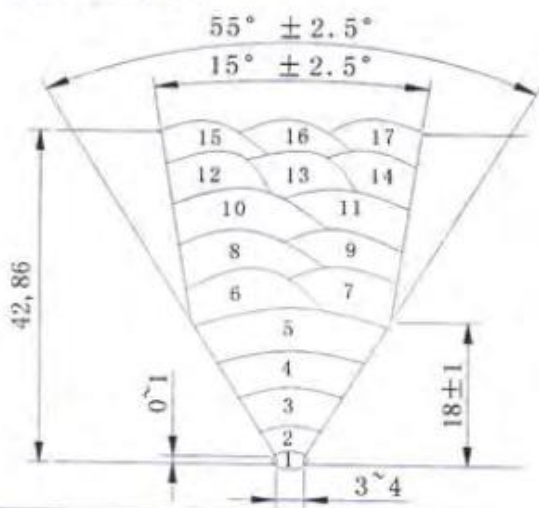


图4-1 双V型坡口型式

五、焊前准备

(一) 工机具及设备准备

焊接前根据焊接工艺指导书要求进行试焊，将焊接参数调整至合适的范围。焊接地线与管道应接触牢固，严禁地线与管道点焊连接。

依据规范SH3501露天作业做好防风挡雨措施，当环境湿度大于90%，风速大于8m/s时不得进行焊条电弧

(二) 填充盖面：焊条电弧焊 (SMAW)

焊条电弧焊填充前对温度进行检测，要求温度不得低于200℃，并保证后续焊接过程中层道间温度不高于此温度，且不高高于315℃。

焊条电弧焊时，注意层道间的焊渣及缺陷清理，层道厚度不得超过焊条直径的1倍。每道焊缝的宽度不得大于焊条直径的3倍。P22合金管道宜一次焊接完成，如被迫中断焊接，应及时在焊缝及两侧100mm范围采取保温缓冷措施。再次焊接前应检查确认焊缝和热影响区无裂纹，并重新预热到规定温度再进行施焊。

(三) 填充盖面：埋弧焊 (SAW)

埋弧焊：熔渣隔绝空气的保护效果好，焊接参数可以通过自动调节保持稳定，焊接电弧稳定，力学性能比较好。电弧光不外露，焊接时没有弧光辐射，减轻对操作者身体的伤害。

在耐热钢合金钢焊接中，埋弧焊工艺采用1G位置，管道转动、持续焊接，更好的保证了焊接能量的持续输出，对有焊前预热温度要求，焊接过程中持续保温要求的焊接工艺，有显著优势；能够更好的保证层道间温度均衡，延长焊缝高温停留时间，有利于有害气体逸出。特别是在管径大、厚度大的高压管道施工中，管道埋弧焊工艺的效率约为焊条电弧焊的4倍。

埋弧焊工艺参数较大，氩弧焊打底层不得少于2层。当管径规格≤350mm时，可选用≤φ2.0mm焊丝作为填充材料。当管径规格>350mm时，可选用φ2.4mm焊丝作为填充材料。

焊接过程中选用相较碳钢材质稍大的焊接电压，用以提高熔池高温停留时间，为有害气体逸出提供有利条件。调整焊丝校准指针使其与焊丝端部处于同一直线，便于观察焊丝位置。埋弧焊在焊接厚壁管道时，将焊枪适当向所需焊接一侧角摆，有利于减少两侧夹渣缺陷。埋弧焊盖面层焊接时，焊枪置于管道11点或1点位置便于熔池平缓凝固、与管壁圆滑过渡。管道埋弧焊盖面焊接时，应选用比填充稍快的焊接速度，防止焊道成型过高，造成应力集中。



图6-1 焊丝校直指针

七、焊后热处理

本文中施工项目P22合金钢管道壁厚最大为76mm，在焊接过程中不可避免的存在不均匀温度场分布，加之合金钢热膨胀性较大，焊接完成后会有较大残余应力，为延迟裂纹倾向提供了有利条件。因此，焊接完成后应立即对焊接位置进行高温回火热处理。

如不能立即高温热处理时，应在焊接完成后，焊接接头尚未冷却时，立即对焊缝进行后热处理，依据SH/T3520规定加热至200~350℃，保温时间不低于30分钟，之后缓冷至室温。后热处理的目的是消氢，并不能

改善焊接应力，因此，消氢处理不能够代替高温热处理。

高温回火热处理的主要目的是降低焊接应力和降低氢致裂纹倾向。有些文献中提出在焊接完后就进行X射线检测，然后再进行焊后热处理。然而延迟裂纹的发生不仅限于焊后24小时，在24小时之后也同样存在，这种工艺顺序有可能遗漏部分延迟裂纹缺陷，将对焊接接头的安全性造成巨大隐患。为了完善施工现场焊缝保温缓冷、施工工艺连续、质量过程控制等工作，建议热处理完成后，再进行无损检测的工艺方案。

按规范SH/T3554要求，A335-P22合金钢热处理温度为725±25℃，以规格φ611×56mm管道为例，简述热处理参数。升温到300℃后，加热速度按5125/δ (℃/h) 计算，加热速度91℃/h，恒温时间2.8h。降温速度按6500/δ (℃/h) 计算，降温速度116℃/h，降温至300℃时可自然冷却。均温带宽度100mm，加热带宽度为均温带宽度加50mm，保温宽度为加热带宽度加200mm。

八、焊接过程质量检查

管道壁厚不超过20mm的管道，可一次焊接完成，并及时进行热处理，热处理完成24小时后，进行X射线检测；对于管壁厚度20mm以上的管道，为确保内部焊接质量，应进行分层探伤，待合格后继续施焊。

焊接完成后将焊缝熔渣和热影响区飞溅等打磨清理干净，要求焊缝表面不得有裂纹、咬边、气孔、夹渣、弧坑、未焊满等缺陷，焊缝分布平直规整，与母材融合处圆滑过渡，如果出现以上问题应在热处理前及时进行修磨焊补。

热处理完成后对焊缝表面进行PT渗透检测，对焊缝内部进行X射线检测，PT渗透检测要求I级合格，X射线检测在无裂纹等线形缺陷的条件下，满足II级要求为合格。(SH/T3520)

九、结语

本文重点介绍了P22管道典型的焊接工艺及其焊接质量控制要点，类似铬钼合金钢管道焊接过程中，也可参考本文介绍的工艺措施，进行施焊过程质量管理。

上述质量控制措施，已在某石油化工装置超高压蒸汽管道P22焊接施工中，得到应用。主要用于工厂化管道预制和现场安装管道5G位置固定口焊接，通过制定合理的焊接工艺和技术措施操作技巧，并在施焊前对焊工进行专项理论与实践相融合的强化培训，从坡口角度，焊接材料，焊接工艺，过程控制等方面严格把控，有效的保证了焊接质量，提高了施工进度，降低综合成本，所有焊缝外观质量和内部质量都符合相关的检验标准，经过无损检测，一次焊接合格率达到99.2%，取得较好的效果，具有一定推广意义。

参考文献

- [1] SH3501-2021, 石油化工有毒、可燃介质钢制管道工程施工及验收规范[S].
- [2] SH/T3520-2015, 石油化工铬钼钢焊接规范[S].
- [3] SH/T3554-2013, 石油化工钢制管道焊接热处理规范[S].
- [4] NB/T47014-2011, 承压设备焊接工艺评定[S].
- [5] NB/T47018-201, 承压设备用焊接材料订货技术条件[S].
- [6] 大西洋焊材手册[Z].