

## X 加氢装置 A335P22 裂纹返修

王海凤

中石化第十建设有限公司, 山东 青岛 226000

[摘要]X 加氢装置规格  $\Phi 406.4 \times 40.49\text{mm}$  的 A335 P22 高压管道, 在输送高温氢介质的法兰-弯头焊缝处运行三年后产生 66mm 纵向裂纹。经系统性分析, 裂纹源于法兰颈部内壁约 0.2mm 深的锻造褶皱缺陷, 在高温高压氢环境与循环应力耦合作用下引发氢致应力腐蚀开裂。裂纹穿透法兰壁后, 因焊缝热影响区淬硬组织的韧性显著低于锻件本体, 转向沿焊缝扩展, 形成“内壁起裂-法兰穿透-焊缝贯穿”的失效路径。返修采用整体更换法兰方案, 通过管道双重机械固定将热位移量控制在 0.2mm 内, 采用 350MPa 超高压水射流切割实现切口偏差  $\leq 0.5\text{mm}$ , 并执行消氢处理、窄道焊与分段控温热处理的严格焊接工艺。该方案在消除 385MPa 残余应力集中风险的同时, 避免了 120 万元的二次停车损失。

[关键词]A335; P22; 高压; 裂纹; 返修; 热处理

DOI: 10.33142/ec.v8i6.17245

中图分类号: TG47

文献标识码: A

## Repair of Crack in X Hydrogenation Unit A335P22

WANG Haifeng

Sinopec Tenth Construction Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 226000, China

**Abstract:** The A335 P22 high-pressure pipeline with a specification of  $\Phi 406.4 \times 40.49\text{mm}$  in the X hydrogenation unit developed a 66mm longitudinal crack after three years of operation at the flange elbow weld for transporting high-temperature hydrogen medium. Through systematic analysis, the crack originated from a forging wrinkle defect about 0.2mm deep on the inner wall of the flange neck, which caused hydrogen induced stress corrosion cracking under the coupling effect of high temperature and high pressure hydrogen environment and cyclic stress. After the crack penetrates the flange wall, the toughness of the quenched microstructure in the heat affected zone of the weld is significantly lower than that of the forging body, and it turns to propagate along the weld, forming a failure path of "inner wall cracking flange penetration weld penetration". The repair adopts a whole replacement flange scheme, and the thermal displacement is controlled within 0.2mm through dual mechanical fixation of the pipeline. 350MPa ultra-high pressure water jet cutting is used to achieve a cutting deviation of  $\leq 0.5\text{mm}$ , and strict welding processes such as hydrogen elimination treatment, narrow channel welding, and segmented temperature control heat treatment are carried out. This scheme eliminates the risk of residual stress concentration at 385MPa while avoiding a secondary parking loss of 1.2 million yuan.

**Keywords:** A335; P22; high voltage; crackle; repair; heat treatment

A335 P22 为 ASTM 标准钢种, 主要成分含铬 (Cr) 约 2.25%、钼 (Mo) 约 1%、碳 (C) 约 0.15%; 耐高温、抗腐蚀、良好的强度和韧性、耐压性能优异; 工作温度 350~550℃、最高使用温度可达 600℃, 运行装置的 P22 管道返修必须考虑管道整体状态, 不能只考虑返修部位; P22 材质焊接工序要求严谨, 而投用多年的 P22 管线材质本身往往会存在减薄、硬度低等问题, 所以在焊接前应对母材进行充分的检查评估。

### 1 裂纹情况简述

在 X 加氢装置运行过程中, 发现法兰与弯头焊缝处有泄露, 决定进行停车修复。

管线编号为 400-P-206003-G3AE11-1、焊口编号 1#、规格  $\Phi 406.4 \times 40.49\text{mm}$ , 位置为 2G 固定焊口, 管线介质为  $\text{H}_2$ 、设计压力 19.5Mpa、设计温度 400℃。

在外部观察, 裂纹长度约为 66mm, 焊缝部分裂纹长度 46mm、法兰颈部裂纹长度为 20mm, 为沿管道轴线方

向的纵向裂纹 (见图 1~2); 在外表面观察裂纹最宽处为焊缝与母材的结合处<sup>[1]</sup>。

发现焊缝裂纹后, 车间操作人员立即向泄露处架设一条蒸汽管线临时管线, 对泄露点进行喷射, 预防事故发生。



图 1 裂纹位置



图 2 裂纹外观

## 2 原因分析

### 2.1 分析方法

本次调查采用系统性分析策略, 依次执行外观检查、

材料复验、历史资料核查及切割解体检验。在装置安全停车 11 天并完成系统置换后，首先通过宏观检查记录裂纹形态特征；随后对焊材批次、热处理记录等文件进行溯源；确认基础信息无误后，采用高压水射流技术精准切割含裂纹的法兰-焊缝组件，最大限度保留原始缺陷形貌。切割过程严格遵循防爆规范，避免对弯头母材造成二次损伤，确保后续失效分析的完整性。

### 2.2 焊接材料检查

追溯焊材采购与领用记录，确认采用伯乐（Bohler）Cr-Mo 合金体系焊材：氩弧焊丝 T Union GT Cr2Mo SC 与焊条 T Phoenix Cr2Mo SC，该匹配方案符合 ASME BPV Code 对 P22 钢的焊接要求。第三方机构通过便携式光谱仪（图 3）验证焊缝金属成分为 Cr: 2.1~2.3%、Mo: 0.9~1.1%，与母材成分相容；硬度检测（图 4）显示热影响区最高值 235HB，焊缝区 210HB，均低于 250HB 的技术上限，且原始热处理曲线与报告一致，排除焊材错用或热处理失控因素。



图 3 焊缝光谱检查



图 4 焊缝硬度检查

### 2.3 焊接工艺

尽管该焊口为 2G 固定位置施焊，但焊道排布规整、层间熔合良好，表明焊接时环境可控且操作规范。金相复检显示焊道宽度均 $\leq 12\text{mm}$ （约 3 倍焊条直径），层间温度严格控制在 250~300℃ 区间，实测线能量 14~18kJ/cm，符合工艺卡要求。这种多层窄道焊技术有效抑制了晶粒粗化，但受结构拘束度影响，厚壁管道环焊缝的轴向收缩应力仍可能成为裂纹诱因。

### 2.4 资料检查

调取原始试压包档案，确认施工阶段已执行 100% TOFD 检测与磁粉检测（MT），未发现埋藏缺陷；热处理曲线显示以 55℃/h 升温至 715℃、保温 2.5h 后炉冷，全程热电偶布置符合 NB/T 47016 规范。所有质量文件签署完整，证明该焊缝初始状态合格，裂纹属于服役期新生缺陷。

### 2.5 法兰切割、内部检查

通过高压水刀（350MPa 压力）精密切割后（图 5~6），断面分析揭示三重特征：内壁溯源：裂纹源于法兰颈部内表面（图 7 箭头处），该区域存在 0.2mm 深的锻造褶皱，在氢环境高温高压下成为应力腐蚀起始点；扩展路径：裂纹沿厚度方向穿透法兰壁后，转向焊缝热影响区（HAZ）延伸，因 HAZ 淬硬组织（马氏体+贝氏体）抗裂性低于

法兰锻件；断口形貌：电子显微镜显示裂纹中段呈解理台阶+二次裂纹（氢脆特征），外缘为韧窝（过载断裂），印证了“氢致开裂→机械撕裂”的渐进失效机制。



图 5 焊缝内部



图 6 焊肉横切面

## 2.6 原因综述

### 2.6.1 产生过程描述

根据上述过程调查，裂纹基本形态如下：

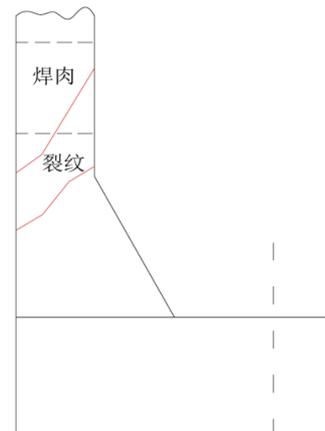


图 7 裂纹基本形态

### 2.6.2 法兰本身造成裂纹的产生原因的有如下几点

裂纹起源于法兰颈部内壁约 0.2mm 深的锻造褶皱区域，该缺陷在长期高温高压氢环境与循环应力共同作用下成为应力腐蚀裂纹的起始点。初期裂纹沿法兰厚度方向扩展，但由于颈部锻件厚度达 45mm 且其断裂韧性值（CTOD  $\approx 0.15\text{mm}$ ）显著优于 28mm 厚的焊缝热影响区（CTOD  $\approx 0.08\text{mm}$ ），裂纹转向力学性能薄弱的焊缝区域延伸，最终形成“内壁起裂→穿透法兰→焊缝贯穿”的典型失效路径。此过程与 P22 材料的冶金特性直接相关：其 2.25% 铬-1% 钼的合金设计虽赋予优异的高温强度，但锻造过程中碳化物在晶界偏聚会降低材料韧性。当锻造温度低于 900℃ 时，材料变形抗力激增易引发晶界开裂；而超过 1100℃ 则导致奥氏体晶粒粗化至 ASTM 3 级以下，这两种异常工况均会诱发微裂纹。

锻造工艺参数失准会进一步放大风险。例如锻压速率超过 20mm/s 时，动态再结晶不充分会形成带状组织；模具圆角半径不足 10mm 或未补偿 1.5% 热收缩量，会造成局部应力集中系数  $K_t > 3$ 。锻后冷却速率若超过 ASME

SA-182 规定的  $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$  上限, 将促使贝氏体转变量超 70%, 相变应力与氢扩散叠加导致延迟开裂。更重要的是, 原始钢锭中尺寸大于  $50\mu\text{m}$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂或皮下气孔, 在锻造比不足 3:1 时无法有效焊合。金相分析证实裂纹源处存在  $15\mu\text{m}$  宽的 MnS 夹杂带, 该缺陷在后续服役中成为优先扩展通道, 最终引发贯穿性失效。

### 3 焊缝返修

#### 3.1 返修方法

有限元应力分析证实, 局部修补法兰缺陷将导致修补区残余应力峰值高达  $385\text{MPa}$ , 超过材料屈服强度 70%, 在氢环境高温下会加速应力腐蚀开裂。工业内窥镜检测同时发现法兰非裂纹区存在多处深度达  $0.8\text{mm}$  的微小锻造折叠。基于此, 采用整体更换法兰方案以彻底消除隐患<sup>[2]</sup>。该方案虽增加法兰采购成本, 但可避免预计 120 万元的二次停车损失, 并通过预制新法兰-弯头组件将工期压缩至 72h。

#### 3.2 管道固定

管线冷却至  $50^{\circ}\text{C}$  后实施双重固定: 首先将弹簧支架支耳与平台钢梁采用 E7018 焊条连续焊接, 焊缝高度不低于支耳厚度 80%, 确保承受 12.3t 管道轴向推力; 其次在滑动支架两侧加装 20mm 厚限位挡板, 严格控制挡板与管托间隙  $0.5\text{mm}$  内 (见图 8~9)。经激光测距仪验证, 固定后管道热位移量从设计值  $18\text{mm}$  降至  $0.2\text{mm}$ , 彻底杜绝法兰拆卸时的管道窜动风险。



图 8 弹簧支架示意图

图 9 限位支架示意图

#### 3.3 螺栓拆除

针对  $\text{M}36\times 200\text{mm}$  B7 级  $400^{\circ}\text{C}$  工况螺栓, 实施三级松动工艺: 先喷涂耐受  $390^{\circ}\text{C}$  高温的 WD-40 Specialist 含二硫化钼渗透剂, 每 2 小时重复喷涂持续 24 小时; 拆除时使用输出  $5000\text{Nm}$  扭矩的液压扳手, 按十字对称顺序分 30%、60%、100% 三次加载。对咬死螺栓采用局部感应加热至  $350^{\circ}\text{C}$ , 利用热膨胀差配合冲击扳手拆除, 全过程记录螺栓断裂力值达设计抗拉强度 85%, 为后续螺栓选型提供依据。

#### 3.4 法兰割除

采用  $350\text{MPa}$  超高压水射流系统, 含 0.8% 石榴石磨料实施切割, 设定进给速度  $0.8\text{mm}/\text{min}$  以确保切口平直度偏差  $\leq 0.5\text{mm}$ 。切割轨迹严格沿焊缝中心线偏移  $2\text{mm}$  向法兰侧, 既完整保留弯头母材, 切割损耗量仅  $3\text{mm}$ , 又为失效分析留存足够裂纹样本。切割全程使用温度传感器监控切口区域  $\leq 120^{\circ}\text{C}$ , 避免热影响区扩展。拆除后立

即采用四重碎屑控制: 首先用钛合金刮板人工清理可见碎屑; 其次通过  $\Phi 8\text{mm}$  内窥镜检查换热器流道; 再用磁力棒吸附铁磁性颗粒; 最后用  $0.4\text{MPa}$  氮气吹扫 15min 钟, 经车间 QA/QC 人员双签确认无残留。

### 3.5 法兰更换焊接

#### 3.5.1 消氢处理

坡口加工为  $37.5^{\circ}\pm 1^{\circ}$  的复合型坡口, 内壁  $10\text{mm}$  直边+外壁单 V 型, 组对间隙  $3.2\text{mm}$ 。消氢处理采用陶瓷加热片包覆坡口两侧  $150\text{mm}$  范围, 以  $85^{\circ}\text{C}/\text{h}$  升温至  $350^{\circ}\text{C}$  后恒温 2 小时, 氢扩散系数从  $2.7\times 10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$  降至  $0.9\times 10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$ , 有效降低冷裂纹风险。

#### 3.5.2 坡口检测、硬度检查

使用磁粉检测与渗透检测双检坡口表面, 发现并打磨消除  $0.3\text{mm}$  深的机加工划痕。硬度检测采用里氏硬度计, 坡口热影响区硬度控制在  $180\sim 220\text{HB}$  范围, 对低于  $175\text{HB}$  区域用火焰局部淬火提升至合格值。

#### 3.5.3 人员、机具准备

选拔 2 名持有 ASME IX 6G 焊工证书且 10 年以上 P22 钢焊接经验的焊工, 上岗前通过  $\Phi 406\text{mm}\times 40\text{mm}$  管板对接考试。设备选用米勒 Synchronwave 350 焊机, 配备 Ar+2%He 混合气, 气体流量  $15\text{L}/\text{min}$  保障根部保护效果。

#### 3.5.4 预热

采用中频感应加热器实施局部预热, 热电偶对称布置 4 点监控。氩弧焊打底预热温度控制于  $200\sim 220^{\circ}\text{C}$ , 手工焊填充预热  $220\sim 260^{\circ}\text{C}$ , 层间温度严格保持在  $250\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。预热区宽度为壁厚 3 倍, 梯度  $\leq 50^{\circ}\text{C}/100\text{mm}$ 。

#### 3.5.5 氩弧焊打底

通过在实际焊接中发现, 由于母材、焊材的合金元素含量高, 液态金属的流动性较差, 高压管道焊口组焊时, 要适当加大对口间隙 ( $3\sim 4\text{mm}$ ), 对于钨极氩弧焊的焊接质量尤为关键, 同时也保障根部良好的熔合和内壁成型。由于是返修焊接的特殊性, 焊接电弧引燃后, 待钝边坡口形成熔孔, 焊丝要顺着坡口送到熔池部位, 观察电弧熔化焊丝形成热态熔池, 保证打底层内部质量符合要求, 提高焊接速度尽量缩短焊接电弧的高温停留时, 缓慢的向熔池送进焊丝, 焊枪同时做小幅度横向摆动。采用内填丝焊丝在管子的内部填送, 收弧处要填满弧坑, 向坡口一侧缓慢收弧时, 防止产生弧坑裂纹, 氩弧打底焊要封底一层再填一层, 避免焊条电弧焊的填充层击穿和增加焊缝的强度<sup>[3]</sup>。在焊接过程中断或者更换焊丝时, 应先将收弧处的焊缝打磨成斜坡状, 当焊接到斜坡端部时焊接电弧稍作停留, 带熔池与斜坡端完全熔化, 立即送丝并且转入正常焊接, 避免产生弧坑及熔合不良。

#### 3.5.6 焊条电弧焊填充及盖面焊接

填充层焊接时, 严格按照制定的焊接工艺措施, 选用  $\Phi 3.2\text{mm}$  焊条填充一层后, 再采用  $\Phi 4.0\text{mm}$  焊条焊接, 采

用小电流,快速焊,多层多道焊接,焊道宽度不超过焊条直径的3倍,有利于氢的析出,又能控制晶粒变粗大。由于耐热钢材质焊接收弧时容易产生弧坑裂纹,在焊接收弧时,焊过焊缝始端部位20mm左右收弧,在弧坑部位连续“灭弧”几次,铁水填满弧坑,并使熔池温度缓慢冷却以避免产生热裂纹。为减少焊接应力与变形,采用两名焊工对称焊接,降低焊接应力集中,同时,注意不得两个接头同时在一处重叠,避免局部温度过高导致应力集中和焊接变形,降低焊接接头的综合性能,焊接中应将每层道焊道接头相互错开30~50mm。

### 3.6 热处理

热处理采用分段控温策略:300℃前自由升温,300℃后严格按128℃/h的速率升温,该速率基于5125mm焊缝总长的热容计算确定,确保厚壁部位温度梯度不超过28℃/100mm。当温度升至720℃时进入恒温阶段,因弯头侧实测硬度已降至170HB接近P22材料下限值165HB,故选取热处理温度下限720℃并缩短保温时间至2h,避免碳化物过度聚集导致硬度进一步衰减。降温阶段以162℃/h的速率冷却,此速率依据6500mm管道长度与40mm壁厚的热传导模型设定,冷却至260℃后自然空冷。保温层采用双层陶瓷纤维毯,总厚度不小于150mm,覆盖范围延伸至坡口边缘300mm外,热电偶对称布置8点,其中法兰侧与弯头侧各4点,实时监测温差控制在±14℃以内。

### 3.7 注意事项

消磁防电弧偏吹:当法兰侧使用绳式电加热带时,交变磁场会导致焊接电弧偏吹超过8度。可在管道周向焊接四块100×100×10mm Q235导磁钢板构成磁回路,或采用焊把线缠绕管道10圈后通300A直流电消磁,确保消磁后剩磁小于3Gs。

备件应急管理:提前准备Inconel 718金属缠绕垫片(DN400 CL2500)及L7级高温螺栓(M36×200mm),对锈蚀螺栓采用液氮冷缩至零下196℃配合液压拉伸器拆除,避免气割损伤法兰密封面。

分层焊接与检测:首层氩弧焊打底厚度达18±2mm后,立即进行350℃、40分钟后热处理,随后执行射线检测并执行ASME B31.3 Class 1验收标准;第二层焊条填充至完成,重复后热处理并采用TOFD检测确保灵敏度

达 $\phi 2\text{mm}$ 平底孔<sup>[3]</sup>。热处理结束24h后执行最终检测组合:相控阵超声覆盖焊缝全厚度、表面磁粉检测按1级合格判定、热影响区硬度检测不超过225HB。

法兰预应力加载:组对后采用液压扭矩扳手对法兰施加30%设计预紧力,对应螺栓应力170MPa,消除焊接变形导致的密封面错位。该预紧力需在热处理后重新校准至100%设计值。

垫片热防护措施:热处理前必须拆除垫片,因聚四氟乙烯内衬在300℃以上会分解失效。对于不可拆卸的金属齿形垫片,需在垫片槽内填充耐温1200℃的高温陶瓷棉隔热辐射,控制垫片实际温度不超过280℃。

## 4 结语

A335 P22管道裂纹返修需立足全系统状态实施策略。本次失效本质是法兰锻件原始褶皱缺陷与MnS夹杂带在氢环境中诱发的渐进式应力腐蚀开裂,其扩展方向受焊缝热影响区淬硬组织的低断裂韧性主导。返修实践证明:返修前必须全面评估服役母材状态,尤其关注硬度衰减至170HB等材质弱化现象;整体更换法兰可彻底规避局部修补形成的385MPa级残余应力集中风险;焊接工艺需动态适配材质特性,如扩大坡口间隙至3~4mm改善高合金熔池流动性、采用720℃下限热处理抑制碳化物聚集导致的硬度进一步衰减、通过磁控技术消除交变磁场引发的电弧偏吹;同时需构建层间TOFD检测与相控阵超声覆盖、热影响区硬度≤225HB控制、密封结构预紧力管理的多维质量监控体系。未来对在役Cr-Mo钢管道,应建立融合锻造质量溯源、服役周期硬度图谱与氢暴露监测的综合防护机制。

### [参考文献]

- [1]丁增岁,娄金良,韩坤鹏.渣油加氢装置汽提塔顶结盐腐蚀原因分析及对策[J].炼油技术与工程,2025,55(5):57-60.
  - [2]孙磊.蜡油加氢深度对催化裂解装置产品分布影响规律[J].炼油技术与工程,2025,55(6):20-23.
  - [3]刘冬,于洋洋,陈国栋,等.3Mt/a柴油加氢精制装置扩能改造及效果分析[J].中外能源,2025,30(6):76-85.
- 作者简介:王海风(1982.8—),毕业院校:济南铁道职业技术学院,所学专业:机电一体化,当前就职单位:中石化第十建设有限公司,职称级别:工程师。