

乙烯装置减温水 TP304H 管线母材开裂失效分析

李军业¹ 余江海¹ 何昊²

(1. 中化泉州石化有限公司 福建泉州 362000; 2. 天华化工机械及自动化研究设计院有限公司 甘肃兰州 730000)

摘要: 通过宏观检查、渗透检测、化学成分分析、力学性能检验、金相检验、扫描电镜及能谱分析, 找出了裂解炉减温水管线开裂的原因。结果表明: 减温水管线开裂失效机理为热疲劳开裂, 并伴有 Cl 离子应力腐蚀。主要失效原因为该部位温度较高, 存在干湿交替工况。

关键词: 减温水管线; 开裂; 热疲劳; 干湿交替

某单位 100 万吨/年乙烯装置 F-103 裂解炉减温水管线于 2020 年 9 月投入使用, 运行后每 30 天按计划烧焦 1 次, 每次烧焦约 20~24 小时。2023 年 9 月该管线在运行过程中, 装置班组人员巡检发现 F-103 裂解炉 7 层平台减温水管线出现介质泄漏, 距焊缝约 15mm 部位可见一处环向开裂, 裂纹位于管线安装位置的 0 点方向。

1. 运行工况介绍

减温水管线详细参数见表 1。减温水管线用于调节超高压蒸汽管线的温度, 其与超高压蒸汽管线采用焊缝连接。超高压蒸汽管线工作温度 515℃、工作压力 9.3MPa。

表 1 减温水管线主要技术参数

| 名称 | 减温水管线 |
|------------|----------------|
| 设计压力 (MPa) | 17.5 |
| 工作压力 (MPa) | 9.0 |
| 设计温度 (℃) | 170 |
| 工作温度 (℃) | 143.7 |
| 介质 | 超高压锅炉给水 |
| 规格 | Φ60.3 × 6.35mm |
| 材质 | TP304H |

2. 检测结果及分析

2.1 宏观检查

图 1 为减温水管段宏观形貌, 管段外壁呈灰褐色锈蚀状, 安装位置的 0 点方向距失效管段管端约 15mm 处存在长约 10mm 的环向裂纹, 该裂纹周围存在褐色腐蚀产物。管段沿轴向剖开局部形貌及

取样位置如图 1b 所示, 内壁整体呈暗红色, 无明显冲刷腐蚀痕迹; 外壁发现的 10mm 环向裂纹对应的内壁处, 裂纹长度约 40mm, 可见该裂纹为贯穿裂纹, 且由内壁启裂; 贯穿裂纹附近存在多条非贯穿环向裂纹, 且基本相互平行。于贯穿裂纹尖端处截取轴向金相试样, 贯穿裂纹处打开取断口试样。管段内壁渗透检测形貌可以看出, 安装位置的 0 点方向内壁存在数条环向裂纹, 越靠近贯穿裂纹处环向裂纹越密集, 安装位置的 6 点方向内壁未见裂纹。



a. 管段外壁局部形貌



b. 管段内壁局部形貌及取样位置

图 1 减温水管段宏观形貌

2.2 化学成分分析

对减温水管段进行化学成分分析, 结果 (见表 2) 表明减温水管段化学成分符合 ASMESA-312/SA-312M 对 TP304H 材料的要求。

表 2 化学成分分析结果 (Wt%)

| 项目 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
|----------------------------|-----------|-------|-------|--------|--------|-------------|------------|
| 实测值 | 0.043 | 0.309 | 0.78 | 0.023 | 0.002 | 18.37 | 8.11 |
| ASME SA-312 /SA-312M | 0.04~0.10 | ≤1.00 | ≤2.00 | ≤0.045 | ≤0.030 | 18.00~20.00 | 8.00~11.00 |

2.3 力学性能检验

减温水管段常温力学性能试验结果见表 3, 规定屈服强度、抗拉强度以及断后伸长率均符合 ASME SA-312/SA-312M 对 TP304H 材料的要求。

表 3 减温水管段力学性能

| 项目 | 抗拉强度 /MPa | 屈服强度 /MPa | 断后伸长率/% |
|---------------------|-----------|-----------|---------|
| 实测值 | 685 | 322 | 60 |
| ASME SA-312/SA-312M | ≥ 515 | ≥ 205 | ≥ 35 |

对减温水管段进行维氏硬度测试分析, 分析结果 (见表 4) 表明, 裂纹附近、近外壁区、心部及近内壁区硬度接近, 平均硬度值范围为 174HV ~ 179HV。

表 4 维氏硬度分析结果 (HV10)

| 分析部位 | | 测点编号 | | | | |
|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 均值 |
| 减温水管段 | 裂纹附近 | 183 | 180 | 181 | 171 | 179 |
| | 近外壁区 | 199 | 174 | 174 | 170 | 179 |
| | 心部 | 170 | 184 | 182 | 173 | 177 |
| | 近内壁区 | 175 | 175 | 174 | 172 | 174 |

2.4 金相检验



图 2 裂纹尖端轴向截面裂纹形貌及金相组织

裂纹尖端轴向截面裂纹形貌及金相组织如图 2 所示, 裂纹均启裂于内壁, 沿厚度方向由内向外穿晶扩展, 裂纹平直, 基本无分支。金相组织为奥氏体, 平均晶粒度 5 级, 满足 ASME SA-312/SA-312M 对 TP304H 材料晶粒度 7 级或更粗的要求。

2.5 扫描电镜 (SEM) 及能谱 (EDS) 分析

原始开裂区 SEM 形貌所示, 可见原始开裂区表面呈解理台阶、河流状花样、海滩状花样, 腐蚀产物呈颗粒状、局部呈絮状覆盖于断口表面, 且存在二次裂纹; 清洗后的原始开裂区表面呈现明显的疲劳辉纹, 为典型的疲劳断裂形貌; 打断区表面呈韧窝状, 为典型的塑性断裂形貌, 如图 3、图 4 所示。

对原始开裂区腐蚀产物进行 EDS 分析。由分析结果可知, 原始开裂区腐蚀产物主要以铁的氧化物形式存在, 除含 Na、Ca、Al 等杂质元素以外, 含有大量的具有腐蚀性 Cl 元素, 最高处达 0.67%, 近内壁区 Cl 元素含量高于近外壁区。

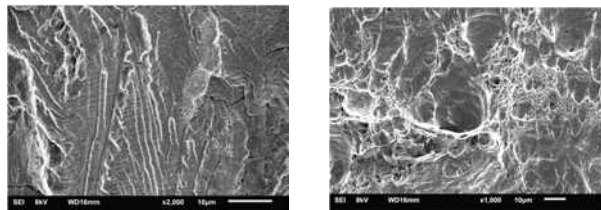


图 3 原始开裂区 SEM 形貌(清洗后) 图 4 打断区 SEM 形貌(清洗后)

3. 分析及讨论

根据以上分析可知, 减温水管线 TP304H 化学成分、拉伸性能均满足标准要求; 裂纹附近、近外壁区、心部与近内壁区维氏硬度接近, 硬度未见异常; 裂纹部位附近金相组织正常, 平均晶粒度满足标准要求; 贯穿裂纹及非贯穿裂纹均启裂于内壁, 沿厚度方向由内向外穿晶扩展, 裂纹平直, 基本无分支; 断口形貌可见疲劳辉纹, 结合金相样品的裂纹扩展形态, 来样管段开裂失效机理为疲劳开裂, 并伴有应力腐蚀开裂特征。

综上推断, 超高压蒸汽管线需进行温度调节时, 通过增大或减少减温水管线的水流量实现, 该减温水管线距超高压蒸汽管线较近区域, 由于受热传导的影响该区域温度较其它部位高, 位于安装位置 0 点方向的内壁表面, 长期处于气液两相环境, 受温度的影响, 该区内壁表面干湿交替, 进而产生热应力, 导致接近超高压蒸汽管线的区域产生热疲劳开裂, Cl 离子于裂纹内发生浓缩, 引起 Cl 离子应力腐蚀, 该应力腐蚀对疲劳开裂起促进作用, 裂纹沿壁厚方向贯穿后, 最终引起开裂和介质泄漏。

4. 结论及建议

减温水管段失效机理为热疲劳开裂, 并伴有 Cl 离子应力腐蚀。主要失效原因为该部位温度较高, 存在干湿交替工况。建议在相似工况部位进行 100%无损检测, 对出现裂纹的管段及时更换。

参考文献

- [1]GB/T 222.《钢的成品化学成分允许偏差》[S].2006
- [2]GB/T 11170.《不锈钢 多元素含量的测定 火花原子发射光谱法(常规法)》[S].2008
- [3]GB/T 228.1《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》[S].2021
- [4]GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法》[S].2009
- [5]GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》[S].2015
- [6]GB/T 17359—2012《微束分析能谱法定量分析》[S].2012