

化肥装置合成气管道焊缝裂纹研究

杨圣轩（宁夏特种设备检验检测院，宁夏 银川 750001）

摘 要：合成气管道是将合成气从合成塔运送至下游换热器的关键设备，对化肥装置正常运行至关重要。本文通过探究某化肥装置合成气管道定期检验中发现的重大裂纹缺陷形成机理，提出处理意见，从而保障装置长周期安全运行。

关键词：TP347H；合成气管道；裂纹；焊接

0 引言

在化肥装置中，合成塔及合成气管道是装置运行的关键设备，具有压力大、温度高、失效破坏性大、失效即停产的特点，一直以来都是设备管理人员和安全管理人员的关注重点，也是每次定期检验和日常检修的重点项目。藉由下文，笔者将对某化肥装置合成气管道定期检验中发现的重大裂纹缺陷，通过技术手段探究裂纹形成机理，提出修复处理意见，消除安全风险，保证装置长周期运行。

1 某合成气管道及裂纹情况概述

2021 年某化肥装置停车检修期间，笔者带领检验队伍对合成单元特种设备开展定期检验，此编号为 PG1801 的合成气管道是本次重点检验项目。

1.1 管道基本概况

1.1.1 管道参数

此管道由中国寰球工程公司设计，设计单位资质和设计资料均符合要求。管道工作参数如下表 1：

表 1 管道工作相关参数

管道编号	介质	规格	工作压力	工作温度	材质	长度
PG1801	合成气	Φ508*44.5mm	14.95MPa	426℃	TP347H	13.6m

由上表 1 可知，此管道选用的材质为 TP347H。

TP347H 成分和性能与国标 1Cr19Ni11Nb 类似，属于高碳含铌 Cr-Ni 奥氏体不锈钢，由于含稳定化元素 Nb，具有良好的力学性能和耐晶间腐蚀能，一般应用于高温、高压、抗晶间腐蚀环境。此管道设计选材符合合成气管道的应用场景。

1.1.2 运行状况及宏观检查

此管道于 2015 年 12 月由中石油某建设公司安装完成。由于受到天然气供应不足的影响，化肥装置于 2018 年 6 月才正式投产运行。

经过查阅生产运行记录和向现场工艺人员沟通了解，化肥装置和此合成气管道投用以来一直运行正常，未发生超温、超压、甚至泄露的情况，不存在工艺参数循环波动工况。检验人员现场宏观检查时，亦未发现管道保温层破损、管体色变、支吊架位移等状况。

1.1.3 管道焊口现场图

管道焊口现场见图 1。

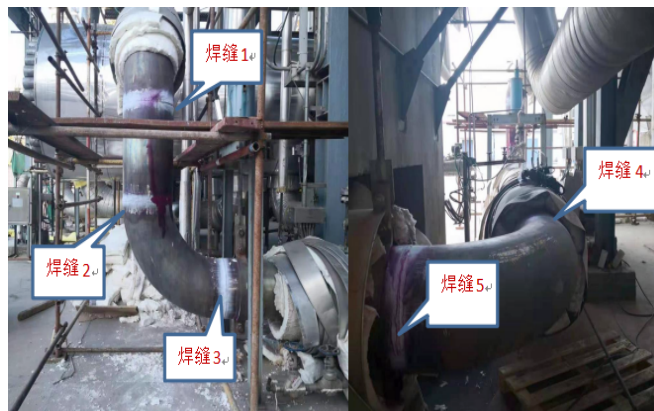


图 1 管道焊口现场图

1.2 裂纹缺陷基本概况

TP347H 为不锈钢材质，为此我们根据《承压设备无损检测》NB/T47013-2015 标准选取渗透检测方法。在镀铬试块（B 型对比试块）验证渗透检测剂系统灵敏度及操作工艺正确性后，对此合成气管道开展渗透

检测。

1.2.1 裂纹参数

经渗透检测，发现焊接接头 H1、H3、H4、H5 表面存在重大裂纹缺陷，缺陷尺寸如下表 2：

表 2 焊接接头 H1、H3、H4、H5 表面重大裂纹缺陷尺寸

焊缝编号	H1	H3	H4	H5
裂纹长度	422mm	456mm	419mm	204mm

1.2.2 裂纹分布特征

焊接接头 H1、H3、H4、H5 裂纹缺陷均断续分布于焊缝表面的多个焊道及焊道熔合线上，形态规则特征明显，未见横向跨越两个或多个焊道的裂纹缺陷。热影响区及附近母材未发现裂纹缺陷。裂纹处的焊接接头及管体表面色泽正常，未发现超温变色现象；管体椭圆度正常，未见塑性变形现象。

1.2.3 裂纹现场图例

焊接接头 H4 表面裂纹细节见下图 2：

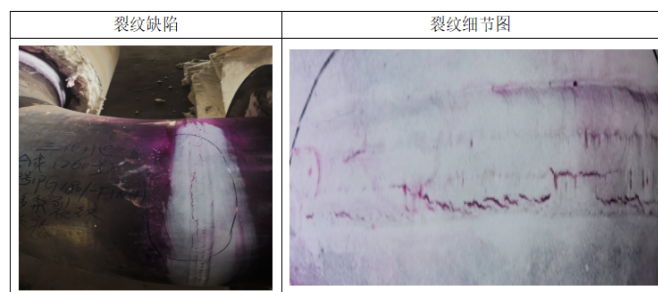


图 2 焊接接头 H4 表面裂纹图

2 裂纹成因技术分析

经过检验，确定此合成气管道宏观检验、壁厚测定、超声波检测均未见异常。为了消除安全隐患，确保装置长周期运行，亟需采取技术措施查明裂纹缺陷产生原因。重点考虑以下两个方面的措施：一个是理化分析，分析判断裂纹性质，判断母材、热影响区、焊缝金属有无异常；二是应力分析，判断管道系统应

力分布有无异常，从而分析裂纹与应力的关系。

2.1 理化分析

理化分析采用现场金相检测和硬度检测两种方式。

2.1.1 金相检测

选取焊接接头 H4 的裂纹区域焊缝、热影响区及母材做现场金相检测，得出如下现场金相图（见图 3）。

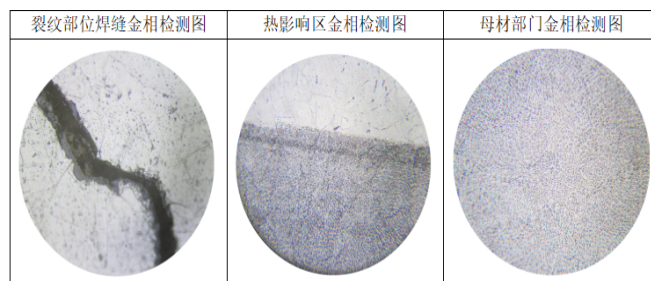


图 3 金相图

由现场金相图组可知，裂纹微观形态呈现为沿晶开裂，材料焊接学术界一般认为此形态下的裂纹性质倾向于热裂纹或再热裂纹，即由于焊接时，熔覆金属高温结晶或焊接后焊接接头再次加热（热处理或生产工况）而产生的裂纹；热影响区和母材的金相图显示金属晶粒粗细均匀，未见晶粒增大现象，可见管道材料性能未受焊接施工及生产运行影响。

2.1.2 硬度检测

现场选取焊接接头 H4 的裂纹部位焊缝、无裂纹部位焊缝及热影响区、母材等典型部位做材料硬度测定，通过对比各部位材料硬度值的差异性判断硬度与裂纹的关系。经过现场测定，裂纹部位焊缝材料硬度值区间范围为 210~230HB，无裂纹部位焊缝材料硬度值区间范围为 160~180HB，热影响区材料硬度值区间范围为 140~160HB，母材硬度值区间范围为 140~150HB。

根据中华人民共和国电力行业标准《火力发电厂金属技术监督规程》DL/T438-2016，TP347H 材料钢管硬度推荐值范围为 140~192HB。由以上测定数据可知，裂纹部位焊缝材料硬度值明显高于其他部位材料硬度值且高于标准推荐范围，裂纹部位焊缝材料硬度值存在异常。无裂纹部位焊缝、热影响区及母材材料硬度值符合标准推荐范围。由此可见，此合成气管道焊缝材料硬度与裂纹形成直接对应关系。

材料焊接学术界一般认为金属材料硬度值越大韧性越小越容易产生焊接裂纹缺陷，焊缝材料硬度值与

热影响区、母材的硬度值差值较大, 可以造成局部应力集中, 长期运行中易形成裂纹缺陷。影响焊缝材料金属硬度的因素有很多, 焊接线能量、层间温度、环境温度等均可以对其产生直接影响。

经过仔细了解, 此合成气管道是冬季施工安装, 环境温度对硬度值的影响尤其明显。如果防风保温措施不当, 焊后冷却速度过快则造成热量分布不均匀, 焊缝表面特性呈现淬火倾向, 造成焊缝硬度值偏大。在此情况下, 焊接金属冷却过程中焊缝表面与内部间、焊道与焊道间温度差异较大形成温差应力继而引起硬度值较大部位的焊缝表面产生裂纹缺陷。这与上文中“断续分布于焊缝表面的多个焊道及焊道熔合线上, 形态规则特征明显, 未见横向跨越两个或多个焊道的裂纹缺陷”的裂纹分布特征基本吻合。

2.2 应力分析

根据现场管道走向结合其运行参数, 依据管道设计规范 ASME B31.3 Process Piping, 计算得到如下持续应力云图 (见图 4)。

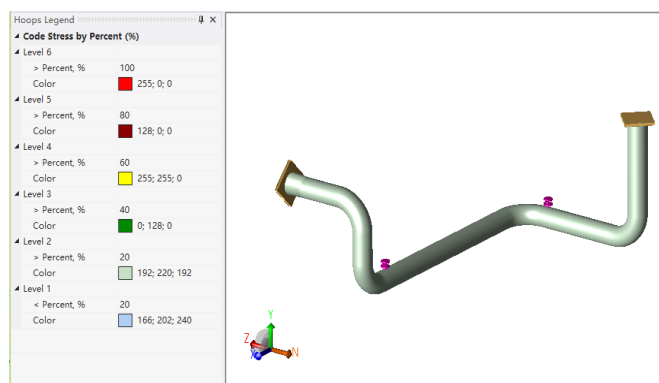


图 4 持续应力云图

根据计算结果, 管线各节点应力和最大应力基本相同, 应力值基本为许用应力的 $30 \pm 1.5\%$ 范围内, 符合要求相关标准要求, 可排除管道系统应力对裂纹产生的影响。

综合以上理化分析和应力分析结果, 确认了裂纹性质为热裂纹或再热裂纹, 硬度值偏大与裂纹产生有直接对应关系; 排除了合成气管道微观组织和管道系统应力对裂纹产生的影响。再结合管道裂纹表面特征及分布规律, 基本可判断此合成气管道焊缝裂纹是由焊接过程或热处理过程工艺控制不当引起。

3 裂纹修复措施

经查阅相关文献获知, 高温服役过程 TP347H 材质管道发生表面裂纹是一项长期困扰材料焊接学术界

的疑难问题, 目前没有比较成熟的解决方法, 只能从材料成型、焊接过程等方面综合应对。在参与裂纹的修复处理时, 我们建议从优化焊接工艺方面入手, 重点针对焊接线能量、层间温度、环境温度采取如下修复措施:

第一, 对于焊缝进行渗透检测, 发现裂纹时在裂纹前端采用样冲进行打点;

第二, 沿着裂纹方向机械打磨, 防止打磨消除过程中裂纹继续扩展, 过程中进行渗透检测, 打磨直至裂纹消除为止;

第三, 选用 TGF347 焊丝 (要求含碳量 $\geq 0.04\%$)、E347-15 (FOX E347H) 焊条, 铁素体含量控制在 FN5-10;

第四, 焊接过程采用小电流、多层多道焊, 小摆动或不摆动, 摆动宽度不超过焊条直径的 2.5 倍, 层间温度控制在 60°C 以下, 环境温度控制在 20°C 以上;

第五, 采用打底焊 + 填充焊焊接方式, 每层焊完后进行渗透检测, 及时发现并消除焊接裂纹; 焊接层厚度达到 15mm 时进行 RT 检测; 全部焊缝焊完后进行 RT、UT、PT 检测;

第六, 抽查焊缝表面铁素体含量, 铁素体含量应不小于 5FN;

第七, 不进行焊后热处理。

4 结语

通过对某化肥装置合成塔合成气出口管道理化分析和应力分析, 及时找到了焊缝裂纹产生的原因。TP347H 材质的管道在安装或维修改造期间, 应严格控制现场焊接和热处理工艺, 即使措施充足前提下, 也尽量避免在下雨、大风或低温天气施工, 防止焊缝出现气孔、飞溅或微观开裂等缺陷; 冬季施工时应有一定的环境温度控制措施, 防止焊缝冷却速度过快, 出现熔覆金属淬硬倾向, 增加了焊缝硬度继而增加裂纹敏感性; 控制焊接能量输出和层间温度, 防止出现晶粒粗大造成应力集中; 增加无损检测频次, 及早发现焊接缺陷, 以便于及时查明原因, 进一步改进工艺。

参考文献:

- [1] 董彦伟. 化工设计中的管道应力分析 [J]. 化工管理, 2021(08).
- [2] 丘平. TP347H 不锈钢厚壁管道的焊接 [J]. 石油化工设备技术, 2011, 32(03).
- [3] 张捷, 杨行炳, 等. 高温再热器 SA-213TP347H 钢管裂纹原因分析 [J]. 失效分析与预防, 2018, 13(04).