

高压换热器接管坡口堆焊层缺陷成因分析及处理方案

程传裕

(中石化广州工程有限公司, 广东 广州 510620)

摘 要: 炼化装置中的高压换热器长期在高温、高压的临氢环境中运行, 为抵抗高温 H_2 - H_2S 的腐蚀, 通常要在换热器内表面堆焊不锈钢耐蚀层, 并在换热器接管顶端堆焊镍基合金, 以便在现场换热器与管道组对焊接时和对应的奥氏体不锈钢管道焊接。文章针对某渣油加氢装置厚壁接管坡口堆焊 INCONEL625 后出现裂纹的问题, 系统分析了堆焊层焊接工艺、焊后热处理、无损检测、焊缝表面打磨处理等方面可能造成缺陷的成因。针对相应的缺陷制定了修复方案, 并对避免出现同类问题给出了相应的建议和措施。文章对高压换热器厚壁接管坡口堆焊层出现的问题及解决措施提供了工程参考。

关键词: 高压换热器; 厚壁接管; 坡口; 堆焊层; 缺陷形成; 成因分析; 处理方案

中图分类号: TG 156

文献标志码: A

文章编号: 1009-3281 (2026) 03-0027-005

加氢装置反应系统中的高温、高压换热器, 如加氢反应器、热高压分离器、高压换热器等, 长期在临氢环境中运行, 在此操作条件下, 物料中 90%~98% 的有机硫将转化为 H_2S , 造成此类换热器面临较严重的高温 H_2 - H_2S 腐蚀。氢促进 H_2S 加速对钢材的腐蚀, 通常表现为均匀腐蚀, 并伴随硫化亚铁锈垢的形成^[1], 加之反应系统换热器操作条件苛刻, 此类腐蚀一旦导致设备破坏, 将产生特别严重的后果。

为抵抗高温 H_2 - H_2S 腐蚀, 通常要在与介质接触的内表面堆焊不锈钢覆盖层^[2], 而对应的管线通常选用奥氏体不锈钢, 如 S32168、S34778 等奥氏体不锈钢。虽然设备接管与管道通常采用法兰连接, 但对于高压区换热器, 需要减少泄漏点或部分换热器接管, 由于空间限制、螺栓拆装不方便等原因, 工程上常选择将换热器接管与对应管道直接焊接连接, 这就造成不同材质换热器接管与管道接管相焊的异种钢焊接。为减少异种钢焊接时易出现的焊接缺陷, 通常采用在换热器接管端部堆焊一层过渡层合金, 项目现场焊接时再与相连的奥氏体不锈钢管道焊接。

在采取上述措施的情况下, 由于设备制造遗留缺陷、现场焊接不规范等原因, 仍不时会出现接管端部堆焊的过渡层合金产生缺陷的情况。本文基于某炼化企业建设的大型渣油加氢装置高压换热器接管

处出现的堆焊层缺陷, 从坡口结构设计到制造过程, 再到现场焊接等各个环节进行原因分析, 并提出处理措施和预防建议。

1 高压换热器接管坡口结构简介

高压换热器接管采用铬钼钢 + 堆焊不锈钢时, 通常采用的坡口结构如图 1 所示。接管内部堆焊层为双层不锈钢, 其中过渡层为 TP309L, 表面层为 TP347, TP347 作为耐蚀层, 换热器接管的坡口处堆焊 INCONEL625。

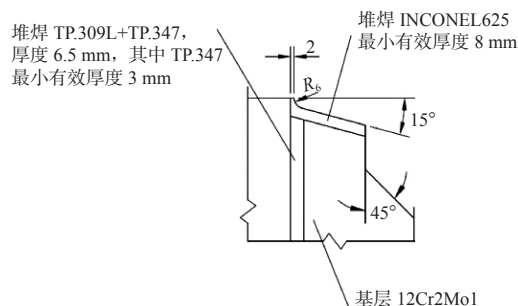


图 1 高压接管坡口结构型式

收稿日期: 2026-01-19

作者简介: 程传裕 (1982—), 高级工程师, 本科。主要从事压力容器设计和研究工作。E-mail: chengcy.lpec@sinopec.com。

在换热器接管的坡口处额外堆焊 INCONEL625, 主要基于以下几个核心原因:

(1) 解决异种钢焊接的冶金难题。如果直接在接管的不锈钢堆焊层(TP347)上焊接不锈钢管道, 焊缝的根部(即最靠近铬钼钢基材的部分)实际上是高铬镍奥氏体不锈钢(焊缝金属)与铬钼钢基材的直接融合。这两种材料在化学成分、金相组织和热物理性能(特别是热膨胀系数)上差异巨大。

在焊接热循环和后续设备运行的热应力作用下, 这种异种钢焊接界面极易产生高硬度的马氏体脆化层(由于铬钼钢的稀释作用, 焊缝根部合金成分发生变化)和较大的残余应力(因膨胀系数不同而产生)。异种钢的焊接使焊缝根部成为裂纹敏感区, 在换热器启停或压力波动时, 可能诱发回火脆化或应力腐蚀开裂, 严重威胁换热器安全。

(2) INCONEL625 是“理想的过渡材料”。INCONEL625 属于 Ni-Cr-Mo 合金, 具有优秀的抗点蚀、耐应力腐蚀、高温强度和韧性, 在各种介质中有优良的耐腐蚀性能^[3], 能够耐受苛刻的临氢(H_2+H_2S)环境以及设备运行中的热疲劳。焊接时通常采用手工焊条电弧焊或钨极氩弧焊, 这两种方法具有热输入小、焊缝质量高、应用范围广的优点^[4], 能够同时展示出很好的与铬钼钢、不锈钢的相容性。

与铬钼钢的相容性: 镍基合金与铁素体铬钼钢的冶金相容性优于奥氏体不锈钢。焊接时, 625 合金对铬钼钢的稀释不敏感, 能有效抑制脆性马氏体组织的形成, 大幅降低根部开裂风险。

与不锈钢的相容性: INCONEL625 可以与奥氏体不锈钢(如 TP347)进行焊接, 且焊缝金属具有良好的塑性和韧性。

(3) 简化现场焊接工艺的同时保证质量

创造同材质焊接条件: 坡口堆焊 INCONEL625 后, 现场安装焊接时, 实际进行的是“奥氏体不锈钢管道”与“INCONEL625 堆焊层”之间的焊接。这本质上更接近于同种或相近材质的焊接。

降低技术要求: 这种匹配大大降低了现场焊接工艺的复杂性和敏感性, 对焊工技能的要求相对降低, 更容易保证焊接接头的质量和一致性。

明确工艺评定: 焊接工艺规程可以针对“不锈钢与 INCONEL625”这一特定材料组合进行开发和评定, 工艺窗口更宽, 可靠性更高。

2 接管、堆焊层以及坡口加工过程

(1) 接管入厂复检。换热器管、壳程出入口接管锻件入厂后, 按设计要求对接管锻件按同冶炼炉号、相近的锻造比、同热处理制度组, 按批进行了化学分析、力学性能试验等复验, 检验结果均满足技术文件的要求; 管、壳程出入口接管锻件按 NB/T 47013.3—2015 对锻件进行了 100%UT 检测, I 级合格。

(2) 接管待堆焊面机加工及表面检测。管、壳程出入口接管锻件待堆焊面加工后, 加工表面按 NB/T 47013.4—2015 进行了 100%MT 检测, I 级合格。

(3) 接管内壁堆焊不锈钢。管、壳程出入口接管内壁堆焊后, 按 NB/T 47013.3—2015 对堆焊贴合层进行了 100%UT 检测 I 级合格, 按 NB/T 47013.5—2015 进行了 100%PT 检测, I 级合格。

(4) 接管坡口堆焊。管、壳程出入口接管内壁堆焊完成后, 采用 ENiCrMo-3 焊条对接管坡口端面堆焊了 INCONEL625, 堆焊层最小厚度 8 mm。

(5) 接管坡口机加工及检测。进行管、壳程出入口接管堆焊坡口机加工, 机加工表面按 NB/T 47013.5—2015 进行了 100%PT 检测, I 级合格, 并按 NB/T 47013.2—2015 进行了 100%RT 检测, 技术等级 AB 级, II 级合格。

(6) 接管与管壳程组装焊接及热处理。管、壳程出入口接管组装、焊接完成后随换热器进行了最终热处理, 热处理温度(690 ± 14) $^{\circ}\text{C}$, 热处理时长 8 小时。

3 缺陷产生及形态

本批高压换热器制造完成后运送到项目现场并安装完成, 换热器吊装完成约 6 个月后与对应管道进行焊接。焊接前对 10 台换热器(换热器 A~换热器 J)共 40 个管口坡口堆焊层的着色检测中发现 21 个堆焊层有微小裂纹, 深度从 1~3 mm 不等, 其中打磨后的微观图见图 2。分布见表 1。

4 缺陷产生原因分析

为了查清缺陷产生的原因, 设计方、换热器制造商、建设单位等组成专家组, 从以下几个方面进行了原因排查。

(1) 堆焊焊材。根据技术协议和设计文件要求,

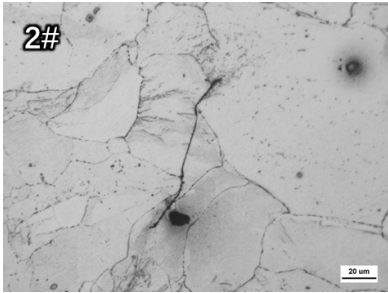


图 2 高压接管堆焊层微裂纹

焊材采用 ENiCrMo-3 焊条, 焊材入厂后, 对焊材进行了复验, 经检查复验结果合格。经分析, 焊材成分见表 2, 符合标准要求。

(2) 焊接工艺。焊接工艺有专用焊接工艺评定支撑, 评定过程符合 NB/T 47014—2023 标准要求, 制备过程经特检院见证、审核。经共同确认, 焊接工艺符合焊接工艺评定要求。

(3) 焊接过程控制。管、壳程出入口接管坡口

表 1 高压接管坡口缺陷统计

	换热器 A	换热器 B	换热器 C	换热器 D	换热器 E	换热器 F	换热器 G	换热器 H	换热器 I	换热器 J
管口 1	有	有	有	—	有	—	—	有	有	有
管口 2	—	—	有	有	有	—	—	—	有	—
管口 3	—	—	—	—	有	有	有	—	有	有
管口 4	—	有		有	有	—	—	—	有	有
总计	1	2	2	1	4	1	1	1	4	3

表 2 堆焊材料 (ENiCrMo-3) 成分质量分数

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Nb+Ta	Fe	Cu	Mo	其他
标准值	≤ 0.10%	≤ 0.75%	≤ 1.0%	≤ 0.02%	≤ 0.03%	20.0%~23.0%	≥ 55.0%	3.15%~4.15%	≤ 7.0%	≤ 0.50%	8.0%~10.0%	≤ 0.50%
实测值	0.013%	0.35%	0.50%	0.006%	0.004%	22.01%	63.99%	3.75%	0.23%	0.03%	8.96%	0.1%

堆焊过程中, 焊接操作人员严格按焊接工艺要求进行堆焊。堆焊完成并机加工后, 对管、壳程出入口接管坡口堆焊层按 NB/T 47013.2—2015 进行了 100%RT 检测, 技术等级 AB 级, II 级合格, 并按 NB/T 47013.5—2015 进行了 100%PT 检测, I 级合格。

(4) 接管坡口堆焊层厚度。为保证堆焊层厚度, 在实际堆焊时要求接管坡口堆焊厚度为 13.33 mm, 堆焊后进行坡口加工。

(5) 接管焊后热处理。管、壳程出入口接管属于受压元件, 按 GB/T 150.4—2011 标准中 8.2.2.1 条规定任意厚度 12Cr2Mo1 焊接接头需要进行焊后热处理。管、壳程出入口接管与管箱筒体组装、焊接完成后随换热器进行最终热处理。

经分析热处理对堆焊层的影响, 接管坡口堆焊 ENiCrMo-3, 堆焊过程中产生焊接残余应力, 且在堆焊层贴合处由于异种钢焊接形成淬硬层, 该处硬度较高, 通过焊后热处理降低硬度, 消除堆焊过程中产生的焊接残余应力; ENiCrMo-3 焊材在焊接过程中, 由于 S 杂质在焊缝金属中偏析, S 和 Ni 形成 Ni₃S 低熔点共晶物, 经对产生微裂纹的坡口处堆焊层

进行的晶相分析验证了此点, 见图 3。管、壳程出入口接管坡口制造完成后, 随换热器进行最终热处理, 在热处理释放应力过程中, 低熔点共晶物在拉应力作用下堆焊层表面存在产生微裂纹的风险。同时堆焊层在随换热器本体热处理过程中, 热处理温度及时间由母材决定, 相同热处理状态下堆焊层中析出相较较多, 使其耐腐蚀性能明显变差^[5]。

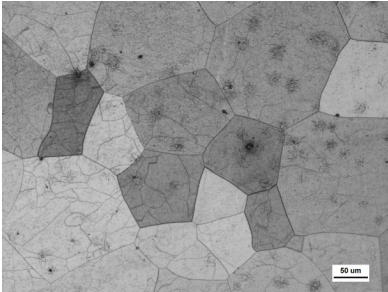


图 3 堆焊层热处理后的共晶物

(6) 坡口打磨。打磨过程中, 打磨工具的选用不当、打磨时长过长, 造成了表面裂纹进一步扩展。

(7) 存在的制造工艺问题。通过分析发现, 坡口 RT 检测时未带补偿块, 导致对堆焊层缺陷检测不

全面。同时管、壳程出入口接管坡口堆焊后,未对接管坡口堆焊层进行 UT 检测,无法确定结合面是否存在超标缺陷。接管随换热器最终热处理后,接管坡口未安排 PT 检测工序,热处理后接管坡口堆焊层表面可能产生的缺陷未在产品出厂前发现。

经过对以上 7 个方面的分析,发现裂纹产生的主要原因集中在三个方面,一是焊后热处理措施不当,并且热处理后未对坡口再次进行表面检测,造成缺陷未能及时发现;二是打磨工具使用不当及打磨时温度控制不当,镍基合金打磨应采用专用的合金磨头或者不锈钢专用砂轮片,不能使用普通的磨头;三是换热器到达现场后,未对待焊接面进行有效的防护,该项目现场为沿海基地,在堆焊层表面易出现盐雾腐蚀损伤。

5 解决方案

针对缺陷产生的原因分析,换热器供应商对于缺陷的修复编制了整改方案,经各方确认后进行了实施,方案如下:

(1) 坡口表面进行 100% PT 检测,按 NB/T 47013.5—2015 中 I 级合格,用记号笔将缺陷标记出来,采用合金磨头或不锈钢专用砂轮片将缺陷打磨去除,打磨部位不允许出现尖角凹槽,需圆滑过渡,处理后的坡口角度需经现场施工方确认合格。同时打磨去除缺陷时,单次打磨时长不得超过 30 秒,打磨后立即采用洁净水进行冷却,不得连续打磨,防止缺陷扩展。

(2) 采用干净的棉纱将打磨部位表面杂质擦拭干净,对打磨部位进行 100%PT 检测,按 NB/T 47013.5—2015 中 I 级合格,并进行拍照记录。

(3) 无损检测合格后,采用干净的棉纱将坡口表面着色剂、显像剂擦拭清除干净。

(4) 对于缺陷裂纹较深需要补焊的部位,进行补焊(管、壳程出入口接管坡口堆焊层对于存在的表面裂纹缺陷,打磨处理后堆焊层有效厚度 ≥ 5 mm 的管口不再进行补焊,与对应的不锈钢管道接管直接进行环缝焊接;打磨处理后堆焊层有效厚度 < 5 mm 的

管口,采取手工钨极氩弧焊补焊)。

(5) 打磨补焊部位,使其与坡口母材平齐。

(6) 打磨表面进行 100% PT 检测,按 NB/T 47013.5—2015 中 I 级合格,并进行拍照记录。无损检测合格后,采用干净的棉纱将坡口表面着色剂、显像剂擦拭清除干净。

按以上步骤进行检测-补焊-检测合格后,最终完成了换热器接管与管线的焊接。装置开工后运行良好,通过加强巡检,未发现泄漏。

6 结论

本文通过对堆焊层出现的缺陷进行检测及原因分析,并制定了合理的整改方案,最终消除了缺陷,确保了工程后续阶段的顺利完成。得出以下结论:

(1) 对于堆焊层需要与换热器本体一同热处理的换热器,应制定合理的热处理工艺,在符合标准的前提下,适当降低保温温度,确保堆焊层在热处理后不出现损伤及保持堆焊层的耐腐蚀性能。

(2) 严格执行换热器的检测程序,热处理后对需要的检测程序按照制造规程严格落实。

(3) 镍基合金焊接接头打磨应采用专用的工具和合理的打磨工艺,控制打磨时长,不得连续打磨,防止缺陷扩展。

(4) 换热器运输至现场后,安装前后均要做好相应的防护工作,避免恶劣的环境对换热器造成损伤。

参考文献

- [1] 王金光. 炼油装置腐蚀风险控制 [M]. 北京:中国石化出版社, 2021.
- [2] 张海涛. 加氢装置设备腐蚀与防护 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2007, 24 (2): 43-48.
- [3] 齐淑改. 热处理对 N06625 堆焊层耐腐蚀性能的影响 [J]. 压力容器, 2019, 36 (9): 7-12, 6.
- [4] 张敏. 焊接工艺对镍基堆焊层组织及性能的影响 [J]. 压力容器, 2018, 35 (12): 69-73.
- [5] 黄健成, 姚润钢, 姚上卫. 热处理对镍基 625 合金带极堆焊层组织及耐晶间腐蚀性能的影响 [J]. 焊接技术, 2016, 45 (7): 29-32, 4.

Cause Analysis and Repair Plan in Thick-wall Nozzle Groove Weld Overlay of High Pressure Equipment

Cheng Chuanyu

(SINOPEC Guangzhou Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510620, China)

Abstract: High-pressure equipment in refineries operate under hydrogen service at high temperature and high pressure for long term. To resist the high-temperature H_2 - H_2S corrosion, stainless steel is typically overlaid on the internal surface of the equipment. When welding the equipment nozzles to the corresponding pipes at site, nickel-based alloy is overlaid on the tip of the equipment nozzle to facilitate welding the corresponding austenitic stainless steel pipe. The potential causes of defects that appear after INCONEL625 is overlaid on the tip of the thick-wall nozzles are systematically analyzed. The analysis covers aspects such as the welding procedure for the weld overlay, post-weld heat treatment, non-destructive testing, weld surface grinding, and on-site storage. Correspondingly reasonable repair plans are formulated for the identified defects, and recommendations and measures are proposed to avoid similar issues in the future. The engineering reference regarding problems and solutions encountered in the weld overlay on the tip of thick-walled nozzles for high-pressure equipment is provided..

Keywords: high-pressure equipment; thick-wall nozzle; groove; weld overlay; defect formation; cause analysis; repair plan

《化工设备与管道》再次入选 CSCIED 科技核心期刊

近日, CSCIED 科技核心评价数据库发布科技期刊年度 ES 评分,《化工设备与管道》再度被评为 A 级,划入 Q1 区,成功入选 CSCIED 科技核心期刊。

CSCIED 科技核心评价数据库由香港大学、澳门科技大学、浙江大学、中南大学、深圳大学、哈佛大学、麻省理工学院、纽约州立大学等众多单位学者倡议成立,通过同行评议机制评价高质量科技数据,帮助学者筛选数据、节约科研时间、促进科技生产力发展。该数据库的评价对象涵盖期刊、论文、学者等,评价内容包括创新性、研究方法、结果、结论、投稿经历、期刊效率、影响力等多个维度,用户已覆盖全球近 40 个国家或地区,具有广泛的权威性和客观性。

此次《化工设备与管道》再度获评 A 级、入选 CSCIED 科技核心期刊,充分体现了期刊在学术质量、编辑规范、出版水平等方面的综合实力,标志着编辑部在提升期刊影响力方面取得新进展。近年来,该刊影响力显著提升,连续多年入编中文核心期刊、中国科技核心期刊,成功入选中国化工学会首版化工领域高质量科技期刊分级目录,荣获“全国石油和化工期刊百强”等多项荣誉。编辑部将以此为契机,进一步探索一流科技期刊建设路径,为公司高质量发展贡献更大力量。

