

超设计使用年限热高压分离器堆焊层 开裂原因和定期检验建议

洪明涛, 梁春雷, 刘建杰

(合肥通用机械研究院有限公司 国家压力容器与管道安全工程技术研究中心, 合肥 230031)

摘要: 超设计使用年限压力容器在定期检验过程中, 热高压分离器内壁堆焊层开裂是检验过程中的常见缺陷, 严重影响该类设备的安全运行及定期检验工作的开展。以某石化企业两台热高压分离器为研究对象, 针对历次定期检验中发现的堆焊层长期开裂问题开展研究。依据该设备的主要损伤模式, 结合裂纹宏观形貌、显微组织、硬度、铁素体含量及强度校核等数据资料, 判定开裂性质为多种腐蚀介质环境下的应力腐蚀开裂, 并推测表面存在的微小焊接热裂纹是裂纹萌生的原因。结果表明, 该裂纹的存在不影响容器在一定周期内、特定允许条件下的安全运行, 研究结果可为该类设备的定期检验工作提供参考性建议。

关键词: 超设计使用年限压力容器; 定期检验; 堆焊层; 应力腐蚀开裂; 热裂纹

中图分类号: TQ053.2; TG156.35

文献标志码: B

文章编号: 1001-4012(2026)05-0041-04

Causes of cracking of surfacing layer of hot high pressure separator over design service life and suggestions for periodic inspection

HONG Mingtao, LIANG Chunlei, LIU Jianjie

(National Engineering & Technical Research Center on Pressure Vessels and Piping Safety,
Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: In the periodic inspection process of pressure vessels beyond the design service life, the cracking of the surfacing layer on the inner wall of the thermal high pressure separator was a common defect in the inspection process, which seriously affected the safe operation of such equipment and the development of periodic inspection work. Taking two hot high-pressure separators in a petrochemical enterprise as the research object, the long-term cracking problem of surfacing layer found in previous periodic inspections was studied. According to the main damage mode of the equipment, combined with the data of crack macroscopic morphology, microstructure, hardness, ferrite content and strength verification, it was determined that the defect was stress corrosion cracking in a variety of corrosive media environment, and it was speculated that the small welding hot crack on the surface was the cause of crack initiation. The results show that the existence of the crack did not affect the safe operation of the container within a certain period and under specific allowable conditions. The research results could provide reference suggestions for the regular inspection of such equipment.

Keywords: over design service life pressure vessel; periodic inspection; surfacing layer; stress corrosion cracking; hot cracking

随着我国石化行业的长期发展, 石化企业的承压设备已逐步进入“老龄化”阶段, 其中第三类压力容器是高风险的重点监控设备, 其超期服役的比例

逐年上升, 由此带来的安全生产问题不容忽视。然而, 若过于盲目地进行报废或停用, 不仅会影响企业的正常生产运营, 还会造成不必要的资源浪费, 与我国提倡的“碳达峰、碳中和”战略目标相违背。因此, 近年来大量学者^[1-3]致力于研究如何为上述设备制定科学合理的检验策略。最新调查结果显示, 我国

收稿日期: 2026-01-19

作者简介: 洪明涛(1999—), 男, 硕士, 主要从事压力容器定期检验中的理化检验工作, 1257275030@qq.com

在用超设计使用年限压力容器的比例约为20%,在部分石化企业中,这一比例甚至高达40%以上。预计从2025年起,超期服役压力容器的增量将从每年1万台激增至10万台,到2027年将突破20万台。热高压分离器(简称热高分)作为第三类压力容器的一种,通常运行于高温、高压及临氢(含氢气)的苛刻环境中,是加氢装置中的核心静设备之一,因此热高分历来是历次定期检验的重点。尽管目前已有关于热高压分离器损伤模式^[4-5]及定期检验^[6]的研究,但多数聚焦于结构设计优化和检验策略层面,涉及材料领域的深入分析较少,可能导致部分检验发现的问题未能从根源上得到揭示和解决。因此,针对检验过程中发现的缺陷,采用有效的材料表征手段并结合精确的损伤模式识别,可为后续设备的检验和安全使用提供理论依据。

检验的两台热高压分离器(分别称为设备A和设备B)均为国外进口的利旧设备,于1997年正式在某企业重油加氢装置中投入使用。自1996年(国内投用前的全面检验)至2025年(最近一次定期检验)期间,历次定期检验均记录两台容器内壁堆焊层存在多处表面裂纹和点蚀坑,以及基层与堆焊层之间的小面积剥离等缺陷。笔者对内壁堆焊层表面开裂较为明显的部位进行了抽查,结果显示裂纹深度最大达3.0 mm(堆焊层名义厚度为3.5 mm)。与前一次定期检验结果相比,裂纹深度未见明显变化,周围也未发现新生裂纹。热高压分离器的国内重新设计压力为14.67 MPa,操作压力为13.62 MPa,国内重新设计温度为427℃,操作温度为385℃,操作介质为生成油、H₂、H₂S,主体材料为2.25Cr1Mo钢(基层)+TP347钢(堆焊层),筒体名义厚度为186 mm(基层)+3.5 mm(堆焊层),封头名义厚度为111 mm(基层)+3.5 mm(堆焊层),腐蚀裕量为3.5 mm,容器内径为3 048 mm。笔者对两台超设计使用年限的热高分设备进行理化检验,从而针对这两台设备中长期存在的缺陷进行成因分析和探讨,并根据其存在的主导损伤模式,提出缺陷修复和后期定期检验建议。

1 理化检验

1.1 宏观观察

堆焊层裂纹宏观形貌如图1所示。由图1可知:内壁裂纹多集中分布于上封头与筒体对接环焊缝以下的第1及第2堆焊带。此外,筒体堆焊层表面还存在多处连成线状的点蚀坑,裂纹在30 mm×30 mm

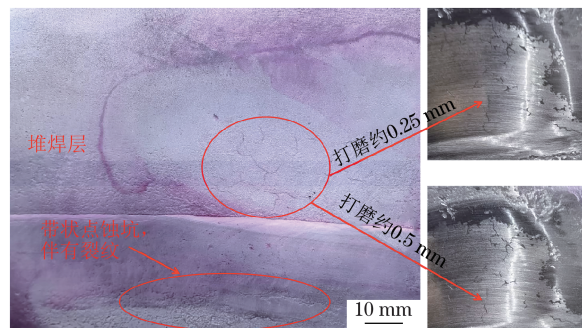


图1 堆焊层裂纹宏观形貌

(长度×宽度)的区域内呈放射状分布。随着打磨深度的增加,部分裂纹逐渐消失或宽度逐渐变窄,由此推断裂纹起源于堆焊层表面,并逐步向内部扩展。

1.2 金相检验和硬度测试

在裂纹处截取试样,将试样置于光学显微镜下观察,结果如图2所示。由图2可知:主裂纹内存在金属氧化物,由于裂纹宽度较大且有分叉,推测分叉部位会存在应力集中现象;主裂纹的分支呈现出沿晶界扩展趋势,裂纹末端呈弯曲状延伸,推测是裂纹在扩展过程中受到材料内部异质性(如晶粒取向、第二相分布和应力场不均)的影响,路径发生偏转;第一类裂纹以沿晶形式呈发散状分布,进而交织形成蜘蛛网状结构,第二类裂纹并未出现网状裂纹结构,多条微裂纹走向较为一致,且在末端出现树枝叉状。

对以上金相检验后的裂纹部位及其周边位置进行硬度和铁素体含量检测,结果如表1所示。由表1可知:裂纹处硬度较其周边部位总体偏高,特别是裂纹尖端部位硬度较正常值(170~200 HB)高约50 HB,较其周围部位高20~40 HB。此外,所有检测部位的铁素体体积分数均偏低,裂纹尖端处铁素体体积分数约比其他部位低0.2%以上。

2 综合分析

检测部位的裂纹宏观上呈现出由表面向基材扩展的趋势,裂纹边缘的氧化物较多,因此可以确定该裂纹存在时间较长。主裂纹主要以沿晶方式分布,裂纹分叉处的扩展路径较为曲折,裂纹尖端呈现出两类较为复杂的结构:第一类为多条微裂纹相互连接、沿晶分布,形成网状结构;第二类则同时为沿晶和穿晶形式,这与应力腐蚀裂纹的常见形貌特征更为相符。针对第一类裂纹的微观形貌特征,依据铁素体含量测试结果,并结合文伟等^[7]的研究可知,铁素体的存在有助于削弱奥氏体柱状晶和树枝晶的方向性,同时能减少碳化铬在奥氏体晶界的析出,从而有效防止堆焊层因晶间腐蚀而开裂。因此推断该类

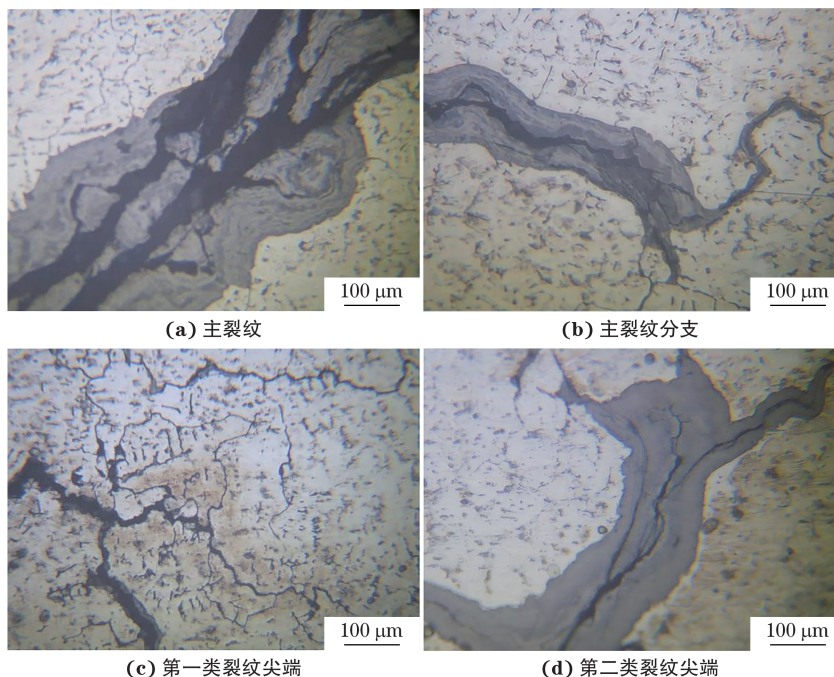


图2 堆焊层裂纹不同部位的微观形貌

表1 堆焊层硬度和铁素体含量检测结果

检测位置	硬度/ HB	铁素体体积分数/ %
主裂纹处	195~199	1.7
主裂纹分支处	194~200	1.7
裂纹尖端处	235~250	1.5
沿筒体周向距裂纹尖端以东100 mm处	199~210	1.9
沿筒体轴向距裂纹尖端以下100 mm处	180~193	2.0
沿筒体轴向距裂纹尖端以下200 mm处	191~196	1.9

微裂纹为堆焊层在铁素体含量偏低的情况下产生的焊接热裂纹。对于第二类裂纹,考虑到该设备的操作介质中含有一定量的 H_2S 、 H_2 和 NH_3 ,并且该利旧设备长期在沿海环境下服役,在海外运输及检修期间,空气或雨水中所含的氯离子有可能进入设备内部,而这些特定介质正是应力腐蚀裂纹产生的必要条件。此外,相关研究^[8]探讨了氯离子对堆焊层材料的腐蚀行为,发现高温条件下,一定浓度的氯离子可使不锈钢堆焊层表面产生点蚀,并具备在应力集中部位诱导应力腐蚀开裂的能力。宏观观察发现堆焊层多处存在大小不一的点蚀坑,其周围伴有裂纹,该形貌特征与上述试验结果高度吻合。文献[9]指出,对于以Cr-Mo钢为基材、内壁采用堆焊工艺的压力容器,由于堆焊层材料的导热系数远低于基材,但其热膨胀系数却高于基材,因此在开停车过程中,内壁

温度的反复变化会使材料产生较大的热应力。此外,堆焊层中铁素体含量偏低也会导致其耐腐蚀性能下降,并显著增大应力腐蚀的敏感性。综合以上几点,不难推断开裂性质应为典型的应力腐蚀开裂。

综上所述,初步判断堆焊层检测处出现裂纹的原因是铁素体含量偏低,材料表面产生微小的焊接热裂纹,进而在多种特定腐蚀介质和热应力的影响下,这些微裂纹的应力集中部位产生应力腐蚀开裂。

关于此类堆焊层表面存在的应力腐蚀裂纹是否会发生扩展的问题,目前国内已有研究^[10-13]表明,表面裂纹具备跨界面扩展的能力,在特定试验环境下,裂纹能够穿透堆焊层与基材的结合界面,并扩展至金属基材。然而,某国外石化企业^[14]曾对数台长期存在表面裂纹的堆焊层压力容器进行跟踪调查,结果证实该类裂纹的扩展均终止于堆焊层与基层的结合界面。即使裂纹扩展至界面后,高温硫介质可能通过裂缝接触基层并对其进行腐蚀,但由于裂缝中缺乏流动性环境,腐蚀产物将阻止介质进一步破坏裂纹处的基层,因此高温硫介质对基层的腐蚀影响较为有限。此外,考虑到在强度校核计算中,堆焊层不计入承载壁厚,故选取国外ASME(美国机械工程师学会)标准中的相关计算参数,并依据GB/T 150.3—2024《压力容器 第3部分:设计》对容器不同类型的部件进行强度校核,计算公式如式(1)、(2)所示,式(1)适用于圆筒,式(2)适用于半球形封头。

$$\delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]_t \phi - p_c} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{p_c D_i}{4[\sigma]_t \phi - p_c} \quad (2)$$

式中: δ 为不考虑腐蚀量计算所需的壁厚; p_c 为计算压力; D_i 为容器内径; $[\sigma]_t$ 为在设计温度下圆筒或球壳材料的许用应力; ϕ 为焊接接头系数, 式中取值为 1.0。

根据此容器实际相关参数取值, 得到的计算结果如表 2 所示, 强度校核结果显示该容器筒体和封头的实测最小壁厚均满足大于所需壁厚的要求, 壁厚裕量也充足。综上所述, 该受检设备满足在一定条

件下继续使用。

3 结论与措施

针对某超设计使用年限的热高压分离器堆焊层开裂问题, 依据内壁宏观观察、金相检验、硬度测试及铁素体含量测定等结果, 系统分析了开裂部位的腐蚀条件和应力分布等因素, 参考相关文献^[15], 最终确定该裂纹为应力腐蚀裂纹, 且其萌生原因与铁素体含量偏低所导致的微小热裂纹有一定关联。针对此类裂纹, 考虑到该利旧设备的特殊使用情况, 结合国内外同类含堆焊层表面裂纹容器的使用经验及强度校核计算结果, 判定其在一定周期内且一定条件下可以安全运行。对于该设备的定期检验策略及后续使用, 应从以下方面加以关注。

表 2 壁厚强度校核数据

设备	部件	计算压力/ MPa	内径/ mm	许用应力/ MPa	计算壁厚/ mm	2个周期 腐蚀量/mm	所需壁厚/ mm	实测最小 壁厚/mm	壁厚裕量/ mm
热高分 A	筒体	13.62	3 055	159	136.8	0.5	137.3	193.4	56.1
	封头	13.62	3 055	159	66.9	0.5	67.4	116.7	49.3

(1) 关注堆焊层裂纹是否扩展及堆焊层是否剥离, 以确定堆焊层的耐腐蚀防护性能是否受到影响。

(2) 对于堆焊层出现点蚀或机械损伤的部位, 须重点关注该处的硬度和铁素体含量是否在标准范围内, 若出现异常, 可考虑采用打磨平滑过渡或表面改性处理, 以降低应力腐蚀裂纹萌生的可能性。

(3) 对于长期存在较大裂纹的部位, 应加强对对应外壁部位的无损检测和厚度测量, 结合强度校核结果, 判断基层壁厚裕量是否充足。

此外, 在后期使用过程中, 应加强容器的压力温度控制, 开车前关注水压试验时的试验温度, 还应完善停车操作规程、增加停车降压过程的恒温脱氢工艺。

参考文献:

- [1] 吕文涛, 周鹏飞, 钱英豪. 达到设计使用年限压力容器的安全评估[J]. 化工机械, 2022, 49(5): 743-748.
- [2] 张雨. 超设计使用年限压力容器定期检验工作要点与策略[J]. 石油化工建设, 2025, 47(5): 95-97.
- [3] 王步美, 王志成, 叶有俊, 等. 超期服役加氢反应器的检验及安全评定[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(10): 21-25.
- [4] 陈炜, 余进, 任日菊, 等. 加氢装置热高分系统完整性操作技术研究[J]. 压力容器, 2021, 38(3): 66-72.

- [5] 韩坤鹏, 郭胜军, 于传瑞, 等. 渣油加氢装置热高分气液夹带现象探究及优化措施[J]. 石油化工, 2024, 53(11): 1646-1652.
- [6] 何文丰. 2.25Cr-1Mo 加氢裂化热高压分离器损伤机理分析[J]. 化工设备与管道, 2004, 41(6): 54-56.
- [7] 文伟, 吴玉冬, 张乐兴, 等. 加氢裂化反应器内壁堆焊层开裂分析及返修探讨[J]. 广州化工, 2024, 52(16): 132-135.
- [8] 卢媛媛, 刘金华, 龚宾, 等. 不锈钢堆焊层在 Cl^- 溶液中的腐蚀性能研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(11): 1951-1955.
- [9] 张林, 苗俊军, 李松山. 分析加氢反应器堆焊层裂纹的成因与对使用的影响[J]. 化工管理, 2017(2): 122.
- [10] 齐林宇. 承压堆焊结构表面裂纹扩展行为研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [11] 柳晓民, 陈进, 孙晓明. 加氢反应器堆焊层裂纹的成因与对使用的影响[J]. 压力容器, 2005, 22(9): 39-42.
- [12] 丁国铨, 沈士明. 热壁加氢反应器堆焊层表面裂纹疲劳扩展规律的试验研究[J]. 机械强度, 2008, 30(6): 1008-1013.
- [13] 丁国铨, 沈士明. 热壁加氢反应器堆焊层表面裂纹扩展初析[J]. 石油化工设备, 2007, 36(2): 54-58.
- [14] BAGDASARIAN A J, BERECZKY E L, ISHIGURO T, et al. Investigation of 26 year old hydroprocessing reactors - a summary report[C]//CORROSION 1993. New Orleans: NACE International, 1993: 1-21.
- [15] 李祖贻. 在役热壁加氢反应器检出缺陷及堆焊层裂纹初析[J]. 石油化工设备技术, 1994, 15(4): 10-13.