加氢裂化反应器内壁堆焊层开裂分析及返修探讨

文 伟[1]，吴玉冬[2]，张乐兴[1]，闫登峰[1]，王焕然[3]，王 盼[1]，赵 伟[1]

（1 机械工业上海蓝亚石化设备检测所有限公司，上海 201600；2 中国石油大连石化公司，辽宁 大连 116011；3 中国石油天然气股份有限公司辽宁销售分公司，辽宁 沈阳 110000）

摘 要：对加氢裂化反应器内壁堆焊层进行检验，发现第一冷氢盘下部第 11、16 带堆焊层上有 70 mm×75 mm、60 mm×50 mm 糊状焊接缺陷，打磨后呈网状裂纹。通过外壁超声检测、磁粉检测，堆焊层渗透检测、铁素体含量测定、硬度测定、化学成分分析，金相组织分析等检测方法分析裂纹成因，确定堆焊层奥氏体不锈钢中铁素体含量不足，氢聚集和热应力叠加是形成裂纹的主要原因。提出针对性返修工艺、日常操作建议，其结果为同类、同工艺设备运行提供参考。

关键词：加氢反应器；不锈钢堆焊层；开裂；返修；原因

中图分类号：TQ052.6；TE96 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-9677(2024)16-0132-04

Cracking Analysis and Repair Discussion of Surfacing Layer on Inner Wall of Hydrocracking Reactor

WEN Wei[1], *WU Yu-dong*[2], *ZHANG Le-xing*[1], *YAN Deng-feng*[1], *WANG Huan-ran*[3], *WANG Pan*[1], *ZHAO Wei*[1]

(1 Mechanical Industry Shanghai Lanya Petrochemical Equipment Inspection Institute Co., Ltd., Shanghai 201600; 2 Dalian Branch, CNPC, Liaoning Dalian 116011; 3 Petrochina Liao Ning Marketing Company, Liaoning Shenyang 110000, China)

Abstract: The surfacing layer on the inner wall of the hydrocracking reactor was tested. It was found that there were paste welding defects of 70 mm×75 mm and 60 mm×50 mm on the 11th and 16th strips of the lower part of the first cold hydrogen plate, which were network cracks after grinding. The causes of cracks were analyzed by ultrasonic testing, magnetic powder testing, penetration testing of surfacing layer, ferrite content determination, hardness determination, chemical composition analysis, metallographic structure analysis and other testing methods. It was determined that the ferrite content in austenitic stainless steel of surfacing layer was insufficient, and hydrogen accumulation and thermal stress superposition were the main causes of cracks. The targeted repair process and daily operation suggestions were put forward, and the results provided reference for the operation of similar and same process equipment.

Key words: hydrogenation reactor; stainless steel weld overlay; cracking; repair; cause

加氢工艺是炼油化工关键工艺，加氢反应器是加氢装置的核心设备。为提高加氢反应器抗蚀性能，通常采用不锈钢衬里或者不锈钢堆焊工艺。加氢反应器制造难度大，造价昂贵，且发生事故后果严重，对经济、环境影响巨大。加氢反应器操作条件苛刻，高温高压临氢，并且进入反应器的物料往往都含有硫、氮等杂质，和氢反应生成具有腐蚀性的硫化氢和氨，内壁堆焊层、衬里层裂纹是长时间运行后检验常见缺陷。对该类设备常见缺陷进行有效检测和扩展分析，从而采取相应的维修监控措施，确保该类设备安全高效长周期运行，是炼油化工加氢装置设备管理人员的难题之一。因此各炼油化工生产单位对加氢反应器检验、缺陷修复管理非常重视。

某石化加氢裂化装置中加氢裂化反应器在定期检验时发现第一冷氢盘下部第 11、16 带堆焊层上有 70 mm×75 mm、60 mm×50 mm 糊状焊接缺陷，打磨后呈网状裂纹。通过外壁超声检测、磁粉检测，堆焊层渗透检测、铁素体含量测定、硬度测定、化学成分分析，金相组织分析等检测方法分析裂纹成因，确定堆焊层奥氏体不锈钢中铁素体含量不足，氢聚集和热应力叠加是形成裂纹的主要原因。提出针对性返修工艺、日常操作建议，其结果为同类、同工艺设备运行提供参考。

1 加氢裂化反应器参数

表 1 加氢裂化反应器

Table 1 Hydrocracking reactor

设计参数				基材	厚度/mm			规格/mm	容积/m^3	介质
设计压力	设计温度	操作压力	操作温度		内衬	封头	筒体			
12.6	445	12.0	430	2.25Cr-1Mo-0.25V	E309L+E347	85+6.5	158+6.5	Φ4 000 mm×22 619 mm	188	原料油、油气、氢气、硫化氢、氨

第一作者：文伟(1983-)，男，工程师，主要从事压力容器、工业管道的检验检测、腐蚀与防护工作。

该加氢裂化反应器为Ⅲ类压力容器，设计工作相关参数见表 1。

加氢裂化反应器基层采用 2.25Cr-1Mo-0.25V 锻件，堆焊层过渡层采用 E309L，面层采用 E347。堆焊层厚度 6.5 mm，其中面层不小于 3 mm。加氢裂化反应器主体结构见图 1。

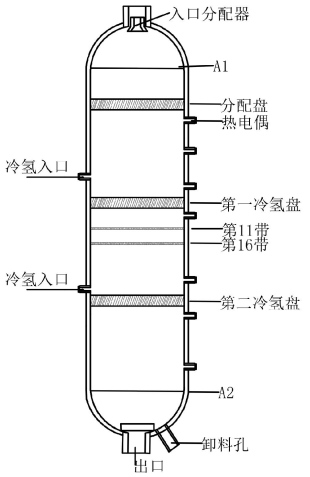


图 1　加氢裂化反应器结构示意图

Fig. 1　Hydrocracking reactor structure diagram

2　加氢裂化反应器检测项目及结果

根据宏观检查发现的糊状焊接缺陷，打磨后目测发现呈网状裂纹，对此加氢裂化反应器缺陷部位采用宏观检查、超声检测、磁粉检测、渗透检测、铁素体含量测定、硬度测定、化学成分分析和金相组织分析进行复查，检查结果具体如下：

2.1　外　壁

对加氢裂化反应器焊接缺陷对应外壁进行宏观检查，未发现变形异常。外壁对应部位打磨 1 000 mm×1 000 mm，依据 NB/T 47013-2015《承压设备无损检测》[1] 进行磁粉检测，超声检测，未发现超标缺陷。说明内壁堆焊层裂纹未扩散至基层母材。

2.2　渗透检测

加氢裂化反应器堆焊层表面宏观检查发现糊状焊接缺陷，见图 2、图 3，打磨后依据 NB/T 47013-2015《承压设备无损检测》进行渗透检测，发现堆焊层表面呈网状裂纹，见图 4、图 5。

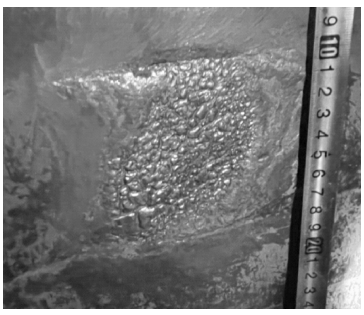


图 2　11 带焊接缺陷

Fig. 2　11 belt welding defects

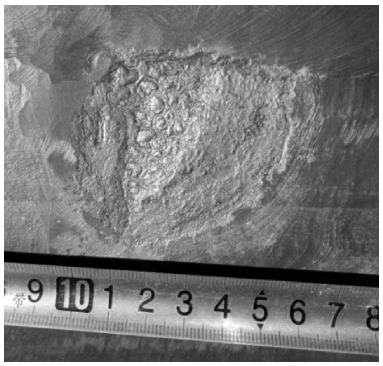


图 3　16 带焊接缺陷

Fig. 3　16 belt welding defects



图 4　11 带打磨渗透检测

Fig. 4　11 belt grinding penetration detection



图 5　16 带打磨渗透检测

Fig. 5　16 belt grinding penetration detection

2.3　堆焊层表面铁素体含量测定

取堆焊层有裂纹部位、完好部位，按 GB/T 1954-2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》[2] 进行铁素体含量测定，测定结果见表 2。

表 2 反应器堆焊层铁素体数

Table 2 Ferrite number of reactor surfacing layer (FN)

位置编号	铁素体测定值/%											备注
A01	0.48	0.78	0.63	0.59	0.64	0.99	1.1	0.55	0.66	0.60	0.82	0.99	11 带裂纹处
A02	0.54	0.62	0.81	0.94	0.78	0.66	0.92	0.73	0.88	0.92	0.71	0.63	16 带裂纹处
A03	5.8	6.2	7.4	7.2	7.6	6.8	7.1	5.9	6.4	7.1	5.9	7.5	完好部位
A04	6.4	7.7	8.1	7.4	6.2	5.3	5.9	6.7	7.2	6.4	7.0	6.8	完好部位

依据 API 934-2008《加氢反应器制造(高温高压临氢 2.25Cr 和 3Cr 钢制厚壁压力容器材料和制造要求)》[3]，铁素体数需控制在 3～10。分析表 2 数据，堆焊层有裂纹部位铁素体数小于 3.0，不满足要求；完好部位铁素体数在 3～10，满足要求。

2.4 堆焊层硬度测定

取堆焊层有裂纹部位、完好部位，按 GB/T 17394.1-2014《金属材料 里式硬度实验 第 1 部分：试验方法》[4]进行硬度检查，检查结果见表 3。

表 3 反应器堆焊层硬度测量值

Table 3 Hardness measurement value of reactor surfacing layer (HB)

位置编号	硬度测量值								备注
A01	165	168	177	172	169	174	177	176	11 带裂纹处
A02	171	169	178	180	175	177	168	179	16 带裂纹处
A03	174	178	169	177	172	176	169	182	完好部位
A04	173	181	166	178	177	174	180	175	完好部位

分析表 3 数据，有裂纹部位和完好部位硬度值无明显差异，结果均小于 225HB，满足 API 934-2008《加氢反应器制造(高温高压临氢 2.25Cr 和 3Cr 钢制厚壁压力容器材料和制造要求)》。

2.5 堆焊层化学成分分析

取堆焊层有裂纹部位、完好部位，通过便携式 X 射线荧光光谱分析，测定堆焊层表面化学成分，结果见表 4。取堆焊层有裂纹部位，打磨深度约 4 mm 处，通过便携式 X 射线荧光光谱分析，测定过渡层化学成分，结果见表 5。

表 4 反应器堆焊层表层化学成分测定结果(质量分数)

Table 4 Determination results of surface chemical composition of surfacing layer in reactor (ω%)

取样位置	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	备注
A01	0.77	19.4	9.85	0.09	0.08	0.26	11 带裂纹处
A02	0.64	19.0	9.94	0.08	0.09	0.21	16 带裂纹处
A03	0.69	19.1	9.98	0.02	0.06	0.19	完好部位
A04	0.73	19.3	9.96	0.05	0.11	0.23	完好部位

表 5 反应器堆焊层过渡层化学成分测定结果

Table 5 Determination results of chemical composition of transition layer of reactor surfacing layer (ω%)

取样位置	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	备注
A01	0.72	22.1	12.1	0.07	0.09	0.17	11 带裂纹处打磨后
A02	0.68	22.4	12.5	0.03	0.02	0.16	16 带裂纹处打磨后

分析表 4、表 5 堆焊层化学成分数据，其化学成分质量分数符合 GB/T 983-2012《不锈钢焊条》[5]中 E347、E309L 焊条的相关要求。

2.6 金相分析

选取堆焊层有裂纹部位、完好部位，采用 GB/T17455-2008《无损检测 表面检测的金相复型技术》[6]进行金相组织分析，经机械抛光、王水溶液腐蚀现场复膜取样，组织结果见图 6、图 7。从图 6 可见，无缺陷堆焊层组织正常，为奥氏体+δ 铁素体；从图 7 可见，裂纹部位堆焊层组织中奥氏体基体溶解极少量的铁素体。

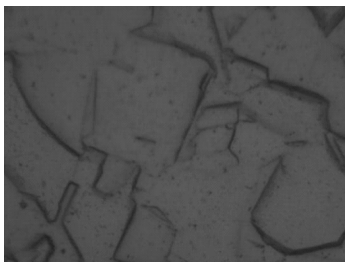


图 6 堆焊层完好部位金相组织(400×)

Fig. 6 The metallographic structure of the intact part of the surfacing layer

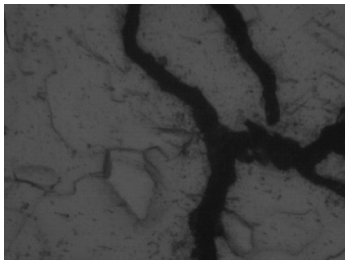


图 7 堆焊层有裂纹部位金相组织(400×)

Fig. 7 Metallographic structure of crack part of surfacing layer

3 裂纹原因分析

堆焊层表面出现糊状龟裂，说明设备制造过程中堆焊工艺控制不严。奥氏体不锈钢焊接时，需要控制焊缝中的铁素体含量，在焊缝中形成铁素体+奥氏体双相组织，提高焊缝的抗热

裂纹性能；铁素体一般均布成小岛状存在于奥氏体晶粒间，能够起到削弱奥氏体柱状晶和树枝晶的方向性，阻隔奥氏体晶界连续网状碳化铬析出，有效提高堆焊层金属的耐晶间腐蚀性能。[7]从铁素体含量的测定值和金相组织分析结果来看，堆焊层表面裂纹处铁素体含量较低，是出现热裂纹的根本原因。

在奥氏体不锈钢堆焊层中，饱和氢的浓度比母材大，但其扩散系数比母材小。在正常条件下，母材的氢浓度远比 TP309 和 TP347 堆焊层低。[8]但在停工条件下，母材的氢扩散速度比堆焊层快，这将加大母材与堆焊层氢浓度的差距，其中堆焊层的氢浓度超过母材 10 倍以上，这极大的提高了堆焊层脆性开裂的几率。

加氢反应器堆焊层材料的导热系数远比母材低，但其热膨胀系数却比母材大，则加氢反应器在开工时，温升将增大 Cr-Mo 钢母材与奥氏体不锈钢的膨胀差，其中在 400 ℃条件下的膨胀差为 1.676 mm/m[9]。加氢反应器在工作条件下，飞温的出现会增大膨胀差，此时堆焊层应力集中区产生的热应力较高；在停工条件下，母材的降温速度明显比堆焊层快，则堆焊层应用集中区产生的热应力也较高。

综合分析，堆焊层表面裂纹处铁素体含量较低，是出现热裂纹的根本原因，氢聚集和热应力叠加促进了裂纹的发展，形成表面龟裂。

4　堆焊层开裂返修处理意见

返修前缺陷部位进行消氢处理，加热至 300 ~ 350 ℃，保温 3 h，扩大范围进行 PT 检测，排查其余部位是否存在缺陷，进一步确定缺陷范围，并标记。

裂纹缺陷部位，采用砂轮片在缺陷外围打磨出止裂槽，然后由外围向内方向打磨防止裂纹扩散，打磨部位应保证底部与周边母材平滑；点蚀凹坑采用砂轮打磨呈平滑凹面，不得打磨呈槽状。

先采用基层焊材进行补焊，基层补焊条 R307C，层间温度不大于 200 ℃。基层补焊至距表面约 5 mm 停止，按照 NB/T 47013-2015 进行 PT 检测，Ⅰ级合格，然后堆焊过渡层和面层。

基层补焊前采用火焰加热进行预热，预热范围为缺陷部位及周边 100 mm 范围内，预热温度不低于 120 ℃，受热均匀；基层焊接完成后立即进行后热消氢处理，加热至 200 ~ 250 ℃，并用保温棉覆盖保温 1 h 后缓慢冷却。

基层补焊后采用局部热处理方式进行返修后热处理。加热至(690±10) ℃，保温 60 min，升降温度≤55 ℃/h。加热片完全覆盖补焊部位，壳体内外壁用石棉覆盖保温。

先采用高 Cr、Ni 焊材焊接过渡层，焊条 E309L，补焊至表面约 2 mm 处停止，层间温度不大于 150 ℃；然后焊接面层，焊条 E347L，层间温度不大于 80 ℃。过渡层、面层按照 NB/T 47013.5-2015 分别进行 PT 检测，Ⅰ级合格。面层进行铁素体含量测定，以 3FN-10FN 合格。

5　结　论

对加氢裂化反应器奥氏体不锈钢堆焊层裂纹进行检测，根据检测结果分析裂纹产生的根本原因是奥氏体不锈钢中铁素体含量不足，主要原因是设备制造过程堆焊工艺控制不严，氢聚集和热应力叠加促进裂纹发展，形成表面龟裂。针对裂纹产生原因，提出了堆焊层缺陷返修工艺，复检合格。为同类、同工艺设备的返修提供了借鉴依据。针对加氢反应器堆焊层裂纹的成因及其对使用的影响，建议加强焊接工艺控制和监督；稳定操作，以减少热应力交变载荷在工作温度波动时的循环次数及控制温度在开、停工时的温度变化速率，同时将热应力降至最低水平；停工条件下，在 300 ~ 350 ℃温度下进行保温，从而完全释放用钢中的氢；加氢反应器催化剂床层的压降不得过大，防止氢扩散至堆焊层。

参考文献

[1] NB/T47013-2015 承压设备无损检测[S].
[2] GB/T 1954-2008 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法[S].
[3] API 934-2008 加氢反应器制造(高温高压临氢 2.25Cr 和 3Cr 钢制厚壁压力容器材料和制造要求)[S].
[4] GB/T 17394.1-2014 金属材料 里式硬度实验 第 1 部分:试验方法[S].
[5] GB/T 983-2012 不锈钢焊条[S].
[6] GB/T17455-2008 无损检测 表面检测的金相复型技术[S].
[7] 许忠义,张勇,戴建军,等. 加氢反应器堆焊层铁素体含量对焊接工艺的影响[J]. 炼油与化工,2015,26(6):35-37.
[8] 杜兵,贾玉力,饶清鹏. 加氢反应器不锈钢堆焊熔合区氢剥离行为的分析[J]. 焊接学报,2013(1):1-3,113.
[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.

(上接第 124 页)

(4)项目实施总占地面积 200 m^2，总装机容量 30.91 kW，运行功率 19.14 kW，运行费用约为 3 元/吨，实施后运行效果较好，具有较低的运行成本。

参考文献

[1] 唐受印,戴友芝. 水污染控制[M]. 北京:化学工业出版设,2000:117-132.
[2] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1995:139-145.
[3] 陈敏恒,丛德滋. 化工原理[M]. 北京:化学工业出版社,1998:195-199.