

中文引用格式:张春义,朱戈,田志勇,等. 加氢反应器接管法兰密封槽失效原因分析及改进措施[J]. 中国安全科学学报,2024,34(12):100-107.

英文引用格式:ZHANG Chunyi, ZHU Ge, TIAN Zhiyong, et al. Failure analysis and improvement measures of hydrogenation reactor flange sealing groove [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12):100-107.

## 加氢反应器接管法兰密封槽失效原因分析及改进措施\*

张春义<sup>1,2</sup>工程师, 朱戈<sup>3</sup>工程师, 田志勇<sup>1,3</sup>高级工程师, 宋明<sup>\*\*1</sup>正高级工程师,  
都亮<sup>1,3</sup>高级工程师, 吴远建<sup>1,3</sup>高级工程师

(1 中国特种设备检测研究院, 北京 100029; 2 国家市场监督管理总局技术创新中心 油气管道与储存设备安全, 北京 100029; 3 中国石油化工股份有限公司 镇海炼化分公司, 浙江 宁波 315207)

中图分类号: X937

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.12.0102

资助项目: 横向课题(K-20-I01); “十三五”国家科技攻关项目(2018YFC0808600)。

**【摘要】** 为预防加氢反应器法兰密封槽失效发生事故, 采用宏观检查、断口分析、铁素体检测、化学成分分析、硬度检测、金相检测、扫描电镜(SEM)分析以及操作过程分析等失效分析方法, 研究损伤模式、开停工操作过程、堆焊层铁素体含量、材料性能及异常元素等影响因素, 分析加氢反应器出口接管法兰密封槽失效原因。结果表明: 密封槽失效主要是由于密封槽堆焊层与母材之间存在较高应力, 在含氟、硫等元素的腐蚀介质作用下产生应力腐蚀开裂; 开裂法兰密封槽底面存在无堆焊层, 穿晶裂纹起裂于表面堆焊层与无堆焊层的交界处, 以在无堆焊层侧表面起裂为主。针对失效原因, 从制造、选材、维护等方面提出相应的改进措施。

**【关键词】** 加氢反应器; 法兰密封槽; 失效原因; 扫描电镜(SEM); 堆焊层; 应力腐蚀开裂

### Failure analysis and improvement measures of hydrogenation reactor flange sealing groove

ZHANG Chunyi<sup>1,2</sup>, ZHU Ge<sup>3</sup>, TIAN Zhiyong<sup>1,2</sup>, SONG Ming<sup>1</sup>, DU Liang<sup>1,2</sup>, WU Yuanjian<sup>1,2</sup>

(1 China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 2 Oil and Gas Pipeline and Storage Equipment Safety for State Market Regulation, Technology Innovation Center, Beijing 100029, China; 3 Zhenhai Refining & Chemical Company, SINOPEC, Ningbo Zhejiang 315207, China)

**Abstract:** In order to prevent accidents caused by the failure of the flange sealing groove in the hydrogenation reactor, failure analysis methods such as macroscopic inspection, fracture analysis, ferrite detection, chemical composition analysis, hardness detection, metallographic detection, SEM analysis and operation process analysis were adopted. The influencing factors of damage mode, start-stop operation

\* 文章编号: 1003-3033(2024)12-0100-08; 收稿日期: 2024-07-25; 修稿日期: 2024-09-28

\*\* 通信作者: 宋明(1985—), 男, 天津人, 博士, 正高级工程师, 主要从事承压类特种设备的失效问题研究与检验检测分析技术开发工作。  
E-mail: songm214@foxmail.com。

process, ferrite content in the weld overlay layer, material properties, and abnormal elements were studied, and the reasons for the failure of the flange sealing groove at the outlet of the hydrogenation reactor were analyzed. The results indicate that the failure of the sealing groove is mainly due to the high stress between the weld overlay layer and base metal of the sealing groove, which produces stress corrosion cracking under the action of a corrosive medium containing F, S and other elements. There is no weld overlay layer on the bottom surface of the cracked flange sealing groove, and the transgranular cracks started at the junction of the surface weld overlay layer and the non-weld overlay layer, mainly on the surface of the non-weld overlay layer side. According to the failure causes, the corresponding improvement measures are put forward from the aspects of manufacturing, material selection and maintenance.

**Keywords:** hydrogenation reactor; flange sealing groove; failure causes; scanning electron microscope (SEM); weld overlay layer; stress corrosion cracking

## 0 引言

加氢反应器是石油化工加氢裂化装置的核心反应设备,长期服役在烃类油气、氢气和硫化氢等高温、高压和临氢介质环境中,使用工况苛刻,因此,反应器制造主要用厚壁铬钼钢锻焊或板焊,内壁采用不锈钢堆焊<sup>[1-3]</sup>。由于长期在复杂工况运行下,材料易发生回火脆化、氢腐蚀、氢脆、应力腐蚀开裂等一系列损伤<sup>[4-5]</sup>。在众多损伤中,裂纹是最危险的一种,加氢反应器应力腐蚀裂纹较多出现在反应器内壁支撑凸台、人孔、接管法兰梯形密封槽底部拐角处、内壁支撑圈角焊缝等应力集中部位<sup>[6]</sup>。

近年来,国内外学者从设计、制造、材料、检验等多方面针对加氢反应器进行了大量的理论研究和分析,尤其是对其长期在苛刻环境运行下的检验和缺陷分析方面取得了较大进步。《在用压力容器检验第 1 部分:加氢反应器》<sup>[5]</sup>系统性地介绍了加氢反应器的损伤模式、部位并给出针对性的检验方法和技术手段,为加氢反应器的检验提供了科学依据;张辉<sup>[7]</sup>、李蓉蓉<sup>[8]</sup>、吴远建<sup>[9]</sup>等分析了反应器损伤模式,以缺陷反应器为例,从宏观检查、金相、硬度等分析加氢反应机器人孔盖密封槽密集裂纹,根据裂纹形态位置,认为停工期间含氯离子水接触到人孔盖密封槽补焊部位,在补焊处较高残余应力下造成氯离子应力腐蚀开裂;强天鹏等<sup>[6]</sup>利用衍射时差法超声检测技术较高精度定量检测反应器法兰密封槽裂纹;都亮<sup>[1]</sup>、胡华胜<sup>[10]</sup>等利用有限元分析软件对反应器上缺陷进行建模、模拟应力计算分析和安全评定,提出运行维修维护建议;侍吉清等<sup>[11]</sup>对蜡油加氢反应器出口管道法兰密封面进行宏观、无损、力学性能、化学成分、金相、有限元等分析,得出法兰密封槽产生周向裂纹失效缘于制造缺陷;吴伟阳<sup>[12]</sup>、庄

法坤<sup>[13]</sup>等对破裂的反应器不锈钢法兰密封槽进行化学成分、金相、扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和断口分析等试验,认为法兰长期在高温高压临氢环境下,材料中出现  $\sigma$  相、 $\sigma$  脆性相和高应力的结合导致法兰密封槽开裂,开裂后,氢元素进入裂缝,从而加速裂纹的生长;熊维琼等<sup>[14]</sup>提出在加氢反应器制造过程中对材料验收、焊接质量、检验等关键环节进行质量管理,为加氢反应器产品质量提供技术参考。综上,前人大都仅从宏观或微观特征上分析加氢反应器设备本体失效,未针对管道法兰开裂进行分析。

鉴于此,笔者拟综合宏观及微观多种特征分析加氢反应器下出口接管法兰梯形密封槽环向开裂失效原因,并结合分析结果及开停工操作过程进一步论证损伤模式,找出失效原因,并从制造、选材、维护等方面提出相应的改进措施,以期有效保障设备安全运行。

## 1 设备结构及主要技术参数

2023 年 4 月某石化企业在检验加氢裂化装置中加氢精制反应器时,发现反应器 R302 底部接管后法兰密封面梯形槽整圈开裂。该台设备在 1989 年设计制造,于 1993 年 9 月投入使用。其中,法兰本体材质为 1Cr18Ni9Ti,密封面堆焊层材质为 TP347 L;法兰垫片材质为 00Cr18Ni10。运行期间法兰的服役温度为 414 °C,操作压力为 17.68 MPa,工况平稳,反应器出口介质为高温氢气与反应产物 (主要是燃料油) 的混合物。

失效接管法兰的结构如图 1 所示。该法兰设计技术文件明确要求密封面布氏硬度  $HB \geq 180$ ,或降低八角垫布氏硬度以保证它们之间的布氏硬度差  $HB \geq 30$ ;如果密封面的布氏硬度  $HB < 180$ ,则允许密封面增

加 TP347L 堆焊层,堆焊层的有效厚度 $\geq 3$  mm。

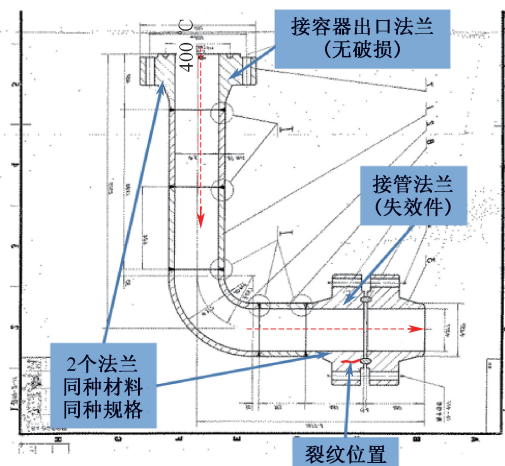


图1 接管和法兰结构

Fig. 1 Outlet nozzle flange

## 2 设备检测和失效原因分析

### 2.1 设备检测缺陷宏观形貌

渗透检测反应器 R302 底部弯管法兰面,发现与容器相连法兰密封面完好,而与管道相连法兰的梯形密封槽的 2 个过渡圆弧处可见沿环向分布的裂纹,其中,沿内环的裂纹较长,几乎覆盖了整个环向。法兰结构完好,无宏观塑性变形,裂纹相对平直且沿环向分布。接管上下游法兰密封面着色检测结果如图 2 所示。

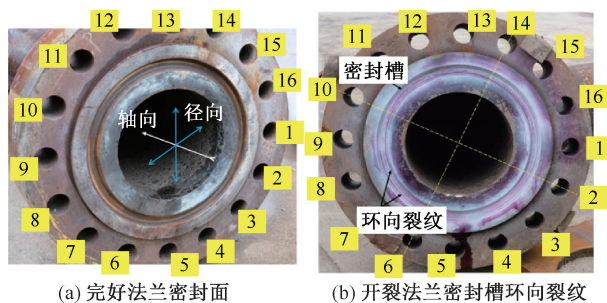


图2 接管上下游法兰密封面着色检测结果

Fig. 2 Penetrant test results of flange sealing surface at upstream and downstream of nozzle

### 2.2 备件工作及锯床切口截面的宏观观察

由于法兰比较笨重,为更好地分析其失效原因,采用碳弧气刨法切割取样分析法兰,使用锯床沿图 2b 虚线位置将失效法兰分割为 4 块。

观察开裂法兰分割后的 4 块样品切割截面,裂纹扩展情况如图 3 所示。法兰截面上直接目视可见的裂纹均与密封槽表面裂纹相连通。其中,2 号、

6 号和 14 号螺栓孔位置截面上的裂纹较单一,不分支;裂纹的扩展方向具有共性特征,与轴向呈  $15\sim 25^\circ$  (轴向取为沿管道中心线方向,即与法兰中心线平行;径向取为法兰半径方向,与轴向垂直)。10 号螺栓孔位置除与其他 3 个螺栓孔位置有类似特征的主裂纹外,在其周围还存在许多分支裂纹,裂纹整体呈树枝状发散分布。

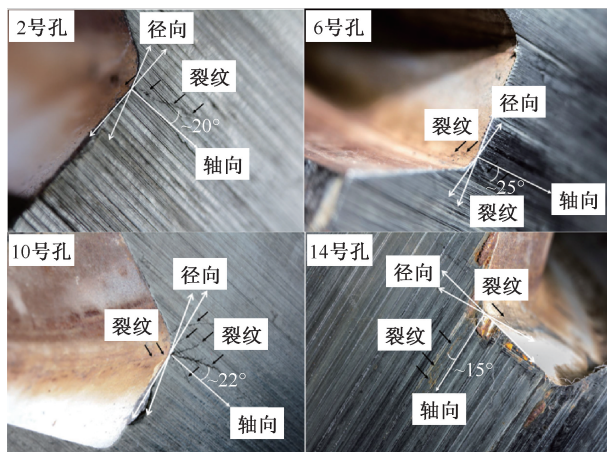


图3 锯床切割截面上的裂纹宏观形貌

Fig. 3 Macro morphology of cracks on the cutting section of sawing machine

### 2.3 密封面铁素体含量测定

采用铁素体仪测定 2 个法兰密封面的铁素体含量。梯形密封面共有 3 个平面,包括双侧面 A、C 和底面 B,如图 4 所示。

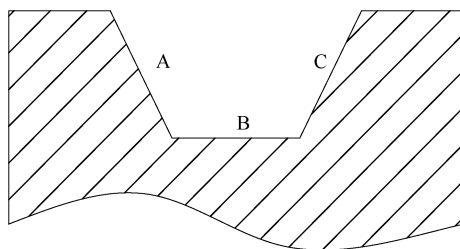


图4 梯形槽密封面铁素体检测

Fig. 4 Ferrite detection on sealing surface of trapezoidal groove

经过系列测试,开裂法兰和完好法兰具有代表性的数据结果见表 1。

表1 开裂法兰和完好法兰梯形槽密封面铁素体检测结果  
Table 1 Ferrite test results of trapezoidal groove sealing surface of cracked flange and intact flange %

检测工件	A 侧面铁素体均值	B 槽底面铁素体均值	C 侧面铁素体均值
开裂法兰	6.9	2.7	7.1
完好法兰	7.2	6.9	7.1

经对各部位铁素体检测,发现开裂法兰槽底部平面多数位置的铁素体值异常,其值小于 3%,在双开裂位置最小值仅有 1.8%,此位置对应金相检测无堆焊层处。而开裂法兰 2 个侧面和完好法兰 3 个密封面测量的铁素体值均在 4%~10%,且均处于较高水平,均明显高于开裂法兰槽底面。

## 2.4 切片断口、硬度、金相和化学分析

锯床切口宏观检验发现,除开裂法兰 10 号螺栓孔切面裂纹呈树枝状外,其余切面裂纹宏观形貌均呈不分叉平直状,且与轴向呈固定角度,具有共性特征。因此,选取 10 号螺栓孔和与之对称 180°的 2 号螺栓孔进行切片取样。一方面进行裂纹宏观观察,另一方面在切片上取样进行裂纹断口、硬度、金相和化学成分分析。同时,在完好法兰随机挑选 11 号螺栓孔位置取一个对比切片,进行比对分析。在开裂法兰 10 号螺栓孔取 1 号切片进行硬度、金相和化学成分分析,取 2 号切片进行断口分析;在开裂法兰 2 号螺栓孔取 3 号切片进行硬度、金相和化学成分分析,取 4 号切片进行断口分析;在完好法兰 11 号螺栓孔取 5 号切片进行硬度、金相和化学成分分析。

### 2.4.1 切片断口分析

分析开裂法兰上切取的 4 个切片裂纹断口。可见裂纹主要沿密封槽过渡圆弧与槽底边的平滑过渡处起裂,少数裂纹沿过渡圆弧与槽侧边的平滑过渡处起裂。大部分裂纹为相对单一的单根裂纹,扩展路径略曲折,宏观上几乎不分叉。仅 10 号螺栓孔切片裂纹存在树枝状分叉现象。密封槽内所有起裂区域均有不同程度的锈蚀颜色。

### 2.4.2 切片断口沿裂纹打开分析

沿裂纹打开开裂法兰的 10 号螺栓孔 2 号切片和 2 号螺栓孔的 4 号切片,分析 2 处断口,可见断面具有近似形貌。断口宏观平直,局部略显粗糙,断面几乎没有二次裂纹,但有明显的锈蚀颜色。用毛刷等清理断面后,发现部分锈蚀颜色脱落,锈蚀颜色底层可见青灰色,如图 5 所示。

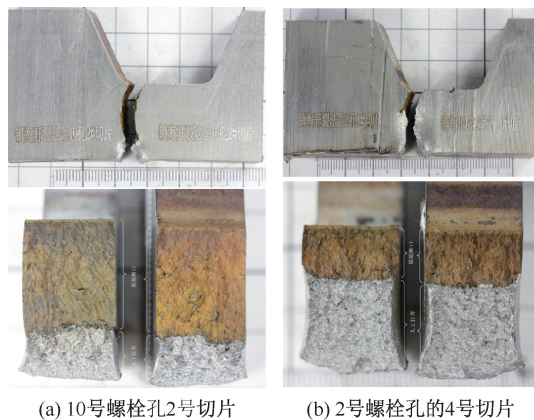


图 5 开裂法兰切片沿裂纹打开断口形貌

Fig. 5 Fracture morphology of cracked flange slice opening along the crack

### 2.4.3 切片化学成分分析

依据《不锈钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)》(GB/T 11170—2008)标准,采用火花放电原子发射光谱分析法,分析失效法兰的化学成分,测定碳、硅、锰、铬、镍、钼、磷、钛、硫等元素含量。化学成分分析依据标准《承压设备用不锈钢和耐热钢 锻件》(NB/T 47010—2017)<sup>[15]</sup>中对应材质 S32168 的要求,见表 2。堆焊层因存在与母材的稀释问题,此处主要列出成分,不作标准比对分析。

表 2 化学成分分析

Table 2 Chemical composition analysis

分析位置	化学成分质量分数/%								
	碳	硅	锰	铬	镍	钼	钛	磷	硫
NB/T 47010—2017 标准要求	≤0.08	≤1.00	≤2.00	17.00~ 19.00	9.00~ 12.00	—	5×C~0.70	≤0.035	≤0.015
开裂法兰 10 号螺栓孔	0.06	0.72	1.64	18.52	10.76	0.10	0.30	0.031	0.004
开裂法兰 2 号螺栓孔	0.06	0.72	1.63	18.62	10.62	0.10	0.30	0.029	0.004
完好法兰 11 号螺栓孔	0.05	0.53	1.73	18.91	10.58	0.07	0.22	0.029	0.004
开裂法兰 10 号孔堆焊层 (TP347L)	0.04	0.53	1.65	19.00	10.24	0.06	0.10	0.021	0.002

注:钛成分中的 C 表示碳含量。

### 2.4.4 切片宏观形貌分析

宏观分析开裂法兰 10 号螺栓孔 1 号切片、2 号螺栓孔 3 号切片和完好法兰 11 号螺栓孔 5 号切片的对应裂纹位置的密封槽截面。发现开裂法兰在密

封槽底面几乎无堆焊层,而完好法兰 2 个侧面和底面均覆盖堆焊层。硬度检测下的密封槽截面宏观形貌如图 6 所示。

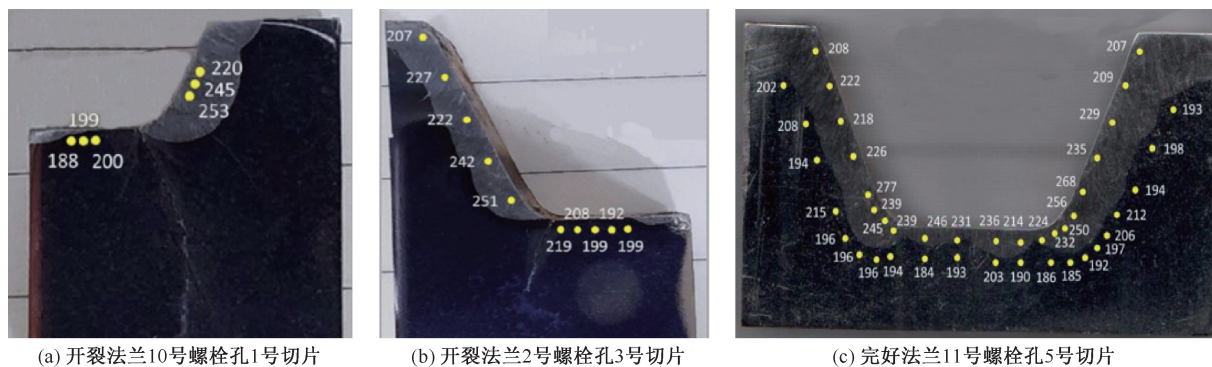


图6 法兰切片密封槽截面宏观形貌及硬度检测结果

Fig. 6 Macroscopic morphology and hardness test results of flange slice sealing groove section

#### 2.4.5 硬度检测分析

采用维氏硬度计,测试开裂法兰10号螺栓孔1号切片、2号螺栓孔3号切片和完好法兰11号螺栓孔5号切片对应裂纹位置密封槽截面的硬度,测试结果如图6所示。堆焊层维氏硬度HV普遍在207~250,基材维氏硬度HV在198左右,堆焊层硬度普遍高于基材硬度。换算成布氏硬度进行分析,密封面能够基本满足设计文件中的技术要求。无论是基材还是堆焊层,随着向裂纹起裂位置靠近,材料的硬度呈明显升高趋势。

完好法兰的硬度大小分布和开裂法兰近似,堆

焊层硬度也普遍高于基材硬度。换算成布氏硬度,分析说明能够基本满足设计文件中的技术要求。无堆焊层位置处硬度值偏低,但差距不大,而堆焊层在密封槽过渡圆弧处的硬度最高。

#### 2.4.6 切片金相分析

分析裂纹的局部放大金相,发现开裂法兰裂纹起裂位置均处于堆焊层和无堆焊层的交界处,且主要分布于无堆焊层的位置,如图7所示。完好法兰切片密封面局部截面金相放大可见其底部堆焊层存在稍微不均匀,但无明显不覆盖。

进一步局部放大分析裂纹尖端,可以发现裂纹

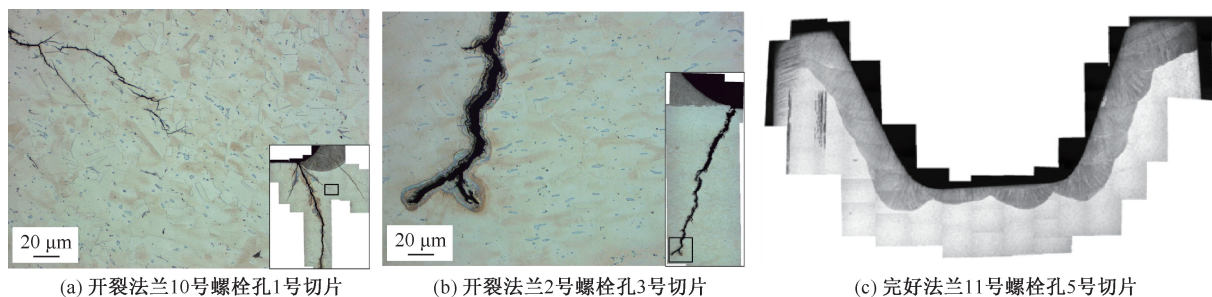


图7 法兰螺栓孔切片密封槽截面金相放大形貌

Fig. 7 Metallographic magnification morphology of flange bolt hole slicing sealing groove section

起裂和扩展均呈穿晶特征。2号螺栓孔裂纹呈单一扩展模式,几乎无分支;10号螺栓孔呈多位置起裂特征,主裂纹扩展方向与2号螺栓孔主裂纹一致,同时在主起裂位置(几乎无堆焊层处)有多处分支;分析其主要原因在于10号螺栓孔存在多处裂纹起裂位置对应堆焊层不均匀或无堆焊层位置。

#### 2.5 能谱与SEM分析

为进一步分析裂纹内部填充物成分,分别对开裂法兰10号螺栓孔1号切片和2号螺栓孔3号切片裂纹内部取样进行能谱和SEM分析,如图8所示。裂纹内部填充物成分分析结果见表3。

从表3中可以看出,开裂法兰10号螺栓孔1号

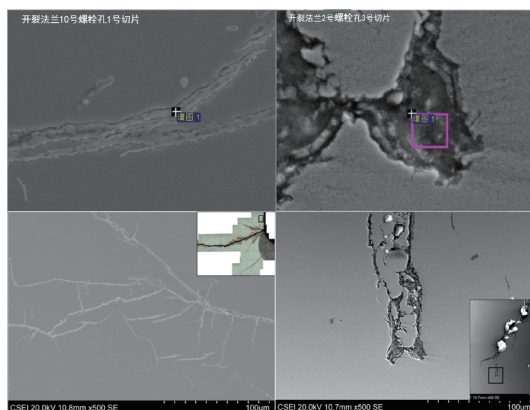


图8 密封槽裂纹SEM分析图谱

Fig. 8 SEM analysis of cracks in sealing groove

表 3 开裂法兰 10 号螺栓孔 1 号切片与 2 号螺栓孔 3 号切片裂纹内部填充物能谱结果

Table 3 The crack internal filler energy spectrum results of Slice 1 from Bolt hole10 and Slice 3 from Bolt hole2 of the cracked flange

分析位置	元素 Element	铁	氧	铬	镍	钙	锰	铝	硅	钛	镁	硫
10 号螺栓孔 1 号切片	质量分数/%	45.67	29	16.61	3.55	—	2.91	0.99	0.85	0.42	—	—
	分数/At%	26.05	57.74	10.18	1.93	—	1.69	1.17	0.97	0.28	—	—
2 号螺栓孔 3 号切片	质量分数/%	45.64	41.68	8.34	—	1.93	1.61	—	—	—	0.42	0.4
	原子分数/%	22.15	70.61	4.34	—	1.3	0.79	—	—	—	0.46	0.34

切片与 2 号螺栓孔 3 号切片裂纹填充物中主要元素含量相近,但元素含量不完全相同;其中,铁、氧、铬的含量较高,其余元素含量比较微量;说明该区域所含颗粒主要为铁、铬和铁、铬氧化物的结合体;且通过 SEM 分析,基材未发现敏化特征。

分析裂纹从起裂到发展前沿尖端的能谱成分。分析开裂法兰 2 号螺栓孔 4 号切片的裂纹扩展前沿能谱成分如图 9 所示。

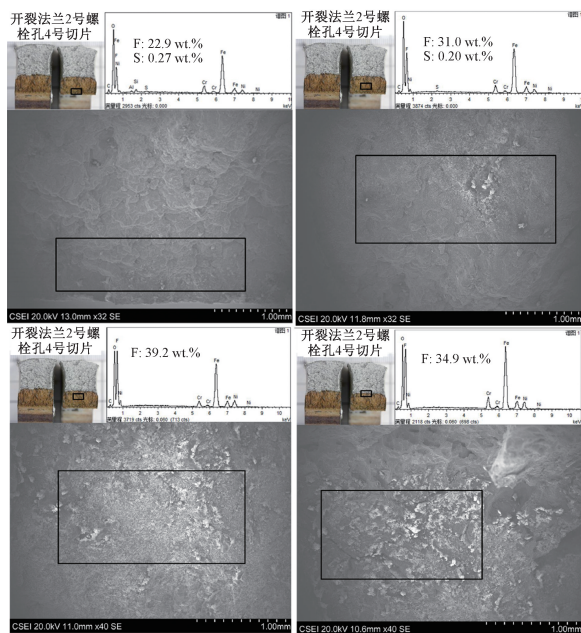


图 9 沿裂纹扩展深入前沿方向能谱分析图谱

Fig. 9 Energy spectrum analysis along the crack propagation front

对开裂法兰 2 号螺栓孔 4 号切片沿裂纹深入方向能谱分析,发现裂纹中含有氟元素和硫元素,且沿裂纹深入方向,氟元素重量比呈现一定的增加趋势。该结果与堆焊层元素含量存在异常。

## 3 失效原因讨论及改进措施建议

### 3.1 失效原因

采用宏观检查、断口分析、铁素体检测、化学成分分析、硬度、金相、SEM 分析以及操作过程分析等

方法分析失效法兰。根据分析结果,从以下 5 个方面讨论失效原因。

1) 损伤模式。加氢反应器法兰件可能出现的主要损伤模式包括以下几种:高温硫化氢/氢气腐蚀、高温氢腐蚀、再热裂纹、回火脆化、连多硫酸应力腐蚀开裂和堆焊层氢致裂纹。①高温硫化氢/氢气腐蚀是当温度超过 204 °C 时会主要表现为均匀腐蚀。由于法兰、法兰垫片均采用铬、镍含量较高的不锈钢材质,宏观检验未发现均匀腐蚀。②高温氢腐蚀主要是临氢环境温度 >260 °C 时,碳钢和合金钢中的碳与氢反应生成 CH<sub>4</sub> 气体,材质发生脱碳的过程,并形成鼓泡或开裂,宏观检验无明显鼓泡变形,但密封面开裂现象。③再热裂纹主要是钢材在焊后热处理或高温服役期间,高应力区发生应力消除或应力松弛,粗晶区应力集中区域的晶界滑动量超过该部位塑性变形能力而发生开裂,由此在法兰件上出现晶间开裂。④回火脆化是低合金钢长期暴露在 343~593 °C 范围内,材料韧性没有明显降低,但材料组织微观结构变化,降低温度后发生脆性开裂的过程,根据宏观检验和硬度及微观分析未发现明显回火脆化现象。⑤连多硫酸应力腐蚀开裂主要是奥氏体不锈钢经历大于 425 °C 的高温阶段时,过饱和的碳向奥氏体晶粒边界扩散,并与铬元素化合形成碳化铬,发生敏化;停工期间法兰件易与空气和水反应生成连多硫酸,从而引起应力腐蚀开裂,一般是沿晶开裂<sup>[16]</sup>。

2) 开停工操作过程。加氢反应器运行在高温高压临氢环境中,H<sub>2</sub> 容易扩散到钢材中。由于钢材的材料和金相组织不同,H<sub>2</sub> 的扩散能力也不同,加氢反应器及其附属管道一般是由母材和堆焊层组成,因此,两者对氢的溶解度、扩散能力不同。设备在运行中,堆焊层 TP347 L 中溶氢量远高于母材中溶氢量;在反应器停工冷却过程中,如果停工操作冷却过快,如温度较快降至 150 °C 以下,氢气来不及向外释放,钢中和堆焊层残留一定量的氢,从而导致氢脆和堆焊层氢致开裂。裂纹容易在铁素体含量偏高

或偏低的部位容易发生,沿堆焊层表面产生向内部母材扩展。

3) 铁素体对产生裂纹的影响。堆焊层铁素体含量要求超过 3% 且不超过 10%, 主要是为了防止热裂纹和使得形成的  $\sigma$  相最小。铁素体含量过高, 堆焊层在焊后热处理中, 一部分  $\delta$  铁素体会转变成  $\sigma$  相, 当  $\sigma$  相吸氢后, 易引起沿渗入氢的  $\sigma$  相开裂并扩展。因此,  $\sigma$  相是导致氢致开裂的重要原因。

4) 热壁加氢反应器母材与堆焊层材料的热膨胀系数存在较大差别, 一般母材的导热系数远大于堆焊层, 堆焊层的热膨胀系数大于母材, 因此, 设备停工冷却时, 内壁比外壁降温快, 往往在反应器内部凸台、接管角焊缝、法兰密封槽等应力集中部位产生很大的应力, 再加上材料其他损伤模式, 从而引起应力腐蚀开裂等缺陷。

5) 对开裂法兰 2 号螺栓孔 4 号切片沿裂纹深入方向能谱分析, 发现裂纹中含有氟和硫元素, 且沿裂纹深入方向, 氟元素重量比呈现一定的增加趋势。对有害元素来源分析, 经与用户沟通了解到, 在上一检修周期对该开裂法兰更换了八角垫片, 经确认更换的垫片含有一定的氟元素。分析在含氟元素或氟化物会引起不锈钢表面钝化膜的破坏<sup>[17]</sup>, 氟化物很容易将稳定的铬从不锈钢金属中析出, 引起不锈钢的腐蚀, 在应力集中部位产出应力腐蚀开裂<sup>[18]</sup>。

### 3.2 改进措施建议

针对加氢反应器出口接管法兰密封槽开裂失效原因的分析, 从制造、选材、维护等方面可采用下述改进措施:

1) 严格控制堆焊层铁素体含量, 主要在封头、筒体内壁堆焊层, 人孔、接管法兰密封槽, 手工堆焊、

补焊、返修部位等, 铁素体含量控制在 3% ~ 10%。堆焊层堆焊过程中应达到技术要求, 避免堆焊不均匀造成无堆焊层或堆焊层不完整。密封槽尽量圆滑过渡, 避免密封槽圆弧过渡处应力过度集中。

2) 严格进行热处理工艺处理, 控制  $\sigma$  相转变。

3) 选择合适密封的八角垫片, 严格控制八角垫片中化学成分。

4) 停工期间, 严格控制降温过程, 防止降温过快, 充分释放钢中的溶解氢。

## 4 结 论

1) 开裂法兰裂纹主要分布于梯形密封槽底面与平滑过渡区的堆焊层稀少或无堆焊层位置, 沿环向分布, 裂纹宏观平直, 微观略呈曲折; 裂纹穿晶起裂于堆焊层与堆焊层稀少或无堆焊层的交界处, 以在无堆焊层侧起裂为主, 且扩展行为也为穿晶, 主裂纹在垂直环向截面上的扩展方向具有共性特征, 切截面的主裂纹均与轴向呈 15 ~ 25° 角, 切截面的裂纹呈单条不分叉。

2) 裂纹扩展行为受应力控制, 堆焊层稀少或无堆焊层位置处硬度值偏低, 堆焊层和基材硬度在开裂位置附近均比其他位置高。堆焊层不均匀或无堆焊层位置铁素体含量异常, 其值小于 3%。

3) 裂纹断口表面附近的密封面有锈蚀的氧化层, 分析氧化层中含有较高氟元素和少量的硫元素; 从表面到裂纹尖端, 氟元素成分呈增高趋势。

4) 环向大部分区域裂纹为应力腐蚀开裂裂纹, 腐蚀介质为含氟和硫的化合物, 其中, 含氟化合物含量较高; 应力腐蚀开裂的驱动力主要为堆焊层与无堆焊层交界处的残余应力, 这是导致法兰密封槽开裂失效的主要原因。

### 参 考 文 献

- [1] 都亮, 别凯, 赵亚洁, 等. 含平面埋藏缺陷的精制加氢反应器安全评定分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 86-91.  
DU Liang, BIE Kai, ZHAO Yajie, et al. Safety assessment of refined hydrogenation reactor with plane embedded defects[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 86-91.
- [2] 史晓红. 热壁加氢反应器设计和使用的几点探讨[J]. 机械, 2007, 34(9): 23-25, 30.
- [3] 高远, 樊运晓, 王一帆, 等. 基于系统思考的我国特种设备监营压力缓解研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(12): 128-133.  
GAO Yuan, FAN Yunxiao, WANG Yifan, et al. A system thinking based study of reducing pressure on special equipment regulation authorities [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(12): 128-133.
- [4] GB/T 30579—2022, 承压设备损伤模式识别[S].

- GB/T 30579-2022, Damage modes identification for pressure equipments [S].
- [5] GB/T 36669.1—2018, 在用压力容器检验第 1 部分:加氢反应器[S].  
GB/T 36669.1—2018, In-service pressure vessel inspection part 1: hydrogenation reactor [S].
- [6] 强天鹏,陈永强,王郁林,等. 加氢反应器法兰密封槽裂纹的检测和定量[J]. 无损检测, 2010, 32 (11): 833-835.  
QIANG Tianpeng, CHEN Yongqiang, WANG Yulin, et al. Inspection and quantification for hydrogenation reactor flange sealing groove crack[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32 (11): 833-835.
- [7] 张辉. 石油化工行业加氢反应器主要损伤类型、因素及防治要点[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(4): 52-54.  
ZHANG Hui. Main damage types, factors and prevention points of hydrogenation reactor in petrochemical industry[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2022, 48(4): 52-54.
- [8] 李蓉蓉,陈学东,李平瑾,等. 对在役加氢反应器缺陷的现场检验及其成因分析(一):反应器内壁及人孔大盖内壁中的裂纹[J]. 压力容器, 2009, 26 (3): 30-36.  
LI Rongrong, CHEN Xuedong, LI Pingjin, et al. Site inspection and cause analysis of defects for hydrogenation reactor in service(1): the cracks of reactor inner wall and manhole cover inner wall [J]. Pressure Vessel Technology, 2009, 26(3): 30-36.
- [9] 吴远建,李修能,赵文静,等. 加氢反应器 RBI 检验及缺陷分析处理[J]. 化工机械, 2021, 48(4): 599-603.  
WU Yuanjian, LI Xiuneng, ZHAO Wenjing, et al. RBI Inspection and defect analysis of hydrogenation reactor[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2021, 48(4): 599-603.
- [10] 胡华胜,邓聪,王磊,等. 反应器上弯管法兰堆焊层表面裂纹的应力分析及安全评定[J]. 山东化工, 2020, 49(17): 221-223, 230.  
HU Huasheng, DENG Cong, WANG Lei, et al. Stress analysis and safety assessment for the crack on the welding layer of the elbow flange of the reactor[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49 (17): 221-223, 230.
- [11] SHI Jiqing, WANG Jieli, SONG Wenming, et al. Failure analysis of flange sealing surface of outlet pipeline of wax oil hydrogenation reactor[C]. ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference, 2020: DOI: 10.1115/PVP2020-21251.
- [12] 吴伟阳. 加氢裂化装置反应器出口管线法兰开裂原因分析[J]. 石油化工设备, 2020, 49(5): 85-90.  
WU Weiyang. Flange cracking cause analysis of hydrocracking reactor outlet pipeline[J]. Petro-chemical Equipment, 2020, 49(5): 85-90.
- [13] ZHUANG Fakun, LIU Wen, XIE Guoshan, et al. Analysis of the flange seal groove cracking in a hydrocracking reactor[C]. ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference, 2020: DOI: 10.1115/PVP2020-21199.
- [14] 熊维琼,王新农,孙亚杰,等. 加氢反应器的制造及监督检验技术探讨[J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(5): 82-87.  
XIONG Weiqiong, WANG Xinnong, SUN Yajie, et al. Discussion on manufacturing and supervision inspection technology of hydrogenation reactors[J]. China Special Equipment Safety, 2024, 40(5): 82-87.
- [15] NB/T 47010—2017, 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件[S].  
NB/T 47010—2017, Stainless and heat-resisting steel forgings for pressure equipment [S].
- [16] 强天鹏. 压力容器检验[M]. 北京: 新华出版社, 2008: 374-386.
- [17] 春名匠,柴田俊夫,陈英夫. 不锈钢的腐蚀(二) 氟对不锈钢的腐蚀[J]. 设备管理与维修, 1997(12): 42-45.
- [18] 冯晓庆. 表面改性 904L 不锈钢在含 F-酸性溶液中的腐蚀行为研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.  
FENG Xiaoqing. Study on corrosion behavior of surface modified 904L stainless steel in F-acid solution [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.

**作者简介:** 张春义 (1990—),男,河南南阳人,硕士,工程师,主要从事特种设备检验检测、风险评估、安全评定和失效分析方面的工作。E-mail: zcy3919@aliyun.com。

