

1Cr5Mo管法兰焊缝在线开裂失效原因分析

卢一城

福建联合石油化工有限公司 福建泉州 362000

摘要：石化装置因压力管道泄漏而不能正常运行，对主要影响因素管法兰开裂焊缝进行追查，并对管法兰开裂焊缝进行失效分析。经过对泄漏管法兰试件的观察与分析，管法兰焊缝热影响区出现开裂，且开裂模式为脆性延迟断裂，机理为应力腐蚀开裂。发生应力腐蚀的原因应是由于焊缝热影响区组织存在淬硬马氏体，导致硬度严重超标，在湿硫化氢作用下产生应力腐蚀开裂。淬硬马氏体的形成应与焊后热处理质量和检测质量有关。

关键词：法兰焊缝；失效分析；改进措施

On-line cracking failure analysis of 1Cr5Mo pipe flange weld

LU Yicheng

Fujian Fefining & Petrochemical Co., Ltd., Quanzhou 362000, Fujian, China

Abstract: The leakage of pressure pipeline in petrochemical plant can not work normally, the main influencing factors of cracking weld of pipe flange are traced, and the failure analysis of cracking weld of pipe flange is carried out. Through the observation and analysis of the leaking pipe flange specimen, the heat affected zone of the pipe flange weld cracks, and the cracking mode is brittle delayed fracture, and the mechanism is stress corrosion cracking. The stress corrosion is caused by the existence of quenched martensite in the weld heat affected zone, which leads to the hardness exceeding the standard seriously, and the stress corrosion cracking occurs under the action of wet hydrogen sulfide. The formation of hardened martensite should be related to the quality of welding heat treatment and testing.

Keywords: flange welds; failure analysis; improvements

1 序言

在石油化工生产中，加氢处理是重质油深度加工的主要工艺之一，集炼油技术、高压技术和催化技术为一体。加氢处理装置采用劣质蜡油加氢处理技术，加氢处理催化剂采用FRIPP的FF14（保护剂采用FZC系列）。加氢处理过程是在较高压力下，烃类分子与氢气在催化剂表面发生加氢脱硫、脱氮

和不饱和烃的加氢反应，同时部分裂解和加氢反应生成较小分子的转化过程^[1]。

加氢处理装置在停工检修后、开工生产前，为了提高催化剂活性，避免催化剂因变成金属状态而永久失活，防止催化剂带水影响催化剂强度等，需要将催化剂内的金属由氧化状态转化成硫化状态，一般采用湿法硫化法。

作者简介：卢一城，本科，工程师，主要从事石油化工装置设备运行、检维修技术管理等方面工作，E-mail: luyicheng@fjrep.com。

2021年12月,某石化公司加氢处理装置在检修后开工时的催化剂预硫化过程中,热低压分离器液位计上引出接管焊缝泄漏,泄漏位置如图1所示。泄漏介质含 H_2S 、 H_2 。发现泄漏后,装置停止预硫化,反应系统紧急降温、降压停工修复。该管道设计技术参数见表1。



a) 实物

b) 泄漏位置示意

图1 热低压分离器管-法兰泄漏位置

表1 管道设计技术参数

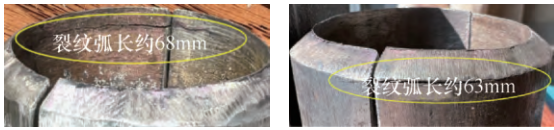
设计压力 /MPa	工作压力 /MPa	设计温度 /℃	工作温度 /℃	规格 /mm	管道材质	介质
3.85	2.4	350	252	$\phi 60 \times 5.5$	1Cr5Mo	油气、油、 H_2 、 H_2S

该法兰(1Cr5Mo钢, NB/T 47008—2017《承压设备用碳素钢和合金钢锻件》)及接管(1Cr5Mo钢, GB 9948—2013《石油裂化用无缝钢管》)采用手工钨极氩弧焊进行焊接。2009年5月安装后投入使用,至泄漏时已运行约12年,其中经历过5次预硫化处理(包括本次),在2013年和2018年停工期间还进行过系统的中和清洗(碱液清洗)。下面将对法兰开裂焊缝的失效问题进行分析。

2 试验分析

2.1 宏观观察

对管法兰焊缝进行内外壁检测,焊缝两侧熔合区均出现裂纹,短管侧裂纹较长,焊缝短管侧熔合区上的环向裂纹内壁长约68mm,外壁长约63mm,裂纹由内壁启裂并向外壁扩展,附近未见明显的塑性变形,表现出脆断特征(见图2)。短管内外壁均有明显的结垢现象,内壁相对外壁要严重些(见图3)。



a) 内壁

b) 外壁

图2 焊缝裂纹宏观特征



a) 内壁

b) 外壁

图3 焊缝内外壁腐蚀状况

2.2 化学成分分析

对法兰及短管母材取样进行化学成分分析,见表2。分析结果表明,法兰母材的化学成分满足NB/T 47008—2017《承压设备用碳素钢和合金钢锻件》中对1Cr5Mo锻件的要求。短管母材的化学成分满足GB 9948—2013《石油裂化用无缝钢管》中对1Cr5Mo钢管的要求。

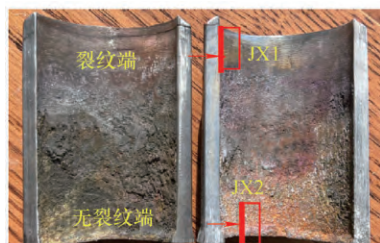
表2 法兰及短管母材化学成分(质量分数)(%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
法兰	0.087	0.273	0.516	0.013	0.008	5.13	0.56	0.064	0.072
1Cr5Mo (NB/T 47008—2017)	≤ 0.15	≤ 0.50	≤ 0.60	≤ 0.025	≤ 0.015	4.00 ~ 6.00	0.45 ~ 0.65	≤ 0.50	≤ 0.20
管材	0.084	0.173	0.477	0.010	0.0036	4.51	0.53	0.054	0.065
1Cr5Mo (GB 9948—2013)	≤ 0.15	≤ 0.50	≤ 0.60	≤ 0.030	≤ 0.020	4.00 ~ 6.00	0.45 ~ 0.60	≤ 0.60	≤ 0.20

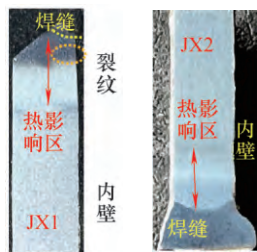
2.3 金相分析

分别从短管的两端焊接接头上截取2块金相分析试样,一块为短管一端裂纹尖端部位(编号为JX1),另一块为短管另一端无裂纹部位(编号为JX2),截取部位(轴向)及金相试样的宏观形貌如图4所示。JX1上裂纹位于焊缝热影响区上,热影响区宽约6mm,JX2上焊缝热影响区宽约5.5mm。

(1) 裂纹金相 裂纹微观形貌如图5所示。由图5可知,裂纹由内壁启裂向外壁扩展,深约2.69mm,位于焊缝热影响区粗晶区。裂纹以穿晶开裂为主,局部有沿晶特征,有分叉现象,同时还观察到相互平行的微裂纹。

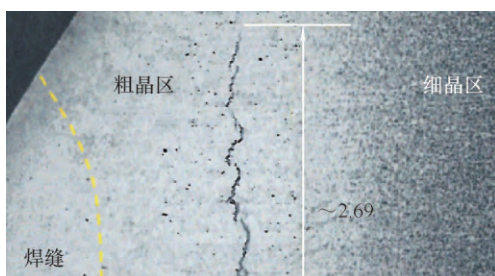


a) 截取部位



b) 宏观形貌

图4 金相试样截取部位及宏观形貌



a) 穿晶开裂



b) 平行微裂纹

c) 分叉现象

图5 裂纹微观形貌

(2) 金相组织 分别对JX1和 JX2焊接接头的金相组织进行观察(见图6、图7)。JX1焊缝金属为贝氏体,热影响区(粗晶区)为马氏体+贝氏体,母材为正常的铁素体+贝氏体;JX2焊缝金属和热影响区均为贝氏体,母材为正常的铁素体+贝氏体^[2]。

2.4 硬度检测

对金相试样进行硬度检测,硬度检测点位置及硬度值如图8所示,过渡区硬度值见表3。

硬度检测结果表明,JX1焊缝金属的平均硬度为275.6HV,热影响区平均硬度为371.8HV(粗晶区),母材平均硬度为129.1HV;JX2焊缝金属的平



a) 焊缝金属



b) 热影响区(粗晶区)



c) 母材

图6 JX1金相组织



a) 焊缝金属



b) 热影响区(粗晶区)



c) 母材

图7 JX2金相组织

均硬度为224.3HV,热影响区平均硬度为268.6HV(粗晶区),母材平均硬度为139HV。分析表明,发生泄漏焊缝的热影响区硬度较高^[3]。

2.5 断口分析

(1) 断口截取部位及宏观形貌 将裂纹打开,

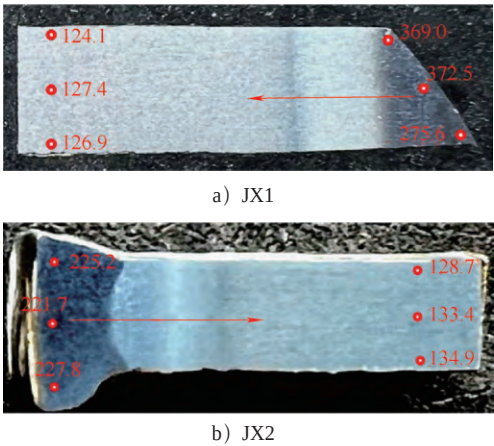


图8 硬度检测点位置及硬度值HV

表3 过渡区硬度值 (HV)

试样编号	焊缝/热影响区	焊缝 → 热影响区 → 母材 (沿箭头方向)	母材
JX1	275.6 (焊缝)	热影响区: 375.2、367.2、 378.1、368.5 母材: 134.9、132.0	124.1
	369.0 (热影响区)		127.4
	372.5 (热影响区)		126.9
JX2	225.2 (焊缝)	焊缝: 224.7、225.0、221.3 热影响区: 275.7、274.8、 266.1、257.6 母材: 168.9、135.0、133.8	128.7
	221.7 (焊缝)		133.4
	227.8 (焊缝)		134.9

其配对断口的宏观形貌如图9所示。由图9可知，断口较平，裂纹断裂面呈褐色和铁锈色，人为打开面呈白色。

(2) 断口微观形貌 首先将断口放入丙酮内进行超声波清洗，断口的内壁侧（启裂部位）和扩展区域的表面腐蚀产物较难去除，晶粒表面因腐蚀而变得较粗糙，而在靠近裂纹尖端部位的断口未见腐蚀产物覆盖，晶粒表面较光滑。对断口经过化学清洗后，可清晰观察到断口为穿晶和沿晶混合特征，并有二次裂纹存在，如图10所示。

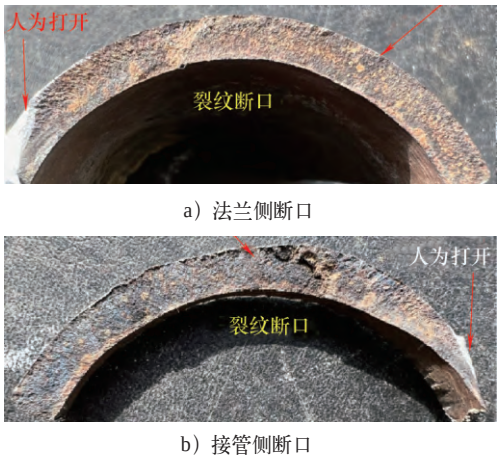


图9 配对断口宏观形貌

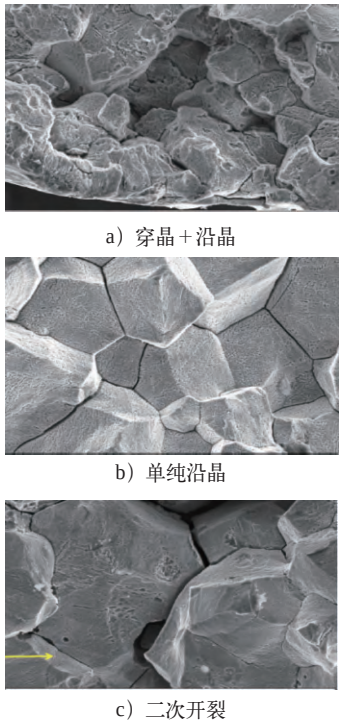


图10 断口微观形貌

2.6 X射线能谱分析

对裂纹缝隙进行能谱分析，结果表明，裂纹缝隙内主要腐蚀性元素为O和S，其中S含量（质量分数，下同）最高为18.83%。

对未清洗和清洗后的断口表面进行能谱分析。结果表明，无论断口是清洗还是未清洗，其表面均有较高的O、S元素，其中S含量最高为29.42%。

2.7 X射线衍射分析

从断管内刮取腐蚀产物进行X射线衍射分析，结果如图11所示。由图11可知，腐蚀产物主要由FeS、Fe₂O₃、Fe₃O₄等构成。

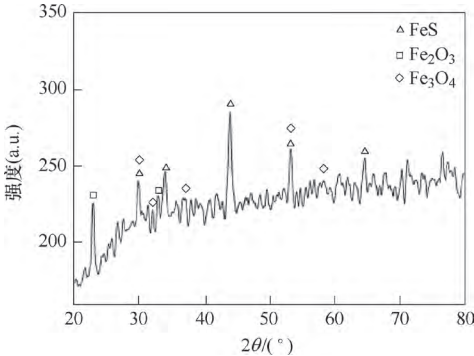


图11 X射线衍射分析结果

3 综合分析及结论

3.1 试验结果分析

试验结果表明，发生开裂的焊缝热影响区硬

度较高 (371.8HV)，金相组织中观察到淬硬马氏体，断裂处未见塑性变形（低应力脆断），裂纹有分叉，断口表面覆盖腐蚀产物；能谱分析断口表面及裂纹缝隙内均有较高的O、S元素，衍射分析腐蚀产物主要由 FeS、Fe₂O₃、Fe₃O₄等构成，上述分析结果与应力腐蚀开裂特征相符。

3.2 管道运行过程分析

正常生产期间，热低压分离器工作压力为2.4MPa，工作温度为250℃，介质为H₂、油气、H₂S。虽然介质中含有H₂S，但因温度较高，介质中没有液相水存在，所以不具备发生应力腐蚀的条件，但长期在250℃临氢环境下工作，存在氢原子进入钢中导致氢脆发生的可能性。

在停工检修期间，工艺要求用碱性水溶液对反应系统进行中和清洗。中和清洗在常温下进行，清洗后若局部存在碱液残留，则在装置重新开工后的升温过程中，随着温度的上升，水被蒸发，碱发生浓缩，从而给低合金钢带来碱应力腐蚀开裂 (ACSCC) 的风险。随着温度继续升高，碱浓缩部位残留液体被蒸发，处于干态后尚未穿透的应力腐蚀裂纹将会停止扩展。

在开工运行后，由于预硫化过程中硫化剂和催化剂在反应器中反应会产生H₂S和水，并随预硫化油从反应器底部流出后被带到回路中的相关设备和管道中，大多数硫化生成水从高分底部排出，但不排除其他部位，特别是温度较低的接管、管路上的阀门的低点处会有水残存，从而在局部形成湿H₂S腐蚀环境。

从上述分析可知，在装置经历的3种工况中，“正常生产工况”对1Cr5Mo钢在250℃下长期服役会造成氢脆损伤，“停工检修工况”的中和清洗对低合金钢带来碱应力腐蚀开裂的风险，“开工过程的硫化工况”则存在引发硫化物应力腐蚀开裂的问题。

对碳素钢和低合金钢而言，硬度越高对应力腐蚀开裂的敏感性越大，工程上要求硬度控制在241HV以下。从硬度检测结果来看，短管开裂端的焊缝热影响区硬度高达378.1HV，因而当出现应力腐蚀介质环境时，焊缝热影响区容易发生开裂^[2]。

从断口腐蚀程度来看，裂纹尖端断口腐蚀产物较易清洗去除，晶粒表面较光滑，而裂纹启裂和扩展区域断口处腐蚀相对较严重，断口表面腐蚀产物

较难去除，晶粒表面因腐蚀而变得较粗糙。由此推断，虽然开裂发生在最后一次催化剂预硫化处理过程中，但在此之前开裂部位已有裂纹存在。此外，因开裂部位长期在250℃临氢环境下运行，会有少量氢原子渗入钢中，导致材料韧性下降，对裂纹扩展可能有一定的促进作用^[4]。

3.3 结论

加氢处理装置热低压分离器液位计1Cr5Mo钢引出接管焊缝在催化剂预硫化和停工清洗过程中发生了应力腐蚀开裂。1Cr5Mo钢长期在250℃下服役可能出现氢脆损伤，安装质量导致焊缝热影响区硬度显著超标，提升了焊缝的应力腐蚀及氢脆的敏感性。接管焊缝处已存在的裂纹在本次催化剂预硫化过程中形成的湿H₂S环境下，发生扩展并穿透管壁导致泄漏，钢中的氢对裂纹扩展可能会有一定的促进作用^[4]。

4 改进措施

根据上述分析结论，结合安装和生产实际情况，进行以下改进措施，可避免开裂问题。

1) 加强该类管道焊缝的热处理质量控制，保证焊接接头硬度满足标准要求，硬度≤241HV。

2) 生产运行期间，控制运行介质中H的浓度，确保H含量不超过设计要求。

3) 在停工检修时，碱液清洗严格按照清洗方案控制碱液浓度和清洗时间，特别是做好碱液清洗后残液的清洁干燥。

4) 开工预硫化过程中，保证预硫化时间和湿H₂S浓度满足方案要求。

5) 在生产运行和停工检修期间，加强该类焊缝的无损检测，确认焊缝存在的缺陷状态。

参考文献：

- [1] 周振丰，张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京：机械工业出版社，1988.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册（第2卷）——材料的焊接[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2014.
- [3] 杨富，章应霖，任永宁. 新型耐热钢焊接[M]. 北京：中国电力出版社，2006.
- [4] 于战德，徐光明，周应谦. FF-14催化剂在蜡油加氢处理装置的工业应用[J]. 当代化工，2006（6）：439-444.

MW 20240102