

# 核级阀门堆焊密封面裂纹原因分析

孙奇<sup>1,2,3</sup>, 范清华<sup>1</sup>, 焦咏翔<sup>1</sup>, 赵祥路<sup>1</sup>, 李天澍<sup>1</sup>, 黄冶冶<sup>2</sup>, 邓德伟<sup>1,2,3</sup>

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司-沈鼓大工研究院, 辽宁 大连 116024; 3. 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**某核级阀门在核电站现场存放两年后,安装调试过程中发现阀门密封面泄漏的问题。采用液体渗透剂、荧光光谱仪、扫描电镜、EDS能谱仪、金相显微镜、显微硬度计、残余应力测试仪等设备和方法对失效的阀门进行测试。结果表明:阀体密封面堆焊的硬质合金存在孔洞;断面处发现大量韧窝,属于韧性断裂;硬质合金层的残余应力处于比较高的水平,阀门在核电站现场长期存放,残余应力逐渐在孔洞处形成应力集中萌生裂纹,裂纹沿着堆焊层内部的孔洞扩展,导致阀体密封面密封失效。

**关键词:**核级阀门;硬质合金;裂纹;堆焊;失效分析;气孔

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20202275

中图分类号: TG441.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)17-0157-06

## Cause Analysis of Cracks on Surfacing Sealing Surface of Nuclear Grade Valve

SUN Qi<sup>1,2,3</sup>, FAN Qinghua<sup>1</sup>, JIAO Yongxiang<sup>1</sup>, ZHAO Xianglu<sup>1</sup>, LI Tianshu<sup>1</sup>, HUANG Zhiye<sup>2</sup>, DENG Dewei<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. R&D Division of Shenyang Blower Works Group Corporation and Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), Dalian 116024, China)

**Abstract:** After two years of storage of a nuclear-grade valve at nuclear power plant site, the leakage problem of sealing surface was found during the installation and commissioning process. The failed valve was analyzed by using liquid penetration, fluorescence spectrometer, scanning electron microscope, EDS energy spectrometer, metallographic microscope, microhardness tester, residual stress tester and other equipment and methods. The results show that the hard alloy surfaced on the sealing surface of the valve body has holes, and a large number of dimples are found at the fracture. The residual stress on the sealing surface is relatively high. During a long time storage of the valve at nuclear power plant, residual stress gradually concentrates and crack initiates at the hole, and the crack propagates along the hole in the surfacing layer, resulting in the failure of the sealing surface of the valve body.

**Key words:** nuclear grade valve; hard alloy; crack; surfacing; failure analysis; bowhole

随着国家重大装备国产化的战略举措的实施,我国核级阀门国产化取得快速进步。我国有关阀门企业抓住机遇,走技术引进消化吸收、自主创新发展之路,充分发挥后发优势,依托核电项目建设,不断

提高核阀技术水平,推动我国核电建设标准化、系列化、规模化发展,为实现国家核电发展目标作出了贡献<sup>[1-3]</sup>。然而在核级阀门自主化进程中也出现过很多的问题:①国内核电阀门标准滞后,制造标准早已不能适应核电阀门建造和国产化的现实需要<sup>[4-8]</sup>;②受国内核级阀门实验测试技术以及技术、管理所限制,目前核级阀门及其执行机构产品的可靠性数据少,自动控制水平较低、产品的质量还不够稳定,导致核电站业主不愿或不轻易采用国内生产的核电站关键部件;③核级阀门前期样机研制投入大,制造成本高,一定程度上影响了企业的进一步发展<sup>[5-12]</sup>。

核级阀门在核电设备中起着保障系统安全平稳

收稿日期:2020-09-09

基金项目:辽宁重大装备制造协同创新中心基金项目(DUT2017031);  
高端控制阀产业技术协同创新中心基金项目  
(2018WZ003);国家 973 项目(2011CB013402);辽宁省自然  
科学基金项目(2014028002);辽宁省科技创新重大专项项  
目(201303002)

作者简介:孙奇(1988-),男,辽宁大连人,工程师,硕士,主要从事材料表面  
强化及再制造、设备零部件失效分析;电话:15998642705;

E-mail:626668148@qq.com

运行的重要作用,该设备运行环境恶劣,故障率高,及时有效地分析核级阀门的故障原因,对核电设备安全运行起到重要作用。核级阀门的常见故障有泄露、启动不灵活、振动、噪声和零部件磨损等<sup>[13-18]</sup>。

某核级阀门在核电站现场调试过程中发现泄漏的情况,经过初步检测是阀门密封面堆焊的硬质合金产生裂纹,导致阀门泄漏。为了查明硬质合金产生裂纹的原因,进行了一系列检测分析。阀门基体材质是 316 不锈钢,密封面堆焊的硬质合金牌号为 ERFerCr-A5,属于铁基硬质合金<sup>[19]</sup>。图 1 是核电站泄漏阀门的阀体和阀盖。



图 1 泄漏阀门的阀体和阀盖  
Fig.1 Valve body and bonnet of the leaked valve

## 1 检测结果分析

### 1.1 液体渗透检测

采用电火花线切割设备对阀体进行了切割,切割位置如图 2 所示。对阀体密封面和阀盖的堆焊面分别进行了液体渗透检测。

液体渗透检测 (penetration testing, PT) 依据 JB/T 4730.5-2005 《承压设备无损检测 第五部分渗透检测》,检测结果如图 3 所示。检测结果显示阀盖堆焊面没有裂纹显示,而阀体密封面有裂纹显示<sup>[4]</sup>。可以断定阀门泄漏是由于阀体密封面的裂纹导致的。而该阀门在出厂和核电站验收时进行的密封性能检测均合格,所以阀体密封面的裂纹是在核电站现场存

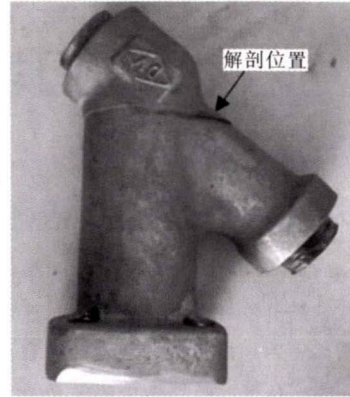


图 2 阀体解剖位置  
Fig.2 Anatomical position of the valve body

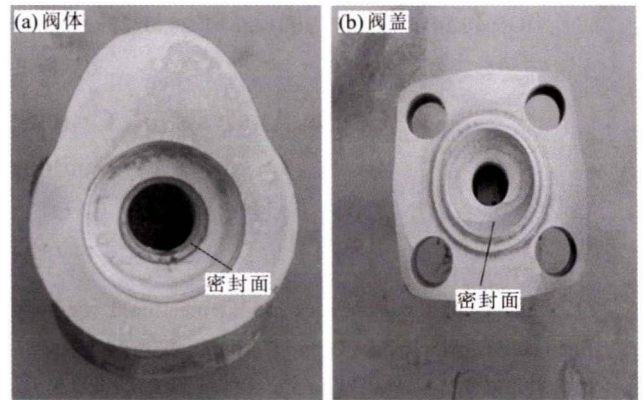


图 3 阀体和阀盖 PT 检测结果  
Fig.3 PT results of valve body and bonnet

放过程中形成的。

### 1.2 阀体化学成分检测

采用 XRF-1800 荧光光谱仪和 CS 分析仪对阀体基体材料 (316 不锈钢) 和堆焊层 (ERFeCr-A5) 进行化学成分检测,检测结果如表 1、2 所示,各元素含量均在要求值范围内,说明材质成分不存在问题。

### 1.3 阀体密封面金相检测

用线切割设备按照图 4 从阀体中切取试样,其中试样 1<sup>#</sup> 取自裂纹处,试样 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 取自非裂纹处。

表 1 阀体基体的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of the valve body (wt%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	Fe
标准值	≤0.08	≤1	≤2	≤0.045	≤0.03	2.0~3.0	10.0~14.0	16.0~18.0	余量
测试值	0.038	0.59	1.66	0.029	0.0047	2.27	10.31	16.54	67.8

表 2 堆焊层的化学成分(质量分数,%)

Tab.2 Chemical composition of the surfacing layer (wt%)

元素	C	Cr	Si	Ni	Mn	Mo	S	P	Co	Fe	其他
标准值	1.5~2.5	24~32	≤2	≤4	0.5~1.5	≤4	≤0.035	≤0.035	≤0.50	余量	< 0.50
测试值	1.82	27.46	1.35	3.22	0.66	0.54	0.022	0.02	-	66.73	< 0.50

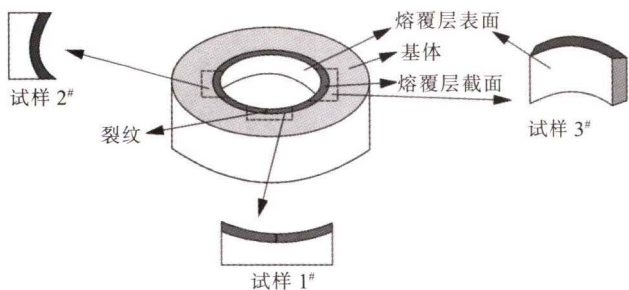


图4 阀体取样位置示意图  
Fig.4 Schematic diagram of sampling positions of the valve body

用环氧树脂分别将3个试样包埋镶嵌,其中试样1#和试样2#观察面是堆焊层的截面(从阀体密封面的上表面观看),试样3#观察面是堆焊层的表面(阀体的流道面),将试样打磨抛光并用王水腐蚀。

试样1#抛光后的显微照片如图5所示。堆焊层的组织比较均匀,从图中可以直接观察到裂纹,裂纹由熔覆层外表面贯穿整个熔覆层至熔覆层及基体界面处的黑色区域,裂纹在扩展中还有二次裂纹形成。还可以观察到基体材料也出现微小裂纹。而且在堆

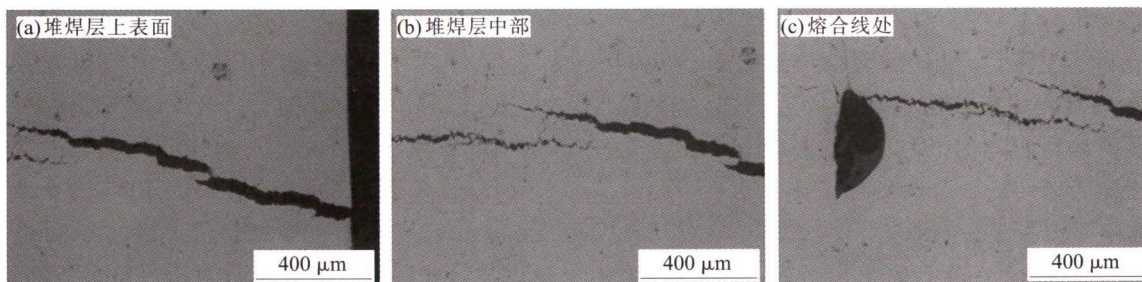


图5 试样1#抛光后照片  
Fig.5 Photos of sample 1# after polishing

焊层和基体熔合线处有一个半圆形黑色区域,后面的分析表明黑色区域为孔洞。

试样1#腐蚀后的金相照片如图6所示,堆焊层上部和中部主要是白色的等轴晶和灰色的晶间组织,靠近熔合线在孔洞的右方主要是胞状晶和树枝晶,属于正常的铁基硬质合金堆焊层组织。裂纹连接的孔洞为高度142.53 μm,直径为372.39 μm的半圆形,半圆形底部与基体连接,可推断该孔洞是在堆焊过程初始阶段形成的。

试样2#腐蚀后的金相照片如图7所示。堆焊层的组织比较均匀,是正常的树枝晶、等轴晶及枝晶间

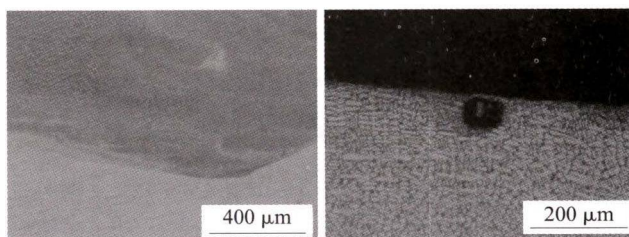


图7 试样2#腐蚀后金相照片  
Fig.7 Metallographic pictures of sample 2# after corrosion

组织,但从照片中可以观察到堆焊层中依然存在黑色的孔洞。

试样3#腐蚀后的金相照片如图8所示。堆焊层的组织比较均匀,但从照片中可以观察到堆焊层中依然存在黑色的圆形孔洞。

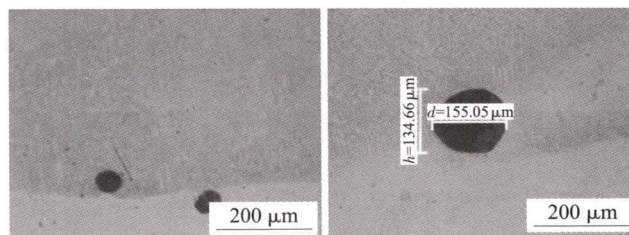


图8 试样3#腐蚀后金相照片  
Fig.8 Metallographic pictures of sample 3# after corrosion

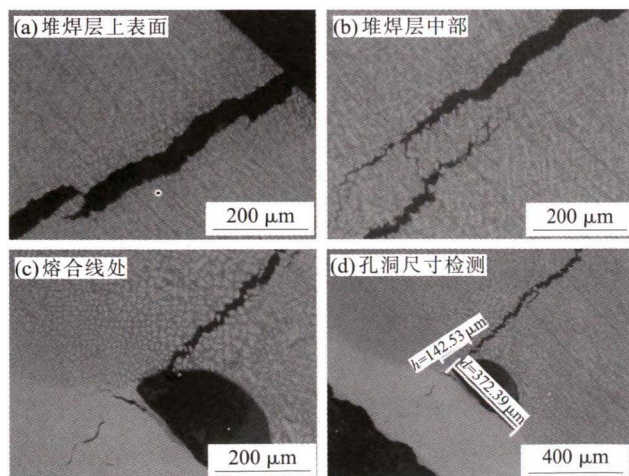


图6 试样1#腐蚀后金相照片  
Fig.6 Metallographic pictures of sample 1# after corrosion

#### 1.4 硬度检测

沿着试样1#的位置A(远离裂纹)和位置B(近裂纹),利用MVC-1000B维氏硬度计进行硬度检测,步长为0.4 mm,检测结果如图9所示。

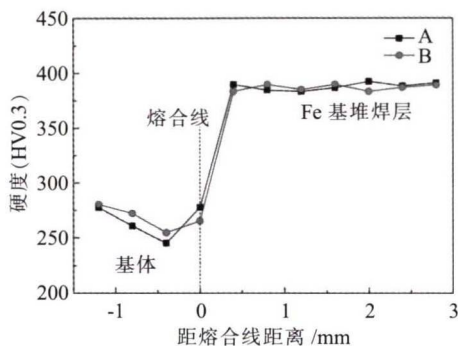


图9 试样1#硬度曲线  
Fig.9 Hardness curves of sample 1#

从检测结果可以看出,近裂纹位置 B 和远离裂纹位置 A 的堆焊层的硬度值比较接近,并且这两位置的硬度值都比较均匀,硬度值为 380~400 HV,堆焊层的硬度值在硬质合金的硬度范围内。

### 1.5 扫描电镜分析

将试样从环氧树脂中取出后进行 SEM 分析。其中试样 1# 从环氧树脂中取出时,有稍许振动,试样 1# 沿着裂纹自动分离成两部分,如图 10 所示,说

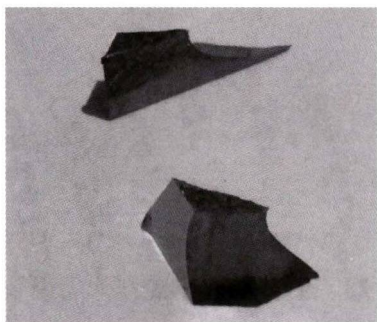


图 10 试样 1# 沿裂纹处分离的形貌  
Fig.10 Morphology of sample 1# separated along the crack

明裂纹沿横向和纵向两个方向贯穿整个堆焊层。

试样 1# 断口的扫描电镜图片如图 11 所示。可以看出,断口极不平整,同时断口含有大量的韧窝,可以断定密封面属于韧性开裂,同时断口含有大量

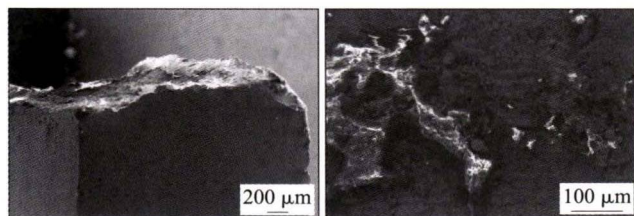


图 11 试样 1# 断口的扫描电镜照片  
Fig.11 Scanning electron micrograph of fracture of sample 1#  
的白色不规则组织。

试样 3# 扫描电镜图片如图 12 所示。可以观察

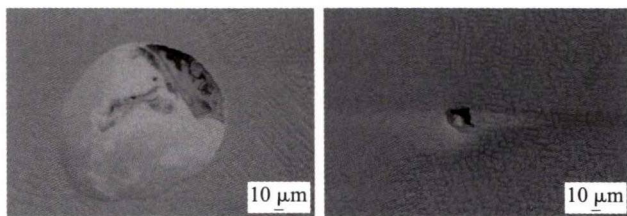


图 12 试样 3# 的扫描电镜照片  
Fig.12 Scanning electron micrograph of sample 3#

到金相照片中的黑色孔洞,因为扫描电镜的衬度有别于金相显微镜,孔洞在扫描电镜中主要以白亮色呈现。

试样 3# 孔洞位置的 EDS 能谱分析如图 13 所示。可以看出孔洞位置除了 Fe、Cr、Ni,检测到大量的 C 和 O 元素。

试样 1# 断口的白亮组织的 EDS 分析如图 14 所示,白亮组织中也检测到了大量的 C 和 O 元素。与试样 3# 孔洞位置成分进行对比,可以推断试样 1# 白亮组织也是孔洞,可见堆焊层开裂贯穿多个孔洞。

### 1.6 残余应力检测

用型号为 Stresstech 的便携式应力测试仪,对阀体密封面区域进行应力测试。由于现有技术手段无法对堆焊层的应力进行快速、有效的检测,因此检测靠近堆焊层的基体位置,测试位置示意图如图 15 所示。测试结果如表 3 所示,检测位置整体的应力处于比较高的水平,最高处的残余应力值达到 328.8 MPa,由此可以推断堆焊层区域的应力值比较大。

## 2 结果讨论及分析

通过宏观 PT 检验和微观照片检验表明,基体未有损伤迹象,阀体堆焊层裂纹贯穿整个堆焊层,裂纹存在多处二次裂纹,裂纹导致阀门泄漏。

通过金相和扫描电镜分析表明,在阀体裂纹处和其他位置观察到一定数量的孔洞,通常孔洞是由于溶入焊接熔池中的气体,在金属凝固之前未来得及逸出而在焊缝金属表面或者内部形成的。冶金型气孔尺寸达到一定程度,会破坏金属内部组织的连续性,引起应力集中,成为零件失效的裂纹源,会诱导裂纹萌生<sup>[20-25]</sup>。本次检测的断面处孔洞最大直径约 300 μm,数量和尺寸远超过正常堆焊组织。通常导致气孔的尺寸和数量异常的原因有很多,焊材烘干不足,焊丝中存在气孔,基材表面有锈迹、油污,焊接工艺不稳定(电压偏高、焊速太大、电流太小),堆焊区域保护不良都可能导致气孔的形成。

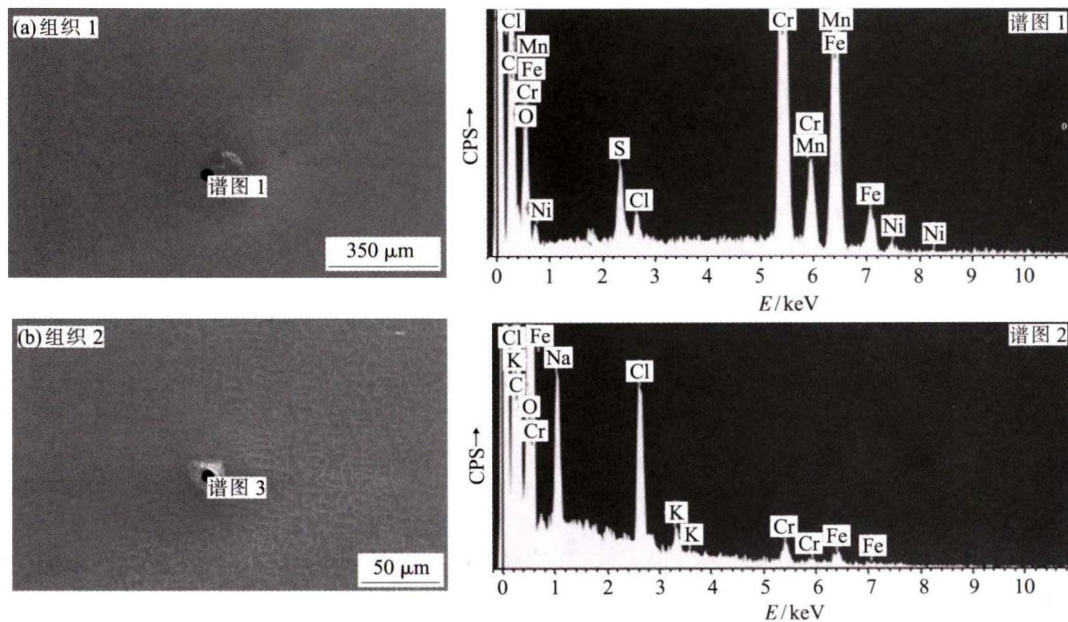


图 13 试样 3# 的 EDS 能谱分析  
Fig.13 EDS spectral analysis of sample 3#

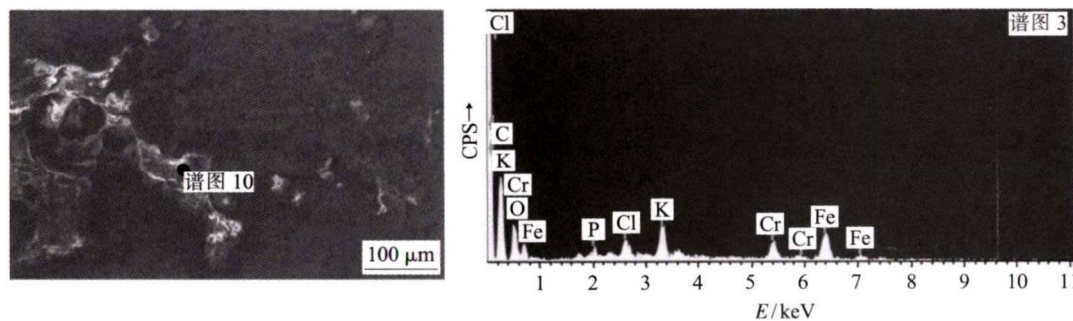


图 14 试样 1# 断口的 EDS 能谱分析  
Fig.14 EDS spectrum analysis of sample 1# fracture

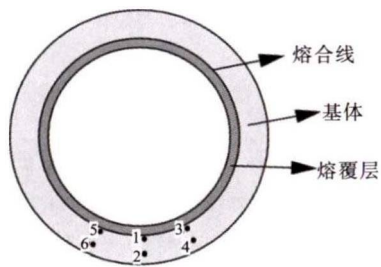


图 15 应力测试位置示意图  
Fig.15 Schematic diagram of stress test location

表 3 各测试位置应力值  
Tab.3 Stress values of each test location

位置点	1	2	3	4	5	6
应力 /MPa	328.8	202	101.6	121.7	276.5	230.1

通过对断口的扫描电镜分析表明,断口形貌有大量韧窝,为韧性断裂。断口位置的 EDS 分析和扫描电镜形貌表明,裂纹及断口纵面上也存在尺寸比

较大的孔洞,裂纹贯穿多个孔洞,且 EDS 能谱显示孔洞周围的含氧量较高,造成孔洞周围堆焊层组织氧化,形成力学性能较差的氧化物。孔洞与氧化物两种缺陷易导致堆焊过程的应力集中,为裂纹的萌生埋下隐患。按照技术要求该阀门采用高纯氩气做保护气堆焊硬质合金,理论上组织内部不应该形成氧化物,经焊接车间现场考察交流,可能是该批次高纯氩气纯度有问题。

残余应力结果表明,堆焊层的残余应力处于一个不均匀且较高的水平,说明堆焊硬质合金后没有进行消应力处理或者应力消除不充分。阀门在核电站现场存放时,随着应力的重新分布,在孔洞及氧化物周围出现应力集中,进而在现场调试过程中,堆焊层受力促使孔洞及氧化物处萌生裂纹,并逐渐扩展,最后形成宏观裂纹。

### 3 结论与建议

阀体密封面堆焊的硬质合金存在大量的孔洞,并且硬质合金层的残余应力处于比较高的水平。阀门在核电站现场长期存放时,残余应力逐渐在孔洞处形成应力集中萌生裂纹,裂纹沿着堆焊层内部的孔洞扩展,导致阀体密封面密封失效。

建议优化堆焊工艺、加强过程控制,一方面避免堆焊层中孔洞的形成,另一方面降低堆焊过程中引入的残余应力。具体可以从以下几个方面进行优化:

(1) 增加焊前预热,降低焊接过程中熔池凝固的速度,保证熔池中的气体充分逸出。


(2) 对焊丝进行复验,确保焊丝中不存在气孔,避免焊丝中气体导致堆焊层形成气孔。

(3) 严格按照堆焊工艺参数进行堆焊;增加焊后缓冷,增加缓冷时间使堆焊层的残余应力尽可能得到释放,大尺寸零部件需要进行焊后消除应力热处理。

(4) 确保待堆焊表面不能有孔洞、油渍及其他异物;对长时间未使用的焊材需要进行焊前烘干保温;确保保护气体的纯度以及保护气可以充分保护堆焊熔池。

#### 参考文献:

- [1] 孙奇,肖箭,邓德伟. 液化天然气用超低温阀门的设计与研究[J]. 阀门,2013(1):6-11.
- [2] 盛根林. 我国阀门国产化取得可喜进步[J]. 通用机械,2009(11):24-28.
- [3] 邓德伟,陈蕊,张洪潮. 等离子堆焊技术的现状及发展趋势[J]. 机械工程学报,2013,49(7):106-112.
- [4] 丁洪峰. 核电站焊缝渗透检测验收标准差异[J]. 无损检测,2015,37(9):23-25.
- [5] 聂丽萍,王大勇,巩秀芳,等. 汽轮机阀座堆焊司太立开裂原因分析[J]. 东方汽轮机,2019(4):56-59.
- [6] 时运,杜晓东,庄鹏程,等. 等离子熔覆技术的研究现状及展

- 望[J]. 表面技术,2019,48(12):23-33.
- [7] 朱奇敏,高廷斌,朱慧秦. 核岛阀门阀瓣堆焊裂纹失效原因分析及改进[J]. 焊接技术,2019,48(11):81-85.
- [8] 崔卫东,王焱,刘浩然,等. 阀门密封面堆焊性能检验方法的研究[J]. 焊接技术,2019,48(9):132-135.
- [9] 赵玉栓. 堆焊熔敷修复技术在检修中的应用[J]. 中国金属通报,2019(7):197-199.
- [10] 宁亮亮. 电站锅炉阀门密封面耐磨堆焊层性能分析[J]. 国网技术学院学报,2019,22(3):54-57.
- [11] 孟凡明. 阀门焊接工艺评定相关标准规定的对比与分析[J]. 阀门,2019(3):32-34.
- [12] 崔卫东,王焱,刘浩然,等. 浅析阀门密封面堆焊质量控制的常见问题[J]. 焊接技术,2019,48(4):92-94.
- [13] 沈根平. 阀门密封面堆焊工艺分析[J]. 焊接技术,2019,48(3):96-99.
- [14] 孟凡飞. 堆焊试验机工作台受热变形研究与结构改进[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [15] 刘世辉,吴广坤,郭鹏,等. 核级阀门密封面铁基合金堆焊工艺[J]. 阀门,2019(1):19-21.
- [16] 张佳,高杨,何睿. 安全阀密封面等离子堆焊工艺研究[J]. 阀门,2018(6):15-16.
- [17] 李延葆. 压水堆堆内构件钴基合金堆焊工艺研究[D]. 上海:上海交通大学,2018.
- [18] 何胜昌,纪兴国,马焕楠,等. 阀门密封面钴基合金深孔堆焊工艺[J]. 阀门,2018(3):21-22.
- [19] 赵斌,张亮,姜子龙. 不锈钢热丝 TIG 堆焊缓冷工艺研究[J]. 科技风,2018(11):124.
- [20] 连鹏宇. 我国核电发展的现状及前景[J]. 民营科技,2018(3):31.
- [21] 谭勇,薛敬凯,何子昂,等. 基于自动脉冲 TIG 焊的核级阀门管道焊接工艺[J]. 电焊机,2017,47(8):109-113.
- [22] 陈庆文. 核级阀门密封面材料与焊接技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [23] 苏志东. 核级阀门密封面堆焊[J]. 中国核电,2010,3(1):39-49.
- [24] 邓德伟,刘海英,张林,等. 电流对等离子堆焊 Fe90 组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报,2017,38(7):138-144.
- [25] 王世安,苏志东. 核级阀门焊接质量控制[J]. 阀门,2001(1):37-39. 

欢迎点击本刊网页  
<http://www.rjggy.com>  
<http://www.rjggy.net>