

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.09

核电机组主蒸汽安全阀阀瓣密封面堆焊层开裂 原因分析及预防措施

汤 恒, 银帮耀, 王 琪, 邓江勇

广西防城港核电有限公司, 广西 防城港 538001

摘要: 某核电厂大修期间对VVP116VV安全阀进行解体检查,发现阀瓣密封表面堆焊层存在20多条裂纹缺陷。通过宏观检查、化学成分分析、金相检验、硬度测试、残余应力分析、扫描电镜断口分析及能谱分析等方法分析阀瓣密封面堆焊层开裂的原因。结果表明:阀瓣密封面堆焊层的Fe含量明显偏高,表明稀释率过大,这与堆焊工艺控制不当(焊接热输入过大、热处理控制不当)有关。焊接热输入过大引起堆焊层残余应力偏高是开裂的主要原因;层间温度控制不当及焊后热处理不充分可能是促成堆焊层开裂的因素。并根据开裂的原因分析结果给出了处理建议,可以为其他机组的同类问题提供参考。

关键词: 核电机组; 主蒸汽安全阀; 密封面; 钴基堆焊; Stellite21合金; 开裂

中图分类号: TG441.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2024)04-0063-08

Cause and prevention measures for Cracking of Surfacing Layer on Sealing Surface of Main Steam Safety Valve Disc in Nuclear Power Units

TANG Heng, YIN Bangyao, WANG Qi, DENG Jiangyong

Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538001, China

Abstract: During the overhaul of a certain nuclear power plant, the VVP116VV safety valve was disassembled and inspected, and it was found that there were more than 20 crack defects in the welding layer on the sealing surface of the valve disc. Analyze the reasons for the cracking of the valve disc sealing surface surfacing layer through methods such as macroscopic examination, chemical composition analysis, metallographic examination, hardness testing, residual stress analysis, scanning electron microscopy fracture analysis, and energy spectrum analysis. The results indicate that there is a problem of high dilution rate in the surfacing layer of the valve disc sealing surface. Analysis suggests that it is related to improper control of the surfacing process (excessive welding heat input, improper heat treatment control). The main reason for the cracking of the surfacing layer is the high residual stress in the surfacing layer caused by excessive welding heat input. Improper control of interlayer temperature during the welding process and insufficient post weld heat treatment may be contributing factors to the cracking of the surfacing layer. According to the result of cause analysis, the disposal suggestions are given to provide reference for similar problems of other units.

Keywords: nuclear power units; main steam safety valve; sealing surface; cobalt based surfacing; stellite21 alloy; cracking

引用格式: 汤恒, 银帮耀, 王琪, 等. 核电机组主蒸汽安全阀阀瓣密封面堆焊层开裂原因分析及预防措施[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 63-70.

Citation: TANG Heng, YIN Bangyao, WANG Qi, et al. Cause and prevention measures for Cracking of Surfacing Layer on Sealing Surface of Main Steam Safety Valve Disc in Nuclear Power Units[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 63-70.

收稿日期: 2023-07-25 修回日期: 2023-10-16

作者简介: 汤 恒(1989—),男,硕士,高级工程师,主要从事核电厂关键金属部件失效分析及寿命评估。E-mail:875850536@qq.com。

0 引言

核电厂主蒸汽系统(VVP)安全阀是压水堆核电站核岛内主蒸汽系统的超压保护装置,其作用一是通过排出反应堆冷却系统产生的能量来防止一回路侧超压和过热,二是通过限制蒸汽向大气的释放量来防止反应堆堆芯冷却。

某核电厂对 VVP 116VV 阀门进行在线整定试验后发现阀门出现泄漏,未恢复密封,随后巡视发现泄漏进一步扩大。大修期间解体 VVP116VV 安全阀进行液体渗透检查(PT 检查),发现 VVP116VV 阀瓣密封面有 20 多条线性显示缺陷(裂纹),同时发现密封面上显示有多条冲蚀缺陷。VVP 安全阀密封面的裂纹会使阀门内漏,在高温高压蒸汽的冲蚀作用下,介质泄漏量会越来越大,严重时将造成反应堆堆芯过度冷却,影响堆芯的反应性控制;对阀门进行隔离检修,机组需后撤至正常停堆预热排出模式(NS/RRA),严重影响机组的安全性和经济性。

VVP116VV 为德国 Bopp&Reuther 生产的机械式安全阀,型号为 Si 9507H,阀门口径为 DN250($\varnothing$ 250 mm),系统正常运行最高工作压力 75 bar,最高工作温度 316 $^{\circ}\text{C}$ 。阀瓣材料为碳钢锻件,牌号为 RCC-M 1122 A48AP。该阀门自投入运行至第一次换料大修,期间无维修记录,服役时间为 1 年。密封面堆焊采用 Stellite 21(司太立 21)粉末^[1-2],等离子弧焊法进行堆焊,堆焊层厚度约为 4.5 mm,标准依据为 RCC-M S8000,材料焊接前后需要预热和焊后热处理。

为了找到 VVP116VV 阀瓣密封面堆焊层开裂的原因,防止机组安全阀泄漏的再次出现,本文针对该开裂阀瓣密封面进行了组织与性能分析,通过找出失效原因并采取措施,保障机组后续的安全稳定运行。

1 理化检验及结果

1.1 宏观形貌

宏观上未见阀瓣和阀座等零件内部产生磨痕、深沟及凹坑等明显外在缺陷。开裂的 VVP116VV 阀瓣密封面的宏观形貌及裂纹分布情况如图 1 所

示,密封面堆焊层径向宽度约 4.1 mm。裂纹的分布及形貌如图 2 所示,密封面上约有 20 多条长短不一的裂纹,长约 1.5~2.1 mm,开口较小,沿周向相对均匀地分布,裂纹位于堆焊层中线至外沿位置,开口较小,部分裂纹贯穿外沿,裂纹形貌如图 2 所示。

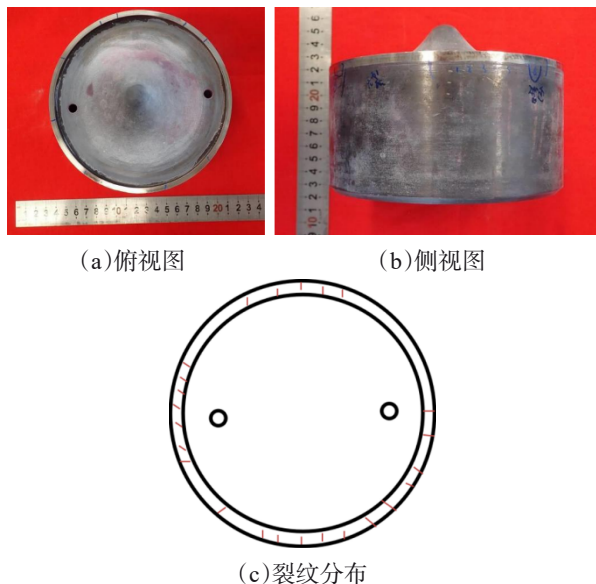


图 1 VP116VV 阀瓣的宏观形貌及裂纹分布示意

Fig. 1 Macro morphology and crack distribution diagram of VP116VV valve clack

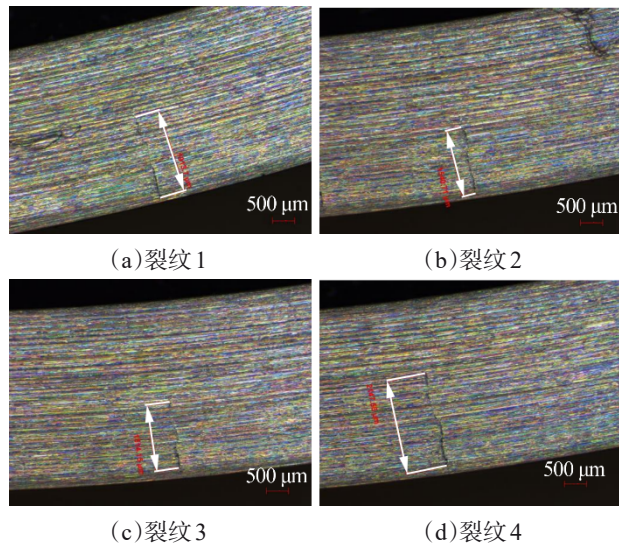


图 2 VP116VV 阀瓣密封面部分裂纹的宏观形貌

Fig. 2 Partial crack morphology of VP116VV valve clack sealing surface

根据分析需要,在密封面上选取裂纹集中区域和无裂纹区域截取径向截面试样和横向截面试样进行化学成分分析、金相检验、力学性能测试、断口微观分析、能谱分析等试验。取样如图 3 所示。

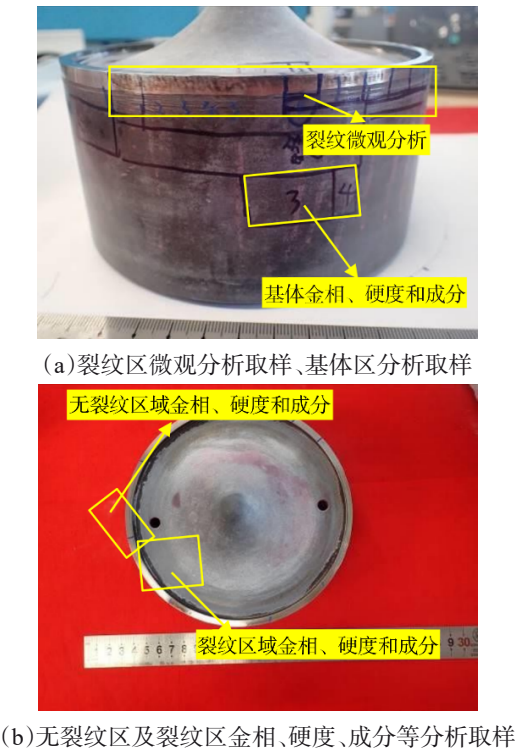


图3 阀门取样示意

Fig. 3 Schematic diagram of valve sampling

人为打开裂纹3、裂纹4,断口宏观形貌如图4所示,上部深色区为原始断面,下部浅色区(靠近基

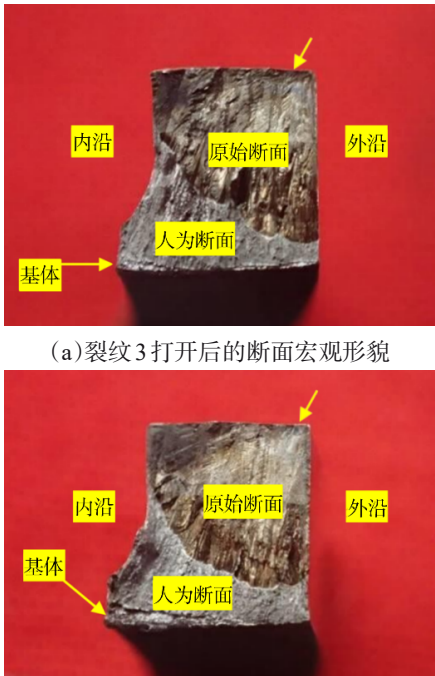


图4 打开裂纹后的断面宏观形貌

Fig. 4 Macro morphology of the cross-section after crack opening

体部分)为人为断面;裂纹3、4均已贯通内外沿但未扩展至基体部分,靠近堆焊层内沿面的断口颜色更深,为VVP蒸汽高温腐蚀所致;通过断口的纹理走向,判断启裂区均为密封面中线至外沿之间区域,如图4箭头所示。

1.2 化学成分

采用火花放电原子发射光谱法方法,用PMI-MASTER Smart火花直读光谱仪对阀瓣堆焊层表层的化学成分进行分析,结果如表1所示,可见裂纹集中区域和无裂纹区域的化学成分并无明显差别,其Cr含量略低于RCC-M8000及其引用标准NF M 64-100对21级钴基堆焊材料的要求,Fe元素含量远超标准成分范围上限。

表1 堆焊层表层化学成分分析结果(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of surfacing layer (wt. %)

取样位置	C	Cr	Ni	Mn
堆焊层裂纹区域	0.29	23.97	2.47	0.361
堆焊层无裂纹区域	0.28	24.42	2.26	0.387
RCC-M8000(21级钴基堆焊材料)	0.18~0.32	25.0~29.0	1.75~3.75	≤1.0

取样位置	Mo	W	Si	Fe
堆焊层裂纹区域	4.89	0.099	0.60	12.22
堆焊层无裂纹区域	4.86	0.102	0.76	10.89
RCC-M8000(21级钴基堆焊材料)	4.8~6.1	≤0.5	≤2.0	≤3.0

阀瓣基体材料的化学成分分析结果如表2所示,各元素均满足RCC-M 1122对母材A48AP的成分要求。

表2 阀瓣化学成分分析结果(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of valve disc (wt. %)

试样	C	Cr	Ni	Mn	Mo
阀瓣	0.175	0.189	0.148	0.909	0.045 9
RCC-M 1122(A48AP)	≤0.22	≤0.25	≤0.30	0.8~1.5	≤0.10

试样	Cu	Si	P	S
阀瓣	0.136	0.241	0.011	0.003 2
RCC-M 1122(A48AP)	≤0.30	≤0.35	≤0.04	≤0.035

1.3 硬度

使用SHBRV-187.5布洛维多用硬度计对堆焊层表面进行硬度测试,由表3可见,堆焊层表面硬度值在RCC-M8000及其引用标准NF M 64-100对21级钴基合金堆焊层表面硬度要求范围下限附近,裂纹集中区域和无裂纹区域的硬度值无明显差别。

堆焊层纵截面的硬度值如表4所示,堆焊层表层的硬度要高于第一层,由表层到基体附近区域硬度呈下降趋势。

表3 堆焊层表面硬度测试结果

Table 3 Hardness test results of surfacing layer surface	
位置	测试值/HRC
无裂纹区域	30.2,29.8,30.0
裂纹集中区域	29.1,29.6,30.5
RCC-M8000(21级钴基堆焊材料)	28~35

表4 堆焊层表面到基体截面硬度测试值

Table 4 Hardness test value from surfacing layer surface to substrate section			
位置	表层(HV1)	第一层(HV1)	基体(HV1)
裂纹试样	331,321,297	252,298,315,304	182,177,179
无裂纹试样	326,330,318	285,263,268,257	188,176,183

1.4 微观形貌

在金相显微镜下观察阀瓣密封面堆焊层纵向截面金相组织形貌。由图5可知,堆焊层总厚度约4.5 mm,第一层厚度约为2.2~2.6 mm,表层厚度约1.4~1.9 mm。两层堆焊层组织均为Co基固溶体+碳化物析出相;晶粒呈长条状,晶界明显,部分晶界跨越层间熔合线;基体热影响区粗晶区不明显,而细晶区宽度较大,细晶区组织为铁素体+珠光体,晶粒度等级约为10级;阀瓣的基体组织为铁素体+贝氏体,与细晶区组织差异明显。裂纹集中区域和无裂纹区域无明显的组织差别,在堆焊层内未发现未熔合、未焊透、微裂纹、夹渣、气孔等焊接缺陷。

由图6可见,堆焊层纵向截面裂纹较平直,其扩展路径和晶界没有明显相关性,为穿晶裂纹,裂纹仅在表层扩展,没有到达第一层。堆焊层横向截面(密封面)裂纹较为平直,可以看出,裂纹类型同样为穿晶裂纹,其扩展路径和晶界没有明显相关性。

1.5 断口SEM形貌

图7的1区域为裂纹启裂区,位于密封面靠近外沿区域,未发现异常缺陷;2和3区域为扩展区,分别位于表层和第一层,均为解理形貌特征;4区域为裂纹面和人为断面之间的过渡区域,人为断面呈韧窝形貌特征;5区域为第一层和基体的熔合线处,局部呈现准解理和韧窝形貌特征。微观上未见凹坑状形貌及塑性变形特征。

图8中1区域为裂纹启裂区,位于密封面靠近

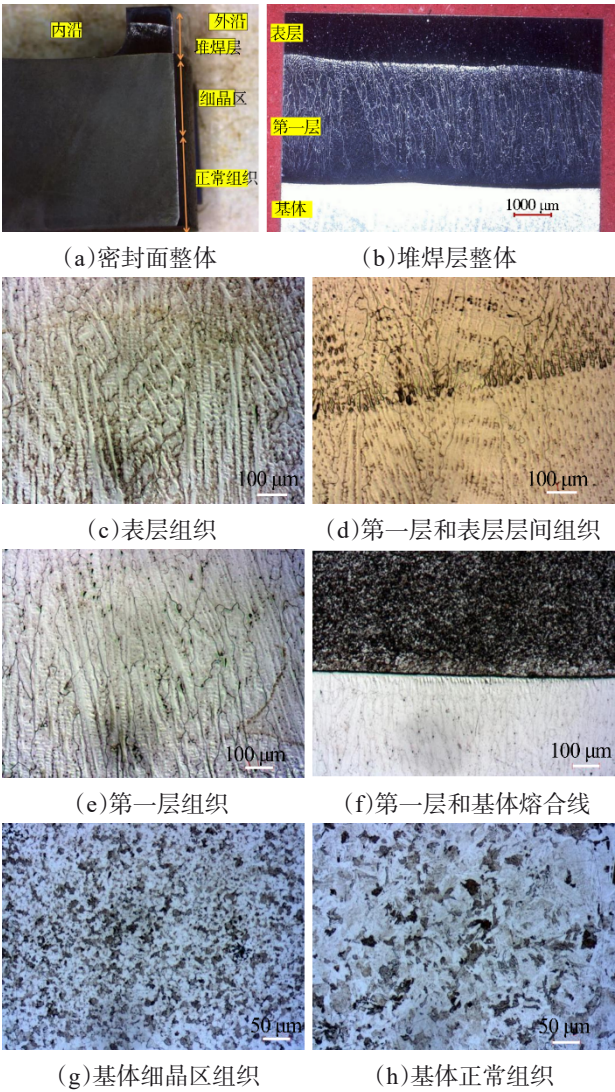


图5 密封面纵截面不同区域的显微组织

Fig. 5 Metallographic microstructure of different areas in the longitudinal section of valve sealing surface

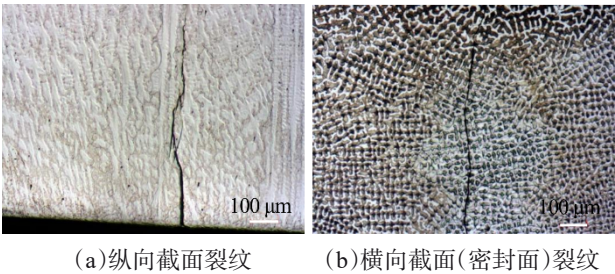


图6 密封面横纵截面的组织与裂纹微观形貌

Fig. 6 Microstructure and Micromorphology of Cracks in the Cross and Longitudinal Sections of Valve Sealing Surface

外沿区域,未发现异常缺陷;2、3区域为扩展区,分别位于表层和第一层,为解理形貌特征;4区域为裂纹面和人为断面之间的过渡区域,人为断面呈韧窝

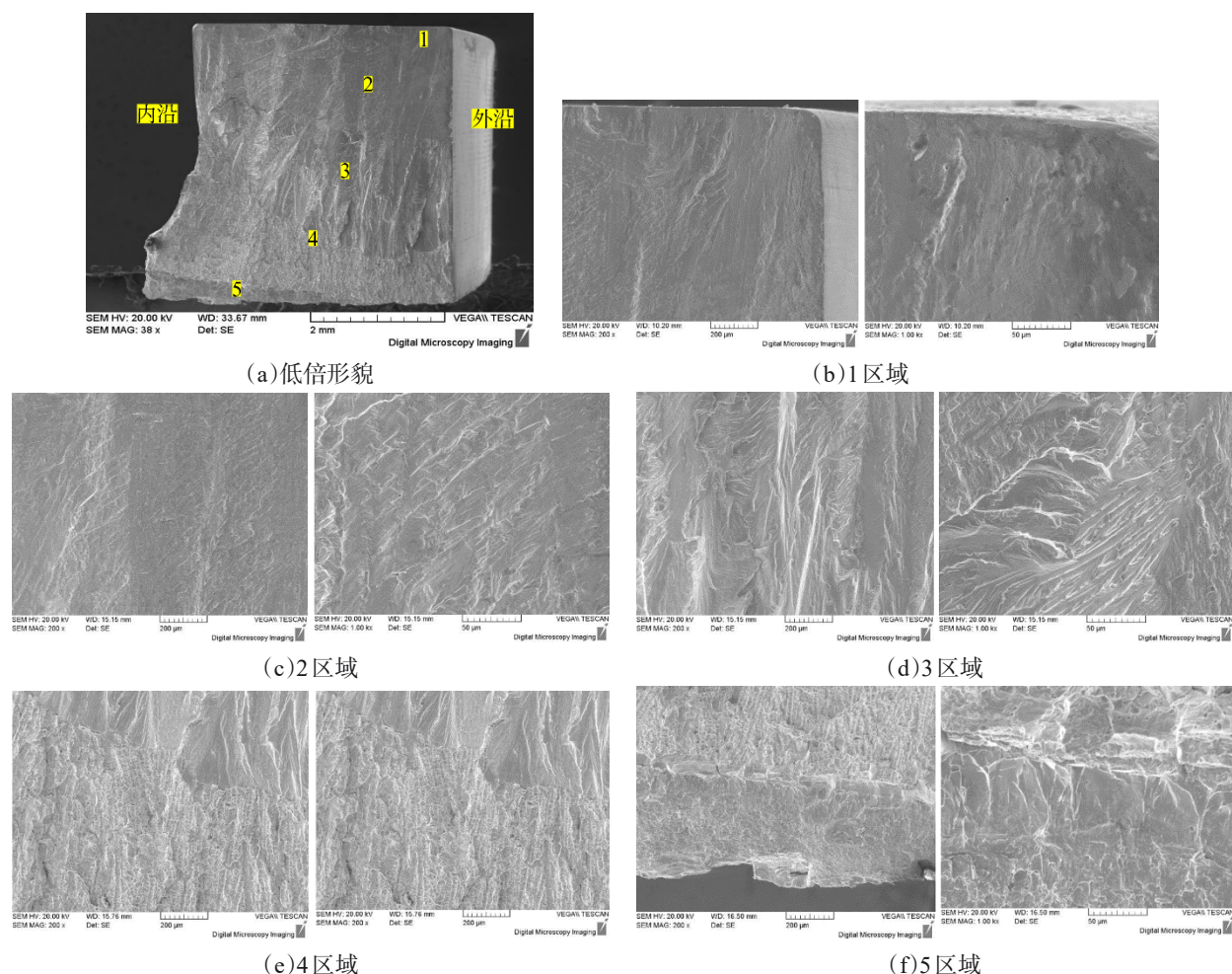


图7 裂纹4人为打开后的断口SEM形貌

Fig. 7 SEM morphology of artificially opened fracture surface of crack 4

形貌特征。微观未见凹坑状形貌及塑性变形特征。

1.6 能谱分析

对纵向金相样品进行扫描电镜能谱线扫描,图9黄色线为线扫描路线,线扫描路径为:堆焊表层→堆焊第一层→阀瓣基体,红色为Cr元素,黄色为Fe元素,绿色为Co元素,青色为Mo元素,蓝色为Ni元素,如图9所示,从线扫描结果可知:扫面至层间时,Fe元素含量跳跃式增长,形成一个台阶。扫描线上堆焊层第一层能谱和基体能谱测点交界处,Cr和Mo元素含量陡降,原因是堆焊层成分与母材成分不同导致。如图10~图12所示,堆焊层表层的Fe含量为10.97%,而第一层Fe含量为24.83%。

1.7 残余应力测试

使用JG-81型便携式X射线残余应力测试仪,按照GB/T 7704—2017《无损检测 X射线应力测定

方法》对阀瓣密封面堆焊层表面残余应力进行分析,在裂纹区和无裂纹区沿切向(上表面)和径向(侧表面)各测试3处位置,如图13所示。

2VVP116VV 阀瓣堆焊层表面残余应力分析结果如表5所示,应力值为正时表示拉应力,为负时表示压应力。残余应力测试结果表明堆焊层的残余应力分布,切向以拉应力为主,径向以压应力为主;开裂和研磨等过程已部分释放残余应力的情况下,堆焊层的残余应力仍处于较高的水平。

2 开裂原因分析

理化检验结果显示,VVP116VV安全阀阀瓣密封面堆焊层的开裂性质是穿晶裂纹,启裂位置为密封面表面上中线至外沿之间区域。在堆焊层内没

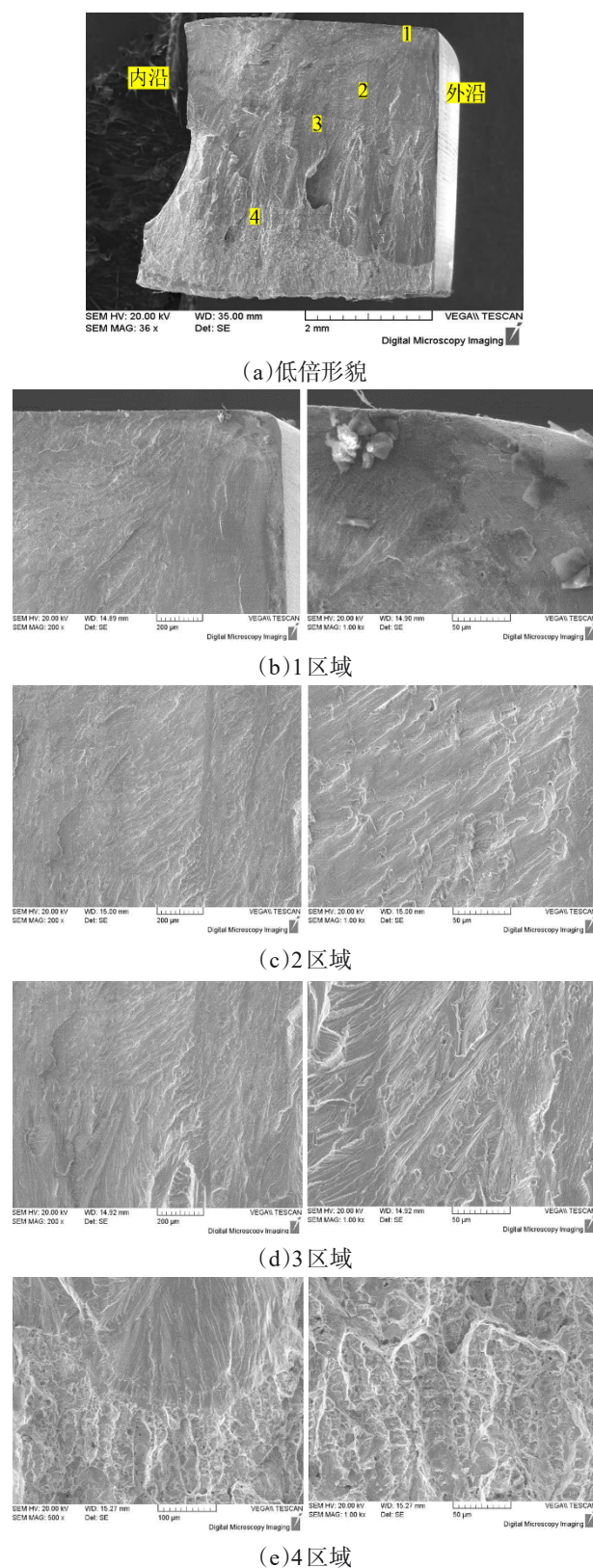


图 8 裂纹 4 人为打开后的断口 SEM 形貌

Fig. 8 SEM morphology of artificially opened fracture surface of crack 4

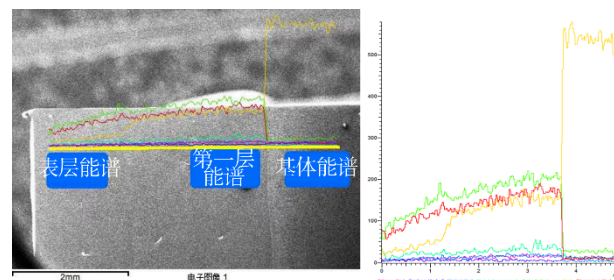


图 9 能谱线扫描路径及测点

Fig. 9 Energy spectrum scanning analysis results

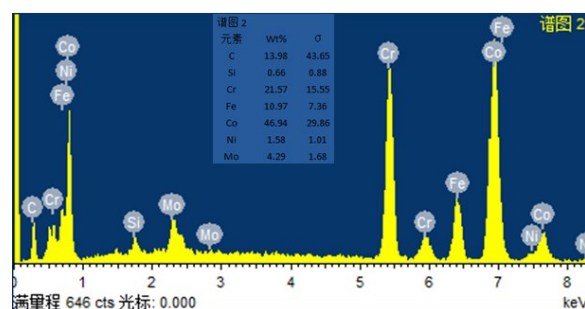


图 10 堆焊层表层能谱分析结果

Fig. 10 Energy spectrum analysis results of the second layer of surfacing layer

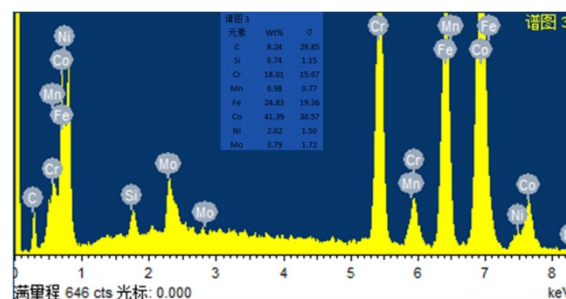


图 11 堆焊层第一层能谱分析结果

Fig. 11 Energy spectrum analysis results of the first layer of surfacing layer

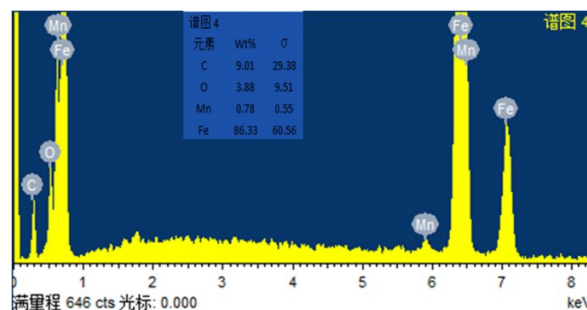


图 12 阀瓣基体能谱分析结果

Fig. 12 Energy spectrum analysis results of valve disc matrix

有发现未熔合、未焊透、微裂纹、夹渣、气孔等焊接缺陷,判断堆焊层开裂与焊接缺陷无关。宏观上,未见阀瓣和阀座等零件内部产生磨痕、深沟及凹

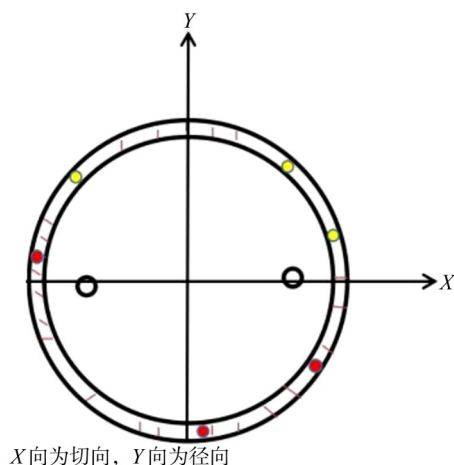


图13 阀瓣堆焊层表面应力测点示意

Fig. 13 Schematic diagram of stress measurement points on the surface of valve disc surfacing layer

表5 2VVP116VV 阀瓣堆焊层表面残余应力分析结果

Table 5 Results of residual stress on the surface of 2VVP116VV valve disc surfacing layer

位置	切向应力/MPa	径向应力/MPa
裂纹集中区域	188.33, 204.27, 147.27	-455.38, -512.47, -496.52
无裂纹区域	325.26, 318.18, 366.35	-685.80, -742.21, -750.28

坑;微观上阀瓣处也未见凹坑状形貌及塑性变形特征,与汽蚀特征不符。

堆焊过程中铁基体的部分材料会熔入钴基堆焊层,稀释堆焊合金的化学成分,稀释率越大,由母材熔化而进入焊缝中的合金元素或杂质元素就多,影响堆焊层的固有性能,其中Fe元素是重要的稀释率评价指标^[3-4]。

NB/T 20002.7—2013《压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范》第7部分:耐磨堆焊 5.3.2.1.4 规定“一般情况下,Fe含量 $\leq 6\%$ ”^[5]。查阅相关文献,为保证堆焊层性能,等离子弧堆焊稀释率应追求尽量小的稀释率(5%左右)^[6-7]。光谱分析及能谱分析结果显示,2VVP116VV 阀瓣密封面稀释率偏高,以Fe元素含量表征,参考标准目标值为6%,实测值为12.22%,超出参考标准上限值较高,同时发现堆焊层热影响区细晶区较宽。这些迹象表明该安全阀阀瓣密封面堆焊过程中没能有效控制焊接热输入,稀释率高通常由于焊接热输入过大引起,焊接热输入过大会导致堆焊层焊后残余应力过大,进而引起堆焊层开裂。

残余应力水平过高是钴基合金堆焊层开裂的

常见原因。焊接过程中,堆焊层周向收缩,受到基体的拘束,产生沿周向的拉应力是导致堆焊层开裂的重要原因之一。焊接线能量越大,拉应力越大。此外,预热及焊后热处理也是影响堆焊层开裂的重要原因。如果预热或焊后热处理不充分,就可能在堆焊层焊道和近缝区处存在较大的拉伸残余应力,导致堆焊层在焊接或焊后冷却过程中形成微裂纹,或者使用过程中在外部载荷和内部残余应力的共同作用下产生开裂。

残余应力分析结果表明,开裂和研磨等过程已部分释放残余应力,但堆焊层的残余应力仍处于较高水平。另外,堆焊层硬度值为252~331 HV,硬度分散性较大,也从侧面反映出堆焊层内的残余应力水平较高^[8]。

查阅完工报告,阀门密封面堆焊前经过了预热,预热温度为400℃,层间温度要求400~420℃。焊接完成后进行了热处理,热处理温度为590~600℃,恒温时间120 min。热处理记录未见明显异常,但不能完全排除执行过程可能存在阀门堆焊层热处理不充分、不均匀的问题。此外,层间温度范围仅20℃,堆焊过程中如控制不当,容易超出温度要求范围,一般给出至少50℃的控制范围,便于现场操作执行。

3 结论

(1)VVP116VV 安全阀阀瓣密封面堆焊层裂纹形式为穿晶裂纹,裂纹起源于密封表面上中线至外沿之间区域。堆焊层共有两层,第一层中Fe含量接近25 wt.%,表层Fe含量达12.22 wt.%,稀释率超出参考标准上限值(6%)较高,分析认为稀释率高通常由于焊接热输入过大引起,焊接热输入过大会导致堆焊层焊后残余应力过大,进而引起堆焊层开裂。残余应力分析结果表明,堆焊层的残余应力处于较高的水平。另外,不能排除堆焊过程中层间温度控制不当及焊后热处理不充分的问题。

(2)建议采用无损检测方法,如液体渗透检查,对机组使用同厂家或同工艺的司太立合金阀瓣堆焊层进行系统检查,对于检测有异常的阀瓣进行更换或局部进行补焊修复处理,也可考虑对同类司太

立合金阀瓣堆焊层做真空消应力热处理,消除后期可能由于密封面堆焊层失效导致的安全隐患。

(3)建议重新审视阀瓣堆焊工艺的正当性以及堆焊实施过程中工艺控制的有效性,确保采用适当的堆焊工艺施焊,避免产生稀释率偏大和焊接热影响区较宽等问题。在保证堆焊质量的前提下,通过选择较小的焊接电流、适当增大送粉量、降低焊接速度来降低焊缝稀释率,尽量减少层间温度,改善焊缝的裂纹倾向和焊接残余应力,提高焊缝的力学性能。堆焊实施过程中,认真执行经过严格评定后的堆焊工艺,加强工艺执行过程控制,尤其注意保证热处理(预热、焊后热处理)的均匀性和充分性,严格控制层间温度,控制和降低堆焊层的焊接残余应力。

参考文献:

- [1] He B, Nie Q W, Zhang H Y, et al. Effects of solution treatment on micro-structure and wear-resistant properties of CoCrW alloys [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(4): 484-490.
- [2] Li J N, Gong S L, Wang J, et al. Influence of Cu on microstructures and wear resistance of Stellite 12 matrix laser alloying coatings on TA15-2 Titanium alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(5): 547-554.
- [3] 谢建昌. 焊后热处理工艺对堆焊层 Fe 含量稀释率的研究[J]. *电焊机*, 2019, 49(9): 116-118.
- XIE J C. A Study on the Dilution Rate of Fe Content in the Surfacing Layer by Postweld Heat Treatment Process[J]. *Electric welding machine*, 2019, 49(9): 116-118.
- [4] 董兵天. 基于等离子堆焊稀释率的工艺改进[J]. *山东工业技术*, 2016(2): 193-193.
- DONG B T. Process Improvement Based on Dilution Ratio of Plasma Surfacing Welding [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2016(2): 193-193.
- [5] NB T 20002.7-2013, 压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范第 7 部分耐磨堆焊[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [6] 朱凯, 阙梅福, 朱治愿, 等. 司太立合金等离子弧堆焊工艺参数对焊层稀释率的影响[J]. *焊接技术*, 2014(9): 37-40.
- ZHU K, QUE M F, ZHU Z Y, et al. Effect of process parameters of Stellite plasma arc surfacing on dilution ratio of welding layer [J]. *Welding Technology*, 2014(9): 37-40.
- [7] 阙福恒, 王振民. 等离子-MIG 焊的研究进展[J]. *电焊机*, 2013, 43(3): 28-32.
- QUE F H, WANG Z M. Research progress in the plasma-MIG welding [J]. *Modern Welding*, 2013, 43(3): 28-32.
- [8] 李贵杰, 骆云龙. 气动阀合金阀瓣开裂原因分析[J]. *全面腐蚀控制*, 2019, 33(11): 31-35.
- LI G J, LUO Y L. Analysis of the Causes of Cracking in the Alloy Disc of Pneumatic Valves [J]. *Comprehensive Corrosion Control*, 2019, 33(11): 31-35.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>