



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.06

阀杆失效分析及其表面激光熔覆修复

郭毅军¹, 雷自成¹, 关永康¹, 张书军¹, 李洁², 李世亮²

1. 陕西陕煤韩城矿业有限公司桑树坪二号井, 陕西 韩城 715407

2. 西安智能再制造研究院有限公司, 陕西 西安 710018

摘要: 针对桑树坪二号井煤矿瓦斯抽放系统三偏心蝶阀阀杆和排水系统闸阀阀杆的失效问题进行系统分析, 确定主要失效原因是 H_2S 、 CO_2 、 SO_2 等介质的均匀腐蚀。为了提高阀杆的耐蚀性能, 提出了其表面激光熔覆Inconel 625合金(粉末和丝材)的修复方案。对激光熔覆层进行系统的显微组织观察、化学成分测试、显微硬度测试和电化学测试, 评估其可靠性。结果表明: Inconel 625丝材和粉末熔覆层组织分布类似, 熔覆层组织结构均为树枝晶, 与基体结合良好, 未见裂纹和气孔缺陷; 熔覆层中枝晶间区域Cr含量高于枝晶内区域, 枝晶间均存在富Nb析出相; 熔覆层整体元素分布较均匀, 在界面处Ni、Cr、Fe、Mo、Nb等主要元素与母材之间呈现过渡分布; Inconel 625熔覆层的硬度略高于母材, 且自腐蚀电位高于母材, 熔覆层自腐蚀电流密度 I_{cor} ($8.62 \times 10^{-7} A/cm^2$) 低于母材 ($8.23 \times 10^{-6} A/cm^2$), 经等效电路拟合后得到Inconel 625熔覆层电荷转移电阻为 $9.9 \times 10^4 \Omega \cdot cm^2$, 远高于母材的 $2.6 \times 10^3 \Omega \cdot cm^2$, 表明熔覆层的耐蚀性优于基体。上述修复后的阀杆结构在煤矿中服役6个月未发生腐蚀失效, 仍正常运行, 而未处理的阀杆结构服役1个月就发生腐蚀失效, 说明Inconel 625熔覆层对阀杆材料有较好的保护作用。

关键词: Inconel 625合金; 激光熔覆; 失效分析; 阀杆; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG115 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0043-07

Failure Analysis of Valve Stems and Their Laser Cladding Repair

GUO Yijun¹, LEI Zicheng¹, GUAN Yongkang¹, ZHANG Shujun¹, LI Jie², LI Shiliang²

1. Sangshuping No. 2 Mine, Shaanxi Shanmei Hancheng Mining Co., Ltd., Hancheng 715407, China

2. Xi'an intelligent Remanufacturing Reserch Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China

Abstract: The failure analysis of the three-eccentric butterfly valve stem serviced in a Sang Shuping No.2 Mine gas extraction system and the drain gate valve stem was systematically investigated and the main failure mechanical was homogeneous corrosion in H_2S , CO_2 , SO_2 medium. In order to improve the corrosion resistance of these stems, laser cladding with Inconel 625 alloy was proposed. Microstructure observation, chemical composition, microhardness and electrochemical tests were performed to evaluate the cladding layers. The results show that the Inconel 625 wire cladding layer and powder cladding layer are consisted of dendrite structures. The cladding layers are free from cracks and pores, showing good bonding with the base metal. The contents of Cr element are higher in the interdendrite regions than that in the dendrite regions. Particles which are rich in Nb are precipitated in the interdendritic regions. The cladding layers show quite uniform element distribution on the whole, where Ni, Cr, Mo, Nb elements present transitional distribution at the interface. The corrosion potential of the Inconel 625 cladding layer is higher than that of the base metal. The corrosion current density of the cladding layer I_{cor} (8.62×10^{-7}

收稿日期: 2023-10-20 修回日期: 2024-02-01

作者简介: 郭毅军(1985—),男,高级工程师,主要从事煤矿开采机械的研究和管理工作。

A/cm^2) below that of the base metal ($8.23 \times 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$). The charge transfer resistance of Inconel 625 cladding layer obtained by the equivalent circuit fitting is $R_{ct} 9.9 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, far higher than that of the base metal ($R_{ct} 2.6 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$). It is concluded that the corrosion resistance of the cladding layer is better than that of the base metal. The repaired valve stems have been in service for 2 months in the coal mine without failure and still operates normally, while the new valve stems failed after only 1 month of service. It is proved that the Inconel 625 laser cladding layer has well protected the substrate.

Keywords: Inconel 625 alloy; laser cladding; failure analysis; valve stem; corrosion resistance

引用格式:郭毅军,雷自成,关永康,等. 阀杆失效分析及其表面激光熔覆修复[J]. 电焊机,2024,54(4):43-49.

Citation:GUO Yijun, LEI Zicheng, GUAN Yongkang, et al. Failure Analysis of Valve Stems and Their Laser Cladding Repair[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 43-49.

0 引言

蝶阀是用圆形蝶板作启闭件并随阀杆转动来开启、关闭和调节流体通道的一种阀门^[1]。三偏心蝶阀是在双偏心蝶阀基础上,使阀座密封面偏置一定角度,其阀座密封面为圆锥面,阀板密封在开启时就会脱离阀座密封面,二者之间几乎没有摩擦,与双偏心蝶阀相比大大提高了蝶阀的密封性能和使用寿命^[2]。三偏心蝶阀的结构如图 1a 所示。楔式闸阀是以闸板为启闭件,工作时候闸板运动方向与流体方向垂直。楔式闸阀一般通过阀杆上下移动来完成阀门的启闭^[3-5]。楔式闸阀因其阀门的密封面与垂直中心线成某种角度,密封较好,因此可以承受较大压力。楔式闸阀结构图如图 1b 所示。一般情况下,三偏心蝶阀和楔式闸阀的阀杆(见图 1 中箭头所示)经调质和表面氮化处理,有良好的抗腐蚀性和抗擦伤性。

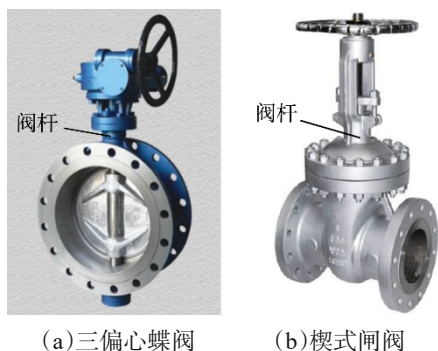


图 1 三偏心蝶阀和楔式闸阀结构

Fig. 1 Structure of three-eccentric center butterfly valve and wedge gate valve

然而,由于井下服役环境的日益恶化,上述结构在使用寿命内均发生严重的腐蚀失效^[6]。瓦斯抽放蝶阀是煤矿井下瓦斯抽放系统控制和节流的主

要设备,给排水楔式闸阀是煤矿井下给排水系统的主要设备,阀杆作为上述设备的转动核心,其可靠性和稳定性对生产安全至关重要。

本文针对桑树坪二号井煤矿服役运行的蝶阀阀杆和闸阀阀杆的失效进行系统分析,基于分析结果提出了激光熔覆 Inconel 625 合金来提高阀杆耐腐蚀性能的方案。Inconel 625 合金属于 Ni-Cr-Mo 合金系,具有优异的抗氧化腐蚀能力^[7-10];激光熔覆具有热影响区小,成形件力学性能优良等特点,是失效结构件表面修复的首选方法^[11-14]。通过对激光熔覆层进行系统的显微组织观察、化学成分、显微硬度测试和电化学测试,综合评估熔覆层的可靠性。

1 失效分析

从拆解下的蝶阀阀杆和闸阀阀杆外观(图 2)可以看到,两个阀杆表面的腐蚀均比较严重,主要以点蚀为主。阀轴阀杆经过化学成分检测,确认其材料为 2Cr13 不锈钢,其主要失效原因为:阀杆与轴孔之间直接接触,无隔离,服役环境中的高温介质(H_2S 、 CO_2 、 SO_2 等)深入阀杆与轴孔之间的间隙,形成间隙腐蚀现象,而阀杆材料抵抗上述腐蚀介质的能力较弱。



图 2 失效阀杆形貌

Fig. 2 The morphology of the failed valve stems

2 试验材料与方法

2.1 激光熔覆修复

旧蝶阀的阀杆基材为2Cr13,激光熔覆采用Inconel 625丝材,丝材规格 $\phi 1.2$ mm,材料化学成分见表1。旧蝶阀每台阀杆有两节,规格分别为 $\phi 55$ mm $\times$ 200 mm、 $\phi 55$ mm $\times$ 468 mm。激光熔覆前先将旧阀杆表面车削掉0.5 mm厚度,然后在车削部位激光熔覆Inconel 625丝材,熔覆一层,厚度为1.2 mm,最后对阀杆进行机加工恢复至原尺寸。丝材激光熔覆采用的功率为2 500 W,熔覆速度为14 mm/s,光斑直径为4.5 mm。蝶阀阀杆丝材激光熔覆前后的形貌如图3所示。

表1 Inconel 625材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the Inconel 625 (wt. %)

	C	Cr	Fe	Ti	Mo	Ni	Nb
丝材	0.01	22.12	0.04	0.15	8.82	Bal.	3.58
粉末	0.059	21.23	4.12	0.29	8.08	Bal.	3.29



(a)丝材激光熔覆前 (b)丝材熔覆后

图3 蝶阀阀杆丝材激光熔覆修复

Fig. 3 Laser wire cladding repair of butterfly valve stem

拆解旧闸阀,经检测其阀杆材料为17-4PH,激光熔覆采用Inconel 625粉末。粉末形貌如图4所示,粉末球形度较好,粒度为150~300目。

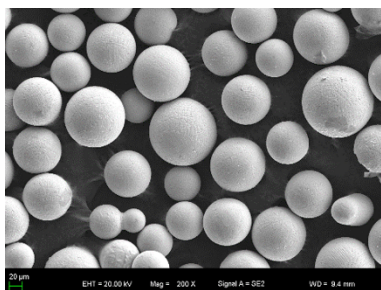


图4 Inconel 625粉末形貌

Fig. 4 Morphology of Inconel 625 powder

拆解下来的旧阀杆规格为 $\phi 38 \times 360$ mm,激光熔覆前先将待熔覆部位车削掉0.5 mm厚度,然后对车削部分进行Inconel 625粉末的激光熔覆增材,熔

覆层厚度1.2 mm。粉末激光熔覆功率为2 500 W,熔覆速度为40 mm/s,送粉速度为1.2 r/min,进给距离为1.6 mm,光斑尺寸为4 mm $\times$ 4 mm。闸阀阀杆粉末激光熔覆前后的形貌如图5所示。



(a)熔覆前 (b)熔覆后

图5 闸阀阀杆粉末激光熔覆修复

Fig. 5 The laser powder cladding repair of gate valve stem

2.2 试验方法

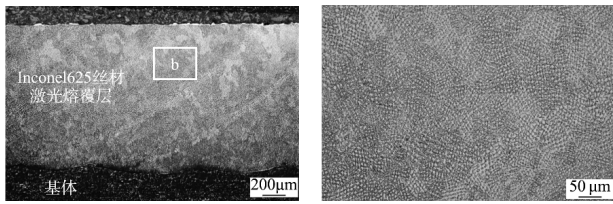
采用Olympus光学显微镜对激光丝材和激光粉末熔覆层横截面进行显微组织分析。采用Zeiss场发射扫描电镜对熔覆层显微结构进行观察,配合EDS探头测定其微区成分。采用显微维氏硬度计测试熔覆层横截面显微硬度,测试载荷为300 g,保载时间为15 s,熔覆层测点间距为100 μ m,母材处测点间距为200 μ m。在上海辰华CHI600E系列电化学测试工作站上开展熔覆层电化学测试试验,选取三电极系统评价各熔覆层电化学行为,铂网与Ag/AgCl分别作为本试验测试中的辅助和参比电极,选用3.5% NaCl作为试验测试所用电解液。

3 结果与讨论

3.1 组织分析

3.1.1 金相组织分析

图6、图7分别为Inconel 625丝材和粉末激光熔覆层的金相组织。熔覆层组织均为树枝晶结构,与母材结合良好,未见裂纹和气孔缺陷。从图6b、7b可以看出,熔覆层中部均呈现等轴晶形貌。这是因为丝材和粉末激光熔覆过程中,进给距离均小于光斑直径,后一道熔覆层均对前一道熔覆层进行了充分的重熔处理。Inconel 625丝材和粉末激光熔覆层在金相组织上差异不明显。



(a)熔覆层/基体界面 (b)熔覆层中部

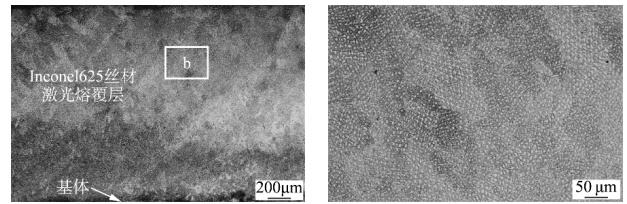
图6 丝材激光熔覆层金相组织

Fig. 6 The microstructure of laser wire cladding layer

3.1.2 扫描电镜及EDS分析

采用场发射扫描电镜对 Inconel 625 丝材熔覆层/基体结合界面及熔覆层中部区域进行观察,如图8所示。

图8中典型区域的EDS能谱检测结果见表2。结合能谱检测结果,丝材熔覆层靠近界面处组织以细小的枝晶形貌为主,其中紧挨母材界面区域(谱

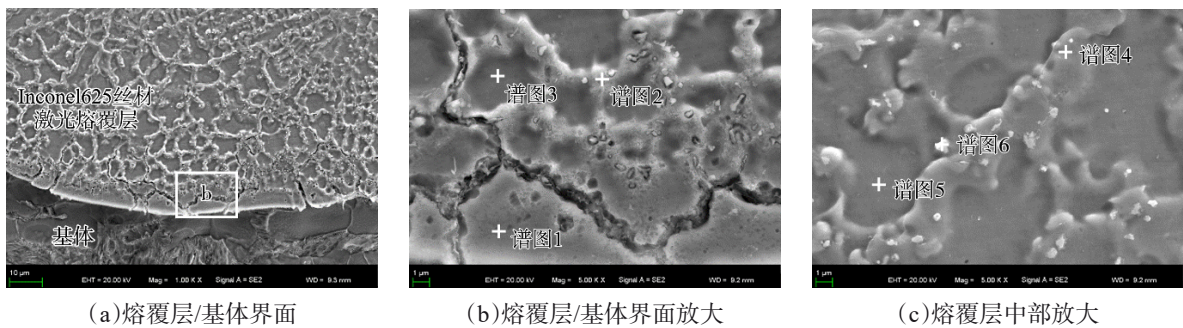


(a)熔覆层/基体界面 (b)熔覆层中部

图7 粉末激光熔覆层金相组织

Fig. 7 The microstructure of laser powder cladding layer

图1)Fe元素的含量相对较高(15.37 wt.%);凸起的枝晶间区域(谱图2)和枝晶区域(谱图3)相比,存在Mo、Nb元素的富集。在熔覆层中部区域,枝晶间(谱图4)的Cr含量略高于枝晶区域(谱图5);枝晶间区域存在亮色的、颗粒状析出相,EDS能谱检测结果显示是富Nb相(谱图6)。借助上述EDS数据,计算出丝材激光熔覆层的稀释率约为4%~5%。



(a)熔覆层/基体界面

(b)熔覆层/基体界面放大

(c)熔覆层中部放大

图8 丝材激光熔覆层SEM观察及EDS分析

Fig. 8 The SEM microstructure and EDS analysis of laser wire cladding layer

表2 丝材激光熔覆层EDS检测结果(质量分数,%)

Table 2 EDS results of the laser wire cladding layer (wt. %)

谱图	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	Nb
谱图1	0.23	18.55	15.37	Bal.	6.65	1.51
谱图2	0.57	20.16	7.13	Bal.	11.18	5.41
谱图3	0.29	20.86	10.35	Bal.	6.78	1.81
谱图4	0.25	22.21	5.37	Bal.	7.28	1.47
谱图5	0.25	21.36	5.21	Bal.	7.31	1.97
谱图6	0.30	19.04	4.16	Bal.	8.45	21.64

图9为粉末激光熔覆层的场发射扫描电镜观察结果,表3为典型区域的EDS能谱检测结果。粉末激光熔覆层的组织及元素分布与丝材激光熔覆层类似,在靠近母材界面处,枝晶间区域(谱图1)的Cr含量略高于枝晶区域(谱图2),在枝晶间区域存在富Nb的析出相(谱图3)。在熔覆层中部区域,亮色富Nb析出相(谱图6)呈现颗粒状分布在枝晶间;枝晶内区域(谱图5)的Cr、Mo、Nb含量略低于枝晶间

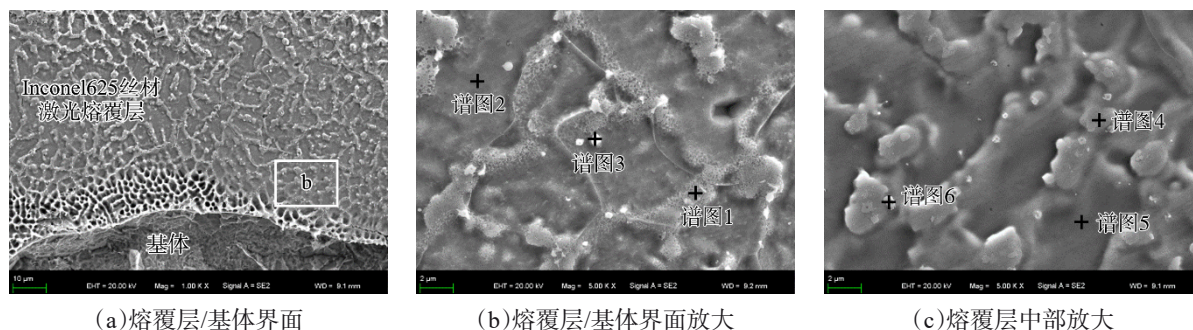
表3 粉末激光熔覆层EDS检测结果(质量分数,%)

Table 3 EDS results of the laser powder cladding layer (wt. %)

谱图	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	Nb
谱图1	0.40	19.49	9.17	Bal.	5.41	1.18
谱图2	0.26	17.91	14.43	Bal.	6.93	1.59
谱图3	0.40	18.61	12.76	Bal.	9.22	18.68
谱图4	0.15	22.15	5.26	Bal.	7.80	2.09
谱图5	0.30	21.67	5.21	Bal.	7.39	1.67
谱图6	0.34	16.17	3.05	Bal.	7.76	33.86

区域(谱图4)。借助上述的EDS数据,计算出粉末激光熔覆层的稀释率约为5%~6%,与丝材熔覆层的稀释率接近。由于激光热源能量密度集中,上述两个熔覆层的枝晶结构均较细小。

图10为激光熔覆层EDS线扫结果,由于丝材熔覆层和粉末熔覆层的组织分布类似,仅呈现粉末熔覆层的元素分布情况。可以看出,熔覆层整体成分分布均匀,局部存在波动(枝晶间富Nb析出相)。



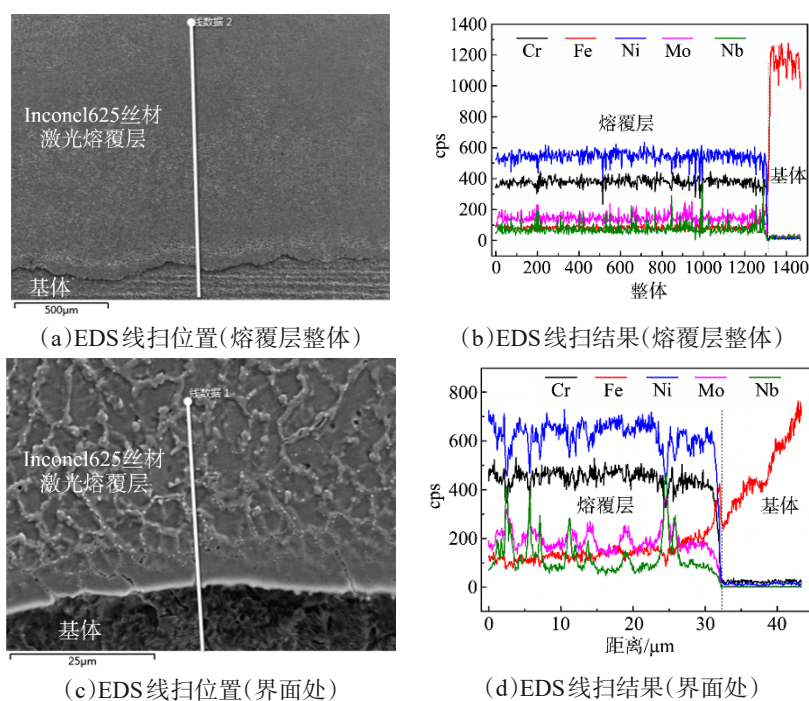
(a)熔覆层/基体界面

(b)熔覆层/基体界面放大

(c)熔覆层中部放大

图9 粉末激光熔覆层SEM观察及EDS分析

Fig. 9 The SEM microstructure and EDS analysis of laser powder cladding layer



(a)EDS线扫位置(熔覆层整体)

(b)EDS线扫结果(熔覆层整体)

(c)EDS线扫位置(界面处)

(d)EDS线扫结果(界面处)

图10 粉末激光熔覆层EDS线扫结果

Fig. 10 EDS line scanning results of powder laser cladding layer

在界面处,熔覆层主要元素Ni、Cr、Fe、Mo、Nb与母材之间存在过渡分布特点。

3.2 显微硬度测试

为了确定Inconel 625丝材和粉末激光熔覆层沿厚度方向的性能变化,对其进行显微维氏硬度测试,测试结果如图11所示。显微硬度测试从基材开始,垂直于厚度方向,到熔覆层外表面结束。可以看出,基材处硬度值较低,处于140~180 HV0.3之间。激光熔覆层的硬度高于基材,其中粉末激光熔覆层的硬度(平均值为254 HV0.3)略高于丝材激光熔覆层(平均值为248 HV0.3)。这主要是因为粉末激光熔覆过程中熔池较小,液态熔池凝固时温度梯

度相对较大,导致熔覆层组织更加细小。此外,激光熔覆(无论是粉末还是丝材)对基材的热影响作用都较小,基材热影响区硬度变化不明显。

3.3 电化学性能测试

Inconel 625粉末激光熔覆层及基体材料的电化学测试结果如图12所示。从图12a极化曲线可以看出,熔覆层自腐蚀电位为 $E_{\text{corr}}=-0.399$ V,高于母材的自腐蚀电位 $E_{\text{corr}}=-0.872$ V;同时Inconel 625熔覆层自腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}}=8.62 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 低于母材的 $I_{\text{corr}}=8.23 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,表明熔覆层的耐蚀性明显优于母材。从图12b阻抗曲线可以看出,母材及Inconel 625熔覆层交流阻抗谱均表现为单一容抗弧,表

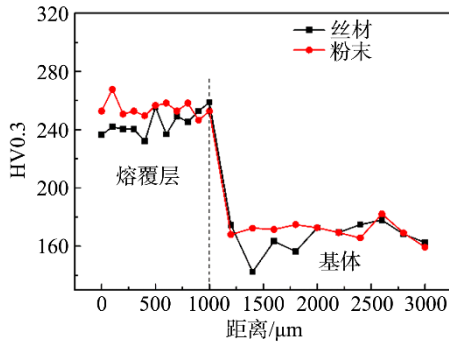
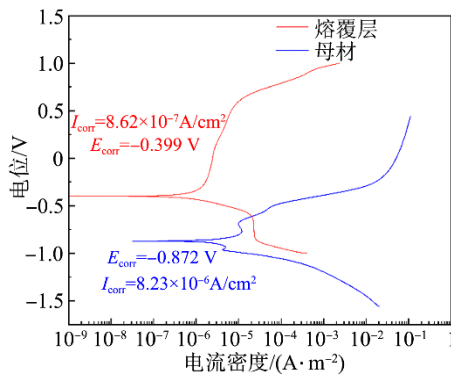


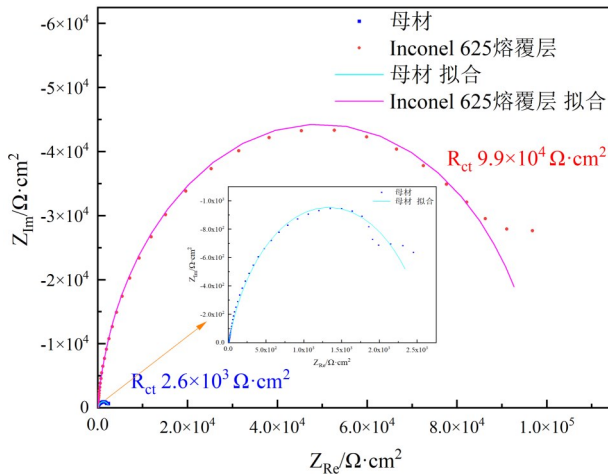
图 11 激光熔覆层显微硬度分布

Fig. 11 Microhardness distribution of the laser cladding layer

明电极反应过程由电荷转移控制,容抗弧的半径越大耐蚀性越好;经等效电路拟合后得到 Inconel 625 熔覆层电荷转移电阻为 $R_{ct}=9.9\times10^4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$, 远高于母材的 $R_{ct}=2.6\times10^3\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。上述测试结果表明,在母材表面熔覆 Inconel 625 合金可以大大提高零件的耐蚀性,从而提高其使用寿命。



(a) 极化曲线



(b) 阻抗曲线

图 12 激光粉末熔覆层电化学测试结果

Fig. 12 Electrochemical tests results of laser power cladding

采用上述两种激光熔覆工艺修复后的蝶阀阀杆和闸阀阀杆在井下服役 6 个月,均未发生腐蚀失效,而未处理的阀杆服役 1 个月就发生腐蚀失效,说明 Inconel 625 激光熔覆层对阀杆材料有较好的保护作用。

4 结论及建议

本文对某矿井使用的蝶阀和闸阀关键转动部件阀杆结构的失效进行系统分析,其主要发生的是 H_2S 、 CO_2 、 SO_2 等腐蚀性介质下的均匀腐蚀。鉴于此,提出了在上述失效阀杆表面激光熔覆 Inconel 625 合金的修复方案。分别进行 Inconel 625 丝材熔覆和粉末熔覆,综合显微组织、化学成分、显微硬度和电化学测试结果,评价了所制备的熔覆层的可靠性。得到如下主要结论:

(1) 金相组织观察表明,丝材激光熔覆层与粉末激光熔覆层的组织均为树枝晶结构,熔覆层与母材基体结合良好,未见裂纹和气孔缺陷。激光熔覆过程中采用的进给距离小于光斑尺寸,所得到的熔覆层(丝材和粉末)均呈现等轴晶组织。

(2) 场发射扫描电镜及 EDS 分析表明,丝材激光熔覆层和粉末激光熔覆层中元素的偏析行为类似,枝晶间区域的 Cr 含量均高于枝晶内区域,枝晶间区域均存在亮色的富 Nb 析出相。熔覆层整体化学成分分布均匀,在界面处存在主要元素 Ni、Cr、Fe、Mo、Nb 与母材之间的过渡分布。

(3) 显微硬度测试结果表明,粉末激光熔覆层的硬度(平均值为 254 HV0.3)略高于丝材激光熔覆层(平均值为 248 HV0.3),基体处硬度值最低,处于 140~180 HV0.3 之间。

(4) 粉末激光熔覆层的电化学测试结果表明,Inconel 625 熔覆层自腐蚀电位高于母材基体自腐蚀电位,熔覆层自腐蚀电流密度 I_{corr} ($8.62\times10^{-7}\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$) 低于母材的 I_{corr} ($8.23\times10^{-6}\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$),经等效电路拟合后得到的 Inconel 625 熔覆层电荷转移电阻 R_{ct} 为 $9.9\times10^4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,远高于母材 R_{ct} 的 $2.6\times10^3\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,表明熔覆层的耐蚀性优于基体。

修复后的蝶阀阀杆和闸阀阀杆在矿井中服役 6

个月,未发生失效,而未处理的阀杆服役1个月就发生失效,说明 Inconel 625 激光熔覆层对阀杆材料有较好的保护作用。

参考文献:

- [1] 潘康. 控制蝶阀调节特性的研究[D]. 浙江:浙江大学, 2008.
- PAN K. The study on flux control characteristic of control butterfly valve[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008.
- [2] 谢金宏. 双偏心蝶阀开裂失效分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 60-63.
- XIE J H. Failure analysis of the valve plate and valve body[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(S1): 60-63.
- [3] 张建斌. 大口径楔式闸阀结构与优化[J]. 中国设备工程, 2017(02): 120-122.
- ZHANG J B. Structural design and optimization of large diameter wedge gate valve[J]. China Plant Engineering, 2017(02): 120-122.
- [4] 薛红权, 雷磊, 项光洪, 等. 楔式闸阀内部气固两相流动及冲蚀磨损研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(06): 82-83+86.
- XUE H Q, LEI L, XIANG G H, et al. Research on Gas-Solid Two-Phase Flow and Erosion Wear in Wedge Gate Valve[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(06): 82-83+86.
- [5] 张孙力. 大口径楔式闸阀流动特性分析与使用建议[J]. 阀门, 2023(4): 453-457.
- ZHANG S L. Flow Characteristic Analysis and Application Suggestion of Large Diameter Wedge Gate Valve[J]. Valve Magazine, 2023(4): 453-457.
- [6] 薄纪康. 高压节流阀的冲蚀磨损机理及其激光熔覆再制造[J]. 中国机械工程, 2015, 26(02): 255-259.
- BO J K. Erosion Wear Mechanism and Laser Cladding Remanufacturing of High-pressure Throttle Valves[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(02): 255-259.
- [7] 王进才, 霍晓阳, 李雷, 等. Inconel 625 及其去 Mo 和 Alloy 686 粉末激光熔凝性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(10): 1256-1262.
- WANG J C, HUO X Y, LI L, et al. Laser Melting Solidification Properties of Inconel625, Mo-free Inconel625 and Alloy686 powders[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10): 1256-1262.
- [8] 褚清坤, 余春风, 邓朝阳, 等. TiC 含量对激光选区熔化 Inconel 625 合金微观组织及表面摩擦磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2021, 34(01): 76-84.
- CHU Q K, YU C F, DENG C Y, et al. Effect of TiC on Microstructure and Wear Properties of Inconel 625 Alloy Fabricated via Selective Laser Melting Technology[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(01): 76-84.
- [9] 李毅, 于彦东, 林凯. 选区激光熔化 Inconel 625 合金的热处理工艺及其性能研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(06): 124-127.
- LI Y, YU Y D, LIN K. Study on Heat Treatment Process and Properties of Selective Laser Melting Inconel 625 Alloy[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(06): 124-127.
- [10] 胡文伟. 选区激光熔化成形 Inconel 625 合金高温失塑行为研究[D]. 江西:南昌航空大学, 2022.
- HU W W. High temperature plastic failure behavior of Inconel 625 alloy formed by selective laser melting[D]. Jiangxi: Nanchang Hangkong University, 2022.
- [11] 徐翔宇, 曹阳, 王辉, 等. 激光熔覆修复叶片的过渡区力学性能试验研究[J]. 现代制造工程, 2021(09): 118-123.
- XU X Y, CAO Y, WANG H, et al. Experimental research on mechanical properties of the blade transition zone by laser cladding repair process[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(09): 118-123.
- [12] 刘明霞, 李昭, 畅庚榕, 等. 激光重熔对高速激光熔覆 Ni625 合金涂层组织和耐蚀性的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(08): 153-160.
- LIU M X, LI Z, CHANG G R, et al. Effect of laser remelting on microstructure and corrosion resistance of Ni625 alloy coating fabricated by high speed laser cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(08): 153-160.
- [13] 徐富家, 杨义成, 雷振, 等. 激光同轴送粉增材制造粉末束流关键特征表征与分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(08): 68-72+117-118.
- XU F J, YANG Y C, LEI Z, et al. Characterization and analysis of key characteristics of powder stream in laser coaxial powder feeding additive manufacturing[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2022, 43(08): 68-72+117-118.
- [14] 李凯斌, 李东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 82-87.
- LI K B, LI D, LIU D Y, et al. Research of Fiber Laser Cladding Repairing Process with Wire Feeding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 82-87.