

表面失效及防护

强流脉冲电子束表面改性 FeCrAl 涂层的
显微组织及耐高温腐蚀性能研究陈军^{1,2}, 李伟², 贺冬云¹, 郝胜智^{1,2}

(1.大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024;

2.大连理工大学 鞍山研究院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 目的 改善 FeCrAl 涂层表面组织, 提高其耐高温盐溶液腐蚀性能。方法 用电弧喷涂方法在 45 碳钢表面制备 FeCrAl (Cr 25.5%, Al 5.5%, Fe 余量) 涂层。用强流脉冲电子束 (HCPEB) 对 FeCrAl 涂层进行表面改性处理, 工作参数为: 脉冲宽度 200 μs , 能量密度分别为 20、25、30、40 J/cm^2 。处理脉冲次数均为 1 次。通过金相显微镜和扫描电子显微镜对改性层形貌进行分析, 通过电子探针方法测量改性前后涂层中 Fe、Cr、Al 和 O 元素的分布变化, 利用 X 射线衍射分析对比改性层的相成分组成。在温度 650 $^{\circ}\text{C}$ 下, 以 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{K}_2\text{SO}_4$ 饱和盐溶液为腐蚀介质, 测试 FeCrAl 涂层的高温腐蚀性能, 并对腐蚀表面形貌进行分析。**结果** HCPEB 处理 FeCrAl 涂层发生表层重熔, 原始粗糙疏松的涂层组织变得光滑致密, 表面出现分离的球冠状凸起, 凸起内部由排列紧密的 Fe-Cr 柱状晶组成, Al 元素向凸起结构的表面和周围凹陷处聚集。随 HCPEB 处理能量密度增大, 凸起结构尺寸增加, 涂层表面的 Fe_2O_3 相消失, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相含量增多。经 120 h 高温腐蚀后, 原始涂层腐蚀增重 63.8 mg/cm^2 , HCPEB 能量密度 20 J/cm^2 处理的样品腐蚀增重 51 mg/cm^2 。**结论** 使用 HCPEB 在脉冲宽度 200 μs 和能量密度 20 J/cm^2 下处理 FeCrAl 涂层后, 其高温腐蚀增重较原始涂层减少 20%, 而使用过高的 HCPEB 能量密度处理会导致 FeCrAl 涂层表面结构和耐高温腐蚀性能变差。

关键词: 强流脉冲电子束; FeCrAl 涂层; 表面改性; 显微组织; 高温腐蚀**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)05-0200-07**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.024Surface Microstructure and High-temperature Erosion Resistance of
FeCrAl Coating after High Current Pulsed Electron Beam TreatmentCHEN Jun^{1,2}, LI Wei², HE Dong-yun¹, HAO Sheng-zhi^{1,2}

(1.School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2.Anshan Institute, Dalian University of Technology, Anshan 114051, China)

收稿日期: 2019-10-17; 修订日期: 2020-04-11

Received: 2019-10-17; Revised: 2020-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11975002, 51471043); 鞍山市科技计划项目 (2014)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (11975002, 51471043), Anshan Science and Technology Project (2014)

作者简介: 陈军 (1965—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料表面改性。

Biography: CHEN Jun (1965—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: material surface modification.

通讯作者: 郝胜智 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为强流脉冲电子束装置及材料表面改性。邮箱: ebeam@dlut.edu.cn

Corresponding author: HAO Sheng-zhi (1973—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: HCPEB equipment and surface modification of materials. E-mail: ebeam@dlut.edu.cn

引文格式: 陈军, 李伟, 贺冬云, 等. 强流脉冲电子束表面改性 FeCrAl 涂层的显微组织及耐高温腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 200-206.

CHEN Jun, LI Wei, HE Dong-yun, et al. Surface microstructure and high-temperature erosion resistance of FeCrAl coating after high current pulsed electron beam treatment[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 200-206.

ABSTRACT: The work aims to increase the high-temperature resistance of FeCrAl coating against salt solution erosion by improving its surface microstructure. The FeCrAl coating with 25.5% Cr, 5.5% Al and rest Fe was prepared on 45 carbon steel by arc spraying method, and then treated once by HCPEB with the pulse width of 200 μs and energy density of 20, 25, 30 and 40 J/cm^2 respectively. The morphology of FeCrAl coating before and after HCPEB treatment was studied by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The distribution of alloying elements as Fe, Cr, Al and O in the modified surface layer was measured with electron probe micro-analyzer (EPMA). The phase composition was analyzed by X-ray diffractometry (XRD). The high-temperature erosion resistance of FeCrAl coating was tested in saturated solution of Na_2SO_4 and K_2SO_4 as the erosion medium at 650 $^\circ\text{C}$ and the erosion morphology was analyzed. After HCPEB treatment, the surface layer of FeCrAl coating was remelted and the rough and loose surface became smooth and dense. Many bulged nodules composed of Fe-Cr column grains were formed on the modified surface. The agglomeration of Al element was observed at the surface of bulged nodules and the concave parts around. With the increasing energy density of HCPEB treatment, the size of nodules became larger. Moreover, the content of Fe_2O_3 phase decreased in the surface layer of FeCrAl coating with the more $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase formed contrarily. After the 120 hours high temperature erosion tests, the weight gain of as-sprayed FeCrAl coating was 63.8 mg/cm^2 and that of HCPEB treated sample with 20 J/cm^2 was 51 mg/cm^2 . The high temperature erosion weight gain of FeCrAl coating treated by HCPEB with pulse width of 200 μs and energy density of 20 J/cm^2 is reduced by 20% compared with the original coating, while the application of HCPEB treatment with excessive high energy density deteriorates the surface microstructure and high temperature erosion resistance of FeCrAl coating.

KEY WORDS: high current pulsed electron beam; FeCrAl coating; surface modification; microstructure; high-temperature erosion

电弧喷涂以生产效率高,同时兼备质量稳定、适于大面积操作等优点,广泛应用于工件表面的磨损和腐蚀防护,目前已实现多种元素体系涂层成功制备。其中,电弧喷涂 FeCrAl 涂层在高温腐蚀防护和涂层结合力方面表现良好,受到石油化工、高温锅炉及航海运输等行业的青睐,大量用于液体管线、炉体炉管和轮机叶片等部件的表面防护^[1-4],但在高温腐蚀环境运行时,经常会遇到涂层发生腐蚀、脱落和基体受到严重侵蚀等情况,成为安全生产的重大隐患。分析发现,由于电弧喷涂涂层的表面一般较为粗糙,涂层组织由变形粒子相互交错堆叠构成,颗粒间存在大量孔隙、空洞和氧化物夹杂等缺陷,腐蚀介质会沿着这些结构缺陷进入涂层,使涂层内部产生腐蚀,同时降低涂层和基体的结合能力,造成涂层脱落和防护失效。因此,为了保持电弧喷涂涂层长期稳定的防护功能,必须对涂层表面进行适当的封闭处理^[5-7],优化涂层的结构和性能。

相比于其他高能束技术(包括激光、离子束、等离子体束流以及连续型电子束等),强流脉冲电子束(HCPEB)是近年发展迅速的一种新型高能密荷电粒子束技术^[8-10]。使用强流脉冲电子束进行表面处理时,在其辐照区内会产生高能量沉积($10\sim 100\text{ J}/\text{cm}^2$),具有加热速度快($10^9\text{ K}/\text{s}$)、作用层深($10^{-4}\sim 10^{-6}\text{ m}$)、辐照面积大($\phi 60\sim 100\text{ mm}$)的特点,处理材料表层经历剧烈的热力作用过程,可显著改善材料表面性能^[11-18]。

本文利用 HCPEB 进行电弧喷涂 FeCrAl 涂层的表面改性处理,分析研究不同能量密度 HCPEB 改性

后涂层的表面形貌、成分分布和相结构变化,以及表面改性工艺对涂层热防护性能的影响。

1 实验

1.1 实验材料和样品制备

选择 45 碳钢为基体材料,加工成 $\phi 15\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 试样,在酒精中进行超声波清洗去除油污。考虑高温腐蚀性能,测试采用单面滴液方法,实验中对试样一侧端面进行涂层制备。经喷砂粗化后,采用 ZPG-400B 型电弧喷涂系统和 QDIII-250 型喷枪喷涂厚约 150 μm 的 FeCrAl (Cr 25.5%, Al 5.5%, Fe 余量)涂层。

利用 SOLO-M 型强流脉冲电子束系统完成 FeCrAl 涂层表面处理,所用 HCPEB 处理参数为:脉宽 200 μs ,能量密度分别为 20、25、30、40 J/cm^2 ,束斑面积 $\phi 60\text{ mm}$ 。所有样品均为 1 次脉冲处理。

1.2 显微组织观察和高温腐蚀性能测试

利用 Olympus BX51 型光学显微镜(OM)和 JSM-6360LV 型扫描电镜(SEM)观察涂层表面组织形貌。通过 Shimadzu 1600 型电子探针仪和 D8 X-ray 型 X 射线衍射仪(Cu 靶)分析表层成分分布和相结构变化。利用扫描电镜观察比较涂层表面腐蚀形貌变化。根据电厂锅炉管道工作液体中主体钠、钾盐成分比例,选用质量比为 8:5 的 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{K}_2\text{SO}_4$ 饱和盐溶液为工况模拟腐蚀介质,考虑复合硫酸盐在 $\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$ 中对铁基合金的腐蚀能力最强,选择 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 进行高温腐蚀测试。在涂层端面滴涂 8 mg 饱和盐溶液,

依靠表面张力支撑无侧面流淌, 放入高温炉内静置, 每隔 5 h 取出, 在沸水中煮去表面盐分、干燥称重, 重新涂盐进行下一个周期的实验, 累积加热时间 120 h。

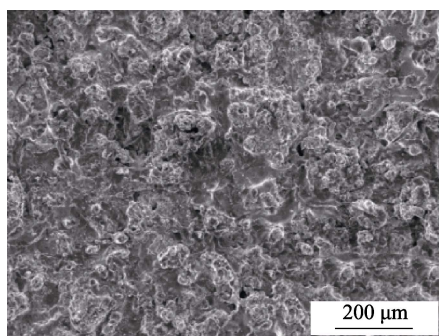
2 结果及分析

2.1 表层显微形貌

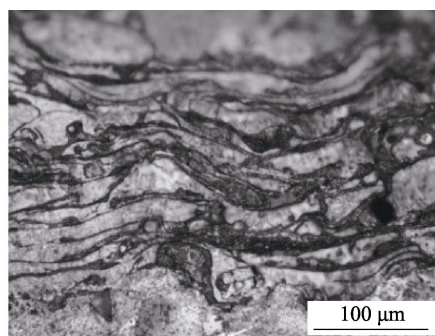
图 1 为电弧喷涂 FeCrAl 涂层的显微形貌。从图 1a 中可以看到, 涂层表面粗糙松散, 分布着大量不规则的起伏颗粒状结构, 颗粒间存在孔隙、空洞和微

观裂纹等缺陷。涂层截面为层片状组织, 层间结合不紧密, 有大的缝隙和空洞存在, 涂层厚度约为 150 μm , 如图 1b 所示。上述的涂层形貌特征与电弧喷涂工艺密切相关, 涂层材料在电弧热源作用下加热至熔融或高塑性状态, 雾化成细小粒子后, 向基材定向高速飞行并发生猛烈碰撞, 粒子发生变形、展平、嵌合和冷凝等连续过程, 经过变形粒子的逐层堆积, 构成整体涂层。在此过程中, 由于粒子尺寸、成分、变形程度和热力作用等因素, 使得涂层结构不可避免地存在一些孔隙、空洞和氧化物夹杂等显微缺陷。

图 2 为经 HCPEB 处理的 FeCrAl 涂层表面形貌。



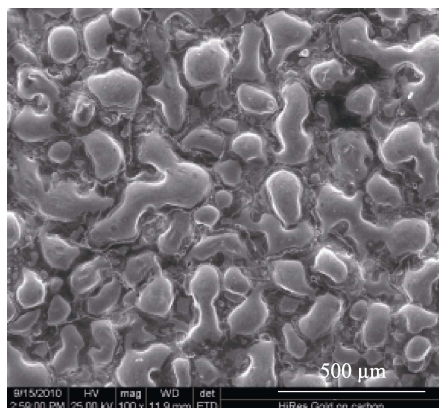
a 表面SEM形貌



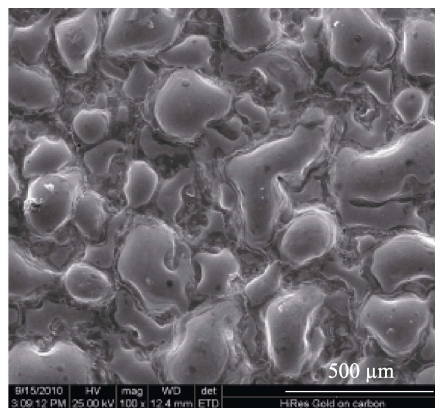
b 截面金相形貌

图 1 电弧喷涂 FeCrAl 涂层组织形貌

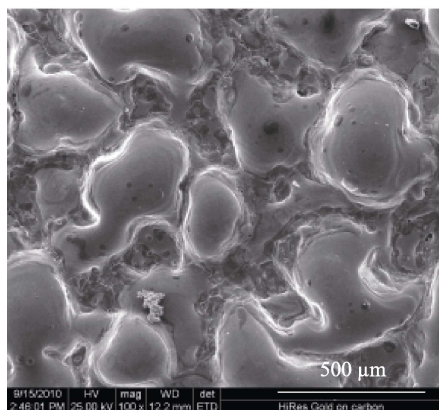
Fig.1 Morphologies of arc-sprayed FeCrAl coating: a) surface SEM image; b) cross-section OM image



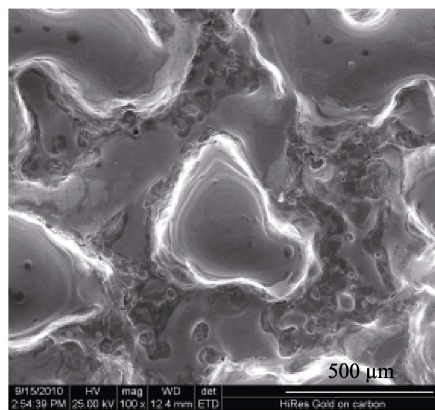
a 20 J/cm²



b 25 J/cm²



c 30 J/cm²



c 40 J/cm²

图 2 HCPEB 处理 FeCrAl 涂层表面 SEM 形貌

Fig.2 SEM images showing surface morphology of HCPEB-treated FeCrAl coatings

可以看到, 经 HCPEB 处理后, 原始涂层表面的松散颗粒状结构转变为分离的包状凸起, 表面总体变得致密光滑, 在凸起边缘均可观察到少量裂纹产生。随使用能量密度的增加, 表面凸起结构尺寸逐渐增大。关于原始涂层表面粗糙度优化控制, 还将在后续研究工作中加以考虑。

图 3 为经 HCPEB 处理的 FeCrAl 涂层截面组织形貌。可以看出, 涂层表面已发生明显重熔, 形成不

连续的球冠状起伏结构, 凸起之间的涂层厚度减小。凸起内部能观察到致密的柱状晶组织, 晶粒沿与涂层近似垂直方向排列。与表面观察的结果一致, 球冠状凸起的体积和突出高度都会随着入射电子束能量密度的增加而变大。对应 20 J/cm^2 处理时, 表面改性层平整连续 (图 3a), 当能量密度增加到 40 J/cm^2 时, 凸起结构的高度已接近整个涂层的厚度, 边缘有贯穿整个涂层的裂纹出现, 如图 3d 所示。

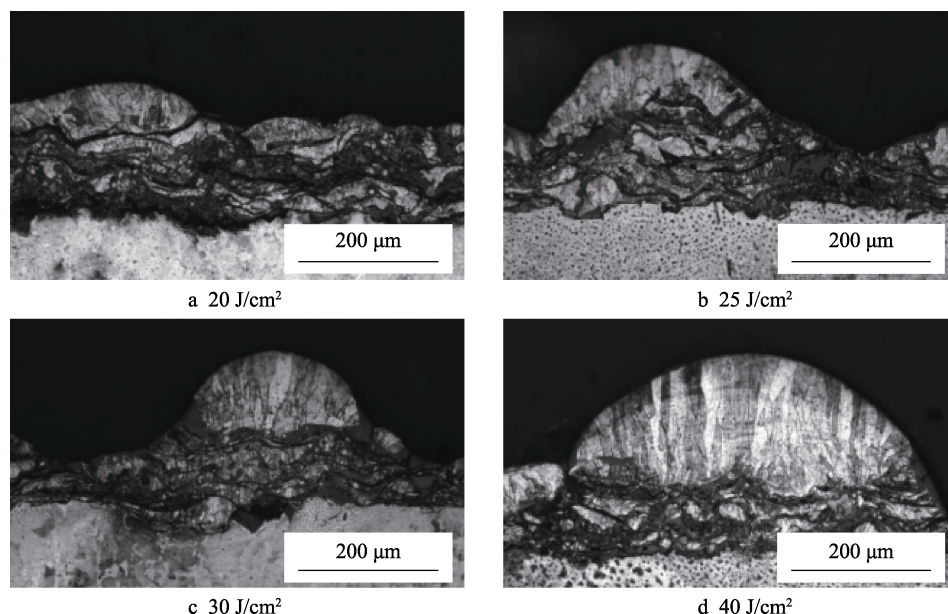


图 3 HCPEB 重熔处理 FeCrAl 涂层截面金相形貌

Fig.3 OM images showing cross-section morphology of HCPEB-treated FeCrAl coatings

经 HCPEB 处理后, FeCrAl 涂层表面形貌发生显著变化, 形成大量的包状凸起。其中, 对应使用较低的能量密度 20 J/cm^2 时, 凸起结构主要是由原始涂层表面局部松散的起伏颗粒重熔凝固形成, 处理表面变得相对平整致密。当使用更高的 HCPEB 能量时, 涂层表面的熔化深度增加, 表层高温持续时间延长, 熔体冷却凝固过程相应减缓, 此时分离的熔体之间会发生融合兼并。随后的冷却凝固过程中, 表面熔体一方面沿着与基体垂直的散热方向迅速生长为柱状晶, 另一方面受到界面能最小化驱动和液固转变体积收缩因素的影响, 在涂层表面形成球冠状凸起结构。

2.2 EPMA 成分测试

图 4 为电弧喷涂 FeCrAl 涂层截面的电子探针元素面扫描分析结果, 其中图 4a 为测量区域的背散射电子形貌, 图 4b—e 分别对应 Fe、Cr、Al、O 元素面扫描结果。可见, 涂层基体主要含有 Fe、Cr 元素, Al、O 元素的分布位置基本重合, 说明 Al 元素在喷涂过程中更容易发生氧化, Al、O 元素主要分布在以 Fe、Cr 元素为主体的变形粒子之间, 对应图 4a 中颜色较深的位置。

图 5 是经 HCPEB 能量密度 25 J/cm^2 处理的涂层

的截面电子探针元素面扫描分析结果。可以看出, 对应球冠状凸起的重熔层中主要含有均匀分布的 Fe、Cr 和 Al 元素, O 元素含量极低, 而在凸起结构表面和周围凹陷位置出现 Al 和 O 元素的富集现象。

2.3 X 射线衍射分析

图 6 为原始 FeCrAl 涂层和经 HCPEB 不同能量参数处理的样品的 X 射线衍射分析结果。原始涂层主要由 Fe-Cr 相构成, 含有少量的 Fe_2O_3 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相成分。经 HCPEB 处理后, 对应 Fe-Cr 相的衍射峰无明显变化, Fe_2O_3 相的衍射峰值消失, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相的衍射峰有所增强。 Fe_2O_3 相的消失可以由 HCPEB 处理过程特有的选择蒸发效应进行解释, 即入射电子的穿透式能量沉积模式使材料次表层率先熔化, 熔体膨胀受到表面覆盖层约束, 而高温表层中存在的成分和结构差异位置呈现热应力集中, 进而产生局部熔体喷发现象, 在应力得以释放的同时, 此处存在的异质相或结构缺陷会得到明显去除和修复。更多关于 HCPEB 作用下的熔坑形成机理和选择净化效应可参考文献 [11-13]。对于本研究工作中使用的长脉宽 HCPEB, 表层 Fe_2O_3 相的去除过程主要发生在 HCPEB 脉冲能量注入初期, 分布于浅表层的 Fe_2O_3 相作为异质结构

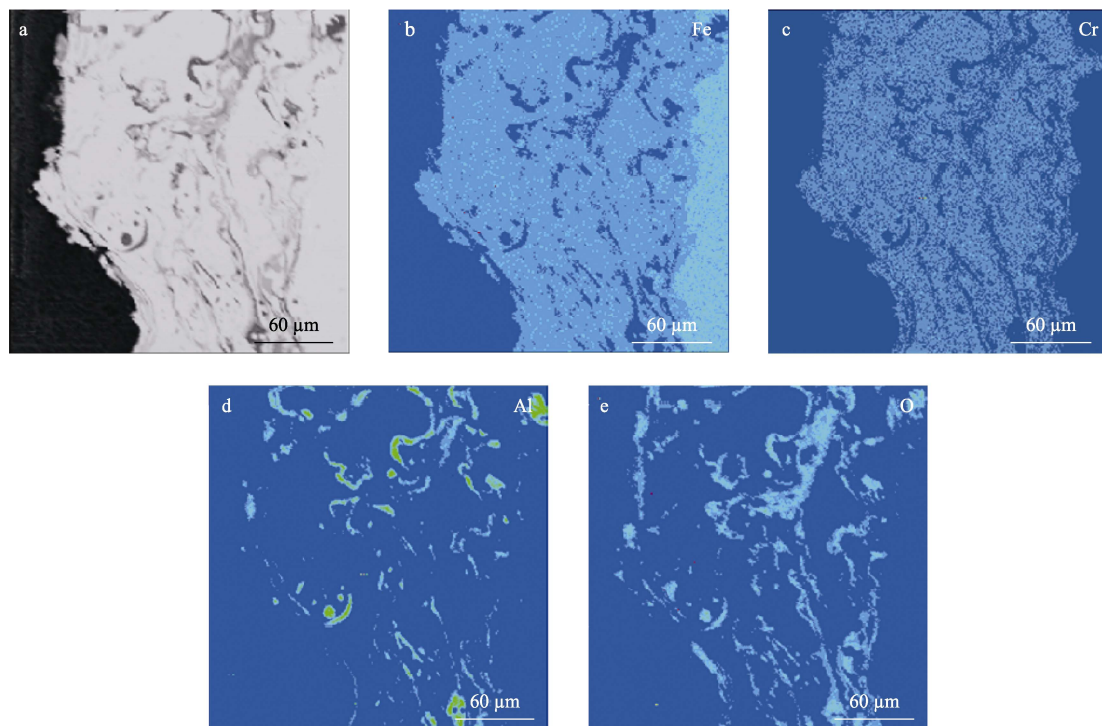
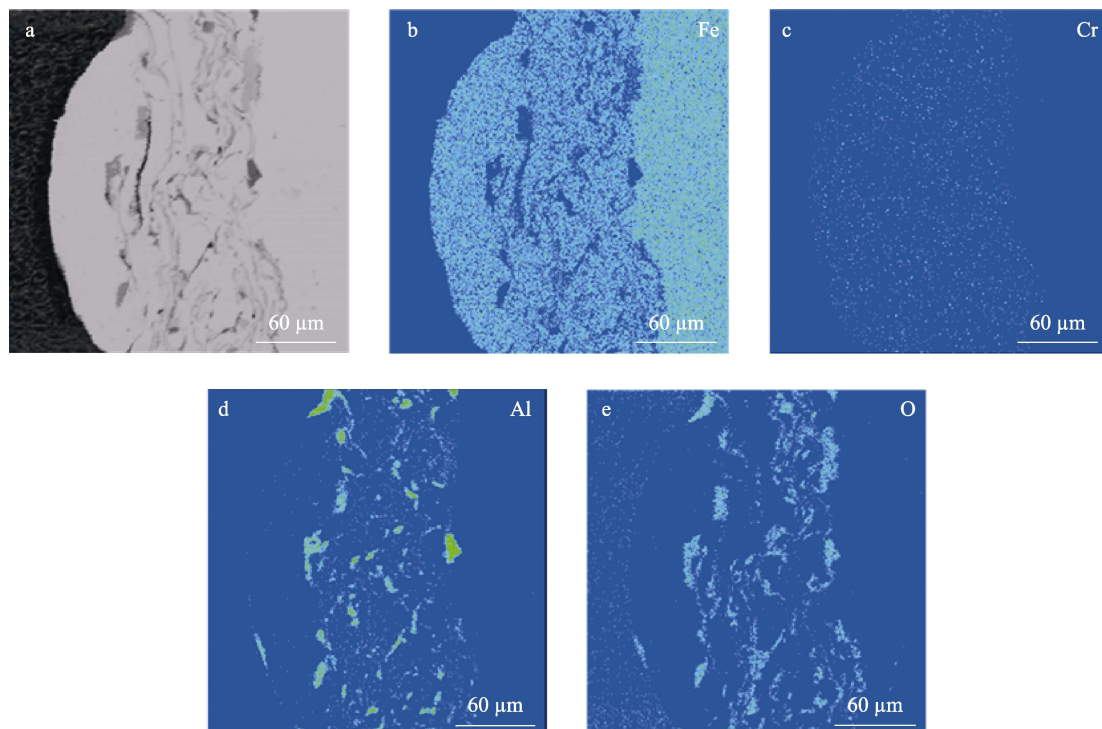


图 4 电弧喷涂 FeCrAl 涂层截面 EPMA 面扫描结果

Fig.4 EPMA map scanning results showing the element distribution on the cross section of arc-sprayed FeCrAl coating

图 5 经 HCPEB 能量密度 25 J/cm^2 处理的样品截面 EPMA 面扫描结果Fig.5 EPMA map scanning results showing the element distribution on the cross section of HCPEB-treated FeCrAl coating with energy density of 25 J/cm^2

被迅速选择喷发去除。经 HCPEB 处理后, 涂层表面覆盖少量 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相, 这对提高涂层表面耐蚀性能十分有利。对比不同谱线中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相衍射峰, 发现随着 HCPEB 能量密度的增加, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相衍射强度有降低趋势。结合图 5 中关于 Al、O 元素的分布测量结

果, 可知 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 更多集中在表面凸起结构间的凹陷位置。说明表面涂层被电子束熔化时, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相受熔体表面张力排斥, 向熔池边缘位置流布, 而凝固表面的凸起结构尺寸变化会对 X 射线衍射中的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相测量造成影响, 表现为衍射峰强逐渐下降。

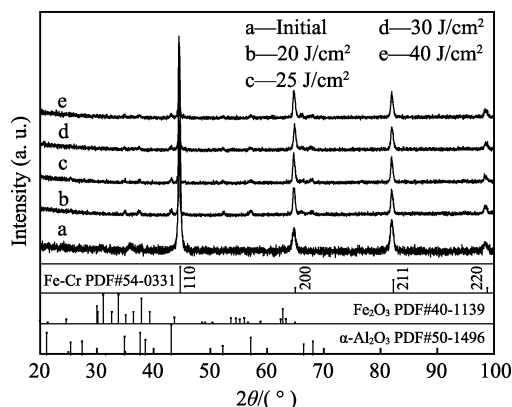


图 6 电弧喷涂 FeCrAl 涂层及 HCPEB 处理样品的 XRD 图
Fig.6 XRD patterns of arc-sprayed and HCPEB-treated FeCrAl coatings

2.4 高温腐蚀性能

在温度 650 °C 下, 以 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{K}_2\text{SO}_4$ 饱和盐溶液为工况模拟腐蚀介质, 对原始电弧喷涂 FeCrAl 涂层及 HCPEB 处理样品进行高温腐蚀性能测试, 结果如图 7 所示。可以看到, 在高温腐蚀测试的开始阶段, 经 HCPEB 处理的涂层表现出更好的耐蚀性能, 腐蚀增重较原始 FeCrAl 涂层要慢。随着高温腐蚀时间的延长, 使用 HCPEB 不同能量密度处理的涂层, 高温腐蚀增重表现出明显差别。经过 120 h 后, 原始涂层表面腐蚀增重 63.8 mg/cm^2 , 经 HCPEB 能量密度 20 J/cm^2 处理样品腐蚀增重 51 mg/cm^2 , 较原始涂层减少 20%。随着 HCPEB 能量密度的提高, 涂层表面耐高温腐蚀性能逐渐降低, 使用能量密度 25 J/cm^2 时,

处理涂层的耐高温腐蚀性能接近原始涂层, 而经 40 J/cm^2 处理样品的腐蚀增重较原始涂层多出近一倍。

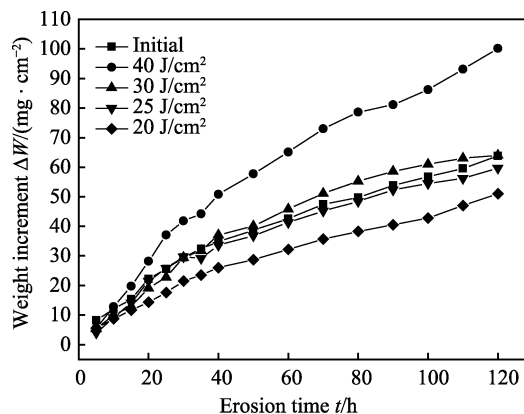


图 7 电弧喷涂 FeCrAl 涂层及 HCPEB 处理样品的高温腐蚀增重曲线

Fig.7 Weight increment of arc-sprayed and HCPEB-treated FeCrAl coatings measured in high-temperature erosion testing

图 8 给出了经高温腐蚀性能测试后涂层表面的形貌对比图。可以看出, 原始 FeCrAl 涂层表面发生严重腐蚀, 形成大量疏松的颗粒状腐蚀产物, 腐蚀痕迹遍及整个表面。经 HCPEB 能量密度 20 J/cm^2 处理后, 涂层表面基本保持光滑平整状态, 腐蚀产物大大减少。对应 25 J/cm^2 处理的涂层, 表面凸起结构部位发生明显腐蚀, 而凹陷位置总体保持光滑平整。其原因是, 由于此处 Al 元素富集, 形成较高含量的 Al_2O_3 相成分, 但沿裂纹和局部缺陷处仍有腐蚀现象发生。

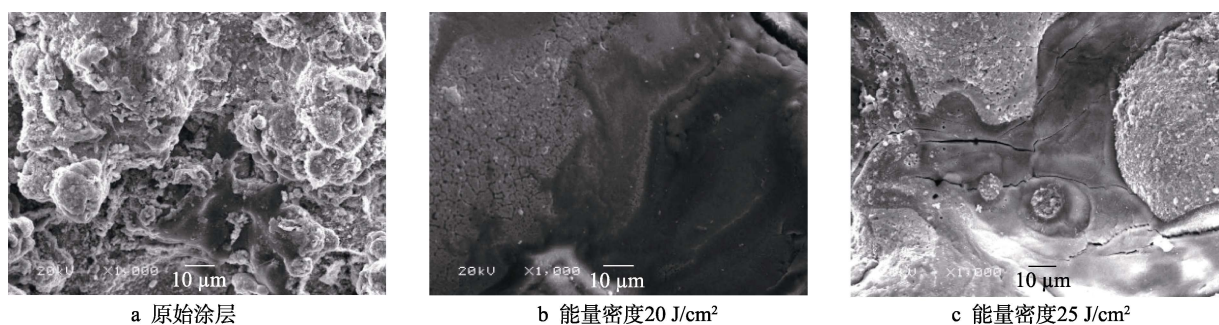


图 8 电弧喷涂 FeCrAl 涂层及 HCPEB 处理样品表面高温腐蚀形貌

Fig.8 SEM images showing the surface morphology of arc-sprayed FeCrAl coating and HCPEB-treated sample after high temperature erosion testing: a) original coating; b) energy density of 20 J/cm^2 ; c) energy density of 25 J/cm^2

上述现象说明, HCPEB 处理对电弧喷涂 FeCrAl 涂层耐高温腐蚀性能的影响是双重的。当使用较低能量密度 (20 J/cm^2) 时, 涂层表面发生重熔, 形成相对致密平整的改性层, 可以有效减少与高温腐蚀介质的接触面积, 同时以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为主的表面相成分可有效减缓高温下的腐蚀进程^[6]。使用过高的 HCPEB 能量密度进行处理时, 涂层表面形成巨大的凸起结构, 相邻的凹陷处涂层有效厚度减少, 并有贯穿裂纹出现, 涂层的结构完整性遭到破坏, 导致改性涂层的耐

高温腐蚀性能发生恶化。

3 结论

对电弧喷涂 FeCrAl 涂层进行强流脉冲电子束 (HCPEB) 表面改性处理, 涂层表层发生重熔, 原始粗糙疏松的涂层组织变得光滑致密, 表面出现分离的球冠状凸起结构, 凸起内部由紧密排列的 Fe-Cr 柱状晶组成, Al 元素向凸起结构的表面和周围凹陷处

聚集。随 HCPEB 能量密度的增大, 凸起结构尺寸增加, 分布于浅表层的 Fe_2O_3 相受选择净化效应得以去除, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相含量增多, 且集中在表面凸起结构间的凹陷位置。120 h 高温腐蚀后, 经能量密度 20 J/cm^2 处理的 FeCrAl 涂层样品的腐蚀增重为 51 mg/cm^2 , 较原始涂层减少 20%, 而使用过高的 HCPEB 能量密度会导致 FeCrAl 涂层耐高温腐蚀性能变差。

参考文献:

- [1] LIU G M, ROZNIATOWSKI K, KURZYDLOWSKI K J. Quantitative characteristics of FeCrAl films deposited by arc and high-velocity arc spraying[J]. Materials characterization, 2001, 46: 99-104.
- [2] REGINA J R, DUPONT J N, MARDER A R. The effect of water vapor on passive-layer stability and corrosion behavior of Fe-Al-Cr base alloys[J]. Oxidation of metals, 2004, 61: 69-90.
- [3] TOLPYGO V K, VIEFHAUS H. Segregation at the Al_2O_3 -FeCrAl interface during high-temperature oxidation[J]. Oxidation of metals, 1999, 52: 1-29.
- [4] ZHANG Z L, LI D Y, DONG X Q. Microstructural study of Fe-Cr-Al/Al composite coatings during oxidation and sulfidation at 900°C [J]. Acta metallurgica sinica (english letters), 2007, 20: 87-94.
- [5] 陈永雄, 魏世丞, 刘燕, 等. 电弧喷涂抗热腐蚀/海水腐蚀双层复合涂层的制备及其组织分析[J]. 材料保护, 2008, 41(10): 36-39.
CHEN Y X, WEI S C, LIU Y, et al. Process and structure study on arc sprayed double-layer composite coating with heat and sea-water corrosion resistance[J]. Materials protection, 2008, 41(10): 36-39.
- [6] CAI J, LV P, GUAN Q F, et al. Thermal cycling behavior of thermal barrier coatings with MCrAlY bond coat irradiated by high-current pulsed electron beam[J]. ACS applied materials & interfaces, 2016, 8: 32541-32556.
- [7] 韩志勇, 丘珍珍, 史文新. CoCrAlY 表面改性后热障涂层高温氧化及热震性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 19-22.
HAN Z Y, QIU Z Z, SHI W X. High temperature oxidation and thermal shock resistance of CoCrAlY surface modified thermal barrier coatings[J]. Transactions of the China welding institution, 2019, 40(6): 19-22.
- [8] PROSKUROVSKY D I, ROTSHEIN V P, OZUR G E, et al. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams[J]. Surface and coatings technology, 2000, 125: 49-56.
- [9] PROSKUROVSKY D I, ROTSHEIN V P, OZUR G E, et al. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials[J]. Journal of vacuum science & technology A, 1998, 16: 2480-2488.
- [10] HAO S Z, WANG H H, LI X N, et al. Design and experimental study of penning discharge plasma anode for high current pulsed electron beam source [J]. Vacuum, 2016, 127: 61-64.
- [11] HAO S Z, GAO B, WU A M, et al. Surface modification of steels and magnesium alloy by high current pulsed electron beam[J]. Nuclear instruments methods in physics research section B, 2005, 240: 646-652.
- [12] QIN Y, ZOU J X, DONG C, et al. Temperature-stress fields and related phenomena induced by a high current pulsed electron beam[J]. Nuclear instruments methods in physics research section B, 2004, 225: 544-554.
- [13] PENG W H, HAO S Z, CHEN J, et al. Surface composite microstructure and improved mechanical property of YG10X cemented carbide induced by high current pulsed electron beam irradiation[J]. International journal of refractory metals & hard materials, 2019, 78: 233-239.
- [14] ZHANG C L, GAO Q, LV P, et al. Surface modification of Cu-W powder metallurgical alloy induced by high-current pulsed electron beam[J]. Powder technology, 2018, 325: 340-346.
- [15] 何吉东, 高波, 胡亮, 等. 电子束对稀土铝硅合金表面形貌及硬度的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 153-158.
HE J D, GAO B, HU L, et al. Effects of HCPEB on morphology and hardness of Al-Si alloy with rare earth element[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 153-158.
- [16] CAI J, GUAN Q F, YANG S Z, et al. Microstructural characterization of modified YSZ thermal barrier coatings by high-current pulsed electron beam[J]. Surface & coatings technology, 2014, 254: 187-194.
- [17] 罗天星, 周志明, 黄灿, 等. 强流脉冲电子束处理 50BA 钢耐腐蚀性能[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 197-201.
LUO T X, ZHOU Z M, HUANG C, et al. Corrosion resistance 50BA steel treated with high current pulsed electron beam[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 197-201.
- [18] PENG W H, HAO S Z, ZHAO L M, et al. Formation mechanism of graphite nanospheres in W-C-Co system under high current pulsed electron beam irradiation[J]. Materials letters, 2019, 244: 207-210.