

电流密度对碳钢微弧氧化层耐液态 铅铋腐蚀性能的影响

朱强, 陈文彬, 雷玉成, 赵军

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘 要: **目的** 提高碳钢耐液态 Pb-Bi 耐腐蚀性能。**方法** 采用熔钎焊的方法, 对 6061 铝合金和 Q235 钢进行搭接焊, 焊后采用微弧氧化技术在焊接接头制备微弧氧化陶瓷层, 将其放入 350 °C 的高温液态 Pb-Bi 中进行 300 h 静态腐蚀试验。**结果** 选用钨极氩弧焊机, 用 ER4043 焊丝作为钎料, 通过调节焊接参数, 在焊接电流为 85 A、焊接速度为 140 mm/min 的参数下, 铝层与 Q235 钢的结合强度达到 182 MPa, 金属间化合物厚度为 7.3 μm 。在 2 g/L KOH+4 g/L $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 的电解液中进行微弧氧化试验, 放电孔洞直径和数量随着电流密度的增大而增加。通过对比发现, 在 10 A/dm² 下生成的氧化膜层厚度适宜, 同时致密性较好, 陶瓷层由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 组成。经过静态腐蚀后, Q235 碳钢母材试样表面被明显腐蚀, 而 Q235 钢微弧氧化后的试样则有较好的耐腐蚀性能, 其中 10 A/dm² 电流密度参数下制得的氧化膜层耐蚀性能最优。**结论** 微弧氧化陶瓷膜层可显著提高材料在高温液态 Pb-Bi 合金中的耐腐蚀性能, 且膜层致密性和厚度会影响其对材料的保护作用。

关键词: 熔钎焊; 微弧氧化; 陶瓷层; 电流密度; 液态 Pb-Bi 腐蚀

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)02-0193-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.028

Effect of Current Density on Liquid Pb-Bi Corrosion Resistance of Carbon Steel Micro-arc Oxidation Layer

ZHU Qiang, CHEN Wen-bin, LEI Yu-cheng, ZHAO Jun

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the corrosion resistance of carbon steel in liquid Pb-Bi. The 6061 aluminum alloy and Q235 steel were lap welded by fusion brazing method. After welding, micro-arc oxidation technology was used to prepare micro-arc oxidation ceramic coating on the welded joint. Then the micro-arc oxidation samples were put into 350 °C liquid Pb-Bi for 300 h static corrosion test. The tungsten argon arc welding machine was used, and the ER4043 welding wire was selected as the brazing material. By adjusting the welding parameters, the bonding strength of the aluminum layer and the Q235 steel reached 182 MPa and the intermetallic compound thickness was 7.3 μm under the parameters of welding current of 85 A and welding speed of 140 mm/min. Micro-arc oxidation experiments were carried out in 2 g/L KOH and 4 g/L $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ electrolytes. The diameter and number of discharge holes increased with the increase of current density. By comparison, it was found

收稿日期: 2018-07-21; 修订日期: 2018-09-11

Received: 2018-07-21; Revised: 2018-09-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51505197)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation Youth Fund Project of China (51505197)

作者简介: 朱强 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为焊接技术与焊接制造工艺。邮箱: zhuqng@163.com

Biography: ZHU Qiang (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: welding technology and welding manufacturing technology. E-mail: zhuqng@163.com

that the thickness of the oxide coating formed at 10 A/dm^2 was suitable and the compactness was good. The ceramic coating was composed of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. After static corrosion, the surface of Q235 carbon steel base material was obviously corroded, while Q235 steel sample after micro-arc oxidation had better corrosion resistance. The corrosion resistance of oxide coating obtained under 10 A/dm^2 current density was the best. The micro-arc oxidation ceramic coating can significantly improve the corrosion resistance of the material in high temperature liquid Pb-Bi alloy, and the compactness and thickness of the coating will affect the protective effect on the material.

KEY WORDS: fusion brazing; micro-arc oxidation; ceramic layer; current density; liquid Pb-Bi corrosion

在未来核反应堆循环回路中,其核心部件核主泵需要为高温液态 Pb-Bi 合金在循环回路中的流动提供动力^[1-3],而高温液态 Pb-Bi 合金会对此类系统主泵的泵体、泵叶等部件产生腐蚀作用,从而影响核工程部件的使用寿命^[4]。若能够通过表面强化技术在这些结构材料表面获得具有耐高温液态 Pb-Bi 合金腐蚀能力的表面防护层,将有效地提高核工程关键部件的使用寿命。

微弧氧化技术是一种新兴的表面强化处理技术,生成的陶瓷膜层耐磨性、耐腐蚀性和耐热冲击性能优异^[5-6]。因此,在钢铁材料的表面覆盖一层性能优异的微弧氧化陶瓷层,并探究其在高温液态 Pb-Bi 中的耐腐蚀性能,对于推广微弧氧化技术,提高流核反应堆系统关键部件的使用寿命提供了重要的参考价值。但对于钢铁材料来说,由于材料本身的物理及化学性能的原因,在其表面原位生长出连续、性能优异的微弧氧化陶瓷层非常困难,诸多学者在对钢铁材料表面微弧氧化技术进行研究时,通常采用以制备铝层为主的过渡中间层的方法,先将铝涂层覆盖在钢铁材料表面,然后再把铝层氧化制成微弧氧化层,以起到保护材料的目的。

本文以常用结构钢材料(Q235 钢)为研究对象,采用复合方法在其表面制备一层微弧氧化陶瓷层,并研究陶瓷层在高温液态 Pb-Bi 中的耐腐蚀性能。结合相关文献^[7],先通过熔钎焊的方法在 Q235 钢表面制备一层铝基中间层,然后对中间层进行微弧氧化,制得的氧化层在高温液态 Pb-Bi 中能够对钢基体材料起到一定的保护作用,这对后续关于核工程结构材料表面陶瓷层在高温液态 Pb-Bi 中耐蚀性能的提高有重要的理论意义。

1 试验

1.1 Q235 钢表面铝层的制备

本文选用 6061 铝合金和 Q235 碳钢进行异种金属的熔钎焊连接,利用两种材料熔点的不同,在焊接过程中,选择合理的热输入量,在 Q235 碳钢不发生熔化的情况下,熔融的铝母材与填充金属一起在碳钢表面铺展,通过原子扩散机制实现钢侧的钎焊链接以及铝侧的熔焊链接。试验前将 Q235 钢板和 6061 铝

板打磨光亮,除去表面的氧化皮,并用丙酮清洗干净。选用 TIG 熔钎焊的方法,将 ER4043 焊丝作为钎料,为方便进行拉伸性能试验,检测铝层与钢基体的结合强度,采用 Q235 碳钢在下,6061 铝合金在上搭接焊的焊接方法,搭接宽度约为 10 mm(如图 1 所示)。经过大量的试验,获得钨极偏向铝侧 1 mm 的试件,其铝合金铺展面积大,焊缝成形美观、结合强度高(焊缝形貌见图 2)。

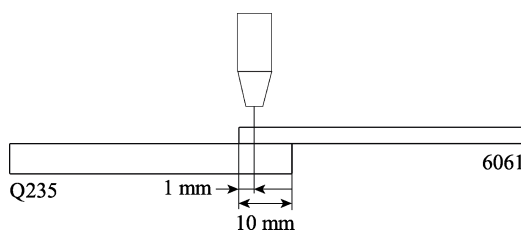


图 1 焊接示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding

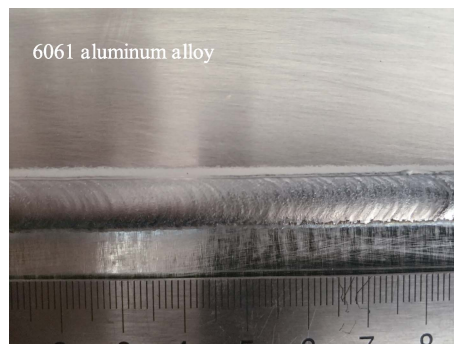


图 2 焊缝形貌

Fig.2 Morphology of welded joint

1.2 Q235 钢表面微弧氧化

将经 TIG 熔钎焊所获得的试件沿搭接处切割出 $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的微弧氧化样品,并将焊缝余高打磨平整。试样用丙酮清洗干净后,用钻孔机在试样背面边缘打直径 2.5 mm、深度 2 mm 的孔洞,将铝丝拧进试样的孔洞中作为挂具,并用玻璃胶将试样包裹严实,仅露出待微弧氧化的表面。随后采用南京工业大学自制的试验设备,在 $2 \text{ g/L KOH} + 4 \text{ g/L Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 的电解液中,保持其他工艺参数不变,改变电流密度进行对比试验。

1.3 Q235 钢表面陶瓷膜层在高温液态 Pb-Bi 中的腐蚀试验

高温液态 Pb-Bi 腐蚀试验装置如图 3 所示。腐蚀试验前, 打开炉盖, 将微弧氧化后以及未进行微弧氧化的 Q235 试样固定在试样台上, 随后关闭炉盖, 抽气至真空状态, 加热升温至 350 ℃, 待固态铅铋熔化成液态后, 将试样台降至液态 Pb-Bi 界面下 10 cm 左右, 并充高纯氩气作为保护气体, 保持试样台静止, 模拟高温液态 Pb-Bi 静态腐蚀环境进行 300 h 腐蚀试验。

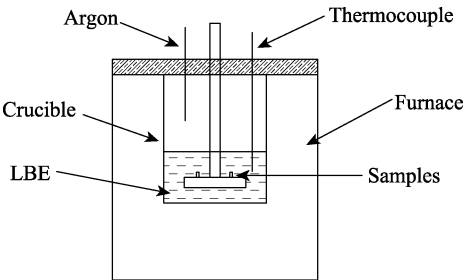


图 3 腐蚀试验装置内部结构示意图
Fig.3 Schematic diagram of internal structure of corrosion test device

2 结果和分析

2.1 焊接试样的抗拉强度和微观结构

通过对比一些前期的熔钎焊试验结果发现, 保持在送丝速度为 0.32 m/s, 氩气流量为 10 L/min 的条件下, 将焊接电流控制在 80~90 A 之间, 焊接速度控制在 100~140 mm/min 之间时, 焊缝外观成形较好。表 1 所列数据为不同参数下熔钎焊后焊接接头的抗拉强度。可以看出, 将焊接电流固定为 85 A, 焊接速度由 100 mm/min 逐渐增加到 140 mm/min 时, 接头的抗拉强度显著提高。而保持焊接速度在 140 mm/min 不变的条件下, 接头的抗拉强度与焊接电流并非线性关系: 逐渐增加焊接电流, 接头的抗拉强度呈先增加后降低的趋势。文献[8]中认为接头性能还与铝/钢界面处化合物层的厚度和微观形貌有关, 本试验中参数 4 下, 结合强度最高, 达到 182 MPa。

表 1 不同焊接参数条件下接头的抗拉强度
Tab.1 Tensile strength of joints under different welding parameters

No.	Welding current/A	Wire feed speed/(m·min ⁻¹)	Welding speed/(mm·min ⁻¹)	Welding voltage/V	Tensile strength/MPa
1	80	0.32	140	14.2	151
2	85	0.32	100	14.2	131
3	85	0.32	120	14.2	145
4	85	0.32	140	14.2	182
5	90	0.32	140	14.2	137

图 4 为参数 4 下的界面层微观形貌。由图看出化合物界面层靠近熔化区一侧呈细小锯齿状, 靠近钢侧呈条状, 其厚度为 7.3 μm。相关研究指出, 金属间化合物层的厚度控制在 10 μm 以内时, 结合强度高^[9-10]。此外, 细小锯齿状的化合物层渗入到铝合金基体并与融化的铝合金基体相结合, 可以使组织更加稳固^[11], 并且在焊接冷却过程中, 防止因冷却速度过快而萌生的裂纹的进一步扩散, 从而提高焊接接头结合强度。

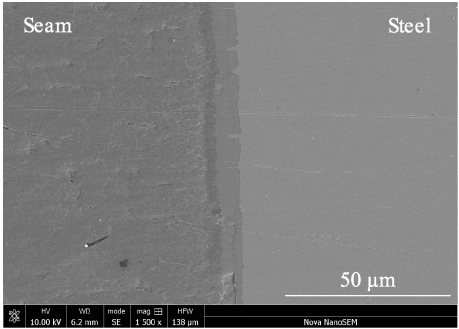


图 4 界面区金属间化合物微观形貌图
Fig.4 Microscopic topography of intermetallic compounds in interface region

2.2 微弧氧化陶瓷层的结构和性能分析

2.2.1 微弧氧化电流密度对陶瓷层组织的影响

在 2 g/L KOH+4 g/L Na₂SiO₃·9H₂O 的电解液中进行微弧氧化试验, 试验基本工艺参数为: 时间 30 min, 脉冲频率 200 Hz, 占空比 12%。微弧氧化过程中, 电流密度是一个重要参数, 通过前期试验发现, 电流密度增加, 试样表面放电现象更剧烈, 但当电流密度过大时, 试样表面电压升高过快, 在 20 min 后电压超过 650 V, 造成试样表面烧蚀严重。故本试验中, 微弧氧化电流密度分别控制为 5、10、15 A/dm²。

图 5 为保持其他参数不变, 电流密度分别为 5、10、15 A/dm²时电压随时间变化的曲线。由图可以看出, 三条曲线的整体变化趋势相一致, 表现为电压随

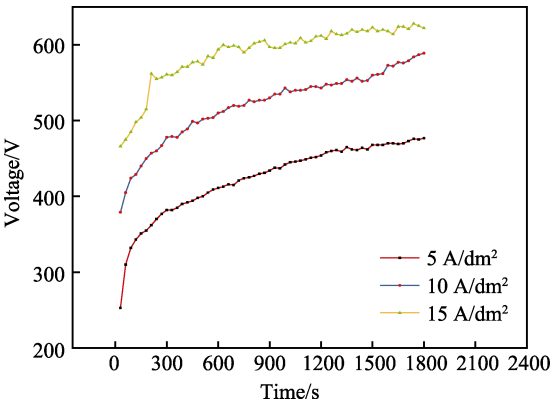


图 5 不同电流密度下微弧氧化的电压-时间曲线
Fig.5 Micro-arc oxidation voltage-time curves under different current densities

着时间的延长而升高。当电流密度为 5 A/dm^2 时,即在微弧氧化初期,试样表面初始电压为 253 V,后由于施加的电流过小,单个脉冲能量小,最终电压为 477 V。电流密度为 10 A/dm^2 时,在相同的脉冲频率下,由于单个脉冲能力增加,相应的初始电压和终止电压也都有所增加。当电流密度增大到 15 A/dm^2 时,微弧氧化初期电压达到 466 V,最终电压超过 600 V,对比 10 A/dm^2 时的情况,其试样表面放电现象更加剧烈,并伴随着刺耳的爆鸣声。

表 2 是陶瓷层厚度的变化情况。在进行微弧氧化时,保持其他参数不变,增大电流密度,微弧放电过程中对陶瓷层的击穿能量随之增大,导致反应更剧烈,更多熔融的氧化物从击穿放电过程留下的通孔中喷射而出,在电解液的冷却下,凝固聚集在试样表面的放电通孔周围,从而迅速增大陶瓷膜层厚度。结合图 5 所示曲线可以发现,在同一时间段,电流密度越大,微弧氧化反应电压越大,试样表面反应更加激烈,氧化层生长迅速。图 6 为微弧氧化试样截面形貌,如

表 2 不同电流密度下所得试样陶瓷层厚度
Tab.2 Ceramic coating thickness of samples under different current densities

Current density/ $(\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	Ceramic layer thickness/ μm
5	17.0
10	36.6
15	54.3

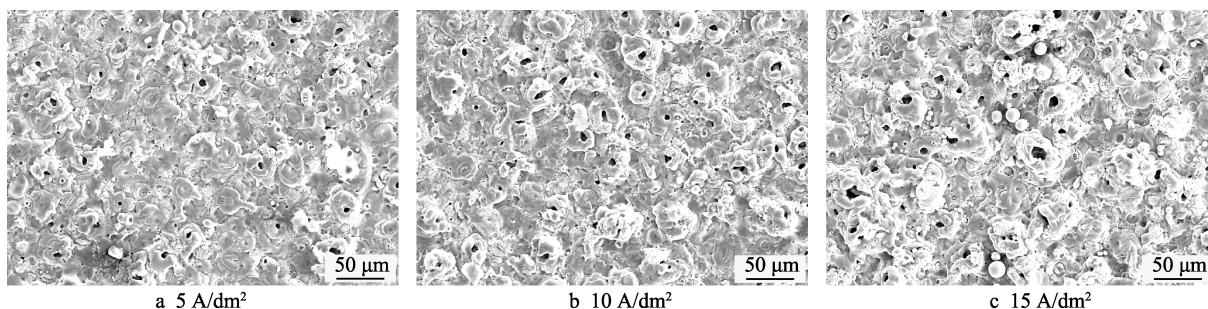


图 7 不同电流密度下陶瓷层的表面 SEM 图

Fig.7 SEM images of ceramic layer surface under different current densities

2.2.2 Q235 钢表面微弧氧化陶瓷层的组成

图 8 是在微弧氧化时间为 30 min, 频率为 200 Hz, 电流密度为 10 A/dm^2 , 占空比为 12% 的条件下, 试样表面陶瓷层的 XRD 图。由图可知, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为其主要组成相, Al 相来自于未被微弧氧化的铝, 由于放电孔洞的存在, X 射线能够透过放电孔洞作用于铝层^[15], 因此能够检测到 Al 元素的存在。

2.2.3 Q235 钢微弧氧化陶瓷层在液态 Pb-Bi 中的腐蚀行为

将微弧氧化后的试样和 Q235 母材试样 (编号如表 3 所示) 放入 350°C 的高温液态 Pb-Bi 环境中进行 300 h 的耐蚀性试验。图 9 为腐蚀试验后 4 组试样的

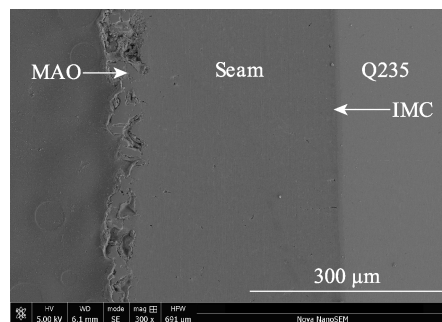


图 6 试样截面形貌

Fig.6 Cross-section morphology of sample

图所示, 从左到右依次为陶瓷层、铝层、金属间化合物层、钢基体。

图 7 所示为在电流密度分别为 5、10、 15 A/dm^2 条件下所得陶瓷膜层表面的微观形貌。可以看出, 陶瓷膜层表面均生成了“火山口”状的放电孔洞, 并且表面放电孔洞的孔径大小和数量均随着电流密度的增加而增大。由文献[12-13]可知, 陶瓷层的致密性主要表现为单位面积内放电孔洞的数量和孔径的大小, 故电流密度增加, 陶瓷膜层致密性降低。试验中保持其他参数不变, 增大电流密度, 微弧氧化单个脉冲放电对陶瓷层的击穿能力更强, 从而使表面放电通孔的直径增大。同时, 单个脉冲的能量增加导致更多的氧化物经过通孔喷出, 并在孔洞周围堆积^[14]。本试验中, 在 10 A/dm^2 条件下生成的氧化陶瓷膜层具备一定的厚度, 同时致密性较好。

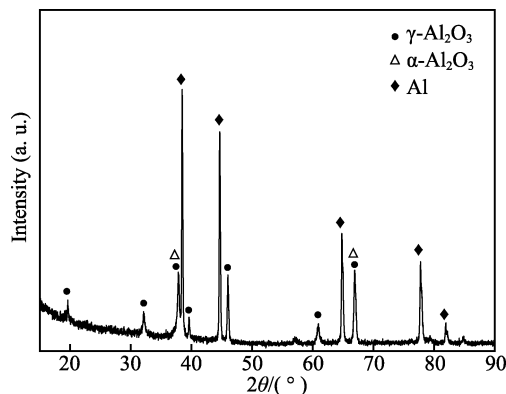


图 8 试样表面陶瓷层 XRD 图

Fig.8 XRD pattern of the ceramic layer on the surface of the sample

表 3 静态腐蚀试验试样编号
Tab.3 Number of specimen for static corrosion test

Samples	Material	Microarc oxidation parameters
1	Q235 steel micro-arc oxidation sample	5 A/dm ² , 30 min, 200 Hz, 12%
2	Q235 steel micro-arc oxidation	10 A/dm ² , 30 min, 200 Hz, 12%
3	Q235 steel micro-arc oxidation	15 A/dm ² , 30 min, 200 Hz, 12%
4	Q235 steel base material	

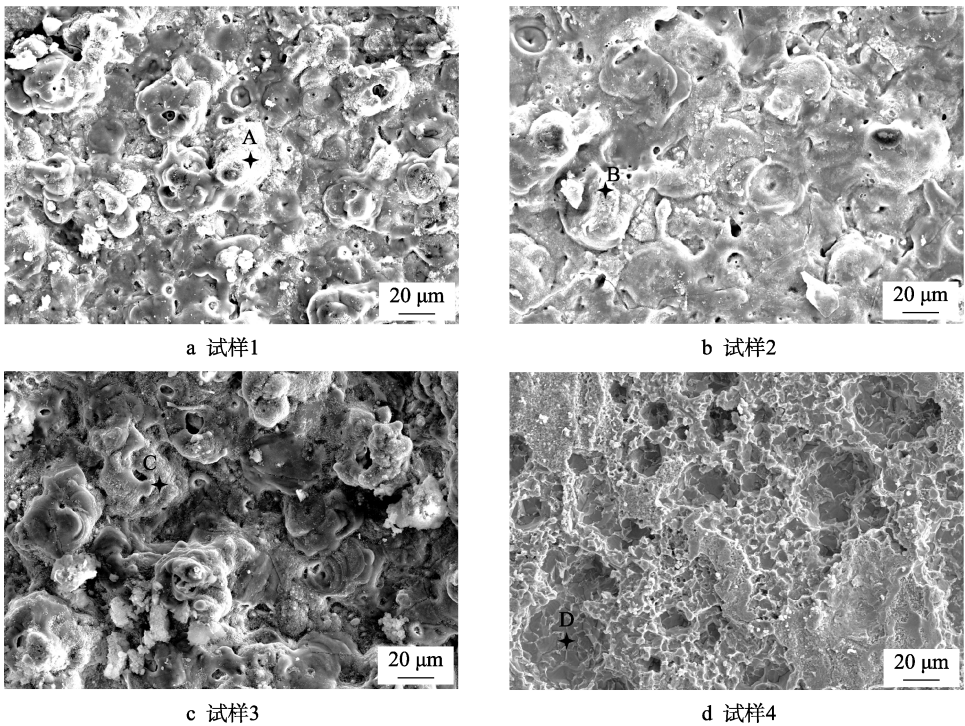


图 9 试样腐蚀后的表面形貌
Fig.9 Surface morphology of samples after corrosion: a) sample 1; b) sample 2; c) sample 3; d) sample 4

表面形貌图。其中，试样 1、2、3 表面均未出现明显的腐蚀现象，仍保持原有的陶瓷层形貌。分别对试样 1、2、3 表面“火山口”状放电孔周围进行 EDS 点扫描分析，扫描结果见表 4。发现 A、B、C 三处只含有极少量的 Pb 和 Bi，同时 Al、O 的百分比接近 2:3，说明试样 1、2、3 表面陶瓷层的物相组成没有发生变化，但 Pb-Bi 仍有可能通过放电孔洞渗透进陶瓷层。在试样 3 表面还发现少量白色残留物，推测可能为未清洗干净的铅铋。试样 4 为 Q235 母材，腐蚀后表面产生了严重的腐蚀现象，表面呈凹凸不平的沟壑状形貌，存在大量大小不一腐蚀坑。对 D 点进行 EDS 点扫描分析，扫描结果见表 5，发现 D 点主要为 Fe 元素和少量 O、Pb、Bi 元素，说明基体表面已被腐蚀，已经有 Pb-Bi 渗透进 Q235 钢。

图 10 为静态腐蚀试验后 4 组试样的截面 SEM 及 EDS 图。试样 1、2、3 截面与腐蚀前相比没有明显的变化，从左到右依次为陶瓷层、铝层、金属间化合物层、钢基体。结合 EDS 发现，3 组试样陶瓷层中均含有少量的 Pb、Bi 元素，铝层、金属间化合物层、钢基体中没有 Pb、Bi 元素。对比三组试样发现，在试

表 4 A、B、C 点处能谱分析结果
Tab.4 Energy spectrum analysis results at points A, B, and C %

Point	O	Al	Pb	Bi
A	59.08	38.84	0.48	0
B	63.93	35.32	0.12	0.07
C	65.85	32.42	0.92	0.02

表 5 D 点处能谱分析结果
Tab.5 Energy spectrum analysis results at point D %

Point	O	Fe	Pb	Bi
D	3.03	87.19	4.27	2.48

样 3 陶瓷层中 Pb、Bi 元素相对较多；试样 2 陶瓷层中 Pb、Bi 元素最少。分析认为，由于陶瓷层主要由化学活性低的 Al₂O₃ 组成，在静态的 Pb-Bi 环境中，不会发生元素的溶解，且陶瓷层相对致密，能够阻碍 Pb-Bi 的渗透，但仍有少量 Pb-Bi 通过陶瓷层表面的放电孔洞进入陶瓷层。而微弧氧化工艺参数中电流密度的变化会影响陶瓷层的致密性和厚度，电流密度为

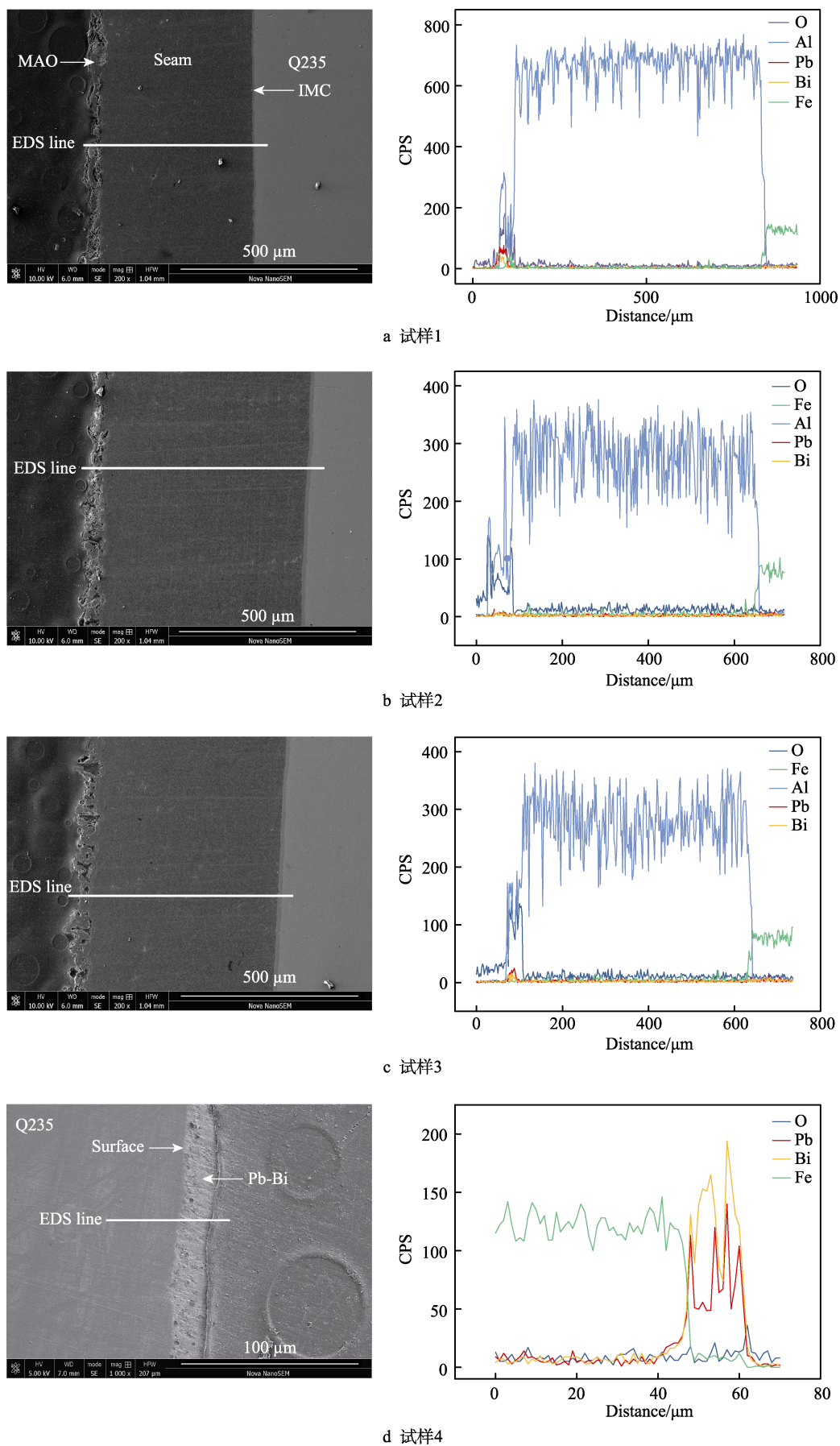


图 10 试样 1、2、3、4 腐蚀后截面的 SEM 及 EDS 图

Fig.10 Cross-section SEM and EDS of samples after corrosion: a) sample 1; b) sample 2; c) sample 3; d) sample 4

10 A/dm²时, 陶瓷层厚度大, 致密性好, 故试样2陶瓷层中 Pb、Bi 元素最少。而 Q235 钢母材截面出现了参差不齐的腐蚀坑, 表层发生了少量 Pb-Bi 的渗透。

综上可知, 经过 300 h、350 °C 的高温液态 Pb-Bi 静态腐蚀后, Q235 表面发现明显的腐蚀坑, 同时表层有微量的 Pb-Bi 渗透。而三组 Q235 钢表面微弧氧化试样没有出现腐蚀现象。这是因为, 陶瓷层阻碍了 Pb-Bi 向基体的渗透, 同时阻碍了基体中的 Fe 元素向液态 Pb-Bi 的溶解, 表明陶瓷层对基体有较好的保护作用。此外, 对比其他两组试样, 在 10 A/dm²的条件下制得的微弧氧化试样, 经高温液态 Pb-Bi 腐蚀后, 陶瓷膜层表面的 Pb、Bi 元素最少, 表现出最优的耐腐蚀性。微弧氧化陶瓷层对 Pb-Bi 的阻碍作用与其致密性和厚度有关, 厚度适宜, 致密性越高, 其耐高温液态 Pb-Bi 腐蚀性能越好。

3 结论

1) 在熔钎焊试验中, 在焊接电流 85 A, 焊接速度 140 mm/min, 送丝速度 0.32 m/min, 氩气流量 10 L/min 的工艺参数下, 在 Q235 钢表面制备了一层结合强度较高的铝层, 结合强度达到 182 MPa, 金属间化合物层厚度为 7.3 μm。

2) 在 2 g/L KOH、4 g/L Na₂SiO₃·9H₂O 的电解液中, 增大电流密度, 会使微弧氧化过程中单个脉冲放电对陶瓷膜层的击穿更加容易, 导致氧化层表面放电通孔的孔径增大, 更多的熔融氧化物从孔洞喷出, 从而使陶瓷层迅速增厚。在氧化时间 30 min、脉冲频率 200 Hz、占空比 12% 的条件下, 当电流密度 10 A/dm² 时生成的陶瓷层厚度适宜, 同时致密性较好。

3) 在 350 °C 的液态 Pb-Bi 中经过 300 h 的静态腐蚀后, Q235 钢母材有明显的腐蚀, 而 Q235 钢微弧氧化试样则有较好的耐腐蚀性能, 其中 10 A/dm² 电流密度参数下试样耐腐蚀性能最优, 陶瓷层的致密性和厚度会影响其保护作用。

参考文献:

- [1] MARTINELLI L, DUFRENOY T, JAAKOU K, et al. High temperature oxidation of Fe-9Cr-1Mo steel in stagnant liquid lead-bismuth at several temperatures and for different lead contents in the liquid alloy[J]. Journal of nuclear materials, 2008, 376: 282-288.
- [2] ARTÍN F J M, SOLER L, HERNÁNDEZ F, et al. Oxide layer stability in lead-bismuth at high temperature[J]. Journal of nuclear materials, 2004, 335: 194-198.
- [3] MÜLLER G, HEINZEL A, KONYS J, et al. Results of steel corrosion tests in flowing liquid Pb/Bi at 420~600 °C after 2000 h[J]. Journal of nuclear materials, 2002, 301: 40-46.
- [4] 许咏丽, 龙斌. ADS 结构材料在液态 Pb-Bi 合金中的腐蚀[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(4): 325.
XU Yong-li, LONG Bin. Corrosion behavior of materials in Liquid Pb-Bi eutectic[J]. Atomic energy science and technology, 2003, 37(4): 325.
- [5] 薛文斌, 邓志威, 来永春, 等. 有色金属表面微弧氧化技术评述[J]. 金属热处理, 2000(1): 1-3.
XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun, et al. Review of microarc oxidation technique on surface of non-ferrous metals[J]. Heat treatment of metals, 2000(1): 1-3.
- [6] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(z2): 18-26.
GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai, XU Hui-bin. Progress in thermal barrier coatings for advanced aeroengines[J]. Materials China, 2009, 28(z2): 18-26.
- [7] 许志武, 陈仁华, 李雪涛, 等. 纯 Al 与镀锌钢板 TIG 熔-钎焊接头的界面结构特征[J]. 焊接, 2010(2): 18-21.
XU Zhi-wu, CHEN Ren-hua, LI Xue-tao, et al. Interface structure of TIG welding-brazed joint of pure aluminum and zinc-coated steel[J]. Welding, 2010(2): 18-21.
- [8] 雷振, 于宁, 游爱清, 等. 5A02/Q235 钢 Nd: YAG 激光-脉冲 MIG 复合热源熔-钎连接[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 24-28.
LEI Zhen, YU Ning, YOU Ai-qing, et al. Fusion-brazing joining between 5A02 aluminium alloy and Q235 steel by Nd: YAG laser-pulsed MIG hybrid welding[J]. Transactions of the China welding institution, 2008, 29(6): 24-28.
- [9] 宋建岭. 铝合金/不锈钢预涂层 TIG 熔-钎焊特性与界面行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
SONG Jian-ling. Study on characteristics and interface behavior of precoating TIG welding-brazing of aluminum alloy to stainless steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [10] PEYRE P, SIERRA G, DESCHAUX B F, et al. Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting[J]. Materials science & engineering A, 2007, 444(1-2): 327-338.
- [11] MURAKAMI T, NAKATA K, TONG H, et al. Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux cored wire[J]. Transactions of the iron & steel institute of Japan, 2007, 43(10): 1596-1602.
- [12] 夏天. 镁合金微弧氧化陶瓷层的结合强度及其致密性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
XIA Tian. Study on bonding strength and compact-ability of ceramic coatings formed by micro-arc oxidation on magnesium alloys[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [13] 刘晓龙, 鲁亮, 邹志锋, 等. 5083 铝合金微弧氧化膜的制备及腐蚀性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(1): 85-89.
LIU Xiao-long, LU Liang, ZOU Zhi-feng, et al. Preparation and corrosion behaviors of micro-arc oxidation ceramic coating on 5083 aluminum alloy[J]. Special-cast and non-ferrous alloys, 2013, 33(1): 85-89.
- [14] 苗景国. 超硬铝合金 7075 微弧氧化陶瓷层的微结构及性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
MIAO Jing-guo. Study of the microstructure and properties of ceramic coatings prepared by micro-arc oxidation on surface of 7075 super-hard aluminum alloy[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [15] 李世杰. 铝合金微弧氧化电泳复合涂层耐腐蚀性能的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
LI Shi-jie. Study on the corrosion resistance of composite coating by micro-arc oxidation and electrophoresis on aluminum alloy[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.