

Al 基金属玻璃涂层孔隙特性的精确表征 及其腐蚀行为的影响规律

王晓明¹, 朱 胜¹, 杨柏俊², 陈永星¹

(1. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

(2. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家联合实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 选用 $\text{Al}_{86}\text{Ni}_6\text{Y}_{4.5}\text{Co}_2\text{La}_{1.5}$ 铝基非晶粉体材料, 采用自研的低温超音速喷涂系统, 在 ZM5 表面制备了具备良好耐蚀性能的铝基金属玻璃涂层, 分析了涂层的孔隙类型及成因, 优选出 X 射线三维成像法测定了涂层孔隙率, 表征了涂层孔隙几何特征, 阐明了孔隙对涂层腐蚀行为的影响规律。结果表明, 涂层主要包含宏观型、层间型、微球型和微细型四类常规孔隙缺陷; 涂层孔隙率基本小于 1% 且沿厚度方向上变化不大, 孔隙呈近球形, 尺寸均小于 $10\ \mu\text{m}$, 尤以 $5\ \mu\text{m}$ 左右居多; 不同孔隙率的涂层均呈现出较宽的自钝化区间, 自腐蚀电位较为接近, 腐蚀电流密度与孔隙率正相关, 大尺寸、贯穿型、边界处的个别特殊孔隙是导致涂层腐蚀失效的根本原因。

关键词: 铝基金属玻璃涂层; 低温超音速喷涂; X 射线三维成像法; 孔隙; 腐蚀行为

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)12-3779-06

Al 基金属玻璃粉体由于高强度、高韧性、高耐蚀等优异性能^[1-11]被应用于金属表面防护, 如于玮^[12]利用激光熔覆技术在铝合金基体表面制备了 Al-Ni-Y 非晶合金熔覆层, 提高了合金的力学性能; 张志彬等^[13-16]利用高速电弧喷涂技术在铝合金基体表面制备了具有优良力学性能和耐腐蚀性能的铝基非晶涂层。然而, 到目前为止, 尚未看到有采用低温超音速喷涂技术制备 Al 基非晶涂层作为镁合金表面防护层的相关报道。

本工作采用低温超音速喷涂技术在 ZM5 表面制备了 Al 基金属玻璃涂层, 提高了合金的综合服役性能尤其是耐腐蚀性能。而孔隙作为涂层的主要缺陷, 对涂层耐腐蚀性具有重要影响。孔隙的存在会使腐蚀介质直接渗入涂层内部, 甚至通过贯穿孔道接触到基体表面, 导致涂层内部产生严重破坏, 从而大幅降低涂层的服役性能^[17]。孔隙对涂层耐腐蚀性能影响较大, 然而, 目前关于孔隙对 Al 基金属玻璃涂层的耐腐蚀影响机理研究较少。

本实验分析了 ZM5 表面 Al 基金属玻璃涂层的孔隙类型及成因, 选定了孔隙测定方法并测定了涂层孔隙率, 表征了涂层孔隙的几何特征, 阐明了孔隙对涂层腐蚀行为的影响规律, 对于镁合金表面高耐蚀 Al 基金属玻璃涂层制备工艺设计及过程调控具有重要意义。

1 实验

Al 基金属玻璃涂层制备依托装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室自研的低温超音速喷涂设备系统, 通过“正交”试验确定最佳工艺参数水平组合, 并依据实际试验合理调整。

试验基体材料选用 ZM5 镁合金, 试样规格为 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ 。喷涂材料选用 $\text{Al}_{86}\text{Ni}_6\text{Y}_{4.5}\text{Co}_2\text{La}_{1.5}$ 铝基非晶粉体材料, 其中, 粒径介于 $25\sim 45\ \mu\text{m}$ 的粉体约占 30%, 粒径小于 $25\ \mu\text{m}$ 的粉体约占 70%。

采用 Versa XRM-500 型 X 射线三维成像系统测试涂层的孔隙率并表征涂层的孔隙特征。采用 Princeton VMP3 电化学工作站测试涂层的极化特性, 进而分析孔隙对涂层腐蚀行为的影响规律。

2 结果与分析

2.1 Al 基金属玻璃涂层孔隙的分类及成因

与传统热喷涂的完全熔融液滴不同, 低温超音速喷涂工艺中的喷涂粒子以热塑、完全固体及微量熔融等多种不同状态撞击基体表面, 加之喷涂工艺固有的分散性特征和基体表面较大的粗糙度差异等因素, 最终导致涂层中种类多样、形态各异孔隙的产生。图 1

收稿日期: 2016-12-14

基金项目: 国际合作项目 (2015DFG51920); 军队计划重点基金资助项目 (9140A27030312JB3501)

作者简介: 王晓明, 男, 1978 年生, 博士, 助理研究员, 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072, 电话: 010-66718477, E-mail: 1043933832@qq.com; uwangxm@126.com

直观展示了低温超音速喷涂制备的 Al 基金属玻璃涂层中的孔隙形貌，总体上可归纳为 4 种类型，具体如下：

第 1 类为宏观型孔隙，如图 1 中 A 点所示。该类孔隙的形状不规则、所占比重大。主要因受粒子内应力分布、基体形貌等因素影响，喷涂粒子在撞击基体或先期沉积涂层后不能充分扁平化而相互支撑所致；也会因碰撞界面绝热温升不够，致使产生的边界射流不能将其表面的沟槽完全填充而产生。

第 2 类为层间型孔隙，如图 1 中 B 点所示。该类孔隙在涂层厚度方向上的尺寸很小而另外 2 个方向上尺寸较大，主要出现在涂层/基体界面处或变形颗粒间的界面处。主要由于变形粒子间的不紧密堆积而产生，或因涂层/基体间的热膨胀系数较大在涂层冷却过程中相互剪切拉伸所致，还会因界面温升导致局部熔融并急速冷却而出现。

第 3 类为微球型孔隙，如图 1 中 C 点所示。该类孔隙的形状通常为球形或类球形、几何尺寸很小。主要是由于喷涂过程中的扰流效应导致气体卷入并溶于微量熔融粉末中，在凝固过程中被截留所致。

第 4 类为微细型孔隙，如图 1 中 D 点所示。该类孔隙的几何尺寸很小、形状不规则。主要因 Al 基金属玻璃颗粒自身的脆性较高，在与基体或先期沉积层高速撞击时破碎而产生，也会在局部微熔急速冷却凝固的过程中出现。

另外，当拖带热流温度整体较低时，会导致绝大多数粉体颗粒变形不够充分，大量的不充分变形颗粒互相叠加堆积通常会导致另一种严重缺陷的产生，即贯穿型孔隙。

2.2 Al 基金属玻璃涂层的孔隙测定

2.2.1 测定方法的选取

涂层耐腐蚀性不仅受孔隙率影响，而且会受到孔隙特征的影响，为深入理解孔隙对涂层腐蚀行为影响，首先需对其数目、尺寸、形态、分布及体积分数等特

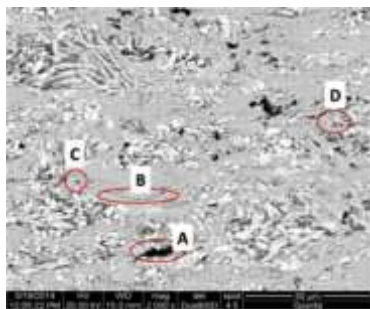


图 1 Al 基金属玻璃涂层的典型孔隙形貌

Fig.1 Typical pore morphology of aluminum-based metallic

glass coating

征进行精确表征。常见测定涂层孔隙特征方法有图像法^[18]、共聚焦激光扫描显微镜法 (CLSM)^[19]、X 射线三维成像法 (XRT)^[20]等，各类方法对比如表 1 所示。

由于喷涂成形固有的工艺特性，涂层中的孔隙数目较多、结构复杂，主要以封闭状态存在于涂层内部，且属于立体的概念，结合表 1 孔隙各类测定方法对比，采用可获取孔隙更全面具体数据信息的 X 射线三维成像法对 Al 基金属玻璃涂层的孔隙进行表征。

2.2.2 Al 基金属玻璃涂层孔隙的 XRT 测定

XRT 的基本原理是以 X 射线为光源，X 射线穿过样品生成单幅二维衬度像，样品在样品台上每旋转一定的角度都会得到一幅同样的衬度像，旋转 360° 之后即可获得测试样品的整套二维衬度像，再经傅里叶过滤背投影算法重构出样品三维形貌^[12]，如图 2 所示。

表 1 涂层孔隙测定方法对比

Table 1 Comparison of coating porosity measurement methods

Serial No.	Assay method	Advantage	Disadvantage
1	Image method	The statistical analysis of the following 15 field whose roughness <math>< 0.1 \mu\text{m}</math>, and blow 1000 times has higher reliability	The accuracy of the measurement results is affected by factors such as surface roughness, image magnification and number of fields, and the data of the voids in the 3D space is not comprehensive
2	CLSM	Can get data information of the hole in the 3D spatial	The test deviation of those gap whose surface part is smaller than the inside part is large, and the sample surface roughness requirements are extremely high
3	XRT	Can get the specific information such as porosity, number of voids, ratio of various voids, individual pore geometry, morphology and distribution in 3D	

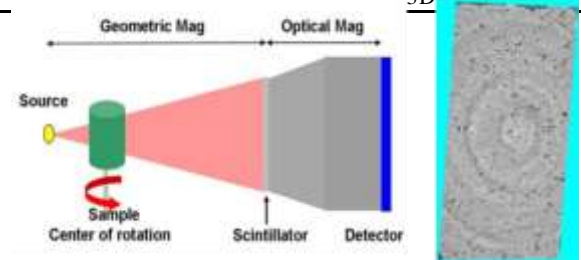


图 2 X 射线三维成像原理图

Fig.2 Schematic diagram of XRT^[12]

采用 XRT 方法观察涂层孔隙的图像如图 3 所示。图 3a 左边部分为涂层三维图像, 右边为涂层内孔隙三维图像, 图 3b 为 X-Z 面二维截面图像, 图 3c 为 X-Y 面二维截面图像。

采用 XRT 测定不同工艺下的涂层孔隙率与厚度对应关系如表 2 所示, 由表知, 涂层孔隙率基本小于 1%且沿厚度方向上变化不大。典型 Al 基金属玻璃涂层的整体轮廓、三维形貌及各尺寸孔隙数目如图 4 所示。可见, 绝大多数孔隙的尺寸在 10 μm 以下, 尤以 5 μm 附近的居多。孔隙基本呈近球形, 在涂层内部分布均匀。同时, 涂层/基体界面处的孔隙多呈不规则形状, 且此处孔隙的大小和分布与涂层内部较为一致, 表明喷涂过程中喷涂粒子能够完全填满基体表面的沟槽, 工艺较为合理。

2.3 孔隙对 Al 基金属玻璃涂层耐腐蚀性影响规律分析

2.3.1 孔隙率对涂层极化行为的影响规律

不同孔隙率涂层在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线如图 5 所示。选取与涂层相同成分的完全 Al

基金属玻璃条带作为对比, 以分析判断涂层的钝化特性及其影响因素。涂层及条带在 3.5% NaCl 溶液中的

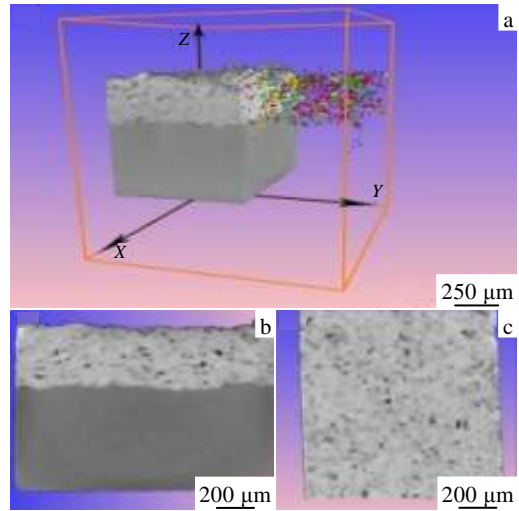


图 3 涂层孔隙的 X 射线三维形貌图像
Fig.3 X-ray three-dimensional images of coating pores

表 2 不同工艺下的涂层孔隙率与厚度

Table 2 Porosities and thickness of coatings under different technical conditions

Serial No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Porosities/%	1.10	0.50	1.60	0.90	0.37	0.90	0.84	0.22	0.35	0.35	2.60	0.31	1.78	2.00	0.60	0.60
Thickness/μm	157	109	193	204	261	598	372	412	258	195	302	156	305	350	657	295

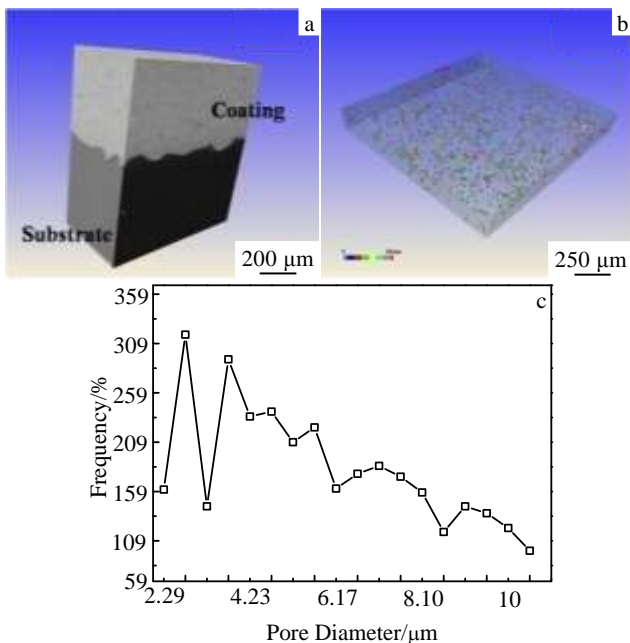


图 4 典型 Al 基金属玻璃涂层孔隙三维形貌及其分布

Fig.4 Typical pore three-dimensional morphology (a,b) and pore distribution (c) of aluminum-based metallic glass coating

电化学特征参数如表 3 所示, 结合图 5 知, 不同孔隙率涂层均表现出了与完全金属玻璃条带基本相同的腐蚀过程, 均出现了自钝化, 且呈现出了较宽的自钝化区间, 约为 0.7 V。各涂层的自腐蚀电位较为接近, 点蚀电位基本一致, 自腐蚀电流密度随孔隙率的增大而增大。

孔隙是涂层与条带材料在组织上存在的主要差别, 孔隙的存在导致涂层腐蚀电流密度较条带材料大幅增加, 且随孔隙率的增大逐渐升高, 可能存在 2 个方面的原因: 一是孔隙的存在增大了与溶液接触的测试面积, 导致实际参与腐蚀反应的面积增大, 进而导致腐蚀电流密度变大; 二是孔隙的存在改变了测试面周围的化学环境, 造成了涂层局部的钝化溶解特性发生改变, 从而使整体的腐蚀电流增大。另外, 块体和不同孔隙率涂层的

动电位极化曲线出现了部分锯齿行为,这可能与局部点蚀行为有关,或者与 Cl⁻ 穿透钝化膜使其破裂有关^[21]。

电化学测试前后的涂层表面形貌如图 6 所示。可见,测试后的涂层表面发生了较为严重的腐蚀,虽然基本保持了测试前的整体形貌特征,但原本平整的表面已变得凹凸不平。

2.3.2 孔隙特征对涂层腐蚀行为的影响规律

动电位极化曲线测试的是涂层被测部位的整体区域,所得电流密度是电流值与测试面积之商的平均值。

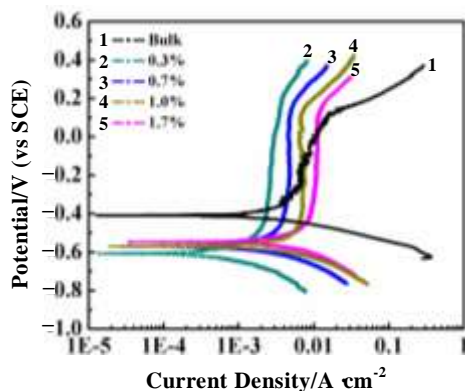


图 5 不同孔隙率涂层在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线
Fig.5 Dynamic potential polarization curves of the coating with different porosities in 3.5% NaCl solution

表 3 不同孔隙率涂层在 3.5% NaCl 溶液中电化学特征参数
Table 3 Electrochemical characteristic parameters of coating with different porosities in 3.5% NaCl solution

Porosities/%	Self corrosion potential/V	Self corrosion current density/A cm ⁻²	Pitting potential/V
Al glass block	0.5	0.008	1.0
0.3	0.3	0.002	1.1
0.7	0.3	0.004	1.1
1.0	0.3	0.006	1.1
1.7	0.3	0.01	1.1

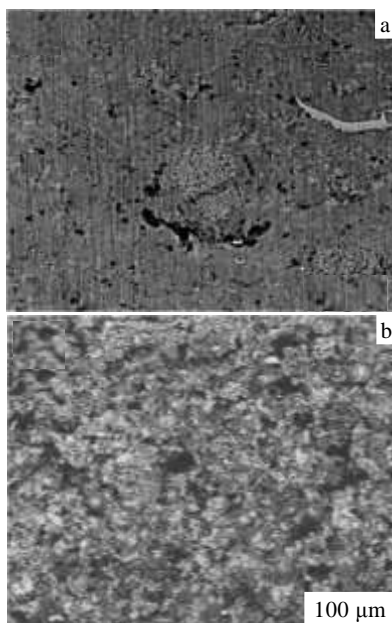


图 6 典型涂层腐蚀前后的表面 SEM 像

Fig.6 SEM images of typical coating surface before (a) and after (b) corrosion

单纯依靠动电位极化曲线无法准确判断涂层究竟是在整个表面上发生了均匀腐蚀,还是在孔隙等某些特定区域发生了局部严重点蚀。因此,需进一步研究孔隙特征对涂层腐蚀行为的作用机制。

低温超音速喷涂工艺制备的 Al 基金属玻璃涂层组织致密,2.1 节所述的宏观型、层间型、微球型和微细型四类普通孔隙主要孤立存在于其内部,对涂层的综合使役性能尤其是耐腐蚀性能影响较小。但当涂层孔隙率较高或服役过程中厚度减薄或被划伤时,由于缝隙或裂纹的连接作用,就会产生从涂层表面连通至基体的特定类型的孔隙,即贯穿型孔隙。该类孔隙会使涂层与基体在腐蚀性电解液中构成电偶对,在极化作用下进一步增大基体的腐蚀速率,造成涂层/基体界面间发生强烈的电化学腐蚀,腐蚀产物的积聚膨胀使得涂层在短时间内迅速从基体表面脱落而失去防护作用。图 7 为采用三维成像系统得到的典型 Al 基金属玻璃涂层的形貌。可见,界面区域存在明显的较大孔隙。

利用 XRT 的 Avizo 图像处理软件对涂层三维形貌中的孔隙体积的进行统计分析。结果表明,涂层孔隙率约为 1.0%,体积大于 1000 μm³ 的孔隙数约占孔隙总数的 8%,但这部分大孔隙的体积约占孔隙总体积的 83%,说明小尺寸微孔所占比重很小,如图 8 所示。

腐蚀前后涂层中体积最大的 10 个孔隙体积的变化对比如图 9 所示。可见,腐蚀作用对不同尺寸的孔隙产生了不同的影响,绝大多数孔隙或增大或减小,总体变化幅度不大。但有 2 个孔隙的体积出现了急剧增大,即出现了超大孔隙。其中,1 号孔隙(腐蚀前体积最大孔)的体积由腐蚀前的 55 084 μm³ 增大至 184 904 μm³,为腐蚀前的 3.36 倍;2 号孔隙(腐蚀前体积第 2 大孔)的体积由腐蚀前的 44 276 μm³ 增大至 95 681 μm³,为腐蚀前的 2.16 倍。该试验现象的出现存在 2 个可能的原因:一是由于腐蚀使得原本相距较近的几个大孔连通起来所致;二是由于贯穿孔隙的存在,引起涂

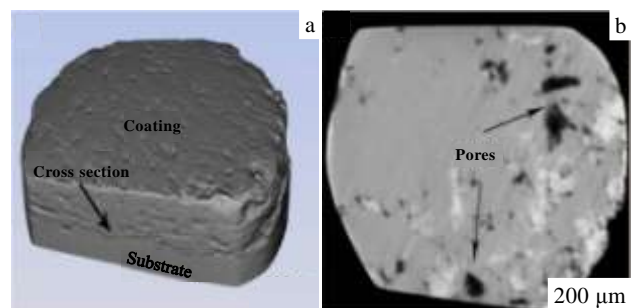


图 7 典型 Al 基金属玻璃涂层形貌

Fig. 7 Typical aluminum-based metallic glass coating profile: (a) 3D profile and (b) 2D cross profile on boundary zone

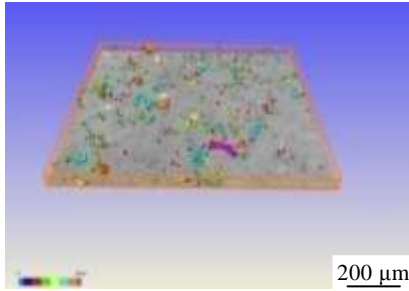


图 8 涂层孔隙的三维分布图

Fig. 8 Three-dimensional distribution of coating pores

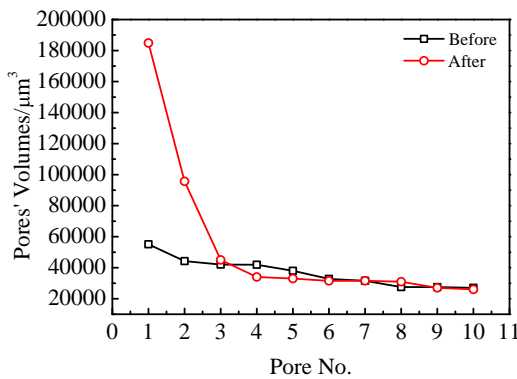


图 9 腐蚀前后涂层孔隙体积的变化对比

Fig. 9 Comparison of pores' volumes (μm³) in the coating before and after corrosion

层/基体界面发生了强烈的电偶腐蚀而形成新的孔隙。

为准确判定超大孔隙的产生原因及其与涂层腐蚀行为的关联关系,利用 X 射线三维成像系统进一步对比分析了腐蚀前后涂层中孔隙(体积大于 4000 μm³)的分布及定位,如图 10 所示。

对比图 10a 和 10b 同一位置 A 处的孔隙分布可见,腐蚀前 A 处虽然随机分布着数个距离较近的孔隙,但腐蚀后这些孔隙依然孤立存在,说明该超大孔隙并非是由上述孔隙相互连通而形成的。腐蚀后 B 位置处的超大孔隙在腐蚀前的同一对应位置处并不存在,说明该超大孔是新生成的。通过 Avizo 图像分析软件定位,确定 A、B 2 处孔隙均位于涂层与基体的界面处。综上所述可知,A、B 2 处的 2 个超大孔隙均是由于涂层固有贯穿孔隙的存在,导致涂层/基体界面发生强烈电

偶腐蚀而重新生成的。

同时,对比图 10a 和 10b 可见,体积相对较小的孔隙在腐蚀后其几何尺寸变化不大,并且出现了大体积孔隙数目有所减少的现象,如在图 10a 中接近中心区域的一些孔隙在图 10b 中的相同位置并未出现,说明这部分孔隙由于腐蚀产物的堆积,其几何尺寸已由阈值之上减小为阈值之下。涂层孔隙体积的小幅度变

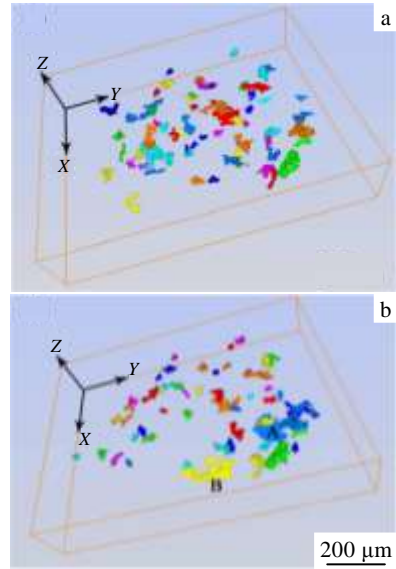


图 10 腐蚀前后涂层中孔隙形貌

Fig. 10 Pores' morphologies in the coating before (a) and after (b) corrosion

化说明在该处发生的腐蚀较轻。

综上,涂层实际腐蚀进程中,绝大多数体积较小且相对孤立的孔隙处发生的腐蚀较为轻微,而在涂层/基体界面处存在贯穿孔隙的个别微小区域,在腐蚀介质环境下发生了强烈的局部吸附溶解,出现了超大的孔隙,这些孔隙会进一步成为腐蚀介质的侵入通道诱发腐蚀的逐步加剧。这类局部强烈的腐蚀比整体上的均匀腐蚀更具破坏性,因此降低涂层孔隙率、减少大孔隙出现,杜绝贯穿孔隙产生对于高耐蚀 Al 基金属玻璃涂层制备工艺设计及过程调控具有重要意义。

3 结 论

1) 基于典型涂层形貌观察,归纳了低温超音速喷涂层主要包含宏观型、层间型、微球型和微细型 4 类常规孔隙缺陷,阐明了颗粒扁平化不充分、热力学参数差异、气动扰流效应及粉体自身脆性等是各类孔隙产生的主要原因。

2) 采用 X 射线三维成像法准确表征了涂层在三维尺度上的孔隙率、几何特征及分布状态。Al 基金属玻璃

涂层孔隙率基本小于 1% 且沿厚度方向上变化不大, 孔隙呈近球形, 尺寸均小于 10 μm , 尤以约 5 μm 尺度的多。

3) 揭示了孔隙率及孔隙特征对涂层电化学腐蚀行为的影响规律。不同孔隙率的 Al 基金属玻璃涂层均呈现出了较宽的自钝化区间, 自腐蚀电位较为接近, 腐蚀电流密度与孔隙率正相关。小尺寸、孤立型、涂层内均匀分布的孔隙在腐蚀前后几何尺寸变化不大, 且由于腐蚀产物堆积出现了较大体积孔隙数目有所减少的现象, 是涂层腐蚀失效的非主要影响因素。大尺寸、贯穿型、边界处的个别特殊孔隙是诱发涂层在腐蚀介质中发生强烈局部吸附溶解, 进而产生新的超大孔隙, 是导致涂层腐蚀失效的根本原因。

参考文献 References

- [1] Yang B J, Yao J H, Yang H W *et al. Scripta Materialia*[J], 2009, 61(4): 423
- [2] Inoue A. *Progress in Materials Science*[J], 1998, 43(5): 365
- [3] Wu Xueqing(吴学庆), Ma Mo(马 募), Tan Chaogui(檀朝桂) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(9): 1668
- [4] Sun Z, Xing Q, Axinte E *et al. Materials & Design*[J], 2015, 81: 59
- [5] Yi J J, Xu W, Xiong X Z *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 628: 245
- [6] Babu P, Jha R, Guzman M *et al. Materials Science & Engineering A* [J], 2016, 658(1): 415
- [7] Zhang W, Chen S Q, Zhu Z W *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016: 688: 89
- [8] Johnson W C, Zhou P, Lucente A M *et al. Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2009, 40A: 757
- [9] Han F F, Inoue A, Han Y *et al. Journal of Materials Science*[J], 2016: 1
- [10] Dittrich M, Meixner M, Schumacher G. *Intermetallics*[J], 2016, 74: 46
- [11] Willian C. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2009, 40(4): 757
- [12] Yu Wei(于 玮). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012
- [13] Zhang Zhibin(张志彬), Liang Xiubing(梁秀兵), Xu Binshi(徐滨士) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(5): 872
- [14] Zhang Zhibin(张志彬), Liang Xiubing(梁秀兵), Wei Shicheng(魏世丞). *Journal of Beijing University of Technology*(北京工业大学学报)[J], 2012, 38(6): 933
- [15] Zhang Qingliang(张秦梁), Liang Xiubing(梁秀兵), Zhang Zhibin(张志彬) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2015, 28(6): 104
- [16] Liang Xiubing(梁秀兵), Zhang Zhibin(张志彬), Chen Yongxiong(陈永雄) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2012, 48(3): 289
- [17] Yu Huibo(于惠博), Sun Hongfei(孙宏飞), Wu Bin(武 彬) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2007, 21(1): 68
- [18] Qin Jianfeng(綦建峰), Sui Wanghua(隋旺华), Zhang Gailing(张改玲) *et al. Journal of Engineering Geology*(工程地质学报)[J], 2014, 22: 339
- [19] Sun Xianda(孙先达), Li Yiqiang(李宜强), Dai Qiwen(戴琦雯). *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*(电子显微学报)[J], 2014, 33(2): 123
- [20] Wang Shaogang(王绍钢), Wang Sucheng(王苏程), Zhang Lei(张 磊). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2013, 49(8): 897
- [21] Li J M, Yang X, Zhu R L *et al. Metals*[J], 2014, 4(4): 597

Accurate Characterization for Pore Properties of Aluminum-based Metallic Glass Coating and the Influence of Pores on Corrosion Behavior of Coating

Wang Xiaoming¹, Zhu Sheng¹, Yang Baijun², Chen Yongxing¹

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

(2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

Abstract: The aluminum-based metallic glass coating on ZM5 surface with good corrosion resistance was prepared from $\text{Al}_{86}\text{Ni}_6\text{Y}_{4.5}\text{Co}_2\text{La}_{1.5}$ amorphous powder by self-developed low-temperature supersonic spray system. The types and causes of pores in the coating were analyzed, the porosity of the coating was determined by X-ray three-dimensional imaging method, the pore geometry features were characterized, and the influence of pores on the corrosion behavior of the coating was clarified. The results show that the coating consists mainly of four types of conventional porosity defects, which are macro-type, layer-type, microsphere-type and microscopic-type. The porosities are substantially less than 1% and have little change along the thickness direction. The pores are nearly spherical, and their average sizes are less than 10 μm , mostly about 5 μm ; the coatings of different porosities show a wide range of self passivation interval, self

corrosion potentials are closer, and there is a positive correlation between the corrosion current density and the number of special pores at the border with the characteristics of large-size and through-type are the fundamental cause of corrosion failure of the coating.

Key words: aluminum-based metallic class coating; low-temperature supersonic spray; XRT; pores; corrosion behavior

Corresponding author: Wang Xiaoming, Ph. D., Assistant Researcher, National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, P. R. China, Tel: 0086-10-66718477, E-mail: uwangxm@126.com