

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180131003

团聚粉末制备工艺对冷喷涂 Ti₂AlC 沉积的影响

臧旭升^{1,2}, 谢曦^{1,2}, 沈艳芳¹, 王吉强¹, 柏春光¹, 熊天英¹

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院, 沈阳 110016)

摘要: 以热压烧结后球磨粉碎的 Ti₂AlC 亚微米粉末为原料, 通过水热处理使其团聚成微米级粉末, 并运用冷喷涂技术在 Zr-4 合金基体上沉积 Ti₂AlC 涂层。采用扫描电子显微镜、金相显微镜、XRD 衍射仪、激光粒度分析仪等对 Ti₂AlC 颗粒和涂层微观结构进行表征; 采用显微硬度仪和拉伸测试系统对 Ti₂AlC 涂层的基本力学性能进行测试; 采用 N₂ 吸附法测涂层孔隙, 采用电化学工作站测涂层的贯通孔隙。结果表明: 对平均粒径 < 0.3 μm 的 Ti₂AlC 粉末进行水热处理时, 添加硫酸铵能够促进亚微米颗粒的团聚, 团聚粉末的平均粒度可达到 6 μm。此粉末的冷喷涂特性最好, 沉积的 Ti₂AlC 涂层厚度达到 100 μm, 涂层中有微孔和介孔但没有贯通孔隙, 涂层和基体结合强度达到了 44 MPa。

关键词: Ti₂AlC 涂层; 冷喷涂; 水热处理; 团聚

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)04-0140-08

Influences of Agglomeration Powder Preparation on Deposition of Cold-sprayed Ti₂AlC Coating

ZANG Xu-sheng^{1,2}, XIE Xi^{1,2}, SHEN Yan-fang¹, WANG Ji-qiang¹, BAI Chun-guang¹, XIONG Tian-ying¹

(1. Institute of Metal Research, Academy of Science, Shenyang 110016; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016)

Abstract: The Ti₂AlC submicron powders, fabricated by hot-pressing and ball milling, were hydrothermally treated. Then, Ti₂AlC coating was successfully deposited on Zr-4 substrate by cold spray using the powders. The microstructure of Ti₂AlC particles and as-sprayed coatings were characterized by scanning electron microscope (SEM), optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD) and laser particle size analyzer. A micro hardness tester and a tensile-testing system were utilized to evaluate the mechanical properties of the Ti₂AlC coatings. The porosity of the coatings was measured by N₂ adsorption and the through-porosity of the coating was measured by an electrochemical workstation. The results show that the addition of (NH₄)₂SO₄ can promote the agglomeration of nanoparticles during hydrothermal treatment. The particle size of the Ti₂AlC powders increases from 0.3 μm to 6 μm after hydrothermal treatment with the addition of (NH₄)₂SO₄. Using the powders as feedstock, a dense Ti₂AlC coating of 100 μm thickness is deposited on Zr-4 substrate by cold spray. The bonding strength between the coating and substrate is measured to be 44 MPa. The coating is composed of micropores and mesopores, however, no through-porosity is noticed.

Keywords: Ti₂AlC coating; cold spray; hydrothermal treatment; agglomeration

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-05-03

网络出版日期: 2018-07-02 10:48; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180702.1047.016.html>

通信作者: 熊天英 (1962—), 女 (汉), 研究员, 博士; 研究方向: 表面喷涂技术及涂层性能; E-mail: tyxiong@imr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (50971127)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (50971127)

引用格式: 臧旭升, 谢曦, 沈艳芳, 等. 团聚粉末制备工艺对冷喷涂 Ti₂AlC 沉积的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 140-147.

ZANG X S, XIE X, SHEN Y F, et al. Influences of agglomeration powder preparation on deposition of cold-sprayed Ti₂AlC coating[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 140-147.

0 引言

三元层状化合物 Ti₂AlC 属于 MAX 相陶瓷 (M 为过渡金属元素, A 主要为 III 和 IV 族元素, X 为 C 或 N), 具有六方对称的晶体结构^[1-2]。由于其特殊的层状结构和键合类型, 它具有较高的弹性模量和屈服强度、高的熔点和热稳定性以及良好的抗氧化性能。基于以上优势, Ti₂AlC 材料可用于制备耐磨损、抗氧化以及腐蚀的涂层, 在核能燃料包壳的防护方面具有一定的应用潜力^[3-4]。

目前, 热喷涂是制备 Ti₂AlC 涂层的常用方法。研究表明, 虽然采用热喷涂可获得致密且较厚的 Ti₂AlC 涂层, 但由于热喷涂工作温度高, Ti₂AlC 粉末在喷涂过程中会发生相变。故该方法制备的 Ti₂AlC 涂层含有大量杂质相, 抗氧化和抗腐蚀能力大大下降^[5-6]。

冷喷涂是以压缩气体 (如 N₂、He、空气或混合气体等) 作为加速介质, 带动粉末颗粒在固态下以极高的速度碰撞基板, 使颗粒发生强烈的塑性变形而沉积形成涂层的一种新型喷涂技术。由于冷喷涂的工作温度远低于喷涂材料的熔点, 喷涂材料在冷喷涂过程中发生氧化和相变的程度大大降低^[7-8]。

基于冷喷涂在该方面的优势, Gutzmann 等^[9-10]采用冷喷涂微米级 Ti₂AlC 粉末制备了 Ti₂AlC 涂层。结果表明, 冷喷涂过程中 Ti₂AlC 粉末未发生明显的氧化和相变, 涂层基本保持了原始的 Ti₂AlC 相。然而, 由于 Ti₂AlC 有限的塑性变形能力, 采用冷喷涂直接沉积微米级 Ti₂AlC 粉末, 涂层的裂纹和分层现象严重。

李长久等^[11]用聚乙烯醇将纳米的 TiO₂ 团聚为 10~45 μm 的颗粒进行冷喷涂沉积获得单一层的涂层。近年来, 日本枫桥大学 Fukumoto 团队^[12-13]将纳米级 TiO₂ 团聚为微米级颗粒, 采用冷喷涂成功制备了 TiO₂ 涂层。该方法制备的 TiO₂ 涂层不但保持了原始粉末的相结构, 而且涂层致密, 与基体结合力良好, 内部也未发生分层现象。可以看出, 纳米团聚结构的粉末为冷喷涂沉积陶瓷涂层的必要条件, 更与粉末的团聚方式和强度有关。受该工作的启发, 文中将球磨粉碎的亚微米 Ti₂AlC 粉末通过水热处理制备了微米级粉末, 而后对比研究了普通微米、亚微米以及水热处理的微米粉末的冷喷涂特性。

1 试验

1.1 粉末和涂层制备

原始 Ti₂AlC 粉末由中国科学院金属研究所钛合金研究部提供, TiAl 粉和 TiC 粉热压合成。在氩气保护下, 运用行星式球磨机 (Pulverisette 6 Premium, Fritsch GmbH, Germany) 粉碎得到微米级和亚微米级两种 Ti₂AlC 粉末。两种粉末的球磨工艺参数如表 1 所示。

表 1 Ti₂AlC 球磨的主要工艺参数

Parameters	Micron-size powders	Submicron-size powders
Rotating speed / (r·min ⁻¹)	600	600
Process control agent	C ₂ H ₅ OH	C ₂ H ₅ OH
Protective gas	Argon	Argon
Abrasive (agate) diameter / mm	1	1
Ball milling time / h	1	12

亚微米 Ti₂AlC 粉末水热处理的具体步骤为: 将 20 g 亚微米 Ti₂AlC 粉末与 300 mL 去离子水混合, 其中一组未加 (NH₄)₂SO₄, 另一组加入 11 g (NH₄)₂SO₄, 以此形成对比。将两组混合液置于磁力搅拌器上均匀搅拌后放入集热式恒温搅拌器中, 于 150 °C 处理 4 h。将水热处理的粉末在真空过滤器上洗涤 5 次, 以尽可能降低 NH₄⁺, SO₄²⁻ 离子浓度以及其他可能引入的杂质。将水热处理后的粉末在真空干燥器中 60 °C 保温 12 h 进行烘干, 随后研磨成粉末。基体采用 Zr-4 合金 (常用的燃料元件包壳和堆芯结构材料), 主要成分质量比为 Zr(>95%)、Sn(1.2%~1.7%)、Fe(0.18%~0.24%) 和 Cr(0.07%~0.13%) 等, 线切割将其制成 10 mm×10 mm×5 mm 的试样, 将试样待喷涂面用 400 号砂纸打磨处理, 并在喷涂前将打磨表面进行喷砂处理。

冷喷涂设备是由中国科学院金属研究所自行搭建的 IMR-6000, 其拉瓦尔 (De Laval) 缩放喷嘴的矩形喉部孔径为 2 mm×3 mm, 矩形横截面的出口为 2 mm×10 mm。试验中喷嘴出口到基板表面的间距为 20 mm, 喷枪以 10 mm/s 的恒定速度在基板上方移动。以压缩空气为加速气体, 在沉积过程中气体压力为 2.0~2.5 MPa, 压缩气体压力存在可接受的误差波动, 喷涂时一般稳定在 2.2 MPa;

Ti₂AlC 温度过高时会发生氧化, 基于此选择 400 °C 为气体预热温度。

1.2 结构表征及力学性能测试

采用激光粒度分析仪 (MS2000, Malvern, UK) 测定四种 Ti₂AlC 粉末的粒度分布。采用扫描电子显微镜 (SSX-550, Shimadzu, Japan) 观察粉末和涂层的形貌。通过 X 射线衍射 (D/Max-2500PC, Rigaku, Japan) 测定粉末和涂层的相结构, 计数测量采用步进式扫描方式, 步长 0.02°, 扫描速度 3°/min, 扫描范围为 10°~90°。

采用全自动显微硬度测试仪 (AMH43, LECO) 测量涂层截面的显微硬度, 加载载荷为 10g, 停留时间为 15 s, 随机测量 5 个点取其平均值。采用冷喷涂在 Zr-4 基体沉积较厚涂层, 将基体磨薄后弯曲收集剥落的涂层, 总共为 865 mg。采用 MicroActive for ASAP 2460 型比表面及孔隙分析仪进行低温氮吸附测试。

涂层的结合强度通过粘合-拉伸试验测定, 按照标准 ASTM C633-79 在电子万能试验机 (AG-100KNG, Shimadzu) 上进行。涂层制备在直径为 Φ 25 mm 的圆片基材试样的一侧表面。将喷有涂层的试样粘结于自制的钢质拉伸夹具上, 粘合剂为上海合成树脂研究所提供的 E7 胶, 其粘结强度可达到 70~80 MPa, 如图 1 所示, 测量 3 组数据取其平均值为结合强度。

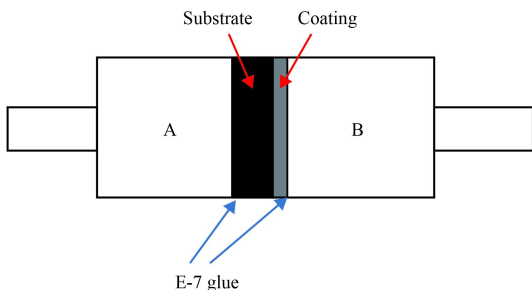


图 1 涂层结合强度拉伸棒示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen for coating and substrate bonding strength test

将 Zr-4 合金切割成尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的试样, 一侧焊接上铜导线后, 另一侧沉积冷喷涂涂层。将试样用牙托粉和牙托水封装在聚乙烯的套筒中, 露出 10 mm×10 mm 的面积为电极工作表面, 用 800 号砂纸充分打磨后用酒精清洗干净表面。试验采用三电极法, 涂层和 Zr-4 合金

为工作电极, 铂电极为对电极, 饱和甘汞电极为参比电极。使用 PARSTAT 2273 型电化学工作站测量, 测开路电位, 电脑自动记录数据。

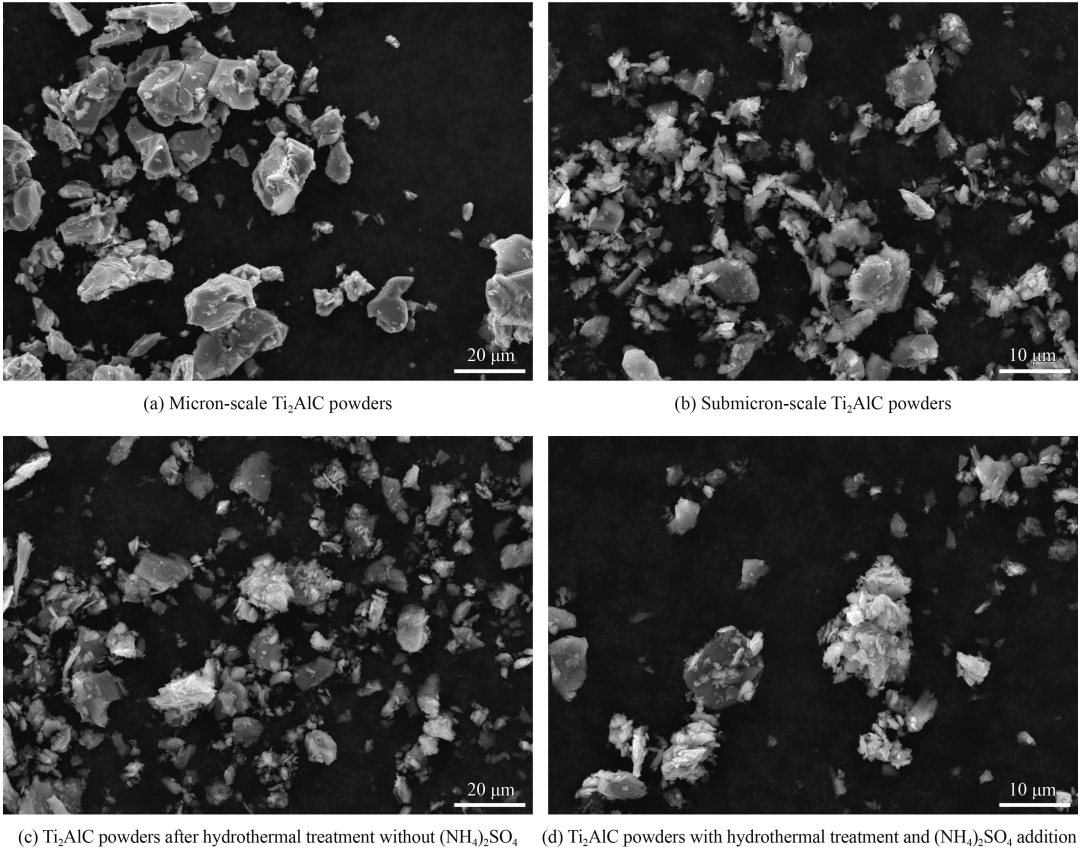
2 结果与讨论

2.1 粉末特性

在扫描电镜下观察微米 Ti₂AlC、亚微米 Ti₂AlC 和水热处理后颗粒的形貌, 如图 2 所示。微米级 Ti₂AlC 的颗粒形貌不规则, 平均粒径在 19 μ m 左右, 如图 2(a)。在图 2(b) 可以看到, 延长球磨时间, 颗粒的尺寸明显下降, 除少数大颗粒存留, 大部分颗粒的平均粒径小于 1 μ m。图 2(c) 是未添加 (NH₄)₂SO₄ 仅水热处理的粉末形貌, 颗粒的结构无太大变化, 仍然是不规则形状, 而且视场内存在大量平均粒径小于 1 μ m 的颗粒。图 2(d) 为添加 (NH₄)₂SO₄ 水热处理的粉末形貌, 颗粒之间的团聚明显增强, 小颗粒团聚形成尺寸较大的颗粒并呈现出一定程度的类球形。

图 3 为激光粒度仪测定的 4 种粉末的粒径分布图。亚微米 Ti₂AlC 颗粒的 $d(0.1)=0.166 \mu\text{m}$, $d(0.5)=0.273 \mu\text{m}$, $d(0.9)=7.344 \mu\text{m}$, 从粉末颗粒的体积分数可以看出, 绝大部分粉末的尺寸小于 1 μ m, 但存在一定数量的微米级颗粒, 这与扫描电镜颗粒分析在误差范围内结果一致。当不添加 (NH₄)₂SO₄ 进行水热处理, 粉末粒径 $d(0.1)=0.167 \mu\text{m}$, $d(0.5)=0.281 \mu\text{m}$ 和 $d(0.9)=7.016 \mu\text{m}$, 与原始粉末相比未发生明显变化。对于双峰粉末, 小于 1 μ m 的粉末喷涂时无法突破激波到达基体表面, 虽然所有的大颗粒粉末都能到达基体, 但只有发生自团聚的才能沉积, 其余的颗粒只是冲击作用。而添加 (NH₄)₂SO₄ 后, 团聚颗粒的粒径 $d(0.1)=2.735 \mu\text{m}$, $d(0.5)=5.941 \mu\text{m}$ 和 $d(0.9)=12.655 \mu\text{m}$, 颗粒的尺寸明显增大, 其平均粒径在 6 μ m 左右。

单纯的水热处理, 聚集在一起的粉末内部存在较大孔隙, 颗粒之间结合较弱。添加 (NH₄)₂SO₄ 后, HN_4^+ 和 SO_4^{2-} 分散在颗粒表面, 水热处理过程中亚微米颗粒在阴阳离子静电吸引力作用下团聚长大, 有些颗粒接触的区域形成化学键, 超声波亦不能将其分散开^[4]。此时 Ti₂AlC 粉末内部在液相反应阶段发生了团聚结合, 主要依靠静电引力、范德华力、毛细管力等较弱的力聚合在一起。



(a) Micron-scale Ti_2AlC powders

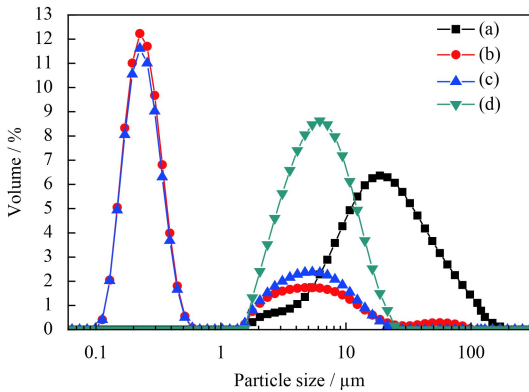
(b) Submicron-scale Ti_2AlC powders

(c) Ti_2AlC powders after hydrothermal treatment without $(NH_4)_2SO_4$

(d) Ti_2AlC powders with hydrothermal treatment and $(NH_4)_2SO_4$ addition

图 2 不同 Ti_2AlC 粉末的 SEM 形貌

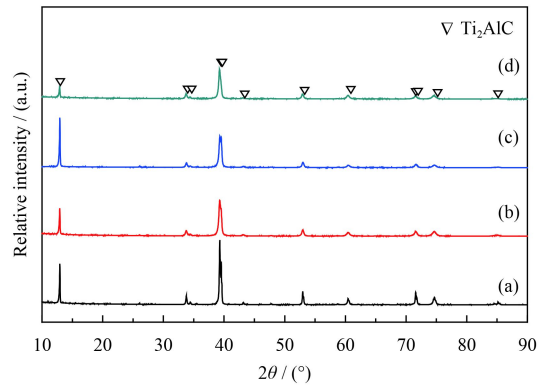
Fig.2 SEM morphologies of different kinds of Ti_2AlC powders



(a) Micron-scale Ti_2AlC powders; (b) Submicron-scale Ti_2AlC powders; (c) Ti_2AlC powders after hydrothermal treatment without $(NH_4)_2SO_4$; (d) Ti_2AlC powders with hydrothermal treatment and $(NH_4)_2SO_4$ addition

图 3 不同 Ti_2AlC 粉末的粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of different kinds of Ti_2AlC powders



(a) Micron-scale Ti_2AlC powders; (b) Submicron-scale Ti_2AlC powders; (c) Ti_2AlC powders after hydrothermal treatment without $(NH_4)_2SO_4$; (d) Ti_2AlC powders with hydrothermal treatment and $(NH_4)_2SO_4$ addition

图 4 不同 Ti_2AlC 粉末的 XRD 衍射图

Fig.4 XRD patterns of different kinds of Ti_2AlC powders

2.2 涂层组织

4 种粉末冷喷涂后样品的宏观形貌如图 5 所示。以微米 Ti_2AlC 粉末作为喷涂原料时(图 5(a)), 在抛光和喷砂基体表面均未获得涂层, 颗粒对 Zr-4 基体表面起到了喷砂的作用。以球磨的亚微米 Ti_2AlC 粉末进行冷喷涂时(图 5(b)), 颗粒在基体

图 4 为 4 种粉末的 XRD 图谱, 微米粉末和亚微米粉末分析检测到 Ti_2AlC 相, 并没有其它相存在。亚微米 Ti_2AlC 粉末衍射峰减弱, 主要因为颗粒尺寸减小。两种水热处理的粉末也都只有 Ti_2AlC 相。这表明, 水热处理过程未引入其它杂质相。

表面形成较薄的涂层。同样,未添加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 水热后的粉末(图 5(c))具备一定的喷涂性能,形

成的涂层形貌较为粗糙。添加 11 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 水热后的粉末(图 5(d))喷涂效果最好,形成的 Ti_2AlC 涂层颜色较深且均匀致密。

微米 Ti_2AlC 粉末喷涂后基体的截面 SEM 形貌如图 6(a) 所示,表明颗粒并未沉积。图 6(b) 是亚微米 Ti_2AlC 粉末喷涂后涂层截面 SEM 形貌,涂层中存在较大的孔洞,并且亚微米粉末容易静电吸附,粉末流动性较差,喷涂过程中发生间歇堵塞。未添加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 水热后的粉末喷涂后的涂层截面 SEM 形貌如图 6(c) 所示,涂层中明显存在裂纹,水热处理可以减少静电吸附,但颗粒的尺寸依旧不适合冷喷涂。添加 11 g 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 水热后的粉末喷涂后的涂层 SEM 形貌如图 6(d) 所示,涂层厚度约为 100 μm ,没有明显的孔隙和裂纹,涂层致密并且与基体结合良好。

图 7 是添加硫酸铵水热处理后的 Ti_2AlC 粉末和涂层的 XRD 图谱, Ti_2AlC 涂层与原始粉末的相组成基本一致,无新相生成,也没有发生明显氧化,这主要得益于冷喷涂较低的温度。

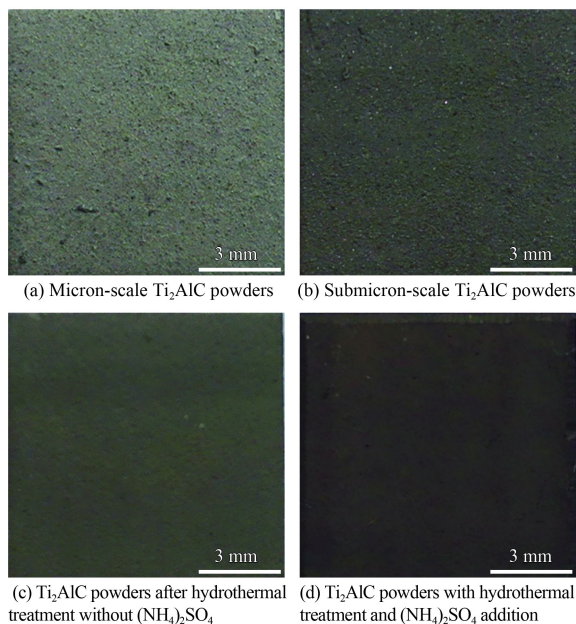


图 5 冷喷涂 Ti_2AlC 涂层的表面宏观形貌

Fig.5 Macrographs of cold-sprayed Ti_2AlC coatings

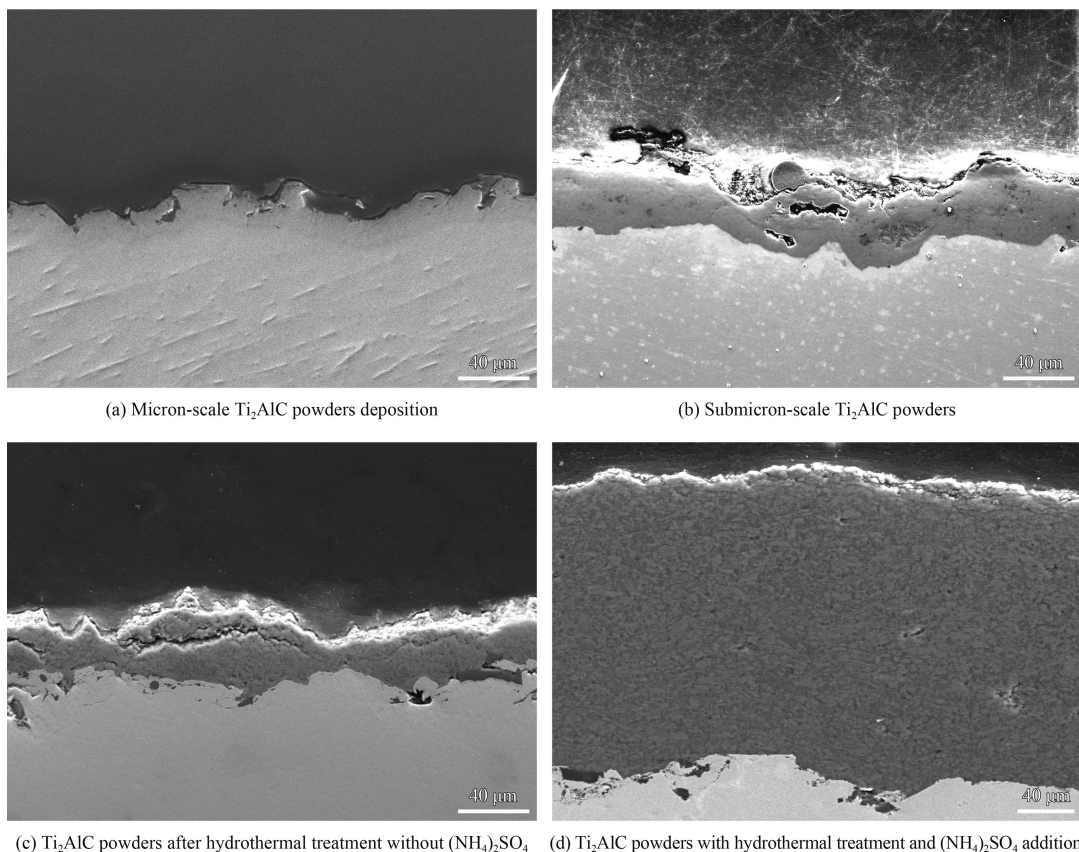


图 6 冷喷涂 Ti_2AlC 涂层的截面形貌

Fig.6 Cross section morphologies of cold-sprayed Ti_2AlC coatings

Ti_2AlC 作为一种 MAX 相陶瓷, 有着较低的塑性变形能力, 但当前条件下, 微米级 Ti_2AlC 粉末很难和金属一样依靠塑性变形连续沉积。未加 $(NH_4)_2SO_4$ 水热处理的 Ti_2AlC 粉末, 依靠少量自团聚的粉末发生沉积, 而大量较小的颗粒由于弓激波的作用无法沉积, 后续大颗粒的撞击容易造成涂层横向断裂, 产生较大裂纹。 $(NH_4)_2SO_4$ 水热处理后的 Ti_2AlC 粉末撞击基体时, 发生破碎和颗粒堆积, 而后续颗粒的撞击对粘结的亚微米颗粒具有夯实作用。最关键的是团聚颗粒可以依靠原始亚微米颗粒的相对运动实现变形, 从而可以密堆积, 彼此发生机械互锁形成涂层, 如图 8(a) 所示。图 8(b) 为粉末截面形貌, 呈现一定的团聚结构, 到达基体后团聚颗粒堆积变形, 而内部的亚微米颗粒没有明显变化, 如图 8(c)。

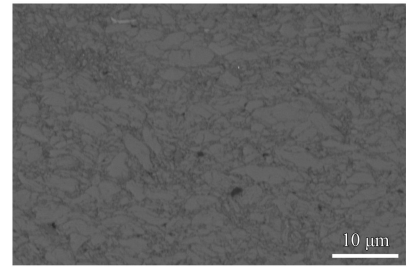
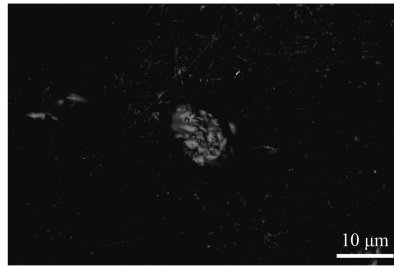
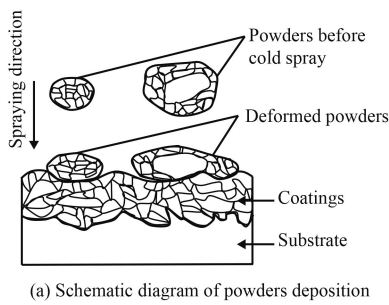


图 8 Ti_2AlC 粉末的变形机理

Fig.8 Deformation mechanism of Ti_2AlC powders

2.3 涂层性能

图 9(a) 可以看到压痕的基本轮廓, 确定其硬度值大小, 而高倍下的形貌如图 9(b) 所示, 载荷为 10 g 时, 压痕较浅, 出现裂纹, 涂层较脆。 Ti_2AlC 涂层的硬度为 $(288.5 \pm 20.5) HV_{0.01}$, 仅达到

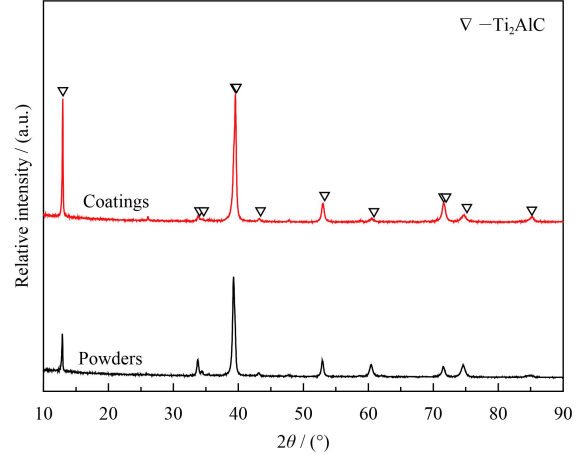


图 7 添加硫酸铵水热处理后的 Ti_2AlC 粉末及其涂层的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of Ti_2AlC powders with $(NH_4)_2SO_4$ addition after hydrothermal treatment and cold-sprayed Ti_2AlC coatings deposited on Zr-4

块体 Ti_2AlC 硬度的一半左右^[10]。这主要是由于颗粒之间是简单的机械互锁, 存在大量颗粒界面。

图 10 为 77 K 下涂层对 N_2 的吸附脱附曲线, 可以看到在较高 P/P_0 区出现滞回曲线, 说明涂层中存在介孔; 在较低 P/P_0 区吸附脱附曲线不能完

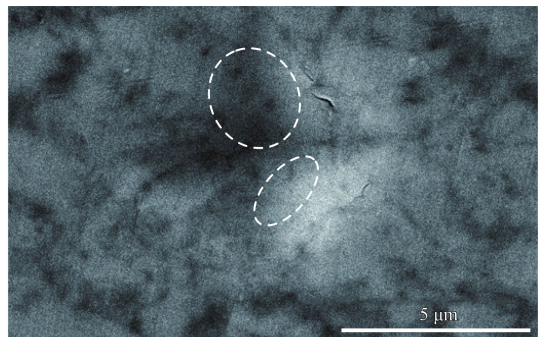
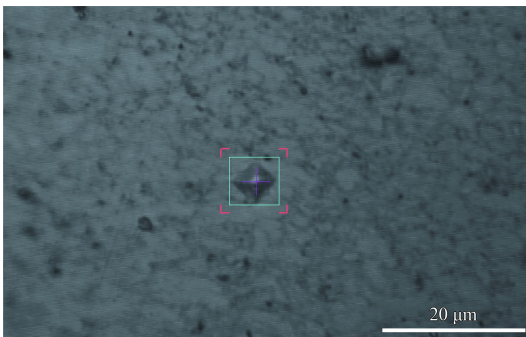


图 9 冷喷涂 Ti_2AlC 涂层的压痕形貌

Fig.9 OM and SEM images of indentation mark in cold-sprayed Ti_2AlC coatings

全重合,说明涂层中存在微孔, N_2 无法完全脱附出来。孔径分布曲线也说明介孔和微孔同时存在,其平均孔径为 9.8 nm。

涂层与基体的拉伸断裂后的形貌如图 11 所示,其低倍形貌呈现出片层剥落,图 11(a₃) 可以看到,涂层已从基体剥离,A 点的能谱检测到 Zr、Ti、Al 和 C,说明拉伸断裂为粘结失效,即基体涂层间断裂;除此之外,涂层部分边缘处从内部发生断裂,如图 11(b₁),高倍下其形貌为堆积的颗粒,B 点的能谱只检测到 Ti、Al 和 C,也

证明了涂层在内部发生断裂,说明涂层与基体的结合强度甚至高于测量值。通过 3 组数据的测算,涂层与 Zr-4 基体的结合强度为 44.3 MPa,两者之间结合很好。

测量开路电位可以很好地评估涂层结构中的通孔,因为涂层是喷涂在基体上,任何通孔都够让测试溶液渗透到涂层与基体的界面,使得涂层的开路电位接近于基体^[15]。图 12 分别为涂层和基体的开路电位,两者之间存在较大差距,说明涂层没有贯通孔隙,涂层对基体起到保护作用。

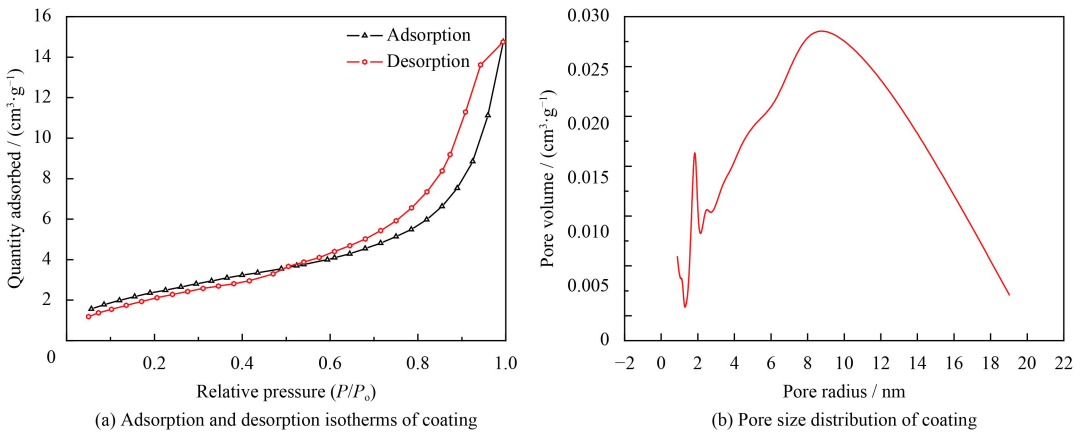


图 10 77 K 下涂层对 N_2 吸附/脱附等温线和孔径分布

Fig. 10 Isotherms of adsorption and desorption for N_2 and pore size distribution of coating at 77 K

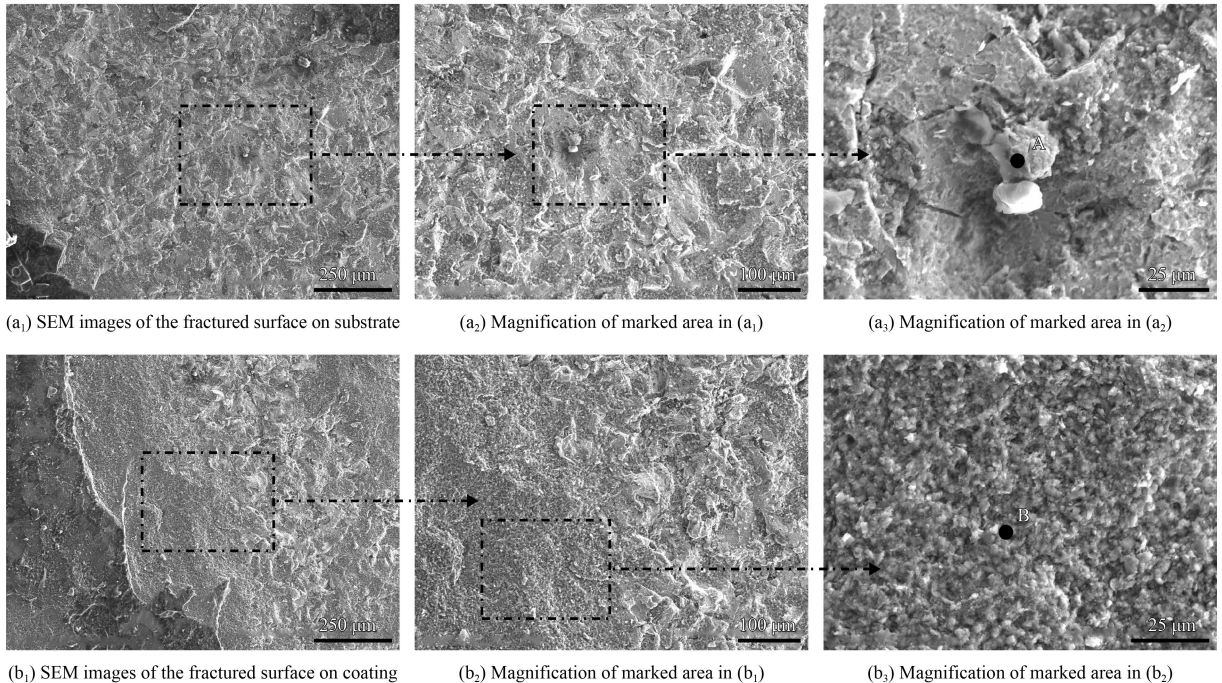


图 11 结合强度测试的断口形貌

Fig. 11 SEM images of the fractured surface after bond strength test

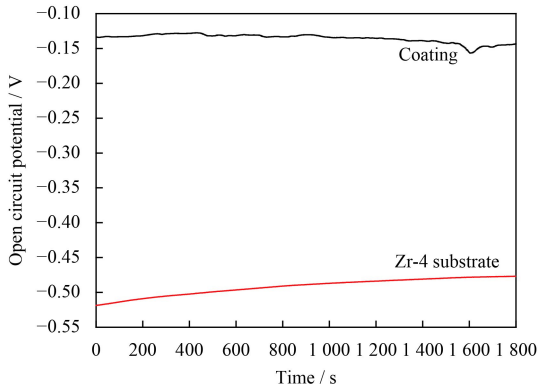


图 12 Ti₂AlC 涂层和 Zr-4 基体的开路电位

Fig.12 Open circuit potential of Ti₂AlC coating and Zr-4 substrate

3 结 论

(1) 采用 TiAl 粉和 TiC 粉热压合成, 球磨粉碎得到微米级和亚微米级两种 Ti₂AlC 粉末。添加 (NH₄)₂SO₄ 水热处理后, 亚微米 Ti₂AlC 粉末团聚成粒径 $d(0.1)=2.735 \mu\text{m}$, $d(0.5)=5.941 \mu\text{m}$ 和 $d(0.9)=12.655 \mu\text{m}$, 平均粒径 $6 \mu\text{m}$ 左右的粉末。XRD 分析仅检测到 Ti₂AlC 相, 无其它相存在。

(2) 分别以微米级和亚微米级 Ti₂AlC 粉末进行冷喷涂尝试, 未获得较好涂层; 未添加 (NH₄)₂SO₄ 进行水热处理的粉末, 颗粒尺寸没有明显变化, 同样不适合冷喷涂; 以添加 (NH₄)₂SO₄ 水热处理的粉末为喷涂原料, 在 400 °C 气体预热温度下, 沉积了厚度为 100 μm 的涂层。XRD 分析显示涂层仅有 Ti₂AlC 相。

(3) 添加 (NH₄)₂SO₄ 水热处理粉末制备的涂层硬度为 288.5 HV_{0.01}, 仅为块体 Ti₂AlC 硬度的一半。涂层较为致密, 涂层中存在微孔和介孔, 平均孔径为 9.8 nm, 但没有贯通孔隙。涂层与基体结合良好, 结合强度达 44.3 MPa。

参考文献

- [1] BARSOUM M W. The M_(N+1)AX_(N) phases: A new class of solids; Thermodynamically stable nanolaminates[J]. Progress in Solid State Chemistry, 2000, 28: 201-281.
- [2] WANG X H, ZHOU Y C. Microstructure and properties of Ti₃AlC₂ prepared by the solid-liquid reaction synthesis and simultaneous in-situ hot pressing process[J]. Acta Materialia, 2002, 50(12): 3141-3149.
- [3] 钱莹, 朱佳, 朱春城. 三元层状陶瓷 Ti₃AlC₂ 的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(23): 150-154.
- [4] QIAN Y, ZHU J, ZHU C C, et al. Research progress on the layered ternary ceramic Ti₃AlC₂[J]. Material Guide, 2012, 26(23): 150-154 (in Chinese).
- [5] NAIER B R, GARCIA-DIAZ B L, HAUCH B L, et al. Cold spray deposition of Ti₂AlC coatings for improved nuclear fuel cladding[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 466: 712-717.
- [6] ZHANG Z S, LIM S H, CHAI J W, et al. Plasma spray of Ti₂AlC MAX phase powders: Effects of process parameters on coatings' properties[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 325: 429-436.
- [7] FRODELIUS J, SONESTEDT M, BJORKLUND S, et al. Ti₂AlC coatings deposited by high velocity oxy-fuel spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(24): 5976-5981.
- [8] 李铁藩, 王恺, 吴杰, 等. 冷喷涂装置研究进展[J]. 热喷涂技术, 2011, 3(2): 15-34.
- [9] LI T F, WANG K, WU J, et al. Development on cold spray apparatus[J]. Thermal Spray Technology, 2011, 3(2): 15-34 (in Chinese).
- [10] 宋婉, 沈艳芳, 吴杰, 等. 冷喷涂沉积陶瓷涂层的研究历程[J]. 热喷涂技术, 2015(1): 1-10.
- [11] SONG W, SHEN Y F, WU J, et al. Review on the research course of ceramic coatings deposited by cold spray[J]. Thermal Spray Technology, 2015(1): 1-10 (in Chinese).
- [12] RECH S, SURPI A, VEZZU S, et al. Cold-spray deposition of Ti₂AlC coatings[J]. Vacuum, 2013, 94: 69-73.
- [13] GUTZMANN H, GARTNER F, HOCHE D, et al. Cold spraying of Ti₂AlC max-phase coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, 22(2-3): 406-412.
- [14] LI C J, YANG G J, HUANG X C, et al. Formation of TiO₂ photocatalyst through cold spraying[C]. Proceedings of the 2004 ITSC, Japan, 2004: 315-319.
- [15] YAMADA M, ISAGO H, NAKANO H, et al. Cold spraying of TiO₂ photocatalyst coating with nitrogen process gas[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(6): 1218-1223.
- [16] MIYAUCHI T, YAMADA M, YAMAMOTO A, et al. The enhanced characteristics of osteoblast adhesion to photofunctionalized nanoscale TiO₂ layers on biomaterials surfaces[J]. Biomaterials, 2010, 31(14): 3827-3839.
- [17] SALIM NT, YAMADA M, NAKANO H, et al. The effect of post-treatments on the powder morphology of titanium dioxide (TiO₂) powders synthesized for cold spray[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206(2-3): 366-371.
- [18] KOIVULUOTO H, NAKKI J, VUORISTO P. Corrosion properties of cold-sprayed tantalum coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(1): 75-82.