

TiB₂-SiC 粉末喷雾造粒及其等离子喷涂沉积机理研究

邹 柯^{1,2}, 邓春明², 刘 敏², 邹俭鹏¹, 朱仁波¹, 高 迪¹

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

(2. 广东省新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东 广州 510650)

摘 要: 利用喷雾干燥对 TiB₂-SiC 复合粉末进行造粒, 研究了浆料固含量、粘结剂含量及 SiC 含量对喷雾干燥粉体颗粒形貌等的影响。采用大气等离子喷涂技术, 以抛光的石墨为基体, 在不同预热温度和不同喷距下对 TiB₂-SiC 粉末进行粒子收集, 研究不同工艺参数对 TiB₂-SiC 粒子铺展形貌的影响, 并制备了 TiB₂-SiC 涂层。结果表明: 当浆料固含量为 50%, 粘结剂含量为 5%, SiC 含量为 10% 时, 喷雾造粒获得球形度高、流动性好的 TiB₂-SiC 粉末; 随着基体预热温度的升高, 喷距的增大, 扁平粒子的溅射逐渐减弱, 形成规则的圆盘状粒子; 在等离子焰流作用下, TiB₂-SiC 粒子熔化加速并与基体发生碰撞, 熔融粒子扁平化, 急速冷却凝固, 不断堆叠、搭接为宏观涂层。

关键词: 喷雾干燥; TiB₂-SiC; 大气等离子喷涂; 粒子收集; 沉积机理

中图分类号: TF123

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)01-0213-08

二硼化钛 (TiB₂) 是硼、钛的最稳定化合物, 以共价键结合, 属六方晶系。它具有高熔点、高硬度、高杨氏模量、高化学稳定性, 同时具有良好的导电性和导热性^[1]。二硼化钛具有广阔的应用前景, 可应用于航天航空、电极材料、超高温耐火材料等方面^[2]。目前自蔓延高温合成 (SHS) 法是国内外工业生产 TiB₂ 粉末的主要方式^[3], 但这种方法生产的粉末颗粒形状不规则, 粒径细小, 流动性差。因此需要把 TiB₂ 复合粉末重构成微米级粉末, 以满足热喷涂的流动性要求, 对此国内外已有一些关于陶瓷粉末的喷雾造粒理论和应用研究的报道^[4-6]。

作为大气等离子喷涂涂层的特征单元, 扁平粒子的形貌及扁平粒子间的堆叠决定了涂层的结构和性能^[7]。基体的预处理状态, 如表面粗糙度、预热温度等, 对等离子喷涂过程中熔滴扁平化有很大的影响^[8-10], 喷涂距离则直接影响涂层粒子沉积到基体上的速度和温度。因此在热喷涂过程中, 基体预热温度和喷涂工艺参数对涂层的结构和性能及涂层与基体的结合强度有着重要的影响。国内外学者对等离子喷涂过程中熔滴扁平化行为方面进行了大量研究^[11-13]。大气等离子喷涂具有高焰流速度、高加热温度、涂层致密、结合强度高优点, 适合制备致密的 TiB₂ 涂层。另外, 考虑到 SiC 和 TiB₂ 复合可提高其耐磨性与涂层结合稳定性, 可在 TiB₂ 粉末中加入 SiC 颗粒来进行造粒与制备涂层, 目前, TiB₂-SiC 粉末

喷雾造粒及其涂层制备的研究鲜有报道。

本研究利用喷雾干燥技术对 TiB₂-SiC 复合粉末进行造粒, 研究浆料固含量、粘结剂含量及 SiC 含量对喷雾干燥颗粒形貌及结构的影响。采用大气等离子喷涂在抛光的石墨基体上沉积 TiB₂-SiC 涂层, 研究 TiB₂-SiC 熔滴在不同预热温度和不同喷距的沉积形貌, 以优化涂层制备的工艺参数, 并阐述 TiB₂-SiC 涂层的沉积机理。

1 实 验

本实验所用的 TiB₂ 和 SiC 粉末均由秦皇岛一诺新材料开发有限公司提供, 其中硼化钛粉末纯度为 99.5%, 粒径范围为 1~3 μm; 碳化硅粉末纯度为 99%, 平均粒径约为 2.5 μm, 粉末混合球磨时所使用的粘结剂为市售聚乙烯醇。基体材料为 Φ25 mm×10 mm 的高纯石墨样品, 将石墨基体采用 400#、800#、1500# 的水砂纸进行打磨, 最后采用粒度为 2.5 μm 的人工金刚石研磨膏进行抛光。

将 TiB₂ 粉末和 SiC 粉末按质量比 9:1 混合, 同时加入适量的去离子水, 在行星球磨机中球磨 3 h, 再将聚乙烯醇加入浆料中继续球磨 3 h, 球磨机转速为 300 r/min, 制备复合粉体浆料供喷雾造粒。采用德国 Gea Niro 公司生产的 Mobile Minor 型喷雾干燥机进行喷雾造粒。主要工艺参数为: (a) 入口温度为 250 °C, 出口温度为 100 °C; (b) 雾化轮供气压力为 1.4×10⁵ Pa; (c) 进料速度 40 r/min。

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0306100); 广东省科学院科技创新发展专项 (2017GDASCX-0202, 2018GDASCX-0402); 湖南省自然科学基金 (2018JJ2524)

作者简介: 邹 柯, 女, 1993 年生, 博士生, 中南大学粉末冶金研究院, 湖南 长沙 410083, 电话: 0731-88876630, E-mail: zoukee@csu.edu.cn

采用德国 GTV 公司的 MF-P1000 型大气等离子喷涂系统,以喷雾造粒后的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末为原料,在抛光的石墨基体表面进行粒子收集。粒子收集过程中,基体预热温度依次控制在 50, 150, 250 $^{\circ}\text{C}$, 喷距为 90, 110, 130 mm, 喷枪以 1000 mm/s 的速度快速扫过基体表面,依次喷扫 1 次、3 次。喷涂中采用 $\Phi 6$ mm 的圆柱形喷嘴,喷涂参数如表 1 所示。

采用 X 射线衍射仪(XRD, Smartlab 9 kW, RIGAKU)对粉末和涂层的物相组成进行分析。采用附带能谱仪(EDS)的场发射-扫描电子显微镜(FE-SEM, Nova-Nano-430, FEI)分析粉末和涂层表面、截面的微观形貌及成分。采用激光粒度仪(LA-950, HORIBA, Japan)检测粉末的粒度分布,采用霍尔漏斗法测试粉末的流动性及松装密度。

2 结果与讨论

2.1 固含量对 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末造粒的影响

喷雾造粒是把液体或溶液通过喷嘴液化成雾滴,再通过干燥或冷却制备颗粒材料的造粒技术^[14]。图 1 为在不同固含量下喷雾造粒 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末的形貌。可以看出,在不同固含量下 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 造粒粉形貌有较大

的差异。当固含量较低时(30%, 质量分数),造粒后的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末细碎,几乎没有成球,球形度很低,如图 1a 所示。随着固含量增加到 40%和 45%(图 1b、图 1c), $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末颗粒逐渐球形化,但表面粗糙度较高。当固含量增加到 50%时(图 1d), $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末颗粒球形度达到最佳,且表面光洁。随着固含量继续增大到 55%和 60%(图 1e、图 1f), $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 复合粉末的球形度降低,且表面重新变得粗糙。

喷雾干燥可分为 3 个基本过程阶段:料液雾化为雾滴;雾滴和干燥介质接触、混合及流动,即进行干燥;干燥产品与空气分离^[15]。当固含量较低时,水分蒸发速率低,在干燥过程中水分迁移到雾滴表面,从颗粒内部蒸发,使雾滴产生隆起,破坏颗粒的球形度,产生破碎型颗粒。当固含量合适时,浆料的干燥过程缩短,减少颗粒内部粘结剂随水分一起向颗粒表面迁移,从而形成了表面光滑、球形度良好的粉末;当固含量过高时,会使浆料的粘度高、流动性差,导致液滴雾化效果低和粘壁现象,使颗粒表面变得粗糙。值得指出的是,就 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末粒径的均匀性而言,固含量 50%(图 1d)不如固含量 45%(图 1c),但图 1d 体现出来的大小颗粒的搭配及最佳的球形度,使其具有最好的流动性,而

表 1 等离子喷涂 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层工艺参数

Table 1 Coating parameters of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ prepared by plasma spraying

Spraying current/A	Spraying voltage/V	Primary gas Ar /L·min ⁻¹	Second gas H ₂ /L·min ⁻¹	Powder feed rate/g·min ⁻¹	Carrier gas/ L·min ⁻¹	Spraying distance/ mm
700	75	40	11	7	3.5	90~130

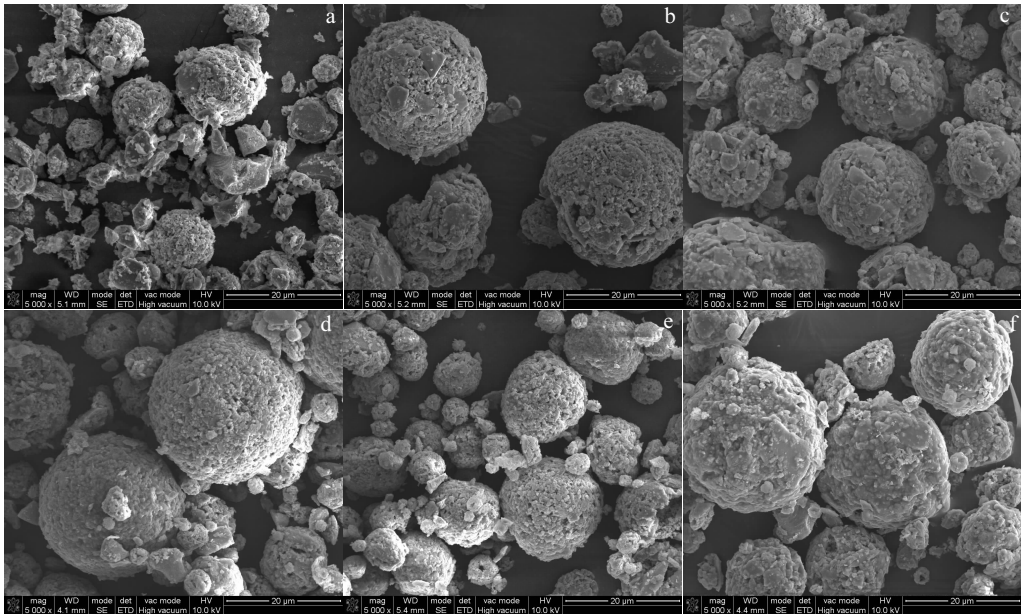


图 1 不同固含量的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 喷雾造粒表面形貌

Fig.1 Morphologies of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ powders spray dried with solid concentration of 30% (a), 40% (b), 45% (c), 50% (d), 55% (e), 60% (f)

粉末流动性是粉末等离子喷涂的一个至关重要的因素,因此,浆料固含量 50% 左右为宜。

2.2 粘结剂含量对 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末造粒的影响

喷雾造粒过程就是利用粘结剂的粘结作用,稳定雾化产生的雾滴和自身固化形成的表面,产生三维相互连接的构架以形成球状颗粒,同时赋予团聚颗粒一定的强度^[16]。图 2 为在不同粘结剂含量下喷雾造粒 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末的形貌。可以看出,当粘结剂含量较低时(1%, 质量分数),造粒粉末细碎松散,几乎不成球,如图 2a 所示。随着粘结剂含量的增加(3%和 4%), $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末造粒颗粒逐渐形成球形,但球形度不高,且表面较粗糙(图 2b 和图 2c)。当粘结剂含量增加到 5% 时,形成球形度好、表面光滑的颗粒,如图 2d 所示。继续增加粘结剂含量(6%和 7%),颗粒表面开始变得粗糙,且颗粒之间有粘结现象,球形度变差,如图 2e 和图 2f 所示。

粘结剂在喷雾造粒过程中主要以物理吸附的形式吸附在颗粒表面,吸附分子间的内聚力使颗粒紧密团聚,形成具有一定强度的团聚颗粒^[17]。当粘结剂含量较低时,颗粒间的内聚力较小,导致造粒颗粒结合强度小且容易松散,成球的颗粒少;当粘结剂含量合适时,粘结剂可改善颗粒间的结合强度,有利于粉末颗粒的球形化和致密化;当粘结剂含量过高时,浆料的粘度过大,使颗粒表面粘性变大,造成颗粒间的相互粘结,使颗粒表面粗糙,颗粒间有粘结现象,流动性变差。因此,

$\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末造粒时粘结剂含量 5% 左右为宜。

2.3 SiC 含量对 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末造粒的影响

TiB_2 的热膨胀系数为 $4.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,与石墨基体的热膨胀系数($1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)存在一定差距,引入热膨胀系数为 $4.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的 SiC,可以部分降低复合涂层的热膨胀系数,同时改善涂层与基体之间的界面结合。图 3 为在不同 SiC 含量下喷雾造粒 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末的组织形貌。当不添加 SiC 时, TiB_2 喷雾造粒为明显的不规则形貌,球形度很差(图 3a)。SiC 含量为 5% 时(图 3b), $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 复合粉末颗粒逐渐球形化,表面 SiC 的加入有助于改善 TiB_2 喷雾造粒时的球形特征。当 SiC 含量增加到 10% 时(图 3c), $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 复合粉末颗粒球形度和均匀性俱佳。随着 SiC 含量继续增大到 20% 和 30% (图 3d 和图 3f), $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 颗粒的球形度和均匀性均大幅下降。

图 4 为不同 SiC 含量的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末 XRD 图谱。随着 SiC 含量由 5% 增加 30%, TiB_2 衍射峰基本无变化, SiC (006) 晶面的衍射峰逐渐加强,而 (103) 晶面和 (110) 晶面的衍射峰也逐渐出现。考虑到 SiC 会降低 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 复合粉末的导电性,且 SiC 含量为 10% 时具有最佳球形度和流动性,故本实验选用 SiC 含量为 10% 的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末。

$\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 复合粉末喷雾造粒的最佳工艺参数为:固含量 50%,粘结剂含量 5%,SiC 含量 10%,经此工艺制备的粉末松装密度为 1.13 g/cm^3 ,具有良好的流

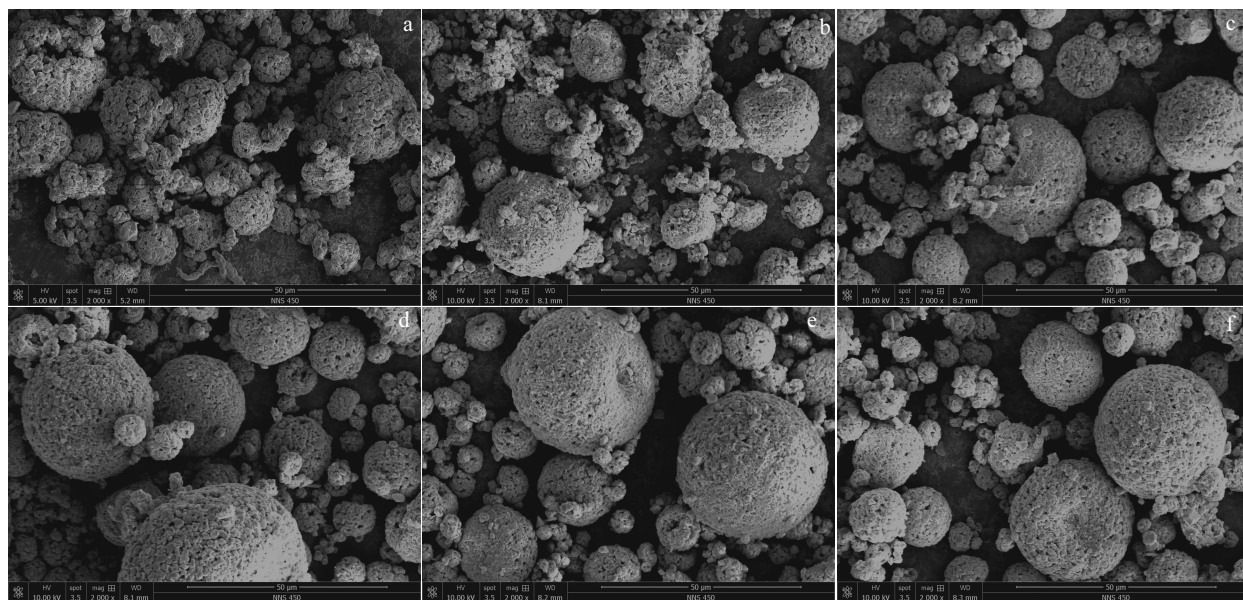
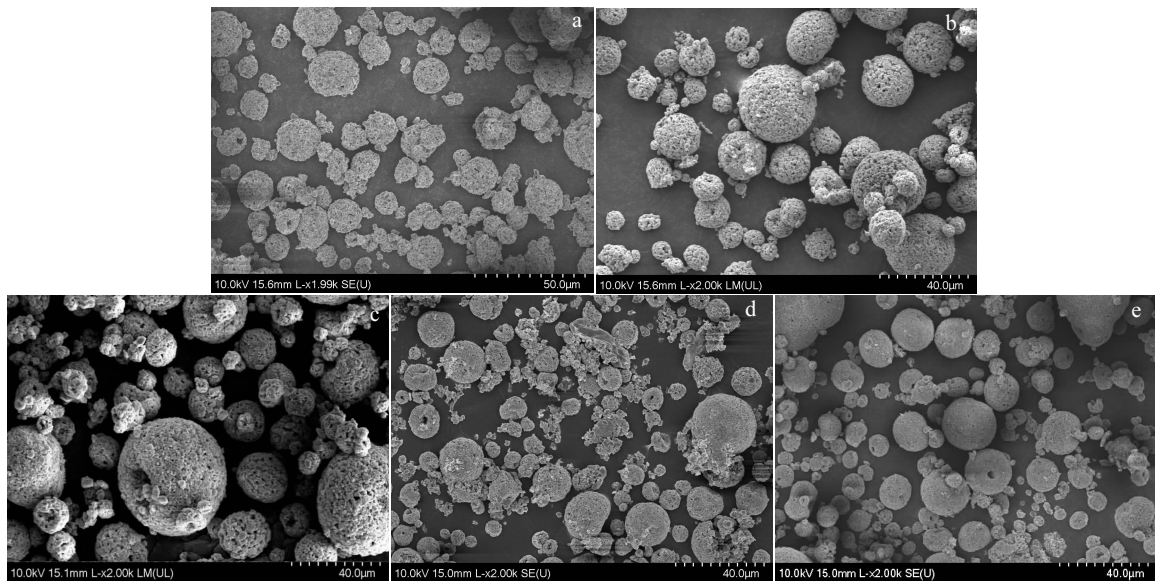
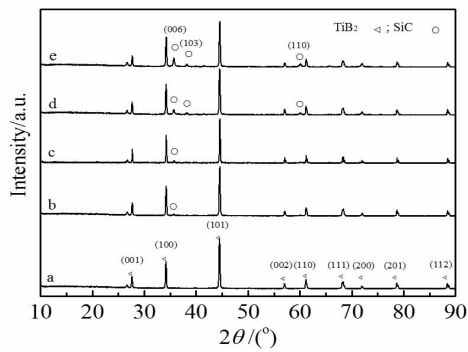


图 2 不同粘结剂含量的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 喷雾造粒表面形貌

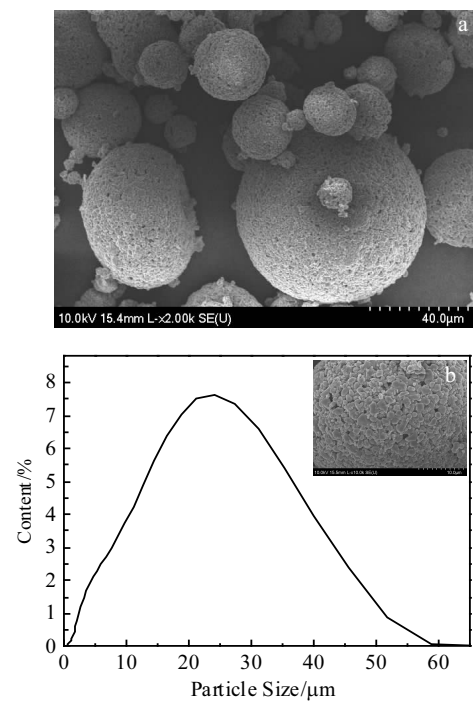
Fig.2 Morphologies of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ powders spray dried with binder concentration of 1% (a), 3% (b), 4% (c), 5% (d), 6% (e), and 7% (f)

图 3 不同 SiC 含量的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 喷雾造粒表面形貌Fig.3 Morphologies of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ powders spray dried with SiC concentration of 0% (a), 5% (b), 10% (c), 20%(d), 30% (e)图 4 不同 SiC 含量的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末 XRD 图谱Fig.4 XRD patterns of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ powders spray dried with different SiC concentrations: (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 20%, and (e) 30%

动性。图 5 为此工艺制备粉末的微观形貌和粒度分布图。从图 5a 可以看出, 粉末颗粒的表面光滑, 球形度良好, 粒径均匀。从图 5b 中的高倍 SEM 图进一步可以看出, 团聚的粉末颗粒由许多细小的粉末颗粒结合而成。经激光粒度分析测试, 粉末的粒径分布如图 5b 所示, 团聚粉末的 D_{50} 为 $25\ \mu\text{m}$, 粉末最大颗粒达 $60\ \mu\text{m}$ 。需要说明的是, 后续等离子喷涂时均采用这种工艺制备的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 复合粉末。

2.4 不同基体温度对 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末熔融粒子的影响

图 6 为大气等离子喷涂 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末在不同基体温度下的粒子沉积形貌。可以看出, 当基体温度较低

图 5 造粒后的 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末 SEM 照片及 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末的粒度分布图, 插图为粉末颗粒的高倍 SEM 照片Fig.5 Morphology of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ powder by spray drying (a), and the particle size distribution of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ powder, with the inset showing the high magnification SEM image of the particles (b)

时, 熔融粒子有明显的溅射倾向, 扁平粒子边沿有飞溅状的“触手”结构, 如图 6a、6b 所示; 当基体温度较高时, 熔融粒子铺展较为均匀, 粒子溅射有所减弱, 形成规则的圆盘状粒子, 如图 6c 所示。基体温度对扁平粒子形貌的影响主要与熔融粒子的冷却速率有关^[18]。基体温度较低时, 熔融粒子的热导率大而凝固潜热小, 当熔融粒子与基体高速碰撞时, 熔滴底部迅速发生局部固化, 而熔滴上部由于温度降低缓慢, 占据铺展优势, 因而具有更大的溅射倾向。反之, 基体温度较高时, 基体与熔滴底部的温度梯度变小, 导致更低的热传递速率, 虽然初期熔滴冷却较慢, 但实际上提高了熔滴上部液态物质的冷却速率, 有利于熔滴的铺展, 不易发生溅射。

在石墨基体上等离子喷涂 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末 3 次后, 较低的基体温度 (50 °C) 仍会发生熔滴飞溅现象 (图 6d); 稍高的基体温度 (150 °C) 会大幅减少飞溅现象, 但所获得的涂层界面为疏松结构 (图 6e); 当基体温度升高到 250 °C 时, 圆盘状的粒子反复沉积, 形成了致密的涂层结构 (图 6f)。

2.5 不同喷距对 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末熔融粒子的影响

图 7 为大气等离子喷涂 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末在不同喷涂距离下的粒子沉积形貌。可以看出, 当喷距较小时 (90 mm), 沉积颗粒中心表面光滑, 边沿有熔滴撞击基体后产生的溅射, 如图 7a 所示; 当喷距适中时 (110

mm), 沉积粒子边沿有辐射状溅射, 如图 7b 所示; 当喷距较大时 (130 mm), 沉积粒子没有出现喷溅状, 只有圆盘状沉积形态, 如图 7c 所示。在大气等离子体喷涂工艺中, 喷涂距离对粉体在等离子体焰流中的温度和速率有很大影响^[19]。

另外, $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末经 3 次等离子喷涂后, 90 mm 喷距喷涂的粒子在焰流中停留时间过短, 未能被充分加热和加速, 粉末熔化状态不好, 未熔的颗粒不能在基体表面很好的沉积下来 (图 7d)。当喷距增加到 110 mm 时, 喷距的增加延长了粉末在火焰中的停留时间, 提高了粉末的熔化程度, 增加了颗粒的动能, 使颗粒与基体结合强度良好 (图 7e)。当喷距过大时 (图 7f), 粒子到达基体时的温度及速度均会过低, 使涂层与基体的结合强度下降, 且粉末的氧化程度也会提高。

2.6 等离子喷涂制备 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层分析

图 6d~6f、图 7d~7f 为 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末在石墨基体等离子喷扫 3 次 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末形貌, 可以看出熔融粒子在石墨基体上的沉积过程。 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层的形成过程主要有 3 步^[20]: (1) 喷涂粒子的产生; (2) $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粒子在热源的作用下, 喷涂材料被加热, 熔化加速;

(3) 高温高速熔融粒子在基体或已沉积形成的涂层上作用, 包括熔融粒子与基体的碰撞, 同时伴随着横向流动扁平化, 急速冷却凝固。

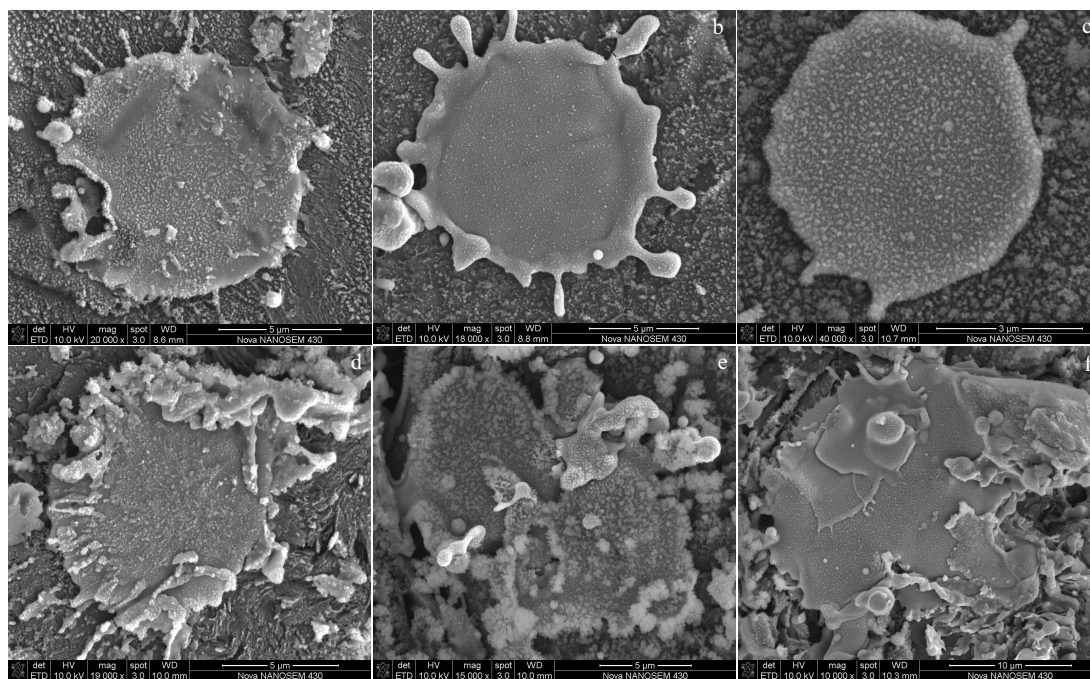


图 6 不同基体温度下等离子喷涂 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末在石墨基体上的沉积形貌

Fig.6 Morphologies of plasma sprayed $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ particles on graphite substrate at various temperatures: (a~c) spray once, (d~f) spray three times; and (a, d) 50 °C, (b, e) 150 °C, (c, f) 250 °C

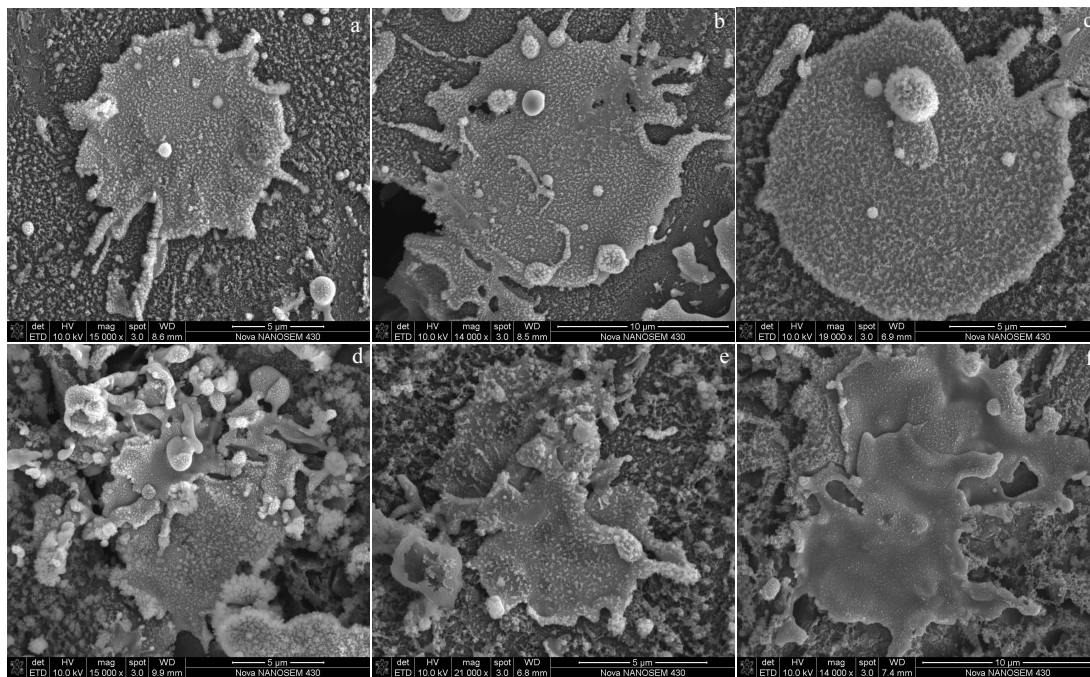


图 7 不同喷距下等离子喷涂 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末在石墨基体上的沉积形貌

Fig.7 Morphologies of plasma sprayed $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ particles on graphite substrate with various spray distance: (a~c) spray once, (d~f) spray three times; and (a, d) 90 mm, (b, e) 110 mm, (c, f) 130 mm

图 8 是 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层表面形貌及标注区和 EDS 分析。由图 8a 可以看出涂层主要由熔融以及一些半熔融粒子堆积而成。通常处于等离子焰流中心区域的粒子都能正常熔融，而一部分粉末粒子在喷涂过程中处于等离子焰流的边缘部位，导致吸收的热量不足，还有一些粒子因粒径比较大，难以熔化，这些粒子都将以半熔融态撞向石墨基体的表面。涂层中虽然含有一些没有彻底熔融的粒子，但依旧存在大片的熔融组织，这些未融的颗粒组织则镶嵌、包裹在其中。变形粉末之间相互良好地堆垛、搭接，并相互堆积长大，变形粒子不存在剥落或开裂等现象。图 8b 的 EDS 能谱表明， $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粉末等离子喷涂涂层主要由 B、Ti、Si、C 等元素组成。EDS 结果与 XRD 结果相吻合。

图 9 是 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层断面结构的示意图。可以看出 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层总体呈现一种堆垛状结构，多数未熔颗粒形成盘状贴片。这主要是因为 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 颗粒熔点高，导热系数小，使得 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 颗粒在等离子射流中较难完全熔化， $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 颗粒在等离子射流中多数是半熔融状态，在与基体碰撞的过程中形成盘状形状。随着撞击到基体表面的颗粒数目的增多，薄层逐层叠放，不仅填充了未被沉积区域，也在已经沉积好的薄层上铺展开来，形成薄层之间的搭接。由于

受各粒子的熔化状态、铺展程度、凝固时的体积变化以及颗粒捕获的气体等因素影响，造成粒子间的不完全堆积，形成涂层间的孔隙。

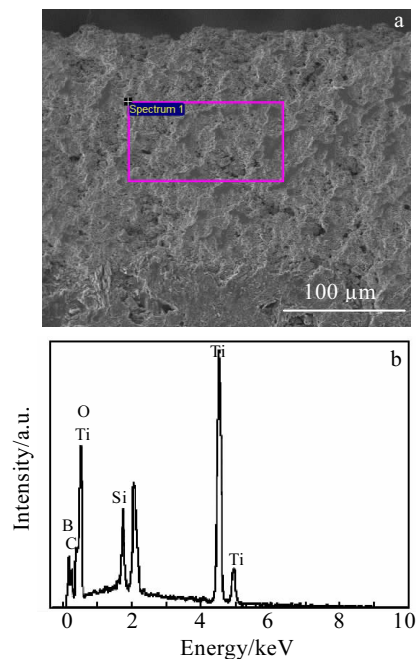


图 8 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层的表面形貌及其 EDS 分析

Fig.8 Surface morphology (a) and EDS analysis (b) of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ coating

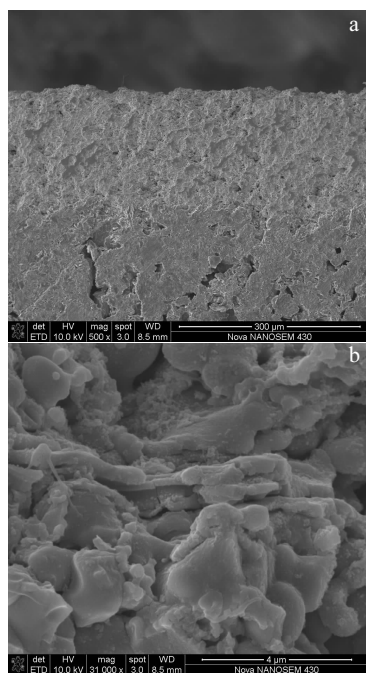


图9 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层的断面结构

Fig. 9 Cross sectional morphologies of $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ coating: (a) low magnification and (b) high magnification

3 结 论

1) $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 浆料固含量会影响干燥过程中水分的蒸发速率, 聚乙烯醇粘结剂含量影响成球过程中颗粒间的内聚力, SiC 含量会影响复合粉末球形度和导电性。 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 喷雾造粒的最佳工艺参数为: 浆料固含量为 50%, 粘结剂含量为 5%, SiC 含量为 10%。

2) 基体温度和喷涂距离对 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粒子铺展形貌有较大的影响。当基体温度较低, 喷距较小时, 熔融粒子有明显的溅射倾向; 随着基体预热温度的升高, 喷距的增大, 扁平粒子的溅射逐渐减弱, 形成规则的圆盘状粒子。

3) 等离子喷涂 $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 涂层呈堆垛状结构, 由熔融及半熔融粒子堆积而成。其沉积过程为在等离子焰流作用下, $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ 粒子熔化加速并与基体发生碰撞, 熔融粒子扁平化, 急速冷却凝固, 不断堆叠、搭接为宏观涂层。

参考文献 References

[1] Xu J, Zou B, Tao S *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2016, 672: 251

[2] Sánchez E, Moreno A, Vicent M *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2010, 205(4): 987

[3] Behnam Lotfi, Zohreh Sadeghian. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2004, 25(5b): 1183

[4] Carpio P, Moreno R, Gómez A *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2015, 35(1): 237

[5] Nandiyanto A B D, Okuyama K. *Advanced Powder Technology*[J], 2011, 22(1): 1

[6] Tang Wenjun(唐文军), Fu Zhengyi(傅正义), Zhang Jinyong(张金咏) *et al. Journal of Ceramics*(陶瓷学报)[J], 2006, 27(4): 370

[7] Fukumoto M, Tanaka Y, Nishioka E. *Materials Science Forum*[J], 2004, 449-452(2): 1309

[8] Yang K, Fukumoto M, Yasui T *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 214: 138

[9] Fukumoto M, Ohgitani I, Yasui T. *Materials Transactions*[J], 2004, 45(6): 1869

[10] Zhang Xiaofeng(张小锋), Zhou Kesong(周克崧), Song Jinbing(宋进兵) *et al. Journal of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐学报)[J], 2015, 43(1): 21

[11] Li Dachua(李大川), Zhao Huayu(赵华玉), Zhong Xinghua(钟兴华) *et al. Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报)[J], 2017, 32(6): 571

[12] Chen S Y, Ma G Z, Wang H D *et al. Applied Surface Science*[J], 2017, 409: 277

[13] Bolelli G, Sabiruddin K, Lusvarghi L *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2010, 205(2): 363

[14] Stunda-Zujeva A, Irbe Z, Berzina-Cimdina L. *Ceramics International*[J], 2017, 43(15): 11 543

[15] Nishiura D, Shimosaka A, Shirakawa Y *et al. Journal of Chemical Engineering of Japan*[J], 2010, 43(8): 641

[16] Wong T W, John P. *Handbook of Nanoparticles*[J], 2016, 52(13): 329

[17] Miyazaki S, Nishiura D, Shimosaka A *et al. Advanced Powder Technology*[J], 2011, 22(1): 93

[18] Morks M F, Tsunekawa Y, Okumiva M *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2002, 11(2): 226

[19] Zagorski A V, Stadelmaier F. *Surface & Coatings Technology*[J], 2001, 146(1): 162

[20] Shinoda K, Demura M, Murakami H *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2010, 204(21): 3614

Research on Spray Granulation and Plasma Spraying Deposition Mechanism of TiB₂-SiC Powders

Zou Ke^{1,2}, Deng Chunming², Liu Min², Zou Jianpeng¹, Zhu Renbo¹, Gao Di¹

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

(2. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Key Laboratory of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510650, China)

Abstract: TiB₂-SiC composite powders were prepared by spray-drying, and the influence of slurry solid content, binder content and SiC content on the particle morphology of the spray-dried powder were investigated. TiB₂-SiC flattening splats were collected on the polished graphite substrate by air plasma spraying under the condition of different substrate temperatures and spray distance. The influences of coating parameters on the splat morphology were investigated. Besides, TiB₂-SiC coatings were prepared by air plasma spraying. The results indicate that TiB₂-SiC powder with high sphericity and good fluidity is obtained by spray-drying when the solid content of the slurry is 50wt%, the binder content 5wt%, and the SiC content 10wt%. With the increase of the substrate temperature and spray distance, the flat particles gradually decrease to form regular disc-shaped particles. Under the flame of plasma, the melting of TiB₂-SiC particles accelerates and the particles collide with the substrate. The molten particles are flattened, rapidly cooled and solidified. Therefore, the TiB₂-SiC particles are continuously stacked and connected as a macroscopic coating.

Key words: spray-drying; TiB₂-SiC; plasma spraying; collect flattening splats; deposition mechanism

Corresponding author: Zou Jianpeng, Ph. D., Professor, State Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, Tel: 0086-731-88830376. E-mail: zoujp@csu.edu.cn