

引用格式: 袁旭罔, 郝亚鸣, 胡悦, 等. 等离子喷涂用氧化铝-钛碳化硅团聚粉末的制备[J]. 航空材料学报, 2025, 45(4): 27-36.
YUAN Xujiang, HAO Yaming, HU Yue, et al. Preparation of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ agglomerated powder for plasma spraying[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(4): 27-36.

等离子喷涂用氧化铝-钛碳化硅团聚粉末的制备

袁旭罔, 郝亚鸣, 胡悦, 赫丽华*, 王智勇, 王峰,
王一渤, 李国鹏

(中国航发北京航空材料研究院 隐身材料重点实验室, 北京 100095)

摘要: 高温吸波材料对先进战机热端部件的隐身性能具有重要的影响, Al_2O_3 和 Ti_3SiC_2 在高温吸波材料领域有着广泛的应用前景。然而, 两种粉末物理混匀后流动性较差, 难以直接用于等离子喷涂, 故需要进行二次造粒。本工作采用喷雾造粒法对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ 团聚粉末进行制备, 研究浆料成分及喷雾造粒工艺参数对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ 团聚粉末形貌、表面粗糙度、粒径分布等性能的影响规律。结果表明, 优化浆料中的固含量及 PVA 含量有利于改善粉末球形度及表面粗糙度, 控制喷雾盘转速可有效调控粉末的粒径分布, 合理的进/出风温度会进一步改善粉末球形度。当喷雾盘转速为 $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进风温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 、出风温度 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 获得的团聚粉末球形度好、表面粗糙度低、松装密度高、流动性优异且粒径分布集中。该方法获得的粉末可直接应用于等离子喷涂, 适合批量生产, 对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ 高温吸波材料的研究具有重大价值。

关键词: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ 团聚粉末; 喷雾造粒; 形貌; 流动性

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000050

中图分类号: V259; TB34

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)04-0027-10

Preparation of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ agglomerated powder for plasma spraying

YUAN Xujiang, HAO Yaming, HU Yue, HE Lihua*, WANG Zhiyong,
WANG Feng, WANG Yibo, LI Guopeng

(Key Laboratory of Stealth Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: High-temperature microwave-absorbing materials play a crucial role in enhancing the stealth capabilities of hot-end components in advanced warplanes. Among them, Al_2O_3 and Ti_3SiC_2 have a wide range of applications in this field. However, the two powders have poor fluidity after physical mixing, which makes them difficult to use directly for plasma spraying, so secondary granulation is required. In this research, agglomerated powders composed of Al_2O_3 and Ti_3SiC_2 are successfully prepared using centrifugal spray drying. The study indicates the influence of various factors, including slurry solid content, PVA solution content, spray disk rotational speed, inlet air temperature, and outlet air temperature, on the morphology, surface roughness, and particle size distribution of the agglomerated powders. The results show that optimizing the content of solid and PVA in the slurry is beneficial to improve the sphericity and surface roughness of the powder, controlling the rotational speed of the spray disk can effectively control the particle size distribution of the powder, and a reasonable inlet/outlet temperature will help to further improvement of the sphericity of the powder. Optimal conditions for producing high-quality agglomerated powders are: 60% solid content, 3% PVA solution content, a spray disk rotational speed of $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, an inlet air temperature of $250 \text{ }^\circ\text{C}$, and an outlet air temperature of $130 \text{ }^\circ\text{C}$. Under these conditions, the agglomerated powders exhibit high sphericity, low surface roughness, a bulk density of $1.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, a fluidity of $37.1 \text{ s}/50 \text{ g}$, and a tightly concentrated particle size distribution ($D_{10} = 30.1 \text{ } \mu\text{m}$, $D_{50} = 56.7 \text{ } \mu\text{m}$, and $D_{90} = 90.1 \text{ } \mu\text{m}$). These powders, obtained through this method, can be directly utilized in plasma spraying and are suitable for large-scale production,

thereby holding significant promise for the research and development of high-temperature wave-absorbing materials based on Al_2O_3 and Ti_3SiC_2 .

Key words: Al_2O_3 - Ti_3SiC_2 composite powder; spray granulation; morphology; fluidity

现阶段世界各国均在大力发展新型探测技术及制导武器,战斗机在战场上会受到多种探测方式的威胁,因此先进战机的隐身性能成为标志性的战技指标^[1]。隐身性能的实现主要依靠外形设计和吸波材料,吸波材料是由基体材料和吸收剂组成。基体材料为透波材料,影响吸波材料的热力学性能;吸收剂是核心,承担着衰减雷达波、降低目标雷达散射截面(RCS)的作用^[2-5]。目前常温及中温吸波材料均采用磁性吸收剂,居里温度较低,当温度超过居里温度时其铁磁性吸波功能消失,吸波材料失效^[6-9]。目前新型战机尾部特别是航空发动机的热端部件服役温度较高,磁性吸波材料无法满足温度需求,故新型耐高温吸收剂的研制尤为迫切^[10-12]。

钛碳化硅(Ti_3SiC_2)是一种三元层状碳化物,价键中同时存在共价键和金属键,兼具金属的铁磁性及陶瓷的耐高温和力学性能,有望成为一种新型的耐高温吸收剂^[13-14]。Su等^[15]利用等离子喷涂工艺制备了 Ti_3SiC_2 /堇青石涂层,其中 Ti_3SiC_2 为高温吸收剂,堇青石为基体材料,当涂层厚度为1.5 mm时,高温下8~12 GHz频段范围内具有较好的吸波性能。但是 Ti_3SiC_2 /堇青石涂层在高温考核后会出现脱落甚至粉化现象,需要寻找合适的基体材料,提升涂层的耐高温性能。氧化铝(Al_2O_3)作为透波材料,具有高强度、耐高温等优势,是理想的基体材料^[16]。综上所述,有必要对 Al_2O_3 - Ti_3SiC_2 材料的制备开展研究, Ti_3SiC_2 和 Al_2O_3 粒径较小,物理混匀后粉末流动性较差,无法直接应用于等离子喷涂工艺,需要对两种粉末进行二次造粒,改善粉末的粒径分布及流动性。喷雾造粒是一种常见的二次造粒工艺,其成本低、应用广、可控性强,能够制备球形度高、粒径分布均匀的粉末,满足等离子喷涂工艺的要求^[17-20]。

本工作采用喷雾造粒法制备 Al_2O_3 - Ti_3SiC_2 团聚粉末,研究浆料中固含量及PVA溶液含量对喷雾造粒工艺的影响。同时,研究喷雾造粒工艺参数(喷雾盘转速、进风温度及出风温度)对团聚粉末特性的影响。通过设计4组实验,优化出 Al_2O_3 - Ti_3SiC_2 团聚粉末的最佳制备工艺,获得球形度高、表面粗糙度低、粒径分布集中的团聚粉体,满足等离子喷涂工艺的要求。该方法高效简单,适合于大

批量 Al_2O_3 - Ti_3SiC_2 团聚粉末的生产,为 Al_2O_3 - Ti_3SiC_2 复合涂层的制备奠定基础。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用 Al_2O_3 (型号为1301134,纯度99.7%) and Ti_3SiC_2 (型号为2203018,纯度99%)粉末均由福斯曼科技有限公司提供,性能见表1,粉末形貌及粒径分布如图1所示。黏结剂为10%的聚乙烯醇(PVA)溶液,PVA(型号为1788,醇解度88%~89%,摩尔分数)由上海麦克林生化科技有限公司提供。

表1 原材料粉末性能
Table 1 Performance of the raw powders

Powder	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	Apparent density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Al_2O_3	3.02	6.39	13.41	1.18
Ti_3SiC_2	0.88	6.74	27.75	0.54

1.2 实验方法

浆料配方: Al_2O_3 与 Ti_3SiC_2 质量比1:1,固含量40%~65%,PVA含量1%~4%,质量分数;球磨工艺:氧化铝磨球(5 mm),转速 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,时间12 h(间歇运行);利用LGZ8型喷雾造粒机进行喷雾造粒,造粒参数:进风温度200~280 $^{\circ}\text{C}$,出风温度110~140 $^{\circ}\text{C}$,喷雾盘转速35~50 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,蠕动泵转速40 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,具体参数如表2所示。

采用Nova nanoSEM450型场发射扫描电镜观察粉末的表面形貌与结构;采用Mastersizer 2000型激光粒度分析仪测试造粒粉末的粒径;采用BT-1000型粉体综合测试仪测试造粒粉末的松装密度和流动性。

2 结果与分析

2.1 固含量对 Al_2O_3 - Ti_3SiC_2 团聚特性的影响

不同固含量的喷雾造粒参数如表2所示(编号1~6),控制PVA溶液含量为3%,进风温度250 $^{\circ}\text{C}$,出风温度130 $^{\circ}\text{C}$,喷雾盘转速40 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,

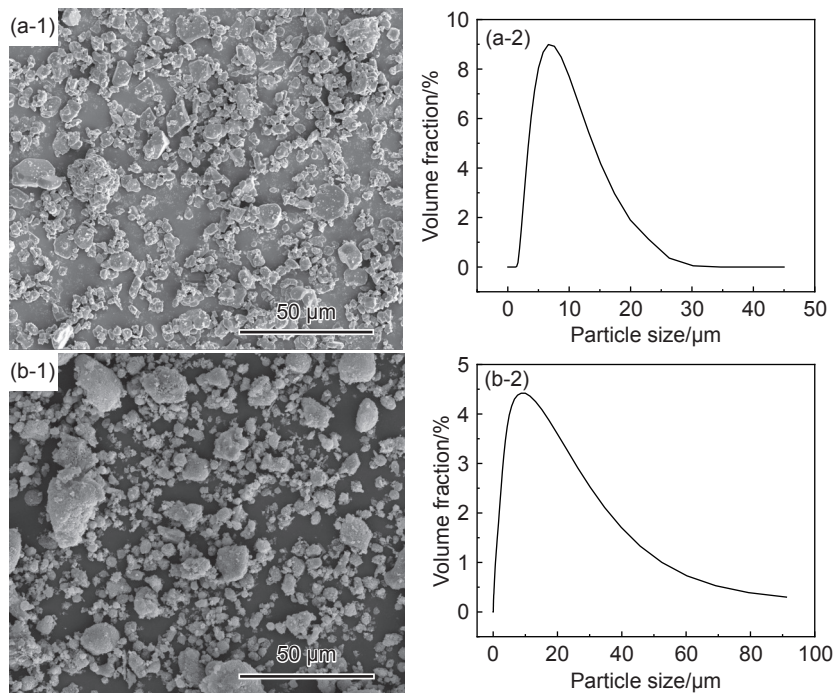


图 1 粉末形貌(1)及粒径分布(2) (a)Al₂O₃; (b)Ti₃SiC₂

Fig. 1 Morphology(1) and particle size distribution(2) of powers (a)Al₂O₃; (b)Ti₃SiC₂

表 2 喷雾造粒参数

Table 2 Parameters of first group spray granulation process

Number	Solid content/ %	PVA content/ %	Inlet temperature/ ℃	Outlet temperature/ ℃	Spray disc speed/ (r · min ⁻¹)	Peristaltic pump speed/ (r · min ⁻¹)
1	40	3	250	130	40	40
2	45	3	250	130	40	40
3	50	3	250	130	40	40
4	55	3	250	130	40	40
5	60	3	250	130	40	40
6	65	3	250	130	40	40
7	60	1	250	130	40	40
8	60	2	250	130	40	40
9	60	3	250	130	40	40
10	60	4	250	130	40	40
11	60	3	250	130	35	40
12	60	3	250	130	40	40
13	60	3	250	130	45	40
14	60	3	250	130	50	40
15	60	3	200	110	40	40
16	60	3	230	120	40	40
17	60	3	250	130	40	40
18	60	3	280	140	40	40

蠕动泵转速 40 r · min⁻¹, 固含量范围在 40%~65% 内变化。喷雾造粒制备的团聚粉末形貌如图 2

所示, 松装密度、流动性、粒径大小如图 3 所示。

由图 2 中不同固含量浆料制备的团聚粉末形

貌可以看出,固含量不同,粉末形貌差异很大。当固含量为40%、45%、50%时,团聚粉末中存在较多的破碎粉末,粉末形状不规则。随着固含量的增加,破碎粉末数量减少,出现较多苹果状颗粒及少量球形颗粒(如图2(a)~(c)所示);当固含量为55%时,团聚粉末中仍有部分苹果状颗粒,但粉末球形度显著改善(如图2(d)所示);当固含量为60%时,团聚粉末球形度最佳(如图2(e)所示);当固含量为65%时,团聚粉末中大多为球形粉末,但出现少量椭球形及苹果状颗粒,颗粒之间存在黏结现象(如图2(f)所示)。

这是由于喷雾造粒过程中液体浆料通过蠕动泵输送至造粒塔时,接触热风快速干燥成球形颗

粒。干燥过程中涉及浆料的传热和传质作用,水分迁移至颗粒表面蒸发。当浆料固含量较低(40%~50%)时,颗粒表面会形成一层易破碎的低渗透性薄膜,导致团聚粉末出现中空或破碎颗粒的现象;当浆料固含量适宜时(55%~60%),颗粒内部较为均匀,由于干燥时间较短,随着水分迁移至颗粒表面黏结剂的量减少,黏结剂均匀分布于颗粒内部,形成球形度较好且实心的团聚粉末;当浆料固含量较高(65%)时,浆料黏度较大,团聚粉末中不但出现椭球颗粒及颗粒间黏结的现象,还出现浆料流动性差及黏度大,导致造粒过程中出现黏壁现象及团聚粉末出粉率低等问题^[21]。

图3为不同固含量浆料制备团聚粉末的松装

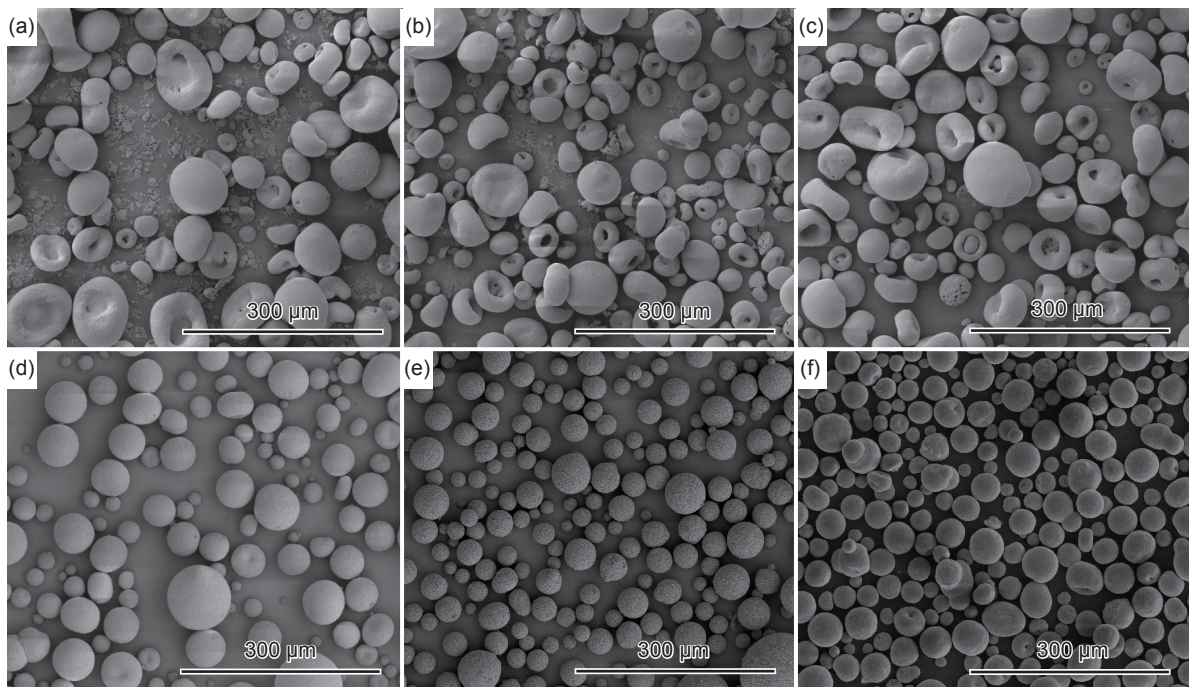


图2 不同固含量实验制备的团聚粉末形貌图 (a)40%; (b)45%; (c)50%; (d)55%; (e)60%; (f)65%

Fig. 2 Morphology of agglomerated powders prepared with different solid contents (a)40%; (b)45%; (c)50%; (d)55%; (e)60%; (f)65%

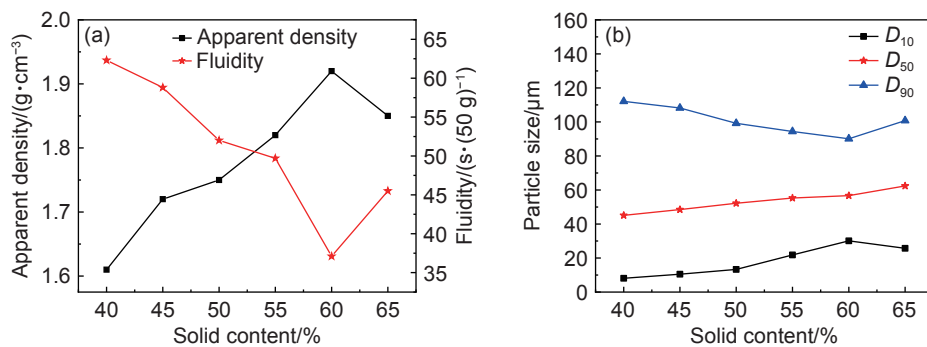


图3 不同固含量实验制备的团聚粉末性能松装密度和流动性(a)以及粒径(b)

Fig. 3 Apparent density and fluidity(a) and particle size(b) of agglomerated powders prepared at different solid contents

密度、流动性及粒径大小。随着固含量的增加,团聚粉末松装密度先增加后减小,流动性先提高后降低,粒径范围由窄变宽;当固含量为60%时,团聚粉末质量最优,松装密度最大为 $1.92\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,流动性最好为 $37.1\text{ s}/50\text{ g}$,粒径较为集中,其中 D_{10} 为 $30.1\text{ }\mu\text{m}$, D_{50} 为 $56.7\text{ }\mu\text{m}$, D_{90} 为 $90.1\text{ }\mu\text{m}$ 。分析其原因为:当固含量较低时,造粒粉末中存在较多的破碎颗粒及苹果状颗粒,导致粉末的松装密度较低,流动性较差,粒径分布较宽;当固含量适宜时,粉末中均为球形颗粒,粉末质量最优;当固含量较高时,粉末中存在椭球颗粒及颗粒之间黏结的现象,导致粉末流动性降低,大颗粒增多^[22]。因此固含量为60%时,制备的团聚粉末球形度最高,质量最好。

2.2 PVA 溶液含量对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ 团聚粉末特性的影响

不同 PVA 含量的实验参数如表 2 所示(编号 7~10),浆料固含量为 60%,喷雾造粒机进风温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$,出风温度为 $130\text{ }^\circ\text{C}$,喷雾盘转速及蠕动泵转速均设置为 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,PVA 溶液含量为 1%、2%、3%、4%。浆料中不同 PVA 溶液含量制备的团聚粉末的形貌、松装密度、流动性及粒径大小如图 4 和图 5 所示。

从图 4 可以看出,浆料中 PVA 溶液含量不同,粉末的状态及表面形貌存在较大差异。PVA 溶液含量为 1%~3% 时,随着含量的提高,粉末球形度提高,粉末表面黏结的细小颗粒减少,粉末表面粗

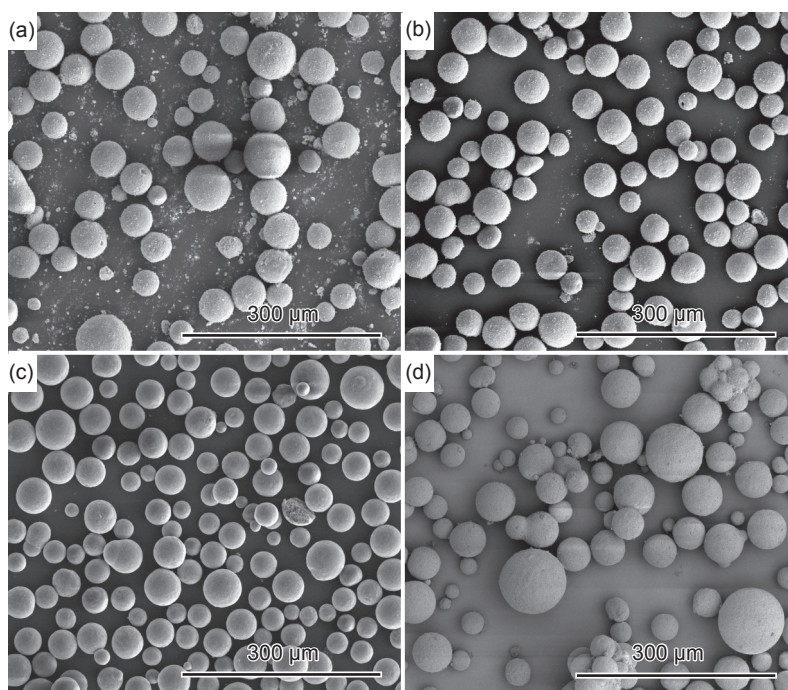


图 4 不同 PVA 溶液含量实验制备的团聚粉末形貌图 (a)1%;(b)2%;(c)3%;(d)4%

Fig. 4 Morphology of agglomerated powders prepared with varying PVA concentrations (a)1%;(b)2%;(c)3%;(d)4%

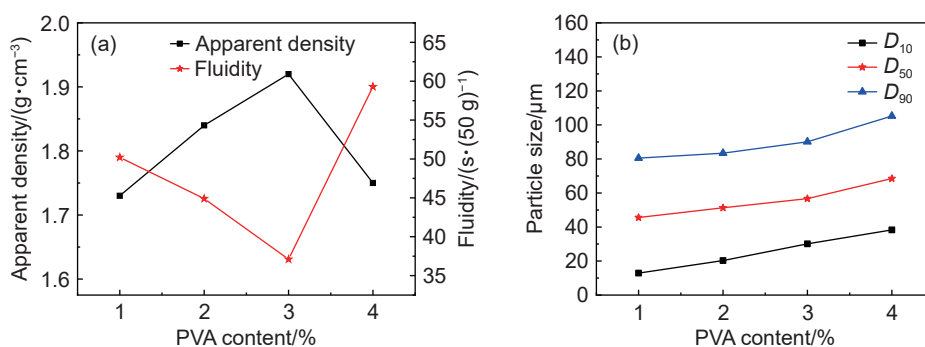


图 5 不同 PVA 溶液含量实验制备的团聚粉末性能松装密度和流动性(a)以及粒径(b)

Fig. 5 Apparent density and fluidity(a) and particle size(b) of agglomerated powders prepared with varying PVA concentrations

糙度降低;当含量为4%时,粉末球形度降低,粉末之间互相黏结,粉末表面粗糙度较大。图5为PVA溶液含量对团聚粉末松装密度、流动性及粒径大小的影响,可以看出随着PVA溶液含量的提高,粉末的松装密度和流动性均为先增加后减小,粉末的粒径逐渐增大。当PVA溶液含量为3%时,团聚粉末的质量最优,松装密度为 $1.92\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,流动性为 $37.1\text{ s}/50\text{ g}$,粉末粒径较为集中(D_{10} 为 $30.1\text{ }\mu\text{m}$, D_{50} 为 $56.7\text{ }\mu\text{m}$, D_{90} 为 $90.1\text{ }\mu\text{m}$)。

喷雾造粒过程中,PVA物理吸附在原始颗粒表面,通过黏结力使得原始颗粒团聚成球形颗粒。同时,在团聚颗粒表面形成一层PVA薄膜,故团聚颗粒保持球形且有一定的强度。当PVA溶液含量较低时,吸附在原始颗粒表面的PVA含量较少,团聚颗粒表面的PVA薄膜强度较低,导致团聚粉末内部结合强度也较低,故粉末容易松散,产生较多的破碎颗粒,从而在团聚粉末表面吸附了较多的破碎颗粒,粉末表面粗糙度则较高,松装密度较低,流动性也较差,并且整体粉末粒径偏小;随着PVA溶液含量的进一步提高,粉末内聚强度提高,表面粗糙度及球形度得到改善,松装密度提高,流动性变好,粒径适中;当PVA溶液含量高达4%时,浆料的黏度较高,导致团聚颗粒之间出现互相粘接的现象,粉末整体粒径偏大,松装密度降低且流动性较差^[23]。故在喷雾造粒过程中,最优的PVA溶液含量为3%。

2.3 喷雾盘转速对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ 团聚粉末特性的影响

不同喷雾盘转速的喷雾造粒参数如表2所示(编号11~14),其中浆料固含量为60%,PVA溶液含量为3%,进风温度设置为 $250\text{ }^\circ\text{C}$,出风温度控制在 $130\text{ }^\circ\text{C}$,蠕动泵转速为 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,变量为喷雾盘转速,分别设置为 35 、 40 、 45 、 $50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。获得的团聚粉末形貌、松装密度、流动性及粒径大小如图6和图7所示。

图6为团聚粉末的表面形貌,不同喷雾盘转速制备的团聚粉末均为实心球形颗粒,基本没有苹果状颗粒,表面较为光滑,说明喷雾盘转速对于团聚粉末的表面状态及形貌影响较小。团聚粉末的物理性能如图7所示,由图可知,随着喷雾盘转速的提高,团聚粉末的粒径减小,松装密度和流动性先随之增加后减小。当喷雾盘转速为 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,团聚粉末松装密度和流动性最优。这是由于喷雾造粒设备采用的是旋转式喷雾盘,当转速提高时,雾滴的离心力较高导致雾滴粒径减小,从而造成干燥后的粉末粒径减小。因此,粉末的松装密度和粒径之间存在一定的关系,随着粉末粒径的提高,粉末之间存在的范德华力则降低,相应粉末的流动性和填充性提高,进而导致粉末的松装密度也提高;然而,当粉末的粒径高于某一极限值而继续提高时,随着粉末尺寸的增大,不同粉末之间的孔隙增大,填充

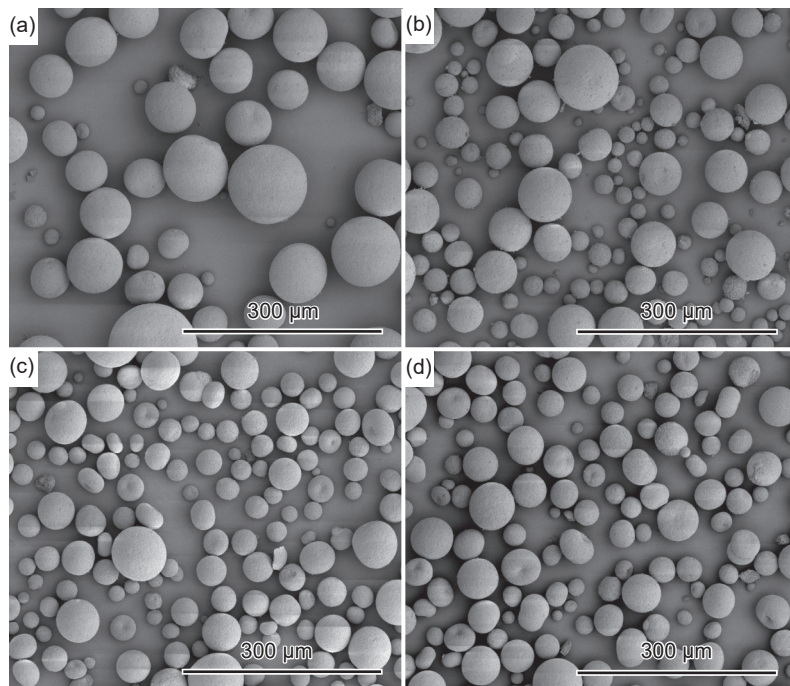


图6 不同喷雾盘转速实验制备的团聚粉末形貌图 (a) $35\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $45\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (d) $50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 6 Morphology of agglomerated powders prepared at different spray-disk rotation speeds (a) $35\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $45\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (d) $50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

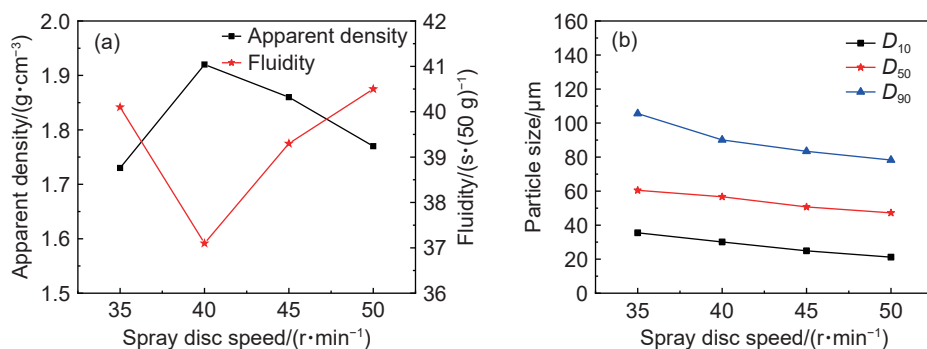


图7 不同喷雾盘转速实验制备的团聚粉末的松装密度和流动性 (a)以及粒径(b)

Fig. 7 Apparent density and fluidity(a) and particle size(b) of agglomerated powders prepared at different spray-disk rotation speeds

性降低,进而导致粉末流动性变差且松装密度降低。团聚粉末的物理性能受上述两方面因素的制约,故当喷雾盘转速从 $35\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 提高至 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,制备的粉末的物理性能主要受前一因素的影响,而当喷雾盘转速高于 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 继续提高时,粉末的物理性能主要受后一方面的影响^[24]。当喷雾盘转速为 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,粉末的松装密度最高为 $1.92\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,流动性最好为 $37.1\text{ s}/50\text{ g}$,综合物理性能最优。

2.4 进风温度、出风温度对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ 团聚粉末特性的影响

该部分研究了喷雾造粒过程中的进风温度对

团聚粉末特性的影响,实验参数如表2所示(编号15~18)。实验过程中固含量为60%、PVA溶液含量为3%、喷雾盘和蠕动泵转速均为 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,进风温度设置为200、230、250、280 $^{\circ}\text{C}$,对应的出风温度为110、120、130、140 $^{\circ}\text{C}$ 。团聚粉末形貌如图8所示,松装密度、流动性及粒径大小如图9所示。

由图8可以看出进风温度、出风温度对粉末形貌的影响很大。当进风温度为200 $^{\circ}\text{C}$ 、出风温度为110 $^{\circ}\text{C}$ 时,粉末球形度较差,存在较多的苹果状颗粒;随着进口、出风温度的升高,粉末球形度变好,苹果状颗粒的比例降低;当进风温度超过250 $^{\circ}\text{C}$ 、出风温度高于130 $^{\circ}\text{C}$ 时,粉末虽然为球形颗粒,但

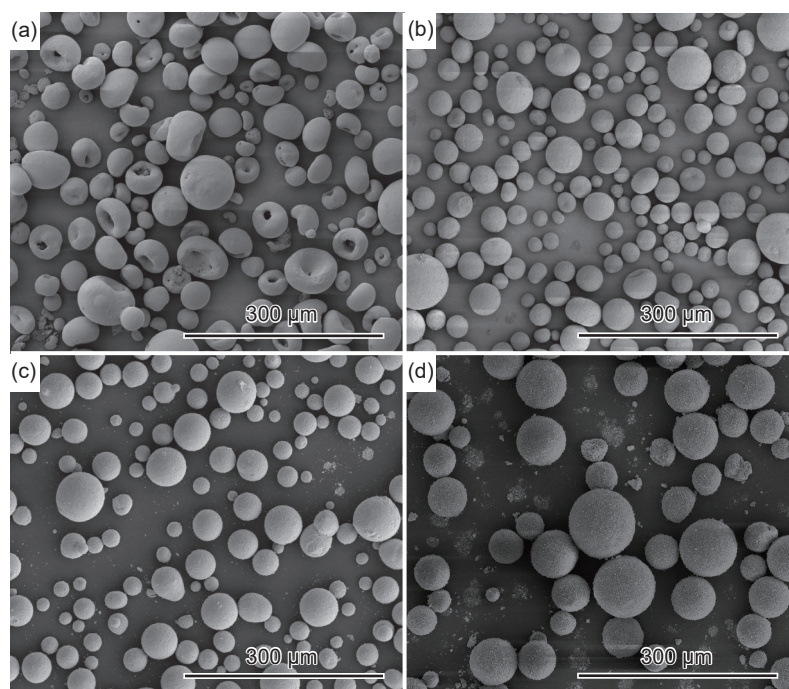


图8 不同进风、出风温度实验制备的团聚粉末形貌图 (a)进风温度200 $^{\circ}\text{C}$ 、出风温度110 $^{\circ}\text{C}$; (b)进风温度230 $^{\circ}\text{C}$ 、出风温度120 $^{\circ}\text{C}$; (c)进风温度250 $^{\circ}\text{C}$ 、出风温度130 $^{\circ}\text{C}$; (d)进风温度280 $^{\circ}\text{C}$ 、出风温度140 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 8 Morphology of agglomerated powders prepared at different inlet-outlet temperature pairs (a)200 $^{\circ}\text{C}$ inlet/110 $^{\circ}\text{C}$ outlet; (b)230 $^{\circ}\text{C}$ inlet/120 $^{\circ}\text{C}$ outlet; (c)250 $^{\circ}\text{C}$ inlet/130 $^{\circ}\text{C}$ outlet; (d)280 $^{\circ}\text{C}$ inlet/140 $^{\circ}\text{C}$ outlet

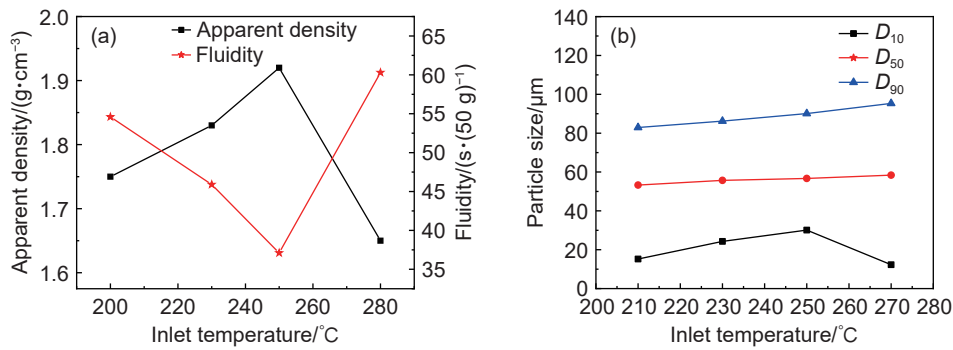


图9 不同进风、出风温度实验制备的团聚粉末松装密度和流动性(a)以及粒径(b)

Fig. 9 Apparent density and fluidity(a) and particle size(b) of agglomerated powders prepared at different inlet-outlet temperature pairs

出现较多的破碎颗粒。由图9可以看出随着进、出风温度的升高,粉末的松装密度和流动性先增加后减小,粉末整体粒径增大,当进风温度为250 °C、出风温度为130 °C时,粉末的粒径分布最为集中。

喷雾干燥过程中,水分从液滴内部扩散至表面形成壳层,最终接触高温而蒸发^[25]。当进风温度较低时,液滴表面水分蒸发,而内部水分未充分干燥,导致颗粒的内部出现中空,形成苹果状颗粒^[26],其粉末填充性较差,松装密度较低,流动性较差;当进风温度提高时,颗粒的球形度有所改善,基本看不到苹果状颗粒,粉末的松装密度提高,流动性有所改善。由于粉末中不存在苹果状颗粒及破碎颗粒,故粉末的粒径分布较为集中;当进风温度超过250 °C继续升高时,液滴表面在高温下迅速形成壳层,液滴内部的水分蒸发快,两方面的因素共同导致颗粒破碎,粉末流动性较差,粉末填充性下降,松装密度降低,粒径分布较宽。根据以上研究,当进风温度为250 °C、出风温度为130 °C时,团聚粉末球形度最好,物理性能最优异。

3 结论

(1)浆料中不同成分含量对喷雾造粒工艺影响较大,其中固含量对团聚粉末形貌有较大影响,PVA溶液含量主要影响团聚粉末表面粗糙度,两者共同影响浆料的均匀性及黏度。当固含量为60%,PVA溶液含量为3%时,浆料适用于喷雾造粒工艺,获得的团聚粉具有较好的球形度和表面质量。

(2)喷雾造粒工艺参数对团聚粉末特性具有明显的影响,其中喷雾盘转速主要影响团聚粉末的粒径大小,进风温度、出风温度主要影响粉末的球形度。当喷雾盘转速为40 r·min⁻¹、进风温度250 °C、出风温度130 °C时,获得的团聚粉末球形度较好、

粒径分布较为集中。

(3)利用最优浆料成分及喷雾造粒工艺制备的团聚粉末球形度好、表面粗糙度低,松装密度为1.92 g·cm⁻³,流动性为37.1 s/50 g,粒径分布集中(D₁₀=30.1 μm, D₅₀=56.7 μm, D₉₀=90.1 μm)。

参考文献:

- [1] SHIRKE N, GHASE V, JAMDAR V. Recent advances in stealth coating[J]. *Polymer Bulletin*, 2024, 81(11): 9389-9418.
- [2] 张安琴, 王江, 张林嘉. 航空发动机先进材料发展现状和趋势研究[J]. *内燃机与配件*, 2024(14): 130-136.
ZHANG A Q, WANG J, ZHANG L J. Research on development status and trends of advanced materials for aircraft engines[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2024(14): 130-136.
- [3] REN S Y, PAN S Y, JIN Y X, et al. Magnetoelectric characterisation of SrFe₁₂O₁₉@MoS₂ composites with high microwave absorption performance[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(8): 10184-10192.
- [4] ZHANG C, GAO B, YU H, et al. Influence of FeSiAl content on the morphological evolution and electromagnetic properties of FeSiAl/CaO-B₂O₃-SiO₂ microwave-absorbing coatings[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(2): 1546-1556.
- [5] 李韶瑜, 何巍, 李小娟, 等. Ti₃C₂T_x基复合电磁吸波材料的研究进展[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(增刊2): 145-150.
LI S Y, HE W, LI X J, et al. Research progress of Ti₃C₂T_x based electromagnetic absorbing composite materials[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(Suppl 2): 145-150.
- [6] WANG L, WANG Y, LU J, et al. Electromagnetic absorption by magnetic oxide nanomaterials: a review[J]. *ACS Applied Nano Material*, 2023, 6(24): 22611-22634.
- [7] ZHAO H, ZHU Z, XU Y, et al. Design and preparation of

- an epoxy resin matrix composite structure with broad-band wave-absorbing properties[J]. *Results in Physics*, 2024, 57: 107353.
- [8] LU D, WANG L, DONG W, et al. MoS₂ composite FeSiCr soft magnetic alloy materials and their wave-absorbing properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 177835.
- [9] DONG W, ZHANG W, WANG L, et al. Grain size modulation to optimize the wave-absorbing properties of FeSiCr alloy micro-powder[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2024, 27(1): 316-324.
- [10] 王一丹, 郭谦, 周琪杰, 等. 先进航空发动机高温功能涂层研究进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(5): 48-69.
- WANG Y D, GUO Q, ZHOU Q J, et al. Research progress in high temperature functional coatings for advanced aeroengines[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(5): 48-69.
- [11] GUO L, HE W T, CHEN W B, et al. Progress on high-temperature protective coatings for aero-engines[J]. *Surface Science and Technology*, 2023, 1(1): 1-39.
- [12] 高雨毅, 李千慧, 韩擎之, 等. 高温雷达吸波涂层研究进展[J]. *航空发动机*, 2024, 50(3): 17-32.
- GAO Y Y, LI Q H, HAN Q Z, et al. Development of microwave absorption coatings for high-temperature radar[J]. *Aeroengine*, 2024, 50(3): 17-32.
- [13] ZHANG Z, WANG W, ZHANG J, et al. Influence of elements (Zr, Mo, Cr, Fe, and Ni) doping on the electromagnetic wave absorption performance of Ti₃AlC₂-based ceramics[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(17): 28660-28673.
- [14] WANG W, LIU G, GE C, et al. Temperature-dependent dielectric properties and high-temperature microwave absorption performance of Ti₃SiC₂/Al₂O₃-13%TiO₂ coatings[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(1): 254-260.
- [15] SU J B, ZHOU W C, LIU Y, et al. High-temperature dielectric and microwave absorption property of plasma sprayed Ti₃SiC₂/cordierite coatings[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, 27(3): 2460-2466.
- [16] 王蒙蒙, 綦开宇, 刘瑞祥, 等. 透波材料及纤维增强陶瓷基透波材料研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2024, 45(6): 1112-1124.
- WANG M M, QI K Y, LIU R X, et al. Research progress of wave-transmitting materials and fiber reinforced ceramic based wave-transmitting materials[J]. *Journal of Ceramics*, 2024, 45(6): 1112-1124.
- [17] GAO X, MO Z, HAO Z, et al. Fabrication of spherical W-ZrC powder for additive manufacturing by spray granulation combined with plasma spheroidization[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28: 4222-4228.
- [18] ZHANG X, LI S, CHEN X, et al. Preparation and characterization of Cr₂AlC microspheres prepared by spray-drying granulation[J]. *Powder Technology*, 2024, 437: 119521.
- [19] 孙航, 贾均红, 杨杰, 等. 等离子喷涂用纳米 MoO₃-Bi₂O₃ 复合粉体的制备[J]. *中国粉体技术*, 2021, 27(6): 29-36.
- SUN H, JIA J H, YANG J, et al. Preparation of nano-structured MoO₃-Bi₂O₃ composite powder for plasma spraying[J]. *China Powder Science and Technology*, 2021, 27(6): 29-36.
- [20] 邹柯, 邓春明, 刘敏, 等. TiB₂-SiC 粉末喷雾造粒及其等离子喷涂沉积机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(1): 213-220.
- ZHOU K, DENG C M, LIU M, et al. Research on spray granulation and plasma spraying deposition mechanism of TiB₂-SiC powders[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(1): 213-220.
- [21] 付静波, 张晓, 庄飞, 等. 浆料固含量对喷雾造粒钼粉组织形貌和物理性能的影响[J]. *中国体视学与图像分析*, 2013, 18(2): 154-158.
- FU J B, ZHANG X, ZHUANG F, et al. Effect of solid content of slurry on the morphology and physical properties of spray granulation molybdenum powder[J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2013, 18(2): 154-158.
- [22] 刘源, 王昕, 冯潇强, 等. 大气等离子喷涂用硼化锆粉体的喷雾造粒制备研究[J]. *材料研究与应用*, 2019, 13(1): 37-52.
- LIU Y, WANG X, FENG X Q, et al. Preparation of zirconium diboride powder by spray granulation for atmospheric plasma spraying method [J]. *Materials Research and Application*, 2013, 19(4): 81-83.
- [23] 付静波, 庄飞, 张晓. 黏结剂含量对喷雾造粒钼粉形貌和物理性能的影响[J]. *中国粉体技术*, 2013, 19(4): 81-83.
- FU J B, ZHUANG F, ZHANG X. Effects of binder content on morphology and physical property of spray granulated molybdenum powders[J]. *China Powder Science and Technology*, 2013, 19(4): 81-83.
- [24] 葛瑾, 张敏, 任思佳. 等离子喷涂用硼化锆粉体的优化及控制研究[J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(10): 1014-1023.
- GE J, ZHANG M, REN S J. Research on optimization and control of zirconium boride powder for plasma spraying[J]. *Electronic Components and Materials*, 2022, 41(10): 1014-1023.
- [25] 朱浪涛, 杨军, 张庆莹, 等. 等离子喷涂用 ZrO₂-

MoSi₂复合粉末的制备及其影响因素[J]. 稀有金属, 2014, 38(6): 1043-1048.

ZHU L T, YANG J, ZHANG Q Y. Preparation and influence factors of ZrO₂-MoSi₂ agglomerated composite powder used for plasma-spraying[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(6): 1043-1048.

- [26] 罗文, 郝振华, 李树荣, 等. 氧化铜和氧化锡混合粉体喷雾造粒工艺研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(2): 98-104.

LUO W, HAO Z H, LI S R, et al. Process research on spray granulation of mixed indium oxide and tin oxide powder[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineer-

ing Science), 2022, 43(2): 98-104.

收稿日期: 2025-04-03; 录用日期: 2025-04-21

基金项目: 第十届中国科协人才托举工程项目(YESS20241002AE); 太行国家实验室技术研发项目(THL-K-24-069); 中国航发科技创新平台项目(CXPT-2023-031); 中国航发航材院基金项目

通讯作者: 赫丽华(1976—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为隐身材料, 联系地址: 北京市 81 信箱 9 分箱(100095), E-mail: helihua-xjt@163.com

(本文责编: 王俊丽)