

引文格式: 王东升, 张晓东, 刘赛月, 等. 纳米结构莫来石粉体喂料的制备与表征[J]. 航空制造技术, 2023, 66(10): 72-76, 84.

WANG Dongsheng, ZHANG Xiaodong, LIU Saiyue, et al. Preparation and characterization of nano-structured mullite feedstock[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(10): 72-76, 84.

纳米结构莫来石粉体喂料的制备与表征*

王东升¹, 张晓东¹, 刘赛月², 魏福双¹, 王 铀¹

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001)

[摘要] 环境障涂层(Environmental barrier coating, EBC)是设立在服役环境和发动机材料之间阻止或减小环境对发动机侵蚀的表面防护层。莫来石具有良好的耐高温性、化学兼容性、抗氧化性和导热性,被视为环境障涂层的重要材料。对纳米结构莫来石粉体喂料的制备工艺进行了研究,目的是制备出球形度好、表面光滑、流动性好、致密度高的纳米结构粉体喂料。以纳米 Al₂O₃、SiO₂ 粉体为原材料,采用湿法球磨、喷雾干燥、固相烧结的方法制备了用于环境障涂层的纳米结构莫来石粉体喂料。借助 X 射线衍射仪和扫描电镜研究了粉体喂料在不同热处理温度下的组织与形貌。结果显示,1300 °C+150 min 的固相烧结的球形度与喷雾干燥所得的球形度保持一致,表面也较为光滑,缺陷较少,莫来石粉体喂料的粒径在 60 μm 左右,晶粒为纳米结构。

关键词: 莫来石粉体喂料; 喷雾干燥; 纳米结构; 等离子喷涂; 环境障涂层(EBC)

Preparation and Characterization of Nano-Structured Mullite Feedstock

WANG Dongsheng¹, ZHANG Xiaodong¹, LIU Saiyue², WEI Fushuang¹, WANG You¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Space Environment Simulation Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] Environmental barrier coating (EBC) is a surface protection layer established between the service environment and the engine material to prevent or reduce the environmental erosion of the engine. Mullite is regarded as an important material for environmental barrier coating due to its good high temperature resistance, chemical compatibility, oxidation resistance and thermal conductivity. The preparation process of nanostructured mullite feedstock was studied, and the purpose was to prepare nanostructured feedstock with good sphericity, smooth surface, good fluidity and high density. This paper uses nano Al₂O₃ and nano SiO₂ as raw materials, and uses spray drying and solid phase sintering methods to prepare nanostructured mullite feedstock. The microstructure and morphology of feedstock at different heat treatment temperatures were studied by means of X-ray diffractometer and scanning electron microscopy. The experimental results show that the sphericity of solid-phase sintering at 1300 °C+150 min is consistent with the sphericity of the feedstock obtained by spray drying, and the surface is relatively smooth, with fewer defects, the particle size of the feedstock is about 60 μm, and the grain is nano structure.

Keywords: Mullite feedstock; Spray drying; Nanostructure; Plasma spraying; Environmental barrier coating (EBC)

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.10.072

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017-VI-0020-0093); 国家重点研发计划(2020YFB2007900); 重大研究计划培育项目(91960107); 国家自然科学基金青年基金(52001217); 空间环境下材料行为与评价技术国家重点实验室开放基金(52001217)。

随着材料科学技术的快速发展,“两机”(航空发动机和燃气轮机)技术取得了巨大的进步,作为飞行器的直接动力来源,“两机”技术直接影响飞行器和舰船的服役性能、安全性及经济性^[1]。虽然“两机”技术取得了辉煌的成绩,但是其发展依然受到众多因素的限制,其中最主要的是温度的影响,“两机”燃烧室的温度不断提高,直接影响了发动机的推重比和进口温度。目前,新型的第四代发动机的推重比已经达到了10,进口温度达到了1600℃左右,所以,开发高推重比、高进口温度等优异性能的发动机也受到科学工作者的重点关注^[2-4]。各代发动机的推重比和进口温度如表1所示^[5]。

镍基高温合金材料曾被视为“两机”技术的首选材料,虽然进口温度不断提高,但是镍基高温合金最高可实现的温度也仅为1075℃。碳化硅、氮化硅以及陶瓷基复合材料(Ceramic matrix composites, CMC)具有良好的耐高温性、抗高温蠕变性能、耐腐蚀性、高强度、高韧性及质量较小的特点,可以有效提高发动机的推重比和进口温度^[6-8]。

高温、干燥的环境下,陶瓷基复合材料的表面会被氧化生成保护性的SiO₂,保护发动机的表面。然而在水氧环境下,SiO₂会与空气中的水蒸气发生反应,生成极易挥发的Si(OH)₄,如反应式(1)~(3)所示^[9-13],导致材料的表面产生损伤,从而降低材料的使用寿命。图1为硅基非氧化物陶瓷在水氧环境中的腐蚀行为示意图^[14]。

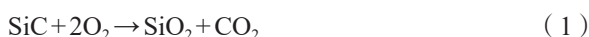


表1 各代发动机的推重比和进口温度^[5]

Table 1 Thrust-to-weight ratio and inlet temperature of each generation of engines^[5]

代别	性能指标	典型发动机
第二代	推重比: 4~6; 涡轮前温度: 1300~1500 K	斯贝 MK202 服役: 20世纪60年代
第三代	推重比: 7~8; 涡轮前温度: 1680~1750 K	F100, F110 服役: 20世纪70年代
第四代	推重比: 9~10; 涡轮前温度: 1850~1980 K	F119, EJ200 服役: 20世纪末

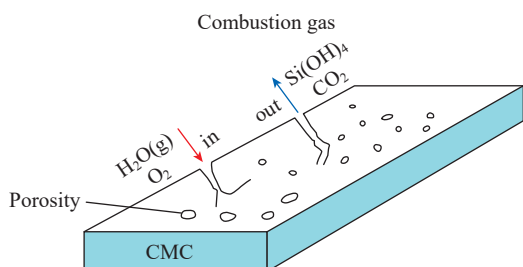
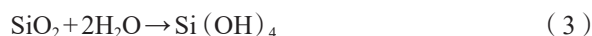
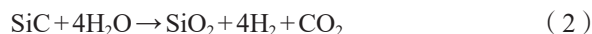


图1 硅基非氧化物陶瓷在水氧环境中的腐蚀行为示意图^[14]
Fig.1 Schematic diagram of corrosion behavior of silicon-based non-oxide ceramics in water-oxygen environment^[14]



环境障涂层(Environmental barrier coating, EBC),是在服役环境和发动机之间设立一道有效阻止或者减小环境对发动机侵蚀的一种表面防护层^[15],可有效解决硅基非氧化物陶瓷在水氧环境中的腐蚀问题^[16]。莫来石因具有较小的热膨胀系数和良好的耐高温性能,以及在较大的温度变化范围内具有良好的抗氧化性和导热性能而成为环境障涂层中间层的首选材料^[17-19]。

等离子喷涂是目前主要采用的环境障涂层技术,而为了制备高质量的环境障涂层,首先必须有高质量的粉体喂料作为喷涂材料。到目前为止,环境障涂层已经具备成熟的理论体系和制备工艺,进一步提高环境障涂层的服役温度 and 安全性依然是环境障涂层研究的重点课题,如果解决了这些问题,环境障涂层的发展将会迈进巨大一步。众多科学工作者的研究课题主要集中在环境障涂层的制备,忽略了粉体喂料的重要性,对粉体喂料的研究较少。邓路炜等^[20]采用喷雾造粒加固相烧结的方法制备了纳米结构Yb₂SiO₅喷涂粉体喂料,探索了制备高纯度Yb₂SiO₅的固相烧结工艺。Yang等^[21]研究了陶瓷粉末孔隙结构对等离子喷涂热障涂层热物理性能的影响,揭示了不同孔隙率的粉体喂料结构对TBC涂层使用的寿命。

在喂料的制备过程中,热处理过程是制备合格喂料的重要环节,热处理温度过高,所得到的粉体会出现结块的现象,影响喂料的流动性,热处理温度过低,无法生成所需的物相。因此,本文着重研究了纳米结构莫来石粉体喂料的制备工艺,目的是制备出球形度好、表面光滑、流动性好、致密度高的纳米结构粉体喂料,为今后纳米结构环境障涂层提供技术支撑。

1 试验及方法

1.1 试验原材料

本试验所用的原料有:SiO₂(宁波金雷纳米材料科技有限公司)、Al₂O₃(广州市华力森贸易有限公司)、柠檬酸铵(天津市瑞金特化学品有限公司)、聚乙烯醇(PVA,天津市科密欧化学试剂有限公司)。其中,柠檬酸铵作为分散剂,PVA作为黏结剂。

1.2 粉体喂料的制备

莫来石的化学式为3Al₂O₃·2SiO₂,Al₂O₃和SiO₂的质量分数分别为71.83%和28.17%,按照此比例配制。由于纳米级的粉体粒径较小、质量较轻、流动性差、容易团聚等特性,容易被气流吹散或者被高温火焰烧掉,不能直接作为喷涂的喂料,需要经过湿法球磨、喷雾干燥、固相烧结的过程才能制备出用于喷涂的纳米

结构的喂料。

湿法球磨时,首先将柠檬酸铵溶解于去离子水中,使柠檬酸铵均匀地分散在去离子水中,待柠檬酸铵混合均匀后,将 Al_2O_3 和 SiO_2 依次加入到去离子水中,待粉体均匀分散在去离子水中后加入一定质量的 PVA。表 2 为湿法球磨的配比参数。

喷雾干燥是将球磨制浆后的浆料经过雾化后,在热空气的作用下,浆料中的水蒸气迅速蒸发,得到干燥的微米级或者亚微米级的粉末,表 3 为喷雾干燥参数。本试验使用上海雅程设备仪器有限公司 YC-018 型喷雾干燥机。

固相烧结是形成莫来石粉体喂料的关键步骤,湿法球磨和喷雾干燥后的粉体是 Al_2O_3 和 SiO_2 的混合物,必须经过固相烧结才可以形成粉体喂料。图 2 为莫来石粉体喂料的固相烧结工艺,500 $^{\circ}C$ +60 min 保证柠檬酸铵、PVA 胶水和结晶水的挥发。

表 2 湿法球磨物料质量配比
Table 2 Material mass ratio of wet ball mill

粉体	柠檬酸铵	去离子水	PVA
1	0.02	3	0.1

表 3 喷雾干燥参数
Table 3 Spray drying parameters

喷雾干燥参数	设定值
进口温度/ $^{\circ}C$	250
出口温度/ $^{\circ}C$	110
雾化速度/ $(r \cdot min^{-1})$	18000
送料速度/ $(g \cdot min^{-1})$	13.5

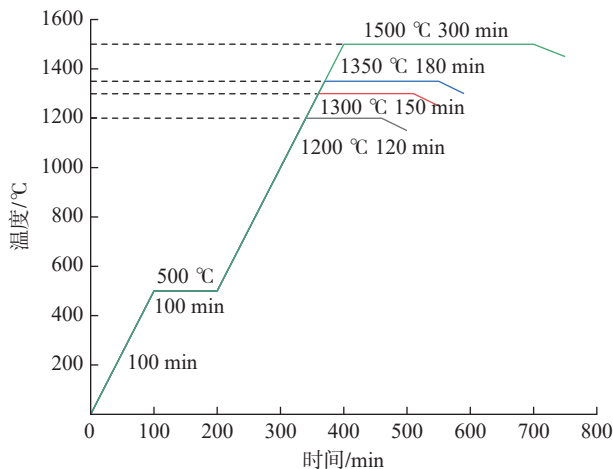


图 2 莫来石粉体喂料固相烧结
Fig.2 Solid-phase sintering of mullite powder feedstock

1.3 测试分析

采用 XPERT 型 X 射线衍射仪对所制的粉体喂料进行物相分析。采用 SUPRA55 型场发射扫描电镜研究粉体喂料的结构形貌,测试扫描速度为 $10^{\circ}/min$,步长为 0.02° ,扫描范围为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$,仪器所采用的加速电压和加速电流分别为 40 kV 和 40 mA。采用丹东百特 BT-301 型振实密度测试仪测量了粉体喂料的松装密度和振实密度;采用 LDBT-200/FL4-1 型霍尔流量计测试了粉体喂料的流动性,漏斗孔径为 5 mm。采用 LS-POP 激光粒度仪研究了粉体喂料的粒径。

2 结果与讨论

2.1 喷雾造粒后的团聚体

图 3 为喷雾干燥后的团聚体尺寸及表面形貌,可以看出,喷雾干燥后的粉体尺寸在 $50 \mu m$ 左右,粉体形状为圆形,表面存在少量的凸起,以及粉体中存在少量的没有团聚成球形的粉体,整体颗粒比较光滑,存在缺陷的粉体较少。

将图 3 中的团聚体进行能谱分析,得到表 4 所示的原子数分数。可知,喷雾造粒后的 Al 和 Si 的原子比约为 3 : 1,说明湿法球磨和喷雾干燥的参数较好, Al_2O_3 和 SiO_2 分散均匀,以一定的比例结合成球形。

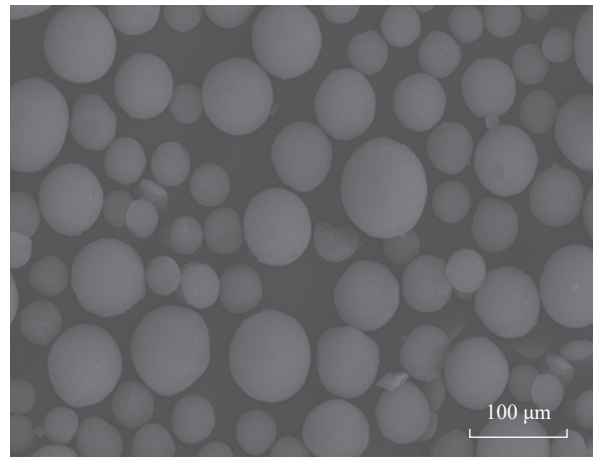


图 3 喷雾干燥后粉体表面形貌
Fig.3 Surface morphology of powder after spray drying

表 4 喷雾干燥后 EDS 分析(原子数分数)
Table 4 EDS analysis after spray drying (atomic fraction) %

元素	原子数分数
O	65.25
Al	25.74
Si	9.02

2.2 固相烧结后的粉体喂料

图4为不同热处理工艺粉体喂料表面形貌。可以观察到,1200℃的喂料表面十分光滑,表面的缺陷很少,粉体喂料的球形度好,与喷雾干燥后的表面形貌较为一致;1300℃的喂料表面形貌表面比较光滑,没有发现破碎的颗粒,粉体喂料的尺寸大部分在60μm左右;1350℃的喂料表面形貌稍显粗糙,并且在1350℃的烧结条件下出现了轻微的结块(图5);1500℃的喂料表面形貌十分粗糙,表面出现了许多的孔洞,球形喂料形貌被破坏,出现破损的现象,而且出现了更加明显的结块情况。

表5为不同烧结温度下粉体喂料的平均晶粒尺寸和SiO₂的质量分数。随着烧结温度的升高,粉体喂料中的SiO₂逐渐减少,粉体喂料中未反应的Al₂O₃和SiO₂继续发生反应,但粉体喂料中的晶粒却发生了长大的现象。因此,综合粉体喂料的形貌、晶粒尺寸和流动性,选择1300℃+150min为粉体喂料的最佳烧结温度。

图6为不同热处理工艺粉体喂料的物相组成。

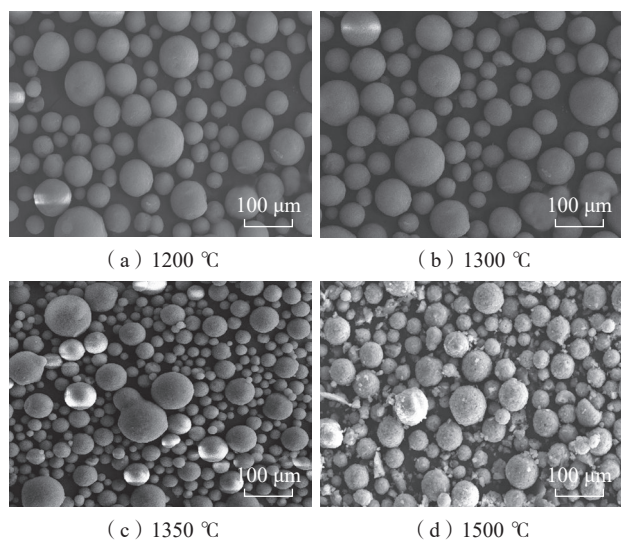


图4 不同热处理工艺粉体喂料表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of powder feedstock with different heat treatment processes

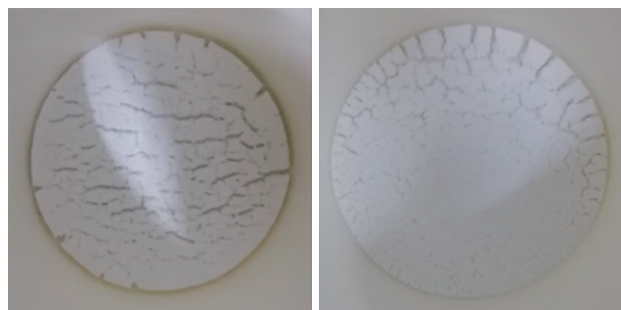


图5 1350℃烧结粉体喂料结块

Fig.5 Agglomeration of powder feedstock sintered at 1350℃

1200℃没有生成莫来石,依然是Al₂O₃和SiO₂的混合物,表明莫来石的生成温度在1200℃以上。1300℃和1350℃的物相组成为莫来石,但是粉体喂料中依然还存在微量的SiO₂,结合表5可知,1300℃烧结后的莫来石的平均晶粒尺寸小于50nm,1350℃大约为70.4nm。1500℃生成的全部物质为莫来石,没有其他的物质,但是晶粒尺寸已接近100nm。

2.3 莫来石粉体喂料的性能表征

表6为喷雾干燥与固相烧结制得的粉体的流动性、松装密度和振实密度。可以看到,经过固相烧结之后,粉体喂料的流速、松装密度和振实密度都有了极大的提升。流速达到了150g/s,说明莫来石粉体喂料的球形度

表5 粉体喂料的晶粒尺寸与SiO₂质量分数

Table 5 Grain size and SiO₂ mass fraction of powder feedstock

烧结温度	平均晶粒尺寸/nm	SiO ₂ 质量分数/%
1500℃+300min	91.5	0
1350℃+180min	70.4	3
1300℃+150min	42.5	5
1200℃+120min	—	—

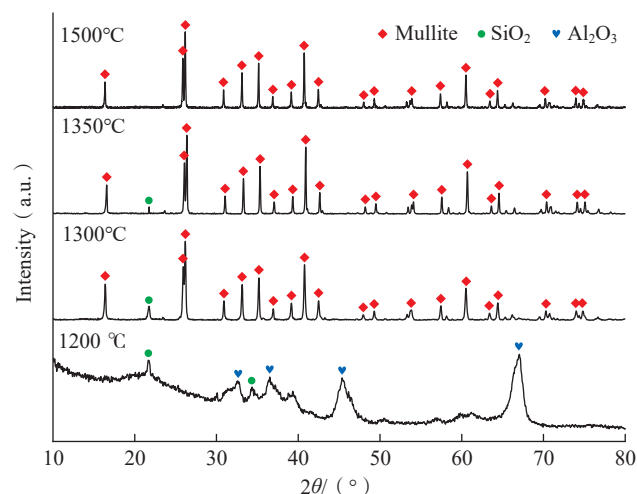


图6 不同热处理工艺粉体喂料的物相组成

Fig.6 Phase composition of powder feedstock with different heat treatment processes

表6 1300℃莫来石粉体喂料的密度、流动性和流速

Table 6 Density, fluidity and flow rate of mullite feedstock at 1300℃

状态	松装密度/(g·mL ⁻¹)	振实密度/(g·mL ⁻¹)	流速/(g·s ⁻¹)	流动性
喷雾干燥	0.55	0.67	34.5	差
固相烧结	1.12	1.37	150	好

较好,适合作为 EBC 涂层的喂料。松装密度和振实密度也比较大,说明粉体喂料的致密度较高。

图 7 为莫来石粉体喂料的粒径分布。莫来石粉体喂料的粒径 D_{10} 为 $38.6 \mu\text{m}$ 左右, D_{25} 为 $49.1 \mu\text{m}$ 左右, D_{50} 为 $63.9 \mu\text{m}$ 左右, D_{75} 为 $81.3 \mu\text{m}$ 左右, D_{90} 为 $97.3 \mu\text{m}$ 左右。粉体喂料的粒径在 $38.6 \mu\text{m}$ 以下的约占总喂料的 3%, 粒径在 $97.3 \mu\text{m}$ 以上的约占总喂料的 9.33%, 其中在 $38.6 \sim 97.3 \mu\text{m}$ 之间的喂料占绝大部分。

图 8 所示为用上述纳米结构莫来石粉体喂料经低压等离子喷涂技术制备的涂层, 可以看到, 涂层中分散保留着许多未熔的纳米结构莫来石粉体喂料(深灰色的区域)。

3 结论

(1) 湿法球磨、喷雾干燥可获得球形度好、表面光滑、缺陷较少的 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ 团聚粉体。

(2) 喷雾干燥后的 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ 团聚粉体经 $1300^\circ\text{C} + 150 \text{ min}$ 固相烧结后形成纳米结构莫来石粉体喂

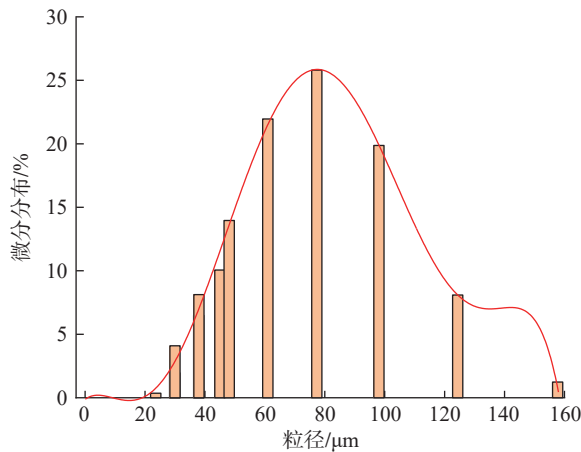


图 7 粉体喂料的粒径分布

Fig.7 Particle size distribution of powder feedstock

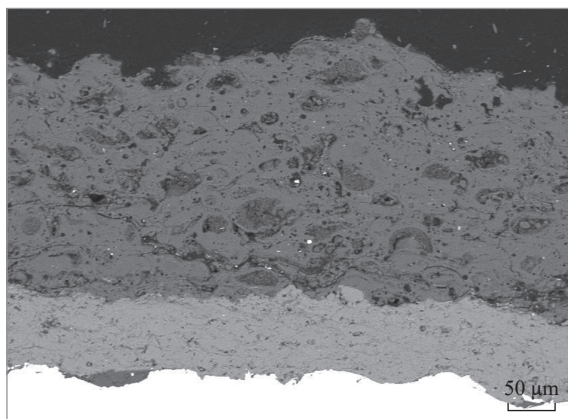


图 8 含纳米结构莫来石粉体喂料的莫来石涂层

Fig.8 Mullite coating containing nano-structured mullite feedstock

料,粉体喂料的球形度较好,表面也较为光滑,缺陷较少,粉体喂料的粒径在 $60 \mu\text{m}$, 晶粒为纳米结构(小于 50 nm)。

(3) 莫来石粉体喂料的流动性较好,流速为 150 g/s ; 而松装密度和振实密度分别达 1.12 g/mL 和 1.37 g/mL , 致密度较好,可完全满足作为 EBC 的要求。

参考文献

- [1] 王铀, 孟君晟, 刘赛月, 等. 环境障涂层——挑战与机遇[J]. 国际航空航天科学, 2018, 6(3): 17-29.
WANG You, MENG Junsheng, LIU Saiyue, et al. Environmental barrier coatings—Challenges and opportunities[J]. International Aerospace Science, 2018, 6(3): 17-29.
- [2] XUAN H J, WU R R. Aeroengine turbine blade containment tests using high-speed rotor spin testing facility[J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(6): 501-508.
- [3] 江舟, 倪建洋, 张小锋, 等. 陶瓷基复合材料及其环境障涂层发展现状研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(14): 48-64.
JIANG Zhou, NI Jianyang, ZHANG Xiaofeng, et al. Research progress of ceramic matrix composites and their environmental barrier coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(14): 48-64.
- [4] 谭禧, 陈孝业, 张小锋, 等. 硅基非氧化物陶瓷复合材料的环境障涂层系统的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(2): 152-159.
TAN Xi, CHEN Xiaoye, ZHANG Xiaofeng, et al. The process of environmental barrier coating system for silica-based non-oxide ceramic matrix composites[J]. Materials Research and Application, 2019, 13(2): 152-159.
- [5] 董志国, 王鸣, 李晓欣, 等. 航空发动机涡轮叶片材料的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2): 455-457.
DONG Zhiguo, WANG Ming, LI Xiaoxin, et al. Application and progress of materials for turbine blade of aeroengine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(S2): 455-457.
- [6] SWAIN B, MALLICK P. Failure analysis and materials development of gas turbine blades[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33: 5143-5146.
- [7] WANG C, ZHANG X F, ZHOU K S, et al. Nano-composite structured environmental barrier coatings prepared by plasma spray-physical vapor deposition and their thermal cycle performance[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(11): 3455-3462.
- [8] XIAO S K, LIU X R, CHANG Z X, et al. Si— HfO_2 composite powders fabricated by freeze drying for bond layer of environmental barrier coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(13): 19266-19273.
- [9] JACOBSON N S, OPILA E J, MYERS D L, et al. Thermodynamics of gas phase species in the Si—O—H system[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2005, 37(10): 1130-1137.
- [10] OPILA E J, SMIALEK J L, ROBINSON R C, et al. SiC recession caused by SiO_2 scale volatility under combustion conditions: II, thermodynamics and gaseous-diffusion model[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1999, 82(7): 1826-1834.

(下转第 84 页)

上海:上海交通大学,2016.

MA Yue. Creep behavior of TB2 titanium alloy and applications in satellite band[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

[5] 杨冬雨,付艳艳,惠松晓,等. 高强度高韧钛合金研究与应用进展[J]. 稀有金属,2011,35(4): 575-580.

YANG Dongyu, FU Yanyan, HUI Songxiao, et al. Research and application of high strength and high toughness titanium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(4): 575-580.

[6] 崔伟,李勋,苏贵鸿,等. TB6 钛合金抛光表面完整性试验[J]. 航空制造技术,2017,60(4): 73-78.

CUI Wei, LI Xun, SU Guihong, et al. Experiment on surface integrity of polishing for titanium TB6[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 73-78.

[7] 李和仙,刘伟,李梅,等. 谈电化学机械抛光[J]. 机电技术,2010,33(5): 63-64,68.

LI Hexian, LIU Wei, LI Mei, et al. On electrochemical mechanical polishing[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2010, 33(5): 63-64, 68.

[8] EL KHALICK MOHAMMAD A, WANG D W. Electrochemical mechanical polishing technology: Recent developments and future research and industrial needs[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5): 1909-1924.

[9] DUBEY A K, SHAN H S, JAIN N K. Precision microfinishing by electro chemical honing[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2009, 17(4): 364.

[10] DUBEY A K, SHAN H S, JAIN N K. Analysis of surface roughness and out-of-roundness in the electro chemical honing of internal cylinders[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(5): 491-500.

[11] PA P S. Synchronous finishing processes using a combination of grinding and electrochemical smoothing on end-turning surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(3): 277-285.

[12] GOSWAMI R N, MITRA S, SARKAR S. Experimental investigation on electrochemical grinding (ECG) of alumina-aluminum interpenetrating phase composite[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(7): 729-741.

[13] XU B. Five-axis numerical control of electrochemical mechanical polishing of an integral impeller[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15: 12504-12523.

[14] 刘新龙,陈燕,张国富,等. 电解-旋转超声磁粒复合对 TC4 板抛光的研究[J]. 电镀与精饰,2019,41(10): 13-16.

LIU Xinlong, CHEN Yan, ZHANG Guofu, et al. Study on polishing of TC4 plate by electrolysis-rotating ultrasound magnetic particle composite[J]. Plating & Finishing, 2019, 41(10): 13-16.

[15] FUSHIMI K, HABAZAKI H. Anodic dissolution of titanium in NaCl-containing ethylene glycol[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(8): 3371-3376.

[16] KIM D, SON K, SUNG D, et al. Effect of added ethanol in ethylene glycol-NaCl electrolyte on titanium electropolishing[J]. Corrosion Science, 2015, 98: 494-499.

[17] HUANG P, LAI J H, HAN L H, et al. Electropolishing of titanium alloy under hydrodynamic mode[J]. Science China Chemistry, 2016, 59(11): 1525-1528.

[18] 胡垒,孔令叶,阎秋生,等. 基于砂带千页轮的模具抛光加工过程研究[J]. 机电工程技术,2010,39(11): 109-112,146.

HU Lei, KONG Lingye, YAN Qiusheng, et al. Research on polishing process of mould with abrasive belt wheel[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2010, 39(11): 109-112, 146.

通讯作者: 房晓龙,教授,博士,研究方向为电解加工、微细加工和特种加工。

(责编 阳光)

(上接第 76 页)

[11] SALIKOVA A P, BAN' KOVSKAYA I B, KOLOVERTNOV D V, et al. Oxidation of the zirconium boride-silicon nitride composite in the temperature range 1100-1300 °C in air[J]. Glass Physics and Chemistry, 2010, 36(2): 225-231.

[12] GUO Q, HE W T, LI C, et al. High-temperature interface stability of tri-layer thermal environmental barrier coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(7): 9313-9323.

[13] WANG H Y, ZHANG J, SUN L C, et al. Microstructure and phase composition evolution of dual-phase ytterbium silicate coatings plasma sprayed from stoichiometric Yb₂Si₂O₇ feedstock powder[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 437: 128373.

[14] XU Y, HU X X, XU F F, et al. Rare earth silicate environmental barrier coatings: Present status and prospective[J]. Ceramics International, 2017, 43(8): 5847-5855.

[15] 马壮,刘玲,郑伟. 航空发动机环境障涂层: 材料及性能[J]. 现代技术陶瓷,2019,40(5): 331-344.

MA Zhuang, LIU Ling, ZHENG Wei. Environmental barrier coating for aeroengine: Materials and properties[J]. Advanced Ceramics, 2019, 40(5): 331-344.

[16] ZHU D M, LEE K N, MILLER R A. Sintering and cyclic failure mechanisms of thermal and environmental barrier coating systems under thermal gradient test conditions[M]//Ceramic Engineering and Science Proceedings. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008: 505-516.

[17] RAMASAMY S, TEWARI S N, KANG N, et al. Environmental durability of slurry based mullite-gadolinium silicate EBCs on silicon carbide[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(6): 1123-1130.

[18] GARCIA E, MESQUITA-GUIMARÃES J, MIRANZO P, et al. Porous mullite and mullite-ZrO₂ granules for thermal spraying applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(17-18): 4304-4311.

[19] FOURNIER V, QUET A, MEILLOT E, et al. Plasma spraying of mullite and pore formers for thermal insulating applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 406: 126744.

[20] 邓路炜,张晓东,王东升,等. 环境障涂层用纳米结构 Yb₂SiO₅ 粉体喂料的制备与表征[J]. 中国表面工程,2020,33(6): 108-117.

DENG Luwei, ZHANG Xiaodong, WANG Dongsheng, et al. Preparation and characterization of nanostructured Yb₂SiO₅ feedstock for environmental barrier coatings[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(6): 108-117.

[21] YANG M, LI Z G, WANG X Y, et al. Effect of spraying ceramic powder pore structure on thermophysical properties of plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(1): 1125-1131.

通讯作者: 王铀,教授,博士生导师,研究方向为纳米表面工程。

(责编 阳光)