

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181228003

SiC_f/SiC 表面环境障涂层的基体无损去除方法

马 帅, 李广荣, 刘梅军, 李长久, 李成新, 杨冠军

(西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 应用于碳化硅陶瓷基复合材料 (SiC_f/SiC-CMC) 表面的抗水氧腐蚀环境障涂层 (EBC), 在高速燃气冲刷等极端环境下长期服役后出现烧蚀、局部开裂或剥落等问题。为了循环再利用价格昂贵的 CMC 材料, 亟待发展 EBC 修复技术, 而去除原有 EBC 涂层是最重要和最基础的第一步。论文在研究 EBC 涂层的多层复杂结构及其力学行为基础上, 基于 EBC 与基体的力学性能差异, 提出了喷砂层剥的涂层去除方法。相比于化学腐蚀、高压水冲击、激光清洗等, 该方法在确保基体无损方面具有明显的优势。利用自主研发的 EBC 去除装置, 结合涂层去除前后的表面形貌分析, 探究了去除工艺参数对涂层去除效果的影响规律, 实现了涂层去除并明确了基体无损伤特征, 讨论了涂层去除机理。无损 CMC 基体的 EBC 去除方法, 为发展整套 EBC 维修再制造技术提供了基础支撑。

关键词: EBC; 涂层去除方法; 基体无损; CMC 材料; 再制造

中图分类号: TB383

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)04-0123-10

Substrate-lossless Removal Approach of Environmental Barrier Coatings on SiC_f/SiC

MA Shuai, LI Guangrong, LIU Meijun, LI Changjiu, LI Chengxin, YANG Guanjun

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Environmental barrier coatings (EBC) can be applied to the surface protection of silicon carbide ceramic matrix composites (SiC_f/SiC-CMC) from combined corrosion of water-oxygen. Local spallation or delamination would occur after exposure to high-speed and high temperature flame ablation. In order to recycle and reuse the extremely expensive CMC materials, it is urgent to develop EBC remanufacturing technology. Removing the original failed EBC is the most important and primary step for the deposition of new EBC. In this study, a substrate-lossless removal method for the failed EBC is proposed, based on the structural and mechanical property analysis of the multi-layered EBC and substrate. Conventional methods, such as chemical corrosion, high pressure water impact, laser cleaning, are difficult to be directly applied to the removal of EBC coating due to the inevitable substrate damage. By comparing and analyzing the mechanical properties of multi-layered EBC and substrate, a selective erosive method with sandblasting was proposed. By using a self-developed EBC removal device, the effects of parameters on coating removal efficiency were investigated based on the surface morphology after removal. In addition, the non-destructive characteristics of substrate and the removal mechanism of coating were discussed. The substrate-lossless removal method of failed EBC provides fundamental support for the development of overall EBC remanufacturing technology.

Keywords: environmental barrier coating (EBC); coating removal technology; substrate lossless; ceramic matrix composite (CMC); remanufacturing

收稿日期: 2019-02-10; 修回日期: 2019-05-13

通信作者: 杨冠军 (1977—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 表面工程; E-mail: ygj@xjtu.edu.cn

基金项目: 国家级人才计划首批“青年拔尖人才支持计划”专项基金

Fund: Supported by National Program for Support of Top-notch Young Professionals

引用格式: 马帅, 李广荣, 刘梅军, 等. SiC_f/SiC 表面环境障涂层的基体无损去除方法[J]. 中国表面工程, 2019, 32(4): 123-132.

MA S, LI G R, LIU M J, et al. Substrate-lossless removal approach of environmental barrier coatings on SiC_f/SiC[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 123-132.

0 引言

碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料 (SiC_f/SiC -CMC, 后简称 CMC) 因具有高比强度、高比模量、耐高温等特点, 成为先进航空发动机热部件关键材料之一^[1-2]。目前航空发动机涡轮热部件材料主要使用镍/钴基高温合金材料, 在表面制备热障涂层可实现隔热防护效果^[3-7], 进一步优化粘结层抗氧化性能可保障热障涂层长效稳定服役^[8-10]。然而, 热部件承温能力仍不能满足日益提高的设计要求, 为进一步提高涡轮工作温度和发动机效率, 可耐超高温的 CMC 成为替代镍/钴基高温合金材料的最有前景的材料之一^[1-2]。在航空发动机高速气流冲刷下, CMC 中的 SiC 被氧化后生成的 SiO_2 具有一定的抗氧化防护作用, 但是, SiO_2 易被高温高速气流中的水蒸汽腐蚀, 生成 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 气态物质而挥发, 从而导致碳化硅材料严重氧化和消耗^[11]。研究表明, 厚度 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的 CMC 材料在 $1550\text{ }^\circ\text{C}$ 含水气流中保温 1000 h 后已经完全腐蚀并挥发^[12]。因此, 在干燥环境中具有优异抗氧化性能的 CMC, 在实际含水服役环境下极易受到环境中腐蚀介质的影响而被严重破坏。

为解决上述问题, CMC 材料表面需要沉积制备能长时间抗高温腐蚀环境的涂层, 即环境障涂层 (Environmental barrier coatings, EBCs)^[13-14]。环境障涂层目前已经发展到第三代。第一代环境障涂层是以莫来石为粘结层、以 YSZ 为陶瓷面层的双层结构。第二代环境障涂层, 以硅、莫来石为粘结层和过渡层, 以钡铝硅酸盐为陶瓷面层, 呈现多层结构。但莫来石的相稳定性较差, 钡铝硅酸盐抗水蒸汽腐蚀性能也不能满足实际应用需求。目前研究的第三代环境障涂层, 是以硅和莫来石作为粘结层和过渡层、以高温相稳定性较好且抗腐蚀能力较强的稀土硅酸盐作为陶瓷面层的多层结构涂层, 单层涂层厚度约为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ^[15]。EBC 能够在高温结构材料和发动机恶劣环境 (腐蚀性介质、高速气流冲刷等) 间设立一道屏障, 降低发动机环境对高温结构材料性能的不良影响^[16]。EBC 的使用显著提高了 CMC 在航空航天等领域的服役性能。然而, 在航空发动机高温燃气高速冲刷的环境下, 服役后的 EBC 常常出现剥落等损伤问题, 从而引发 CMC 烧蚀^[17]。若不及时维修, 昂贵的 CMC 热部件就可能一次性报废, 甚至在后

续持续使用中造成灾难性事故。为了循环再利用价格昂贵的 CMC 材料, 亟待发展 EBC 修复技术。而去除原有 EBC 涂层是最重要和最基础的第一步, 但因涂层与基体均为属性极为类似的硬脆性陶瓷材料, 如何去除涂层而不损伤基体面临巨大挑战。

此文在研究 EBC 涂层的多层复杂结构及其力学特征基础上, 提出了可确保不损伤基体的涂层去除方法。通过对比分析 EBC 各结构层与基体的力学性能, 提出了喷砂去除涂层的磨料选择方法, 利用自主研发的 EBC 去除装置, 结合涂层去除过程和去除后表面形貌研究, 实现了涂层的彻底去除并明确了基体无损伤特征, 讨论了涂层的去除机理。CMC 基体无损的 EBC 去除方法, 为发展整套 EBC 维修再制造技术提供了基础支撑。

1 涂层去除方法的综合对比分析

目前, 去除损伤涂层的方法可以归结为化学去除和物理去除两大类^[18]。化学去除方法包括化学腐蚀、电化学腐蚀等; 物理去除方法包括机加工、高压水冲击、打磨、激光清洗、喷砂等。为实现 EBC 涂层的无损基体去除, 需要对各种方法在去除效果和基体损伤两个层面进行系统的分析和对比研究。

CMC 表面 EBC 的去除是为了循环再利用 CMC 材料。因此在涂层去除过程中, 首先, 要确保不会对 CMC 的性能产生影响, 其次, 为确保再制造 EBC 涂层性能, 需将失效涂层完全去除。这两个方面在去除 CMC 表面 EBC 问题上同等重要, 不可偏废。

1.1 化学去除方法

化学腐蚀或电化学腐蚀是利用涂层与基体材料在去除液中的化学活性不同使涂层和基体分离。国内外开展了很多化学法去除损伤涂层的研究。但采用化学腐蚀或电化学腐蚀去除涂层一般需要较长时间^[19], 涂层去除液配制复杂, 且废弃溶液处理不当还容易造成严重的环境污染。因此, 对于去除 EBC 这种多层涂层而言, 使用化学及电化学腐蚀去除涂层并不是理想的选择。

1.2 物理去除方法

1.2.1 打磨

打磨包括砂轮打磨和局部砂纸打磨。砂轮打

磨适合于在平面及规则外形的工件上进行涂层去除,可打磨面积较大;局部砂纸打磨适用于特殊形状工件,去除效率低。这两种方法虽然成本低廉、设备简单,但打磨去除涂层工艺稳定性不好,对于高硬度陶瓷类的 EBC 涂层和高精度 CMC 热部件基体均不适用。手工去除涂层可用于要求相对不高的场合,尺寸和精度要求极高的超高温叶片这一类材料的涂层,适用性不佳,而且也无法保证去除加工的工艺稳定性^[18]。

1.2.2 高压水冲击

高压水冲击是将普通的常压水通过高压柱塞泵加压到几十至几百兆帕,而后通过特殊的喷嘴(喷孔直径一般为 0.4~2.5 mm)以极高的速度(30~750 m/s)喷出,利用高速水流强大的冲击力和水楔作用直接冲刷和剥离涂层,达到去除涂层和清洗表面的效果^[20]。高压水冲击具有成本低、应用范围广、效率高和基本不产生污染等优点,但主要适用于涂层与基体属性差异明显的材料体系且要求材料与高压水不反应,比如去除韧性金属基体表面的陶瓷或有机涂层,可在海底管道维修方面用于清理管道混凝土防护层和防腐绝缘层。因此,高压水冲击方法并不适用于此研究所针对的脆性 CMC 表面的脆性 EBC 涂层去除。

1.2.3 激光清洗

激光清洗是利用高能量脉冲使材料表面涂层、漆层、杂质和污染物等在极短时间内蒸发或剥离基体表面,以达到清洁基体的目的。激光清洗的表面洁净度高,且可对复杂表面进行处理^[21]。激光清洗机理主要有烧蚀效应和振动效应两种机制^[22]。烧蚀效应作用机制如图 1(a)所示,利用高能量密度的激光脉冲短时间将涂层加热到沸点,使得涂层汽化或者分解。振动效应的作用机制如图 1(b)所示,利用基体与涂层吸收激光能量后短时间内热膨胀不匹配形成振动波,产生大于涂层结合力的脱离应力而使涂层与基体剥离。对于 CMC 材料上的 EBC,基体材料长时间使用温度<1650 ℃^[23],而涂层中莫来石材料熔融温度高达 1850 ℃^[24],激光清洗涂层的过程中不可避免会对基体材料产生影响。

另外,为了避免去除涂层的同时损伤基体,激光清洗还需要找到涂层材料高吸光但基体材料低吸光的波长,这对于目前的 EBC 和 SiC_f/SiC-

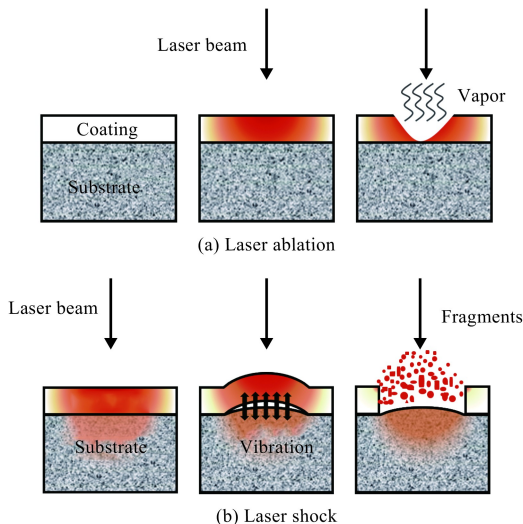


图1 激光去除涂层作用机制

Fig.1 Mechanism of laser removal of coatings

CMC 也存在困难。因此,激光清洗还难以直接用于去除 CMC 基体表面的 EBC 涂层。

1.2.4 喷砂

喷砂是将磨料颗粒高速射流(气固相或液固相)喷射到工件表面,利用磨料的撞击和冲刷作用对工件表面进行材料去除的一种表面处理工艺。喷砂去除涂层方法效率高、易操作,尤其对于结合强度相对较低的涂层,若通过合理的材料选择和喷砂工艺设计,可望一次性去除整个涂层。在涂层和基体的物理和力学属性差异较小的情况下,比如金属基体上的金属涂层、陶瓷基体上的陶瓷涂层,在去除涂层的同时容易损伤基体材料,需要进行专门的材料和工艺设计。

2 基体无损的涂层喷砂去除方法设计

陶瓷基复合材料上环境障涂层去除是为了循环利用昂贵的基体材料,因此,必须将失效的涂层完全去除,且同时保证基体不受损伤,以满足航空发动机热部件的服役条件。为了保证环境障涂层完全去除,研究选用了涂层材料和基体对应的块材进行喷砂,以探究能够完全去除涂层的参数。在磨料材料的选择上,基于涂层和基体硬度的差异进行初步筛选。涂层材料的显微维氏硬度如表 1^[25-28]所示。对于喷砂磨料,基本的原则是磨料的硬度应高于涂层的材料硬度、且低于基体的材料硬度。若磨料硬度过高,喷砂去除涂层过程中很有可能损伤基体。若磨料硬度过低,喷砂不能去除涂层或需要时间较长,就会造成时间成本

表 1 涂层和基体材料的显微维氏硬度^[25-28]

Table 1 Vickers micro-hardness of coatings and substrate ^[25-28]	
Coatings / Substrate	Vickers micro-hardness / GPa
γ -Yb ₂ Si ₂ O ₇	6.2±0.1
β -Yb ₂ Si ₂ O ₇	6.8±0.2
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ (Mullite)	5.3
Si	8-12
SiC	30.4-33.3

的浪费。为了定量考察磨料硬度与涂层去除效果的关系，选取了如表 2 所示的 7 种磨料，利用涂层磨损理论进行对比分析，涂层磨损量可采用式 (1)^[29] 进行初步判别。

$$E_r = \left(\frac{H_t}{H_p} \right)^x \tag{1}$$

式 (1) 中， E_r 为磨损量， H_t 为样品材料的硬度， H_p 为磨料粒子的硬度， x 为与试验相关的常数。根据 Janos 等^[30] 的研究，对于陶瓷材料， x 为小于 0 的常数。取 x 值为-1，可得图 2。由图 2 可知，表 2^[31] 中 7 种磨料前 4 种对碳化硅的相对磨损量小于 1，认为其对基体的磨损去除不显著。因此，研究中选取 SiO₂、Al₂O₃-1 和 Al₂O₃-2 为喷砂磨料。

除磨料硬度外，攻角对涂层去除效果也有影响。不同攻角下材料的抗磨损性能不尽相同，为研究 EBC 去除方法，选用 30°、60°和 90°这 3 个攻角对材料进行喷砂。以 30 s 为时间间隔，每个时间间隔后对样品进行称重。每个间隔所用磨料质量选用 10 g 以确保材料有明显减重且不会将样品冲破。磨料粒径为 (250±30) μm，压缩空气压力选用 (0.3±0.025) MPa，喷砂距离 100 mm。

图 3 为喷砂去除试验示意图。粘结层硅材料选厚度为 (200±10) μm 的多晶硅，由于多晶硅样

表 2 磨料显微维氏硬度^[31]

Table 2 Vickers micro-hardness of abrasives ^[31]	
Abrasive	Vickers micro-hardness / GPa
SiO ₂	8
MgAl ₂ (SiO ₃) ₄ (Garnet)	13.3
Al ₂ O ₃ -1	19-21.6
Al ₂ O ₃ -2	21.6-26
SiC	20.4-33.3
B ₄ C	49
C (Diamond)	78.5

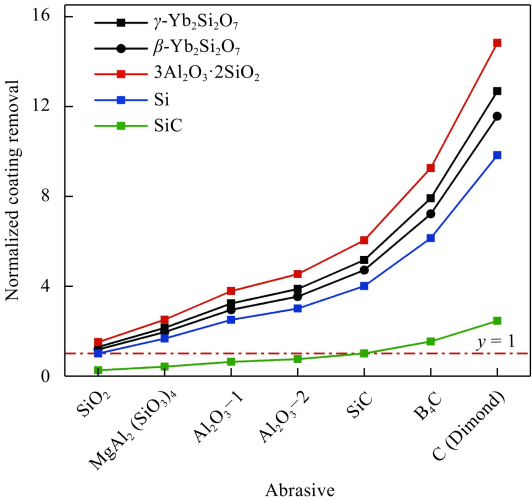


图 2 不同磨料的归一化相对磨损量

Fig.2 Normalized removal of coating using different abrasives

品较薄，试验中喷砂至样品中心将其磨损完全为止^[32]；为了探讨致密莫来石材料自身的喷砂去除效果，研究使用压制烧结的致密莫来石；试验所用 SiC 纯度>98%，尺寸为 50 mm×50 mm×6 mm 的 SiC 陶瓷。使用喷砂去除装置对试验材料进行喷砂。材料磨损状态使用质量去除效率 E_r 表征，质量去除效率计算由式 2^[33] 计算。

$$E_r = \Delta m / m_p \tag{2}$$

式中， E_r 为样品喷砂时的实际质量去除效率，mg·g⁻¹； Δm 为样品质量变化，mg； m_p 为所用磨料粒子质量，g。

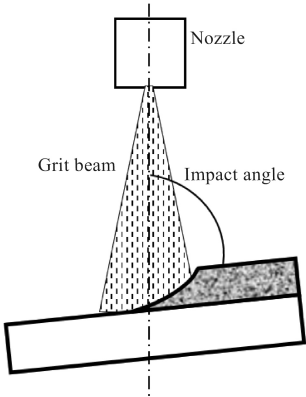


图 3 喷砂去除试验示意图

Fig.3 Diagram of sandblast removal test

3 基体无损的涂层去除机理

3.1 磨料硬度对涂层去除效率的影响规律

在 90°攻角下，试验所用 3 种磨料粒子对莫来

石、多晶硅及碳化硅的喷砂去除效率结果如图 4 所示。莫来石的去除效率是对样品减重曲线进行拟合得出^[34]。结果表明, 对于莫来石和多晶硅, 硬度较低的 SiO₂ 去除效率反而较高。3 种磨料的硬度均不低于莫来石和多晶硅, 且 SiO₂ 的密度 (2.22 g·cm⁻³) 比 Al₂O₃ 密度 (3.97 g·cm⁻³) 低, 相同磨料质量情况下, SiO₂ 颗粒数目多约 78%, 所以去除效率更高。

不同硬度磨料喷砂后表面形貌如图 5 和图 6 所示。图 5 中, 莫来石不同磨料喷砂后表面形貌接近, 均为磨料锤击出大量凹坑, 进而造成材料失重。对于涂层的喷砂磨损而言, 热喷涂制备的涂层普遍具有层状结构, 而涂层的喷砂去除性能受到层状结构的一定影响^[28], 涂层耐喷砂磨损行为另外也与涂层的制备相关, 包括喷涂时基体的温度^[35]、喷涂距离、喷涂功率等^[36]。

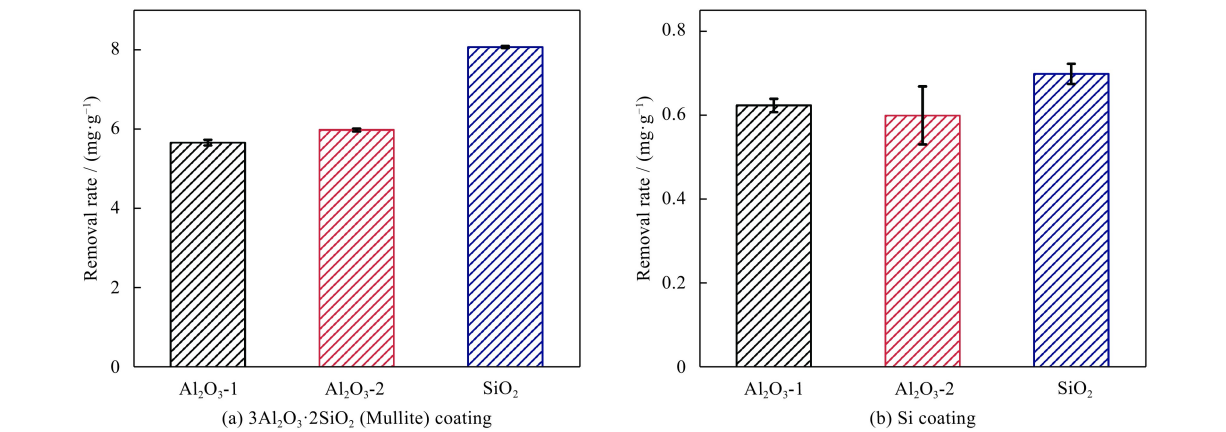


图 4 不同磨料对涂层材料的去除效率 (90°攻角)
Fig.4 Removal rate of different abrasives on coating material (90°)

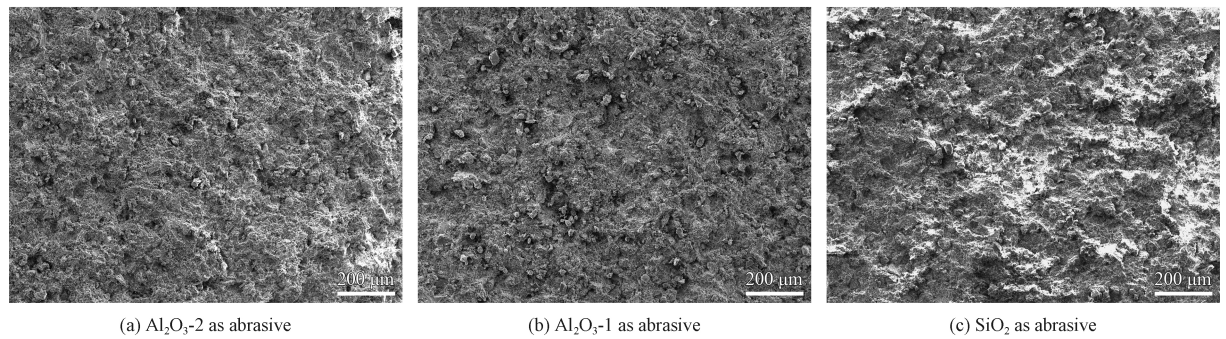


图 5 不同磨料喷砂后莫来石表面形貌 (90°攻角)
Fig.5 Surface morphologies of mullite after sandblasting using different abrasives (90°)

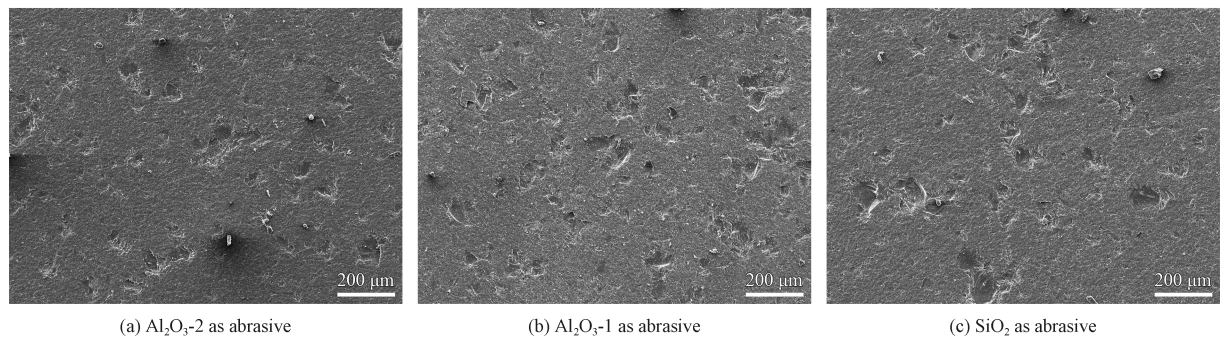


图 6 不同磨料喷砂后硅表面形貌 (90°攻角)
Fig.6 Surface morphologies of Si after sandblasting using different abrasives (90°)

图6中,不同磨料喷砂去除后多晶硅表面,在200倍下,均为磨料锤击出现的凹坑。

涂层材料与基体材料采用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2}$ 磨料的喷砂去除效率对比如图7所示。由图7可以看出,在相同的试验条件下,涂层材料 $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ 和 Si 具有相对较大的去除效率,而基体材料 SiC 的去除效率为0。试验发现,当压缩空气压力 $\leq 0.5\text{ MPa}$ 时,所用3种磨料均未对碳化硅产生明显的磨损,而当压缩空气压力增至 0.55 MPa 时,使用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2}$ 在前述喷砂条件下去除效率为 $(0.030 \pm 0.005)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

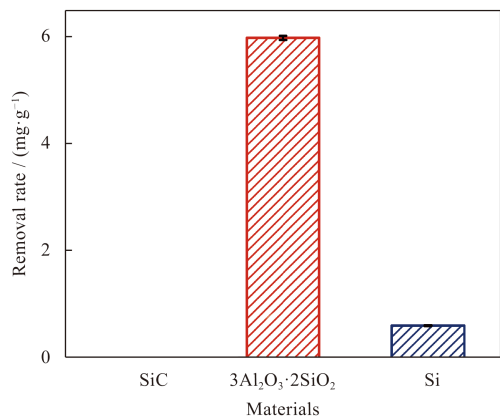


图7 涂层材料与基体材料去除效率 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2}$, 90° 攻角)

Fig.7 Removal rate of coating and substrate ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2}$, 90°)

碳化硅表面在喷砂前后表面3D形貌如图8所示。由图8可以看出,在喷砂前后,碳化硅表面

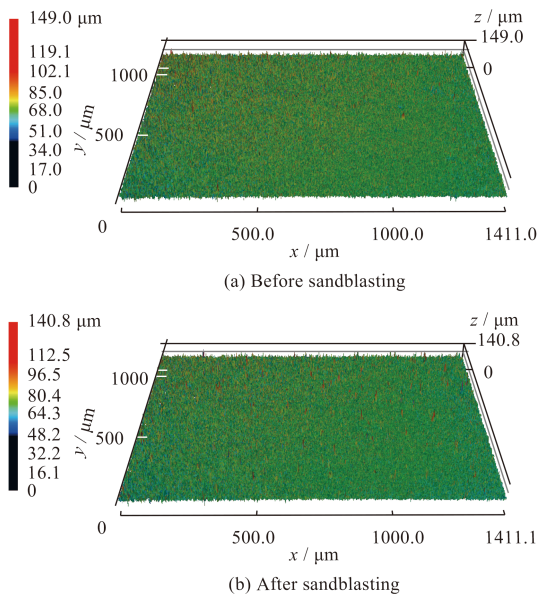


图8 喷砂前后 SiC 表面 3D 形貌

Fig.8 3D topographies of SiC before/after sandblasting

并未表现出明显变化,既没有沟槽,也没有凹坑,表明基体未发生损伤。

喷砂前后碳化硅表面的 SEM 形貌如图9所示。图9中,低倍下,碳化硅表面形貌喷砂前后看不到可察觉的变化,而当倍数放大时,可以发现,除了粘附少量磨料的碎屑外,碳化硅表面展现出的细小晶粒形貌也未发生任何明显的改变。

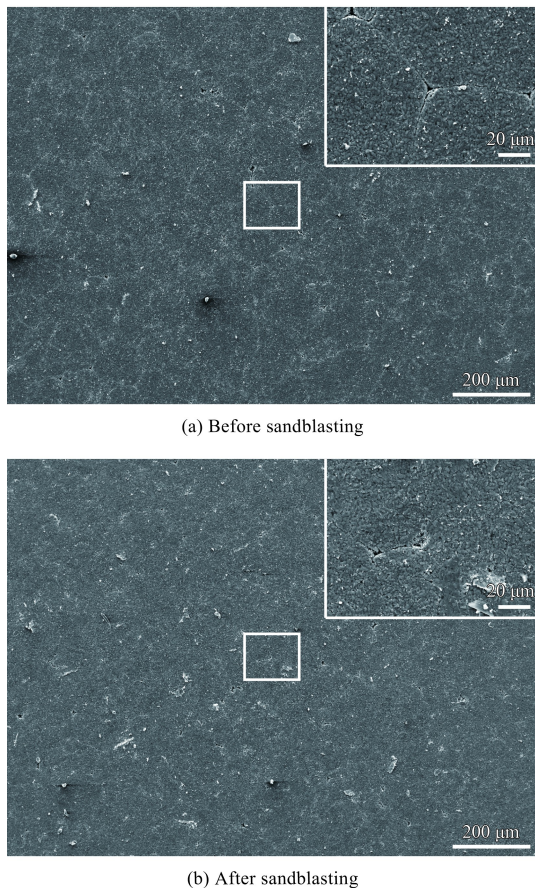


图9 喷砂前后 SiC 表面形貌 (90° 攻角)

Fig.9 Surface morphologies of SiC before and after sandblasting (90°)

3.2 攻角对去除效率的影响

以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-1}$ 磨料为例,不同攻角下涂层材料去除效率如图10所示。由图10中可以发现,莫来石与多晶硅材料在 60° 与 90° 攻角下去除效率相当,然而在 30° 攻角条件下,涂层材料去除效率明显低于大攻角时的去除效率,涂层材料表现为典型的脆性材料^[37]。若要快速去除,应选择大攻角进行涂层去除。

不同攻角下材料表面形貌如图11和图12所示。图11中莫来石喷砂后表面形貌表明,大攻角

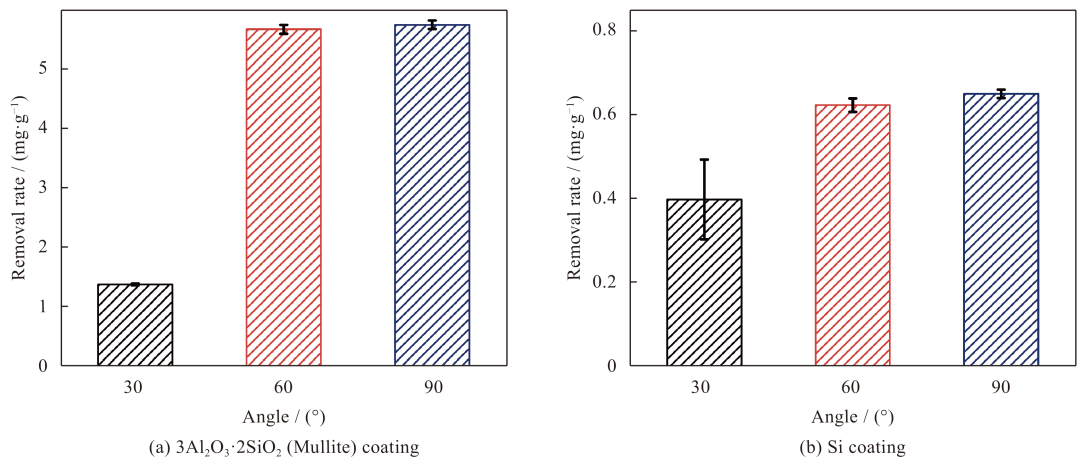


图 10 攻角对去除效率的影响 (Al₂O₃-1)
Fig.10 Effects of sandblasting angle on removal rate (Al₂O₃-1)

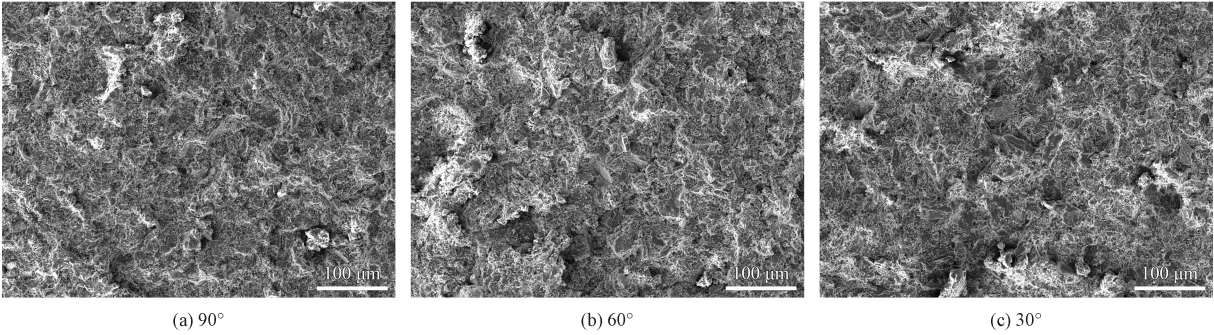


图 11 莫来石不同攻角喷砂后表面 SEM 形貌 (磨料为 Al₂O₃-2)
Fig.11 SEM images of SiC after sandblasting with different angles (Al₂O₃-2 as abrasive)

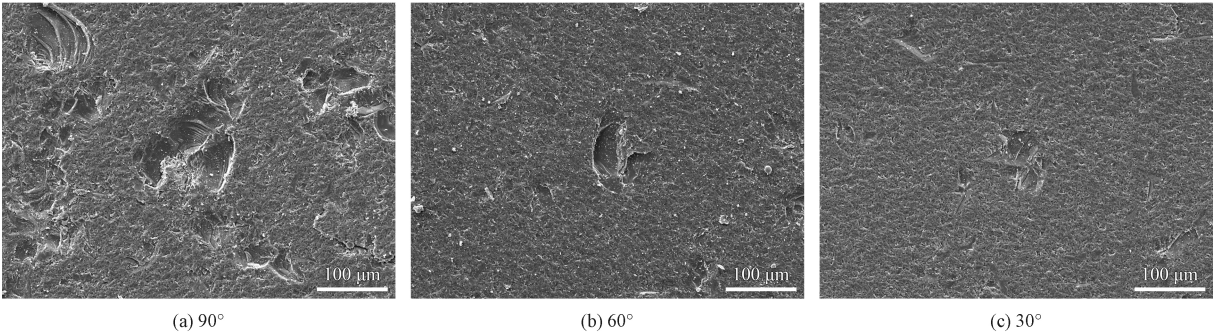


图 12 多晶硅不同攻角喷砂后表面 SEM 形貌 (磨料为 Al₂O₃-2)
Fig.12 SEM images of SiC after sandblasting with different angles (Al₂O₃-2 as abrasive)

喷砂 (90°和 60°) 后, 莫来石表面以锤击凹坑为主, 而小攻角 (30°) 喷砂后, 莫来石表面以犁削沟槽为主。这与金属陶瓷涂层的喷砂去除行为类似^[37]。材料磨损的两种典型机制为疲劳剥落和微切削。粒子垂直分速度不断锤击材料表面使之产生内部疲劳应力, 进而会在材料表面产生裂纹, 这些裂纹进一步生长、连通, 最终使试样产生表

面剥落; 粒子的水平分速度则会首先切削掉材料表面硬度较低的区域, 使硬度较高的区域逐渐暴露在外, 并在后续粒子的冲击下发生剥落。对于莫来石而言, 磨损的机制主要为疲劳剥落。由图 12 中多晶硅喷砂后表面形貌可以看出, 相比于 30°攻角, 60°与 90°角下多晶硅样品表面喷砂后凹坑更多。多晶硅喷砂去除过程中, 晶界等区域

首先被磨损,失重机制主要为疲劳剥落。对比图 11 与图 12,莫来石喷砂后表面比多晶硅粗糙,这是由于相对莫来石而言,多晶硅硬度更高,相同喷砂参数下,莫来石磨损失重更多,表面更加粗糙。

4 结 论

该文在研究 EBC 多层复杂结构及其力学行为基础上,基于 EBC 与基体的力学性能差异,提出了喷砂层剥的涂层去除方法,得出以下结论:

(1) 相比于化学腐蚀、打磨、激光清洗等涂层去除方法,喷砂去除 EBC 涂层材料可行。利用合适的 SiO_2 、 Al_2O_3 -1 和 Al_2O_3 -2 磨料,可以去除不同类型的 EBC 结构层。

(2) 在压缩空气压力不超过 0.5 MPa 的情况下,使用 $(250\pm 30)\mu\text{m}$ 的 SiO_2 、 Al_2O_3 -1 和 Al_2O_3 -2 均可获得显著的涂层去除效果,且同等质量下,由于 SiO_2 密度相对较小、颗粒数更多,因而去除效率更高。

(3) EBC 涂层材料在大攻角 ($60^\circ\sim 90^\circ$) 下更易产生磨损,相较而言,小攻角 (30°) 情况下,3 种磨料去除效率均有明显下降。大攻角喷砂去除涂层更加快速。

(4) 利用喷砂去除 EBC,通过合理选用喷砂磨料和工艺条件,不仅实现了 EBC 各结构层的去除,而且对基体质量和表面均未造成任何损伤。因此,喷砂去除 EBC 涂层,是一种基体无损的去除方法。

参考文献

- [1] 陈明伟,谢巍杰,邱海鹏.连续碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料研究进展[J].现代技术陶瓷,2016,37(6):393-402.
CHEN M W, XIE W J, QIU H P. Research progress of continuous silicon carbide fiber reinforced silicon carbide ceramic matrix composites[J]. Advanced Ceramics, 2016, 37(6): 393-402 (in Chinese).
- [2] 刘巧沐,黄顺洲,何爱杰.碳化硅陶瓷基复合材料环境障涂层研究进展[J].材料工程,2018,46(10):1-8.
LIU Q M, HUANG S Z, HE A J. Research progress in environmental barrier coatings of SiC ceramic matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(10): 1-8 (in Chinese).
- [3] LI G R, YANG G J, CHEN X F, et al. Strain/sintering Co-induced multiscale structural changes in plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2018, 44(12): 14408-14416.
- [4] LI G R, YANG G J, LI C X, et al. Stage-sensitive microstructural evolution of nanostructured TBCs during thermal exposure[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(9): 3325-3332.
- [5] MENG G H, ZHANG B Y, LIU H, et al. Vacuum heat treatment mechanisms promoting the adhesion strength of thermally sprayed metallic coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 344: 102-110.
- [6] 李广荣,杨冠军.热障涂层高温跨尺度服役机理及多维度结构设计[J].现代技术陶瓷,2018,39(5):321-354.
LI G R, YANG G J. High-temperature cross-scale service mechanism and multi-dimensional structural design of thermal barrier coating[J]. Advanced Ceramics, 2018, 39(5): 321-354 (in Chinese).
- [7] CHENG B, WEI Z Y, CHEN L, et al. Prolong the durability of $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ TBCs by decreasing the cracking driving force in ceramic coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(16): 5482-5488.
- [8] ZHANG B Y, SHI J, YANG G J, et al. Healing of the interface between splashed particles and underlying bulk coating and its influence on isothermal oxidation behavior of LPPS MCrAlY bond coat[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(4): 611-621.
- [9] ZHANG W W, LI G R, ZHANG Q, et al. Self-enhancing thermal insulation performance of bimodal-structured thermal barrier coating[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27(7): 1064-1075.
- [10] MENG G H, ZHANG B Y, LIU H, et al. Highly oxidation resistant and cost effective MCrAlY bond coats prepared by controlled atmosphere heat treatment[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 347: 54-65.
- [11] OPILA E J. Variation of the oxidation rate of silicon carbide with water-vapor pressure[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2004, 82(3): 625-636.
- [12] MORE L K, TORTORELLI F P, FERBER K M, et al. Exposure of ceramics and ceramic matrix composites in simulated and actual combustor environments[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1999, 122(2): 212-218.

- [13] EATON H E, LINSEY G D. Accelerated oxidation of SiC CMC's by water vapor and protection via environmental barrier coating approach[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, 22(14-15): 2741-2747.
- [14] 陈代荣, 韩伟健, 李思维, 等. 连续陶瓷纤维的制备、结构、性能和应用: 研究现状及发展方向[J]. *现代技术陶瓷*, 2018, 39(3): 151-222.
- CHEN D R, HAN W J, LI S W, et al. Structure, properties and application of continuous ceramic fiber: research status and development direction[J]. *Advanced Ceramics*, 2018, 39(3): 151-222 (in Chinese).
- [15] 田志林, 王京阳. 稀土硅酸盐陶瓷材料研究进展[J]. *现代技术陶瓷*, 2018, 39(5): 295-320.
- TIAN Z L, WANG J Y. Research progress on rare earth silicate ceramic materials[J]. *Advanced Ceramics*, 2018, 39(5): 295-320 (in Chinese).
- [16] 黄光宏, 王宁, 何利民, 等. 环境障涂层研究进展[J]. *失效分析与预防*, 2007(1): 59-64.
- HUANG G H, WANG N, HE L M, et al. Development of environmental barrier coatings on Si-based ceramics[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2007(1): 59-64 (in Chinese).
- [17] 范金娟, 常振东, 陶春虎, 等. 环境障涂层失效机理研究进展[J]. *失效分析与预防*, 2017, 12(6): 386-391.
- FAN J J, CHANG Z D, TAO C H, et al. Research progress of failure analysis of EBCs[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2017, 12(6): 386-391 (in Chinese).
- [18] 李伟溢. 脱漆剂的研究进展[J]. *电镀与涂饰*, 2004, 23(3): 37-40.
- LI W Y. Progress of study on paint strippers[J]. *Electroplating & Finishing*, 2004, 23(3): 37-40 (in Chinese).
- [19] 李晗晔, 袁福河, 孙慧艳, 等. 航空发动机涂层去除技术的研究现状[J]. *材料保护*, 2015(12): 37-41.
- LI H Y, YUAN F H, SUN H Y, et al. Research status of aero engine coating removal technology[J]. *Materials Protection*, 2015(12): 37-41 (in Chinese).
- [20] 陈勇, 潘东民, 邓平, 等. 高压水清洗技术在海底管道维修中的应用[J]. *石油工程建设*, 2013, 39(4): 26-29.
- CHEN Y, PAN D M, DENG P, et al. Application of high pressure water cleaning technology in submarine pipeline maintenance[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2013, 39(4): 26-29 (in Chinese).
- [21] 邱兆飏, 朱海红. 脉冲激光除锈工艺研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 416-420.
- QIU Z B, ZHU H H. Process parameter study on the removing rust using pulsed laser[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 416-420 (in Chinese).
- [22] WALTERS C T. Short-pulse laser removal of organic coatings[C]// *Proceedings of SPIE*. Santa Fe, NM, USA: SPIE, 2000, 4065: 567-575.
- [23] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展[J]. *航空制造技术*, 2003(1): 24-32.
- ZHANG L T, CHENG L F, XU Y D. Progress in research work of new CMC-SiC[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2003(1): 24-32 (in Chinese).
- [24] 赵光岩, 饶平根, 吕明. 莫来石及多孔莫来石的研究和应用[J]. *中国陶瓷*, 2006, 42(9): 13-17.
- ZHAO G Y, RAO P G, LV M. Research and application of mullite and porous mullite[J]. *China Ceramics*, 2006, 42(9): 13-17 (in Chinese).
- [25] 李缨, 黄凤萍, 梁振海. 碳化硅陶瓷的性能与应用[J]. *陶瓷*, 2007(5): 36-41.
- LI Y, HUANG F P, LIANG A H. Properties and applications of silicon carbide ceramics[J]. *Ceramics*, 2007(5): 36-41 (in Chinese).
- [26] 李东升, 杨德仁, 阙端麟. 杂质对单晶硅材料硬度的作用[J]. *半导体学报*, 2004, 25(7): 798-803.
- LI D S, YANG D R, QUE D L. Effect of impurities on the hardness of single crystal silicon material[J]. *Journal of Semiconductors*, 2004, 25(7): 798-803 (in Chinese).
- [27] 磨料的硬度检测方法[EB/OL]. [2018-01-17]. http://www.microimage.com.cn/xwjs/2010/1013/article_8346.html.
- Abrasive hardness testing method[EB/OL]. [2018-01-17]. http://www.microimage.com.cn/xwjs/2010/1013/article_8346.html (in Chinese).
- [28] ZHOU Y C, ZHAO C, WANG F, et al. Theoretical prediction and experimental investigation on the thermal and mechanical properties of bulk β -Yb₂Si₂O₇[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96(12): 3891-3900.
- [29] WADA S. Effects of hardness and fracture toughness of target materials and impact particles on erosion of ceramic materials[J]. *Key Engineering Materials*, 1992, 71: 57-74.
- [30] JANOS B Z, LUGSCHEIDER E, REMER P. Effect of thermal aging on the erosion resistance of air plasma sprayed zirconia thermal barrier coating[J]. *Surface & Coatings*

- Technology, 1999, 113(3): 278-285.
- [31] LI C J, YANG G J, OHMORI A. Potential strengthening of erosion performance of plasma-sprayed Al_2O_3 coating by adhesives impregnation[J]. [Journal of Materials Science Letters](#), 2003, 22(21): 1499-1501.
- [32] KIRSCHNER M, WOBST T, RITTMEISTER B, et al. Erosion testing of thermal barrier coatings in a high enthalpy wind tunnel[J]. [Journal of Engineering for Gas Turbines and Power](#), 2014, 137(3): 032101.
- [33] YANG G J, LI C J, LI C X, et al. Improvement of adhesion and cohesion in plasma-sprayed ceramic coatings by heterogeneous modification of nonbonded lamellar interface using high strength adhesive infiltration[J]. [Journal of Thermal Spray Technology](#), 2013, 22(1): 36-47.
- [34] LI C J, YANG G J, OHMORI A. Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings[J]. [Wear](#), 2006, 260(11-12): 1166-1172.
- [35] YANG G J, LI C X, HAO S, et al. Critical bonding temperature for the splat bonding formation during plasma spraying of ceramic materials[J]. [Surface & Coatings Technology](#), 2013, 235: 841-847.
- [36] 陈林, 杨冠军, 李成新, 等. 热喷涂陶瓷涂层的耐磨应用及涂层结构调控方法[J]. [现代技术陶瓷](#), 2016, 37(1): 3-21.
- CHEN L, YANG G J, LI C X, et al. Wear-resistant application of thermal spray ceramic coating and coating structure control method[J]. [Advanced Ceramics](#), 2016, 37(1): 3-21 (in Chinese).
- [37] 纪岗昌, 李长久, 王豫跃, 等. 喷涂工艺条件对超音速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层冲蚀磨损性能的影响[J]. [摩擦学报](#), 2002, 22(6): 424-429.
- JI G C, LI C J, WANG Y Y, et al. Effect of spraying process conditions on erosion wear performance of supersonic flame sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating[J]. [Tribology](#), 2002, 22(6): 424-429 (in Chinese).