厚热障涂层的失效分析研究

郑南松，姬小兰，张志远，张远应，郭建云

（中国航发南方工业有限公司，株洲，412002）

摘要：厚热障涂层因具有优异的隔热效果，在航空发动机热端部件防护上获得应用。在高温燃气冲蚀环境中服役后，致密厚热障涂层呈局部块状剥落而失效。本文对涂层失效后的截面形貌、元素分布、相结构等进行分析。结果表明，涂层失效的主要原因是表面附着物的渗入和焰流冲蚀下致密厚热障涂层内部应力的增加。采用高能等离子喷涂制备具有弥散分布裂纹的厚热障涂层有望提高涂层寿命。

关键词：厚热障涂层；冲蚀；失效；高能等离子

中图分类号：TG174.4 文献标识码：A **文章编号**：1674-7127(2020)12-0010-05
DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2020.04.010

Study on Failure Analysis of Thick Thermal Barrier Coating

Nansong Zheng, Xiaolan Ji, Zhiyuan Zhang, Yuanying Zhang, Jianyun Guo

(Aecc South Industry Company Limited, Zhu Zhou, 412002)

Abstract: Thick thermal barrier coatings are used in the protection of hot-end components of aero-engines because of their excellent thermal insulation effect. After serving in a high-temperature gas erosion environment, the dense and thick thermal barrier coating flakes off locally and fails. In this paper, the cross-sectional morphology, element distribution, phase structure of the coatings after failure has been investigated. The results show that the main reason for the failure of the coating is the infiltration of surface attachments and the increase in internal stress of the dense and thick thermal barrier coating under flame erosion. The service life of thick thermal barrier coating with dispersed cracks prepared by high-energy plasma spraying is expected to be improved.

Key words: Thick thermal barrier coating; Erosion; Failure; High-energy plasma

0 引言

在航空发动机热端部件表面制备热障涂层 (Thermal Barrier Coatings, TBCs) 可以有效提高发动机工作温度、性能和效率 [1-3]。目前，厚度为 250~350μm 的氧化钇部分稳定的氧化锆 (Y_2O_3 Stabilized Partially Zirconia, YSZ) TBCs 在工作环境下的隔热能力有限，难以满足先进发动机更高服役温度的需求。而厚热障涂层因其具有更优异的隔热性能在发动机部分热端部件上获得了应用。但随着 TBCs 厚度的增加，涂层在承受高温燃气热冲击、热冲蚀服役过程中，易出现热膨胀不匹配、内部温度梯度大及残余应力较大等问题，从而导致涂层过早失效 [4-6]。为了提高厚热障涂层的服役寿命，近年来，研究人员对厚热障涂层的失效原因、制备工艺优化已开展了一些研究工作。陶顺衍等人 [7] 采用等离子喷涂工艺制备了具有分区裂纹结构的厚热障涂层，分析认为分区裂纹厚

第一作者：郑南松 (1972-)，男，高级工程师，Email : hbzhengns331@126.com。

热障涂层在热震循环过程中分区裂纹密度保持稳定，失效是起源于样品边缘的分层裂纹及其固有的分区裂纹的共同作用而引发的涂层局域片状剥落。王全胜[8]采用复合喷涂工艺制备了总厚度分别为 0.6 mm、1.0 mm 和 2.0 mm 的具有梯度过度结构的厚热障涂层，结果表明，采用复合喷涂法制备的 2mm 厚梯度热障涂层其抗拉强度得到显著提高，其主要原因是喷涂粘结底层很好的改善了铝基体与涂层之间的界面结合强度。王东生[9]指出大厚度热障涂层的制备是现阶段研究的热点，并介绍了热喷涂和激光熔覆技术在大厚度热障涂层制备方面的探索情况以及采用激光熔覆工艺对陶瓷热障涂层进行重熔从而制备具有一定厚度的热障涂层。

但服役环境的不同，造成涂层失效的模式与原因存在差异，因此，提升涂层性能的制备工艺优化方向也存在不同。本文针对直升机发动机热端部件用厚热障涂层的失效进行分析，探究在特定服役环境下涂层的失效模式，以期为提升涂层的使用寿命提供理论支持。

1 实验方法

1.1 厚热障涂层制备

实验制备了由 NiCrAlY 粘接层和 YSZ 面层组成的厚热障涂层，粘接层厚度为 0.1mm，采用超音速火焰喷涂 (HVOF) 工艺制备，喷涂工艺参数为氧气流量 900L/min，煤油流量 26 L/h，送粉速率 75g/min，喷距 380mm。面层采用主粒度范围 25~125μm 的 YSZ 球形喷涂粉末，采用大气等离子喷涂 (APS) 工艺制备，厚度为 0.8mm，喷涂工艺参数为功率 43kW，送粉速率 20g/min，喷距 100mm，主气流量 40L/min，喷涂完成后，对面层表面进行磨削加工。

1.2 涂层性能测试分析

对 YSZ 厚热障涂层进行显微形貌观察 (SEM)、能谱分析 (EDS) 及相结构分析 (XRD)。根据 ASTM E1920-03 制备涂层截面金相样品，微观形貌观察和能谱分析采用日立 SU5000 扫描电镜。XRD 相结构分析采用 BRUKER D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪。失效厚热障涂层样品在模拟考核条件下进行，考核温度为 1000℃，采用航空煤油燃烧火焰对样品连续冲击 1000 小时。

2 结果与讨论

2.1 失效涂层宏观形貌分析

在燃气冲击下失效后的热障涂层样品宏观形貌如图 1 所示。失效样品不同区域的涂层厚度因涂层脱落而呈现差别。涂层发生明显剥落的区域（区域 1），厚度较薄，涂层厚度在 100~300μm 之间，发生刮削但未剥落的部位（区域 3）涂层平均厚度为 800~900μm，部分区域存在沉积物的附着（区域 4），厚度相对较厚，约为 1147~1479μm。

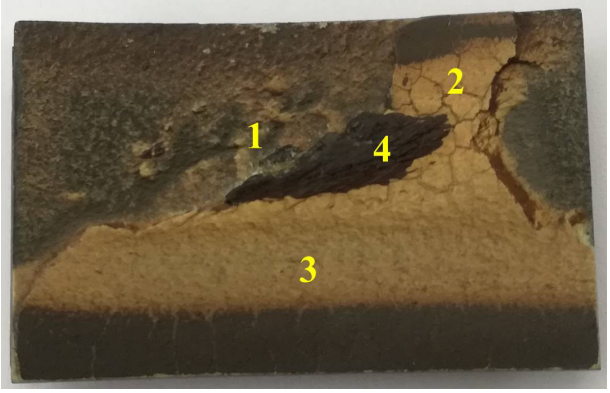

图 1 失效厚热障涂层宏观形貌

Fig.1 Macro morphology of failed thick thermal barrier coatings

2.2 失效后涂层显微形貌分析

失效后厚热障涂层不同部位截面显微 SEM 形貌分别如图 2(a)-(d) 所示。其中区域 1（图 2(a)）位置处 YSZ 层均已发生了剥落失效，涂层断裂位置为靠近 YSZ 层与底层的界面处。区域 2（图 2(b)）和 3（图 2(c)）均为未剥落区域，区域 2 存在明显的龟裂，区域 3 涂层被刮削后厚度减薄，两个区域涂层孔隙分布均匀，结构较为致密。区域 2 的 YSZ 层内部存在贯穿深度约为 300μm 的纵向裂纹，并且在接近陶瓷层与金属粘结层的界面处出现了较长的横向裂纹。当 YSZ 层结构致密且厚度较厚时，在涂层服役过程中，涂层在冷热冲击及高频振动的工况下易产生较大内应力，导

致涂层中产生大量微小裂纹，在应力的作用下，涂层中的微小裂纹将不断扩展，最终扩展成较长的裂纹，导致涂层开裂 [7]。而区域 4（图 2(d) ）的 YSZ 层表面附着了一层厚度较厚的附着物，其厚度可达 500μm，且涂层纵向裂纹内部也存在有附着物。

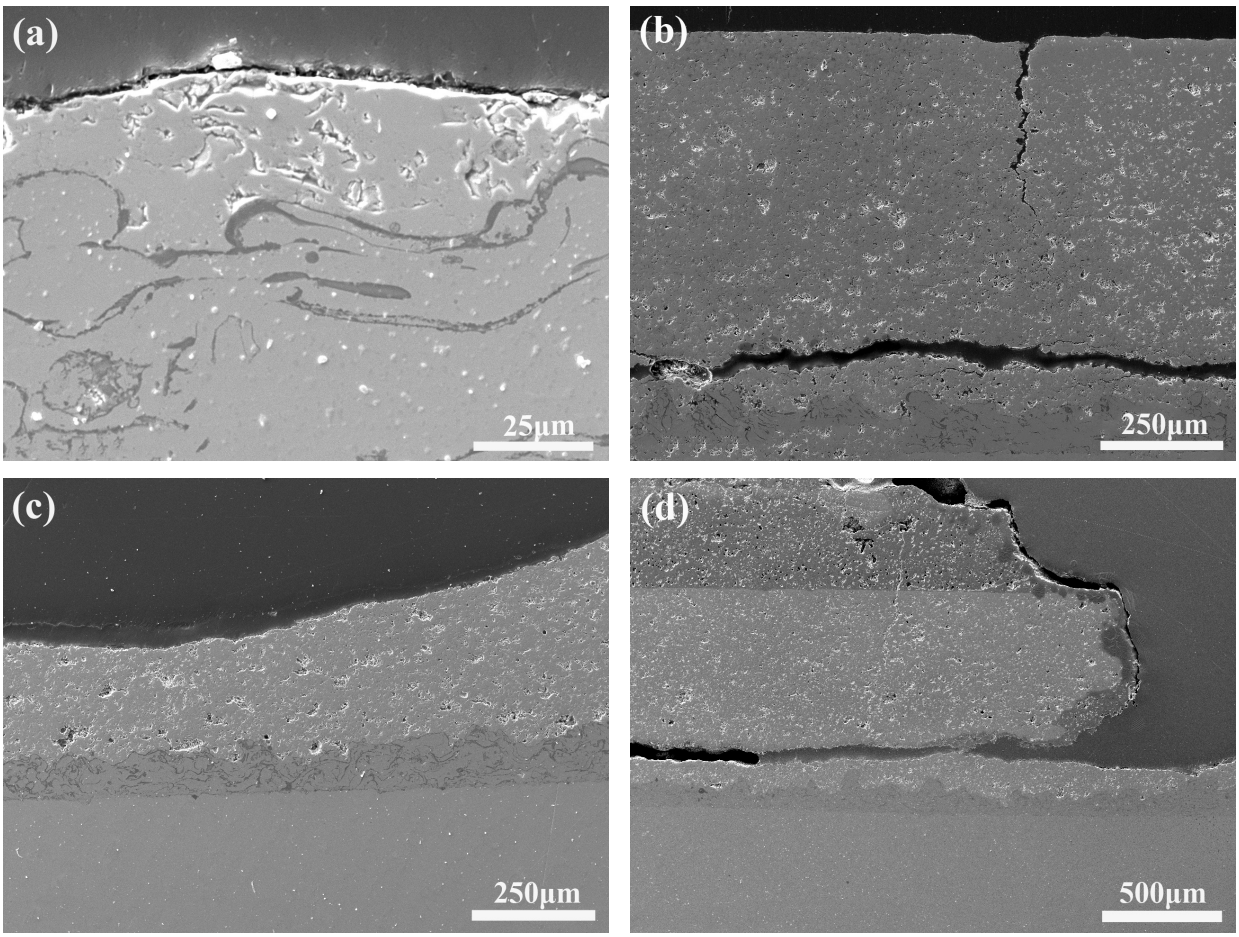

图 2 失效后涂层不同部位截面显微形貌：(a) 区域 1 截面形貌；
(b) 区域 2 截面形貌；(c) 区域 3 截面形貌；(d) 区域 4 截面形貌

Fig.2 Micromorphology of cross section of different parts of coating after failure: (a) cross-section morphology of zone 1; (b) cross-section morphology of zone 2; (c) cross-section morphology of zone 3; (d) cross-section morphology of zone 4

2.3 失效涂层能谱分析

由图 2(d) 中失效涂层区域 4 的截面形貌可知，涂层表面附着了一层厚度约 0.5mm 的附着物。为了研究附着物对涂层失效的作用，对区域 4 涂层表面附着物的成分进行了能谱分析，结果如图 3 所示，可知附着物主要成分为 SiO_2、CaO、Fe_2O_3、Al_2O_3 等氧化物，各种元素的相对含量如表 1 所示。

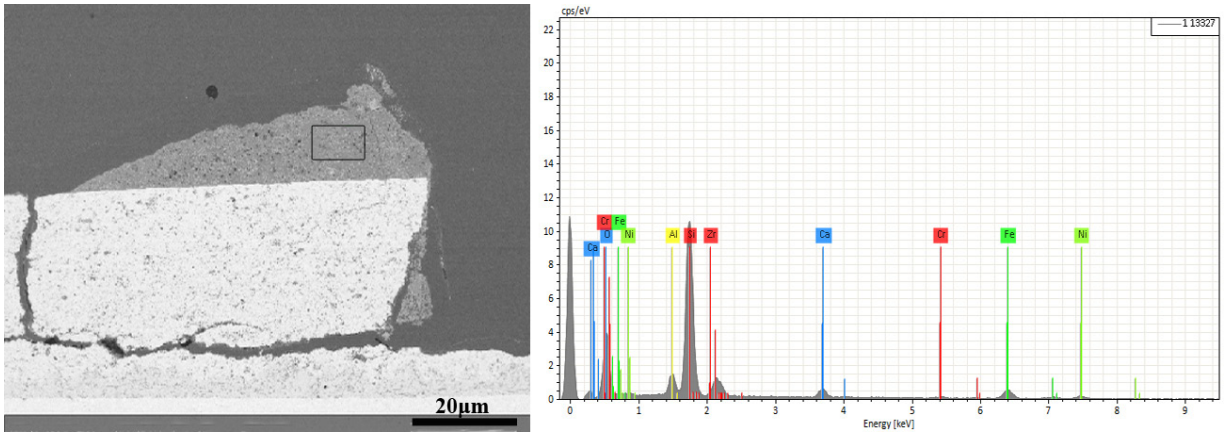

图 3 失效涂层表面附着物能谱分析

Fig. 3 EDS analysis of surface attachment of the failed coating

表 1 失效涂层表面附着物 EDS 分析结果

Table 1 EDS results of surface attachment of the failed coating

元素	wt.%	at.%
O	33.1	51.87
Al	3.76	3.49
Si	37.36	33.35
Ca	4.06	2.54
Cr	1.18	0.57
Fe	10.54	4.73
Ni	4.58	1.96
Zr	5.42	1.49

由图 2(d) 可知，涂层纵向裂纹内部也有附着物存在。对靠近面层与底层界面处的横向裂纹附近区域进行了能谱分析，如图 4 所示，各种元素的相对含量如表 2 所示。可以看出在靠近裂纹附近的 YSZ 涂层内部也检测到少量的 SiO_2、CaO 等氧化物，说明 YSZ 涂层内部发生了附着物成分的渗透。综合前面附着物分析结果可以看出，杂质附着物层与 YSZ 陶瓷层结合较为紧密，无明显界面。并且杂质附着物对 YSZ 涂层渗透效应明显，SiO_2、CaO、Al_2O_3、Fe_2O_3 等杂质渗透到 YSZ 层内部，在高温服役环境下可与涂层发生物理及化学侵蚀作用，降低 YSZ 涂层相稳定性 [10]，可能加速了 YSZ 陶瓷厚致密涂层内部缺陷的产生，最终造成内部裂纹扩展并失效。

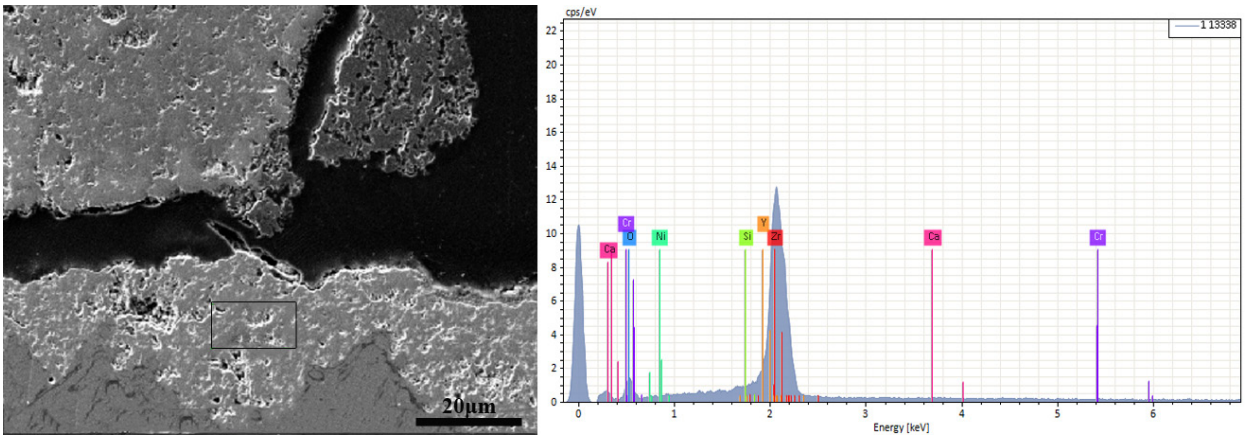

图 4 裂纹附近 YSZ 涂层能谱分析

Fig.4 EDS analysis of YSZ coating near crack

表 2 裂纹附近 YSZ 涂层 EDS 分析结果
Table 2 EDS results of YSZ coating near crack

元素	wt.%	at.%
O	15.05	49.73
Si	0.52	0.98
Ca	0.19	0.26
Cr	0.19	0.19
Ni	0.28	0.25
Y	2.52	1.50
Zr	81.24	47.08

2.4 失效涂层相结构分析

对失效的厚热障涂层表面进行 XRD 分析，如图 5 所示，发现失效试样主要为 $Zr_{0.92}Y_{0.08}O_{1.96}$（四方相），与制备态涂层相比，出现了一些新的 m-ZrO_2（单斜相）和 Al_2O_3 相，但单斜相的增加比例不高，并不是造成涂层失效的原因。Al_2O_3 相与前述图 2(d) 中涂层表面附着物有关，由于涂层对磨部件中含有 Al，在含氧高温高速考核条件下，很容易在涂层表面形成其氧化物。

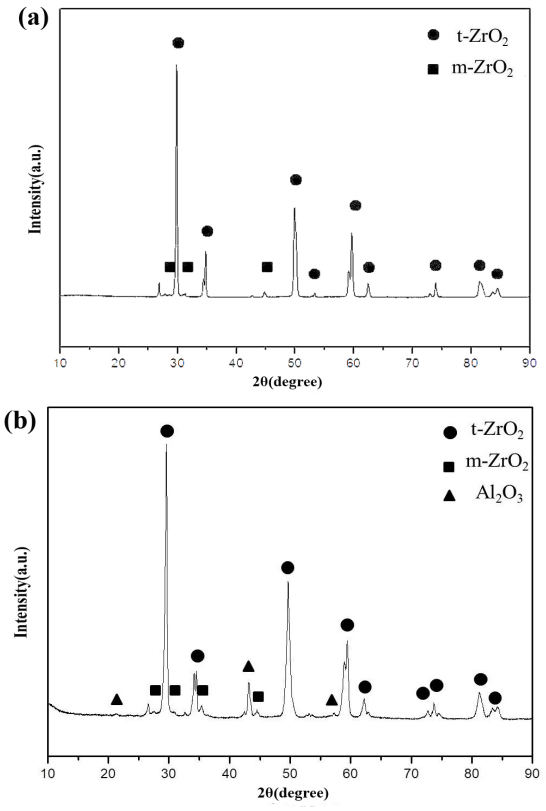

图 5 厚热障涂层试样失效前后的 XRD 图谱：(a) 制备态涂层 XRD 图谱；(b) 失效涂层 XRD 图谱
Fig. 5 XRD patterns of thick thermal barrier coating samples before and after failure: (a) XRD pattern of prepared coating; (b) XRD pattern of failed coating

2.5 涂层工艺优化建议

根据以上对失效厚热障涂层样品的分析，初步认为涂层失效的主要原因是表面附着物的渗入和燃气冲蚀下致密厚热障涂层内部应力的增加。为了提高涂层的服役寿命，一是要对厚涂层进行后加工，提高表面光洁度，尽量避免表面物质的附着，其次是优化喷涂工艺，降低涂层内应力。根据研究，可采用高能量等离子喷涂工艺，制备涂层内部存在均匀弥散微小孔隙结构的厚热障涂层。这种涂层有利于热冲击过程中涂层内部应力的释放，从而避免裂纹的产生及扩展，提高涂层寿命。高能量等离子喷涂制备的致密厚热障涂层的形貌、相结构、热冲击性能与目前传统工艺制备的厚热障涂层的对比也是下一步重点的研究方向。

3 结论

(1) 厚热障涂层在燃气冲蚀考核条件下，以龟裂、掉块、刮削的方式发生失效，失效原因主要是由于应力集中引起的裂纹扩展和剥落，以及氧化物在涂层表面附着引起的反应而导致涂层剥落。

(2) 喷涂工艺改进，可在致密厚热障涂层中引入微小的、弥散均匀分布的微裂纹，减少涂层在热冲击环境下的应力集中，提高涂层寿命。

参考文献

[1] 郭洪波 , 宫声凯 , 徐惠彬 , 等 . 新型高温 / 超高温热障涂层及制备技术研究进展 [J]. 航空学报 , 2014, 35(10): 2722-2732.

[2] Darolia R. Thermal barrier coatings technology: critical review, progress update, remaining challenges and prospects[J]. International Materials Reviews, 2013, 58(6): 315-348.

[3] Miller R A. Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(1): 35-42.

[4] Guo H B, Vaßen R, Stöver D. Atmospheric plasma sprayed thick thermal barrier coatings with high segmentation crack density[J]. Surface and Coatings Technology. 2004; 186(3): 353-363.

[5] Guo H B, Vaßen R, Stöver D. Thermophysical properties and thermal cycling behavior of plasma sprayed thick

（下转 82 页）

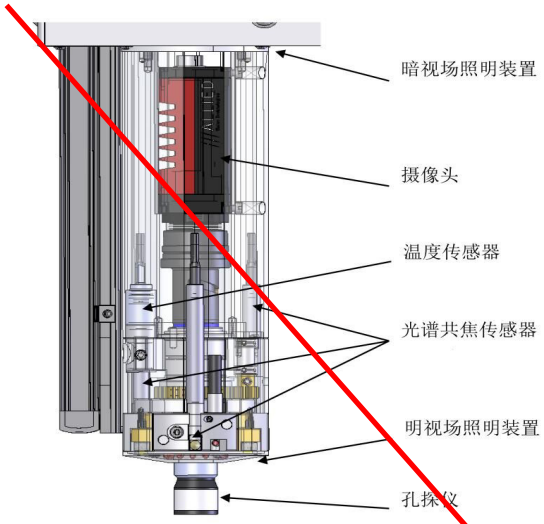

图 12 Sturm 公司的测量头结构示意图

Fig.12 Structure diagram of measuring head of the Sturm Co., Ltd

4.4 清洗

考虑到产品功能和性能要求，残留在水套及油道里面的过喷材料及精加工面上的过喷材料需要清除，同时，在发动机装配和精加工区域所需的区域也不允许有过喷材料残留。

5 结论

国内各大汽车主机厂在对该大气等离子热喷涂技术进行积极的量产工艺开发，发动机缸孔内壁涂层缸体替代传统缸套铝合金缸体已成为发展趋势。本文基于国内汽车厂对量产发动机缸孔喷涂的需求，并就某公司某型号发动机为例开发了基于 APS 的缸孔涂层工业化量产工艺，并对大气热喷涂缸孔内壁的工作机理、前处理、后处理等加工工序、质量检测方法进行研究和介绍，为 APS 缸孔涂层工业化量产工艺开发提供理论支持和应用分析。

参考文献

[1] 李汶哲 . 汽车企业节能新技术评价及油耗目标优化方法 [D]. 长沙：湖南大学 , 2015.

[2] 王智文 . 汽车轻量化技术发展现状初探 [J]. 汽车工艺与材料 , 2009, (2): 1-5.

[3] 郑晖 , 赵曦雅 . 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用 [J]. 锻压技术 , 2016(2): 1-6.

[4] 蔡其刚 . 铝合金在汽车车体上的应用现状及发展趋势探讨 [J]. 轻工科技 , 2009, 12(1): 28-29.

[5] 刘黎明 , 肖金坤 , 徐海峰 , 等 . 热喷涂汽车发动机气缸内壁涂层的研究进展 [J]. 表面技术 , 2017, 46(2): 68-76.

[6] Ernst P, Barbzeat G. Thermal spray applications in powertrain contribute to the saving of energy and material resources[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(18): 4428-4431.

[7] 肖立新 , 沈婕 , 高峰 , 等 . 发动机汽缸内壁新型耐磨涂层研究 [J]. 热喷涂技术 , 2012, 4(1): 32-35.

[8] 毛俊元 , 郑卫刚 . 船用柴油机气缸套内壁热喷涂方式的研究 [J]. 热加工工艺 , 2014, 43(18): 137-139.

[9] 黄勇 , 季强 , 何勇 , 等 . 无缸套全铝合金气缸体缸孔内壁涂层的制备及性能研究 [J]. 汽车工艺与材料 , 2019(07): 37-43.

[10] 杨震晓 , 刘敏 , 邓春明 , 等 . 热喷涂基体表面前处理技术的研究进展 [J]. 中国表面工程 , 2012, 25(02): 8-14.

[11] 司圣春 . 发动机缸孔等离子热喷涂工艺研究 [J]. 机械工程师 , 2016(07): 230-232.

[12] Hoffmeister H W, Schnell C. Mechanical roughing of cylinder bores in light metal crankcases[J]. Production Engineering, 2008, 2(4): 365-370.

[13] Lamraoui A, Langlade C, Costil S, et al. Surface pre-treatments including Laser texturing for thermal spraying[C]. International Thermal Spray Conference and Exposition, 2010: 842-846.

[14]Mezghani S, Demirci I, Yousfi M, et al. Running-in wear modeling of honed surface for combustion engine cylinderliners. 2013, 302(1-2): 1360-1369.

（上接 73 页）

thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology. 2005: 192(1): 48-56.

[6] Ahmaniemi S, Vippola M, Vuoristo P, et.al. Modified thick thermal barrier coatings: microstructural characterization[J]. Journal of the European Ceramic Society. 2004; 24(8): 2247-2258.

[7] 赵月兴 , 李大川 , 赵华玉 , 等 . 具有分区裂纹的厚热障涂层的失效机制分析 [C]. 第十七届全国热喷涂年会 , 2013: 31-37.

[8] 王全胜 , 王富耻 , 马壮 , 等. 铝基厚梯度热障涂层制备工艺及性能研究 [J]. 中国表面工程 . 2004, 17(4): 35-37+41.

[9] 王东生 , 田宗军 , 沈理达 , 等 . 大厚度热障涂层制备技术的研究进展 [J], 材料保护 , 2013, 46(6): 60-63.

[10] 冀晓鹃 , 于月光 , 卢晓亮 . 杂质对氧化锆热障涂层性能的影响 [J], 无机材料学报 , 2020, 35(6): 669-674.