

孔隙结构对大气等离子喷涂热障涂层 抗侵蚀性能影响的数值研究

邸娟¹, 陈高飞¹, 颜晓江², 刘峰³

(1. 太原科技大学机械工程学院, 030024, 太原; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

3. 太原理工大学机械与运载工程学院, 030024, 太原)

摘要: 为探索涂层内部缺陷结构对大气等离子喷涂热障涂层(APS-TBCs)抗冲蚀的影响,建立了含有大量随机分布圆形孔隙的大气等离子热障涂层模型。基于显式动力学算法并结合脆性断裂准则,模拟了粒子冲击作用下陶瓷层内裂纹扩展、冲蚀破碎等失效现象,获取了陶瓷层内孔隙半径(0.1~5 μm)、孔隙率(0~20%)等关键参数与冲蚀质量之间的内在关系。仿真结果表明,圆形孔隙结构会使热障涂层冲蚀性能发生改变;对于某特定孔隙率存在最优孔隙半径,使其抗冲蚀性优于无孔隙结构的热障涂层;对于某特定孔隙半径,随着孔隙率的增加涂层冲蚀质量逐渐趋于稳定。此项研究可为预测涂层服役寿命、改进等离子喷涂制备工艺、提高其抗冲蚀能力提供一定的参考。

关键词: 孔隙率;孔隙半径;抗冲蚀性;大气等离子喷涂热障涂层

中图分类号: TK47 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202201013 **文章编号:** 0253-987X(2022)01-0113-07



OSID 码

Numerical Study on Effect of Pore Structure on Erosion Resistance of Atmospheric Plasma Thermal Barrier Coating

DI Juan¹, CHEN Gaofei¹, YAN Xiaojiang², LIU Feng³

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to explore the influence of internal defect structure on erosion resistance of atmospheric plasma thermal barrier coatings (APS-TBCs), a coating model containing a large number of randomly distributed circular pores was established. Based on the explicit dynamic algorithm and the brittle cracking criterion, the failure phenomena of crack propagation and erosion cracking in the ceramic layer under particle impact were simulated. The relationship between the key parameters, such as pore radius (0.1–5 μm) and porosity (0–20%), and erosive mass loss in the ceramic layer was obtained. Simulation results show that the circular pore structure will change the erosion performance of thermal barrier coatings. For a specific porosity, there is an optimal pore radius, which makes erosion resistance better than that of thermal barrier coatings without pore structure. For a specific pore radius, the erosion mass of the coating gradually tends to be stable with the increase of porosity. This study may provide a reference for predicting service life of the coating, improving the plasma spraying preparation process and

收稿日期: 2021-06-02。 作者简介: 邸娟(1988—),女,讲师,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52002265);山西省高等学校科技创新资助项目(2020L0346);山西省优秀博士毕业生来晋工作奖励资助基金资助项目(20202020)。

网络出版时间: 2021-10-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20211012.1942.012.html>

enhancing its erosion resistance.

Keywords: porosity; pore radius; erosion resistance; atmospheric plasma thermal barrier coatings

燃气轮机涡轮叶片表面涂覆热障涂层是提高其服役寿命的重要方法,通过在燃机涡轮叶片上使用热障涂层(TBCs)技术,弥补了高温合金许用工作温度的不足,可提高涡轮进口温度约 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,在隔热延寿、防黏结氧化以及防颗粒冲蚀等方面起到重要作用。微细固体颗粒冲击热障涂层表面产生的冲蚀损伤,目前已成为影响热障涂层失效的第二大关键因素^[1-7]。

大量的实验观察和测试结果表明,TBCs 冲蚀损伤模式不仅受到冲蚀颗粒的尺寸、速度及冲蚀角的影响,还取决于涂层的力学性能及内部微观结构。目前 TBCs 的制备工艺主要以大气等离子喷涂和电子束物理气相沉积工艺最为常用^[8-13]。由于制备工艺的不同,两种涂层在形成的微观组织结构、抗冲蚀能力以及失效模式上都存在很大差异。

电子束物理气相沉积(EB-PVD)热障涂层的显微组织呈相对规则的柱状晶结构,其冲蚀机理和冲蚀失效机制已通过理论分析、实验研究及数值求解等手段开展了较为深入的研究^[4,14-18];而大气等离子喷涂涂层的微观结构近乎层状,整个陶瓷层可以看成是含大量孔隙和微裂纹的疏松层状单元叠加而成^[19],其冲蚀失效主要表现为在粒子的冲击作用下层状单元的边沿形成裂纹,并在持续冲击下,导致裂纹扩展并沿着边沿剥落,陶瓷层在冲击过程中不产生明显的致密区^[20]。由于其复杂的涂层结构,关于其冲蚀性能的研究尚不深入,且主要是基于实验测试和显微观测,其失效机理并不明确,还需进一步研究。此外,孔隙和裂纹等缺陷结构为等离子喷涂涂层的层状单元提供了更多的剥落源,研究表明,孔洞及裂纹等缺陷结构的分布及组织形态对涂层冲蚀率、残余应力分布有显著影响^[6,21-22]。

本文基于大气等离子喷涂涂层的缺陷结构特征,建立含有圆形孔隙和真实微观结构的涂层冲蚀模型,探索孔隙率、孔隙半径等关键参数对冲蚀性能的影响,以期进一步探究大气等离子喷涂热障涂层的冲蚀特性。

1 孔隙涂层的数值模型

1.1 孔隙模型

大气等离子喷涂法是将氧化钇部分稳定氧化锆($\text{ZrO}_2(7\sim 8)\text{Y}_2\text{O}_3$)粉末沉积在高温合金表面形成的一层陶瓷涂层。所制得的热障涂层的陶瓷层孔隙

率 f 一般在 4% 到 20% ,且层内缺陷结构杂乱无章,不易于分析各种缺陷对陶瓷层冲蚀性能的影响情况。针对其结构特点,对陶瓷层内的缺陷做了合理简化,剔除了存在的微裂纹,同时将孔隙简化为圆形孔洞,并将圆形孔洞随机分布。这种处理将陶瓷层内复杂的结构缺陷分离为孔隙率、孔隙大小、孔隙分布这样的单一变量,随后即可针对各个影响因素进行独立研究,进而为制备工艺的改进提供参考。

通过程序编写,完成随机孔洞材料 2D 模型的建立。定义材料形状、尺寸及圆形孔洞的尺寸、数量及分布范围,并确保圆形孔洞间互不相交,由于程序中含有随机函数,每次运行得到的模型的孔隙的分布情况都不一样,值得注意的是,有时运行得到的数据模型的孔洞会分布在较边缘的位置,常常在后续有限元计算中导致结果不收敛,为了后续仿真工作的顺利进行,可通过多次运行调试得到孔洞分布较为理想的数据模型。孔隙结构的一次运行结果如图 1 所示。采用边长为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的正方形,孔隙半径为 $0.1\sim 1\text{ }\mu\text{m}$,孔隙率 f 为 5% 。

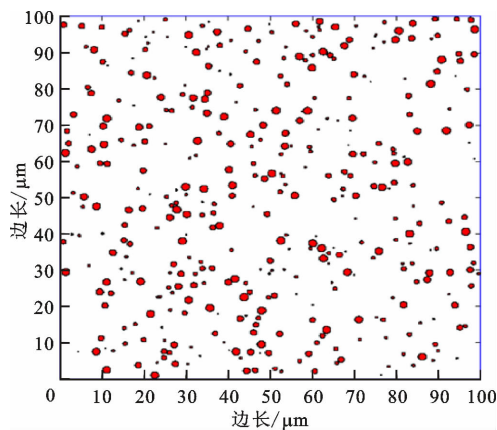


图1 孔隙结构的一次运行结果

Fig. 1 A program-execution result of pore structure

将得到的圆心位置坐标 x 、 y 及孔隙半径 r_f 等孔隙参数输出到 excel 表中,使用 Python 脚本编写程序,在 Abaqus 软件中建立含随机分布圆形孔隙的等离子喷涂涂层冲蚀模型,有限元模型流程如图 2 所示。

1.2 陶瓷层性能参数

建立的涂层冲蚀模型中,陶瓷层内孔隙率 f 为 5% ,孔隙半径 r_f 在 $0.1\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,材料相关参数的选取见表 1^[20,23]。冲蚀粒子直径 d_p 为 $20\text{ }\mu\text{m}$,

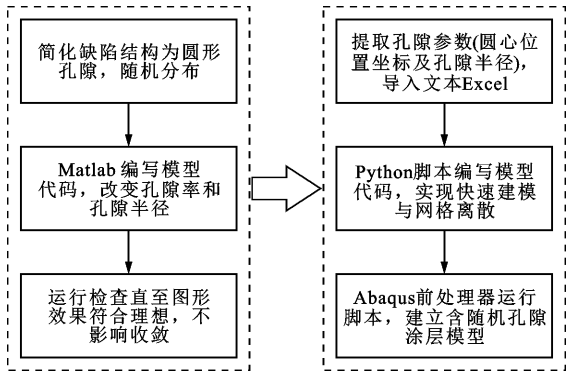


图 2 含随机孔隙结构有限元模型流程图

Fig. 2 Flow chart of finite element model with random pore structure

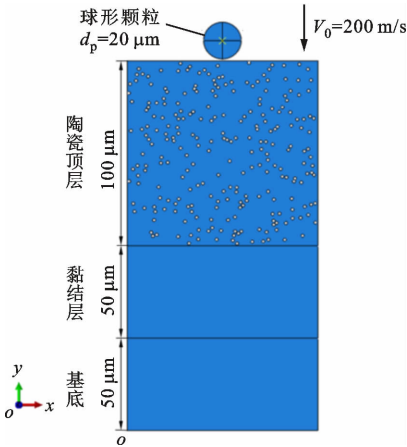
密度 ρ_p 为 $2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 冲蚀速度 V_0 为 $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 并将颗粒定义为刚体。建立的二维含随机孔洞的冲蚀有限元模型及网格如图 3 所示。

表 1 陶瓷层材料相关参数的选取

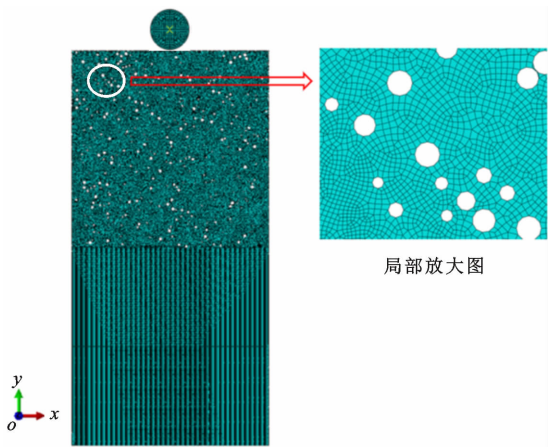
Table 1 Parameters of the ceramic layer

陶瓷层材料参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	6 000
泊松比	0.25
弹性模量/GPa	92
机械能释放率/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	0.28
失效拉应力/MPa	232.93
失效压应力/MPa	1 170.96
破坏时的裂纹张开位移/ μm	2.0×10^{-5}

本节采用可用于脆性材料的断裂分析^[24-25]的脆性断裂准则模拟陶瓷层冲蚀失效。采用脆性断裂准则需定义以下几个特征参数:首先是给定材料的抗拉强度,也就是最大主拉应力破坏准则(第一强度理论),即判断材料什么时候开始发生破坏;之后定义



(a) $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙模型的孔隙率为 5%



(b) 孔隙半径为 $0.1\sim1\text{ }\mu\text{m}$ 时随机分布孔隙的有限元网格

图 3 二维含随机孔洞的冲蚀有限元模型及网格

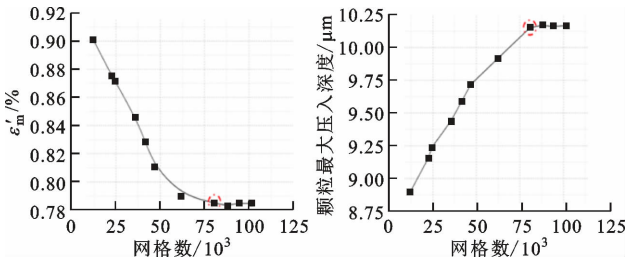
Fig. 3 Two-dimensional erosion model with random pore structure (geometric model and grid)

其开裂后的软化特性,陶瓷层材料设置为 GFI 类型,即软化规律主要通过开裂能量和破坏载荷的关系来确定;另外,还需定义材料发生开裂后开裂面的剪切性能,这里选取了指数形式,具体参数由实验获得^[26];最后,通过设置脆性失效指定材料失效应变,将失效单元从模型中删除,材料单向裂纹失效破坏应变参数取自实验^[26]。

以孔隙半径为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 、孔隙率为 5% 的冲蚀模型为例进行网格独立性考核。网格无关性验证如图 4 所示。为便于比较不同孔隙半径及孔隙率下的冲蚀质量,定义了一个无量纲参数,即靶材的相对冲蚀质量,定义为平均冲蚀质量与靶材原始质量的比值,表达式为

$$\epsilon'_m = \frac{\Delta m}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

图 4a 和图 4b 分别表示靶材相对冲蚀质量和颗粒最大压入深度随网格数的变化规律。由图 4 可以看出,当模型网格数达到 80 770,相对冲蚀质量及颗粒最大压入深度随网格数的变化基本可以忽略不



(a) 靶材相对冲蚀质量 (b) 颗粒最大压入深度

图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

计,本文最终选用网格数80 770,对应的最小网格尺度约为 0.2 μm 。

2 数值计算结果与分析

由于随机函数控制模型中孔隙的分布情况,因此在孔隙率、孔隙尺寸相同的情况下,每次运行程序得到的陶瓷层模型的孔隙分布情况都各不相同。为消除其对冲蚀性能的影响,对每种冲蚀模型取多种孔隙分布情况进行求解计算,得到冲蚀质量平均值。

图 5 给出了孔隙半径为 0.4 μm 时两种不同孔隙分布情况下的 APS-TBCs 冲蚀后形貌。图 6 给出了各种孔隙半径分布情况下的 APS-TBCs 裂纹萌生及扩展情况。

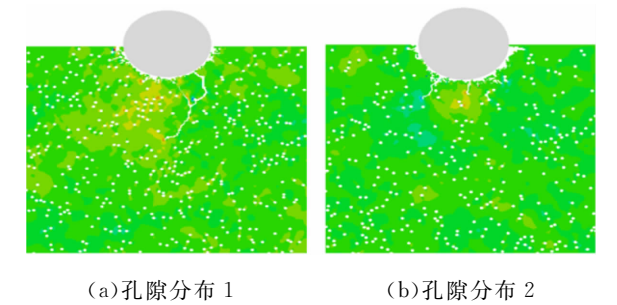


图 5 孔隙半径为 0.4 μm 时两种孔隙分布情况下的 APS-TBCs 冲蚀后形貌
Fig. 5 The eroded morphologies of APS-TBC with 0.4- μm pore radius under two different pore distributions

以孔隙半径 0.8 μm 、孔隙率 5% 为例,研究了冲蚀角对冲蚀性能的影响。图 7 给出了涂层冲蚀质量随冲蚀角的变化。由图 7 可以看出其变化规律呈典型的脆性材料冲蚀特性^[1]。涂层的冲蚀质量随着冲蚀角的增加而增加,最大冲蚀质量在冲蚀角为

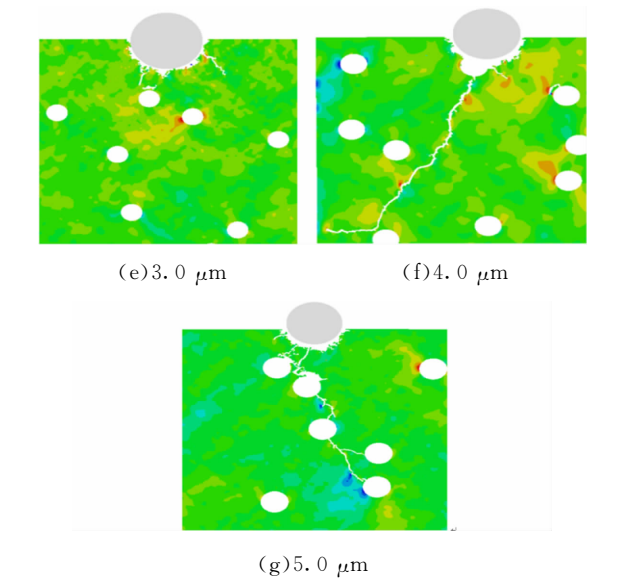
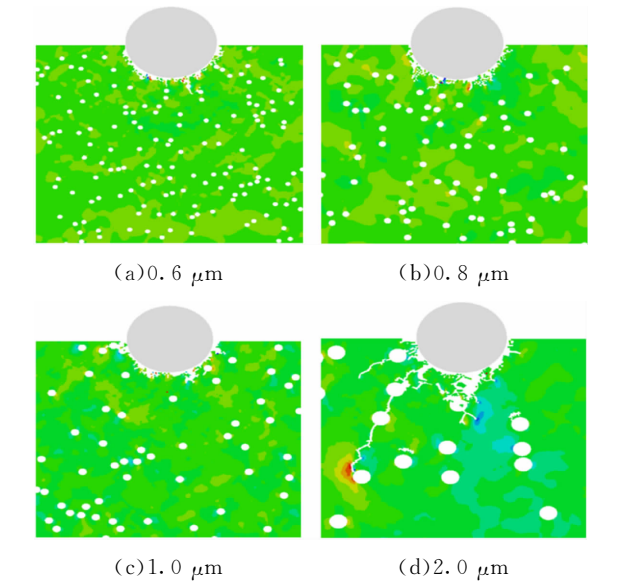


图 6 各种孔隙半径情况下裂纹萌生及扩展情况
Fig. 6 Post-impact morphologies with crack initiation and propagation for various pore radius

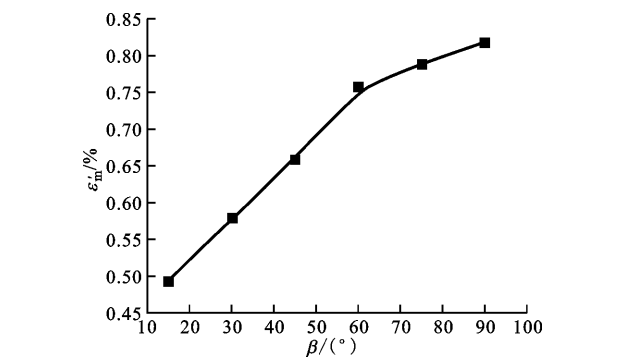
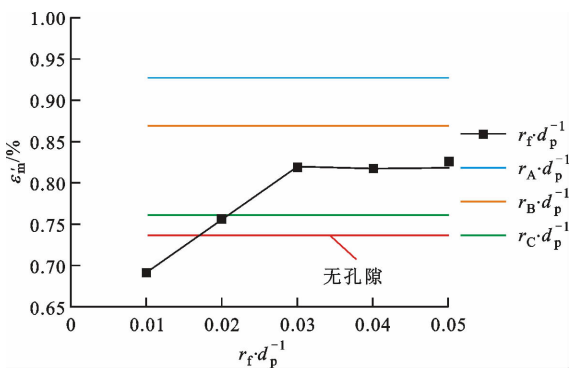


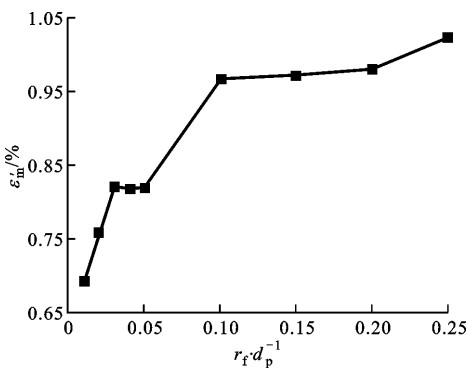
图 7 涂层相对冲蚀质量随冲蚀角的变化
Fig. 7 The relationship between erosive mass loss of coating and impact angle

90°碰撞下取得,这也对模型可靠性进行了一定的验证。

图 8 给出了靶材相对冲蚀质量随陶瓷层内孔隙半径的变化关系。图 8a 中 $r_A \cdot d_p^{-1}$ 、 $r_B \cdot d_p^{-1}$ 和 $r_C \cdot d_p^{-1}$ 对应的 3 条曲线是孔隙半径 r_f 在 0.1~1.0 μm 范围内随机分布时,孔隙的 3 种分布情况所对应的陶瓷层的相对质量损失。由图 8 可知,孔隙率 f 一定时,当孔隙半径分布在 0.1~1.0 μm 范围内,陶瓷层内的孔隙分布对冲蚀质量有显著影响;另外,孔隙率 f 一定,当孔隙半径为 0.2 μm 时,涂层抗冲蚀性能优于无孔隙结构的 TBCs;当孔隙半径在 0.6~1.0 μm 范围内时,冲蚀质量较为稳定;当孔隙半径超过 1.0 μm 后,冲蚀质量显著增大,如图 8b 所示。分析其原因:由于孔隙率不变,孔隙半径的改变



(a)孔隙半径 0.1~1.0 μm 随机分布及孔隙半径在 0.2~1.0 μm 内取定值



(b)孔隙半径在 0.2~5.0 μm 内取定值

图 8 靶材相对冲蚀质量随孔隙半径的变化

Fig. 8 The variation of relative erosive mass loss of target with pore radius

会使陶瓷层内孔隙数发生变化,当陶瓷层内孔隙半径为 0.2 μm 时,孔隙非常小且数量多即分布密集,此时陶瓷层达到弥散状态,具有很好的消除应力集中的作用,因此具有较为优异的抗冲蚀能力。当孔隙半径继续增加到 0.6~1.0 μm 范围内时,孔隙分布仍较密集,因此陶瓷层抗冲蚀能力较稳定。当孔隙半径进一步增加到 1.0 μm 以上,由于孔隙数明显减小,且孔隙半径较大,因此在颗粒冲击作用下孔隙位置容易形成应力集中,裂纹萌生后沿路径上的孔隙方向依次扩展,不易终结,因此质量损失显著增加,抗冲蚀能力明显减弱。

对孔隙半径的研究表明,无量纲半径 $r_f \cdot d_p^{-1}$ 在 0.03~0.05 范围内时,陶瓷层的冲蚀情况较为稳定,因此选取 $r_f \cdot d_p^{-1}$ 为 0.04,即孔隙半径为 0.8 μm,通过改变孔隙率分析孔隙率对等离子喷涂热障涂层冲蚀性能的影响。孔隙半径为 0.8 μm 且随机分布,各孔隙率下 TBCs 陶瓷层冲蚀后形貌及裂纹萌生与扩展情况如图 9 所示,其中冲蚀角为 90°,冲蚀速度为 200 m · s⁻¹。

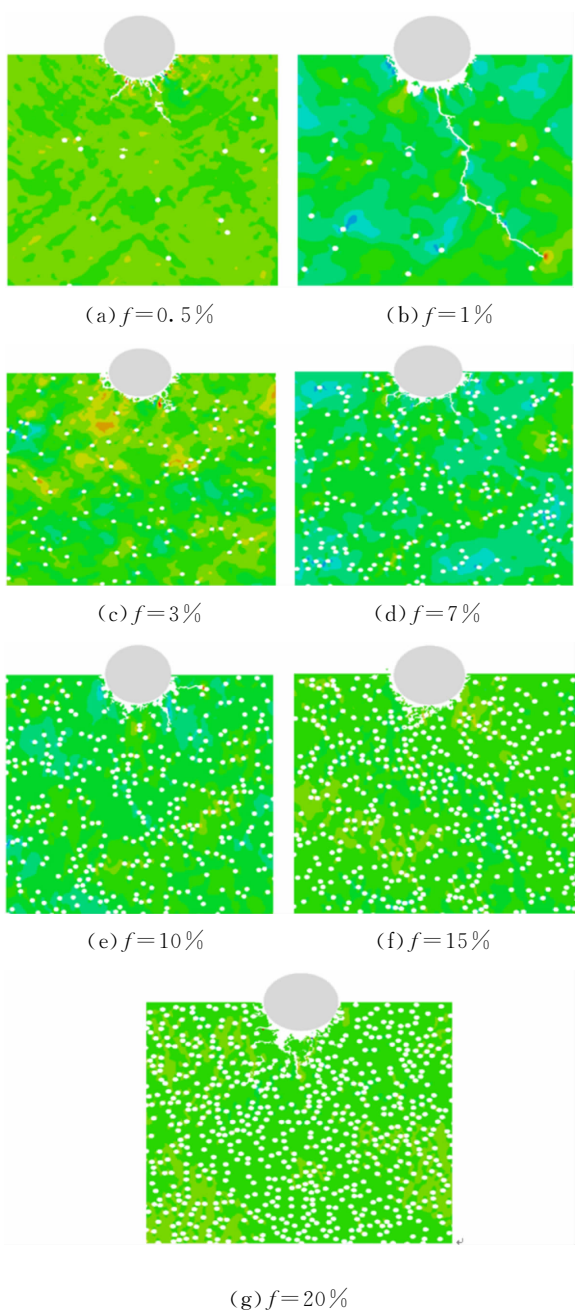


图 9 APS-TBCs 陶瓷层在各孔隙率下的冲蚀后形貌及裂纹萌生与扩展情况

Fig. 9 The eroded morphologies with crack initiation and propagation of APS-TBCs with different porosity

涂层相对冲蚀质量随孔隙率的变化如图 10 所示。由图 10 可以看出,孔隙率在 5% 以下,冲蚀比较严重,且冲蚀质量波动性很强,孔隙处应力集中,裂纹扩展不易终结。孔隙率在 5%~7% 范围内时,孔隙数多且分布密集,此时陶瓷层达到弥散状态,具有很好的消除应力集中的作用,因而涂层具有较好的抗冲蚀性能。当涂层孔隙率在 10%~20% 范围内进一步增加,冲蚀质量变化很小,基本呈稳定趋

势,且由于孔隙更加密集,也具有一定的消除应力集中的作用,因此裂纹萌生扩展后很快终结。

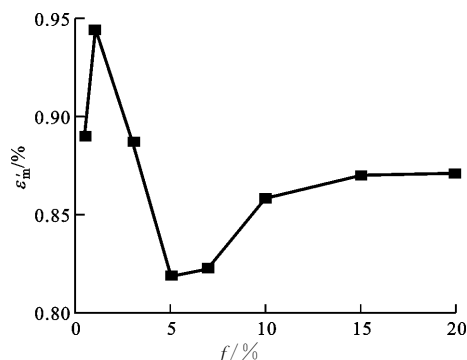


图10 涂层相对冲蚀质量随孔隙率的变化

Fig. 10 Curve of erosive mass loss of coatings vs. porosity

3 结论

本文基于理论分析和数值模拟,对燃机涡轮热障涂层的抗冲蚀特性进行了初步研究,建立了热障涂层冲蚀模型,并结合大气等离子热障涂层结构特点,分析了含随机分布孔隙的大气等离子热障涂层的冲蚀性能。建立了含有圆形孔隙的大气等离子热障涂层模型,将孔隙半径、孔隙率等陶瓷层内关键参数对冲蚀性能的影响进行了分析。结果表明:

(1)孔隙率 f 一定时,陶瓷层内的孔隙分布对冲蚀质量有着重要影响;

(2)孔隙率 f 一定、隙半径为 $0.2 \mu\text{m}$ 时,其抗冲蚀性能优于无孔隙结构的热障涂层;

(3)当孔隙半径为 $0.6 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 时,冲蚀质量较为稳定;当孔隙半径超过 $1.0 \mu\text{m}$ 后,冲蚀质量显著增大;

(4)以孔隙半径为 $0.8 \mu\text{m}$ 为例,孔隙率小于 5% ,冲蚀比较严重,且冲蚀质量波动性很强。孔隙率在 $5\% \sim 7\%$ 范围内,涂层具有较好的抗冲蚀性能。当涂层孔隙率在 $10\% \sim 20\%$ 范围内,冲蚀基本呈稳定趋势。

参考文献:

[1] 杨丽,周益春,齐莎莎. 热障涂层的冲蚀破坏机理研究进展 [J]. 力学进展, 2012, 42(6): 704-721.
YANG Li, ZHOU Yichun, QI Shasha. Research progress in erosion mechanisms of thermal barrier coatings [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(6): 704-721.

[2] 周益春,刘奇星,杨丽,等. 热障涂层的破坏机理与寿命预测 [J]. 固体力学学报, 2010, 31(5): 504-531.
ZHOU Yichun, LIU Qixing, YANG Li, et al. Failure mechanisms and life prediction of thermal barrier coat-

ings [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(5): 504-531.

[3] 李美姮,胡望宇,孙晓峰,等. 热障涂层的研究进展与发展趋势 [J]. 材料导报, 2005, 19(4): 41-45.
LI Meiheng, HU Wangyu, SUN Xiaofeng, et al. Recent research progress in thermal barrier coatings [J]. Materials Review, 2005, 19(4): 41-45.

[4] WELLMAN R G, NICHOLLS J. A review of the erosion of thermal barrier coatings [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2007, 40(16): R293-R305.

[5] CHEN X, HE M Y, SPITSBERG I, et al. Mechanisms governing the high temperature erosion of thermal barrier coatings [J]. Wear, 2004, 256(7/8): 735-746.

[6] CHEN X, WANG R, YAO N, et al. Foreign object damage in a thermal barrier system: mechanisms and simulations [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 352(1/2): 221-231.

[7] FLECK N A, ZISIS T. The erosion of EB-PVD thermal barrier coatings: the competition between mechanisms [J]. Wear, 2010, 268(11/12): 1214-1224.

[8] WELLMAN R G, NICHOLLS J R, MURPHY K. Effect of microstructure and temperature on the erosion rates and mechanisms of modified EB PVD TBCs [J]. Wear, 2009, 267(11): 1927-1934.

[9] WELLMAN R G, NICHOLLS J R. Erosion, corrosion and erosion-corrosion of EB PVD thermal barrier coatings [J]. Tribology International, 2008, 41(7): 657-662.

[10] NICHOLLS J R, DEAKIN M J, RICKERBY D S. A comparison between the erosion behaviour of thermal spray and electron beam physical vapour deposition thermal barrier coatings [J]. Wear, 1999, 233/234/235: 352-361.

[11] ZHU Dongming, MILLER R A, KUCZMARSKI M A. Development and life prediction of erosion resistant turbine low conductivity thermal barrier coatings [M]. Cleveland, OH, USA: National Aeronautics and Space Administration, 2010: 1-15.

[12] CERNUSCHI F, LORENZONI L, CAPELLI S, et al. Solid particle erosion of thermal spray and physical vapour deposition thermal barrier coatings [J]. Wear, 2011, 271(11/12): 2909-2918.

[13] DREXLER J M, AYGUN A, LI Dongsheng, et al. Thermal-gradient testing of thermal barrier coatings under simultaneous attack by molten glassy deposits and its mitigation [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(16/17): 2683-2688.

- [14] CHEN X, HE M Y, SPITSBERG I, et al. Mechanisms governing the high temperature erosion of thermal barrier coatings [J]. *Wear*, 2004, 256(7/8): 735-746.
- [15] CHEN X, WANG R, YAO N, et al. Foreign object damage in a thermal barrier system: mechanisms and simulations [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 352(1/2): 221-231.
- [16] WELLMAN R G, DEAKIN M J, NICHOLLS J R. The effect of TBC morphology on the erosion rate of EB PVD TBCs [J]. *Wear*, 2005, 258(1/2/3/4): 349-356.
- [17] CHEN Q, LI D Y. Computer simulation of erosion-corrosion of a non-passive alloy using a micro-scale dynamic model [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 369(1/2): 284-293.
- [18] CHEN Q, LI D Y. Computer simulation of solid particle erosion [J]. *Wear*, 2003, 254(3/4): 203-210.
- [19] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications [J]. *Science*, 2002, 296(5566): 280-284.
- [20] RAMANUJAM N, NAKAMURA T. Erosion mechanisms of thermally sprayed coatings with multiple phases [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 204(1/2): 42-53.
- [21] 齐莎莎. 等离子喷涂热障涂层冲蚀失效的量纲分析及有限元模拟 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015: 16-24.
- [22] 董杰. 考虑真实微观结构 APS-TBCs 冲蚀失效的有限元模拟 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015: 2-9.
- [23] WU Jing, GUO Hongbi, GAO Yuzhi, et al. Micro-structure and thermo-physical properties of yttria stabilized zirconia coatings with CMAS deposits [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(10): 1881-1888.
- [24] 王家明, 谷安. 微磨粒冲击陶瓷材料的有限元模拟 [J]. *机电一体化*, 2010, 16(10): 33-36.
- WANG Jiaming, GU An. Finite element simulation of micro-abrasive impacting on ceramics [J]. *Mechatronics*, 2010, 16(10): 33-36.
- [25] 庄茁, 由小川, 廖剑晖. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 219-223.
- [26] 钟志春. 热障涂层表面开裂与界面剥离失效的声发射定量评价 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013: 40-50.

(编辑 武红江)

(上接第 30 页)

- PENG Zhijun, BAI Long, BAI Fuqiang, et al. Experimental study on ABE diesel droplet combustion with micro-explosion [J]. *Transactions of CSICE*, 2019, 37(3): 273-279.
- [17] 吴东垠, 盛宏至, 张宏策, 等. 柴油、甲醇和水三组元乳化液滴微爆过程的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(7): 772-775.
- WU Dongyin, SHENG Hongzhi, ZHANG Hongce, et al. Study on micro-explosions procedure of diesel/water/methanol emulsions droplet [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(7): 772-775.
- [18] COUGHLIN B, HOXIE A. Combustion characteristics of ternary fuel Blends: pentanol, butanol and vegetable oil [J]. *Fuel*, 2017, 196: 488-496.
- [19] XUAN Tiemin, SUN Zhongcheng, EL-SEESY A I, et al. An optical study on spray and combustion characteristics of ternary hydrogenated catalytic biodiesel/methanol/n-octanol blends: part I spray morphology, ignition delay, and flame lift-off length [J]. *Fuel*, 2021, 289: 119762.
- [20] XUAN Tiemin, SUN Zhongcheng, EL-SEESY A I, et al. An optical study on spray and combustion characteristics of ternary hydrogenated catalytic biodiesel/methanol/n-octanol blends: part II liquid length and in-flame soot [J]. *Energy*, 2021, 227: 120543.
- [21] ZHAN Cheng, FENG Zehao, MA Wen'an, et al. Experimental investigation on effect of ethanol and diethyl ether addition on the spray characteristics of diesel/biodiesel blends under high injection pressure [J]. *Fuel*, 2018, 218: 1-11.
- [22] HOXIE A, SCHOO R, BRADEN J. Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets [J]. *Fuel*, 2014, 120: 22-29.
- [23] ZENG Yangbing, LEE C F F. Modeling droplet breakup processes under micro-explosion conditions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2185-2193.

(编辑 荆树蓉)