

涂层表面宏观损坏对 EB-PVD 热障涂层的热应力分布影响

黄太红, 宋鹏, 周会会, 季强, 罗恒, 马景涛, 陆建生

(昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650093)

摘要: 燃气轮机叶片在服役过程中受高速气流冲蚀和异物撞击会形成宏观的凹坑。研究叶片的陶瓷层 (YSZ) 表面宏观凹坑以及叶片边缘处孔洞对热障涂层热应力分布的影响, 进而分析其对热障涂层整体的使用寿命的影响。通过 ANSYS 软件, 模拟 TBCs 在高温运行时的热应力分布及其变化趋势, 研究发现在 YSZ 表面存在宏观缺陷时 TBCs 表面的 YSZ 存在凹坑会改变原有的热应力分布云图, 扩大波峰处的最大拉应力区域, 利于裂纹的产生, 涂层寿命减少, 凹坑越大, 影响越大。对于边缘处的孔洞会严重改变原有的热应力分布且在 TGO 与 BC 之间存在最大热应力区域, 严重制约了热障涂层的使用寿命。

关键词: 有限元模拟; 热障涂层; 热应力; 涂层寿命

中图分类号: TB35

The influence of thermal stress distribution by impact damage on the EB-PVD thermal barrier coatings

HUANG taihong, SONG peng, ZHOU huihui, JI qiang, LUO heng, MA jingtao, LU jiansheng

(Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Gas turbine blades always formed a macroscopic pit by high velocity gas stream and foreign impact during service. Research the influence of thermal stress distribution by impact pits and the hole which at the edge of blades, then analysis the life span of the TBCs. Simulate the thermal stress distribution and the stress changing trend in high temperature by ANSYS software, Study found that in macroscopic damage on the surface of YSZ can change the original thermal stress distribution, expanding the maximum tensile stress area at the crest, conducive to the generation of cracks, coatings life is reduced, the bigger the pit, the greater the impact. The hole can seriously change the original thermal stress distribution. The maximum thermal stress region exists between the TGO and BC, severely restricts the thermal barrier coating life.

Key words: finite element method; thermal barrier coatings; thermal stress; coating life

0 引言

随着现代工业的快速发展, 在已有的材料表面加上不同作用目的的涂层成为一个很重要的研究方向, 其中热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 在航空发动机和燃气轮机设备等的高温部件的应用成为了研究热点^[1-4]。这种高温陶瓷涂层可以有效地保护轮机基体免受外部恶劣的环境以提高使用寿命^[5-7]。过去几十年, 热障涂层快速发展但关于涂层的使用寿命和性能仍需要提高^[8]。轮机在服役的过程中会遇到很多复杂的环境, 其中燃气轮机叶片会受高速气流冲蚀和异物撞击会形成宏观的凹坑, 叶片边缘处孔洞, 这样的缺陷对涂层局部区域的影响, 对涂层内部热应力分布的影响以及对涂层裂纹的萌生等机理都不甚清

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20125314110002, 20135314120003); 国家自然科学基金资助项目 (51401097); 云南省应用基础研究计划 (2013FB016)

作者简介: 黄太红 (1987—), 男, 博士生, 涂层制备与分析

通信联系人: 宋鹏 (1979—), 男, 副教授, 涂层制备与分析. E-mail: songpengkm@163.com

楚。由于 TBCs 各层之间存在一定的热不匹配,在服役过程升温 and 降温过程中各层之间会存在一定应力,特别是在热生长层(TGO)与粘结层(BC),TGO 与陶瓷层(YSZ)之间^[9]。国外的研究者对 TBCs 内的应力进行很多的研究,其中 Kevin Knipe 利用高能同步 X 衍射测量真实环境中涂层的微观晶体形变,通过衍射峰的变化进而分析涂层中内应力^[10]。Rene Diaz 利用高能同步 X 衍射对加载一定的载荷后 TGO 层的内应力的情况进行研究^[11]。但此方法都只能测量涂层内部综合应力,无法把热内应力和涂层制备过程中残余应力分开。本研究采用 ANSYS workbench 软件,建立模型,计算模拟叶片在高温运行条件下,陶瓷层上凹坑和异物撞击的损坏对热应力分布以及涂层的使用寿命的影响。明确叶片在运行阶段各个温度梯度是所具有的热应力分布,确定叶片在高温运行时,热应力对涂层失效的影响机理。

1 实验内容

本研究采用以 In738 合金为基体,EB-PVD 沉积的 YSZ 和低压大气等离子制成粘结层(BC)组成的热障涂层(TBCs)其中陶瓷层为 7%Y₂O₃-ZrO₂,而粘结层为 CoNiCrAlY。利用 ANSYS 软件,简化实验模型,模拟 TBCs 在高温运行时的热应力分布,建立模型涂层分为 4 层,宽度均为 1mm,YSZ 层厚度 100μm,TGO 层厚度 5μm,BC 层厚度 40μm,基体设为 1mm(如图 1 所示)。图 1(a)模型在 YSZ 层表面挖去一个长轴为 80μm,短轴为 50μm 半椭圆。图 1(b)模型在 TBCs 侧面挖去一个长轴为 80μm,短轴为 50μm 半椭圆,该椭圆位于 YSZ 和基体之间。图 1(c)模型为完整无损坏涂层。模型建立,模型参数如表 1 所示,建立模型约束,本模拟设定涂层各层之间为 no separation(不分离),即在模拟过程中,不管涂层之间出现多大的热应力,TBCs 也不会脱落。本模拟主要研究在不同的温度梯度下热应力分布和其变化趋势。然后划分网格,在 YSZ 表层施加 1200℃的温度载荷,设定对流参数,利用 ANSYS workbench 14.0 对模型进行温度场与结构力场耦合,计算在一定的温度梯度下的热应力分布。设定表层 YSZ 在 100s 内由常温 25℃升到 1200℃,并在 1200℃下运行 7900s,整个过程为 8000s,分析在这个过程中 TBCs 应力分布情况。

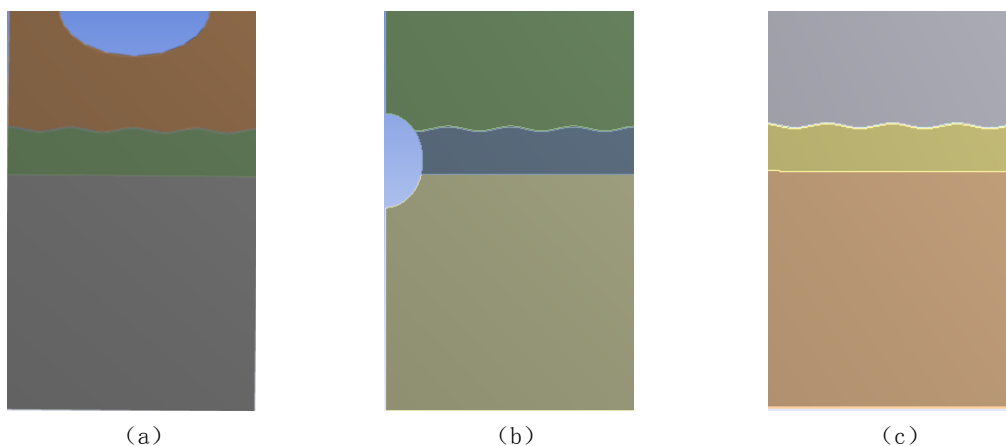


图 1 (a) 图为 YSZ 层表面存在凹坑,深度为 50μm,宽度为 80μm, (b) 图为在涂层侧面存在孔洞,孔深为 50μm,宽度为 80μm, (c) 图为完整无缺陷涂层

Fig.1 (a)major axis 80μm, short axis 50μm semi elliptical on the surface of YSZ layer, (b)major axis 80μm, short axis 50μm semi ellipse on TBCs edge,(c)the model without any damage

表 1 不同温度下的材料参数
Tab.1 Material parameters at different temperatures

	T/°C	E/10 ⁵ Mpa	V	$\alpha/10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$
Bond coat	20	1.524	0.311	1.23
	200	1.433	0.32	1.38
	400	1.371	0.33	1.47
	600	1.333	0.338	1.54
	800	1.172	0.345	1.66
	1000	0.7416	0.351	1.86
	1100	0.4107	0.354	2.02
TGO	20	4	0.23	7.13
	200	3.9	0.23	7.47
	400	3.8	0.24	7.82
	600	3.7	0.24	8.15
	800	3.55	0.25	8.46
	1000	3.25	0.25	8.75
	1100	3.2	0.25	8.88
Ceramic coat	20	17.5	0.2	1.0149
	1100	1123	0.2	1.0344

2 结果与讨论

80 研究涂层表面存在宏观损坏和端部孔洞对 TBCs 的热应力分布的影响,先研究涂层在没有缺陷的情况下热应力的分布。图 2 可以明显发现热应力全部集中在 TGO 层的附近。图 2 (a) 图显示在 50s 时涂层热应力分布,可以发现沿着 TGO 上侧拉应力和压应力交替分布,在波峰处为拉应力,波谷处为压应力。相比于稳定运行(图 2 (b), 4000s),拉应力和压应力的

85 从图 3 (a) 中可以看出凹坑的存在改变了原有的应力分布,升温时对拉应力处在 TGO 波峰的最大并且凹坑的存在让最大拉应力区域从 TGO 的波峰一直延伸到凹坑底部。压应力在升温过程中变化趋势与拉应力相仿,但是正对凹坑底部的 TGO 压应力远小于无缺陷涂,这是因为凹坑让底部拉应力集中,压应力得到释放。在波峰上侧和波谷的下侧拉应力聚集,而在波峰下侧和波谷上侧压应力聚集,这使得 TGO 层具有很大剪切应力,有利于裂纹的萌生,降低涂层的使用寿命。同时在凹坑两侧也存在一定的剪切应力,会加剧涂层的失效。

90 当涂层温度达到动态平衡的时候(如图 3 (b)),整体的热应力约为原来的 1/4,同时拉压应力相对应的区域也都大幅缩小,凹坑仅对 TGO 层热应力的大小产生影响,然而凹坑对于 YSZ 依然保持着相对稳定的影响,这是因为陶瓷层在稳定运行时候温度梯度保持不变,热耦合计算出的应力不会产生变化。整个涂层系统中处于低热应力阶段,不利于裂纹源的萌生,裂纹的扩展。

图 4 (a) 为端部孔洞在运行 50s 后涂层的热应力分布云图,孔洞的存在彻底地改变原有的热应力分布云图,可以看出涂层的最大热应力达到了 6.6GPa,这是由于在边界条件不分离的设置,并不意味着涂层实际可以达到 6.6GPa。实际上涂层达到这样的热应力, TBCs 早已失效。最大热应力区域位置由波峰处转移到孔洞 TGO 下侧, TGO 与 BC 粘结处。拉应力区域和压应力区域发生翻转, TGO 上侧主要分布压应力,波谷下侧的压应力区域小于波峰下侧拉应力。当涂层达到稳定运行时(图 4 (b)),涂层热应力分布云图没有发生变化,只是热应力减小。此时,涂层的最大热应力仍然比表面凹坑和无缺陷涂层大。整个热障涂层不管升温还是稳定运行都处于一个高热应力阶段。整个涂层系统, TGO 上侧存在压应力,而在下侧聚集着拉应力, TGO 上存在一个剪切应力,有利于裂纹的产生和扩展,涂层剥落加速,使用寿命急剧减少。

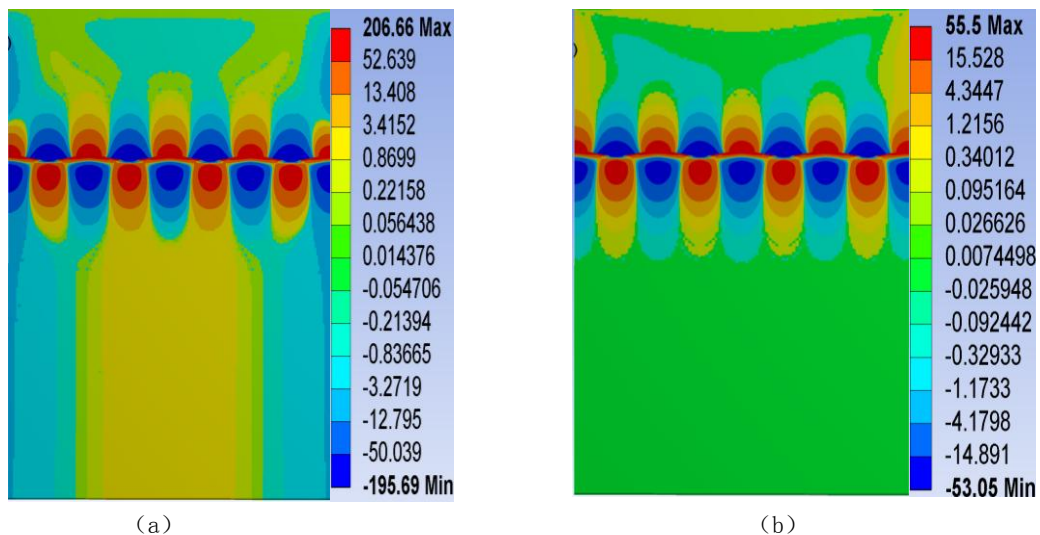


图 2 (a) 表示无缺陷涂层在运行 50s 后的热应力分布, (b) 表示涂层运行 4000s 后热应力分布
Fig. 2 (a) Stress distribution of TBCs at 50s, (b) Stress distribution of TBCs at 4000s

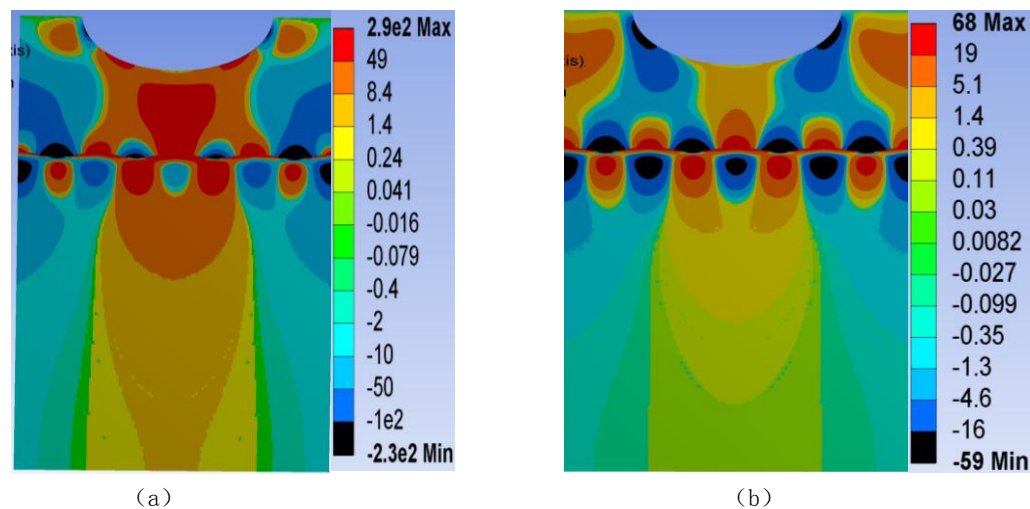


图 3 (a) 表示凹坑涂层在运行 50s 后的热应力分布, (b) 表示涂层运行 4000s 后热应力分布
Fig. 3 (a) stress distribution of TBCs at 50s, (b) stress distribution of TBCs at 4000s

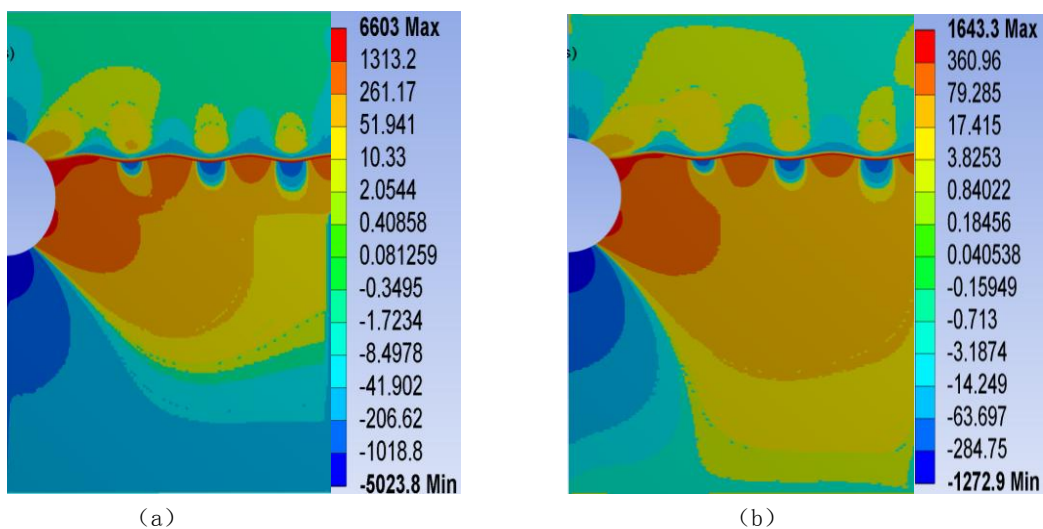


图 4 (a) 表示端部孔洞涂层在运行 50s 后的热应力分布, (b) 表示涂层运行 4000s 后热应力分布
Fig.4 (a)Stress distribution of TBCs at 50s, (b)Stress distribution of TBCs at 4000s. And the showed maximum stress did not mean a materials authentic stress due to the model parameters

研究涂层在整个升温 and 稳定运行阶段的热应力变化情况如图 5 所示。红色的代表拉应力，黑色代表压应力。从整体上看，热应力随着运行时间的增加在不断减小直到保持不变，压应力始终小于压应力。表面存在凹坑涂层和无缺陷的涂层变化幅度基本一致，但端部孔洞的涂层内应力变化幅度大于其他 2 类型的涂层。这是因为涂层的热应力集中在 TGO 附近，但端部有孔洞时，热应力聚集的快，释放的也快，造成了涂层热应力变化幅度大。

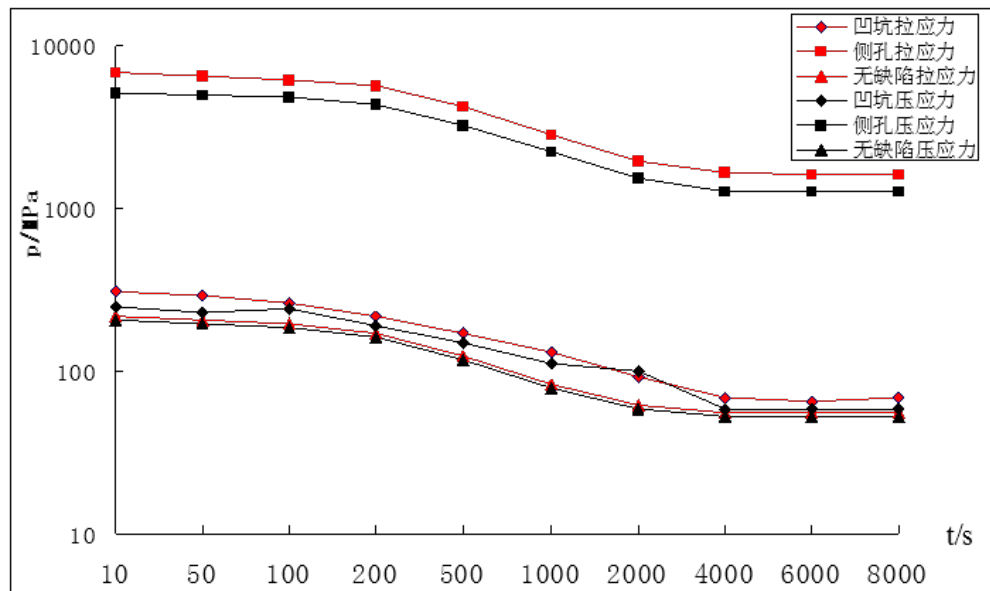


图 5 三种模型涂层的热应力随时间的变化对数图
Fig.5 Logarithm of the time variation of the thermal stress

3 结论

本文给出了如下结论：

- 1) 涂层表面因高速气流冲蚀或异物撞击形成的凹坑会对涂层的热应力产生影响，凹坑的存在使涂层拉应力聚集，压应力得到释放并在 TGO 上产生剪切应力。
- 2) 涂层端部的孔洞完全破坏原有的热应力分布云图，孔洞附近拉应力聚集，拉应力急剧增大，严重制约了涂层的使用寿命。
- 3) 涂层在升温 and 稳定运行过程，3 种实验模拟的涂层热应力分部云图基本不变，随着运行时间增加，热应力在不断地减小，其中端部孔洞的热应力变化最大。
- 4) 本研究接下来将研究在降温过程中涂层热应力变化情况，以及其对涂层失效的影响。另外，实验样品已完成，将对涂层实际脱落的热应力进行测量并与模拟试验结果进行对比。

[参考文献] (References)

- [1] Evans A G, Mumm D R, Hutchinson J W et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings[J]. Prog. Mater. Sci, 2001, 46(5): 505-553
- [2] Patdure N, Gell M, Jordan E., Thermal barrier coatings for gas turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [3] Evans A G, Clarke D R, Levi C G. The influence of oxides on the performance of advanced gas turbines[J]. J European Ceramic Soc, 2008, 28(7): 1405-1419.
- [4] Pertorak C, IlavNsky J, Wang H et al. Microstructural evolution of 7 wt.% Y2O3-ZrO2 thermal barrier coatings due to stress relaxation at elevated temperatures and the concomitant changes in thermal conductivity[J]. Surf. Coat. Technol, 2010, 205(1): 57-65 .
- [5] Wang X, Wu R, Atkinson A. Characterization of residual stress and interface degradation in TBCs by photo-luminescence piezo-spectroscopy[J]. Surf. Coat. Technol, 2010, 204(15): 2472-2482 .
- [6] Kevin KnipeI, Albert Manero III, Sanna F. Siddiqui et al. Strain response of thermal barrier coatings captured under extreme engine environments through synchrotron X-ray diffraction.[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4559-4559.
- [7] Busso E., Evans H., Qian Z et al. Effects of breakaway oxidation on local stresses in thermal barrier coatings[J].

Acta Mater,2010,58(4):1242-1251.

[8] Mercer C., Kawagishi K., Tomimatsu T. et al. A comparative investigation of oxide formation on eq (equilibrium) and NiCoCrAlY bond coats under stepped thermal cycling[J]. Surf. Coat. Technol,2011,205(8):3066-3072.

160 [9] Wen M., Jordan E. H., Gell, M. Effect of temperature on rumpling and thermally grown oxide stress in an EB-PVD thermal barrier coating[J]. Surf. Coat. Technol,2006,201(6):3289-3298.

[10] Zhou Y., Hashida T. Coupled effects of temperature gradient and oxidation on thermal stress in thermal barrier coating system[J]. Int. J. Solids Struct,2001,38(24-25):4235-4264.

165 [11] Rene D, Melan J, Mitra M et al. Role of mechanical loads in inducing in-cycle tensile stress in thermally grown oxide[J]. Appl. Phys. Lett,2012,100(11):230-237.