

中,冷却气体与高温燃气用带有热障涂层的叶片模型隔开。取热障涂层的当量导热系数为 $2.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。在不改变其他边界条件的情况下,本数值实验通过改变涂层表面粗糙度 ($R_a=1.2, 2.0, 2.8, 3.6 \mu\text{m}$) 的方法,来改变涂层表面的表面传热系数从而实现改变复合传热表面传热系数的目的。通过对比不同表面粗糙度下表面传热系数与温度的分布,用以验证热障涂层热防护效果与复合传热表面传热系数之间的趋势关系。

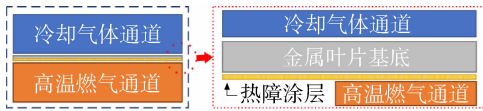


图2 复合传热表面传热系数对热防护影响的算例模型示意图

Fig. 2 Example simulation schematic diagram of the relationship between composite surface heat transfer coefficient and thermal protection

如图3所示是不同表面粗糙度情况下,热障涂层表面传热系数 α_c 沿燃气流动方向的分布。图中横坐标 x 表示沿燃气流动方向的位移。由图可以看出不同表面粗糙度下的热障涂层表面传热系数变化趋势均为先减少并在结尾处增大。通过对比,可以明显地看出较大的表面粗糙度会带来更高的表面传热系数,即对流换热能力增强。同时随着表面粗糙度的增加,表面传热系数的增

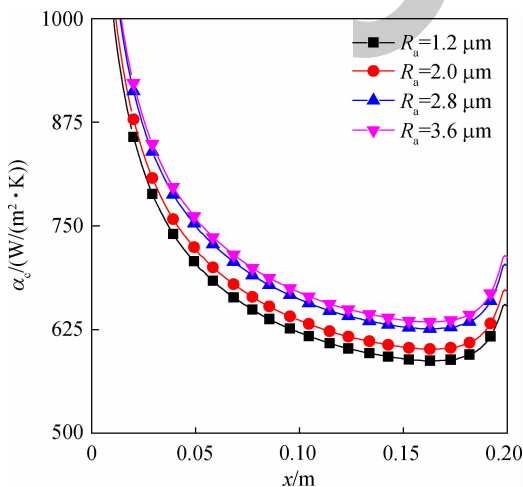


图3 表面传热系数沿燃气流动方向的分布
Fig. 3 Distribution of surface heat transfer coefficient along gas flow

速逐渐减慢。即表面传热系数在较小的表面粗糙度的工况下,对表面粗糙度的变化较为敏感。金属叶片的表面粗糙度 R_a 通常在 $1.2 \mu\text{m}$ 左右,这就意味着工程中表面粗糙度的变化能显著影响热障涂层的对流换热能力以及热防护有效性。因此降低喷涂后的表面粗糙度对提高热防护效果是有较大意义的。这对热障涂层喷涂工艺提出了较高的要求。

为更清晰地分析热障涂层表面粗糙度对金属叶片温度的影响,定义参数 $\theta = T_{w1} - T_{wn}$ 来表征热障涂层在不同表面粗糙度情况下的热防护效果。其中 T_{w1} 是带有热障涂层的金属叶片的温度, T_{wn} 是相同工况下无热障涂层的金属叶片温度,其中金属叶片的表面粗糙度 $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ 。当 $\theta > 0 \text{ K}$ 时,热障涂层热防护失效并起到了反效果。

如图4是 θ 沿燃气流动方向的分布。当热障涂层与金属叶片基底拥有相同的表面粗糙度时,带有热障涂层的叶片温度始终小于无涂层的叶片温度,证明相同工况下热障涂层是有热防护效果的。由图4可以看出, $R_a = 1.2, 2.0 \mu\text{m}$ 均能起到热防护效果。对于 $R_a = 2.0 \mu\text{m}$ 的工况,其对流换热强度大于 $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ 的工况。但由于热障涂层的高导热热阻的特性能够弥补对流换热增强带来的消极作用,因此热障涂层仍然能够起到一定的热防护效果。而对于 $R_a = 2.8, 3.6 \mu\text{m}$ 的工况,热障涂层的高导热热阻性质已经无法弥补对流换热强度的增加造成的温度的升高。因此,喷涂有热障涂层的叶片温度相较于不使用热障涂层的叶片温度更高,热障涂层不仅没有起到热防护的效

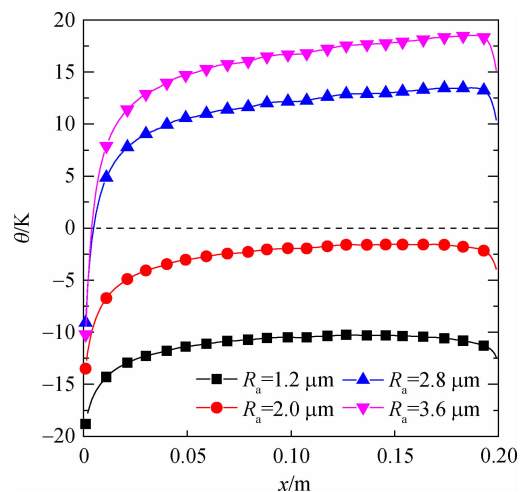


图4 θ 沿燃气流动方向的分布
Fig. 4 Distribution of θ along gas flow

果,反而提高了叶片的温度,使得叶片更容易被烧蚀。

由于表面传热系数与辐射换热系数对复合传热表面传热系数的影响具有相似性,因此不难推出涂层表面发射率、吸收率的变化也会对热障涂层的热防护效果产生显著影响。综合来看,在热障涂层的制备过程中,应考虑到其制备工艺对复合传热能力的影响,以确保其热防护有效性。

4 结 论

本文针对带有热障涂层的涡轮叶片模型进行了简化建模,基于能量守恒,建立了含对流换热、辐射换热、导热的热分析模型,并进行了微分推导,得到了不同因素对热障涂层有效性的影响,最终提出了热障涂层有效性判据;并通过建立二维算例,验证了热障涂层制备指标之一的表面粗糙度对热障涂层热防护有效性的影响。通过对热障涂层的数学建模与数值分析,得到以下结论:

1) 对于高温涡轮叶片,喷涂热障涂层后,对复合传热表面传热系数的影响应该满足判据

$$\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1} < \frac{\alpha_1}{\lambda_1} l_1 \text{ 以确保热防护有效性。}$$

2) 在发动机典型工况下,对于处在高温区的涡轮叶片前缘区域,由于热障涂层带来的复合传热表面传热系数变化率最大值范围为 1.25% ~ 10.83%,以保证其热防护有效性。

3) 热障涂层在制备过程中,表面粗糙度、发射率等因素是显著影响复合传热表面传热系数的。因此其应作为被严格控制的质量标准,以降低复合传热表面传热系数,否则会使得叶片反而更容易被烧毁。

参考文献:

[1] 胡晓安,石多奇,庞学佳,等. 某涡轮叶片热障涂层的寿命预测方法[J]. 航空动力学报,2018,33(1):48-53.
HU Xiaohan, SHI Duoqi, PANG Xuejia, et al. Thermal barrier coating life prediction method for a turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(1): 48-53. (in Chinese)

[2] WAHIDUZZAMAN S, MOREL T. Effects of ceramics translucence on heat barrier effectiveness in diesel engines [J]. SAE (Society of Automotive Engineers) Transactions, 1989, 98(3): 1018-1035.

[3] MATTHEWS L K, VISKANTA R, INCROPERA F P. Combined conduction and radiation heat transfer in porous

materials heated by intense solar radiation[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1985, 107(1): 29-34.

[4] SIEGEL R. Internal radiation effects in zirconia thermal barrier coatings[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1996, 10(4): 707-709.

[5] THOMAS J R. Coupled radiation/conduction heat transfer in ceramic liners for diesel engines[J]. Numerical Heat Transfer: Part A Applications, 1992, 21(1): 109-120.

[6] SIEGEL R. Temperature distribution in a composite of opaque and semitransparent spectral layers[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(4): 533-539.

[7] SIEGEL R. Green's function to determine temperature distribution in a semitransparent thermal barrier coating[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(2): 315-317.

[8] 王平阳,谈和平,刘林华,等. 涡轮发动机高温隔热涂层内的传热研究[J]. 航空动力学报,2000,15(3):268-273.
WANG Pingyang, TAN Heping, LIU Linhua, et al. Study on heat transfer in thermal insulation coating of turbine engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 48-53. (in Chinese)

[9] 崔慧然,李宏然,崔启政,等. 航空发动机及燃气轮机叶片涂层概述[J]. 热喷涂技术,2019,11(1):82-94.
CUI Huiran, LI Hongran, CUI Qizheng, et al. Summary of blade coatings for aero-engine and gasturbine[J]. Thermal spray technology, 2019, 11(1): 82-94. (in Chinese)

[10] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006.

[11] 张志强,宋文兴,陆海鹰. 热障涂层在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[J]. 航空发动机,2011,37(2):38-42.
ZHANG Zhiqiang, SONG Wenxing, LU Haiying. Development of TBCs on turbine blade of aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 37(2): 38-42. (in Chinese)

[12] 王亚清. 热障涂层厚度涡流检测方法研究[D]. 北京:中国矿业大学,2019.
WANG Yaqing. Study on eddy current testing method for thickness of thermal barrier coating[D]. Beijing: China University of mining and technology, 2019. (in Chinese)

[13] 袁旭同. 多元稀土掺杂 YSZ 材料涂层结构及 PS-PVD 制备工艺研究[D]. 北京:北京理工大学,2018.
YUAN Xujiang. Study on coating structure and PS-PVD preparation process of YSZ material doped with multiple rare earth elements[D]. Beijing: Beijing University of technology, 2018. (in Chinese)

[14] 寇志海,苏雷,袁鑫,等. 粗糙圆管内超临界航空煤油湍流换热特性分析[J]. 热科学与技术,2018,17(2):87-93.
KOU Zhihai, SU Lei, YUAN Xin, et al. Turbulent heat transfer characteristics of supercritical aviation kerosene in a rough tube[J]. Journal of thermal science and technology, 2018, 17(2): 87-93. (in Chinese)

[15] STRANGMAN T, RAYBOULD D, JAMEEL A, et al. Damage mechanisms, life prediction, and development of EB-PVD thermal barrier coatings for turbine airfoils[J].

- Surface and Coatings Technology, 2007, 202(4/6/7): 658-664.
- [16] 宫声凯, 邓亮, 毕晓方, 等. 陶瓷热障涂层的隔热效果研究[J]. 航空学报, 2000, 21(增刊): S25-S29.
GONG Shengkai, DENG Liang, BI Xiaofang, et al. Thermal barrier effect of ceramic thermal barrier coating[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21 (Suppl. 1): S25-S29. (in Chinese)
- [17] 田伟, 何爱杰, 钟燕, 等. 高推重比发动机热障涂层应用现状分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(5): 52-57.
TIAN Wei, HE Aijie, ZHONG Yan, et al. Application of thermal barrier coatings on aero-engines of high thrust-to-weight ratio[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29(5): 52-57. (in Chinese)
- [18] 胡旋焯, 黄国胜, 李相波, 等. 热障涂层制备工艺的综述[J]. 热加工工艺, 2017, 46(24): 6-9.
HU Xuanye, HUANG Guosheng, LI Xiangbo, et al. Review on preparation process of thermal barrier coating[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(24): 6-9. (in Chinese)
- [19] 顾维藻, 刘晓峰. 燃气轮机涡轮叶片冷却通道内的流动与传热[C]//中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 1995: 14-20.

(编辑: 王碧珺)