

热障涂层在涡轮叶片应用中的 热防护有效性

朱剑琴, 赵超凡, 邱璐, 陶智

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 建立了含热障涂层的涡轮叶片简化传热模型,通过理论推导建立了热障涂层的有效性判据,并基于此进行了热防护有效性分析。理论分析与数值实验表明:由热障涂层带来的复合传热表面传热系数的变化会显著影响热障涂层的热防护效果;在发动机典型工况下,对于处于高温区的高压涡轮叶片前缘处,热障涂层引起的复合传热表面传热系数变化率最大值的范围为1.25%~10.83%以满足热防护有效性要求。在工程中应特别注意由于热障涂层的应用带来的复合传热表面传热系数的变化,否则会导致热防护失效,甚至产生反效果。

关 键 词: 热防护; 航空发动机; 热障涂层; 传热机理; 有效性分析

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Thermal protection effectiveness of thermal barrier coatings in turbine blade applications

ZHU Jianqin, ZHAO Chaofan, QIU Lu, TAO Zhi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine

Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A validity criterion of thermal barrier coating was developed by theoretical derivation based on a simplified heat transfer model of turbine blades with thermal barrier coating. Besides, the effectiveness of thermal protection was analyzed based on the validity criterion and engineering practice. Theoretical analysis and numerical experiments showed that the change of composite heat transfer coefficient caused by thermal barrier coating could greatly affect the thermal protection effect. For the front edge of the high pressure turbine blade in the high temperature zone, the maximum rate of change of the composite heat transfer coefficient caused by the thermal barrier coating should be range from 1.25% to 10.83% to meet the thermal protection effectiveness. In practice, special attention should be paid to the change of the composite heat transfer coefficient due to the application of the thermal barrier coating, otherwise it will cause thermal protection failure or even counter effect.

收稿日期: 2019-10-28

作者简介: 朱剑琴(1983—),女,副教授、博士生导师,博士,主要从事航空发动机热端部件冷却、高超飞行热防护技术。

E-mail: zhujianqin@buaa.edu.cn

通信作者: 赵超凡(1992—),男,博士生,主要研究方向为发动机热端部件冷却。E-mail: zhaochaofan@buaa.edu.cn

引用格式: 朱剑琴,赵超凡,邱璐,等.热障涂层在涡轮叶片应用中的热防护有效性[J].航空动力学报,2019,34(11):2503-2508.

ZHU Jianqin, ZHAO Chaofan, QIU Lu, et al. Thermal protection effectiveness of thermal barrier coatings in turbine blade applications[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(11): 2503-2508.

Key words: thermal protection; aero-engine; thermal barrier coatings; heat transfer mechanisms; effectiveness analysis

涡轮热防护技术是现代航空发动机发展的关键技术。随着现代飞行器对机动灵活以及超音速巡航性能的追求,如今高推质比航空燃气发动机的涡轮前温度已经到达并远远超过了涡轮材料的耐受温度。作为发动机工作环境最为恶劣的高压涡轮叶片,其承受着航空发动机中最大的工作压力和最高的温度载荷。如第四代航空发动机 F119,其推质比达到 10 以上,涡轮前温度更是已经达 2000 K 以上。即使采用当今先进的耐高温单晶合金叶片也无法耐受如此高的温度载荷,因此设计人员运用了很多方法来保证叶片不被烧蚀。或提高涡轮叶片的耐受温度,如使用单晶叶片、陶瓷叶片;或提高涡轮叶片的冷却效率,如使用气膜孔结构、发散冷却结构,复杂的层板冷却结构等。此外,在第四代发动机的设计过程中,热障涂层(TCCs)技术被应用到了航空发动机中用以降低涡轮金属叶片的温度。热障涂层通常使用低导热、耐高温的氧化锆(ZrO_2)和氧化钇(Y_2O_3)作为基础材料进行制备^[1-4]。其出色的高热阻特性可以隔绝涡轮合金叶片与高温燃气的直接接触,从而在金属叶片外缘形成一层较大的温度梯度^[1]。因此,在设计合理的前提下,热障涂层可以达到降低涡轮叶片金属表面温度的目的,使得涡轮叶片的使用寿命得到提高。

近年来,相继有学者针对喷涂了热障涂层的热防护结构进行实验或者数值模拟研究。Thomas^[5]针对喷涂了陶瓷热障涂层的柴油发动机衬垫进行了辐射和导热的耦合换热数值研究。Siegel^[4,6]选用两谱代模型并采用双热流法,在漫反射条件下模拟了氧化锆热障涂层的辐射传热研究。之后其又使用多谱代模型研究了热障涂层厚度和涂层透明度对热障涂层热防护效果的影响,并分析了涂层透明和不透明情况下的温度分布^[7]。王平阳等^[8]针对涡轮发动机的热障涂层,建立了一维数值模型,从辐射传热角度分析了热障涂层厚度、透明度和涂层发射率对热障涂层隔热效果的影响。尽管众多学者分析了热障涂层的隔热特性,然而在工程应用中,热障涂层会改变涡轮叶片原有的流动方式与传热特性^[6,9],从而影响热防护效果,甚至在不适当的制备条件下,喷涂了热障涂层会导致涡轮

叶片更易被烧蚀。因此针对热障涂层进行传热机理分析以得到其热防护有效性的判别标准变得尤为迫切。

基于上述学者的研究以及工程实际,本文针对涂有热障涂层的涡轮叶片,分析其在对流换热、自身导热、辐射下的传热机理。并基于能量守恒定律,建立了简化的一维综合换热模型。以叶片金属壁面温度作为评价指标,建立了金属壁面温度与热障涂层导热、涂层表面复合传热的数学关系。本文根据微分关系推导了复合传热表面传热系数变化率的约束关系,并结合工程实际得到了热防护有效性判定标准。同时基于数值仿真结果,验证了涂层表面复合传热表面传热系数与热防护有效性之间的变化关系。

1 物理模型

在实际工程应用中,热障涂层的喷涂厚度极小,其在厚度方向的空间尺度远远小于其在其他维度上的空间尺度,因此可以通过建立一维模型来分析带有热障涂层的叶片温度场。

如图 1 是简化的一维综合换热模型。考虑由热障涂层和叶片串联组成的无限大平板结构位于代表燃气和冷气的气体通道中。无限大平板左侧为远端温度为 T_h 的高温燃气通道,右侧是远端温度为 T_c 的冷却气体通道。定义 T_w 、 T_{w1} 、 T_{w2} 分别表示在涂层的左表面 S_1 的外壁面温度(T_w),涂层与叶片基底接触部分 S_2 的金属叶片的温度(T_{w1})以及叶片右侧表面 S_3 的叶片冷端温度(T_{w2})。在 S_1 处,高温燃气与热障涂层表面会发生对流换热和辐射换热。在工程上,针对同时发生对流换热和辐射换热的传热问题,会引入复合传热表面传热系数来简化复合换热的问题^[10]。因此,在 S_1 处取复合传热表面传热系

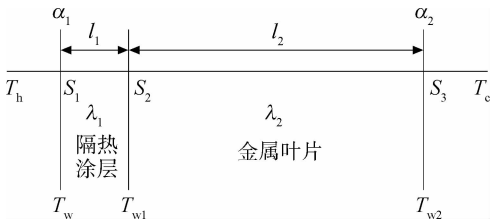


图 1 一维物理模型

Fig. 1 One-dimensional physical model

数 α_1 来表征 S_1 处的传热能力。同理,在 S_3 处,选用复合传热表面传热系数 α_2 来表征 S_3 处的传热能力。由于热障涂层的热阻主要分布于热障涂层的陶瓷层^[11-12],为了简化热障涂层内部的传热分析,将复杂结构的热障涂层总包成等同于陶瓷层的导热系数 λ_1 ,厚度为 l_1 的热障涂层。金属叶片的导热系数为 λ_2 ,厚度为 l_2 。喷涂热障涂层的目的是在相同燃气和冷气温度工况下,降低金属叶片的温度 T_{w1} 。因此可以将叶片温度 T_{w1} 作为评价标准来评价喷涂热障涂层后的热防护效果。

2 热障涂层传热机理分析

考虑有涂层的叶片传热,对于无限大平板模型,热流密度彼此相等,根据能量守恒关系有

$$q = \alpha_1 (T_h - T_w) = \frac{T_w - T_{w1}}{\epsilon_1} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\epsilon_2} = \alpha_2 (T_{w2} - T_c) \quad (1)$$

其中 ϵ_1 、 ϵ_2 代表热障涂层和叶片的导热热阻。消去式(1)的中间变量 T_w 与 T_{w2} ,并整理后得到

$$T_{w1} = \frac{\alpha_2 (\alpha_1 \epsilon_1 + 1) T_c + \alpha_1 (\alpha_2 \epsilon_2 + 1) T_h}{\alpha_2 (\alpha_1 \epsilon_1 + 1) + \alpha_1 (\alpha_2 \epsilon_2 + 1)} \quad (2)$$

由于式(2)对 α_1 和 ϵ_1 的偏导数存在且连续,将 T_{w1} 对 α_1 和 ϵ_1 进行全微分可得

$$\Delta T_{w1} = \frac{\partial T_{w1}}{\partial \alpha_1} \Delta \alpha_1 + \frac{\partial T_{w1}}{\partial \epsilon_1} \Delta \epsilon_1 + o(\rho) \quad (3)$$

式(3)在工程上的意义可以理解为:在相同的边界条件下,由于热障涂层引起的流动换热特性的改变,会使得新的热障涂层的 α_1 和 ϵ_1 发生了变化 $\Delta \alpha_1$ 和 $\Delta \epsilon_1$ 。温度指标会发生相应的改变 ΔT_{w1} 。若 $\Delta T_{w1} < 0$ K 则表示喷涂了热障涂层后能够降低叶片温度,即起到了热防护效果。

考虑热障涂层喷涂的过程中,热障涂层的导热系数 λ_1 不变,并且涂层的厚度极薄。令 $\Delta T_{w1} < 0$ K,则可得到热障涂层的有效性判据

$$\frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} < \frac{\alpha_1}{\lambda_1} l_1 \quad (4)$$

即由于热障涂层引起的复合传热表面传热系数变化率 $\frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1}$ 应满足式(4)所示的约束关系时,才能确保热障涂层是具有热防护效果的。

式(4)展示了复合传热表面传热系数能满足热障涂层有效性时的约束关系。喷涂热障涂层会改变叶片表面的流动传热特性和辐射特

性,而这些改变通常是不利于热防护的。Siegel^[4,6-7]的研究中提到热障涂层对红外线具有半透明性特性,即喷涂了热障涂层后会改变辐射换热强度。同时热障涂层的制备工艺也会造成叶片表面粗糙的增加^[13]。相较于原始金属叶片表面粗糙度 R_a 约为 $1.2 \mu\text{m}$,国内喷涂工艺下的热障涂层表面粗糙度 R_a 达到了约 $3.6 \mu\text{m}$ 。表面粗糙度的增加会极大地影响近壁处边界层流体的流动,表面凹凸不平的热障涂层如同在叶片表面覆盖了一层“肋片”。这些“肋片”会扰乱边界层流动,使对流换热能力增强,壁面温度上升^[14]。因此,设计不合理的热障涂层极有可能由于对流换热能力和辐射换热能力的增强导致涂层热防护失效而产生反效果。

对于第一级高压涡轮,在工程上常采用电子束-物理气相沉积(EB-PVD)喷涂工艺^[15],该工艺下的热障涂层的当量导热系数通常在 $1.8 \sim 2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[16]。该喷涂工艺下的热障涂层的陶瓷层喷涂厚度为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ ^[17-18]。在发动机典型工况下,对于处于高温区的高压涡轮叶片前缘处,其复合传热表面传热系数通常在 $500 \sim 1300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[19]。将上述数值带入式

(4),可得 $\frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} < 1.25\% \sim 10.83\%$,阐明了由于

喷涂热障涂层导致的复合传热系数变化率在保证涂层热防护有效性条件下的最大值。对于高压涡轮叶片其他区域的高温结构,部分区域复合传热表面传热系数较小,其满足热防护有效性的复合传热表面传热系数变化率更小,因此对热障涂层的制备要求更高。在工程上应特别注意由于热障涂层的应用带来复合传热表面传热系数的变化,稍有不慎就会导致其热防护作用失效,甚至产生反效果。

3 复合传热表面传热系数对热障涂层有效性的影响

由文中第 2.2 节可知,在热障涂层的制备过程中,其制备原料与喷涂工艺会影响喷涂后的辐射换热强度和对流换热强度。复合传热表面传热系数变化率需要满足式(4)的约束条件,热障涂层才能起到热防护作用。

为了验证热障涂层复合传热表面传热系数对热障涂层热防护效果的影响,本文采用如图 2 所示的二维算例进行数值仿真实验。

算例中,冷却气体和高温燃气相向流动。其

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 ($R_a=1.2, 2.0, 2.8, 3.6\text{ }\mu\text{m}$) 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。

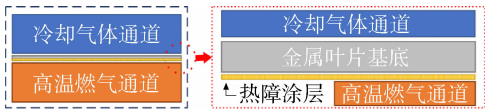


图 2 复合传热表面传热系数对热防护影响的算例模型示意图

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

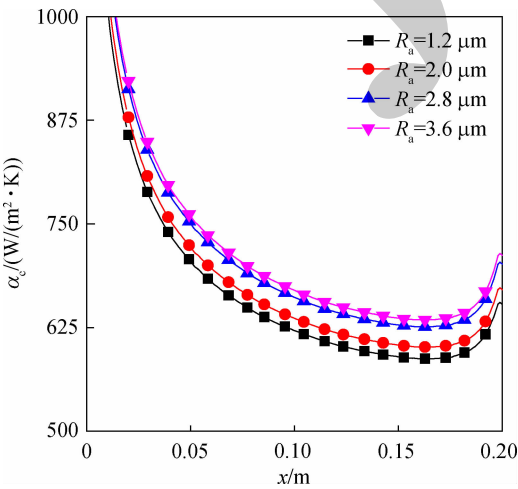


图 3 表面传热系数沿燃气流动方向的分布
Fig. 3 Distribution of surface heat transfer coefficient along gas flow

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 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 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 $\theta = T_{w1} - T_{w2}$ 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_{w2} 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 $R_a = 1.2\text{ }\mu\text{m}$ 。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, $R_a = 1.2, 2.0\text{ }\mu\text{m}$ 均能起到热防护效果。对于 $R_a = 2.0\text{ }\mu\text{m}$ 的工况,其对流换热强度大于 $R_a = 1.2\text{ }\mu\text{m}$ 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 $R_a = 2.8, 3.6\text{ }\mu\text{m}$ 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

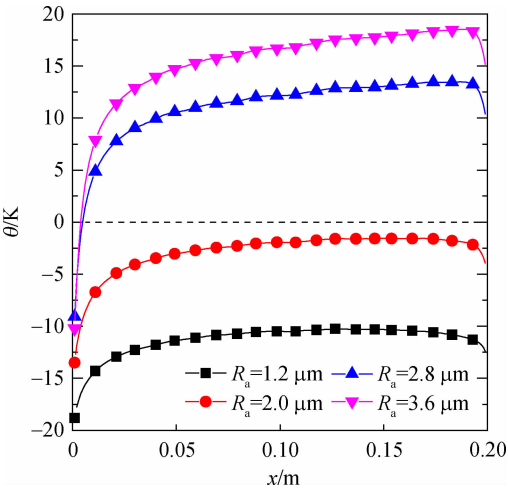


图 4 θ 沿燃气流动方向的分布
Fig. 4 Distribution of θ along gas flow

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

$$\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1} < \frac{\alpha_1}{\lambda_1} l_1$$
 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 turbin 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] 袁旭阿. 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] 胡旋烨, 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)