

航空发动机热障涂层导电性能研究

段力¹, 姬中林¹, 翁昊天¹, 陈熙¹, 杨志¹, 邹兵林², 王盈², 李杰³, 王强³

- (1. 上海交通大学微纳电子学系, 上海 200240;
2. 中国科学院长春应用化学研究所, 长春 130022;
3. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200240)

[摘要] 传统的航空发动机热障涂层主要关注点是其热绝缘特性及可靠性的研究, 并且已经形成了一整套基于 YSZ 的热障涂层技术, 但是缺乏热障涂层高温导电性能的研究。另一方面, 基于对航空发动机智能化的要求, 需要在涡轮叶片表面制造电学器件(传感器), 所以有必要对航空发动机热障涂层的电学性能进行相关的研究。研究了 YSZ 热障涂层在高温下的电学性能, 提出了能提高其高温电绝缘性能的技术方法: 可以对 YSZ 热障涂层喷涂配方进行改良。试验证明, 在涂层中加入一定含量的氧化铝可以把热障涂层的高温电绝缘性能提高 4 个量级, 可以满足在涡轮叶片热障涂层之上制作微传感器的实际工程需要。此外, 利用计算机仿真技术对高温环境下的热障涂层复合结构进行了电学性能的综合分析, 分析的结果证明, 在传感器/热障涂层/涡轮叶片基底的复合结构当中, 热障涂层表面的传感器电流的高温特性是各层材料的导电性、传感器与热障涂层的结构与尺寸的综合函数。

关键词: 传感器; 航空发动机智能化; 热障涂层; 高温温度测量; 计算机仿真

Study of Electrical Properties of TBC Coated on Aero-Engine Turbine Blade

DUAN Li¹, JI Zhonglin¹, WENG Haotian¹, CHEN Xi¹, YANG Zhi¹, ZOU Binglin²,
WANG Ying², LI Jie³, WANG Qiang³

- (1. Institute of Micro/Nano Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Changchun Institute of Applied Chemistry (CIAC), Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;
3. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] Traditional aero-engine thermal barrier coatings (TBC) mainly focus on thermal insulation properties and reliability, and YSZ-based TBC is already well-developed technology. Yet its electrical properties under elevated temperatures is missing. On the other hand, due to the need to build sensors on turbine blade, study on electrical insulation of TBC is necessity. In this paper, the electrical properties of YSZ thermal barrier coatings at high temperature were studied, and a new YSZ spraying formula is proposed that its high temperature electrical insulation performance. Experiments show that adding a certain amount of alumina into the coating can improve the electrical insulation performance at high temperature by four orders of magnitude, and can meet the practical needs to embed MEMS sensors on the surface of turbine blades. In addition, the electrical properties of the metal/TBC/metal sandwich structure at high temperature have been analyzed by computer simulation. Sensor performance is a composite function of the electric conduction properties under high temperatures as well as size and dimensions of each layer.

Keywords: Sensor; Aero-engine intelligence; Thermal barrier coating; High temperature measurement; Computer simulation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.17.081

先进航空发动机高温材料 70%~80% 要靠材料的改进, 航空发动机所使用的基底材料在近几十年的发展历程中多以 Ni、Al、Ti 等合金材料构成, 近期的研究则以定向和单晶叶片为主。近年来, 乘着材料学、薄膜制

造工艺等交叉学科蓬勃发展的东风, 专家和工程师们开辟了新的材料及工艺领域。21 世纪的先进航空发动机对材料的要求将不再满足于传统涡轮叶片基底材料热学和机械学性能的提高(如耐高温能力), 而是引进现代

交叉学科领域的先进技术的“他山之石”来“攻玉”，例如利用薄膜沉积技术形成多层及混层状的结构来构筑以前较昂贵和性能未优化的单一基底材料结构，从而使整个航空发动机叶片工程得到整体上的优化。借鉴热障涂层 (Thermal Barrier Coating, TBC) 技术可以有效提高航空发动机的整体性能。有文献报道，TBC 可以使基底材料表面温度降低约 150K，相当于过去 20 多年里采用改进合金材料方法获得收效的总和^[1-4]。而且，随着燃气涡轮发动机推重比不断提高，涡轮进口温度已超过 1600℃。为满足涡轮叶片使用寿命要求，在叶片合金材料革新、复杂冷却结构设计综合运用基础上，应用 TBC 是一种重要防护手段，具有显著的隔热效果^[5-9]。图 1 总结了自 20 世纪 60 年代至 2025 年发动机叶片研究进展和预估^[10]，可以看到，新一代的航空发动机材料的发展方兴未艾，在当前的时段 (2015)，新一代的单晶高温合金材料和 TBC 及陶瓷基类 CMC 材料有并行发展的趋势。

热障涂层是一种表面处理技术，TBC 又称隔热涂层，实际上就是将一种导热性很差的材料通过特殊的工艺附加在涡轮叶片表面，这类材料多为陶瓷基的材料，发动机涡轮部件的隔热涂层多为二元涂层系统，由粘结层和陶瓷层两部分组成，其中粘结层是 MCrAlY (M 为 Ni 或 NiCo) 的混合合金，常采用常规 PVD 或真空等离子喷涂工艺形成，合金里面的不同材料组分使得基体和陶瓷层在 1000℃ 多的高温条件下都可以有很好的应力匹配和粘结性能，同时又对基体起到防腐蚀、防氧化的作用。在此之上生长 TBC，多采用 (6%~8%) Y₂O₃ 部分稳定的 ZrO₂ 材料 (简称 YSZ)，对基体主要起到热防护的作用。

在涡轮叶片表面原位集成制造温度、应力等传感器

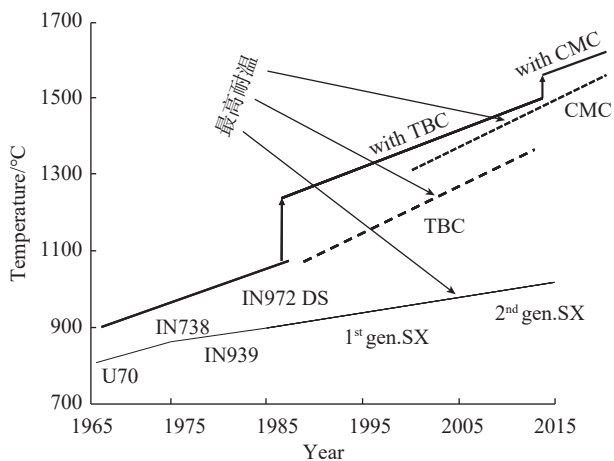


图1 航空发动机材料从传统材料到复合材料的转变趋势
Fig.1 Evolution of aero-engine turbine blade materials

是航空发动机智能化的迫切需要。美国早期实施的综合高性能涡轮发动机技术 (IHPDET) 计划 (1988 年)^[11]，主要是依靠材料科学和机械工程等“硬实力”优势。2006 年，随着微电子与计算机技术的蓬勃发力，IHPDET 的后续计划改为 VAATE 计划，即通用、可承担起的先进涡轮发动机计划，智能航空发动机是 VAATE 计划一个关键词，开始将智能航空发动机作为重要的一个领域来投入研发。作为 21 世纪工程学的一大亮点，智能化利用了交叉学科的优势，营造性能更优越和更经济的通用智能航空发动机。

为了实现航空发动机的“智能化”，就需要在发动机内多个部位安装大量的传感器和驱动器。传统的传感器和驱动器由于体积大、质量重、功能单一等因素^[12]，很难安装在航空发动机需要监控的位置，而利用 MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System)^[13] 技术开发的新型微型传感器和驱动器体积小、质量轻，容易布置在航空发动机内的很多部位，从而获得更准确的发动机工作状态参数，有利于实现航空发动机的“智能化”，提高发动机的性能、可操纵性和可靠性，这正是多用途、经济可承受的先进涡轮发动机 (VAATE) 计划的核心内容。

在涡轮叶片表面原位集成制作高温温度传感器，首先需要在涡轮叶片表面做一层高温电绝缘层，而在 500℃ 或更高的高温环境下，一般的陶瓷材料的电绝缘性能会下降^[14]，从而影响传感器特性。因为如果衬底绝缘层开始电导通，表面的电学传感器会通过衬底导通的并联电阻产生短路效应而影响测量精度。传统的热障涂层的研究主要侧重于性能以及强度研究^[15-16]，技术已经相当成熟了，而电学性能的表征是基于涡轮叶片表面智能传感器的新需要，目前相关研究很少。

本论文，针对高温环境下 YSZ 热障涂层陶瓷材料电绝缘下降问题进行了一系列的探讨和研究，在此基础上利用 MEMS 微制造技术制作了一系列的薄膜高温温度传感器，并且表征一系列的高温电学性能。

1 试验及方法

本文试验分为以下几个部分：YSZ 热障涂层的喷涂，涡轮叶片表面温度传感器的 MEMS 微制造，热障涂层高温绝缘特性与传感器的测量，涡轮叶片热障涂层体系的计算机仿真。

1.1 YSZ热障涂层的喷涂

采用等离子体喷涂工艺在涡轮叶片表面制作热障涂层，把金属或陶瓷粉末送入高温的等离子体火焰，加热到熔融或高塑性状态，然后用气流推动向前喷射，最后以一定的动能冲击基体表面，形成涂层并瞬间凝固。

在镍铬系的航空发动机涡轮叶片材料上先沉积一层 NiCrCoAlY 过渡材料,用以增加叶片金属基底与陶瓷层之间的高温热应力缓冲,在过渡材料上再用等离子喷涂技术喷涂 YSZ 陶瓷材料。具体喷涂过程中,先用氧化铝粉末进行表面喷砂,随后在乙醇里做喷涂前的超声波清洗。打底层使用了商业渠道购买的 CoNiCrAlY 粉末 (AMDRY 9951, USA), YSZ 的喷涂过程中采用 APS (大气等离子喷涂技术) 系统进行喷涂沉积,调整喷涂参数,使涂层材料以熔融状态在试样表面层状堆积,相对致密地形成涂层。粉末粒径 30~70 μm ,喷涂过程中,多次调整喷涂角度、速度以及其他工艺条件,使得涂层厚度尽量均匀。缓冲层的厚度约为 50 μm ,而 YSZ 表面涂层的厚度大约为 300 μm 。喷涂设备是 Sulzer Metco Unitcoat (喷枪 F4-MB, 瑞士),喷涂参数见表 1。

选用了 3 种 YSZ 的配方,一种是常规的 YSZ,此外还有两种,一种是先用 30% Al_2O_3 +70%YSZ 配比形成喷涂粉末,然后形成 300 μm 的涂层;另一种是先涂一层 200 μm YSZ,再涂一层 100 μm 的 Al_2O_3 。涂层制造完毕之后就是用 MEMS 微制造的方法在涂层上面制作薄膜型的温度传感器。

对含有 Al_2O_3 的喷涂表面进行了电镜扫描和 EDS 成分分析,结果如图 2 所示。从 SEM 图像可以观察到表面喷涂层面的结构是均匀的,EDS 分析结果可以观测到 Al 和 Zr 的成分基本上与喷涂比例是吻合的。需要指出的是,如果 EDS 做的不是区域 (10 \times 10 μm^2) 的而是点状的谱图分析,会发现有的地方的原子比只有 Al 或是只有 Zr,而不是两个共存,而有的地方是共存的,说明大部分的 Al_2O_3 和 ZrO 是分立的颗粒而不一定是化合物组分。

1.2 温度传感器的微制造

刚刚喷涂完毕的热障涂层表面非常粗糙,粗糙度多在 30 μm 左右,在微制造之前必须予以打磨。经打磨后的粗糙度控制在几微米的量级。薄膜原位集成 MEMS 传感器采用微加工工艺制作,即采用软模板转印的方法^[17],在涡轮叶片热障涂层表面原位微集成了白金薄膜热电阻。此曲面微制造工艺利用一张易于弯曲的模板将传感器图形转印至涡轮叶片表面。图 3 是叶片表面集成制作的传感器及其连线结构,使用了上海交通大学的校徽改制成一个热电阻结构,然后使用高温导电浆将白金导线焊接在叶片表面,并且延伸到高温炉外边的万用表上做相应的电学测量。

1.3 YSZ热障涂层高温电学特性测量

图 4 所示为 MEMS 传感器与外界的连线,用高温连接线与外界的万用表相连接,来测量高温炉内热电偶的热电压和热电阻的电阻值,并且采用计算机来记录测

量的数值。

高温炉可以设定程序来控制其温度升降,图 5 为温度循环方案,650~950 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内上下循环的时间在 30~60min 之内。温度循环的目的在于检验热障涂层及其传感器与连线的温度稳定性与可靠性。

1.4 计算机仿真

采用 COMSOL 计算机仿真程序对涡轮叶片表面 MEMS 薄膜 / 热障涂层 / 涡轮叶片复合结构进行了多物理场热学与电学特性的仿真,图 6 是仿真的结构与计算网格图,可以看到,在两种材料的交界处网格的密度比较大,那是因为这个区域电势差的

表 1 喷涂参数

Table 1 Spraying parameters

项目	等离子气体流速 (Ar/H ₂)/SLPM	载气流速/ SLPM	冷却气体流速/ SLPM	电流/ A	喷涂距离/ mm
金属层	46/8	2.6	4	650	100
瓷砖层	35/12	2.6	4	650	100

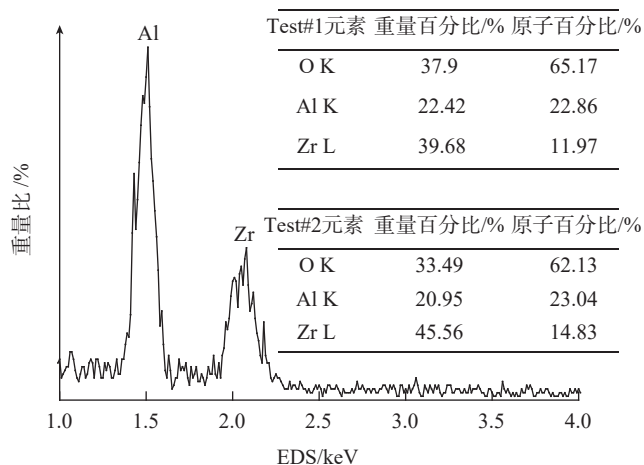
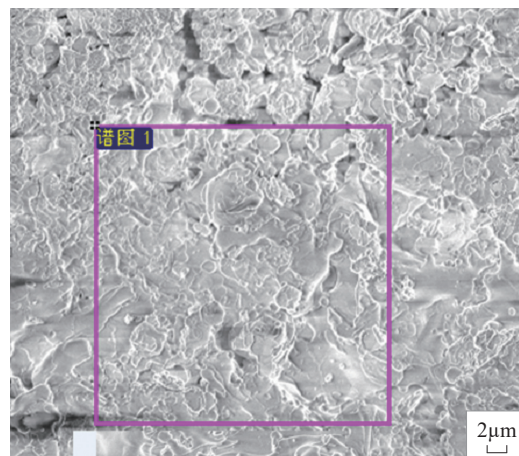


图 2 掺有 Al_2O_3 的热障涂层表面的 SEM 和 EDS 分析图

Fig.2 SEM and EDS pictures of TBC surface with added Al_2O_3

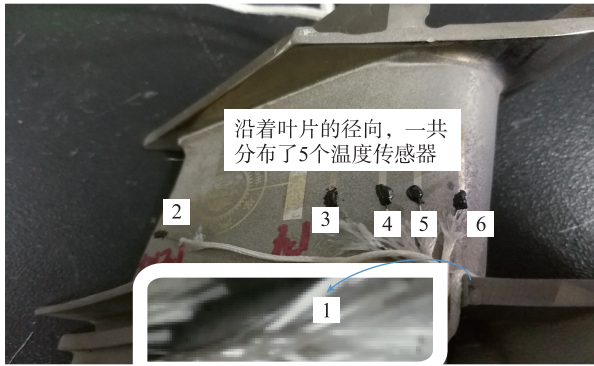


图3 涡轮叶片表面热障涂层上制作的传感器的连接图
Fig.3 Connection diagram of sensors made on surface of thermal barrier coatings on turbine blade



图4 将延长线连接到炉外的万用表对多组传感器的热电阻和热电压进行数据采集与测量
Fig.4 Connecting extension wire to multi-meter outside furnace and collecting measured data of thermal resistance and thermal voltage of sensors

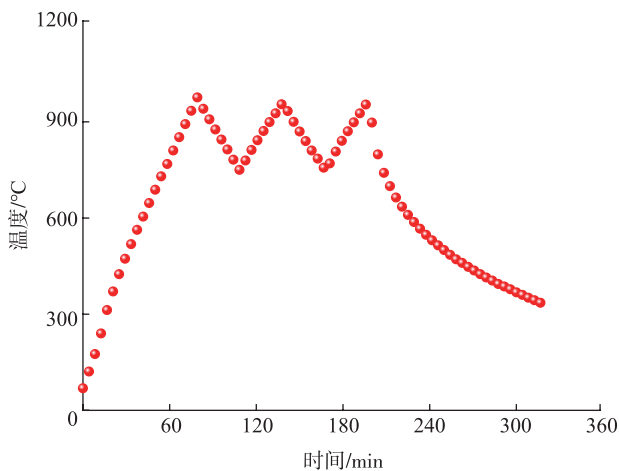


图5 温度随时间的循环曲线
Fig.5 Temperature cycling over time

变化比较大,为了保证仿真程序的收敛,必须加大计算的精度。

图7是在高温环境下仿真得到的结果,即在涡轮叶片与热障涂层中的电势差与电力线密度。对这些电流密度进行积分,就可以算出在不同温度和不同结构下的电流,并且换算成导通电阻。

2 结果与讨论

2.1 热障涂层高温电绝缘退化

从图8可以看到,热障涂层的电阻随温度升高呈现指数下降的趋势,在800°C的外界环境下,这个电阻已经降到了100Ω左右,如果热障涂层表面传感器的薄膜电阻也在几十和几百欧姆的范围,那么就会形成并联电

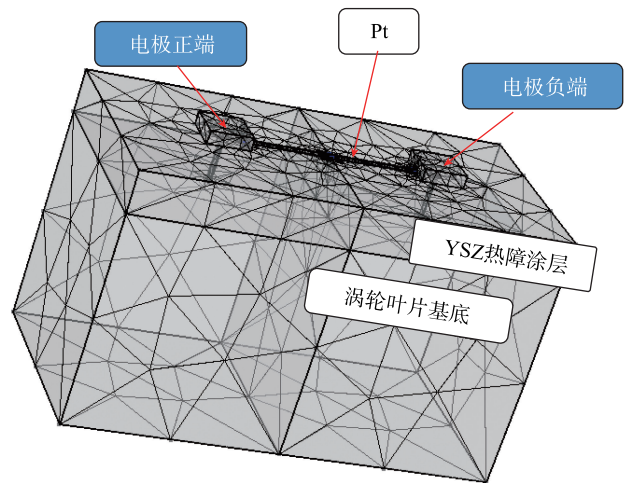


图6 传感器热障涂层涡轮叶片仿真结构及其网格分布
Fig.6 Simulation structure and grid distribution of sensor on the top of TBC coated on turbine blade

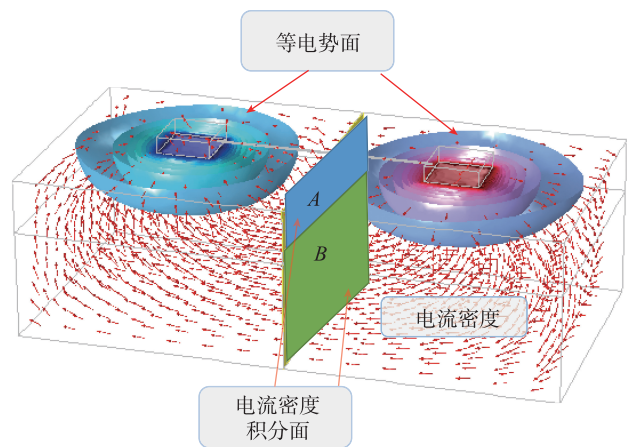


图7 高温下热障涂层中电势差与电流密度分布
Fig.7 Electrical potential distribution and current density at high temperature

阻的误差,所以在图8中也看到了Pt高温电阻温度传感器的线性变差。

2.2 提高热障涂层高温电绝缘性能

如果在制作热障涂层的过程当中,掺入一定含量的 Al_2O_3 成分,就会相应地提高热障涂层的高温绝缘性能。如图9所示,比较涡轮叶片表面不同的热障涂层性能,看到利用不同的喷涂配方可以将绝缘热电阻提高2~4个量级,尤其是在高温区段,这项发现对在涡轮叶片表面热障涂层之上形成薄膜型传感器提供了有利的条件。

2.3 比较不同热障涂层在高温下的性能

图10展示了两种不同的热障涂层结构的TBC电绝缘特性,凸面是以30% Al_2O_3 和70%YSZ配比的喷涂粉末进行喷涂,厚度是300 μm ,凹面是先喷涂一层

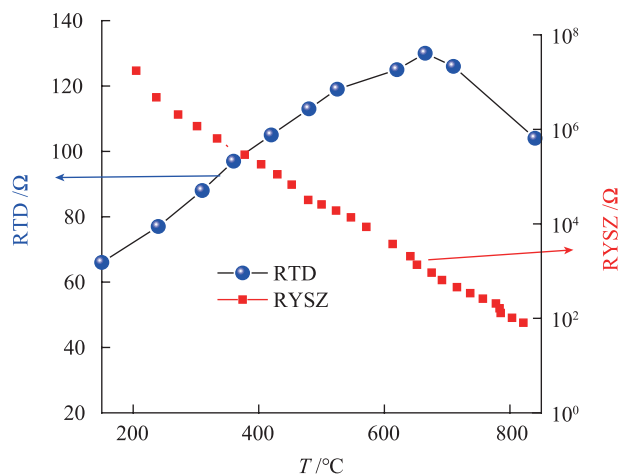


图8 热障涂层绝缘电阻 (RYSZ) 和白金薄膜热电阻 (RTD) 随温度变化特性

Fig.8 Thermal barrier coating insulation resistance (RYSZ) and platinum thin film thermal resistance (RTD) vs. temperature relationship

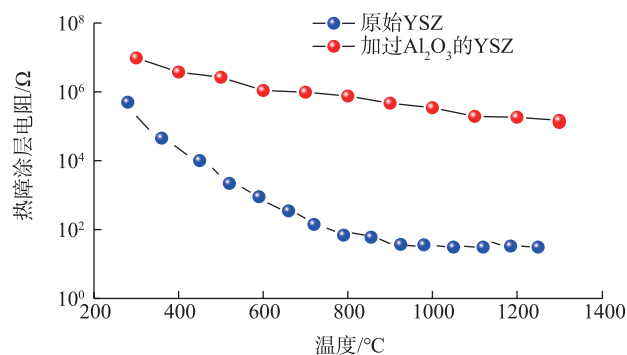


图9 热障涂层在高温下的热绝缘电阻 (高达1200°C)

Fig.9 Insulation resistance changes of thermal barrier coatings up to 1200°C

200 μm 的YSZ,然后再喷涂一层100 μm 的 Al_2O_3 。可以看到两种喷涂形成的热障涂层在高温下的电阻都有很好的绝缘效果,绝缘电阻值达10k Ω 以上,可以满足制作MEMS薄膜传感器的需要。但是凸面的电阻随温度的变化比较敏感,此外就是凹面的热障涂层在试验过后有剥落现象(图10),这是由热应力的不平衡造成的,同时进行了一项简单的初步测试试验,就是在高温过后直接喷水冷却,观察涂层是否剥落,试验证明,在30% Al_2O_3 和70%YSZ配比的喷涂粉末与常规的YSZ热障涂层都没有看到剥落现象,在未来的工作中,将进行更深入的强度试验。就目前的结果而言,建议使用 Al_2O_3 和YSZ混合造粉进行喷涂,而不是采用分层的方式进行喷涂,可以规避热应力带来的可靠性问题。

2.4 计算机仿真对复合结构的分析

在不同的温度区域对MEMS薄膜/热障涂层/涡轮叶片基底复合结构进行了导电性能的仿真。在仿真过程中,上面两个电极加1V的电压(图6),然后沿着截面A和B进行电流密度的积分,从而得到了在热障涂层和涡轮叶片基底流通的电流。在仿真过程中使用的热障涂层电阻温度特性模型是基于试验测量的结果,见图9(原始YSZ)。图11中可以看到,在高温的情况下,YSZ体内确实存在导通电流,而在室温的环境下,YSZ是绝缘的。图12显示了热障涂层当中流动的电流值和电极之间距离与温度的函数关系。可以看出由于YSZ热障涂层在高温下的电导通,形成了流通在热障涂层当中的导通电流。这个电流可沿横向和纵向流动,其纵向流通的电流经过热障涂层流到涡轮叶片衬底,并通过涡轮叶片基底流到另外一端电极。最后形成的总电流是叶片表面传感器、热障涂层与涡轮叶片衬底电流的总

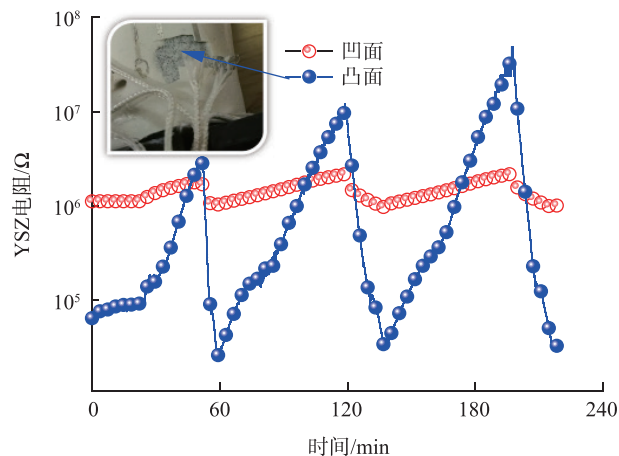


图10 涡轮叶片正面和反面不同热障涂层结构呈现的绝缘电阻温度特性

Fig.10 Temperature characteristics of insulation resistance of different thermal barrier coatings on front and back of turbine blades

和。所以在高温环境下表面的两个电极之间的电流其导通机制相对比较复杂,有纵向与横向、表面与体内多种电流方式的组合方式,最后形成总电流值。在这一点上,计算机仿真技术是一项不可或缺的工具。

3 结论

本文研究了高温环境下涡轮叶片表面热障涂层及其相关的薄膜传感器的电学特性,有3项主要结论:

(1) 在高温环境下,利用常规配方比制作的涡轮叶片表面 YSZ 热障涂层,其电绝缘性能会呈指数趋势退化,在 900°C 时可下降到几百到几十欧姆,会給在其上制作的薄膜 MEMS 微传感器造成测量误差。

(2) 在原有的 YSZ 配方中加入 Al_2O_3 ,可以显著提高热障涂层的电学绝缘性能,在高温环境下可以提高4个数量级,可以满足在热障涂层表面用 MEMS 微制造

技术制作薄膜传感器的需要。

(3) 基于传热学和电学多物理场的计算机仿真技术,可以有效地模拟涡轮叶片/热障涂层表面传感器复合结构当中的导通电流及其机制,是研究航空发动机高温环境下不同材料与结构电学特征不可或缺的工具。

4 致谢

航空发动机智能化是航空发动机研发的一个具有很大潜力的技术方向,在国际和国内都是最前端的高新技术。在本课题的研究中,得到了很多相关部门,如中国科学院长春应用化学研究所、中国航空发动机集团商发公司科技部/试验测试中心、上海交大微纳制造团队、上海交大 AEMD 先进电子材料与器件校级平台的鼎力支持,在此深表致谢。感谢参与这项研究的学生高均超、胡铭楷,感谢薄膜与微细技术教育部重点实验室张亚非

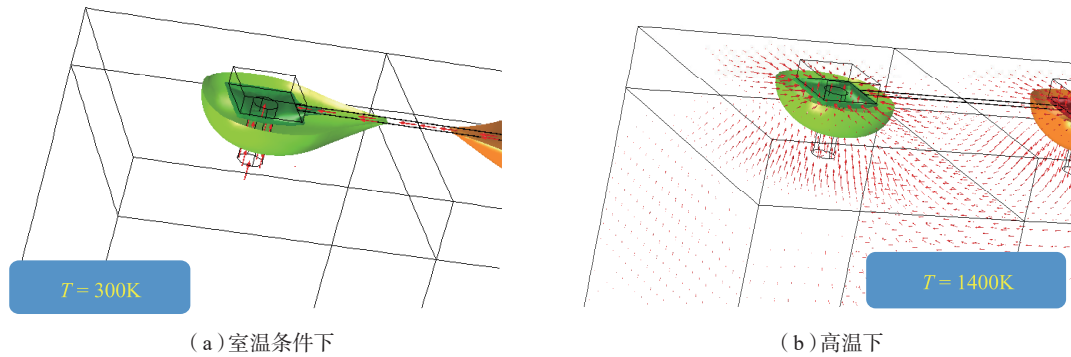


图11 不同温度下的电势差与导通电流(电流密度)
Fig.11 Voltage and current densities at different temperatures

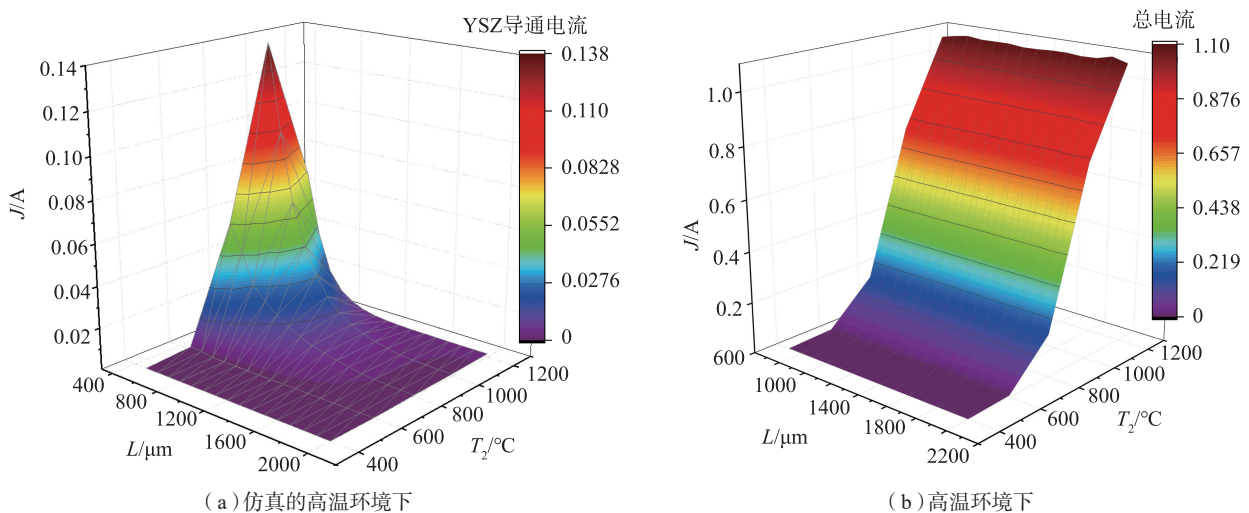


图12 仿真的高温环境下热障涂层当中的导通电流和电极之间的距离与温度的关系及高温环境下两个电极之间的总电流值
Fig. 12 Temperature dependence of conduction current as well as distance between electrodes on surface of TBC and total current between two electrodes at high temperatures

教授和杨志研究员,武汉理工大学的曹学强教授与北京农机学院的汪瑞军教授所提供的技术与学术上的支持。

参考文献

- [1] BOSE S, DEMASI M J. Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1997, 6(1): 99–104.
- [2] SHEN Z Y, HE L M, XU Z H, et al. LZC/YSZ DCL TBCs by EB-PVD: Microstructure, low thermal conductivity and high thermal cycling life[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(4): 1443–1450.
- [3] ADTURE P, ELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. *Science*, 2002, 296: 280–284.
- [4] CLARKE D R, OECHSNER M, PADTURE N P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines[J]. *MRS Bulletin*, 2012, 37(10): 891–898.
- [5] 曹学强. 热障涂层材料[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- CAO Xueqiang. Thermal barrier coating material[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [6] 刘纯波, 林锋, 蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(1): 269–291.
- LIU Chunbo, LIN Feng, JIANG Xianliang. Research status and development trend of thermal barrier coatings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(1): 269–291.
- [7] SHEN Z Y, HE L M, XU Z H, et al. Morphological evolution and failure of LZC/YSZ DCL TBCs by electron beam-physical vapor deposition[J]. *Materialia*, 2018, 4: 340–347.
- [8] CAO X Q, VASSEN R, STOEVEER D. Ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, 24(1): 1–10.
- [9] MISHRA S K, JAGDEESH N, PATHAK L C. Fabrication of nanosized lanthanum zirconate powder and deposition of thermal barrier coating by plasma spray process[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2016, 25(7): 2570–2575.
- [10] Wadley Research Group. High temperature coatings[EB/OL]. [2015–11–16]. <http://www.virginia.edu/ms/research/wadley>.
- [11] VIARS P. The impact of IHPTET on the engine/aircraft system[C]//Proceedings of Aircraft Design and Operations Meeting. Seattle, 1989: 10.251416.1989–2137.
- [12] BALLAL D R, ZELINA J. Progress in aeroengine technology (1939–2003)[J]. *Journal of Aircraft*, 2004, 41(1): 43–50.
- [13] ZHANG Y, DUAN L F, ZHANG Y, et al. Advances in conceptual electronic nano devices based on 0D and 1D nanomaterials[J]. *Nano-Micro Letters*, 2014, 6(1): 1–19.
- [14] WRBANEK J D, FRALICK G C, BLAHA C A, et al. A multilayered thin film insulator for harsh environments[C]// 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis, 2002.
- [15] GLEESON B. Thermal barrier coatings for aeroengine applications[J]. *AIAA Journal of Propulsion & Power*, 2012, 22(2): 375–383.

[16] 段力, 高均超, 汪瑞军, 等. 航空发动机叶片表面热障涂层温度分布的仿真分析[J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(8): 915–920.

DUAN Li, GAO Junchao, WANG Ruijun, et al. Simulation analysis of temperature distribution of thermal barrier coatings on aeroengine blades[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2017, 51(8): 915–920.

[17] 高均超, 段力. PDMS 软质模板制备与叶片曲表面图形转移工艺[J]. *微纳电子技术*, 2016, 32(5): 333–339.

GAO Junchao, DUAN Li. Fabrication of PDMS mask and PDMS based soft lithography process on turbine blade[J]. *Micronanoelectronics Technology*, 2016, 14(5): 333–339.

通讯作者: 段力, 博士, 副教授, 研究方向为无线通信与传感、MEMS 技术在航空发动机上的交叉应用, E-mail: frankliudian@sjtu.edu.cn。

(责编 铃兰)

(上接第72页)

[9] 宁会峰, 阎相忠, 朱悦, 等. 水基光固化陶瓷浆料的粘度与分散性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(11): 3944–3949.

NING Huifeng, YAN Xiangzhong, ZHU Yue, et al. Research on viscosity and dispersity of aqueous ceramic suspension for stereolithography[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(11): 3944–3949.

[10] 范哲超, 丰洪微, 陈磊, 等. 基于 DLP 技术光固化 3D 打印系统研究与实践[J]. *铸造技术*, 2018(3): 582–585.

FAN Zhechao, FENG Hongwei, CHEN Lei, et al. Research and practice of light curing 3D printing system based on DLP technology[J]. *Foundry Technology*, 2018(3): 582–585.

[11] 卢振, 蒋少松, 张凯锋. 陶瓷粉末微注射成形脱脂与烧结机理相关研究[J]. *精密成形工程*, 2015(3): 33–36.

LU Zhen, JIANG Shaosong, ZHANG Kaifeng. Fundamental research on debinding and sintering of submicron pillar arrays made by ceramic micro powder injection molding[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2015(3): 33–36.

[12] EMIL J, OSCAR L, JAN J, et al. Influence of resin composition on the defect formation in alumina manufactured by stereolithography[J]. *Materials*, 2017, 10(2): 10020138.

[13] ZHOU M, WEI L, WU H, et al. Preparation of a defect free alumina cutting tool via additive manufacturing based on stereolithography optimization of the drying and debinding processes[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(10): 598–602.

[14] PFAFFINGER M, MITTERAMSKOGLER G, GMEINER R, et al. Thermal debinding of ceramic-filled photopolymers[J]. *Materials Science Forum*, 2015, 825–826: 75–81.

通讯作者: 田宗军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种加工技术、增材制造(3D 打印技术), E-mail: Tianzj@nuaa.edu.cn。

(责编 铃兰)