

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220762-13

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220762

有限元方法在热障涂层研究领域中的发展与应用

刘延宽¹, 王源生¹, 王璐璐^{2,3}

- (1. 中国民航大学 航空工程学院 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300;
2. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870;
3. 中国南方航空公司 沈阳维修基地, 沈阳 110169)

摘 要: 分别从热生成氧化物(TGO)生长行为及应力应变、热障涂层(TBC)整体热力学性能、热障涂层结构优化及寿命预测三大方面进行概述, 分析近些年来有限元方法在该研究领域中的发展与应用, 总结目前研究中存在的问题和局限性。目前研究的发展方向主要是将失效理论、多物理场耦合以及 Python 子程序等与复杂的物理模型相结合, 以获取更为准确的有限元分析结果。然而受限于真实 TGO 形貌毫无规律、高温条件下材料物性参数不充足、陶瓷层内微观孔隙随机分布等诸多问题, 所得计算结果相比实际仍存在一定差距。今后可以从物理模型精细度、层间边界条件、动态生长模拟等方面进行更深入的研究。

关 键 词: 热障涂层; 有限元; TGO 生长; 温度分布; 应力分布; 寿命预测

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Development and application of finite element methods in research field of thermal barrier coatings

LIU Yankuan¹, WANG Yuansheng¹, WANG Lulu^{2,3}

- (1. Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance,
College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Materials Science and Engineering,
Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
3. Shenyang Maintenance Base, China Southern Airlines, Shenyang 110169, China)

Abstract: Three major aspects, including thermally grown oxides (TGO) growth behavior and stress-strain, overall thermomechanical properties of thermal barrier coatings (TBC), structural optimization and life prediction of TBC, were reviewed. The development and application of finite element method in these researches in recent years were analyzed, then the problems and limitations in current researches were summarized. At present, the research directions mainly focus on the combination of failure theory, multi-physics coupling and Python subroutines with complex physical models to obtain more accurate finite element analysis results. However, due to many problems such as irregular morphology of TGO, insufficient physical parameters of materials under high temperature conditions, and random distribution of microscopic pores in ceramic layers, there is still a gap between the calculated and actual results. In the future, more in-depth research can be carried out from the aspects of physical model fineness, interlayer boundary conditions and dynamic growth simulation, etc.

收稿日期: 2022-10-03

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2020KJ016)

作者简介: 刘延宽(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事热障涂层方向的研究。E-mail: yk-liu@cauc.edu.cn

引用格式: 刘延宽, 王源生, 王璐璐. 有限元方法在热障涂层研究领域中的发展与应用[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220762. LIU Yankuan, WANG Yuansheng, WANG Lulu. Development and application of finite element methods in research field of thermal barrier coatings[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220762.

Keywords: thermal barrier coatings; finite element; TGO growth behavior; temperature distribution; stress distribution; lifetime prediction

随着航空航天事业的飞速发展,对航空发动机的性能要求越来越高,其工作温度及推质比的不断提高导致高温合金已远远不能满足要求,为此需要研发更先进的技术。热障涂层(thermal barrier coatings, TBC)作为其中一项关键技术,已经成功应用在发动机燃烧室和其他高温部件上,有效提高了其工作温度并延长了服役寿命^[1-3]。TBC 基于陶瓷材料的耐高温、抗腐蚀以及低热导率等特性,通过特定方法涂覆于合金基体表面即可阻挡高温气体的冲击,大幅降低基体温度,延长发动机的工作寿命和可靠性。根据研究结果,当涡轮表面应用 150~300 μm 厚的 TBC 后工作温度可提升 50~150 $^{\circ}\text{C}$,这相当于近 30 年高温单晶基体性能提升的总和,因此航空发动机的可靠性与推质比的提升很大程度上取决于此技术的发展^[4-5]。

TBC 一般由陶瓷面层(top coat, TC)和金属黏结层(bond coat, BC)组成,随着高温氧化的进行会在两者之间出现热生成氧化物(thermally grown oxides, TGO)。陶瓷层主要起到隔热、抗腐蚀耐热震的作用,粘结层则要在体膨胀系数相差很大的陶瓷和金属之间形成过渡,改善两者之间的物理相容性,提高涂层的结合强度,同时降低界面应力^[6]。现今使用最广泛的材料是将 MCrAlY (M 取 Ni、Co 或 Ni+Co)作为粘结层,用质量分数为 6%~8% 的 Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 (yttrium-stabilized zirconia, YSZ)为陶瓷面层,其熔点较高(约为 2 700 $^{\circ}\text{C}$)、热导率较低(致密材料在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时热导系数约为 2.3 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$)^[7-9]。

由于 TBC 工作环境非常恶劣,会受到热流冲击、腐蚀以及频繁经受冷热循环等影响,使其服役寿命无法达到预期,严重时还会影响到发动机的稳定性和安全性。为了进一步提高其综合性能,研究人员针对各类失效问题,从诸多方面进行过分析。然而在具体实验的过程中受限于设备、成本等因素,会出现无法观测和计算的情况,尤其是在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上的高温实验中难以进行过程检测,大多只能通过最终的实验结果来推断实验过程,甚至还会限于实验的安全性,无法得到理想的结果。因此很多情况下,针对 TBC 的理论及实验研究有必要通过模拟计算的手段来论证是否获

得期望结果。

模拟仿真在工程中的应用一般基于有限元分析(finite element analysis, FEA),其基本思想是将结构离散化,使复杂问题简单化后进行求解,首先由有限个微小的、互连的单元组成求解域,然后根据平衡和变形条件互相协调综合求解。由于大多数实际问题难以得到准确解,而有限元不仅计算精度高,还能适应各种复杂形状,所以成为了行之有效的分析手段。因此随着有限元方法的不断发展,在 TBC 相关研究中开始起到重要作用,依据其计算结果可以直观地分析涂层各组分的应力、温度分布,也可以抛开成本、安全性等的顾虑进行更深入的研究,经过数年的不断发展和完善,如今已经有了成熟的应用,为研究提供了重要帮助。本文分别从 TGO 的生长与内部应力变化、TBC 整体温度、应力分布、TBC 结构优化与寿命预测三个方面对多年来有限元方法在研究中的发展与应用作阐述,总结数值模拟的发展情况及目前研究中存在的一些局限性,展望了未来的发展方向,希望能为今后研究的进一步发展提供思路和借鉴。

1 TGO 相关研究

对 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上环境中长时间工作的 TBC 来说,最主要的一个失效原因就是高温氧化使 TGO 持续生长:TGO 内存在较大的残余应力且应力会随 TGO 的生长而增大,同时还会受到 TGO 附近已存在的微小裂纹影响而导致出现多种破坏形式。由于受喷涂过程的影响,TC/BC 界面会变粗糙,而且 TGO 的实际厚度最多也只有几十微米,难以通过实验手段去观测其在高温氧化过程中的生长行为,有限元方法在研究过程中提供了很好的帮助。一般采用以下 3 种形式对界面形貌进行建模:将正弦、余弦等作为代替的简单曲线^[10-12];弧度、幅度周期性变化的较复杂曲线^[13];基于剖面局部实际形貌的真实复杂曲线^[14-15]。

1.1 TGO 生长行为

早期基于有限元方法进行模拟计算可以追溯到 2000 年左右,Olsson 等^[16]采用球壳模型测算金属陶瓷复合材料的体膨胀系数,与实验结果符合性良好。Evans 等^[17]根据涂层内裂纹的萌生与拓

展过程, 建立平面模型计算耐久性, 模拟高温氧化过程中 TGO 在面内生长的残余应力变化, 最终导致涂层因累积了大量裂纹和屈曲而剥落。此外, 他与 He 等^[18]首次采用了 ABAQUS 有限元分析软件研究 TBC 失效模式, 在黏结层表面加入正弦波动的不稳定位移, 并以高温横向生长应力作为涂层内部位移失稳的条件, 将热膨胀失配、基体屈服强度和 TGO 生长应力建立联系。

考虑到 TGO 存在体积变化而非局限于面内生长, Ambrico 等^[19]在上述研究基础上将 TGO 模拟为弹塑性基体的表面环形区域, 推导应力分布和塑性区面积之间的解析解, 深入研究热应变、屈服应力、氧化物生长应变和几何形状的影响, 建立如图 1 所示理想化模型, 以半球形或半圆柱形缺陷代替不规则缺陷, 结果表明热应变、循环反向屈服和 TGO 的生长共同促进了涂层的失稳。He 等^[20]在 ABAQUS 中开发子程序, 加入体膨胀系数并允许 TGO 大规模增厚, 分别在 1 000 °C 等温氧化、循环氧化条件下对 TGO 线性增厚与抛物线型增厚过程进行稳定性计算, 对比可知非线性增厚结果更加符合实验结果。

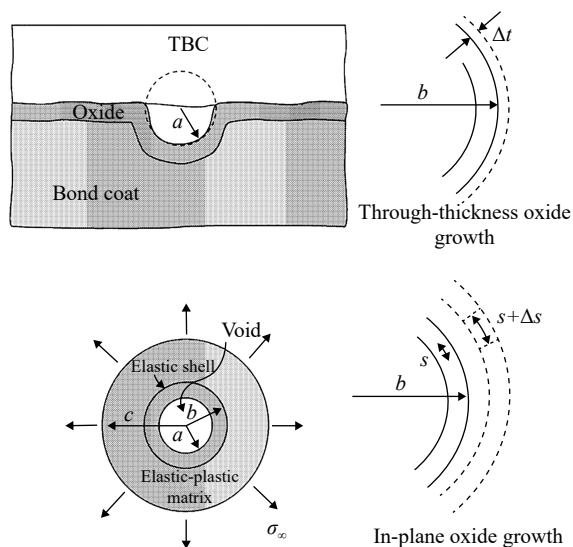


图 1 TGO 不规则形貌及生长模型^[19]

Fig. 1 Model of TGO irregular morphology and growth^[19]

TGO 在厚度方向也会生长, 并且粘结层与基体之间存在热膨胀不匹配, 过于理想化的模型无法体现出这些因素对结果的影响。因此 Karlsson 等^[21-23]进一步优化了数值模型: 建立简单的球对称模型, 以凹陷的表面形貌代替实际几何构型、薄壳代表 TGO, 通过改变半径之比来模拟不同缺陷的形状, 将粘结层和金属基体视为理想弹

塑性模型, 通过计算热应变来替代 TGO 在厚度上的变化, 判断其对涂层性能的影响。由于高温氧化使 TGO 不断生长并发生位移, 基于此模型对黏结层屈服应变、缺陷大小、TGO 和黏结层的弹性特性、热膨胀失配、TGO 生长应变以及 TGO 厚度等问题进行了模拟计算。然而其局限性在于只能在对小范围的生长做静态计算, 若要与实际结果拟合就需要设定较大的氧化生长应变值并且粘结层材料必须相对柔软, 为此又改进了球对称模型, 进一步探寻位移失稳的因素^[20,24]。

Busso 等^[25-26]首先考虑到氧化和烧结的综合影响, 以电子束物理气相沉积 (electron beam-physical vapor deposition, EB-PVD) 制备的 YSZ-TBC 为对象, 建立连续介质的力学扩散本构模型, 研究粘结层和 YSZ 的性质、TBC 形貌特征与局部微裂纹萌生和应力分布之间的关系, 着重研究了粘结层的氧化、烧结温度以及烧结时间对 YSZ 的影响。在等温热暴露的模拟过程中材料不再视为理想线弹性, 加入表面粗糙度、高温蠕变等因素, 计算粘结层和 TGO 的弹塑性变形、蠕变以及体积应变, 根据计算结果, 在氧化过程中产生的体积应变会导致 YSZ 表层形成较高的面外拉应力 (大于 0.5 GPa), 而且涂层的表面粗糙度越大则拉应力也越大, 这些应力足以使凸起处出现横向开裂, 实验结果也证实了这一点^[27]。

但是由于缺乏有关 TGO 的实验数据 (如高温下 TGO 的生长应变、其与基体的屈服应力等), 所以在模拟计算过程中材料性质通常被简化为与温度无关的常数, 显然随着热循环的进行计算误差会越来越大。Kang 等^[28-31]首先在实验手段上取得突破, 测量得到 TGO 的横向生长应变、增厚速率等关键数据, 基于实际数据对热障涂层的失稳进行模拟计算, 同时也优化了位移失稳的算法, 使其可以适用于任何厚度的 TGO。通过分析多次热循环过程中 TGO 的位移失稳情况, 最终的计算结果都与实验结果较为吻合, 为之后热力耦合参数化计算的研究进一步奠定了基础。

1.2 TGO 应力应变

TGO 的持续生长增厚会加速涂层失效, 黏结层不断氧化生成的金属氧化物也会对已形成的 TGO 产生应力造成起皱、破裂。Mercer 等^[32]考虑到飞机实际飞行时热端部件在起飞时的温度和巡航时的温度并不相同, 在模拟 TGO 失稳过程的应力变化时施加阶梯热循环。根据有限元分析结

果, TGO 的生长速度不同容易出现褶皱, 而褶皱所产生的弯曲应力足以诱发蠕变生长机制下的脊状裂纹, 在脊状裂纹附近应力明显降低; 对比等温热处理实验的结果发现 TGO 中富含 Y_2O_3 颗粒的局部区域应力显著降低, 表明局部应力松弛导致了 TGO 失稳, 造成涂层加速失效。

观测失效实验后 TBC 的内部结构可知 TGO 的形貌为不规则曲线, 在有限元分析计算过程中应充分考虑到此影响^[33-35]。相比直线型界面形状, 同样参数条件下余弦的界面形状对热障涂层应力场的改变幅度超出了 2 倍以上^[36]。Yu 等^[37]在对等离子喷涂(plasma spray, PS)TBC 冷却过程中涂层内残余应力变化情况进行有限元分析计算时, 以变幅度的复杂余弦曲线代表层间界面形状, 模拟 TBC 从 1 000 °C 冷却至 25 °C 后引起的残余应力、应变大小与分布(如图 2、图 3 所示, 图中符号含义参见文献^[37])。不同 TGO 厚度对涂层各个结合面处应力状态的影响: 厚度越大残余应力越大, 塑性变形也越严重, 在 TC/TGO 界面残余应力会转变为压应力; 当 TGO 厚度较薄或波动幅值较小时, BC/TGO 界面峰值点的拉伸应力与波动幅值呈线性关系。

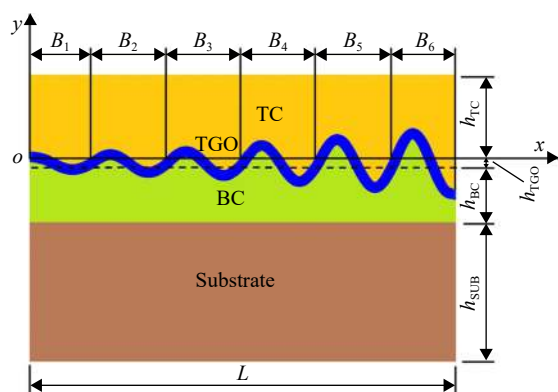


图 2 TBC 模型示意图^[37]

Fig. 2 Schematic of TBC model^[37]

李佐君等^[38]则是将 TGO 界面简化为正弦曲线, 保持波长不变, 仅改变振幅代表不同的 TGO 粗糙度, 应用内聚力单元与扩展有限元模型模拟了不同 TGO 厚度、粗糙度以及涂层内部初始裂纹对应力应变的影响情况, 并与裂纹的形核与生长建立了联系。Jiang 等^[39]对含有膜冷却系统的 TBC 进行模拟, 先通过共轭换热计算和流固耦合计算, 得到了流、固两区域的温度场, 并且加入辐射换热、蠕变的影响。随后通过有限元计算对该体系在高温和室温下的热-力学性能进行了分析。

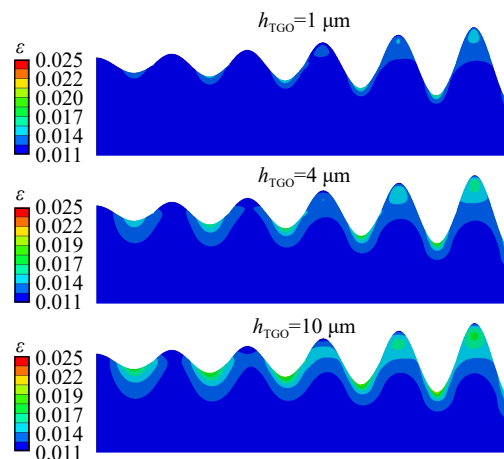


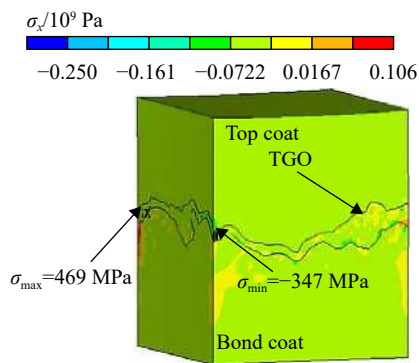
图 3 冷却至 25 °C 后, 不同 TGO 厚度下界面等效塑性应变(ε)的分布^[37]

Fig. 3 Distribution of equivalent plastic strain (ε) for different TGO thicknesses when TBC is cooled down to 25 °C^[37]

薄膜冷却会导致 TGO 生长不均匀, 经过长时间氧化后, 其厚度在最大可达 4.5 μm , 而在冷却孔边缘处最小只有 2.5 μm , 且 TGO 形貌粗糙使冷却孔周围的局部应力有所增加, 导致了裂纹的萌生。

郭蕙敏等^[40]提取服役后叶片的真实 TGO 形貌, 基于此进行有限元分析后进一步明确了涂层内部应力分布情况: 陶瓷面层和黏结层中的法向应力分布完全相反, TGO 内法向应力随着其厚度的增加而增大, 当 TGO 厚度保持不变时应力则会随着黏结层表面的振幅增大而增大。钟建兰等^[41]利用三维 X 射线显微镜等设备对热处理后的涂层内部结构进行扫描重建, 将所得的 TGO 三维结构进行有限元分析, 设置第一类边界条件, 对其在 20~1 050 °C 之间进行热循环模拟, 观测不同热循环次数后的 TGO 热应力、褶皱等情况(如图 4 所示, 图中符号含义参见文献^[41]), 并基于热力耦合计算表明高温蠕变可以释放热障涂层内的热应力, 在 15 次循环后 TBC 内部应力分布趋于稳定。此外, Kyaw 等^[42]也对 TGO 界面形貌建立了三维模型, 对 TGO 的厚度、应力分布等进行过类似计算。

根据这些研究结果, 建议在 TBC 制备过程中尽量降低 TC/BC 的界面粗糙度, 通过提高陶瓷层的厚度及内部孔隙分布的均匀性能够有效延缓涂层的失效。同时可以发现有限元方法在热障涂层研究领域的应用逐渐走向成熟, 对 TGO 进行研究的进程从最初模拟 TGO 的面内生长发展到对于任意形状 TGO 体积变化、应力变化的测算; 从理想线弹性模型、涂层材料参数都是与温度无关的

图 4 在 63 次热循环后 TBC 热应力分布^[41]Fig. 4 Thermal stress distribution of TBC after 63 thermal cycles^[41]

常数发展到基于实际实验数据的耦合模型;从定性研究失效趋势发展到定量判断危险区域等。尽管还有许多不足,但是通过这些研究的积累,对于失效的过程有了更加直观的认识,使得有限元方法在针对热障涂层相关研究过程中的重要性越来越高,也推动了其在研究中更加深入地应用。

2 TBC 热力学性能分析

实际工作环境下失效行为是一个动态过程,它往往与残余应力、高温蠕变、烧结、氧化等多种因素有关,在高温热循环过程中,影响其失效模式和寿命的因素非常复杂且无法预测,比如基体与黏结层的弹塑性变形、TGO 和陶瓷层的弹性变形、温度梯度的变化、各层与其相邻两层界面的高温蠕变、环境的热流分布等,诸多因素共同导致了失效。利用有限元分析热力学性能时,需要以完整的模型和热-力-机械等多重耦合计算来尽可能地逼近实际工况,此外 TBC 内部也并非致密完整,会存在缺陷(微孔、微裂纹等),这些缺陷的几何特征和空间分布对于隔热效果有重要影响,在模拟计算过程中需要加以考虑。

2.1 孔隙影响

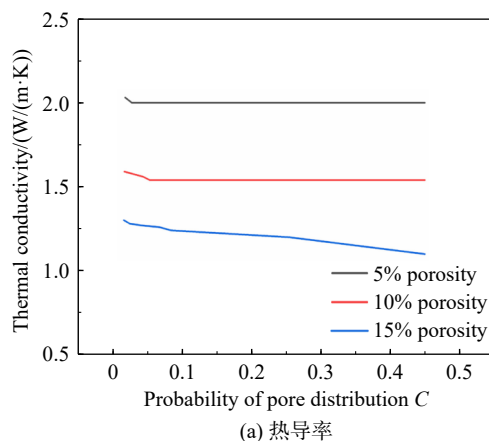
陶瓷层本身是一种多孔材料,而且不论采取大气等离子喷涂(air plasma spraying, APS)还是 EB-PVD 方法制备 TBC 都会产生孔隙结构。将孔隙率控制在合适的范围内能够有效降低其热导率提高隔热性能,同时细小的孔隙还为应力释放提供了空间,有助于提高热障涂层在热循环过程中的疲劳性能^[43]。然而在高温工作环境中,多孔陶瓷材料中的原子会被高度调动并沿着晶格、晶界以及孔隙表面等发生扩散,使表面自由能最小化,这种扩散过程即为烧结。这一过程会不可避

免地改变热障涂层的力学性能,是造成热障涂层失效的原因之一^[44]。研究人员对热障涂层内不同孔隙形态结构与热导率、弹性模量、热循环性能等之间的关系进行了大量的研究。为使数值方法更加准确,在有限元分析过程中设定了复杂的孔隙形态参数,包括涂层总体孔隙度、孔隙大小、孔隙长径比和孔隙角度等,研究不同微观结构孔隙对热障涂层性能造成的影响。

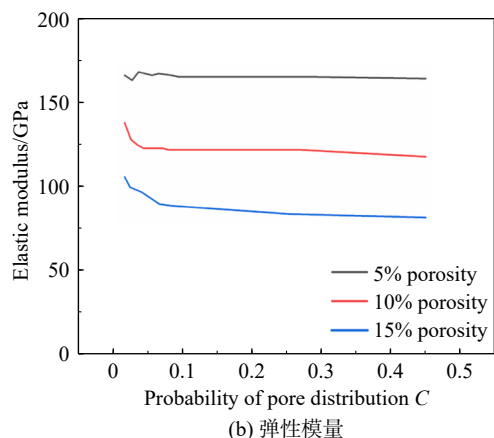
Wang 等^[45]基于孔隙均匀分布的有限元计算模型分析孔隙的倾斜角度、纵横比及体积大小对隔热性能的影响,但局限性在于模型较为理想化没能将孔隙随机分布的特征体现出来;对于 TBC 建立周期阵列的多孔结构几何模型也无法进一步测算传热路径等信息^[46-47]。Cui 等^[48]通过分析 APS 的 YSZ 热障涂层,得出了在低孔隙率(1%~5%)状态下涂层孔隙分布对孔隙周围温度场、热流密度的影响,暂未考虑更高孔隙率的情况。

Sun 等^[49]基于 ABAQUS 和 MATLAB 随机生成的复杂多孔微观结构研究真实孔隙微观形貌与 TBC 热力学性能之间的关系,引入孔隙分布概率 C ,即在相同孔隙率下,分布概率越大,单独孔隙体积越小、孔隙数量越多、分布越密集。研究总体孔隙率、孔径、孔长比、孔隙角度等参数对热导率和弹性模量的影响。由图 5 可知小孔径使涂层的保温性能和热力学性能更佳:热导率会随着孔隙率的增大而降低,当孔隙率在 10% 以内时则几乎不受孔径尺寸的影响;弹性模量同样随着孔隙率的增大而减小,但对于微小的孔径更加敏感;当分布概率大于 0.1 后对结果的影响减弱。

当总的孔隙率不变时,孔隙体积越小则说明孔分布密度越高,对热流阻挡效果更好;孔隙角度对于涂层性能的影响很大,当小孔以 0° 方向分布时可以增大热流在热梯度方向的换热路径,使

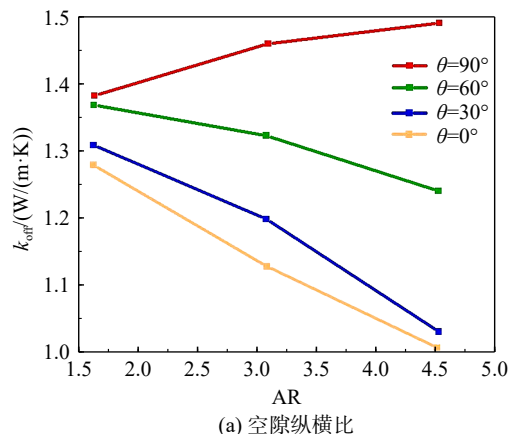


(a) 热导率

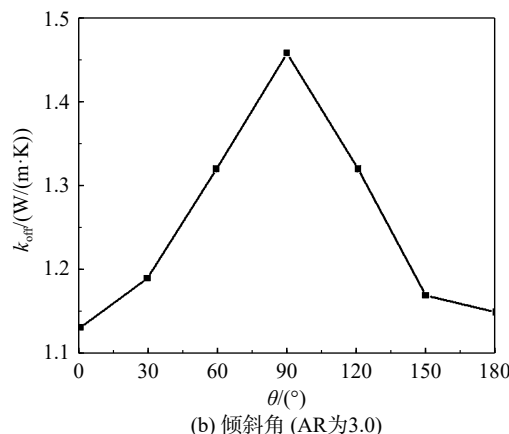
图 5 不同孔隙率下, 热导率和弹性模量随孔径的变化^[49]Fig. 5 Evolution of thermal conductivity and elastic modulus with pore size at different porosities^[49]

TBC 热导率最低、弹性模量最大, 但以 90° 分布时则相反(见图 6)。

刘阳等^[50]着重研究了孔隙的随机分布问题, 基于 ABAQUS 和 Python 的二次开发建立更加接近真实情况的孔隙随机分布模型, 采用控制变量方法计算孔隙特征参数对 TBC 隔热性能的影响。如图 7 可见(图中 k_{eff} 为有效热导率), 孔隙倾斜角 θ 、孔隙纵横比(aspect ratio, AR)与隔热性能呈正相关, 当孔呈 90° 分布时由于平行于热流方向而导致隔热性能降低, 这与文献^[51]得到的结果是一致的。尽管高孔隙率涂层的工作寿命要比精密



(a) 空隙纵横比



(b) 倾斜角 (AR为3.0)

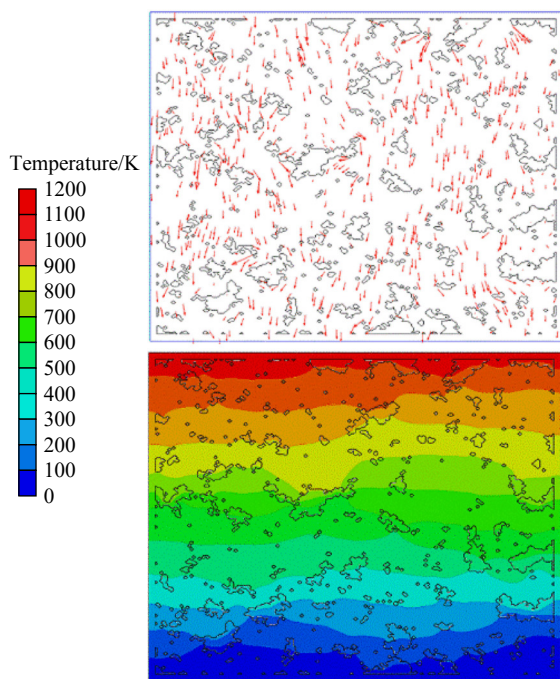
图 7 孔隙纵横比和倾斜角对有效热导率的影响^[50]Fig. 7 Effect of pore aspect ratio and pore tilt angle on thermal conductivity of coating^[50]

涂层的工作寿命提高一倍, 但是当黏结层也含孔隙时反而会促进微裂纹的萌生与拓展, 尤其是孔隙分布在靠近涂层表面的位置时还会引起应力集中^[51-52]。

2.2 温度、应力分布

在研究局部区域对 TBC 性能影响之余, 也应对其实际工况下的整体性能有所分析, 例如分析涡轮叶片在高温下的应力场、温度场分布可以对 TBC 性能优化、可靠性分析起到重要作用, 与孔隙等微观结构的研究相互促进。

史丽萍等^[53]利用 ANSYS 中生死单元法模拟 EB-PVD 制备过程的逐层沉积过程, 分析发现制备时金属/陶瓷体系的残余应力要大于金属/金属体系, 通过提高基体预热温度能够减小轴向的残余应力。赵运才等^[54]同样利用此方法建立了 PS 喷涂过程直接热-力耦合的有限元模型, 对喷涂时每一层涂层的温度场和应力场进行分析: 随着沉积层的增多, 涂层温度迅速升高, 可能会造成涂层表面烧损; 在反复经历多次高温循环后, 喷涂端面的热量积累增多, 容易造成应力集中, 对减

图 6 热流路径及温度分布^[49]Fig. 6 Heat flow path and temperature distribution^[49]

小残余应力不利。

然而诸多关于涂层热导率的研究都集中在其内部孔隙、微裂纹等影响因素,忽略了界面的影响。界面作为材料中的重要组成,当处于高温环境下时,晶界、晶相界面以及层界面都会发生改变,影响隔热性能。Wang 等^[55]通过实验验证了 TBC 内部存在界面热阻后建立多种不同热阻的有限元模型计算涂层隔热性能的差异,分析界面特征对传热行为的影响:随着界面粗糙度的增加,隔热性能降低,而界面面积的增大却可以提高隔热性能,所得结果与实验基本吻合。

段力等^[56]基于有限元方法分析固体热传导过程中的温度特性,以覆有层状 TBC 的圆柱体模型作为研究对象分析航空发动机叶片内、外表面边界条件与隔热性能之间的关系,但其模型较为简单存在一定局限性。Tenango 等^[57]建立三维的涡轮叶片模型,基于流-固耦合计算出叶片上温度场和应力场,局限性在于整个叶片模型是实心的。实际上叶片表面布满了气膜冷却孔,在降低基体温度方面其与 TBC 共同发挥关键作用,冷却孔形状不同所产生的应力也大不相同,几何形状过于复杂的孔反而会造成热障涂层提前脱落,所以有必要构建更细致的模型进行有限元分析^[58-59]。Liu 等^[60]同样建立三维涡轮叶片模型,基于流-固耦合计算出叶片的温度场和应力场,预测危险区域并研究气膜孔几何形状对涂层隔热性能和热应力分布的影响:TBC 能够显著降低叶片的表面温度,其隔热性能随涂层厚度的增大而增大,随气膜冷却效率、热导率的增大而减小;叶片表面最大主应力位于孔的近表面区域,这是由于气膜孔增加了温度梯度,导致热应力集中在其附近。

刘建华等^[61]建立含气膜孔的复杂三维叶片模型后基于热-流耦合计算叶栅流场中 TBC 温度分布、热应力以及 TGO 热生长,根据结果直观看

到叶片表面高温区域集中在叶盆、叶背中后部以及端部进气侧边缘。而且高温工作初期涂层热应力区的面积更广,更易发生早期开裂,随着高温累积使合金出现蠕变和塑性行为才逐渐缓解了涂层内部的应力集中;陶瓷层在叶身处应力集中出现在叶盆和叶背的近尾缘区域、叶背最大曲率处以及进气边靠近两端的气膜孔区域;端壁处的应力集中初期主要出现在叶栅入口处的进气侧边缘,随着高温的累积主要集中在了上端壁的气膜孔区域。

刘志远等^[62]基于真实的涡轮叶片进行有限元建模,将叶片分为流体域、固体域两部分,生成稀疏不同的四面体网格,函数中加真实材料参数计算得到了叶片的整体温度场和应力场。

如图 8、图 9 所示,能够直观看出热障涂层易发生剥落的危险区域在叶盆中部、前缘气膜孔等位置。分析叶片尾缘顶部气温的升高是因为压力

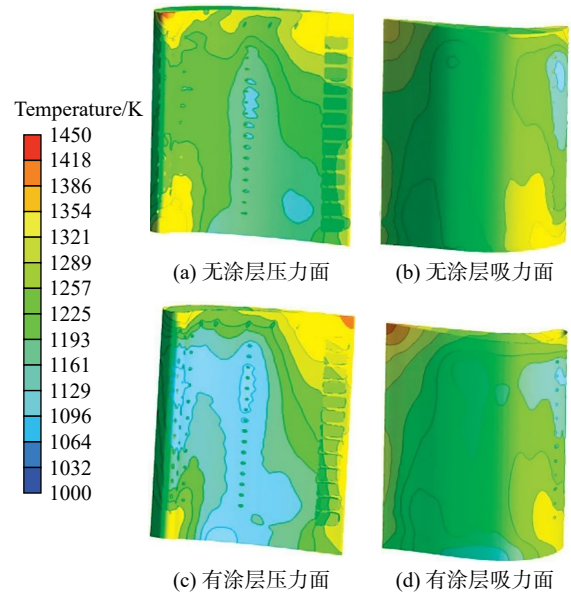
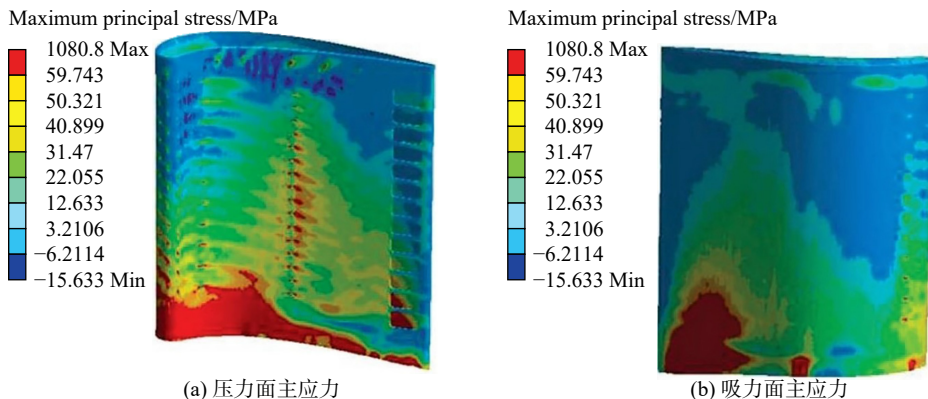
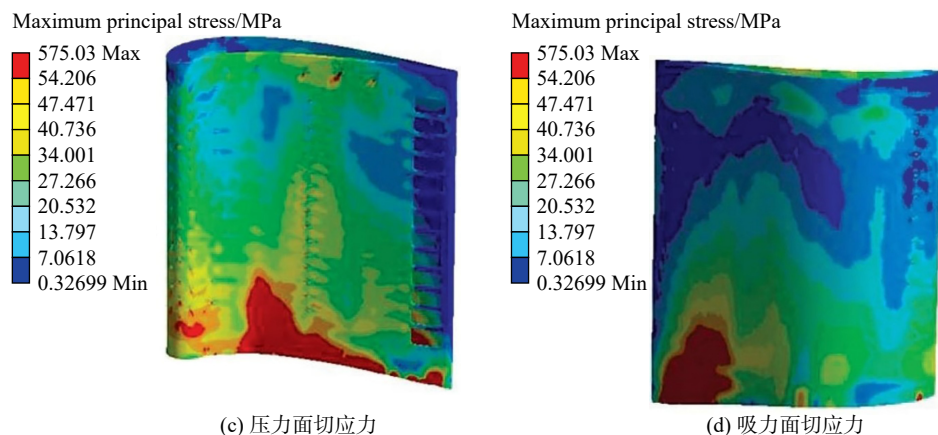


图 8 涡轮叶片温度分布^[62]

Fig. 8 Temperature distribution of turbine blade^[62]



图 9 涡轮叶片应力分布^[62]Fig. 9 Stress distribution of turbine blade^[62]

面气流温度较低,涂层反而起副作用阻碍了散热;而涂层应力沿着叶高方向逐渐降低则是因为离心力对叶片的应力分布影响较大。

在实验过程中,由于无法保证每一批样品的内部结构都完全相同,因而很难去分析孔隙的大小、位置、方向等因素对涂层隔热性能的影响,对于 TBC 整体温度、应力分布更是无法实时监测,需要借助有限元方法才能很好地推进这些研究方向上的发展,从理想化的模型到拥有复杂内外构型的模型,有限元分析的结果也越来越贴合实际,具备了更好的参考价值。

3 TBC 性能优化与监测

失效问题极大地影响着 TBC 稳定性及性能发挥,近年来研究人员在温度分布、应力分布、高温氧化等相关问题的研究基础上,开始对结构和性能进行优化,研发更加先进可靠的高性能 TBC。而实际涡轮叶片的内部结构非常复杂,对其材料、结构等进行创新性的优化改造时一般先借助有限元软件进行计算与验证,为后续深入研究指明方向,对于可实行的思路再进一步安排加工和实验做综合性能测试,对优化结果进行评判,能够提高研究效率、降低研发成本。此外,通过建立预测工作寿命的有限元模型,还可对服役寿命等进行分析和推断,为实际工作环境下 TBC 性能的充分发挥、航空发动机的稳定工作提供帮助和借鉴。

3.1 表面结构优化

传统 YSZ 材料经过多年的发展和应用已经非常成熟,但当温度超过 1 200 °C 后会出现烧结等问题导致其力学性能降低,而且随着温度进一步升高,稳定性会迅速下降、寿命急剧减少^[63-64]。

对于日益提升的发动机进口温度,需要通过研发更高性能的 TBC 材料、采用双陶瓷层 TBC 或者对陶瓷层表面进行改性等方法来应对需求。

双陶瓷层 TBC 材料选择大多以 YSZ 作为内部陶瓷层,以热导率更低、相稳定性更好的锆酸镧($\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, LZ)、 LZ_7C_3 、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 等材料作为顶层,能够延长 TBC 热循环寿命^[65-66]。但是受到热不匹配的影响,多层结构在冷热循环过程中残余应力会更大,需要利用数值计算方法去分析其内部的裂纹拓展、应力分布等问题。

Han 等^[67]建立双陶瓷层 TBC 有限元模型,在 8YSZ 层上覆盖 LZ_7C_3 为顶层并设定两陶瓷层的厚度同为 150 μm ,接触面则以半径 $r=15 \mu\text{m}$ 的周期性半圆波代替 PS-TBC 的粗糙界面,着重研究两层性能之间的联系:顶层所受应力大小与内层体膨胀系数相关,当内部陶瓷层的体膨胀系数处于 $10.35 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \sim 10.887 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 之间时, TBC 内部残余应力最小。实验表明,两陶瓷层之间的厚度比对热循环性能有很大影响,当内部拉应力累积到一定程度后会直接造成涂层失效^[68-69]。Chen 等^[70]以 LZ 双陶瓷层 TBC 为研究对象,设置 YSZ-TGO 与 LZ-YSZ 的界面为理想余弦曲线,对两组不同厚度 YSZ 涂层的性能进行分析:YSZ-TGO 界面形貌会影响 LZ-YSZ 界面的应力分布,界面粗糙度增大会改变最大拉应力的位置甚至会使拉应力转化为压应力,但当 YSZ 层较厚时这种影响会迅速减小并可忽略不计;而且计算过程中还发现,在一定的界面振幅下存在波长临界值使最大拉应力不再出现于界面峰值处,为此研究了临界波长与 YSZ-TGO 界面幅值之间的函数关系并阐明了可能的失效机制,为进一步研究提供了

参考。

关于涂层材料结构的优化上, Abbas 等^[71] 分别对传统结构和纳米结构 YSZ 的 TBC 性能进行了对比分析, 在进行有限元计算时假设热-力耦合过程中材料为各向同性, 结果表明纳米结构的 YSZ 涂层内部轴向、径向拉伸应力都要低于传统 YSZ 涂层, 能够有效降低应力对 TBC 的影响。实验结果也证实了纳米结构的 YSZ-TBC 具有更低的平面径向拉应力、较高的断裂韧性以及更好的抗热震能力^[72]。

关于涂层表面改性的研究中, 宋振飞等^[73] 模拟强流脉冲电子束对 EB-PVD 制备的 TBC 表面进行重熔改性, 在保持良好韧性和抗高温疲劳性能的同时使涂层耐腐蚀性能明显提高; 并且重熔后的表面粗糙度有了明显改善, 使涂层耐磨性能也有所提高, 结论与实验结果较为吻合, 成功实现了柱状晶的封顶。王曼莉^[74] 在研究电子束对涂层表面改性的过程中利用 COMSOL 建立传热模型, 将 TBC 内孔隙特性转化为密度问题并在孔隙中填充理想气体, 基于材料的真实物性参数分别通过等效法和耦合法测算了涂层表面在电子束作用下的重熔深度、温度梯度以及涂层内部传热情况等, 得到电子束作用时间、功率密度等参数对重熔深度、温度梯度的影响, 为试样表面进行实验操作提供了重要参考。

3.2 寿命预测

TBC 长时间服役于恶劣的工作环境中且失效形式非常复杂, 由机械应变引起的循环损伤积累或是长时间热暴露造成的氧化等原因, 使其工作寿命很难达到预期且直到现在也仍未完全探明失效机理。考虑到其稳定性对航空发动机性能发挥起着决定性的影响, 一旦发生剥落等失效会使合金基体直接暴露于高温热流当中, 因此有必要对 TBC 的工作寿命进行预测。这项任务不仅关系到其工作的可靠稳定也是出于对成本等的考虑, 所以需要研究人员将理论、实验以及数值计算等方法相互结合, 研发可靠的工作寿命预测模型并不断优化预测的准确度, 为涡轮叶片等关键部件的安全、稳定工作提供参考。

在早期, Cruse 等^[75] 将 TBC 寿命等同于循环塑性应变与单次循环失效应变比值的基础上结合热循环实验、热力学实验在数值计算方法中加入氧化物生长、蠕变的影响, 提出了一个经验型的预测公式; Miller^[76] 基于 TGO 厚度、弹性应变、体

膨胀系数不匹配以及经验指数等设计出了应用于工业设计的分析性寿命预测模型; Renusch 等^[77] 基于等温氧化和循环氧化下裂纹的生长情况, 建立了寿命预测方程; Beck 等^[78] 根据 TGO 厚度和生长应力、烧结、热应力等参数建立了寿命预测模型; Busso 等^[79] 开发出寿命预测软件, 主要通过测算 TBC 的应力分布来推测其剩余工作寿命; Vassen 等^[80] 基于高温氧化下裂纹的增长情况, 通过比较计算涂层规格、内部能量释放率来建立寿命预测模型。

随着对于寿命理论计算、TBC 失效机理的研究越来越深入, 对其进行工作寿命预测有了更好的针对性。魏洪亮等^[81-82] 基于黏塑性本构模型, 在加入 TGO 厚度、形貌等参数的基础上结合疲劳累积损伤理论, 在实时氧化过程中建立了寿命模型, 能够体现氧化损伤与热疲劳损伤的耦合效应; 姚玉东等^[83-84] 在研究多种应力应变形式对 TBC 寿命的影响后根据实验结果建立了二维对称有限元模型, 将涂层界面简化为余弦曲线并结合线性疲劳累积理论、Manson-Coffin 低周疲劳模型以及遗传算法, 研究涂层各结构厚度以及余弦界面幅度与波长对 TBC 寿命的影响, 计算得出波长 λ 随陶瓷层厚度增加而上升、随黏结层厚度增加而下降(如图 10), 同时给出了在不同涂层厚度下达到寿命极值的波长、幅度选取公式, 对长寿命 TBC 的结构设计与研发有重要意义。Guan 等^[85] 在进行 TBC 寿命预测的过程中, 基于流动-热-结构耦合方法并结合氧化损伤、热疲劳损伤等理论, 创新性地建立了主从模型并将其推广到实际涡轮叶片结构, 通过对比实验结果验证了模型的可靠性, 尤其在预测发动机叶片前缘、后缘关键点部位的涂层温度和生命周期方面具有较高的计算精度和效率。

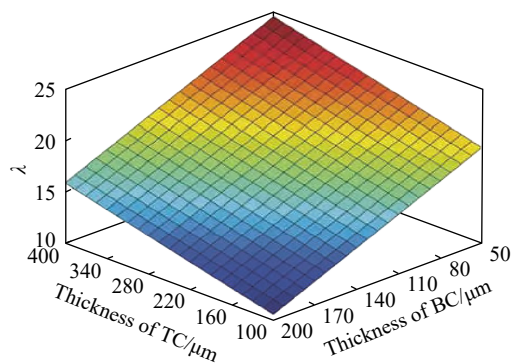


图 10 波长 λ 随陶瓷层和黏结层厚度的变化^[83]

Fig. 10 Wavelength λ variation with TC and BC thickness^[83]

关于 TBC 工作寿命的预测有了长足的发展,从早期提出经验公式到如今结合实际构件建立预测模型已经取得了很大的进步。然而实际工作情况非常复杂存在不确定性因素,诸多失效机理也尚未研究清晰,对于工作寿命的预测主要还是进行针对性的研究,未来要进一步研究对于 TBC 整体性能评估的方法,不断优化热-力-机械等多物理场耦合算法等方法提高准确性,使预测结果更加可靠;或者将失效问题转化为寻优问题,模拟不同结构、厚度等参数下 TBC 对寿命的影响,为实验操作开拓新思路。

4 总结与展望

有限元方法发展到今天已经在 TBC 领域的研究中得到了成熟的应用,尤其在实验手段难以开展的问题上更是频繁地利用有限元计算为实验方法提供思路;当实验技术取得突破后又能够为数值计算提供更确切的参数,两者互相促进、相辅相成。基于真实数据和多物理场的耦合计算能够模拟 TBC 各个工作阶段,对一些关键问题如 TGO 生长行为、微裂纹拓展、TBC 整体温度、应力分布情况等研究中能够很直观地给出结果,既补充了实验方法的空白,也为性能优化研究奠定基础,以这些关键点为突破口来提升 TBC 的综合性能并对提升程度作出定性分析;同时还能够在这些研究基础上构建 TBC 寿命预测模型,充分保证其性能的稳定发挥。

诚然,数值模拟手段也有其局限性:①观测实际工作环境中服役后的构件可以发现 TBC 各层的界面以及 TGO 层是没有规律的复杂曲面,粗糙度不一致且厚度分布也不均匀,与模型中平滑的正弦、余弦型曲线有较大差别;②对于高温环境下 TGO 氧化生长行为还没有完整地研究,所以模拟计算过程中建立氧化增厚模型公式对于 TGO 的厚度增长会有一定的计算偏差,或者对于较厚的 TGO 只能做简化处理;③热端部件在高温下工作会产生热变形及热应力,要考虑材料的非线性问题,进行热-力耦合等计算,如今复合材料的使用越来越普遍,仅靠线性计算理论已经不足以解决遇到的问题,需要采用非线性有限元算法并结合多物理场进行分析才能解决;④随着温度的改变,TBC 内部各组分的物性参数(如弹性模量、蠕变特性等)大多都会随着温度发生改变,但是由于高温环境下实验手段难以获取实时的材料参数,

只能在模拟计算时进行简化。

所以目前模拟研究与实际结果还存在一定差距,之后要进一步对模型的细节作出优化,以更加拟合的函数来代替常数,充分考虑 TBC 内外部材料各项性质变化,融合多物理场耦合分析,在局部问题研究清晰后开展 TBC 整体综合性能的研究,并将实际工况下高温高速气流冲击、环境沉积物($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, CMAS)腐蚀等关键影响因素融入计算,使结果更加具有参考价值。未来对 TBC 的研究方向包括但不限于以下几个方面:

1) 动态模拟研究: TBC 研究中有关裂纹萌生与拓展的机理同样需要更深入地研究,可以通过拓展有限元方法、虚拟裂纹闭合技术等对裂纹生长的动态过程作进一步计算。

2) 纳米涂层技术: 如今纳米材料的研发进行得如火如荼,对于纳米结构的 YSZ 或其他陶瓷层材料在性能和稳定性等方面有待进一步研究。

3) 丰富有限元模型: 随着新型制备技术的出现,如 PS-PVD(等离子-物理气相沉积)技术相比 EB-PVD、PS 技术制备的涂层,热流传导方式等会发生改变,在模拟计算时需要针对性地建立模型分析涂层结构对计算结果的影响。

4) 开发可视化模块: 通过结合不同的寿命预测理论,开发可视化模块并融合到有限元计算方法中,能使分析过程更加方便快捷。

5) 结合无损检测技术: 利用有限元方法对 TBC 的探伤与无损检测进行辅助分析,比如掺杂稀土元素后,TBC 内部损伤对于激光照射后的表征会出现某些方面的变化,通过数值模拟结果可以为实验方法建立一定的依据。

参考文献:

- [1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. *Science*, 2002, 296 (5566): 280-284.
- [2] 王博, 刘洋, 王福德, 等. 航空发动机及燃气轮机涡轮叶片热障涂层技术研究及应用[J]. *航空发动机*, 2021, 47(增刊 1): 25-31.
WANG Bo, LIU Yang, WANG Fude, et al. Research and application of thermal barrier coatings for aeroengine and gas turbine blades [J]. *Aeroengine*, 2021, 47(Suppl. 1): 25-31. (in Chinese)
- [3] 温泉, 李亚忠, 马意文, 等. 热障涂层技术发展[J]. *航空动力*, 2021(5): 60-64.
WEN Quan, LI Yazhong, MA Yiwen, et al. Development of thermal barrier coating technology[J]. *Aerospace Power*, 2021(5): 60-64. (in Chinese)
- [4] 郭洪波, 魏亮亮, 张宝鹏, 等. 等离子物理气相沉积热障涂

- 层研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(22): 26-31.
- GUO Hongbo, WEI Liangliang, ZHANG Baopeng, et al. Study on plasma spray-physical vapor deposition thermal barrier coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 26-31. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 周洪, 李飞, 何博, 等. 热障涂层材料研究进展[J]. *材料导报*, 2006, 20(10): 40-43.
- ZHOU Hong, LI Fei, HE Bo, et al. Research progresses in materials for thermal barrier coatings[J]. *Materials Review*, 2006, 20(10): 40-43. (in Chinese)
- [7] 牟仁德. 热障涂层隔热性能研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2007.
- MOU Rende. Study on thermal insulation performance of thermal barrier coating[D]. Beijing: Beijing Institute of Aerospace Materials, 2007. (in Chinese)
- [8] 彭春玉. 氧化钇稳定氧化锆涂层的研究现状[J]. *广州化工*, 2019, 47(13): 44-46.
- PENG Chunyu. Research progress on failure mechanism of thermal barrier coating[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(13): 44-46. (in Chinese)
- [9] 李政. 大气等离子喷涂纳米 5wt. %YSZ 和 8wt. %YSZ 涂层的组织与性能研究[D]. 辽宁 大连: 大连海事大学, 2020.
- LI Zheng. Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma Sprayed 5wt. %YSZ and 8wt. %YSZ Nanostructured Coatings[D]. Dalian Liaoning: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [10] RANJBAR-FAR M, ABSI J, MARIAUX G, et al. Simulation of the effect of material properties and interface roughness on the stress distribution in thermal barrier coatings using finite element method[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(2): 772-781.
- [11] ERIKSSON R, SJOSTROM S, BRODIN H, et al. TBC bond coat-top coat interface roughness: influence on fatigue life and modelling aspects[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 236: 230-238.
- [12] AHRENS M, VABEN R, STOVER D. Stress distributions in plasma-sprayed thermal barrier coatings as a function of interface roughness and oxide scale thickness[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 161(1): 26-35.
- [13] BASU S N, YE G, KHARE R, et al. Dependence of splat remelt and stress evolution on surface roughness length scales in plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, 27(2): 479-484.
- [14] GUPTA M, SKOGSBERG K, NYLEN P. Influence of topcoat-bondcoat interface roughness on stresses and lifetime in thermal barrier coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(1): 170-181.
- [15] MORIDI A, AZADI M, FARRAHI G H. Thermo-mechanical stress analysis of thermal barrier coating system considering thickness and roughness effects[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 243: 91-99.
- [16] OLSSON M, GIANNAKOPOULOS A E, SURESH S. Elastoplastic analysis of thermal cycling: ceramic particles in a metallic matrix[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1995, 43(10): 1639-1671.
- [17] EVANS A G, MUMM D R, HUTCHINSON J W, et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(5): 505-553.
- [18] HE M Y, EVANS A G, HUTCHINSON J W. The ratcheting of compressed thermally grown thin films on ductile substrates[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(10): 2593-2601.
- [19] AMBRICO J M, BEGLEY M R, JORDAN E H. Stress and shape evolution of irregularities in oxide films on elastic-plastic substrates due to thermal cycling and film growth[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(9): 1577-1588.
- [20] HE M Y, HUTCHINSON J W, EVANS A G. Large deformation simulations of cyclic displacement instabilities in thermal barrier systems[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(5): 1063-1073.
- [21] KARLSSON A M, EVANS A G. A numerical model for the cyclic instability of thermally grown oxides in thermal barrier systems[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(10): 1793-1804.
- [22] KARLSSON A M, LEVI C G, EVANS A G. A model study of displacement instabilities during cyclic oxidation[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(6): 1263-1273.
- [23] KARLSSON A. A fundamental model of cyclic instabilities in thermal barrier systems[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2002, 50(8): 1565-1589.
- [24] KARLSSON A, HUTCHINSON J, EVANS A. The displacement of the thermally grown oxide in thermal barrier systems upon temperature cycling[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 351(1/2): 244-257.
- [25] BUSSO E P, QIAN Z Q. A mechanistic study of microcracking in transversely isotropic ceramic-metal systems[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(2): 325-338.
- [26] BUSSO E P, QIAN Z Q, TAYLOR M P, et al. The influence of bondcoat and topcoat mechanical properties on stress development in thermal barrier coating systems[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(8): 2349-2361.
- [27] BUSSO E P, EVANS H E, QIAN Z Q, et al. Effects of breakaway oxidation on local stresses in thermal barrier coatings[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(4): 1242-1251.
- [28] DING Jun, LI Fengxun, KANG K J. Numerical simulation of displacement instabilities of surface grooves on an alumina forming alloy during thermal cycling oxidation[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23(8): 2308-2319.
- [29] LEE S S, SUN S K, KANG K J. *In-situ* measurement of the thickness of aluminum oxide scales at high temperature[J]. *Oxidation of Metals*, 2005, 63(1): 73-85.
- [30] KANG K J, MERCER C. Creep properties of a thermally grown alumina[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 478(1/2): 154-162.
- [31] SHARMA S, KO G, KANG K. High temperature creep and tensile properties of alumina formed on FeCrAlY foils doped with yttrium[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, 29(3): 355-362.
- [32] MERCER C, HOVIS D, HEUER A H, et al. Influence of thermal cycle on surface evolution and oxide formation in a superalloy system with a NiCoCrAlY bond coat[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202(20): 4915-4921.
- [33] 李国浩, 巴德纯, 倪岩松, 等. 粘结层粗糙度对 YSZ 涂层热震性能的影响[J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 310-317, 336.
- LI Guohao, BA Dechun, NI Yansong, et al. Effect of bonding layer roughness on thermal shock performance of YSZ coating[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 310-317, 336. (in Chinese)
- [34] ROUSSEAU F, QUINSAC A, MORVAN D, et al. A new injection system for spraying liquid nitrates in a low power plasma reactor: application to local repair of damaged thermal barrier coating[J].

- Surface and Coatings Technology, 2019, 357: 195-203.
- [35] 付倩倩, 通雁鹏, 杨玉璋. 航空发动机涡轮叶片热障涂层失效分析研究[J]. 失效分析与预防, 2017, 12(6): 376-380.
- FU Qianqian, TONG Yanpeng, YANG Yuzhang. Failure analysis of thermal barrier coatings deposited on turbine blades[J]. Failure Analysis and Prevention, 2017, 12(6): 376-380. (in Chinese)
- [36] 郝勇, 齐红宇, 马立强. 高温氧化对 EB-PVD 热障涂层内部应力场分布影响的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1520-1526.
- HAO Yong, QI Hongyu, MA Liqiang. Numerical simulation of effect of high temperature oxidation on stress field distribution of EB-PVD thermal barrier coating[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(7): 1520-1526. (in Chinese)
- [37] YU Q, ZHOU Huashan, WANG Lu. Influences of interface morphology and thermally grown oxide thickness on residual stress distribution in thermal barrier coating system[J]. Ceramics International, 2016, 42: 8338-8350.
- [38] 李佐君, 梁伟, 钟舜聪, 等. TGO 及初始裂纹对热障涂层裂纹形核与扩展影响的有限元分析[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(5): 300-308, 313.
- LI Zuojun, LIANG Wei, ZHONG Shuncong, et al. Influence of TGO and initial crack on crack nucleation and propagation in thermal barrier coatings based on finite element analysis[J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, 16(5): 300-308, 313. (in Chinese)
- [39] JIANG Jishen, JIANG Lingxin, CAI Zhenwei, et al. Numerical stress analysis of the TBC-film cooling system under operating conditions considering the effects of thermal gradient and TGO growth[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 357: 433-444.
- [40] 郭惠敏, 李博, 张立群, 等. 真实 TGO 界面形貌对热障涂层界面应力的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 232-235.
- GUO Huimin, LI Bo, ZHANG Liqun, et al. Effect of real TGO interface topography on interface stress of thermal barrier coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(11): 232-235. (in Chinese)
- [41] 钟建兰, 敖波, 古玉祺. 基于真实 TGO 三维结构的热障涂层热应力分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2100-2106.
- ZHONG Jianlan, AO Bo, GU Yuqi. Thermal stress analysis on thermal barrier coatings based on real three-dimensional structure of thermally grown oxide[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(7): 2100-2106. (in Chinese)
- [42] KYAW S, JONES A, JEPSON M A E, et al. Effects of three-dimensional coating interfaces on thermo-mechanical stresses within plasma spray thermal barrier coatings[J]. Materials & Design, 2017, 125: 189-204.
- [43] SCRIVANI A, RIZZI G, BERNDT C C. Enhanced thick thermal barrier coatings that exhibit varying porosity[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 476(1/2): 1-7.
- [44] YAN Jinrong, WANG Xin, CHEN Kuiying, et al. Sintering modeling of thermal barrier coatings at elevated temperatures: a review of recent advances[J]. Coatings, 2021, 11(10): 1214.
- [45] WANG L, WANG Y, SUN X G, et al. Influence of pores on the thermal insulation behavior of thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spray[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 36-47.
- [46] GUO Xingye, HU Bin, WEI Changdong, et al. Image-based multi-scale simulation and experimental validation of thermal conductivity of lanthanum zirconate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 34-38.
- [47] YANG Ming, ZHU Yongping, WANG Xueying, et al. Effect of five kinds of pores shape on thermal stress properties of thermal barrier coatings by finite element method[J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 9664-9678.
- [48] CUI Shiyu, MIAO Qiang, DOMBLESKY J P, et al. Modeling of the temperature field in a porous thermal barrier coating[J]. Ceramics International, 2019, 45(10): 12635-12642.
- [49] SUN Fan, FAN Xueling, ZHANG Tao, et al. Numerical analysis of the influence of pore microstructure on thermal conductivity and Young's modulus of thermal barrier coating[J]. Ceramics International, 2020, 46: 24326-24332.
- [50] 刘阳, 蔡洪能, 魏志远, 等. 等离子喷涂热障涂层内孔隙对其隔热性能的影响[J]. 材料保护, 2021, 54(11): 1-9.
- LIU Yang, CAI Hongneng, WEI Zhiyuan, et al. Influence of the porosity on the thermal insulation performance of plasma sprayed thermal barrier coating[J]. Materials Protection, 2021, 54(11): 1-9. (in Chinese)
- [51] 廖红星, 宋鹏, 周会会, 等. 陶瓷层与界面孔隙率对热障涂层寿命及其失效机制的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(8): 1785-1793.
- LIAO Hongxing, SONG Peng, ZHOU Huihui, et al. Effect of porosity of ceramic-coats and interface on lifetime and failure mechanism of thermal barrier coating[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(8): 1785-1793. (in Chinese)
- [52] REZVANI RAD M, FARRAHI G H, AZADI M, et al. Stress analysis of thermal barrier coating system subjected to out-of-phase thermo-mechanical loadings considering roughness and porosity effect[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 262: 77-86.
- [53] 史丽萍, 赫晓东, 李焱. EBPVD 制备复合多层结构材料中残余应力的数值模拟[C]//中国硅酸盐学会 2003 年学术年会论文摘要集. 北京: 中国硅酸盐学会, 2003: 290.
- [54] 赵运才, 张佳茹, 何文. 基于 ANSYS 生死单元法的多层等离子喷涂体系仿真[J]. 金属热处理, 2017, 42(12): 225-231.
- ZHAO Yuncai, ZHANG Jiaru, HE Wen. Simulation of multi-layer plasma spraying system based on ANSYS element death and birth method[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(12): 225-231. (in Chinese)
- [55] WANG L, ZHONG X H, ZHAO Y X, et al. Effect of interface on the thermal conductivity of thermal barrier coatings: a numerical simulation study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 79: 954-967.
- [56] 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 turbine blades by thermal buffer coating for aero engine[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(8): 915-920. (in Chinese)
- [57] TENANGO O, JARON E L, GARCIA J C, et al. Effect of thermal barrier coating on the thermal stress of gas microturbine blades and nozzles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 66(10): 581-590.
- [58] BUNKER R S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(4): 441-453.
- [59] DAVIDSON F T, KISTENMACHER D A, BOGARD D G. Film cooling with a thermal barrier coating: round holes, craters, and trenches[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(4): 041007.
- [60] LIU Z Y, ZHU W, YANG L, et al. Numerical prediction of thermal insulation performance and stress distribution of thermal barrier coatings coated on a turbine vane[J]. International Journal of

- Thermal Sciences*, 2020, 158: 106552.
- [61] 刘建华, 刘永葆, 刘莉, 等. 气膜冷却涡轮导叶热障涂层热应力的数值模拟[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(3): 126-136.
LIU Jianhua, LIU Yongbao, LIU Li, et al. Numerical modeling of thermal stress of thermal barrier coatings on a turbine vane with film cooling structure[J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(3): 126-136. (in Chinese)
- [62] 刘志远, 肖杰, 杨丽, 等. 涡轮叶片热障涂层隔热性能和应力数值模拟[J]. *湘潭大学学报 (自然科学版)*, 2020, 42(3): 107-115.
LIU Zhiyuan, XIAO Jie, YANG Li, et al. Numerical simulation of thermal insulation performance and stress of thermal barrier coatings on turbine blades[J]. *Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(3): 107-115. (in Chinese)
- [63] VASSEN, R, TRAEGER F, STOVER D. New thermal barrier coatings based on pyrochlore/YSZ double-layer systems[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2004, 1(4): 351-361.
- [64] 张勇. 1200℃ 烧结 EB-PVD YSZ 涂层微结构演变的 TEM 表征与分析[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学, 2015.
ZHANG Yong. TEM characterization and analysis of microstructure evolution of EB-PVD YSZ coating sintered at 1200℃[D]. Xiangtan Hunan: Xiangtan University, 2015. (in Chinese)
- [65] ZHONG Xinghua, ZHAO Huayu, ZHOU Xiaming, et al. Thermal shock behavior of toughened gadolinium zirconate/YSZ double-ceramic-layered thermal barrier coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 593: 50-55.
- [66] CHENG Bo, YANG Guanjun, ZHANG Qiang, et al. Gradient thermal cyclic behaviour of $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ DCL-TBCs with equivalent thermal insulation performance[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(4): 1888-1896.
- [67] HAN Meng, HUANG Jihua, CHEN Shuhai. Behavior and mechanism of the stress buffer effect of the inside ceramic layer to the top ceramic layer in a double-ceramic-layer thermal barrier coating[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(2): 2901-2914.
- [68] SONG Yan, WU Weijie, QIN Mu, et al. Effect of geometric parameter on thermal stress generation in fabrication process of double-ceramic-layers thermal barrier coating system[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(11): 3962-3973.
- [69] DAI Hui, ZHONG Xinghua, LI Jiayan, et al. Thermal stability of double-ceramic-layer thermal barrier coatings with various coating thickness[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 433(1/2): 1-7.
- [70] CHEN Qi, HU Peng, PU Jian, et al. Interfacial interaction and roughness parameters effects on the residual stresses in DCL-TBC system with different thickness distributions[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(2): 2781-2792.
- [71] ABBAS M, GUO Hongbo, SHAHID M R. Comparative study on effect of oxide thickness on stress distribution of traditional and nanostructured zirconia coating systems[J]. *Ceramics International*, 2013, 39(1): 475-481.
- [72] WANG L, WANG Y, SUN X G, et al. Thermal shock behavior of 8YSZ and double-ceramic-layer $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying[J]. *Ceramics International*, 2012, 38(5): 3595-3606.
- [73] 宋振飞, 秦颖, 郝胜智, 等. 强流脉冲电子束热障涂层表面改性温度场数值模拟[J]. *真空科学与技术学报*, 2008, 28(6): 522-525.
- SONG Zhenfei, QIN Ying, HAO Shengzhi, et al. Simulation of temperature field in surface modification of thermal barrier coating deposited by high current pulsed electron beam[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2008, 28(6): 522-525. (in Chinese)
- [74] 王曼莉. 电子束作用下氧化锆热障涂层传热数值模拟与实验[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
WANG Manli. Numerical simulation and experiment of heat transfer of zirconia thermal barrier coating under electron beam[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017. (in Chinese)
- [75] CRUSE T A, STEWART S E, ORTIZ M. Thermal barrier coating life prediction model development[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1988, 110(4): 610-616.
- [76] MILLER R A. Life modeling of thermal barrier coatings for aircraft gas turbine engines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1989, 111(2): 301-305.
- [77] RENUSCH D, ECHSLER H, SCHUTZE M. Progress in life time modeling of APS-TBC: Part II critical strains, macro-cracking, and thermal fatigue[J]. *Materials at High Temperatures*, 2004, 21(2): 77-86.
- [78] BECK T, HERZOG R, TRUNOVA O, et al. Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma-sprayed thermal barrier coating systems for gas turbines: Part II modeling[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202(24): 5901-5908.
- [79] BUSO E P, EVANS H E, WRIGHT L, et al. A software tool for lifetime prediction of thermal barrier coating systems[J]. *Materials and Corrosion*, 2008, 59(7): 556-565.
- [80] VASSEN R, GIESEN S, STOVER D. Lifetime of plasma-sprayed thermal barrier coatings: comparison of numerical and experimental results[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, 18(5): 835-845.
- [81] 魏洪亮, 杨晓光, 齐红宇, 等. 等离子涂层涡轮导向叶片热疲劳寿命预测研究[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(1): 1-8.
WEI Hongliang, YANG Xiaoguang, QI Hongyu. Study on thermal fatigue life prediction for plasma sprayed thermal barrier coatings on the surface of turbine vane[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(1): 1-8. (in Chinese)
- [82] 魏洪亮, 杨晓光, 齐红宇, 等. 等离子涂层热疲劳失效模式及失效机理研究[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(2): 270-275.
WEI Hongliang, YANG Xiaoguang, QI Hongyu, et al. Study of failure mode and failure mechanisms on thermal fatigue of plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 270-275. (in Chinese)
- [83] 姚玉东, 艾延廷, 关鹏, 等. 基于遗传算法的热障涂层寿命微观影响因素[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(1): 207-219.
YAO Yudong, AI Yanting, GUAN Peng, et al. Microscopic factors influencing the lifetime of thermal barrier coatings based on genetic algorithms[J]. *China Surface Engineering*, 2022, 35(1): 207-219. (in Chinese)
- [84] 姚玉东, 艾延廷, 关鹏, 等. 热障涂层热疲劳寿命预测模型研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(6): 267-274.
YAO Yudong, AI Yanting, GUAN Peng, et al. Thermal fatigue life prediction model for thermal barrier coatings[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(6): 267-274. (in Chinese)
- [85] GUAN Peng, AI Yanting, FEI Chengwei, et al. Thermal fatigue life prediction of thermal barrier coat on nozzle guide vane via master-slave model[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4357.

(编辑: 秦理曼)