两种不同热障涂层材料的隔热特性 研究



齐广峰¹,张恒超²,贺涛²,付艳丽² 1.海军装备部,陕西西安710077 2.航空工业庆安集团有限公司,陕西西安710077

摘 要:为了保证航空发动机矢量作动器在高温恶劣环境下能够正常工作,可通过在作动器外壁面增加隔热材料的方法来 提高作动器耐高温性能,为此,本文设计了两种热障涂层材料的试片,利用仿真软件FloEFD对涂有隔热涂层的试片模型进 行了数值仿真分析和试验验证。本文研究了两种不同涂层材料在不同涂层厚度下的隔热特性。研究结果表明,材料的热导 率对隔热性能的优劣起主要作用,树脂填充热障涂层较氧化锆热障涂层更有助于提升作动器的耐温性能,且在涂层厚度为 2mm时具有较高的隔热经济效益。

关键词:作动器; 耐高温; 数值仿真; 试验测试; 热障涂层

中图分类号:TH145.9

文献标识码:A

发动机性能的提高与所使用的耐高温结构材料密切相 关[1-2],随着科技的发展,发动机的压力比、进口温度、燃烧 室温度,以及转速都有了极大的提高[3],发动机的涡轮进口 温度可达到2130℃。针对高温所带来的问题,目前主要的 解决办法是提高材料的耐热等级和应用先进的冷却技 术[4-6]。提高材料的耐热等级可以通过添加热障涂层的方 式来实现,热障涂层是近几年发展起来的热防护方式,具有 隔热、节能、环保、施工简易、工期短、见效快等特点,因此得 到了广泛应用。杨明等^[7]对国内外热障涂层的制备方法进 行了归纳分析,并展望了热障涂层制备方法的发展方向,热 障涂层的制备方法主要包括大气等离子喷涂、电子束物理 气相沉积、激光熔覆、电泳沉积、液相等离子喷涂、等离子喷 涂一物理气相沉积等,目前实际生产中主要使用大气等离 子喷涂和电子束物理气相沉积两种方法。张强等[8]对飞秒 激光热障涂层气膜加工技术进行了研究,阐述了飞秒激光 与涂层和基体材料的作用原理和加工技术的研究过程及发 展现状。赵娟利等¹⁹对热障涂层材料的进展进行了研究, 并展望了热障涂层材料的未来发展趋势,在模拟研究方面, 研究多侧重于力/热学性能的预测和机理解释,且有一定的 可靠性,并成功发现了许多潜在的新型TBC材料;模拟研

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.05.009

究需要更多地综合考虑力/热学性能、热膨胀系数和结构/界 面稳定性,进行多尺度仿真的集成模拟。在试验探索方面, 开发新的制备方法以提高涂层质量。

热障涂层沉积在耐高温金属或超合金的表面,对基底材 料起到隔热作用,降低基底温度,使用其制成的产品能够在 高温下运行,提高产品正常工作时的耐温性能。热障涂层热 防护性能的优劣决定了基体器件工作性能的优劣,为了保证 航空发动机矢量作动器在高温恶劣环境下正常工作,可通过 增加隔热材料来提高作动器耐高温性能^{110-11]}。本文通过数值 仿真和试验测试的方法研究了两种不同涂层材料在不同涂 层厚度下的耐高温性能,对作动器进行耐温优化设计。

1 研究内容及方法

本文首先通过热仿真软件 FloEFD 对涂有不同隔热涂 层的钢板进行了热仿真分析,并通过试验测试,验证了仿真 分析的可靠性,最后对涂有树脂填充热障涂层和氧化锆热 障涂层材料的钢板进行了热仿真分析,得到不同涂层材料 在不同涂层厚度下的隔热特性,为进行作动器耐温优化设 计提供技术支撑。

收稿日期: 2022-11-29; 退修日期: 2023-02-10; 录用日期: 2023-03-07

引用格式: Qi Guangfeng, Zhang Hengchao, He Tao, et al. Study on thermal insulation characteristics of two different thermal barrier coating materials[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(05):67-73. 齐广峰,张恒超,贺涛,等. 两种不同热障涂层材料的隔热特性研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(05):67-73.

1.1 数值仿真及方法

1.1.1 仿真建模

仿真模型如图1所示,主要包括钢板、涂层及高温箱体

等。其中钢板和涂层的物理特性见表1。



Fig.1 Simulation model

表 1 两种涂层材料及钢板的物性参数

Table 1 Physical parameters of two coating materials and steel plates

项目	钢板	树脂填充	氧化锆
		热障涂层	热障涂层
密度/(kg/m ³)	7780	600	5280
热导率/(W/(m·K))	16	0.08	1.8
比热容/(J/(kg·K))	502	640	640

建模完成之后对计算域进行网格划分,计算域网格剖 面如图2所示。为了提高数值仿真的精度,对钢板及涂层 进行了局部网格加密,并进行了网格无关性研究,最后确定 总体网格数量约30万个。

1.1.2 边界条件

在外界环境温度为常温25℃且外部为自然对流时,钢



Fig.2 Gridding

板及涂层初始温度为25℃,箱体内设有400℃高温热源,对 涂有树脂填充热障涂层和氧化锆热障涂层的钢板进行热仿 真分析。

1.1.3 试验验证

为了验证仿真结果的可靠性,在钢板一侧涂有树脂填充热障涂层时,钢板和涂层厚度均为5mm,炉内温度为400°C时,对仿真数据和试验数据进行对比分析,具体仿真与试验参数及对比结果分别见表2和表3。

表2 仿真与试验参数 Table 2 Simulation and test parameters

涂层材料	钢板和涂层	环境	炉内
	厚度/mm	温度/℃	温度/℃
树脂填充热障涂层	5	25	400

表3 仿真与试验数据对比

Table 3 Comparison between simulation and test

项目	钢板最高温度/℃	相对误差/%	
试验	144	0.6	
仿真	147.8		

由表3可见,试验结果显示钢板最高温度为144℃,仿 真结果显示钢板最高温度为147.8℃,相对误差为0.6%,可 知仿真结果和试验结果吻合良好,由此验证仿真结果可靠。

1.2 试验测试及方法

1.2.1 试验台

试验台主要包括加热炉、试片、测温仪等。

1.2.2 试验方法

在外界环境温度为常温25℃,外部空气为自然对流,炉 内温度为400℃时对试片的结构进行了试验测试研究。

试验使用了树脂填充热障涂层和氧化锆热障涂层,首 先通过在基体表面设置黏结层,然后在黏结层表面进行等 离子喷涂。树脂填充热障涂层和氧化锆热障涂层的物性参 数见表1。树脂填充热障涂层试片和氧化锆热障涂层试片 分别如图3和图4所示。

在5mm厚钢板一侧涂覆5mm厚涂层,将涂覆涂层的一 侧紧贴于加热炉窗口处,加热炉内部升温至400℃,试片另 一侧的金属板与大气相通,并保持2h。

2 研究结果及分析

通过对涂有树脂填充热障涂层和氧化锆热障涂层的 钢板在不同涂层厚度下进行数值仿真和试验测试,得到两 种涂层材料在不同涂层厚度下对试片钢板温度的影响



图 3 树脂填充热障涂层试片 Fig.3 Resin filled thermal barrier coating test piece



图 4 氧化锆热障涂层试片 Fig.4 Zirconia thermal barrier coating test piece

2.1 不同涂层材料结果分析

2.1.1 仿真结果分析

通过对涂有相同厚度的两种热障涂层进行仿真分析, 得到两种涂层材料对试片钢板温度分布的影响。

树脂填充热障涂层和氧化锆热障涂层仿真结果如图5 和图6所示。由图5和图6可见,树脂填充热障涂层情况 下,试片钢板的最低温度为94.6℃,最高温度为147.8℃;氧 化锆热障涂层情况下,试片钢板的最低温度为138.0℃,最 高温度为239.2℃。由此可见,树脂填充热障涂层的隔热性 能优于氧化锆热障涂层。

2.1.2 试验结果分析

运用以上试验测试方法,分别对涂有树脂填充热障涂 层和氧化锆热障涂层的试片进行试验测试,如图7和图8所 示。由以上试验结果可见,树脂填充热障涂层情况下,试片 钢板的测试结果为144℃;氧化锆热障涂层情况下,钢板试 片的测试结果为183~208℃。

由以上仿真和试验结果可见,树脂填充热障涂层的隔 热性能优于氧化锆热障涂层。

2.2 不同涂层厚度结果分析

上节分析了两种涂层材料的优劣,本节针对两种涂层 材料进行了不同涂层厚度的仿真分析研究,涂层厚度分别



图5 钢板的温度分布云图(树脂填充热障涂层,时间=3000s)





图6 钢板的温度分布云图(氧化锆热障涂层,时间=3000s)

Fig.6 Temperature distribution nephogram of steel plate (zirconia thermal barrier coating)



图 7 树脂填充热障涂层试验结果 Fig.7 Results of resin filled thermal barrier coating

为 0mm、1mm、2mm、3mm、4mm、5mm、6mm。图 9 和图 10 给出了涂层厚度分别为 2mm 和 5mm 的仿真结果,其余涂层 厚度的结果见表4 和表5。

由图9和图10钢板温度分布云图可见,涂层为树脂填 充热障涂层时,在涂层厚度为2mm时,钢板的最低温度和 最高温度分别为116.78℃和191.55℃,涂层厚度为5mm时, 钢板的最低温度和最高温度分别为94.68℃和147.8℃。钢



图 8 氧化锆热障涂层试验结果 Fig.8 Results of zirconia thermal barrier coating

板最低温度和最高温度都有明显降低。

涂层为氧化锆热障涂层时,在涂层厚度为2mm时,钢板 的最低温度和最高温度分别为140.71℃和245.39℃,涂层厚 度为5mm时,钢板的最低温度和最高温度分别为138.01℃和 239.21℃。钢板最低温度和最高温度都有明显降低。

隔热层厚度从0增加到6mm时,隔热层厚度对钢板温 度的影响规律见表4和表5。涂层厚度对钢板最高温度影 响的变化规律如图11所示,钢板最高温度相对于无隔热涂 层时的相对温差系数η曲线如图12所示。



(a) 钢板的温度分布云图(树脂填充热障涂层,时间=3000s)



图9 不同涂层的温度分布云图(涂层厚度2mm)

Fig.9 Temperature distribution nephogram of different thermal barrier coatings(coating thickness,2mm)



(b) 钢板的温度分布云图(氧化锆热障涂层,时间=3000s) 图10 不同涂层的温度分布云图(涂层厚度5mm)



Table 4 Effect of resin filled thermal barrier coating				
钢板最高	相对于无隔热	增加单位涂层		
温度/℃	工况的温差系数	厚度的温降		
248.2	—	—		
220.2	11.2%	28		
191.5	22.8%	28.7		
174.0	29.9%	17.5		
156.3	37%	17.7		
147.8	40%	8.5		
141.2	43%	6.6		
	Effect of resir 钢板最高 温度/℃ 248.2 220.2 191.5 174.0 156.3 147.8 141.2	Effect of resin filled thermal ba 钢板最高 相对于无隔热 温度/°C 工况的温差系数 248.2 — 220.2 11.2% 191.5 22.8% 174.0 29.9% 156.3 37% 147.8 40% 141.2 43%		

树脂填充热障涂层的影响规律

表5 氧化锆热障涂层的影响规律

Table 5 Effect of zirconia thermal barrier coating

涂层厚度/mm	钢板最高	相对于无隔热	增加单位涂层
	温度/℃	工况的温差系数	厚度的温降
0	248.2	_	—
1	247.2	0.4%	1
2	245.3	1.1%	1.9
3	243.7	1.8%	1.6
4	241.3	2%	2.4
5	239.2	3.6%	2.1
6	237.4	4.3%	1.8

$$\eta = \frac{T_0 - T_i}{T_0} \times 100\%$$

表4

每增加1mm涂层厚度的温降ΔT随涂层厚度的变化趋







势如图13所示(i取1~6,代表隔热层厚度)。

 $\Delta T = T_{i-1} - T_i$

式中,*T_i*代表某隔热层厚度时的钢板最高温度(*i*取1~6,代表隔热层厚度)。

由表4、表5可见,对于树脂填充热障涂层,在涂层厚度为1mm时,相对于无涂层时温度降低了11.2%,在涂层厚度增加到6mm时,相对于无隔热层时温度降低了43%。对于氧化锆热障涂层,在涂层厚度为1mm时,相对于无涂层时温度降低了0.4%,在涂层厚度增加到6mm时,相对于无隔热层时温度降低了4.3%。



国12 Ш差尔奴随你还序及时又怕







由图 11~图 13 可见,涂层为树脂填充热障涂层时,钢板 的最高温度随涂层厚度的增加而降低,温差系数随涂层厚 度的增加而增加,单位涂层厚度的温降随涂层厚度的增加 整体明显呈下降趋势;而氧化锆热障涂层的变化则相对平 缓。由此得出,随着涂层厚度的增加,树脂填充热障涂层隔 热性能越明显,其隔热性能优于氧化锆热障涂层,在树脂填 充热障涂层厚度为2mm时具有较优的隔热能力。

3 结论

通过数值仿真和试验测试的方法研究了两种不同涂层 材料在不同涂层厚度下的耐高温隔热特性,由两种热障涂 层的仿真结果可以得出如下结论:

(1)钢板的最高温度随着隔热涂层厚度的增加而降低, 涂层隔热能力随着隔热涂层厚度的增加而增加。

(2)隔热特性和涂层材料的物理特性密切相关,热导率 越低,隔热性能越明显。钢板最高温度相对于无隔热涂层 时的温差系数随着厚度的增加而升高,涂层每增加1mm, 树脂填充热障涂层对隔热性能的贡献明显优于氧化锆热障涂层,前者具有较高的隔热经济效益。

参考文献

- [1] 倪萌,朱惠人,裘云,等.航空发动机涡轮叶片冷却技术综述
 [J].燃气轮机技术,2005,18(4):25-26.
 Ni Meng, Zhu Huiren, Qiu Yun, et al. Review of aeroturbine cooling technologies[J].Gas Turbine Technology, 2005, 18(4): 25-26. (in Chinese)
- [2] 徐世南,吴催生.高超声速飞行器热防护材料研究进展[J].机 械研究与应用,2018,31(5):221-223.

Xu Shinan, Wu Cuisheng. Research progress of hypersonic vehicle thermal protection material technology[J]. Mechanical Research and Application , 2018,31(5):221-223. (in Chinese)

[3] 杨冬晖,李志,刘洪静.舱外航天服被动热防护技术[J].载人 航天,2010(3):9-10.

Yang Donghui, Li Zhi, Liu Hongjing. Technology of passive control for EVA spacesuit[J]. Manned Space, 2010(3):9-10. (in Chinese)

- [4] 王佳为,郑振荣,毕月姣.飞行器热防护材料的研究现状与发展趋势[J].化工新型材料,2020,48(11):15-17.
 Wang Jiawei,Zheng Zhenrong,Bi Yuejiao.Research status and development trend of aircraft thermal protection material[J].
 New Chemical Materials, 2020,48(11):15-17. (in Chinese)
- [5] 唐见茂. 航空航天材料发展现状及前景[J]. 航天器环境工程, 2013,30(2):115-118.

Tang Jianmao. A review of aerospace materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(2):115-118. (in Chinese)

- [6] 喻成璋,刘为华.高超声速飞行器气动热预测技术研究进展
 [J].航空科学技术,2021,32(2):14-16.
 Yu Chengzhang, Liu Weihua. Research status of aeroheating prediction technology for hypersonic aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(2):14-16. (in Chinese)
- [7] 杨明,李玉华,李明. 热障涂层制备方法的研究现状[J]. 湖北 理工学院学报,2021,37(3):33-36.
 Yang Ming, Li Yuhua, Li Ming. Research review of thermal barrier coatings preparation methods[J]. Jouranl of Hubei Polytechnic University, 2021, 37(3):33-36. (in Chinese)
- [8] 张强,贺斌,田东坡,等.飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔加 工技术研究进展[J]. 航空科学技术,2018,29(2):9-12.

Zhang Qiang, He Bin, Tian Dongpo, et al. Development of gas film holes machining on turbine blades with thermal barrier coating by femtosecond laser[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(2):9-12. (in Chinese)

- [9] 赵娟利,杨岚,张成冠,等.热障涂层材料研究进展[J].现代陶 瓷技术,2020,41(3):163-164.
 Zhao Juanli,Yang Lan,Zhang Chengguan,et al. Recent progress in thermal barrier coatings[J]. Advanced Ceramics,2020,41(3): 163-164.(in Chinese)
- [10] 马杰,梁俊龙.液体冲压发动机技术发展趋势和方向[J].火箭 推进,2011,37(4):12-15.
 Ma Jie, Liang Junlong. Development trends and directions of liquid ramjet/scramjet technology[J]. Journal of Rocket Propulsion,2011,37(4):12-15. (in Chinese)
- [11] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2008.
 Yang Shiming,Tao Wenquan.Heat transfer [M].Beijing:Higher Education Press, 2008. (in Chinese)

Study on Thermal Insulation Characteristics of Two Different Thermal Barrier Coating Materials

- Qi Guangfeng¹, Zhang Hengchao², He Tao², Fu Yanli²
- 1. Naval Equipment Department, Xi' an 710077, China
- 2. AVIC Qingan Group Co., Ltd., Xi' an 710077, China

Abstract: In order to ensure that the aero-engine vector actuator can work normally under high temperature and harsh environment, the high temperature resistance performance of the actuator can be improved by adding heat insulation material to the outer wall of the actuator. Therefore, two test pieces of thermal barrier coating materials are set in this paper. The simulation software FloEFD is used to conduct numerical simulation analysis and test verification of the test piece model coated with heat insulation coating. The thermal insulation properties of two different coating materials under different coating thicknesses are studied. The results show that the thermal conductivity of the material plays a major role in the thermal insulation performance. The resin-filled thermal barrier coating is more helpful to improve the thermal resistance of the actuator than the Zirconia thermal barrier coating. Moreover, the thermal insulation brings higher economic benefit is higher when the thickness of the coating is 2mm.

Key Words: actuator; high temperature resistance; numerical simulation; test; thermal barrier coating