

采用低发射率涂层的发动排气系统红外特征实验

陈俊^{1,2}, 吉洪湖¹, 斯仁¹, 黄伟¹

(1.南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016

2.中航商用飞机发动机有限责任公司, 上海 201109)

摘要: 实验测量了涡扇发动机收敛喷管排气系统模型的红外辐射强度的分布, 比较了中心锥表面上涂覆低发射率涂层前后, 水平平面内 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°, 75°和 90°方向上在 3~5 μm 波段的红外辐射强度。结果表明: 在 0°~45°范围内, 中心锥表面涂覆发射率 ϵ 为 0.51 的涂层后排气系统的辐射强度比原型(中心锥表面 $\epsilon=0.89$) 排气系统的红外辐射有明显下降, 最大降幅约为 15%; 低发射率涂层对排气系统固体壁面辐射抑制作用明显, 而对燃气辐射几乎没有影响。

关键词: 轴对称收敛喷管; 低发射率涂层; 红外辐射

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2011)07-0395-06

Experiment of IR Suppression for Nozzle with Low Infrared Emissivity Coating

CHEN Jun^{1,2}, JI Hong-hu¹, SI Ren¹, HUANG Wei¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. AVIC Commercial Aircraft Engine CO., Ltd, Shanghai 201109, China)

Abstract: The coating with low infrared emissivity was employed to suppress the infrared radiation(IR) of axisymmetric convergent nozzle for a turbofan engine, and experimental research was conducted on the simulation test bench of turbofan engines. The infrared radiation intensity in 3~5 μm of axisymmetric convergent nozzle on the orientation of 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90° on horizontal plane was measured with and without the nozzle low infrared emissivity coating. The results show that low infrared emissivity coating can reduce the IR intensity of the nozzle by about 15%. The coating can distinctly suppress the IR radiation intensity from nozzle wall but it has little effect on IR radiation intensity of gas plume.

Key words: axisymmetric convergent nozzle, low infrared emissivity coating, infrared radiation(IR)

引言

发动机的排气系统是飞机在 3~5 μm 波段的主要红外辐射源, 降低飞机排气系统的红外辐射特征对于提高作战飞机的生存能力具有重要的意义。降低排气系统红外辐射强度的技术主要包括 3 个方面: 低发射率材料技术、降温技术和遮挡技术等。排气系统固体壁面的发射率及改变其分布能够有效地降低其红外辐射特征, 且不会影响气动性能, 如文献[1]通过计算发现降低发动机排气系统中温度相对较高的固体壁面的发射率能够有效地降低排气系统的红外辐射, 因此, 低发射率材料技术是提高隐身涂层技术成为提高战斗机的隐身性能和战场生存能力的一条重要的技

术途径^[2]。

随着红外隐身技术的发展, 已有不少学者对红外隐身涂层进行深入的研究。胡晨、徐国跃^[3]等对 3~5 μm 波段低发射率耐高温涂料进行了研究, 其结果表明该涂料的发射率约为 0.51。谷荣亮^[4]研究了红外隐身涂层的种类、基本特性和涂料实现隐身的途径。王自荣^[5]对红外隐身涂料的平均发射率进行了测试。吕建伟^[6]研究了表面发射率对飞行器红外辐射特征的影响。崔杰^[7]对低发射率材料在动力系统红外隐身中的应用进行了研究。李艳红等^[8]对影响红外隐身涂层发射率的主要因素进行了分析。

目前公开的研究成果主要集中在红外涂层本身性能的研究, 而缺乏红外隐身涂层在飞机排气系统应

用研究较少, 缺乏可信的实验数据。本文采用某型涡扇发动机排气系统的缩比模型, 通过在排气系统内中心锥壁面上涂覆低发射率涂层(涂层材料采用文献[3]中的低发射率涂料), 实验研究了红外隐身涂层对飞机排气系统红外辐射强度及其空间分布的影响。

1 实验系统

涡扇发动机的排气系统红外特征模拟实验系统如图1所示。主要由三部分组成: 内涵气流系统, 外涵气流系统, 实验段。①内涵气流系统主要包括内涵气流风机, 燃烧室, 点火和供油控制台等组成。②外涵气流系统由外涵气流风机, 外涵导气软管(4根), 外涵气流混合收敛段等组成。③实验段主要有中心锥, 支板, 收敛喷管。实验时, 内、外涵气流分别由两台高压离心风机提供, 内、外涵流量分别为 1 kg/s 和 1.2 kg/s。燃烧室为单管燃烧室, 内涵燃气的静温保持在 830 K, 外涵气流静温为 360 K, 环境温度为 301 K。在内涵进口、内涵支板、外涵进口、外涵支板、混合器内外两侧壁面、中心锥、中心锥后端面, 收敛喷管内壁面等处布置有测温热电偶。

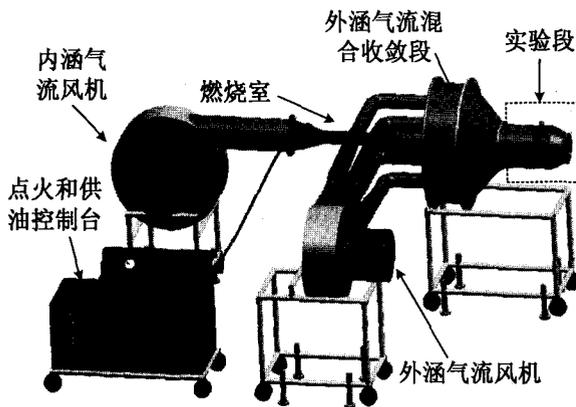


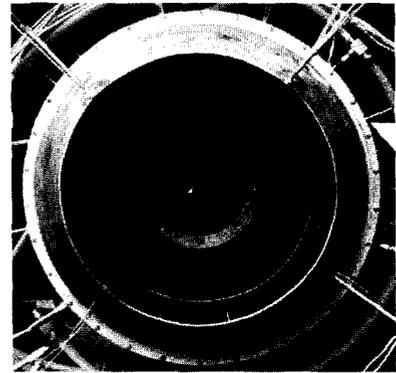
图1 实验系统图

Fig.1 The illustration of the experiment system

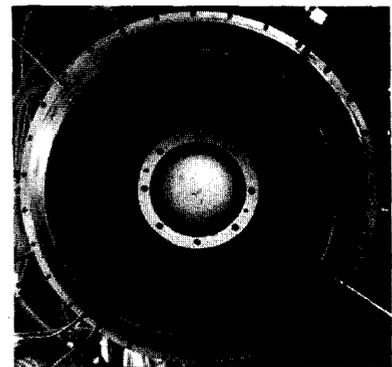
2 实验模型

本文以某型涡扇发动机收敛喷管排气系统的缩比模型为对象, 实验研究了排气系统内固体壁面发射率对其辐射特征的影响。该收敛喷管排气系统主要由中心锥、支板、喷管壁面等组成。为模拟涡轮对燃烧室明火的遮挡效果, 在排气系统内涵安装有 18 个不可旋转的可完全遮挡内涵的叶片, 因而在本实验中内涵进口截面的辐射特性用 18 个遮挡叶片所形成的固体壁面的辐射特性来表征(如图3所示)。考虑到在正后方向上, 中心锥后端面投影面积较大, 改变其壁面发射率对排气系统红外辐射的影响较大, 故本实验采用涂覆低发射率涂层降低中心锥后端面壁面发射

率的办法来研究壁面发射率对喷管红外辐射特征的影响。中心锥后端面不涂覆低发射率涂层(如图2(a)所示)时, 壁面发射率约为 0.89; 中心锥后端面涂覆低发射率涂层后(如图2(b)所示), 壁面发射率约为 0.51。



(a)中心锥后端面无涂层



(b)中心锥后端面有涂层

图2 实验喷管模型

Fig.2 Model of test nozzle

3 测试仪器

实验中采用 MR100 型傅立叶变换红外光谱仪测量喷管的红外辐射强度, 测量仪器与喷管距离为 34.5 m, 具体的测量与数据处理方法见文献[9]。本实验中喷管为轴对称喷管, 其流场具有轴对称性, 故只对水平平面内 0°~90°方向上的红外辐射进行了测量, 并研究了方向角 α 对辐射强度的影响, 方向角 α 的设置如图3所示。

4 实验结果和分析

4.1 各部件的投影面积及温度测量结果

排气系统各部件的温度及在各个探测角度上的投影面积对排气系统红外辐射特征具有决定性的影响, 一般认为, 投影面积大且温度高的部件其辐射贡献也较大。图4给出了排气系统各主要部件在 0°~90°方向上的投影面积, 表1给出了中心锥涂敷低发射率涂层前后排气系统主要部件的壁面温度。

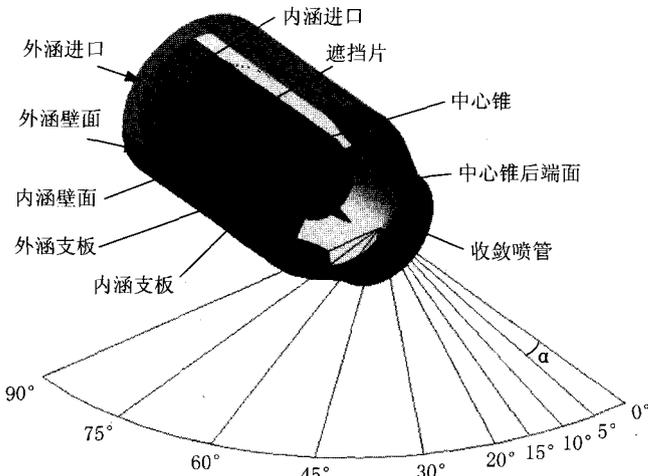


图3 排气系统模型及探测角度的设置

Fig.3 The Model exhaust system and detected angles settings

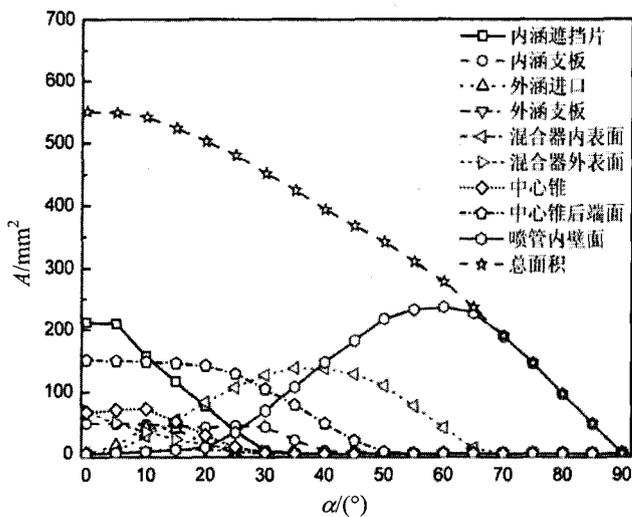


图4 排气系统主要部件投影面积随探测角的变化

Fig.4 Project area of exhaust system at different detected angles

表1 涂层前后壁面温度对比

Table 1 Compare of wall temperature with coating or not

单位: K

| | 原型排气系统 | 中心锥涂敷低发射率涂层 |
|----------|--------|-------------|
| 内涵遮挡片静温 | 800 | 800 |
| 内涵支板静温 | 767 | 765 |
| 外涵进口截面静温 | 360 | 360 |
| 外涵支板静温 | 388 | 385 |
| 混合器内表面 | 660 | 661 |
| 混合器外表面 | 600 | 599 |
| 中心锥静温 | 791 | 791 |
| 中心锥后端面静温 | 765 | 777 |
| 喷管内壁面 | 342 | 342 |

由表1可知: 内涵遮挡片(内涵截面), 中心锥,

中心锥后端面, 混合器内表面, 混合器外表面等壁面温度较高, 是排气系统内的高温部件, 也是排气系统固体辐射的主要来源。除去中心锥后端面, 涂敷低发射率涂层前后排气系统主要部件壁面温度几乎没有变化, 在涂敷低发射率涂层后, 中心锥后端面的壁面温度升高了约 12 K, 这是由于在涂敷低发射率材料后, 中心锥后端面向周围环境辐射能量减少, 导致自身温度升高。

4.2 无量纲光谱辐射强度分布

图5至图14分别给出了 $\alpha=0^\circ\sim 90^\circ$ 方向上中心锥后端面无低发射率涂层和涂有低发射率涂层时 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段内的无量纲光谱辐射强度 $I_\lambda/I_{\lambda\text{max}}$ 。其中 $I_{\lambda\text{max}}$ 是各方向上喷管所有光谱辐射强度中的最大值。(最大值出现在 $\alpha=30^\circ$ 方向上, 如图10所示)。

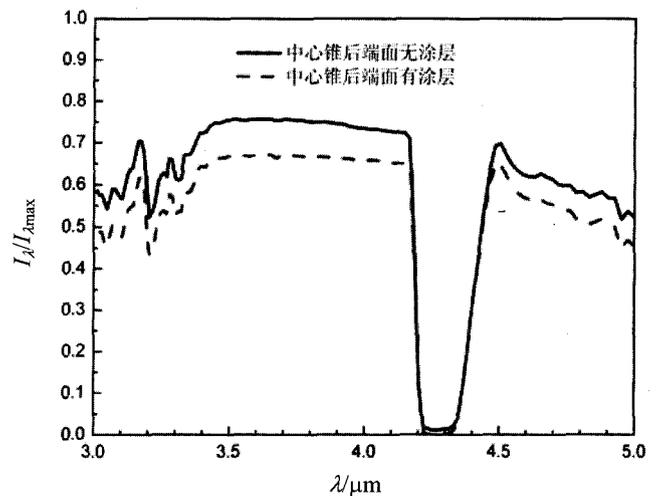


图5 $\alpha=0^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度

Fig.5 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=0^\circ$

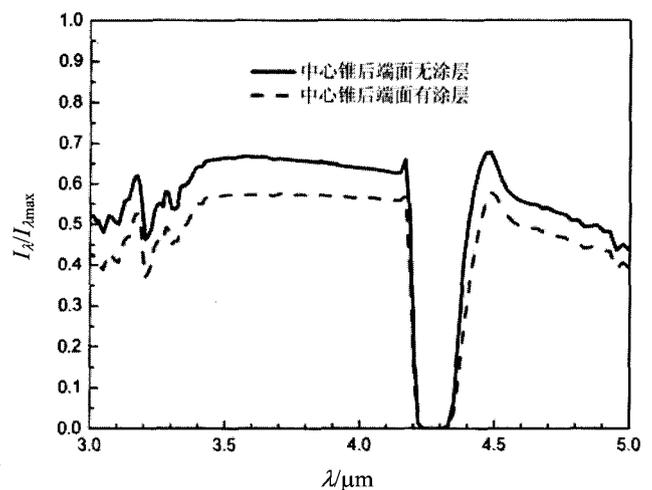


图6 $\alpha=5^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度

Fig.6 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=5^\circ$

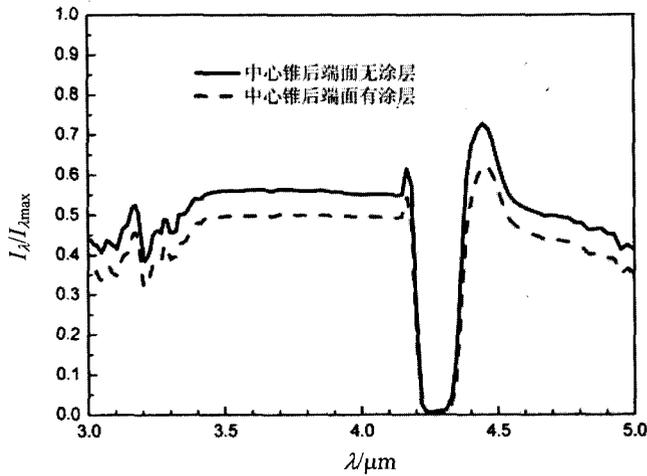


图7 $\alpha=10^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度
Fig.7 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=10^\circ$

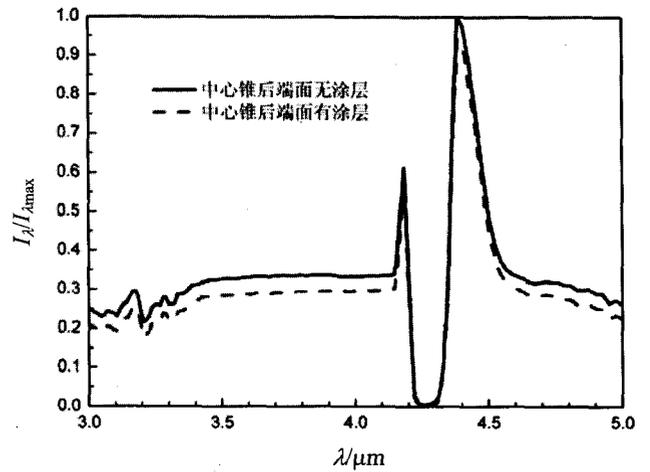


图10 $\alpha=30^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度
Fig.10 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=30^\circ$

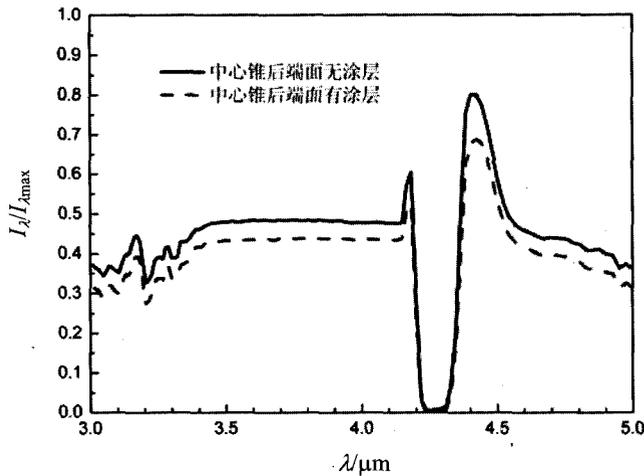


图8 $\alpha=15^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度
Fig.8 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=15^\circ$

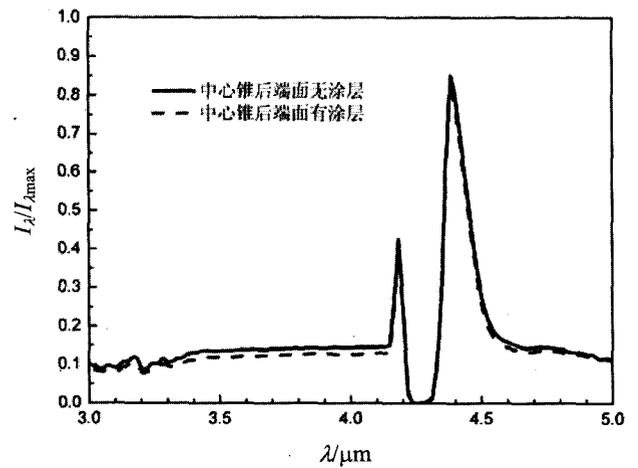


图11 $\alpha=45^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度
Fig.11 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=45^\circ$

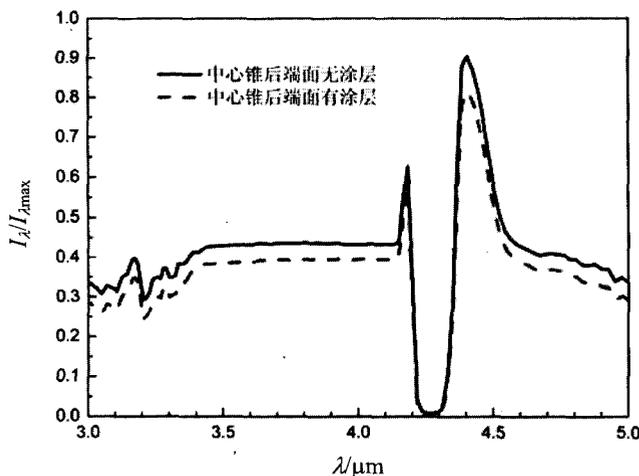


图9 $\alpha=20^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度
Fig.9 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=20^\circ$

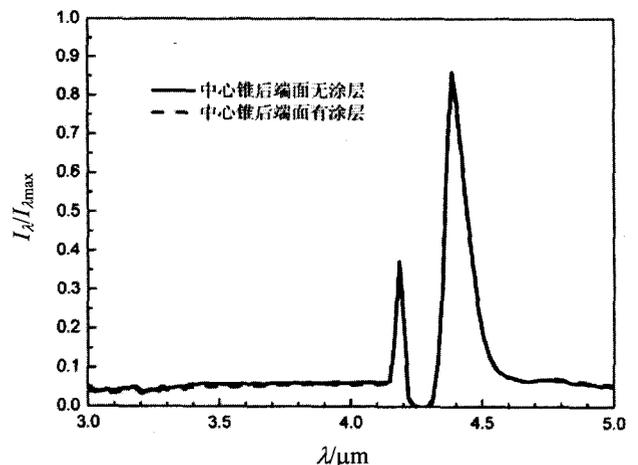


图12 $\alpha=60^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度
Fig.12 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=60^\circ$

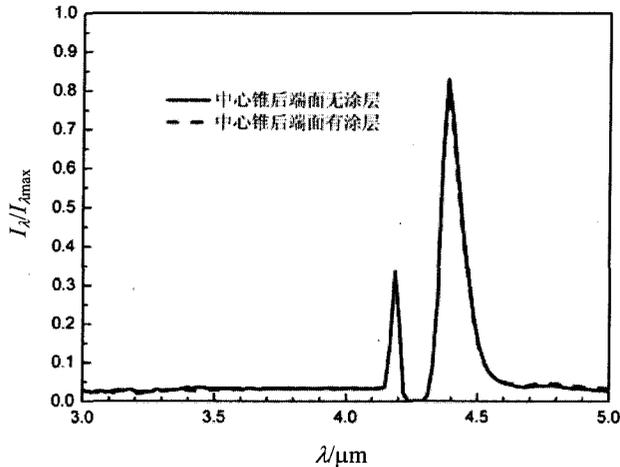


图 13 $\alpha=75^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度

Fig.13 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=75^\circ$

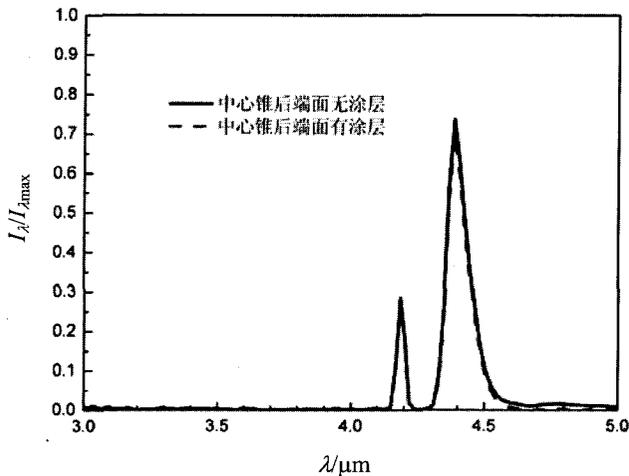


图 14 $\alpha=90^\circ$ 方向上无量纲光谱辐射强度

Fig.14 Dimensionless spectral radiant intensity on the orientation of $\alpha=90^\circ$

$\alpha=0^\circ$ 时(喷管正后方),如图5所示,中心锥后端面涂覆低发射率涂层后,排气系统无量纲红外光谱辐射强度的分布趋势和原型排气系统的光谱强度相似,但在数值上明显低于原型排气系统无量纲光谱辐射强度,且在大气吸收作用较弱的 $3.45\sim 4.16\ \mu\text{m}$ 波段范围内,光谱辐射强度减低了约14%。在 $3.0\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 和 $4.6\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 波段内,由于大气中 H_2O 的吸收作用,光谱辐射强度出现了轻微的波动;由于喷流中 CO_2 的发射作用和大气中 CO_2 的吸收作用,在 $4.39\ \mu\text{m}$ 和 $4.27\ \mu\text{m}$ 附近出现了如图所示的波峰和波谷;而在其余波段,由于大气的吸收作用很弱,表现为较平滑的曲线。

在 $\alpha=5^\circ$ 方向上,无论中心锥有无涂层,排气系统的光谱辐射强度分布都和 $\alpha=0^\circ$ 方向上的光谱辐射强度分布类似,但数值上均略小于 $\alpha=0^\circ$ 方向上的相

应值;这是因为当测量方向角 α 从 0° 增加至 5° 时,由于喷管壁面对排气系统内固体壁面遮挡,固体壁面的投影面积减小,使得固体壁面辐射的贡献减小,固体辐射强度降低;与此同时,燃气辐射增强, $4.39\ \mu\text{m}$ 处 CO_2 发射产生的波峰加宽,并且在 $4.18\ \mu\text{m}$ 附近也开始出现由 CO_2 的发射作用而产生的波峰。中心锥后端面涂覆低发射率涂层后,在大气吸收作用很弱的 $3.45\sim 4.16\ \mu\text{m}$ 波段范围内,排气系统的光谱辐射强度降低了15%。

随着探测角度增加至 $\alpha=10^\circ$,排气系统高温壁面的投影面积继续减小,特别是固体辐射贡献最大的内涵遮挡片,投影面积由 $\alpha=0^\circ$ 时的 $213\ \text{mm}^2$ 减少至 $157\ \text{mm}^2$,无论中心锥后端面有无地发射率涂层,固体壁面的辐射均降低。在 $3.45\sim 4.16\ \mu\text{m}$ 波段上,中心锥涂层后相比于原型排气系统光谱辐射强度降低了约9%;随着燃气流的投影面积增加,燃气辐射贡献增加,从而导致燃气辐射的峰值也不断增加,波峰加宽。

$\alpha=15^\circ\sim 30^\circ$ 方向上,随着探测角度 α 的增加,排气系统在 $3.0\sim 4.15\ \mu\text{m}$ 和 $4.6\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 等固体辐射为主波段上的辐射强度不断降低,且低发射率涂层导致的排气系统光谱辐射的降幅基本保持在10%左右;而在 $4.18\ \mu\text{m}$ 和 $4.39\ \mu\text{m}$ 波段处,燃气辐射峰值不断增加。当 $\alpha=30^\circ$ 时, $4.39\ \mu\text{m}$ 处 CO_2 发射产生的峰值在所有光谱辐射强度中达到了最大值,这是由于排气系统的红外辐射是由固体辐射和燃气辐射共同作用组成的,随着 α 的增加,固体辐射不断减小而燃气辐射不断增加,两者共同作用下恰在 $\alpha=30^\circ$ 方向上 $4.39\ \mu\text{m}$ 处峰值达到最大值。

当 $\alpha=45^\circ\sim 75^\circ$ 时,在 $3.0\sim 4.15\ \mu\text{m}$ 和 $4.6\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 等固体辐射为主的波段上,排气系统的无量纲光谱辐射强度约为0.1~0.02左右,且无论中心锥后端面有无低发射率涂层排气系统的光谱辐射强度差别不大,这是由于在 $\alpha\geq 45^\circ$ 方向上,内涵遮挡片、中心锥及混合器外表面等壁面投影面积为0,中心锥后端面和内涵支板面积投影面积很小,中心锥后端面涂覆低发射率材料后,喷管红外辐射强度降低幅度微弱。同时,由于燃气流的投影面积随 α 增加变化不大, $4.18\ \mu\text{m}$ 和 $4.39\ \mu\text{m}$ 波段处燃气辐射的峰值基本不变。

在 $\alpha=90^\circ$ 方向上,所有波段上的固体辐射均为0,只存在 $4.16\sim 4.21\ \mu\text{m}$ 和 $4.35\sim 4.6\ \mu\text{m}$ 波段的燃气辐射,这是因为该方向上所有排气系统内固体壁面均不存在投影面积,因而固体辐射为0。低发射率涂层对燃气流的辐射基本没有影响,因而无论中心锥后端面有无涂层,排气系统辐射强度没有变化。

4.3 无量纲积分辐射强度分布

图 15 给出了中心锥后端面有涂层和无涂层时排气系统无量纲积分辐射强度 II_{max} 分布, 其中 I_{max} 是中心锥无涂层时排气系统在 $\alpha=0^\circ$ 方向上的积分辐射强度。可见: 中心锥后端面无涂层时, 喷管的积分辐射强度分布具有典型涡喷发动机排气系统的“梨”形分布, 在 $\alpha=0^\circ$ 方向上红外辐射强度最大, 随着 α 的增加 I 迅速降低, 这是因为中心锥、支板、内涵遮挡叶片等高温壁面在 $\alpha=0^\circ$ 方向的投影面积较大其红外辐射明显大于其它固体壁面; 在 $\alpha=0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内, 排气系统固体壁面在各个方向的投影面积随着 α 的增加而减小, 虽然在 $\alpha=45^\circ\sim 75^\circ$ 范围内燃气在各个方向的投影面积随着 α 的增加而增加, 相对于固体壁面的辐射而言, 燃气的辐射是次要的。中心锥后端面涂有低发射率涂层后, 在 $\alpha=0^\circ\sim 45^\circ$ 范围内, 排气系统的积分辐射强度明显低于中心锥无涂层时的积分辐射强度; 在 $\alpha=0^\circ$ 方向上, 中心锥涂层后积分辐射强度的降幅最大, 约为 10%, 随着 α 的增加, 低发射率涂层对红外辐射抑制作用逐渐减弱, 这是因为在 $\alpha=0^\circ$ 方向中心锥等高温固体壁面的投影面积最大, 降低其壁面发射率能够有效地降低喷管的红外辐射强度。随着 α 的增加, 高温固体壁面的投影面积逐渐减小, 其对整个喷管红外辐射的贡献也逐渐减小, 降低其壁面发射率对整个喷管的红外辐射的影响也逐步的减弱; 当 $\alpha>45^\circ$ 后, 喷管内的高温固体壁面几乎全部被遮挡, 降低中心锥壁面发射率, 对喷管的红外辐射已没有影响, 中心锥涂层前后的积分辐射强度几乎相同。

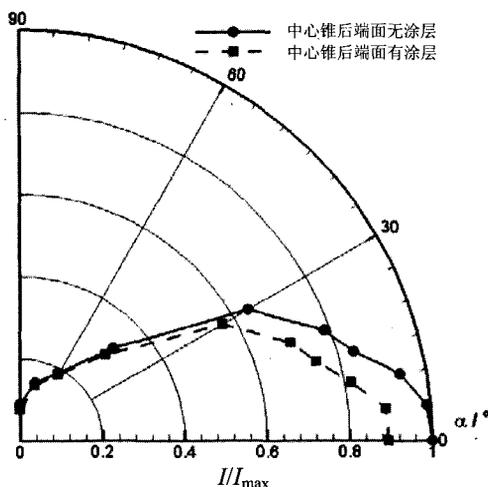


图 15 无量纲积分辐射强度

Fig.15 Dimensionless integral radiant intensity

5 结论

本文采用低发射率涂层来降低涡扇发动机收敛喷管的红外辐射, 并利用涡扇发动机模拟实验台测量了喷管中心锥后端面涂覆低发射率涂层前后喷管光谱辐射强度和积分辐射强度的分布, 得到结论如下:

1) 采用低发射率涂层可以在 $\alpha=0^\circ\sim 45^\circ$ 范围内有效降低喷管红外辐射强度, 且 $\alpha=5^\circ$ 方向喷管光谱辐射强度降幅最大, 在本文的实验条件下, 相对于无涂层时降幅约为 15%; 当 $\alpha\geq 45^\circ$ 后, 喷管中心锥后端面涂层前后其光谱辐射强度相同。

2) 中心锥后端面涂层前后, 喷管的积分辐射强度分布大体相似。 $\alpha=0^\circ$ 方向, 低发射率涂层对喷管红外的抑制作用最大, 积分辐射强度的降幅为 11%; 随着 α 的增加, 涂层对红外辐射抑制作用逐渐减弱; 当 $\alpha\geq 45^\circ$ 后, 低发射率涂层对喷管积分辐射强度没有影响。

参考文献:

- [1] 施小娟. 涡扇发动机收敛喷管红外辐射特征及反射抑制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [2] 胡传. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 121-183.
- [3] 胡晨, 徐国跃, 申星梅, 等. 3~5 μm 波段低发射率磷酸盐耐高温涂料的研究[J]. 材料保护, 2009, 42(4): 54-56.
- [4] 古荣亮, 杜江, 陈涛. 红外隐身涂层在导弹上的应用[J]. 制导与引信, 2007, 28(1): 53-56.
- [5] 王自荣, 余大斌, 孙晓泉. 红外隐身涂料颜料发射率研究[J]. 上海航天, 2000(1): 24-26.
- [6] 吕建伟, 王强. 飞机表面温度和发射率分布对红外辐射特征的影响[J]. 光电工程, 2009, 36(2): 50-54.
- [7] 崔杰. 红外隐身技术在动力系统中的应用[J]. 推进技术, 1995(3): 81-83.
- [8] 李艳红, 陈宏书, 郑建龙, 等. 红外隐身涂料发射率的影响因素研究[J]. 红外技术, 2008, 30(8): 454-457.
- [9] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1423-1429.