

# 航空发动机尾喷流大气透过率变化规律研究

黄龙飞, 李 瑶, 李益文, 张浦幼森, 陈 戈, 化为卓

(空军工程大学航空动力系统与等离子体技术全国重点实验室, 西安, 710038)

**摘要** 针对发动机红外辐射特性测试尾喷流近场大气透过率难以全方位准确测量的问题, 研究了  $3\sim 5 \mu\text{m}$  波段发动机尾喷流不同角度和距离大气透过率对红外辐射特性的影响规律。研究发现: 发动机尾喷流核心区的大气透过率相比自然环境下减小了 5.65%。随着距离的增加, 发动机尾喷流区域的大气透过率与自然环境的差异逐渐增大, 在 25 m、50 m 路径上分别减小了 22.64%、29.88%。同时, 随着角度的增加, 尾喷流对大气透过率的影响逐渐减弱。研究结果可为大气透过率现场测试提供方法支撑, 并为评估发动机红外辐射特性提供数据支持。

**关键词** 航空发动机; 大气透过率; 非均匀大气; 红外特性测试

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.001

**中图分类号** V263.4; TN219    **文献标志码** A    **文章编号** 2097-1915(2025)01-0001-09

## A Study of the Changing Law of Atmospheric Transmittance of Aero-Engine Tail Jet

HUANG Longfei, LI Yao, LI Yiwen, ZHANGPU Yousen, CHEN Ge, HUA Weizhuo

(National Key Lab of Aerospace Power System and Plasma Technology,  
Air force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract** In view of the problem that in the measurement of infrared radiation characteristics for engine tail jet, the near-field atmospheric transmittance of tail jet is difficult to measure accurately in all-direction, this paper studies a law of the influence from near-field atmospheric transmittance at different angles and distances on the infrared radiation characteristics of the tail jet in  $3\sim 5 \mu\text{m}$  band, and simultaneously finds that the atmospheric permeability in the core area of the tail jet decreases by 5.65% compared with the natural environment. With the increase of distance, the atmospheric transmittance in the tail jet area of the engine decreases rapidly, and the test distance of 25 meters and 50 meters decreases by 22.64% and 29.88%. With the increase of the test angle, the influence of the tail jet on the atmospheric transmittance decreases. The results show that this scientific research achievement can not only support the measurement of atmospheric transmittance of aero-engine infrared characteristics, but also provide data support for the evaluation of near-field atmospheric transmittance and infrared radiation of tail jet.

收稿日期: 2024-06-01

基金项目: 国家博士后创新人才支持计划(BX2021370); 航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究项目(J2019-V-0008-0101); 全国重点实验室基金(6142202210307); 科技创新团队(2023-CX-TD-22); 杰出青年科学基金项目(2022JC-29)

作者简介: 黄龙飞(1998—), 男, 甘肃会宁人, 硕士生, 研究方向为红外辐射特性测试大气透过率。E-mail: 2330141619@qq.com

通信作者: 李 瑶(1992—), 女, 陕西西安人, 讲师, 博士, 研究方向为目标红外辐射特性测试评估技术。E-mail: liyao\_0927@163.com

引用格式: 黄龙飞, 李瑶, 李益文, 等. 航空发动机尾喷流大气透过率变化规律研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 1-9. HUANG Longfei, LI Yao, LI Yiwen, et al. A Study of the Changing Law of Atmospheric Transmittance of Aero-Engine Tail Jet[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 1-9.

**Key words** engine tail jet; atmospheric transmittance; non-uniform atmosphere; infrared radiation test

红外辐射试验测试是评估发动机红外辐射特性的重要手段,是获取目标真实辐射特性的唯一方法<sup>[1]</sup>,但其测试结果严重受到大气透过率的影响。因此,大气透过率对评估航空发动机的红外隐身性能具有十分重要的意义<sup>[2]</sup>。

大气透过率是表征红外辐射在大气中衰减程度的重要参数,是指经过大气传输后,探测器实际接收到的辐射强度与发动机发出的本征红外辐射强度的比值<sup>[3-4]</sup>。通过大气透过率,反演发动机的本征红外辐射,从而评估发动机的红外隐身性能。

地面静态红外特性测试时,发动机排放高温高压的燃气向自然大气扩散,使尾喷流相邻的气体吸热升温,并且由于尾喷流中含有大量的二氧化碳、水蒸气以及气溶胶等物质,随着发动机试车时间的增加,产生累积效应,在尾喷流近场形成一个温度、气压、组分浓度等梯度变化,不同于自然大气的过渡区域,严重衰减发动机高温固体壁面与喷流自身的红外辐射,使发动机尾喷流近场大气透过率变得复杂<sup>[5]</sup>。在工程应用中,对发动机尾喷流近场大气透过率的研究,已成为一个亟需解决的问题。

本文针对发动机尾喷流环境的非均匀性,根据发动机流场计算数据,采用分层计算的方法,利用CART 大气透过率计算软件,获得了发动机尾喷流不同路径 3~5 μm 波段的大气透过率,分析了发动机尾喷流大气透过率的变化规律。

## 1 计算原理

### 1.1 发动机尾喷流气体组分及影响

航空发动机使用的燃料是航空煤油,化学式为 C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>,通常航空煤油中添加抗氧剂、抗磨剂等。因此,航空发动机燃烧产生的气体中主要含有二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO)、水蒸气(H<sub>2</sub>O)、氧气(O<sub>2</sub>),以及微小颗粒物,包括灰尘、烟霾等物质<sup>[6-7]</sup>。

利用 HITRAN 和 HITEMP 数据库,对发动机开车前低温低压的自然大气环境和发动机开车状态下的高温高压环境,计算了两种环境不同气体在 3~5 μm 波段对红外辐射的影响。高温高压下的计算条件为:气体组分浓度 0.05,温度 1 000 K,压强 202 650 Pa,光程 100 cm。低温低压下的计算条件为:气体组分浓度 0.05,温度 300 K,压强 101 325 Pa,光程 200 cm。计算结果如图 1 所示。

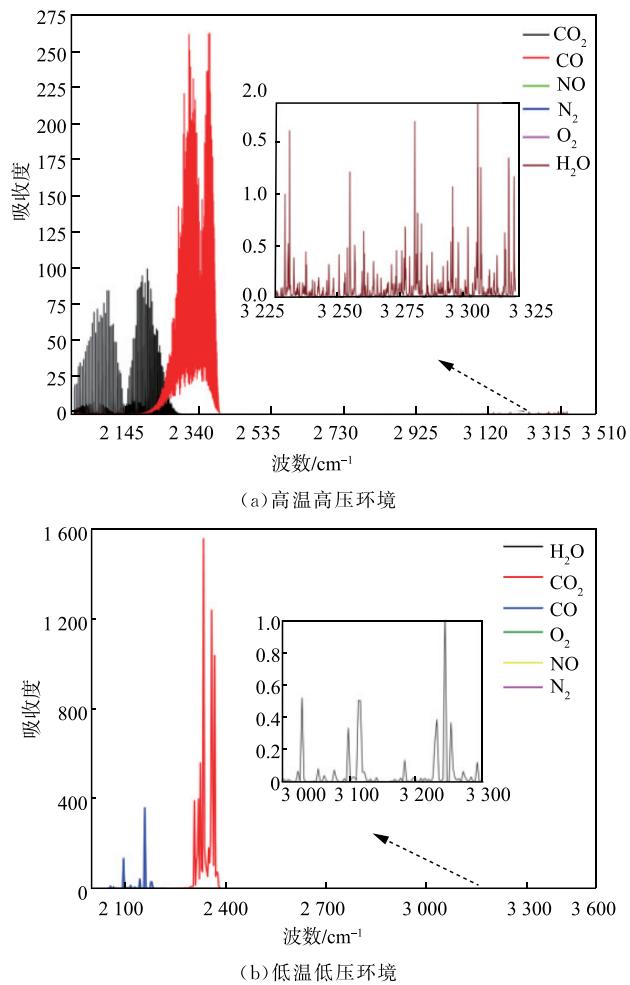


图 1 尾喷流不同气体吸收度

Fig. 1 Different gas absorption of the tail jet

计算发动机尾喷流不同气体在 3~5 μm 波段内的平均吸收度,计算结果如表 1 所示。

表 1 尾喷流不同气体吸收度

Tab. 1 Different gas absorption of the tail jet

气体组分	低温低压吸收度	高温高压吸收度
CO <sub>2</sub>	16.923	5.456
CO	1.696	0.561
H <sub>2</sub> O	0.017	0.029 7
NO	8.8×10 <sup>-5</sup>	0.000 28
N <sub>2</sub>	1.53×10 <sup>-9</sup>	3.7×10 <sup>-10</sup>
O <sub>2</sub>	0	0

通过上述研究发现,无论是发动机开车前的自然大气环境,还是发动机试车状态的高温高压环境,尾喷流中的气体对红外能量吸收最为显著的气体为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、一氧化碳(CO)和水蒸气(H<sub>2</sub>O)。航空煤油化学分子式一般取为 C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>,其在完全燃烧下的方程式为:



从式(1)可以看出,航空煤油燃烧后的产物主要为二氧化碳( $\text{CO}_2$ )和水蒸气( $\text{H}_2\text{O}$ )。

通过以上研究,发动机尾喷流不同物质对大气透过率的影响主要为二氧化碳( $\text{CO}_2$ )和水蒸气( $\text{H}_2\text{O}$ )对红外辐射的吸收,以及微小颗粒对红外辐射的散射作用。

## 1.2 温度和压力对气体吸收的影响

发动机尾喷流主要包括核心区、外部环流、欠膨胀区和膨胀区。在核心区温度和压力处于最高,随着距离的增加,在欠膨胀区的温度和压力等参数快速衰减,直至膨胀区与自然大气环境相等。针对发动机尾喷流温度和压力的变化,利用 HITRAN 和 HITEMP 数据库,研究了温度和压力对二氧化碳和水蒸气吸收度的影响,同时也分析了浓度、光程对吸收度的影响<sup>[8-9]</sup>。

通过研究发现,随着压力、浓度和光程的增加,二氧化碳和水蒸气吸收度都在增加。设置浓度为 0.05,压强 101 325 Pa,光程 100 cm,温度对二氧化碳和水吸收的影响如图 2 所示。

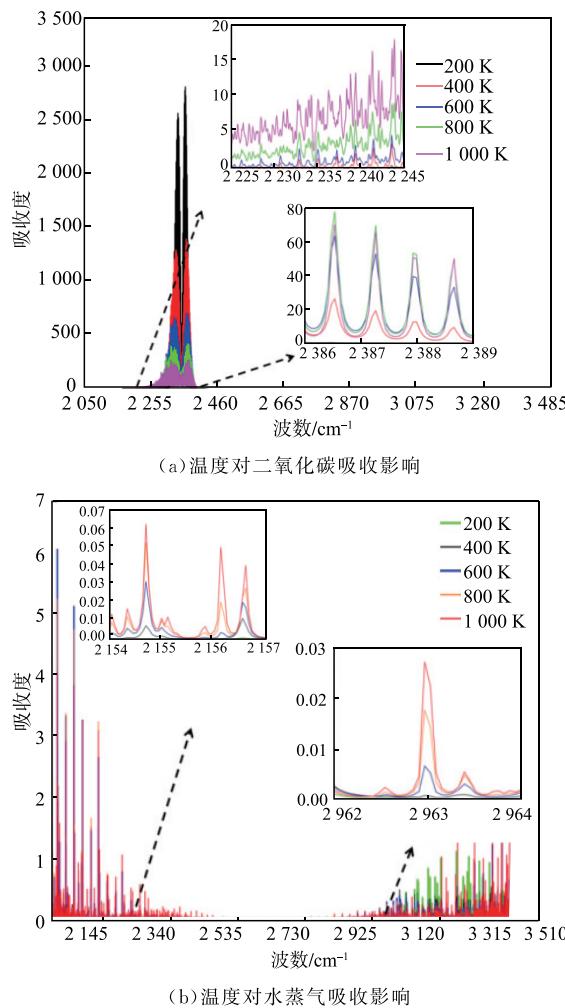


图 2 温度对气体吸收度的影响

Fig. 2 Effect of temperature on gas absorption

从图 2 可以看出,在二氧化碳的强吸收带 4.2~

$4.4 \mu\text{m}$ ,温度越高,吸收度越小。水蒸气具有较宽的吸收波段,在  $3\sim3.4 \mu\text{m}$  随着温度的增加,水蒸气吸收度减小;而在  $4.7\sim5 \mu\text{m}$  随着温度的增加,吸收度在增加。通过计算不同温度水蒸气在  $3\sim5 \mu\text{m}$  波段上的平均吸收度,发现随着温度的增加,水蒸气的平均吸收度在增加。

## 1.3 大气透过率计算模型

大气透过率的主要影响因素是大气中非对称分子对红外辐射的选择性吸收,具有明显的光谱选择特性,同时还受到大气中气溶胶的散射衰减作用<sup>[10]</sup>。除此之外,气象条件如温度、湿度、压力等对大气透过率也有一定影响。由于发动机尾喷流的温度、压力和气体浓度等显著高于自然大气,且存在明显的梯度变化,导致其内部的大气透过率谱线存在独有的特征。根据 Beer-Lambert 定律,发动机尾喷流的光谱透过率为:

$$\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda)\tau_\beta(\lambda) \quad (2)$$

式中: $\tau_a(\lambda)$  为大气吸收透过率; $\tau_\beta(\lambda)$  为大气散射透过率。

### 1.3.1 大气吸收计算模型

发动机尾喷流中高浓度的水蒸气、二氧化碳非对称分子,是红外辐射吸收衰减的主要分子。采用 MT-CKD 方法来计算尾喷流分子连续的吸收<sup>[11-12]</sup>。假设尾喷流中有  $n$  种吸收气体,发动机尾喷流吸收透过率  $\tau_a(\lambda)$  可分解为尾喷流中各单项分子的吸收:

$$\tau_a(\lambda) = \prod_{i=1}^n \tau_{ai}(\lambda) \quad (3)$$

式中: $\tau_{ai}(\lambda)$  为发动机尾喷流组分  $i$  与吸收相关的透过率。

### 1.3.2 大气散射计算模型

航空发动机在地面试车时,由于燃烧不充分等原因,导致尾喷流大气环境中含有气溶胶颗粒物。气溶胶使发动机高温固体壁面和尾喷流自身的红外辐射在传输过程中改变传播方向,从而使传播方向上的红外辐射能量减弱<sup>[13-14]</sup>。

发动机尾喷流中的烟、尘埃及气溶胶等微粒主要发生 Mie 散射。由 Mie 散射理论计算两点间的大气透过率为:

$$T_\lambda = \exp(-\tau) = \exp\left(-\int_0^l \rho k(\lambda, l) dl\right) \quad (4)$$

式中: $\tau$  为两点间的光学厚度; $l$  为两点间的间隔距离; $\rho$  为气溶胶物质的密度; $k$  为所对应波长  $\lambda$  的质量消光截面。

### 1.3.3 平均大气透过率

对于发动机地面静态红外辐射特性测试而言,

工程计算关注的是一个波段范围内的平均大气透过率<sup>[15]</sup>,其计算式为:

$$\tau = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \int_{2\lambda_1}^{\lambda} \tau(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

式中: $\lambda$  为波长; $\tau$  为波长  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  范围内的平均大气透过率。

#### 1.4 尾喷流大气透过率计算方法

根据 GJB《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》,对发动机地面静态红外辐射特性评估试验提出的具体要求,规定了测试方位角为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ ,共计 11 个方位角。发动机正后方中心轴线方向为  $0^\circ$ ,正侧向为  $90^\circ$ 。本研究计算角度为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 。

针对航空发动机尾喷流温度、气压、组分浓度的非均匀性,提高航空发动机尾喷流大气透过率的计算精度,采用分层的方法计算尾喷流的大气透过率<sup>[16-17]</sup>,即根据尾喷流大气参数的梯度变化情况,将整个测试路径分成  $m$  层,计算出每一层的平均大气透过率,之后再计算得到整个测试路径上的大气透过率。图 3 是测试角度为  $0^\circ$  的大气透过率分层计算法原理示意图。

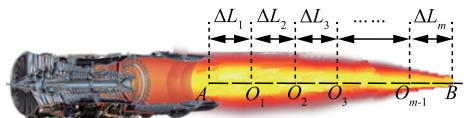


图 3 大气透过率计算方法

Fig. 3 Calculation method of atmospheric transmittance

如图 3 所示, $0^\circ$  角上的测试路径为  $AB$ 。 $A$  点为尾喷口的圆心,设  $AB$  两点之间的距离为  $L$ ,根据此路径上大气浓度的梯度分布情况,在  $AB$  之间选取  $m-1$  个传感器  $O_1$ 、 $O_2$  …、 $O_{m-1}$ ,每层的距离为  $\Delta L_j$ ,满足  $\Delta L_1 + \Delta L_2 + \dots + \Delta L_m = L$ ;当划分的层数足够多时,每个传感器获得的大气参数为第  $j$  层的平均值,并认为在  $\Delta L_j$  内分子处于局部热平衡,其温度、气压和组分浓度等均匀恒定。计算获得每一层航空发动机尾喷流的平均大气透过率  $\tau_j$ ,则  $AB$  整个路径上的大气透过率  $\tau(\lambda)$  为:

$$\tau(\lambda) = \prod_{j=1}^m \tau_j(\lambda) \quad (6)$$

式中: $\tau_j(\lambda)$  为第  $j$  层尾喷流的大气透过率。

利用大气透过率计算软件 CART,可获得航空发动机尾喷流  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  角的大气透过率,并利用式(5)算得  $3\sim5\mu\text{m}$  波段的平均大气透过率。

## 2 发动机流场仿真分析

由于航空发动机尾喷流结构复杂多变,给理论分析与计算造成很大的困难,工程中常用流场模型求解流场参数。通过流场计算对航空发动机尾喷流流场进行数值计算,分析气动特性,得到航空发动机尾喷流的大气参数,研究发动机尾喷流的温度、气压、气体浓度等关键大气参数的变化规律及分布情况<sup>[18-19]</sup>。

### 2.1 航空发动机模型

根据发动机的基本结构和工作原理,建立航空发动机的三维模型,该模型具有中心锥、火焰稳定器、混合器、调节片、加力筒、喷管等。图 4 为航空发动机模型,尾喷管直径 0.6 m,模型长度为 2.6 m<sup>[20]</sup>。

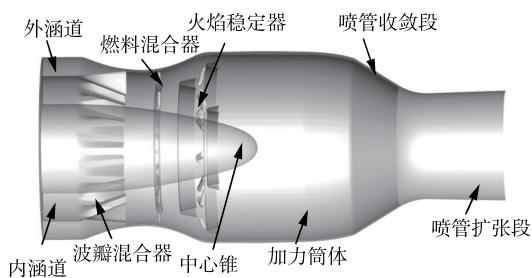


图 4 某航空发动机简化模型

Fig. 4 Simplified model of an aeroengine

### 2.2 流场计算网格

根据航空发动机的结构特点,为了节约计算资源,同时为了使计算结果能够收敛,采用结构化网格。对于一些不规则区域,采用分块结构化网格,并在喷管核心流区域进行局部加密。具体网格如图 5 所示。本文所有网格质量均在 0.5 以上,整体网格的最小正交质量为 0.004 95,最大纵横比为 0.007 58,满足计算要求。

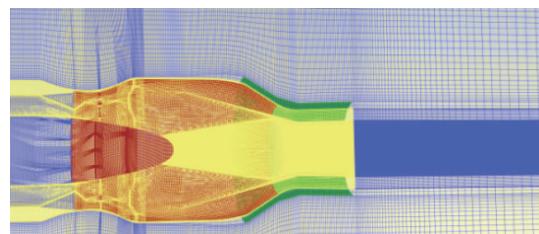


图 5 流场计算网格

Fig. 5 Flow field calculation grid

### 2.3 流场结果分析

发动机地面试车时有不同的工作状态,本文流场计算根据最大状态进行参数设置,内涵进口温度为 850 K,外涵进口温度为 400 K,湍流模型为标准

K-epsilon 模型,求解方式基于密度隐式求解,流动离散为二阶迎风格式<sup>[21]</sup>。

### 2.3.1 流场温度和压力分布

发动机尾喷流水平面上的温度和压力分布如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,高温核心区在喷管口轴线附近,且随着距离的增加温度逐渐降低。压强在轴向的沿程分布是表征喷管流场特征的重要物理量,从图 6(b)可以看出,流场核心区和欠膨胀区为高压区,右边为低压区。导致尾喷流外形呈漏斗状。

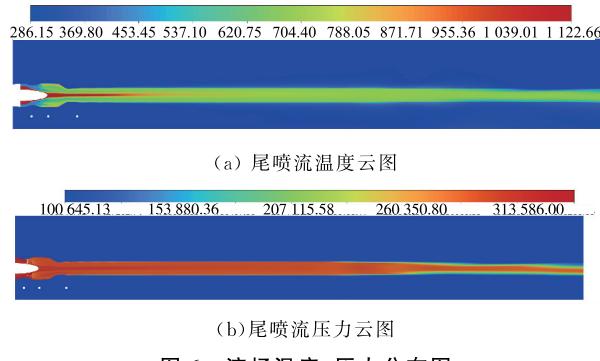


图 6 流场温度、压力分布图

Fig. 6 Flow field temperature, pressure cloud picture

### 2.3.2 流场组分浓度分布

发动机尾喷流水平面上  $H_2O$  和  $CO_2$  的体积分数分布分别如图 7(a)、图 7(b)所示。 $H_2O$  和  $CO_2$  体积分数分布趋势相同,体积分数高的区域均分布在喷管轴线附近,随着距离的增加体积分数逐渐降低。

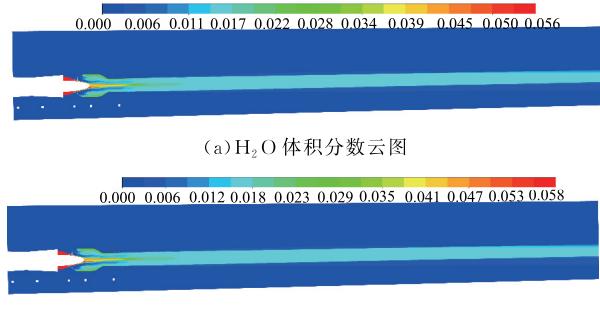


图 7 流场组分浓度云图

Fig. 7 Flow field component concentration cloud map

## 3 尾喷流近场大气透过率计算

发动机开车前自然环境的大气透过率起着对比的作用,因此首先计算发动机开车前的大气透过率,然后对发动机开车状态下尾喷流不同路径下的大气透过率进行计算,最后对比分析了发动机尾喷流近场大气透过率的变化规律。

### 3.1 自然大气环境的大气透过率

发动机地面静态红外特性测试中,发动机未开车时的测试路径均为自然大气环境,认为此时的大

气参数均匀分布,不同方位角路径上的大气参数相同,此时取不同测试距离计算自然大气环境的大气透过率<sup>[22]</sup>。

本文对发动机尾喷流大气透过率的研究,主要考虑尾喷流温度、压力、 $CO_2$  和  $H_2O$  的体积分数的影响。采用自定义单层大气模式,计算参数设置为:气溶胶模式为城市型,能见度为 23 km,环境温度为 288 K,气压为 101 325 Pa, $H_2O$  和  $CO_2$  的体积分数分别为 0.03% 和 0.031%。距离分别取 3 m、10 m、25 m、50 m、100 m 以及 200 m,计算获得发动机开车前自然环境下的大气透过率。计算结果如图 8 所示。

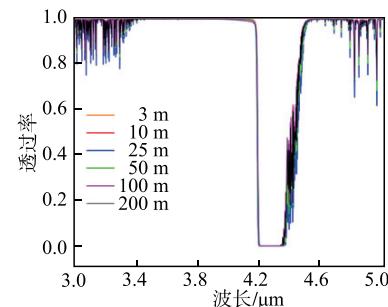


图 8 自然环境大气透过率

Fig. 8 Natural ambient atmospheric transmittance

根据式(5),计算得到发动机开车前 3~5  $\mu m$  波段的平均大气透过率,计算结果如表 2 所示。

表 2 自然大气环境的大气透过率

Tab. 2 Natural ambient atmospheric transmittance

距离/m	大气透过率
3	0.950 9
10	0.927 3
25	0.911 3
50	0.898 4
100	0.884 3
200	0.866 6

### 3.2 发动机开车状态的大气透过率

#### 3.2.1 不同距离的大气透过率

在发动机红外辐射特性现场测试中,由于在高压高速的核心区难以布置大气参数传感器,没有其大气透过率相关的数据,缺少对发动机尾喷流核心区大气透过率的研究。本文研究计算包含了发动机尾喷流核心区的大气透过率,可以为核心区的红外辐射和大气透过率提供数据支撑。

通过发动机流场计算的结果,取 0°角上不同距离下的大气参数进行计算大气透过率。0°角上温度、气压、 $CO_2$  和  $H_2O$  的体积分数分布规律如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在发动机开车状态下,发动机尾喷流的各种大气参数在核心区较大。其中  $CO_2$  和  $H_2O$  的体积分数变化趋势相同, $CO_2$  和  $H_2O$  的

体积分数峰值分别为 4.146% 和 4.145%。压力随距离的增加中间有波动,其原因是尾喷流从发动机进入外部环境,很快进入湍流状态,导致流场中出现速度、

压力和浓度的空间和时间波动,同时尾喷流与周围空气混合过程中,流场中各参数产生波动。温度和气压的最大值分别为 755.53 K 和 111 255.83 Pa。

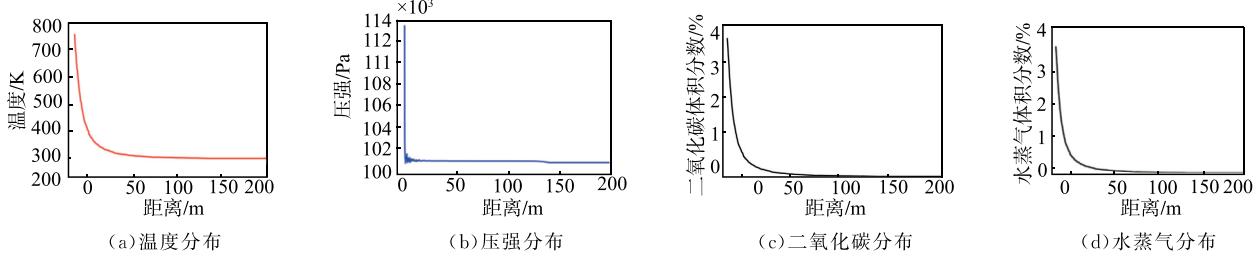


图 9 0° 大气参数分布

Fig. 9 0° Atmospheric parameter distribution

考虑尾喷流温度、压力、二氧化碳和水的体积分数梯度变化情况,笔者取温度为 610 K 以上的流场区域为发动机尾喷流的核心区,距离的选取包含了发动机尾喷流核心区、尾喷流的衰减区,以及尾喷流影响以外的区域,同时为了便于计算共取 6 个不同距离,在尾喷流近端大气参数变化剧烈处密集,分别选取 3 m、10 m、25 m、50 m、100 m 和 200 m 不同距离计算大气透过率。

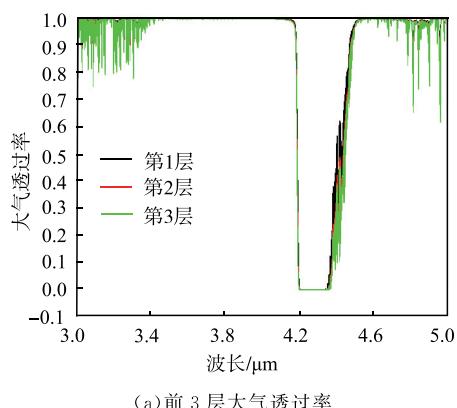
根据发动机尾喷流 0° 角上大气参数的梯度变化情况,将整个路径分为 6 层,第 1 层为发动机尾喷流的核心区,中间 4 层为尾喷流的衰减区,最后一层为自然大气,取每一层大气参数的平均值,其路径分层参数如表 3 所示。

表 3 0° 路径不同层大气参数

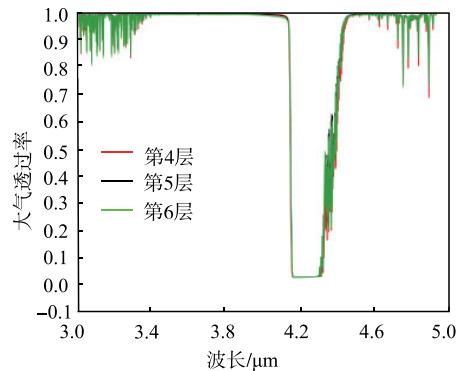
Tab. 3 0° path different layer atmospheric parameters

分层	距离/m	温度/K	压强/Pa	H <sub>2</sub> O /%	CO <sub>2</sub> /%
1	0~3	683.09	102 877.86	3.466	3.467
2	3~10	524.43	101 270.56	1.813	1.814
3	10~25	387.20	101 228.02	0.695	0.695
4	25~50	321.63	101 210.27	0.238	0.238
5	50~100	300.46	101 201.41	0.098	0.098
6	100~200	293.37	101 130.81	0.052	0.052

根据每层路径的大气参数和距离,利用 CART 大气透过率软件计算每一层的光谱大气透过率,大气透过率计算结果如图 10 所示。



(a) 前 3 层大气透过率



(b) 后 3 层大气透过率

图 10 不同层大气透过率计算结果

Fig. 10 Calculation results of atmospheric transmittance in different layers

根据式(5)计算每一层路径的平均大气透过率,利用式(6)得到 0° 角不同距离的平均大气透过率,最终计算结果如表 4 所示。

表 4 不同距离大气透过率

Tab. 4 Atmospheric transmittance at different distances

距离/m	大气透过率
3	0.897
10	0.797
25	0.705
50	0.630
100	0.564
200	0.504

### 3.2.2 不同角度的大气透过率

从发动机尾喷流流场计算结果中选取 0°、5°、10°、15°、20°、30°、40°、60°、90° 共 9 个不同角度的流场大气参数,为了进一步对比分析不同角度的大气透过率,测试距离均取为 50 m。利用上述相同的计算方法,对每个不同角度的流场数据进行分析,并进行分层,最终计算不同角度整个路径 3~5 μm 波段的平均大气透过率。计算结果如表 5 所示。

表5 不同角度大气透过率

Tab. 5 Atmospheric transmittance at different angles

角度/(°)	大气透过率
0	0.714 1
5	0.754 7
10	0.757 6
15	0.766 1
20	0.774 4
30	0.785 5
40	0.796 2
60	0.804 6
90	0.822 6

## 4 结果与分析

通过上述计算,最终得到了发动机尾喷流不同角度、不同距离的大气透过率。 $0^{\circ}$ 角不同距离的大气透过率与发动机开车前的大气透过率对比如图11所示。

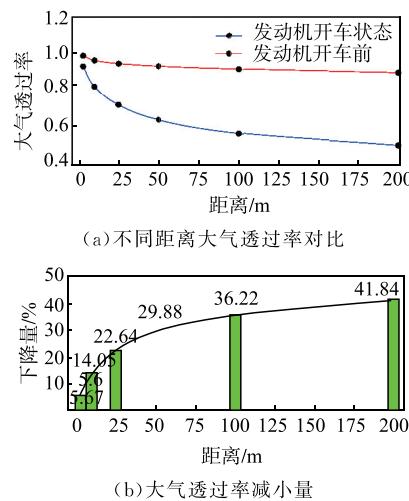


图11 不同距离大气透过率

Fig. 11 Atmospheric transmittance at different distances

从图11可以得出:发动机尾喷流核心区的大气透过率为0.897,与自然大气相比减小了5.67%。在发动机尾喷流欠膨胀区,随着距离的增加大气透过率迅速减小,在10 m处尾喷流大气透过率相比开车前减小了14.05%,50 m处则减小了29.88%。

在发动机尾喷流的膨胀区,大气透过率减小速率变缓,100 m处发动机开车状态的大气透过率相比开车前减小了36.22%,而在200 m处则减小了41.84%。此时大气透过率的变化,主要影响因素是距离。

分析以上结果原因:在发动机尾喷流核心区平均温度达到755 K且CO<sub>2</sub>的浓度较高,高温时分子运动剧烈,根据1.2节温度对气体吸收度的影响规律,温度越高,二氧化碳强吸收带4.3 μm附近吸收

率越低<sup>[17]</sup>,导致总大气透过率就高。随着距离的增加,尾喷流温度降低,温度对二氧化碳的吸收度影响降低,整个测试路径上总的大气透过率迅速降低。

发动机尾喷流不同角度的大气透过率结果如图12所示,图12(a)为不同距离大气透过率对比,图12(b)为不同角度发动机开车状态相比开车前大气透过率的减小量。

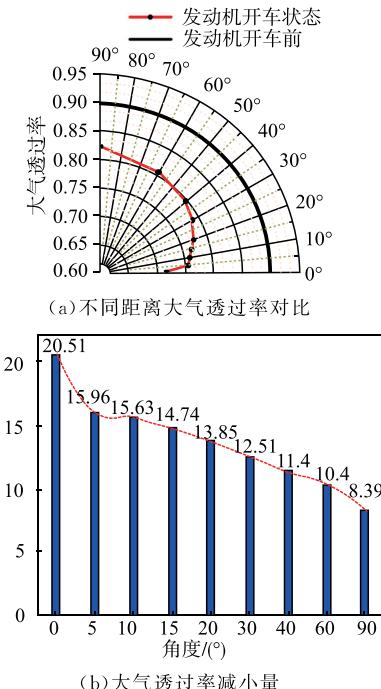


图12 不同角度大气透过率

Fig. 12 Atmospheric transmittance at different angles

从图12可以看出,50 m距离下,发动机开车状态下 $0^{\circ}$ 角的大气透过率最小,大气透过率为0.714;90°的大气透过率0.823为最大值,相比自然大气环境下的大气透过率,随着角度的增加,大气透过率的减小量在降低, $0^{\circ}$ 角的大气透过率减小了20.51%,90°大气透过率减小了8.39%。

分析上述结果原因: $0^{\circ}$ 角正对着发动机尾喷口,受尾喷流影响的路径最长,随着角度的增加,受尾喷流影响的距离减少,同时外部环流对尾喷流外部气流的混合和扩散,大气参数梯度变化减小,在大角度50 m处尾喷流大气参数接近自然大气环境。

通过上述研究,发动机地面静态红外特性测试中,利用实测大气参数计算大气透过率时,可以忽略发动机尾喷流核心区的影响,将核心区作为辐射源。布置大气参数传感器时,从尾喷流核心区的边缘开始布置传感器,测点应覆盖尾喷流的环流区、欠膨胀区和膨胀区。

图13为发动机红外辐射强度空间分布曲线,发动机的红外辐射呈梨形包络,在发动机正后方 $0^{\circ}$ 角

的红外辐射并不是最大,而在 $20^{\circ}$ 角的红外辐射强度为最大值<sup>[23]</sup>。通过本文研究可知,0°角上的大气透过率最小,发动机的红外辐射被强烈地衰减,随着角度增加大气透过率增大,对红外辐射的衰减作用减小,同时 $20^{\circ}$ 角探测到的高温壁面和尾喷流较大,导致发动机红外辐射最强。在小角度测试点上,大气透过率曲线与发动机红外辐射曲线相一致,从而也验证了本文数据的正确性和仿真的准确性。在大角度上,虽然此时的大气透过率在增大,但探测器接收到的红外辐射较少,因此辐射强度曲线在 $20^{\circ}$ 后减小。

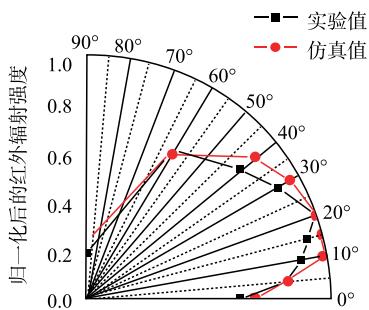


图 13 辐射强度分布曲线

Fig. 13 Radiation intensity distribution curve

## 5 结语

通过本文的研究,深入探讨了航空发动机尾喷流大气透过率的变化规律,为航空发动机地面红外辐射特性试验测试中大气透过率的测量提供了科学方法和数据支撑。这一研究不仅推动了工程实践的发展,而且对于优化测试过程中的参数设定和提高测试精度具有重要意义。同时,本研究分析了大气透过率在不同路径下的变化规律,这对利用大气透过率反演发动机本征红外辐射测试结果至关重要。可以更准确地预测和解释发动机红外辐射特性测试结果,从而为航空发动机的设计、优化和性能评估提供了更为可靠的科学依据。最终,这些研究成果将有助于提高航空发动机的红外隐身性能,增强其在复杂环境下的生存能力,对于航空发动机技术的长远发展和应用具有重要的战略意义。

## 参考文献

- [1] 许帆,姚凯凯,张锐娟,等.航空发动机红外辐射特性测试评估技术[J].激光与红外,2019,49(10):1223-1227.  
XU F,YAO K K,ZHANG R J,et al. Infrared Radiation Characteristic Testing and Evaluating Technology of Aero-Engine[J]. Laser & Infrared,2019,49(10):1223-1227. (in Chinese)
- [2] 王怡,王浩,卫子毓,等.基于光谱辐射计的航空发动机红外辐射特性测试方法[J].红外技术,2023,45(3):292-297,321.  
WANG Y,WANG H,WEI Z Y,et al. Test of Infrared Radiation Characteristic for Aero-Engines Based on Spectral Radiometer[J]. Infrared Technology,2023,45(3):292-297,321. (in Chinese)
- [3] 丁旭,王浩,宋江涛,等.航空发动机台架红外辐射特性测试技术研究[J].激光与红外,2024,54(1):78-83.  
DING X,WANG H,SONG J T,et al. Research on Infrared Radiation Characteristics Testing Technology of Aircraft Engine Bench[J]. Laser & Infrared,2024,54(1):78-83. (in Chinese)
- [4] 张安琪,邰会强,高佳星,等.基于大气参数修正的时变大气透过率测试方法研究[J].燃气涡轮试验与研究,2023,36(2):39-44.  
ZHANG A Q,TAI H Q,GAO J X,et al. Time-Varying Atmospheric Transmittance Measurement Method Based on Atmospheric Parameter Correction[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2023,36(2):39-44. (in Chinese)
- [5] 吴辉阳,王泽洋,黄兴军,等.大气气溶胶红外散射透过率计算研究[J].红外技术,2022,44(2):151-156.  
WU H Y,WANG Z Y,HUANG X J,et al. Calculation of Infrared Scattering Transmittance of Aerosol [J]. Infrared Technology,2022,44(2):151-156. (in Chinese)
- [6] 王智平,李周.水平方向上的大气透过率和热辐射计算模型研究[J].红外,2019,40(12):15-21.  
WANG Z P,LI Z. Research on a Calculation Model of the Atmospheric Transmittance and Thermal Radiation in the Horizontal Direction[J]. Infrared,2019,40(12):15-21. (in Chinese)
- [7] 王志会,屈鸿伟,张晶涛,等.低层大气红外吸收透过率计算模型[J].激光与红外,2024,54(2):249-255.  
WANG Z H,QU H W,ZHANG J T,et al. Calculation Model of Infrared Absorption Transmittance of Lower Atmosphere [J]. Laser & Infrared,2024,54(2):249-255. (in Chinese)
- [8] SUN W J,GAO Q H,ZHANG J Z,et al. Aerosol Infrared Stealth Technology: Theory and Development of Infrared Suppression and Particle Dispersion in Aircraft Plume[J]. Thermal Science and Engineering Progress,2023,39:101695.
- [9] SUN M C,WU X C,GONG X,et al. Transmittance Simulation Calculation Based on 3D Ray Tracing and

- HITRAN Database[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40: 2092.
- [10] 马刚, 郭杨, 苏婧, 等. 卫星探测通道晴空大气吸收透过率快速计算研究进展[J]. 地球物理学报, 2023, 66(6): 2275-2291.  
MA G, GUO Y, SU J, et al. An Overview of Fast Calculation to Clear Atmospheric Absorption Transmittance of Satellite Channel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(6): 2275-2291. (in Chinese)
- [11] 魏合理, 陈秀红, 戴聪明. 通用大气辐射传输软件(CART)及其应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3360-3366.  
WEI H L, CHEN X H, DAI C M. Combined Atmospheric Radiative Transfer(CART) Model and Its Applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3360-3366. (in Chinese)
- [12] 戴聪明, 魏合理, 陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)大气散射辐射计算精度验证[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1575-1581.  
DAI C M, WEI H L, CHEN X H. Validation of Atmospheric Scattering Radiance Calculated by Combined Atmospheric Radiance Transfer (CART) Code [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 (6): 1575-1581. (in Chinese)
- [13] KOZLOV P V, ZABELINSKII E, BYKOVA N G, et al. Radiation Characteristics of Shock-Heated Air in the Visible and Infrared Spectral Ranges[J]. Fluid Dynamics, 2023, 58(5): 960-967.
- [14] LI W, WANG Y R, ZHANG L, et al. Simulation Analysis on the Characteristics of Aerosol Particles to Inhibit the Infrared Radiation of Exhaust Plumes[J]. Materials, 2024, 17(14): 3505.
- [15] 陈芳芳, 赵金刚. 大气悬浮微粒对激光传输透过率的影响研究[J]. 光学仪器, 2022, 44(2): 22-30.  
CHEN F F, ZHAO J G. Research on the Influence of Atmospheric Suspended Particles on Laser Transmittance[J]. Optical Instruments, 2022, 44(2): 22-30. (in Chinese)
- [16] SUN D D, ZHENG H J. Simulation Study of Infrared Transmittance under Different Atmospheric Conditions[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, (1): 012045.
- [17] 叶宏达, 庄子波, 蒋立辉, 等. 大气透过率的多点移动测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1894-1901.  
TAI H D, ZHUANG Z B, JIANG L H, et al. Multi-Point Mobile Measurement of Atmospheric Transmittance[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1894-1901. (in Chinese)
- [18] 牛青林, 董士奎. 火箭发动机喷焰红外辐射数值计算方法研究(特邀)[J]. 光电技术应用, 2023, 38(1): 1-10, 35.  
NIU Q L, DONG S K. Progress of Numerical Calculation Methods for Infrared Radiation of Rocket Exhaust Plume (Invited) [J]. Electro-Optic Technology Application, 2023, 38(1): 1-10, 35. (in Chinese)
- [19] 康丽珠, 赵劲松, 李振华, 等. 飞机目标红外辐射特性研究现状概述[J]. 红外技术, 2017, 39 (2): 105-115, 124.  
KANG L Z, ZHAO J S, LI Z H, et al. The Overview of the Research Work Developments on Infrared Signature of Aircrafts[J]. Infrared Technology, 2017, 39 (2): 105-115, 124. (in Chinese)
- [20] 刘涛, 丁旭, 张琦. 航空发动机整机红外辐射特性台架试验方案研究[J]. 现代机械, 2020(1): 41-45.  
LIU T, DING X, ZHANG Q. Bench Test Scheme for Infrared Radiation Characteristics of Aeroengine[J]. Modern Machinery, 2020(1): 41-45. (in Chinese)
- [21] NAM H J, KWON O J. Infrared Radiation Modeling of NO, OH, CO, H<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub> for Emissivity/Radiance Prediction at High Temperature[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 67: 283-291.
- [22] 孙志远, 朱玮, 乔彦峰, 等. 红外辐射特性测量中环境影响的修正研究[J]. 激光与红外, 2010, 40 (2): 162-165.  
SUN Z Y, ZHU W, QIAO Y F, et al. Atmosphere Amending Research in Infrared Radiation Characteristic Measurement[J]. Laser & Infrared, 2010, 40 (2): 162-165. (in Chinese)
- [23] 任利锋, 邵万仁, 徐速, 等. 航空发动机排气系统红外辐射特性数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2018, 31(4): 19-24, 52.  
REN L F, SHAO W R, XU S, et al. Numerical Study of Infrared Radiation Characteristics for Aero-Engine Exhaust System[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2018, 31(4): 19-24, 52. (in Chinese)

(编辑:陈斐)