# 不同尺寸孔径对冲击冷却影响的研究

王瀚艺1 朱帅2 李岚锦3

(1中国民用航空飞行学院工程技术训练中心 四川 广汉 618300;2中国航发商发制造测试中心 上海 201306;3成都天府国际机场分公司机电设备部 四川 成都 641419)

摘要:针对引入冲击冷却的涡轮叶片,使用 CATIA 进行冲击冷却工作环境建模,用 FLUENT 对引入冲击 冷却后流场进行分析,得到了流场流速、温度等情况,并改变冷却射流孔孔径,得到了不同孔径下流场压力、 流速和努塞尔数等参数的变化规律。通过计算分析得到结论,冲击冷却的引入能够有效提供对发热板的热 防护,越远离射流孔,冷却效果呈现逐渐减弱的趋势;射流孔孔径越大,流场压力损失越明显,冲击靶面 平均努塞尔数越小,因而冷却效果越差。

关键词:冲击冷却;数值模拟;涡轮叶片

## 0 引言

冲击冷却是飞机发动机上最能有效冷却、提高局部 传热系数的冷却手段之一,但随着冷却气流从相应冷却 孔流出,又难免对发动机主气流的运动产生影响而造成 气动损失的增加。因此,对冲击冷却的施加以及带来 的气动损失的影响之间的关系的研究就显得尤为重要。

目前,Otero Perez 等人对多射流形式的冲击冷却 流动进行了高保真模拟,Kastamonu大学对扩展射流孔 射流冲击冷却进行了试验与数值研究。在国内,郭文 等人通过数值模拟的方法对冲击冷却等涡轮叶片冷却 技术进行了深入分析,邢改兰等人分析了刀片式多排圆 孔气体射流,考察了喷射高度和雷诺数对密集圆孔气 体射流冲击光滑平板换热效果的影响,郭曾嘉等人研究 了异五边形扰流柱工况下的冲击冷却,证明了异五边 形选择的合理性。

为研究冷却孔不同尺寸对冲击冷却带来的影响,采 用数值模拟的方法,利用 CATIA 和 FLUENT 等软件 对涡轮叶片冲击冷却的工作环境进行建模仿真,分析 引入冲击冷却给涡轮叶片流场带来的变化,并研究了 不同冷却孔的尺寸工况下流场的压力、速度等参数的 变化,最终得到不同尺寸孔径对冲击冷却效率影响的 规律。

# 1 射流板模型建立与计算

为方便研究不同孔径下的冲击冷却,利用 CATIA 软件建立简易板型结构模拟冷却工况。所建立的板状 结构分为流体区域和固体区域两部分。流体区域包括 射流冲击孔、冷却腔以及压力腔体。冷却腔体是由射 流冲击孔平板和射流冲击发热板之间的流体区域组 成,而压力腔体则包括压力腔上平板与射流冲击孔平 板之间的流体部分。固体区域包括压力腔的上下板, 分别为压力腔上平板和射流冲击孔平板、射流冲击发 热板。冷却气体首先从压力腔两端进气道进入压力 腔,流经射流孔后进入冷却腔,对发热板进行冲击冷 却,最后从冷却腔左右两侧出口流出,完成整个冷却 过程。

表1给出了射流板模型的具体参数。根据表中参数, 利用 CATIA 软件完成了射流板模型的建立。图1~图3 为射流板的模型示意图。

表 1 射流板模型基本尺寸 /mm

外壳	外壳	外壳	内部腔	内部腔	内部腔
长度	宽度	高度	体长	体宽	体高
30	12	14	30	12	4



## 图 1 射流板模型图

将建立好的射流板模型导入 ICEM 中进行网格划 分,使用块划分工具对流体区域和固体区域进行区分, 定义全局最大网格尺寸为 5mm、射流孔处最大网格

- 22 -





## 图 5 射流孔局部网格图

尺寸为 0.1mm, 对射流孔处的网格进行加密, 且需保 证网格加密时 y+为 1。得到的网格划分如图 4、图 5 所示。

图 2 射流孔结构图



图 3 完整几何模型



网格划分完成之 后,将模型导入Fluent 软件进行进一步计算设 置。选择时间类型为稳 态,速度方程为绝对速 度,并选择基于压力法 的求解器。同时湍流模 型选择带壁面温度传递 函数的标准 K-ε 模型。 表 2 和表 3 给出了

边界条件相关参数信息,其中,模型工况为 不可压缩流体,定义流 体为理想流体。具体参 数如表2所示。

定义固体材料为发 热钢板(steel),其发热 量设置为常数1500W/ m<sup>3</sup>。综合考虑模型工况, 在流入口处选择采用流 量入口条件(mass-flowinlet),出口边界选择压 力出口边界(Pressure-Outlet),壁面边界条件 无滑移(No Slip)绝热 壁面,具体参数如表3 所示。边界条件设置完 成之后,进而设置解算 条件和初始条件,然后 进行计算。

# 机械制造与智能化

#### 表 2 理想气体参数

Cp/(J/(kg·K))	热导率 /(W/(m·k))	黏度 /(kg/(m·s))
1006.43	0.0242	1.7894 × 10 <sup>-5</sup>

表 3 边界条件设置

发热靶板的	压力腔进口	压力腔进口
发热量	气体压力	气体流量
1.5 × 103W/m <sup>3</sup>	303975Pa	0.0015kg/m <sup>3</sup>

# 2 结果分析

# 2.1 冲击冷却的引入对流场影响分析

图 6 给出了引入冲击冷却后模型的流场速度分布。 从图 6 可以看出,由于冲击气流的引入,射流孔入口处 出现了明显的湍流,流速在射流孔中达到最大,当气流 却的引入而起到被保护的作用。

2.2 不同射流孔内径对流场的影响分析

改变射流孔内径,分别在 1mm、2mm 和 3mm 的 内径下完成模型的建立、网格划分以及计算,得到了 不同尺寸孔径下的流场流速和温度分布情况。图 8 给 出了射流孔直径分别为 1mm、2mm 和 3mm 时流场压 力的分布情况。

从图 8 可以看出,直径为 1mm 情况下,整个截面 压力最高值为 4.3×10<sup>4</sup>,射流孔内部压力分布比较均匀, 靠近出口腔出压力逐渐增大。

从图 8(a) 可以看出,整个工作部分的压力按不同 区域分布较为均匀,在射流孔和压力腔体解除部分能 观察到明显的压力下降现象,而压力降低的分界线呈 现较为明显的抛物线形状,压力值从 2.74×10<sup>4</sup>下降到

图7给出了在 引入冲击冷却后发 热板下端面的温度 分布。可以看出, 由于冲击气流的引 入,发热板得到了 有效的冷却。正对 射流孔的位置温度 最低,而远离射流 孔的区域,距离越 远,呈现温度逐渐 增加的趋势。因此 可以认为,正对射 流孔的位置冷却效 果最佳,冷却效果 随着偏离射流孔而 降低。而由于多个 射流孔的存在, 使 得发热板大部分区



图 6 流场速度分布图





图 9 射流孔区域压力值

2.00E+04

1.50E+04

1.00E+04

5.00E+03

0.00E+00

1.98e+02 8.07e+01 3.63e+0 1.53e+02 -2.70e+02 -3 87e+02 (c) 直径 3mm 图 8 不同射流孔直径下流场压力分布图 3.00E+04 2.50E+04

d=2mm

•最高压力 🗕

d=3mm

■最低压力

1.48×10<sup>3</sup>量级。

图 8(b) 给出了射流孔直径为 2mm 情况下流场压力分布。从图中 可以看出,由于射流孔直径的增大, 射流孔中引入的冲击冷却气流与主 气流发生一定掺混,从而导致了射 流孔内部区域压力的不均匀,同时, 压力改变处的分界线和 1mm 直径 时的抛物线相比变得更平缓。

图 8(c) 给出了射流孔直径为 3mm 情况下流场压力分布。从图 中可以看出,射流孔内部的压力随 着孔径直径尺寸的增大而减小,靠 近出口的射流孔压力损失的现象更 明显,靠近进出口面附近的射流 孔冲击压力明显受到两侧气流的影 响。

对比3个尺寸射流孔内径可以 发现,孔直径越大,流场在射流孔 区域的压力损失越明显(图9),从 而冷却效果也会受到影响;随着内 径的进一步增大,冷却的效果会进 一步减弱。因此,在保证整体冷却 效果的前提下选择较小射流孔直径 为宜。

图 10 给出了射流孔分别在 1mm、2mm 和 3mm 孔径下流场速 度的分布情况。从图中可以看出, 射流孔孔径较小时,冷却腔和射流 孔内部区域流速均处于较大值,流 速未受到出口主流场的明显影响, 流体很好地沿射流孔方向流动。而 随着内径的增大,由于气体掺混的 影响,射流孔入口处的流速呈现逐 渐降低的趋势,射流孔内部流速也 呈现中间高、两边低的趋势。随着 射流孔径的增大,气体掺混混合区 的湍流度不断增强,导致射流孔出 口处流速也逐渐减小,从而导致冷 却效果的降低。

关注努塞尔数,图11给出了 不同孔径下冲击射流靶面的平均努 塞尔数。从图中可以明显看出,随 着孔径尺寸的增加, 努塞尔数有下 降的趋势,这表明在给定的射流板 尺寸下,采用更大的射流孔直径会

22-47 机械制造与智能化 22年 2月中 第5期.indd 25

2022年 第05期



机械制造与智能化

# 机械制造与智能化

中国机械



减弱传热的能力,降低冷却 的效果。根据以上数据可以 得出,在其他条件不变的情 况下,适当减小射流孔直径 是增强冲击冷却换热的有效 手段。

#### 3 结语

利用 CATIA 和 FLUENT 等软件,采用数值模拟方法模 拟涡轮叶片冲击冷却工作环境 并进行计算分析,得到冲击冷 却下流场的速度、温度等分布 规律,改变冷却孔孔径,在不 同孔径工况下对流场压力、流 速和努塞尔数等方面进行分 析,得到如下结论:

(1)冲击冷却的引入能 够有效提供对发热板的热防 护,正对射流孔位置温度最 低,冷却效果最好,越远离 射流孔,冷却效果呈现逐渐 减弱的趋势;

(2)随着射流孔孔径增 大,流场在射流孔区域的压 力损失越明显,冷却效果随 之减弱,在保证整体冷却效 果的前提下选择较小射流孔 直径为宜;

(3)随着射流孔孔径增 大,冲击靶面平均努塞尔数 呈现减小趋势,同样可以说

明在其他条件不变的情况下,适当减小射流孔直径是 增强冲击冷却换热的有效手段。

#### 参考文献:

[1] 孙启超. 层板结构内部流动与换热特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学,2012.

[2] 郭文, 王鹏飞. 涡轮叶片冷却技术分析 [J]. 航空 动力, 2020 (06): 55-58.

[3] 邢改兰, 赖焕新, 刘华飞. 刀片式多排密集圆孔 气体冲击射流冷却的实验研究 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2020, 46 (06): 815-821.

[4] 郭曾嘉, 李润东. 异五边形扰流柱冲击冷却系统的数值研究 [J]. 低温工程, 2019(05): 28-34.





图 11 冲击靶面的平均努塞尔数