

高温高速气流冲击下气流挡板的换热性能研究

王 瑾, 段文珊, 赵 凯, 赵路平

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 在高温高速气流喷口后方设置倾斜气流挡板,使气流沿着挡板角度射入周围环境,达到减少对周围相关人员和设备的影响.同时为满足对挡板的使用要求,降低挡板表面的温度,对其换热过程进行分析,发现挡板表面空气层在换热中为主要影响因素.涂层表面粗糙度和挡板顶部边缘的锐角都会对边界层产生扰动,进而影响换热.采用 FLUENT 软件对挡板阻挡高温高速气流在不同工况条件下的影响因素及其耦合特性进行数值模拟仿真研究,结果显示,适当的涂层表面粗糙度,使传入挡板的热量减少 3%~7%;挡板边缘倒圆角后,顶部温度下降 10%.

关键词: 气流挡板; 空气边界层; 表面粗糙度; 换热; 数值模拟

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Heat Transfer at High Temperature and High Speed Airflow Jet Impinging on Baffle

WANG Jin, DUAN Wenshan, ZHAO Kai, ZHAO Luping

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: An oblique baffle was set behind the high temperature and high speed airflow nozzles in order that the air can flow along the baffle into the surrounding environment to decrease the affection around relevant personnels and equipments. For ensuring the use of the baffle, the heat transfer was analyzed and it was found the air layer on the baffle surface is the dominant factor. And the boundary layer stability is affected by the surface roughness and the baffle top edge angle. The influencial factors and their coupling characteristics under different operating conditions were studied by using the software FLUENT. The results show that the proper coating surface roughness can reduce the heat flux by 3%~7%, and the temperature of top surface of baffle by 10%.

Key words: airflow baffle; air boundary layer; surface roughness; heat transfer; numerical simulation

喷气式发动机的大尺寸喷管喷出的高温高速气流会对其周围的人员与设备造成很大影响,为改变以上状况,采用挡板阻挡,改变其气流方向,使高温

高速气流沿着挡板板面某一角度方向向上进入空气中,以达到保护周围人员与设备的目的.目前对喷管射流冲击倾斜挡板的现象进行了一

收稿日期: 2014-04-30
基金项目: 上海市教委重点学科资助项目(J50502)
第一作者: 王 瑾(1955-),女,副教授.研究方向:制冷空调工程研发与节能. E-mail: wjljh2003@163.com

系列的研究,陶世森等^[1]对跨声速理想膨胀射流冲击的角度、射流距离与喷口直径比进行了模拟分析,得到了最佳射流角度和射流距离;叶纯杰等^[2-3]对用于湍流射流冲击的不同数值方程的使用效果进行了探讨;陈庆光等^[4]研究了矩形喷口冲击射流的气流流动和传热特性.研究主要集中在喷管射流特性及喷管射流和气流挡板之间的关系等,而对气流挡板的热力性能的研究比较少见.为了保证气流挡板的工作可靠性,延长其使用期限,必须保证气流挡板的耐高温性,因此,需对挡板的结构特点以及喷射气流特性对换热的影响进行分析,以指导气流挡板设计.

1 气流挡板换热影响分析

1.1 气流挡板基本结构

气流挡板装置的作用是阻挡高温高速气流在周围的扩散并改变气流方向,挡板必须具有一定的结构强度和耐温性能.气流挡板是通过敷设在面板表面的涂层、面板和贯穿在面板内部的水道冷却来实现整个挡板耐温的特性,挡板结构如图1所示.要求涂层和板面的材料耐压、耐高温,能够完全承受高速气流的喷气推力和高温的侵蚀.为了降低挡板的表面温度,在面板内部设置冷却水水道,起到了良好的冷却作用.

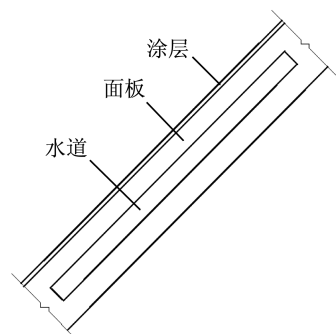


图1 倾斜气流挡板结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of baffle

1.2 换热影响因素分析

减少发动机喷射气流与气流挡板的换热量,提高挡板内的冷却效果,是控制好面板温度、延长挡板的使用期的两个方面.高温喷射气流和挡板间的换热量与其换热热阻密切相关.发动机尾部喷射的高温高速气流会在气流挡板表面形成流程短而且薄的空气边界层,在离壁面极近的区域内存在仅靠分子运动的导热传递热量的黏性底层^[5],黏性底层之外流体旋涡将加强壁面和喷射气流主流区之间的热量

传递.与喷射主流流体不同,边界层内的流体温度由于黏性底层的作用,沿壁面法线方向梯度较大,传热主要包括热传导传递的热量和热对流传递的热量.空气侧热阻包括对流换热热阻和导热热阻.根据气流挡板结构,其换热热阻包括空气侧热阻、涂层热阻、面板热阻和水侧热阻.

倾斜气流挡板的总热阻为 R ^[6].

$$R = \frac{1}{h_a} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{1}{h_w} \quad (1)$$

$$h_w \frac{d}{\lambda_w} = Nu_w = 0.023 Re_w^{0.8} Pr_w^{0.3} \quad (2)$$

$$h_a \frac{r}{\lambda_a} = Nu_a = 2 Re_a^{0.5} Pr_a^{0.42} \cdot$$

$$(1 + 0.005 Re_a^{0.55})^{0.5} \frac{1 - 1.1D/r}{1 + 0.1(H/D - 6)} \quad (3)$$

$$\delta_a = 5 \sqrt{\nu x / U_\infty} \quad (4)$$

式中, h_a 为空气对流换热系数; h_w 为冷却水对流换热系数; δ 为导热热阻厚度; λ 为导热系数; d 为冷却水道的定型尺寸; Re 为雷诺数; Nu 为努塞尔数; Pr 为普朗特数; r 为挡板表面任一处与滞止点的距离; H 为喷口与挡板的距离; D 为射流喷口直径; ν 为运动黏度; x 为挡板特征长度; U_∞ 为主流流体速度; 下标 a, w 分别代表空气和冷却水; 下标 T, M 分别代表涂层和面板.

在整个热阻计算中,空气的导热系数和对流换热系数较小,得到空气侧总热阻占挡板总热阻的96%左右,而涂层和面板导热热阻以及水侧对流热阻所占比率分别为2%,1%,1%.因此,板面处的空气边界层对挡板换热是影响挡板换热的主要因素.增加空气侧热阻,可以有效地控制喷射气流和气流挡板之间的换热量.由于气流挡板表面的耐温涂层存在一定粗糙度,对挡板表面的气流黏性底层影响很大,高温高速气流冲击面板时受表面粗糙度的影响,使喷射气流的空气边界层厚度产生变化,从而影响气流挡板空气侧热阻;同时,当气流平稳地沿板面流动时,板面顶部边缘90°的直角也会对气流挡板的空气边界层造成很大扰动.本文通过数值模拟的方式来分析表面粗糙度和倾斜挡板顶部倒角对倾斜气流挡板的板面空气边界层的影响,进而研究气流挡板的换热耐温性能.

2 高温高速气流冲击挡板的数值模拟

2.1 建立物理模型和求解方程

高温高速气流冲击倾斜挡板示意如图2所示,

以其整场作为计算域,设定喷口直径为 1 m,喷口中心距挡板表面为 3 m,挡板大小为 5 m×4 m,气流挡板与气流冲击方向呈 45°夹角,Y 轴与挡板平面呈 45°,垂直向上,Z 轴与 X 轴构成水平平面,Z 轴与气流流入方向相反,X 轴与冷却水流入方向相反.

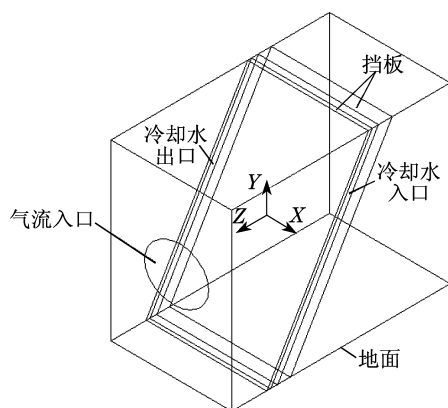


图2 冲击射流示意图

Fig.2 Schematic diagram of jet impingement

采用前处理软件 Gambit 进行几何建模并划分网格. 为提高网格质量及计算求解的准确性,表面涂层、挡板本体、冷却水道及挡板后区域均采用六面体结构性网格划分;气流挡板前部区域均采用 T-Grid 网格划分;并采用线、面、体的顺序依次对计算模型进行网格设置,对挡板表面的空气边界层处网格局部加密,保证第一个计算节点在 $y^+ < 5$ 内. y^+ 是第一层网格质心到壁面的无量纲距离,保证第一层网格划分在层流底层内部.

Navier-Stokes 方程能精确描述射流的流动和传热问题^[7].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \quad (5)$$

式中, ∇ 为梯度算子, ∇^2 为拉普拉斯算子; u , p 分别为流体的速度和压强; t 为射流的时间.

射流冲击湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型^[8],可直接求解近壁空气边界层处的流动和传热问题. 计算采用有限体积法离散控制方程,并用 SIMPLE 算法处理压力与速度之间的耦合.

2.2 边界条件的设定

射流侧和循环冷却水侧均采用速度入口条件,给定入口处的速度和温度;内部冷却水沿 $-X$ 轴向流入气流挡板,均匀流动,定义冷却水初始温度为 32 °C,速度为 1.5 m/s;出口采用压强出口条件;计算区域的上部、后部以及两个侧面与大气相通的面均设定为压力出口;地面设定为固定无滑移壁面条件.

3 模拟结果及分析

采用 FLUENT 软件对高温高速气流冲击倾斜挡板在不同工况条件下进行瞬态数值模拟计算. 由于喷气式发动机喷口的作用,整个倾斜挡板周围的气流流场均呈现为高温高速状态,选用喷气式发动机的 2 种工况进行研究,工况 1 的发动机喷口气流温度为 800 °C,喷口中心气流速度为 500 m/s;工况 2 的发动机喷口温度同为 800 °C,气流速度达到 1 000 m/s. 而气流挡板所能承受的材料表面温度不宜超过 480 °C. 气流喷射过程中,喷射气体沿喷出方向的温度衰减很大,气流各组分气体的物性参数值随着温度的变化而波动. 如图 3 所示,在模拟时对气流的物性参数设定中,根据气体的燃气组分和温度变化范围,采用最小二乘法拟合曲线,使这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小,由此获得气流比定压热容 c_p 、动力黏度 μ 等作为物性参数的输入数据.

发动机在 2 种工况下工作 3 min 时,喷口对倾斜挡板冲击射流以及挡板整体换热情况如图 4 所示(见下页),整束气流到达挡板后大部分沿板面折射

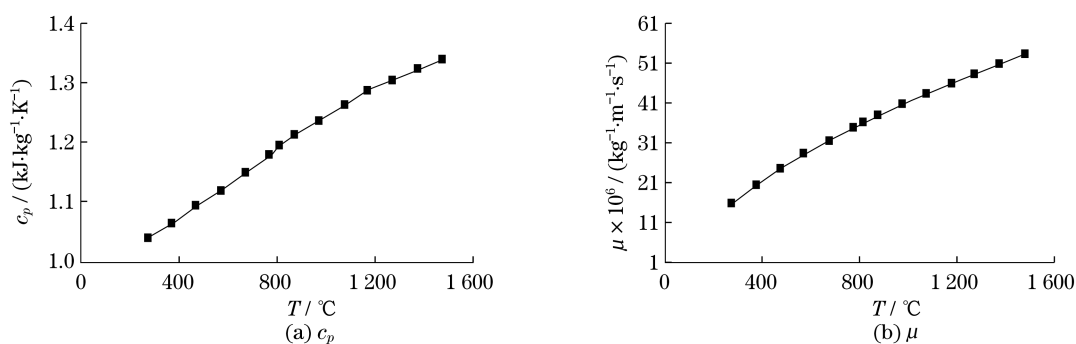


图3 物性参数与温度的拟合关系曲线

Fig.3 Fitting curve of c_p and μ versus temperature

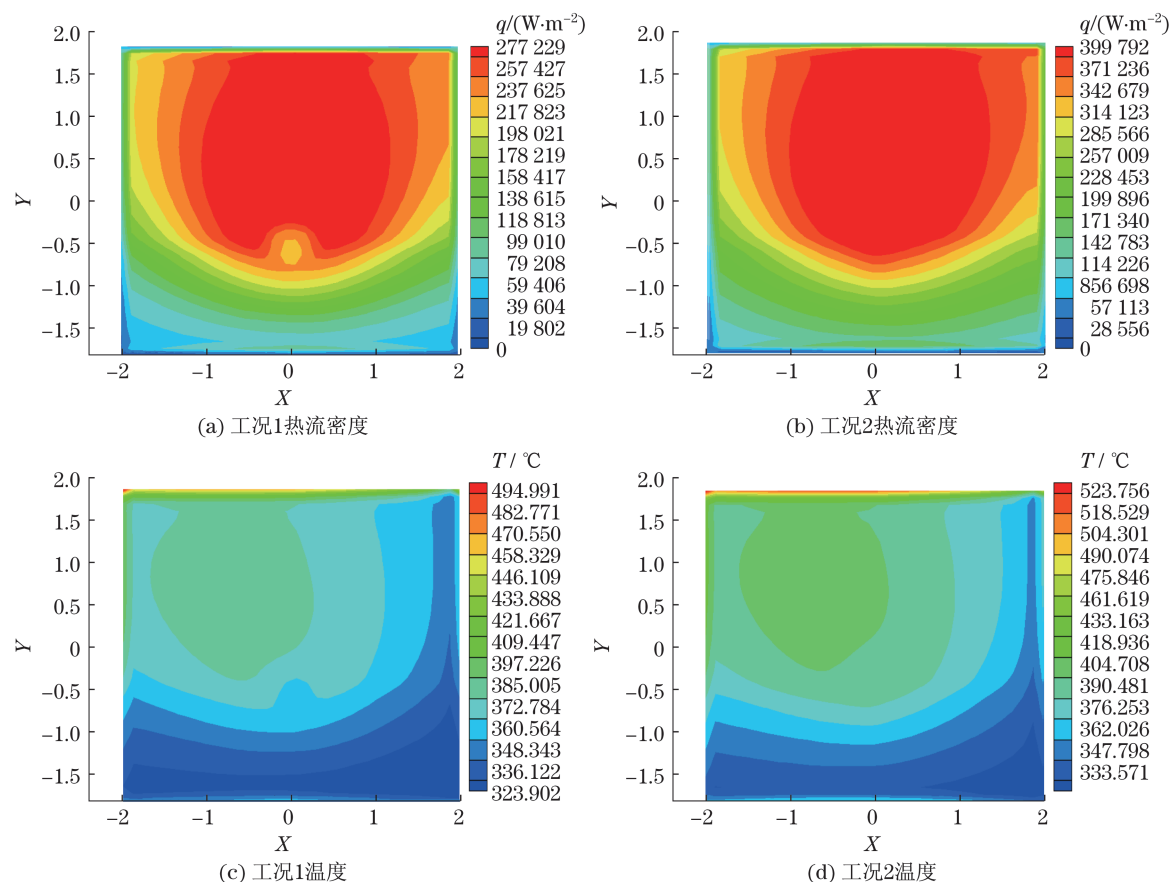


图4 挡板表面热流密度和温度分布云图

Fig.4 Contours of heat flux and temperature on surface of baffle

向上流动.挡板中心处气流驻点区的空气边界层非常薄,随着气流沿板面 Y 轴正向流动的过程中,流态充分发展,扰动增加,在挡板上半部分的热流密度 q 逐渐增多.在挡板顶部存在局部高温现象,在工况1下气流挡板的顶端局部最高温度 T 约为 495°C ,在工况2下可达 533°C ,均高于材料能够承受的 480°C .为了延长气流挡板的工作寿命,改变涂层表面粗糙度和气流挡板顶部边缘尖角,可有效降低挡板表面温度和改善气流挡板的换热性能.

3.1 表面粗糙度

当发动机尾部喷出的高温高速气流流过挡板,板面的空气边界层随着气流流过方向逐渐加厚,涂层表面粗糙度会对空气边界层的稳定性造成影响,进而影响装置的换热性能.李轶名等^[9]选取粗糙元高度为 3.2 mm 的涂层,通过实验表明,二维单一粗糙元在流向上使层流提前向湍流转变,对转捩有促进作用;Sharif 等^[10]分析了表面粗糙度对射流冲击凸状半球的对流热传递的影响,认为在物体表面设置粗糙度后会增强换热;Carolyn^[11]认为边界层厚度为一常数,指出粗糙度与边界层厚度的比值会影响

流体的分离.本文以光滑壁面为参考,垂直于壁面的气流速度 U 如图5所示,在工况1下,主流流体速度 U_{∞} 约 450 m/s .在2个发动机工况下,气流自滞止点沿板面向上流动 1 m 处的边界层厚度 δ_{99} 分别约为 $2,3\text{ mm}$,即在较小速度冲击挡板时,在板面形成的空气边界层较厚.在工况2下,气流雷诺数较高,流体紧贴壁面处速度梯度较大, U_{∞} 约为 850 m/s .

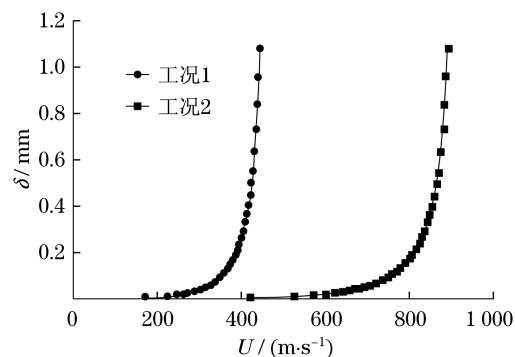


图5 垂直于壁面的气流速度分布

Fig.5 Airflow velocity distribution in the direction perpendicular to the surface

发动机在2种工况参数下冲击倾斜挡板3 min时,在挡板表面形成的边界层厚度不同,在工况1下取涂层表面粗糙度 K 分别为 1 000, 200, 150, 100 μm ,在工况2下取 K 分别为 100, 50, 25, 10, 1 μm 进行瞬态模拟计算.

如图6(a)和6(b)所示,在边界层内部垂直于壁面处的气流速度沿边界层厚度 δ 增加的方向,先逐渐增大,后趋于平缓.工况1时,不同粗糙度下的气流速度基本一致.工况2时,涂层表面 $K = 50, 100 \mu\text{m}$ 时的垂直于壁面处的气流速度大小基本相同,明显低于其它 K 值下的流速,且涂层表面 $K = 1, 10 \mu\text{m}$ 时的气流速度大小也基本相同.在发动机工况2较高的气流流速条件下,随着板面粗糙度的增大,对边界层内空气流动产生的粘性阻力亦随之增加,近壁面处的气体流速由于受到粘性力的影响而逐步减小.由于在工况2下,发动机喷口气流的流

速高于工况1的,在挡板表面形成的边界层厚度较薄,故粗糙度大小对近壁面处空气边界层流动影响较明显.

同时,垂直于壁面气流的湍流强度 I 如图6(c)和6(d)所示,随着网格点靠近主流区域气流的湍流强度先增加后减小.在工况1下,不同粗糙度对边界层内气流的湍流强度影响不大.在工况2下, $K = 100, 50 \mu\text{m}$ 时湍流强度基本相同,高于其它较小粗糙度, $K = 1, 10 \mu\text{m}$ 时湍流强度最小.因此,随着粗糙度的增大,边界层内速度梯度有减缓趋势,但是,挡板表面越粗糙,对气流的扰动作用越强.当涂层表面粗糙元处于边界层内部时,能够增加边界层内部流场粘性力^[12],保持流动的稳定,延缓流动由层流向湍流的转变.随着粗糙度的增加,空气边界层逐渐变厚,气流流动易受到粗糙元的影响而形成扰动,加速了流态转换,进而破坏边界层的稳定,增强了换热效果.

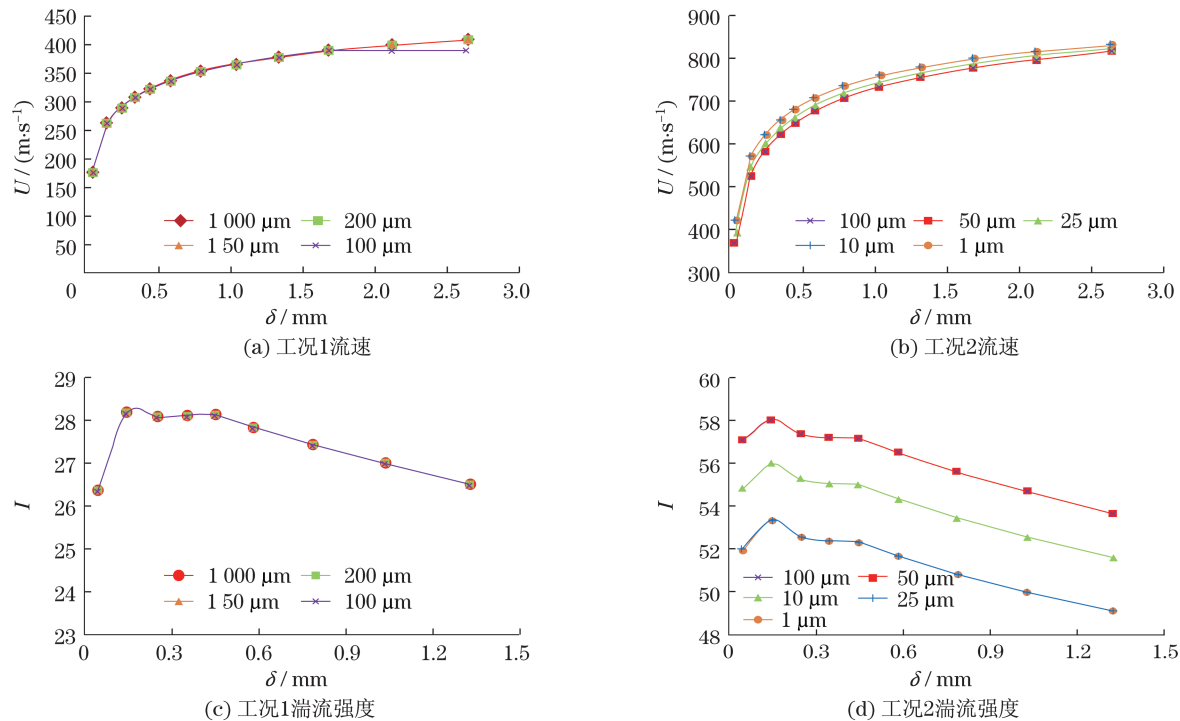


图6 不同粗糙度下垂直于壁面的气流分布

Fig.6 Airflow parameters trends in the direction perpendicular to the surface under different roughness

高温高速气流沿板面向上流动时,沿 Y 轴正方向的气流近板面流速变化如图7(a)和7(b)所示(见下页).气流在倾斜挡板表面边界层内的流速从滞止点沿板面 Y 轴正方向先逐渐增大,后有减小趋势,粗糙度大小依旧对工况1下的沿板面流速影响不大.在工况2下, K 在小数值时,气流沿挡板的流速大小基本一致,超过 $K = 10 \mu\text{m}$ 后,随着粗糙度增加,对气流流动产生更多的阻力,使流速逐渐降低,当 $K = 50 \mu\text{m}$

时,流速最小,再增加粗糙度,流速已不再变化,这与边界层内垂直于板面的速度变化规律相符.

粗糙度的增加会减小板面气流的流动速度,进而减少对流换热,但是,粗糙度不能一味增大,这样边界层内流动的稳定也会受到破坏.从图7(c)和7(d)(见下页)可以看出,气流在倾斜挡板表面的热流密度从滞止点沿板面 Y 轴正方向先逐渐增大,后逐渐减小,与沿板面速度变化趋势一致.在工况1

下,不同粗糙度下板面的热流密度区别不明显.在工况2下,滞止点处在粗糙度较小时,热流密度较大,随着气流流动稳定,在 $K = 50 \sim 100 \mu\text{m}$ 时传入挡板的热流密度趋于稳定,传入挡板的热量最多.而当 $K = 10 \mu\text{m}$ 时传入挡板的热量最少,比 $K \geq 50 \mu\text{m}$ 时减少了近7%.因此,可以认为在此工况下,粗糙

度为 $10 \mu\text{m}$ 时可以阻隔更多的热量.

挡板表面温度与热流密度的分布相一致,如图7(e)和7(f)所示,当 $K = 10 \mu\text{m}$ 时挡板表面温度最低,相比 $K = 1 \mu\text{m}$ 时的下降了 4°C ,相比 $K = 25 \mu\text{m}$ 时下降了 5°C ,相比 $K = 50, 100 \mu\text{m}$ 时的下降了 10°C .

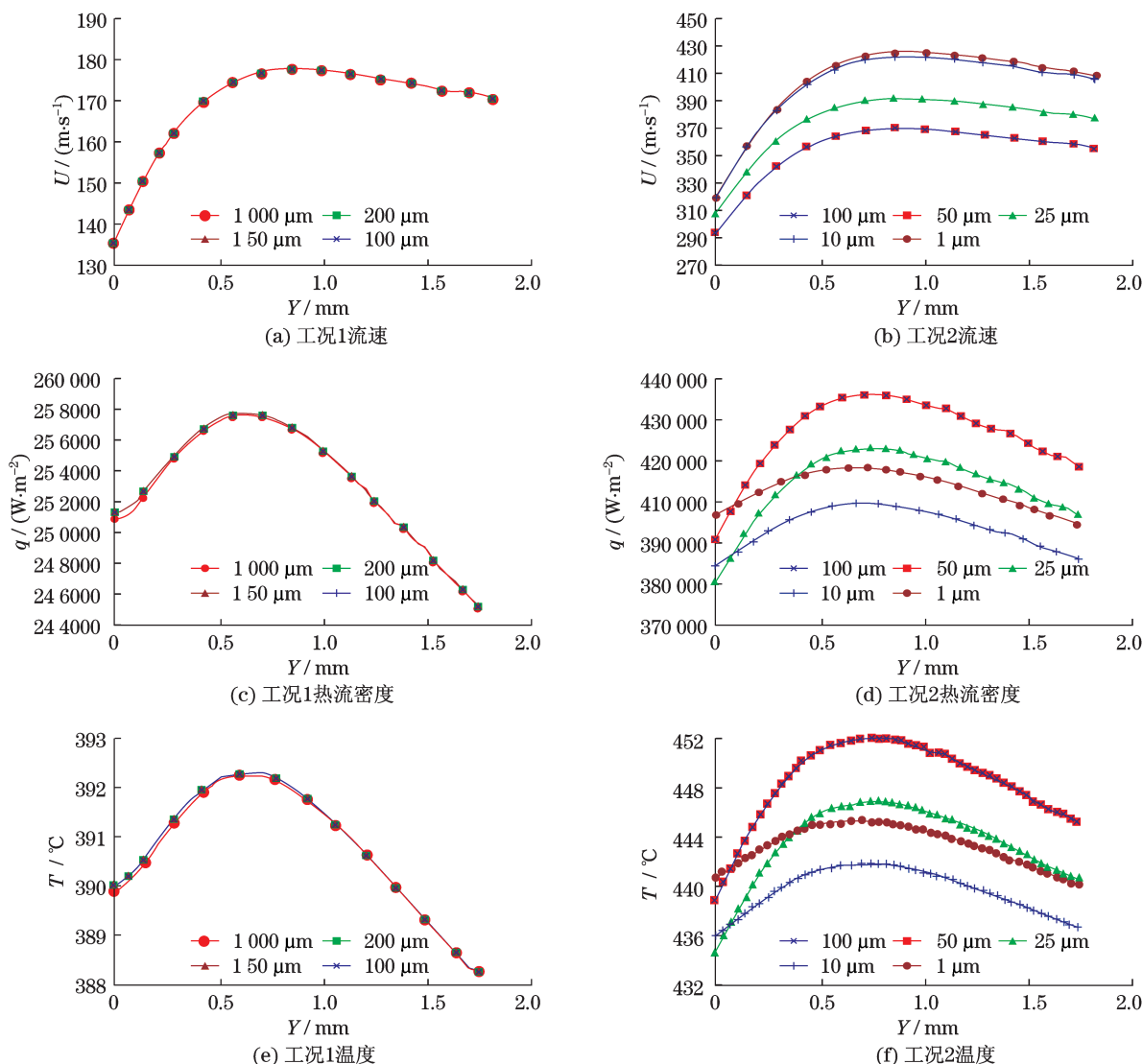


图7 不同粗糙度下沿挡板表面气流参数的变化趋势

Fig.7 Airflow parameters trends along the baffle surface under different roughness

3.2 挡板顶部边缘倒角

当气流流过挡板边缘,由于顶部边缘处为 90° 的直角,破坏了流体流线,对空气边界层造成扰动,增强了换热效果,挡板顶部在高温高速流体的作用下出现了局部高温.如果在挡板顶部设置一个5 mm半径的圆角,使气流脱离挡板时沿圆弧流线进入周围环境.如图8所示,使气流刚到达挡板顶部时温度迅速升高,在流动稳定后温度有所下降并趋于平缓.在工况1下,挡板温度稳定时,在设置圆角后挡板顶

部温度为 424°C ,改变结构前为 473°C .在工况2下,在设置圆角后挡板顶部温度为 487°C ,改变结构前为 536°C .虽然在气流冲击挡板过程中挡板顶部温度短暂的超过允许温度,但是,瞬时效应短暂,考察稳定后的参数值满足材料要求.因此,将挡板顶部直角倒角后,降温效果明显.

综上所述,适当的挡板表面粗糙度和改变挡板顶部直角状态对减弱高温高速流体冲击挡板和射流换热效果明显,挡板顶部局部最高温度降低 $50 \sim$

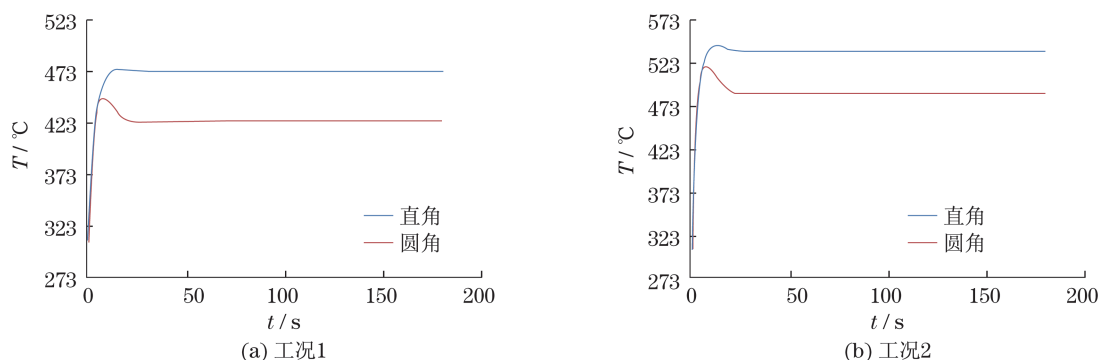


图8 挡板顶部温度随时间变化趋势

Fig.8 Temperature trend varying with time at the top of baffle

60 °C,有效地将气流挡板的温度控制在挡板材料许用温度范围内,满足了气流挡板在高温高速喷射气流冲击下的使用要求.

4 结 论

通过对高温高速气流冲击倾斜气流挡板换热的影响因素进行分析,得出以下结论:

a. 高温高速气流喷射倾斜气流挡板时,在挡板涂层表面处形成的空气边界层是影响气流挡板换热性能的主要因素.而气流挡板涂层表面的粗糙元对整体板面空气边界层的稳定性起了关键性作用,同时挡板边缘的直角对气流挡板顶部局部空气边界层的厚薄产生较大影响.

b. 由于喷气式发动机工况不同,工况1气流冲击速度较低,在气流挡板板面形成的空气边界层较厚,因此,换热性能受到粗糙度的影响较小;工况2气流冲击速度增加,在气流挡板表面的空气边界层较薄,粗糙度的变化对气流挡板的换热性能有较大影响.通过模拟分析,在 $K=1\sim 100\ \mu\text{m}$ 的粗糙度范围内,粗糙度为 $10\ \mu\text{m}$ 时阻隔的热量最多,使气流挡板板面整体温度下降近 $10\ ^\circ\text{C}$,传入气流挡板的热流密度减少7%.

c. 在倾斜气流挡板顶端边缘将直角改为5 mm半径的圆角后,高温高速气流沿气流挡板顶部圆弧流线进入周围环境,避免了气流经过边缘直角造成的空气层扰动,无论工况1或工况2,气流挡板顶端局部最高温度均下降 $50\sim 60\ ^\circ\text{C}$.

参考文献:

[1] 陶世森,董积旂,宗培.跨声速射流冲击对挡板作用特性的模拟分析[J].江苏科技大学学报(自然科学版),

2013,27(4):312-316.

- [2] 叶纯杰,范俊生,潘红良.倾斜射流对移动平板表面紊动和传热特性的影响[J].动力工程学报,2012,32(4):315-320.
- [3] 陈庆光,徐忠,张永建.湍流冲击射流流动与传热的数值研究进展[J].力学进展,2002,32(1):92-108.
- [4] 陈庆光,王涛,吴玉林,等.三维湍流冲击射流流动与传热特性的数值研究[J].空气动力学学报,2006,24(2):227-232.
- [5] 生井武文,井上雅弘.粘性流体力学[M].伊增欣,译.北京:海洋出版社,1984.
- [6] 杨世铭,陶文全.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.
- [7] 陆昌根,赵玲慧,沈露予.局部扰动对平板边界层流动稳定性影响的研究[J].空气动力学学报,2012,30(1):63-67.
- [8] Eça L, Hoekstra M. Numerical aspects of including wall roughness effects in the SST $k-\omega$ eddy-viscosity turbulence model[J]. Computers and Fluids, 2010, 40(1):299-314.
- [9] 李轶明,颜大椿.二维单一粗糙元对边界层转捩影响的实验[J].北京大学学报(自然科学版),2005,41(1):70-75.
- [10] Sharif M A R, Ramirez N M. Surface roughness effects on the heat transfer due to turbulent round jet impingement on convex hemispherical surfaces[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2):1026-1037.
- [11] Aubertine C D, Eaton J K, Song S. Parameters controlling roughness effects in a separating boundary layer [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25(3):444-450.
- [12] 张春平,唐大伟,曲伟,等.粗糙度对细微通道内流动特性影响的实验研究[J].上海理工大学学报,2008,30(1):55-58.

(编辑:石 瑛)