

DOI: 10.7652/xjtuxb201707009

平板冲击发散冷却流动与换热特性的数值模拟

费昕阳, 王新军, 陆海空

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用 ANSYS-CFX 商用软件对模化平板冲击发散冷却结构中的流动与换热特性进行了数值模拟, 对比了有、无固体域时冲击发散冷却的冷却效率, 分析了不同吹风比时气体的流动结构、涡强度、综合冷却效率和流动效率的变化, 分析了固体导热系数对冷却效率的影响。结果表明: 冲击发散冷却同时具有冲击冷却和气膜冷却的优点, 可以有效保护壁面; 当吹风比增大时, 冲击冷却的效果增强, 肾型涡强度增大, 气膜冷却效果减弱, 但冲击冷却的影响优于气膜冷却, 所以其综合冷却效率仍然提高了; 气膜冷却部分有最大的局部压力损失系数, 当吹风比增大时, 总压力损失系数增大, 流动效率下降; 当固体导热系数增大时, 冲击冷却的影响增大, 综合冷却效率提高。该结果可为进一步冷却燃气轮机内工作部件提供参考。

关键词: 冲击发散冷却; 数值模拟; 吹风比; 综合冷却效率

中图分类号: TK472 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)07-0057-05

Numerical Simulation for Flow and Heat Transfer Characteristics of Impingement/Effusion Cooling on a Flat Plane

FEI Xinyang, WANG Xinjun, LU Haikong

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Flow characteristics and heat transfer of impingement/effusion cooling on a flat plane were numerically analyzed by ANSYS-CFX software. The simulation for the working conditions with and without solid domain was carried out to find their influence on the cooling performance. The influence of solid thermal conductivity and effects of blowing ratio on the flow structure, vortex intensity, total cooling efficiency and flow efficiency were discussed. The results show that impingement/effusion cooling has advantages of both impingement and film cooling to protect the solid surface well. When blowing ratio becomes larger, the impingement is more effective, and the film cooling acts adversely. But the impingement cooling is more influential so the total cooling efficiency increases. The film cooling part has the largest local pressure loss coefficient, and total pressure loss coefficient increases with the increasing blowing ratio. When the solid thermal conductivity becomes larger, the impingement cooling is more influential and the total cooling effectiveness increases.

Keywords: impingement/effusion cooling; numerical simulation; blowing ratio; total cooling effectiveness

先进燃气轮机的进口温度不断提高, 需要更有效率的冷却方式对叶片、端壁等重要位置进行保护。

收稿日期: 2016-09-30。 作者简介: 费昕阳(1991—), 男, 硕士生; 王新军(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

网络出版时间: 2017-04-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170421.1649.004.html>

在现有的燃气轮机中,冲击冷却和气膜冷却得到了大范围的应用,而冲击发散冷却不仅将这两种冷却方式结合了起来,并且在内部可以布置不同的扰流结构,从而大幅度提高综合冷却效率,是一种很有前景的冷却方式。

国内外许多学者对冲击发散冷却进行了研究。Cho 等数值研究结果表明:叉排孔的冷却效果更好,总体冷却效率随着冲击高度的减小和雷诺数的增大而增大^[1]。Zhang 等通过实验研究,获得了低孔密度下压损大、高孔密度下压损小的结论^[2]。Oh 等实验研究了吹风比和气膜孔角度对全覆盖平板冲击发散冷却的换热特性的影响^[3]。Zhang 等数值对比了不同孔间距和吹风比下全覆盖平板冲击发散冷却的性能^[4]。Ignatious 等值研究平板冲击发散冷却时发现,当吹风比由 0.5 上升至 1.5 时,换热效率明显增大,但当吹风比由 1.5 继续增大时,换热效率不再发生明显的变化,随着孔直径的增大,效率也相应提高^[5]。Miller 等研究发现,冲击高度较高时努塞尔数分布较均匀,冲击高度较低时总换热量较大,孔密度较大时换热效果更好^[6]。Nakamata 等实验结果表明,孔顺排和叉排对综合冷却效率几乎无影响,内部添加扰流柱能够有效提高综合冷却效率^[7]。

本文采用了 ANSYS-CFX 商用软件研究了平板冲击发散冷却的冷却特性,分析了吹风比和固体导热系数对流动效率、冷却效率的影响。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型

图 1 是平板冲击发散冷却的数值计算模型示意。该模型包含 5 排冲击孔和 4 排气膜孔(第 1 排冲击孔 x 坐标为 0.045,坐标原点位置见图 1),冲击孔与气膜孔直径相同, $D_i = D_e = 15$ mm;气膜孔的倾斜角度为 30° ;冲击腔室高度 $H_1 = 3D_i$,主流通道的腔室高度 $H_2 = 6D_i$,冲击孔高度 $t_1 = 1.33D_i$,气膜

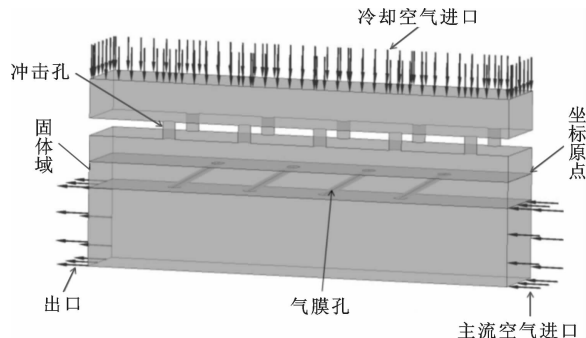


图 1 平板冲击发散冷却的计算模型示意图

孔高度 $t_2 = 2D_i$,冲击高度 $H = 2D_i$,冲击孔间距与气膜孔间距相同, $P = 6D_i$ 。图 2 是冲击孔和气膜孔的排布方式。

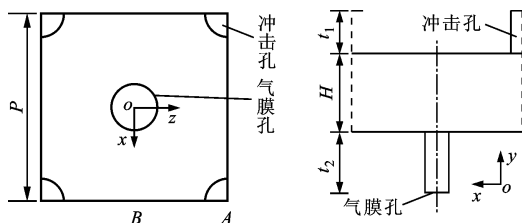


图 2 冲击孔和气膜孔排布示意图

1.2 参数定义

雷诺数定义为

$$Re = \frac{\rho v D_e}{\mu}$$

式中: ρ 为气体密度; v 为气膜孔出口速度; D_e 为气膜孔直径; μ 为气体动力黏性系数。

局部努塞尔数定义为

$$Nu = \frac{q_{\text{wall}} D_e}{(T_w - T_c) k}$$

式中: q_{wall} 为热交换壁面的热通量; T_w 为热交换壁面的温度; T_c 为冷却气流温度; k 为气流导热率。

吹风比定义为

$$M = \frac{v_c}{v_g}$$

式中: v_c 为气流在气膜孔进口处的流动速度; v_g 为主流气体流速。由于主流与冷却流气体温度差较小,所以本文在计算时忽略密度比。

绝热气膜冷却效率定义为

$$\eta_{\text{ad}} = \frac{T_g - T_{w,\text{adi}}}{T_g - T_c}$$

式中: T_g 为主流气体温度; $T_{w,\text{adi}}$ 为绝热壁面温度。

无量纲温度定义为

$$T_{\text{di}} = \frac{T_g - T}{T_g - T_c}$$

式中: T 为特定点处的温度。

综合冷却效率定义为

$$\eta = \frac{T_g - T_w}{T_g - T_c}$$

压力损失系数定义为

$$f = \frac{2\Delta p}{\rho \omega^2}$$

式中: Δp 为进、出口压力差; ω 为主流出口速度。

1.3 计算方法及网格无关性验证

采用 ANSYS-CFX 商用软件,求解了平板冲击发散冷却的三维定常黏性雷诺时均 N-S 方程。

在文献[1]的实验中,冲击板与气膜板上均布置有 25(5×5)个孔。为了减少计算量,选取一个冲击单元进行计算,并利用实验数据对数值方法进行了验证。图 3 是数值验证模型的结构。

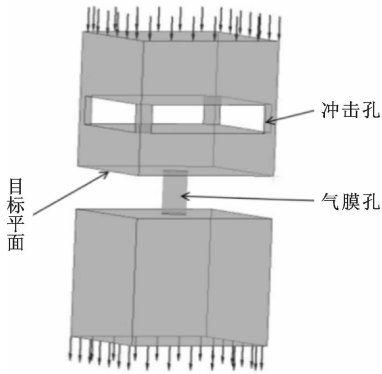


图 3 数值验证模型的结构示意图

采用 ICEM 商用软件进行结构化网格划分,冲击孔及气膜孔表面采用 O 型网格,边界层进行加密处理,设定第 1 层网格 $y^+ = 0.01$ 。

图 4 是不同湍流模型下的计算结果与实验数据对比(图 2 中 AB 线上的局部努塞尔数)。从图中可以看出,SST 模型模拟出的曲线与实验曲线十分接近,变化趋势相似,所以后续计算均采用 SST 湍流模型。

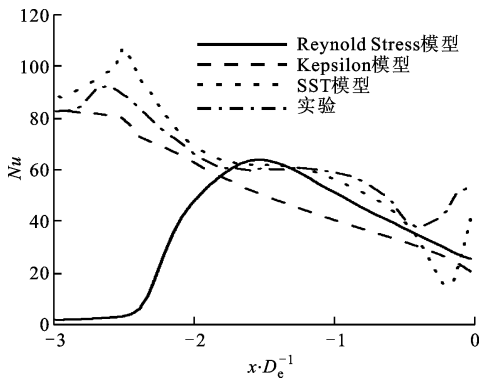


图 4 不同湍流模型下的计算结果与实验数据对比

图 5 是不同网格数下气膜板主流通道一侧中心线上从主流进口至第 1 排气膜孔出口处壁面的温度变化,可以看出,当总网格数达到 540 万,计算结果基本不变。所以,后续计算时网格数均为 540 万。

1.4 边界条件

冷却气流温度 $T_c = 300$ K,主流温度 $T_g = 320$ K,出口压力设定为 1 个标准大气压。除了固体域与流体域的重合面设置为交界面外,其余壁面都为绝热壁面,左右壁面设置为对称面。固体域为不锈钢材料,导热系数 $k = 13.4$ W/(m·K)。

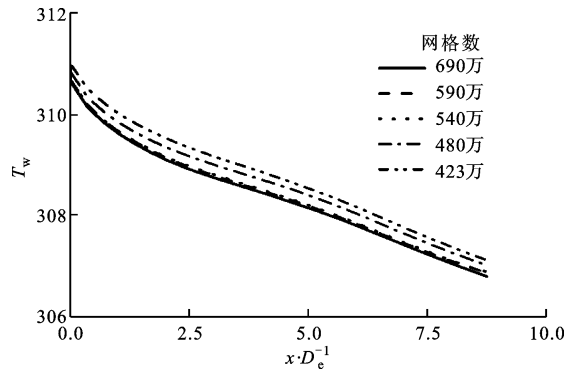


图 5 网格无关性验证

2 计算结果及分析

2.1 有、无固体域的冲击发散冷却对比

本文首先将流固耦合计算的结果与无固体域的计算结果进行了对比,计算时设定雷诺数 $Re = 10\ 000$,吹风比 $M = 1$ 。图 6 是气膜板主流一侧的壁面温度分布云图。从图中可以看出:在没有加入固体域时,冷却气流从第 1 排气膜孔流出后,由于展向上的速度分量很小,所以从每个气膜孔流出的冷却气流的最大宽度仅仅略大于气膜孔直径,而在冷却气膜无法覆盖的区域,其温度与主流温度相同;在加入了固体域之后,由于冲击冷却能够直接冷却冲击孔正下方一定区域内的气膜板,固体材料导热能力较强,所以整个固体表面的温度分布更为均匀,尤其是展向的温度,只有很小的变化。从图中还可以看出:在主流流向上,冷却空气逐渐累积,并在主流的作用下紧贴壁面,使得气膜变宽、变厚,对壁面的冷却效果增强;在有固体域时,气膜孔周围出现了明显的低温区域(包括第 1 排气膜孔上游位置),这是因为气膜孔内气流的高速流动能够有效冷却气膜孔内壁,这种冷却作用通过固体传递到外壁面,在较近的气膜孔周围形成了十分明显的低温区域。

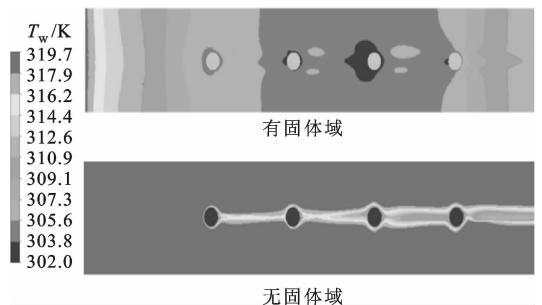


图 6 主流通道一侧壁面的温度分布云图

2.2 吹风比对冲击发散冷却的影响

2.2.1 对流动的影响 在保持主气流流动状态

($Re=10\ 000, M=1$) 不变的条件下,研究了吹风比(0.5, 1, 2)对流动和换热特性的影响。

图7给出了不同吹风比(0.5, 1, 2)时主流一侧壁面附近 xz 截面上的湍动能 E_{xz} 分布云图。从图中可以看出,当吹风比增大时,只有展向上距离气膜孔3 mm以内的气流受到了较大的扰动,而在其他位置上,湍动能几乎没有变化,主流与壁面间的换热强度基本不发生变化。

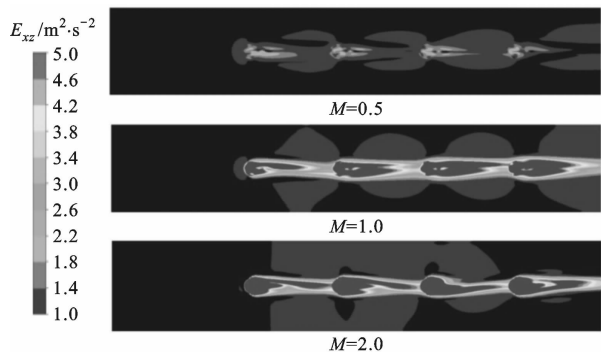


图7 不同吹风比下湍动能的分布云图

图8给出了不同吹风比下过气膜孔中心的 xy 截面上的归一化温度分布云图(仅包括主流通道和冲击腔室)。从图中可以看出:当吹风比增大时,冲击速度增大,冲击冷却效率上升,通过固体导热,被保护的壁面温度相应降低,整个冲击腔室内气体温度升高;当吹风比($M=0.5$)较小时,冷却空气从气膜孔流出的速度小于主流气流速度,所以当冷却空气流出气膜孔后会迅速被主流影响并贴附在固体壁面附近。从图中还看出:当 $M=0.5$ 时,仅在第一排气膜孔后出现了一个较小的高温区域(由流动分离造成的),在下游的其他区域,冷却空气均能在壁面附近形成良好的保护气膜;当吹风比增大时,由于流动分离形成的高温区域逐渐扩展,在 $M=2$ 时冷却

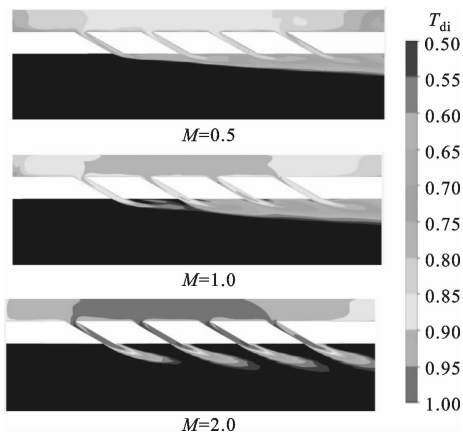


图8 不同吹风比下归一化温度分布云图

气流从气膜孔流出的速度为主流速度的2倍,可以轻易的“穿透”主流,而不会重新贴附在壁面附近,所以对被保护壁面无法形成有效的冷却气膜,气膜冷却效率因此而显著降低。

图9给出了不同吹风比下距离主流进口350 mm处的 yz 截面上的涡强度 I_{yz} 云图。从图中可以看出,当吹风比增大时,冷却气流和主流空气互相影响,从而形成肾型涡且不断扩展、增强。这会使冷却气流更快地抬离固体壁面,并使更多的主流高温空气卷吸至壁面附近,破坏冷却气膜,造成气膜冷却效率降低。

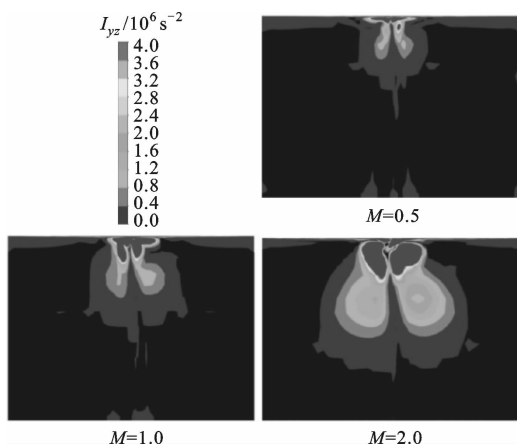


图9 不同吹风比下涡强度分布云图

2.2.2 对综合冷却效率的影响 图10和图11分别给出了不同吹风比下中心线和展向上的综合冷却效率的变化曲线。从图10可以看出,中心线上的综合冷却效率在气膜孔口附近仍然有明显的上升趋势。这主要是气膜孔口附近的壁面温度取决于冷却流速的缘故。当流速增大时,孔内的换热和孔口周边的换热增强,由此冷却效率提高。

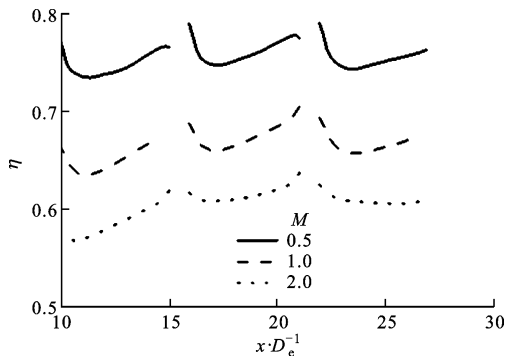


图10 中心线上的综合冷却效率

当不同吹风比时,通过对比中心线和展向上平均综合冷却效率的变化可以发现,吹风比越大,冷却效率越大。改变吹风比后,主流速度不变,大部分壁

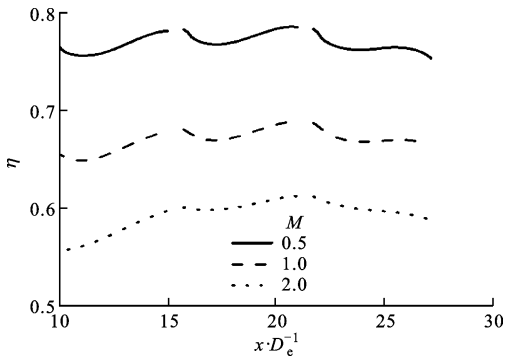


图 11 展向上的综合冷却效率

面附近的气体湍动能不变,即主流与气膜板壁面的换热基本不变。吹风比增大,冲击冷却的效果增强,冲击一侧壁面温度显著降低,又因固体导热系数较高,主流一侧壁面温度也相应降低,而气膜孔出口处冷却流速增大形成的肾型涡增大、增强,气膜冷却效率下降。冲击冷却影响范围较大,冷却效果较好,气膜冷却影响的范围较小,所以综合来看,当吹风比增大时,综合冷却效率提高,即吹风比发生变化时,冲击冷却对壁面温度的影响明显优于气膜冷却。

2.2.3 吹风比对流动效率的影响 添加冲击发散冷却结构会造成压力损失,对主流气流流动产生阻碍作用。图 12 给出了不同吹风比下的压力损失系数。从图中可以看出,随着吹风比的增大,压力损失系数相应增大,整个流动结构产生的流动损失增大。对于冲击发散冷却结构,造成其流动损失的原因主要有 3 方面,分别为冲击冷却流动损失、气膜冷却流动损失、主流和冷却气流掺混引起的损失。通过公式计算得到 3 处位置的局部压力损失系数:在气膜孔附近产生的流动损失最大,局部压力损失系数达到 96%,这是因为在气膜孔附近,气流流入气膜孔时会产生较大的流动分离;从冲击孔进口到气膜孔进口位置产生的压力损失系数为 48%,这主要是冷却气流的垂直冲击和相应产生的涡流造成的;流动

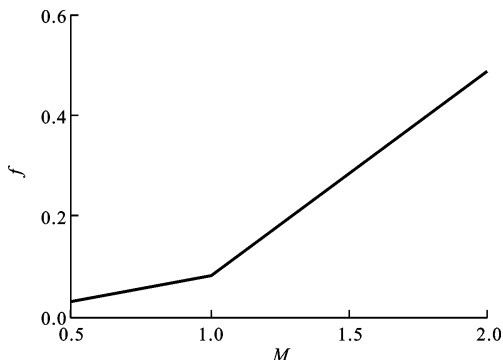


图 12 压力损失系数随吹风比的变化曲线

掺混产生的压力损失最小,局部压力损失系数仅为 0.3%。本文研究中,气膜孔有 30° 的倾斜角,所以冷却出流与主流流动方向较为一致,阻碍作用较小,局部压力损失系数最小。

2.3 不同固体材料对综合冷却效率的影响

图 13 给出了不同固体材料在壁面展向上的综合冷却效率的变化曲线。3 种固体材料的导热系数分别为 0.2 W/(m·K)(聚碳酸酯)、1 W/(m·K)(可丽耐)、13.4 W/(m·K)(不锈钢)。

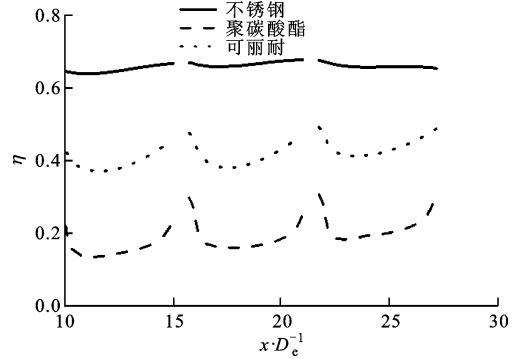


图 13 3 种固体材料在展向上的综合冷却效率

从图 13 中可以看出,当固体导热系数降低时,综合冷却效率明显降低。这是因为,当固体导热系数降低时,冲击冷却的冷却作用难以通过固体热传导作用在主流一侧壁面上,所以冲击冷却的影响削弱,气膜冷却的效果变得更加明显。另外,导热系数的降低还造成了固体壁面各部分间的温差加大,在图中表现为,导热系数较高时,展向上的冷却效率变化无明显起伏,近似为一条与 x 轴平行的直线,而当导热系数降低时,展向上的冷却效率在靠近气膜孔出口时明显提高。

3 结 论

本文数值研究了吹风比和固体导热系数对冲击发散冷却流动换热性能的影响,分析了产生变化的原因,具体结论如下。

(1) 冲击发散冷却作为一种复合型的冷却结构,兼顾冲击、气膜冷却的优势。冲击冷却可以使主流通道一侧的壁面温度整体降低,温度分布更均匀,而气膜冷却可针对性地加强特定位置的冷却效果。使用冲击发散冷却结构,不仅可以提高综合冷却效率,还可以应对复杂的热负荷分布。

(2) 改变吹风比可以有效改变流动结构。吹风比越大,气膜冷却形成的肾型涡影响范围和强度越

(下转第 72 页)