

冷却孔复合角和排列方式综合作用对平板气膜冷却效果的影响

陈伟^{1,2}, 董若凌¹, 施红辉¹, 张晓东¹, 沈伟杰¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 杭州职业技术学院金都管理学院, 杭州 310018)

摘要: 研究复合角和排列方式综合作用对平板气膜冷却效果的影响。采用数值模拟的方法,保持射流圆孔尺寸、间距及倾斜角不变,分别对四种孔阵的平板气膜冷却进行了流动和传热的分析。利用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,标准壁面函数边界处理和 SIMPLE 算法,分析速度、涡量、冷却效率,对比冷却孔复合角和排列方式综合作用对平板气膜冷却效果的影响。结果显示:复合角和叉排同时存在时可改善平板展向上的冷却效果,而在平板流向上对冷却效果的影响不明显。结合吹风比得出较优的孔排方式。

关键词: 冷却孔; 复合角; 排列方式; 平板; 气膜冷却; 数值模拟

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

0 引言

燃气轮机存在进口温度提高与叶片耐热性能局限的矛盾,气膜冷却技术是有效解决这一问题的措施之一。气膜冷却效果受多种因素的影响,其中结构参数的作用不容忽视。结构参数包括孔的排列方式、孔间距、行间距、长径比、倾斜角度、复合角度等。郭婷婷等^[1]比较了倾斜角为 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 及 $\pm 90^\circ$ 的流场,表明随倾斜角度减小,孔口下游射流与主流的流动分离现象逐渐消失。戴萍^[2]比较了气膜孔的长径比对冷却效率的影响,得知增加长径比可以提高效率,但当 $L/D > 8$ 时增幅趋缓。谢浩^[3]研究了以减小孔间距来增加孔阵的密集程度,可得到较低的壁面平均温度。徐红洲^[4]通过实验研究发现复合角时,射流可在主流中产生一对具有明显强度和大小差别的肾形涡和反向肾形涡。孙璐^[5]研究表明引入复合角后可改善冷却气膜在壁面的横向分布。但Ahn^[6]认为采用相反复合角的双排叉排布局更为有效,王磊^[7]的实验结果也表明在相同位置处叉排排

列的冷却效率高于顺排排列。但以上研究都是针对一个单一结构参数考虑其对气膜冷却效果的影响,在实际中会有两种甚至多种结构参数的组合应用,而对多参数综合作用下对气膜冷却效果影响的相关研究较少见到。对于改善冷却效果已有的研究表明^[4-7]:设置复合角优于没有复合角,叉排排列优于顺排排列。叉排排列与复合角综合作用下是否会表现出更优的冷却效果,对此鲜有相关的文献报道。本文保持圆孔的尺寸、间距及倾斜角度不变,依次改变圆孔的排列方式与复合角,对比分析两个结构参数综合作用下对速度、涡量、冷却效率的影响情况,总结气膜冷却平板 x 向和 z 向冷却效果的变化规律,为燃气轮机叶片气膜冷却结构组织及设计提供参考。

1 物理模型与数值计算方法

1.1 物理模型

计算模型以 CHN Yuen^[8]的实验为参考和对比,如图1所示:其圆孔孔径 $D=10$ mm,气膜平板

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1090869);浙江省科技厅公益技术研究工业项目(2012C21052);浙江省重中之重学科和浙江理工大学重点实验室优秀青年人才培养基金(ZSTUMD2011B011)

作者简介: 陈伟, (1981-), 女, 山东菏泽人, 博士研究生, 讲师, 主要从事流体机械的研究。

通信作者: 董若凌, 电子邮箱: dongruoling@zstu.edu.cn

长 $100D$, 射流角 30° , 孔间距 $3D$, 行间距 $6D$ 。文献 [8] 曾利用该系统对圆孔在不同倾斜角、孔间距和排列方式条件下的气膜冷却特性进行过研究, 本文则在相同条件下的圆孔考虑四种孔阵方式 (如表 1 所示) 的流场、冷却效果进行分析, 其计算模型如图 1 所示。为验证数值计算的可靠性, 本文取值与 CHN Yuen^[8] 中提到的参数相同, 将计算值与 CHN Yuen 的实验值进行了对比, 结果如图 2 所示。气膜冷却效率除了在气膜孔口位置与实验值有较大差异外 (其原因可能是由于 CHN Yuen 实验装置中 z 向尺寸较小引起), 在孔口下游位置大小和变化趋势都吻合较好。

表 1 四种孔阵编号

有无复合角	排列方式	编号
无	顺排	a
有	顺排	b
无	叉排	c
有	叉排	d

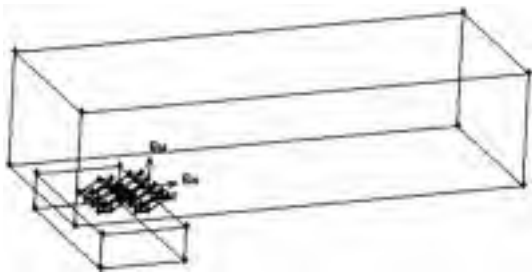


图 1 数值计算模型

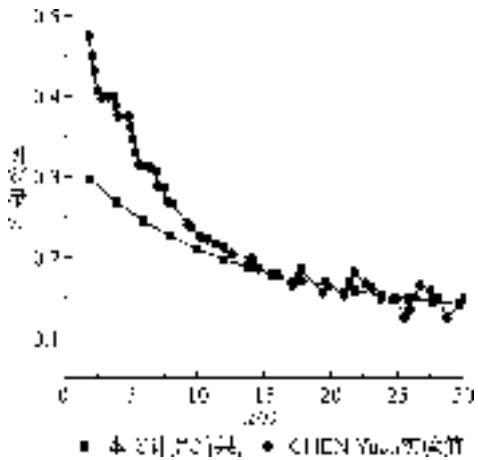


图 2 本文数值计算结果与文献 [8] 实验数值的比较

1.3 数值计算方法

湍流模型选取 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 气、固边界用标准壁面函数处理, 计算利用分离隐式求解器, 二阶上风差分格式离散方程, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。

计算域宽度限为 $100D$, 高度限为 $400D$, 长度限

为 $1000D$ 。划分计算网格时将计算域在长度方向上左右两侧区别对待, 左侧划分为非结构网格, 右侧为提取有用的计算结果便于下文的分析而划分为结构网格。在主流与射流的混合区域进行了局部的网格加密。比较顺排无复合角孔阵网格节点数量分别是 24.5 万和 41.6 万时, 气膜冷却效率的差值约在 2% 以内, 即本文所建立的计算模型符合网格无关性。

射流和主流为相同密度的空气, 设为不可压缩气体, 所定义的吹风比可简化为射流与主流的速度比: $M=U_j/U_\infty$, 其中 U_j 、 U_∞ 分别代表主流与射流工质的速度。主流速度为 17 m/s 并保持不变, 调整射流速度使吹风比的值分别是 0.5、1.0、1.5、2.0。计算时主流和射流入口温度分别设置为 583 K 和 295 K, 主流湍流强度为 3.21%, 与 CHN Yuen^[8] 的实验参数近似。定义主流出口为压力出口边界条件, 主流和射流为速度入口边界条件, 其余为无滑移绝热壁面边界条件。

2 计算结果的分析讨论

比较 $M=0.5$ 、1.0、1.5、2.0 四种气膜冷却孔阵的射流与主流的流动和传热情况, 发现冷却效果与 M 值的变化趋势一致。随着 M 值增大, 射流穿越主流的能力增强, 所形成的肾形涡明显抬离壁面, 对壁面保护不利, 导致平板壁面近下游冷却效率减小, 远下游冷却效率增加。由于这种变化规律的一致性, 为了便于讨论排列方式和复合角的综合作用, 使四种孔阵之间的涡量、速度和温度差异更明显, 下文在进行分析时所选取的 M 值不同, 并结合四种孔阵的速度、涡量、冷却效率, 来分析复合角、排列方式对冷却效果的影响。

2.1 有无复合角的影响

2.1.1 涡量分析

涡是射流与主流进行动量传递和热量传递的主要场所, 涡量是描述漩涡运动强度的物理量。所以涡量分析对于气膜冷却优化设计具有指导意义。图 3 为 $x/D=2$ 截面涡量分布, 该图以涡量等值线显示了射流和主流掺混情况。

冷却射流进入射流孔后于孔口处形成反向对称涡 (以下称为肾形涡)。康顺^[9] 总结前人的研究成果认为肾形涡是由横流边界层与射流剪切层相互作用而产生的。观察图 3 的结果可见, 各孔阵出口位置都可见肾形涡, 且都有多涡核汇集现象发生, 与文献 [10] 结果吻合。即四种孔阵肾形涡的起源是相同的, 但在孔口出流之后却产生了差异。由于能量交

换,肾形涡沿 y 向和 z 向逐渐衰减,即产生了耗散,在大小上表现为涡量轮廓线的尺寸减小,在强度上表现为涡量数值变小。观察中间孔位置处涡强度为 $\pm 1\,000\text{ s}^{-1}$ 的轮廓线,顺排排列及 0° 复合角在 y 方向上达到了 $y/D=2.0$,叉排排列及 15° 复合角仅为 $y/D=1.0$ 。由此可以认为,肾形涡沿平板的损耗受孔外流场影响明显,即复合角和排列方式对于射流出流后的耗散有较大影响。

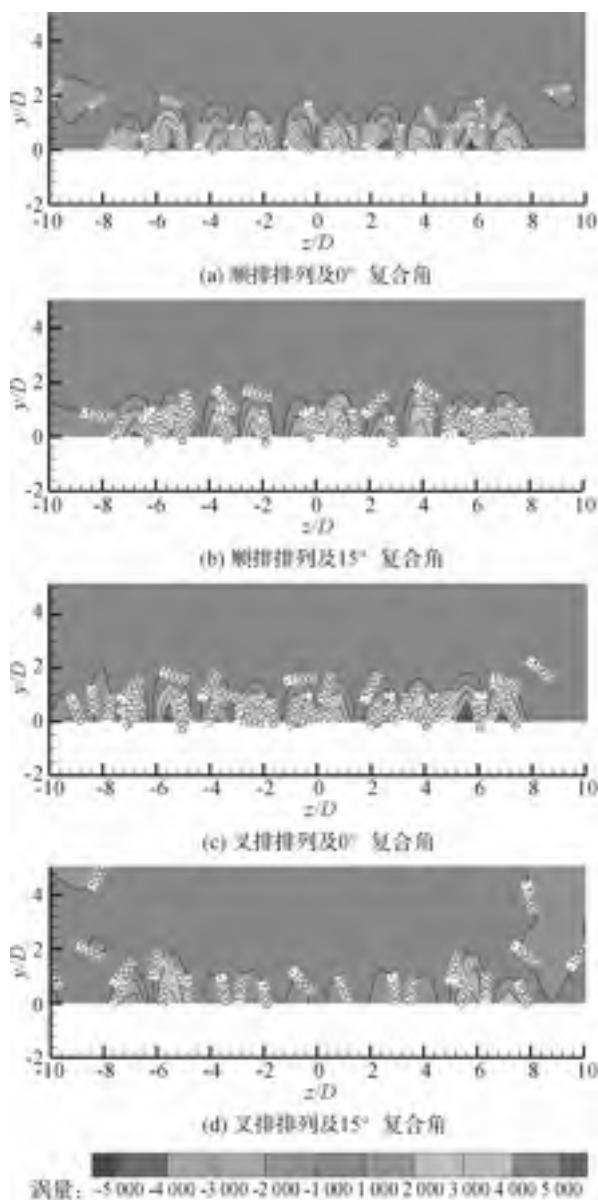


图3 $x/D=2$ 截面涡量分布 ($M=1.0$)

注:图中颜色深浅表示涡量的数值,单位 s^{-1} 。

有复合角时,造成射流和主流的掺混角度发生变化,射流出流后存在沿 z 向的扩散,对应质量守恒,使 y 向扩散削弱。这与文献[12]中数值模拟结果一致。肾形涡的发展趋势即射流在 z 向扩散使得射流在展向贴覆壁面,改善热保护效果;在 y 向扩

散使得射流抬离壁面,使壁面暴露在主流中不利于冷却^[11-12]。观察图3中孔阵a与b,c与d中的现象刚好与之相符。因此,复合角存在对于孔口出流以及之后肾形涡的抑制作用明显。

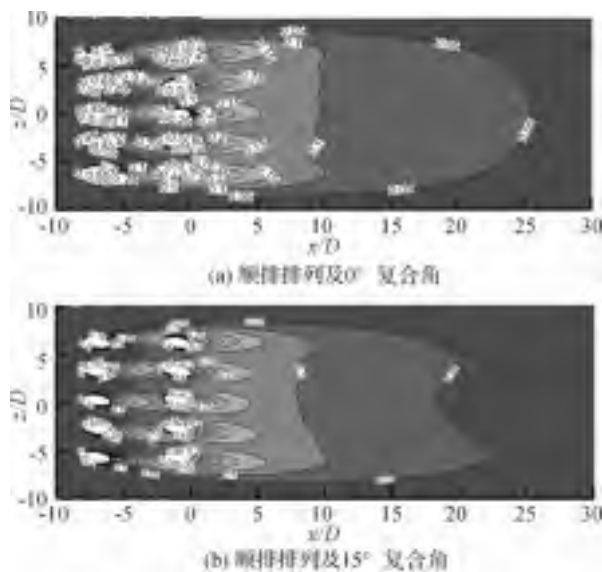
顺排时,前排和后排射流孔位置一致,引起 y 向扩散的叠加效应加剧,肾形涡的 y 向尺寸和强度较大;叉排时这种叠加效应较小,引起肾形涡的 y 向尺寸和强度减弱。观察图3中孔阵a与c,b与d中的现象也刚好与之相符。由此可见,叉排排列可在一定程度上抑制肾形涡的发展,但不是非常明显。

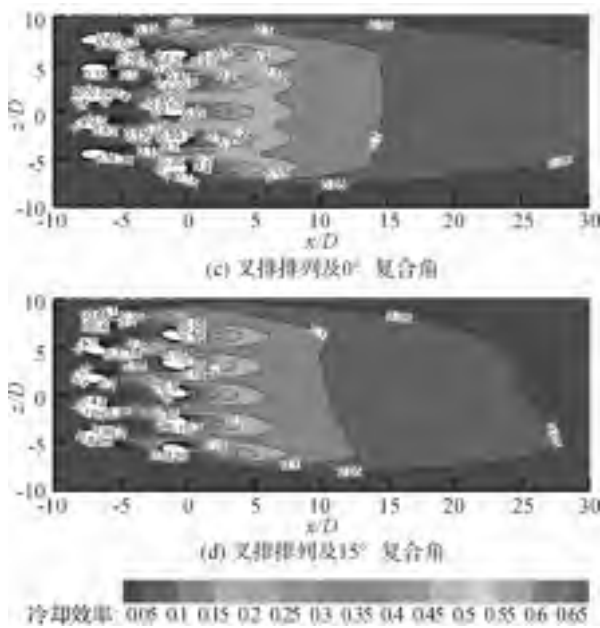
2.1.2 冷却效率分析

$$\text{绝热气膜冷却效率 } \eta = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_j},$$

式中 T_∞ 为主流温度, T_w 为平板壁面绝热壁温度, T_j 为冷却射流温度。绝热气膜冷却效率(简称冷却效率)反映了气膜冷却保护的有效性,其值的大小和分布是衡量气膜冷却方案优劣的重要指标。

图4是 $M=1.0$ 时, $x/D=2$ 截面的气膜冷却效率分布云图。比较 $\eta=0.1$ 的覆盖区域,顺排及 0° 复合角在 x 向达到 $x/D=10$,在 z 向比较齐整;顺排及 15° 复合角虽然在 x 向也达到了 $x/D=10$,但在 z 向存在明显的凹区。同样地,叉排及 0° 复合角在 x 向达到 $x/D=14$,在 z 向比较齐整;叉排及 15° 复合角在 x 向达到 $x/D=12$,在 z 向同样存在凹区。由此可见,有复合角时,对于射流向下游扩散不利,这是因为有复合角时,射流在 z 向扩散,使得 x 向的扩散程度与无复合角相比减小。因此有复合角将弱化射流在 x 向对壁面的保护能力。



图4 平板壁面冷却效率分布图($M=1.0$)

注:图中颜色深浅表示冷却效率的数值,单位为1。

2.2 排列方式的影响

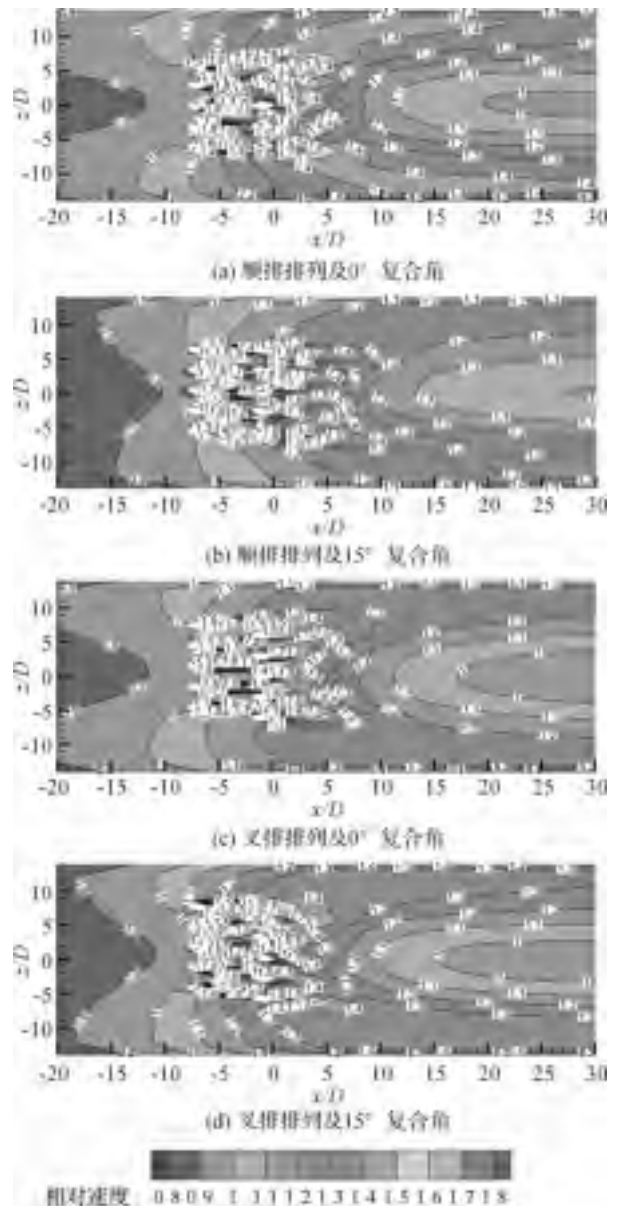
2.2.1 对平板壁面相对速度的影响

射流从气膜冷却孔口流出后,在平板壁面处 x 向相对于主流的速度(以下称为速度)表明射流向下流发展的情况。 $M=0.5、1.0$ 时,射流和主流的速度差不够明显,故选取 $M=2.0$ 进行比较。如图5所示。以相对速度1.4的覆盖区域进行比较:叉排及0°复合角在 x 向可以达到下游 $x/D=8$,并且在 z 向连通;顺排及0°复合角在 x 向可以达到 $x/D=7$, z 向不连通;顺排及15°复合角在 x 向可以达到 $x/D=6$, z 向不连通;叉排及15°复合角在 x 向可以达到 $x/D=5$, z 向联通。所以在 x 向近下游区域($x/D=0\sim 8$ 范围内)叉排及0°复合角孔阵的 x 向速度最大,顺排及0°复合角次之,顺排及15°复合角、叉排及15°复合角较小。而这时的 x 向速度大小可以认为是射流在平板壁面沿 x 向的覆盖区域的大小,也就是叉排及0°复合角孔阵的 x 向覆盖区域最大。

2.2.2 对冷却效率的影响

x 向速度可以表征射流出流后在平板壁面的扩散情况, x 向速度越大表明扩散越好,对平板壁面的 x 向热保护效果越好。根据2.2.1的分析,叉排及0°复合角在此方面存在优势,这在图4所示的冷却效率中也可得到证实。

分析其原因:顺排时,第一排孔(左侧)射流出流向下流发展过程中,由于第二排孔(右侧)孔位在 z 向完全相同,部分射流流经此处时发生折转,扩散方向由沿 x 轴方向变为以第二排孔为中心的扰流扩

图5 平板壁面相对速度云图($M=2.0$)

注:图中颜色深浅表示相对速度的数值,系当地速度和主流速度的比值。散,导致射流 x 向的扩散减弱。而对于叉排排列,由于第一排和第二排的孔位在 z 向不同,发生折转处的射流本身量较小,所以叉排所造成的 x 向扩散减弱程度也较小。故叉排可以有效改善 x 向的冷却效果。

2.3 复合角和排列方式的综合影响

苗强^[13]曾通过数值模拟比较了压力面上复合角分别为0°、30°、60°的冷却效率分布:在孔中心下游复合角为0°时最优,30°时较小,60°最小。宋波^[14]指出因复合角会降低叉排冷却效果,故叉排不宜采用复合角,但复合角对顺排孔阵气膜冷却有利。本文2.2.2的分析结果不但进一步验证了上述学者的结论,也进一步说明复合角不利于射流沿 x 向扩

散,而又排对射流沿 x 向扩散有利,两者同时存在则会对 x 向冷却效果相互抑制,复合角和叉排对射流沿 z 向扩散都有利,两者同时存在则会使 z 向冷却效果更好。因此,在燃气轮机叶片气膜冷却设计中,以 z 向和 x 向对冷却效果的要求出发进行具体考虑,如对 z 向冷却效果要求比较高,则采用叉排排列方式和复合角;如对 x 向冷却效果要求比较高,则采用叉排排列方式,不设置复合角。

比较图 4 和图 6,孔阵排列方式由顺排变为叉排, $M=1.0$ 时, $\eta=0.1$ 覆盖区域由 $x/D=10$ 扩展到 $x/D=14$,增加了约 55.6%; $M=2.0$ 时, $\eta=0.15$ 覆盖区域由 $x/D=15$ 扩展到 $x/D=19$,增加了约 26.7%。由此可见在小吹风比时,叉排排列具有改善 x 向冷却效果和使射流在 z 向分布更均匀的作用。

根据图 4 和图 6 比较 $\eta=0.1$ 的冷却覆盖区域: $M=1.0$ 时,虽然最大覆盖位置都到了 $x/D=10$,但是由于顺排有复合角的孔阵方式在 z 向存在明显凹区,导致覆盖区域明显小于顺排无复合角的覆盖区域; $M=2.0$ 时,虽然顺排有复合角依然在 z 向存在明显凹区,但其最大覆盖位置大于顺排无复合角,导致总体覆盖区域与顺排无复合角相比无明显减少。

综上,对气膜冷却进行结构参数的优化设计时,需要考虑具体的运行条件:较小吹风比时,将排列方式由顺排变为叉排,可以同时明显改善 x 向和 z 向冷却效果,设置复合角时可以明显减弱 x 向冷却效,对 z 向冷却效果的改善却不明显。因此,在较小吹风比时建议不设置复合角,采用叉排排列方式。

如图 6 所示,在 $x/D=3\sim 10$ 范围内,比较 z 向孔间的冷却效率,顺排无复合角孔间的冷却效率为 0.2,顺排有复合角在此范围内也有部分区域冷却效率是 0.2,主要集中在上侧的两个孔间位置,但是 z 向尺寸减小,下侧的两个孔间位置其冷却效率达到了 0.25。而这种现象在图 4 中并没有观察到。因此吹风比较大时,有复合角可以明显改善 z 向的冷却效果。

较大吹风比时,顺排排列时冷却效率已经较高,变为叉排后, x 向和 z 向的冷却效果虽然有所提高但不明显。虽然有复合角会稍微减弱射流的 x 向扩散,但此种情况下射流在 x 向对平板壁面的保护区域已经足够大,有无复合角的差异已经不明显;而这时更应该予以关注的是在 z 向容易发生肾形涡拾离壁面,设置复合角可以有效的抑制这一现象,使平板壁面处于冷却射流的保护作用下。为此,在较大吹风比时无论采用顺派还是叉排,均建议设置复合角。

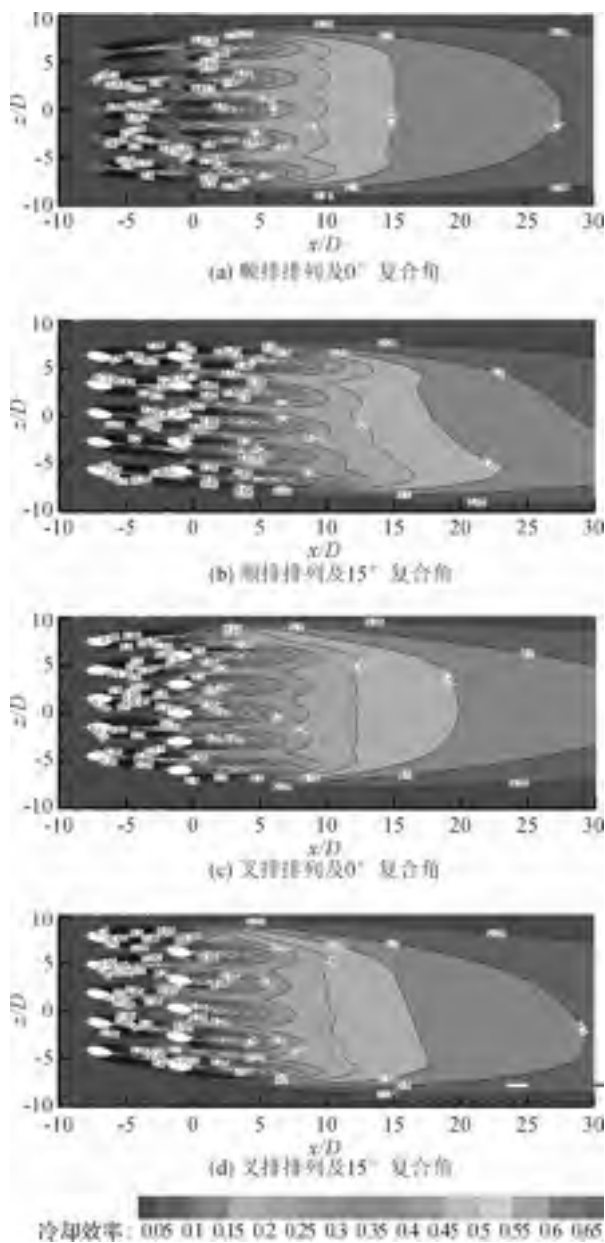


图 6 平板壁面冷却效率分布 ($M=2.0$)

注:图中颜色深浅表示冷却效率的数值,单位为 1。

3 结 论

复合角可以减弱肾形涡的强度和尺寸,使射流在 z 向附壁效果更好,对 x 向射流扩散不利;叉排可使射流沿 z 向分布更均匀,并对射流在 x 向的扩散有利,使射流在 x 向的冷却效果更好。因此,在燃气轮机叶片气膜冷却组织及设计中,应以 z 向和 x 向冷却效果的要求为出发点进行具体考虑。对气膜冷却进行结构参数的优化设计时,还要考虑具体的运行条件。在较小吹风比时建议不设置复合角,采用叉排排列方式。在较大吹风比时建议设置复合角,可采用顺排或叉排排列方式。

参考文献:

- [1] 郭婷婷, 金建国, 李少华, 等. 不同出射角度对气膜冷却流场的影响[J]. 中国电机学报, 2006, 26(16): 117-121.
- [2] 戴萍, 林枫. 长径比对缩放槽缝孔气膜冷却效果的影响[J]. 燃气轮机技术, 2012, 52(6): 435-439.
- [3] 谢浩, 张靖周. 致密孔阵气膜冷却绝热温比和对流换热系数的数值研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6): 1229-1235.
- [4] 徐红洲, 王尚锦, 刘松龄, 等. 单孔复合角射流的流场实验研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(1): 69-71.
- [5] 孙璐, 章大海, 曾敏, 等. 开槽前扩孔及复合角对气膜冷却的影响[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1723-1725.
- [6] Ahn J, Jun I S, Lee J S. Film cooling from two rows of holes with opposite orientation angles: injectant behavior and adiabatic film cooling effectiveness[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24: 91-99.
- [7] 王磊, 张靖周, 杨卫华, 等. 冲击/发散冷却气膜冷却效率的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 97-100.
- [8] CHN Yuen, Martinez-Botas R F. Film cooling characteristics of a rows of round holes at various streamwise angles in a crossflow: part 1 effectiveness[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 4995-5016.
- [9] 康顺. 冷却孔附近三维流动的结构[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 754-756.
- [10] 刘存良, 朱惠人, 白江涛. 收缩-扩张形气膜孔提高气膜冷却效率的机理研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 598-604.
- [11] Walters D K. Impact of film-cooling jets on turbine aerodynamic losses[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(3): 537-545.
- [12] 李国庆, 邓宏武, 侠晖霞. 复合角对涡轮叶片旋转气膜冷却效果的影响[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2), 308-313.
- [13] 苗强, 张发生, 戴韧. 压力面气膜冷却射流复合角的数值研究[J]. 热力透平, 2010, 39(3): 190-194.
- [14] 宋波, 林宇震, 刘高恩. 不同排列方式多斜孔壁气膜冷却绝热温比研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(1): 91-94.

Influence of Combined Action of Compound Angle and Arrangement Mode of Cooling Holes on Flat Air Film Cooling Effect

CHEN Wei^{1,2}, DONG Ruo-ling¹, SHI Hong-hui¹, ZHANG Xiao-dong¹, SHEN Wei-jie¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Jindu Management Institute, Hangzhou Vocational Technical College, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To study the influence of combined action of compound angle and arrangement mode on flat air film cooling effect, this paper analyzes the flow and heat transfer of flat air film cooling of four hole arrays with jet hole size, interval and angle of inclination unchanged with the method of numerical simulation; mainly analyzes the speed, vorticity and cooling efficiency with Realizable $k-\epsilon$ turbulence model, standard wall function boundary treatment and SIMPLE algorithm; and compares the influence of combined action of compound angle and arrangement mode of cooling holes on flat air film cooling effect. The result shows that, when compound angle and staggered arrangement coexist, the cooling effect of upward flat can be improved; however, upward flat flow does not have an obvious influence on the cooling effect. In addition, it obtains an optimal hole arrangement mode in combination with blowing ratio.

Key words: cooling hole; compound angle; arrangement mode; flat; air film cooling; numerical simulation

(责任编辑: 张祖尧)