

不同孔型对气膜冷却效果影响的数值模拟

张晓东¹, 董若凌¹, 施红辉¹, 陈伟^{1,2}, 沈伟杰¹, 张苹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, 杭州 310018)

摘要: 为了解气膜冷却技术中孔型作用的影响,采用数值模拟方法,在主流速度 20 m/s,湍流度 6%,主、射流温分别为 333 K 和 293 K 的条件下,考察无复合角、流向角为 35°时的圆柱孔、收缩-扩散孔和反涡孔进行平板气膜冷却的冷却效果。其中,圆孔孔径 12.7 mm,长径比 3.5,与集气室连接面形式同于其余孔型。模拟过程中,端流 Realizable $k-\epsilon$ 方程,标准壁面函数处理边界,SIMPLEC 算法实现压力、速度耦合。结果表明:由于反涡射流抑制了肾型涡的形成并减弱了肾型涡的强度,反涡孔的冷却效果和覆盖区域优于其他两孔型。

关键词: 气膜冷却; 数值模拟; 孔型; 肾型涡

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

0 引言

为了获取更高的燃机效率,现代燃气轮机一直朝着高压比和高涡轮入口温度的方向发展,导致涡轮部件的热载荷不断增加。为确保燃气轮机正常运行,高效冷却技术的应用显得极其迫切。气膜冷却技术是目前燃气机涡轮部件上广泛采用的有效冷却保护技术,准确预估气膜冷却效果对涡轮叶片等的设计具有重要意义^[1]。孔型是影响冷却效果的主要因素之一。早期,较多的研究集中在圆孔型气膜冷却喷孔下游流场的流动和传热特性上,Goldstein 等^[2]将圆孔喷孔进行梯形扩展后发现,单孔和排孔的冷却效果都显著提高。进而,刘存良等^[3]将梯形扩展孔改变成收缩-扩散孔后发现其冷却效果更好。Alok Dhungel 等^[4]则创造性地设计了一种称为反涡孔的射流孔型,实验发现,此孔型也能得到良好的冷却效果。为了明确上述孔型的实际应用前景,本文以圆柱孔型、收缩-扩散孔型与反涡孔孔型为研究对象,对三种孔型的单孔平板气膜冷却情况予以数值模拟,了解并对比 3 种冷却孔下游的流动和传热特性。

1 数值模拟方法

1.1 计算模型

计算模型以 Pietrzyk 等^[5]和 Sinha 等^[6]的实验为参考,其系统如图 1 所示。图 1 中圆柱孔孔径 $D=12.7$ mm,测试平板长 $50D$,前缘距孔口前缘 $19D$,各孔间距 $3D$,长径比为 3.5。Walters 和 Leylek^[7]曾利用该系统对若干孔型在不同复合角和流向角条件下的气膜冷却特性进行过研究,本文则对在相同实验条件下圆柱孔、收缩-扩散孔和反涡孔的冷却流场及冷却效果进行分析,各孔型结构尺寸如图 2。

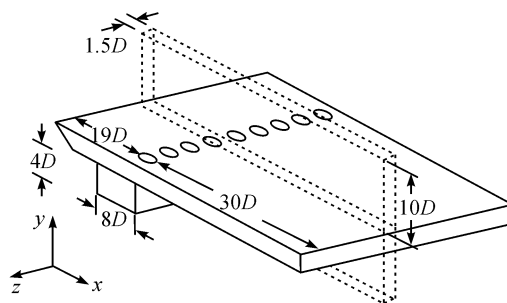


图 1 计算模型

收稿日期: 2012-10-24

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(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: 张晓东(1986—),男,浙江海宁人,硕士研究生,主要从事汽车制造技术的研究。

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

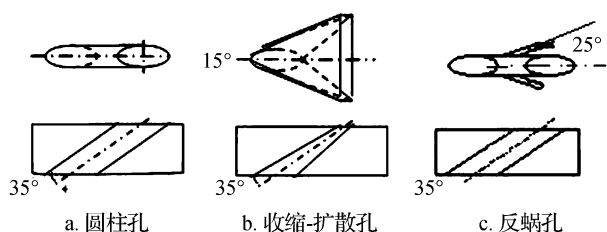


图2 气膜冷却孔示意图

为简化计算,本文仅考虑单一角度射流,流向角控制为 35° ,收缩-扩散孔出口长 $0.2D$,宽 $3D$;反涡孔参照 Alok Dhungel 的实验模型^[4],其子孔孔径为 $0.5D$,与 XZ 平面夹角为 40° ,与 XY 平面夹角为 25° ,基于各射流孔结构的对称性,模拟区域宽度限为 $1.5D$ 。为避免进口效应,对射流的模拟扩展至上游集气室入口,该部件长 $8D$,高 $4D$,采用铅垂向(y 方向)进气。

1.2 湍流模型及网格

鉴于 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在气膜冷却的数值研究中可获得较可靠的结果^[3,7],本文也选择 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型来进行计算。计算域采用非结构性网格,选择基于压力的求解器,二阶迎风差分格式离散方程,压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法。在首次计算后采用自适应办法按速度梯度进行网格精细化处理(见图3),再次计算结果与原结果差异不大,即本文所建立的计算模型符合网格无关性。

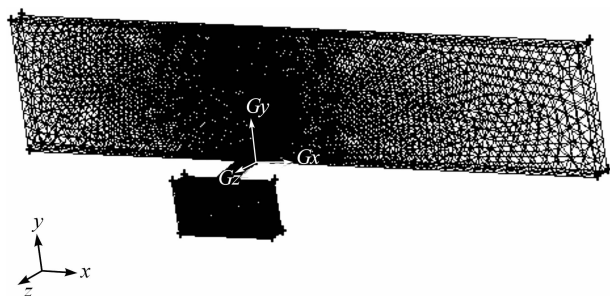


图3 网格示意图

1.3 边界条件

主流入口湍流度分别为 6% 和 5% ,主流风速 20 m/s ,按吹风比($M = \rho_c U_c / \rho_\infty U_\infty$)分别为 0.5 、 1.0 、 1.5 确定集气室进口风速。主流与冷却密度按不可压缩理想气体处理,比值(ρ_c / ρ_∞)近似等于 1 ,主流温度 293 K ,射流入口温度 333 K (在下文的分析中,仍然称其为冷却气体),则气膜冷却绝热效率为

$$T' = \frac{(T_g - T_{aw})}{(T_g - T_c)} \quad (1)$$

式中, T' —气膜冷却绝热效率, T_g —主流温度, T_{aw} —绝热壁面温度, T_c —冷却射流温度。

2 计算结果及分析

2.1 速度场的分析

冷却孔出来的射流与横向主流的相互作用,在冷却孔附近产生局部非常复杂的流动现象和漩涡结构,最明显的特征是在射流的下游形成一个支配冷却孔附近流场的涡对,即所谓的肾型涡,其旋向相反。康顺等^[8]指出肾型涡会使射流流体抬离壁面,会使冷却效果降低。截取 $X/D=2$ 处各孔型对应截面的速度矢量场,以了解孔型对应的流场变换规律,如图4、图5、图6。

图4为圆柱孔三种吹风比工况下对应的速度矢量图。图4可见,有明显的肾型涡形成,吹风比大时肾型涡更强,射流的反向对称涡靠近射流轴线,涡中心离壁面距离最大,已经体现了一定的抬离现象。在中心线的两侧肾型涡的卷吸作用明显,使得冷却射流抬离了壁面,这也正是后文给出的图7(a)中为何吹风比的增加会导致在 $X/D=1$ 到 $X/D=7$ 的区域内,中心线处的绝热效率下降如此之快的原因。

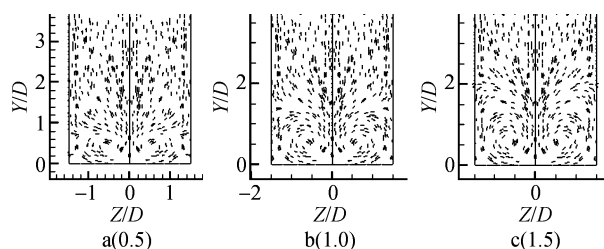
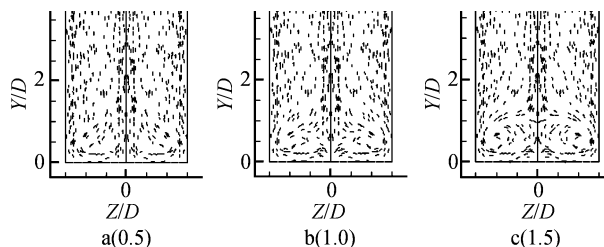
图4 圆柱孔 $X/D=2$ 速度矢量图

图5为收缩-扩散孔的不同吹风比在截面处的速度矢量图。图5可见,也有类似于涡的结构产生,但是由于孔的横向扩散,收缩-扩散孔的反向对称涡对间距较大,而且其间有与反向对称涡转向相同和相反的其他涡对,其中,相反旋向的结构将抵消反向对称涡抬离作用,使冷却气更有效地保持于壁面。结合图5、及后文给出的图7b、图9,收缩-扩散孔比圆柱孔绝热效率高是因为收缩-扩散形孔减小了射流的流向厚度,增大了射流的展向宽度,且产生了更大的展向速度,从而扩大了射流喷出后的覆盖区域,

图5 收缩-扩散孔 $X/D=2$ 速度矢量图

并形成了与圆柱孔射流相比作用相反的反向对称涡,促使冷却气流在壁面的贴附性好于圆柱孔,也获得了更高的绝热效率。

图6为反涡孔的三个吹风比在截面处的速度矢量图。由于反涡射流的存在,在吹风比 $M=1.0$ 和 $M=1.5$ 时,肾型涡的强度减弱、涡对间距也变大,涡中心离主流的中心线更远。综合图6、图7c、图10结果得出:因为子孔涡结构和母孔的相互作用,削弱了肾型涡减少了壁面冷却气流的抬离,使得更多冷却气流不受肾型涡影响而向前运动,从而反涡孔在绝热效率和冷却射流的覆盖区域都是优于圆柱孔和收缩-扩散孔。

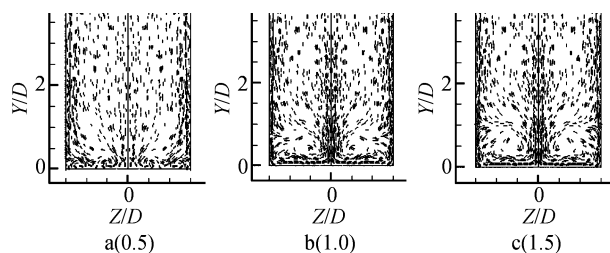


图6 反涡孔 $X/D=2$ 速度矢量图

2.2 气膜冷却绝热效率的分析

气膜冷却绝热效果 T' 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。三种孔型的计算结果如图7。

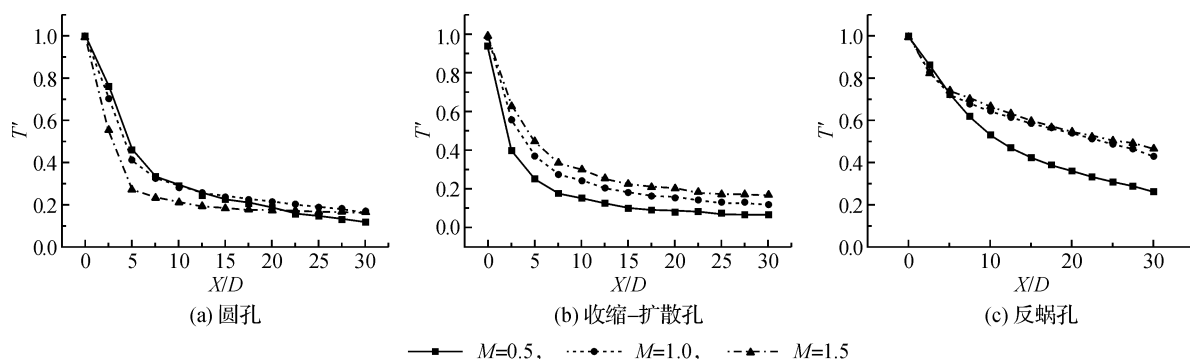


图7 不同孔型绝热效率曲线

从图7(a)可见,对于圆柱孔而言,在 X/D 为12.5之前 $M=0.5$ 的绝热效率是略高于 $M=1.0$ 的。其主要原因是射流速度的增加使得主流与射流的相互作用加强,导致冷却气流无法覆盖在壁面上。在 X/D 为12.5以后,吹风比为1.0的绝热效率才略大于吹风比为0.5的绝热效率。其因为越往下游,射流的动量逐步减少,对流场的作用开始减弱,主流将逐渐支配整个流场的流动,在主流的压力和摩擦力作用下射流再次贴附于壁面。而吹风比为1.5的绝热效率,除了起点处相近之外,其绝热效率都低于吹风比为1.0的工况,其原因与前面所述一样。由此可见,对于圆柱孔,吹风比的增加不一定能提高绝热效率。在绝热壁面的前段随着吹风比的提高,绝热效率反而是下降的;只是到了后段,绝热效率才会因吹风比的增大而稍稍上升,其原因不再赘述。

收缩-扩散孔的气膜冷却绝热效率随吹风比的变化如图7(b)所示。对于收缩-扩散孔而言,当吹风比从 $M=0.5$ 增加到 $M=1.5$ 的过程中,绝热效率也是随其增加的,并且从 $X/D=25$ 开始各吹风比绝热效率趋于不变。但是吹风比从1.0到1.5所提高的绝热效率没有吹风比从 $M=0.5$ 增到 $M=$

1.0 提高得那么明显。由此趋势可以推断,对于收缩-扩散孔型,绝热效率会在吹风比大于1.5的某个值处达到最大值,然后会保持不变或减小。

从图7(c)可以看出,对于反涡孔而言,冷却壁面在 X/D 从0到5的区域内,吹风比从 $M=0.5$ 增加到 $M=1.5$ 的过程中,绝热效率并没有出现大的变化。不过,从 $X/D=5$ 开始至下游,吹风比 $M=1.0$ 和 $M=1.5$ 的绝热效率明显高于吹风比为 $M=0.5$ 的绝热效率。但吹风比 $M=1.5$ 的绝热效率只是略高于吹风比 $M=1.0$ 的绝热效率。

对于圆孔和收缩-扩散孔而言,通过改变吹风比值这一方法来提高绝热效率是有效的,但其效果并不显著。而对于反涡孔,其绝热效率在整体上是优于其他两个孔型的,并且吹风比的增大也能得到较好的改进效果。

2.3 温度场的分析

图8为圆柱孔在吹风比 $M=0.5, 1.0, 1.5$ 时的 $Y/D=0$ 冷却壁面的温度场。图8可见,随吹风比的增加,冷却气体的覆盖面会有所增大(图中由于尺寸关系没有显示),但有效冷却区域还是限于 $Z/D=\pm 1$ 。

图9为收缩-扩散孔的 $Y/D=0$ 的冷却壁面的

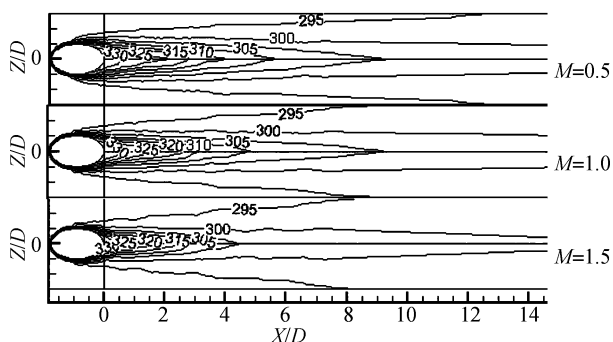


图8 圆柱孔温度场

注:图内数值的单位为K。

温度场云图。与圆柱孔相比,收缩-扩散孔的冷却气体的覆盖面积是明显的增大了,无论是Z方向的宽度还是X方向的长度,冷却效果也相对要好。对收缩-扩散孔自身而言,随着吹风比的增加,305K(该温度的绝热效率 $T' = 0.3$)温度的覆盖面积较从 $X/D = 6$ 处增大到了 $X/D = 21$ 处,改善效果显著。

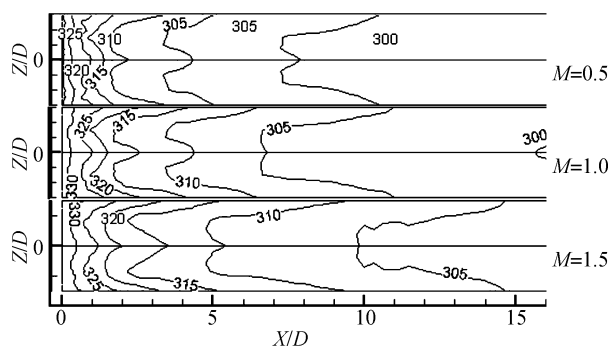


图9 收缩-扩散孔温度场

注:图内数值的单位为K。

图10为反涡孔在吹风比 $M = 0.5, 1.0, 1.5$ 时的冷却壁面的温度场云图。图10可见,相对于圆柱孔,冷却效果提高甚多。与收缩-扩散孔比较:在X方向,覆盖的最低温度从300K左右提高到了310K左右;在Z方向,除了在开始阶段($X/D < 10$)气体的覆盖区域没有收缩-扩散孔那么宽以外,在冷却壁面的中后段,反涡孔的冷却气体也完全覆盖了整个

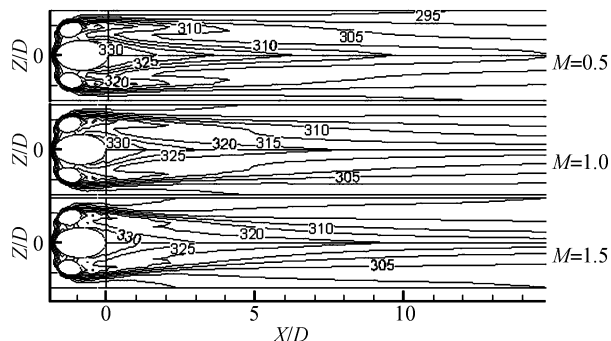


图10 反涡孔温度场

注:图内数值的单位为K。

区域(相对于各自孔型的最好效果而言)。比较反涡孔的三个吹风比,吹风比的增大能显著提高冷却效果、增大冷却气体覆盖面积。

3 结论

通过对三种孔型在3个吹风比的工况下的数值模拟,对比绝热效率、温度场和射流下游截面的速度矢量,得出以下结论:a)相同吹风比情况下,反涡孔的冷却效果和横向覆盖面积都是最好的,收缩-扩散孔其次,圆柱孔最差;从流向覆盖面积来看,反涡孔在起始阶段没有收缩-扩张孔那么广,但从 $X/D = 10$ 开始,反涡孔的效果就要优于收缩-扩散孔;b)收缩-扩散孔和反涡孔在一定程度上抑制了肾型涡的产生和减弱了它的强度,使得冷却气膜能更好地贴附于壁面,确保射流不容易抬离壁面,因而冷却效果均较圆柱孔好;c)反涡孔比另两种孔型的绝热效率大约提高0.2甚至更多。

参考文献:

- [1] 韩介勤, 杜达 S, 艾卡德 S V. 燃气轮机传热和冷却技术[M]. 程代京, 谢永慧, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2005: 3-50.
- [2] Goldstein R J, Eckert E R G, Burggraf F. Effect of hole geometry and density on three-dimensional film cooling[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1974, 17(5): 595-607.
- [3] 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.
- [4] Dhungel A, Lu Yiping, Phillips W, et al. Film cooling from a row of holes supplemented with antivortex holes[J]. Journal of Turbo Machinery, 2009, 131(4): 1-10.
- [5] Pietrzyk J R, Bogard D G, Crawford M E. Effects of density ratio on the hydrodynamics of film cooling[J]. Journal of Turbo Machinery, 1990, 112(3): 437-443.
- [6] Sinha A K, Bogard D G, Crawford M E. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio[J]. Journal of Turbo Machinery, 1991, 113(3): 442-449.
- [7] Walters D K, Leylek J H. A systematic computational methodology applied to a three-dimensional film-cooling flow field[J]. Journal of Turbo Machinery, 1997, 119(3): 437-443.
- [8] 康 顺. 冷却孔附近三维流动的结构[J]. 工程热物理学报, 2009, 27(5): 754-756.
- [9] Jovanovi M B, de Lange H C, Van Steenhoven A A.

- Effect of hole imperfection on adiabatic film cooling effectiveness [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(2): 377-386.
- [10] Heidmann J D, Srinath Ekkad. A novel antivortex turbine film-cooling hole concept [J]. *Journal of Turbo machinery*, 2008, 130(6):1-9.
- [11] 雷云涛, 林智荣, 袁 新. 不同吹风比下平板气膜冷却数值模拟[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2008, 48(8): 1331-1334.
- [12] 郭婷婷, 刘建红, 宋东辉, 等. 不同形状气膜孔对气膜冷却效果的影响[J]. *动力工程*, 2006, 26(3): 333-336.
- [13] 康 顺, 马 丽, 陈党慧. 矩形冷却孔附近流动的数值研究[C]//北京. 中国工程热物理学会学术会议论文: 热机气动热力学, 2006: 291-297.

Numerical Simulation of Influence of Different Hole Patterns on Air Film Cooling Effect

ZHANG Xiao-dong¹, DONG Ruo-ling¹, SHI Hong-hui¹, CHEN Wei^{1,2}, SHEN Wei-jie¹, ZHANG Ping¹

(1. School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Hangzhou Vocational Technical College, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To understand the influence of hole pattern in air film cooling technique, this paper investigates the cooling effect of flat air film cooling of cylindrical hole, shrinkage-diffusion hole and vortex hole when there is no compound angle and the angle of current is 35° under the conditions of main flow speed 20 m/s, turbulence 6%, main flow temperature 333K and jet flow temperature 293K with numerical simulation method. The aperture of round hole is 12.7 mm and length-diameter ratio is 3.5. The form of its joint face with plenum chamber is the same as other hole patterns. In the simulation process, pressure and velocity coupling is realized by turbulent flow Realizable $k-\epsilon$ equation, standard wall function boundary treatment and SIMPLEC algorithm. The result shows that as vortex jet flow inhibits the formation of kidney vortex and reduces the intensity of kidney vortex, the cooling effect and coverage area of vortex hole are superior to other two hole patterns

Key words: air film cooling; numerical simulation; hole pattern; kidney vortex

(责任编辑: 张祖尧)