

水平喷流对叶顶气膜冷却效率影响的数值研究

姜 伟, 谢诞梅
(武汉大学 动力与机械学院, 武汉 430072)

摘 要: 为进一步提高燃气轮机叶顶区域的气膜冷却效率,在叶顶模型结构上对 4 种叶顶冷却结构的流动和传热进行了数值模拟,结果显示带有盖板的水平喷流结构能够有效地提高叶顶区域的气膜冷却效率,对于圆孔,可以将气膜冷却效率提高至原来的 2 倍以上.通过流场的分析发现:水平喷流结构可以调整冷却工质的流动,使得冷却工质的贴壁性更好、分布更加均匀,进而提高气膜冷却效率.此外还研究了间隙宽度、盖板尾缘厚度、盖度和整流栅对水平喷流结构气膜冷却效率的影响.结果表明:增加盖度和减小间隙宽度可以提高气膜冷却效率,但是盖度和间隙宽度的选取受到了强度、工艺和冷却工质入口压力等因素的限制.水平盖板结构的冷却效果比倾斜盖板结构的好.整流栅足够长时可以调整流动、提高气膜冷却效率.

关 键 词: 气膜冷却; 叶片; 叶顶; 孔形; 冷却效率

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Numerical study on the effect of parallel injection on film-cooling effectiveness at turbine blade tip

JIANG Wei, XIE Dan-mei
(School of Power and Mechanical Engineering,
Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For the purpose of improving the film-cooling effectiveness on blade tip region of gas turbine, numerical simulation was carried out on the blade tip model to investigate the flow and heat transfer for four kinds of cooling holes. It was found that the covered structure can double the film-cooling effectiveness compared to the uncovered structure for aclinic injection structure. The physics was revealed by analysis of the flow filed, and results showed that the aclinic injection can improve flow distribution, obtain better film-coverage and more uniform flow distribution, consequently increasing the film-cooling effectiveness. The effect of gap width, cover degree, cover thickness and fence on film-cooling effectiveness was studied, and the results showed that the increase of the cover degree and decrease of the gap width can get a higher film-cooling effectiveness, but the cover degree and gap width were restricted by structural strength, technological level and secondary flow inlet pressure. A-clinic cover can obtain a better film-cooling effectiveness than the inclined one and there is a best cover thickness enabling to obtain the highest film-cooling effectiveness for the aclinic one. Sufficiently long fence can improve the flow distribution and increase the film-cooling effectiveness.

Key words: film-cooling; blade; blade tip; shaped hole; cooling effectiveness

收稿日期:2014-07-29

作者简介:姜伟(1991—),男,湖北鄂州人,硕士生,主要从事燃气轮机叶片冷却设计方面的研究.

通讯作者:谢诞梅(1963—),女,湖北武汉人,教授、博士生导师,博士,主要从事转子动力学方面的研究.

E-mail:dmxie@whu.edu.cn

因存在着巨大的温度梯度、压力梯度和速度梯度,燃气轮机叶顶区域成为燃气轮机中最难冷却的区域之一^[1].通过叶顶间隙泄漏的高温气流和潜在的动静碰磨是导致叶顶损伤的主要原因,由此而引起的叶片寿命问题受到了广泛的关注.由于叶顶区域气封结构趋于复杂,叶顶间隙来流不稳定,其内部冷却工质流动也极其复杂,这些给叶顶冷却结构的设计带来了许多不确定性.为此,高效的叶顶冷却对于提高叶片寿命乃至整机可靠性具有重要的意义.

Mayle 和 Metzger^[2]率先进行了叶顶传热的研究,在他们的研究中使用旋转轮盘作为外壁,而叶片是静止的,通过静止和运动工况的对比,认为在流动条件相似的前提下,可以用静止叶片代替旋转叶片来研究叶顶的传热. Metzger 和 Rued^[3-4]采用模型叶顶引入汇流和源流的方法研究了压力面和吸力面顶部附近的流动和传热,结果证明这一模型叶顶可以获得与真实叶顶间隙相似的汇流和源流. Chyu 等^[5]、Metzger 等^[6]和 Ameri 等^[7]在平顶叶片的基础上研究了凹槽状叶顶的流动和传热. Bunker 等^[8]和 Azad 等^[9]则分别采用显色液晶技术在高速直叶栅上获取了叶顶的传热分布,其研究表明叶顶间隙和湍流度对传热系数有很大的影响,平顶和凹槽的传热分布有明显的不同. Kwak 等^[10]在 GE-E³ 发动机动叶上使用显色液晶技术测量了传热系数和气膜冷却效率,其研究结果表明传热系数和气膜冷却效率随叶顶间隙的增加而增加,随吹风比的增加传热系数降低而冷却效率增加;Ahn 等^[11]在同样的装置上使用压敏涂料测量了气膜冷却效率,结果表明开孔位置和凹槽对叶顶表面压力和气膜冷却效率有重要的影响. 在国内,虞跨海等^[12]进行了叶顶结构及间隙变化对叶片气动与传热性能影响的研究,发现射流孔可以有效地降低叶顶表面温度,凹槽射流叶片具有最高的气动性能. 韩昌等^[13]在某 F 级重型燃气轮机一级动叶上使用压敏涂料研究了质量流量比、密度比和叶顶间隙对气膜冷却特性的影响. 王文三等^[14]采用数值模拟的方法对比分析了 1+1/2 对转涡轮 4 种不同的叶顶冷却布置方案对叶顶传热、冷却性能以及气动特性的影响,研究结果表明气膜孔靠近压力面布置可以提高气膜冷却效率和涡轮效率. 王进等^[15]通过数值模拟的方法研究了叶顶下游孔位对叶顶区传热的影响,结果表明下游气膜孔布置在前缘附近可以改善前缘区域的气膜冷却效率而不会影响下游区

的气膜冷却效率.

以上研究的冷却孔均为垂直喷流结构. 目前,水平喷流结构在燃烧室火焰筒的冷却设计中有所应用,其特点是可以减小主流和冷却工质的掺混并且获得更均匀的气膜分布. 为此,本文尝试将水平喷流结构应用于动叶叶顶上,借助于计算流体动力学的数值方法,对其提高叶顶气膜冷却效率的可能性进行了探索性的研究.

1 数值方法

1.1 计算模型

叶顶泄漏气流的模拟模型如图 1 所示,强制气流通过一个狭窄间隙来模拟叶顶的泄漏气流,模拟的区域见图中阴影部分. 图 2 给出了计算模型的示意图,图中叶顶到外壁距离 $H=8\text{ mm}$. 分别模拟计算了图 3 所示的 4 种孔结构的流动与传热,图 3(a) 冷却结构为圆孔,图 3(b)冷却结构为带盖板的水平喷流的圆孔,图 3(c)冷却结构为离散槽,图 3(d)冷却结构为带盖板的水平喷流的离散槽. 其中图 3(a)和图 3(c)取自文献[16],图 3(b)和图 3(d)分别在图 3(a)和图 3(c)的冷却工

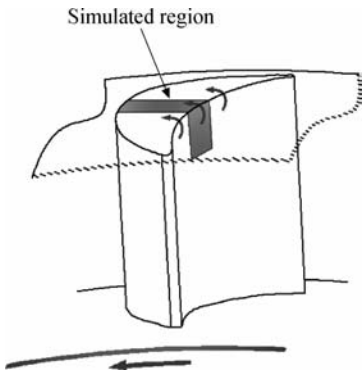


图 1 叶顶泄漏气流模拟模型

Fig. 1 Simulated model of blade tip leakage

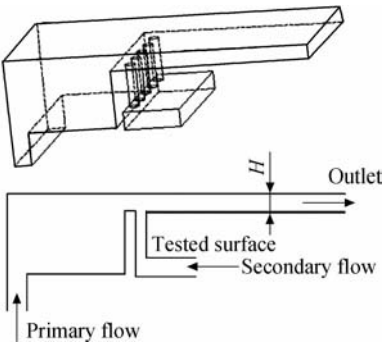


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Sketch map of the computational model

质出流顶端增加盖板,以调整流动方向使得冷却工质形成水平喷流. 4 种结构的基础尺寸参数如表 1 所示,间隙宽度 W 、尾缘厚度 t 和盖度 L 为本文的设计参数. 图 4 为加强筋和整流栅示意图,加

强筋和整流栅将盖板和叶顶连接在一起,关于加强筋和整流栅的作用将在后文详细讨论.

1.2 湍流模型选择

湍流是一种高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流动,湍流模型的选取对边界处传热计算的准确性起关键性作用. 可实现 $k-\epsilon$ 模型是一种低雷诺数模型,其湍流动力黏度计算式中的系数不是常数^[17],而是与应变率相关. 文献[18]采用该模型进行气膜冷却效率预测时发现该模型与试验结果吻合得最好. 本文采用不同的湍流模型计算气膜冷却效率,包括两方程模型中的 $k-\omega$, RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 、标准 $k-\epsilon$ 、可实现 $k-\epsilon$ 和 7 方程的雷诺应力模型,其中只有标准 $k-\epsilon$ 模型配合标准壁面函数或增强壁面函数以及可实现 $k-\epsilon$ 模型配合非平衡壁面函数可以获得收敛解. 将这 3 种湍流模型的计算结果与文献[16]在雷诺数 $Re=30\,000$, $L_0/H=9.12$ 的圆孔试验结果进行对比,对比结果如图 5 所示,图中 RKE

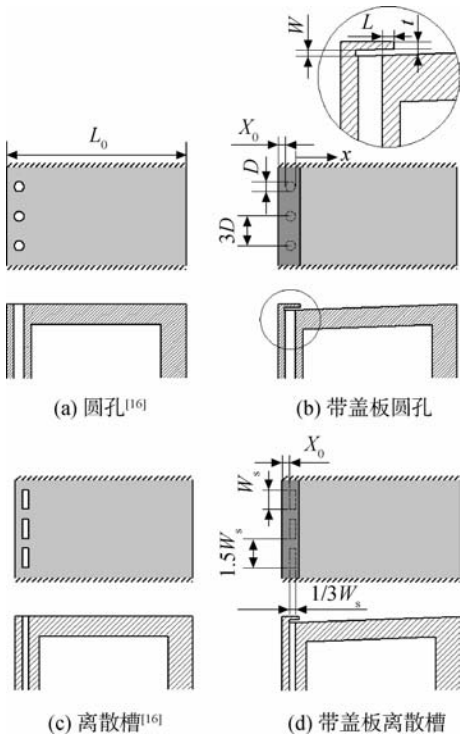


图 3 4 种气膜冷却结构

Fig. 3 Four kinds of film-cooling structure

表 1 叶顶模型尺寸

Table 1 Dimensioness of blade tip model

孔型名称	参数/mm
圆孔	$X_0=2.5$, $D=4.8$, $L_0=72.4$
带盖板圆孔	$X_0=2.5$, $D=4.8$, $L_0=72.4$
离散槽	$X_0=5.3$, $W_s=9.5$, $L_0=72.4$
带盖板离散槽	$X_0=5.3$, $W_s=9.5$, $L_0=72.4$

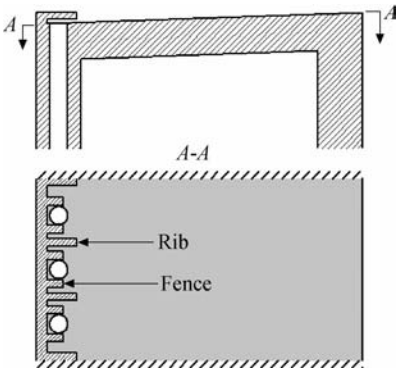
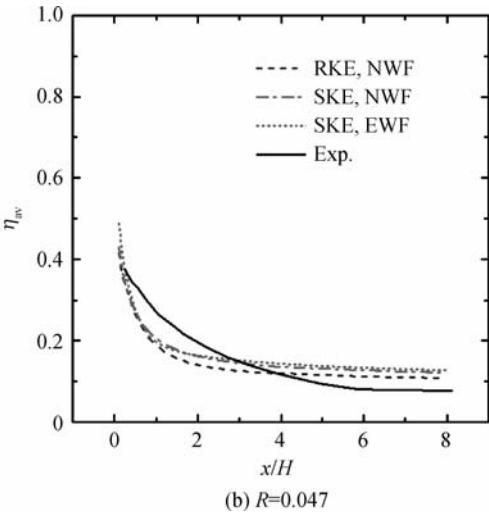
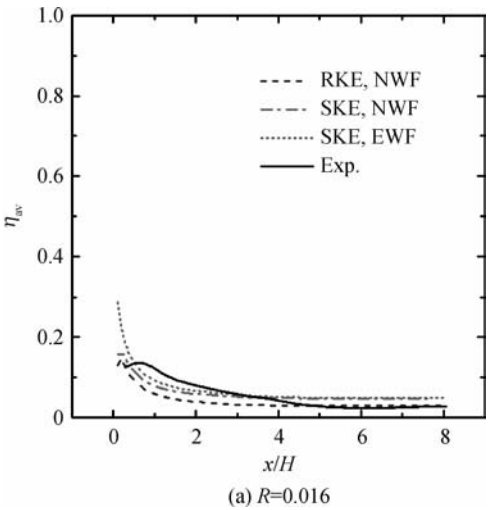


图 4 加强筋和整流栅示意图

Fig. 4 Sketch map of rib and fence



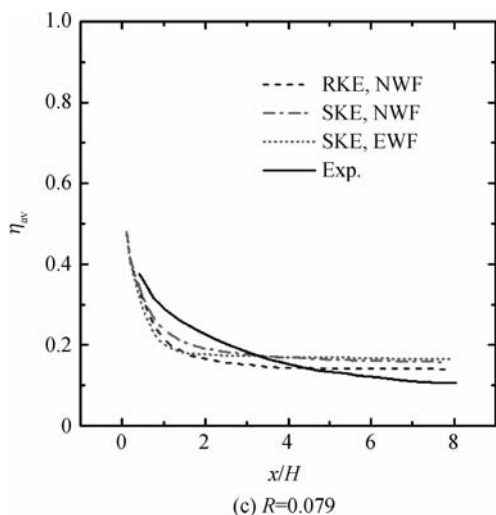


图5 计算结果与测量值对比图

Fig. 5 Comparison between numerical results and experiment data

表示可实现 $k-\epsilon$ 模型, SKE 表示标准 $k-\epsilon$ 模型, NWF 表示非平衡壁面函数, EWF 表示增强壁面函数, x 表示流动方向到气膜孔的距离, R 表示主流与冷气的质量流量比. 结果表明配合非平衡壁面函数的可实现 $k-\epsilon$ 模型与试验数据吻合得最好, 后文采用这种湍流模型进行研究. 收敛的判断标准为相对残差小于 10^{-5} , 并且测试表面平均气膜冷却效率 η_{av} 趋于稳定.

1.3 网格划分

模型网格采用非结构化网格, 根据非平衡壁面函数的要求选取 $y^+ = 1$. 第1层网格的厚度 y 由式(1)确定

$$y = \frac{\rho U}{\mu y^+} \quad (1)$$

式中 ρ, μ 为流体的密度和黏度. 速度 U 计算公式为

$$U = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2)$$

式中 τ_w 为壁面切应力. 最终确定测试表面的第1层网格厚约为 0.02 mm , 近壁区设置10层网格, 增长率为1.2. 以测试表面平均气膜冷却效率(对测试表面的气膜冷却效率进行面积平均)和冷却工质入口压力作为网格无关性验证指标, 最终确定的网格单元数为110万左右(随结构参数的变化而有所波动), 图6为整体网格示意图.

1.4 边界条件

流体介质为空气, 密度按理想气体计算, 比热容、导热系数、黏度通过对温度进行线性插值

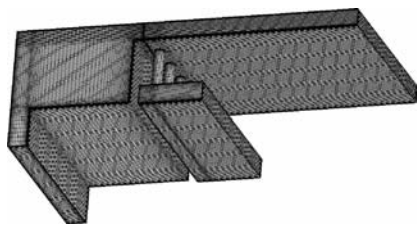


图6 网格示意图

Fig. 6 Sketch map of mesh

取得.

本文模拟了4种叶顶冷却结构在质量流量比 $R=0.016, 0.047$ 和 0.079 下的流动与传热, 其中主流质量流量固定不变而改变冷却工质质量流量. 质量流量比 R 的定义如下

$$R = \dot{m}_s / \dot{m}_p \quad (3)$$

式中 $\dot{m}_s$ 和 $\dot{m}_p$ 分别为冷却工质和主流的质量流量.

主流和冷却工质的入口设为质量流量入口, 出口为压力出口. 冷却工质与主流的温度比 $T_s/T_p = 0.75$, 主流的湍流度设为10%, 冷却工质湍流度设为1%.

所有壁面均设为绝热壁面, 此时的壁温即为绝热壁温 T_{aw} . 据此, 可计算得到气膜冷却效率 η

$$\eta = (T_p - T_{aw}) / (T_p - T_s) \quad (4)$$

式中 T_p, T_s 分别为主流和冷却工质的入口温度.

2 计算结果及分析

2.1 两种孔结构对比研究

为确定水平喷流结构对圆孔和离散槽气膜冷却效率的影响, 进行了两组对比研究. 图7为图3(a)和图3(b)中的两种冷却结构气膜冷却效率的对比. 图中实线和虚线分别表示圆孔垂直喷流和带盖板圆孔的水平喷流的计算结果. 由图7可以发现, 在不同的质量流量比下, 水平喷流结构的气膜冷却效率均可达到垂直喷流结构的2倍以上, 冷却效果有显著的提高. 图8为图3(c)和图3(d)中的两种冷却结构平均气膜冷却效率的对比, 带盖板离散槽的水平喷流结构又分为有加强筋和没有加强筋两种情况. 由图8可以发现, 在质量流量比很小的时候, 水平喷流结构不仅没有提高气膜冷却效率, 反而在大部分区域降低了气膜冷却效率; 但是随着质量流量比的增大, 水平喷流结构的优势逐渐表现出来. 图8的数据还表明加强筋有改善流动、提高气膜冷却效率的作用. 从图7、图8的数据中可以得到以下结论: 对于圆孔结构, 水平

喷流可以显著地提高气膜冷却效率,在特定的尺寸参数下,水平喷流结构的气膜冷却效率可以达到垂直喷流结构的 2 倍以上;对于离散槽结构,在较大质量流量比的情况下,水平喷流结构有提高气膜冷却效率的效果,但是质量流量比很小时水平喷流结构就失去优势了。

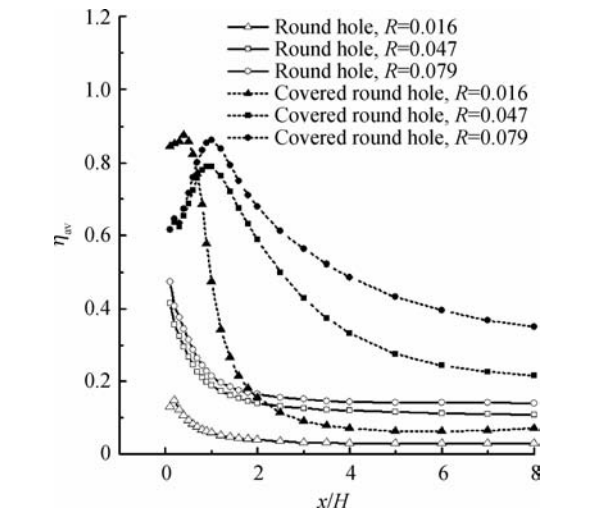


图 7 两种圆孔结构的平均气膜冷却效率对比图
Fig. 7 Comparison of averaged film-cooling effectiveness between two kinds of round holes

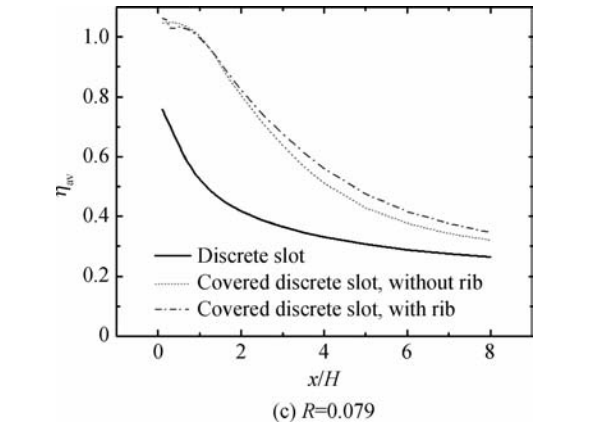
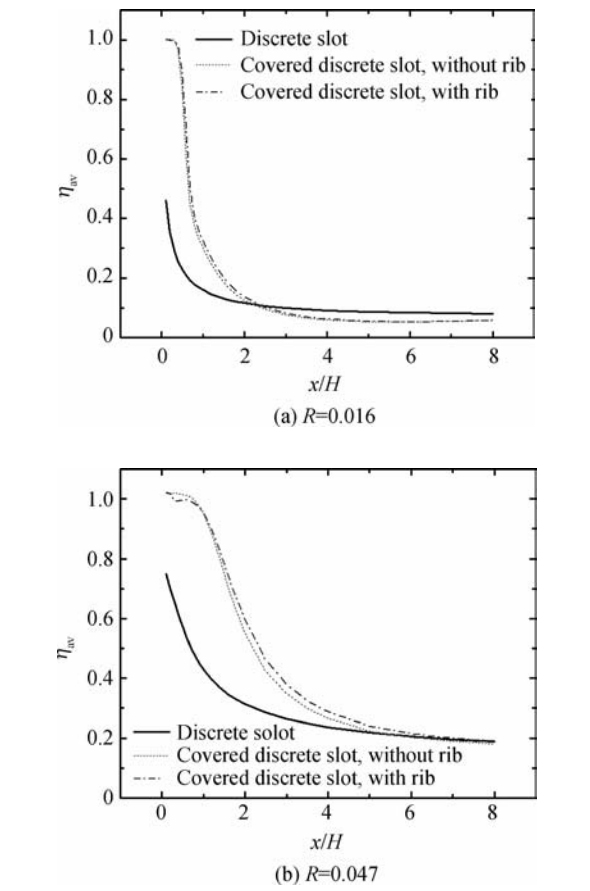


图 8 两种离散槽结构的平均气膜冷却效率对比图
Fig. 8 Comparison of averaged film-cooling effectiveness between two kinds of discrete slots

图 9、图 10 可以解释水平喷流结构提高气膜冷却效率的机理。图 9 为不同质量流量比下图 3 (a)和图 3(b)两种结构冷却工质分布的对比,图中深灰色表示冷却工质的分布。从图 9 中可以发现:冷却工质的分布范围随着质量流量比的增加而扩张,意味着冷却工质与主流的掺混更严重;对于水平喷流结构,由于盖板的存在,冷却工质在垂直于测试表面方向上的扩张受到了限制,冷却工质的覆盖效果更好,因而能获得更高的气膜冷却

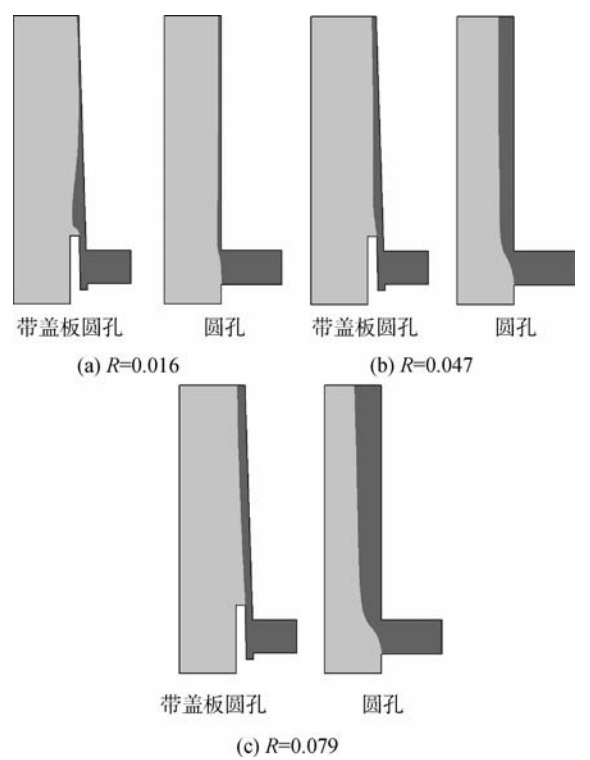


图 9 不同质量流量比下的冷却工质分布
Fig. 9 Secondary flow distribution under different mass flow rates

效率,在冷却工质质量流量很小时,冷却工质出流速度低,进入压力更低的主流区有一个降压增速的过程,这个过程形成了图 9(a)中的“凸起”,这个凸起结构会在一定程度上降低气膜冷却效率.图 10 为不同质量流量比下图 3(a)和图 3(b)两种结构冷却工质流线的对比.从图 10 中可以看出,在测试表面上水平喷流结构的冷却工质分布更均匀,形成的气膜覆盖效果更好,垂直于流动方向的温度分布也会更均匀.水平喷流之所以能够形成更好的气膜覆盖,是因为盖板在冷却工质出口处形成一个低压区,这个低压区为冷却工质沿测试表面扩散提供了条件;而对于垂直喷流,孔间区域迅速被主流所填充,限制了冷却工质沿测试表面的扩散.

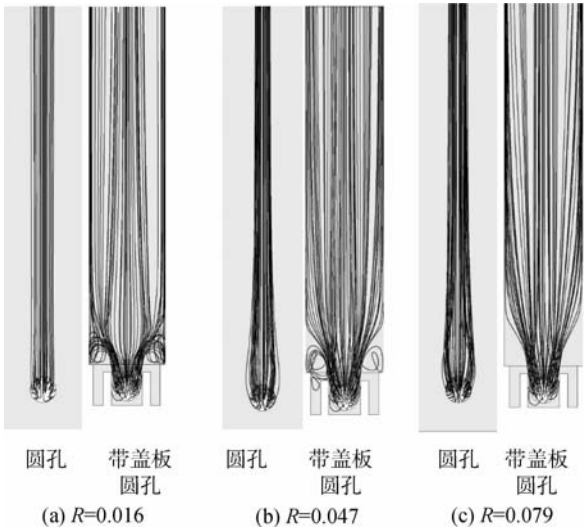


图 10 不同质量流量比下的冷却工质流线
Fig. 10 Streamlines of secondary flow under different mass flow rates

2.2 结构参数对水平喷流冷却效果的影响

本文对图 3(b)所示的 3 个结构参数——间隙宽度 W 、尾缘厚度 t 和盖度 L 对水平喷流冷却效果的影响进行了研究,其中间隙宽度为盖板与测试表面之间的距离,尾缘厚度为盖板尾缘处厚度,盖度为盖板超出圆孔(离散槽)的距离.

图 11 为 $t=0\text{ mm}$, $L=2.4\text{ mm}$, $R=0.079$ 时间隙宽度对平均气膜冷却效率的影响,随着间隙宽度的减小气膜冷却效率有所提高,此时气膜冷却效率的提高受到两个因素的作用.首先,冷却工质喷口面积随着间隙宽度的减小而减小,在相同的质量流量下出流速度更大,当喷口面积足够小时,冷却工质的出流速度会大于冷却工质入口速

度,意味着此时有部分内能转化为了流体的动能,冷却工质的温度会降低,从而提高了气膜冷却效率;其次,更大的出流速度有更好的贴壁效果,进一步提高了气膜冷却效率.图 11 中部分区域出现了平均气膜冷却效率大于 1 的现象,这是因为计算气膜冷却效率的冷却工质温度取为冷却工质入口温度,而实际的冷却工质出流温度可能低于入口温度.更小的间隙宽度可以获得更大的气膜冷却效率,但是过小的间隙宽度不仅给加工带来了困难,而且压力损失更大,需要更大的入口压力来保证质量流量,间隙宽度应由工艺水平和冷却工质入口压力共同决定.

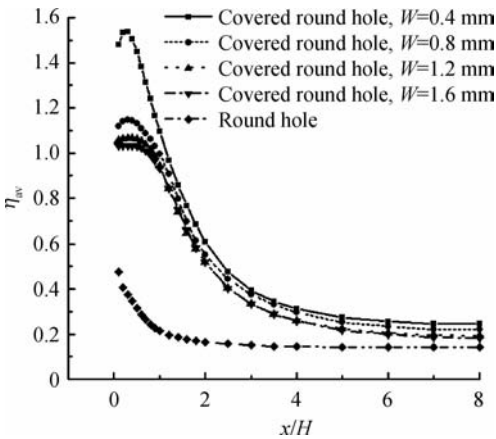


图 11 不同间隙宽度下的平均气膜冷却效率
Fig. 11 Averaged film-cooling effectiveness of different gap widths

图 12 为 $t=0\text{ mm}$, $W=1\text{ mm}$, $R=0.079$ 时盖度对带盖板的水平喷流圆孔的平均气膜冷却效率的影响,随着盖度的增加平均气膜冷却效率有所

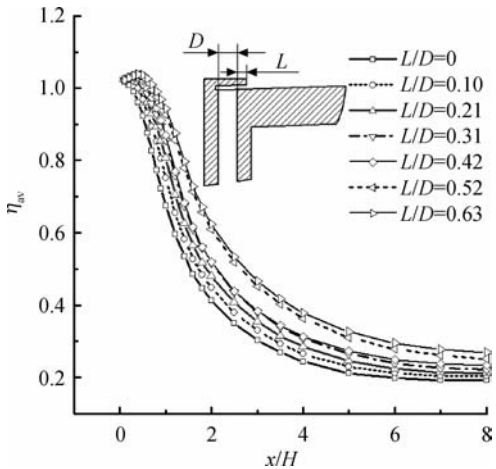


图 12 不同盖度下的平均气膜冷却效率
Fig. 12 Averaged film-cooling effectiveness of different cover degrees

提高,但盖度增加到一定程度时,平均气膜冷却效率的增加不再明显.图 13 为不同盖度下带盖板的水平喷流圆孔流线分布,在冷却工质出口处有一个“凸起”,随着盖度的增加,这个“凸起”趋于平坦.冷却工质流动在盖板下有一个发展的过程,当盖度过小时发展没有充分地完成,出流速度带有较大的垂直分量,因而气膜冷却效率更低.当发展充分完成后,继续增大盖度对气膜冷却效率的影响不明显.盖板过长会增加盖板上的离心应力,而且盖板本身也需要其他辅助结构进行冷却,因此在保证冷却工质充分发展的前提下应选取较短的盖板.

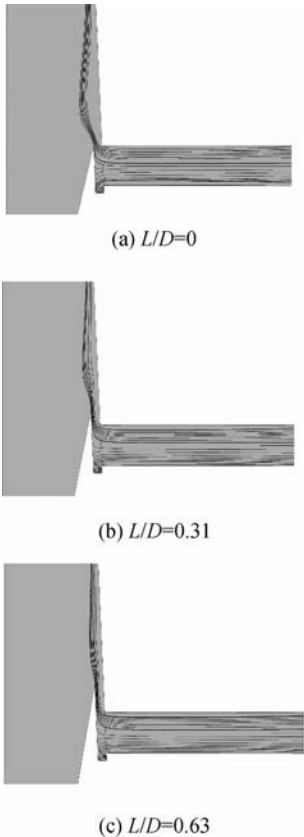


图 13 不同盖度下的流线图
Fig. 13 Streamlines of different cover degrees

图 14 为 $W=1\text{ mm}$, $L=2\text{ mm}$ 时带盖板的水平喷流圆孔结构尾缘厚度对平均气膜冷却效率的影响,讨论了两种盖板形式:一种盖板的上表面略有倾斜(倾斜角度随着尾缘厚度的增加而减小,直至水平);一种盖板的上表面水平.在所研究的尺寸范围内水平盖板比倾斜盖板的气膜冷却效率更好.水平盖板平均气膜冷却效率只有一个峰值,在 $t=1.2\text{ mm}$ 处;尾缘厚度对倾斜盖板平均气膜冷却效率的影响比较复杂,平均气膜冷却效率不止

一个峰值,其中一个在 $t=1\text{ mm}$ 处.虽然水平盖板平均气膜冷却效率更好,但考虑到可能存在叶顶碰磨以及减少叶顶泄漏的需要,倾斜盖板相对而言更可靠、更安全.

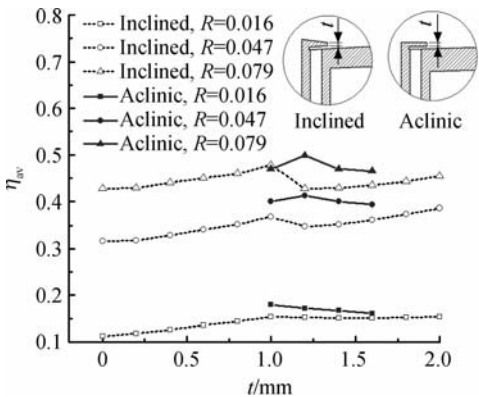


图 14 不同尾缘厚度的平均气膜冷却效率
Fig. 14 Averaged film-cooling effectiveness of different cover thicknesses

2.3 加强筋与整流栅的作用

加强筋和整流栅见图 4,加强筋连接盖板与冷却表面,主要起加强结构强度的作用;整流栅比加强筋短,主要起调整冷却工质流动的作用.需要说明的是,加强筋和整流栅是根据其主要功能进行的定义,没有严格的区分,整流栅也可以加强结构强度,加强筋也起到了一定的整流作用.

图 15 说明了整流栅对带盖板的水平喷流圆孔平均气膜冷却效率的影响,图中横坐标为整流栅超出圆孔圆心的距离(E),纵坐标为测试表面的平均气膜冷却效率.实线为不同整流栅长度下的平均气膜冷却效率,虚线为同样边界条件下没有整流栅的平均气膜冷却效率.当整流栅较短时,

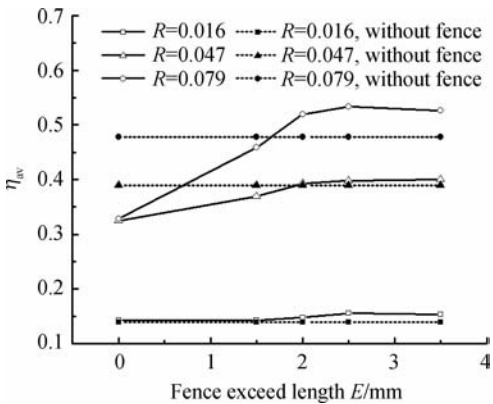


图 15 整流栅对平均气膜冷却效率的影响
Fig. 15 Effect of fence on averaged film-cooling effectiveness

平均气膜冷却效率反而更低,说明此时整流栅没有达到调整流动的效果,反而是扰乱了原有的流动;随着整流栅的加长,平均气膜冷却效率逐渐提高并超过没有整流栅的情况,最终达到了整流的效果。

2.4 关于压力面扩张孔的讨论

压力面扩张孔结构如图 16^[16]所示,这种冷却孔开设在叶片的压力面上,冷却工质被泄漏气流挟带至叶顶进行冷却。压力面扩张孔的详细结构和研究见文献[19-20]。这种冷却孔的优点在于可以对整个叶顶进行冷却,这一点是圆孔和离散槽做不到的,圆孔和离散槽必须和压力面保持一定的距离,这段距离就成了冷却盲区。这种孔的缺点是气膜冷却效率低,而且对叶片结构的破坏更大,不良的设计还会影响到叶片的气动性能。一般这种孔不会单独使用,而是与其他气膜孔相配合。本文所提到的盖板在底部虽然受到冷却工质的冲击冷却,但是顶部同样留有冷却盲区,也需要与压力面扩张孔配合使用。

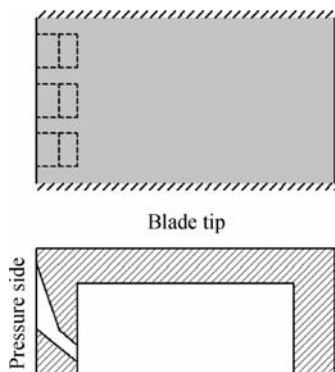


图 16 压力面扩张孔

Fig. 16 Pressure-side hole

3 结 论

本文采用 Fluent 软件对叶顶模型结构的流动和传热进行了数值模拟,研究了 4 种叶顶冷却结构,通过对比气膜冷却效率、分析流场得出以下结论:

1) 相较于垂直喷流结构,水平喷流结构可以改变和调整冷却工质的流动,形成更高效的气膜覆盖,从而提高了气膜冷却效率。对于圆孔,在特定结构参数下,可以将气膜冷却效率提高至原来的 2 倍以上;对于离散槽,在较大质量流量比的情况下水平喷流结构有提高气膜冷却效率的效果,但是质量流量比很小时水平喷流结构就不适

用了。

2) 减小间隙宽度可以提高气膜冷却效率,但实际应用中的间隙宽度应由加工条件和冷却工质入口压力共同决定。增加盖度可以提高气膜冷却效率,考虑到安全性和综合经济性,在保证冷却工质充分发展的前提下应选取较短的盖板。水平盖板结构的气膜冷却效果比倾斜盖板结构的好,对于水平盖板结构,存在一个尾缘厚度使得冷却效率达到最大值,本文计算得到最佳尾缘厚度为 1.2 mm。

3) 当整流栅满足特定长度时可以起到调整流动、改善冷却效果的作用,同时整流栅还可以同加强筋一起加强盖板的结构强度。

参考文献:

- [1] Bunker R S. A review of turbine blade tip heat transfer [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2001, 934(1): 64-79.
- [2] Mayle R E, Metzger D E. Heat transfer at the tip of an unshrouded turbine blade [J]. Heat Transfer, 1982, 3(3): 87-92.
- [3] Metzger D E, Rued K. The influence of turbine clearance gap leakage on passage velocity and heat transfer near blade tips; Part I sink flow effects on blade pressure side [J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 111(3): 284-292.
- [4] Rued K, Metzger D E. The influence of turbine clearance gap leakage on passage velocity and heat transfer near blade tips; Part II Source flow effects on blade suction sides [J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 111(3): 293-300.
- [5] Chyu M K, Moon H K, Metzger D E. Heat transfer in the tip region of grooved turbine blades [J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 111(2): 131-138.
- [6] Metzger D E, Bunker R S, Chyu M K. Cavity heat transfer on a transverse grooved wall in a narrow flow channel [J]. Journal of Heat Transfer, 1989, 111(1): 73-79.
- [7] Ameri A A, Steinhilsson E, Rigby D L. Effect of squealer tip on rotor heat transfer and efficiency [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 753-759.
- [8] Bunker R S, Bailey J C, Ameri A A. Heat transfer and flow on the first-stage blade tip of a power generation gas turbine; Part 1 experimental results [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(2): 263-271.
- [9] Azad G S, Han J C, Teng S, et al. Heat transfer and pressure distributions on a gas turbine blade tip [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(4): 717-724.
- [10] Kwak J S, Han J C. Heat transfer coefficient and film-cooling effectiveness on a gas turbine blade tip [C] // ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air. Amsterdam: American Society of Mechanical Engineers, 2002: 309-318.

[11] Ahn J, Mhetras S, Han J C. Film-cooling effectiveness on a gas turbine blade tip using pressure-sensitive paint [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(5): 521-530.

[12] 虞跨海, 杨茜, 岳珠峰. 高压涡轮冷却叶片叶顶结构气动与传热[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 174-178.
YU Kuahai, YANG Xi, YUE Zhufeng. Aerodynamic and heat transfer of cooling blade tips for high pressure turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(2): 174-178. (in Chinese)

[13] 韩昌, 任静, 蒋洪德. 多参数对叶顶气膜冷却的影响[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(9): 1501-1504.
HAN Chang, REN Jing, JIANG Hongde. Multi-parameter influence on film cooling of blade tip [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(9): 1501-1504. (in Chinese)

[14] 王文三, 唐菲, 赵庆军, 等. 涡轮叶顶冷却布置对叶顶传热冷却性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(3): 393-396.
WANG Wensan, TANG Fei, ZHAO Qingjun, et al. Effects of different cooling holes arrangements on film cooling performance of a gas turbine blade tip [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(3): 393-396. (in Chinese)

[15] 王进, 於永, 曾敏, 等. 叶顶下游孔位对气膜冷却特性影响的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(11): 1954-1957.
WANG Jin, YU Yong, ZENG Min, et al. Numerical re-

search on film cooling characteristics of a single hole site at trailing edge [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(11): 1954-1957. (in Chinese)

[16] Downs J P, Abdel-Messeh W, Steuber G D, et al. A summary of the cooled turbine blade tip heat transfer and film effectiveness investigations performed by Dr. D. E. Metzger [J]. Journal of Turbomachinery, 1995, 117(1): 1-11.

[17] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

[18] Silieti M, Kassab A J, Divo E. Film cooling effectiveness from a single scaled-up fan-shaped hole; a CFD simulation of adiabatic and conjugate heat transfer models [C] // ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Reno Nevada: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 431-441.

[19] Christophel J R, Thole K A, Cunha F J. Cooling the tip of a turbine blade using pressure side holes; Part 1 adiabatic effectiveness measurements [C] // ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. Vienna: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 263-271.

[20] Christophel J R, Thole K A, Cunha F J. Cooling the tip of a turbine blade using pressure side holes; Part 2 heat transfer measurements [C] // ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. Vienna: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 273-282.

(编辑: 陈 越)