

旋转状态下燃气涡轮叶片内部冷却的研究进展

戴 萍¹, 林 枫²

(1 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 在现代高性能燃气涡轮发动机中, 随着涡轮前燃气温度的不断提高, 旋转涡轮叶片的冷却问题日益受到重视。在众多的冷却技术中, 内部冷却具有明显的优势和较强的应用前景。综述了近年来旋转状态下燃气涡轮叶片内部冷却技术的研究成果, 总结了光滑壁面旋转对流场和传热的影响、旋转对冲击冷却影响以及旋转扰流式肋片冷却介质通道传热的研究现状, 阐述了旋转状态下内部冷却和气膜冷却相互影响的研究情况。最后指出进一步优化内流通道结构, 研究旋转对扰流柱通道流动及换热的影响以及在旋转状态下深入探讨内部流动与外部气膜冷却相互影响的机理是今后工作的重点。

关 键 词: 燃气轮机; 冷却叶片; 内流冷却; 对流传热; 肋片; 旋转

中图分类号: TK471; TK124

文献标识码: A

引 言

现代燃气涡轮发动机的性能随着发动机的压缩比和涡轮前燃气温度的提高而不断提高, 而涡轮前燃气温度的提高使得发动机热端部件的冷却结构日益复杂。此时, 在高温环境下工作的涡轮叶片内部冷却结构和冷却方式成为了研究的关键技术之一。内流冷却是使冷却工质流经叶片内部

强化传热的通道并从叶片外侧吸收热量的一种冷却方式, 目前使用较多的内流冷却方式主要有冲击射流冷却、肋片扰流强化换热和柱—肋强化换热。

湍流、特性变化、表面粗糙度和通道几何形状的综合作用会影响静叶片中冷却流体的流动及特性, 研究旋转状态下气冷叶片流场和换热的难度远远大于静止状态, 因为和静止叶片相比, 工作叶片由于旋转力的加入, 使得冷却介质的流动分析增加了一个维数, 旋转的哥氏力和旋转浮力改变了流场, 在通道中引起二次流, 使主流分布不对称, 因而影响传热。研究旋转对涡轮内部流场和换热的影响, 对于气冷涡轮冷却结构的设计及优化、改善涡轮的气动性能有着非常重要的作用。

因此, 研究了旋转状态下燃气涡轮叶片内部冷却技术, 可以为合理设计旋转状态下涡轮叶片内部冷却系统提供参考。

1 光滑壁面的冷却介质通道

涡轮在旋转时, 其内部流场结构和叶片的换热特性与静止叶栅或平板是明显不同的。在旋转状态下, 存在着离心力、哥氏力以及非等温场下的浮升力, 在这些

力的相互作用下, 叶片内部的流动和换热是相当复杂的。旋转对流动和换热的影响是通过动量方程中的非惯性力来起作用的, 这些力的作用各有特点: 离心力类似于质量力, 属于保守力, 因为有势可直接进入到压力梯度项中, 其本身特点不明显; 哥氏力总是作用在垂直于流体流动的方向上, 是个二次流的产生项; 浮升力取决于离心力场和温度场的共同作用, 这些附加力项将明显改变流阻和流体与壁面的热交换。

1.1 旋转对流场的影响

旋转通道与静止通道中的流动有显著差别, 对于旋转涡轮叶片内流, 离心力除引起静压分布变化外对 U 型通道的流动没有太大影响, 但如果旋转数很大, 此时离心力项对冷气流的压缩作用就不可忽略了。在旋转状态下, 哥氏力会使流动结构发生两个明显的变化: 一个是主流型向哥氏力所指的方向偏移。另一个是旋转时由哥氏力的径向流速导致的二次流动的出现, 它不仅改变了速度分布, 而且也将改变湍流的随机速度波动特性。离心浮升力的方向和流体主流的惯性力在同一直线上, 其对通道内流动的影响与哥氏力的作用相比, 处于较弱位置。

收稿日期: 2009-07-03 修订日期: 2010-05-04

作者简介: 戴 萍 (1971-), 女, 黑龙江大庆人, 哈尔滨工程大学博士研究生。

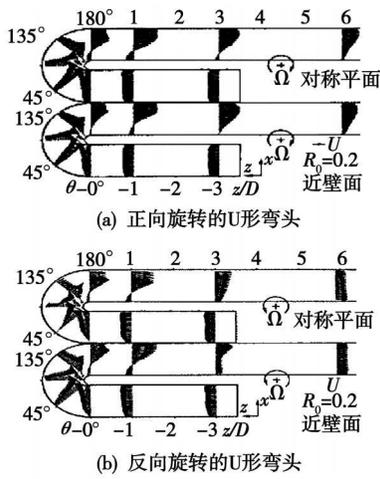


图 1 旋转 U 形管中的速度分布

Cheal 等人采用多普勒激光速度仪 (LDV) 对旋转双流程通道的速度进行了测量^[1]。图 1 中的速度矢量图显示了 180° 弯头下游的流动分离。正向旋转使再附着长度增加, 反向旋转使再附着长度减小。测量表明, 弯头附近的横向波动程度与沿流线方向的波动程度相当。Tse 等人用 LDV 测量了雷诺数为 25 000 旋转数为 0.24 的旋转流体^[2]。结果发现流动并没有充分发展, 且上下侧壁面附近沿流动方向产生了较高的流动速度。Liu 应用 LDV 测量了雷诺数为 140 000、旋转数为 0.082 时双流程通道中的流动^[3]。发现在第一流程中, 旋转导致沿流线方向的平均速度分布发生变化, 在后缘附近产生了较高的轴向流动速度。在第二流程中, 转弯干扰了流动, 速度分布出现两个峰值。并发现旋转使湍流强度增加, 并且在中心区域湍流强度增加的少, 而壁面附近增加的多。Bons 用粒子成像速度仪 (PIV) 测量了加热和不加热的模拟光滑壁面叶片冷却通道内的流动^[4]。研究发现, 壁面附近的流动受二次流的影响很大, 流动矢量向前缘方向倾斜。沿流向

的速度分布在流体加热和不加热的情况下差别显著, 加热的流体在后缘附近具有更高的速度。

1.2 旋转对传热的影响

涡轮工作叶片在旋转条件下产生的附加力强化了换热, 减小了流阻, 但旋转使得换热在各个面换热能力分布不均, 增加了温度梯度。对于离心力衍生的浮升力, 将把壁面附近密度相对较小的热流体向旋转轴心的方向加速, 而对中心密度相对较高的冷流体却是向离心的方向加速, 导致壁面处热流体的流动受到阻碍, 热流体的平均流速降低, 因此在壁面处流体与换热表面的热交换能力有所降低, 这在高速旋转且温差较大的高压涡轮叶片中是一个不可忽视的影响因素。对于哥氏力衍生的浮升力对换热的影响与哥氏力本身的作用相同, 即强化了通道压力面侧的换热, 而减弱了吸力面的换热效果。在旋转情况下, 传热主要决定于旋转数 $R_\Omega = \omega D/\nu$ 和密度比 $DR = (\rho_{in} - \rho_{wall})/\rho_{in}$, 旋转数是哥氏力与整体流动惯性力之比的相对强度, 密度比是旋转浮力与整体惯性力之比的相对强度。

Wagner 采用四流程正方形截面通道来研究旋转对传热的影响^[5], 如图 2 所示。该旋转实验设备在大约 0.981 MPa 的环境中, 以 1 100 r/min 的转速运行来模拟蛇形动叶片冷却介质通道条件, 使用铜制加热器保持不同的恒定温度用以表现在传热方面不同的浮力影响, 铜元件的温度通过插入每个元件的两个热电偶来测量, 从而量化了旋转对传热的影响。邓宏武等人研究了在旋转状态下涡轮内冷蛇形通道的非稳态换热特性^[6]。实验表明, 对于旋转通道的非稳态过程, 换热系

数的变化呈波动变化过程, 且主要发生在实验参数变化的阶段。加速旋转时, 角加速度力的作用会加强进气通道前缘面的换热, 而降低后缘面的换热; 减速旋转时, 情况相反。刘传凯等人在通道进口雷诺数从 6 100 ~ 25 100 旋转数从 0 ~ 0.26 的范围内, 实验研究了旋转对光滑 U 型通道换热特性的影响^[7]。结果表明, 静止状态下, 通道局部努塞尔数随雷诺数增加而增加, 但其沿程分布规律基本不变。旋转状态下, 第一通道前后缘换热差异随旋转数的增加而增加, 在第二通道中正好相反。

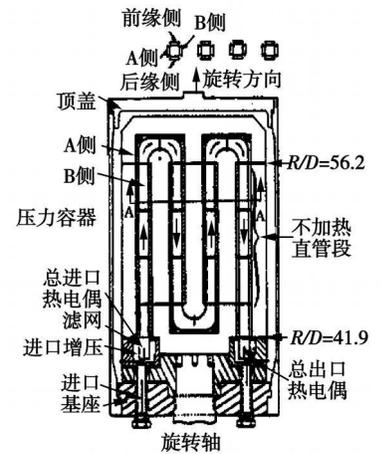


图 2 Wagner 等使用的 U 形冷却介质通道模型

2 旋转扰流式肋片冷却介质通道的传热

在高速旋转条件下, 内壁有肋管道的对流换热研究是近年内部通道对流换热研究的热点。传热表面上布置的周期性肋片扰动了边界层, 强化了叶片的表面传热, 肋片引起的流体分离增加了边界层内的湍流度, 导致受旋转影响的速度分布扭曲现象在光滑通道中那样显著。此外, 与整体流动成一定角度放置在流体中的

肋片会引起二次流, 它与转弯和旋转发展的二次流相互作用, 因此, 有肋片通道中的流体特性与光滑通道中的流体特性有很大的不同, 速度分布差别也很大^[8]。

2.1 旋转对扰流式肋片流动的影响

在正方形截面的旋转双流程有肋片通道内, 第一流程内和转弯前半部分的速度分布将会受到旋转方向(正向和反向旋转)的影响, 但是在转弯的下游, 旋转方向的影响并不显著^[9]。

Tse 等人用 LDV 测量了带倾斜肋片的正方形旋转通道内的速度分布^[10]。Tse 等人采用的多流程通道以及肋片的取向如图 3 所示, 图中标出了测量位置。采用的雷诺数为 25 000 旋转数为 0.24 肋片角度为 45°, 后缘和前缘有错列但平行的肋片装置。在错列的肋片排列中, 肋片以补偿方式布置在两个相对的壁面上, 在平行肋片排列中, 肋片相对于流体方向倾斜相同的角度。

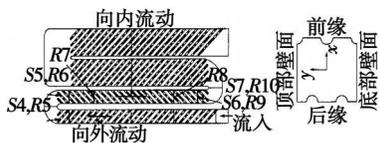


图 3 Tse 等人采用的蛇形通道结构及肋片取向

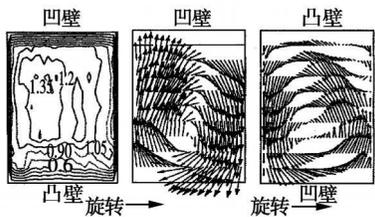


图 4 蛇形通道第一弯头和第二弯头处的二次流

图 4 显示了旋转通道的第一和第二转弯处的速度分布。从图中可看出, 由于肋片的相对位置、

转弯方向和旋转的影响, 在通道的第一转弯处, 整体流动向顺时针方向转弯, 而在第二转弯处, 整体流动向逆时针方向转弯。

2.2 旋转斜交肋片通道的传热

内部冷却中一般会采取不同的肋片取向, 来增强扰动和增大换热面积, 以强化换热, 从而有效地降低叶片内壁的温度, 如图 5 所示。肋片角度对传热分布的影响非常显著, 60°斜置肋片比 90°横向肋片产生更高的努塞尔数比, 这种强化传热的差别在第一流程和第二流程后缘壁上更为显著。

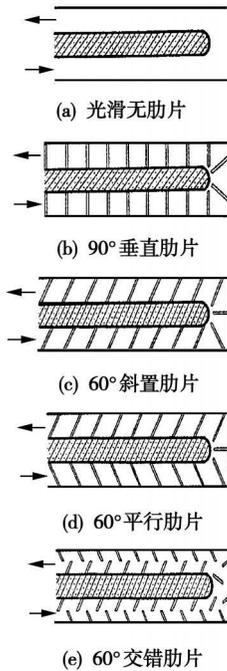


图 5 双流程通道中不同的肋片取向

Zhang 等人将 60°斜置肋片(截面是正方形)和 45°斜置肋片(截面是半圆形)的换热效果进行了比较^[11]。在第一流程中, 60°斜置肋片前缘表面的努塞尔数比与 45°斜置肋片一致, 而 60°斜置肋片后缘表面的努塞尔数比则比 45°斜置肋片要大很多。在第二流程中, 前缘表面 60°斜置

肋片努塞尔数比较大, 而后缘表面较小。这是由于在第一流程中, 几何特征(如肋片形状、肋片取向)对后缘较薄边界层的影响比对前缘较厚边界层的影响大。

2.3 旋转 90°肋片通道的传热

肋片对换热的增强作用主要是通过其扩展表面以及对边界层的破坏作用实现的。旋转改变了各表面的近壁流场, 而肋片对边界层的破坏能力直接与其所处近壁流场的流动状态相关。

Wagner 研究了旋转对 90°肋片通道传热的影响^[12], 实验是在大尺度、多流程, 既具有径向内流, 又具有径向外流的传热模型中进行的。对于低旋转数 ($R_0 < 0.25$) 而言, 第一流程前缘传热比随着旋转数的增大而降低, 随着密度比的增大而增加, 在径向内流的第二流程后缘, 密度比对努塞尔数比的影响比径向外流的第一流程前缘的影响大。这是由于低旋转数时的浮力和壁面附近流体的稳定性、发展的哥氏力驱动的二次流, 以及高旋转数时的肋片下游再附着长度的增加综合影响了传热分布。在第二流程进口附近因为大湍流混合以及通道弯曲区域二次流的影响, 热边界层很薄, 随着离转弯区域的距离增加, 转弯支配的二次流逐渐消失, 而浮力和哥氏力驱动的二次流横向流动的影响增加, 导致在第二流程进口附近密度比变化的影响相对较小, 而在出口附近密度比变化的影响相对较大。刘传凯用实验方法研究了旋转状态下光滑及带肋 U 型方截面通道的换热特性^[13]。带肋通道中, 90°直肋对称布置在前后缘, 肋片高径比为 0.143 节距比为 7。在实验雷诺数及旋转数范围分别为 6 100 ~ 25 100 和 0 ~ 0.26 下, 对比

分析了光滑及带肋通道的旋转换热特性。结果表明,带肋通道的换热明显好于光滑通道,旋转强化了第一通道后缘及第二通道前缘的换热,但是削弱了第一通道前缘及第二通道后缘的换热。

3 旋转对冲击冷却的影响

在所有的强化换热技术中,冲击冷却是最能有效加强局部换热系数的冷却方法。冷气通过细小的冲击孔,以很高的速度冲击到叶片内壁面,对内壁面进行有效地冷却,一部分通过气膜孔排出叶片,另一部分通过内流通道,最后从叶片尾缘排出。由于冲击孔在叶片内部的布置减弱了叶片的强度,所以冲击冷却一般用在叶片热负荷比较大的叶片前缘。

3.1 旋转对前缘冲击冷却的影响

从流体的流动和换热特性来看,叶片前缘的冷却形式是小空间内对大曲率凹面的冲击加上冷却气体在前缘和鳃区气膜孔的出流,同时其流动与换热要受到哥氏力、离心力和非等温场下衍生的浮升力的作用,所以旋转状态下叶片前缘的流动与换热是非常复杂的。

朱进容等人采用数值模拟的方法,对一典型航空发动机旋转状态下涡轮叶片前缘冲击气膜复合冷却的流动与换热特性进行了研究,计算模型将孔出流结构简化为缝出流结构,并由进气块、前缘块和尾缘块组成^[14~15]。通过对不同旋转速度的计算结果分析表明,雷诺数较低时前尾缘冲击面的平均努塞尔数分布出现波动现象;在雷诺数较高时,前尾缘冲击面的平均努塞尔数分布随转速的增大而单调减小,且尾缘冲击

面的换热比前缘冲击面的换热好。徐磊在旋转条件下对带出流孔的受限空间内冲击换热特性进行了实验研究^[16],并提出了一种“冲击 稀疏气膜”受限空间内部冷却结构。在冲击与旋转方向相同及相反的情况下,通过改变冲击雷诺数、旋转数和无因次温比对冲击靶面的平均换热特性进行了研究。研究发现,靶面的换热随着冲击雷诺数的增加而增强,旋转对冲击换热的削弱在雷诺数较大时表现较明显。在实验参数范围内,浮升力对换热的影响较小,离心力、哥氏力等对换热的影响程度与内部空气的流动结构及出流方式有关。

3.2 旋转对中弦区冲击冷却的影响

Parsons等人采用旋转通道研究了旋转对叶片中弦区冲击冷却的影响^[17]。研究发现,存在旋转时冲击的有效性减小,哥氏力以及两个腔室中离心力的方向使得射流冲击偏离靶面。并且由于旋转时,在后缘壁面附近,总的横向流和相关的湍流增加,减小了后缘冲击冷却的有效性。Akella等人研究了其它冲击结构中旋转对冲击的影响^[18]。实验表明,对径向外流而言,后缘传热系数较高,对径向内流而言,前缘传热系数较高。

3.3 旋转对扰流式肋片冲击冷却的影响

Akella等人研究了旋转对冲击靶面上有斜置肋片换热的影响^[19]。45°斜置肋片产生了二次流,而且对第一流程和第二流程来说,二次流的取向是不同的。图6给出了流动的哥氏力和离心力,哥氏力对中心主流的影响用下标 j 表示,对冲击射流的影响用下标 c 表示。由于两个通道中

的流动方向不同,而旋转方向保持相同,因此哥氏力在两个通道中的方向是不同的。研究表明,平均努塞尔数的减少与旋转数的对数成线性关系,流动通道中斜置肋片的增加改变了传热系数分布的特性。

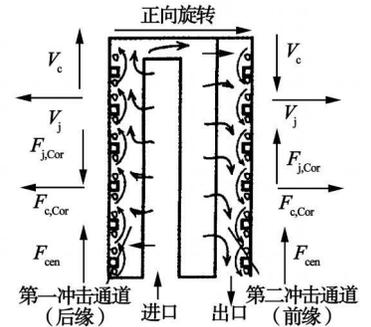


图6 旋转冲击通道中流动和旋转力简图

4 通道截面对旋转传热的影响

以上阐述的是正方形通道的研究结果,为了考察旋转对不同通道截面的传热影响,Durr等人采用双流程三角形通道,研究了光滑壁面和带肋片壁面在不同模型角时的传热分布^[20~21]。研究发现,第一流程中,由于三角形通道中流体因旋转而形成二次流的空间减小,因此三角形通道努塞尔数比大多是在正方形通道所属的上下限之间;在第二流程中,与正方形通道相比,三角形通道前缘具有较高的努塞尔数比,比正方形通道增加了近120%。

采用围绕自身轴旋转双流程通道的方法改变了三角形通道的模型取向,如图7所示。对于模型取向 Δ 第一流程后缘壁面和第二流程前缘壁面的努塞尔数比随着旋转数的增大而增大,与静止叶片相比,小旋转数时,侧壁的

传热有所增强。对于模型取向 B 有肋片通道的传热在小旋转数时随着旋转数的增加而增加, 在大旋转数时随着旋转数的增加而减小。这些现象的发生是由于旋转诱发的二次流加大了气流间掺混和扰动的结果。

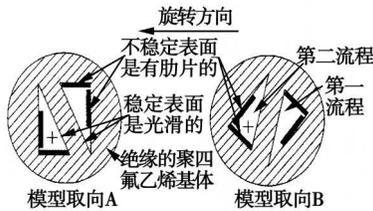


图 7 Dutta 等人所采用的两个模型取向

5 旋转对扰流柱通道流动及换热的影响

在燃气涡轮叶片的尾缘部分, 由于通道狭窄, 冷却方式有限, 短扰流柱排是一种有效的强化换热手段, 冷气在叶片尾缘处从叶片底部流入到叶片内的扰流柱冷却通道, 一部分气流沿径向流出, 另一部分从弦向流出。短扰流柱排可增强冷气扰动, 从而加强了端壁的换热。因此, 研究旋转状态下扰流柱通道的流场结构及换热特性具有重要的意义。

王学文等人对在旋转状态下有弦向出流的梯形扰流柱通道内的三维流场进行了模拟^[22], 重点研究了在固定出流比的情况下, 不同转速对扰流柱通道内的流动情况及端壁平均换热系数的影响。计算结果表明, 在旋转数不为零时, 通道内的流场与静止时相比有较大变化, 在扰流柱区域内的扰动强度明显增大, 流动紊乱, 在扰流柱区域有涡旋现象发生; 当雷诺数一定时, 通道的压降和端壁的平均换热系数随着旋转

数的增大而增加。

6 旋转状态下内部冷却和气膜冷却的相互影响

在实际涡轮叶片的内部冷却通道里, 带有气膜孔的壁面往往是带肋的, 以增大对流换热。而带肋后由于肋的扰动和形成的二次流会对气膜孔的出流产生一定的影响, 并且气膜孔的布置也不是单一的, 因此, 后面气膜孔的出流情况和前面的气膜孔会有所不同, 所以, 对涡轮叶片内部冷却的研究, 应该考虑有肋和气膜孔出流同时存在的情况。和静止叶片相比, 工作叶片旋转时受到的哥氏力和离心力的作用会使内部冷却通道的流场变得非常复杂, 改变了气流进入气膜孔的状态, 结果必然会导致气膜孔流量系数的变化, 所以研究旋转效应对内冷通道流场和气膜孔流量系数的影响规律, 对涡轮叶片冷气量的计算及冷却结构设计具有非常重要的意义。

目前, 国内外在这方面的研究还不多见。李广超等人对带 90°肋和气膜孔出流的旋转矩形通道内的三维流场进行了数值模拟^[23]。研究发现, 带肋和气膜孔出流的旋转内冷通道的流场非常复杂, 具有很强的三维特性。当旋转数不等于零时, 旋转效应对气膜孔流量系数有明显的影响, 通道顺时针旋转时, 哥氏力由上壁面指向带气膜孔的下壁面, 引起流量系数增加; 通道逆时针旋转时, 情况相反。另外, 在通道内同一径向位置处的两个气膜孔的流量系数是不同的, 通道顺时针旋转时, 左侧孔的流量系数大于右侧孔的流量系数, 通道逆时针旋转时, 情况相反。

7 结束语

分析了在旋转状态下的国内外燃气涡轮叶片内部冷却的研究现状和发展趋势。从近几年燃气涡轮工作叶片内部冷却研究的发展情况来看, 研究工作主要集中在旋转扰流式肋片冷却介质通道传热的研究和旋转对前缘冲击冷却的影响等方面。通过分析确定今后涡轮工作叶片内冷通道的优化设计应侧重于以下几个方面:

(1) 在旋转情况下, 研究新的冷却结构, 比如肋的结构、肋的布置、通道截面形状等, 以进一步优化内流通道结构, 从而降低叶片的温度, 对叶片进行有效地保护。

(2) 实际发动机涡轮工作叶片的尾缘区是旋转的梯形通道, 因此, 今后的另一个研究重点是关于旋转对梯形扰流柱通道流动和换热的影响。

(3) 为了优化冷却效果, 目前涡轮工作叶片普遍采用内部冷却和气膜冷却相结合的复合冷却技术, 以保证涡轮运转的可靠性。在旋转状态下, 内部流动与外部气膜冷却相互影响, 这二者之间的关系在国内外文献中少有报道, 两者之间的影响情况, 影响程度需要进一步研究和深入理解, 以更真实的模拟涡轮叶片的工作情况, 从而更为有效地对叶片进行冷却, 最终提高发动机的整体性能。

参考文献:

- [1] CHEAH S C, LACOVIDES H, JACKSON D C et al. LDA investigation of the flow development through rotating U-ducts. *J. ASME Journal of Turbo-machinery* 1996 118 590-595
- [2] TSE D G N, MCGRATH D B. A com-

bined experimental/computational study of flow in turbine blade cooling passage Part 1: experimental study [R]. ASME Paper95-GT-355 1995

[3] LIU T M, CHEN C C. LDV study of developing flows through a smooth duct with a 180 deg straight corner turn [J]. ASME Journal of Turbomachinery 1999, 121: 167-174

[4] BONS J P, KERREBROCK J L. Complementary velocity and heat transfer measurements in a rotating cooling passage with smooth walls [R]. ASME Paper98-GT-464 1998

[5] WAGNER J H, JOHNSON B V, KOPPER E C. Heat transfer in rotating serpentine passages with smooth walls [J]. ASME Journal of Turbomachinery 1991, 113: 321-330.

[6] 邓宏武, 陶 智, 徐国强, 等. 旋转蛇形通道内换热的非稳态实验 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(9): 1004-1008

[7] 刘传凯, 陶 智, 丁水汀, 等. 旋转对光滑 U形通道内换热的影响研究 [J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 512-517

[8] HAN J E, CHIN DUTTA SAND P, EKKAD SRINATH 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

[9] LACOVDESH J, JACKSON D C, JIH et al. LDA study of the flow development through an orthogonally rotating U-bend of strong curvature and rib roughened walls [J]. ASME Journal of Turbomachinery 1998, 120: 386-391

[10] TSE D G, N SIEUBER G D. Flow in a rotating square serpentine coolant passage with skewed trips [R]. ASME Paper97-GT-529 1997.

[11] ZHANG Y M, HAN J C, PARSONS J A et al. Surface heating effect on local heat transfer in a rotating two-pass square channel with 60 angled rib turbulators [J]. ASME Journal of Turbomachinery 1995, 117: 272-278

[12] WAGNER J H, JOHNSON B V, GRAZIANI R A et al. Heat transfer in rotating serpentine passages with trips normal to the flow [J]. ASME Journal of Turbomachinery 1992, 114: 847-857.

[13] 刘传凯, 陶 智, 丁水汀, 等. 旋转光滑及带肋 U形通道的局部换热特性 [J]. 航空学报, 2006, 27(5): 751-755.

[14] 朱进容, 吴 宏, 陶 智, 等. 旋转状态下涡轮叶片前缘的流动与换热 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(2): 261-264

[15] 朱进容, 吴 宏. 涡轮叶片前缘冲击气膜复合冷却的数值研究 [J]. 湖北工业大学学报, 2006, 21(1): 50-53

[16] 徐 磊, 常海萍, 潘金栋. 旋转条件下带出流孔的受限空间内冲击换热 [J]. 推进技术, 2008, 29(2): 149-152

[17] PARSONS J A, HAN J C. Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with heated target walls and radially outward cross flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 1998, 41: 2059-2071

[18] AKELLA K V, HAN J C. Impingement cooling in rotating two-pass rectangular channels [J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer 1998, 12(4): 582-588

[19] AKELLA K V, HAN J C. Impingement cooling in rotating two-pass rectangular channels with ribbed walls [J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer 1999, 13(3): 364-371

[20] DUTTA S, ANDREW S M, J HAN J C. On the simulation of turbulent heat transfer in a rotating duct [J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer 1995, 9(2): 381-382

[21] DUTTA S, HAN J C, LEE C P. Local heat transfer in a rotating two-pass ribbed triangular duct with vorticity orientations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 1996, 39(4): 707-715

[22] 王学文, 朱惠人, 张 丽. 旋转对梯形扰流柱通道流动及换热的影响 [J]. 汽轮机技术, 2006, 48(5): 346-349

[23] 李广超, 朱惠人, 郭 涛. 旋转对内冷通道气膜孔流量系数的影响 [J]. 推进技术, 2006, 27(5): 394-398

(编辑 辉)

新技术、新工艺

有余热锅炉的蒸燃联合装置与蒸汽回注式燃气轮机装置经济性的比较

据《Тяжелое машиностроение》2009年7月号报道, 现在带有余热锅炉的 ПГУ (蒸燃联合装置) 是最有前途的动力装置, 它的效率达到 55% ~60%; 与此相比, 锅炉—汽轮机装置的效率不超过 38% ~42%。

将具有余热锅炉的蒸燃联合装置与蒸汽回注式 (STIG) 燃气轮机装置的经济性进行比较, 得到了能够对二者进行经济性比较的计算方程式。

计算表明, 带有余热锅炉的蒸燃联合装置比蒸汽回注式燃气轮机装置的经济性高 10% ~12%。

(吉桂明 摘译)

旋转状态下燃气涡轮叶片内部冷却的研究进展 = Recent Advances in the Study of Inner Cooling of Gas Turbine Blades in a Rotating State [刊, 汉] / DAIPing (College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, China, Post Code: 266061), LN Feng (CSC (China Shipbuilding Industrial Corporation), Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 363 ~ 368

In modern high-performance gas turbine engines with gas temperatures before turbines ever increasing, the rotating turbine blade cooling problem has received growing and unremitting attention. Among numerous cooling technologies, the inner cooling enjoys a conspicuous edge and relatively brilliant prospects for engineering applications. A survey of recent research results concerning the gas turbine blade inner cooling technologies in the rotating state was given. Summarized were the recent research findings regarding the influence of smooth wall surface rotation on the flow field and heat transfer, the influence of rotation on impingement cooling as well as the heat transfer of cooling media in the passages formed by turbulent rotation-flow type ribs. The advances in the study of the mutual influence of inner and air film cooling in a rotating state were described. Finally, it should be noted that the further optimization of inner flow passage structures, the influence of the rotation on the flow and heat transfer in the turbulent flow column passages and the in-depth exploration of the mechanism governing the mutual influence of inner flow and external air film cooling will be the focal point of future studies. Key words: gas turbine; cooling blade; inner flow; cooling; convection; heat transfer; rib; rotation

医疗废物热解焚烧处理研究 = A Survey of Medical Waste Pyrolysis and Incineration Treatment [刊, 汉] / MENG Qingmin, CHEN Xiaoping (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 369 ~ 373

Nowadays, the study on medical waste pyrolysis and incineration technologies is mainly focused on the aspect of thermodynamics, including an analysis of the pyrolysis process and influencing factors, as well as the establishment of a dynamic model with an even higher precision. From such aspects as physicochemical characteristics of medical wastes, dynamic characteristics of reactions in the pyrolysis and incineration process, miniature test scale study and numerical simulation etc., described were the recent advances in the study of medical waste pyrolysis and incineration treatment technologies. It should also be noted that the law governing the influence of material characteristics and pyrolysis and incineration conditions obtained from a fixed bed test stand on the above process in a relatively large quantity of materials and establishment of a material bed layer model involving a single particle model will be the problems to be solved further in future studies. Key words: medical waste; pyrolysis; incineration; physicochemical characteristics; numerical model

天然气长输管道燃压机组的机型选择及配置 = Machine Type Selection and Configuration for the Gas Turbine/compressor Unit of a Natural Gas Long-distance Transmission Pipeline [刊, 汉] / GAO Shunhua (China Petroleum West & East Gas Transmission Pipeline Company, Shanghai, China, Post Code: 200122), CHEN Renhui (China Petroleum Tarim Oil Field Sub-company, China, Post Code:) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 374 ~ 376

During the construction of a natural gas long-distance transmission pipeline, gas turbine type selection for a gas turbine/compressor unit and rational configuration of the number of units are very important. The current status of the units in the gas turbine-driven stations of the west & east gas transmission front line project was described. The "1+1" and "2+0" or "2+1" configuration methods of 38 light type gas turbines having a unit power output of about 30 MW were analyzed and the existing problems pointed out. The analytic results show that under the condi-