

DOI: 10.7652/xjtuxb201303020

布置球窝的 U 型冷却通道传热性能研究

申仲畅, 谢永慧, 张荻

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用数值模拟方法研究了球窝结构对 U 型通道传热和阻力特性的影响, U 型通道的一侧布置了球窝结构;采用 SST $k-\omega$ 和大涡模拟(LES)湍流模型,对不同 Re 下的球窝强化传热性能进行了分析。结果表明:U 型通道中第 2 列通道传热系数明显大于第 1 列通道,180°转弯角附近存在明显的二次流现象且传热系数较高;球窝结构的引入能明显强化 U 型通道的传热性能,球窝表面的平均 Nu 沿着流动方向逐渐减小,经过 180°转弯角后急剧增大,球窝结构强化传热带来的压力损失非常小,几乎与光滑通道相当;RANS 方法计算出的球窝表面 Nu 要大于 LES 方法的时均结果,相比 LES 方法,RANS 方法判断的球窝腔内再附点更加靠近上游。

关键词: 球窝;U 型通道;大涡模拟;传热

中图分类号: V211.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0108-06

Heat Transfer Performance of U-Shaped Coolant Channel with Dimple Structure

SHEN Zhongyang, XIE Yonghui, ZHANG Di

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

Abstract: Numerical investigations were conducted to examine the heat transfer and friction performance of a U-shaped coolant channel with dimple structure on one surface of the channel. The SST $k-\omega$ turbulence model and the large eddy simulation (LES) were both adopted in the calculation to analyze the effect of dimple structure on the heat transfer performance at different Reynolds numbers. The results indicate that the heat transfer coefficient for the second row line in the U channel is much higher than that for the first row line, and the secondary flow exists near the 180° bend and the heat transfer rate is higher. Dimple structure can enhance the heat transfer process on the channel surface considerably. In the flow direction, the average Nu of the dimple surface decreases gradually, and it increases dramatically after the bend. Moreover, the pressure loss caused by dimple structure is small, almost approaching that of smooth channels. The Nu calculated by the SST model is slightly higher than that by the LES method, and the reattachment position obtained by the RANS method occurs earlier than that by the LES method.

Keywords: dimple; U-shaped channel; large eddy simulation; heat transfer

燃气透平是重要的热动力机械,其工作温度高,透平热负荷的逐渐增大,对内部冷却通道的换热能力所以叶片内部需要布置大量的冷却通道。随着燃气力的要求也越来越高,同时还需兼顾阻力损失,因此

收稿日期: 2012-07-19。 作者简介: 申仲畅(1991—),男,博士生;谢永慧(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 西安交通大学基本科研业务费资助项目(xjj20100127)。

网络出版时间: 2012-12-10 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121210.1008.005.html>

开发燃气透平叶片的高效冷却通道非常关键。球窝结构是近些年被广泛关注的一种强化传热技术,具有大传热系数、小阻力损失等特性。在国外,相关研究包括平板上浅球窝的传热特性和压力损失特性的研究^[1],球窝内瞬态和时均涡结构的实验研究^[2],叉排球窝的传热与阻力特性的实验研究^[3];在国内,相关研究包括阵列球窝、钉状翅片以及两者共同布置的传热阻力性能的实验研究^[4],布置球窝的微通道传热性能研究^[5],球窝、球凸结构对旋转直通道传热性能影响的研究^[6]。

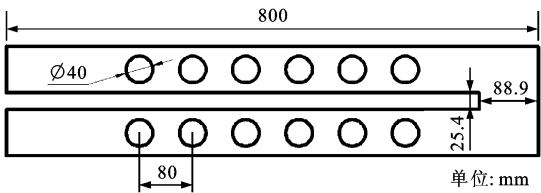
实际的燃气透平叶片冷却通道中 U 型通道更为常见,U 型通道中的 180°转角对换热性能影响较大,所以相关研究涉及到带肋 U 型通道的流动及传热特性的研究^[7],抽吸作用对 U 型通道传热特性影响的分析^[8]。

综上,球窝的传热性能研究大多是在直通道中进行的,在 U 型通道中传热性能研究很少见,通道转角对球窝传热影响的研究并不充分。因此,本文以某 U 型通道为基准,采用数值模拟的方法研究了球窝结构对通道流动传热性能的影响,并在数值模拟中采用雷诺时均及大涡模拟(LES)的方法进行了分析,以期对未来新型冷却通道的设计及数值分析提供参考。

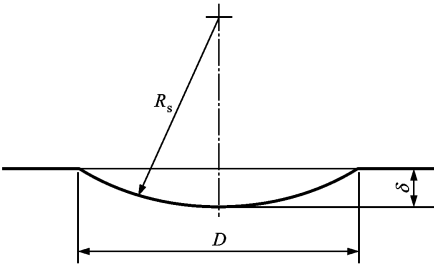
1 冷却通道模型

以 GE 研究中心公开的带有翅片的冷却通道顶部换热性能研究^[9]为参考,构建了相同尺寸的 U 型通道数值模型,并将此模型作为研究的基准模型。在基准 U 型通道的 2 列各布置了 6 排球窝,球窝及通道尺寸如图 1 所示,球窝结构的相对深度 δ/D 为 0.2。

通道计算区域采用结构化网格,球窝表面采用 O 型网格,其他区域采用 H 型网格,流动壁面及球窝局部进行了网格加密,以确保计算域所有位置的表面网格 $Y^+ < 1$ 。对光滑及球窝通道的模型在 RANS 方法下进行了网格无关性验证,验证中以下壁面整体平均 Nu 和距离进口第 4 排球窝表面平均 Nu 为参考变量,以验证值变量不超过 0.1% 为原则,来确定最后球窝通道的网格数分别为 380 万,并在后期不同数值方法的研究中均选用此无关性网格数量。球窝通道的三维结构如图 2 所示,网格无关性验证结果见表 1。



(a)U 型通道及球窝尺寸



(b)球窝截面

图 1 带有球窝的 U 型通道尺寸及参数

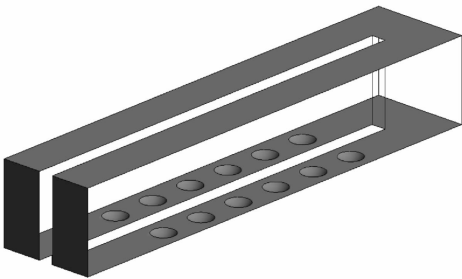


图 2 带有球窝的 U 型通道三维结构

表 1 $Re=50\ 000$ 时网格无关性验证结果及相对于 490 万网格的平均 $Nu(\bar{Nu})$ 的误差 δ

网格数 / 10^4	壁面 $\bar{Nu}$	壁面 δ /%	第 4 排球窝 $\bar{Nu}$	球窝 δ /%
120	1.597	2.240	1.492	2.680
210	1.576	0.900	1.468	1.030
380	1.563	0.064	1.454	0.069
490	1.562	0.000	1.453	0.000

2 数值方法

本研究采用空气作为流动工质,数值计算采用商用计算流体力学软件 ANSYS CFX 来求解三维稳态 RANS 方程,常规求解采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行。为了获得更加精确的流场和换热过程,还需采用大涡模拟方法进行详细计算。由大涡模拟方法直接求解大尺度涡,由亚格子 Smagorinsky 应力模

型模拟小尺度涡。

计算边界条件如下: Re 分别为 12 500、25 000、50 000、100 000,通道入口为速度边界,速度大小由水力直径和 Re 决定,即

$$Re = \frac{\rho U_{in} D_h}{\mu}$$

(1)

式中: U_{in} 为入口速度; D_h 为入口截面水力直径。

通道入口湍流度为 5%,工质温度为 300 K,出口背压为 0 Pa,上下壁面为热边界,热流量为 650 W/m²,其余壁面为绝热无滑移壁面。计算时动量及能量方程残差为 10⁻⁶,同时壁面温度监测点波动不超过 0.1%。大涡模拟计算中采用了预先模拟的方法,即入口段之前添加流动段,使其自然形成一定的湍流度,以模拟入口的湍流状态。作者在已有研究中^[6]验证了球窝的流动传热过程模拟的合理性。

3 计算结果与分析

3.1 定常结果

U 型通道在 180°转角附近存在着非常复杂的流动,图 3 为光滑通道中转角附近的流体流线($Re=50\ 000$)。流体在第 1 排通道中未发生偏移,流体进入转角区域后在外侧局部较大范围内发生流动分

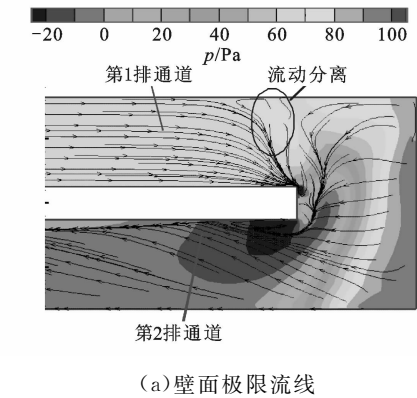
离,并在通道顶面附近冲击通道面,继而流体发生大角度偏转且进入第 2 排通道;流体进入第 2 排通道后受 180°转角处的冲击、偏转作用而产生离心力,从而导致流线在第 2 排通道处向内侧偏转。图 3b 为靠近壁面的 2%通道高度范围内的一簇流线轨迹。从图 3 看出,180°转角对流体造成了明显的扰动,流体在经过转角后向上偏移,出现了明显的二次流动特征。值得注意的是,流体经过大转角进入第 2 排通道后的湍动能较第 1 排时明显增大,湍动能的增大是流体经过偏转、冲击而导致扰动增大造成的,两排通道中流体湍动能的差异明显影响了通道的传热特性。

图 4、图 5 分别为光滑通道和球窝通道的换热面增强因子 Nu/Nu_0 分布,其中

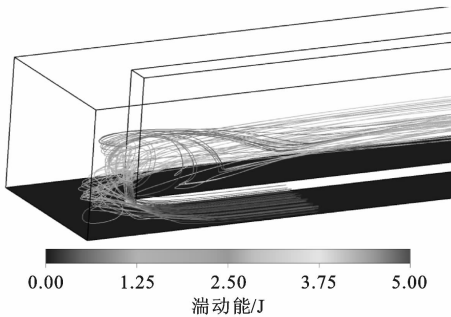
$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} = \frac{q_w}{T_w - T_f} \frac{D_h}{\lambda}$$

(2)

式中: q_w 为壁面的热流密度; T_w 和 T_f 分别为上、下壁面的温度和各段冷却气体的平均温度; λ 为冷却气体的导热系数; Nu_0 为对应雷诺数在光滑通道充分发展时的理论值。



(a) 壁面极限流线



(b) 转弯角附近三维流线

图 3 光滑通道转角附近流体流线

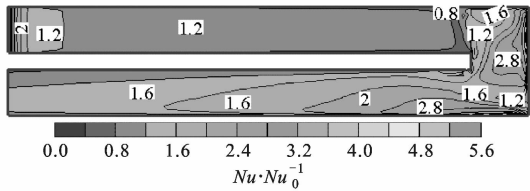


图 4 光滑通道 Nu/Nu_0 分布($Re=50\ 000$)

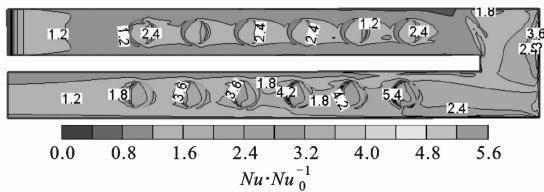


图 5 球窝通道 Nu/Nu_0 分布($Re=50\ 000$)

从图 5 可以得出,U 型通道的传热特性与直通通道有所不同,即:在 180°转角处流体冲击顶面并发生偏转,由于冲击,在 U 型通道顶面附近产生了强烈的二次流,此处流体扰动非常强烈,该区域附近的传热系数较大;经过转角后,第 2 排通道的传热系数大于第 1 排通道,尤其是在接近转角的小部分区域,传热系数增大尤为明显;流体经过转角进入第 2 排通道后受到了离心力的作用,U 型通道第 2 排的传热系数分布呈现出与第 1 排通道相同的接近对称的情况,外侧区域的传热系数大于内侧区域。对比光

滑通道和球窝通道发现,球窝通道的传热能力明显提升,传热增强的区域主要为球窝结构的覆盖区及其附近的尾迹区域,可见球窝区域的传热增强是由几何结构带来的特殊流动造成的。图 6 为第 1 排第 4 列球窝局部极限流线及 Nu/Nu_0 分布。

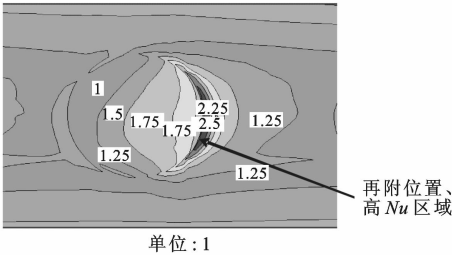
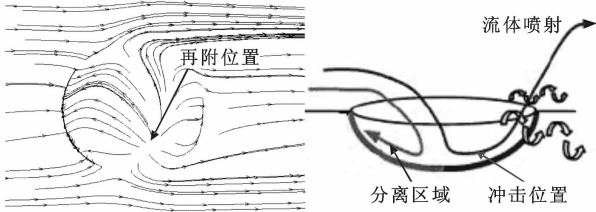


图 6 球窝局部极限流线及球窝附近 Nu/Nu_0 分布

从图 6b 给出的球窝结构附近的理论流动示意可见:在球窝前缘附近,流体受逆压梯度的作用而发生流动分离,在球窝的前半部分形成了分离区,球窝后部的逆压梯度逐渐减小;在球窝后部,流体对球窝进行再附冲击并以喷射状的结构离开球窝腔体,并在尾迹区域形成 2 道马蹄涡。

从图 6 还可以看出:球窝前部,由于存在一定的流动分离,所以传热系数较小;在球窝的下游尾迹区,由于脱落涡造成了扰动,所以该区域传热系数略大于球窝上游光滑壁面。图 7 为通道中各球窝表面的平均 Nu/Nu_0 分布,图 8 为光滑及球窝通道换热面 Nu/Nu_0 分布及通道范宁摩擦系数 f/f_0 ^[4] 分布,其中

$$f = -(\Delta p / 0.5 \rho u_i^2) (D_h / L) \tag{3}$$

从图 7 中可以看出,U 型通道中两排通道传热存在较大差异,本文中所有 Re 工况下,第 1 列通道中球窝表面的平均 Nu/Nu_0 沿流向基本不变,经过 180° 转角后,流体湍动能的急剧增大及流体对前两排球窝的冲击,使得第 2 列通道中的第 1 排球窝 Nu 迅速增大,之后 Nu 沿流向明显下降。整体而言,第 2 列通道中的球窝表面平均 Nu/Nu_0 远大于第 1 列。从图 8 可以看出:球窝结构的引入使得通道换

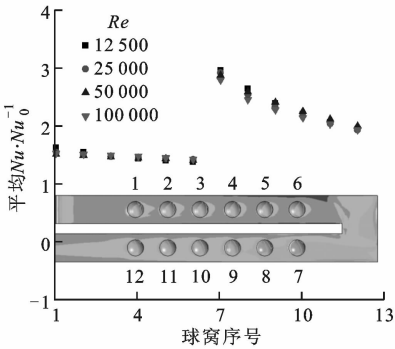


图 7 通道中各球窝表面的平均 Nu/Nu_0 分布

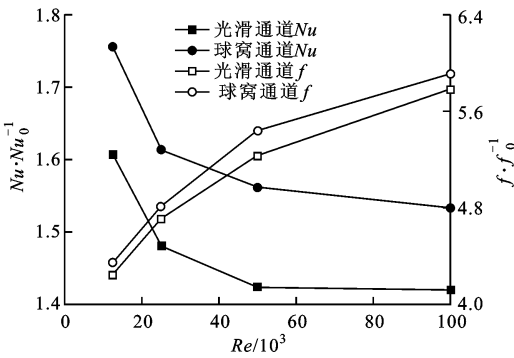


图 8 光滑及球窝通道换热面 Nu/Nu_0 及 f/f_0 分布

热面 Nu/Nu_0 明显提高,球窝的强化传热效果明显增强,同时 Re 对球窝的传热强化影响较大;随着 Re 的增加,通道的 Nu/Nu_0 下降,说明 Re 在 $10\,000 \sim 100\,000$ 的范围内, Re 增加削弱了强化传热的能力。从图 8 还可以看出, Re 的增加使得光滑及球窝通道的阻力损失增大,球窝通道的阻力损失和光滑通道的差别不大,表明相对于强化传热,球窝结构带来的阻力损失非常小,此特性也正是球窝结构强化传热的最大优势。著名学者 Ligrani 曾通过热性能指标来分析球窝和肋片的传热性能,得出球窝通道在不同的工况下具有和肋片相当甚至高于肋片的热性能^[10],其主要原因是球窝强化传热造成的阻力损失非常小。

3.2 大涡模拟时均结果

大涡模拟能较为精确地模拟通道或球窝附近的复杂流动,因此本文进行了大涡模拟分析,并对大涡模拟和定常计算结果进行了对比。图 9 为分别采用 RANS 和大涡模拟方法计算获得的光滑和球窝通道 Nu/Nu_0 分布。从图 9 可以看出,采用大涡模拟和 RANS 方法得出的通道 Nu/Nu_0 分布大体相同,即:在通道的第 1 列、第 2 列的绝大多数区域,RANS 方法计算出的 Nu 普遍略大于大涡模拟方

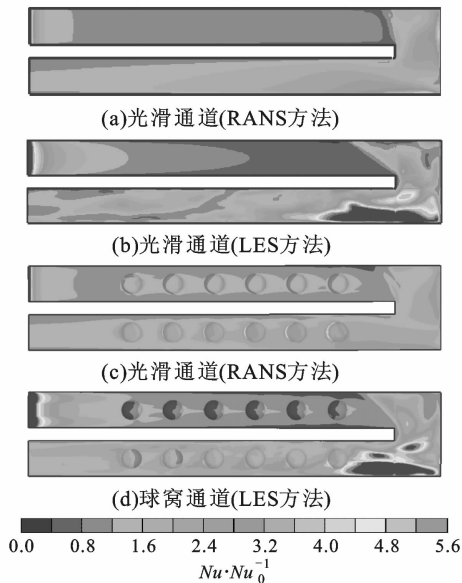


图 9 2 种方法获得的光滑和球窝通道 Nu/Nu_0 分布

法,整体趋势和分布基本相似;在通道转角处的下游小部分区域,大涡模拟方法的计算结果明显大于 RANS 方法,说明 RANS 方法对于 180° 转角位置的传热模拟与大涡模拟方法存在较大差异。原因是,大涡模拟方法对大尺度涡采用直接求解,对小尺度涡采用亚格子模型模拟,所以大涡模拟方法能捕捉到小尺度的涡结构,从而得到与 RANS 不同的流动状态。图 10 为 2 种方法在球窝附近的法向截面二次流特性。从图 10 可以看出,大涡模拟方法既可求解小尺度涡旋,又可求解大尺度涡旋。

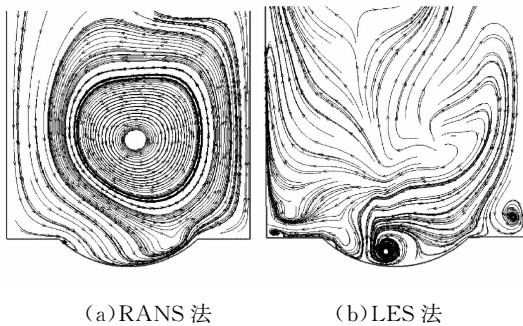


图 10 2 种方法在球窝附近的法向截面二次流特性

图 11 为通道中第 1 列、第 2 列球窝附近的中心线上的 Nu/Nu_0 分布。从图 11 可以看出,U 型通道中球窝附近的 Nu/Nu_0 具有以下特点:①球窝前缘附近的 Nu 较小,后缘附近的 Nu 较大,再附的驻点处球窝表面 Nu 达到局部峰值,各球窝附近的 Nu 分布呈相似性,每一列球窝表面 Nu 沿流动方向逐渐减小;②经过 180° 转角后的第 2 列球窝表面 Nu

明显大于第 1 列,沿着流动方向 Nu 逐渐减小;③大涡模拟和 RANS 方法得出的 Nu 分布规律相同,但 RANS 方法的 Nu 略大于大涡模拟方法,同时大涡模拟方法判断的球窝表面流动再附点要比 RANS 方法预测点更靠近下游,因此大涡模拟方法强化传热系数小于 RANS 方法。

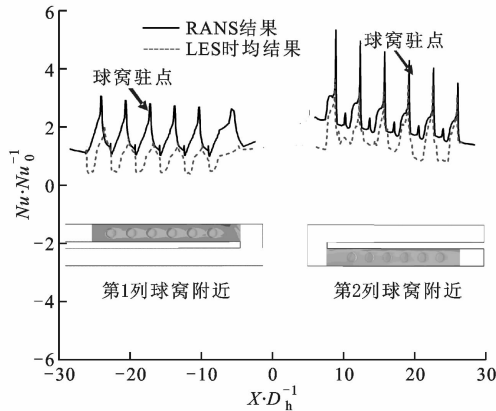


图 11 通道中球窝附近的中心线上的 Nu/Nu_0 分布

4 结 论

本文采用 RANS 和大涡模拟方法对布置球窝结构的 U 型通道传热及阻力性能进行了研究,得出的主要结论如下。

(1)U 型通道中第 2 列通道传热系数明显大于第 1 列,且在 180° 转角附近存在复杂的流动分离、再附、偏转等特性,并伴随着明显的二次流,此区域传热系数较大。

(2)球窝结构的引入明显强化了 U 型通道的传热性能,在球窝前缘逆压梯度的作用下,流体形成了分离涡,并在球窝后部冲击再附,继而高速涌出球窝腔。球窝表面的平均 Nu/Nu_0 沿着流动方向逐渐减小,经过 180° 转角后急剧增大,第 2 列通道中球窝表面平均 Nu/Nu_0 明显大于第 1 列。随着 Re 的增加,通道换热面 Nu/Nu_0 逐渐减小,球窝结构强化传热带来的压力损失非常小,几乎与光滑通道的相当,可见球窝结构是一种小流阻的高效强化传热结构。

(3)RANS 与大涡模拟方法得出的 Nu 分布规律基本相同,RANS 方法计算出的球窝表面 Nu 大于大涡模拟方法,RANS 方法判断的球窝腔内再附点位置比大涡模拟方法更靠近上游,大涡模拟方法计算出转角附近的 Nu 明显大于 RANS 方法。总而言之,相比大涡模拟方法,RANS 方法计算出的球窝结构的强化传热能力更大。

参考文献:

- [1] AFANASYEV V N, CHUDNOVSKY Y P, LEONTIEV A I, et al. Turbulent flow friction and heat transfer characteristics for spherical cavities on a flat plate [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1993, 7 (1): 1-8.
- [2] LIGRANI P M, HARRISON J L, MAHMMOD G I, et al. Flow structure due to dimple depressions on a channel surface [J]. *Physics of Fluid*, 2001, 13 (11): 3442-3451.
- [3] MAHMOOD G I, SABBAGH M Z, LIGRANI P M. Heat transfer in a channel with dimples and protrusions on opposite walls [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2001, 15(3): 275-283.
- [4] RAO Y, WAN C Y, ZANG S S. Comparisons of flow friction and heat transfer performance in rectangular channels with pin fin-dimple, pin fin and dimple arrays, GT2010-22442 [R]. New York, USA: ASME, 2010: 1-11.
- [5] 蓝吉兵, 谢永慧, 张荻. 微通道中球窝球凸强化传热特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(7): 89-94.
- LAN Jibin, XIE Yonghui, ZHANG Di. Heat transfer enhancement in micro-channel with dimples and protrusions [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(7): 89-94.
- [6] 申仲畅, 谢永慧, 张荻, 等. 不同球窝/凸结构的旋转矩形通道传热及阻力特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(7): 89-94.
- SHEN Zhongyang, XIE Yonghui, ZHANG Di, et al. Heat transfer and flow friction performance of rotating rectangular channels with different dimple/protrusion structures [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(11): 52-57.
- [7] HAN J C. Recent studies in turbine blade cooling [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2004, 10 (6): 443-457.
- [8] SCHULER M, ZEHNDER F, WEIGAND B, et al. The effect of side wall mass extraction on pressure loss and heat transfer of a ribbed rectangular two-pass internal cooling channel [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(2): 1-11.
- [9] BUNKER R S. The augmentation of internal blade tip-cap cooling by arrays of shaped pins [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2008, 130(1): 1-8.
- [10] MAHMOOD G I, LIGRANI P M, CHEN K. Variable property and temperature ratio effects on Nusselt numbers in a rectangular channel with 45 deg angled rib turbulators [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2003, 125(1): 769-778.

(编辑 苗凌)

(上接第 79 页)

- [22] MEDASANI S, KIM J, KRISHNAPURAM R. Overview of membership function generation techniques for pattern recognition [J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1998, 19(3/4): 391-417.
- [23] CAPPELLE B, KERRE E E. On a possibilistic approach to reliability theory [C]// *Proceedings of 2nd International Symposium on Uncertainty Analysis*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 415-418.
- [24] 戎翔, 左洪福, 张海军. 视情维修策略下的民航发动机拆换时间预测研究 [J]. *机械科学与技术*, 2008, 27 (5): 583-587.
- RONG Xiang, ZUO Hongfu, ZHANG Haijun. On prediction of removal time for commercial aero-engines using condition based maintenance strategy [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008, 27(5): 583-587.

(编辑 管咏梅)