

DOI: 10.7652/xjtuxb201303021

短周期风洞上动叶表面压力和换热测量

李红才, 朱惠人, 任战鹏, 许都纯

(西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安)

摘要: 采用短周期冷态传热风洞研究了某型放大动叶表面静压及换热系数分布, 实验中雷诺数和叶栅压比范围涵盖了叶片的典型工作状态。结果表明: 压比是影响表面压力系数的主要因素, 雷诺数的影响可以忽略; 雷诺数和压比都会影响表面换热系数和绝热壁温, 随着雷诺数的增大, 叶片表面换热系数增加, 吸力面转捩点前移, 大雷诺数的换热系数分布趋势有别于小雷诺数; 保持主流总温不变, 随着叶栅压比的增大或雷诺数的减小, 绝热壁温降低, 小雷诺数下绝热壁温实验值低于平板的理论计算值。

关键词: 短周期风洞; 表面压力系数; 表面换热系数; 雷诺数; 叶栅压比

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0114-06

Pressure and Heat Transfer Measurements for Blade Surface in Short-Duration Wind Tunnel

LI Hongcai, ZHU Huiren, REN Zhanpeng, XU Duchun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Surface pressure and heat transfer measurements for an enlarged blade were conducted in a short-duration cold heat transfer wind tunnel at representative Reynolds numbers and pressure ratios. The results suggest that the blade pressure ratio is the main factor affecting the pressure coefficient distribution, while the effect of the Reynolds number can be neglected. The Reynolds number and pressure ratio both contribute to the heat transfer coefficient and local adiabatic wall temperature. With the increase in Reynolds numbers, the surface heat transfer coefficients increase and the transition point of the suction side moves upward, showing that the heat transfer coefficients distribution at larger Reynolds numbers is different from that at smaller Reynolds numbers. The local adiabatic wall temperature decreases with an increase in the pressure ratio or the decrease in the Reynolds number at constant main stream total temperature. Additionally, the experiment data for the local adiabatic wall temperature are smaller than the analytical solution for flat plates at small Reynolds numbers.

Keywords: short-duration wind tunnel; surface pressure coefficient; surface heat transfer coefficient; Reynolds number; blade pressure ratio

高速风洞叶片换热实验对涡轮叶片设计具有重要的作用。对于无气膜冷却的叶片, 近些年国外的研究重点是为数值计算模型的验证和改进提供数据

支持, 包括高压涡轮级导叶、动叶不同展向位置及端壁、叶尖的换热测量^[1], 旋转涡轮级上 3 个不同展向位置和端壁上的气动、换热测量及数值对比^[2], 一级

收稿日期: 2012-06-20。 作者简介: 李红才(1981—), 男, 博士生; 朱惠人(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB707701)。

网络出版时间: 2013-01-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130118.1449.001.html>

半涡轮不同展向位置完整的压力和换热数据测量^[3],带端壁一级半涡轮等一系列的换热测量^[4]。国内在上述方面的实验很少,最早的高速状态下涡轮叶片换热实验是在激波风洞上进行的^[5],之后又在短周期涡轮实验台上对机匣表面换热测量进行了初步尝试^[6]。本文是在西北工业大学的短周期跨音速叶栅传热风洞中,对某型涡轮工作叶片的表面压力和换热系数进行了详细的实验研究。

1 实验装置及方法

实验在短周期跨音速叶栅传热风洞中进行,图 1 为风洞实验原理示意。高压气源容积为 140 m³,最高设计压力为 1 MPa。为了保证小雷诺数的实验,蝶阀下游装有由 16 根可单独开关的喷管组成的引射器,同时用大开角扩散段和稳压舱来保证实验段气流的均匀性,用节流阀、蝶阀和引射器来调节实验的状态,用调压阀来维持实验状态的稳定性,用快速阀来控制实验的开始和结束,用电动阀来保证运行安全。实验中主要参数如下:有效工作时间大于 5 s,基于叶栅弦长的进口雷诺数为 1.0×10⁵~16.0×10⁵,出口马赫数为 0~1.6,流量为 0.5~20.0 kg/s。

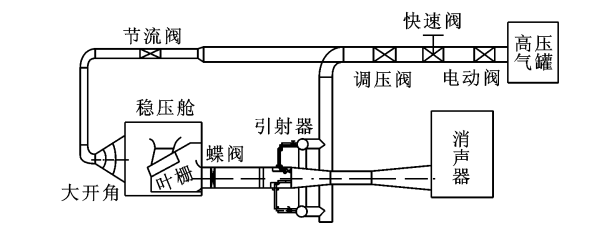


图 1 短周期跨音速叶栅传热风洞实验原理示意

实验段截面为矩形,尺寸为 700 mm×120 mm;叶栅由 8 个直叶片组成,中间 2 个用于实验。本文研究的动叶弦长为 99.1 mm,栅距为 87.5 mm,叶型进气角为 55°,出气角为 30.5°。测量静压时钢制叶片表面共有 32 个直径为 0.5 mm 的静压孔(压力面 15 个,吸力面 17 个),叶片静压孔照片如图 2 所示。测量换热时在环氧树脂叶片表面共布置了 32 个热电

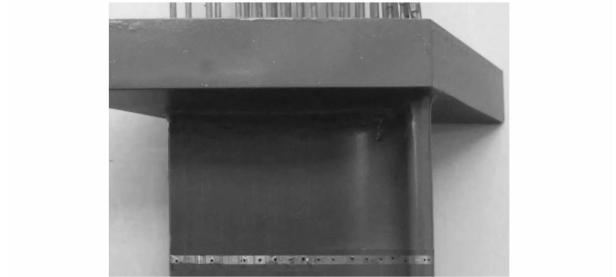


图 2 实验叶片静压孔照片

偶(压力面 15 个,吸力面 17 个),叶片热电偶照片如图 3 所示。测量主流总温的热电偶直径为 0.1 mm。

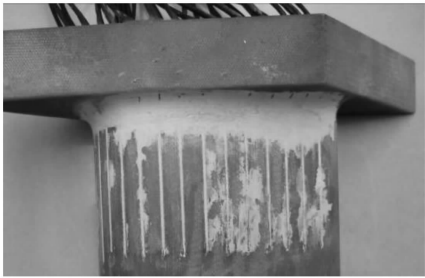


图 3 实验叶片热电偶照片

换热实验采用反向热流法,实验前叶片用加热气流加热,待叶片温度均匀后进行实验。

叶片表面静压测量用美国 Esterline 公司的 Netscanner 9816/98RK 压力扫描阀,采样频率为 100 Hz。热电偶输出的电压信号通过测试系统放大和调理后送入计算机,采样频率为 10 kHz。

2 实验工况与数据处理

2.1 实验工况

根据叶栅进口雷诺数和叶栅压比来调节实验状态,即

$$Re = \rho_1 V_1 L / \mu_1 \tag{1}$$

$$p_r = p_{1t} / p_2 \tag{2}$$

式中: ρ_1 、 V_1 、 μ_1 分别为叶栅进口的气流密度、速度和动力黏性系数; L 为叶栅弦长; p_{1t} 为叶栅进口总压; p_2 为叶栅出口静压。

实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况

p_r		条件选取					
1.03	✓						
1.10	✓	✓	✓	✓	✓		
1.20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
1.40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
1.60		✓	✓	✓	✓	✓	
1.75		✓	✓	✓	✓	✓	
$Re/10^5$	2	3	4	6	8	10	

图 4 为典型风洞的压力曲线。实验段气流在 3 s 时达到稳定状态,并持续约 5 s,所以表面静压是稳态的,但是环氧树脂叶片的导热未达到稳定状态,因此表面换热测量采用瞬态进行。

2.2 压力数据处理

叶片表面静压由表面压力系数描述,即

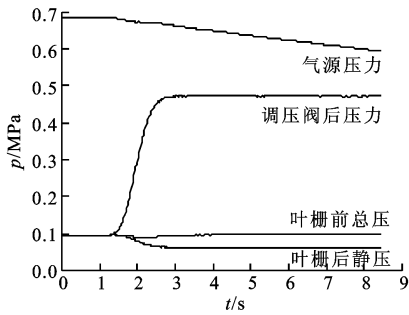


图 4 典型风洞的压力曲线

$$C_p = \frac{(p - p_{1t})}{(p_{1t} - p_1)} \tag{3}$$

式中: p 为叶片表面静压; p_{1t} 为叶栅进口静压。

2.3 换热数据处理

瞬态换热数据处理基于的是一维半无限大导热假设,微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial q}{\partial x} \tag{4}$$

式中: λ 、 ρ 、 c 分别为材料的导热系数、密度和比热容; q 表示热流密度。叶片表面内法线方向为 x 轴正向,叶片表面为坐标原点,边界条件为

$$\begin{aligned} t = 0, \quad x > 0, \quad T(x, 0) &= T_0 \\ t > 0, \quad x = 0, \quad T(0, t) &= T_w(t) \\ t > 0, \quad x \rightarrow +\infty, \quad q(x, t) &= 0 \end{aligned}$$

将式(4)应用于叶片表面,叶片材料按常物性处理时,式(4)为一线性时不变系统。把 $T_w(t)$ 和 $q_w(t)$ 分别看作输入和输出, $q_w(t)$ 等于 $T_w(t)$ 与系统脉冲响应函数的卷积,当 $T_w(t)$ 和 $q_w(t)$ 均为离散信号时,则有

$$q_w[n] = h[n] * T_w[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[n-k] T_w[k] \tag{5}$$

该方法称为脉冲响应法,相关信息参考文献[7]。

定义指向壁面为热流的正方向,则

$$q_w = H(T_{gr} - T_w) \tag{6}$$

式中: T_{gr} 为主流的绝热壁温。 T_{gr} 与来流总温 T_g 的关系为^[8]

$$\frac{T_{gr}}{T_g} = r + \frac{1-r}{1+Ma^2(k-1)/2} \tag{7}$$

式中: k 为空气比热比; Ma 为当地自由流马赫数; r 为恢复系数。比值 T_{gr}/T_g 与流动状态相关,对于一个给定的气动状态,每个热电偶测点位置的 T_{gr}/T_g 均为常数。式(6)除以 T_g 得

$$- \frac{q_w}{T_g} = H \frac{T_w}{T_g} - H \frac{T_{gr}}{T_g} \tag{8}$$

实验中各测点数据需要整理,以 $-q_w/T_g$ 为因变量,以 T_w/T_g 为自变量,对数据点做线性拟合,拟合直线的斜率就是表面换热系数 H ,直线在横轴上的截距就是 T_{gr}/T_g 。为了减小实验误差,对于给定的工况需要进行 2 次实验,2 次实验中主流温度均为常温,叶片初始温度在第 1 次实验中为室温,在第 2 次实验中比室温高 50 K 左右,工况参数取 2 次实验的平均值。

2.4 实验误差

各参数相对误差如表 2 所示。

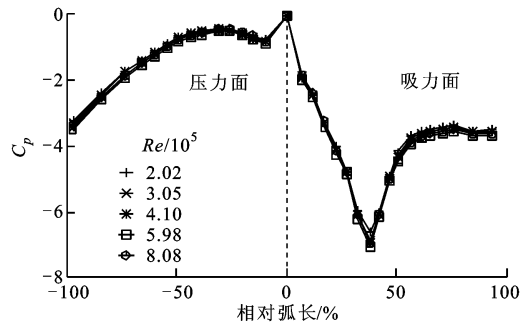
表 2 实验参数相对误差

参数	Re	p_r	C_p	H	T_{gr}/T_g
相对误差/%	1.9	3.2	3.3	2.0	0.2

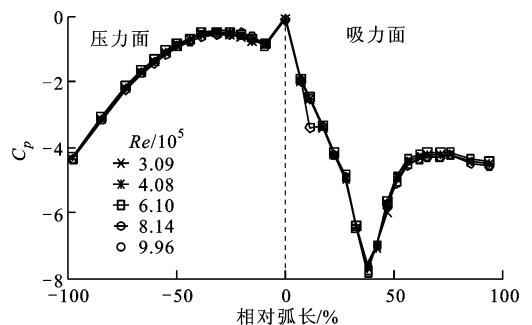
3 实验结果

3.1 压力测量结果

图 5 为 $p_r=1.10, 1.75$ 时不同雷诺数下实验叶片表面压力系数的测量结果,可以看出图中参数与表 1 略有差别,这是由于表 1 参数是名义工况参数,图中参数是实际工况参数,二者存在偏差的缘故。



(a) $p_r = 1.10$



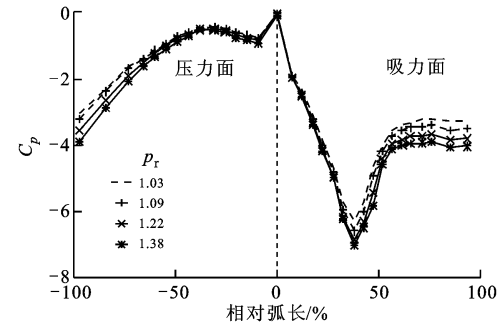
(b) $p_r = 1.75$

图 5 雷诺数对压力系数的影响

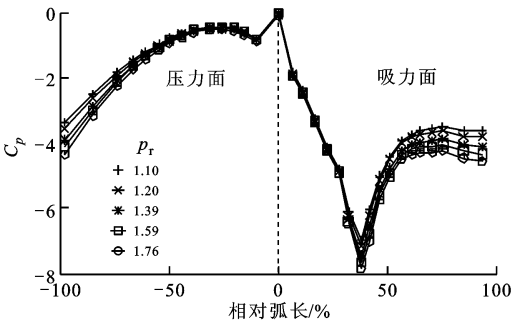
从图 5 可以看出:排除个别点偶然的大误差因素以外,相同压比下不同雷诺数工况的叶片表面压力系数分布是重合的,即雷诺数未影响压力系数的

分布;压力面侧,压力系数在驻点下游短暂下降,之后出现先升后降的趋势,在 30% 相对弧长处达到极大值;吸力面侧,压力系数在驻点到 40% 相对弧长之间呈快速下降的趋势,在 40%~60% 相对弧长之间呈先快速上升后缓慢下降的趋势,这预示着吸力面中部可能存在分离区。

图 6 为雷诺数分别为 2.0×10^5 、 8.0×10^5 时不同压比下叶片表面压力系数的测量结果。图 6a 中 $p_r=1.03$ 对应着叶栅出口等熵马赫数为 0.02,此时可将气流作为不可压流处理。从图 6 可以看出,当压比增大时,压力面和吸力面侧的压力系数均有下降的趋势,越靠近尾缘,压力系数下降得越多。不同压比下叶片表面压力系数的差异说明,对于本文研究的动叶叶型,在不可压流状态下测量压力系数存在着一定的偏差。



(a) $Re=2.0 \times 10^5$



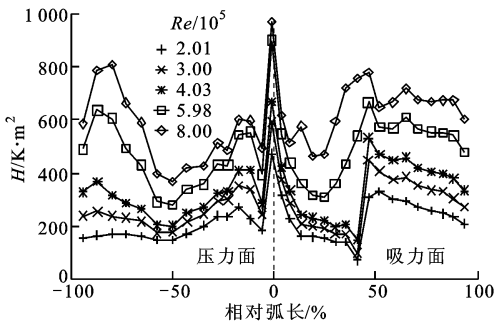
(b) $Re=8.0 \times 10^5$

图 6 压比对压力系数的影响

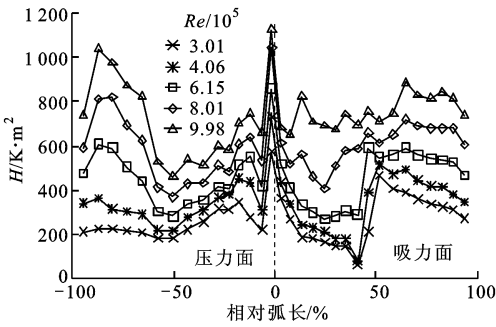
3.2 换热测量结果

图 7 为 $p_r=1.10, 1.75$ 时不同雷诺数下实验叶片表面换热系数的测量结果。从图 7 可以看出,换热系数的最高点出现在前缘驻点处,雷诺数增大时,叶片表面换热系数随之增加,该换热系数沿叶片表面的分布趋势也有所变化。

压力面侧,换热系数从驻点处迅速降低,但很快又上升,结合图 5 可以发现:压力面相对弧长小于



(a) $p_r=1.10$



(b) $p_r=1.75$

图 7 雷诺数对换热系数的影响

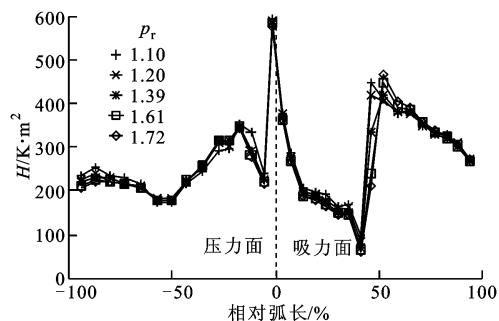
10% 的区域存在较强的顺压梯度,主流增速较快,从而导致换热系数增大;压力系数在 30% 相对弧长处开始下降,在 10%~50% 相对弧长区域变化比较缓慢,这一区域边界层增厚,从而导致换热系数减小;压力系数在相对弧长大于 50% 的区域加速下降,换热系数增大,大雷诺数下该区域换热系数增速加大,这可能是边界层由层流向湍流转变引起的;换热系数在接近压力面尾缘的区域有所下降,大雷诺数下该换热系数迅速降低,这可能是流动再层流化所致。

不同雷诺数下吸力面前半段换热系数分布存在明显差异,3 个雷诺数较小的状态在相对弧长小于 40% 的区域,换热系数持续降低,然后突然上升,说明此弧长处边界层发生分离,之后流体重新附着壁面,分离后边界层较薄,所以换热系数很大。在雷诺数分别为 8.0×10^5 、 10.0×10^5 时,换热系数从驻点开始下降,在约 30% 相对弧长处开始上升,说明边界层可能发生了从层流到湍流的转变,雷诺数为 10.0×10^5 时的换热系数最低点比雷诺数为 8.0×10^5 时提前。

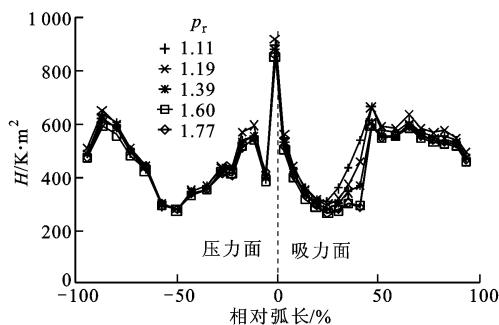
当压力系数分布基本相同时,2 个大雷诺数下的 40% 相对弧长处未出现换热系数突变的情况,说明大雷诺数下边界层不易分离。在吸力面后半段,压力系数变化比较平缓,因此边界层逐渐加厚,换热

系数呈现不断下降的趋势。

图8为雷诺数分别为 3.0×10^5 、 6.0×10^5 时不同压比下实验叶片表面换热系数的测量结果。从图8可以看出,压比对压力面换热系数分布影响很小,吸力面侧在雷诺数为 3.0×10^5 时的40%~50%相对弧长区域,或者雷诺数为 6.0×10^5 时的25%~50%相对弧长区域,压比增大,换热系数减小。



(a) $Re = 3.0 \times 10^5$



(b) $Re = 6.0 \times 10^5$

图8 压比对换热系数的影响

图9为雷诺数为 3.0×10^5 时不同压比下叶片表面 T_{gr}/T_g 的测量结果。从图9可以看出,随着压比的增大, T_{gr}/T_g 逐渐减小,这可以从式(7)得到解释。式(7)中自由流马赫数计算式如下

$$Ma = \left(\frac{2}{k-1} \left(\left(\frac{p_{1t}}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right)^{1/2} \quad (9)$$

若认为恢复系数近似不变,当叶栅压比增大时,同一测点的 p_{1t}/p 增大,等熵马赫数增大,所以 T_{gr}/T_g 减小。

式(7)中的恢复系数与流体流动状态和普朗特数 Pr 有关,文献[9]给出了平板上恢复系数的理论分析结果,即层流时 $r = Pr^{1/2}$,湍流时 $r = Pr^{1/3}$ 。

图10为 $p_r = 1.75$ 时不同雷诺数下实验叶片表面 T_{gr}/T_g 的测量结果及相应条件下的静压测量结果。从图10可以看出,不同雷诺数下 T_{gr}/T_g 的差异主要出现在吸力面的30%~50%相对弧长区域,

该区域通常是边界层流动从层流向湍流过渡的区域,这种差异预示着不同雷诺数下区域的边界层流动状态存在一定差别。在排除实验误差的情况下,小雷诺数下实验值比平板计算值低很多。

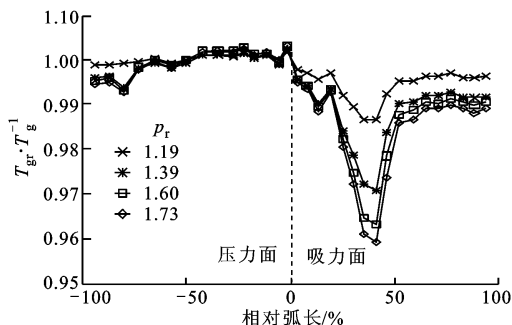


图9 压比对 T_{gr}/T_g 的影响

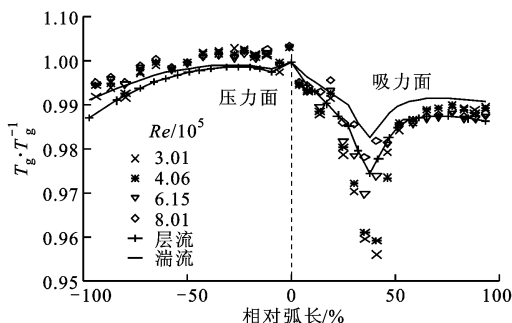


图10 雷诺数对 T_{gr}/T_g 的影响

4 结论

(1)用短周期叶栅传热风洞对某涡轮动叶进行了表面静压和换热测量,以此研究了进口雷诺数和叶栅压比的影响,实验状态涵盖了典型叶片的工作状态。

(2)影响叶片表面压力系数的主要因素是叶栅压比,雷诺数的影响可以忽略。当叶栅压比在较大范围内变化时,压力面和吸力面后半段的压力系数存在一定的差异,为了获得准确数据,应在真实压比下进行叶片表面压力系数测量。

(3)换热系数主要受雷诺数的影响,当叶栅压比增大时,吸力面压力系数最低点(40%相对弧长处)附近区域的换热系数有所降低,其他区域受压比的影响很小。

(4) T_{gr}/T_g 测量结果表明, T_{gr}/T_g 随叶栅压比的增大而减小,在吸力面30%~50%相对弧长区域, T_{gr}/T_g 随雷诺数的增大而增大,小雷诺数状态下该区域 T_{gr}/T_g 的测量值明显小于平板层流状态的理论计算值。

参考文献:

- [1] HALDEMAN C W, DUNN M G. Heat transfer measurements and predictions for the vane and blade of a rotating high-pressure turbine stage [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. New York, USA: ASME, 2003: 591-600.
- [2] BERGHOLZ R F, DUNN M G, STEUBER G D. Rotor/stator heat transfer measurements and CFD predictions for short-duration turbine rig tests, 2000-GT-208 [R]. New York, USA: ASME, 2000.
- [3] HALDEMAN C W, DUNN M G, BARTER J W, et al. Aerodynamic and heat-flux measurements with predictions on a modern one and 1/2 stage high pressure transonic turbine [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2004. New York, USA: ASME, 2004: 439-450.
- [4] TALLMAN J A, HALDEMAN C W, DUNN M G, et al. Heat transfer measurements and predictions for a modern, high-pressure, transonic turbine, including endwalls [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2006. New York, USA: ASME, 2006: 721-737.
- [5] 李静美, 赵润民, 王吉南. 用短周期风洞进行涡轮叶片传热实验初探 [J]. 航空动力学报, 1987, 2(2): 18-22.
- LI Jingmei, ZHAO Runmin, WANG Jinan. Turbine blade surface heat transfer measurements in short-duration facility [J]. Journal of Aerospace Power, 1987, 2(2): 18-22.
- [6] 周勇, 赵晓路, 徐建中. 短周期实验台涡轮机匣换热实时测量初探 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 208-302.
- ZHOU Yong, ZHAO Xiaolu, XU Jianzhong. Time-resolved heat transfer measurements on turbine outer endwall in a blow-down transient test facility [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 208-302.
- [7] OLDFIELD M L G. Impulse response processing of transient heat transfer gauge signals [J]. ASME Journal of Turbomach, 2008, 130(2): 021023.
- [8] GIEL P W, BUNKER R S, FOSSEN G J V, et al. Heat transfer measurements and predictions on a power generation gas turbine blade, 2000-GT-0209 [R]. New York, USA: ASME, 2000.
- [9] 朱谷君. 工程传热传质学 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.

(编辑 苗凌)

(上接第 89 页)

- SUN Junsheng, WU Chuansong. The influence of weld pool surface shape on the distribution of arc current density [J]. Metallurgica Sinica, 2000, 49(12): 2427-2432.
- [6] 贾昌申, 殷咸青, 贾涛, 等. 纵向磁场中的焊接电弧行为 [J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(4): 7-13.
- JIA Changshen, YIN Xianqing, JIA Tao, et al. The behavior of welding arc in longitudinal magnetic-field [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(4): 7-13.
- [7] 常云龙, 杨旭, 李大用, 等. 外加纵向磁场作用下的 TIG 焊接电弧 [J]. 焊接学报, 2010, 31(4): 49-52.
- CHANG Yunlong, YANG Xu, LI Dayong, et al. Arc shapes of TIG welding in a longitudinal magnetic field [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(4): 49-52.
- [8] OLSEN H N. Thermal and electrical properties of an argon plasma [J]. The Physics of Fluids, 1959, 2(6): 614-623.
- [9] FARMER A J D, HADDAD G N, CRAM L E. Temperature determinations in a free-burning arc: III Measurements with molten anodes [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1986, 19(9): 1723-1730.
- [10] HAIDAR J, FARMER A J D. Temperature measurement for high-current free-burning arcs in nitrogen [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1993, 26(8): 1224-1229.
- [11] DGHEIM J. Characterization of an argon plasma jet by the imagery method [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(8): 1650-1655.
- [12] PETERS J, HEBERLEIN J, LINDSAY J. Spectroscopic diagnostics in a highly constricted oxygen arc [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2007, 40(13): 3960-3971.
- [13] MA Shuiliang, GAO Hongming, ZHENG Senmu, et al. Spectroscopic measurement of temperatures in pulsed TIG welding arcs [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2011, 44(40): 405202-405213.

(编辑 葛赵青)