

DOI: 10.7652/xjtuxb201310014

透平叶片双工质冷却特性的实验研究

史晓军, 王维, 高建民, 徐亮, 董俊飞

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对双工质冷却叶片存在尾缘温度较高的问题,提出了一种带尾缘射流孔的双工质冷却叶片。在建立的 3 叶片叶栅热风洞实验平台上,实验研究了冷却介质进口参数对实验叶片表面温度和冷却效率分布的影响。结果表明:双工质综合冷却下,叶片尾缘温度大幅度下降,叶片表面温度分布较均匀;当冷却介质与主流燃气的温比 $T_c/T_g=0.65$ 、压比 $P_c/P_g=1.3$ 、流量比 $M_c/M_g=0.034$ 时,叶片尾缘和前缘区域冷却效率分别约为 50% 和 55%,中弦区域的冷却效率高达 67%;与冷却介质进口参数相比,冷却方式和冷却结构对提高叶片冷却效率更有效。

关键词: 燃气轮机;叶片冷却;冷却效率;传热

中图分类号: TK47 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)10-0081-06

Experimental Investigation on Cooling Performance of Binary Cooling Gas Turbine Vane

SHI Xiaojun, WANG Wei, GAO Jianmin, XU Linag, DONG Junfei

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new binary cooling vane with trailing edge ejection of cooling air was proposed to solve the problem of very high thermal load at the trailing edge of a binary cooling turbine vane. The influence of the coolant inlet parameters on the temperature and cooling effectiveness distribution on the experimental vane surface was investigated in the hot wind tunnel with a three-vane cascade. The experimental results show that the thermal load at trailing edge decreased and the surface temperature uniformity improved. When $T_c/T_g=0.65$, $P_c/P_g=1.3$, and $M_c/M_g=0.034$, the cooling effectiveness of the trailing edge region and leading edge region was 50% and 55%, respectively. The cooling effectiveness of the middle chord region was the highest and reached 67%. In addition, the cooling method and structure had more influence on the cooling effectiveness than the inlet conditions of the cooling fluids.

Keywords: gas turbine; blade cooling; cooling efficiency; heat transfer

随着燃气透平进口温度超过 1 500 ℃,以空气为冷却介质的传统叶片冷却技术存在冷却效率低、冷却剂耗量大等问题^[1]。为了突破传统叶片冷却技术的瓶颈,发展下一代高性能燃气轮机,将蒸汽和空气冷却相结合的高温涡轮叶片双工质冷却技术已成为重型燃气轮机冷却技术研究的重点和热点。文献

[2-3]分析了闭式蒸汽双工质冷却技术的优势以及对循环效率的贡献。上述研究表明,在相同的燃烧温度下,与空气冷却叶片相比,采用闭式循环蒸汽冷却叶片,冷却效率显著提高,联合循环电站效率可提高 1.5%。文献[4]采用数值模拟的方法研究了冷却工质蒸汽和空气的流量和流动方向对叶片双

收稿日期: 2013-01-17。 作者简介: 史晓军(1974—),男,讲师;徐亮(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276136);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120201120039)。

网络出版时间: 2013-06-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130604.1445.003.html>

工质冷却效率的影响。该叶片具有 5 个光滑内冷通道和尾缘鳍状孔结构,从前缘起,前 4 个内冷通道均采用闭式蒸汽对叶片进行冷却,最后 1 个内冷通道与鳍状孔连通,通入其中的冷却空气由尾缘喷射到叶栅主流中。Nomoto 等人实验研究了一种冷却结构简单的静叶,其冷却通道为数十个直圆孔,冷却介质为高压蒸汽^[1]。Bohn 等对具有相似冷却结构的叶片进行了数值分析和叶栅风洞实验^[5]。本课题组对一具有 5 个光滑内冷通道的蒸汽对流冷却静叶的内、外部耦合流动换热特性进行了研究,选用 γ -Re 转捩模型模拟了静叶表面的传热过程,并在高温涡轮叶栅风洞系统上进行了该静叶的冷效实验^[6]。上述文献的研究结果均表明,虽然叶片的主体冷却效率较高,但叶片尾缘未得到充分冷却,因而温度较高。

本文针对重型燃机双工质冷却叶片存在尾缘温度较高这一问题,提出了一个尾缘开有射流孔的新型双工质冷却叶片,实验研究了蒸汽和空气入口参数对此结构双工质冷却叶片换热和冷却效率的影响,以期为双工质叶片冷却技术的工程应用提供参考。

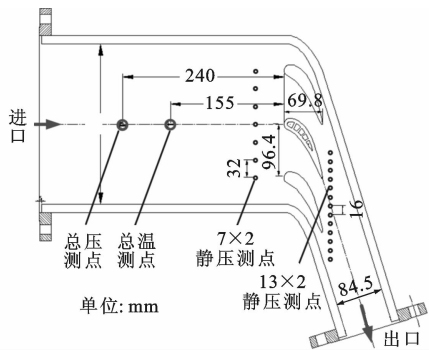
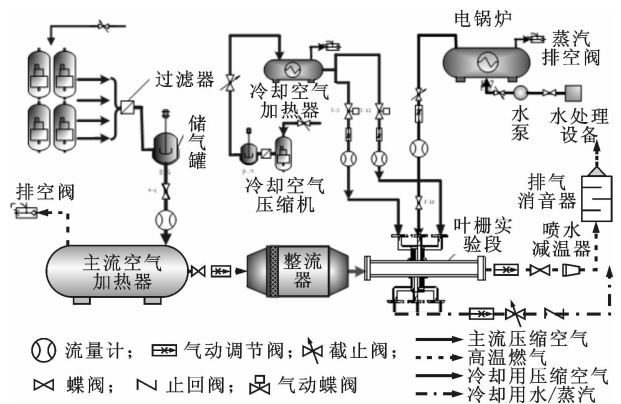
1 实验系统及设备

1.1 实验系统

实验装置为一热叶栅风洞系统,由主流空气子系统、冷却蒸汽子系统、冷却空气子系统、整流装置、叶栅实验段、排气子系统、控制系统和数据采集系统构成,如图 1 所示。4 台并联螺杆式压缩机提供流量为 $30\sim 150\text{ m}^3/\text{min}$ 、压力为 0.7 MPa 的压缩空气。压缩空气被主流空气加热装置加热成 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的高温空气,模拟实际燃气轮机的燃气。高温空气经进气整流装置进入实验段叶栅,其流量由一精度等级为 2.0 的多喉径孔板流量计测定。叶栅实验段入口和出口安装有气动调节阀,分别调节高温空气的流量和实验段出口背压。高温空气经减温器减温和排气整流装置扩压消音后排入大气。冷却蒸汽由一功率为 460 kW 的电锅炉产生,其流量、温度和压力由冷却蒸汽子系统调节。由一台 LU 型涡街流量计(量程为 $60\sim 600\text{ kg/h}$,精度等级为 2.0)测量蒸汽流量后,送入双工质实验叶片的蒸汽供气室。冷却空气由一台最大流量为 $10\text{ m}^3/\text{min}$ 螺杆式压缩机提供,温度由一最大功率为 33 kW 的空气加热器控制。冷却空气从加热器出来后进入两条管路,在这 2 条管路上分别装有调节气阀和精度等级为

2.0 的涡街流量计对流量进行调节和测量。这两路具有一定流量、温度和压力的冷却空气分别引入双工质实验叶片的 2 个空气供气室。蒸汽和空气冷却叶片后排入大气。为了减少热损失,所有设备及管路均包裹有 50 mm 厚的硅酸铝保温层。

实验段叶栅由 3 个直叶片、3 个通道构成,其中两侧的叶片为实心叶片,起导流作用,中间的叶片为具有冷却结构的实验叶片,叶片材料为 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 。叶栅栅距为 96.4 mm ,叶片弦长为 126 mm ,叶片高度为 83 mm ,进口角为 107° ,出口角为 17° 。在叶栅入口分别布置一精度为 0.5% 温度变送器和一总压探针,用于测量入口总温和入口总压,此外在叶栅入口和出口共布置 40 个静压测孔分别用于测量高温主流空气进出口压力。叶栅详细测点布置如图 2 所示。



1.2 实验叶片

针对双工质冷却叶片存在尾缘温度较高的问题,本文提出一带有尾缘射流孔的双工质冷却叶片。该叶片为将某涡轮叶片第一级静叶原型进行 0.5 倍模化的模型。叶片具有 4 个中空的冷却腔室,如图 3 所示,从叶片前缘数起分别为通道 1、2、3、4。其中通道 1 和通道 4 中通入冷却空气,而通道 2 和通道

3 中通入冷却蒸汽。实验叶片前缘压力面和吸力面分别布置有 2 排直径为 1.5 mm 的圆柱形气膜孔,孔轴向与叶片表面垂直。压力面每排有 14 个圆柱形气膜孔,间距为 5.6 mm,两排气膜孔与水平方向的夹角分别为 117°和 83.9°。吸力面每排有 24 个圆柱形气膜孔,间距为 3 mm,两排孔与水平方向的夹角分别为 49.8°和 2.4°。通道 2 和通道 3 的吸力面和压力面对应的内壁上各对称布置有 9 排间距为 8 mm 的横置 90°肋片,肋片宽高比为 1。文献[4]数值模拟的带尾缘鳍状孔叶片,其尾缘有 9 排截面尺寸为 1.2 mm×1.5 mm 的矩形方孔,而本文改进的双工质冷却叶片的尾缘开有 27 个直径为 1.6 mm 的射流圆孔,孔间距为 3 mm。孔的数量更多,排布更密,这样密的排布可以减少叶片表面纵向上的温度波动,使得温度分布更为均匀,但是也会带来叶片强度降低的问题。

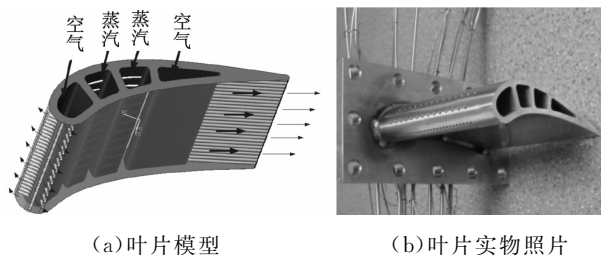


图 3 实验叶片

1.3 实验数据测量

在实验叶片截面(50%叶高截面)的表面上埋有 15 个不确定度为 0.5℃的 E 型铠装热电偶和 15 个直径为 1 mm 的引压管,分别用来测量叶片表面温度分布和叶片表面附近主流的静压分布,温度和压力测点间隔均匀布置,间距为 15 mm,如图 4 所示。所有热电偶均由 3850 型精密铂电阻温度计标定。压力由 NCS-PT105 II 智能绝压变送器(量程为 0~690 kPa、精度为 0.075%)和差压变送器(量程分别为 ±7.5 kPa、±37.4 kPa 和 186.8 kPa,精度为

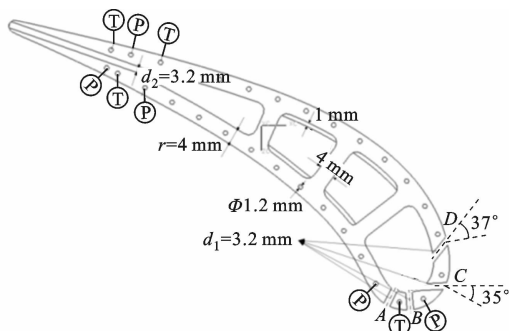


图 4 叶片中径处温度和压力测点分布

0.075%)测量。

实验工况参数由控制系统精确控制。实验工况稳定后,所有测量实验数据(主流空气、冷却蒸汽和冷却空气的流量、3 路冷却工质进出口压力和温度、叶栅进口总压和总温、叶栅进出口静压)均送入横河 MX100 数据采集系统,转换后送入计算机进行进一步处理。

1.4 实验数据处理

冷却效率的定义为

$$\epsilon = \frac{T_g - T_w}{T_g - T_c} \quad (1)$$

式中: ϵ 为冷却效率; T_g 为叶栅主流进口温度(K); T_w 为叶片壁面温度(K); T_c 为冷却工质进口温度(K)。

采用 Kline 和 McClintock 在文献[7]中提出的方法计算实验结果的误差,冷却效率的不确定度公式为

$$\frac{d\epsilon}{\epsilon} = \left(\left(\frac{dT_g}{T_g} \right)^2 + \left(\frac{dT_b}{T_b} \right)^2 + \left(\frac{dT_c}{T_c} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

取实验中的最坏情况分析,将 $\frac{dT_g}{T_g} = 0.5\%$ 、 $\frac{dT_b}{T_b} = 2\%$ 、 $\frac{dT_c}{T_c} = 2\%$ 代入式(2),得到冷却效率的不确定度 $\frac{d\epsilon}{\epsilon} = 2.87\%$ 。

2 实验结果及分析

在实验过程中,叶栅主流进口总温、总压分别为 633.15 K 和 188 kPa,通过调节叶栅进出口两个气动调节阀来调节叶栅出口雷诺数为 1.15×10^6 和出口马赫数为 0.91。

2.1 双工质冷却叶片表面温度场分布

实验中叶片各冷却通道的冷却介质不同,通道 1 和通道 4 中通入空气,通道 2 和通道 3 中通入蒸汽,各冷却通道的冷却介质进口温度和压力相同。实验测量了在不同冷却介质的进口压比 P_c/P_g (冷却介质进口静压与主流进口总压之比)、温比 T_c/T_g (冷却介质进口温度与主流进口温度之比)和流量比 M_c/M_g (冷却介质进口流量与主流单个叶栅流道的流量之比)下的叶片表面温度和冷却效率分布。

当 $P_c/P_g = 1.3$ 、 $M_c/M_g = 0.034$ 时,不同 T_c/T_g 下双工质冷却叶片 50% 叶高处叶片外表面温度分布如图 5 所示。从图上可以看到,双工质冷却叶片表面温度分布较为均匀,并且呈现周期性分布。温比波谷分别位于叶片的前缘、叶片中部和叶片尾缘。

这是由于前缘气膜冷却、叶片中部蒸汽对流冷却和尾缘射流冷却通道的间断排布造成的。与叶片无冷却相比,双工质冷却叶片表面在中弦区降低了 180 K,而尾缘区最多下降了 152 K。随着 T_c/T_g 的降低,叶片表面温度整体明显逐次降低, T_c/T_g 从 0.75 减小到 0.65,表面温度平均降低约 20 K。

当 $T_c/T_g=0.65$ 、 $M_c/M_g=0.034$ 时,不同 P_c/P_g 下双工质冷却叶片 50% 叶高处叶片外表面温度分布如图 6 所示。由图可见,叶片温度变化很小, P_c/P_g 从 1.03 增大到 1.3,叶片尾缘区域温度变化不明显。这可能是因为冷却空气随压力的增大,其在圆柱孔中的流量已达阈值。冷却空气在尾缘 27 个圆柱形孔通过对流换热降低叶片尾缘的温度。由于尾缘射流孔通道截面积不变,在亚声速下,速度变化对冷却空气流量变化起主导作用;在超声速下,密度变化对冷却空气流量变化起主导作用。流量在达到阈值以前,叶片内冷通道换热能力主要取决于流速,当流速达到临界值之后,换热能力主要取决于密度的变化。因此,当 P_c/P_g 从 1.03 增大到 1.3 时,叶片前缘温度下降不明显,尾缘温度几乎没有变化,说明此时圆柱形孔内冷却空气的流量已达阈值。将尾缘圆柱形喷射孔改变为收缩扩展孔,可进一步提高尾缘的换热能力。

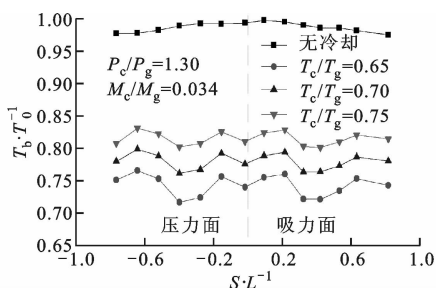


图 5 T_c/T_g 对双工质冷却叶片中截线处温度分布的影响

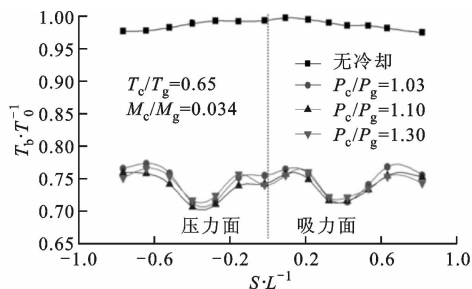


图 6 P_c/P_g 对双工质冷却叶片中截线处温度分布的影响

当 $T_c/T_g=0.65$ 、 $P_c/P_g=1.3$ 时,不同 M_c/M_g 下双工质冷却叶片 50% 叶高处叶片外表面温度分

布如图 7 所示。由图中可见,在 T_c/T_g 和 P_c/P_g 不变的情况下, M_c/M_g 从 0.017 增大到 0.034 时,只有叶片压力面和吸力面的中部得到了进一步的冷却,其温度分别降低了约 10 K,而叶片前缘和尾缘温度没有变化,说明增大蒸汽流量只强化了蒸汽冷却腔室的对流换热。

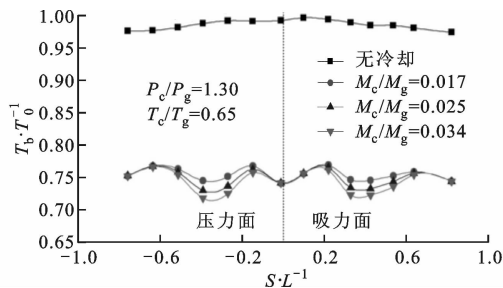


图 7 M_c/M_g 对双工质冷却叶片中截线处温度分布影响

2.2 双工质冷却叶片的冷却效率

图 8 描述了实验叶片冷却效率随 T_c/T_g 变化的分布。在冷却压比 $P_c/P_g=1.3$ 和流量比 $M_c/M_g=0.034$ 时,随冷却温比 T_c/T_g 的减小,叶片冷却效率提高,提高最大为 10%,最小为 3%。

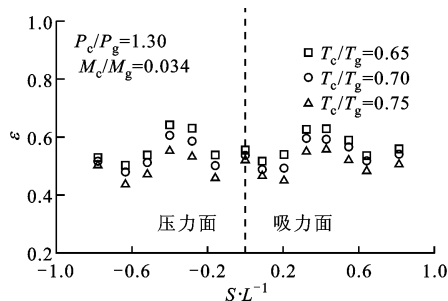


图 8 T_c/T_g 对冷却效率分布的影响

图 9 描述了实验叶片冷却效率随 P_c/P_g 变化的分布。当 $T_c/T_g=0.65$ 和 $M_c/M_g=0.034$ 时,随着 P_c/P_g 的增加,叶片冷却效率基本不变。这可能是因为冷却空气随压力的增加,在圆柱孔中的流量已达阈值。由图 9 可见,实验叶片压力面和吸力面

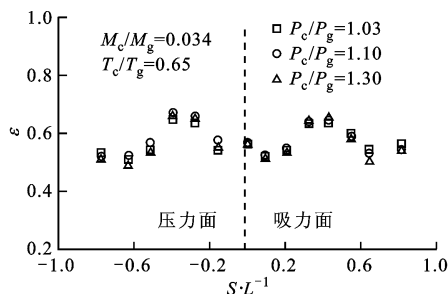


图 9 P_c/P_g 对冷却效率分布的影响

中弦区域的冷却效率最高,为 67%,尾缘附近的冷却效率为 50%,前缘区域冷却效率约为 55%。

图 10 描述了实验叶片冷却效率随蒸汽流量比 M_c/M_g 变化的分布。当 $T_c/T_g=0.65$ 和 $P_c/P_g=1.3$ 时,随着蒸汽流量比从 0.017 增大到 0.034,叶片压力面和吸力面中弦区域冷却效率增大,最大提高 8%。这是因为肋片引起冷却蒸汽流的分离和再附着,扰动热边界层导致传热系数的提高,蒸汽冷却腔室的努塞尔数也随着蒸汽雷诺数的增大而增大,使得叶片表面的温度大幅度下降,相对冷却效率升高。

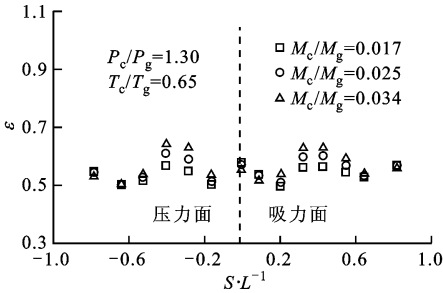


图 10 M_c/M_g 对冷却效率分布的影响

2.3 双工质冷却方式分析

当 $T_c/T_g=0.65$ 、 $P_c/P_g=1.3$ 时,实验测试了只有前缘气膜冷却、前缘气膜和中弦区蒸汽冷却组合、双工质综合冷却方式(前缘气膜冷却、蒸汽对流冷却和尾缘射流冷却组合)下叶片表面的温度和冷却效率分布,并与无冷却叶片进行了对比。测得的实验叶片中截面温度分布如图 11 所示。由图可见,只有前缘气膜冷却时,前缘温度下降比较明显,叶片中弦区域和尾缘区温度有所下降,但仍然较高,导致叶片前缘和中弦区域的温度梯度较大。加入蒸汽对流冷却后,中弦区域的温度迅速降低,但是尾缘温度降低不显著,因此尾缘和中弦区域的温度梯度较大。叶片采用双工质综合冷却后,尾缘温度大幅度下降,温度分布均匀性得到改善,有效地降低了叶片的温度梯度。

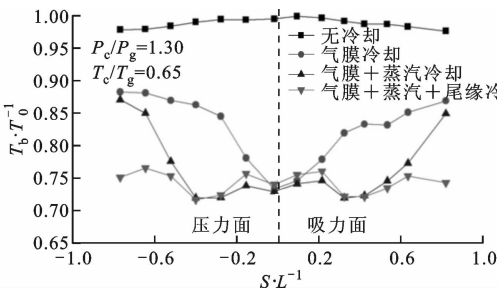


图 11 不同冷却方式下叶片表面温度分布

各冷却方式下实验叶片 50% 叶高处叶片表面温度对比如表 1 所示。双工质综合冷却叶片表面温度梯度相比于另外两种冷却方式的温度梯度小了近 67%。

表 1 不同冷却方式下的叶片表面温度

冷却方式	叶片表面最高温度 /K	叶片表面最低温度 /K	叶片表面最大温差 /K	与无冷却最大温差 /K
气膜冷却	552.0	461.0	91.0	170.0
气膜+蒸汽冷却	549.6	454.6	95.0	180.0
气膜+蒸汽+尾缘冷却	482.7	452.1	30.6	152.0

各冷却方式下实验叶片表面冷却效率分布如图 12 所示。由图可见,采用双工质综合冷却后,叶片冷却效率要比前缘气膜冷却高出很多,尤其是尾缘区域,冷却效率差值为 40% 左右,压力面中间区域差值为 43% 左右。最高冷却效率出现在蒸汽对流冷却腔室附近的叶片表面。这是由于蒸汽相对于空气具有更高的传热能力,单位体积蒸汽能传递更多的热量。此外,由肋片引起冷却蒸汽流的分离和再附着,扰动热边界层导致传热系数的提高,因此冷却效率高于前缘和尾缘冷却效率。

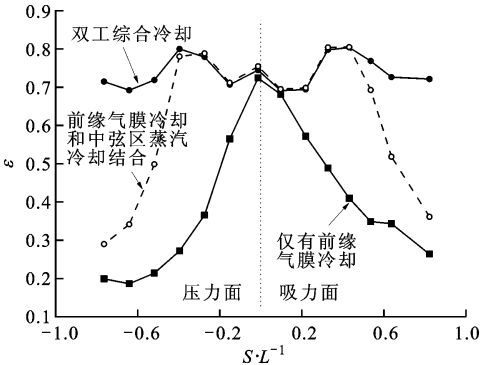


图 12 不同冷却方式下叶片冷却效率分布

3 结 论

本文在建立的导叶叶栅热风洞测量实验平台上,研究了冷却工质参数对双工质冷却叶片表面温度分布、冷却效率分布以及叶片表面换热效果的影响,并对 4 种冷却方式进行了对比,主要结论如下。

双工质综合冷却下,叶片尾缘温度大幅度下降,叶片表面温度分布更为均匀,温度梯度更小,大大减小了热应力。当 $T_c/T_g=0.65$ 、 $P_c/P_g=1.3$ 、 $M_c/$

$M_g=0.034$ 时,由于蒸汽相对于空气具有更高的传热能力以及蒸汽冷却腔室的肋片导致传热增强,压力面和吸力面中弦区域的冷却效率最高,为67%,尾缘附近也高达50%,前缘区域冷却效率约为55%。

对前缘气膜冷却、前缘气膜和中弦区蒸汽冷却组合,以及双工质综合冷却方式对比实验研究发现,与冷却方式对冷却效率的影响相比,冷却介质参数对冷却效率的影响较小,因此优化冷却方式和冷却结构对于提高冷却效率、降低叶片表面温度和温度梯度具有重要作用。

参考文献:

- [1] NOMOTO H, KONGA A, ITO S, et al. The advanced cooling technology for the 1 500 °C class gas turbine: steam-cooled vanes and air-cooled blades [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119: 624-632.
- [2] FACCHINI B, INNOCENTI L, CARNEVALE E. Evaluation and comparison of different blade cooling solutions to improve cooling efficiency and gas turbine performances [C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo 2001*. New York, USA: ASME, 2001: 1-10.
- [3] JORDAL K, TORISSON T. Comparison of gas turbine cooling with dry air, humidified air and steam [C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo 2000*. New York, USA: ASME, 2000: 1-8.
- [4] 徐亮, 税琳棋, 高建民, 等. 透平叶片双工质冷却流量和流向的优化配置 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(5): 7-12.
XU Liang, SHUI Linqi, GAI Jianmin, et al. Investigation on optimal allocation of mass flow and direction for binary cooling turbine test blades [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(5): 7-12.
- [5] BOHN D, WOLFF A, WOLFF M, et al. Experimental and numerical investigation of a steam-cooled vane [C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002: Heat Transfer, Manufacturing Materials and Metallurgy*. New York, USA: ASME, 2002: 477-484.
- [6] WANG Wei, GAO Jianmin, SHI Xiaojun, et al. Experimental study on comparison of cooling effectiveness between steam and air for a gas turbine nozzle guide vane [C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012*. New York, USA: ASME, 2012: 1-9.

- [7] KLINE S J, MCCLINTOCK F A. Describing uncertainties in single-sample experiments [J]. *Mechanical Engineering*, 1953, 75: 3-8.

[本刊相关文献链接]

- 孙皖, 马斌, 牛璐, 等. 低温透平膨胀机内平衡凝结两相流动的数值模拟. 2013, 47(7): 36-39. [doi: 10.7652/xjtuxb201307007]
- 李红才, 朱惠人, 任战鹏, 等. 短周期风洞上动叶表面压力和换热测量. 2013, 47(3): 114-119. [doi: 10.7652/xjtuxb201303021]
- 孙皓, 宋立明, 李军, 等. 小展弦比叶栅非轴对称端壁造型及气动性能的数值研究. 2012, 46(11): 6-11. [doi: 10.7652/xjtuxb201211002]
- 张宗卫, 朱惠人, 刘聪, 等. 全气膜冷却叶片表面换热系数和冷却效率研究. 2012, 46(7): 103-107. [doi: 10.7652/xjtuxb201207019]
- 潘家成, 徐亮, 高建民, 等. 轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响. 2012, 46(7): 1-6. [doi: 10.7652/xjtuxb201207001]
- 徐亮, 税琳棋, 高建民, 等. 透平叶片双工质冷却流量和流向的优化配置. 2012, 46(5): 7-12. [doi: 10.7652/xjtuxb201205002]
- 吴君, 张荻, 马丹丹, 等. 利用三维接触有限元法的透平叶片枞树型叶根轮廓优化. 2012, 46(5): 25-31. [doi: 10.7652/xjtuxb201205005]
- 叶冬挺, 张荻, 蓝吉兵, 等. 合成射流控制下低压高负荷透平叶片边界层分离大涡模拟. 2011, 45(3): 58-64. [doi: 10.7652/xjtuxb201103011]
- 刘小民, 周海洋, 王星, 等. 低压透平叶片表面合成射流非定常流动控制机理研究. 2011, 45(3): 95-101. [doi: 10.7652/xjtuxb201103018]
- 刘钊, 丰镇平, 宋立明. 实际叶片前缘冲击冷却流动和换热的数值研究. 2011, 45(1): 5-9. [doi: 10.7652/xjtuxb201101002]
- 钟杰, 郭成, 岳朋, 等. 43"汽轮机叶片材料热变形行为及制坯工艺参数优化. 2011, 45(1): 94-98. [doi: 10.7652/xjtuxb201101019]
- 刘小民, 周海洋. 低压透平叶片流动分离主动控制的数值研究. 2010, 44(9): 21-26. [doi: 10.7652/xjtuxb201009005]
- 蓝吉兵, 谢永慧, 张荻. 采用球窝控制边界层分离流动的大涡模拟. 2010, 44(9): 27-32. [doi: 10.7652/xjtuxb201009006]
- 孙皓, 薛志恒, 李军, 等. 低雷诺数对透平叶片间隙泄漏流动影响的研究. 2010, 44(3): 11-15. [doi: 10.7652/xjtuxb201003003]

(编辑 杜秀杰 荆树蓉)