

## 实际叶型前缘冲击冷却换热的 液晶显示实验研究

苑中显<sup>1</sup>, 阎小军<sup>2</sup>, 王秋旺<sup>1</sup>, 陶文铨<sup>1</sup>  
(1. 西安交通大学, 710049, 西安; 2. 美国南伊利诺伊大学)

**摘要:** 采用液晶显示技术, 对两种实际叶型的前缘凹面的模拟表面在大冲距范围内进行了射流冲击热实验, 并与半圆凹面的换热进行了比较. 研究表明, 在小冲击距时, 随着冲击面曲率的增大, 滞止区内的换热较之半圆面有所增强; 在实验参数范围内, 两实际叶型表面的  $Nu_s$  比半圆面约高 12%; 对于相对喷嘴间距为 2.27 的情况, 所研究的 3 种曲面的  $Nu_s$  随相对冲距的变化存在一个极值点; 对于相对喷嘴间距为 1.35 的情况, 未发现有极值点. 此外, 还给出了换热准则关系式.

**关键词:** 叶片; 射流冲击; 换热; 液晶显示

中国图书资料分类法分类号: TK124

### Liquid Crystal Thermography Applied to Jet Impingement Heat Transfer for Leading Edge of Blade

Yuan Zhongxian<sup>1</sup>, Yan Xiaojun<sup>2</sup>, Wang Qiawang<sup>1</sup>, Tao Wenquan<sup>1</sup>  
(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. South Illinois University, USA)

**Abstract:** Liquid crystal thermography is applied to examine the jet impingement heat transfer of concave surface simulating the turbine blade. The test results show that for small nozzle to plate spacing, the Nusselt number in the stagnation region increases with increasing curvature. The heat transfer is enhanced compared to that for a semi-circular surface. For the parameter range studied, the Nusselt number is larger than that of a semi-circular surface by 12%. When the relative nozzle spacing equals to 2.27, there exists a maximum for a plot of Nusselt number versus nozzle to plate spacing. Heat transfer correlations are obtained.

**Keywords:** blade; jet impingement; heat transfer; liquid crystal thermography

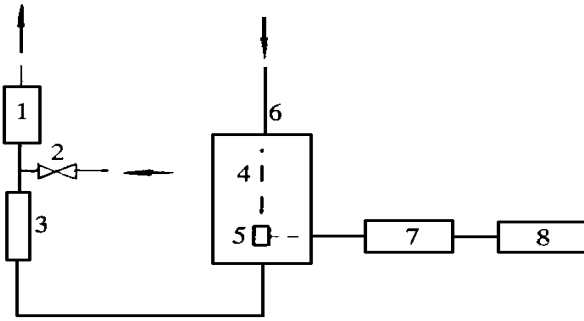
从已发表的文献来看, 燃气轮机叶片前缘的冲击冷却实验研究几乎全部采用半圆形凹面作为冲击靶<sup>[1,2]</sup>. 由于实际应用中的叶片前缘型线常与半圆面有明显差别, 故用半圆面冲击冷却实验结果来计

算一切实际叶片的传热, 其准确度难以确定. 为此, 本文对文献[3]和文献[4]所提供的两种实际叶型的前缘凹表面, 采用液晶显示技术, 在大冲距范围内进行了实验研究, 以探明实验表面与半圆表面在传

热特性上的差别程度.

## 1 实验系统

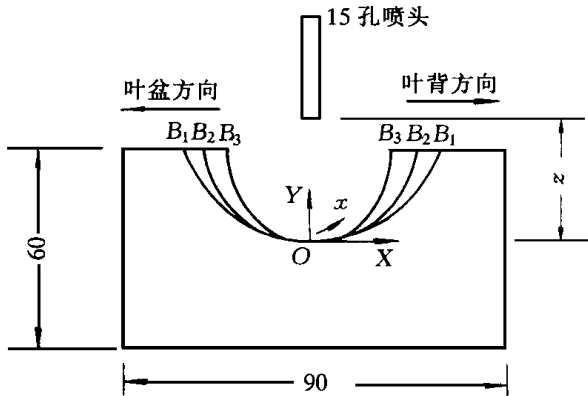
实验系统如图 1 所示. 在抽气机的抽吸下, 气流通过喷头在腔体内冲击实验靶, 然后经过浮子流量计排入大气. 其入口气流温度  $t_{\infty}$  由温度计随时读取. 实验靶面采用聚乙烯塑料层上真空沉淀金箔来加热, 加热膜经过功率表和直流稳压电源与 220 V 交流电源相接. 冲击靶体采用导热系数很低的白松木制作, 以降低导热损失.



1: 油气机; 2: 旁通阀; 3: 浮子流量计; 4: 负压腔体;  
5: 冲击靶; 6: 喷头; 7: 功率表; 8: 直流稳压电源

图 1 实验系统图

为了便于对比, 也对半圆表面进行了实验, 3 种表面型线的比较示于图 2 中. 其中,  $B_1$  为半圆表面;  $B_2$  和  $B_3$  为实际叶型表面, 分别来自于文献[3]和文献[4].  $B_2$ 、 $B_3$  表面的拟合公式分别见式(1)和式(2). 冲击靶的长度为 100 mm, 宽和高分别为 90 mm × 60 mm, 喷头的长度与冲击靶的长度相当, 厚度为 24 mm.



$B_1$ : 半圆面;  $B_2$ : 小曲率面;  $B_3$ : 大曲率面

图 2 3 种实验靶面的形状

$$B_2: Y = 7.91853 \times 10^{-7} X^5 + 2.93168 \times$$

$$10^{-5} X^4 - 5.64671 \times 10^{-4} X^3 + 0.01501 X^2 + 0.103813 X + 0.386743 \quad (1)$$

$$B_3: Y = -9.14911 \times 10^{-7} X^5 + 7.38781 \times 10^{-5} X^4 + 1.2652 \times 10^{-3} X^3 + 0.0533709 X^2 - 0.0621052 X - 0.375488 \quad (2)$$

本实验采用了 2 种喷头, 喷孔直径  $D_1 = 2.2$  mm 及  $D_2 = 3.7$  mm, 15 个喷孔组成一排, 孔间距  $C_n = 5$  mm, 形成准二维冲击冷却射流.

## 2 实验原理及实验工况

### 2.1 实验原理

液晶显示是近年来发展起来的一门测试技术, 在热工领域中的应用愈益广泛. 它利用不同温度下液晶呈现不同颜色的特性进行测温. 本实验采用美国 Hallcrest Products 公司生产的 R35C1W 型液晶进行冲击靶面温度的测量. 实验之前, 首先对此种液晶的特征温度(即红色所对应的温度)进行了校验, 校验结果为  $t_{1c} = 35.09$  °C, 与其出厂时的标称值 35 °C 相差 0.09 °C.

实验采用稳态法测量靶壁面温度, 实验时将表面涂有液晶的金箔粘贴在绝热性能良好的木质靶体上, 金箔两端通电加热, 加热到一定功率时液晶的红色将稳定在表面某一位置, 此颜色对应一条等温线, 它也是一条等换热系数线. 当射流冲击换热时, 改变冲距或流速等参数, 红色位置会发生变化, 从而可以确定不同位置处的局部换热系数. 红色对应的局部对流换热系数为

$$h(x) = q / (t_{1c} - t_{\infty}) \quad (3)$$

其中加热热流密度为

$$q = W/A - q_r - q_c \quad (4)$$

式中:  $A$  为加热面积;  $q_r$ 、 $q_c$  分别为热辐射损失和导热损失, 在实验中二者占总加热量的比例分别为 2% 和 3.6%. 实验过程中, 入口气温波动较小, 温差  $(t_{1c} - t_{\infty})$  变化不大. 通过改变加热功率  $W$ , 即可得到不同位置处的  $h(x)$ .

### 2.2 实验工况

根据前人的研究结果, 影响冲击换热的主要因素包括  $Re$ 、相对冲距  $z/b$  及相对喷嘴间距  $C_n/D_n$ .  $z$  为喷嘴与靶面之间距离(见图 2),  $b$  为喷孔折算成当量二元射流槽的槽缝宽度. 在本实验中,  $C_n = 5$  mm, 则  $C_n/D_1 = 2.27$ ,  $C_n/D_2 = 1.35$ .  $Re = (0.77$

$\sim 2.82) \times 10^4$ ,  $z/b = 6 \sim 30$ .  $Re$  和  $z/b$  均取 5 个值. 采用  $D_2$  喷头时, 对 5 个  $z/b$  在每个冲距下, 都进行了 5 个  $Re$  的实验测定. 采用喷头  $D_1$  时, 只对  $z/b = 18$  下的 5 个  $Re$  和  $Re = 17900$  下的 5 个  $z/b$  做了交叉测定. 3 个靶面的工况完全一样. 这样, 总共测定了 102 个工况, 每个工况测定 12 个点, 共得到 1200 多个实验数据.

### 2.3 数据整理

雷诺数按  $Re = uD_e/\nu$  确定, 式中  $u$  为喷头出口平均气流速度, 按浮子流量计的读数及喷孔总射流面积计算而得;  $D_e$  为两倍的当量二元射流槽的缝宽,  $D_e = 2f/L$ ;  $f$  为总射流面积;  $L$  为两端喷孔的中心距离. 努谢尔特数  $Nu$  按下式计算

$$Nu = hD_e/k \quad (5)$$

其中  $k$  为空气的导热系数.

## 3 实验结果及分析

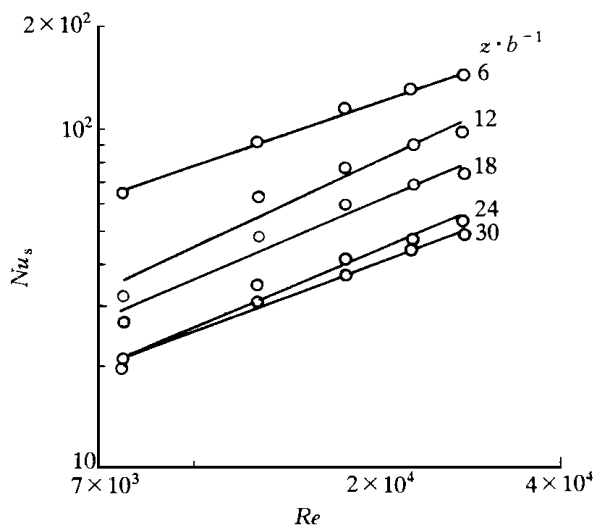
射流冲击冷却的着眼点在于滞止区域. 下面, 首先讨论滞止区域的实验结果. 半圆面  $B_1$  的实验结果与文献[1]和[2]所提供的实验关联式计算结果的比较表明, 对于  $C_n/D_n = 1.35$  的情形, 3 位实验者的结果很接近; 但对于  $C_n/D_n = 2.27$  的情形, 文献[1]的结果明显偏高, 而本文的结果与文献[2]的结果一致. 采用  $D_2$  喷头时,  $B_2$  靶面滞止区的努谢尔特数  $Nu_s$  随  $Re$  及  $z/b$  的变化示于图 3. 由图可见,  $Nu_s$  随  $Re$  及  $z/b$  的变化关系在双对数坐标下为直线, 故均可用幂函数来描述. 总体来看, 各  $z/b$  下  $Nu_s$  随  $Re$  变化的斜率变化不太显著, 5 个  $z/b$  下的

直线呈大致平行的趋势.  $B_3$  靶面  $Nu_s$  的变化情况在定性上与  $B_2$  类似.

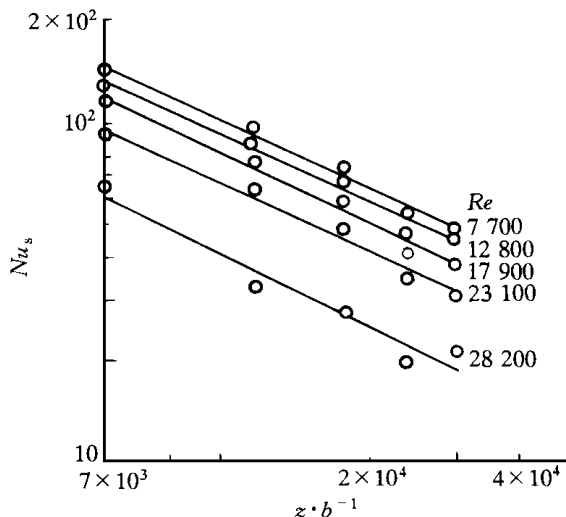
采用  $D_1$  喷头冲击,  $z/b = 18$  时, 3 种靶面的  $Nu_s$  随  $Re$  的变化及  $Re = 17900$  时  $Nu_s$  随  $z/b$  的变化分别示于图 4a 和图 4b 中. 图 4a 表明, 此种工况下  $Nu_s$  随  $Re$  单调增加, 除个别点持平外, 半圆面的  $Nu_s$  在整体水平上要低于所测实型叶片前缘表面的值, 相同  $Re$  下其差值约为 12%. 但是,  $Re = 17900$  时,  $Nu_s$  随  $z/b$  的变化则存在一个极大值(见图 4b), 此极大值约出现在  $z/b = 12$  和  $z/b = 18$  之间. 虽然对大曲率的表面  $B_3$ , 在  $z/b = 6$  时, 由于距离太近观察不到液晶的颜色, 但  $B_1$ 、 $B_2$  的结果足以说明此种变化趋势. 用  $D_2$  喷头冲击时, 不出现  $Nu_s$  随  $z/b$  变化的极值点.

对于喷头  $D_2$  冲击的情形, 3 种靶面  $Nu_s$  的相对大小变得较为复杂. 当  $z/b < 18$  时, 同样有  $Nu_{B_1} < Nu_{B_2}$  和  $Nu_{B_3}$ , 但随着  $z/b$  的增大,  $Nu_{B_2}$  和  $Nu_{B_3}$  的优势变得不明显. 这表明, 在近距离冲击时, 半圆面滞止区的换热与大曲率面的差别才显得比较重要. 结合前面对  $D_1$  喷头的讨论, 考虑到  $D_1$  喷头的当量缝宽  $b$  较小, 相同  $z/b$  下实际冲距也较小, 可以认为, 在小冲时, 由于大曲率面在滞止区域的流速有所增大, 导致其换热系数高于小曲率表面. 实际工程中的叶片前缘多采用近距离冲击冷却, 故采用半圆表面的实验关联式来计算传热有可能偏低.

最后, 根据  $B_2$ 、 $B_3$  靶面采用  $D_2$  喷头冲击时  $Nu_s$  随  $Re$  和  $z/b$  的变化规律, 采用最小二乘法拟合出了计算  $Nu_s$  的公式

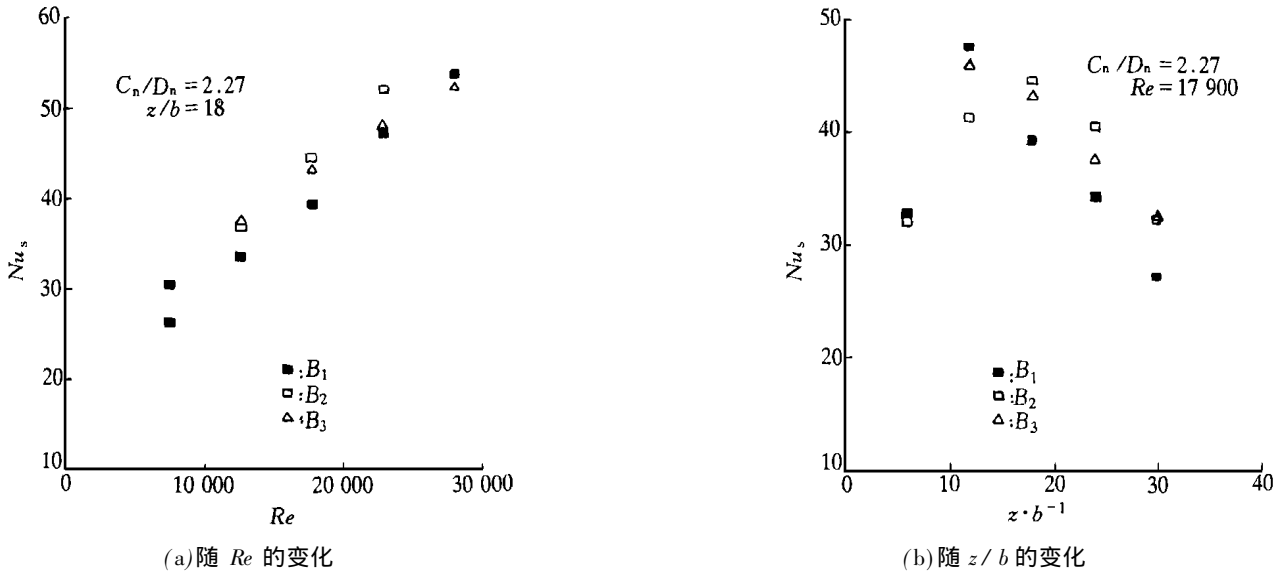


(a) 随  $Re$  的变化



(b) 随  $z/b$  的变化

图 3  $Nu_s$  随  $z/b$  及  $Re$  的变化 ( $B_2$ ,  $C_n/D_n = 1.35$ )

图4 3种靶面  $Nu_s$  的比较

$$B_2: Nu_s = 2.48Re^{0.5207}(z/b)^{-0.6953} \quad (6)$$

$$B_3: Nu_s = 2.00Re^{0.5285}(z/b)^{-0.6705} \quad (7)$$

以上两式的参数范围为:  $12\,000 \leq Re \leq 28\,000$ ,  $6 \leq z/b \leq 30$ ,  $C_n/D_n = 1.35$ . 在上述参数范围内, 两式的最大误差为 7%. 由于对喷头  $D_1$  只做了交叉实验, 数据较少, 不足以拟合准则关系式.

## 4 结 论

(1) 冲击面的曲率增大, 小冲击距时使得滞止区内的流速有所增大, 导致滞止区的换热较之半圆面有所增强.

(2) 在实验参数范围内, 两实际叶型表面的  $Nu_s$  比半圆面约高出 12%.

(3) 对于  $C_n/D_n = 2.27$  的情况, 所研究的 3 种曲面的  $Nu_s$  随  $z/b$  的变化存在一个极值点, 约在

$z/b = 12 \sim 18$  的范围内; 对于  $C_n/D_n = 1.35$  的情况, 未发现极值点.

## 参考文献:

- [1] 康滢, 邱绪光, 周维. 近距离散冲击射流换热实验研究. 航空动力学报, 1993, 8(2): 165~168.
- [2] 任苓华, 郑际睿. 冲击冷却局部换热特性的实验研究. 航空动力学报, 1987, 2(1): 13~17.
- [3] Hamed A, Kuhn T P. Effects of variational particle restitution characteristics on turbomachinery erosion. ASME J of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117: 432~438.
- [4] Amagasa S, Shimomura K, Takeishi K, et al. Study on the turbine vane and blade for a 1 500 °C class industrial gas turbine. ASME J of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116: 597~608.

(编辑 蒋慧妹)