

文章编号:1000-8055(2011)12-2691-07

压力敏感涂料的标定及在气膜冷却效率 测量中的应用

张 超^{1,2}, 王 湛^{1,2}, 周嗣京¹, 刘建军¹

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190)

摘 要: 采用自行设计的标定装置对压力敏感涂料进行了标定实验,研究了激励光源光强、温度两种参数对标定曲线的影响。结果表明:当激励光源光强能够使得光敏分子发生氧猝熄条件下,激励光源光强对标定曲线的影响可以忽略不计;标定曲线对温度变化较为敏感。据此提出了采用二维插值方法得出发射光强关于压力比、温度比的表达式,从而对测量结果进行温度修正。在此基础上,将压力敏感涂料测试技术分别应用于圆柱孔、扇形孔气膜冷却效率的测量中,所得实验数据与前人结果符合较好。

关 键 词: 压力敏感涂料; 标定实验; 激励光源光强; 温度修正; 气膜冷却

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Calibration of pressure-sensitive paint and application to the measurement of film cooling effectiveness

ZHANG Chao^{1,2}, WANG Zhan^{1,2}, ZHOU Si-jing¹, LIU Jian-jun¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Calibration of pressure sensitive paint was carried out by using the self-designed calibration setup. The influence of excitation light intensity and temperature on the calibration curve was investigated. The experimental results showed that the effect of excitation light intensity was negligible when the excitation light intensity was sufficient to cause the oxygen quenching of luminescent molecules, but the calibration curve was more sensitive to the temperature change. The expression of emission light intensity about pressure ratio and temperature ratio was proposed based on two-dimensional interpolation method, and the measurement results were corrected to account for temperature change effects. Then the pressure sensitive paint technology was applied to the film cooling effectiveness measurement of cylinder film hole and fan-shaped film hole, and the experimental results compared well with the previous experimental data.

Key words: pressure-sensitive paint (PSP); calibration experiment;
excitation light intensity; temperature correction; film cooling

收稿日期:2011-02-28; 修订日期:2011-05-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2007CB210108)

作者简介:张超(1983—),男,河南睢县人,博士生,主要从事叶片冷却技术研究。

压力敏感涂料 (pressure-sensitive paint, 简称 PSP) 技术是上世纪 80 年代后期发展起来的一种基于氧-光致发光原理的压力测量技术. 相比于传统的测压孔和传感器测量方法, PSP 技术具有表面无接触测量、对流场干扰小、空间分辨率高等优点, 因此在航空航天、叶轮机械内流、汽车工业等领域逐渐得到应用. PSP 技术最初用于测量低速风洞模型的压力分布^[1], 之后其应用范围扩展至高速流场乃至非定常流场^[2]. 近年来国内研究机构在应用 PSP 技术测压方面取得了一定的进展, 文献[3]利用国产 PSP 在跨声速叶栅中进行了静叶吸力面压力的测量.

利用传热传质类比的原理, PSP 技术被创造性地应用于燃气透平的气膜冷却效率测量^[4]. 文献[5]比较了目前常用的 5 种气膜冷却效率测量技术, 包括稳态热敏液晶、瞬态热敏液晶、红外测温、热电偶和压力敏感涂料. 实验结果表明 PSP 技术测量气膜冷却效率具有测量精度较高、稳定和可重复性良好的特点. 目前 PSP 技术在透平气膜冷却的研究中被普遍认可和采用^[6-8].

无论利用 PSP 技术测压或者测量气膜冷却效率, 特性曲线标定实验都是应用 PSP 技术的基础, 所获得的特性曲线的准确程度是影响测量精度的关键因素. 文献[9]对影响 PSP 技术测量精度的因素进行了总结, 发现温度变化是引起测量误差最大的因素. 文献[10]介绍了常用的 PSP 技术测压中削弱温度影响的处理方法: 等温测量、原位测量、K 拟合测量以及基于温度修正的压力测量, 并比较了 4 种方法的精度. 文献[6]提出了 PSP 技术测量气膜冷却效率中消除温度影响的处理方法. 另外, PSP 技术应用于燃气透平测量还会受到叶片扭曲、视窗厚度不均匀、光照不均匀等因素的影响. 文献[11]分析了光源入射角度、相机探测角度对特性曲线的影响, 结果表明光源入射角度在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内均可得到可靠的测量结果, 对于平板测量相机视角在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时, 可忽略视角变化对结果的影响. 文献[12]分析了相机光圈与激励光源光强对国产 PSP 特性曲线的影响, 结果表明激励光源须具有一定的强度, 以使光敏分子产生能级的跃迁.

本文在自行建立的 PSP 标定装置上进行了大量标定实验, 验证了标定装置的可靠性和有效性, 重点研究了激励光源光强、温度变化对特性曲线的影响, 并提出了相应的解决方法和措施. 在此基础上, 利用 PSP 技术分别测量得到了圆柱孔、

扇形孔的气膜冷却效率分布.

1 PSP 测压及测气膜冷却效率原理

PSP 技术以氧-光致发光原理为基础. 喷涂压力敏感涂料的表面受到特定的电磁辐射或光照, 光敏分子发生猝熄, 所激发出磷光或荧光的强度与所处环境中氧气分压力直接相关. 由于空气中氧气体积分数可认为恒定, 因此光强大小与空气压力的变化关系 (Stern-Volmer 公式) 为^[9]

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = A + B \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad (1)$$

其中 p 为空气压力; I 为相应压力下的光敏分子发射出的光强; A, B 为 Stern-Volmer 系数; 下标 ref 代表参考状态. 由于环境温度的变化不可避免地导致光敏分子发生热猝熄, 因此特性参数 A, B 与温度相关.

利用 PSP 技术测量气膜孔绝热气膜冷却效率的实验中, 主流工质为空气, 气膜冷却射流工质为氮气, 由传热传质类比可以得到气膜冷却效率

$$\eta = \frac{C_{\text{air}} - C_{\text{mix}}}{C_{\text{air}} - C_{\text{N}_2}} \Rightarrow \eta = \frac{T_{\text{aw}} - T_{\infty}}{T_{\text{c}} - T_{\infty}} \quad (2)$$

其中 η 为绝热气膜冷却效率, C_{air} 为主流的氧气体积分数 (约为 21%), C_{mix} 为主流与射流混合气流中的氧气体积分数 (位于 $0 \sim 21\%$ 之间), C_{N_2} 为氮气中的氧气体积分数, T_{aw} 为主流与冷却射流混合后绝热壁面的温度, T_{∞} 为主流温度, T_{c} 为冷却射流温度. 由于射流采用接近 100% 氮气, 因此可认为射流中氧气体积分数为零, 再依据气体分压原理, 上式可简化为

$$\eta = \frac{C_{\text{air}} - C_{\text{mix}}}{C_{\text{air}}} = \frac{(p_{\text{O}_2})_{\text{air}} - (p_{\text{O}_2})_{\text{mix}}}{(p_{\text{O}_2})_{\text{air}}} \quad (3)$$

对于 PSP 气膜冷却实验而言, 需要采集 4 幅图像: 一幅黑色背景图像 (无光、无空气), 一幅参考图像 (无空气、有光), 一幅空气喷射图像 (有空气、有光、有空气喷射) 及一幅氮气喷射图像 (有空气、有光、有氮气喷射). 黑色背景图像用来消除环境噪音影响, 参考影像表征在参考压力下的激发光强, 作为参照值, 与空气喷射图像和氮气喷射图像形成比值, 由预先标定曲线中光强比与压力比的关系即可获得气膜冷却效率.

2 PSP 标定及影响因素分析

2.1 标定装置

PSP 标定装置示意图如图 1 所示, 主要分为激励光源系统、装置主体、图像采集分析处理系统

三个部分。

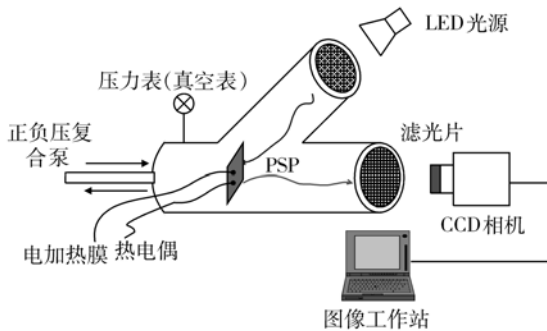


图 1 PSP 标定装置示意图

Fig. 1 PSP calibration setup sketch

入射激励光源通过发射光子激发光敏分子使之发射出荧光。激励光源系统的选择依赖于 PSP 涂料的激励光谱范围和辐射光谱范围。本文选用 ISSI(Innovation Scientific Solution Inc.)公司的 PSP,激励光谱波长范围为 380~520 nm,辐射光谱波长范围为 620~750 nm。因此激励光源选择中心波长为 400 nm 的 LED(light emitting diode)光源,由于 LED 光源波段较窄且与荧光波段不重叠,故光源前方无需加滤光片。

装置主体为自行设计的密闭压力容器,允许压力范围为 0.9~300 kPa。在压力容器上镶嵌两块有机玻璃板作为光源入射窗口和图像采集窗口,其角度分别为 45°和 90°。容器内压力由正负压复合泵进行调节,当容器内处于负压状态,其压力由真空表测量得到,反之,压力由压力表测量得到。实验件为 50 mm×50 mm 的铜板,一侧均匀喷涂 PSP,另一侧铺设电加热膜以改变铜板的温度。铜板内部布置热电偶测量温度,其精度为 0.2℃。通过调节正负压复合泵和电加热膜的电压分别改变压力容器内的压力和温度,对特性曲线进行全面的标定。

图像采集分析处理系统为 PSP 标定实验中的核心部分,主要包括 CCD(charge coupled device)相机、滤光片、图像采集卡、图像采集软件及图像处理软件。本文选用 10 位科学级 CCD 相机,分辨率为 1024×768,帧频为 30 帧/s。CCD 相机镜头前安装直径为 25.4 mm,中心波长为 670 nm,半带宽为 ±75 nm,透过率大于 75% 的带通滤光片。图像经由图像采集卡和图像采集软件存储到硬盘,输出图片格式为 Tiff 格式。采集图像处理程序为自编程,将采集得到的荧光分布图转换为压力分布图。

2.2 激励光源光强的影响

特性曲线标定实验环境温度为 19.0℃,当地大气压力为 101.3 kPa,以此作为参考温度和参考压力。标定表压范围为 -50~30 kPa,压力间隔为 10 kPa,在每个压力工况下采集时间约为 2 s,共采集 60 幅图像进行时间平均以减小随机噪声影响。为了减小环境光的影响,分别采集无光和有光情况下的图像,对时间平均后的有光图像和无光图像进行减运算。由于实验中喷涂 PSP 表面光源照射光强分布不可能完全均匀,特别在叶轮机械内流中由于叶片扭曲、弧形窗口、视窗厚度不均匀等因素,导致光照不均匀程度更加剧烈,因此有必要研究光强对特性曲线的影响。

为了研究激励光源光强对特性曲线的影响,实验采用三种光强照射喷涂 PSP 表面,光源功率分别为 15,21,36 W。图 2 为三种激励光源光强下涂料的标定特性曲线,横坐标 p/p_{ref} 为实验压力与参考压力的比值,纵坐标 I_{ref}/I 为参考压力下光强与实验光强的比值。从图中可以看出,当压力逐渐增大时,氧猝熄效应逐渐增强,辐射出的荧光强度逐渐变小,而且两者基本呈现线性变化趋势。

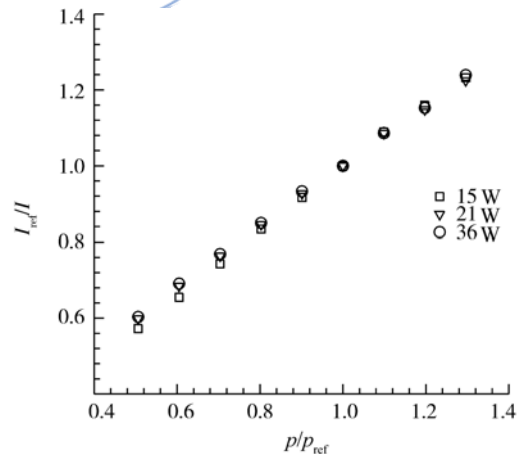


图 2 不同激励光源光强下标定曲线

Fig. 2 Calibration curves at different excitation light intensity

三种不同光强下涂料的特性系数如表 1 所示,根据文献[9]介绍,当系数 B 大于 0.5 时,表明该涂料具有较好的压力敏感特性,可用于定量的压力测量;反之,若系数 B 小于 0.5 时,应用于压力测量将产生较大的误差。由表 1 中数据可知,实验所用压敏涂料具有较好的压力敏感特性。对比不同激励光源光强下的标定曲线,可知标定曲线对光强大小变化不敏感,在 I_{ref}/I 为 0.5~1.3

范围内,其测量 p/p_{ref} 最大偏差为 0.044. 尤其在光源功率分别为 21 W 和 36 W 时,标定曲线几乎重合. 因此,可以认为当光强大小能够使得光子发生猝熄条件下,光强大小对压敏涂料的标定曲线的影响可忽略不计.

表 1 不同激励光源光强下压敏涂料 Stern-Volmer 系数

Table 1 Stern-Volmer coefficients of PSP at different excitation light intensity		
光源功率/W	A	B
15	0.1487	0.8461
21	0.2054	0.7926
36	0.2076	0.7959

2.3 温度对标定曲线的影响

由于 Stern-Volmer 系数 A, B 在不同的温度条件下有所差异,因此温度成为 PSP 测量过程中引起误差最大的因素^[9]. 基于上述原因,实验通过调整电加热膜电压得到三种温度(19, 31, 47 °C),研究温度对标定曲线的影响. 选择光源功率 21 W 为例,考察三种温度条件下的标定曲线. 图 3 为不同温度条件下得到的标定性能曲线,由图中可以看出,性能曲线基本呈线性变化,所不同的是随着温度升高,线性度逐渐变差. 其原因在于标定实验过程中,实验件温度并非恒定,而是稍有变化. 在同样压力比值条件下,光强反比 I_{ref}/I 随温度升高而增大,其原因因为压敏涂料氧致发光分子受到热猝熄的影响,发射出的荧光光强减弱.

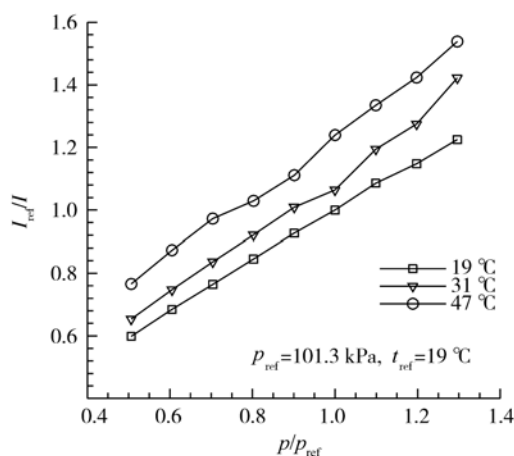


图 3 不同温度下的标定曲线

Fig. 3 Calibration curves at different temperatures

表 2 为三种温度条件下压敏涂料的 Stern-Volmer 系数,从中可以看出标定曲线斜率随温度

升高而增大. 若不考虑温度的影响,应用图 3 中标定曲线进行压力测量,测量得到的 p/p_{ref} 最大偏差约为 0.01/°C. 由此可见,温度对测试结果影响较大. 由于实际实验过程中测试表面温度空间分布有所差异,因此需要将测试结果进行温度修正以得到精度较高的压力分布.

表 2 不同温度下压敏涂料 Stern-Volmer 系数

Table 2 Stern-Volmer coefficients of PSP at different temperatures		
温度/°C	A	B
19	0.2054	0.7926
31	0.1741	0.9315
47	0.2796	0.9583

对于气膜冷却实验,由于射流与主流温差要求控制在 0.5 °C 以内^[4],因此可认为实验测试表面处于等温状态. 但实验温度与标定状态下温度有可能不一致,因此如何应用标定性能曲线成为关键问题.

文献[6]采用了消除温度影响的方法,该方法对实验标定曲线进行特殊处理,将纵坐标改变为标定压力下光强与相应温度参考压力条件下光强的反比,横坐标仍为压力比,发现经过处理后不同温度条件下的特性曲线基本重合,从而将随温度变化的特性曲线归一化为消除温度影响的特性曲线. 但文献[6]并没有说明该处理方法的原理. 采用该方法对光源功率为 21 W 不同温度的实验数据进行处理并进行最小二乘拟合归一化,如图 4 所示. 由图 4 可以看出,在压力比较小时,归一化特性曲线线性度较好,当压力比大于 1.2 时,线性度较差.

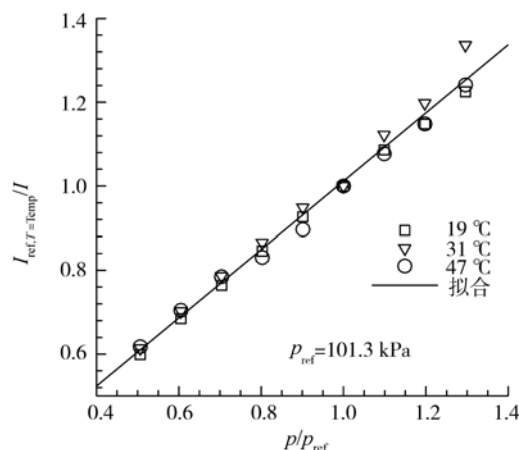


图 4 归一化 PSP 性能曲线

Fig. 4 Normalized calibration curve of PSP

根据文献[10]介绍,在同一压力条件下光强反比 I_{ref}/I 随温度变化基本呈现单调变化. 图 5 为光源功率为 21 W 条件下三种温度不同压力条件下的光强比的分布图,从中可以看出在同一压

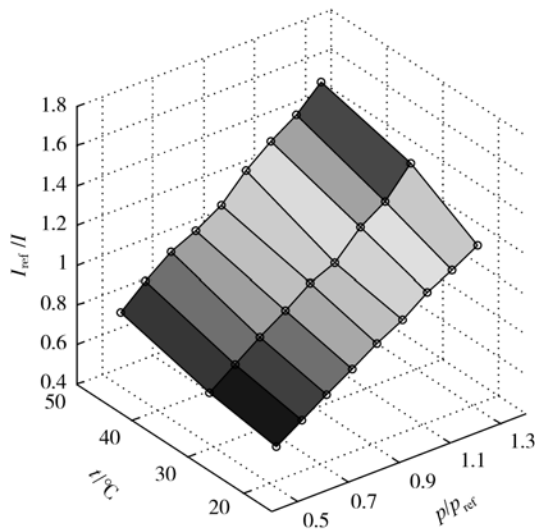


图 5 PSP 标性能曲面分布
Fig. 5 Calibration performance surface distribution of PSP

力条件下,随着温度的增大,光强反比逐渐增大. 因此认为可以将 Stern-Volmer 系数 A, B 随温度的变化关系可分别拟合多项式,经过最小拟合发现表达式确定为二次多项式形式,其表达式如下:

$$A = 28.0217 \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^2 - 57.9565 \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right) + 30.1403 \quad (4)$$

$$B = -30.1469 \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^2 + 64.9126 \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right) - 33.9731 \quad (5)$$

其中 T/T_{ref} 为绝对温度的比值. 将系数 A, B 随温度的变化关系代入式(1),将光强反比随温度、压力的变化关系通过一个表达式即可表达出来.

以光源功率为 21 W、压力比为 0.8、温度分别为 19、31 °C 和 47 °C 下的标定数据为例,分别由本文提出的处理方法与文献[6]中方法处理得到压力比误差,其定义为

$$\epsilon = \frac{|(p/p_{\text{ref}})_{\text{calc}} - (p/p_{\text{ref}})|}{p/p_{\text{ref}}} \quad (6)$$

其中 $(p/p_{\text{ref}})_{\text{calc}}$ 为根据标定时某光强比 I_{ref}/I 插值处理得到的压力比, p/p_{ref} 为标定时相应的压力比. 误差处理结果如表 3 所示,可知本文所提出

方法和文献[6]中方法误差均较小,最大误差分别约为 2.5% 和 3.2%. 但本文方法较文献[6]方法误差更小,尤其在温度为 31 °C 时,误差基本可以忽略.

表 3 利用文献[6]方法与本文方法结果误差比较

Table 3 Error comparison between the present method and the method of reference[6]

温度/°C	本文方法误差/%	文献[6]方法误差/%
19	0.5790	0.9145
31	0.0856	2.1923
47	2.5269	3.1877

3 测量气膜冷却效率

气膜冷却实验台示意图如图 6 所示,主流经由离心风机、整流段、收敛段、稳定段流经至平板气膜冷却实验段. 实验段主流进口布置热电偶测量进口温度,布置总压、静压探针测量进口速度. 在气膜冷却实验中需要进行两次实验,冷却射流分别来自氮气和空气压缩机,实验过程中可互相切换. 射流经过电加热器和质量流量计后进入冷气腔,最终经由气膜孔喷射入主流流动. 喷涂 PSP 的实验平板上分别布置圆柱型气膜孔和扇形气膜孔,其中圆柱孔孔径为 7 mm,孔的间距比为 3.6,长径比为 7,流向倾角为 30°,扇形孔几何结构与圆柱孔几何形状基本相同,展向扩张角为 14°. 为了保证气膜冷却流动周期性,圆柱孔和扇形孔实验平板上均布置 7 个气膜孔. 实验过程中 LED 光源和相机布置尽可能与标定状态下保持相同,即 LED 光源由 45° 倾斜角照射,CCD 相机从与实验平板垂直方向拍摄.

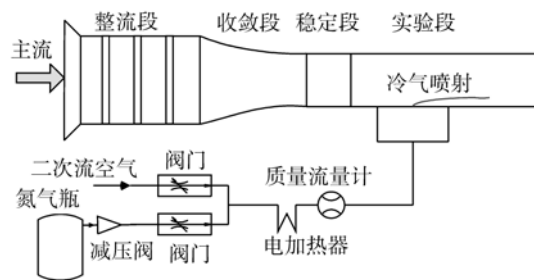


图 6 平板气膜冷却实验台示意图
Fig. 6 Sketch of flat plate film cooling experiment rig

气膜冷却实验中 4 幅图像应均在同一温度下采集,以消除温度对测试结果的影响. 如果利用文

献[6]归一化特性曲线,需要保证黑色背景图像和参考图像温度与实验过程中温度一致,具体实施方法为:在实验结束时快速关闭主流,立即采集参考图像和黑色背景图像,此时温度无大的变化,可认为采集图像温度与实验温度相同.利用本文提出的温度修正方法,则不受两者温度一致的限制,即黑色背景、参考图像的温度与实验状态无需保持一致,实验操作过程较为简单,不需要对主流进行快速截止.实验具体操作如下:在实验开始前进行黑色背景和参考图像进行采集,然后通过标定曲线表达式进行温度修正,将实验开始前温度下光强反比换算至喷射空气和氮气时温度下的压力比;然后采集喷射空气和氮气时的图像,从而得利用 PSP 技术和本文提出的温度修正方法在平板气膜冷却实验台上分别对圆柱孔、扇形孔测量得到了常见吹风比 $M=0.5$, 密度比 $D_r=1.0$ 时气膜冷却效率分布.图 7 为实验平板中部 3 个气膜孔的冷却效率分布,其中 x 为以圆柱气膜孔出口为原点的流向坐标.由图可知,无论是圆柱孔还是扇形孔,气膜冷却区域呈现周期性,且扇形孔冷却效率较高区域覆盖面积较大,表明扇形孔冷却性能较圆柱孔有较大的提升.

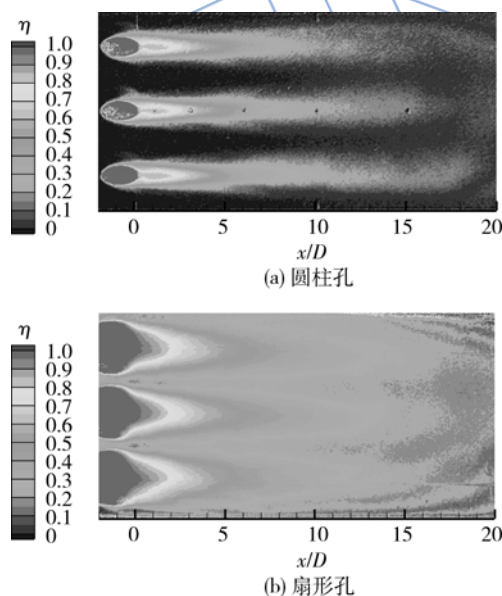


图 7 圆柱、扇形气膜孔冷却效率分布

($M=0.5$, $D_r=1.0$)

Fig. 7 Film cooling effectiveness distribution of cylindrical hole and fan-shaped hole

($M=0.5$, $D_r=1.0$)

为了验证 PSP 技术的有效性,及本文提出温度修正方法的合理性,以圆柱孔为例,取圆柱孔中

心线冷却效率与前人实验结果进行对比,如图 8 所示.其中文献[7]中实验结果由 PSP 测量得到,文献[13]中实验结果由热电偶测量得到.由图中可以看出,本文利用 PSP 技术测量得到的气膜冷却效率与文献结果趋势一致.在 $x/D < 5$ 范围内,实验数据与文献[13]结果符合较好,在 $x/D > 5$ 范围内,实验数据与文献[7]结果符合较好.总体来看,本文实验数据与前人实验结果符合较好.将采用本文温度修正方法与采用文献[6]方法处理得到的气膜冷却效率相比,可知前者冷却效率较后者低,在气膜覆盖集中区域($x/D < 5$)差别稍大,但两者相差不超过 0.02.

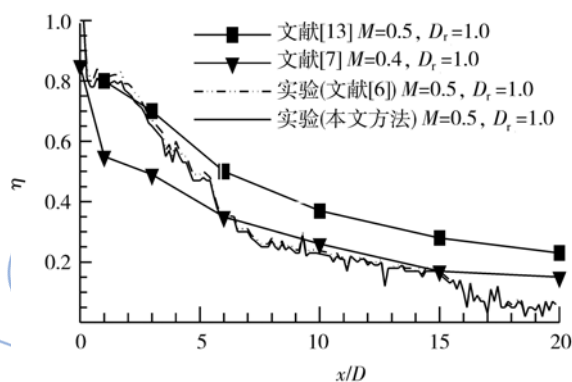


图 8 圆柱孔中心线冷却效率分布对比

Fig. 8 Comparisons of centerline film cooling effectiveness distribution of cylindrical hole

4 结 论

本文采用基于自行设计的压力敏感涂料标定装置,对压力敏感涂料进行标定得到其标定曲线,验证了该标定装置的有效性.通过改变激励光源光强和温度,进行了一系列标定实验,研究了上述两种因素对性能曲线的影响.分析标定实验结果可知:激励光源光强对标定性能曲线的影响很小,可忽略不计;温度对性能曲线的影响较大.针对这一现象,本文提出了利用二维插值将光强比关于压力比、温度的变化关系整合为一个表达式的温度修正方法,并在平板气膜冷却实验台上得到了应用,使实验操作更为简便.利用 PSP 技术分别测量了圆柱孔、扇形孔的冷却效率分布,并与文献结果进行了对比,实验结果与文献结果符合较好.

参考文献:

- [1] Kavandi J, Callis J, Gouterman M, et al. Luminescent ba-

- rometry in wind tunnels[J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(11): 3340-3347.
- [2] Gregory J W, Asai K, Kameda M, et al. A review of pressure-sensitive paint for high-speed and unsteady aerodynamics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2008, 222(2): 249-290.
- [3] ZHOU Qiang, LIU Bo, GAO Limin, et al. Pressure measurement on suction surface of a single vane using pressure-sensitive paint[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 138-144.
- [4] Zhang L, Baltz M, Padupatty R, et al. Turbine nozzle film cooling study using the pressure sensitive paint (PSP) technique[R]. ASME Paper No. 99-GT-196, 1999.
- [5] Varvel T A. Shaped hole effects on film cooling effectiveness and a comparison of multiple effectiveness measurement techniques [M]. Texas: Texas A&M University, 2004.
- [6] Gao Z H, Diganta N, Han J C. Turbine blade platform film cooling with typical stator-rotor purge flow and discrete-hole film cooling[R]. ASME Paper GT2008-50286, 2008.
- [7] Russin R A, Alfred D, Wright L M. Measurement of detailed heat transfer coefficient and film cooling effectiveness distributions using PSP and TSP[R]. ASME Paper GT2009-59975, 2009.
- [8] 李佳, 韩昌, 任静, 等. 基于压敏漆的带横槽气膜冷却实验与数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 239-242.
LI Jia, HAN Chang, REN Jing, et al. Film cooling performance of the embedded holes in trenches with compound angles[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 239-242. (in Chinese)
- [9] Liu T, Sullivan J P. Pressure and temperature sensitive paints[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [10] Woodmansee M A, Dutton J C. Treating temperature-sensitivity effects of pressure-sensitive paint measurements [J]. Experiments in Fluids, 1998, 24(2): 163-174.
- [11] 刘火星, 余弦, 陈怡, 等. 用于叶轮机内流测量的压力敏感涂料校准实验[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 223-226.
LIU Huoxing, YU Xian, CHEN Yi, et al. The calibration test of pressure sensitive paints in turbomachinery flow-field measurement [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 223-226. (in Chinese)
- [12] 高丽敏, 王欢, 刘波, 等. 光学压敏涂料的校准实验研究 [C]// 航空学会第十五届叶轮机专业委员会学会交流学会论文集. 张家界: 中国航空学会动力专业分会, 2009: 290-296.
- [13] Sinha A K, Bogard D G, Crawford M E. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113(3): 442-449.