

文章编号:1000-8055(2011)09-2061-07

大弯角扩压叶栅吸力面全域压力分布的 PSP 实验

高丽敏, 高 杰, 王 欢, 周 强, 刘 波
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 基于自行组建的 PSP (pressure sensitive paint) 测量系统, 采用中国科学院化学研究所 PSP, 实验测量了来流马赫数分别为 0.4 和 0.5 时大弯角扩压叶栅叶片吸力面全域压力分布, 并与传统测压技术所得结果进行了比较. 研究表明: ①采用 PSP 技术测量可以获得叶片表面全域的连续压力分布, 具有空间分布率高、定量测量的特点; ②叶片中部 PSP 测量压力值与压力扫描阀结果吻合得非常好, 但受到叶片吸力面曲率的影响, 叶片前缘与尾缘附近的误差较大, 最大误差为 4.48%; ③随着来流速度的提高, PSP 与压力扫描阀之间的误差逐渐减小.

关 键 词: PSP (pressure sensitive paint) 测量技术; 大弯角; 扩压叶栅; 压力分布; 吸力面
中图分类号: O354 **文献标志码:** A

PSP experiment of global surface pressure distribution on suction surface of compressor cascade with large curved angle

GAO Li-min, GAO Jie, WANG Huan, ZHOU Qiang, LIU Bo
(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the home-made PSP (pressure sensitive paint) system and ICCAS's (Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences) PSP, the pressure distribution on the compressor cascade surface was performed on a subsonic cascade wind-tunnel while the conventional pressure scanner was employed to validate the PSP measurement. Comparison between the PSP and the pressure scanner indicates: (1) Pressure distribution on the suction surface of with use of PSP is quantitative, continuous and global, and that with use of pressure scanner is discrete and limited. (2) Compared with the results of pressure scanner, there is a good agreement on the pressure valley and the maximum measuring error near the leading edge and trailing edge, which does not exceed to 4.48%. (3) The maximum measuring error is decreasing when Mach number of the inflow is increasing.

Key words: PSP (pressure sensitive paint) measurement technique;
large curved angle; compressor cascade; pressure distribution;
suction surface

收稿日期:2010-09-21; 修订日期:2011-06-01

基金项目:国家自然科学基金(51076132); 航空基金(2010ZB53014); 西北工业大学基础研究基金; 2010 年度新世纪人才计划

作者简介:高丽敏(1973-), 女, 陕西韩城人, 教授, 博士, 主要研究方向为叶轮机械流动理论与实验.

平面叶栅实验是先进叶轮机械设计方法形成的基础,而平面叶栅各参数测量中以叶片表面压力分布测量最为重要.传统压力测量是在叶片表面开设静压孔或通过放置压力传感器直接获取叶片表面压力分布,这种方法的实时性好,但受到安装以及模型强度的限制,实际只能测量有限离散测量点处的压力值.近年来,一种全域表面压力测量方法得到了关注:PSP (pressure sensitive paint, 压力敏感涂料) 测量技术^[1-3]. 该技术能够更加直观、全面和准确地反映出物体表面的全域压力分布状况,并且对被测模型没有破坏,体现出传统压力测量方法无法比拟的独特优势.

经过三十多年的发展,有关 PSP 测量技术的研究以及应用已取得很大进展,文献[1]曾对国内外有关 PSP 测量技术的发展及应用进行了较为全面的总结;国外开展 PSP 测量技术的研究及应用起步较早,发展了较为成熟的便携式 PSP 测量系统^[4],已在外流场的研究中得到了广泛工程应用^[5-9]. 然而,由于受到空间结构以及流动复杂性的限制,有关 PSP 测量技术在内流场的应用研究仅有零星报道:美国国家航空航天局 NASA Lewis 研究中心于 1998 年在四个不同转速下分别对跨声速轴流式风扇的一对覆盖着 PSP 和 TSP (temperature sensitive paint, 温度敏感涂料) 的叶片进行了测量尝试^[10]; 2002 年,文献[11]将 PSP 喷涂在叶栅端壁面,开展了超声速叶栅的激波显示实验;德国宇航研究院^[12]使用双组份 PSP 对 NASA 3506 压气机静子叶片进行了测量. 但是,上述报道仅简单介绍了相应的测量结果,并未报道更多的有关内流场的实验细节.

由于涉及到多个学科领域,国内的相关研究起步较晚,其中以中国科学院化学研究所自主研发的 PSP^[13]、中国航空工业空气动力研究院的翼身、机翼模型等外流模型实验^[14-15]以及西北工业大学自行组建的 PSP 测量系统最具代表性,清华大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学等也相继启动了 PSP 测量技术的研究工作^[16-17]. 然而,由于可能涉及国防机密,2009 年前,集成度较高的商品化 PSP 测量系统一直处于对华技术封锁状态. 目前为止,限于技术发展水平以及测量系统的成熟度,有关内流场全域压力测量的工作在国内零星可见.

本文将综合考虑叶栅流场结构与几何特点,基于对自行组建的光学压力敏感涂料测量与校准系统的改进,应用国产单组份 PSP,开展平面叶栅

风洞内扩压叶栅表面全域压力测量技术的研究,以获取叶片吸力面上的静压分布图谱.

1 测量原理

光学压力敏感测压技术是一种光学测压技术,其测量原理主要包括压力敏感涂料(简称压敏涂料)的光致发光和氧猝灭两个过程,继而压敏涂料受到激发光的照射会根据所处环境压力发出不同强度的荧光^[13],其相互关系即

$$\begin{aligned} \text{压力} \uparrow &\rightarrow \text{氧物质的量浓度} \uparrow \rightarrow \\ &\text{氧猝灭效应} \uparrow \rightarrow \text{荧光光强} \downarrow \end{aligned}$$

以上压力与荧光强度之间的量化关系通常由多次的 Stern-Volmer 关系式表示

$$\frac{I_0}{I} = A + B \frac{p}{p_0} + C \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 + \dots \quad (1)$$

式中 p 为压力, I 为相应压力下压敏涂料所发荧光的光强,即灰度值;下标 0 表示的是参考状态,通常选择当地大气压下的状态为参考;而系数 A , B , C 则反映了涂料对压力的敏感性,由压力校准实验决定.

2 测量系统及实验方案

与外流场测量相比,基于光学测量技术的 PSP 测量技术在进行内流场测量时面临很多困难. 对于叶栅风洞内叶片吸力面的表面压力测量,主要问题表现在:①叶栅是由相同叶型的多个叶片以一定安装角和栅距排列而成,因此构成的叶栅通道空间极为狭小,且存在相邻叶片遮挡现象,这给 PSP 实验的光路布置带来了困难;②大弯角是高负荷压气机叶片的重要特征之一,然而,在光路保证的前提下,大弯角叶片吸力面的大曲率极易导致被测表面上激发光照与被激发荧光的分布不均匀,如强光区与弱光区的光强相差过大,甚至出现局部区域光照饱和的现象,使得大弯角叶片表面全域压力测量难度增大.

因此,在进行叶栅风洞内流场叶片表面压力测量时,需综合考虑光路通畅、激发光与 CCD (charge-coupled device) 视角对大曲率叶片表面的整体覆盖、激发光入射角度与相机拍摄角度、激发光强度与均匀度、反射光干扰以及环境污染等因素的影响,以便正确进行测量系统的安装调试.

2.1 测量系统

压力敏感涂料测量系统包括:压敏涂料、激发光源、图像采集系统、压力系统、图像后处理软

件等。

本文实验研究所用测量系统是由课题组自行组建^[13]:①所用单组份PSP由中国科学院化学所提供,为自主研制的荧光类压敏涂料,最佳激发波长为320~340 nm,在0~40℃范围内有较好的温度不敏感性,超过此温度范围需要进行温度校准。②根据涂料特性,美国Uvitron公司生产的Portaray 400型便携式紫外光源作为PSP的激发光源,同时为了尽量消除背景光和可见光的影响,保证激发紫外光的纯度以及照射的均匀度,根据紫外光源的波长范围以及涂料的最佳激发波长,课题组自主设计了滤光暗箱,与激发光源一起构成激发光源系统。考虑到内流场测量空间的限制,在文献[13]的基础上,充分考虑激发光源系统的体积影响,在保证激发光源均匀度、波长的纯粹性以及光源的冷却等基本功能后,对滤光暗箱进行了再设计,最终体积约为滤光原暗箱的2/5,实现了激发光源系统的小型化,如图1所示。③图像采集系统为TSI公司的Power View 2M10位灰度科学级CCD相机,该相机的空间分辨率为1600像素×1200像素,这也决定了PSP测量技术的空间分辨率。④图像处理软件采用专业PSP图像处理软件Afix2,但是该软件不具备Color bar的显示功能,所以在完成基本的PSP图像处理,还需借助Matlab进行编程,以量化的形式显示PSP测量所获得的压力云图即Color bar。⑤自行组建的PSP校准系统主要由空压机、真空泵、压力表、密封舱、压力调节阀组成,该压力校准系统可提供0~0.8 MPa的压力,足以覆盖本实验所需的压力范围。



图1 激发光源系统

Fig. 1 Exciting light source

由于测量系统各部分均为自行设计组建,在

开展PSP测量技术研究的初期阶段,课题组曾针对测量系统性能的影响进行了专门研究^[13],为本文实验研究中光源功率、CCD相机光圈的设置以及涂料的校准曲线等方面提供了研究基础。

2.2 大弯角扩压叶栅

实验叶栅选取西北工业大学翼型、叶栅空气动力学国防科技重点实验室自行设计的某大弯角扩压叶栅。该叶栅弦长为56.7 mm,叶片弯角为52.6°,叶栅安装角为32°,并综合考虑叶栅风洞内流场测量的空间限制以及扩压叶栅表面压力的变化,叶栅的栅距调整为100 mm。为了保证进行PSP实验时实验模型与激发光源以及图像捕捉系统具有畅通的光路,叶栅实验件所安装的栅板采用光学有机玻璃加工而成,其紫外光透光率为90%,以保证有足够能量的激发光穿过有机玻璃栅板。图2为实验叶栅叶片示意图。涂有国产单组份压力敏感涂料的实验叶片如图3所示,压敏涂料的喷涂由中国科学院化学研究所完成。在自然光线下涂有国产压敏涂料的叶片表面呈淡蓝色,在激发光的照射下呈紫色。

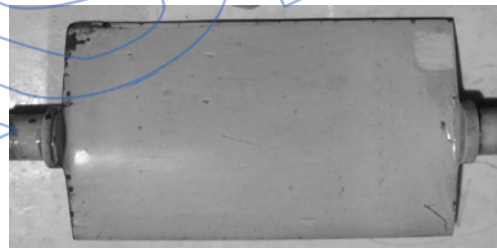


图2 涂有压敏涂料的叶片

Fig. 2 Compressor blade coated with PSP

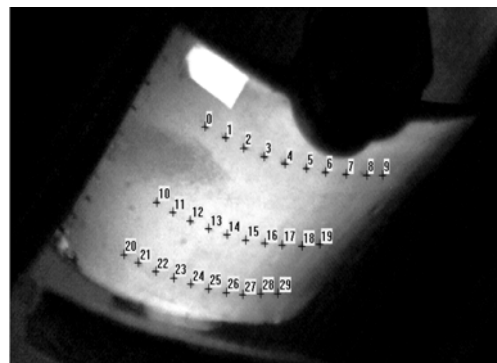


图3 带有标记点的参考图像

Fig. 3 Referenced picture with marked points

在吹风状态下,叶片会由于振动而在图像采集过程中产生位移现象,导致参考图像与吹风图像不匹配,进而导致测量误差增大。因此,在被测

叶片吸力面的90%,50%以及10%三个叶高位置各设有10个标记点(如图3为带有标记点的参考图像),每一叶高处的标记点弦向坐标相同,以便在图像处理中进行图像的匹配处理,消除由于振动而引起的测量误差。

压力敏感涂料测压技术是一种全新的测压技术,国内有关PSP测量技术在内流场测量研究的相关报道较少。为了进一步考核PSP测量技术的测量精度,同时不破坏实验叶片表面的压敏涂层,在另一叶片吸力面的50%叶高处沿着弦向开设有10个静压孔,以便采用传统测压方式——压力扫描阀获取叶片吸力面上的表面压力分布。

2.3 实验方案

实验是在西北工业大学翼型、叶栅空气动力学国防科技重点实验室的高亚声速叶栅风洞中进行的。该风洞及相应的测量系统已经过大量的吹风实验,测量精度与准确度是有一定保证的。

在PSP实验测量中,需要尽可能增大光源、相机与模型表面的正交性,从而保证完成实验并取得较好的测量结果,图4为实验光路示意图。由于叶栅稠度较大且空间狭小,需要不断调试相机、光源与模型之间的相对位置,从而保证相机能拍摄到全叶高图像,同时避免由于叶片表面弯曲和光照不均匀而出现的局部光照饱和的现象(图5)。根据PSP测量原理,在未吹风状态下获取叶片表面所发出的荧光强度应该相同,即为同一灰度值(同一色彩)的图像。然而,由于激发光源以一定角度照射到叶片表面,距离光源较近的叶片尾缘处光照过强,导致附近局部区域出现光照饱和和现象(图5中的黑色区域),其灰度值超出相机分辨范围;如果将激发光源离远一些,该区域的光照强度将有所减弱,但同时也使得叶片前缘处的光

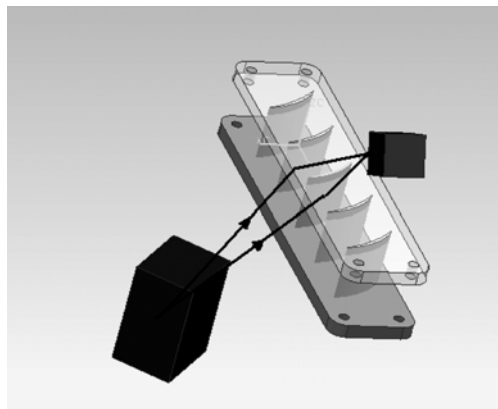


图4 实验光路图

Fig. 4 Light path

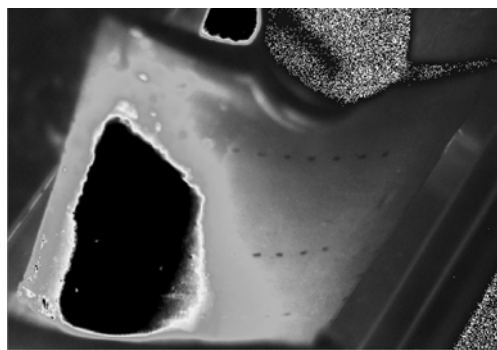


图5 局部光照饱和现象

Fig. 5 Picture of local high luminescence intensity

照强度也随之减弱。根据以前研究基础^[18],当激发光强度太弱时,压敏涂料中的光敏分子不会被全部激发,导致压敏涂料的对压力变化的分辨率下降。

经过大量的计算机模拟及现场调试,最终确定将光源放置在风洞出口斜下方,而相机放在风洞一侧。此时风洞出口方向为斜上方,不会对光源产生冲击;激发光以及CCD相机可以覆盖整个叶片吸力面;同时,激发光与CCD相机几乎90°的相对位置也避免了激发光、反射光对采集图像的干扰。实验布置图如图6所示。



图6 实验现场布置图

Fig. 6 Picture of experiment

经过多次实验发现,在实验攻角为正攻角或负攻角较小时,相机不能拍摄到叶片全域,因而实验攻角取为 -10° 。实验来流马赫数分别为0.4和0.5,实验时叶片表面温度满足PSP温度要求。两个来流条件下分别采集20张吹风图像,以便在后期PSP图像处理中进行系统平均以减少系统所产生的误差;停止吹风后采集20张参考图像;关闭光源并盖上相机镜头盖,采集相机黑背景暗电流图像,以便在后期图像处理中消除暗电流噪声。

随后,在相同的来流条件下,采用压力扫描阀采集叶片吸力面 10 个测压孔的静压,以便对压敏测量结果的测量准确度以及精度进行对比.风洞吹风实验完后,立即进行 PSP 的校准实验.

3 PSP 图像处理及实验结果

获取吹风实验的叶片表面的荧光图像以及压敏涂料的校准曲线后,根据 PSP 测压原理——Stern-Volmer 关系式,需进行吹风图像与参考图像之间的对比运算才得到模型表面的全域压力分布.在进行图像处理过程中,应尽可能的剔除图像中的噪声信号. PSP 测量技术中图像处理的流程为:①分别对参考图像与吹风图像进行多张图像的平均运算,以消除实验的系统误差;②对参考图像与吹风图像分别进行相机暗电流与背景光的消减和滤波,消除相机本身电流噪声的影响;③对成像设备进行非线性响应校正;④经过对标记点的对比,发现参考图像和吹风图像之间大概有 10 多个像素的偏移.因此,以所选取的 30 个标记点为参考,进行吹风图像与参考图像的图像对准处理,消除由于叶片振动所引起测量误差;⑤用参考图像与吹风图像对比,并结合校准曲线,即可得到叶背表面的全域压力分布及压力云图.

来流攻角为 -10° 、来流马赫数分别为 0.4 和 0.5 时,叶片吸力面上的静压分布分别如图 7、图 8 所示,在两幅图的右侧给出了无量纲静压的 Color bar.

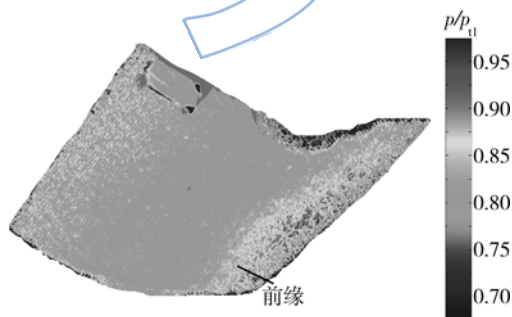


图 7 马赫数为 0.4 时的叶片吸力面静压分布
Fig. 7 Static pressure distribution on suction surface ($Ma=0.4$)

由图 7 与图 8 可以看出,在两个来流马赫数下,扩压叶栅叶片表面静压分布趋势基本相同:气流以较大负攻角进入叶片通道,在叶片吸力面前缘产生冲击,使得前缘附近吸力面上的压力较大;随后气流顺着叶片吸力面进行膨胀加速流动,使

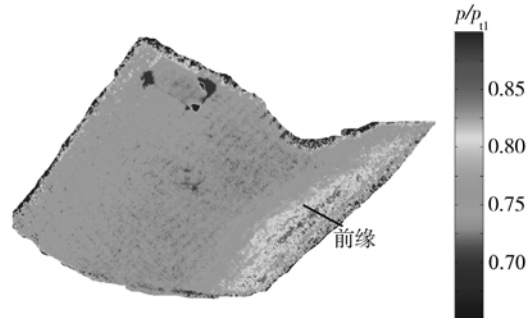


图 8 马赫数为 0.5 时的叶片吸力面静压分布
Fig. 8 Static pressure distribution on suction surface ($Ma=0.5$)

得叶片表面的压力在叶片曲率最大处降到最低,速度达到最大;随后,随着叶栅通道的逐渐扩张,气流速度逐渐减小,叶片表面压力逐渐增大.在叶片的端壁附近,由于端壁区附面层与叶片表面附面层的相互干扰,导致叶片表面靠近端壁区附近区域压力值略有降低.然而,当来流马赫数由 0.4 (图 7)增大到 0.5 (图 8)时,尽管叶片表面最大压力与最小压力位置基本相同,但由于叶栅通道内流速增大,使得叶片吸力面相同位置处的静压值明显减小.

为了进一步检验叶栅风洞叶片表面的压力测量的精度,可从图 7、图 8 读取叶片表面静压孔处相应像素点的表面静压值,与叶栅风洞配备的 20 通道压力扫描阀所测量的有限测点处静压值进行定量比较.两种测量方法得到的压力值如图 9 所示,图中横坐标为相对弦长,纵坐标为无量纲静压.由图中可以看出:来流马赫数为 0.4 (图 9(a))时,叶片吸力面最大无量纲压力为 0.9,而最小无量纲压力为 0.82,气流在叶片表面先后经历加速与减速过程,但由于来流马赫数较低,叶片表面静压变化范围相对较小;图 9(b)中,随着来流速度提高到马赫数为 0.5,叶片表面静压值总体减小,但压力沿流动方向的梯度增大.两个来流马赫数下,在叶片表面 40% 弦长处, PSP 测量得到叶片表面最低压力与扫描阀测量结果吻合得非常好;由于本实验叶栅为大弯角叶栅,叶片吸力面曲率较大,由于激发光光照的不均匀,导致叶片前缘与尾缘附近的激发光强度相差较大,因此两种测量方法在叶片前缘与尾缘处的压力值差别较大,最大误差为 4.48%;但是随着来流马赫数的提高 (图 9(b)),叶片表面压力梯度增大,压敏涂料对压力的分辨率也随之增强.同时,叶片表面整体压力的下降使得 PSP 涂料所发出的荧光强度增大,

提高了吹风图像的信噪比. 因此, PSP 测压所获得前缘与尾缘附近的压力值与扫描阀所获结果之间的差距随着来流马赫数的增加而逐渐减小.

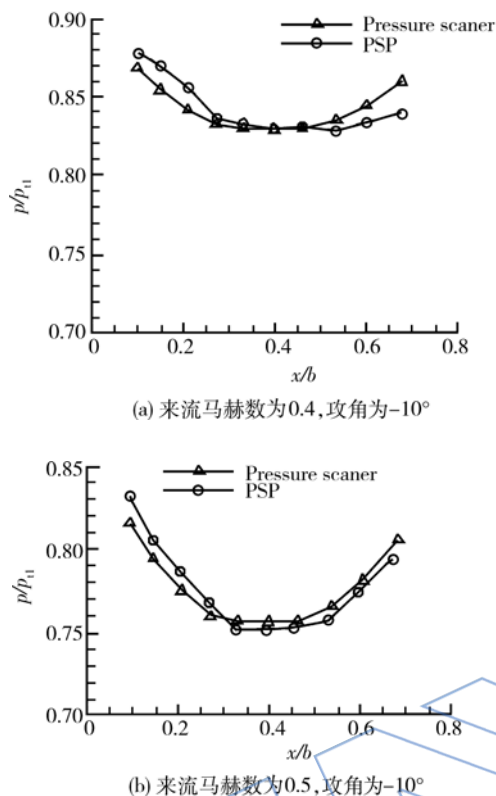


图9 50%叶高处PSP测量结果与压力扫描阀结果对比

Fig. 9 Contrasted curve between the result of PSP and pressure scanner on measurement hole at 50% span

4 结 论

光学压力敏感涂料测量技术具有传统测压手段无法比拟的独特优势, 且已在外流中得到了较为广泛的应用. 本文针对平面叶栅内流场的特点, 采用国产压敏涂料与自行组建的PSP测量系统, 在国内完成了叶栅风洞内大弯角扩压叶栅吸力面的全域压力测量, 并与压力扫描阀测量的压力值进行了比较.

研究结果表明: ①本文采用PSP测量技术, 获得了两个来流马赫数下大弯角扩压叶栅吸力面的全域压力分布, 具有高空间分布率、定量测量的特点; ②与传统测压方法在50%叶高处的结果比较表明, 由于被测表面具有大曲率特点, 使得叶片表面光照强度不均匀, 两种测量方法所获压力值在叶片前缘与尾缘处误差较大, 但叶片中间位置处测量精度较高; 随着来流速度的增大, 前缘与尾

缘处的测量误差逐渐减小; ③叶栅内流场具有几何空间狭小、被测表面曲率大等特点, 因此叶片表面压力的PSP测量需综合考虑振动、光路、光照与拍摄的角度及其覆盖范围等因素.

然而, 由于实验条件所限, 本实验所得数据较少, 距离工程应用具有一定的距离. 基于本文研究工作所掌握的PSP测量技术以及叶栅内流场测量存在的困难, 进一步开拓狭小空间中光路设置的思路, 采用如光纤等解决光照不均、拍摄角度等问题, 以进一步提高测量精度; 另外, 逐步开展叶轮机叶片表面压力的动态测量将是本文研究的下一个研究计划.

致谢:

中国科学院化学研究所高分子物理化学国家重点实验室的金熹高研究员和陈柳生研究员无偿地提供了本文研究所用的压敏涂料, 在此表示衷心感谢.

参考文献:

- [1] 刘波, 周强, 靳军, 等. 压力敏感涂料技术及其应用[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 225-233.
LIU Bo, ZHOU Qiang, JIN Jun, et al. Applications of pressure-sensitive paint technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 225-233. (in Chinese)
- [2] Peterson J I, Fitzgerald R V. New technique of surface flow visualization based on oxygen quenching of fluorescence[J]. Rev. Sci. Instrum., 1980, 51(5): 670-671.
- [3] Sakaue H, Gregory J W, Sullivan J P. Porous pressure sensitive paint for characterizing unsteady flow fields[J]. AIAA Journal, 2002, 40(6): 1094-1098.
- [4] Basu B J, Anandan C, Rajam K S. Study of the mechanism of degradation of pyrene-based pressure sensitive paints[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2003, 94(3): 257-266.
- [5] Bencic T J. Application of pressure-sensitive paint to ice-accreted wind tunnel models[R]. AIAA-2000-0834, 2000.
- [6] Fonov S D, Goss L P, Jones J W, et al. Surface pressure and shear force fields measurements using elastic polymeric film[C]// The 11th International Symposium on Flow Visualization. IN, USA: IOS Press, 2004: 9-12.
- [7] Engler R H, Klein C. DLR PSP system: intensity and lifetime measurements[C]// ICIASF'97 Record, International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities. CA, USA: IEEE, 1997: 46-56.
- [8] Asai K. Status of pressure sensitive paint technology at national aerospace laboratory[C]// 18th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF). Toulouse, France: IEEE, 1999: 15. 1-15. 11.
- [9] Nakakita K, Asai K. Pressure-sensitive paint application to a wing-body model in a hypersonic shock tunnel[R].

- AIAA-2002-2911, 2002.
- [10] Bencic T J. Rotating pressure and temperature measurements on scale-model fans using luminescent paints[R]. AIAA Paper, 98-3452, 1998.
- [11] Lepicovsky J, Bencic T J. Use of pressure-sensitive paint for diagnostics in turbomachinery flows with shocks[J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(4): 531-538.
- [12] Engler R H, Klein C, Trinks O. Pressure sensitive paint systems for pressure distribution measurements in wind tunnels and turbomachines[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, 11 (7): 1077-1085.
- [13] 高丽敏, 王欢, 刘波, 等. 测量系统特性对压敏涂料校准影响的实验研究[J]. *航空学报*, 2010, 31(1): 76-81.
- GAO Limin, WANG Huan, LIU Bo, et al. Experimental of study influence of measurement system characteristics on pressure-sensitive paint calibration[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(1): 76-81. (in Chinese)
- [14] 金熹高, 林勇, 史毅, 等. 一类茈萜生物及其制备方法与应用: 中国, 200610112965. 5[P]. 2008-03-19.
- JIN Xigao, LIN Yong, SHI Yi, et al. The preparation method and application of pyrene derivatives: China, 200610112965. 5[P]. 2008-03-19 (in Chinese).
- [15] 张永存, 邢汉奇, 赵文涛, 等. 光学压力测量技术的应用研究[C]//第六届全国实验流体力学学术会议论文集. 太原: 中国力学学会、中国空气动力学学会, 2004: 388-391.
- ZHANG Yongcun, XING Hanqi, ZHAO Wentao, et al. Application of optical pressure measurement [C]// The Sixth Chinese Conference of Experiments in Fluid Mechanics Papers. Taiyuan: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Chinese Aerodynamics Research Society, 2004: 388-391. (in Chinese)
- [16] 程厚梅, 张永存, 陈柳生. 光学涂层测压技术[C]//2003 空气动力学前沿研究论文集. 北京: 中国空气动力学学会, 2003: 108-115.
- CHEN Houmei, ZHANG Yongcun, CHEN Liusheng. The optical pressure paint measurement technique [C]// 2003 Aerodynamics Former Research Papers. Beijing: Chinese Aerodynamics Research Society, 2003: 108-115. (in Chinese)
- [17] 郑立新, 郝重阳, 刘波, 等. 压力敏感涂料内流场测量系统及涂料校准[J]. *实验流体力学*, 2008, 22(3): 86-93.
- ZHENG Lixin, HAO Chongyang, LIU Bo, et al. Construction of pressure-sensitive paint measurement system and calibration for homemade paint[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2008, 22(3): 86-93. (in Chinese)
- [18] 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.