

文章编号: 1000-8055(2010)12-2704-07

光学压力敏感涂料测量技术及其 在内流场的应用

郑立新¹, 郝重阳¹, 周 强², 刘 波², 陈柳生³, 金熹高³

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

3. 中国科学院 化学研究所, 北京 100190)

摘 要: 介绍了应用基于发光强度的全域压力测量方法进行叶片表面压力分布的一系列实验结果. 在自主建立光学压力测量系统和自主研发国产压力敏感涂料的基础上, 对高亚声速叶栅风洞出口处大弯度孤立叶片吸力面和对转压气机实验平台出口整流叶片吸力面的压力分布进行了测量, 并采用传统电子静压扫描装置在高亚声速叶栅风洞中进行了同步测量. 光学压力测量与电子压力扫描结果的对比表明所建立的光学压力测量系统可用于内流场测量, 其精度达到了工程应用水平.

关 键 词: 压力敏感涂料; 压力测量系统; 光学压力测量; 内流场; 校准

中图分类号: V211.7

文献标识码: A

Application of optical pressure sensitive paint measurement technique in internal flow fields

ZHENG Li-xin¹, HAO Chong-yang¹, ZHOU Qiang²,
LIU Bo², CHEN Liu-sheng³, JIN Xi-gao³

(1. School of Electronic and Information,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A series of experimental pressure measurements inside internal flow fields employing the intensity-based method of pressure sensitive paint technique were depicted based on self-established optical pressure measurement system and indigenously developed pressure sensitive paint. These experimental measurements include the applications inside both the transonic cascade wind tunnel and the nationally unique axial dual counter-rotate compressor facility (ADCCF) of Northwest Polytechnical University (NPU). The test articles involved a single vane of a large bending angle in transonic cascade wind tunnel and the oriented vane inside ADCCF, and both the surfaces of interest were correlated with the suction. The traditional pressure measurement using electronic pressure scanning has been simultaneously conducted in the cascade wind tunnel for comparison. The contrast of both results from optical pressure measurement and electronic pressure scanning has revealed that

收稿日期: 2009-11-20; 修订日期: 2010-02-22

作者简介: 郑立新(1966—), 男, 陕西南郑人, 博士生, 主要从事图像信号处理与测试技术研究.

the feasible application of optical pressure measurement system in internal flow fields and in practical industrial engineering.

Key words: pressure sensitive paint; pressure measurement system;
optical pressure measurement; internal flow fields; calibration

长期以来,对各种流动状态下流场形态与结构的研究分析一直是空气动力学关注的重点.为了验证流场分析及其数学描述的真实性,要求对流场中气流压力、温度和速度等相关参数测量不能影响流场结构和流动状态.对于传统的压力测量手段,这是很难达到的.同时随着对流动认识的不断深入,模型表面和近壁面流场的研究对实验空气动力学提出了更高要求.

自上世纪 80 年代开始,出现了利用高分子聚合物的光致发光现象及其氧“猝熄”效应定量测量表面压力的多学科非接触式光学测量方法——光学压力敏感涂料测量技术,能够更好地适应流场测量的基本要求,且在测量区域、数据表现、经济性和时效性等方面显现出独特的优势^[1-6],更适于内流场和涡轮机械内部的压力测量,并经 20 余年的发展,形成了较为完善的技术体系,进入工程应用.立足于国内现有条件,西北工业大学率先以较为成熟的光强法应用压力敏感涂料开展内流场和涡轮机械内部表面压力测量的应用研究,获得了一定进展,为下一步的研究与应用提供了重要的参考依据和宝贵的经验.

1 国产压敏涂料和光学测量系统的构建

压力敏感涂料及其测量系统是开展光学压力测量的前提和基础.迄今为止,光学压力敏感测量技术尚属高新技术,为西方对华限制出口的技术,组成其测量系统的大功率激发光源和高分辨率的科学级致冷 CCD (charge coupled device) 相机等相关设备曾列入西方发达国家对华限制出口的名单.鉴于外部限制及经费方面的原因,依赖全套引进技术和系统开展研究是不现实的,因此自主建立测量系统是当时唯一出路.

1.1 国产压力敏感涂料

自上世纪 90 年代初,中国科学院化学研究所与中航工业空气动力研究院引进俄罗斯技术的基础上,共同研发了具有自主知识产权的荧光类压力敏感涂料^[2],其主要成份为芘类及其衍生物的荧光探针分子和聚硅氧烷胶的基体材料,并通过

有机溶剂加以稀释混合后,以喷涂的方式覆盖于模型表面,固化形成涂层.通常情况下,涂层包括两层,底层为白色环氧漆,主要用来反射增强紫外激发光和探针分子光致发光强度,顶层为功能涂层,为探针分子和基体材料的蓝色混合物.两层厚度均为 20~40 μm .用于实验研究的压力敏感涂料即为中国科学院化学研究所研发提供的荧光类涂料^[3].其激发波长为 320~390 nm,其中 320~340 nm 为最佳激发波段,受激后发出主峰在 480 nm 左右的蓝色荧光,在 -10~60 $^{\circ}\text{C}$ 范围内涂料的温度敏感度很低.中航工业空气动力研究院曾进行标准大气条件下 0~40 $^{\circ}\text{C}$ 范围内涂料温度校准实验,结果表明该涂料已具备“理想”压力敏感涂料的标准.

1.2 光学压力测量系统的建立

自主建立的光学压力测量系统主要由激发光源、数字成像、图像处理和涂料校准四个分系统组成.可分别实施涂料校准和实验测量.

激发光源分系统选用了美国 Uvitron 公司生产的 Porta-ray 400 型便携式紫外光源,在距灯头 5.08 cm (2 英寸)范围内的近紫外线(UVA)波段照射强度高达 0.5 W/cm²,在涂料最佳吸收谱段也有一定强度的紫外光输出.鉴于该光源属于广谱光源,可见谱段也有较强的光,如不进行滤光处理,会将微弱的蓝色荧光“淹没”于可见光中.为筛选出荧光强度,需要滤除光源中的可见谱段,为此自行设计制造了相对封闭的滤光箱,选用经强化处理的低通滤光片,以保证荧光采集光路的“洁净”.

数字成像分系统移植了粒子成像测速仪(PIV)中的两台 630051 型 Power View 2 M CCD 相机,其空间分辨率为 1600 像素 $\times$ 1200 像素,像素尺寸 7.4 μm $\times$ 7.4 μm ,动态灰度范围 10 位,在 540 nm 处的量子效率为 33%.

图像处理分系统包括图形工作站和专业图像处理软件.图形工作站采用个人计算机;专业图像处理软件以法国 ONERA 适用于压力敏感涂料、温度敏感涂料和红外成像测温等图像数据处理 Afix 2 软件包为工具,并以 MATLAB 语言及其

图像处理工具箱作为必要的补充和辅助手段。

涂料校准分系统主要由密封舱、真空泵、空压泵、高精度正负压压力表、控制开关及其连接导管等组成。鉴于综合考虑,没有为密封舱设置调温和温控装置,不能对压力敏感涂料进行温度校准。对于苾类荧光涂料,因其很低的温度敏感性,仅通过实验环境温度条件下的涂料压力校准即可建立涂料荧光强度与压力值的定量关系。

2 涂料校准

涂料校准是光学压力测量的基础与前提。通过涂料校准不仅可以摸清与掌握涂料特性,而且还可建立光致发光强度与压力值之间的定量关系,同时还起到了检验验证自主建立的光学压力测量系统的性能。

2.1 Stern-Volmer 关系式

按照描述压力敏感涂料光致发光及其氧猝熄效应的 Stern-Volmer 关系^[7-14],发光强度与压力之间的数值关系为

$$I_0/I = 1 + K_{SV} p \quad (1)$$

其中 I 为涂料光致发光强度,下标“0”表示绝对真空条件; p 为静压力。由于式(1)在实际操作过程中很难实现完全真空环境,因此,通常采用 Stern-Volmer 关系的衍生式

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = A(T) + B(T) \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad (2)$$

其中下标“ref”表示作为基准的某一特定压力与温度条件, $A(T)$ 和 $B(T)$ 分别为由实验确定的

且与温度有关的 Stern-Volmer 系数。涂料校准就是在已知的压力与温度条件下,通过压力与发光强度确定 Stern-Volmer 常数 $A(T)$ 和 $B(T)$,以便在实验测量中应用,实现压力的定量转换。需要说明的是,式(2)在实际使用中通常不是以一阶形式出现,而是以二阶甚至是三阶的形式出现。

2.2 涂料的压力校准

由于技术条件限制,涂料校准中采取了真空与正压范围分别校准的实施方案,即以当地大气压力为基准压力值和分界点,分别进行真空范围(10~95.4 kPa)和正压范围(95.4~155.4 kPa)的涂料压力校准,压力间隔分别为 20 kPa(真空)和 10 kPa(正压),并以当地大气压时的涂料试件荧光亮度为度量基准,实时记录涂料校准时当地大气压的数值。各个压力值点处涂料试件的荧光亮度图像分别如图 1 所示。可以发现:随着压力值的不断升高,荧光图像的亮度随之减小,即在涂料校准的压力范围之内,涂料试件能够感应氧压的变化,说明国产荧光涂料能够适应跨声速内流场的压力测量。

以图像局部平均的方法,采用最小二乘拟合依据 Stern-Volmer 关系式建立了涂料荧光强度与压力值之间的定量关系,如图 2 所示。可以发现,所建立的 Stern-Volmer 关系式是二阶的,且其解析式为

$$\frac{p}{p_{\text{ref}}} = 0.3472 - 1.9462 \left(\frac{I_{\text{ref}}}{I} \right) + 2.6022 \left(\frac{I_{\text{ref}}}{I} \right)^2 \quad (3)$$

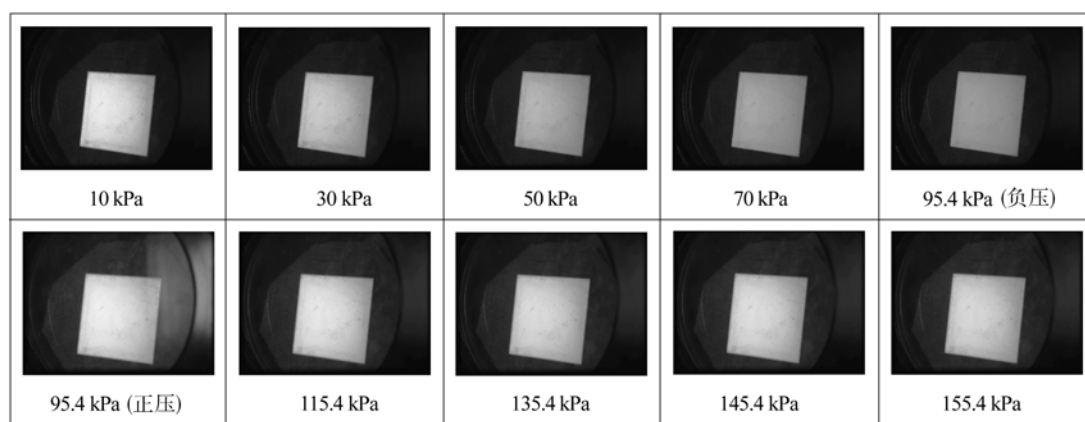


图 1 涂料校准所获得的各压力值点亮度图像

Fig. 1 Intensity image of sample at various pressure values in calibration

由此,所建立的涂料荧光强度与测量表面压力值之间的定量关系就可以用来进行实验测量中的荧光强度至表面压力之间的数值转换.

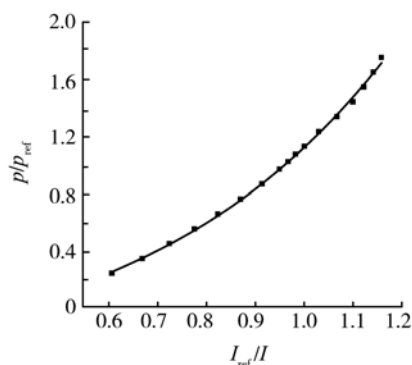


图 2 涂料的校准曲线

Fig. 2 Curve of conversion from intensities to pressures by calibration

3 实验测量

在由涂料校准建立发光强度与压力的定量关系的基础上,分别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平面叶栅风洞和轴流式双排对转压气机实验平台中进行了大弯度直叶片和出口导流叶片吸力面压力分布的实验测量.在高亚声速平面叶栅风洞的实验测量中,还应用传统压力测量手段进行了同步测量,并以此与光学测量结果进行了对比分析.

3.1 大弯度直叶片吸力面压力的测量

大弯度直叶片以插入方式固定于钢制底座上,吸力面上开设有 10×4 个 $\phi 1$ mm 测压孔,分别与叶片顶部 10 个金属细管相通,金属细管可与电子压力扫描阀相通,便于传统压力测量.为保证光路畅通,选择了高亚声速叶栅风洞实验工作段出口处作为实验段,将叶片底座固定于风洞出口下导流挡板上.由于该处并非预定实验段,无法获得气流速度,因此进行了风洞的预运转,并在出口处安装了皮托管进行测速,以建立风洞实验段内部气流速度与出口处流速的对应关系,发现当风洞内部马赫数为 0.8 和 0.9 时,出口处气流速度对应马赫数为 0.3 和 0.4.由此,选定出口处气流马赫数为 0.3 和 0.4 作为实验速度条件.

实验时的当地大气压力为 95.4 kPa,当地温度为 15°C ,在叶栅风洞实验工作段出口气流马赫数分别为 0.3 和 0.4 时,各采集了一组实验叶片的实验荧光图像,并应用电子压力扫描装置进行了同步测量.在风洞运转前和停止运转后还分别

采集了一组叶片的参考图像,以便于运用光强法确定叶片吸力面压力分布.

实验测量图像后处理工作是保证测量精度的关键环节,主要运用图像对准方法保证实验图像和参考图像一一对应,消除或抑制因气动载荷而导致的实验叶片在图像中的移动与旋转,还需要对图像进行降噪复原平滑处理.采用专业图像处理软件 Afix 2 和 MATLAB 语言图像处理工具箱实现上述图像处理和校准曲线的拟合以及发光强度与表面压力的转换,得到实验叶片表面连续的压力分布,分别如图 3 和图 4 所示.

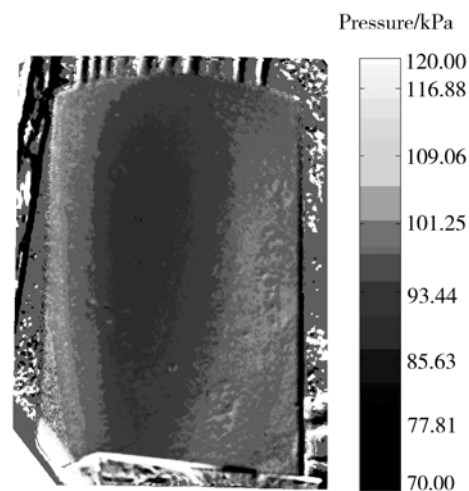


图 3 马赫数为 0.3 和攻角为 20° 条件下叶片压力面压力分布图谱

Fig. 3 Pressure distribution of large camber blade in high subsonic cascade wind tunnel at Mach number of 0.3 and at angle of attack of 20°

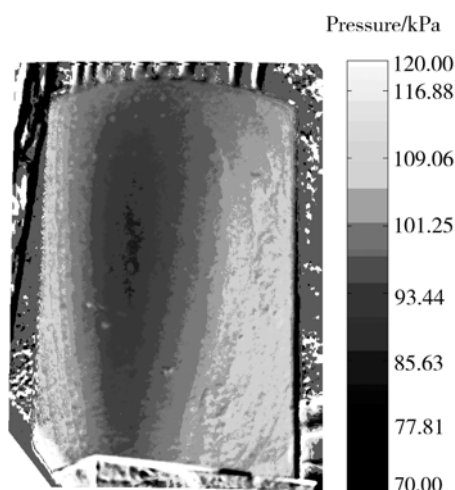


图 4 马赫数为 0.4 和攻角为 20° 条件下叶片压力面压力分布图谱

Fig. 4 Pressure distribution of large camber blade in high subsonic cascade wind tunnel at Mach number of 0.4 and at angle of attack of 20°

两个实验条件下的光学测量与传统压力测量结果对比分别见表 1 和表 2, 可以发现光学测量与传统压力测量结果的相对差值在 5% 以内, 已接近工程应用水平.

3.2 轴流式对转压气机导流叶片吸力面压力测量

对转技术是目前国际上航空发动机先进关键技术之一, 其主要目的是通过改变压气机内部气流组织方式, 在提高和保持压气机压比的同时, 通过取消压气机静子来降低发动机质量, 以显著提高航空发动机推质比.

西北工业大学的轴流式双排对转压气机实验装置为周向进出气流, 内部轴向流动, 最大转速为 8 000 r/min, 设计压比 1.23, 出口导管安装有大小

两个节流阀, 用来调整实验平台的出口反压, 可模拟双排对转压气机在各种设计与非设计状况条件下的工作, 并可进行逼近喘振工作状态的研究和流动形态的观测, 其侧壁开有用于观测的石英光学视窗, 可观察双排旋转叶片与导流叶片. 实验测量中, 当地大气压力值为 98.9 kPa, 温度为 15 ℃. 在涂料校准中以 98.9 kPa 为基准压力值. 通过改变两级转子的转速和转速比, 同时在实验测量过程中动态地调整气流出活门的开度, 以实现不同转速和转速比条件下实验平台内部通道的不同反压. 实验测量与图像后处理结果显示在不同的转速条件下出口导流叶片吸力面压力分布的变化图谱如图 5 和图 6 所示.

表 1 光学压力敏感涂料与静态压力扫描装置测量的压力结果对比 (马赫数为 0.3)

Table 1 Contrast of both results from optical pressure sensitive paint and electronic pressure scanning at Mach number of 0.3

编号	静压扫描 压力/kPa	光学压力敏感涂料 测量压力/kPa	相对误差/ %
1	99.28	97.78	-1.51
2	95.74	91.57	-4.36
3	93.73	90.34	-3.61
4	89.91	89.19	-0.80
5	86.26	85.44	-0.95
6	86.68	85.71	-1.11
7	86.94	86.31	-0.73
8	87.92	88.57	0.74
9	89.76	89.95	0.22
10	90.91	91.62	0.78

表 2 光学压力敏感涂料与静态压力扫描装置测量的压力结果对比 (马赫数为 0.4)

Table 2 Contrast of both results from optical pressure sensitive paint and electronic pressure scanning at Mach number of 0.4

编号	静压扫描 压力/kPa	光学压力敏感涂料 测量压力/kPa	相对误差/ %
1	101.43	101.35	0.08
2	95.78	95.237	0.57
3	93.33	93.358	-0.03
4	87.42	89.08	-1.90
5	81.52	85.586	-4.99
6	82.18	8.4685	-3.05
7	82.66	83.289	-0.76
8	84.65	85.819	-1.38
9	87.55	88.154	-0.69
10	88.63	92.577	-4.45

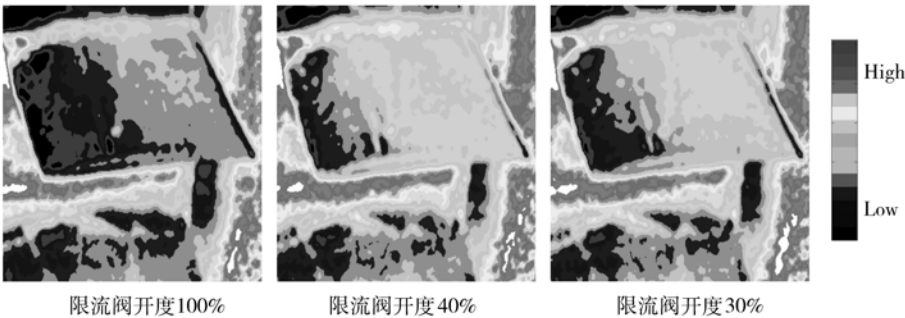


图 5 双排旋转叶栅转速 6 400 r/min 条件下不同限流阀开度的压力分布伪彩色比图像
Fig.5 False-color pressure distribution of guide vane in axial dual counter-rotating compressor facility at rotation speed of 6 400 r/min with the zero speed difference of each stage and at various positions of air outlet control valve

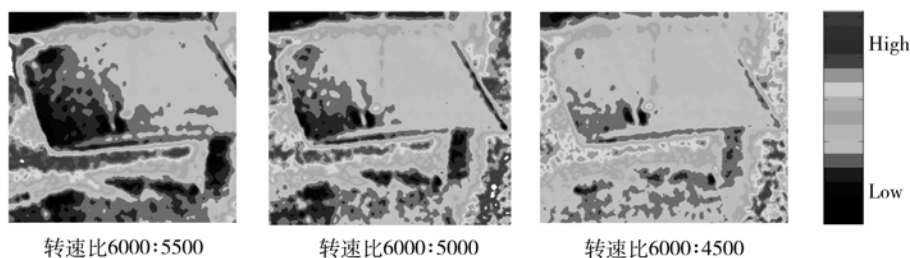


图 6 双排旋转叶栅在不同转速比状态下(100%限流阀开度)的压力分布伪彩色比图像

Fig. 6 False-color pressure distribution of guide vane in axial dual counter-rotating compressor facility at rotation speed of 6 400 r/min with the given speed difference of each stage and at maximum air mass flux of air outlet control valve

实验测量与图像后处理结果表明可以通过光学压力敏感涂料的应用直观和形象地展示整流叶片吸力面压力分布的变化情况. 在实验测量过程中, 整流叶片表面和视窗玻璃随时存在着受到杂质污染的可能性, 由此会引起激发光照射发生畸变, 导致涂料层所发荧光发生相应变化, 对测量结果有一定的影响. 当气流速度逐渐减小, 叶片表面荧光亮度减小, 引起图像信噪比下降, 同时叶片表面压力梯度减小, 超出了涂料层的分辨能力, 使得叶片表面压力分布云图所表现的层次变化降低, 两种因素综合作用, 导致总的测量精度有所下降.

4 结 论

依托西北工业大学翼型叶栅空气动力学国防科技重点实验室现有条件, 以设备移植、外购和自制相结合的方式, 建立了适于内流场的光学压力测量系统, 通过涂料校准检验和验证了光学测量系统的有效性和可信度. 在涂料校准的基础上, 率先在高亚声速平面叶栅风洞和轴流式双排对转压气机实验平台中进行了大弯度直叶片和出口导流叶片吸力面的压力测量, 并在高亚声速平面叶栅风洞的实验测量中应用传统压力测量手段进行了同步测量. 平面叶栅风洞中光学测量与传统压力测量结果相对误差小于 5%, 已满足工程化应用的基本要求, 反映了较为雄厚的发展前景; 进行了不同转速和节流阀开度下对转压气机实验装置导流叶片吸力面的压力分布测量, 形象直观地显示了叶片吸力面压力分布图谱. 一系列涂料校准和光学测量尝试表明: 所建立的光学测量系统可基本满足内流场研究的需求, 所开展的研究提供了宝贵的实验依据和实践经验, 为下一步工作和在内流场的工程化应用奠定了必要的基础.

5 存在困难及今后工作方向

压力敏感涂料测量技术是跨学科的综合应用技术, 需要研究者在有机化学、光物理学、微电子学、图像处理技术、光学和摄影测量学等学科具有较为坚实的知识基础, 而国内学科划分较为细致, 不利于综合性技术研究的开展; 另外由于国内研究起步较晚, 与压力敏感涂料测量技术有关的微电子技术、图像处理技术、摄影测量学等方面差距较大, 尤其在高分辨的科学级 CCD 相机、压力敏感涂料和专业图像处理软件等关键技术与设备上, 主要依赖于引进, 成本较高, 极大地制约了国内研究工作的进展.

对于内流测量而言, 对旋转部件表面压力分布的测量具有极大的挑战性, 也是今后研究工作的主要方向. 国内现有的测量系统性能不能满足高速旋转部件表面压力分布测量的需要, 主要是在保证图像高信噪比的条件下, 科学级 CCD 相机时间积分特性与部件高速旋转所对应的较短采集时间之间存在的矛盾^[4]. 此外, 适于内流测量的较宽温度范围压力敏感涂料的研发^[15-16]、基于摄影测量学的压力分布三维匹配技术的实现以及基于发光寿命的压力敏感涂料测量技术的研究与应用将是今后较长一段时期内研究工作的主要方向.

致谢:

本文所涉及的研究内容得到了国家自然科学基金资助, 以及各方面无私的帮助与鼎力支持和关注. 研究所用的荧光压力敏感涂料是中国科学院化学研究所高分子物理化学国家重点实验室无偿地提供, 测量系统的构建和研究的实验部分得到了西北工业大学翼型叶栅空气动力学国防科技重点实验室朱柱国研究员和赵旭民高级工程师

的全力支持和无私帮助,在此由衷地表示感谢.

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):2325-2333.
LIU Bo,ZHOU Qiang,JIN Jun,et al. Applications of pressure-sensitive paint technique[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(2):2325-2333. (in Chinese)
- [2] 金熹高,林勇,史毅,等. 一类茈萜衍生物及其制备方法与应用:中国,200610112965.5[P].
- [3] 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:中国力学学会和中国空气动力学学会,2004:388-391.
- [4] Liu T, Sullivan J P. Pressure and temperature sensitive paints[M]. New York:Springer,2005.
- [5] Fonov S D, Goss L P, Jones G E, et al. New method for surface pressure measurements [R]. AIAA 2005-1029, 2005.
- [6] Volan A, Alafi L. New optical pressure measurement system[C]// Proceedings of IEEE 14th International Congress of Instrumentation in Aerodynamic Simulation Facilities (ICIASF). New York:IEEE,1991:10-16.
- [7] Kammeyer M E, Kelble C A, Donovan J F, et al. Recent improvements in pressure-sensitive paint measurement accuracy at Boeing[R]. AIAA-2002-2907,2002.
- [8] Bencic T J. Calibration of detection angle for full field pressure-sensitive paint measurements[R]. AIAA-2001-0307, 2001.
- [9] Kimura F, Khalil G, Zettsu N, et al. Dual luminophore polystyrene microspheres for pressure-sensitive luminescent imaging[J]. Measurement Science and Technology,2006,17(6):1254-1260.
- [10] Baumann P D. Investigation of pressure and temperature sensitive of a pressure sensitive paint[D]. Monterey, California:Naval Postgraduate School,1998.
- [11] Bencic T J. Development of advanced optical instrumentation for use in the NASA Glenn icing research tunnel[R]. Reno,NV;39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2001.
- [12] Gahagan S G. Pressure-sensitive paint measurements on a rotor disk surface at high speeds[D]. Monterey, California:Naval Postgraduate School,1997.
- [13] Liu T,Guille M,Sullivan J P. Accuracy of pressure sensitive paint[J]. AIAA Journal,2001,39(1):103-112.
- [14] Woodmansee M A,Dutton J C. Treating temperature-sensitivity effects of pressure-sensitive paint measurements [J]. Experiments in Fluids,1998,24(2):163-174.
- [15] 肖亚克,马洪志,张孝棣,等. 光学压力敏感涂料的研制[J]. 传感器技术,2003,22(4):29-32.
XIAO Yake,MA Hongzhi,ZHANG Xiaoli,et al. Preparation of optical pressure sensitive paint [J]. Journal of Transducer of Technology,2003,22(4):29-32. (in Chinese)
- [16] 蒋峰芝,许认,王夺元,等. 气动力压敏漆发光特性研究[J]. 感光科学与光化学,1999,17(4):309-314.
JIANG Fengzhi,XU Ren,WANG Duoyuan,et al. Luminescent characteristic of novel aerodynamic pressure sensitive paint[J]. Photographic Science and Photochemistry,1999,17(4):309-314. (in Chinese)