

# 压力敏感涂料特性及其校准技术实验研究

李国帅<sup>1</sup>, 周强<sup>1,\*</sup>, 刘祥<sup>1</sup>, 金毕青<sup>2</sup>, 高丽敏<sup>3</sup>, 马护生<sup>1</sup>, 熊健<sup>1</sup>

1. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000
2. 武汉工程大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430073
3. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072

**摘要:** 精细化的校准技术和涂料特性研究是影响压力敏感涂料(PSP)测量技术测量精度及其工程应用的重要因素。为此以 PSP 地面实验测量系统为主要平台,进行了国产 PSP 的静态校准和光降解实验,基于自主编制的 PSP 静态校准图像后处理程序研究了 PSP 压力、温度灵敏度之外所展现出的重要特性。研究结果表明:一定压力范围内,PSP 的 Stern-Volmer 响应曲线呈现出较为明显的非线性,在校准中应采取高阶 Stern-Volmer 关系式进行拟合;在均匀压力和温度下,不同样片区域的校准结果呈现出空间不均匀性,这种不均匀性会影响 PSP 的校准精度;PSP 存在光降解效应,其降解曲线在一定时间内近似为线性。同时,本文还简要分析了其产生机理以及对 PSP 测量精度的影响,初步提出了相应的评估指标及改进措施。

**关键词:** 压力敏感涂料; 静态校准; 涂料特性; 压力响应非线性; 空间不均匀性; 光降解

中图分类号: V211.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2013)02-0227-08

压力敏感涂料(Pressure Sensitive Paint, PSP)测量技术是一种基于高分子聚合物光致发光过程和动态氧猝灭效应的新型光学非接触式压力测量方法。自 20 世纪 80 年代提出以来,以其技术优势和巨大的发展前景,受到了世界各国航空航天领域的广泛关注和深入研究。目前,美国、俄罗斯和欧洲等航空航天大国在 PSP 测量技术应用研究方面已十分成熟,在各类大型生产型风洞中建立了先进的 PSP 测量系统<sup>[1-7]</sup>。90 年代末以来,国内 PSP 测量技术经过多年的努力已经取得了长足的进展,中航空气动力研究院、航空气动力技术研究院以及西北工业大学等单位开展了大量的工程应用与基础研究工作,极大地推动了 PSP 测量技术的发展<sup>[8-11]</sup>。

涂料校准是 PSP 测压的基础和关键环节,而精细化的涂料特性研究对于提高 PSP 测量精度具有重要意义。国外相关研究机构和大学,如:美国国家航空航天局(NASA)兰利中心、阿诺德中心、格林中心以及英国曼彻斯特大学等均建立了较为先进的 PSP 校准系统,并基于涂料校准系统开展了大量的工作,研究了涂料压力与温度敏感特性<sup>[12]</sup>以及相机视角、滤光片组合方式、温度效应和自猝灭效应等因素<sup>[13-17]</sup>对涂料特性的影响。美国 Boeing 公司<sup>[18]</sup>以 PSP 校准装置为实验平台,研究了上百种涂料的特性,建立了较为完善的涂料特性评价标准与评估体系。

目前,从公开发表的文献来看,国内的涂料特性研究主要集中在压力灵敏度和温度灵敏

收稿日期: 2012-02-23; 退修日期: 2012-04-05; 录用日期: 2012-05-07; 网络出版时间: 2012-06-08 15:55

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120608.1555.003.html

基金项目: 国家自然科学基金(11172316)

\* 通讯作者. Tel.: 0816-2462463 E-mail: zhouqiang6604@163.com

引用格式: Li G S, Zhou Q, Liu X, et al. Experimental research of pressure sensitive paint performance and calibration technique. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 227-234. 李国帅,周强,刘祥,等. 压力敏感涂料特性及其校准技术实验研究. 航空学报, 2013, 34(2): 227-234.

度<sup>[8,11]</sup>,涂料校准实验的图像后处理一般采用法国 ONERA Afix2 等国外图像处理软件<sup>[19-20]</sup>。

本文基于自主编制的 PSP 静态校准程序,通过 PSP 静态校准和光降解实验深入研究了涂料压力与温度敏感度之外所呈现出的压力响应非线性、校准空间不均匀性以及光降解等重要特性,并简要分析了其产生机理以及对 PSP 测量精度的影响,初步提出了相应的评估指标与改进措施。

## 1 实验原理及方案

PSP 受到一定波长光源照射时,涂层中的探针分子会受到激发,进入电子激发态,并通过发射波长更长的光来耗散所吸收的能量,同时,激发态的探针分子与空气中渗透进入涂层并在其中扩散的氧分子相碰撞,转移所吸收的能量,回到基态。上述过程被称为 Stern-Volmer 过程<sup>[21]</sup>,而描述这一过程的关系式则为 Stern-Volmer 关系式。Stern-Volmer 关系式描述了空气压力  $p$  与探针分子发光强度  $I$  之间的定量关系。工程应用中,一般采用一阶线性 Stern-Volmer 关系式:

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

式中: $I_{\text{ref}}$ 为参考状态的发光强度; $p_{\text{ref}}$ 为参考状态的的压力值; $A(T)$ 、 $B(T)$ 为 Stern-Volmer 常数,与温度有关。

静态校准是获取涂料 Stern-Volmer 响应曲线的主要方法。通常,根据预先确定的压力和温度范围,分别采集某一特定温度下不同压力值点处的校准样片发光图像,完成涂料的压力与温度校准。

本文采用中国科学院化学所研制的国产 PSP,主要技术参数如表 1 所示。该型涂料温度敏感度较低,可以不考虑其温度效应。在实验中,涂料样片为 2 个  $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的方形铝片,完成喷涂后在通风干燥的暗室放置 24 h 进行涂料固化。针对常规跨超声速风洞测压实验,校准压力  $p_{\text{cali}}$  变化范围为  $10 \sim 120 \text{ kPa}$ ,压力间隔为  $10 \text{ kPa}$ ,整个校准工作在室温下完成。校准实验完成后,将另一个样片放入校准箱,保持激发光源一直照射,每隔  $10 \text{ min}$  采集一次发光图像,研究涂料的光降解特性。为了降低图像噪声,校准实验和光降解实验中每个采集点均采集 40 幅图像以进行平均运算。

表 1 PSP 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of PSP

Excitation/ nm	Emitted/ nm	Temperature range/ $^{\circ}\text{C}$	Rspnse time/ms	Temperature coefficient/ $^{\circ}\text{C}$
300-400	425-550	-20-60	500	-0.3%

## 2 校准系统及图像后处理程序

以西北工业大学自主建立的 PSP 校准系统为主要平台<sup>[14-15]</sup>,校准系统主要由校准箱、压力测控模块、激发光源及图像采集系统组成,如图 1 所示。激发光源采用美国 Uvitron 公司生产的 Porta-ray 400 型便携式紫外光源,前置滤光暗箱。图像采集设备采用 TSI 公司 630051 型自相关/互相关科学级 CCD 相机,10 位灰度(图像处理中扩展为 16 位),可安装在三维坐标立体定位机构上进行精确定位。校准系统的主要技术指标如下:压力范围为  $0.05 \sim 0.50 \text{ MPa}$ ;压力控制误差  $\leq 100 \text{ Pa}$ ;CCD 相机空间分辨率为  $1\,200 \times 1\,600$ ;光学视窗透射率  $\geq 80\%$ 。

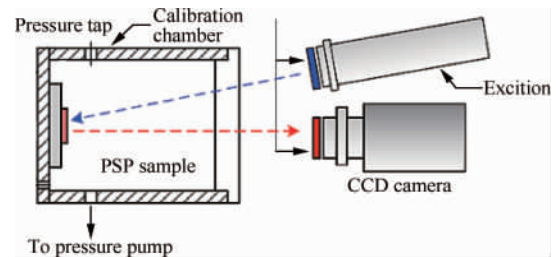


图 1 PSP 静态校准测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of PSP static calibration system

自主编制的 PSP 静态校准图像后处理程序流程图如图 2 所示。实验结果表明,一些随机因素或操作失误会导致采集的某些 PSP 图像为跳点,为无效采集图像,在图像处理过程中应予以剔除。图 3 为  $p_{\text{cali}} = 90 \text{ kPa}$  时 40 幅校准图像的平均强度变化曲线,显然,中间的 6 幅为跳点。

相比于 Afix2、ISSI OMS Calibration 等校准软件,本程序增加了无效采集图像剔除、校准空间不均匀性分析及涂料特性研究等功能模块,具有较好的适用性。同时,获得的校准曲线与 Afix2、ISSI OMS Calibration 校准结果相比一致性较好,验证了程序的可靠性。

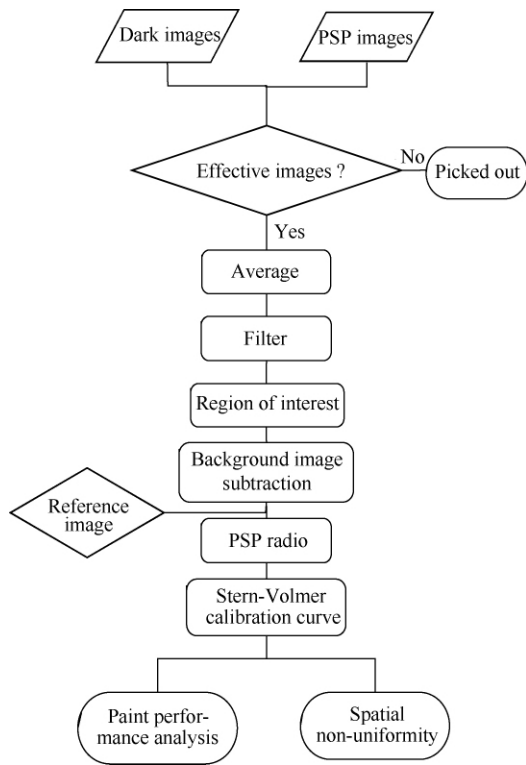


图2 PSP 静态校准程序流程图

Fig. 2 Flowchart of PSP static calibration program

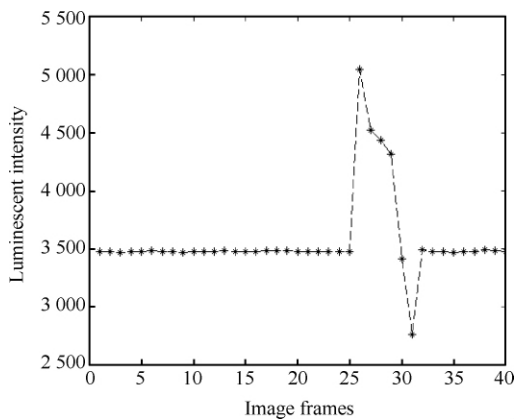


图3  $p_{cali} = 90$  kPa 时校准图像平均强度变化曲线

Fig. 3 Average intensity curve of calibration images at  $p_{cali} = 90$  kPa

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 压力非线性响应特性

静态校准数据按照图 2 所示的图像后处理流

程进行计算即可得到最终的 Stern-Volmer 响应曲线。图 4 给出了利用不同阶数 ( $n = 1, 2, \dots, 6$ ) 的 Stern-Volmer 关系式拟合得到的校准曲线及其残差(RMS)信息。

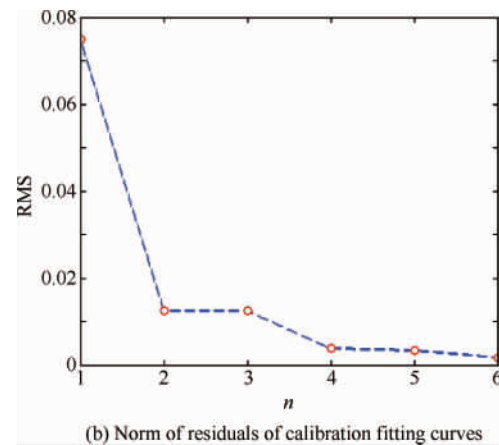
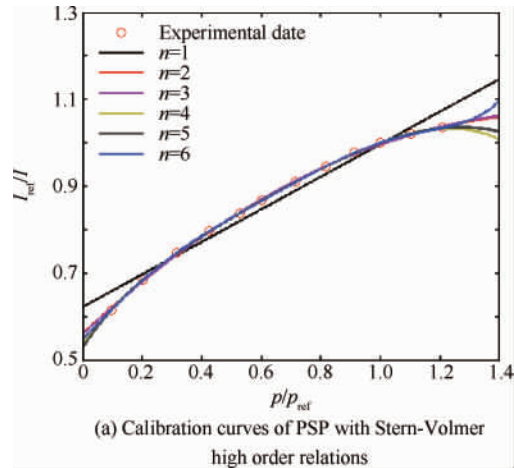


图4 PSP 校准曲线及其残差信息

Fig. 4 Calibration curves and residuals information of PSP

显然, Stern-Volmer 线性关系式拟合得到的校准结果精度较差,尤其在低压区 and 高压区明显偏离了线性拟合曲线。同时,三阶和四阶 Stern-Volmer 关系式的拟合残差范数仅为 0.012 和 0.003, 已可满足工程应用要求,更高阶的 Stern-Volmer 关系式增加了数据处理的复杂程度,对校准精度的提高并不明显。

基于 PSP 光化学基本测量原理分析可知,不同压力下涂层内的氧分子和激发态光敏分子浓度不同,光致发光和氧猝灭光化学反应速率会随着压力的变化而变化,从而引起涂料压力响应的非线性。同时,实验中采用的紫外光源激发频谱较

宽,按照 Beer-Lambert 定律<sup>[17,21]</sup>,每个窄的激发频谱对涂料激发产生荧光的过程可以近似看做线性,按照叠加原理,最终所获得的校准曲线也会呈现出非线性。当被测压力范围较大, Stern-Volmer 响应曲线呈现较为明显的非线性时,须用高阶 Stern-Volmer 关系式进行描述,即

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = \sum_{k=0}^n A_k(T) \left( \frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^k \quad (2)$$

式中:  $n$  为多项式形式的高阶 Stern-Volmer 关系式阶数;  $A_k$  为相应的 Stern-Volmer 系数。

基于上述分析,可以采用 Stern-Volmer 曲线  $p/p_{\text{ref}}=1$  处的二阶导数来衡量涂料压力响应非线性程度,即

$$\text{NL} = -f'' \left( \frac{p}{p_{\text{ref}}} \right) \Big|_{\frac{p}{p_{\text{ref}}}=1} \quad (3)$$

式中:  $f$  为式(2)的 Stern-Volmer 关系式。

NL 反映了 Stern-Volmer 曲线的凸凹程度,可以作为描述涂料压力响应非线性程度的重要指标。NL 越大说明 Stern-Volmer 曲线非线性越明显,响应曲线为线性时,  $\text{NL}=0$ 。对于本次实验,采用二阶 Stern-Volmer 曲线进行拟合时,  $\text{NL}=0.405$ 。

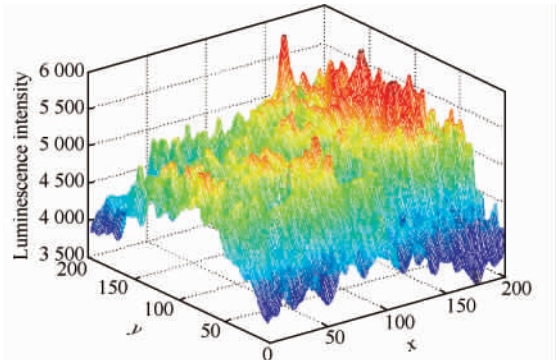
当 Stern-Volmer 曲线呈现出非线性时,涂料的压力灵敏度和压力分辨率会随着压力的改变而变化,从而导致不同压力之间测量误差产生一定的差异,同时也缩小了涂料的有效测压范围。工程应用中,可以通过调整测量系统如增强入射光强度、选用频谱较窄的光源滤光片等来减小涂料的压力响应非线性程度。

值得注意的是,从图 4(a)中可以发现,高阶 Stern-Volmer 校准曲线在校准压力范围之外出现了截然不同的变化趋势,四阶形式甚至出现了随着压力的增高,光强比变小的趋势,不符合 PSP 的压力响应规律。可见,多项式形式的 Stern-Volmer 关系式可以作为提高校准精度的一种数据处理方法,但并不能完全描述 PSP 的非线性压力响应特性。所以,在利用多项式形式的 Stern-Volmer 非线性关系式进行校准数据处理时,应尽量避免数据外插,而 PSP 非线性响应的数学模型有待进一步的研究与完善。

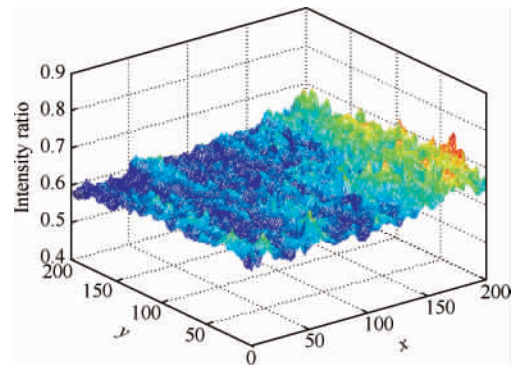
### 3.2 空间不均匀性

基于光强法的 PSP 测量技术通过实验状态

和参考状态发光图像的比运算来消除激发光强度、涂层厚度以及探针分子浓度分布不均匀造成的测量误差。图 5 给出了样片表面 PSP 发光强度与光强比的对比。



(a) Luminescence intensity distribution of PSP sample at  $p_{\text{cali}}=10$  kPa



(b) Intensity ratio distribution of PSP sample at  $p_{\text{cali}}=10$  kPa

图 5 样片表面 PSP 发光强度与光强比的对比

Fig. 5 Comparison between luminescence intensity and intensity ratio of PSP sample

图 5(a)为校准压力  $p_{\text{cali}}=10$  kPa 时样片表面 PSP 发光强度分布图像,从图中可以发现,涂料发光强度在 3 503~5 760 起伏变化,且变化幅度较大。喷涂过程中,样片表面的涂层厚度以及探针分子浓度存在一定的不均匀性,同时,激发光由于照射视角及自身强度分布特点也存在着一定程度的不均匀性,这些因素造成均匀压力和温度下样片表面 PSP 发光强度的不是一个定值,具有不确定性。

图 5(b)为校准压力  $p_{\text{cali}}=10$  kPa 时样片校准的光强比图像,从图中可以发现,光强比分布相比与发光强度分布更加均匀,校准压力  $p_{\text{cali}}=10$  kPa 时样片表面的光强比基本保持在 0.62 左右。



假设涂料试件表面有  $N$  个像素点, 对应的光强(比)分别为  $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ , 为了进一步对比涂料发光强度和光强比分布的不均匀度, 定义无量纲和归一化的光强(比)不均匀度 (Spatial Non-uniformity) 为

$$SN = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} = \frac{\left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i} \quad (4)$$

即光强(比)分布标准差  $\sigma_x$  与平均值  $\bar{x}$  之比。

校准压力为 10 kPa 时, 涂料发光强度的不均匀度 SN 为 0.074, 光强比不均匀度为 0.036。显然, 选择大气压条件下的发光强度图像为参考图像, 经过比运算得到的光强比图像有效抑制了激发光强度、涂层厚度以及探针分子浓度分布不均匀带来的影响。

但是, 从图 5 中也可以看出, 恒定压力和温度下, 基于光强法得到的光强比图像仍然存在一定的空间不均匀性。

图 6 给出了校准压力为 80 kPa 时的光强比图像, 将光强比图像划分网格如图所示。网格大小分别为  $1 \times 1, 5 \times 5, 10 \times 10, 20 \times 20, 25 \times 25$  的像素区域。

图 7 为光强比图像空间不均匀度随压力的变化曲线, 其中空间不均匀度用各个网格光强比的均方根标准差来衡量。显然: 光强比空间不均匀度随着压力的增强先变小后变大, 在接近大气压的压力范围内达到最小; 同时, 所选网格区域越大, 光强比越均匀。

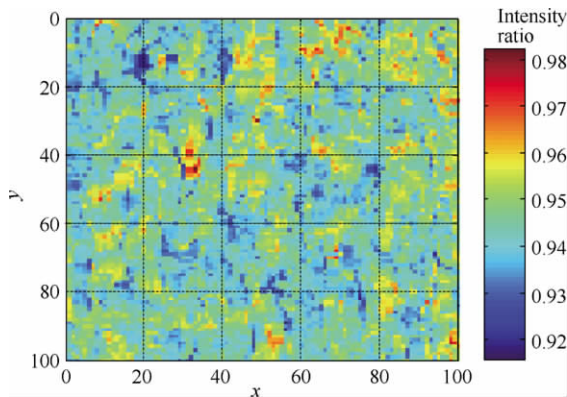


图 6  $p_{\text{cali}} = 80 \text{ kPa}$  时样品 PSP 光强比分布图

Fig 6 Intensity ratio distribution of PSP sample at  $p_{\text{cali}} = 80 \text{ kPa}$

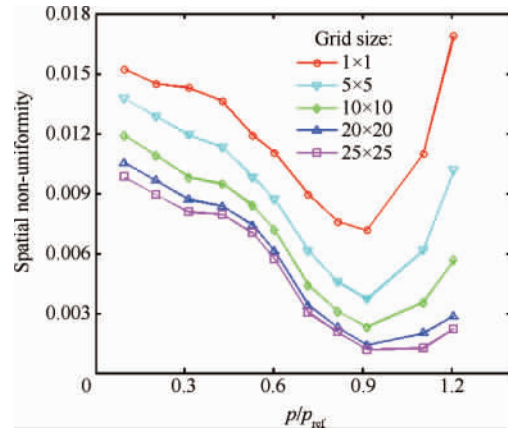


图 7 光强比图像空间不均匀度随压力的变化曲线

Fig 7 Intensity ratio image spatial non-uniformity vs pressure

压力偏离大气压越远, 校准箱内外压差越大, 校准箱内的压力分布也就越不均匀, 所以, 样片表面压力分布均匀度随着压力的增高先变小后变大, 在大气压附近达到最小。同时, 随着压力的增高, 涂料发光强度变弱, 信噪比变差, 也会增大光强比图像的空间不均匀度, 而增大邻域平均的网格区域可以降低 CCD 噪声, 从而较小这种空间不均匀度。喷涂质量对 PSP 特性也有一定的影响。

基于上述的分析可知, 造成这种空间不均匀性的主要原因如下:

- 1) 校准箱气密性或稳压时间不够造成的样品表面压力分布不均匀。
- 2) CCD 采集过程中随机分布的各种噪声如暗电流、高斯噪声等。
- 3) 喷涂不均匀造成的 PSP 响应特性变化, 如探针分子局部浓度过高会使 PSP 产生自猝灭现象<sup>[15]</sup>。

由式(1)可得:

$$\Delta \frac{p}{p_{\text{ref}}} = \frac{1}{B} \Delta \frac{I_{\text{ref}}}{I} \quad (5)$$

由式(5)易知, 光强比的测量误差对压力测量误差有较大影响。工程应用中, 为了保证校准精度, 须采取相应措施如提高校准容器的气密性与涂料喷涂质量、采用精细化的滤波方法等, 从而将校准的空间不均匀度降至最低限度。

### 3.3 光降解

压敏涂层中的一部分激发态探针分子会经历

不可逆的永久性光化学过程,失去再辐射荧光的能力,使得 PSP 恒定压力下的发光强度产生降解趋势。

图 8 给出了大气压环境下 PSP 发光强度随时间的变化曲线。显然:PSP 存在光降解特性,其降解曲线在一定时间内近似为线性。

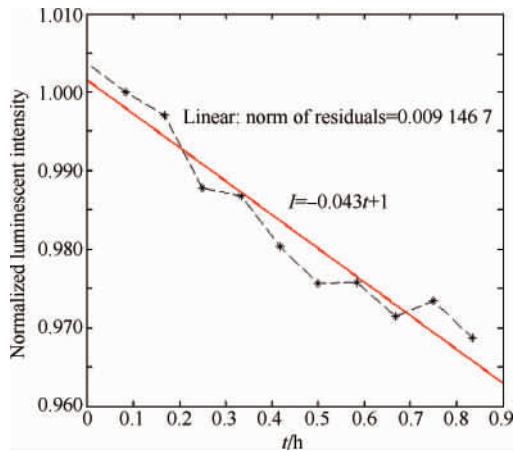


图 8 PSP 光降解曲线

Fig. 8 Photo-degradation curves of PSP

定义涂料光降解速率为参考压力下涂料发光强度的变化速率,即

$$D = - \left. \frac{dI}{dt} \right|_{p=p_{ref}} \quad (5)$$

由图 8 可知,本文所采用的国产 PSP,其光降解速率约为 4%/h。

需要说明的是,涂料的光降解速率受涂料入射光强度、实验温度等因素影响,为了获得较为明显的降解曲线,本次实验中,激发光源调至全功率,涂料样片离光源距离仅为 15 cm。风洞试验中,PSP 的光降解现象并不会非常明显。

涂料的光降解会影响其重复性、稳定性以及使用时限,从而影响 PSP 的测量精度。工程应用中,吹风停止后,应及时屏蔽入射光,以抑制涂料的光降解。涂料的光降解速率较大时,须根据实验精度要求及涂料光降解曲线,确定涂料的有效使用时间,超过有效使用时间后应重新喷涂涂料。

## 4 结 论

1) 自主编制的 PSP 静态校准程序,兼具无效采集图像剔除、涂料特性研究及校准空间不均匀

性分析等功能模块,具有较好的适用性。

2) 一定压力范围和测量系统下,PSP 的 Stern-Volmer 响应曲线会呈现较为明显的非线性,此时,须用适当阶数的 Stern-Volmer 非线性关系式进行数据插值,且应尽量避免外插。

3) 光强法可以抑制激发光强度、涂料厚度及探针分子浓度分布不均匀带来的影响,但均匀校准压力和温度下,光强比及校准系数分布仍存在着一定的空间不均匀性。校准中,可以通过提高校准系统的气密性与涂料喷涂质量、采用精细化的滤波方法等措施将校准空间不均匀性降至最低。

4) PSP 在长时间照射时呈现出光降解特性,一定的时间内,光降解曲线近似为线性。工程应用中,吹风停止后应及时屏蔽入射光,以抑制涂料的光降解。

随着基础研究和工程应用的不断深入,PSP 测量技术正朝着精细化的方向发展。涂料空间不均匀性、压力响应非线性以及光降解等特性作为影响 PSP 测量精度的重要因素,本文初步提出了其评估指标和改进措施,但其有效性与通用性有待进一步的验证与深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] Morris M J, Donovan J F, Kegelman J T, et al. Aerodynamic application of pressure-sensitive paint. *AIAA Journal*, 1993, 31(3): 415-419.
- [2] Kontis K. A review of some current research on pressure sensitive paint and thermographic phosphor techniques. *The Aeronautical Journal*, 2007, 7(1): 495-508.
- [3] Engler R H, Klein C. DLR PSP system intensity and lifetime measurements. *Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, 1997, 29(2): 46-56.
- [4] Erickson G E, Gonzalez H A. Wind tunnel application of a pressure-sensitive paint technique to a double delta wing model at subsonic and transonic speeds. *NASA/TM*, 2006, 32(5): 41-47.
- [5] Fang S, Long S R, Disotell K J, et al. Comparison of unsteady pressure-sensitive paint measurement techniques. *AIAA Journal*, 2012, 50(1): 109-122.
- [6] Mitsuo K, Kurita M, Fujii K, et al. PSP measurement of a high-lift-device model in JAXA 6.5 m×5.5 m low-speed wind tunnel. *AIAA-2007-1356*, 2007.
- [7] Ouchi H, Irikado T. PSP Measurements in the large-scale transonic wind tunnel and associated image data process-

- ing. AIAA-2005-1079, 2005.
- [8] Zhang Y C, Chen L S, Yan L, et al. Investigation and application of pressure sensitive paint techniques in wind tunnel test. *Journal of Experiment in Fluid Mechanics*, 2010, 24(1): 74-78. (in Chinese)  
张永存, 陈柳生, 阎莉, 等. 压敏涂料技术在风洞中的应用研究. *实验流体力学*, 2010, 24(1): 74-78.
- [9] Zhang Y C, Chen L S, Ma X G, et al. Investigation and application of two-component pressure sensitive paint techniques. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2010, 28(5): 485-489. (in Chinese)  
张永存, 陈柳生, 马晓光, 等. 双分量压敏涂料技术的应用研究. *空气动力学报*, 2010, 28(5): 485-489.
- [10] Zhou Q, Liu B, Gao L M, et al. Pressure measurement on suction surface of a single vane using pressure-sensitive paint. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(2): 138-144.
- [11] Xiang X J, Lang W D, Xiong H L, et al. Application of pressure-sensitive paint on aerodynamics load measurement of delta wing model in supersonic wind tunnel. *Journal of Experiment in Fluid Mechanics*, 2010, 24(3): 81-86. (in Chinese)  
向星居, 郎卫东, 熊红亮, 等. 压敏漆测量三角翼模型气动载荷的超声速风洞试验. *实验流体力学*, 2010, 24(3): 81-86.
- [12] Muller J A. Calibration to determine pressure and temperature sensitivities of a pressure-sensitive paint. ADA380715, 2000.
- [13] Benic T J. Calibration of detection angle for full field pressure sensitive paint measurement. AIAA-2001-307, 2001.
- [14] Orozco G, Kontis K. Effects of filters on the performance and characteristics of pressure sensitive paints. *Measurement Science and Technology*, 2009, 7(20): 1-6.
- [15] Ruyten W, Chall C. Spatially nonuniform self-quenching of the pressure-sensitive paint PtTFPP/FIB. AIAA-2009-1006, 2009.
- [16] Woodmansee M A, Dutton J C. Treating temperature-sensitivity effects of pressure-sensitive paint measurements. *Experiments in Fluids*, 1998, 24(2): 163-174.
- [17] Dhall T, Chall C. Pressure resolution of a PSP based measurement system with non-linear intensity response. AIAA-2008-279, 2008.
- [18] Benn E, Mark E, John D, et al. General strategy for the development of an improved pressure-sensitive paint formulation. AIAA-2002-1127, 2002.
- [19] Liu B, Zhou Q, Zheng L X, et al. Construction of pressure-sensitive paint measurement system and calibration for homemade fluorescent pressure-sensitive paint. *Journal of Air Force Engineering University*, 2007, 6(8): 72-75. (in Chinese)  
刘波, 周强, 郑立新, 等. 压力敏感涂料测量系统及涂料校准实验. *空军工程大学学报*, 2007, 6(8): 72-75.
- [20] Gao L M, Wang H, Liu B, et al. Experimental of study influence of measurement system characteristics on pressure-sensitive paint. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(1): 76-81. (in Chinese)  
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. *航空学报*, 2010, 31(1): 76-81.
- [21] Huber J P, Carroll B F. Application of dual sorption theory to pressure sensitive paints. *AIAA Journal*, 1997, 35(11): 1790-1792.

#### 作者简介:

李国帅 男, 硕士研究生, 助理工程师。主要研究方向: PSP/TSP 光学测量技术。

Tel: 0816-2462280

E-mail: lgs0000@163.com

周强 男, 博士后。主要研究方向: 流场测量和流动显示等。

Tel: 0816-2462463

E-mail: zhouqiang6604@163.com

刘祥 男, 博士研究生, 助理研究员。主要研究方向: 实验流体力学。

Tel: 0816-2463920

E-mail: 372792387@qq.com

## Experimental Research of Pressure Sensitive Paint Performance and Calibration Technique

LI Guoshuai<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>1</sup> \* , LIU Xiang<sup>1</sup>, JIN Biqing<sup>2</sup>, GAO Limin<sup>3</sup>, MA Husheng<sup>1</sup>, XIONG Jian<sup>1</sup>

1. *China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China*

2. *School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China*

3. *School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

**Abstract:** Calibration technique and paint performance research are critical for improving the measurement accuracy and engineering application of pressure sensitive paint (PSP). In this paper, static calibration and photo-degradation experiments are performed based on a PSP static calibration setup and image post-processing software which is programmed independently to study paint performances other than its pressure and temperature sensitivity. The results of this study reveal that the Stern-Volmer curve of PSP exhibits a nonlinear characteristic rather than following the conventional linear pattern, which is approximated with a polynomial function using curve-fitting analysis. Moreover, calibration results of the painted coupon vary in space although the experiment is performed under uniform pressure and temperature, and it tends to decrease calibration accuracy. Finally, PSP demonstrates a photo-degradation characteristic and the degradation curve is approximately linear within a range of time. Evaluation indices of pressure response nonlinearity, calibration spatial non-uniformity and photo-degradation are proposed while their mechanisms of production, influences on PSP measurement accuracy and correction methods are also presented.

**Key words:** pressure sensitive paint; static calibration; paint performance; nonlinear pressure response; spatial non-uniformity; photo-degradation

---

Received: 2012-02-23; Revised: 2012-04-05; Accepted: 2012-05-07; Published online: 2012-06-08 15:55

URL: [www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120608.1555.003.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120608.1555.003.html)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11172316)

\* Corresponding author. Tel.: 0816-2462463 E-mail: zhouqiang6604@163.com