

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108671

聚合物基压力敏感涂料近真空稳态特性研究及优化

吴 靖, 陈远哲, 郭禹泽, 孔 迪, 黄 峰

(福州大学机械工程及自动化学院 福州 350108)

摘 要:压力敏感涂料(PSP)作为一种分子级的氧传感器,已广泛应用于飞行器气动力的高分辨率全场测量。为了将PSP应用于近真空环境飞行器气动特性的分析和研究,需要研究和制备在低压下压力灵敏度足够高的PSP,以实现近真空环境下的微小压力测量。采用具有高氧透过性的高分子聚合物PTMSP为基层、以PdTFPP和PtTFPP为不同发光分子的两种PSP,即PdTFPP/PTMSP和PtTFPP/PTMSP,在近真空环境下开展稳态校准特性研究。实验结果表明,PdTFPP/PTMSP的压力灵敏度显著高于PtTFPP/PTMSP,而温度敏感度和光稳定性与PtTFPP/PTMSP相当,更适合用于近真空环境下测量微小压力的变化。进一步对PdTFPP/PTMSP开展特性优化研究,发现PdTFPP/PTMSP的压力灵敏度随发光分子和聚合物浓度的增加而先上升后下降,并且在发光分子和聚合物浓度分别为1.2和8 mg/mL时达到最高值68.65 %/kPa。使用甲苯作为溶剂的PdTFPP/PTMSP配方压力灵敏度明显高于二氯甲烷和丙酮为溶剂时的配方,且温度敏感性和光稳定性最佳。

关键词:压力敏感涂料;聚合物基;近真空环境;稳态校准;压力灵敏度

中图分类号: TH744 TP212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Investigation and optimization on static characteristics of polymer-based pressure-sensitive paints in near-vacuum environment

Wu Jing, Chen Yuanzhe, Guo Yuze, Kong Di, Huang Feng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Pressure-sensitive paint (PSP), as a molecular-level oxygen sensor, has been widely used for high resolution full-field aerodynamics measurement of aircrafts. To apply PSP for the analysis and study of aerodynamic characteristics of aircrafts in near-vacuum environment, PSP with sufficiently high pressure sensitivity at low pressures needs to be prepared and studied to enable small pressure measurements in near-vacuum environments. In this article, two PSPs, namely PdTFPP/PTMSP and PtTFPP/PTMSP, with high-oxygen-permeability polymer PTMSP as the binder, PdTFPP and PtTFPP as luminescent molecules, are used to carry out the static calibration characteristics in near-vacuum environment. Experimental results show that the pressure sensitivity of PdTFPP/PTMSP is significantly higher than that of PtTFPP/PTMSP. While the temperature sensitivity and photostability of PdTFPP/PTMSP are comparable to those of PtTFPP/PTMSP, which is more suitable for measuring small pressure changes in near-vacuum environment. Further characterization of PdTFPP/PTMSP reveals that the pressure sensitivity of PdTFPP/PTMSP increases and then decreases with the increase of the concentration of luminescent molecule and polymer, and reaches the highest value of 68.65 %/kPa at concentrations of luminescent molecule and polymer are 1.2 and 8 mg/mL, respectively. The PdTFPP/PTMSP with toluene as solvent has the better pressure sensitivity than the formulation with dichloromethane or acetone as solvent, and has the optimum temperature sensitivity and photostability.

Keywords: pressure-sensitive paint; polymer-based; near-vacuum; static calibration; pressure sensitivity

0 引 言

航天技术是对人类社会生活具有广泛而深远影响的

重要科学领域之一,也是表征一个国家科学技术实力的重要标志。空气动力学是航空航天活动最为重要的理论基础。近年来,火星直升机作为一种在近真空环境中运行的飞行器,成为火星探测工程中的研究热点^[1-2]。开展

高真空度下的飞行器空气动力学特性研究,对于实现飞行器设计定型及地外行星表面探测具有重要价值。

在空气动力学试验中,典型的气动力测量技术是基于离散测压孔的压力传感器测量^[3-4]。压力敏感涂料 (pressure-sensitive paint, PSP) 作为一种分子级的氧传感器,近年来发展成为一种新型非接触式光学压力测量技术,凭借其测量的高空间分辨率且不受模型结构限制、试验周期短、经济效益高等优点,已广泛应用于各类风洞试验中的模型表面压力全场测量和流场显示等领域^[5-7]。

近真空环境作为火星直升机等航天器的苛刻服役条件,在此背景下开展表面压力分布测量是新型飞行器气动特性研究的主要难题之一。目前关于 PSP 的特性研究与实际工程应用多以大气环境为背景,而在绝对压力极低的近真空条件下对 PSP 的研究及相关应用较少,部分低温风洞试验、火星风洞试验和真空羽流对平板的冲击研究取得成果^[8-15]。Egami 等^[16]通过对不同发光分子与聚合物的组合进行试验评估,研究了发光分子发光寿命和基层氧透过性对 PSP 压力灵敏度的影响,提出了适用于低温风洞的 PSP 配方。Wu 等^[14]比较了 PtTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PC 在低压环境下的稳态校准特性,发现 PtTFPP/PTMSP 的压力灵敏度比 PtTFPP/PC 高出 12 倍以上,并且 PtTFPP/PTMSP 比 PtTFPP/PC 具有更低的温度依赖性。利用 PtTFPP/PTMSP 测量了单羽流和双羽流撞击平板模型时的压力分布,证实了低压范围内 PSP 对压力变化的响应时间与压力传感器相同,且对温度的依赖性更低。Anyoji 等^[17]发现,由 PdTFPP 和 PTMSP 组成的 PSP 在低压下表现出较高的压力灵敏度,并采用该 PSP 开展了平板冲击试验,证实了其应用于火星风洞低雷诺数测试的可行性。

因此,研究和制备一种在低压下对压力变化足够敏感的 PSP,对实现高真空环境下对新型飞行器的气动特性研究具有意义。为了使 PSP 在低压条件下具备较高的压力灵敏度,满足近真空环境微小压力测量的需求,要求 PSP 具有氧透过性较高的基层和发光寿命较长的发光分子^[16]。1-三甲基硅烷基-1-丙炔聚合物 (poly [1-(trimethylsilyl)-1-propyne, PTMSP) 由 Masuda 等^[18]首次合成,是一种氧透过性优异的玻璃态含硅高分子聚合物。Asai 等^[19]采用 PTMSP 制备的膜材料含有大量微孔,具有极高的氧透过性和较高的机械强度。同时,采用 PTMSP 作为聚合物基层制备得到的 PSP,其在温度敏感度方面的表现显著优于大气下常用的聚合物/陶瓷压力敏感涂料^[6,8]。金属卟啉 PdTFPP 和 PtTFPP 作为 PSP 常用的发光分子,在发光寿命长度、光子产率和猝灭性能等方面均存在差异,进而可能对 PSP 压力灵敏度和测量信噪比等方面造成不同程度的影响^[20]。

本文以聚合物 PTMSP 作为基层,研究对比了以 PdTFPP 和 PtTFPP 为不同发光分子的两种压力敏感涂料在近真空环境下的稳态校准特性。对具有较高压力灵敏度的 PdTFPP/PTMSP 进行优化研究,对比了不同发光分子浓度、聚合物浓度和溶剂种类对其压力灵敏度、温度敏感度和光稳定性等稳态校准特性的影响。优化了 PdTFPP/PTMSP 在近真空环境下的综合稳态性质并提出了制备参数方面的建议,为将 PSP 技术应用于近真空环境下的微小压力变化测量提供依据。

1 PSP 测量技术

1.1 PSP 基本原理

PSP 测量技术基于光致发光和氧猝灭的工作原理,发光分子吸收一定频率的激发光子从基态转为激发态后,通过发射荧光或与氧分子相互作用失活 (即氧猝灭过程) 返回到基态^[6,21]。因此,PSP 的发光强度随表面压力的升高而递减。对于压力 p 和温度 T 下的发光强度 I ,根据参考压力 p_{ref} 时获得的参考光强 I_{ref} ,可以得到适用于空气动力学的线性 Stern-Volmer 方程^[7,17,20]:

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

当氧分压超过特定范围时,线性 Stern-Volmer 公式不再适用,可用非线性 Stern-Volmer 公式进行描述^[22-23]:

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

式中: $A(T)$ 、 $B(T)$ 和 $\gamma(T)$ 为校准系数。

PSP 的压力灵敏度 $S_p(T)$ 是表征涂料性能的重要指标,反映了涂料发光强度随压力变化的灵敏程度,可通过对式(2)在参考压力 p_{ref} 处求导后得到:

$$S_p(T) = \left. \frac{d(I_{\text{ref}}/I)}{d(p)} \right|_{p=p_{\text{ref}}} = \frac{\gamma(T) \times B(T)}{p_{\text{ref}}} \quad (3)$$

通常用温度敏感度 S_T 来评估 PSP 压力测量中受温度的影响程度,可用温度多项式表征光强比 I/I_{ref} 和温度 T 的关系:

$$I/I_{\text{ref}} = \sum_{n=0}^N C_n T^n \quad (4)$$

式中: $C_n (n=0,1,\dots,N)$ 是校准常数,本文 N 取 2。温度敏感度 S_T 通过对式(4)求导后得到:

$$S_T = \left. \frac{d(I/I_{\text{ref}})}{dT} \right|_{T=T_{\text{ref}}} = \sum_{n=1}^N n C_n T^{n-1} \quad (5)$$

1.2 涂料制备

本文在近真空环境对基于多孔聚合物 PTMSP 和两种金属卟啉 PdTFPP 及 PtTFPP 作为发光分子的聚合物类 PSP 进行稳态校准特性研究。PTMSP 是一种最早由

Masuda 等^[18]合成,由 Asai 等^[19]开发的具有大量微孔的含硅高分子聚合物,其制备的薄膜具有极高的氧透过性和较高的机械强度。

PdTFPP/PTMSP 参考 Anyoji 等^[17]的制备方法,发光分子 PdTFPP 浓度范围为 1~20 mg,聚合物 PTMSP 的浓度范围为 40~120 mg,将两种物质溶于 10 mL 的甲苯中。PtTFPP/PTMSP 参考 Yasuhiro 等^[24]的制备方法,将 4 mg 的发光分子 PtTFPP 和 80 mg 的聚合物 PTMSP 溶解于 10 mL 的甲苯中,该比例下 PdTFPP/PTMSP 取得压力灵敏度的最高值。

使用磁力搅拌器搅拌混合物 10 min 左右,直至溶质完全溶解。使用喷枪将制备好的 PSP 直接喷涂于样片上,放置于 60℃ 干燥箱烘干 1 h。

2 实验系统

PSP 近真空稳态校准实验系统如图 1 所示,包含校准舱子系统、激发光子系统和数据采集子系统。

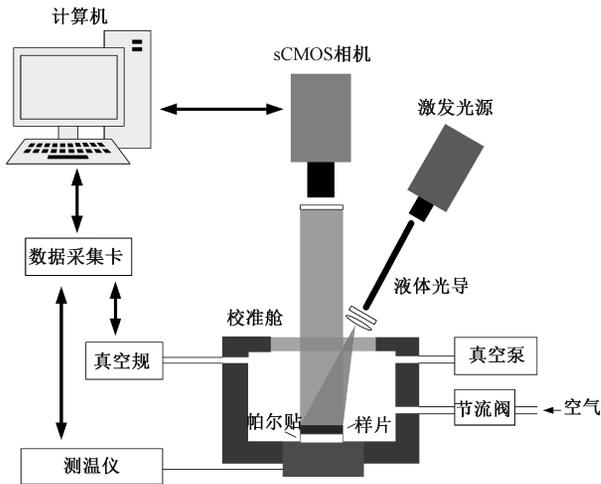


图1 PSP 近真空稳态校准实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the near-vacuum static calibration system for PSP

校准舱子系统主要由校准舱体、气源(本文使用干燥空气)、节流阀、真空泵、真空规、温控仪等组成。校准舱前端设置石英玻璃观察窗作为激发光和发射光的通路。校准舱内放置表面喷涂 PSP 的测试样片,样片底面粘帖于帕尔贴半导体单元,帕尔贴单元与校准舱底部的紫铜散热单元相连。校准舱内压力通过控制进气量和真空泵(PFEIFFER, HiCube 80 Eco)进行调节,并由皮拉尼冷阴极规(0~300 Pa, 15% 读数精度)电容薄膜真空计(500~5000 Pa, 0.5% 读数精度)读取。PSP 样片温度由温控仪所控制的帕尔贴单元进行调节。稳态校准实验中的压力范围和温度范围分别设定为 0~5 kPa 和 288~318 K,参考压力和参考温度分别设定为 1 kPa 和 298 K。

激发光子系统包括激发光源、液体光导、滤光片及透镜。激发光源采用紫外发光二极管(Luminus CBM-120UV-K385),其峰值波长为 385 nm,光功率大于 10 W,实验前预热光源 30 min 以保证输出光强稳定。激发光源通过适配器连接液体光导(Edmund 53694),液体光导的末端设有 450 nm 低通滤光片和凸透镜,用于滤除长波杂散光并聚拢光束。

数据采集子系统包括科学级 CMOS 相机、数据采集卡及计算机。相机采用德国 Pco 公司生产的 16 bit 背照式 sCMOS 相机(Pco edge 4.2),相机镜头前安装 600 nm 高通滤光片,用于采集 PSP 的发射光强度。数据采集卡用于获取真空规和温控仪的压力及温度数据,由计算机进行图像和数据处理。

校准实验全程在黑暗环境中进行,每组共拍摄 40 幅图像并进行平均处理以减少随机噪声。每次拍摄时激发光源照射 PSP 样片的时间不超过 2 s,每轮照射时间累积不超过 0.5 min,且在校准期间之外,样片均遮挡避光以最大程度减少光降解对实验结果的影响。

3 稳态校准特性比较分析

3.1 压力灵敏度

发光分子浓度均为 0.4 mg/mL 的 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 在温度 298 K 时的 Stern-Volmer 曲线如图 2 所示,参考压力取 1 kPa,压力范围为 0~5 kPa。可以看出 PdTFPP/PTMSP 的曲线斜率明显高于 PtTFPP/PTMSP,由式(3)得到两种聚合物基 PSP 在 298 K 时的压力灵敏度分别为 64.91 %/kPa 和 46.99 %/kPa, PdTFPP/PTMSP 压力灵敏度远高于 PtTFPP/PTMSP,更适合于在近真空条件下测量微小压力的变化。

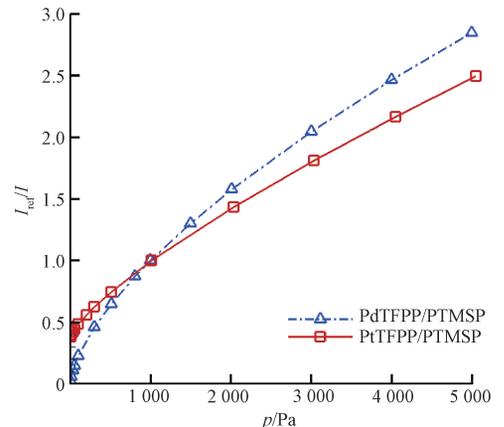


图2 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 在 298 K 下的 Stern-Volmer 曲线

Fig. 2 Stern-Volmer curves for PdTFPP/PTMSP and PtTFPP/PTMSP at 298 K

3.2 温度敏感度

PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 在参考压力为 1 kPa 时的温度多项式曲线如图 3 所示。由于发光分子的发光强度因热猝灭的作用而降低, PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 的光强比均随着温度的上升而下降。由式(5)得到 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 的温度敏感度分别为 $-0.10\%/K$ 和 $-0.21\%/K$, 两种聚合物基 PSP 的温度敏感度基本一致, 在近真空条件下具有较好的温度稳定性。

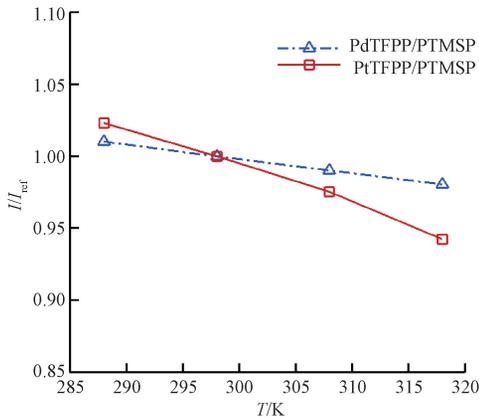


图3 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 的温度多项式曲线

Fig. 3 Temperature polynomial curves for PdTFPP/PTMSP and PtTFPP/PTMSP

3.3 光稳定性

为了比较 PdTFPP/PTMSP 与 PtTFPP/PTMSP 的光稳定性, 将两种 PSP 放置于紫外光源下连续照射 30 min, 照射期间校准舱内压强小于 0.1 Pa, 样片温度恒定为 298 K, 每隔 1 min 记录一次样片发光强度, 取照射开始时第 1 次测量的光强作为参考光强。图 4 所示为两种 PSP 发光强度随时间的变化, 可以看出光照 30 min 后, PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 的发光强度分别下降到初始强度的 97.20% 和 97.56%, 二者下降程度接近。由于 0.1 Pa 的极低压力环境中 O_2 极为稀薄, 可以忽略 PTMSP 膜 O_2 渗透率对发光强度的影响, 因此, PSP 发光强度的下降是由于发光分子光降解造成, 表明 PdTFPP 和 PtTFPP 均具有较高的光稳定性。

3.4 信号强度与信噪比

选取压力和温度分别为 1 kPa 和 298 K 条件下 PtTFPP/PTMSP 的发光强度作为参考值, 比较了两种聚合物基 PSP 在相同发光分子浓度和激发光强度下的归一化信号强度 η , 如图 5 所示。PtTFPP/PTMSP 的信号强度显著高于 PdTFPP/PTMSP, 表明 PtTFPP 具有比

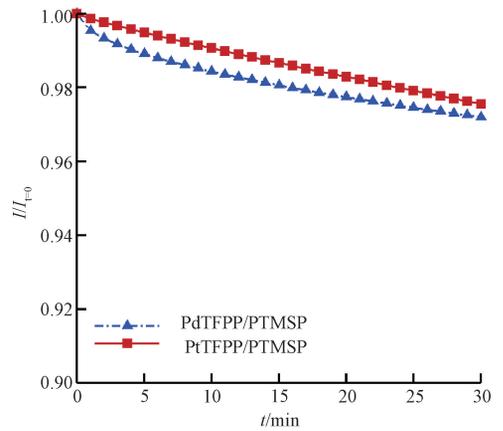


图4 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 在受连续光照时光强随时间变化曲线

Fig. 4 Intensity of PdTFPP/PTMSP and PtTFPP/PTMSP varied with time under continuous illumination

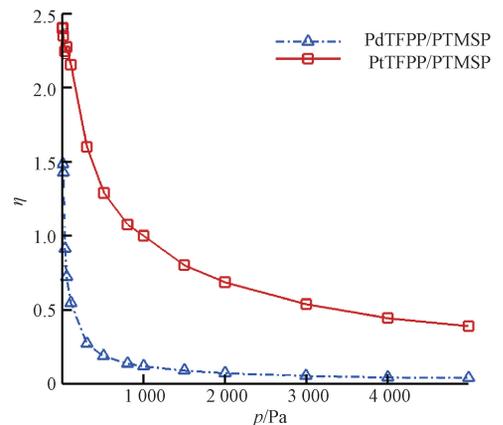


图5 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 信号强度校准结果

Fig. 5 Calibration results of signal level of PdTFPP/PTMSP and PtTFPP/PTMSP

PdTFPP 更高的光量子效率。随着压力的增加, 二者的信号强度快速降低。因 PdTFPP/PTMSP 具有更高的压力灵敏度, 其发光强度随压力增大而降低的程度更为剧烈。

为了获得更加准确的测量结果, 还要求图像具有较高的信噪比 (SNR)。信号值 S 取各压力拍摄连续图像的平均灰度值, 噪声 N 取信号标准偏差, 通过 S 与 N 之间的比值来衡量信噪比, 并取其分贝数, 即 $SNR = 10 \times \lg(S/N)$ 。两种 PSP 的信噪比如图 6 所示, 在 0~5 kPa 压力范围内, 由于 PtTFPP 光量子效率较高, 信号强度也较高, 因此 PtTFPP/PTMSP 的信噪比高于 PdTFPP/PTMSP。为了提高 PdTFPP/PTMSP 的测量信噪比, 可增大激发光强度, 获得更高的发射光强度。

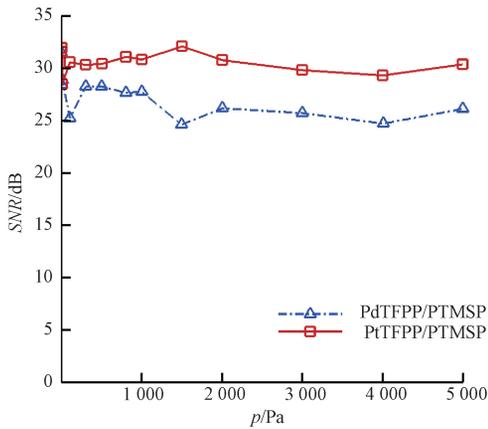


图 6 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP 信噪比
Fig. 6 Comparison of SNR of PdTFPP/PTMSP and PtTFPP/PTMSP

4 PdTFPP/PTMSP 特性优化研究

综合第 3 节的结果, PdTFPP/PTMSP 具有极高的压力灵敏度, 与 PtTFPP/PTMSP 相当的温度敏感度及光稳定性, 更适合于在近真空环境中进行微小压力的测量。因此, 针对 PdTFPP/PTMSP 开展进一步的特性优化研究。

4.1 发光分子及聚合物浓度对压力灵敏度的影响

发光分子浓度定义为溶解在甲苯中的 PdTFPP 浓度, 记为 C_{PdTFPP} 。共设置 6 组 PdTFPP 浓度, 分别为 0.1、0.4、1.0、1.2、1.4、2.0 mg/mL, 不同发光分子浓度下的压力灵敏度校准结果如图 7 所示。PdTFPP/PTMSP 的压力灵敏度随发光分子浓度的增加先增大后减小, 并且在浓度为 1.2 mg/mL 时取得最大值。

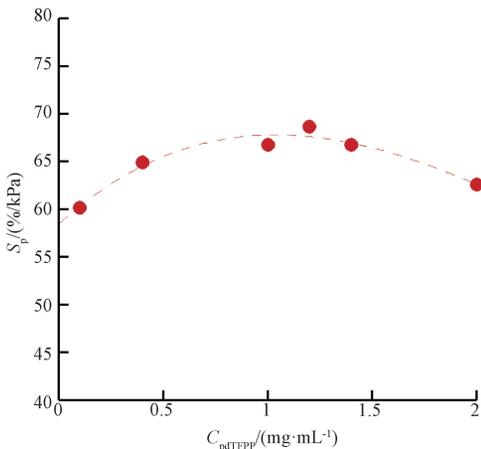


图 7 不同发光分子浓度时 PdTFPP/PTMSP 的压力灵敏度
Fig. 7 Pressure sensitivities of PdTFPP/PTMSP at different luminescent molecule concentrations

聚合物浓度定义为溶解在甲苯中的 PTMSP 的浓度, 记为 C_{PTMSP} 。共设置 5 组 PTMSP 浓度, 分别为 4、6、8、10、12 mg/mL, 不同聚合物浓度下的压力灵敏度校准结果如图 8 所示, PdTFPP/PTMSP 的压力灵敏度随聚合物 PTMSP 浓度的增大同样呈现了先上升后下降的趋势, 在 6~10 mg/mL 浓度下压力灵敏度较高, 并且在浓度为 8 mg/mL 时取得的最大值。

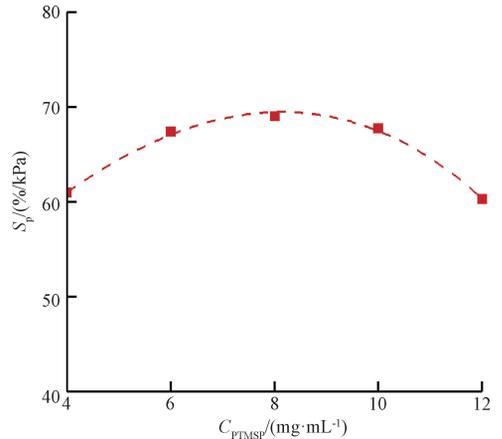


图 8 PdTFPP/PTMSP 在不同聚合物浓度下的 Stern-Volmer 曲线
Fig. 8 Stern-volmer curves of PdTFPP/PTMSP at different polymer concentrations

因此在低压环境下使用 PdTFPP/PTMSP 进行压力测量时, 建议发光分子浓度设为 1.2 mg/mL、聚合物浓度设为 8 mg/mL 进行涂料制备, 以得到最优的压力灵敏度。

4.2 溶剂对 PdTFPP/PTMSP 特性的影响

以发光分子浓度为 1.2 mg/mL、聚合物浓度为 8 mg/mL 的比例, 溶剂分别采用甲苯、二氯甲烷和丙酮制备 PdTFPP/PTMSP 溶液, 研究不同溶剂对 PdTFPP/PTMSP 特性的影响。制备过程中观察到甲苯能完全溶解聚合物 PTMSP, 二氯甲烷中有少量 PTMSP 未能溶解, 丙酮中 PTMSP 的溶解度最小。图 9 所示为采用不同溶剂制备 PdTFPP/PTMSP 的 Stern-Volmer 曲线, 溶剂为甲苯、二氯甲烷、丙酮时的压力灵敏度分别为 68.65、47.99 和 14.69 %/kPa, 使用甲苯作为溶剂的配方压力灵敏度明显高于其他两种配方。

采用不同溶剂制备 PdTFPP/PTMSP 的温度多项式曲线如图 10 所示, 溶剂为甲苯、二氯甲烷、丙酮时的温度敏感度分别为 -0.10、-0.28 和 -0.52 %/K, 使用甲苯作为溶剂的配方温度敏感度同样优于其他两种配方。

图 11 所示为在 <0.1 Pa 的极低压力环境下, 采用不同溶剂制备的 PdTFPP/PTMSP 的发光强度随时间的变

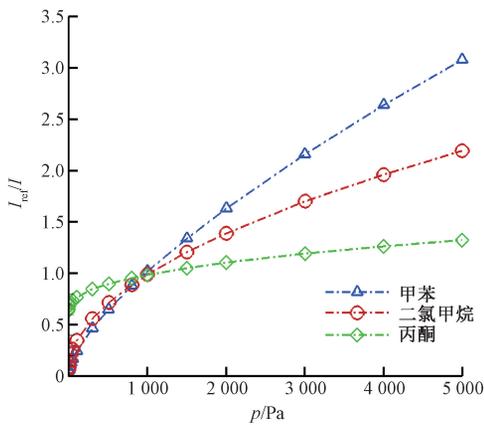


图9 不同溶剂时 PdTFPP/PTMSP 的 Stern-Volmer 曲线
Fig. 9 Stern-Volmer curves of PdTFPP/PTMSP with different solvents

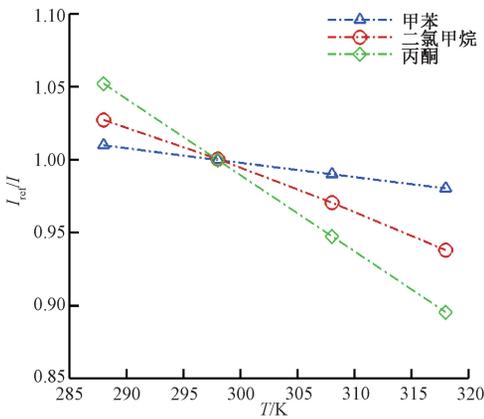


图10 不同溶剂时 PdTFPP/PTMSP 的温度多项式曲线
Fig. 10 Temperature polynomial curves of PdTFPP/PTMSP with different solvents

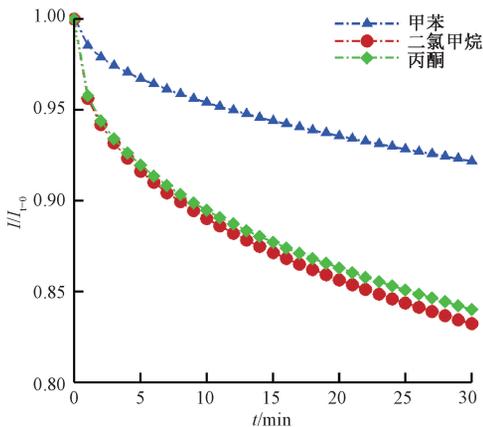


图11 溶剂为甲苯,二氯甲烷,丙酮的 PdTFPP/PTMSP 的 30 min 光降解曲线
Fig. 11 30 min photodegradation curves of PdTFPP/PTMSP with toluene, dichloromethane and acetone as solvents

化曲线,使用甲苯为溶剂的配方光降解速率明显低于其他两种溶剂配方,光稳定性最好。

综合比较压力敏感度、温度敏感度及光稳定性可知,采用甲苯制备的 PdTFPP/PTMSP 均为最优,因此在低压环境下使用 PdTFPP/PTMSP 进行压力测量时,建议采用甲苯作为制备的溶剂。

5 结 论

本文对以具有高氧透过性的聚合物 PTMSP 为基层、以 PdTFPP 和 PtTFPP 为不同发光分子的两类压力敏感涂料,即 PdTFPP/PTMSP 和 PtTFPP/PTMSP,在近真空环境下的稳态校准特性进行了研究和分析,结果表明,温度为 298 K 时, PdTFPP/PTMSP 压力灵敏度为 64.91%/kPa,显著高于 PtTFPP/PTMSP 的压力灵敏度 46.99%/kPa,二者温度敏感度和光学稳定性较为接近,但 PdTFPP/PTMSP 的信号强度和信噪比低于 PtTFPP/PTMSP。因此, PdTFPP/PTMSP 更适合于近真空环境下测量微小压力的变化,可通过适当提高激发光强度改善测量信噪比。对 PdTFPP/PTMSP 进行了特性优化,发现压力灵敏度随发光分子 PdTFPP 浓度和聚合物 PTMSP 浓度的增加先上升后下降,分别在 1.2 和 8 mg/mL 浓度下取得最高值。因此在低压环境下使用 PdTFPP/PTMSP 进行压力测量时,建议选择该参数进行 PSP 的制备。研究了甲苯、二氯甲烷、丙酮 3 种溶剂对 PdTFPP/PTMSP 特性的影响,制备过程中观察到甲苯能完全溶解聚合物 PTMSP,二氯甲烷次之,丙酮中的溶解度最低。使用甲苯作为溶剂的 PdTFPP/PTMSP 的压力灵敏度明显高于其他两种溶剂的配方,且温度敏感性和光降解速率最低。因此,甲苯最适合作为 PdTFPP/PTMSP 的溶剂。

参考文献

- [1] 曲少杰,呼延奇,饶炜,等. 火星环境对着陆探测任务的影响及设计考虑[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3):240-247.
QU SH J, HU Y Q, RAO W, et al. Effects of Mars environment on landing probe mission and related design considerations[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(3): 240-247.
- [2] 王涛. 火星探测陆空协同无人系统的研究发展分析[J]. 无人系统技术, 2020,3(5):1-8.
WANG T. Study of the ground-aerial cooperative

- unmanned systems applications for the exploration of mars[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2020, 3(5): 1-8.
- [3] 姜昌兴, 宋超鑫, 雷小华, 等. 基于一体化探针的航空发动机内流多方向压力测量技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 9-19.
- JIANG CH X, SONG CH X, LEI X H, et al. Study on the multi-direction pressure measurement technology of aero engine internal flow based on an integrated probe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(10): 9-19.
- [4] 贺红林, 许佳豪, 周战洪, 等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(12): 1-7.
- HE H L, XU J H, ZHOU ZH H, et al. Research on interpolation compensation method for temperature error of piezo-resistive pressure sensor[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(12): 1-7.
- [5] PENG D, LIU Y Z. Fast pressure-sensitive paint for understanding complex flows: From regular to harsh environments[J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(1): 1-22.
- [6] GREGORY J W, SAKAUE H, LIU T, et al. Fast pressure-sensitive paint for flow and acoustic diagnostics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46(1): 303-330.
- [7] 于靖波, 向星居, 熊红亮, 等. 快速响应压敏涂料测试技术与应用[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(3): 17-32.
- YU J B, XIANG X J, XIONG H L, et al. Measurements and applications of fast response pressure sensitive paint[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(3): 17-32.
- [8] HAYASHI T, SAKAUE H. Temperature effects on polymer-ceramic pressure-sensitive paint as a luminescent pressure sensor[J]. *Aerospace*, 2020, 7(6): 80.
- [9] PENG D, GU F, ZHONG Z, et al. Thermal stability improvement of sprayable fast-responding pressure-sensitive paint for measurement above 100°C [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 320-326.
- [10] NAGATA T, KASAI M, OKUDERA T, et al. Optimum pressure range evaluation toward aerodynamic measurements using PSP in low-pressure conditions[J]. *Measurement Science & Technology*, 2020, 31(8): 85303.
- [11] EGAMI Y, KONISHI S, SATO Y, et al. Effects of solvents for luminophore on dynamic and static characteristics of sprayable polymer/ceramic pressure-sensitive paint[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 286: 188-194.
- [12] PENG D, CHEN J W, JIAO L R, et al. A fast-responding semi-transparent pressure-sensitive paint based on through-hole anodized aluminum oxide membrane [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 274: 10-18.
- [13] PENG D, GU F, LI Y Z, et al. A novel sprayable fast-responding pressure-sensitive paint based on mesoporous silicon dioxide particles[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279: 390-398.
- [14] WU J, BITTER M, CAI G B, et al. Investigation on aerodynamic force effect of vacuum plumes using pressure-sensitive paint technique and CFD-DSMC solution [J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(7): 1058-1067.
- [15] HAYASHI T, SAKAUE H, HIROTAKA S, et al. Dynamic and steady characteristics of polymer-ceramic pressure-sensitive paint with variation in layer thickness[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(5): 1125.
- [16] EGAMI Y, FEY U, ENGLER R. Appropriate selection of pressure-sensitive paint for cryogenic wind tunnels[C]. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006.
- [17] ANYOJI M, NUMATA D, NAGAI H, et al. Pressure-sensitive paint technique for surface pressure measurements in a low-density wind tunnel[J]. *Journal of Visualization*, 2015, 18(2): 297-309.
- [18] MASUDA T, ISOBE E, HIGASHIMURA T, et al. Poly [1-(trimethylsilyl)-1-propyne]: A new high polymer synthesized with transition-metal catalysts and characterized by extremely high gas permeability [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1983, 105(25): 7473-7474.
- [19] ASAI K, AMAO Y, IJIMA Y, et al. Novel pressure-

sensitive paint for cryogenic and unsteady wind-tunnel testing[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2002, 16(1): 109-115.

- [20] NIIMI T, YOSHIDA M, KONDO M, et al. Application of pressure-sensitive paints to low-pressure range [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2005, 19(1): 9-16.
- [21] 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.
- [22] SAKAUE H. Luminophore application method of anodized aluminum pressure sensitive paint as a fast responding global pressure sensor [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(8): 84101.
- [23] GREGORY J W, SULLIVAN J P. Effect of quenching kinetics on unsteady response of pressure-sensitive paint[J]. *Aiaa Journal*, 2006, 44(3): 634-645.
- [24] EGAMI Y, IIGIMA Y, ASAI K. Optimization of polymer-based PSP for cryogenic wind tunnels [C]. *ICIASF 2001 Record, 19th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, 2001.

作者简介



吴靖, 2009 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2016 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为福州大学副教授, 主要研究方向为光学流动成像、人工智能图像处理。

E-mail: wujing@fzu.edu.cn

Wu Jing received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2009 and 2016, respectively. He is currently an associate professor at Fuzhou University. His main research interests include optical flow imaging and artificial intelligence image processing.



黄峰(通信作者), 2004 年于陆军工程大学获得学士学位, 2010 年于陆军工程大学获得博士学位, 现为福州大学教授, 主要研究方向为光电探测成像。

E-mail: huangf@fzu.edu.cn

Huang Feng (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Army Engineering University of PLA in 2004 and 2010, respectively. He is currently a professor at Fuzhou University. His main research interest include photodetection imaging.