

Pressure and Temperature  
Sensitive Paints

# 压力敏感涂料与 温度敏感涂料

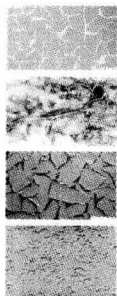
[美] T.Liu J.P.Sullivan 著  
周强 陈柳生 马护生 等译



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

著 [美] T. Liu J. P. Sullivan

译 周 强 陈柳生 马护生 郑立新 姚 丹 张永存  
校审 金熹高 刘劲帆 李 明



---

# 压力敏感涂料与 温度敏感涂料

---

Pressure and Temperature  
Sensitive Paints

---



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字:军—2008—060 号

图书在版编目(CIP)数据

压力敏感涂料与温度敏感涂料 / (美)刘天舒, (美)苏里温 J. P. (Sullivan, J. P.) 著; 周强等译. —北京: 国防工业出版社, 2012. 1

书名原文: Pressure and Temperature Sensitive Paints  
ISBN 978 - 7 - 118 - 07355 - 3

I. ①压... II. ①刘... ②苏... ③周... III. ①特种涂料 IV. ①TQ638

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 173950 号

Pressure and Temperature Sensitive Paints by Liu T., Sullivan J. P. :

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005

Springer is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由德国 Springer 授予国防工业出版社独家出版发行。版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 插页 2 印张 17½ 字数 311 千字  
2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 致 中 文 版 读 者

2004年由Springer出版了我们的专著“Pressure and Temperature Sensitive Paints”一书,很高兴看到此书的中文版正在出版中。在气动力学和流体力学试验中,压力和温度敏感涂料(PSP和TSP)是基于图像技术进行表面压力和速度的普适和定量测量。PSP和TSP已成功应用于各种风洞、飞行试验、发动机试验和其他流动装置,它可提供用常规技术无法方便地获得的复杂流动方面十分详尽的数据。

我们希望本书中文版为中国研究人员和学生提供有关PSP和TSP有用的引导。在某种意义上讲,将此书译成中文所付出的努力等同于撰写一本新书。因此我们特别感谢为此书翻译作出贡献的中国同行们:陈柳生,周强,马护生,姚丹,郑立新,张永存先生;校勘者金熹高,刘劲帆,李明先生,以及国防工业出版社编辑王华先生。

△ Tianshu Liu  
△ John P. Sullivan  
2011. 8. 24 于美国

## 译者序

压力与温度敏感涂料及其实验空气动力学方法是 20 世纪 80 年代发展起来的光学压力与温度测量新技术,以其非接触测量方式、真实反映物理表面连续压力分布、高空间分辨率以及省时、经济等突出优势,已在国内外得到广泛关注,并在航空航天、高速车辆、高层建筑、大型桥梁等工程设计中的空气动力学测量领域获得了成功的应用。2010 年 5 月在北京举办的“压力与温度敏感涂料国际学术研讨会 (PSP & TSP International Workshop 2010)”集中反映了这一发展趋势。

本书作者 Tianshu Liu 教授和 J. P. Sullivan 教授在此领域进行了长期和深入的研究,获得了许多开创性成果。他们一并汇集了国际间近年发表的 360 多篇研究结果,于 2005 年编辑出版了本书。本书全面介绍了压力与温度敏感涂料及其基本光物理过程、测量装置和实验方法、图像处理和数据分析,以及这项技术的应用现状。有感于此书对国内本领域工程技术人员会有很高的实用价值和参考意义,读后便萌生了将它译成中文,尽快介绍给国内同行的想法,对此两位原著作者欣然表示支持,于是邀约了材料化学、空气动力学和测量技术方面的专家通力合作。本书前言、第 1 章~第 3 章和 4.1 节、4.2 节由陈柳生译;4.3 节~4.5 节由张永存译;第 5 章由郑立新译;第 6 章~第 8 章和附录由周强译;第 9 章由姚丹译;第 10 章由马护生译;全书由金熹高、刘劲帆和李明审校。能将本书中文版奉献给国内同行,还应感谢国防工业出版社的支持与帮助。本书涉及多个学科,由于笔者学识局限,读者如发现译文错误或不当之处,望不吝指正。

△ 译者敬识

2010. 12

## 前言

压力敏感涂料(PSP)和温度敏感涂料(TSP)是20世纪80年代作为空气动力学、流体力学和转捩实验而发展起来的技术,本书的目的是对该技术进行系统介绍。首先,PSP是一种全域光学技术,对复杂的空气动力学流场,它提供了一种非接触的、定量的表面压力可视测量方法,对流场结构也提供了大量的信息,这一切都无法从传统的压力传感器上获取。TSP是其他全域温度测量技术,如温场闪烁法、温敏液晶法和红外测温法的一种重要的补充方法。本书主要包括美国、日本、德国、法国、英国和加拿大在该领域所进行的研究结果。此外,在“Luminescent Pressure Sensors in Aerodynamic Experiments”一书(俄罗斯中央空气动力学研究院(TsAGI)的V. E. Mosharov, V. N. Rodchenko 和 S. D. Forov 著)中,在PSP领域俄罗斯所进行的杰出的研究成果已有详尽论述。

我们真诚地感谢在PSP和TSP领域的同事们,他们慷慨地把自己的论文手稿提供给我们,对本书提出建议,并允许我们使用他们已发表的结果。本书并不能包罗一切。我们特别要感谢下列所有的个人和单位:

T. Amer, K. Asai, J. H. Bell, T. J. Bencic, O. C. Brown, G. Buck, A. W. Burner, S. Burns, B. Campbell, B. F. Carroll, L. N. Cattafesta, J. Crafton, R. C. Crites, G. Dale, R. H. Hamner, J. M. Holmes, C. Y. Huang, J. P. Hubner, J. Ingram, H. Ji, R. Johnston, J. D. Jordan, M. Kameda, M. Kammeyer, J. T. Kegelman, N. Lachendro, J. Lepicovsky, Y. Le Sant, X. Lu, Y. Mebarki, R. D. Mehta, K. Nakakita, C. Obara, D. M. Oglesby, T. G. Popernack, W. M. Ruyten, H. Sakaue, E. T. Schairer, K. S. Schanze, M. E. Sellers, Y. Shimbo, K. Teduka, S. D. Torgerson, B. T. Upchurch, A. N. Watkins.

NASA, ONR, AFOSR, Boeing, Raytheon, Japanese NAL.

## C O N T E N T S

<b>第 1 章</b>	<b>绪论</b>	1
1.1	压力敏感涂料	2
1.2	温度敏感涂料	6
1.3	发展历程	8
<b>第 2 章</b>	<b>光物理基础</b>	12
2.1	发光过程动力学	12
2.2	常规 PSP 的光物理模型	14
2.3	多孔 PSP 的光物理模型	19
2.3.1	碰撞控制模型	20
2.3.2	吸附控制模型	21
2.4	热猝灭	25
<b>第 3 章</b>	<b>涂料的物理性能</b>	27
3.1	标定	27
3.2	典型的 PSP	28
3.3	典型的 TSP	37
3.4	低温涂料	41
3.5	多发光体组分涂料	44

3.6	理想的 PSP	46
3.7	涂料的性能指标	47
<hr/>		
<b>第 4 章</b>	<b>辐射能量转移和基于光强的测量方法</b>	<b>50</b>
4.1	辐射度的标记法	50
4.2	激发光	51
4.3	光发射和检测器响应	53
4.4	基于光强的测量系统	57
4.4.1	CCD 相机系统	57
4.4.2	激光扫描系统	60
4.5	数据的基本处理	61
<hr/>		
<b>第 5 章</b>	<b>图像和数据分析技术</b>	<b>65</b>
5.1	相机的几何标定	66
5.1.1	共线性方程	66
5.1.2	直接线性变换	69
5.1.3	优化方法	70
5.2	相机辐射度的标定	74
5.3	自照射校正	76
5.4	图像对准	83
5.5	压力换算	85
5.6	低速流场的压力外插校正	87
5.7	变形模型表面网格的生成	90
<hr/>		
<b>第 6 章</b>	<b>基于发光寿命的测量方法</b>	<b>92</b>
6.1	涂料对时变激发光的发光响应	93
6.1.1	一阶模型	93
6.1.2	高阶模型	93



6.2	发光寿命测量技术	95
6.2.1	脉冲法	95
6.2.2	相位法	95
6.2.3	振幅调制法	96
6.2.4	选通光强比法	98
6.3	发光寿命成像	102
6.3.1	增强型 CCD 相机	102
6.3.2	内选通 CCD 相机	104
6.4	寿命法应用实例	105
<b>第 7 章 不确定度</b>		<b>110</b>
7.1	光强法的不确定度	110
7.1.1	系统建模	110
7.1.2	误差增长、敏感度和总体不确定度	111
7.1.3	光电探测器噪声与压力分辨率极限	113
7.1.4	模型变形所导致的误差	115
7.1.5	温度效应	116
7.1.6	标定误差	116
7.1.7	发射光与激发光的时序变化	116
7.1.8	光谱的易变性和光学滤片的光泄漏	117
7.1.9	压力映射误差	117
7.1.10	涂层对流场的干扰	117
7.1.11	其他误差源及其限制	119
7.1.12	基本误差容许上限	119
7.1.13	集中力与力矩的不确定度	120
7.2	亚声速翼型绕流的不确定度分析	121
7.3	原位标定的不确定度	124
7.3.1	试验实例	124
7.3.2	仿真模拟	127
7.4	寿命法的不确定度	129

7.4.1	相位法	129
7.4.2	幅值调制法	130
7.4.3	选通光强比法	131
7.5	TSP 的不确定度	135
7.5.1	误差增长和有限的温度分辨率	135
7.5.2	基本误差源	136
<hr/>		
<b>第 8 章</b>	<b>时间响应</b>	<b>139</b>
8.1	常规 PSP 的时间响应	139
8.1.1	扩散方程的解	139
8.1.2	压力响应及最佳涂层厚度	142
8.2	多孔 PSP 的时间响应	145
8.2.1	平方律偏差	145
8.2.2	有效扩散率	146
8.2.3	扩散的时间尺度	148
8.3	压力的时间响应测量	149
8.4	TSP 的时间响应	156
8.4.1	脉冲激光对金属薄膜的加热	157
8.4.2	阶梯式射流的冲击冷却	159
<hr/>		
<b>第 9 章</b>	<b>PSP 的应用</b>	<b>161</b>
9.1	低速流应用	161
9.1.1	翼型绕流	161
9.1.2	三角翼、后掠翼和汽车模型	167
9.1.3	冲击射流	174
9.2	亚声速、跨声速和超声速风洞中的应用	175
9.2.1	跨声速流中的飞机模型	175
9.2.2	巡航状态下的超临界高速机翼	180
9.2.3	跨声速翼身融合模型	182

9.2.4	跨声速机翼的激光扫描压力测量	184
9.2.5	超声速进气道边界层控制	184
9.3	高超声速风洞和激波风洞	187
9.3.1	超高声速膨胀压缩流动	188
9.3.2	运动激波对圆柱形立柱的冲击效应	193
9.4	低温风洞中的应用	194
9.5	旋转机械的应用	198
9.5.1	激光扫描压力测量	199
9.5.2	CCD 相机成像压力测量	202
9.6	冲击射流的应用	205
9.7	飞行试验中的应用	211
9.8	微喷管中的应用	216
<hr/>		
<b>第 10 章</b>	<b>TSP 的应用</b>	<b>218</b>
10.1	高超声速气流的应用	218
10.2	边界层转捩位置的测量	225
10.3	冲击射流传热研究	229
10.4	激波/边界层的相互作用	233
10.5	激光点加热及其传热测量	236
10.6	剪切流中热膜表面温度的测量	242
<hr/>		
<b>附录 A</b>	<b>标定装置</b>	<b>245</b>
<b>附录 B</b>	<b>PSP 和 TSP 常规配方</b>	<b>248</b>
<b>参考文献</b>		<b>250</b>

## 第 1 章 绪 论

在风洞和飞行器实验中,表面压力和温度的定量测定是了解飞行器气动性能和传热特性的最基本课题。对于飞行器的设计,测定空气动力学载荷分布需要压力数据的测量,同时用温度数据来评估飞行器表面的热传递。压力和温度测量提供了很多重要流动现象的关键信息,如激波、流动分离和边界层转捩等。另外,精确的压力和温度数据在验证和确认计算流体力学程序中起着关键的作用。传统的表面压力测定是在所需位置,利用压力孔通过小管连接到压力传感器上进行(Barlow et al. 1999)。为了在复杂的飞行器模型上得到容许的压力场,需要有数百个压力孔。对于风洞实验,打孔、接管和准备工作劳动强度大且花费甚巨,而对薄的模型,如超声速运输机、军用飞机和小尺寸的风扇叶片,要设置大量压力孔是不可能的,而且,以非连续的压力孔所测得的压力分布最终限制了所测结果的空间分辨率,如无法显示复杂流场的某些信息。同样,传统上表面温度场测量也是在离散点安装温度传感器,如热电偶和电阻温度计进行测量(Moffat 1990)。

自 20 世纪 80 年代,发展了一种基于发光猝灭的新光学传感器来测定表面压力和表面温度。这些发光传感器被称之为压力敏感涂料(PSP)和温度敏感涂料(TSP)。与传统方法相比,它们提供了以非接触方式对复杂气动模型进行表面全域测量,以较小成本获得高空间分辨率测量结果的独特能力。因此,它们为实验空气动力学家提供了认识和深入理解飞行器绕流中大量物理现象的强有力工具。

PSP 和 TSP 用发光分子为探针,将它们混进合适的聚合物涂料中,并涂覆在空气动力学模型的表面。一般而言,PSP 和 TSP 所用的发光探针及聚合物胶黏

剂都可以溶于溶剂,所制得的涂料可用喷枪或刷子涂覆在模型表面。溶剂挥发后,在模型表面形成了一层含有发光分子的固体涂层。当合适波长的光照射涂层,发光分子受激发,并发出较激发波长更长的光。图 1.1 为涂层在适当波长的光激发下的发光示意图。

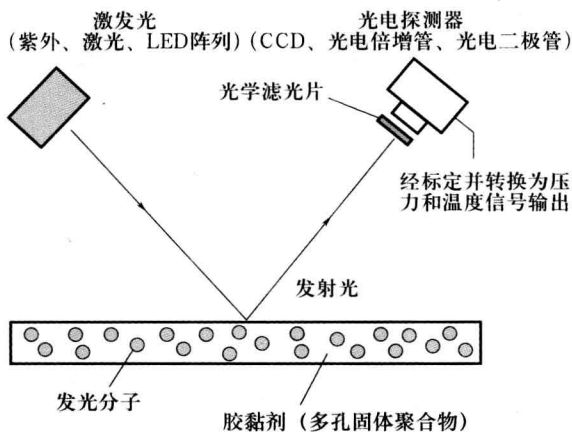


图 1.1 | 模型表面发光涂料(PSP 和 TSP)工作原理图

从涂层发出的发射光受某些光物理过程的影响。在 PSP 中,主要光物理过程是氧猝灭,即当氧分压或空气压力增加,引起发光强度降低的过程。PSP 中所采用的聚合物胶黏剂是可透氧的,可允许氧分子和聚合物胶黏剂中的发光分子相互作用。对某些快速响应的 PSP 而言,发光分子和溶剂混合后直接涂在多孔固体表面。事实上,PSP 是一种氧敏感的传感器。相比之下,TSP 的主要工作原理是热猝灭,即当温度升高,发光强度降低。由于热猝灭 PSP(TSP)本质上是温度敏感的,又因为 TSP 所用的聚合物黏胶剂是不可透氧的,所以 TSP 对空气压力不敏感。对 PSP 和 TSP 进行适当校正后,通过检测发射光强度,就可远程测定压力和温度。PSP 和 TSP 堪称姐妹技术,因为它们不仅都用发光分子作为探针,而且用相同测定体系和相似的数据处理方法。

## 1.1 压力敏感涂料

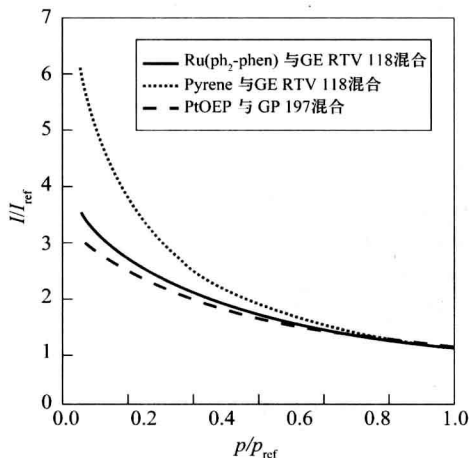
PSP 的基本概念比较简单。发光体吸收了一定辐射频率的光子后,可从电子基态被激发到电子激发态,受激发的电子通过辐射和无辐射过程回到基态。其中辐射过程称之为发光(通常为荧光和磷光的总称)。在无辐射过程中,激发

态可以通过激发态发光体和氧分子相互作用而失活,这就是发光的氧猝灭。按照亨利定律,在PSP聚合物内的氧浓度正比于聚合物表面气体的氧分压。对于空气,其压力正比于氧分压,所以,空气压力越高,PSP层中氧分子越多,发光分子被猝灭也越多。因此,发光强度是随空气压力递减的函数。

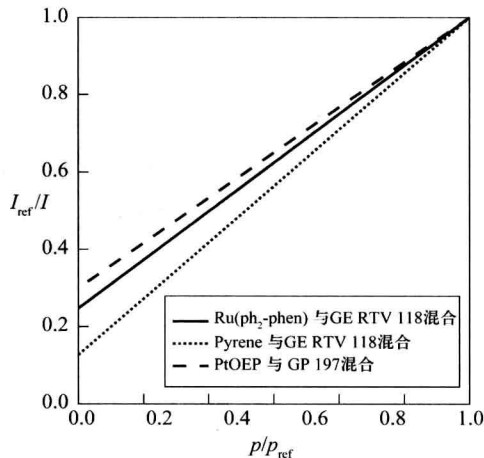
发光强度和氧浓度之间的关系可用 Stern-Volmer 关系来描述。对实验空气动力学而言,发光强度  $I$  和空气压力  $p$  之间一个简便的 Stern-Volmer 关系式是:

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = A + B \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad (1.1)$$

式中: $I_{\text{ref}}$ 和 $p_{\text{ref}}$ 分别是参照条件下的发光强度和压力;Stern-Volmer 系数  $A$  和  $B$  在实验中通过校正测得。由于热猝灭作用,它们都有温度依赖性。理论上说, $I_{\text{ref}}/I$  可以消除非均匀照射、涂层的不均匀和发光体在PSP中浓度不均匀分布等因素的影响。在典型的风洞实验中, $I_{\text{ref}}$ 常常取风洞未启动时的发光强度值,因此 $I_{\text{ref}}$ 常常称之为无风时的发光强度(或图像),同样, $I$ 则被称之为有风时的发光强度(或图像)。图 1.2 和图 1.3 分别是 3 种 PSP 在室温下压力和发光强度之间关系及 Stern-Volmer 图,3 种 PSP 分别由 Ru(ph<sub>2</sub>-phen)与 GE RTV 118,Pyrene 与 GE RTV 118 及 PtOEP 与 GP 197 混合制得。



**图 1.2** 3 种 PSP 在室温下发光强度与压力的关系  
 $p_{\text{ref}}$ —环境压力;  
 $I_{\text{ref}}$ —环境压力下的发光强度。



**图 1.3** 3 种 PSP 在室温下的 Stern-Volmer 图  
 $p_{\text{ref}}$ —环境压力;  
 $I_{\text{ref}}$ —环境压力下的发光强度。

PSP 和 TSP 的测量系统通常由涂层、照射光源、检测器和数据采集处理单元组成。图 1.4 是 PSP 和 TSP 通用的 CCD 照相系统。很多光源都可应用于 PSP/TSP, 包括激光光源、紫外灯、氙灯和发光二极管(LED)。具有科学级电荷耦合(CCD)的相机常被用作检测器, 这是因为它们有很好的线性响应、高动态范围和低噪声。其他通用的光检测器是光电倍增管(PMT)和光二极管(PD)。典型的激光扫描系统如图 1.5 所示, 通常采用带有计算机控制的扫描反射镜的激光作照射光源, PMT 和一个锁相放大器一起作为检测器用于强度和相位测定。在该两个系统中, 用光学滤片以分离发射光和激发光。

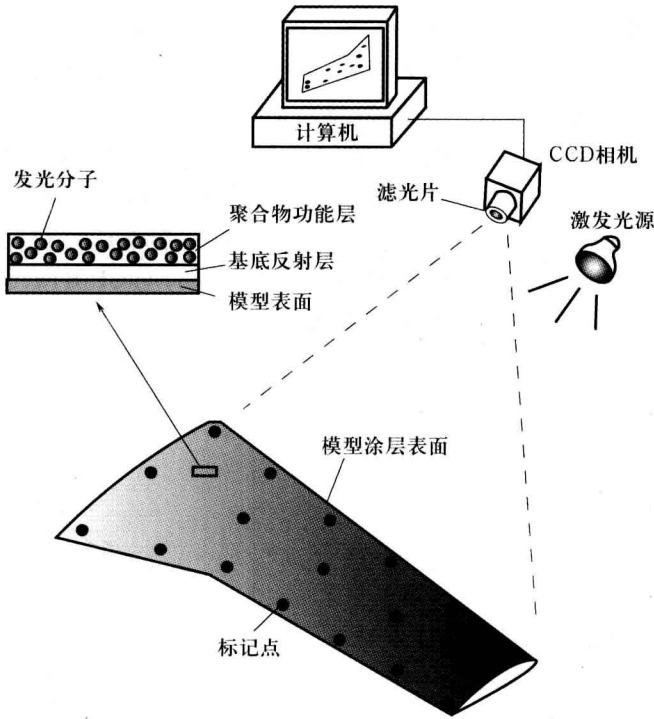


图 1.4 | PSP 和 TSP 通用的 CCD 照相系统

当 PSP 经标定后, 原则上, 从发光强度用 Stern-Volmer 关系就可直接计算压力。然而, 为了排除误差和提高 PSP 的测量精度, 实际上数据处理是比较耗费精力的。对光强型 CCD 相机系统, 有风时采集的图像往往和无风时的参照图像不能调准重合, 这是在风洞试验时由于模型的气动力弹性形变造成的。因此, 在应用这些图像发光强度比值前, 必须用图像对准技术将有风时采集的图像重新核准到无风时采集的图像。另外, 因为 Stern-Volmer 系数  $A$  和  $B$  有温度依赖性,

因而需要进行温度校正,因为 PSP 的温度效应是 PSP 测定中最主要的误差源,在风洞试验时,通过原位校正方法使 PSP 的温度效应得以最大程度的补偿。所谓原位校正法就是风洞试验时,在模型表面适当区域,将发光强度数据用采集到的压力孔数据进行直接标定。为进一步降低测定的不确定性,也应用其他一些数据处理方法,包括图像累加、暗电流校正、平场校正、照度补偿和自照度校正。采集压力图像后,为使压力数据对飞行器设计工程师更加有用,图像平面的数据应该以三维物体空间绘制在模型表面网格上。因此,必须用几何相机标定和图像交叉方法以建立图像平面与三维物体空间之间的关系。

除单发光体 PSP 的光强比法外,近年还发展了寿命测定体系和多发光组分 PSP 体系。理论上,发光寿命与发光体浓度、照射光强度及涂层厚度无关。因此,寿命法不需要参照强度(或图像),对变形模型而言是理想的方法,避免了光强比法中对变形模型进行的繁琐处理过程。同样,发展多发光体 PSP 体系的一个目的是为了消除无风时参照图像的采集,以及降低和模型变形相关的误差;用多发光体 PSP 体系的另一目的是为了补偿 PSP 的温度影响。

大部分 PSP 测量都已在大型生产型风洞和小型研究型风洞中应用,包括高声速、跨声速和超声速流场中对多种气动试验模型的测量;PSP 在马赫数为 0.3~3.0 特别有效。图 1.6 是 F-16C 模型在马赫数为 0.9、攻角为 4° 时所得

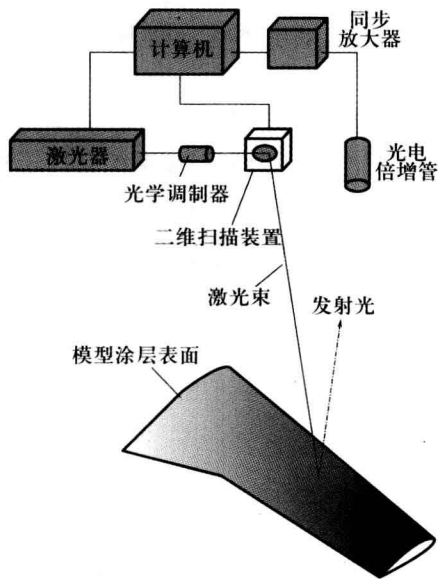


图 1.5 | PSP 和 TSP 的典型激光扫描系统

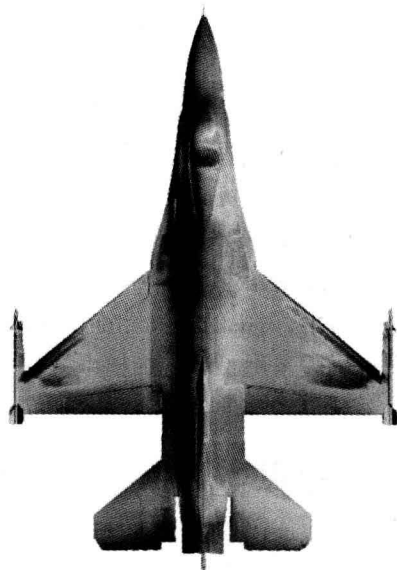


图 1.6 | F-16C 模型在马赫数为 0.9 风速和攻角为 4° 时的 PSP 图像(Sellers 2000)



到的典型的 PSP 压力场结果。该结果是由 Sellers 及其同事在 Arnold Engineering Development Center (AEDC) 取得的 (Sellers 1998a, 1998b, 2000; Sellers and Brill 1994)。在大型风洞试验中, PSP 精度一般为 0.02 ~ 0.03 压力系数, 对于控制良好的试验, 绝对压力精度可以达到 1mbar\* (0.0145psi)。在瞬时 (short-duration) 高超声速风洞中 (马赫数为 6 ~ 10), PSP 测量需要快时间响应和最小的 PSP 的温度响应。无胶黏剂和多孔型阳极化处理铝材 (AA) 的 PSP 已经用于高超声速流场和旋转部件测量, 因为它们响应时间很短, 与传统的聚合物型 PSP 的响应时间 0.5s 相比, 其响应时间仅 30 $\mu$ s ~ 100 $\mu$ s; 因为 AA - PSP 是铝材模型的一部分, 由于铝的高热导性能, 在短时间内表面升温相当小。多孔型 PSP 通常在低温下显示压力敏感性, AA - PSP 和聚合物型多孔 PSP 已用于低温风洞的压力测量, 其温度可低至 90K, 而在这种环境中氧的浓度是极低的。

在低速流场, PSP 测量较为困难。因为在低速测量中, 必须能分辨很小的压力变化, 而且测量误差必须达到定量结果可接受的的水平。某些低速 PSP 测量已应用于三角机翼, 可显示由于前缘涡流引起上表面压力相当大的变化。另外, 已在翼型、汽车模型和冲击射流测量中引入了速度低至 20m/s 的低速 PSP 试验。在低速流场中, PSP 的压力分辨率最终受 CCD 相机的光子发射噪声的限制。为了克服 PSP 测量方法在低速流场应用的局限, 在较高马赫数的亚声速流场中, 建议用消除可压缩效应的方法补偿 PSP 结果中不可压缩压力系数的影响。

因为 PSP 是一种非接触技术, 它特别适用于旋转部件中旋转叶片的压力测量, 而常规方法很难适用于这些部件。CCD 相机系统和激光扫描系统已用于喷气发动机和直升机旋转叶片的 PSP 测量。在某些研究中, 用喷射实验作为规范的流场以测试 PSP 体系的功能。飞行试验是一个有挑战性的领域, 在这个领域, PSP 已显示出其作为一种非接触性的光学压力测量技术的优点。在早期的飞行试验中, 飞机的机翼和部件的压力分布都用胶片相机系统进行测量, 而最近的飞行试验采用了激光扫描系统。

## 1.2 温度敏感涂料

TSP 也是一种以高分子为基质的涂料, 涂料中含有对温度敏感的发光分子。

\* 译者注: 1mbar = 100Pa。