

文章编号: 1001-4888(2010)03-0261-10

基于染料的光弹性涂层方法回顾与展望^{*}

花世群¹, 骆英²

(1. 江苏大学 理学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏大学 国际合作与交流处, 江苏镇江 212013)

摘要: 光弹性涂层法是最常用的实验应变分析测试技术之一,但其实际应用受到诸如准备时间长、基底加强效应、复杂的数据后期处理等固有局限性的影响。近年来,出现了两种通过在光弹性聚合物材料中添加非发光染料或发光染料的新的光弹性涂层制作方法。这种基于染料的光弹性涂层使新方法能够克服上述传统光弹性涂层法应用中的许多局限性,并有望成为重要的应变测量工具。论文回顾了这两种新的基于染料的光弹性涂层方法的提出与发展过程,分别介绍了两种测量方法的实验装置、基本原理及一些实际应用,总结了两种新方法各自的优点与不足。最后指出了基于添加发光染料的发光光弹性涂层的未来发展方向和技术改进。

关键词: 光弹性涂层; 光弹性; 染料; 发光; 应变

中图分类号: O348.4 **文献标识码:** A

0 引言

光弹性贴片法是利用光的双折射现象,先在试件(或实物)表面上粘贴一层灵敏度较高、具有光学双折射效应的薄片,再在偏振光的照射下,通过观察测定由反射光产生的干涉条纹,进而求得该试件(或实物)表面应变分布的一种实验应力分析方法^[1,2]。光弹性贴片法在实际应用中为提高测量信号强度,常在试件表面制作反光层或在粘结层中添加反光粒子,故又称为反射光弹性贴片法(reflective photoelastic coating, RPC)。

RPC 方法尽管与光弹性方法一样,都是基于光敏材料应变—光学干涉效应来测量构件表面应变(应力)信息的实验测试技术,但它不像透射光弹性技术那样,只能在实验室内进行模型实验,而是可以直接用于工程实物的现场测量。由于其不但具有直观、形象、实时、全场大面积、非接触测量等特点;同时又可以测弹性、塑性^[3]、弹—塑性^[4]以及疲劳断裂等多种情况下的应变场^[5],且性能比较稳定,所以, RPC 方法从建立之初就成为实验力学的一个重要组成部分,在航空航天^[5,6]、汽车^[7]、压力容器^[8]、建筑^[9]、生物力学^[10]、快速成型^[11]等众多领域的结构应力分析中都获得了成功应用。

RPC 方法经过多年的普及与推广,已经成为反映结构构件应力分布最有效和可靠的手段之一。上世纪 80 年代随着图像处理技术的逐渐流行,研究人员开始将这一技术应用于光弹性条纹图的分析^[2, 12, 13]。后来,随着计算机性能的进一步提高,图像处理技术的快速发展,廉价且易于使用的商业软件的开发以及高性价比的数字图像处理设备的出现,大量的基于计算机的图像处理技术,如频谱分析法(spectral content analysis)^[2, 14, 15],傅立叶分析方法(Fourier analysis method)^[2, 16, 17]和相移法(phase-shifting method)^[2, 18, 19]等被应用于条纹级数和主应变方向的确定,参考文献[20]和[21]已对这些方法进行了综述;另外,近年来,许多基于上述图像处理技术的多用途光弹仪和一些专门用于 RPC 方法的仪

^{*} 收稿日期: 2009-11-03; 修订日期: 2010-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972092)

通讯作者: 花世群(1965—),男,在读博士,副教授,主要从事光测力学及光学计量测试研究。E-mail: huasq65@163.com

器的出现,其实时、自动化的数据采集和处理能力,使传统的 RPC 方法焕发出新的生机和活力。

从 1998 年至 2005 年,出现了两种通过在光弹性聚合物材料中添加非发光染料或发光染料的新的光弹性涂层制作方法。新的涂层制作方法克服了传统 RPC 方法应用中存在诸如费时、基底加强效应、需要多条纹计数和位相去包裹等诸多固有问题,更重要的是,新涂层的技术特点,使光弹性涂层法的应用过程更简单、应用领域更广泛。

本文综述了两种基于染料的光弹性涂层法的各自产生背景、测量系统组成和基本实验原理;分析并总结了两种新涂层实际应用中的优点和局限性,以及目前的测量分辨率和一些实用事例。最后,对仍处于不断完善中的基于添加发光染料的光弹性涂层法的发展方向和技术改进进行了展望。

1 彩色光弹性涂层法

传统 RPC 方法在实际应用时,首先要制作厚度均匀的光贴片,而光贴片的制作包括下面几个主要步骤^[1,25]: (1) 手工制作与测试试件表面外形相应的光弹性薄片;(2) 对测试试件表面进行预处理,并在贴片的粘贴处制作反光层;(3) 选用合适的粘结剂将制作好的光弹性薄片粘贴在测量构件表面。而从第一步试样模版制备到最后合乎要求光贴片的粘贴完备,整个过程对实验人员的要求较高,需要一定的经验与技巧,而且光贴片的整个制作过程需要耗费较长的时间。

为了突破 RPC 方法应用中的上述局限性,一个可以采用的替代方法就是用喷涂设备在试件表面直接制作光弹性涂层。喷涂方法制作光弹性涂层虽提出多年^[26],但很少用于构件表面应变分布的定量分析,原因在于传统的 RPC 方法本身不能够提供对光弹性涂层厚度的直接测量,当 RPC 方法中应用喷涂法制作光弹性涂层时,所得到的应变测量结果会受到涂层厚度变化带来的误差影响,且无法根据构件表面涂层的厚度分布信息而加以修正。

1.1 彩色涂层厚度测量

为了修正 RPC 方法中应用喷涂法制作光弹性涂层造成的厚度不均匀对应变测量结果的误差影响,Lesniak 等人^[22]首先提出制作彩色光弹性涂层(tinted reflective photoelastic coating, TRPC)的解决方法。即在喷涂的光弹性涂层材料中加入一定量的普通染料,利用所制作的彩色光弹性涂层对入射白光中红光(R)、绿光(G)和蓝光(B)三种光波不同程度的吸收、透射和衰减作用,由 RGB 相机自动采集三个不同波长光波的强度数据,再根据公式(1)^[22]获取构件表面涂层厚度的二维分布信息,以便用于修正构件表面应力(应变)分布的测试结果,从而最终获取测量构件表面真实应变的大小和方向。

$$Thickness = \ln \frac{G-B}{R-B} \quad (1)$$

1.2 实验装置

用于 TRPC 方法的光学测量系统称为灰度场光弹仪(Grey-field polariscope, GFP),它不同于光弹性贴片法中常用的反射式光弹仪,可分为三个部分^[22]: (1) 由光源、起偏镜、四分之一波片等组成的供光部分,提供用于投射到光弹性涂层表面的圆偏振光;(2) 测量构件加载部分;(3) 由变焦透镜(28~70mm)、RGB 相机及相关处理软件等组成的系统控制与测量部分,用于测量信号的强度采集与后续的数据处理。目前,灰度场光弹仪已经可以从 Stress Photonics Inc. 等公司购买。GFP 最初是由美国 NASA 在 1998 年开发,主要用于可见光范围、透明材料的全场、高分辨率的应变分析。GFP 是基于视频锁相技术和计算机技术的全自动光弹仪,特别适用于通过处理次级条纹图来获得材料的剪应变大小和方向。

GFP 的应变分辨率为 $20 \mu\epsilon$ (相当于 1/100 个条纹),空间分辨率为 320×240 像素,图像的采集时间为 10s。该光学测量系统提供了之前其它光弹仪所不具备的一个附加功能,就是能够对用喷涂法制作的彩色光弹性涂层的厚度进行测量,厚度测量精度达到 $\pm 5\%$ 。

1.3 TRPC 方法原理

TRPC 方法与传统 RPC 方法相似,也是基于反射光弹性原理,且只能用于传统 RPC 方法的应用领域,两者之间的主要差别在于 TRPC 方法能够提供构件表面涂层厚度的二维分布。文献[22]说明了利

用彩色涂层厚度的二维分布,对构件表面应力(应变)分布的测试结果进行厚度修正的具体方法。

1.4 TRPC 方法的特点

与传统的 RPC 方法相比,TRPC 方法具有如下特点:

(1) 简化了涂层制作:通过喷涂法制作涂层,缩短了应用 TRPC 方法的前期准备时间,特别是对表面形状复杂的构件。

(2) 涂层厚度自动测量:TRPC 方法不仅能够用于应变分布测量,系统无须其它的辅助设备和技术,还实现了涂层厚度分布的自动测量。

(3) 减少残余应力和基底加强效应:传统 RPC 方法中使用的光贴片较厚,且一次制作成型,为了获得精确的测量结果要考虑光贴片残余应力和对基底加强效应的影响;而 TRPC 方法中使用的涂层较薄,基底加强效应可以忽略,而且涂层采用的是多次喷涂的制作方法,涂层中残余应力也很小。

(4) 简化了数据的采集与处理:应用传统 RPC 方法,光贴片上出现多条干涉条纹,且干涉条纹的级数并不相同,必须进行多条计数和复杂的位相去包裹,才能获得所需的应力(应变)分布。由于 TRPC 方法中的涂层是采用薄的、多次喷涂方法制作的,选择喷涂次数控制涂层厚度,从而使干涉条纹的级数小于一级,其应力(应变)测量结果只需通过次条纹分析获得,数据处理过程更加简单快捷。

目前,TRPC 方法的上述特点已经在其实际应用中得到充分显现。如用 TRPC 方法分析铆钉周围的应力集中时,所制作的彩色涂层的厚度通常在 0.1~0.4mm 之间^[27],只需花几分钟时间的喷涂、再加几小时的固化,便完成涂层制作,从制作涂层到完成最终的应力分析,整个过程只需不到一天的时间;而传统 RPC 方法完成同样过程则需几天的时间。另外,TRPC 方法已经用于玻璃生产工业中产品的实时应力分析,使产品的不合格率从原来的大于 10%降到现在的 0.2%^[28]。

2 发光光弹性涂层法

TRPC 方法应用于实验应力分析,尽管涂层厚度不均匀性对测量结果的影响可以根据涂层的厚度分布进行修正,但方法自身提供的涂层厚度测量精度限制了 TRPC 方法的应用。

发光染料在生物、医药、化工等许多领域一直都有很重要的应用^[29-31],如可用于增加聚合物透明度等许多具有特殊功用的发光功能性纳米粒子,则是目前科学研究中的热点^[32-35]。受到在涂层中添加非发光染料的启发,并考虑到发光染料的特殊光学性能,美国佛罗里达大学(University of Florida)由 Hubner 所领导的研究小组与伟世通公司(Visteon Corporation)合作,于 2003 年开发出一种新的用于实验应力分析的发光光弹性涂层(luminescent photoelastic coating,LPC)^[36-46]。

2.1 染料发光过程

LPC 方法是基于光弹性涂层法和光致发光原理的新的实验应力测试技术,为了更好地理解发光光弹性涂层法的基本原理,以及该方法的技术特点,首先介绍一下分子荧光的产生过程。分子荧光的产生过程可用 Jablonski 能级图详细说明^[47],简单地讲,分子荧光产生可分为图 1 所示的三个过程:

首先,发光体受到合适频率的电磁辐射激发吸收能量,发光体中的分子从能级最低的基态(S_0)跃迁到能级较高的激发单重态(S_1')。在这个能量吸收过程,发光体中的分子吸收入射光中能量为 $h_0 c / \lambda_{ex}$ 的光子,其中 h_0 为普朗克常数; c 为光速; λ_{ex} 为激发光波波长。

其次,因处于激发态的分子不稳定,发光体很快会经历内转移(internal conversion)和振动弛豫(vibrational relaxation)等方式跃迁到第一激发单重态中的最低振动能级(S_1)。

最后,发光体分子发射能量为 $h_0 c / \lambda_{em}$ (λ_{em} 发射光波波长)的光子(即分子荧光),从第一激发单重态中的最低振动能级(S_1)回到基态(S_0)。

由于受激分子在内转移和振动弛豫等衰变过程中的能量损失,发射光波波长要大于激发光波波长,吸收与发射过程中的能量损失导致的波长变化($\lambda_{em} - \lambda_{ex}$)称为 Stokes 位移。发射光波与激发光波的波

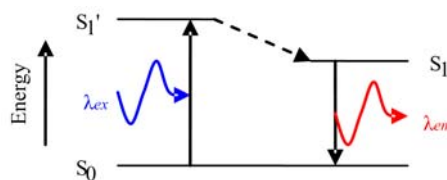


图1 荧光原理示意图

Fig. 1 Luminescence principle

长不同,可被用于将激发光波从测量到的发射光波信号中分离出来。另外,发射荧光的光子数和吸收激发光的光子数之比值称为荧光量子产率(或荧光效率),它表示了物质发射荧光的效率和本领。

2.2 实验装置

图 2 是 LPC 方法的测量装置示意图,整个测量系统由光源(中心波长 465nm 的 LED 光源)、激发光波滤光片、起偏镜、对应于激发光波波长的四分之一波片、分析镜、发射光波滤光片(波长 600nm,带通 40nm)、分析镜转动装置、科学级 CCD(空间分辨率为 512×512 像素或 1024×1024 像素)、50mm 的标准透镜或变焦透镜、计算机及相关软件等组成,其中 LED 光源、CCD 相机及分析镜的转动都由软件自动控制。

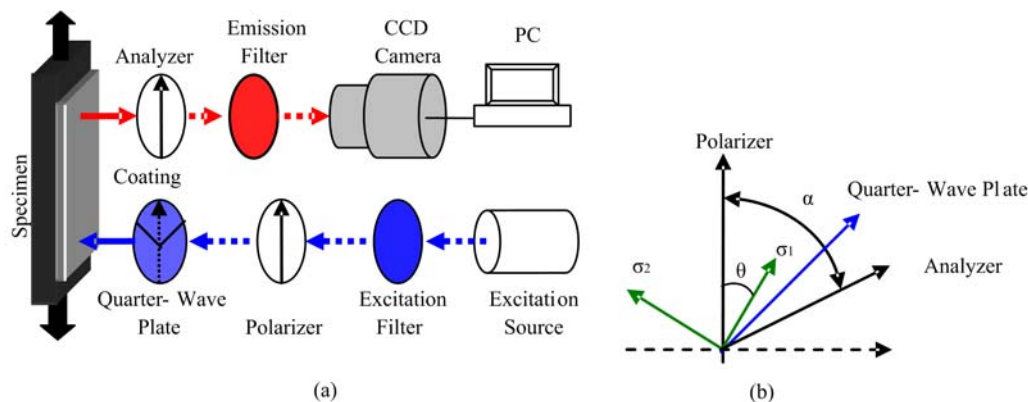


图 2 实验装置:(a) 测量系统,(b) 分析镜与应力主轴相对位置

Fig. 2 Experimental setup: (a) measurement system, (b) orientation of the optical elements

2.3 涂层结构

LPC 方法中的光弹性涂层也采用喷涂制作方法,目前有两种不同的涂层结构,分别是测量结果与涂层厚度有关的双涂层结构和测量结果与涂层厚度无关的单涂层结构。

2.3.1 双涂层结构与涂层厚度测量

图 3(a)为双涂层结构示意图,由发光底层和光弹性外层组成^[38]。制作方法:先将选定的能保持激发光的偏振状态的可溶性发光染料(图中用●表示)加入制作发光底层的聚亚安酯溶液,再用喷涂设备在经过预处理的试件表面直接喷涂;最后,在制作好的发光底层表面,采用薄的、多次喷涂方法喷涂光弹性涂层,喷涂过程可根据涂层的流动性适当添加触变剂。

与 TRPC 方法相同,LPC 方法中采用双涂层结构的涂层,测量结果也会受涂层厚度不均匀性的影响,应根据涂层的厚度分布进行修正。可供 LPC 方法中选用的涂层厚度测量法很多,常用的是比率测量法。

比率测量法采用在发光底层和光弹性外层中分别添加两种不同的发光染料(底层添加染料 1,外层添加染料 2),当染料 1 的发射光谱和染料 2 的吸收光谱有重叠时,则光弹性层的厚度可由染料 2 在发射波长 λ_2 处的强度 $I(\lambda_2)$ 与染料 1 在发射波长 λ_1 处的强度 $I(\lambda_1)$ 之比用公式(2)确定^[48]。

$$Thickness = \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \quad (2)$$

2.3.2 单涂层结构与结果厚度无关

为了更有效地解决采用喷涂法制作涂层时,涂层厚度不均匀性对测量结果的影响,在提出双涂层结构一年后,Hubner 等人又进一步提出了测量结果与涂层厚度无关的单涂层结构^[39]。图 3(b)为单涂层结构示意图,它是既具有发光特性又具有应变敏感特性的单一涂层,采用将发光染料和吸收染料(图中用◆表示)同时加入涂层溶液中进行喷涂的制作方法。

在 LPC 单涂层结构方法中,发光光弹性涂层内既有发光染料又有吸收染料(吸收染料本身不发射,只对发光染料的发射光波起衰减作用)。根据比尔—朗伯定律,通过调节涂层内吸收染料的浓度,利用

其衰减作用限制激发光波进入涂层的深度,使之不能到达试件表面。设涂层内吸收染料的吸收系数为 a ,当光弹性涂层的厚度 h 满足条件: $e^{-ah} \rightarrow 0$,也就是只要涂层的厚度大于激发光的穿透深度,即可认为单涂层结构方法测量结果与涂层厚度无关,无须考虑涂层厚度不均匀性。

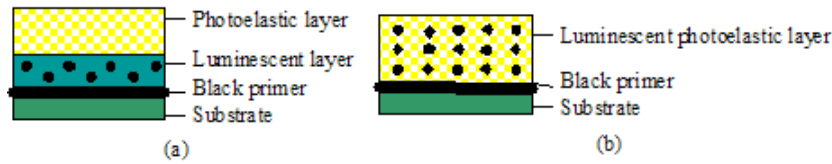


图3 涂层结构剖面示意图

Fig. 3 Cross-sectional schematic diagram of the coating structure

需要说明的是,无论是制作双涂层结构还是单涂层结构的涂层,都要采用薄的、多次喷涂方法,以便减少涂层残余应力和基底加强效应,而且每层喷涂结束后必须用紫外光进行固化处理。

2.4 实验原理

LPC方法用于应力(应变)分析时,从光源(LED)发出的波长为 λ_{ex} 的光波,依次通过滤光片、起偏镜和四分之一波片,成为单色圆偏振光。该圆偏振光作为激发光波在构件表面入射时,会激发光弹性涂层中的荧光染料分子发射波长为 λ_{em} 的荧光测量信号(发射光波)。被反射的激发光波与涂层中荧光染料分子发出的发射光波,经分析镜、发射滤光片(只允许波长为 λ_{em} 的发射光波通过)后,用科学级CCD相机采集,最后通过计算机对采集到的条纹图进行后期处理。

当激发光波在构件表面垂直入射时,LPC方法中CCD采集到的两种不同涂层结构的荧光信号强度都可统一表示为^[38,39]:

$$\frac{I}{I_{avg}} = 1 + F_{CSR} \sin 2(\alpha - \theta) \quad (3)$$

其中, I 为测量到的荧光信号强度; I_{avg} 为检偏镜转动 180° 的过程中所测量到的信号强度平均值; α 为检偏镜偏振轴方向与起偏镜偏振轴方向夹角; θ 为第一主应力(应变)方向与起偏镜偏振轴方向夹角; F_{CSR} 称为涂层的光学应变响应。对图3所示的双涂层结构和单涂层结构, F_{CSR} 可分别表示为:

$$F_{CSR} = \phi \sin(2\pi k h \gamma / \lambda) \quad (4.1)$$

$$F_{CSR} = \phi \left\{ \frac{2\pi k \gamma / (a\lambda)}{1 + [2\pi k \gamma / (a\lambda)]^2} \right\} \quad (4.2)$$

其中, ϕ 为荧光染料偏振系数; k 为涂层光学灵敏度; γ 为涂层面内的最大剪应变; $\lambda = \lambda_{ex} \lambda_{em} / (\lambda_{ex} + \lambda_{em})$ 为光波有效波长。

2.5 图像采集与数据处理

应用LPC方法时,为了尽可能减少背景信号对所测量荧光信号的影响,所有图像的采集都在暗的环境条件下进行。测量过程中通过软件控制转动装置转动检偏镜,使检偏镜偏振轴方向与起偏镜偏振轴方向夹角 α 按照下式取值:

$$\alpha = \pi(n-1)/N \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

其中, N 为任取正整数; n 为采集次数。

在采集完不同 α 角的强度图像后,根据(3)式进行强度曲线拟合,拟合所得的 θ 用于表示主应力(主应变)方向,光学应变响应值 F_{CSR} 代入(4.1)式或(4.2)式,则双涂层结构和单涂层结构的涂层面内最大剪应变分别表示为:

$$\gamma = \frac{\lambda}{2\pi k h} \arcsin \left(\frac{F_{CSR}}{\phi} \right) \quad (5.1)$$

$$\gamma = \frac{a\lambda [1 - \sqrt{1 - 4(F_{CSR}/\phi)^2}]}{4\pi k (F_{CSR}/\phi)} \quad (5.2)$$

当然,由双涂层结构方法获得的涂层面内最大剪应变要进行厚度修正。

2.6 技术优点

LPC 方法除了具备 TRPC 方法的全部优点外,还具有如下技术特点:

(1) 解决了涂层厚度不均匀影响:通过在涂层中加入荧光染料,既保证了比率法对双涂层结构涂层厚度分布的精确测量,又使单涂层结构具有应力(应变)测量结果与涂层厚度无关的特点。

(2) 高质量条纹图:RPC 方法和 TRPC 方法所获得的条纹都是由构件表面的反射光干涉产生的,因此构件表面的各种缺陷也同时被带入到条纹图像中,图像噪声明显^[24,49]。另外,入射光在涂层表面上的反射光没有通过光弹性涂层,不含任何有用的测量信息,与构件表面的反射光一同存在于采集图像中,且因波长相同无法分离,可见,RPC 方法和 TRPC 方法的条纹图对比度不高,信噪比较低。而在 LPC 法的测量系统中,由于发射滤光片只允许波长为 λ_m 的发射光波通过,采集到的条纹图像中不再含波长为 λ_{ex} 的成分,条纹图对比度和信噪比都得到很大提高。

(3) 高的离轴信号强度:由于 RPC 和 TRPC 方法都是基于光的反射原理,采集的光信号强度随光线与表面法线夹角 ζ 的增大而急剧减小;而 LPC 方法中涂层内的荧光染料分子在受到入射光波激发时,涂层中形成的是一个近似的 Lambertian 发射场,如同在涂层中存在一个分散的漫发射光源,其在测量空间形成的光场强度分布比 RPC 和 TRPC 方法中的光场强度分布要均匀得多。

文献[40]中的图 5 所示强度曲线反映了 RPC 方法和 LPC 方法的这种强度差别。LPC 方法的强度曲线表明,当倾角 $\zeta=15^\circ$ 时,光信号强度达到最大强度的 95% 以上,即使倾角 ζ 增加到 60° ,强度仍达到最大强度的 50% 左右。可见,高的离轴信号强度,使 LPC 方法不仅适用于二维或近似二维的构件表面的应变(应力)分析,对于形状复杂的三维构件同样适用,而且比 RPC 方法和 TRPC 方法具有更高的空间分辨率。

(4) 斜射法应力分离优势:由于光弹性实验只能获得等差线和等倾线,而平面应力状态有三个未知数,所以,光贴片法用于实验应力分析时,想要分离主应力或计算出主应力分量,还须借助于其它的实验或数值计算方法。

尽管可用于光弹性贴片法中分离主应力的实验方法很多,如斜射法、栅片法、脆性涂层法、热弹性法等。对于常用的斜射法,都是采用小倾角入射,由于 LPC 法在不超过 $\pm 10^\circ$ 的小倾角范围内,具有相对均匀的光强分布场,可见,LPC 法应用于曲面测量时,采用斜射法进行应变(应力)分离更具优势。

2.7 局限性

与 RPC 方法和 TRPC 方法相比,LPC 方法主要有以下不足:(1) 整个测量系统需要相对高的初始投入,特别是用于购买科学级 CCD 的花费;(2) 由于发光染料的发射光波强度会受温度影响,导致环境的温度变化会对应变测量结果有误差;(3) 数据的采集时间比较长,尤其是为了降低噪声而采集高强度图像。

目前,LPC 方法已经开始应用于实际构件的失效模式分析^[37,38]、应力集中的测量^[38,39]、有限元分析模式中边界条件的验证^[41],其中一些测试结果已被伟世通公司用于其产品设计^[37-39]。但是,LPC 方法中双涂层结构和单涂层结构的应变测量分辨率还仅分别为 $60 \mu\epsilon$ ^[38] 和 $50 \mu\epsilon$ ^[39],其用于动态加载条件下的应力(应变)分析和在结构的长期健康监测等方面还处于空白,还有待进一步的深入研究。

2.8 发光涂层展望

LPC 方法中理想的发光光弹性涂层应该只是应变敏感,温度变化对应变测量结果的影响^[44-46]应可通过温度的测量加以修正。然而现有的发光光弹性涂层只局限于涂层的应变测量,还无法测量其环境的温度变化。

为了获得精确的应变测量结果,修正温度变化的误差影响,LPC 方法中的发光光弹性涂层应该具有应变敏感和温度敏感双重特性;而且,这种具有双重性能的涂层有望使 LPC 方法用于构件的热应力分析时,无须像应用传统 RPC 方法时添加其它的温度测量设备^[50]。因此,为了使 LPC 方法能在复杂环境条件下,应用于包括应变在内的多参数测量,开发双用途甚至多用途的智能发光光弹性涂层应是未来的发展方向之一。

2.9 发光涂层改善

LPC 方法尽管已被成功开发并实际应用,但尚未达到理想的测量精度^[43,45]。为了提高信噪比,获得更高的测量精度,最简单的方法是设法增加 CCD 所采集的信号强度,解决方法有两种:一是在测量系统中采用更高性能的 CCD 相机,当然会增大系统的设备投入;二是改进涂层的透明度,提高发射光波逸出涂层时的强度,由于高透明度是对发光光弹性涂层的基本要求,显然,方法二更趋合理。

2.9.1 复合纳米粒子应用

用于制作光弹性涂层的光弹性材料,如环氧树脂、聚亚安酯、聚碳酸酯等,除了要满足用于应力(应变)测量的力学性能要求,还必须在可见光区光学透明^[51]。众所周知,材料光学透明度与材料内光的散射密切相关,而且,光的散射强度取决于粒子的尺度大小^[49]。因此,考虑到目前涂层中发光和/或吸收染料的颗粒大小,通过引入其它的新技术有望达到改进发光光弹性涂层透明度、提高采集的发射光波强度的预期目的。

目前,随着纳米技术的出现和不同工程需求的增加,已经开发出各种功能性纳米粒子,并在许多领域被广泛使用。研究结果表明,如核壳结构的纳米复合粒子,可通过减少粒子的光散射^[32-35],用于有效改善聚合物的光学透明度。而且,已有许多相对便宜、标准的合成方法^[52],用于制备具有高透明度、期望折射率的聚合物纳米复合材料^[53,54]。

可见,通过纳米技术的引进,制作所需的复合纳米粒子,以便尽可能减少散射影响,获得更透明的发光光弹性涂层,无论是在基本原理,还是在实际操作方面都是可行的。

2.9.2 量子点应用

目前,用于 LPC 方法中可见光范围的发光染料包括罗丹明、二萘嵌苯、二萘嵌苯二酰亚胺及金属络合物等^[38,39],这些发光染料采用中心波长 465nm 的蓝色 LED 光源激发,这些发光染料的单波长激发、宽发射光谱特性,使其在所选定测量波长位置处信噪比的提高受到一定的限制。

量子点(quantum dot, QD)是指直径在 1~100nm 范围内的半导体纳米晶体^[55],作为一种最新型的荧光材料,它们的体积非常小,与传统的荧光材料相比具有诸多独特的光学特性^[55],其中包括:可通过控制它的大小来获取所需的发射波长、激发光谱宽并且连续分布、发射光谱单色性好、高的荧光信号强度和光稳定性、高量子产率、大的 Stokes 位移、可以使用同一波长光波激发不同大小的量子点等。

因此,将量子点技术应用于发光光弹性涂层,不仅可以减少光散射影响,提高涂层透明度,而且量子点特有的宽激发光谱、窄发射光谱的频谱特性为灵活选择激发波长和进一步提高检测的灵敏度创造了条件。

3 结束语

在过去近 10 年的时间内,传统的光弹性涂层方法已发展成为一个更有效和易于使用的光学测试技术。新的测试技术不仅突破了传统方法应用中的许多限制,而且许多方面的成功应用也证明,新方法已成为一个功能强大,不可或缺的应力(应变)测量工具。

本文系统回顾了新近出现的基于染料的光弹性涂层(彩色光弹性涂层和发光光弹性涂层)的性能特点及应用方法,并且考虑到 LPC 方法更广阔的应用前景,对发光光弹性涂层作了更详细的介绍。文章还指出了开发具有应变和温度双重敏感特性的双用途涂层的这一发光涂层的未来发展方向,并对提高现有发光涂层的透明度、灵活选择激发波长所需的技术改进进行了描述。

尽管目前的 TRPC 方法能够对涂层厚度进行测量,但该方法仍局限于传统 RPC 方法的应用领域。LPC 方法不仅能够用于平面和曲面的表面应变分析,而且有在应用斜射法分离主应变方面的优势,因此,要对复杂的三维构件表面的全场应变分布进行测量,LPC 方法更实用和有效。可以预见,随着方法的不断完善和精度的不断提高,LPC 方法的技术特点会得到越来越多的关注和应用,并将成为未来最主要的应变分析工具之一。但是,考虑到 LPC 方法较高的初始投入和相对较长的图像采集时间,TRPC 方法仍将是目前用于结构应变分析的主要工具。

参考文献:

- [1] Zandman F, Redner S and Dally J W. Photoelastic coatings[M]. Ames: Iowa State University Press, 1977.
- [2] Ramesh, K. Digital photoelasticity: advanced techniques and applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [3] Akhmetzyanov M and Albaut G. Study of large plastic strains and fracture in metal elements by photoelastic coating method[J]. International Journal of Fracture, 2004, 128(1):223—231.
- [4] Matsumoto N, Ohtaki S, Ohira M. and Kasayama H. Elastic-plastic behaviour of a plate with a central hole by photoelastic coating method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2005, (3-4): 27—32.
- [5] Hastie R L, Fredell R and Dally J W. Photoelastic study of crack repair[J]. Experimental Mechanics, 1998, 38(1):29—36.
- [6] Patterson E, Brailly P and Taroni M. High frequency quantitative photoelasticity applied to jet engine components[J]. Experimental Mechanics, 2006, 46(6):661—668.
- [7] Smith N P, Palma E S and Figueiredo B V M. Stress analysis in automobile components using reflexive photoelasticity technique[J]. Applied Mechanics and Materials, 2006, (5-6):117—124.
- [8] Case R O and Holly J N. Photoelastic-coating analysis of a thermoplastic, rectangular-parallelepiped pressure vessel[J]. Experimental Mechanics, 1978, 18(11):431—435.
- [9] Chang C W and Lien H S. Expansion stress analysis of ferroconcrete corrosion by digital reflection photoelasticity[J]. NDT&E. International, 2007, 40(4):309—314.
- [10] Hirokawa S, Yamamoto K and Kawada T. Circumferential measurement and analysis of strain distribution in the human ACL using a photoelastic coating method[J]. Journal Biomechanics, 2001, 34(9):1135—1143.
- [11] Ramesh K, Kumar M A and Dhande S G. Fusion of photoelasticity rapid prototyping and rapid tooling technologies[J]. Experimental Techniques, 1999, 23,:36—38.
- [12] Voloshin A S and Burger C P. Half-fringe photoelasticity: a new approach to whole-field stress analysis[J]. Experimental Mechanics, 1983, 23(3):304—313.
- [13] Patterson, E A. Automated photoelastic analysis[J]. Strain, 1988, 24(1):15—20.
- [14] Ajovalasit A, Barone S and Petrucci G. Towards RGB photoelasticity: full-field automated photoelasticity in white light[J]. Experimental Mechanics, 1995, 35(3):193—200.
- [15] Chang C W, Lien H S and Lin J H. Determination of reflection photoelasticity fringes analysis with digital image-discrete processing[J]. Measurement, 2008, 41(8): 862—869.
- [16] Morimoto Y, Morimoto Y Jr and Hayashi T. Separation of isochromatics and isoclinics using Fourier transform[J]. Experimental Techniques, 1994, 18(5):13—17.
- [17] Ajivalasit A and Zuccarello B. Limitation of Fourier transform photoelasticity: in fluence of isoclinics[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(4):384 — 392.
- [18] Ramesh K and Mangal S K. Automation of data acquisition in reflection photoelasticity by phase shifting methodology[J]. Strain, 1997, 33(3):95—100.
- [19] Chen T Y and Chen T F. Whole-field digital measurements of isochromatics and isoclinics in photoelastic coatings[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(5): 325—338.
- [20] Ajolavisit A, Barone S and Petrucci G. A review of automated methods for the collection and analysis of photoelastic data. [J] Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1998, 33(2), 75—91.
- [21] Patterson E A. Digital photoelasticity: principles, practice and potential[J]. Strain, 2002, 28(1):27—39.
- [22] Lesniak J R and Zickel M J. Applications of Automated Grey-field Polariscope[C]. Proceedings of the SEM Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics. Houston, Texas, 1998, 298—301.
- [23] Pacey M N, Haake S J and Patterson E A. A novel instrument for automated principal strain separation in reflection photoelasticity[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2000, 28(4):229—235.
- [24] Lesniak J, Zhang S J and Patterson E A. Design and evaluation of the poleidoscope: a novel digital polariscope[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(2):128—135.
- [25] Redner A S. Photoelastic coatings. Experimental Mechanics, 1980, 20:403—408.
- [26] Measurements Group Tech Instruction Bulletin IB-226. Instructions for photoelastic spray coatings [R].

- Measurements Group, Inc., Raleigh, NC. 1982.
- [27] Calvert G., Lesniak J and Honlet M. Applications of modern automated photoelasticity to industrial problems[J]. *Insight*, 2002, 44(4):224—227.
- [28] Honlet M, Lesniak J R, Boyce B R, et al. Real-time photoelastic stress analysis-a new dynamic photoelastic method for non-destructive testing[J]. *Insight*, 2004, 46(4):193—195.
- [29] Kozlova S S, Rudkovskii I S, Sagalovich E E, et al. Luminescence of acridine dyes in various solvents and biological systems[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1986, 45(4):1051—1055.
- [30] Hubner J P, Carroll B F, Schanze K S, et al. Temperature-and pressure-sensitive paint measurements in short-duration hypersonic flow[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(4):654—659.
- [31] Kocincova A S, Borisov S M, Krause C, et al. Fiber-optic microsensors for simultaneous sensing of oxygen and pH, and of oxygen and temperature[J]. *Analytical Chemistry*, 2007, 79(22):8486—8493.
- [32] Althues H, Henle J and Kaskel S. Functional inorganic nanofillers for transparent polymers[J]. *Chemical Society Review*, 2007, 36(9):1454—1465.
- [33] Li Y Q, Fu S Y, Yang Y, et al. Facile synthesis of highly transparent polymer nanocomposites by introduction of core-shell structured nanoparticles[J]. *Chemistry of Materials*, 2008, 20(8):2637—2643.
- [34] Dazhi S, Hung-Jue S and Nobuo M. Optical properties of ZnO quantum dots in epoxy with controlled dispersion [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2008, 112(41): 16002—16010.
- [35] Luo Y S, Yang J P, Dai X J, et al. Preparation and optical properties of novel transparent Al-Doped-ZnO/epoxy nanocomposites[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(21):9406—9411.
- [36] Hubner J P, Ifju P G, Schanze K S, et al. Full-field strain measurement using a luminescent coating[J]. *Experimental Mechanics*, 2003, 43(1):61—68.
- [37] Hubner J P, Ifju P G, Schanze K S, et al. Luminescent strain sensitive coatings[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(8): 1662—1668.
- [38] Hubner J P, Ifju P G, Schanze K S, et al. Luminescent photoelastic coatings[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(4):416—424.
- [39] 48Hubner, J., Chen, L., Liu, Y., et al. Characterization of a new luminescent photoelastic coating[J]. *Experimental Mechanics*, 2005, 45(2):137—143.
- [40] Hubner J, Nicolosi J, Chen L, et al, W. Oblique incidence response of photoelastic coatings[J]. *Experimental Technique*, 2005, 29(3):52—56.
- [41] Padmanabhan S, Hubner J P, Kumar A V, et al. Load and boundary condition calibration using full-field strain measurement[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(5):569—578.
- [42] Hubner J P and Chen L. Coupled strain and fresnel response of photoelastic coatings at oblique incidence[J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(4):549—560.
- [43] Esirgemez E and Hubner J P. Detailed Uncertainty Analysis of the Luminescent Photoelastic Coating Technique [C]. SEM-11th International Congress and Exhibition on Experimental and Applied Mechanics, 2008, 2:648—657.
- [44] Esirgemez E, Lira C and Hubner J P. Thermal sensitivity analysis of a luminescent photoelastic coating [C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008, 6932:693222-1—693222-9.
- [45] Takahashi D and Hubner J P. Strain separation on a nonplanar object using a luminescent photoelastic coating[J]. *Experimental Mechanics*, 2009 (in press). DOI: 10.1007/s11340-009-9232-y.
- [46] Esirgemez E. and Hubner J P. Temperature Dependence of the Luminescent Photoelastic Coating Technique[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2009 (in press). DOI: 10.1243/03093247JSA520.
- [47] Lakowicz J R. *Principles of Fluorescence Spectroscopy*[M]. 3rd edition, New York:Springer, 2006.
- [48] Gustetic J L. Non-contact thickness measurements of luminescent photoelastic coatings[OL]. http://www.clas.ufl.edu/jur/200410/papers/paper_gustetic.html#top
- [49] Hulst van Der H C. *Light Scattering by Small Particles*[M]. New York: Dover Publications Inc. 1981.
- [50] Zandman F, Redner S S and Post D. Photoelastic coating analysis in thermal fields[J]. *Experimental Mechanics*, 1963, 3(9):215—221.

- [51] Wolna M. Polymer materials in practical uses of photoelasticity[J]. Optical Engineering, 1995, 34(12):3427—3432.
- [52] Ajayan P M, Schadler L S and Braun P V. Nanocomposite science and technology[M]. Cambridge: Wiley-VCH, 2003.
- [53] Zimmermann L, Weibel M, Caseri W, et al. Polymer nanocomposites with "ultralow" refractive index[J]. Polymers for Advanced Technologies, 1993, 4(1):1—7.
- [54] Weibel M, Caseri W, Suter U W, et al. Preparation of polymer nanocomposites with "ultrahigh" refractive index [J]. Polymers for Advanced Technologies, 1991, 2(2):75—80.
- [55] Alivisatos A P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots[J]. Science, 1996, 271(5251):933—937.

Review and Prospect of Dye-based Photoelastic Coating Method

HUA Shi-qun¹, LOU Ying²

(1. Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Office of International Cooperation & Exchange, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Photoelastic coating method is one of the most practical measuring techniques for experimental strain analysis. However, its practical applications have always been affected by various inherent shortcomings such as long preparation time, reinforcing effects from substrate and complex data post-processing. In recent years, two new photoelastic coatings fabricated by adding either non-luminescent dye or luminescent dye into photoelastic polymer materials have been proposed and well developed. The benefits brought by these dye-based photoelastic coatings have made the modified photoelastic coating method overcome above shortcomings from conventional method, and become one of the most prevalent full-field strain measuring tools. The emergence and evolution of above two dye-based photoelastic coating methods, experimental setups, basic principle and some practical application are reviewed, and their main advantages and deficiencies are analyzed in this paper. In addition, the future development trends and technical improvements of developing photoelastic coating containing luminescent dye are also proposed.

Keywords: photoelastic coating; photoelasticity; dye; luminescent; strain