

# 光弹性法的发展与应用

谢文广 周静 王强

获得结构物的各种力学量是工程技术中的基本问题,虽然在工程力学中已经建立了一系列理论分析的方法,但是在很多高新技术领域中所需用到的结构物,几何形状特别复杂,载荷情况和工作环境(高温、高压、地下、液中、强磁场、强辐射、动态等)也越来越多样,致使理论分析十分困难;因此,采用实验的办法就显得尤为重要,甚至是唯一的手段了。加之,科学不断地进步,新材料、新工艺的出现,很多问题都要考虑到非线性、非匀质材料、复合材料、各向异性、粘弹性和动态等方面的特性。对于这类问题,如应用光弹性法去解决,会显示出极大的优越性,不但有效、方便,而且也是最经济的。

光弹性法是以模型的光学条纹图像显示出所研究的结构物内的力学量的大小和分布规律。它是一种全场性测量法。用这种方法能了解到结构物内应力(或位移)分布的全貌,能清晰地反映出应力集中现象,直观性强、一目了然。对于研究结构物的强度问题,以及方案设计的比较和改进,应用光弹性方法都是很有利的。特别是由于很多光弹图像都是通过照相、摄像等方式获得资料信息的,不需在结构物上直接安装传感器或其他测试装置,所以它是非接触式测量,也是非破坏性的测量,而且获得的图像信息还可长期储存,供日后反复研究复核。

## 一、光弹性法的基本原理

各向异性透明晶体具有双折射性质,这种双折射性质是晶体本身所固有的,称为永久双折射。对于各向同性透明非晶体材料,例如环氧树脂塑料、玻璃、赛璐珞等,在其自然状态下并不具有双折射性质,但是当这些材料受到应力作用时,它们就如同晶体一样,表现为各向异性,产生双折射现象。这种双折射是暂时的,当应力解除后即消失,所以称之为暂时双折射。光弹性方法就是用这种具有暂时双折射性质的光学灵敏材料制成与实物相似的模型,或粘贴在实际构件上,在相应载荷作用下,用偏振光照射可以得到因光波的干涉而形成的黑白或彩色条纹图像,在光弹性中称为应力光图;它随模型形状、受力方式和边界条件而改变。因此,通过分析和计算应力光图便能得到其表面及内部的应力变化规律,再

应用相似原理即可得到实物中与之对应的应力和应变情况,从而为以强度设计为依据的结构物提供可靠的实验数据。

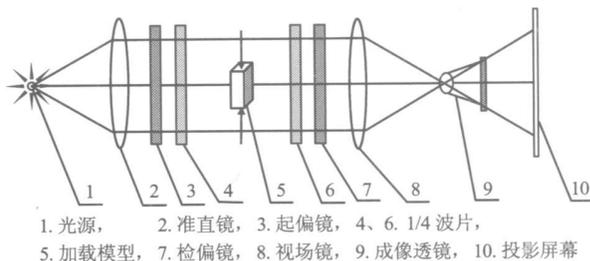


图1 平行光透射式光弹仪

用于光弹实验的装置称之为光弹仪。随用途及要求不同,光弹仪的类型及简繁各异,但它们的基本光学元件都大致相同。图1简要绘出了平行光透射式光弹仪的结构图。用这种实验方法求得的应力分布对工程设计来说具有足够的精度,能得到在各种条件下的全部应力状态。特别是对理论计算较为困难的形状复杂、载荷复杂并且应力集中的构件(生产中经常遇到),光弹性法更能显示出它的优越性。

## 二、光弹性法的发展

光弹性法开展较早,在20世纪20年代初就解决了一系列弹性力学的难题。在30年代发现了应力冻结现象,解决了三维问题。40年代以后,由于仪器设备的改进,新的模型材料的采用和计算方法的提高,光弹性已成为较为完善的技术了,在生产中起了重要作用。60年代激光的出现,提供了一种相干性特别好的光源,将这一光源引入到光弹性中出现了全息光弹性。近年来计算机的出现,特别是计算机图像处理技术的发展,加上接收信息的CCD摄像机的发展,可省去全息光弹性方法显影和定影,直接在计算机上显示结果,这一发展引起了学术界的关注。目前的光弹性法一方面向自动化、计算机化发展,另一方面向更广阔的领域中渗透,在汽车、动力、土建水利、生物力学、航天、航空、机械制造等方面都得到了广泛的应用。

目前的光弹性法大致有以下几个主要分支。

三维光弹性 实际工程构件的形状和载荷都比较复杂,其中大多属于三维问题。而在三维光弹性

应力分析中,比较成熟的是冻结应力切片法。用光弹性材料制成的模型,在室温下承受载荷时产生双折射现象,当把载荷撤掉后其光学效应随即消失。在高温下也能观察到这种现象。但是,一个承受载荷的环氧树脂模型,从高温(约 100~130℃)逐渐冷却至室温后再撤掉载荷,则模型在高温下具有的光学效应可以被保存下来,称为应力冻结现象。然后从冻结应力的模型中截取适当的切片,并对切片中的条纹进行分析计算,就可以得到相应地应力分布情况。这种方法的特点是:清晰直观,它能直接显示应力集中区域,并准确给出应力集中部位的量值。特别是这一方法不受形状和载荷的限制,可以对工程复杂结构进行应力分析。

**散光光弹性** 当光线通过透明的各向同性材料介质时,它沿着所有方向都有散射。这种散射光是由悬浮于材料介质中的微小颗粒和材料的分子本身引起的,而且散射光总是平面偏振光,它的光强不仅和入射光的偏振特性有关,还和产生散射的材料介质的应力状态有关。因此,可以通过对模型中散射条纹的分析,得到实际的应力分布情况。这种方法的优点是:第一,不需切片。即不必破坏模型,这样模型可以反复使用,节约材料。第二,不需冻结。这样避免在冻结时引起的大变形和模型材料泊松比的变化所带来的误差。

**双折射贴片法** 该方法是将光弹材料薄片(通常约 1~3mm)粘贴到被研究的结构物的待测表面上,它随结构物的变形而变形,因而产生双折射效应。当偏振光入射到受载结构表面的光弹性贴片时,经贴片的上下表面反射,形成干涉条纹,然后通过分析计算便可得到结构物表面上的应力大小和方向。贴片法是普通光弹性法的发展,它既具有普通光弹性法的直观、全场测试等优点,且又使之能够直接对原型结构进行现场测试,也可用于不透明材料制作的模型上,从而扩大了光弹性法的应用领域。

**全息干涉法** 由于激光光源的出现,使全息照相技术得到了迅速的发展,进而在光弹性实验中也引用了全息干涉法。其中最常用的是两次曝光法,即在模型不受力时通过模型的物光与参考光在全息底片上发生干涉,曝光一次;然后给模型加载,再使通过受力模型的物光与参考光在同一张全息底片上干涉,进行第二次曝光。通过分析底片上的二次曝光图即可得到模型的受力情况。这种方法也具有非

接触式测量、全场测量、灵敏度和精度高等优点。

### 三、光弹性法在工程技术中的应用实例

在光弹性实验中,等倾线及等差线是最基本的两种实验数据,必须准确地测取。在模型上一系列主应力倾角都相同的点构成的线,称为等倾线,用等倾线可以求出模型上各点主应力的方向;而主应力差值都相同的点构成等差线,根据等差线可以定性判断模型上各点主应力的方向。因此,光弹性法在实际应用中对应力光图的分析也主要是基于对等倾线和等差线条纹的分析。

**对径受压圆环应力分析** 在实际工程中存在很多圆环形构件,例如螺母、垫圈、水泥管等等,在承受载荷时,构件内部的应力分布往往是不均匀的,在某些区域应力十分集中,最易于破裂,而在某些区域应力又很小。因此,在一定载荷下分析构件内部的应力状态,是工程设计的基本前提。我们可以用环氧树脂等光弹性材料制成与实物相似的模型,在对径受压的情况下得到等差线条纹图(如图 2 所示),根据应力连续性原则,条纹级次也是连续变化的,通过计算机图像处理技术,可以按条纹级次绘制出内孔边界应力分布曲线(如图 3 所示)。

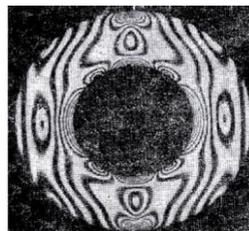


图 2 对径受压圆环的等差线

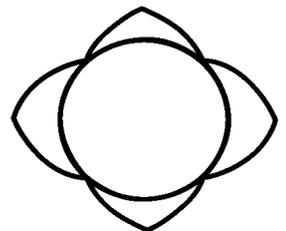
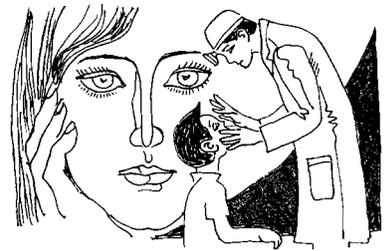


图 3 对径受压圆环内孔边界应力分布曲线

**光弹贴片法研究混凝土裂缝扩展过程** 混凝土作为重要的工程材料,其受力特性与裂缝扩展有密切的关系。因此,混凝土裂缝扩展机理及其定量描述是混凝土结构设计理论的一个重要的基础性课题。光弹性贴片法可有效地测定混凝土裂缝起裂、扩展及失稳破坏全过程。具有实时、直观、精确和便于保存等优点,可直观地观测裂缝稳定扩展长度及扩展方向(如图 4 所示)。由于光弹贴片与试件表面共同变形,所以试件表面的应变场就在贴片上反映出来。如图 5 所示,混凝土裂缝存在严重的应变集中。由于混凝土材料的非均质性,其应变场分布并非完全对称,但其缝端附近范围却基本上呈对称的蝴蝶状分布。随着裂缝的扩展,在其外缘,由于骨料

# 眼 压 计

张学勇 马建国



眼压计测眼压是一种间接测量法,根据 Imbert-Fick 定律:

一个充满液体的密封薄膜球体内的压力等于压平该球外壁成一平面的压力。通过用一定的外力施加于眼球角膜,测出相应的压平面积或压陷深度,再换算成眼内压,从而达到测量眼球内压的目的(如图所示)。

依其测量原理,眼压计分为两种类型:压陷眼压计和压平眼压计。

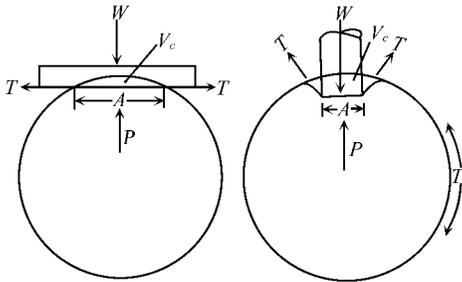
## 压陷眼压计

这类眼压计是测量一定重量压在角膜上所产生的压陷深度,然后换算成眼压,以修兹氏(Schiotz)眼压计为代表。

它的基本结构主要包括三个部分:压柱、足板和持架。压柱在圆筒内滑动,当眼压计垂直于眼球上,压柱压陷角膜,依据角膜压陷的深度,间接测知眼

眼睛是以光作为适宜刺激的视觉生物器官,可视为一种复合的光学系统。在几何外形上,眼球可以近似认为是一个充满房液的密闭球体。眼球为了完成其正常视觉功能,必须维持内压高于大气压的一定水平才能保持形状的稳定。

现代眼科学已证实,人的眼压如同血压一样,24小时是波动的,掌握眼压的变化规律对于眼科疾病的诊断具有重要价值。对于眼压过高或过低的病人,实施眼压监测是非常重要的。



眼压计测压原理示意图

等诸多因素的影响,其分布颇不规则。



图4 光弹贴片所显示的裂纹扩展

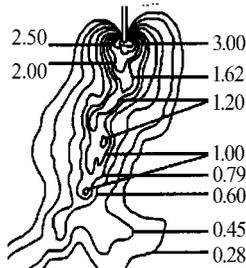


图5 试件缝端应变场分布

记录系统,适时地记录动态的光弹性图像,即等差线图(如图6所示)。根据某一瞬时的等差线图,并结合空边界应力的正负符号,可以绘出人体下颌骨模型在水平方向承受载荷所引起的应力分布图(如图7所示)。

光弹性是力学、光学和新技术相结合的学科,现代工业生产的发展给光弹性法的发展创造了条件,反过来光弹性法的发展又促进了生产的发展。目前我们正处于科学突变和生产高潮时期,光弹性法也必将随着生产高潮向新的阶段发展。

人体下颌骨动态光弹应力分析 据医学临床统计,诸如跳伞、拳击等体育活动中形成人体下颌骨骨折的原因,往往是由冲击载荷所引起的,故对人体下颌骨进行冲击载荷下的动态瞬应力分析,在医学临床、军事和体育等方面都具有实际意义。把用光弹性材料制成的人体下颌骨平面简化模型置于正交圆偏振光场中,以落锤施加冲击载荷,并采用电火花式超高速记录系统。在模型自由边界上不同部位粘贴电阻应变片,用来确定随时间变化的空边界应力符号。当重锤与模型接触的瞬时,通过接触脉冲信号发生器产生一个正的触发脉冲来触发整个超高速



图6 瞬时等差线图

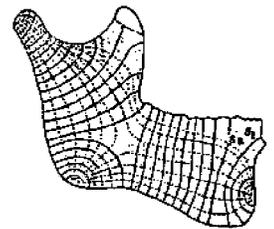


图7 主应力迹线图

(谢文广、王强,黑龙江大学物理学院 150080;周静,哈尔滨师范大学物理系 150025)