

热色液晶无损检测技术*

何世平 龚兴龙 伍小平

(中国科学技术大学, 合肥, 230026)

摘要 本文介绍了热色液晶在无损检测技术中的应用研究,并获得了非常成功的结果。通过液晶显示出的缺陷周围温度分布的色彩奇异性,可以明显地指示出缺陷的位置。

关键词 热色液晶,温度分布,无损检测。

1 引言

液晶是物质在固态晶体和各向同性液体之间的一种过渡相。其外型类似于液体,具有流动性、粘滞性和表面张力,而其分子排列结构又类似于晶体,具有有规律的分子排列、呈现光学各向异性。作为一种新的物质形态,液晶除了具有固体和液体的一些共性外,还具有一些独特的性质,如光电效应、压电效应、双折射、旋光性及热色性等。

液晶的种类很多,有一种能以不同颜色反映不同温度的液晶,通常被称为热色液晶。热色液晶对温度的敏感性已被广泛用于温度场的测量。液晶测温技术,在国外已被用于热传导分析^[1]、流场显示^[2]和无损检测^[3,4]。但在国内,这类应用研究甚少。

本文应用热色液晶的测温技术进行了无损检测试验研究,获得了令人满意的试验结果。借助于热色液晶显示出的缺陷周围温度分布的色彩奇异性,可以非常明显地指出试件中缺陷位置的变化。

2 热色液晶测温原理

根据液晶的形成机制,液晶可分为热致液晶和溶致液晶两大类。热致液晶可通过加热某些固态晶体或冷却某些各向同性液体而得到。液晶材料有两个熔点,当加热固态晶体到第一个熔点时,熔解成混浊状的液体,继续加热至第二个熔点后,混浊状液体变为清晰透明的各向同性液体。热致液晶就是材料在两个熔点之间的一种过渡相。按分子排列结构的不同,液晶又可分为近晶相、向列相和胆甾相三类。也有人主张将液晶分为近晶相和向列相两种,而胆甾相是向列相中的一个分支。

* 本文工作得到了国家自然科学基金的资助

本文于1995年2月4日收到第1稿,1995年12月22日收到修改稿

胆甾相液晶最早是从胆甾醇类物质中发现的,故称胆甾相。胆甾相液晶是由细长的柱状分子构成的,柱状分子分层而整齐地排列着,每一层中的分子长轴互相平行,且平行于层面;不同层中的分子长轴方向,按螺旋线(左旋或右旋)而缓慢地变化。相邻两层分子长轴方向约旋转15弧分。长轴方向相同的相距最近的三个分子层间的距离称螺距,常用 p 表示。由于具有上述层状扭曲型的分子排列结构,因而使胆甾相液晶呈现出一系列的光学特性,如极强的旋光性(是石英旋光能力的900倍)和圆二向色性等。在自然界中,除去胆甾相液晶外,还有一些非甾醇类的液晶也具有扭曲型的分子结构,统称扭曲向列相。

圆二向色性是扭曲向列相液晶的重要特性,液晶对温度的敏感正是基于这一重要特性。当照明光沿着螺旋线纵轴方向入射到液晶上,各种波长的光波分量均分解为旋向相反的两束椭圆偏振光,每一种光波分量的椭圆度取决于该分量的波长与液晶螺距 p 的接近程度。波长与液晶螺距 p 相等的那个光波分量刚好分解成旋向相反的两束圆偏振光。上述所有各种偏振光分量,除去那束旋向与液晶分子排列旋向相反的圆偏振光分量被反射外,其余所有分量均透过液晶。因此,扭曲向列相液晶能够有选择性地反射波长与液晶螺距 p 相等,旋向与液晶分子排列旋向相反的那束圆偏振光分量,并呈现出很纯的色彩。但液晶反射光的色彩会随照明角和观察角的变化而变化。

当环境温度变化造成液晶螺距 p 的改变时,液晶所反射的光波分量也随之变化,以保持光波波长与螺距 p 的相等,从而使液晶呈现出一系列的色彩变化。液晶能以色彩变化反映出温度变化的这种特性被称为液晶的热色性,具有热色性的液晶又称为热色液晶。

不同种类的热色液晶,随着环境温度的变化会出现三种不同的色彩序列变化:随着温度的上升,反射光由紫、兰变到红;随着温度的上升,反射光由红变到兰、紫;或反射光的颜色不随温度的变化而变化。出现这三种截然不同的结果的原因,主要是由于螺距 p 的变化将受到两个因素的控制:一方面螺距 p 会因为温度升高造成体积膨胀而变大;另一方面又因为分子层间长轴方向间相对转角的变大而造成螺距 p 的变小。不同的材料,这两种影响因素也不同,所以形成了三种不同的色彩变化序列。现在市场上可以购买到的热色液晶,基本上都是低温呈红色。随着温度的升高,反射光由红色变到兰、紫。

3 液晶测温技术及其在 NDT 中的应用

为了利用热色液晶对温度的敏感性来检测物体的温度,热色液晶已被制成各种温度指示剂。如薄膜液晶显示剂和液晶墨水等。测量温度时,只要将液晶薄膜贴到物体表面上,或将液晶墨水喷涂到试件表面上。

成品液晶通常是将天然液晶先制成微胶囊状,然后再制成液晶薄膜或液晶墨水,很少直接使用天然液晶作温度显示剂的。因为天然液晶的寿命短、性能不稳定,难以重复使用。微胶囊液晶是用透明聚合物薄膜将液晶包裹成一个个的小颗粒,颗粒大小约在微米到毫米之间。

用喷涂法测量物体温度时,常用一个特制的小喷枪,将液晶墨水喷射到被测物体表面上。为了得到反差好的等色图,物表面需先涂成无光黑色,再在黑色背景上喷涂液晶水溶液(可按1:3的比例配制)。为了保证反射光具有良好的漫射性,在喷涂液晶时最好从不同方向喷射3~4层。

市场上可以买到的温度敏感液晶,其显示温度的范围通常在 $-30^{\circ}\text{C}\sim 115^{\circ}\text{C}$ 之间。液晶能呈现出色彩的宽度范围称为带宽,而常用热色液晶的带宽为 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$,其颜色分辨率可达

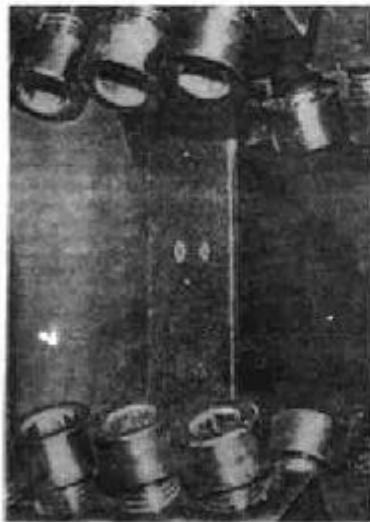
0.1℃。我们在实验中所用液晶的牌号为BM/R35C1W/C17-10。其红色转变温为35℃,彩色带宽为1℃。每一种液晶都有特定的“温度—颜色”对应关系,一定的颜色对应着一定的温度。当需要定量给出精确的温度值时,实验前必须进行严格的温度标定,标定时要注意照明角度和观察角度对颜色的影响。

热色液晶用于无损检测主要是借助于液晶的热色性。先在试件表面粘贴液晶薄膜或喷涂液晶水溶液,然后给试件进行局部加热。由于缺陷的存在,热量在试件内传递时造成了物表面上温度分布的不均匀,借助液晶色彩变化的奇异性,可以非常明显地揭示出缺陷的有无或缺陷的形状、位置等信息。

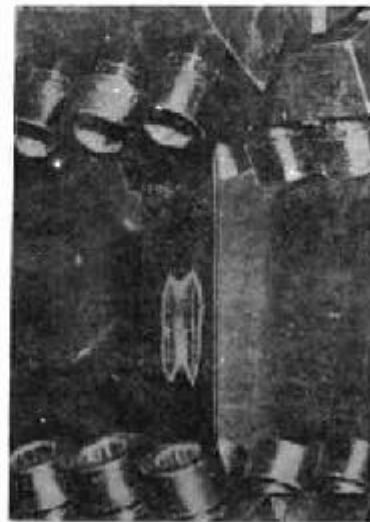
4 实验及结果

4.1 疲劳裂纹检测

所用试件是玻璃纤维环氧树脂复合材料中心带裂纹的拉伸试件,试件Ⅰ的中心裂纹没有扩展,试件Ⅱ的中心裂纹两端已有与原始裂纹正交的疲劳扩展裂纹,试件表面涂有热色液晶。所得结果见图1,其中图(a)是从试件Ⅰ在疲劳实验过程中拍摄的,它显示了在疲劳试验过程中,在原始裂纹两端附近存在着较高的温度分布,这是裂纹附近的高应变区在疲劳试验过程中释放的热量所引起的。图1(b)是从试件Ⅱ在疲劳实验过程中拍摄的,它显示了在疲劳扩展裂纹周围存在着较高的温度分布,由这两幅照片可见,用热色液晶检测疲劳裂纹及其扩展是可行的。



(a) 裂纹显示



(b) 扩展裂纹显示

图1 疲劳裂纹检测结果

4.2 金属试件裂纹检测

图2所用试件是 $50 \times 50 \times 4(\text{mm}^3)$ 的中心带孔铝块试件,孔的右侧开有0.1mm宽的穿透裂纹。裂纹用环氧树脂胶胶住,且在试件上下表面涂上一层薄胶,然后喷涂了无光黑漆及热色液晶。在液晶未显示色彩的情况下,凭眼睛看不出试件上有裂纹。但当给试件的一端加热时,



图2 铝材裂纹检测

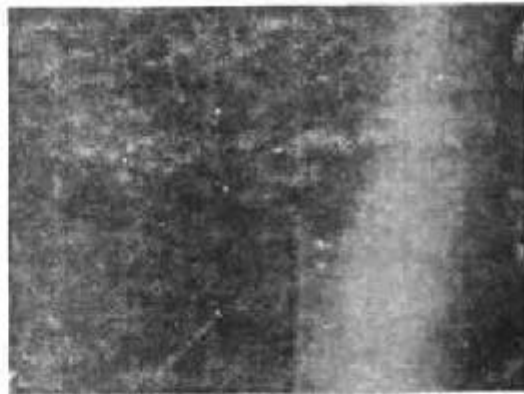


图3 钢材裂纹检测

达到液晶的彩色显示温度后,从试件表面的彩色图上可以非常明显地看出裂缝的存在,但当温度超过液晶的彩色显示温度后,试件表面上又恢复到无光黑色,裂缝也就看不见了。但必须注意,加热方式要采用局部加热法,以造成试件表面上温度分布的不均匀性。

图3所用试件是 $156 \times 30 \times 15(\text{mm}^3)$ 的三点弯曲梁钢材试件,试件一边开有 0.1mm 的裂缝,裂缝前缘是疲劳扩展裂纹。扩展裂纹的两表面实际上是紧贴在一起的。但从图3可见,疲劳扩展裂纹也同样可以明显地揭示出来。

我们还对复合材料带裂纹试件进行了检测研究,发现效果没有金属试件好。

4.3 瓦罐裂纹检测

图4所用试件是一个普通的瓦罐,瓦罐上有一个三叉裂纹,裂纹已用502胶胶住,罐子表面涂有无光黑漆和热色液晶。实验时用电吹风给瓦罐局部加热,达到液晶的彩色显示温度后,瓦罐表面上出现了彩色图。由图中的彩色奇异性可以显示出三叉裂纹的位置,但效果没有金属裂缝那样易于检测。



图4 瓦罐裂纹检测



图5 夹层缺陷检测

4.4 夹层缺陷检测

图5所用试件是一个夹层试件,中间是有机玻璃板,上下两表面胶有铝板,铝板表面涂有

无光黑漆和液晶。在中间的有机玻璃板上,用大头针排成了“NDT”图样。加热方法采用从背后的金属板均匀加热的方式。从图 5 可见,液晶呈现的彩色图样非常明显地揭示出了试件中的“缺陷”形状。用这种方法同样可以显示蜂窝结构及结构中的缺陷。

5 结论及讨论

各种试验研究表明,热色液晶测温技术也是一种行之有效的无损检测技术。它不仅可以检测金属材料和非金属材料中的裂纹等缺陷,还可以用于疲劳检测及裂纹扩展跟踪。但热色液晶无损检测技术必须在试件表面粘贴或喷涂液晶薄膜,这就给实验带来了一定的不方便。

在用热色液晶进行疲劳裂纹检测实验时,若室温加上由疲劳应变释放热量产生的温升还达不到液晶的彩色温度时,就需要给试件加一个偏置温度(用辐射法加热)。但要注意,偏置温度要均匀施加,不能人为造成物表面的温度分布不均匀。同时,偏置温度不能超过液晶彩色温度,必须略低于彩色温度。

对于疲劳裂纹的检测,一般局限于复合材料等非金属材料,而对金属材料的疲劳裂纹,使用热色液晶就难以检测。这是因为金属材料一般传热都很快,而由疲劳产生的温升又不太高,因而难以检测。而非金属材料就不一样,由于疲劳应变产生的热量不易扩散,裂端附近温度不断上升,形成明显的裂端高温区,因而易于检测。对于复合材料疲劳裂纹的扩展,无论是断丝、脱层,还是基体断裂,只要是穿透裂纹、表面裂纹或浅表裂纹都容易检测,但裂纹部位太深时,由于热量扩散区太大,可能不易检测。

对于构件内的缺陷检测,情况较为复杂。一般可分成三种情况:

(1)与表面垂直的裂纹类的缺陷

这类缺陷,如图 2、图 3 和图 4 中的缺陷,一般容易检测。检测时采用局部加热法,即在缺陷的一边局部加热。当热量沿表面传递时,可以显示出缺陷的位置和形状。但当缺陷部位离表面太深时,检测有困难。此外,金属材料比非金属易于检测。这是因为热量在金属材料中的传递,比在缺陷空气中的传递快得多,因而很容易在物表面形成温度的阶跃分布。而非金属材料就不同,热量在非金属材料中的传递与在缺陷空气中的传递速度相差不明显,所以检测较为困难。

(2)与表面平行的断层类的缺陷

这类缺陷的检测,可采用从构件背面大面积加热的方式来检测。通过温度色彩的显示,可以检测出缺陷的部位和大致形状,但无法确定缺陷的深度。对这类缺陷,同样也是金属材料比非金属材料易于检测,浅表缺陷比深层缺陷易于检测。

(3)夹层结构

对于夹层构件的内部结构或缺陷,也可采用从背面大面积加热的方式来检测(如图 5 试件的检测)。这类结构或缺陷比较复杂,检测效果主要由热量沿厚度方向传递的速度差来决定,只要易于在表面形成不同的温度分布,就容易检测。

液晶无损检测技术虽有使用不方便之处,但对于某些大型的化工压力容器的无损检测则有其长处。可以在容器的一些关键部位及危险部位喷涂液晶薄层,作定期检测;或在一些允许有裂纹的机械上,作定期的裂纹扩展跟踪检测。

参 考 文 献

- [1] Moffat R J. Experimental Methods for Air Cooling of Electronic Components, Int. Symp. Cooling Tech. Electron. Equip., Honolulu, (1987)
- [2] Kimura R. Visualization of Temperature Fields of Water by Liquid Crystals, 2d Symp. Flow Visual., ISAS Univ. of Tokyo, 1974, p99-102
- [3] Simcox T A. Liquid Crystals, Their Application to Nondestructive Testing, General Electric Company (1968)
- [4] Dixon G D. Materials Evaluation, 1977, 6:51

Application of Thermochromatic Liquid Crystal in Nondestructive Testing

He Shiping Gong Xinglong Wu Xiaoping
(*University of Science and Technology of China*)

Abstract The application of thermochromatic liquid crystals in nondestructive testing is studied. One of the results is that flaw-sites were clearly indicated with liquid crystals in the form of coloured singularities in the temperature distribution field around the flaws.

Key words thermochromatic liquid crystal, temperature distribution, nondestructive testing.

作 者 简 介

何世平, 男, 1943 年生。中国科学技术大学力学与机械工程系教授。主要从事光测力学的教学和研究。作为主要合作者, 曾获中科院重大科研成果一等奖一项, 国家自然科学基金四等奖一项。