

Light Source Analysis for Photoelastic Experiment in High Stress Fringe

Jun He, Ping Huang

School of Mechanical and Automotive Engineering, National Demonstration Center for Basic Mechanical Experiment Center, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong
Email: jhe@scut.edu.cn, mephuang@scut.edu.cn

Received: Jan. 6th, 2018; accepted: Jan. 23rd, 2018; published: Jan. 30th, 2018

Abstract

In this study, we investigated the high stress fringe characterization ability of filament lamp, LED bulb and fluorescent lamp as light source in photoelasticity experiment. Photoelasticity sample that was made of polycarbonate was put in circle polariscope and experienced pure bending to achieve 24 fringes order in the up and down edges. The polariscope was illuminated by filament lamp, LED bulb and fluorescent lamp separately to produce color digital experiment images. In each experiment picture, one line perpendicular to bending neutral axis in middle of compressed zone was extracted by MATLAB software. Then the red, green and blue spectrums of this line were plot versus picture pixel and fringe order to compare the high stress fringe characterization ability. The analysis result shows that among three light sources, fluorescent lamp provides better fringe characterization ability up to 24 fringes. The result helps to select light source for high fringe order photoelasticity experiment properly.

Keywords

Photoelastic Experiment, Light Source, LED, High Fringe Order

高应力条纹下光弹实验光源分析

何 军, 黄 平

华南理工大学机械与汽车工程学院, 机械基础教学实验国家级示范中心, 广东 广州
Email: jhe@scut.edu.cn, mephuang@scut.edu.cn

收稿日期: 2018年1月6日; 录用日期: 2018年1月23日; 发布日期: 2018年1月30日

摘 要

本文对白炽灯、荧光灯、LED白光灯三种光源在高应力梯度试样条纹的表征能力进行了分析对比。聚碳

聚酯制成的试样放置在圆偏振光暗场中, 受纯弯曲应力使试样中部上下边缘的条纹级数达到24条。用三种光源分别照射光弹试样, 以获取彩色的数字光弹图片。通过MATLAB软件选取图片中试样受压区中间部位垂直中性轴的一条线, 将该线的红光、绿光及蓝光分量的强度值随着像素及条纹级数的变化绘制出来, 以对比三种光源在试样高条纹级数下的分辨能力。分析结果显示荧光灯照射下人工可识别的条纹级数高达24级, 能提供比白炽灯和LED白光灯更高的条纹分辨能力。分析结果有助于正确选择光源开展高应力梯度光弹试验。

关键词

光弹实验, 光源, LED, 高应力条纹

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光弹法是可获取试样全场应力差的经典实验力学方法, 通过采用单色光照射偏振光场中由光弹性材料制成的试样获取单色的等差线图纹, 从而可以分析试样的主应力差, 进而分析试样的受力情况。彩色光弹法采用的光源不是单色光而是白光照射试样, 通过彩色摄像头采集光应力图, 从而获取试样的彩色光应力图纹, 能提供比单色光弹条纹更多的信息, 有助于对高应力梯度试样的分析, 因此近年受到越来越多的关注。彩色光弹法也称为 RGB 光弹法[1]。RGB 光弹实验中白色光的来源常常是白炽灯或荧光灯, 文献[2]用蓝光 LED 进行了光弹涂层实验, 文献[3]用大功率 LED 对太阳能组件进行了表面缺陷的检测, 但尚无报道用 LED 白光灯进行高条纹级数下的光弹实验。本文对白炽灯、荧光灯、LED 白光灯三种光源在高应力梯度试样条纹的表征能力进行了分析对比, 分析结果有助于正确选择光源开展高应力梯度光弹试验, 如: 无润滑下的接触试验、润滑状态下的接触试验等的开展[4] [5]。

白炽灯曾是最方便获取的低成本近似白光光源, 较早用于光弹分析中。白炽灯工作时将灯丝通电加热至高温, 通过热辐射发出可见光。白炽灯的光线波长为近似连续的波长, 文献[6]报道最大的可测量条纹级数为 3~4 级, 条纹级数超过 4 级后, 由于各个像素中的红绿蓝(即 RGB 分量)三个颜色分量越来越接近, 在实验结果中难以有效分离, 因此也称为三条纹光弹法。若把红绿蓝三个颜色分量的光强分布作图, 可以看到三个分量的光强变化为波浪形, 类似正弦函数曲线, 随着条纹级数的增加, 三分量曲线的幅值逐渐减少, 这种现象在彩色的光弹图中则表现为条纹逐渐融合为一种颜色。A. Ajocalasit [6]利用具有 3 个 CCD 传感器的视频摄像头采集彩色图案, 独立的 3 个 CCD 摄像头通过 3 个分离式的 CCD 传感器单独采集红、绿、蓝三种基本颜色的光线, 并采用了 16 位数码板将模拟图像数码化后进行计算机图像处理。

荧光灯的工作原理是灯管内部充装水银蒸汽和惰性气体, 灯管内壁涂有荧光粉, 通过启辉器产生高压电荷轰击荧光粉产生光线。随着光源科技的发展, 出现了基于稀土材料制作荧光粉的三基色荧光灯。三基色荧光灯的内壁荧光粉由分别产生红绿蓝三种基色的材料混合而成, 因此发出的光线为三种基色, 三基色组合形成肉眼看到的白光。由于采用三基色混合材料后, 产生同样流明的光只需原荧光灯一半甚至更小的功率, 因此三基色荧光灯也称为节能灯[7]。采用三基色荧光节能灯作为彩色光弹实验的光源, 类似于采用三种单色光同时照射光弹模型, 在提高实验方便性的同时, 可以大大提高测量结果中图纹级数分离的效果, 文献报道最大的可测量条纹技术已经能达到 20 级[8]。

LED光源基于半导体发光技术, 相对比白炽灯、荧光灯、气体放电灯等光源, LED光源理论发光效率接近100%, 有着节能、环保、长寿命、光源色度稳定性高等优点。LED发出的光是半导体二极管PN结中的电子与空穴结合时, 剩余的能量通过光波的形式发散, 因此LED发射出的光波的颜色即波长与LED的制作材料有着直接的关系。早期的LED光源只有低功率的黄光和红光LED, 没有足够照明功率的蓝光LED, 无法形成真正意义的白光[9]。随着Nakamura用GaN制作出发光效率超过10%的蓝光和绿光LED, 蓝光和绿光LED的使用瓶颈被正式打破, 构成白光的三种基色的LED才可以真正用于照明用途。

综上所述, LED光源理论上能用于光弹实验作为照明光源, 但在实际的光弹实验中的效果仍需要通过实验的证明。

2. 实验方法

本研究中采用了三种光源: LED白光光源、白炽灯、三基色荧光节能灯进行光弹实验, 以对比三种光源产生的光弹图纹的效果。三种光源均为E27接口, 220V, 除白炽灯外, 色温均为6500K。光弹试样的尺寸为厚度3.9毫米, 高度为8毫米, 长度为120毫米, 由聚碳酸酯制成。实验采用如图1所示的圆偏振光场, 试样的受力方式为四点纯弯曲梁, 下部两支承间距为100毫米, 上部两载荷点间距为52毫米, 试样受力为100N(每边50N)。为使各实验图片的光强基本一致, 实验时调节光源与起偏镜的距离, 用数字照度计测量, 使第一片四份之一波片后的亮度为150lux。光弹条纹的显示方式为垂直于中性轴采集试样上方的受压区条纹, 并通过MATLAB软件提取并作图, 所绘制的图形中, 纵坐标为光强值, 横坐标为像素值。由于试样的高度较小导致弯曲变形比较大, 考虑四点弯曲梁中部区域压缩部分的变形相对较小, 因此采样时采用了压缩区的图像, 而不是采用拉伸区域的图像, 实验结果对人工识别无明显影响。

3. 实验结果及分析

3.1. 白炽灯为光源的光弹图纹

图2为白炽灯照明下受力100N的光弹条纹图案, 取样区域如图中黑色框所示, 取框中图的中间一条垂线顺时针旋转90°后作图3。图3为白炽灯照明受力100N产生光弹条纹图案RGB值对比图。

3.2. 白光LED作光源的光弹图纹

图4为LED白光照明下受力100N的光弹条纹图案, 取样区域如图中黑色框所示, 取框中图的中间一条线顺时针旋转90°后作图5。图5为LED白光照明下受力100N产生光弹条纹图案RGB值对比图。

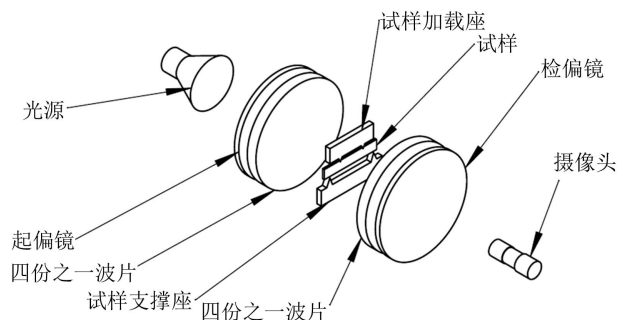


Figure 1. Schematic diagram of experimental setup

图1. 实验工作原理图

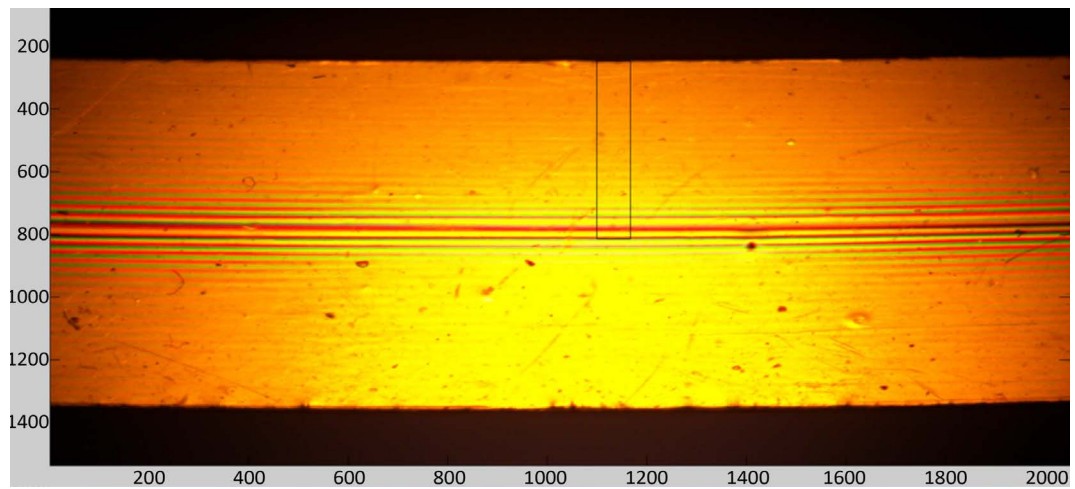


Figure 2. Fringe map of photoelastic sample under filament lamp lighting and 100 N load
图 2. 白炽灯照明下受力 100 N 的光弹条纹图案

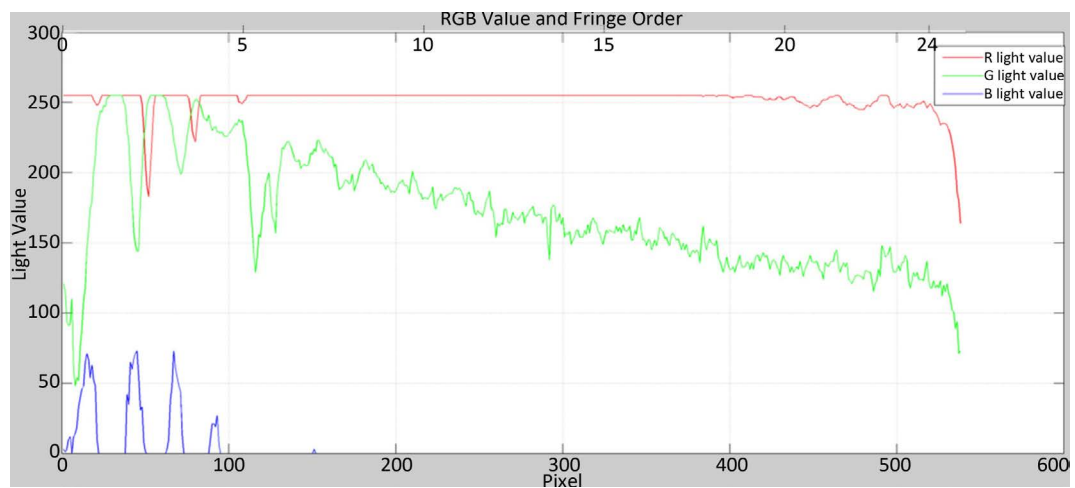


Figure 3. RGB value of fringe of photoelastic sample under filament lamp lighting and 100 N load
图 3. 白炽灯照明受力 100 N 产生光弹条纹图案 RGB 值对比

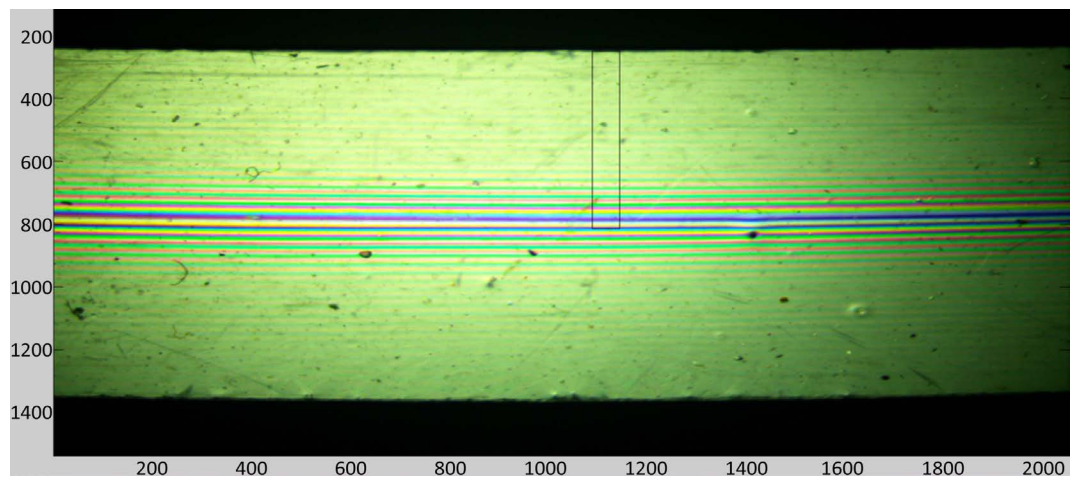


Figure 4. Fringe map of photoelastic sample under LED bulb lighting and 100 N load
图 4. LED 白光球型灯泡作为照明光源受力 100 N 的光弹图

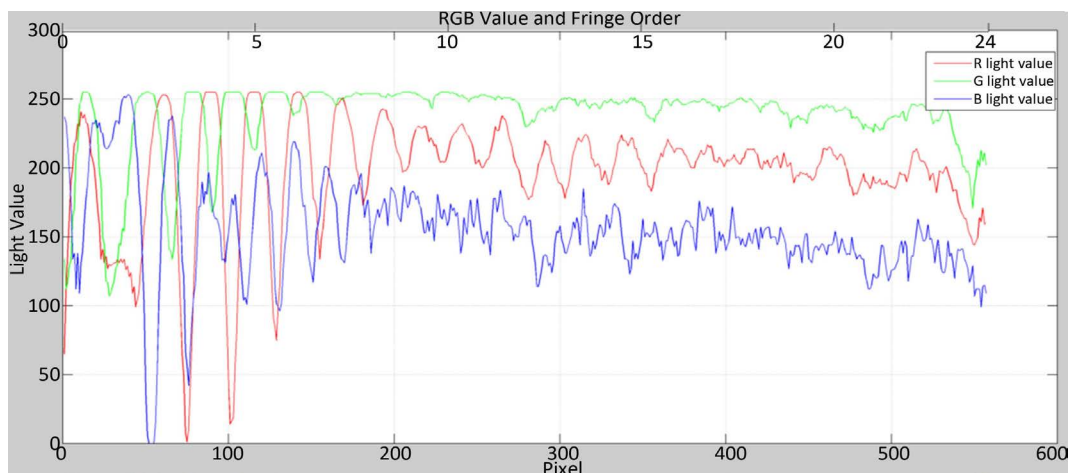


Figure 5. RGB value of fringe of photoelastic sample under LED bulb lighting and 100 N load
图 5. LED 白光球型灯泡作为照明光源受力 100 N 的光弹图 RGB 值对比

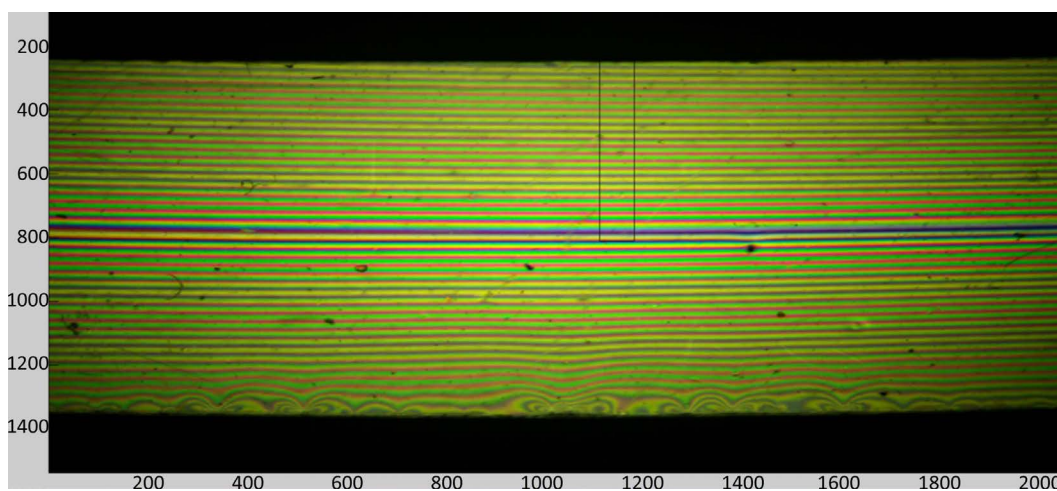


Figure 6. Fringe order map of photoelastic sample under fluorescent lamp lighting and 100 N load
图 6. 荧光灯照明受力 100 N 时的光弹图纹

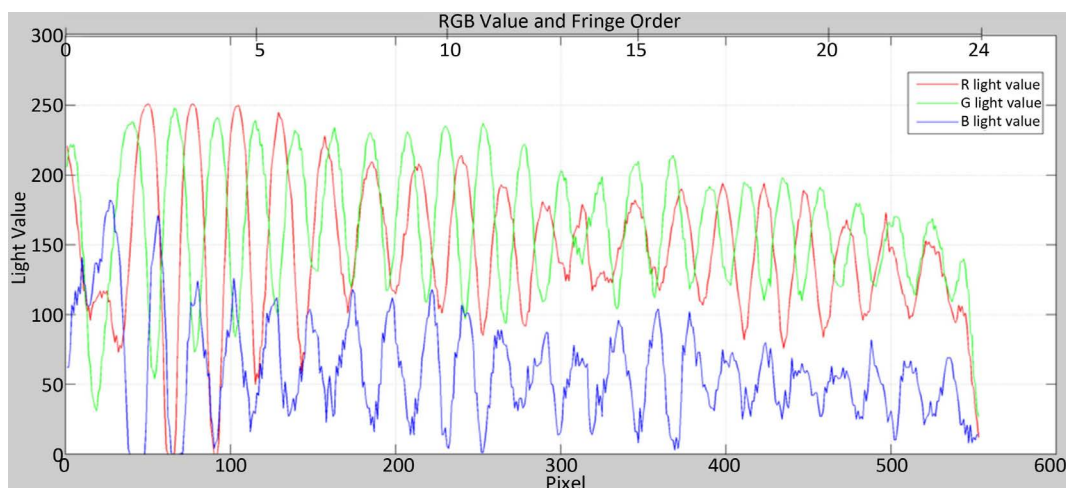


Figure 7. RGB value of fringe of photoelastic sample under fluorescent lamp lighting and 100 N load
图 7. 荧光灯照明受力 100 N 时的光弹图纹 RGB 值对比

3.3. 三基色荧光灯作光源的光弹图纹

图 6 为三基色荧光灯照明下受力 100 N 的光弹条纹图案, 取样区域如图中黑色框所示, 取框中图的中间一条线顺时针旋转 90°后作图 7。图 7 为三基色荧光灯照明下受力 100 N 产生光弹条纹图案 RGB 值对比图。

4. 实验结果分析

白炽灯照射试样时, 当增大载荷时, 随着条纹级数的增大, 高级数条纹迅速融合, 条纹超过 4 级后基本就难以正确判断。通过光弹图中的 RGB 值图, 可以看到白炽灯光源中的三基色主要是红色光谱(即为 R)及绿色光谱(即 G), 并且红色光谱的值高于绿色, 而基本没有蓝色光谱(即 B), 因此白炽灯的灯通过人眼观察时的为暖色。具体来讲, 红色分量仅在 5 级前形成 3 个波浪, 峰值均为 255, 谷值均高于 150, 峰谷值均较小; 5 级到 17 级之间为直线, 光强无波动; 17 级至 24 级之间有微小的波浪, 谷值均高于 230。绿色分量, 在 5 级前形成 4 个波浪, 其中 3 个波峰接近 255, 一个波峰约 240, 波谷由 50、145、200、225 逐渐提高; 超过 5 级条纹后一个波谷接近 130, 波峰升到 220 后开始缓慢下降, 24 级条纹时降到 130, 期间峰谷值均小于 30, 光强的下降形成较好的线性。蓝色分量, 在 5 级条纹前形成 4 个波浪, 波峰值均小于 80, 其中 3 个峰值约 75, 最后一个峰值为 25, 波谷值均为 0; 5 级条纹后蓝色分量完全消失。24 级条纹后红和绿色分量的急剧下降, 可以认为是由于采样于试样的边缘, 图像的光强均快速趋向为零。

白炽灯照明的光弹图中, 随着条纹级次的增加, 红色光谱及绿色光谱快速衰减, 超过 4 级就难以判断, 超过 6 级后各级条纹融合到一齐, 条纹的级别就基本无法判断了。因此, 若由人工进行识别, 白炽灯光源难以应用于高应力梯度图纹实验中。若通过计算机进行识别, 由于白炽灯照明时绿光的光强值, 在条纹级数超过 5 级后成线性递减, 可以视为与条纹级次成大致线性关系, 通过程序可以方便地进行识别。

LED 照明实验结果显示, 随着载荷的增加, LED 照明光弹图纹的衰减比较严重, 超过 5 级后也衰减得比较快。可以由 RGB 图中观察到, 最初 5 级条纹中的三基色值的峰值均较高, 同时谷值也比较低, 亦即峰谷值较大。总体来说, 绿色分量的光强值最高。绿色分量的光强值, 在小于 5 级条纹时有 4 个波浪, 峰谷值最大为 150, 谷值逐渐抬高, 峰值并无明显衰减, 在超过 5 级后, 谷值变化逐渐减少, 峰值变化不明显, 峰值在超过 17 级后才略下降。红色分量的光强值, 在小于 5 级条纹时有 4 个波浪, 峰谷值有 4 次超过 150, 其中 2 次超过 200 接近 255; 超过 5 级条纹后, 峰谷值变化小于 100, 并且逐渐衰减。蓝色分量在小于 5 级条纹时, 有 5 个明显波浪, 峰谷值有 2 次超过 150, 其中 2 次超过 200 接近 255; 超过 5 级条纹后, 峰谷值变化小于 100, 并且逐渐衰减。因此用 LED 光源做照明获得的光弹图片条纹级次的辨识度明显比白炽灯要高, 在条纹级数不超过 5 级时, 条纹较白炽灯照明下更容易区分, 但是超过 5 级后, 衰减较为严重, 已经难以通过人工进行条纹识别。

白光 LED 光弹图纹中三基色的衰减是和其工作原理直接相关的。白光 LED 的实现有三种方式, 分别是多芯片组合法, 多量子阱复合法和荧光粉转换法。多芯片组合法通过组成三基色的三个 LED 芯片组成白光 LED。多量子阱法则是通过将不同的半导体材料按像素成组排列, 通过掺杂不同的材料形成不同的量子阱, 通电后形成不同的光色就可以合成白光。目前 LED 照明灯具大多在芯片中涂覆荧光粉, 通过 LED 发出的光子激发荧光粉发白光。根据激发光源可以分为蓝光激发和紫外光激发两种。蓝光激发光源的芯片本身发蓝光, 芯片中涂覆的黄色荧光粉通常为钇铝石榴石。荧光粉可以被蓝光激发而发出黄色光, 则黄光和芯片发出的蓝光复合成白色光。这种方式的白光中缺少红光成分, 光谱较窄, 显色指数相对低。另一种方式采用发射紫外线 LED 的芯片, 通过紫外线来激发芯片外涂覆的三基色荧光粉。

荧光灯光弹实验结果图片中条纹的级数随着载荷的增加而增加, 随着条纹级数的增加, 光分量的衰

减并不明显。红色的分量前 5 级中有 4 个波浪, 峰值常常接近 255, 谷值也保持到零; 5 级后至 14 级前有 8 个波浪, 峰值由 240 递减到 180, 谷值由 50 提高到 130; 15 级到 24 形成有 8 个波浪, 峰值在 18 级是达到 190, 谷值最低达到 80。绿色分量前 5 级中有 5 个波浪, 峰值最高接近 250, 随后逐渐递减, 第 24 个峰值递减到 130; 谷值由 30 逐渐提高, 第 23 个谷值提高到 110。而蓝色基色总体形成了 24 个波浪, 在 5 级前有 4 个波浪, 峰值最高约 180, 谷值在第 2、3 个波浪时为 0, 随后逐渐提高, 在第 24 级时谷值约为 10。

综合分析, 荧光灯作为光源时, 光弹图案的条纹级次能够达到相当高的级数, 本实验研究中能达到 24 级的条纹级次。

5. 结论

由实验结果对比, 可以得出以下结论:

1) 相对白炽灯和 LED 白光灯, 荧光灯作为高应力梯度光弹实验的光源有着特别的优势, 实验结果表明, 超过 24 级的条纹, 仍能在荧光灯的照明下人工识别。

2) 白炽灯的光源, 三基色主要是红色光谱及绿色光谱, 并且红色光谱的值高于绿色, 而基本没有蓝色光谱, 随着条纹级次的增加, 红色光谱及绿色光谱快速衰减, 超过 4 级就难以通过人工判断, 仅适合于条纹级数少的光弹应力分析。

3) 用 LED 光源做照明获得的光弹图片条纹级次的辨识度比白炽灯要高, 在条纹级数不超过 5 级时, 条纹较白炽灯照明下更容易区分, 但是超过 5 级后, 衰减较为严重, 已经难以通过人工进行条纹识别。

在本文研究基础上, 下一步计划研究通过计算机进行光弹图片中条纹级次的自动识别。

基金项目

国家自然科学基金资助(51375167, 51575190)。

参考文献 (References)

- [1] Ajovalasit, A., Petrucci, G. and Scafidi, M. (2010) RGB Photoelasticity: Review and Improvements. *Strain*, **46**, 137-147. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00571.x>
- [2] Conway, M., Ali, H. and Hubner, J.P. (2013) Dynamic Measurements with a Luminescent Photoelastic Coating. *Imaging Methods for Novel Materials and Challenging Applications, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, Jin H. S C F C, Springer, New York, NY, 375-382.
- [3] Lin, T.W., Rowe, L.P., Kaczkowski, A.J., et al. (2016) Polarization-Resolved Imaging for Both Photoelastic and Photoluminescence Characterization of Photovoltaic Silicon Wafers. *Experimental Mechanics*, **56**, 1339-1350. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0177-7>
- [4] 方燕飞, 何军, 黄平. 基于光弹实验与有限元法的涂层/基体接触应力分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016(5): 103-109.
- [5] 何军. 光弹技术在弹流润滑测试中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [6] Ajovalasit, A., Barone, S. and Petrucci, G. (1995) Towards RGB Photoelasticity: Full-Field Automated Photoelasticity in White Light. *Experimental Mechanics*, **35**, 193-200. <https://doi.org/10.1007/BF02319657>
- [7] 孔丽. 白光 LED 用荧光粉的合成与光谱性能研究[D]: [博士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [8] Quiroga, J.A., Garcia-Botella, A. and Gomez-Pedrero, J.A. (2002) Improved Method for Isochromatic Demodulation by RGB Calibration. *APPLIED OPTICS*, **41**, 3461-3468. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003461>
- [9] 汤安. 白光 LED 用含铟及铈酸钆红色荧光粉的发光性能研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org