

doi:10.3788/gzxb20184711.1112003

# 图像球面化算法在微通道板变形检测中的应用

赵冉, 王久旺, 张弦, 冯跃冲, 周游

(中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024)

**摘 要:** 基于球面化成像算法, 提出了一种微通道板微尺度形变检测的方法. 首先通过数学推演建立了图像球面化模型; 然后以直线图像为标准图, 对微通道板的形变做了成像模拟测试, 解释了微通道板像旋转现象的产生机理; 最后, 根据模拟数据和扫描电子显微镜测量所得的形变结果, 提出了双线形变检测方案, 设计了检测仪器并制定了检测标准. 光干涉仪的实际测量结果表明微通道板的实际形貌与模拟结果相符. 当两条垂直直线在微通道板上的反射像的旋转夹角超过  $40^\circ$  时该板被认为是不合格品; 当旋转夹角小于  $7^\circ$  时则被认为符合国军标中的平面度标准. 该方法的测量精度可达  $1\ \mu\text{m}$ , 已被应用于微通道板生产过程中.

**关键词:** 形变测量; 机器视觉; 图像球面化; 微通道板; 像旋转现象; 检测

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1112003-9

## Application of Image Spherizing Algorithm in Deformation Detection for Micro-channel Plate

ZHAO Ran, WANG Jiu-wang, ZHANG Xian, FENG Yue-chong, ZHOU You  
(China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

**Abstract:** An image spherizing algorithm-based deformation detecting method for micro-channel plate is proposed. A rigorous mathematical deduction on image spherizing model is described in detail, subsequently a straight line image is chosen as standard picture and the imaging simulated test for deformed micro-channel plate is performed. According to the simulated results, the mechanism of image twisting phenomenon is described. At last, the deformation detection scheme of double lines method is proposed. The experimental set-up is designed and the detection standard is defined based on the simulated data and the planeness of micro-channel plate that measured by scanning electron microscope. The experimental result which obtained by interferometer showed that the actual profile characteristics of deformed micro-channel plate is consistent with the theoretical analysis. A micro-channel plate will be treat as defective product when the rotation angle of two orthogonal lines in the reflected image on the surface of micro-channel plate is greater than  $40^\circ$ , whereas the product will meet the military standard when the rotation angle is smaller than  $7^\circ$ . The accuracy of the proposed method can reach  $1\ \mu\text{m}$  and it has been applied to the production process of micro-channel plate.

**Key words:** Deformation detection; Machine vision; Image spherizing; Micro-channel plate; Image twisting phenomenon; Detection

**OCIS Codes:** 120.1880; 240.0240; 330.1880; 040.1880

## 0 引言

微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)是一种具有二维空芯玻璃管阵列结构的电子倍增元件, 已被广

**基金项目:** 特种玻璃纤维与光电功能材料研究院科技创新基金(No. BXKY-2018-03)和山东省自然科学基金(Nos. ZR201702090137, ZR2017LA010)资助

**第一作者:** 赵冉(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为光电检测. Email: zhaoran276@sina.com

**收稿日期:** 2018-07-11; **录用日期:** 2018-09-07

<http://www.photon.ac.cn>

泛地应用于夜视、航天、电子等领域中<sup>[1-3]</sup>.然而,微通道板在生产、加工与使用的过程中会受到热压、研磨抛光、酸碱腐蚀、氢高温还原和镀膜等理化作用的影响,造成其板面形貌发生变化.虽然形变量较小,但是足以严重影响微通道板二维电子像的分辨率和均匀性、机械强度等性能.在夜视微光像管中,微米尺度的平面度超差即可影响近贴式像增强器光阴极与微通道板的近贴距离<sup>[4-6]</sup>.现有研究表明,当微通道板与阳极光纤面板材料的间隙增加 0.1 mm 时,其耦合效率会降低 10%~20%,图像分辨力也会降低 20%以上<sup>[1-2]</sup>.因此,必须在微通道板生产与加工过程中对其进行无损形貌监测与检测,分类或剔除形变超差品以保障其生产效率和各类器件与装备的安全使用.

目前用于微通道板的微形变检测方法主要有扫描电镜法(Scanning Electron Microscope, SEM)<sup>[7-8]</sup>、光干涉测量法<sup>[9-13]</sup>、影像对焦法等<sup>[14-16]</sup>.然而受技术原理和监测条件限制,以上方法在实际应用中存在无法解决的问题:扫描电镜法可以实现高精度测量,但是只能以线扫描的方式进行,无法快速获得全场的形貌特征数据;光干涉测量法虽能实现全场形变检测,但是需要的实验光路较为复杂,且对温度、振动等监测环境要求较高,不适合于工业环境下的形貌测量;影像对焦法往往需要几千帧甚至上万帧图像才能实现微通道板的形貌复原,不适合快速检测.除此之外,若要保证测量精度,以上方法所需仪器的价格均较为昂贵,因此,寻找一种快速、高效、简易且低成本的形貌检测方法是微通道板以及其他光纤材料研究领域的迫切需求.

本文提出了一种基于球面化成像算法的视觉检测技术.首先建立了球面成像的数学模型,然后以一条直线为基准图像,以 Matlab 软件编程的方式分析了关于微通道板的圆球形与马鞍形形变成像特征,解释了微通道板像旋转现象的产生机理.最后基于模拟的结果,提出了微通道板形变双线性检测法,并设计了检测装置.

## 1 球面化成像算法原理

### 1.1 半球形球面化成像算法

图像球面化被定义为图像中某指定区域每个像素点沿该点与区域中心连线方向做扩张或收缩移动.图 1 为平面网格在凸球面下透射或者凹镜面中反射而得到的球面化后的像.假设有一幅网格图像,像中有一点 A,如图 1(a).现在在图像上放一个凸的玻璃球面,如图 1(b),假设球面均匀,底面圆的半径为 R,因此 A 点

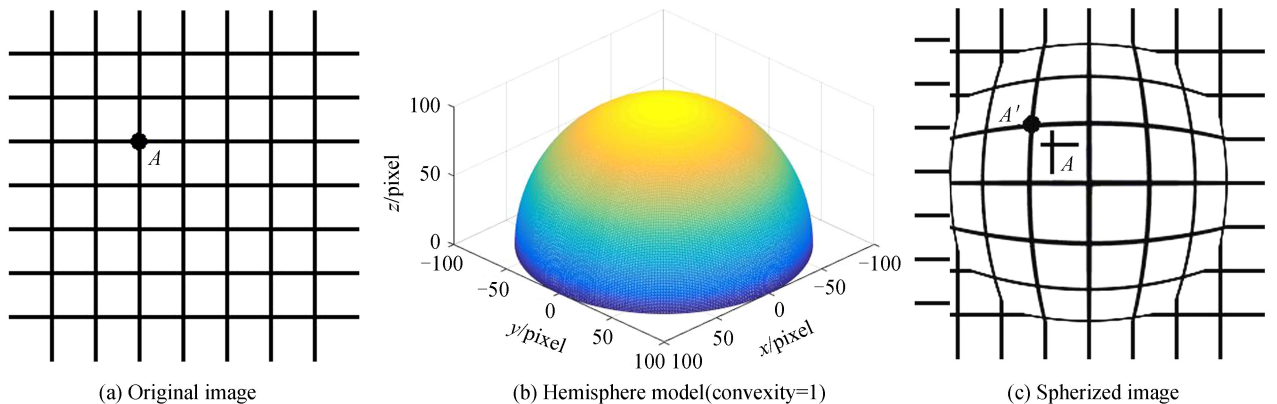


图 1 图像的球面化  
Fig.1 Image spherizing

会移动到了  $A'$  点,如图 1(c).

要为该现象建立数学模型必须引入凸度的概念.凸度是指圆弧所对应圆心角的四分之一大小的正切值,因此对于半圆的圆弧来说凸度为 1,即  $\tan \frac{\pi}{4}$ ,而扇形圆弧的凸度则小于 1.凸度变化的范围为  $[-1, 1]$ ,当凸度取正值时对应凸球面,取负值时对应凹球面.所以一段圆弧的弯曲程度可以用圆弧的凸度值  $b$  来表征.当图像中的 A 点移动到  $A'$

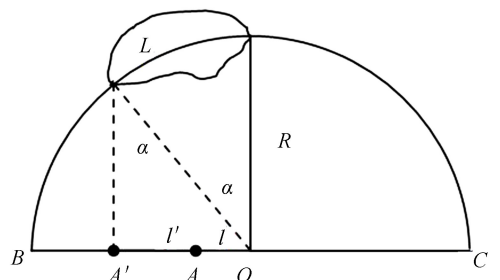


图 2 半凸球面侧视图(凸度=1)  
Fig.2 Side view of the hemisphere (convexity=1)

点时,如图 2,A 与底面圆的圆心 O 的连线 OA 被扩展成了一段圆弧 L,而 OA' 则为弧 L 在 OA 方向上的投影.对于均匀球面来说,在同一个平面内与球心 O 等距的点是均匀扩展的,即每一点的扩展系数均相等.设扩展系数为 k,则直径 BC 被扩展为半圆圆弧  $\widehat{BC}$ ,因此有  $k = \frac{\pi R}{2R} = \frac{\pi}{2}$ .设  $OA = l, OA' = l'$ ,则可以推导出

$$L = k \cdot OA = kl = \frac{\pi l}{2} \quad (1)$$

圆弧内存在

$$l' = R \sin \alpha \quad (2)$$

$$L = R\alpha \quad (3)$$

因为 A 点的扩张方向已知,综合式(1)~(3)可以得到 A 点扩张到 A' 点时运动前后位置的关系式(即 l 与 l' 的关系式)为

$$l' = R \sin \frac{\pi l}{2R} \quad (4)$$

因此,A 点的运动距离  $\Delta l$ (A 点的扩张标量)的表达式为

$$\Delta l = l' - l = OA' - OA = R \sin \frac{\pi l}{2R} - l \quad (5)$$

### 1.2 普通球面化成像算法

对于一般情况的普通球面来说,如图 3,设 R 为球底面半径,  $OC = R, OA = l, OA' = l', O'C = r, \alpha$  为整个球面圆弧所对的圆心角的一半.若整个圆弧的凸度为 b,则  $\alpha = 2 \arctan b$ .OA 在球面的作用下扩展为弧 L,其扩展系数  $k = \frac{R\alpha}{R \sin \alpha} = \frac{\alpha}{\sin \alpha}$ ,因此有

$$L = k \cdot l = \frac{\alpha l}{\sin \alpha} \quad (6)$$

同时由球面内关系可知

$$\begin{cases} \theta = \frac{L}{r} \\ r = \frac{R}{\sin \alpha} \\ OO' = \frac{R}{\tan \alpha} \\ OA' = l' = OO' \tan \theta \end{cases} \quad (7)$$

可得 A 点扩张前后位置的关系式(即 l 与 l' 的关系式)为

$$l' = \frac{R \tan \left( \frac{l\alpha}{R} \right)}{\tan \alpha} \quad (8)$$

进一步得到 A 点的扩张标量  $\Delta l$  的表达式为

$$\Delta l = l' - l = OA' - OA = \frac{R \tan \left( \frac{l\alpha}{R} \right)}{\tan \alpha} - l \quad (9)$$

已知每点必沿其与 O 点的连线方向扩张,可以得到图像中每个点的扩张角度  $\beta$ ,即扩张矢量.因此,图中每一点的水平与竖直方向的位移可以由扩张标量与扩张矢量的余弦和正弦值的乘积得到,即  $\Delta x = \Delta l \cos \beta, \Delta y = \Delta l \sin \beta$ .对于均匀的凸球面来说,当球面凸度为 0.5 和 0.8 时每个像素点扩张的矢量场(方向)和标量场(大小)如图 4 和 5 所示,其中球面的半径为 100 pixels.

对比图 4 和 5 可以看出:1)若球面是均匀的(圆球面),其底面每一条直径所对应弧的凸度相等;2)改变球面的凸度并不能改变像的位移矢量场的大小,但是位移标量场的幅值却会随着凸度绝对值的增加而增加,

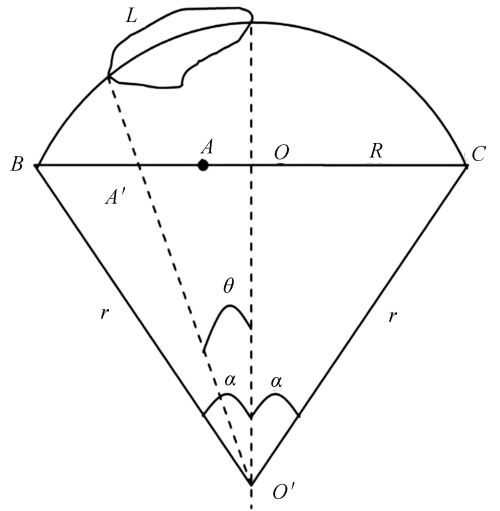


图 3 一般情况凸球面侧视图(凸度  $\neq 1$ )  
Fig.3 Side view of general convex sphere (convexity  $\neq 1$ )

因此球面凸度绝对值越大,像膨胀或收缩得越明显.

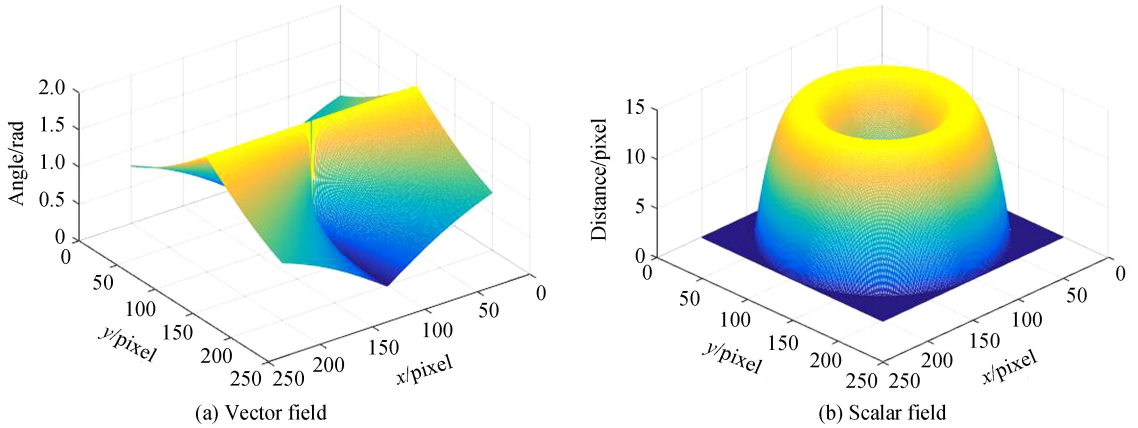


图4 球面化后图像位移场(凸度0.5)

Fig.4 Displacement field of the image after spherizing(convexity=0.5)

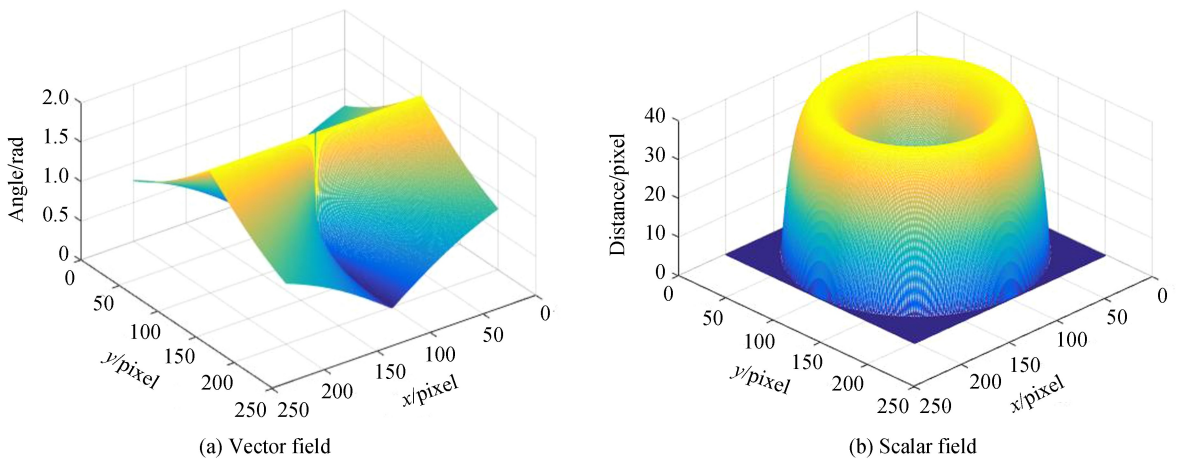


图5 球面化后图像位移场(凸度0.8)

Fig.5 Displacement field of the image after spherizing (convexity=0.8)

## 2 微通道板形变成像模拟

### 2.1 圆球面形变成像模拟

根据 1.2 节中的表述,用 Matlab 软件获得标准直线图并以其为基准图像,如图 6(a),图片的大小为 256 pixels×256 pixels,直线的宽度为 40 pixels,高度为 200 pixels.

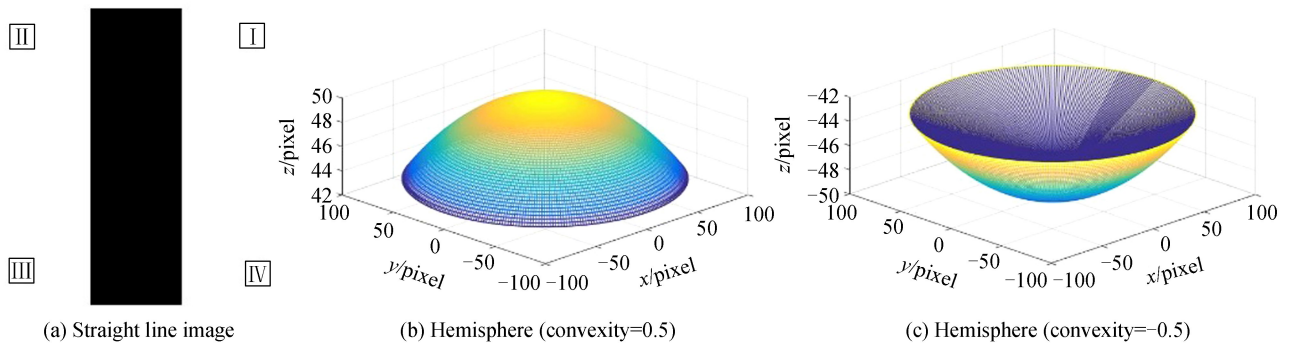


图6 标准图像与模拟球面形变

Fig.6 Standard image and simulated deformation shape

当微通道板发生球面形变时,模拟的球面形变如图 6(b)与(c)所示,其中球面半径为 100 pixels、凸度分

别为+0.5和-0.5,模拟的成像结果其结果如图7和8所示。

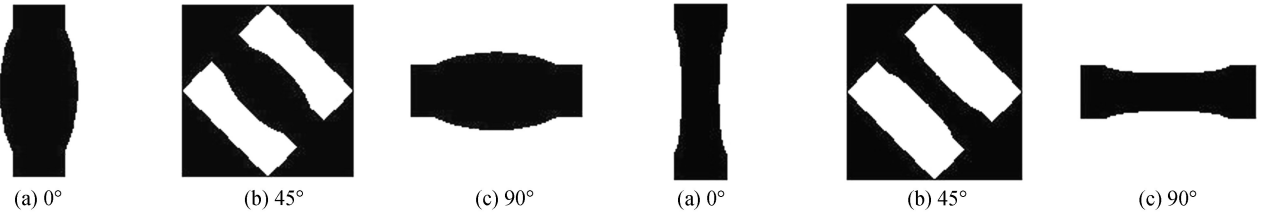


图7 凸球面成像模拟  
Fig.7 Convex spherized image

图8 凹球面成像模拟  
Fig.8 Concave spherized image

从图7(a)和图8(a)可以看出,当微通道板的表面为凸面时,反射的图像整体向外扩张;当表面为凹面时,反射的图像整体收缩,即凹面的凸度为负值,凸面的凸度为正值.如果将整个图像分为四个象限(象限的描述如图6(a)所示),在第I和第IV象限中的像凸起(凹陷)方向一致,第II和第III象限中的像凸起(凹陷)方向一致.同时,由于球面是均匀且对称的,不管图像或者球面如何旋转,每个像素点的扩展程度均不变,即旋转前后板面所呈像的形状不会发生变化,如图7(b)、7(c)、8(b)和8(c)所示。

### 2.2 马鞍形变成像模拟

由模拟结果可知,当形变为全凸或全凹时,由于位移矢量场和标量场的符号不会发生变化,其所成的直线反射像均为整体膨胀或者整体收缩的.然而,当形变的凹凸性发生变化时,由于其位移标量场正负符号发生了变化,因此在凹凸性变化的位置上直线像的膨胀或收缩方向也会发生改变.马鞍形形变即为典型的凹凸性变化的形变,如图9(a),其中 $x$ 轴( $x=0$ )和 $y$ 轴( $y=0$ )处圆弧的凸度值分别为-0.5与+0.5.从图中可以看出凸度正负的分界线应近似处于由 $x$ 轴向 $y$ 轴旋转 $45^\circ$ 的轴线位置上.当微通道板表面发生马鞍形形变时,旋转 $45^\circ$ 后的直线像的模拟成像结果如图9(b)和(c)所示.此时,直线像的竖直对称轴不再与椭圆的长轴重合,大部分直线的像点都处于两个对角象限中(如第II与第IV象限或第I与第III象限).由于此时处于同象限的直线两侧将会向同方向凸起(凹陷),从图形的整体来看,两个象限当中的直线会连为一条,好像发生了“扭转”一样。

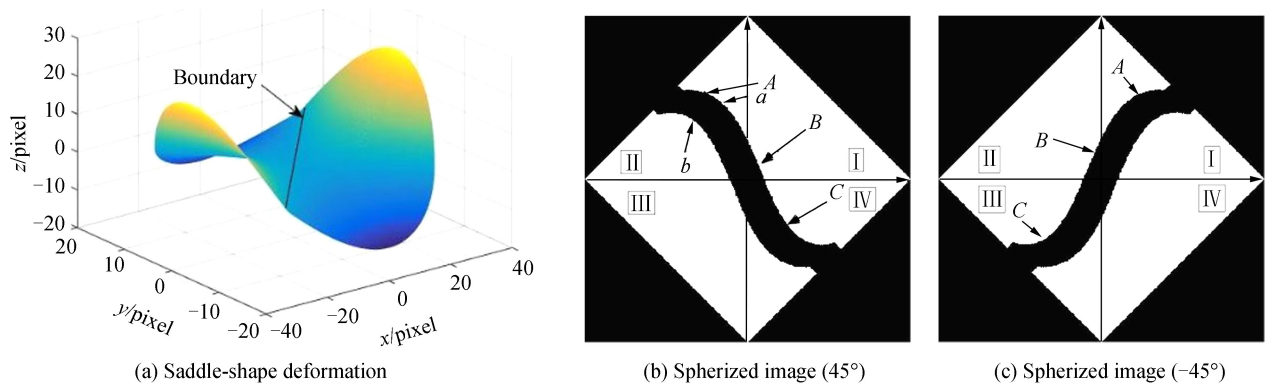


图9 马鞍形变与成像模拟  
Fig.9 Saddle-shape deformation and the spherized image

## 3 成像分析与实验验证

### 3.1 微通道板像随板旋转现象成像分析

像随板旋转是微通道板生产过程中常遇到的一种奇特现象.若微通道板的表面是平滑的,直线形状物体(如日光灯管、细线等)在板表面所成的像不会随着微通道板的旋转而旋转;然而若微通道板表面有了一定形变,当微通道板在旋转时,直线形状物体在微通道板上所成的像会随微通道板的旋转而旋转,并且旋转角速度带有一定的滞后性,如图10。

根据2.2节中马鞍形形变成像模型的表述,该现象可以被解释为:在图9(b)中,当直线状物体由 $y$ 轴向 $x$ 轴以一定角速度旋转时,由于物体的轴线在向分界线靠近,因此在旋转到一定程度后可以看到物体所成的像在B区域发生直线形式的扭转现象,并且越接近分界线该扭转现象越明显;当转过了分界线后扭转现象

则会逐渐消失,直到  $y$  轴与原来的  $x$  轴重合为止.值得注意的是:1) 由于微通道板的最外圈没有镀膜,因此板上  $B$  区域的像所占比例会增大,使像扭转现象更加明显,如图 10;2) 在微通道板旋转时,像旋转的角位移一直滞后于微通道板, $x$  轴与  $y$  轴所对圆弧的凸度值增加会造成马鞍面越陡,像在旋转到  $45^\circ$  时的扭曲程度越大,角位移的滞后量也就越高,如图 11;3) 实际的微通道板由于受到的理化作用并不均匀,其表面形貌也是起伏不定的.所谓分界线其实就是板面上凸起部分与凹陷部分之间的分水岭,若在表面出现多条分界线,则可以在旋转全程观察到像旋转现象,而直线的像的扭曲角度会随着成像位置的不同而变化.

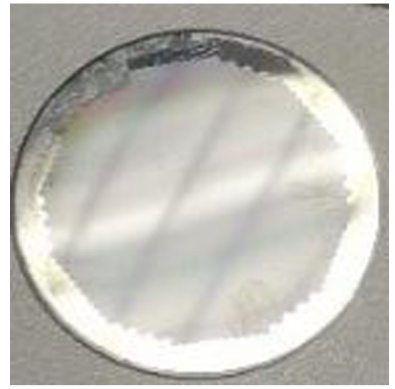


图 10 微通道板的像旋转现象

Fig.10 Image twisting phenomenon of MCP

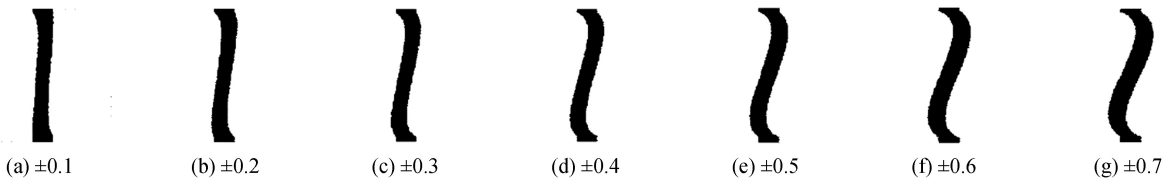


图 11  $x$  轴与  $y$  轴所对圆弧凸度不同时像的扭转情况

Fig.11 Twisted images at different convexities in  $x$  and  $y$  directions

### 3.2 实验测量结果与误差分析

采用乾曜激光干涉仪 G60U 中的傅里叶变换法对在旋转过程中能够发生像扭转现象的微通道板做形貌初步检测,实验装置和检测结果分别如图 12 和 13 所示,图像大小为  $119 \text{ pixel} \times 119 \text{ pixel}$  像素.从图上可以

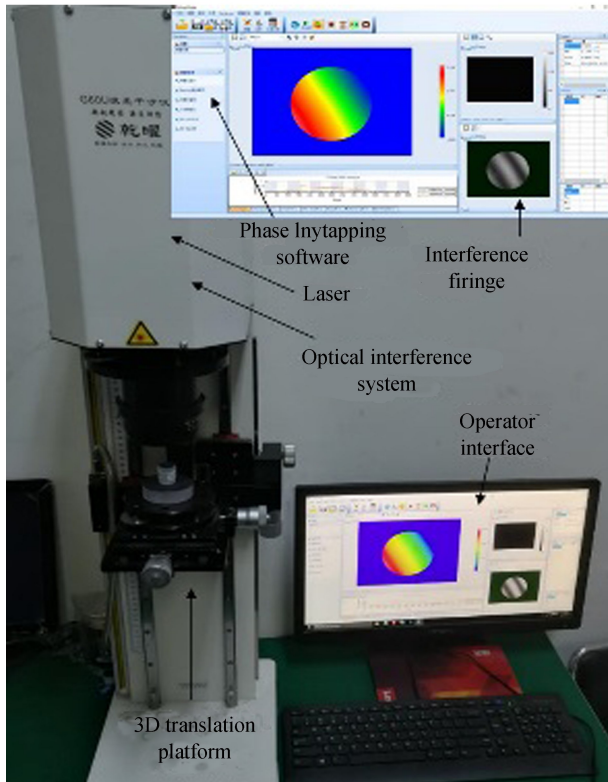


图 12 实验装置

Fig.12 Experimental set-up

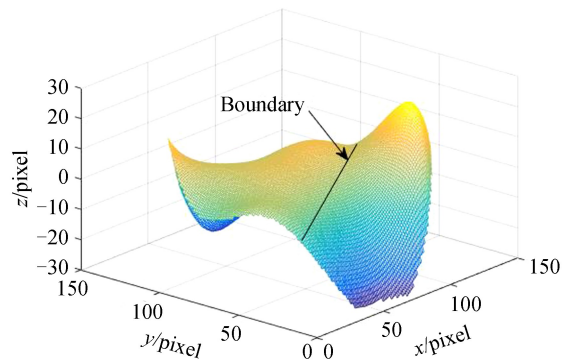


图 13 微通道板形貌检测结果

Fig.13 Profile of deformed MCP

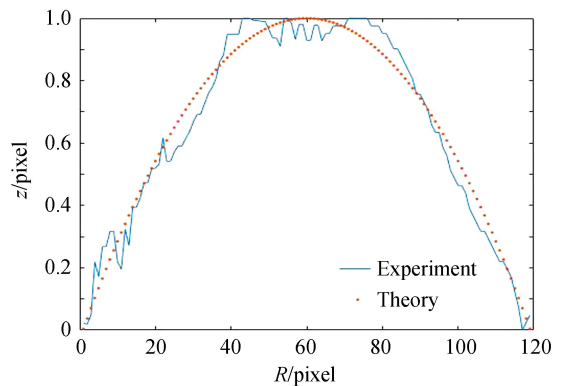


图 14 分界线高度值归一化对比

Fig.14 Comparison of normalized height data of boundary

看出,该形变类似于马鞍形.分界线处形变高度归一化后理论值与测量值的对比数据如图 14 所示,两者平均误差为 1.29%.该结果表明该微通道板上存在凸度为 0 的分界线,因此在该线附近可以看到明显的像扭转现象,这与 2.2 节中的推论一致.另一方面,该结果也证明了本文提出的基于球面化成像技术的检测方法对于其他反光材料的微形变检测同样适用.

#### 4 算法在微通道板形变检测中的应用

由 3.1 节中的分析可知,只要微通道板表面出现凹凸分界面就会出现像旋转现象.同时,分界面两侧的凸度变化越快,像扭转的角度越大.由于板的面积和厚度是固定的,因此微通道板的最大形变值(即平面度)应与像扭转的最大角度相关.为实现定量测试,在定标实验中采用中国建筑材料科学研究总院绿色建筑材料国家重点实验室的扫描电子显微镜(SEM,最大精度可达 10 nm)测量了 100 片可产生像旋转现象的微通道板的平面度,每片板的厚度为 0.39 mm,板面直径为 25 mm,同时采用机器自带的量角器(精度为  $0.1^\circ$ )测量了单条直线在每个板上旋转的最大角度值.具体测量方法为:旋转微通道板,当单线偏转角度达到最大时用量角器测量该偏

转角度值;运用 SEM 选定微通道板的基准面,采用点阵扫描的方式每隔 0.2 mm 测量板面上每一个位置的高度值,其中最大高度与测量基准面高度的差值即为微通道板的平面度值,测量的结果如图 15 所示.从图上可以看出,微通道板的平面度与单条直线的旋转最大角度成正比关系.

由于单条直线的旋转角度较小,采用目视的方式很难得到准确的结果,因此提出了微通道板形变的双线检测法.在该方法中,两条相互垂直的直线被置于微通道板上作为标准图像,同时在微通道板下方放置量角器,用于测量两直线在微通道板上所成的像之间的夹角,如图 16.

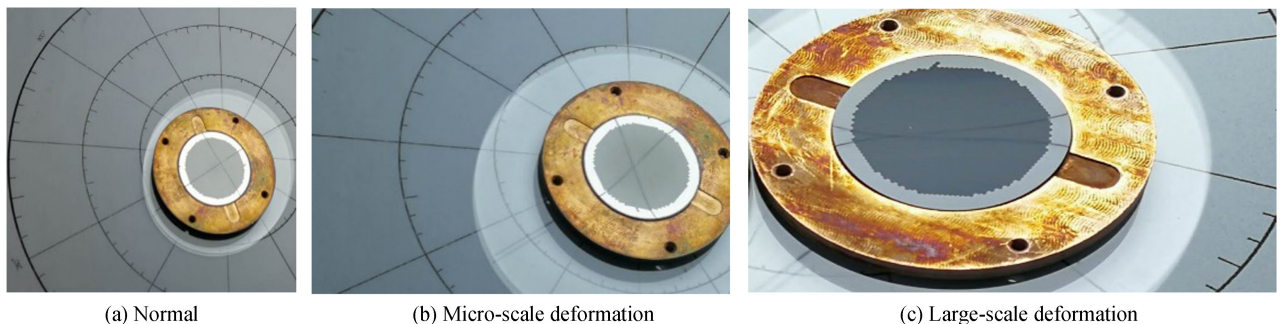


图 16 双线检测法

Fig.16 Two lines testing method

根据图 11 中的数据,计算了不同凸度情况下对应的双线旋转角度的理论值.从凸度与双线旋转角度的理论值的关系可以看出,微通道板的平面度与直线的旋转最大角度成正比.同时,由图 9 中的模拟图像可知,相互垂直的两条直线的旋转方向相反,因此图 15 中旋转角度数据(即单线旋转角度)的二倍值被作为双线旋转角度的实际测量值.由于在本装置中角度的读数误差为  $\pm 0.5^\circ$ ,因此该装置的测量精度为  $1 \mu\text{m}$ ,平均测量误差为  $\pm 3.04\%$ .为便于定标,双线旋转  $5^\circ \sim 40^\circ$  时(即单线旋转  $2.5^\circ \sim 20^\circ$ )对应的微通道板平面度也被列出,所有数据见表 1.

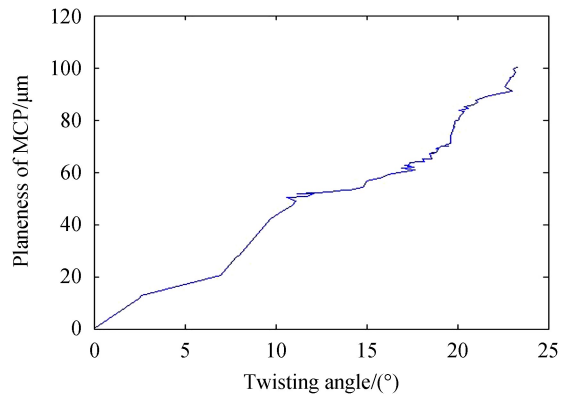


图 15 最大像扭转角度与微通道板平面度的关系

Fig.15 The relationship between twisting angle and planeness of MCP

表 1 双线夹角与实际平面度标定结果

Table 1 Calibration results of the angles between two lines and the actual planeness

The theoretical value of convexity	The theoretical value of twisting angles between two lines	The experimental value of twisting angles between two lines (twisting angle of single line $\times 2$ )	Planeness of MCP (measured by SEM)
$\pm 0.1$	$8.18^\circ$	$5^\circ$	$12.16 \mu\text{m}$
$\pm 0.13$	$10.39^\circ$	$7^\circ$	$15.35 \mu\text{m}$
$\pm 0.2$	$13.22^\circ$	$10^\circ$	$16.96 \mu\text{m}$
$\pm 0.3$	$18.92^\circ$	$15^\circ$	$25.26 \mu\text{m}$
$\pm 0.4$	$22.22^\circ$	$20^\circ$	$43.39 \mu\text{m}$
$\pm 0.5$	$30.92^\circ$	$30^\circ$	$56.57 \mu\text{m}$
$\pm 0.6$	$38.12^\circ$	$40^\circ$	$79.77 \mu\text{m}$

平面度超差会严重影响微通道板的分辨率与耦合效率等性能.国内军用的微通道板的平面度要求小于  $15 \mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>;在实际生产过程中,实验人员分别对平面度为  $10\sim 110 \mu\text{m}$  的微通道板做了性能测试,结果表明平面度超过  $80 \mu\text{m}$  的微通道板的性能会发生显著变化而不能满足国外部分特殊客户的需求,因此可以断定平面度超过  $80 \mu\text{m}$  的微通道板为废板.综上所述,在测试时根据标定数据结果制定了相应的形变检测标准:1)粗测标准:若两直线的偏转角度小于  $40^\circ$ (即平均单线偏转角度小于  $20^\circ$ ),则可认为微通道板的形变量较低(小于  $80 \mu\text{m}$ ),可以进行进一步的性能测试以供国外部分特殊客户使用;反之则该板被认定为形变量较大的废板.2)精测标准:若两直线的偏转角度小于  $7^\circ$ (即平均单线偏转角度小于  $3.5^\circ$ ,最大形变小于  $15 \mu\text{m}$ ),则被认为符合军用标准,可以进一步测试性能;反之则该板被认定为形变量较大的废板.除此之外,微通道板的最大形变值均可通过对比表中数据得到.

## 5 结论

建立了图像球面化数学模型,并基于该模型提出了一种微通道板形变检测方法.通过对微通道板的圆球形和马鞍形形变做成像模拟测试,分析了不同形变下微通道板的成像特征并解释了像旋转现象的产生机理.该方法只需通过目视的方法即可实现形变测试,精度可达  $1 \mu\text{m}$ ,测量过程十分简单,5 s 内即可完成一片微通道板平面度的初步检测,适合工业生产与加工的检测环境.实验结果表明模拟结果与微通道板的实际形貌相符.同时,根据客户要求与 SEM 的测量结果,提出了双线检测法及相应的检测标准:当两条垂直直线在微通道板上的反射像的旋转角度超过  $40^\circ$  时则认为该板为不合格品;当旋转夹角小于  $7^\circ$  时则被认为符合国军标中微通道板的平面度标准.该方法通过数学建模的方式实现了微通道板形变的快速检测,同时也为其它固体材料的形变检测提供参考.目前该方法已被应用于微通道板的生产过程当中.

## 参考文献

- [1] HUANG Yong-gang, GU Zhen-an, ZHANG Yang, *et al.* Nano-scale morphology on micro-channel plate lead silicate glass surface[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012, **40**(7): 994-999.  
黄永刚,顾真安,张洋,等.微通道板铅硅酸盐玻璃表面纳米尺度的形貌[J].硅酸盐学报,2012, **40**(7):994-999.
- [2] HUANG Yong-gang, HUANG Ying, ZHANG Yang, *et al.* Progress in Si-microchannel plates[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(3): 960-966.  
黄永刚,黄英,张洋,等.硅微通道板的研究进展[J].应用光学,2011, **32**(3):354-356.
- [3] PAN Jing-sheng, SUN Jian-ning, HAN Xiao-ming, *et al.* High detection efficiency low noise large format neutron sensitive microchannel plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1204003.  
潘京生,孙建宁,韩晓明,等.高探测效率低噪声的大面阵热中子敏感微通道板[J].光子学报,2014, **43**(12): 1204003.
- [4] XIE Yun-tao, ZHANG Yu-jun, SUN Xiao-quan, *et al.* Monte-Carlo simulation of output electron cloud from a microchannel plate in a saturation mode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(11): 1125001.  
谢运涛,张玉钧,孙晓泉,等.饱和模式下微通道板输出电子云的 Monte-Carlo 仿真[J].光子学报,2017, **46**(11): 1125001.
- [5] XIE Jun-qi, BYRUM K, DEMARTEAU M, *et al.* Development of a low-cost fast-timing microchannel plate photodetector [J], *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, **824**: 159-161.
- [6] LEHMANN A, BöhMA M, BRITTING A, *et al.* Recent developments with microchannel-plate PMTs [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2017, **876**: 42-47.



- [7] ANDREA F, YANNICK R, NICOLAS W, *et al.* Amorphous silicon-based microchannel plates [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, **695**: 74-77.
- [8] MIAO Feng-quan, MIAO Rui, TAO Bai-rui, *et al.* Vertically-oriented few-layer graphene supported by silicon microchannel plates as a counter electrode in dye-sensitized solar cells[J]. *Organic Electronics*, 2017, **45**: 74-80.
- [9] XU Yang-lei, XU Tao, LIU Hui, *et al.* Gain regulation of the microchannel plate system[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2017, **421**: 234-237.
- [10] ZHAO Ran, SUN Ping. Deformation-phase measurement by digital speckle correlation method[J]. *Applied Physics B Lasers and Optics*, 2016, **122**: 251.
- [11] XIAO Fei, ZHAO Ran, SUN Ping. Three-dimensional displacement measurement based on the combination of digital image correlation and optical flow[J]. *Applied Optics*, 2016, **55** (29): 8207.
- [12] ZHAO Ran, SUN Ping. Deformation-phase measurement by optical flow method[J]. *Optics Communications*, 2016, **371**(15): 144-149.
- [13] SUN Hai-bin, SUN Ping. Out-of-plane displacement measurement using optical vortex phase shifting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11): 1112001.  
孙海滨, 孙平. 基于光学涡旋相移技术的离面位移测量[J]. 光子学报, 2016, **45**(11): 1112001.
- [14] FAN Tian-tian, YU Hong-bin. A novel shape from focus method based on 3D steerable filters for improved performance on treating textureless region[J]. *Optics Communications*, 2018, **410**: 254-261.
- [15] XIN Zhi-hui, LIAO Gui-sheng, YANG Zhi-wei. A fast ground moving target focusing method based on first-order discrete polynomial-phase transform[J]. *Digital Signal Processing*, 2017, **60**: 287-295.
- [16] LIU Xiang-jun, YU Mei, WANG Yi-gang. A novel time-domain focusing method for microscope imaging[J]. *Procedia Engineering*, 2011, **15**: 2660-2664.
- [17] PAN Gui-zhi, HE Ye-ying, MIAO Kun-zhi, *et al.* GJB1596-93, Specification for microchannel plate[S]. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1993.  
潘桂枝, 何业英, 缪坤治, 等. GJB1596-93, 微通道板规范[S]. 国防科学技术工业委员会, 1993.

**Foundation item:** Special Glass Fiber and Photoelectric Functional Materials Research Institute Technology Innovation Fund (No.BXKY-2018-03), National Natural Science Foundation of Shandong (Nos.ZR201702090137,ZR2017LA010)

引用格式: ZHAO Ran, WANG Jiu-wang, ZHANG Xian, *et al.* Application of Image Spherizing Algorithm in Deformation Detection for Micro-channel Plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1112003

赵冉,王久旺,张弦,等.图像球面化算法在微通道板变形检测中的应用[J].光子学报,2018,**47**(11):1112003