

文章编号 1004-924X(2016)05-0993-08

薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形测量

戴美玲, 徐向阳, 杨福俊, 何小元*

(东南大学 江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:建立了非接触光学测量实验系统,对薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形及失稳行为进行了实验研究。实验以理想弹塑性材料制成的薄且壁厚均匀的乒乓球为压缩对象,采用透明石英玻璃板作为刚性平面,用相机透过玻璃板采集清晰的散斑图像。然后利用具有非接触、全场、高精度等优点的三维数字图像相关(3D-DIC)技术对与刚性平面接触的乒乓球表面的连续变形进行直接测量,同时利用二维数字图像相关技术结合压力传感器得到对应的力-位移关系。实验研究表明,基于 3D-DIC 方法测量三维表面变形场,实现了对受刚性平面压缩的乒乓球表面从局部压平阶段到轴对称屈曲阶段,进而演化到非轴对称屈曲阶段等力学行为的可视化。实验结果表明,对乒乓球半径的测量精度可达 0.5%,利用 Abaqus 有限元方法得到的结果与实验结果非常吻合,验证了所提方法的有效性。

关键词:数字图像相关;连续变形测量;三维变形测量;薄壁球壳;屈曲

中图分类号:O348.1;O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.0993

Measurement of continuous deformation of thin-walled spheres compressed by a rigid plate

DAI Mei-ling, XU Xiang-yang, YANG Fu-jun, HE Xiao-yuan*

(Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics,
Southeast University, Nanjing 210096, China)

* Corresponding author, E-mail: mmh.xy@seu.edu.cn

Abstract: An optical measurement experimental system was proposed to research the continuous deformation and crushing behavior of thin-walled spheres compressed by a rigid plate. In experiments, ping pong balls were selected as thin-walled spheres because of its ideal material properties and very thin but uniform wall thickness and the quartz glass plate was regarded as a rigid body to compress ping pong balls. Then, the speckle pattern was captured by cameras clearly. Furthermore, the three dimensional digital image correlation (3D-DIC) method with advantages of non-contact, full-field measurement, and high-accuracy was employed to measure the continuous compression deformation of the contact surface of the ping pong balls directly. The two dimensional digital image correlation method combined with a pressure sensor was used to obtain force-displacement curves simultaneously. Experimental results demonstrate that the 3D-DIC method is able to implement the visualization of mechanical behaviors of thin-walled spheres compressed by the rigid plate, including the local

收稿日期:2016-01-06;修订日期:2016-03-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11532005, No. 11472081, No. 11272090);江苏省博士后科研资助计划项目(No. 1501016C);江苏省工程力学分析重点实验室开放课题基金资助项目(No. LEM16B04)

flattening, axisymmetric inward dimpling and the unsymmetric polygon formation. Experimental result indicates that the measurement precision of ping pong balls is up to 0.5%, and the numerical results obtained by using Abaqus is in agreement well with experimental results. The experimental and numerical results both demonstrate the validity of the proposed method.

Key words: digital image correlation; continuous deformation measurement; 3D deformation measurement; thin-walled sphere; buckling

1 引言

薄壁球壳作为一种基本的结构元件,广泛应用于各种运载工具、压力容器以及冲击保护装置,如航天器、深水工程的压力容器以及空心球泡沫材料等。20世纪60年代,人们开始关注单个薄壁球壳大变形后的屈曲问题^[1-2]。Leckie等^[1]用刚性冲头在精制的半球壳正中心进行加载,研究了薄壁半球壳的大变形问题。1969年Morris等^[2]的理论研究表明,结构在变形过程中,塑性变形仅限于很窄的环形区域,并且随着变形增大,环状塑性区域(简称塑性环)向外移动。Updike^[3]对金属半球壳在刚性平板压缩下的准静态过程进行了实验研究和理论分析,获得了薄壁球壳在刚性板压缩下的近似解。N. K. Gupta等^[4-6]对球壳在准静态压缩和动态冲击下的动态响应进行了研究,分析了球壳在各种加载形式下的变形形式、压溃机理和吸能能力。余同希等^[7-9]以乒乓球作为实验对象开展了空心球力学性能的研究,并利用有限元数值模拟分析了其力学性能。吴承伟等^[10]通过实验和数值模拟研究了乒乓球单球自由压缩、被胶结于两个平行板间压缩和胶结成列阵压缩的力学行为。余为等^[11-12]研究了薄壁金属空心球结构受刚性平面、圆柱等压缩的准静态力学性能。路国运等^[13]人采用顶点及平板下压的加载方式对半球壳的准静态压缩进行了实验研究,并数值模拟分析了加载方式与球壳尺寸等对变形行为的影响。

要想全面认识球壳结构的失稳机制,对其压缩过程中的变形模式及规律的认识显得尤其重要。为了获得球壳压缩变形过程中某一阶段球壳的变形模式,传统的方法是在压缩实验过程中进

行中断,再观测发生塑性变形的球壳表面^[4]。此外,传统的电测方法^[9]只能测量球壳表面某几个点的应变。有限元数值模拟能够弥补传统实验方法的缺陷,直观地表现球壳压缩的变形模式及失稳过程^[5, 8, 10, 12];但其计算模型及结果的有效性必须以可靠的实验数据作为基础,因此,开展球壳结构压缩过程的非接触、全场、连续变形测量研究显得十分必要。本文建立了非接触光学测量系统,对薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形及失稳行为进行了实验研究。以具有理想弹塑性材料制成的薄且壁厚均匀的乒乓球为实验压缩对象,利用三维数字图像相关(Three Dimensional Digital Image Correlation, 3D-DIC)技术直接测量与刚性平面接触的乒乓球表面的连续变形。讨论了玻璃板对3D-DIC测量的影响,分析了薄壁球壳受刚性平面压缩的变形过程,并利用Abaqus有限元软件进行了数值模拟实验,验证了本文提出的实验方法的有效性。

2 测量原理和方法

2.1 刚性平面压缩薄壁球壳原理

在球壳压缩实验中,先固定平面,将薄壁球壳置于刚性球座与刚性平面之间,然后压头慢慢向下压缩,如图1所示。已有的理论和实验研究表明,随着压缩位移的增大,薄壁球壳与刚性平板的接触区域将发生屈曲,形成一个很窄的塑性环,并逐渐向外移动^[2]。球壳受平面的压缩过程分为三个阶段^[4]:(1)局部压平阶段,如图1(a)所示;(2)轴对称屈曲阶段,如图1(b)所示;(3)非轴对称屈曲阶段,形成四边形、五边形、六边形等多边形的屈曲模式。本文利用3D-DIC技术对受刚性平面压缩的薄壁球壳表面的连续变形进行了直接测量。

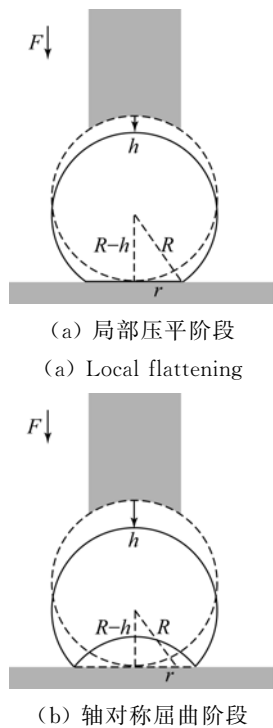


图 1 球壳受刚性平面压缩的原理图

Fig. 1 Principle schematic of plate compression

2.2 三维数字图像相关技术原理

3D-DIC 是一种基于双目立体视觉原理和数字图像相关匹配技术的方法^[14-16]。图 2 是利用 3D-DIC 方法测量物体表面三维位移的流程图。变形前在左摄像机的图像中选择要计算的图像子区,并通过立体匹配找到该子区在右摄像机图像中

$$C = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[\frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x, y) - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x, y) - g_m]^2}} \right]^2, \quad (1)$$

式中: M 为图像子区半宽; $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别为参考图像和变形图像的子区灰度值; f_m 和 g_m 分别为参考图像和变形图像子区灰度的平均值。

2.3 薄壁球壳接触表面的可视化方法

为了便于观察与刚性平面接触的薄壁球壳表面,这里采用透明石英玻璃板作为刚性平面,对由理想弹塑性材料制成的薄且壁厚均匀的乒乓球进行压缩。薄壁球壳压缩变形的光学测量实验系统如图 3 所示,相机 1 和相机 2 透过玻璃板采集压缩过程中乒乓球表面的变形散斑图,用于三维变形计算;为了同时记录压缩位移 h ,在刚性压头处

的相应位置,根据预先标定的摄像机内外部参数可得到该图像子区中心点的三维坐标 (x_0, y_0, z_0) 。同理,在变形后左、右摄像机的数字图像中也追踪到该图像子区中心点的相应位置,则可得到该点变形后的空间三维坐标 (x_1, y_1, z_1) 。变形前后中心点的空间坐标之差即是所求的三维位移,然后对三维位移场进行适当的差分计算或平滑,再进行差分计算即可求得相应的应变场^[14]。

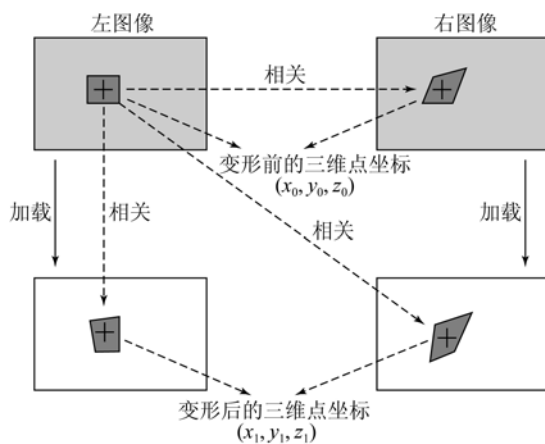


图 2 三维数字图像相关法计算三维位移的流程图

Fig. 2 Flow chart of displacement measurement using 3D-DIC

数字图像相关匹配采用抗干扰性较好的归一化最小平方距离相关函数 C 来评价变形前后图像子区的相关程度,一般采用 Newton-Raphson 非线性优化方法求解,即:

贴一张二维散斑图,相机 3 光轴垂直于该散斑图,用于采集压缩过程中每一时刻的二维散斑场,利用二维 DIC 方法得到压缩过程中每一瞬时的压缩位移;刚性球座与压力传感器连结,相机 4 用于采集每一时刻压力显示器上的压力读数 F 。通过线程同步控制相机 1, 2, 3, 4 采集图片,并储存到计算机内。

压缩开始之前,需要对双目视觉系统(相机 1 和相机 2)进行标定。相机标定是从二维图像重建三维测量信息的关键步骤。目前的相机标定方法有很多,其中,基于三维标准物的标定法以 Tsai 的“两步法”^[18]最为普遍,但是标定块不易制

作且价格昂贵。基于二维标准物如平面棋盘格或带星状图像图板的标定法,如张正友算法^[19],操作灵活且精度较高,现已成为立体视觉标定的主要方法。本文的标定过程如下:调节并固定好相机 1、相机 2,在没有玻璃板的情况下,同时拍摄标定棋盘格不同姿势的图片,共拍摄 13 组标定图片。图 4(a)和 4(b)是其中一组,用于计算相机 1、2 的内参数、外参数及畸变系数^[19]。

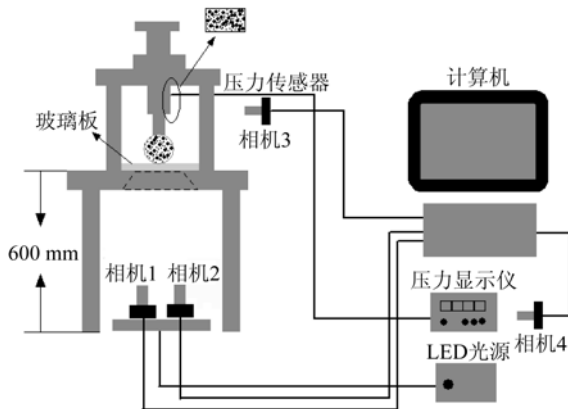


图 3 薄壁球壳压缩形变光学测量系统

Fig. 3 Optical measurement system for continuous deformation of compressed thin-walled

由于实际测量是隔着玻璃板(厚度 10 mm)进行的,玻璃板会影响 3D-DIC 测量。在刚性球座处固定一个表面喷有随机散斑的乒乓球,然后在有、无玻璃板的情况下利用 3D-DIC 测量乒乓球形貌。用方程 $f(x_0, y_0, z_0, R) = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - R^2 = 0$,对得到的三维形貌数据进行最小二乘拟合,再对直角坐标系下的测量结果进行球坐标转换,得到的半径分布图,如图 5(a)和 5(b)所示,平均值分别为 19.79 mm(有玻璃板),19.78 mm(无玻璃板),与游标卡尺的测量结果 (19.8 ± 0.05) mm 之差都在 0.5% 以内,标准差分别为 0.004 18,0.004 08 mm,满足测量精度要求。而拟合球心分别为 $(-43, -10.5, 62.5)$ 和 $(-43.5, -10, 68.5)$,两者相差 6.04 mm,这是由于光在玻璃板中发生折射所致,关于此类问题的量化分析可参考文献^[20]。由于实际测量均是隔着玻璃板进行的,因此本文所提

的乒乓球受刚性平板压缩的连续变形测量方法是可靠的。

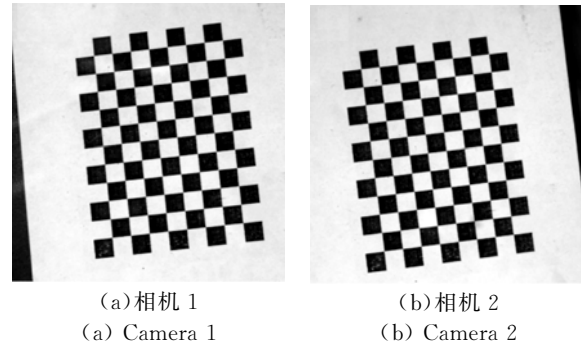


图 4 标定棋盘格

Fig. 4 Calibration checkerboard

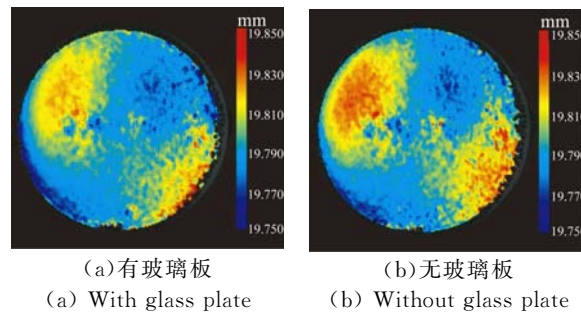


图 5 半径分布

Fig. 5 Radius distribution

3 实验

本文实验现场如图 6 所示。4 台相机均为 IDS USB 3.0 相机,分辨率为 $2\ 048\ \text{pixel} \times 2\ 048\ \text{pixel}$,帧频为 30 frame/s,采用焦距为 50 mm 的 Pentax 镜头,通过连接圈来调整视场并固定相机。压力传感器为“联测 150 型”,其灵敏度为 2 mV/V。采用“红双喜”牌一星乒乓球,乒乓球放置时其表面重叠环与刚性平板平行。将乒乓球材料剪成哑铃型拉伸试样,然后在试验机上进行拉伸实验,其应力-应变曲线如图 7 所示。可见乒乓球材料非常近似于弹塑性材料,材料的弹性模量约为 2.4 GPa,屈服应力约为 47 MPa,其厚度约为 0.38 mm。压缩实验中,加载速度约为 4 mm/min,最大压缩量为 8 mm,相机帧频均设为 2 frame/s。

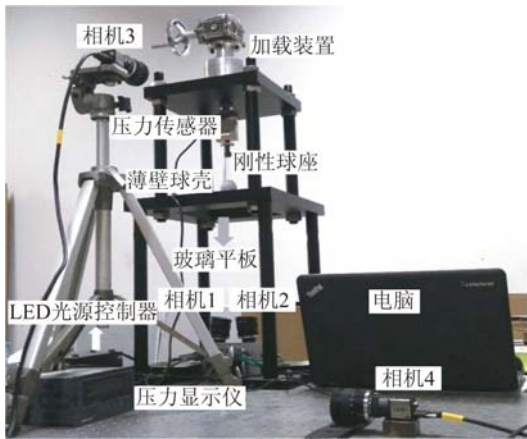


图 6 薄壁球壳压缩变形测量实验现场

Fig. 6 Experimental platform for continuous deformation measurement of compressed thin-walled sphere

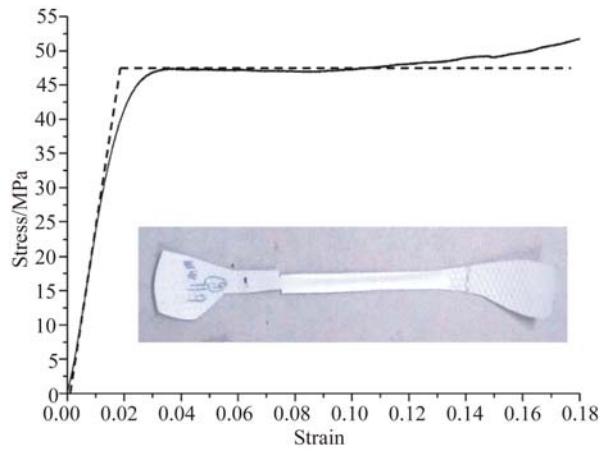


图 7 乒乓球材料的应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of pingpong ball material

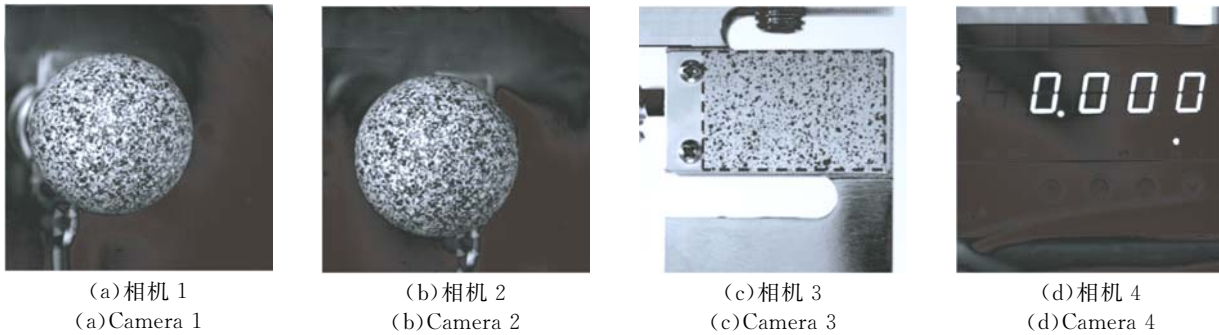


图 8 初始时刻采集到的图

Fig. 8 Captured images at initial time

图 8(a)、(b)、(c)、(d)分别是相机 1, 2, 3, 4 在初始时刻采集到的图片。对相机 1, 2 在压缩过程中采集到的散斑图(如图 8(a)和 8(b))进行三维 DIC 计算可获得乒乓球的三维形貌和变形分布。其中,有效测量区域约为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 对应 $1\ 300\text{ pixel} \times 1\ 300\text{ pixel}$ 。对相机 3 采集到的散斑图(图 8(c))进行二维 DIC 计算,可获得对应每一时刻的压缩位移量,其中虚线长方形区域为 $25\text{ mm} \times 45\text{ mm}$, 对应 $819\text{ pixel} \times 1\ 474\text{ pixel}$ 。对由相机 4 采集到的图片(图 8(d))进行人工读数可以获得每一时刻的压力值。

4 数值模拟

本文利用 Abaqus6.12 有限元软件对薄壁球壳在实验条件下的压缩力学性能进行数值模拟。

实验中,由于乒乓球上半部分不变形或只发生很小的弹性变形,所以采用薄壁半球壳与刚性平板压缩的模型进行计算。在有限元模型中,球壳顶部与刚性平板之间定义为面-面接触,摩擦系数设为 0.1,约束刚性平板所有的自由度,对薄壁半球壳底部施加 8 mm 的位移荷载,同时约束位移方向以外的所有自由度。薄壁半球壳采用理想弹塑性材料,采用四节点减缩积分壳单元 SR4,为避免分区划分网格对变形模态的影响,通过自由网格划分技术进行有限元网格划分。将有限元数值模拟结果与实验结果进行对比验证。

5 结果与讨论

本文采用的 3D-DIC 计算分析软件是南京中讯微的“PM-lab 2014a”。通过相机 1 和相机 2 构

成的 3D-DIC 系统得到每一时刻乒乓球的三维形貌和变形分布。图 9(a)、(b)、(c)、(d) 分别是压缩位移量为 0.24, 3.4, 4.5, 7.2 mm 时测量得到的形貌图, 图 10(a)、(b)、(c)、(d) 是相应的变形分布图。由图可以连续地观测其受刚性平面压缩过程中的力学行为: 首先是压平阶段(第 I 阶段), 此时的压缩位移 h 比较小, 乒乓球顶部被压平(如图 9(a) 所示), 与平面的接触在一个很小的圆面范围之内, 随着变形的增加, 其半径也随之增大; 继续压缩乒乓球, 球壳与平面的接触区域发生屈曲变形, 逐渐与平面分离, 轴对称地向中心翻转, 进入轴对称屈曲阶段(第 II 阶段), 此时球壳与

平面的接触形状由圆面逐渐变为圆环(如图 9(b) 所示), 顶部受到挤压应力逐渐屈服并向内侧流动, 圆环外侧表面发生变形并继续向内翻转、流动, 形成连续的翻转过程, 与平面接触的圆环逐渐向外移动; 随着压缩位移的增大, 与平面接触的塑性圆环逐渐向多边形(如图 9(c)) 转变从而进入非轴对称屈曲阶段(第 III 阶段), 与刚性平面的接触形状变为五边形, 且五边形的顶点出现褶皱(如图 9(d) 所示), 并继续向外扩展。从实验结果可以看出, 球壳的屈曲变形发生在球壳与平面接触受压形成的塑性环内部区域。

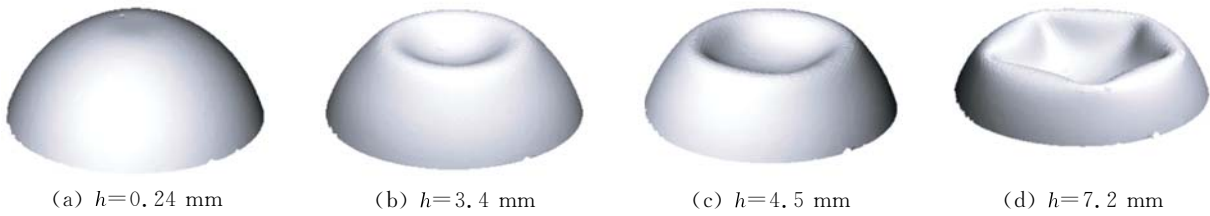


图 9 不同压缩位移下的乒乓球三维形貌

Fig. 9 3D surfaces of thin-walled sphere under different pressures

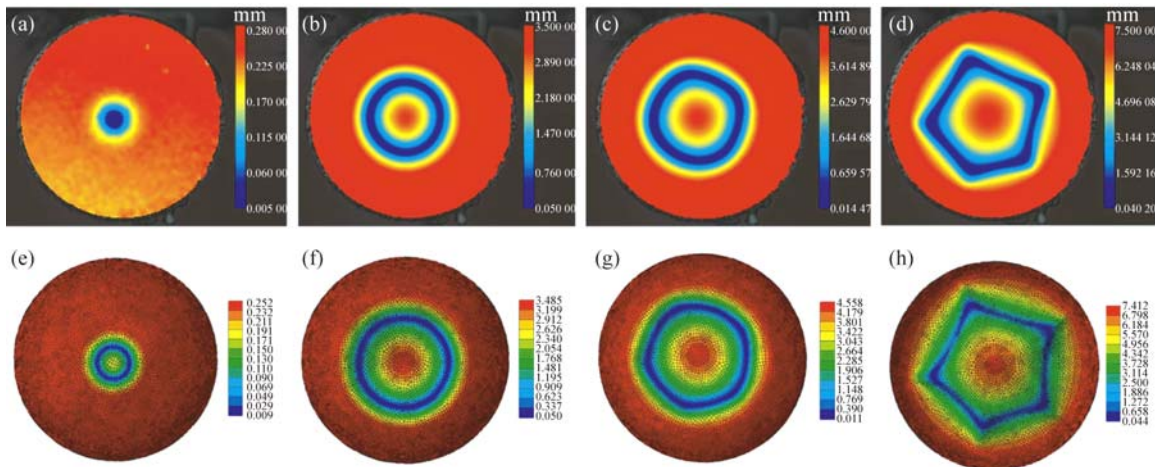


图 10 (a) (b) (c) (d) 由 3D-DIC 方法得到的变形分布; (e) (f) (g) (h) 由数值模拟得到的变形分布

Fig. 10 (a) (b) (c) (d) Deformation patterns from 3D-DIC method; (e) (f) (g) (h) Deformation patterns from numerical method

图 10(e)、(f)、(g)、(h) 是对应图 10(a)、(b)、(c)、(d) 的由数值模拟得到的变形分布图, 图 11 是实验(黑色)和模拟(红色)得到的力-位移曲线图(彩图见期刊电子版)。对比实验和模拟结果可知, 总体上二者非常吻合; 但当压缩位移很小时,

实验和数值模拟结果有较大偏差, 导致这种不一致的主要原因是: 当变形很小时, 力也很小, 此时实验中的小球并不稳定, 与玻璃板之间有一定的滑动。由 3D-DIC 方法直观得到的 3 个不同变形阶段可对应到实验得到的力-位移曲线中的第 I、II、III

区间。由图 11 可知,不同区间的力-位移关系均近似线性关系,第一和第二阶段之间有一个明显的拐点,而第二和第三阶段没有明显的突变。从 3D-DIC 得到的结果可知,第二阶段到第三个阶段是一个逐步形成的过程。

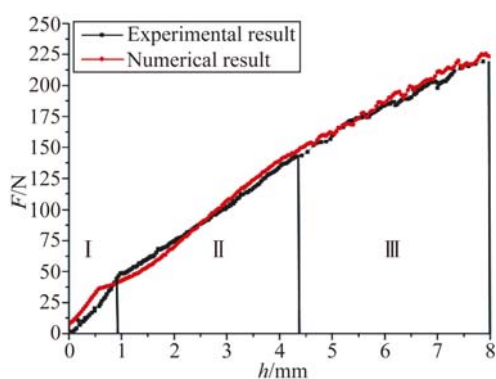


图 11 力-位移曲线

Fig. 11 Force-displacement curves

参考文献:

- [1] LECKIE F A, PENNY P K. *Instability of a Spherical Shell*[M]. London:Cambridge University Press, 1968.
- [2] MORRIS A J, CALLADINE C R. The local strength of thin spherical shell loaded radially through a rigid boss[C]. *Proceedings of the First International Conference on Pressure Vessel Technology*, Berman: ASME, 1969:35-44.
- [3] UPDIKE D P. On the large deformation of a rigid plastic spherical shell compressed by a rigid plates [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1972, 94(3):949-955.
- [4] GUPTA N K, PRASAD G L E, GUPTA S K. Axial compression of metallic spherical shells between rigid plates[J]. *Thin-walled Structures*, 1999, 34(1):21-41.
- [5] GUPTA N K. Experimental and numerical studies of dynamic axial compression of thin walled spherical shells[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(8):1225-1240.
- [6] GUPTA N K, MOHAMED S N, VELMURUGAN R. Experimental and theoretical studies on buckling of thin spherical shells under axial loads[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(3):422-432.

6 结 论

本文建立了非接触的光学测量实验系统,并对薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形及失稳过程进行了实验研究。采用玻璃板作为刚性平面解决了薄壁球壳接触表面不可见的问题,通过实验证明,应用 3D-DIC 技术对乒乓球半径的测量精度可达 0.5%。应用 3D-DIC 技术直观地显示了薄壁球壳受刚性平面压缩变形从压平阶段到轴对称屈曲阶段,进而演化到非轴对称屈曲阶段的全过程。数值模拟结果与实验结果基本吻合,只有在位移很小时,球和刚性板间存在滑动,导致两者偏差较大。实验结果表明,本文所建立的测试方法直观、可靠,是研究薄壁球壳大变形时屈曲力学行为一种有效的测量手段。

- [7] RUAN H H, GAO Z Y, YU T X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, 48: 117-133.
- [8] GAO Z Y, YU T X, KARAGIOZOVA D. Finite element simulations on the mechanical properties of MHS materials[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2007, 23(1):65-75.
- [9] DONG X L, GAO Z Y, YU T X. Dynamic crushing of thin-walled spheres: An experimental study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8):717-726.
- [10] 吴承伟,张鹏程,周平. 薄壁球壳超轻质结构力学行为研究[J]. *大连理工大学学报*, 2008, 48(5): 625-630.
WU CH W, ZHANG P CH, ZHOU P. Research on mechanical behavior of super-lightweight structure made of thin-walled spheres[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2008, 48(5): 625-630. (in Chinese)
- [11] 余为,辛美娟,李慧剑. 薄壁金属空心球结构压缩力学性能研究[J]. *实验力学*, 2012, 27(3): 377-384.
YU W, XIN M J, LI H J. Study of mechanical properties of thin-walled MHSS under compression [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(3):377-384. (in Chinese)

- [12] 余为,李慧剑,梁希,等. 金属半球壳压缩力学性能实验和模拟研究[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 260-271.
YU W, LI H J, LIANG X, *et al.*. Numerical and experimental studies on the compressive mechanical properties of metallic hemisphere shells[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(11):260-271. (in Chinese)
- [13] 路国运,管文博,杨会伟,等. 半球壳准静态压缩下的变形行为研究[J]. 高压物理学报, 2014, 28(2):137-144.
LU G Y, GUAN W B, YANG H W, *et al.*. Deformation mode of hemispherical shell under static load[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(2):137-144.
- [14] 潘兵,谢惠民,李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6):556-567.
PAN B, XIE H M, LI Y J. 3D-DIC for object surface and deformation measurement[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(6):556-567. (in Chinese)
- [15] 唐正宗,梁晋,肖振中. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10):2244-2253.
TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2244-2253. (in Chinese)
- [16] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):1636-1644.
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Measurement of full-field deformations in metal sheet welding processes by image correlation method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1636-1644. (in Chinese)
- [17] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 显微立体视觉小尺度测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):1985-1994.
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Calibration of stereo microscope measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):1985-1994. (in Chinese)
- [18] TSAI, R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *Robotics & Automation IEEE Journal*, 1987(3): 323-344.
- [19] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV*, 1999, 1: 666-673.
- [20] LI R, LI H, ZOU W, *et al.*. Quantitative photogrammetric analysis of digital underwater video imagery[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1997, 22(2):364-375.

作者简介:



戴美玲(1986—),女,江苏泰兴人,博士,2009年于安徽理工大学获得学士学位,2014年于东南大学获得博士学位,2012年6月至2013年7月于新加坡科技与设计大学机械系担任 Research Assistant,主要从事光测实验力学与图像处理的研究。E-mail: meiling-dai@163.com

通讯作者:



何小元(1956—),男,江苏泰兴人,博士,教授,博士生导师,1994年于西南交通大学获得固体力学博士学位,主要从事工程结构变形监测、微电子器件力学行为研究以及工业在线检测等方面的研究。E-mail:mmhxy@seu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)