

皮蛋抗压试验及弹性模量和泊松比的测定

梅志敏 王树才 张融

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 针对皮蛋外形为非标准椭球,难以采用定义方法求其弹性模量的问题,采用美国 ASABE 提出的弹性模量(E)求解方法和泊松比(μ)测定方法,阐述皮蛋的球度、外观尺寸、曲率半径等基本物理量的求解和系数 λ 与 $\cos \alpha$ 的数学关系计算原理,利用 TMS-PRO 食品物性分析仪和小位移传感器为主要测量仪器分别对皮蛋横向和纵向进行压缩试验,获得其不同方向的应力应变曲线,分析计算得出皮蛋抗载弹性模量:中间受压为 3.204 MPa,两端受压为 3.666 MPa;泊松比:中间受压为 0.155 4,两端受压为 0.383 0。

关键词 皮蛋; 抗压特性; 弹性模量; 泊松比

中图分类号 O 242;S 183 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)03-0130-04

皮蛋在生产、流通等环节的破损率高达 11%~14%,其中鸭蛋产出时破损率只 2%~3%,清洗、包装、加工、装卸、运输等环节造成的破损率占 9%~11%^[1-2]。破损的皮蛋全部或部分失去其经济价值,同时还会污染其他皮蛋,加快皮蛋的腐败变质。为减少皮蛋破损,需对皮蛋进行抗压测定,确定皮蛋壳强度,分析受载力学特性,学者们在研究影响禽蛋破损关键物理参数的基础上进行了许多探讨^[3-9]。姜松等^[10]对鸡蛋的表现接触弹性模量进行了初步测定,但试验结果有较大局限性。本试验通过皮蛋力学试验,得出其抗载特性,利用物理特征、力学参数和农产品相关标准求解皮蛋的弹性模量和泊松比,旨在为探索皮蛋减损措施和设计相关加工设备提供科学依据。

1 试验原理

皮蛋为不规则椭球形外观的农产品,不能准确计算出其受载过程中施力面与受力面的接触面积,故不能采用传统求解材料弹性模量的方法(即应力与应变的比值)。本试验采用美国农业和生物工程协会(ASABE)提出的农产品凸面形状的弹性模量计算标准^[11],其计算公式为

$$E = \frac{0.338F(1-\mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}} \left[\lambda_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} \right)^{\frac{1}{3}} + \lambda_2 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中 E 为弹性模量,MPa; F 为加载力,N; D 为变形量,mm; μ 为泊松比,无量纲; R_1 、 R'_1 和 R_2 、 R'_2 为受载时各接触面的上、下表面的曲率半径,mm; λ_1 和 λ_2 为比例系数,与中间常数 $\cos \alpha$ 有关,无量纲。

$$\cos \alpha = \frac{\left| \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right|}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2} \right)} \quad (2)$$

皮蛋在受载过程中,比例极限内的横向应变与纵向应变之比为泊松比^[12],其计算公式为

$$\mu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = \frac{\Delta S_x / S_x}{\Delta S_y / S_y} \quad (3)$$

式中 μ 为泊松比,无量纲; ϵ_x 和 ϵ_y 为横、纵向的应变,无量纲; ΔS_x 和 ΔS_y 为皮蛋横、纵方向上的变形量,mm; S_x 和 S_y 为皮蛋横、纵方向上的原长,mm。

2 材料与方法

2.1 供试材料

测定皮蛋共 60 枚,采自湖北神丹健康食品有限公司,是由鲜鸭蛋用铜锌混合法加工制成^[13],出厂时间为试验前 30 d,置于 20 °C 恒温保存。为减少皮蛋大小不同引起的随机误差,测定时选取质量 50~55 g、壳厚 0.40~0.45 mm、长轴 59.5~60.5 mm、短轴 44.5~45.5 mm 的皮蛋为样品。

2.2 主要设备与仪器

试验用美国 FTC 公司的 TMS-PRO 食品物性分析仪(图 1),载荷为 0~1 000 N,精度±1%;台州市椒江西域电子公司的小位移传感器,量程为 5 mm,精度 0.2%;南京国睿安泰信科技有限公司的 ADS1000 示波器,实时样率为 500 Ms/s,带宽为 25~100 MHz;位移传感器所供电源为直流稳压电源,电压为 12 V。试验过程可由微机和示波器完成力与位移的数据采集。

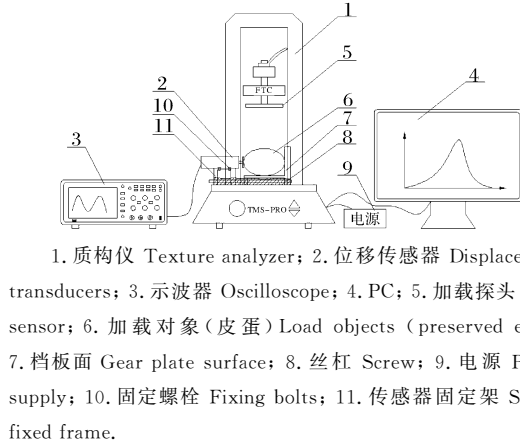


图 1 皮蛋压缩试验台
Fig.1 Preserved egg compression test bench

2.3 测定方法

1)皮蛋球度。球度计算公式为^[14]

$$S_p = di/dc \tag{4}$$

式中 di 为球体最大投影面积图形的最大内接圆直径,mm; dc 为球体最小外接圆直径,mm。

2)皮蛋外观尺寸。皮蛋为非标准椭圆(图 2),其中 B, L 分别为皮蛋在短轴方向最高点处横、纵坐标,半径为 ρ 的圆为皮蛋表面上任一点 M 处的曲率圆, τ 为该点的方向角^[10]; 外轮廓曲线如式(5)所示,式中 a, b 分别为长半轴、短半轴尺寸, θ 为蛋形角。

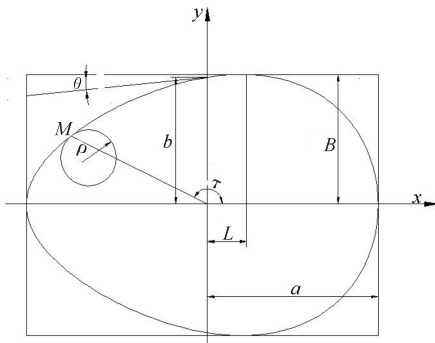


图 2 皮蛋外观尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of preserved egg appearance size

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(b+x \operatorname{tg} \theta)^2} = 1 \tag{5}$$

式(5)可用三角函数表示为

$$\begin{cases} x = a \cos(\tau) \\ y = b \sin(\tau) + a \operatorname{tg}(\theta) \cos(\tau) \sin(\tau) \end{cases} \tag{6}$$

其一阶、二阶导函数可表示为

$$y' = \frac{dy}{dx} = \frac{dy/d\tau}{dx/d\tau} \tag{7}$$

$$y'' = d\left(\frac{dy}{dx}\right)/dx = d\left(\frac{dy/d\tau}{dx/d\tau}\right)/(dx/d\tau) \tag{8}$$

曲线上任一点的曲率为^[15]

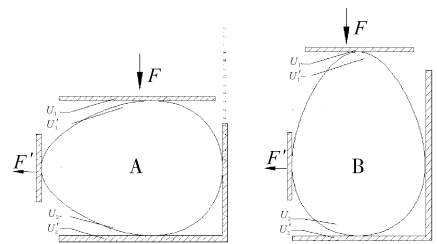
$$k = \left| \frac{y''}{(1+(y')^2)^{\frac{3}{2}}} \right| \tag{9}$$

故可求曲线上该点的曲率半径为

$$\rho = 1/k \tag{10}$$

3)皮蛋曲率半径计算。皮蛋表面任一点的曲率圆及其半径如图 2 所示,本试验采用 Matlab 进行辅助计算^[16],结果见表 4。

4)皮蛋加载方法。纵向方向上,压缩试验采用刚性平板压缩方式,皮蛋下底面固定;设压力值 0~100 N,目标位移 1 mm;上压板进程、压缩中、回程速率分别为 30、5、30 mm/min;破裂百分比为 15%。横向方向上,通过调节丝杠确保位移传感器探头平面与皮蛋表面刚好接触,Y-T 模式下,使 Y 分度值为 500 mV,T 分度值为 1 s。皮蛋随机分为 2 组,分别进行垂直和水平方向压缩试验(图 3)^[17]。



A. 中间受压 Compression of the middle; B. 两端受压 Compression of both ends.

图 3 皮蛋加载示意图

Fig.3 Loading diagram of preserved egg

4)位移传感器标定。皮蛋横向位移的变化经位移传感器探头输入,经过 A/D 转换(内置)为等比例的电压信号输出,故需对位移传感器进行标定^[18]。

5)试验参数采集。试验前,先粗调试台上用于联接位移传感器和皮蛋固定架的丝杠,使位移传感器的探头紧贴皮蛋表面,再细调丝杠,通过观察示波器上 Y 轴电压值是否为零(分度值 100 mV),直至探头刚好接触皮蛋表面且示波器上电压值为零。

开始试验,运行质构仪中的程序。通过示波器自带的 USB 数据和图像存储功能,保存、记录皮蛋因受压而引起横向位移变化转化为电压值随时间的变化过程(图 5);通过 PC 记录皮蛋纵向方向上力与位移的变化过程(图 6)。

6) K 与 R 的数学关系。式(1)中的 λ 为中间常数,与 R 及 $\cos \alpha$ 有关, λ 与 $\cos \alpha$ 的数学关系可通过拟合出的二次线性关系式求解^[17]。

$$\lambda = -0.429 \cos^2 \alpha + 0.045 \cos \alpha + 1.3491 \quad (11)$$

式(11)方程的决定系数 $R^2 = 0.9988$,表明方程拟合性良好,故可以采用。

3 结果与分析

3.1 横向方向的位移变化

受压过程中,皮蛋横向位移的变化等比例转化为电压信号的变化,显示在示波器操作面板上,峰值电压对应为皮蛋破裂时的横向位移(图 5)。由图 5 可知,皮蛋在中间受压时的位移变化大于在两端受压时的位移变化。

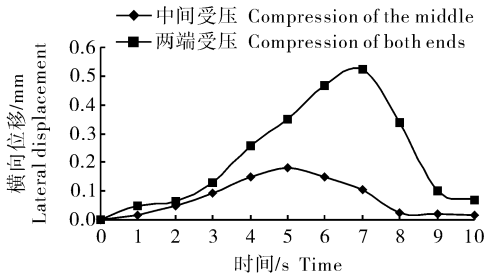


图 5 横向位移随时间的变化过程

Fig. 5 The changing process of lateral displacement by time

表 1 皮蛋压缩力学参数

Table 1 Preserved egg compression mechanical parameters

加载方向 Loading direction	破裂力/N Rupture force	横向变形/mm Lateral deformation	纵向变形/mm Longitudinal deformation	弹性模量/MPa Elasticity modulus	泊松比 Poisson's ration
两端 Both ends	42.08	0.5253	0.9906	3.666	0.3830
中间 Medium	15.59	0.2149	0.9921	3.204	0.1554

表 2 皮蛋外观主要参数

Table 2 Preserved egg three-dimensional size and radius of curvature

类型 Style	球度 Sphericity	长轴 Long axis	短轴 Short axis	尖端 Cusp	赤道 Equator	钝端 Blunt end
均值 Mean	0.748	60.02	45.03	9.815	41.875	∞
标准差 Standard deviation	0.025	0.147	0.110	0.102	0.268	—

4 讨论

本试验对皮蛋的抗压特性进行了观察,分析了其物理破损机理,试验结果可为探寻禽蛋减损措施提供参考,从而进一步优化蛋品加工设备的性能;

3.2 纵向方向上力与位移的变化

受压过程中,皮蛋纵向力与位移在变化时,曲线顶点的横、纵坐标即为皮蛋的纵向方向上的破裂力与变形量(图 6)。由图 6 可知,皮蛋在两端受压时的破裂力大于在中间受压时的破裂力。

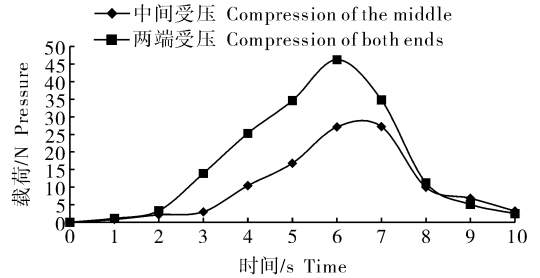


图 6 皮蛋受载特性的力-位移变化关系

Fig. 7 Preserved eggs by load characteristic changes in force-displacement diagram

3.3 皮蛋弹性模量、泊松比和主要外观参数

根据皮蛋在 2 种受载情况下的力与位移变化,由式(1)和式(3)可计算出皮蛋在弹性极限内的弹性模量和泊松比(表 1,表 2)。

经相关软件对试验参数进行分析可知,本重复试验测得皮蛋的抗压特性表现:两端受压时,皮蛋壳破裂力平均值为 42.08 N,标准差 9.928 N;弹性模量为 3.666 MPa,标准差 1.010 MPa;泊松比为 0.3830,标准差 0.08607。中间受压时,皮蛋壳破裂力平均值为 15.59 N,标准差 2.269 N;弹性模量为 3.204 MPa,标准差 0.4630 MPa;泊松比为 0.1554,标准差 0.006195。

弹性模量和泊松比的测定,可为更深入研究禽蛋的抗压特性(如有限元、离散元分析等)提供理论依据,降低理论分析与实际表征间的误差。

试验结果表明:皮蛋两端抗压特性各异,两端抗压强度明显大于中间抗压强度,与其他禽蛋力学性

能一致,但腌制后的皮蛋破裂力小于腌制前鸭蛋的破裂力,因此,为减小皮蛋破损,在加工及流通环节应使皮蛋两端垂直于放置面;皮蛋的弹性模量和泊松比符合各向异性材料特点,主要原因之一是皮蛋壳为多层、多孔结构,因此,在分析皮蛋材料性能时,应在方向上区别开来。本试验只是对整蛋进行了力学分析,在此研究基础上,对皮蛋内部各结构(蛋壳、蛋清和蛋黄)的物理性能和力学特性等均有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 任奕林,王树才,丁幼春,等. 鸡蛋壳生物力学特性分析及试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 145-149.
- [2] 王育桥. 鸡蛋外壳静力学特性有限元分析及试验研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 107-111.
- [3] 刘龙. 皮蛋溏心和蛋壳裂纹检测技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2012.
- [4] 张益鹏,王树才,王石泉. 鸭蛋蛋壳传质特性研究[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(2): 123-127.
- [5] ALTUNTAS E, SEKEROGLU A. Effect of egg shape index on mechanical properties of chicken eggs [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(4): 606-612.
- [6] ALTUNTAS E, SEKEROGLU A. Mechanical behavior and physical properties of chicken egg as affected by different egg weights [J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33(1): 115-127.
- [7] 任奕林. 基于外形特征的鸡蛋生物力学特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2007.
- [8] ENTWISTLE K M, SILYN-ROBERTS H, ABUODHA S O. The relative fracture strengths of the inner and outer surfaces of the eggshell of the domestic fowl [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 1995, 262(1364): 169-174.
- [9] 张凯. 鸭蛋壳的力学特性及多孔超微结构的渗透特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2012.
- [10] 姜松, 崔志平, 李健康, 等. 鸡蛋表面接触弹性模量的测定[J]. 江苏农业科学, 2006(6): 325-326.
- [11] ASAE. Compression test of food materials of convex shapes [S]. St Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2012.
- [12] 单桂芳, 杨伟, 冯建民, 等. 材料泊松比测试方法的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(3): 15-20.
- [13] 蒲跃进, 杜金平, 梁振华, 等. 新型无铜皮蛋生产工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(17): 7659-7661.
- [14] 李云飞, 殷涌光, 徐树来, 等. 食品物性学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- [15] 同济大学数学教研室. 高等数学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [16] 德丰. Matlab 数值分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [17] 姜松, 崔志平, 李健康, 等. 不同加载方式下的鸡蛋静力学特性和有限元分析[J]. 食品科学, 2009(11): 90-93.
- [18] 宋小奇, 何伟铭. 高精密度位移传感器标定技术的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2013(7): 1-4.

Compression test and elastic modulus and Poisson's ratio of preserved egg

MEI Zhi-min WANG Shu-cai ZHANG Rong

College of Engineering, Huazhong Agricultural of University, Wuhan 430070, China

Abstract In view of the non-standard ellipsoidal shape of the preserved eggs, it is difficult to adopt the defining methods to determine the elastic modulus. This research adopts the elastic modulus (E) proposed by ASABE solving method and Poisson's ratio (μ) determination method to describe the calculation principle based on the mathematical relation between the coefficient λ of the basic physical quantities of the preserved egg such as the sphericity, appearance of size, curvature radius and cosine theta. TMS-PRO food property analyzer and small displacement transducer are used as the main measuring instruments to carry out transverse and longitudinal compression experiments on the preserved egg respectively to obtain the stress strain curve of different directions. The load-resistance elastic module of the preserved egg is as follows: the intermediate pressure is 3.204 MPa, and the pressure on both ends is 3.666 MPa; Poisson's ratio: the intermediate pressure is 0.155 4, and the pressure on both ends is 0.383 0.

Key words preserved egg; resistance load characteristic; elastic modulus; Poisson's ratio