

鸡蛋品质特性的有限元分析方法

刘斌, 吴雪, 张媛

(北京工商大学, 北京 100048)

摘要: **目的** 研究鸡蛋品质物性参数与结构动力学响应特征参数间的关联特性, 构建鸡蛋品质检测的动力学相关性模型。**方法** 以敲击响应检测技术为基础, 引入结构动力学分析方法, 应用有限元仿真技术定量分析鸡蛋品质物性参数(蛋形参数、蛋壳厚度、蛋壳刚度、蛋液密度)与其一阶共振频率间的对应变化规律, 获取鸡蛋品质相关的动力学特征参数。**结果** 鸡蛋品质物性参数中蛋形参数、蛋壳厚度、蛋壳刚度、蛋液密度与其结构一阶共振频率关联性显著; 蛋壳厚度与蛋体结构一阶共振频率间符合较好的线性规律。相较而言, 蛋壳密度、气室高度对结构一阶共振频率的影响较小。**结论** 鸡蛋品质特性相关参数(蛋形参数、蛋壳厚度、蛋壳密度和蛋液密度)与其结构动力学响应特性具有较强的关联性。

关键词: 鸡蛋品质; 结构动力学; 有限元; 敲击响应检测

中图分类号: TS253.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0104-06

Finite Element Approach for Egg Quality Characteristics

LIU Bin, WU Xue, ZHANG Yuan

(Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: The work aims to study the correlation between the parameters of egg quality and the dynamic behavior of egg, and establish dynamic response model for the detection of egg quality. Base on the knock response detection technology, structural dynamics method and finite element simulation technology were used to quantitatively analyze the relationship between the resonance frequency of whole egg and the physical property parameters of egg quality (shape index, shell thickness, shell stiffness and egg density). The egg dynamic characteristic parameters were obtained. It was shown that the egg quality parameters in shape index, shell thickness, shell stiffness and egg density were greatly related with the resonance frequency of whole egg. The relation of the first order resonant frequency of whole egg and the eggshell thickness was approximately linear. In contrast, the eggshell density and the air chamber height did not have much influence on its first order resonance frequency. In conclusion, there is a close correlation between the egg quality parameters (such as shape index, shell thickness, shell density and egg density) and the structural dynamic response of whole egg.

KEY WORDS: egg quality; dynamic mechanical behavior; finite element; detection of knock response

鸡蛋品质包括内容物品质(蛋黄颜色、血斑、肉斑、蛋白高度、蛋白 pH 值和哈夫指数等)及外观物理品质(蛋形、蛋重、全蛋密度、蛋形指数、

蛋壳厚度和表面裂纹等)^[1]。鸡蛋品质检测是生产和包装环节中蛋品分级的重要依据。

在蛋品新鲜度检测方面, 刘燕德等^[1]利用光谱

收稿日期: 2016-03-29

基金项目: 北京市教委科研计划(SQKM201610011002)

作者简介: 刘斌(1974—), 男, 江苏淮安人, 博士, 北京工商大学副教授, 主要研究方向为噪声与振动检测。

快速检测技术,构建了鸡蛋品质相关参数与存储时间的光谱模型,获得了较好的准确性和预测能力。林颢等^[2]将近红外光谱技术进行鸡蛋新鲜度的识别,取得了高达 80% 的识别率。李剑锋等^[3]应用近红外光谱检测技术进行了鸡蛋新鲜度的相关性分析,结果有效可行。王巧华等^[4]研究了鸡蛋透射光图像形态特征与新鲜度的相关关系,建立其形态特征与新鲜度的关系模型,实现了快速无损检测。在蛋品外观物理品质检测方面,国内许多研究者^[5-7]结合静力学理论,研究了鸡蛋品质相关的静力学特性。De Ketelaere B 等^[8]采用静力学测试方法测量 6 种不同品种鸡蛋蛋壳的强度特性并进行了相应的比较分析。Coucke P^[9-10]采用试验模态分析方法获得了蛋体结构动力学,如:一阶模态频率、模态振型、模态阻尼等,并将动力学特性分析结果应用于鸡蛋裂纹检测中。吴雪^[11]应用声振检测技术进行了蛋体裂纹检测,结果可靠有效。

已有的鸡蛋品质特性研究包括外观物理品质检测和内部品质检测两部分。已有检测方法有一定的局限性:光谱、图像检测方法需要额外的光源照射,检测精度取决于硬件分辨率、识别模型算法选择、环境动态影响等因素;线弹性静力学无法准确描述实际生产中鸡蛋所受动态外载荷,蛋体内容物对于鸡蛋结构力学特性的影响也不容忽视;外观物理品质检测与内部品质检测相互独立,较难实现两类品质特性的单次检测。该研究将蛋体视为固-液耦合力学对象,采用结构动力学有限元分析方法,充分考虑蛋体的固-液耦合特性,分析鸡蛋结构动力学频率响应特性,进行相关试验验证。通过对鸡蛋品质物性参数与其一阶共振频率变化的定量分析,获取鸡蛋品质相关的动力学特征参数,为鸡蛋品质分析、检测、包装提供相关的机理分析和借鉴参考。

1 鸡蛋动力学特性分析的基本理论模型

1.1 蛋体构成

根据鸡蛋构成,可进行如下假设:蛋体由蛋壳、气室、蛋液(蛋白和蛋黄)三部分构成,见图 1;鸡蛋壳为均质连续壳体,各向同性;蛋体气室构成空气;蛋液可视为均质连续流体;蛋体几何形状可视为有半球体和半椭球体构成的轴对称形体, D 为鸡蛋大、小头纵轴长度, r 为鸡蛋短轴方向半径,

h 为鸡蛋气室高度,见图 1。

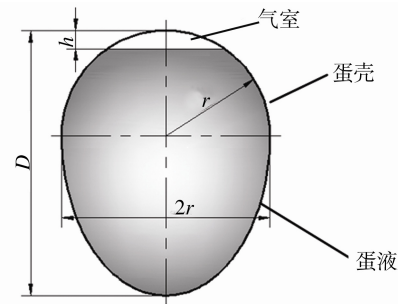


图 1 蛋体模型

Fig.1 Physics model of egg

1.2 流-固耦合模型

蛋液为均质流体,可视为无粘、可压缩和小扰动,蛋壳为线弹性固体材料。流固耦合模型(见图 1)包含流体域 V_f (气室、蛋液部分)、固体域 V_s (蛋壳部分)和流固耦合交界面 S_i (蛋壳内表面)等部分。应用流固耦合方法中的声固耦合法,可以获得流体域的声介模型动力学方程^[12]:

$$[M_F]\{\ddot{P}\} + [K_F]\{P\} = -\{R_F\} \quad (1)$$

式中: $\{P\}$ 为流体单元动压力向量; $[M_F]$, $[K_F]$ 为流体单元的质量矩阵和刚度矩阵; $\{R_F\}$ 为耦合边界处流体单元的等效外载荷向量。

考虑流体压力 $\{R_S\}$ 后,蛋壳结构的无阻尼结构单元动力学方程为:

$$[M_S]\{\ddot{X}\} + [K_S]\{X\} = \{R\} + \{R_S\} \quad (2)$$

式中: $\{X\}$ 为结构单元位移向量; $[M_S]$, $[K_S]$ 为结构单元的质量矩阵和刚度矩阵; $\{R\}$ 为结构外载荷; $\{R_S\}$ 为耦合界面处结构单元的等效外载荷向量。

流固耦合作用一方面体现在式(1)中 $\{R_F\}$ 项,表示耦合边界处的流体节点与结构节点具有相同的法向速度,以确保流体域结构紧密贴合。利用向量换算关系,可得:

$$\{R_F\} = \rho \int_S N \bar{N} \ddot{X} dS = \rho [S] \{\ddot{X}\} \quad (3)$$

式中: $[S] = \int_S N \bar{N} dS$; N 为离散化的结构形函数矩阵; S 为流固耦合边界表面,注意流体域的边界向量与结构域的边界向量方向相反。

流固耦合作用一方面体现在式(2)中 $\{R_S\}$ 项,即流体作用于结构表面上的压力载荷。参考式(3),可得:

$$\{R_s\} = \int_s [\bar{N}]^T P_c dS = [S]^T \{P\} \quad (4)$$

综合式(1)~(4), 可得流固耦合离散方程:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho S & M_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -S^T \\ 0 & K_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

为了求解该流固耦合模型的动力学特性, 不考虑结构的外载荷, 式(5)进一步简化, 即得标准方程形式:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho S & M_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -S^T \\ 0 & K_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ P \end{Bmatrix} = 0 \quad (6)$$

对式(6)进行求解, 即可得到流固耦合模态特征参数。

2 鸡蛋动力学特性的有限元分析

2.1 蛋体有限元描述

取 $r=23$ mm, $D=58$ mm, 蛋壳厚度尺寸为 0.38 mm。蛋壳材料特性参数: 弹性模量 E 为 3×10^{10} N/m², 泊松比 λ 为 0.307, 材料密度为 ρ 为 2400 kg/m³, 气室高度 h 为 4 mm。空气的声学特性参数: 空气密度为 1.25 kg/m³, 声速为 340 m/s。蛋液声学特性参数: 蛋液密度为 997 kg/m³, 声速为 1500 m/s^[13]。

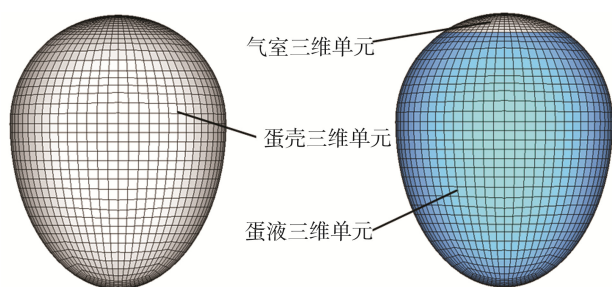


图2 蛋壳及蛋体内容物有限元网格

Fig.2 FE mesh of the eggshell and its content

蛋体的有限元模型由蛋壳有限元网格、气室和蛋液的声学有限元网格等部分构成, 见图2。其中蛋壳有限元单元为二维壳单元, 网格数量为 2816。气室有限元单元和蛋液有限元单元均为六面体单元, 气室网格体单元数量为 6720, 蛋液网格体单元数量为 22 208。单元最大尺寸为 2.73 mm, 根据声耦合计算要求, 其最高上限频率为 21 250 Hz, 已有研究表明鸡蛋的一阶自由模态频率范围为 3000 ~ 6000 Hz^[9-15], 有限元分网尺寸满足频率精度的计算要求。

2.2 蛋体有限元分析及试验验证

考察鸡蛋壳体的单独模态分析, 其结构振动模态的一阶频率为 13 205 Hz, 远大于鸡蛋整体模态的试验结果参考值, 故不予采用蛋壳的仿真结果。采用流-固耦合分析, 充分考虑了蛋液、气室的质量参与, 同时兼顾了固液边界的耦合作用, 可获得的蛋体一阶模态为 4210 Hz, 结果与相关试验参考值较为接近。蛋体一阶模态频率及振型见图3, 其中 z 轴为蛋体长轴 D , x, y 轴为蛋体短轴 $2r$ 。一阶振型表现为蛋体钝端与尖端的振动量最小, 两端向赤道方向振动量逐渐增大, 在蛋体赤道位置附近振动量达到最大, 且最大振动量 (沿 x 轴方向扩张, 沿 y 轴方向压缩) 位于赤道中心轴方向的 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 位置处。

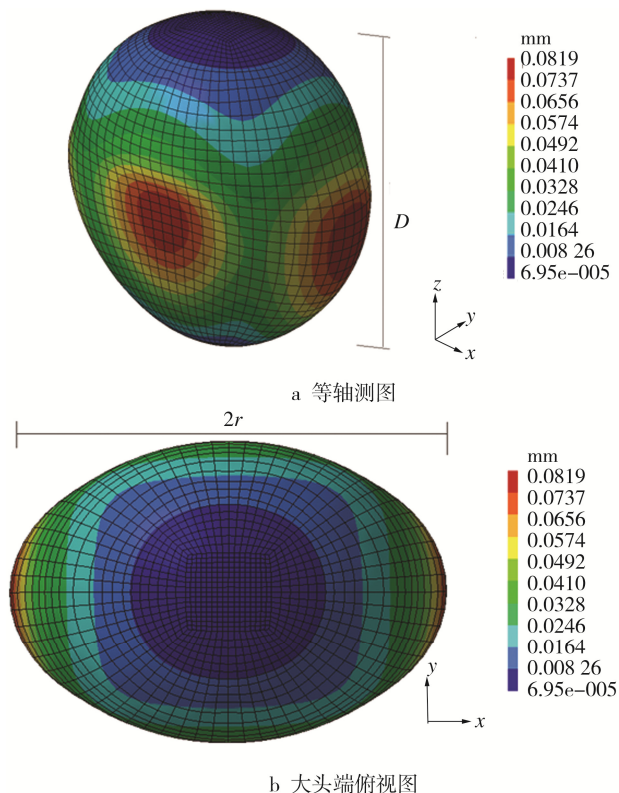


图3 蛋体一阶模态振型图

Fig.3 Isometric view and top view of the mode shape of 1st mode

为了验证有限元分析结果的有效性, 应用锤击法对鸡蛋模态进行了测试, 测试的鸡蛋在蛋形及相应结构参数尽量接近有限元模型。实验模态的一阶模态频率为 4403 Hz, 模态振型见图4, 实验模态分析时构建的坐标方向与仿真分析坐标保持一致, 即 z 轴为蛋体长轴 D , x, y 轴为蛋体短轴 $2r$ 。由于

受鸡蛋结构形状、物性参数和模型非线性等影响，试验结果略高于有限元分析结果，相对误差小于 5%。实验振型图结果与有限元结果基本吻合，鸡蛋的一阶模态为类似球体的呼吸模态，表现为蛋体沿短轴（赤道）方向的压缩和扩张运动，即 x 方向压缩， y 方向扩张（或 y 方向压缩， x 方向扩张），纵轴钝端与尖端的振动量最小。

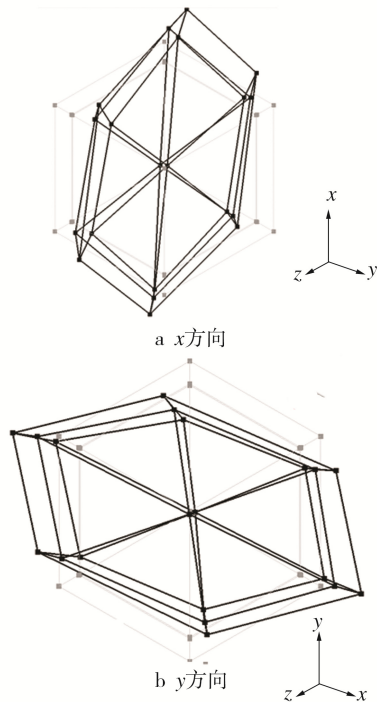


图 4 蛋体一阶试验模态振型图
Fig.4 Top view of the 1st experimental mode shape

3 结果与分析

3.1 蛋体动力学特性的形状影响因素

以鸡蛋品质特性参数中的蛋形参数、蛋体气室高度、蛋壳厚度作为自变量，研究蛋体一阶模态频率（RF）的变化趋势与规律。

蛋形参数 S 为蛋体结构的大小（根据仿真计算要求所设定），用于考察蛋体几何尺寸变化对蛋体一阶共振频率的影响。取蛋壳厚度 $d=0.35\text{ mm}$ ，蛋形参数 S 对应的蛋体几何尺寸及蛋体质量见表 1。

不同蛋形参数的蛋体一阶共振频率随蛋壳厚度的变化规律见图 5。图 5 表明蛋体一阶共振频率值随蛋壳厚度增加而增大，随蛋形参数的减小而显著增大。蛋壳厚度增加能够提高蛋体强度，直接导致蛋体共振频率增大，并且影响效果显著，蛋壳增厚 0.05 mm ，其共振频率增大 300 Hz 左右。蛋形

表 1 蛋形参数及其质量
Tab.1 Geometric parameters of egg shape & egg quality

蛋形参数 S	蛋体短轴最大半径 r/mm	蛋体纵径长度 D/mm	蛋体质量 m/g
0.9	20.7	52.2	49.003
1	23	58	66.801
1.1	25.3	63.8	88.457
1.2	27.6	69.6	114.346

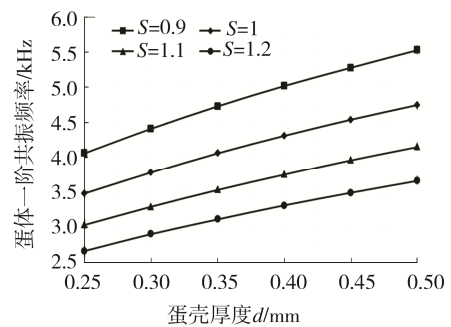


图 5 不同蛋形参数蛋体一阶共振频率随蛋壳厚度的变化规律
Fig.5 RF for different thickness of the eggshell in different egg shape

参数的变化会直接导致蛋体质量的增减，表 1 中可以看出当蛋形参数每增大 10%，质量增大约 30%。

取蛋壳厚度 $d=0.35\text{ mm}$ ，根据不同蛋形时蛋体质量，获得蛋体一阶共振频率相对于其质量的回归曲线，见图 6。其中实线为不同蛋形参数 S 对应的质量对应的蛋体一阶共振频率，表现为随蛋体质量增大，蛋体一阶共振频率呈非线性减小趋势；虚线为回归关系曲线，一元线性回归的结果表明，蛋体质量与其一阶共振频率平方的倒数满足较好的线性关系，即 $m \propto 1/f^2$ 。

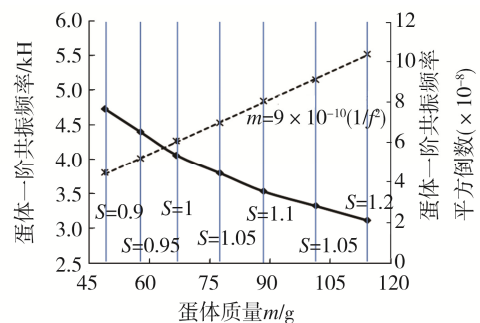


图 6 蛋体一阶共振频率相对于蛋质量的回归曲线
Fig.6 Regression of RF for different egg mass

不同气室高度的蛋体一阶共振频率值随蛋壳厚度的变化规律见图 7。图 7 表明，不同气室高度下，蛋壳厚度增加，蛋体强度增大，蛋体一阶共振

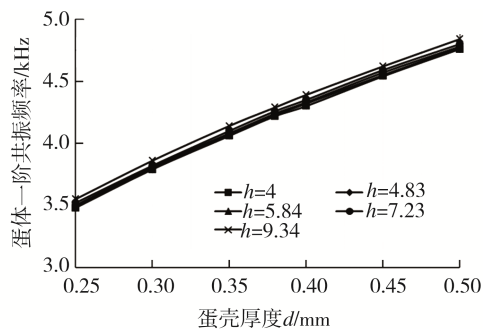


图7 不同气室高度下蛋体一阶共振频率随蛋壳厚度的变化规律

Fig.7 RF for different thickness of the eggshell in different air chamber height

频率随之增大,蛋壳厚度与一阶共振频率间仍能符合较好的线性规律;随气室高度的增大,蛋体一阶共振频率会略有增大。

取 $d=0.35$ mm, 获得蛋体一阶共振频率随气室高度变化的规律, 随气室高度增加, 蛋液所占体积比减小, 蛋体总质量下降, 则其一阶共振频率增大, 变化趋势呈线性规律。当气室高度增加 1 倍时, 蛋体总质量减小 5% 左右, 一阶共振频率仅增大 50 Hz 左右 (增大约 1.2%)。

3.2 蛋体动力学特性的材质物性影响因素

1) 蛋壳弹性模量。不同蛋壳厚度条件下, 蛋体一阶共振频率值与蛋壳弹性模量的变化规律曲线见图 8。蛋壳弹性模量增加会大大提高鸡蛋的整体刚度值, 其一阶共振频率随之增大。图 8 表明, 不同蛋壳厚度条件下, 蛋体一阶共振频率随蛋壳弹性模量的增大显著增加。固-液耦合效应的存在, 使得变化规律呈一定的非线性特征。

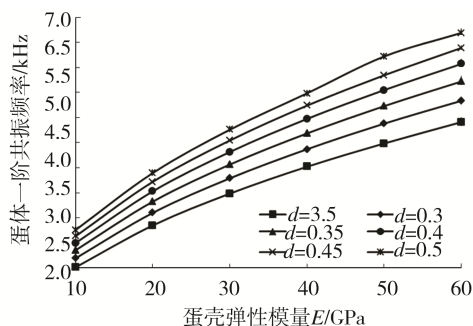


图8 蛋体一阶共振频率随蛋壳弹性模量的变化规律

Fig.8 RF for different thickness of the eggshell in different eggshell Young's modulus

2) 蛋壳密度。不同蛋壳厚度条件下, 蛋体一阶共振频率值与蛋壳密度的变化规律曲线见图 9。

图 9 表明, 不同蛋壳厚度条件下, 蛋体一阶共振频率随蛋壳密度的增大而有所降低, 呈线性变化趋势。蛋壳密度的增大使得蛋壳质量降低, 而蛋壳质量在总质量的占比较低, 约 10%~12%, 从而对其一阶共振频率的影响有限。即使蛋壳密度存在较大的变动 ($1800 \sim 2800 \text{ kg/m}^3$), 其一阶共振频率变化也很小 (小于 100 Hz)。

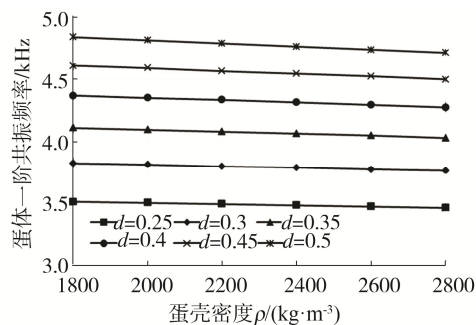


图9 蛋体一阶共振频率随蛋壳密度的变化规律

Fig.9 RF for different thickness of the eggshell in different eggshell densities

3) 蛋液密度。不同蛋壳厚度条件下, 蛋体一阶共振频率值与蛋液密度的变化规律曲线见图 10。图 10 表明, 蛋体一阶共振频率随蛋液密度的增大而显著降低, 固-液耦合效应的存在, 使得其变化呈非线性趋势。由于蛋液为蛋体总质量的主要构成, 占比很高, 约 88%~90%, 蛋液密度每增加 100 kg/m^3 , 总质量增大约 6 g。蛋液密度较低时 (600 kg/m^3), 蛋体一阶共振频率最大降低约 300 Hz。随蛋液密度增大, 蛋体一阶共振频率降低趋势减缓, 在蛋液密度为 1000 kg/m^3 时, 密度每增减 100 kg/m^3 , 蛋体一阶共振频率变化值约为 200 Hz; 蛋液密度较高时 (1300 kg/m^3), 蛋体一阶共振频率降低 130 Hz 左右。

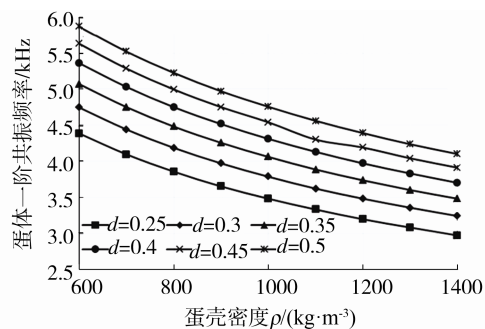


图10 蛋体一阶共振频率随蛋液密度的变化规律

Fig.10 RF for different thickness of the eggshell in different egg fluid densities

4 结语

将鸡蛋整体作为流固耦合模型对象,应用有限元分析方法获得蛋体一阶共振响应频率,结合模态试验进行了初步验证。以此为基础,建立了鸡蛋品质相关的几何结构参数、材质物性参数与蛋体一阶共振频率间的关联特性,并获得结论如下:

1) 蛋体几何结构参数中蛋形参数的影响主要表现在其质量的增减,从而影响其一阶共振频率的变化,利用回归分析可知,蛋形参数变化所引起的蛋体总质量变化与蛋体一阶共振频率间满足 $m \propto 1/f^2$ 。

2) 蛋体几何结构参数中蛋壳厚度变化会显著影响蛋体一阶共振频率,符合较好的线性规律,蛋壳每增厚 0.05 mm,其共振频率增大 300 Hz 左右;气室高度变化对蛋体一阶共振频率的影响较小。

3) 蛋品物性参数中,蛋壳弹性模量的增大能够有效提高蛋体刚度,蛋体一阶共振频率显著增加;蛋液密度的增大会使蛋体总质量,蛋体一阶共振频率显著降低。由于流固耦合特性的存在,蛋体一阶共振频率的变化表现为较明显的非线性特征。相比而言,蛋壳密度的变化对蛋体一阶共振频率的影响较小。

鸡蛋结构动力学仿真分析的结果表明,鸡蛋品质特性相关参数(如蛋形参数、蛋壳厚度、蛋壳密度和蛋液密度)与其结构动力学响应特性具有较强的关联性,对于鸡蛋包装、贮运环节中蛋品检测、分级有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] 刘燕德,周延睿,彭彦颖. 基于近红外漫反射光谱检测鸡蛋品质[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 40—45.
LIU Yan-de, ZHOU Yan-rui, PENG Yan-ying. Detection of Egg Quality by Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 40—45.
- [2] 林颢,赵杰文,陈全胜,等. 近红外光谱结合一类支持向量机算法检测鸡蛋的新鲜度[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 929—932.
LIN Hao, ZHAO Jie-wen, CHEN Quan-sheng, et al. Identification of Egg Freshness Using Near Infrared Spectroscopy and One Class Support Vector Machine Algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(4): 929—932.
- [3] 李剑锋. 基于近红外光谱漫反射技术检测鸡蛋新鲜度的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
LI Jian-feng. Research on Detection of Freshness of Eggs Using Near-infrared Diffuse Reflectance Tech-
- [4] nique[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2009.
王巧华,文友先,林雪冬,等. 鸡蛋透射光图像形态特征与其新鲜度的相关关系[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 179—183.
WANG Qiao-hua, WEN You-xian, LIN Xue-dong, et al. Correlation between Egg Freshness and Morphological Characteristics of Light Transmission Image of Eggs[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 179—183.
- [5] 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.
REN Yi-lin, WANG Shu-cai, DING You-chun, et al. Experimental Study on Egg Biomechanics Properties[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 145—149.
- [6] 刘信芳,吴守一. 鸡蛋力学特性实验分析[J]. 江苏工学院学报, 1992, 13(1): 7—13.
LIU Xing-fang, WU Shou-yi. Experimental Analysis of Mechanical Properties of Eggs[J]. Journal of Jiangsu Institute of Technology, 1992, 13(1): 7—13.
- [7] 宋慧芝,王俊,叶均安. 鸡蛋蛋壳受载特性的有限元研究[J]. 浙江大学学报, 2006, 32(3): 350—354.
SONG Hui-zhi, WANG Jun, YE Jun-an. Analysis of the Loading Properties of Fowl Eggshell with Finite Element Method[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 32(3): 350—354.
- [8] DE K B, GOVAERTS T, COUCKE P, et al. Measuring the Eggshell Strength of 6 Different Genetic Strains of Laying Hens: Techniques and Comparisons[J]. British Poultry Science, 2002, 43(2): 238—244.
- [9] COUCKE P, DEWIL E, DECUYPERE E, et al. Measuring the Mechanical Stiffness of An Eggshell Using Resonant Frequency Analysis[J]. British Poultry Science, 1999, 40(2): 227—232.
- [10] COUCKE P, KETELAERE B D, BAERDEMAEKER J D. Experimental Analysis of the Dynamic, Mechanical Behaviour of A Chicken Egg[J]. Journal of Sound & Vibration, 2003, 266(3): 711—721.
- [11] 吴雪. 鸡蛋裂纹损伤检测的声振分析方法研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 10—13.
WU Xue. Study on Chicken Eggs Crack Detection Based on Different Sound and Vibrational Signals[J]. Food & Machinery, 2014, 30(6): 10—13.
- [12] 薛杰,何尚龙,杜大华,等. 充液容器流固耦合模态仿真分析研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(1): 90—97.
XUE Jie, HE Shang-long, DU Da-hua, et al. Study on Fluid-structure Coupling Modal Simulation of Liquid Filling Container[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(1): 90—97.
- [13] PERIANU C, KETELAERE B D, PLUYMERS B, et al. Finite Element Approach for Simulating the Dynamic Mechanical Behaviour of A Chicken Egg[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(1): 79—85.
- [14] KETELAERE B D, COUCKE P, BAERDEMAEKER J D. Eggshell Crack Detection Based on Acoustic Resonance Frequency Analysis[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(2): 157—163.
- [15] LI Sun, BI Xia-kun, LIN Hao. On-line Detection of Egg-shell Crack Based on Acoustic Resonance Analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(1): 240—245.