

李传珍,王树才,雷杏子,等.基于重叠网格的皮蛋喷淋涂膜仿真研究[J].华中农业大学学报,2024,43(2):254-263.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.028

## 基于重叠网格的皮蛋喷淋涂膜仿真研究

李传珍,王树才,雷杏子,唐诗杰

华中农业大学工学院,武汉 430070

**摘要** 为了加深对皮蛋喷淋涂膜工艺的认识,使用Fluent软件中重叠网格耦合VOF模型开展两相流研究,获得皮蛋不同摆放姿势下的液膜润湿比,并以膜厚变化指数为响应值,结合Box-Behnken试验筛选出悬垂液滴去除时最优吸管参数与工作压力,结果显示:尖端朝下摆放的皮蛋经过喷淋后液膜润湿比为1,而钝端朝下摆放的皮蛋经过喷淋后液膜润湿比仅为0.836,筛选出最优吸管参数组合为间距14.50 mm、直径12.09 mm、工作压力6.97 kPa、膜厚变化指数预测值为0.636。在最优吸管参数组合下进行仿真试验,并利用气吸装置开展悬垂液滴去除试验,试验结果显示,膜厚变化指数仿真值与预测值的相对误差为1.73%,膜厚变化指数的实际值与预测值的相对误差为7.55%,与仿真值的相对误差为9.12%。结果表明本研究的耦合模型可用于皮蛋喷淋涂膜仿真试验。

**关键词** 皮蛋;重叠网格;喷淋涂膜;悬垂液滴;膜厚变化指数

**中图分类号** S377 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0254-10

目前,对皮蛋进行涂膜处理逐渐成为皮蛋加工生产中的必要环节<sup>[1-2]</sup>。禽蛋常见的涂膜方式有浸涂法、喷淋法、喷涂法等。不同涂膜方式下液膜形成机制与成膜效果存在较大差异。王子谕<sup>[3]</sup>对涂膜方法进行对比研究,发现采用喷淋涂膜速度最快。杨祯<sup>[4]</sup>以石蜡为涂膜剂,对比不同涂膜方式下皮蛋蜡膜的质量,发现采用喷淋法在皮蛋表面形成的蜡膜最为光滑。杨森<sup>[5]</sup>在设计鹌鹑蛋封蜡机时,发现利用喷涂法对鹌鹑蛋封蜡时喷出的雾状石蜡极易凝固,导致封蜡失败,最终选择喷淋法完成对鹌鹑蛋的封蜡。皮蛋喷淋涂膜过程是液膜铺展过程,液膜铺展后会在皮蛋底部形成悬垂液滴影响了液膜的均匀性。

国内外学者对液膜流动进行了大量研究。林庆国<sup>[6]</sup>通过射流撞壁试验,分析了射流孔径、射流速度、射流倾角以及壁面曲率等因素对液膜形态的影响,认为射流倾角是影响液膜形态的关键因素。Kibar<sup>[7]</sup>开展倾斜射流撞击竖直的超疏水壁面的试验,发现液膜铺展面积随着接触角的增大而减小,并分析了壁面接触角、射流倾角、射流韦伯数对射流撞壁反弹的影响。Good等<sup>[8]</sup>则以水为冷却剂,对射流撞壁后的液膜分布进行试验研究,并分析了不同倾角下液

膜最大宽度与射流速度之间的关系。Fard等<sup>[9]</sup>通过三维数值对射流撞击溅板后液膜形成及破碎的过程进行了仿真,并结合试验验证了仿真结果的准确性。Cooke等<sup>[10]</sup>利用数值对降膜流动过程进行了仿真研究,并且在数值仿真过程中应用了网格自适应加密技术,从而提高了计算精度和计算效率。目前有关悬垂液滴的研究较少,主要集中在纤维丝上悬垂液滴形态的研究,Mchale等<sup>[11]</sup>基于Young-Laplace方程推导了忽略重力影响下纤维丝悬垂液滴轮廓表面的数学表达式;李健等<sup>[12]</sup>提出了一种基于液滴轮廓割线的纤维接触角测量方案,测量误差控制在 $\pm 2.5^\circ$ 以内。虽然关于液膜的研究众多,但是研究主要集中在静止壁面上,鲜见有关皮蛋喷淋过程中悬垂液滴的研究。

针对目前皮蛋喷淋涂膜理论研究不足的问题,本研究开展皮蛋喷淋涂膜系统仿真研究,利用重叠网格与VOF模型建立耦合模型对皮蛋喷淋涂膜模型进行数值计算,对皮蛋喷淋过程中皮蛋液膜铺展过程与喷淋涂膜后期悬垂液滴去除过程进行分析,并结合Box-Behnken试验筛选出气吸式悬垂液滴去除过程中的最优参数,利用搭建的悬垂液滴去除装

收稿日期:2023-02-15

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662020GXPY005)

李传珍,E-mail:2115700663@qq.com

通信作者:王树才,E-mail:wsc01@mail.hzau.edu.cn

置对筛选出的参数进行验证,旨在为皮蛋喷淋涂膜工艺提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 皮蛋喷淋涂膜模型

皮蛋喷淋涂膜模型如图1所示,皮蛋取自湖北神丹公司,通过MNT951221型游标卡尺(精度0.02 mm)测得皮蛋上部分椭圆短半轴平均长度 $D_1=22.50$  mm,长半轴平均长度 $D_2=27.50$  mm,下部分椭圆长半轴平均长度 $D_3=37.50$  mm。模型长 $L=160$  mm,模型高 $H=160$  mm,模型宽 $W=42.5$  mm,保持皮蛋与压力出口的距离 $W_1$ 、 $W_2$ 均为20 mm。皮蛋进行涂膜时,涂膜剂由喷淋口喷出,喷射速度 $v_0=0.5$  m/s,皮蛋以 $v=0.05$  m/s的速度由位置A运动至位置B完成1次喷淋,并以相同速度返回位置A完成2次喷淋,位置A与位置B相距62 mm,皮蛋在返回位置A后,底部会形成悬垂液滴,采用气吸的方式将附着在皮蛋底部的悬垂液滴去除,为后续皮蛋液膜的快速干燥固化提供较为均匀的液膜。

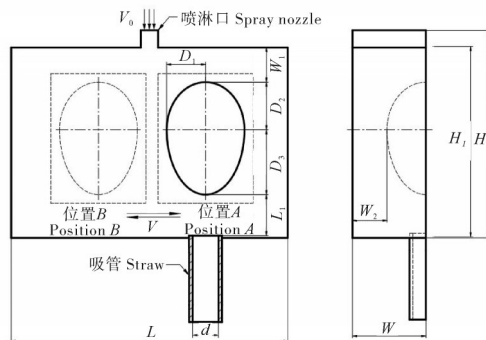


图1 皮蛋喷淋涂膜模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of preserved egg spray coating model

### 1.2 仿真研究方法

1)涂膜剂物理参数测量。涂膜剂为配方保密产品,仅对涂膜剂的密度、表面张力、动力粘度、润湿角进行测量。利用密度计(测量精度为 $0.001$  g/cm<sup>3</sup>)对涂膜剂的密度进行测量,测得涂膜剂的密度为 $1.100$  g/cm<sup>3</sup>;对涂膜剂动力粘度进行测量时选择粘度杯(NK-4型)作为测量仪器,测得涂膜剂流出的平均时间为 $27.65$  s,由式(1)计算得到涂膜剂动力粘度为 $0.107$  Pa·s。

式(1)中, $t$ 为流出时间,s; $v$ 为运动粘度,mm<sup>2</sup>/s;

$$\begin{cases} t=0.223v+6.0 \\ \mu=vp \end{cases} \quad (1)$$

$\mu$ 为动力粘度,Pa·s; $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>。

使用全自动表面张力仪(BZY-1型,上海方瑞仪器有限公司)测量得到涂膜剂平均表面张力为 $64.2$  m·N/m;通过接触角测量仪(Dataphysics-OCA20型,德国Dataphysics公司)对涂膜剂对皮蛋的润湿性进行测量时,取蛋壳较为平整的区域作为测试样本,测得接触角为 $63^\circ$ 。

2)数学模型建立。由式(2)计算本模型雷诺数为 $231.96$ ,由文献[13]可知,绕流雷诺数为 $231.96$ 时涂膜剂的流动为层流状态,故计算时采用层流模型进行计算。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2)$$

式(2)中, $\rho$ 为涂膜剂密度,kg/m<sup>3</sup>; $v$ 为喷射速度,m/s; $d$ 取皮蛋上部分椭圆短半轴平均长度,m; $\mu$ 为涂膜剂动力粘度,Pa·s。计算时采用VOF模型对气液相界面进行捕捉,VOF模型捕捉的相界面锐利度高,并且对于相界面动态适应性较高<sup>[14]</sup>,计算时采用的连续方程为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha = \frac{S_\alpha}{\rho} \quad (3)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\Delta p + [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>; $t$ 为时间,s; $\alpha$ 为体积分数; $\nabla$ 为哈密顿算子; $\vec{v}$ 为速度矢量,m/s, $S_\alpha$ 为源项; $\mu$ 为动力粘度,Pa·s; $\vec{g}$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $\vec{F}$ 为体积力,m/s<sup>2</sup>。

由于涂膜剂的表面张力及对皮蛋的润湿特性,在VOF模型中使用表面张力模型和壁面黏附模型,在VOF模型中增加表面张力模型会在动量方程中增加源项,针对本研究模型中的动量方程所增加的源项为:

$$\vec{F}_{\text{vol}} = \sigma_{i,j} \frac{\rho k_i \Delta \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (5)$$

壁面黏附模型为:

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos \theta_w + \hat{t} \sin \theta_w \quad (6)$$

式(5)~(6)中, $\vec{F}_{\text{vol}}$ 为动量方程中增加的源项; $\sigma_{i,j}$ 为第 $i$ 和第 $j$ 单元表面张力系数; $\rho$ 为加权平均密度,kg/m<sup>3</sup>; $k_i$ 为第 $i$ 单元曲率; $\alpha_i$ 是第 $i$ 单元的体积分数; $\rho_i$ 和 $\rho_j$ 分别为第 $i$ 和第 $j$ 单元密度; $\theta_w$ 为壁面接触角,(°); $\hat{n}_w$ 和 $\hat{t}_w$ 分别为壁面法向和切向的单位矢量。

3)重叠网格模型建立。重叠网格需将计算域划分成不同区域,通过网格装配将多个网格组合成计算网格,网格间通过重叠区域进行信息交互,重叠网格参与数值计算的流程包括网格生成、网格装配、数值计算、网格更新等<sup>[15]</sup>。根据形状特征将皮蛋喷淋涂膜模型分成背景区域和皮蛋区域,由于该模型具有对称性,计算时采用半模模型进行计算,利用ICEM软件划分精度高、适应性强的六面体结构化网格,并利用边界层加密技术对皮蛋区域中近皮蛋壁

面处进行加密处理,所生成的网格模型及边界条件如图2所示。

图3A为网格模型装配后对称面网格,为保证网格装配时的效率和信息交互时的准确性,采用基于单元品质标准的隐式挖洞方法对背景网格和皮蛋网格进行自动装配<sup>[16]</sup>,通过在重叠区域寻找插值点和对应的贡献节点,建立对应的数据存储结构实现网格关系的嵌入,网格模型嵌入网格关系后重叠区域网格如图3B所示。

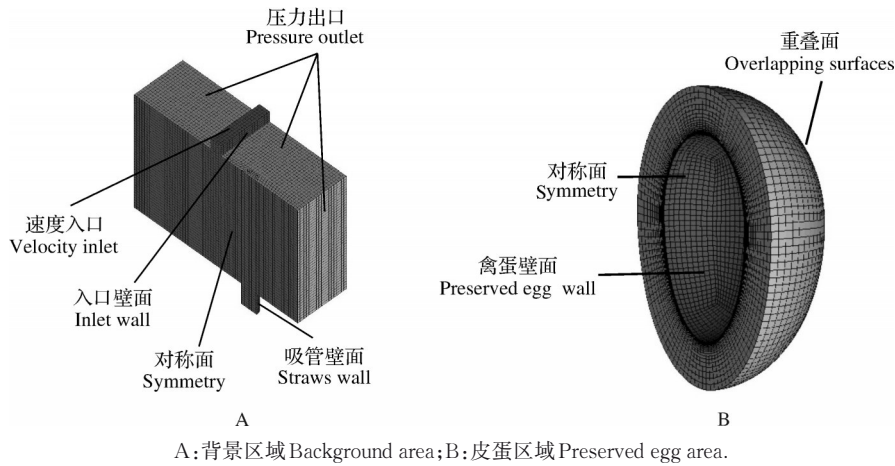


图2 网格模型及边界条件

Fig.2 Mesh model and boundary conditions

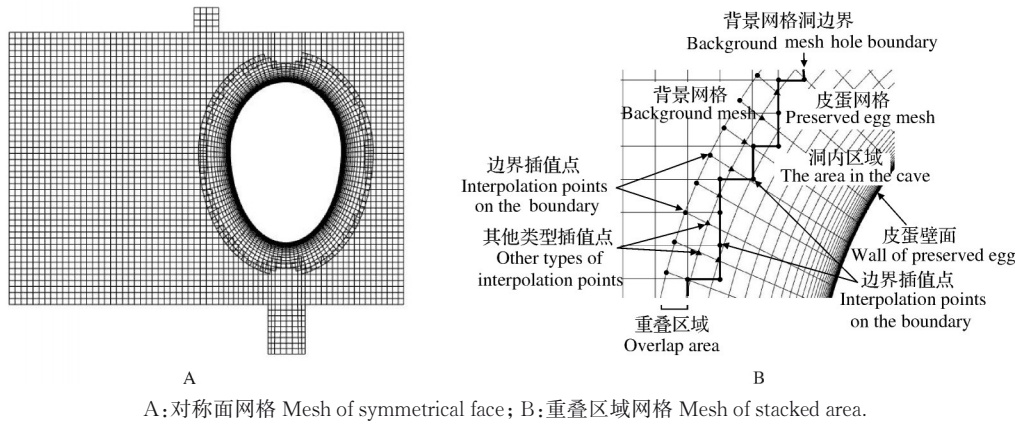


图3 装配网格模型

Fig.3 Assembled mesh model

4)求解器设置。在进行计算时选用3D瞬态求解器,重力加速度取 $9.8 \text{ m/s}^2$ 。体积分数方程选用隐式时间离散格式,界面附近的插值采用修正的HRIC格式。设置空气为基本相,涂膜剂为第二项,压力离散选择PRESTO!格式。Pressure-Velocity Coupling采用Couple算法,Momentum选择二阶迎风格式,Gradient采用Least Squares Cell Based。为提高计算的精度时间步长设置为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,残差保持默认值 $1 \times 10^{-3}$ 。

### 1.3 评价指标

1)液膜厚度。液膜厚度是皮蛋涂膜工艺中重要的参数,液膜厚度决定了皮蛋的保鲜时间。液膜膜厚的提取方法如图4所示,将皮蛋顶端到皮蛋底端沿逆向周向角平均分成10份,相邻节点之间逆向周向角相差 $20^\circ$ ,节点编号依次为 $a \sim j$ 。由图4可知,计算某节点处液膜厚度时,过该节点作皮蛋外壁面法线,该节点处的液膜厚度为外液膜表面和法线的交点与节点之间的距离。具体操作方法为:将计算结果导



入 Tecplot 中,过该节点作皮蛋外壁面法线,法线段长度取 2 mm,在所建立的法线上等距提取 2 000 个点,则每点可代表 1 μm 的距离,将统计的液相体积分数为 1 的总点数作为液膜厚度的取值。

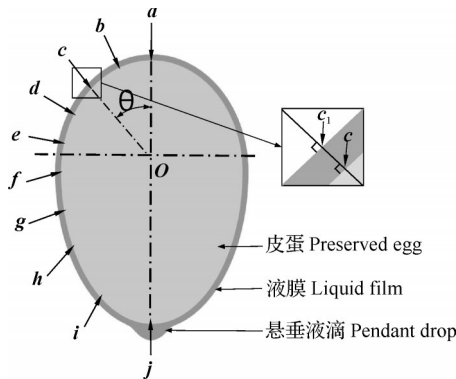


图4 液膜膜厚提取示意图

Fig.4 Diagram of extracted liquid film thickness

2)液膜润湿比。为定量描述涂膜过程中涂膜剂对皮蛋的覆盖情况,取液膜润湿比  $R$  作为皮蛋液膜铺展过程的评价指标, $R$  取值范围为  $[0, 1]$ , 1 表示皮蛋表面均被液膜覆盖, 0 表示皮蛋表面液膜面积为 0,  $R$  越大液膜铺展效果越好<sup>[17]</sup>。

$$R = \frac{S}{S_0} \quad (7)$$

式(7)中: $S$  为涂膜过程中液膜润湿面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_0$  为皮蛋表面积,  $\text{mm}^2$ 。在具体计算液膜润湿比时,将皮蛋近壁面 5 层网格数值作为皮蛋表面积取值,取 5 层网格内中涂膜剂的体积分数为 1 的网格总数作为润湿面积  $S$  的取值。

3)液滴纵横比。液膜进入稳定阶段后皮蛋底端会形成悬垂液滴,如图 5 所示,为定量表述气吸式悬垂液滴去除过程中悬垂液滴形态的变化,参照文献<sup>[18]</sup>,定义悬垂液滴纵横比  $A$ ,以  $O$  点为原点建立直角坐标系,原点  $O$  与节点  $j$  相距 0.5 mm,取  $D_x$  为悬垂液滴横向直径, $D_y$  为悬垂液滴纵向直径,悬垂液滴纵横比  $A$  为:

$$A = \frac{D_x}{D_y} \quad (8)$$

4)膜厚变化指数。皮蛋进入稳定状态后,受重力影响位于下方节点处的液膜厚度要大于上方节点处,而经过气吸式悬垂液滴去除后液膜厚度将会发生改变。参照文献<sup>[19]</sup>,定义膜厚不均系数  $M$  表示膜厚分布的均匀性, $M$  越小液膜均匀性越好。

式(9)中, $T_n$  为节点处液膜厚度,  $\text{mm}$ ;  $\bar{T}$  为液膜平均厚度,  $\text{mm}$ 。膜厚变化指数  $C$  反映了经过悬垂液

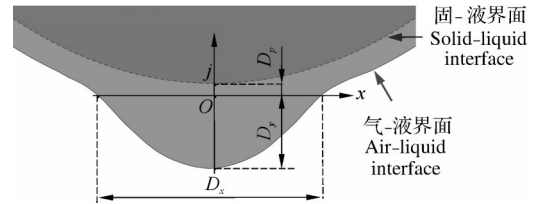


图5 悬垂液滴形状参数示意图

Fig.5 Schematic diagram of pendant droplet shape parameters

$$M = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{n=a}^j (T_n - \bar{T})^2} \times 100\% \quad (9)$$

滴去除后液膜厚度均匀性的变化情况, $C$  越大表示悬垂液滴去除时工作压力  $P$  对  $a \sim j$  节点处膜厚的影响越大,液膜厚度分布均匀性越高。

$$C = \frac{|M' - M|}{M'} \quad (10)$$

式(10)中, $M'$  为未经过悬垂液滴去除后准稳时膜厚不均分布系数, $M$  为经过悬垂液滴去除后膜厚不均分布系数。

#### 1.4 网格无关性验证

由文献<sup>[20]</sup>可知,液膜厚度可达微米级别,为了对皮蛋壁面的液膜进行捕捉,通过改变皮蛋壁面边界层尺寸共获得 3 套网格模型,依次标记为网格模型 1、2、3,网格模型 1 边界层尺寸为 10 μm,网格数量为 18.7 万;网格模型 2 边界层尺寸为 5 μm,网格数量为 24.3 万;网格模型 3 边界层尺寸为 1 μm,网格数量为 30.7 万。选取起始时间至皮蛋进入稳态阶段过程中液膜润湿比进行不同网格模型比较(图 6)。由图 6 可知,网格模型 1 与网格模型 2 计算结果比较接近,网格模型 3 与网格模型 1、2 存在一定的差距,相较于网格模型 1,网格模型 2 满足计算精度的要求,并且网

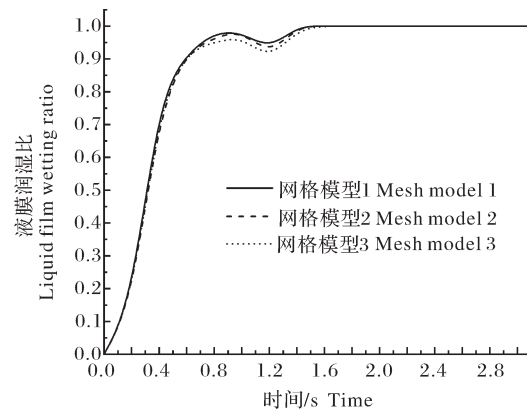


图6 不同网格模型下的液膜润湿比

Fig.6 Wetting ratio of liquid film under different mesh models

格模型2所需的计算时间远小于网格模型1,所以选取网格模型2作为网格计算模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 皮蛋液膜铺展过程可视化分析

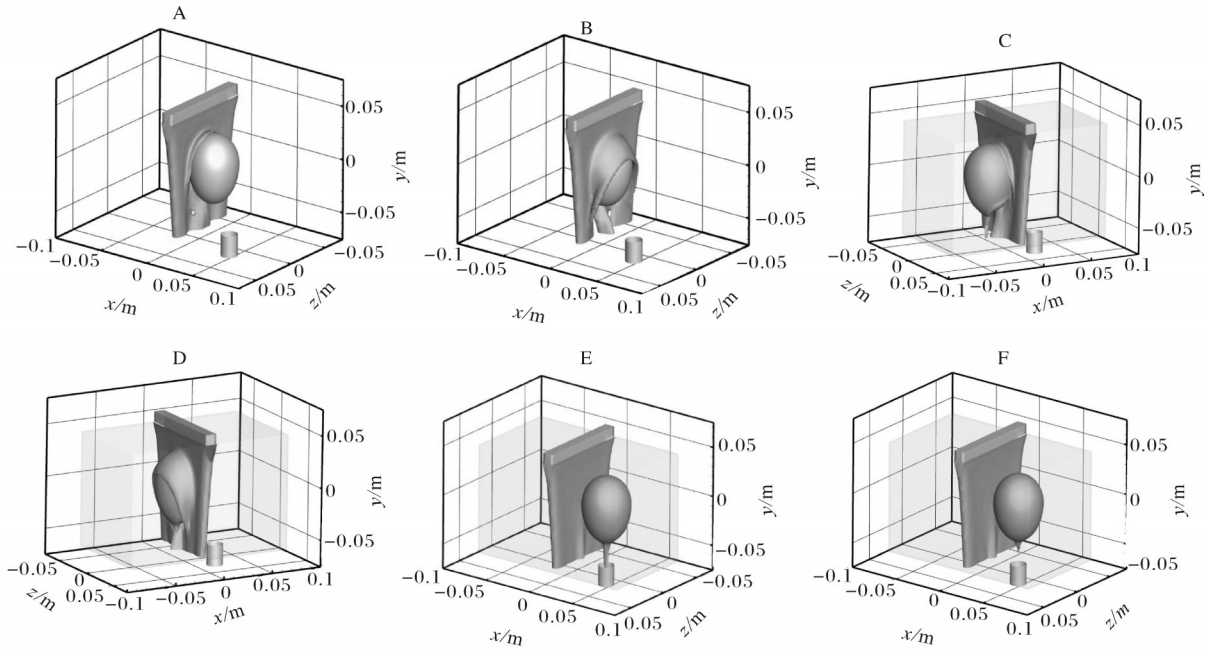
为展示皮蛋液膜铺展过程中的流场分布,图7以立体视角展示外液膜铺展过程,图7A、7B为1次喷淋阶段,图7C、7D为2次喷淋阶段,图7E、7F为涂膜剂脱落阶段。

1)1次喷淋阶段。在该阶段,涂膜剂以恒定速度喷出,由于涂膜剂满足连续介质假设,造成喷出的液膜的横截面积随距喷淋口的距离增加而减小;当皮蛋左侧接触到液膜后,液膜流动被划分成3个主流

区,涂膜剂沿皮蛋表面呈爬坡流动趋势,随着皮蛋的运动爬坡流动消失,皮蛋表面逐渐被涂膜剂覆盖。

2)2次喷淋阶段。经过1次喷淋后,皮蛋液膜由于表面张力的作用发生破裂,导致皮蛋右下侧产生干斑;皮蛋反向运动右侧接触到涂膜剂后所形成的液膜与1次喷淋阶段形成的液膜发生叠加,干斑逐渐被液膜覆盖,从而在皮蛋外表面形成完整液膜。

3)液膜脱落阶段。在液膜脱落阶段前期皮蛋液膜膜厚较大,皮蛋液膜在重力驱动下以柱状流脱落,随着皮蛋液膜膜厚的减小,柱状流逐渐转化成滴状流,最终在表面张力、体积力、黏附力等力的作用下皮蛋底部形成悬垂液滴。



A:  $t=0.35$  s; B:  $t=0.60$  s; C:  $t=1.50$  s; D:  $t=1.74$  s; E:  $t=3.35$  s; F:  $t=3.60$  s.

图7 喷淋阶段液膜铺展过程

Fig.7 Liquid film spreading process in spraying phase

### 2.2 皮蛋摆放姿势对液膜润湿比的影响

将皮蛋摆放姿势分为尖端朝下与钝端朝下,得到稳定阶段时2种摆放姿势下涂膜剂云图(图8),由图8可知,经过2次喷淋后,尖端朝下摆放的皮蛋表面形成完整液膜,而钝端朝下摆放的皮蛋表面并未形成完整液膜。

2种摆放姿势喷淋涂膜时皮蛋液膜润湿比如图9所示,0~1.2 s为1次喷淋阶段,该阶段中,2种摆放姿势下液膜润湿比均明显增加,尖端朝下的皮蛋液膜润湿比在1 s时增加到0.988,由于液膜的收缩作用在1.2 s时下降到0.908,而钝端朝下的皮蛋在1次喷淋

阶段液膜润湿比持续增加,1.2 s时达到最大值0.987;1.2~2.4 s为2次喷淋阶段,2次喷淋所形成的液膜叠加,使尖端朝下的皮蛋液膜润湿比在1.4 s时达到最大值1,且液膜润湿比最终稳定在1处,而钝端朝下的皮蛋在该阶段内液膜润湿比有明显波动,在1.4 s时液膜润湿比下降到0.773,在2 s时液膜润湿比增加到0.931,最终液膜润湿比稳定在0.836处,为保证皮蛋喷淋涂膜时液膜完整性应选尖端朝下摆放皮蛋。

### 2.3 气吸式悬垂液滴去除过程可视化分析

图10为气吸式悬垂液滴去除过程,利用后处理

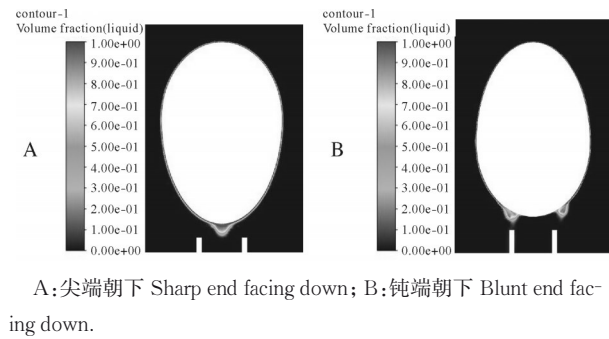


图8 稳态时涂膜剂云图

Fig.8 Cloud diagram of coating agent in steady state  
软件提取上吸管口压力的面积加权平均值的绝对值作为工作压力 $P$ 的取值,在悬垂液滴去除过程中工作压力 $P$ 持续增加至悬垂液滴被去除。前期悬垂液滴纵横比 $A$ 随工作压力 $P$ 的增加逐渐减小,悬垂液滴呈现出锥形,而悬垂液滴的锥度会持续增加,如图10A、10B所示。当悬垂液滴纵横比 $A$ 小于临界值后悬垂

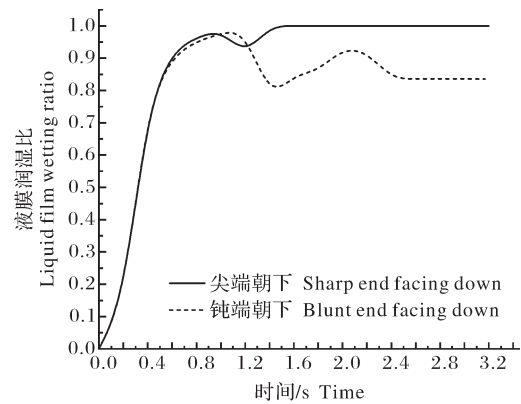


图9 不同时刻液膜润湿比

Fig.9 Liquid film wetting ratio at different moments

液滴中间发生1次断裂,残余悬垂液滴发生收缩回弹造成纵横比 $A$ 增大,如图10C所示。随工作压力 $P$ 的持续增加残余悬垂液滴在与液膜连接处发生摇摆并发生2次断裂,悬垂液滴纵横比 $A$ 变为0,皮蛋表面形成较为光滑的液膜,如图10D所示。

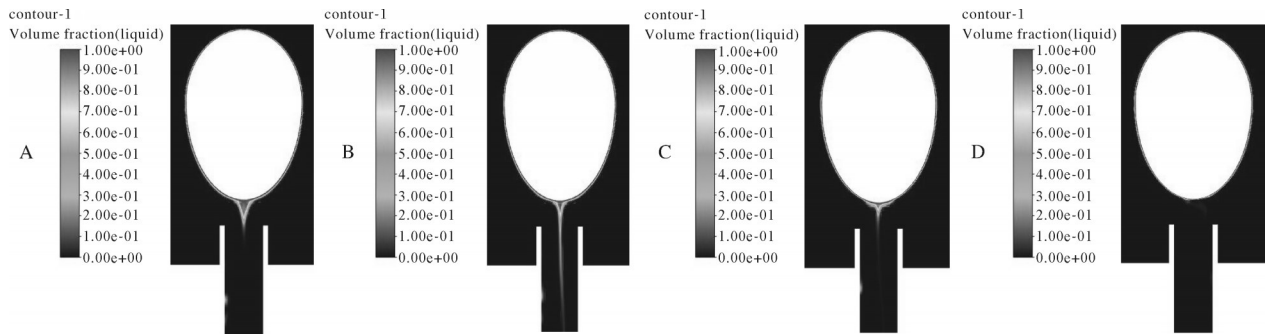


图10 气吸式悬垂液滴去除过程  
A: $A=0.74$ 时液相云图Liquid phase cloud at  $A=0.74$ ;B: $A=0.47$ 时液相云图Liquid phase cloud at  $A=0.47$ ;C: $A=2.05$ 时液相云图Liquid phase cloud at  $A=2.05$ ;D: $A=0$ 时液相云图Liquid phase cloud at  $A=0$ .

图10 气吸式悬垂液滴去除过程

Fig.10 Pneumatic suction pendant droplet removal process

## 2.4 关键参数 Box-Behnken 试验

进行气吸式悬垂液滴去除时上吸管口形成的气流会对 $a\sim i$ 节点处液膜产生扰动,导致节点处液膜厚度发生变化,利用 Design-Expert 8.0.6 进行三因素三水平响应曲面试验设计,选取吸管直径 $d$ 、间距 $L_1$ 、工作压力 $P$ 为影响因素,膜厚变化指数 $C$ 为响应值。试验时取间距 $L_1$ 为5~20 mm,取吸管直径 $d$ 为10~20 mm、工作压力 $P$ 取4~8 kPa。利用 Design-Expert 8.0.6 进行三因素三水平响应曲面试验设计时进行17组仿真试验<sup>[21]</sup>,试验设计方案与结果如表1所示。对 Box-Behnken 试验结果进行多元回归拟合,得到膜厚变化指数的二次多项式回归模型为:

$$G = 0.63 + 0.016A - 0.026B + 0.040C + 0.021AB - 1.400 \times 10^{-3}AC + 0.016BC - 0.023A^2 - 0.036B^2 - 0.049C^2 \quad (11)$$

由该模型方差分析(表2)可知,模型 $P$ 值 $<0.05$ ,表明该模型的各个参数与响应值之间的关系显著。模型中 $B$ 、 $C$ 项以及其二次项对膜厚变化指数呈极显著,该模型决定系数 $R$ 为0.939 4,表明各模型可以揭示93.94%以上响应值变化<sup>[22]</sup>。

应用 Design-Expert 8.0.6 软件绘制响应曲面(图11)。由图11A可知,当工作压力 $P$ 位于中间水平,且直径 $d > 16$  mm、间距 $L_1 < 14$  mm时,膜厚变化指数 $C$ 随直径 $d$ 的减小、间距 $L_1$ 的增大而增大;当 $d < 16$  mm且 $L_1 > 14$  mm时,膜厚变化指数随着直径 $d$ 的增加、间距 $L_1$ 的减小而增加。由图11B可知,当间距 $L_1$ 位于中间水平,且当工作压力 $P < 6$  kPa、直径 $d > 16$  mm时,膜厚变化指数 $C$ 随着工作压力 $P$ 的增大、直径 $d$ 的减小而增加;反之,当工作压力 $P > 6$  kPa、直径



表1 Box-Behnken 试验设计方案及结果  
Table 1 Box-Behnken experiment design scheme and results

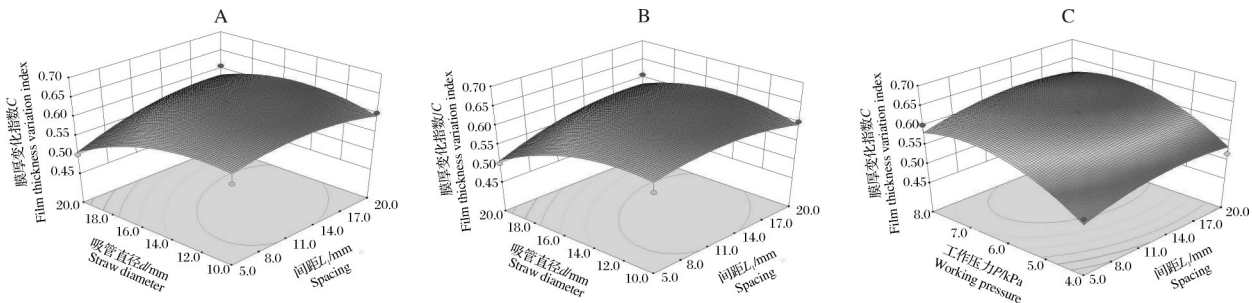
序号No.	$L_1(A)$	$d(B)$	$P(C)$	膜厚变化指数 Film thickness variation index
1	20	15	8	0.599 8
2	20	20	6	0.607 8
3	5	10	6	0.577 8
4	12.5	15	6	0.630 8
5	5	20	6	0.500 8
6	12.5	10	4	0.559 8
7	12.5	20	4	0.456 8
8	12.5	15	6	0.630 8
9	12.5	15	6	0.630 8
10	12.5	15	6	0.630 8
11	12.5	10	8	0.602 2
12	20	10	6	0.601 8
13	20	15	4	0.516 8
14	5	15	8	0.602 4
15	5	15	4	0.513 8
16	12.5	15	6	0.630 8
17	12.5	20	8	0.564 8

$d < 15$  mm 时,膜厚变化指数  $C$  随着工作压力  $P$  的增大、直径  $d$  的减小而减小。由图 11C 可知,当直径  $d$  处于中间水平时、且当工作压力  $P < 6$  kPa 时,间距

表2 Box-Behnken 试验回归模型方差分析  
Table 2 Variation analysis of Box-Behnken quadratic model

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	$P$ 值 $P$ value
模型 Model	0.043 000	9	0.004 802	0.001 7
A	0.002 158	1	0.002 158	0.052 9
B	0.005 586	1	0.005 586	0.007 2
C	0.013 000	1	0.013 000	0.000 7
AB	0.001 722	1	0.001 722	0.076 2
AC	$7.84 \times 10^{-6}$	1	$7.84 \times 10^{-6}$	0.892 4
BC	0.001 076	1	0.001 070	0.144 4
$A^2$	0.002 271	1	0.002 271	0.048 4
$B^2$	0.005 314	1	0.005 314	0.008 2
$C^2$	0.010 000	1	0.004 802	0.001 4
残差 Residual	0.002 790	7	0.002 158	
总和 Sum	0.046 000	16		

$L_1 < 14$  mm 时,膜厚变化指数  $C$  随着工作压力  $P$  的增加、间距  $L_1$  的增加而增加。通过软件对各参数优化求解,得到最优参数为间距  $L_1 = 14.50$  mm、直径  $d = 12.09$  mm、工作压力  $P = 6.97$  kPa,膜厚变化指数  $C$  预测值为 0.636,取以上述参数进行 3 组仿真试验,得到膜厚变化指数  $C$  平均值为 0.647,与预测值的相对误差为 1.73%,验证了仿真试验的真实性与可靠性。



A: 吸管直径  $d$  与间距  $L_1$  的关系 Response surface diagram of the relationship between pipe diameter  $d$  and spacing  $L_1$ ; B: 工作压力  $P$  与吸管直径  $d$  的关系 Response surface diagram of the relationship between working pressure  $P$  and pipe diameter  $d$ ; C: 工作压力  $P$  与间距  $L_1$  的关系 Response surface diagram of the relationship between working pressure  $P$  and spacing  $L_1$ .

图 11 响应面图

Fig.11 Response surface graph

2.5 气吸式悬垂液滴去除试验

试验使用的气吸装置如图 12 所示,主要由空气压缩机、电磁阀、真空发生器等组成。根据 Box-Behnken 试验所求得最优参数,取吸管内径为 12 mm、皮蛋底部与上吸管口间距 14.50 mm,通过旋转空压机压力调整螺钉,使上吸管口工作压力为 6.97

kPa。进行悬垂液滴去除试验时,共获得悬垂液滴未去除皮蛋与悬垂液滴去除皮蛋各 20 枚,采用 SW025SJ 型双尖头数显千分尺进行测量(分辨率为 0.001 mm),取节点处蛋壳进行测量得到干膜与蛋壳的共同厚度记为  $T_c$ ;将测量后的蛋壳置于温水中将干膜去除并晾干,测量去除干膜后蛋壳的厚度记为

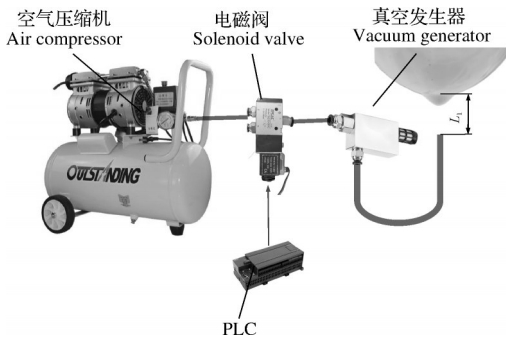


图12 气吸装置示意图

Fig.12 Schematic diagram of pendant droplet shape parameters

$T_d$ , 已知涂膜剂中涂料固体成分的体积占比系数  $n$  为 0.6, 由式(12)得到节点处液膜膜厚  $T_i$ , 取该节点处的液膜厚度的平均值为该节点处的液膜厚度。

$$T_i = \frac{T_c - T_d}{n} \quad (12)$$

悬垂液滴去除前后液膜膜厚如表3示。由式(9)得到悬垂液滴去除前液膜膜厚不均系数  $M$  为 21.83%, 悬垂液滴取出后液膜膜厚不均系数  $M$  为 9.00%, 由式(10)得到实际膜厚变化指数  $C$  为 0.588, 膜厚变化指数实际值与膜厚变化指数预测值的相对误差为 7.55%, 与仿真值的相对误差为 9.12%。

表3 悬垂液滴去除前后液膜膜厚对比

Table 3 Film thickness validation experiment results

项目 Item	测量节点 Measurement nodes								
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
去除前 Prior to removal	380	385	393	402	423	475	488	586	700
去除后 After removal	382	375	383	392	405	439	455	465	478

### 3 讨论

本研究以皮蛋液膜为研究对象, 利用重叠网格、VOF等模型建立了的流体力学耦合刚体动力学的数学模型, 分析了皮蛋摆放姿势对液膜润湿比的影响, 得到了气吸式悬垂液滴去除过程中吸管参数与悬垂液滴纵横比的关系, 并利用Box-Behnken试验筛选出最优的吸管参数组合, 结合搭建悬垂液滴去除装置对筛选出的最优吸管参数组合进行验证。

尖端朝下摆放的皮蛋与钝端朝下摆放的皮蛋2次喷淋过程中液膜润湿比变化趋势基本相同, 但尖端朝下摆放的皮蛋经过2次喷淋后液膜润湿比为1,

而钝端朝下摆放的皮蛋在喷淋过程中液膜润湿比最大仅为0.987, 喷淋结束后液膜润湿比仅为0.836, 由此在皮蛋喷淋涂膜实际作业时皮蛋应优先选择尖端朝下摆放。

本研究通过Box-Behnken试验时筛选出最优的间距  $L_1=14.50$  mm、直径  $d=12.09$  mm、工作压力  $P=6.97$  kPa, 膜厚变化指数  $C$  预测值为0.636, 对筛选出的最优吸管参数进行了仿真试验验证, 得到膜厚变化指数  $C$  平均值为0.647, 与预测值的相对误差为1.73%。利用搭建的悬垂液滴去除装置进行试验时, 得到膜厚变化指数  $C$  预测值为0.588, 与预测值的相对误差为7.55%, 与仿真值的相对误差为9.12%, 考虑到仿真试验与实物试验所采用的皮蛋尺寸存在一定的差异性, 使实物试验所得到的膜厚变化指数  $C$  较小, 但误差范围仍处于较低水平, 表明本研究所建立的数学模型对于皮蛋喷淋涂膜模型有较强适应性。

本研究中仅对皮蛋液膜铺展过程及悬垂液滴去除过程进行分析, 后期需要进一步对液膜由柱状流转化为滴状流阶段进行定量分析。此外, 本研究未对皮蛋液膜的干燥过程进行研究, 后期也需进一步研究, 从而建立皮蛋喷淋涂膜干燥整体理论体系。

### 参考文献 References

[1] 胡杰. 皮蛋涂膜剂的配制及保质效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. HU J. Preparation of the preserved egg coatings and study on the storage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).

[2] 毛昶懿. 皮蛋抗肿瘤功效及其机制的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. MAO C Y. Antitumor effect and mechanism of preserved egg [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).

[3] 王子谛. 清洁蛋生产工艺关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2013. WANG Z D. Study on the key processing technology of clean eggs [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2013 (in Chinese with English abstract).

[4] 杨祯. 淋蜡式皮蛋封蜡机的研究与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. YANG Z. Development and experiment of the top-pouring machine for sealing paraffin on preserved eggs [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).

[5] 杨森. 鹌鹑皮蛋机械封蜡装置的设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. YANG S. Design and experiment of mechanical wax sealing device for quail preserved eggs [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with Eng-



- lish abstract).
- [6] 林庆国. 空间轨控发动机高效燃烧室仿真与试验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015. LIN Q G. Simulation and experiment research on the high efficient combustion chamber for space orbit maneuvering rocket engine[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [7] KIBAR A. Experimental and numerical investigations of the impingement of an oblique liquid jet onto a superhydrophobic surface: energy transformation [J/OL]. Fluid dynamics research, 2016, 48(1): 015501 [2023-02-15]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0169-5983/48/1/015501>.
- [8] GOOD R, NOLLET B. Fluid film distribution investigation for liquid film cooling application [C]//Proceedings of the 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Atlanta, GA. Reston, Virginia: AIAA, 2017.
- [9] FARD M, ASHGRIZ N, MOSTAGHIMI J. A numerical model for flow simulation in spray nozzles [C]//Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [10] COOKE J J, ARMSTRONG L M, LUO K H, et al. Adaptive mesh refinement of gas-liquid flow on an inclined plane [J]. Computers & chemical engineering, 2014, 60: 297-306.
- [11] MCHALE G, NEWTON M I, CARROLL B J. The shape and stability of small liquid drops on fibers [J]. Oil & gas science and technology, 2001, 56(1): 47-54.
- [12] 李健, 程煌煌, 郑科城, 等. 基于液滴轮廓割线的纤维接触角测量方法模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 190-195. LI J, CHENG H H, ZHENG K C, et al. Research on contact angle measurement for droplet on fiber based on secant line of droplet profile [J]. Science technology and engineering, 2016, 16(13): 190-195 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘二朋, 林永水, 池晴佳, 等. 层流状态下旋转圆柱绕流数值模拟研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(12): 1749-1761. LIU E P, LIN Y S, CHI Q J, et al. Numerical investigation of laminar flow past a rotating cylinder [J]. Journal of ship mechanics, 2022, 26(12): 1749-1761 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王泽坤, 刘谋斌. 基于半解析 VOF-DEM 的激光直接沉积多尺度过程模拟[J]. 力学学报, 2021, 53(12): 3228-3239. WANG Z K, LIU M B. Whole-process cross-scale modelling of laser direct deposition with semi-resolved VOF-DEM coupling [J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2021, 53(12): 3228-3239 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李鹏, 高振勋, 蒋崇文. 重叠网格方法的研究进展[J]. 力学与实践, 2014, 36(5): 551-565. LI P, GAO Z X, JIANG C W. The progress of the overlapping grid techniques [J]. Mechanics in engineering, 2014, 36(5): 551-565 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘秋洪, 屈崑, 蔡晋生, 等. 嵌套重叠网格的构造策略及其隐式切割[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(2): 186-198. LIU Q H, QU K, CAI J S, et al. An automated *Chimera* method based on a hierarchical overset grid strategy and the implicit hole cutting technique [J]. Scientia sinica (physica, mechanica & astronomica), 2013, 43(2): 186-198 (in Chinese with English abstract).
- [17] 郑祺美. 横管降膜蒸发流动特性与机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. ZHENG Q M. Study on flow characteristics and mechanisms of horizontal-tube falling film evaporation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陆天宏, 周发贤, 庄大伟, 等. 重力场中水平纤维悬垂液滴形状的模型研究[J]. 化工学报, 2020, 71(12): 5452-5460. LU T H, ZHOU F X, ZHUANG D W, et al. Model of droplet shape on horizontal metal fiber in gravity field [J]. CIESC journal, 2020, 71(12): 5452-5460 (in Chinese with English abstract).
- [19] 代建武. 基于 PTHICD 的倾斜料盘式气流冲击干燥装置设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. DAI J W. The design and experiment of tilted tray air-impingement drying equipment with process-based on temperature and humidity integration control drying (PTHICD) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [20] 沈永泽, 李庆生. 水平蛋形管降膜蒸发器管外液膜铺展数值模拟[J]. 化学工程, 2021, 49(1): 70-75. SHEN Y Z, LI Q S. Numerical simulation of film spreading on horizontal oval-shaped tube falling film evaporator [J]. Chemical engineering, 2021, 49(1): 70-75 (in Chinese with English abstract).
- [21] 舒彩霞, 杨佳, 万星宇, 等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 34-43. SHU C X, YANG J, WAN X Y, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 34-43 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘嫣红, 李梦佳, 艾子平, 等. 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机优化设计及试验验证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 269-278. LIU Y H, LI M J, AI Z P, et al. Optimal design and experimental verification of tilted tray air-impingement dryers [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 269-278 (in Chinese with English abstract).

## Simulation of preserved egg spray coating based on overset mesh

LI Chuanzhen, WANG Shucui, LEI Xingzi, TANG Shijie

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

**Abstract** The overset mesh model coupled with the VOF model in Fluent software was used to study the two-phase flow to deeply understand the spray coating process of preserved eggs and solve the problems of insufficient theoretical researches on the spray coating of preserved eggs. The liquid film wetting ratio during the coating process under different placement positions of preserved eggs was obtained. The changes of the aspect ratio of the droplets under different pipette parameters were analyzed. The optimal pipette parameters and working pressure for the removal of pendant droplets were selected by the Box-Behnken experiment using the variation index of film thickness as the response value. The results showed that the liquid film wetting ratio of the preserved eggs placed downward after spraying was 1 while the liquid film wetting ratio of the preserved eggs placed with the blunt end down after spraying was only 0.836. The optimal combination of straw parameters screened out was spacing of 14.50 mm, diameter of 12.09 mm, working pressure of 6.97 kPa, and predicted variation index of film thickness of 0.636. The experiments of simulation and the removal of pendant droplets using the air suction device were carried out under the optimal combination of straw parameters. The results showed that the relative error between the simulated value and the predicted value of the variation index of film thickness was 1.73%. The relative error between the observed value and the expected value of the variation index of film thickness was 7.55%, and the relative error between the observed value and the simulated value was 9.12%. Indicating that the coupling model in this study can be used for the simulation test of egg spray coating.

**Keywords** preserved egg; overset mesh; spray coating; pendant droplets; variation index of film thickness

(责任编辑:陆文昌)