

基于流体仿真的家用面条机结构设计

Structural design of noodle machine based on fluid simulation

高 飞 张 鹏 张畅原 张峰瑞

GAO Fei ZHANG Peng ZHANG Chang-yuan ZHANG Feng-rui

(大连工业大学, 辽宁 大连 116034)

(Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

摘要:文章设计了一种纵向挤出并且具有螺旋结构的家用面条机。同时,利用 ANSYS 有限元仿真软件对面条机的搅拌挤压部分进行了仿真试验。通过面团流体与螺旋挤压轴的耦合仿真,得出面团流体域的压力云图以及挤压轴的应变云图和应力云图。仿真结果表明:面条出口处的压力稳定在 894.40~994.20 kPa,挤压轴的最大形变量为 0.62 mm,最大弯曲应力为 289.64 MPa,可以满足结构设计的要求。为了确定影响最大压力的因素,增加多组仿真试验,探讨了面团密度、幂律指数、零剪切黏度以及挤压轴转速 4 个因素对最大挤压力的影响,确定幂律指数和零剪切黏度为主要因素。

关键词:流体仿真;面条机;结构设计

Abstract: In this paper, a kind of household noodle machine with longitudinal extrusion and spiral structure was designed. Meanwhile, using ANSYS software, the stirring and extrusion part of noodle machine was simulated. The pressure cloud map of the dough fluid domain, the strain cloud map and the stress cloud map of the squeezing axis were obtained by the coupling simulation of the dough fluid and the squeezing axis. When the pressure was between 894.40 and 994.20 kPa, the pressure at the outside was stable. The value of the maximum shape variable of the extrusion shaft was 0.62 mm, and the maximum bending stress was 289.64 MPa, which was satisfied with the requirements of structural design. In order to determine the factors affecting the maximum pressure, several groups of simulation experiments were added. The influences of dough density, power law index, zero shear viscosity and extrusion shaft speed on the maximum extrusion pressure were discussed, furthermore, the main factors were determined. index and zero shear viscosity, which provided a reference for the structural design of noodle machine.

基金项目:辽宁省教育厅基金(编号:J2019020)

作者简介:高飞,男,大连工业大学在读硕士研究生。

通信作者:张鹏(1976—),男,大连工业大学副教授,博士。

E-mail: zhangpeng@dlpu.edu.cn

收稿日期:2020-05-05

Keywords: fluid simulation; noodle machine; structural design

面条以食用方便、营养丰富等优点,已经成为现代家庭的必备食物,尤其是自制面条,更是凭借其可以根据消费者的喜好制备面糊得到了人们的广泛喜爱,但制作过程较复杂。

目前,科研人员对面条机生产工艺及设备的相关研究虽取得了一些成果^[1-3],但对面团流体和机械结构的相互作用缺乏系统的研究。面条机结构设计的难点在于当搅拌介质的黏度较高时,搅拌叶片受力不均匀,无法在出口形成稳定的压力,顺利将面团挤出形成面条;或在启动过程中扭矩突然增大导致叶片折弯或者折断^[4]。

为解决上述问题,试验拟设计一款结构紧凑简单,加工效率高的家用面条机,并且对所设计的模型进行有限元分析,验证设计的面条机是否能产生稳定的压力将面团挤出形成面条,同时也对关键零件进行仿真分析。

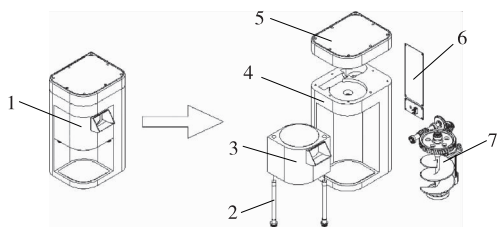
1 面条机的结构设计

1.1 面条机整机设计

家用面条机的功能是将水和面粉进行混合、搅拌,再通过模具挤压成不同形状的面条。内部结合微电脑控制,实现自动化制作,不仅可以制作各种类型的面条,例如龙须面、宽面、空心面等,也可选择单独和面。

面条机在中国属于工厂大型生产设备,近几年,由于小家电的普及,各厂家才转向设计小型化家用面条机^[5-6]。虽然目前市面上的面条机有很多品牌,但种类和形式单一,均采用了水平布置的搅拌轴结构,横向挤出。这种设计方案虽然避免了纵向布置造成的泄漏问题,但是也会造成更多的原料浪费。因此设计以解决下端密封问题为前提,采用纵向布置。整机三维设计模型如图 1 所示。

整机外形长 250 mm、宽 300 mm、高 520 mm,符合家用电器的外观要求,安装、拆卸、维护、使用起来也十分方便。从结构布局上看,电机和螺旋挤压轴均竖直放置,采用一对锥齿轮和一对蜗轮蜗杆传动,结构紧凑,有效利用



1. 整机 2. 定位螺栓 3. 制面容器 4. 箱体 5. 箱盖 6. 后盖板 7. 传动装置

图1 面条机结构图

Figure 1 Structure drawing of noodle machine

了内部空间。面条机工作时,电机通过联轴器带动主动锥齿轮转动,两锥齿轮相互啮合,进而带动被动锥齿轮转动,蜗杆和被动锥齿轮同轴,使得蜗杆发生转动,蜗轮蜗杆相互啮合,因此蜗轮以及与之同轴的螺旋挤压轴获得驱动力矩发生转动,螺旋挤压轴旋转时,对水与面粉的混合物进行充分搅拌、揉搓形成面团,之后再对混合充分的面团进行自上而下的输送并挤压,当面团通过下方的模具后,形成面条。

用户操作步骤:将容器洗净装好,先在控制面板上选择所要制作的面条类型和口味,LED屏幕显示所需的原材料和挤压模具;用户根据屏幕提示,安装相应的挤压模具并将定量原料倒入容器入料口中;用户在面板上确认后,机器将自动开始和面工作,待和面完成后自动进入挤面阶段。根据面条类型不同,出面时间会有所差异,平均5 min完成出面(总时长约15 min,可产500 g面条),此时机器会蜂鸣提醒用户取走面条。设备主要设计参数:容量500 g,重量7.8 kg,电机转速1 400 r/min,搅拌轴转速48 r/min,电压220 VAC,频率20 Hz,功率200 W。

1.2 面条模具的设计

面条模具为圆盘状,直径为100 mm,最大厚度为17 mm,其上开有若干个圆形通孔,面团受压时,将从通孔中挤出,形成面条。

模具通过螺纹旋合固定在容器出口处,模具中心设有锥形凸起,同挤压轴下部的锥形凹槽配合,对挤压轴起支撑作用,使挤压轴在工作时始终保持竖直方向旋转,这样的设计便于模具的安装且解决了纵向挤压易导致泄露的问题。如图2所示,常规类型的“挂面”模具,开有圆形通孔。除此之外,设备还可以配备更多类型的模具,用于制作其他面条,如宽面、龙须面等。

1.3 挤压轴的设计

挤压轴主体由中心轴和螺旋面构成,高222 mm,螺旋面最大直径为150 mm,挤压轴直接与面团接触,通过自身旋转执行和面、挤面的动作。挤压轴上端与低速轴配合,低速轴下端与挤压轴上端具有同样的异形横截面,使低速轴下端能恰好插在挤压轴上端的空腔中,从而限

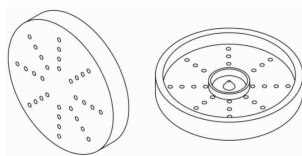


图2 面条模具的结构设计

Figure 2 Structural design of noodle mold

制两者之间的周向旋转,以达到传递转矩的目的。轴的中间部分设计成螺旋式结构,螺旋面主要用于搅拌、挤压、揉搓、输送面团。为了防止挤压轴在工作过程中受到径向扰动而偏离旋转轴线,在轴的底端设计一个与模具中心锥形凸起有着同样尺寸的锥形凹槽,二者恰好相互配合,使轴工作时始终保持在竖直方向旋转,挤压轴结构设计如图3所示。

1.4 传动部分设计

面条机采用竖直布置的200 W的电机驱动,通过锥齿轮改变传动方向,再通过蜗轮蜗杆进行减速。搅拌结构采用竖直设计,面条模具为可拆卸更换的部件,面条机配备多种不同形状的面条模具,不同的面条模具可以挤出不同形状的面条,如普通面、龙须面、宽面、空心面等。这样的设计较面辊结构^[7-8]更加紧凑,在实现和面、挤面功能的前提下,整机体积大大缩小,传动部分设计如图4所示。

1.5 制面容器的设计

制面容器长194 mm,宽190 mm,高185 mm,用于存放物料,物料通过侧边矩形开口加入容器,制面容器的下端为出面口,外围加工出螺纹,使模具旋合其上,更换方便快捷。制面容器如图5所示,两直角边处开有两个通

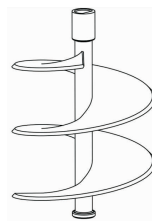
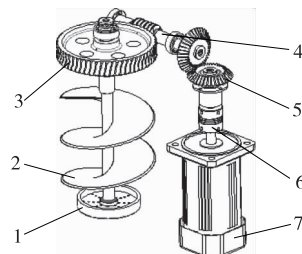


图3 挤压轴的结构设计

Figure 3 Structural design of the extrusion shaft



1. 面条模具 2. 挤压轴 3. 蜗轮 4. 蜗杆 5. 锥齿轮 6. 联轴器 7. 驱动电机

图4 传动部分结构设计

Figure 4 Transmission part structure design

孔,其作用是将容器固定在机器箱体上。安装方法为使用两根特制的长螺栓,穿入两个通孔,再旋合进箱体上对应位置的螺纹孔中。这种设计方便拆装,清洗时省时省力。

1.6 箱体结构设计

箱体大致呈长方体,长 250 mm,宽 300 mm,高 462 mm,箱体用于支撑、固定其他零部件,其外观直接决定了面条机整体是否美观,因此其设计相当重要。箱体结构图如图 6 所示,正面设有一个很大的空腔,用于安装制面容器,以及放置接面容器;箱体的背面设有两个竖直对齐的空腔,分别用来放置电机和电子元器件;箱体上端的孔槽,用于顺应传动部分的零部件,如蜗轮、锥齿轮等。

上箱盖长 250 mm,宽 300 mm,高 60 mm,如图 7 所示,上箱盖的下部同样设有与箱体上部孔槽互为对称的孔槽,通过孔槽的形状控制并固定传动部分零部件的位置。

2 面条机挤压装置的流固耦合仿真

2.1 面团仿真参数的确定

面团为面粉与其他成分的液体经过揉捏混合而成,其中含有大量的水分、碳水化合物以及蛋白质。面团由于混合多种成分,其流体性质为非牛顿流体中的幂律流体,且是一种假塑性流体,假塑性流体的流变特性常用如下的指数函数方程描述^[9]。

$$\tau = k \dot{\gamma}^n (n < 1), \quad (1)$$

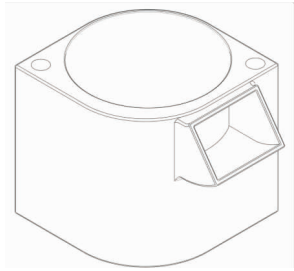
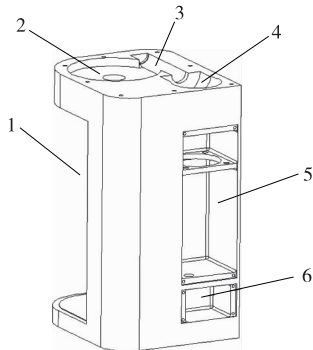


图 5 制面容器的设计

Figure 5 The design of making noodle container



1. 制面容器位 2. 蜗轮位 3. 蜗杆位 4. 锥齿轮位 5. 电机位 6. 电源位

图 6 箱体结构设计

Figure 6 The structural design of the box

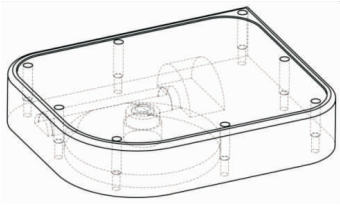


图 7 上箱盖的结构设计

Figure 7 Structural design of the upper cover

式中:

τ —— 剪切力, Pa;

$\dot{\gamma}$ —— 剪切速率, s^{-1} ;

n —— 流动特性系数;

k —— 黏性系数。

通过式(1)可以看出,表观黏度随剪切速率的增大而减小。这是因为具有假塑性流动性质的液体大多含有高分子的胶体粒子,这些粒子多由链状高分子构成,在静止或低流速时,相互钩挂缠结,黏度较大,显得黏稠。但当流速增大时,由于流层之间剪切应力的作用,使比较散乱的链状粒子滚动旋转收缩成团,减少了互相的钩挂,从而使黏度降低。

在 Fluent 软件中进行流体仿真时,对于假塑性流体,一般采用 carreau 黏性模型^[10],该黏度模型采用式(2)计算流体黏度。

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + \dot{\gamma}^2 \lambda^2)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (2)$$

式中:

n —— 幂指数;

λ —— 时间常数, s;

η_0 —— 零剪切黏度, $Pa \cdot s$;

η_{∞} —— 无限剪切黏度, $Pa \cdot s$ 。

通过查阅相关文献^[11],得到面团参数如表 1 所示。

2.2 建立分析模型

对面团流体的挤压过程进行有限元分析时,应尽可能简化模型,以提高仿真速度。文章对挤压装置的模型进行简化,仅保留实际工作的部分,如图 8 所示。容器内壁的最大直径为 160 mm,挤压轴叶片的最大直径为 150 mm,两者之间留有 5 mm 的间距,用于防止压力过大

表 1 面团参数

Table 1 Dough parameters

名称	符号	单位	数值
幂律指数	n		0.4
时间常数	λ	s	2.12
零剪切黏度	η_0	$Pa \cdot s$	24 350
无限剪切黏度	η_{∞}	$Pa \cdot s$	0
密度	ρ	kg/m^3	850

损坏零件,并能排出面团中掺杂的空气。

2.3 挤压装置的流固耦合仿真

用流固耦合的分析方式在 ANSYS workbench 软件中对挤压装置进行有限元分析,主要是为了得到面团流体在装置中的应力分布情况,以及该装置的核心零件——挤压轴在受到面团流体的反作用力后的应力分布情况和变形情况。

2.3.1 面团流体仿真分析 将外壳、挤压轴和面条模具的装配体模型导入 ANSYS workbench 软件后,进行多次布尔操作和切片操作,生成面团流体区域。该模型中存在运动区域,即挤压轴做旋转运动,因此要用到动区域计算模型,文中采用单参考系模型(SRF),对模型进行了简化。对于需要利用 SRF 进行仿真计算的三维旋转模型需要遵循旋转对称规则,而图 3 中的模型下方有 24 个凸台,并不满足旋转对称,因此要将模型进行分割。再对其进行网格划分,网格的划分结果如图 9 所示,软件统计出模型划分有 603 420 个单元格,118 635 个节点。上部分的主体结构满足旋转对称条件,运行计算时,上部分流域的分析数据可以通过接触面传递给下部分流域。

在 Fluent 中,需要对模型添加材料参数、区域条件以及边界条件。材料参数依照表 1 进行设置;搅拌轴以 48 r/min 的转速旋转,因此上部区域单位换算的转速为 0.8 r/s,下部区域静止;进口条件设置为 pressure-outlet,压力为 101 kPa,出口条件为 outflow,其余壁面条件为默认设置^[12-13],设置完成后进行求解运算。

软件求解运算完成后,在 ANSYS 的后处理模块 CFD-Post 中查看计算结果,压力云图如图 10 所示。从图 10 可以看出,压力分布在 46.25~994.20 kPa,自上而下逐渐增加,出口处的压力相对比较稳定,为 894.40~

994.20 kPa,因此可以确定,面条会在出面口均匀地挤出。

2.3.2 挤压轴的静力学仿真 对挤压轴进行静力学有限元仿真,分析挤压轴在面团流体压力下的变形情况以及应力分布情况。

挤压轴的材料为结构钢。对模型划分网格如图 11 所示,包括 13 019 个单元格和 26 474 个节点。划分网格后,要对模型施加约束和载荷。对挤压轴的上端面施加固定约束,对下端面的锥形槽面施加上无摩擦约束;将在 Fluent 计算出的面团流体与挤压轴接触的壁面的压力作用在该模型上,完成载荷施加^[14]。

软件计算完成后,查看计算结果,应变云图见图 12,最大形变量为 0.62 mm,位于挤压轴的下部螺旋面的边缘处,满足工况要求。应力云图见图 13,最大应力为 289.64 MPa,位于挤压轴中心与螺旋面相连接处,在数值上小于材料的许用应力,满足结构设计的工况要求。

2.4 分析各个参数对压力的影响

为了探讨面团密度、幂律指数、零剪切黏度以及挤压

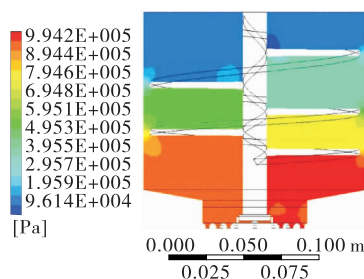


图 10 压力云图

Figure 10 Pressure contour

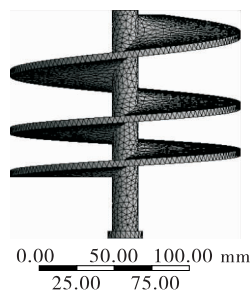


图 11 挤压轴网格划分

Figure 11 The mesh generation of extruding shaft

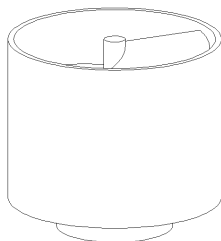


图 8 挤压部分的简化模型

Figure 8 Simplified model of the extruding part



图 9 流域网格划分

Figure 9 The mesh generation of fluid domain

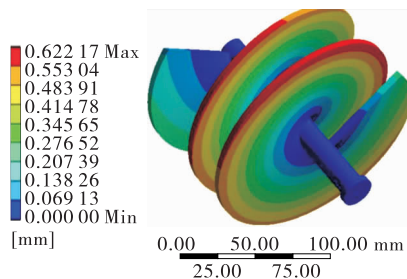


图 12 应变云图

Figure 12 Strain contour

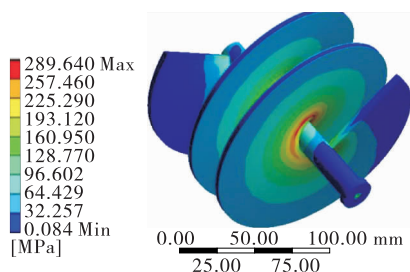


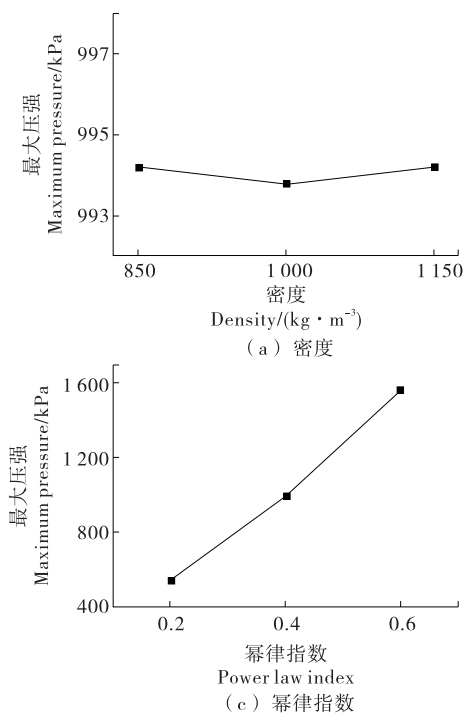
图 13 应力云图

Figure 13 Stress contour

轴转速 4 个因素对最大挤压力的影响,采用控制单一变量法,在原来的仿真基础上,分别对每个因素再增加 2 组仿真试验进行压力结果比对。

2.4.1 面团密度对压力的影响 按照 2.3 中的仿真流程,运用 ANSYS 软件进行仿真,图 14(a)是幂律指数为 0.4,零剪切黏度为 $24.35 \text{ kPa} \cdot \text{s}$,挤压轴转速为 0.8 r/s 时不同面团密度所对应的最大压力变化情况,面团密度为 $850, 1\ 000, 1\ 150 \text{ kg/m}^3$ 时的最大压力分别为 $994.20, 993.80, 994.20 \text{ kPa}$,由此可以判定,流体的密度对压力的影响极小。

2.4.2 幂律指数对压力的影响 图 14(b)是面团密度为 850 kg/m^3 ,零剪切黏度为 $24.35 \text{ kPa} \cdot \text{s}$,挤压轴转速为 0.8 r/s 时不同幂律指数所对应的最大压力变化情况,幂律指数为 $0.2, 0.4, 0.6$ 时的最大压力分别为 $543.70, 994.20, 1562.00 \text{ kPa}$,因此,幂律指数对压力的影响很大。



2.4.3 零剪切黏度对压力的影响 图 14(c)是面团密度为 850 kg/m^3 ,幂律指数为 0.4,挤压轴转速为 0.8 r/s 时不同零剪切黏度所对应的最大压力变化情况,零剪切黏度分别为 $10, 20, 30 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 时的最大压力分别为 $462.20, 834.40, 1\ 113.00 \text{ kPa}$,因此,黏度对压力的影响也很大。

2.4.4 挤压轴转速对压力的影响 图 14(d)是面团密度为 850 kg/m^3 ,幂律指数为 0.4,零剪切黏度为 $24.35 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 时不同挤压轴转速所对应的最大压力变化情况,挤压轴转速为 $0.8, 1.0, 1.2 \text{ r/s}$ 时的最大压力分别为 $994.20, 1\ 046.00, 1\ 095.00 \text{ kPa}$ 。由此可知,挤压轴的转速对压力的影响较小。

通过对面团流体的密度、幂律指数、零剪切黏度以及挤压轴转速对挤压过程中压力影响的分析可知,面团流体的密度和挤压轴的转速对压力的影响较小,在设计过程中可适当忽略二者对压力的影响;而面团流体的零剪切黏度和幂律指数对压力的影响较大,零剪切黏度越大,压力越大,幂律指数越大,压力也越大。因此,设计过程中,在保证面条口感、装置强度等条件下,可适当提高面团黏度和幂律指数,从而提高面条的紧致程度,减少面条断开的情况。若要对更高黏度或更大幂律指数的面团进行搅拌挤压时,可对面条机的主要工作部件挤压轴的螺旋面进行加厚,或者对螺旋面和轴芯的连接处进行倒圆角处理,以保证面条机工作的可靠性。

3 结论

运用流固耦合的方法对面条机的搅拌挤压部分进行

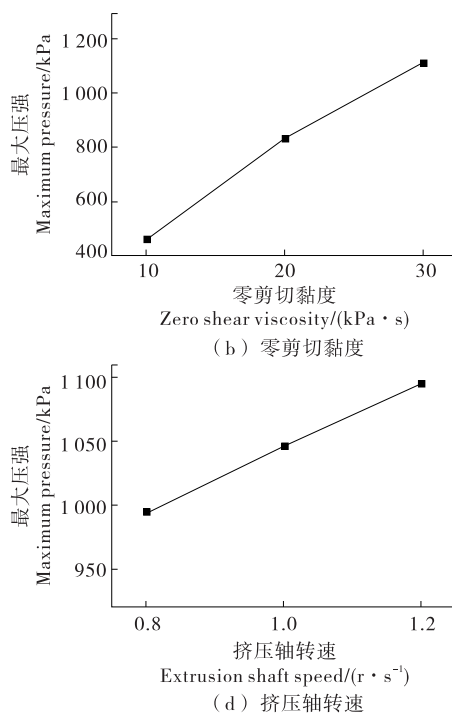


图 14 不同参数对最大压力的影响

Figure 14 The influence of different parameters on the maximum pressure

(下转第 105 页)

7 结论

聚焦裹蒸粽包装,分析现有产品不足之处,通过用户需求及使用情境分析,洞察其创新设计需求,提炼肇庆地域文化符号要素,从品牌形象设计、人性化设计及绿色环保设计等方面对“粽品”裹蒸粽包装进行系统性创新设计。改变包装设计重视视觉效果忽视功能创新的现状,注

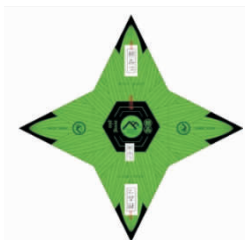


图 12 单个包装展开图

Figure 12 Single package expansion diagram

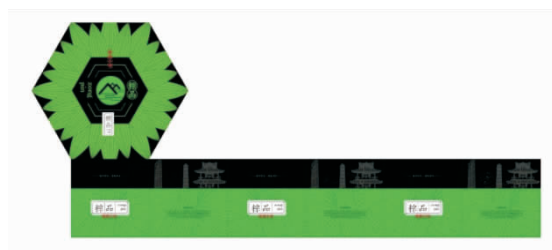


图 13 外包装展开图

Figure 13 Outer package expansion diagram

(上接第 100 页)

了有限元仿真,通过仿真分析验证了面条机结构设计的合理性,挤压轴的强度以及对面团的挤压力均满足设计要求。影响挤压力的因素有 4 个,其中面团黏度和幂律指数对压力的影响较大,而面团密度和挤压轴转速的影响较小,因此设计过程中,可以适当忽略面团密度和挤压轴转速的影响。运用流固耦合有限元仿真的方法辅助面条机的机械结构设计,相比于传统的机械设计,能够大大提高设备的研发效率,减少设计成本。通过找出适合面团流体的有限元仿真的参数模型,可以为和面团流体相关的设备的设计提供参考。由于该结构设计偏向于对非牛顿流体的仿真分析,未对挤压轴螺旋结构的螺距参数进行优化设计,结合螺距的结构参数与挤出压力作为优化目标是接下来的另一个主要工作内容。

参考文献

- [1] 赵延伟,吕振磊,王坤,等. 面条的质构与感官评价的相关性研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(4): 25-28.
- [2] 林宗德,林新英,陈文. 多功能辊式自动面条机的结构设计[J]. 安阳工学院学报, 2019, 18(6): 25-29.
- [3] 李自芹. 手持家用面条机设计[J]. 科学技术创新, 2018(19): 49-50.

重用户体验的同时关注地域文化的传播,是集合功能、文化价值、视觉等要素的整合性设计,拓展了肇庆地区文化研究领域。

参考文献

- [1] 李延寿. 南史[M]. 北京: 中华书局, 1975: 199.
- [2] 韦相伍. 肇庆年鉴[M]. 北京: 中华书局, 2017: 44.
- [3] 鄢莉. 地域文化符号转译在粤西年例食品包装设计中的应用[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 105-109.
- [4] RACHEL Hinman. 移动互联:用户体验设计指南[M]. 熊子川, 李满海, 译. 北京: 清华大学出版社, 2013: 28.
- [5] 鄢莉. 基于情境分析的光照互补蔬菜种植器设计[J]. 湖南包装, 2017(12): 131-136.
- [6] 李莉, 陈屹. 从“PENTAWARDS”获奖作品看全球食品包装设计创意潮流[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 98-105.
- [7] 吴锦花, 胡建辉. 闽北特色农产品的包装设计研究: 以顺昌竹林竹荪为例[J]. 湖南包装, 2019, 34(4): 106-108.
- [8] 刘婷. 岭南传统图形与地域性包装设计融合初探: 以肇庆裹蒸粽包装设计为例[J]. 美术教育研究, 2016(3): 92-93.
- [9] 许辉. 从中华优秀传统文化视角诠释肇庆市包公诞民俗活动内涵[J]. 中国民族博览, 2019(1): 23-25.
- [10] 王敏. 平面设计当中包装设计的视觉信息传达[J]. 佳木斯职业学院学报, 2018(4): 491-493.
- [11] 李娟, 张琛. 信息化时代下 VI 系统人性化设计形式探究[J]. 湖南包装, 2019, 34(3): 80-83.
- [12] 黄常春. 绿色设计理念在“狗脑贡茶”包装设计中的应用研究[J]. 设计, 2020(9): 23-25.
- [4] 马腾, 丁健华. 基于流体分析的发酵釜搅拌器强度计算[J]. 轻工机械, 2014, 32(6): 33-39.
- [5] 安科纳 E, 波加里 G. 面条机: 304067556S[P]. 2017-03-08.
- [6] 吴长松, 刘榕, 钱云飞, 等. 面条机: 207322516U[P]. 2018-05-08.
- [7] 金捷. 多功能家用面条机的设计[J]. 产品开发与设计, 2010, 37(12): 51-52.
- [8] 徐立伟, 宗姝, 周宏. 对辊式全自动面条机的结构设计[J]. 包装与食品机械, 2018(4): 70-72.
- [9] 沈金荣, 史梦珂, 邓泽元, 等. 大豆复合植物蛋白饮料配方优化及其理化性质[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 175-181.
- [10] 胡坤, 顾中浩, 马海峰. CAE 分析大系 ANSYS CFD 疑难问题实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 170-173.
- [11] 张坦. 智能“鲜食面”售卖机关键技术研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018: 47-48.
- [12] 陕梅辰, 朱春梅, 马超, 等. 基于有限元的水基动力无杆抽油系统流体分析[J]. 北京信息科技大学学报, 2014, 29(2): 70-74.
- [13] 张鹏, 张旭, 王慧慧, 等. 可倾斜式贝类预煮装置结构设计及流场分析[J]. 大连工业大学学报, 2018, 37(3): 219-223.
- [14] 鄢强, 邓祥丰, 宋慧瑾, 等. 基于 ANSYS Workbench 小型切草机的静动态特征分析[J]. 机械, 2019, 46(9): 11-17.