

# 螺棱间隙对单螺杆食品挤压膨化机熔体 输送影响数值模拟

Numerical simulation on effect of tip-clearance between screw flight and barrel on performance of food melt conveying section in single screw extruder for expanding

李欢欢 陈海英 崔政伟

LI Huan-huan CHEN Hai-ying CUI Zheng-wei

(江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**摘要:**采用 POLYFLOW 软件对单螺杆挤压膨化机中食品熔体的三维等温流场进行数值模拟, 结合粒子示踪技术, 探索不同螺棱间隙(0.4, 0.8, 1.2 mm)对食品熔体流动和混合性能的影响。研究表明: 随着螺棱间隙的减小, 螺棱顶端的剪切速率增大, 食品熔体平均黏度变小, 螺杆的轴向输送能力变差; 随着螺棱间隙的增大, 食品熔体的停留时间先增后减, 分散混合能力变差。当螺棱间隙增至 1.2 mm 时, 物料停留时间反而比间隙值为 0.4 mm 时长, 说明螺棱间隙过大, 食品物料的停留时间将难以控制, 同时对各物料组分的混合效果也较差。螺棱间隙对熔体流场和混合特性均有一定的影响, 螺棱间隙为 0.8 mm 时, 既能保证对熔体的输送能力, 又能保证良好的流场分布和混合效果, 为比较理想的螺棱间隙。

**关键词:**螺棱间隙; 流场; 混合特性; 数值分析

**Abstract:** The three-dimensional isothermal flow fields of single screws with different values of tip-clearance (0.4, 0.8, 1.2 mm) were simulated by POLYFLOW software. Combined with the particle tracing technique, the effect of different tip-clearance on the flow field and mixing ability of the food melt was also explored. The results show that: the shear rate near the top of the screw flight increases, the average viscosity of food melt decreases, and the conveying capacity of the screw weakens with the decrease of the tip-clearance. On the contrary, with the increase of the tip-clearance, the residence time of the food melt increases first, then decreases subsequently, and the dispersion mixing effect becomes poorer. When the

tip-clearance increases to value of 1.2 mm, the residence time of the food melt is even longer than the one with the value of 0.4 mm. It also shows that if the tip-clearance is too large, the residence time of the food material might become hard to be controlled and the mixing effect of these food material components would also become worse. As a result, the tip-clearance between screw and barrel could significantly influence both the flow field and mixing characteristics of food materials, when the tip-clearance is 0.8 mm, it can not only ensure the transport capacity to the food melt, but also behave the good flow field distribution and mixing effect. Therefore, it is the optimal tip-clearance value deduced by the numerical simulation.

**Keywords:** tip-clearance; flow field; mixing characteristics; numerical simulation

螺棱间隙是指螺杆与料筒间隙, 即机筒内径与螺杆直径差的一半, 一般用  $\delta$  表示。螺棱间隙对挤压膨化机的制造装配工艺和挤出膨化效果都有较大影响。螺棱间隙过大, 漏流量上升, 生产率将明显下降, 甚至会达到完全无法挤出的程度, 同时食品物料在过大的间隙中的停留时间也难以控制, 易发生局部焦糊等现象; 另一方面, 过大的螺棱间隙将导致熔膜增厚, 不利于热传导, 并且会降低剪切速率, 不利于物料的熔融。如果螺棱间隙太小, 挤出产量虽然会提高, 但食品物料在其中将受到较高的剪切力, 易导致物料过度糊化和降解, 同时也将增加螺杆与机筒的磨损<sup>[1]</sup>。因此, 针对不同物料特性, 选择适宜的螺棱间隙非常重要。

目前对于单螺杆挤压机熔体输送段内黏性流体流动情况的数值模拟研究较多, 但大多是针对人工合成聚合物的熔体输送的研究<sup>[2-4]</sup>。对于天然高分子材料如食品、饲料等的流动模拟, 国内外也有一定的研究<sup>[5-8]</sup>, 但针对螺棱间隙对挤压机内熔体输送影响的数值模拟的研究相对较少, 且主

**作者简介:**李欢欢(1989—), 女, 江南大学在读硕士研究生。

E-mail: 1826154353@163.com

**通讯作者:**崔政伟

**收稿日期:**2015-09-26

要是针对塑料、橡胶等人工合成聚合物<sup>[9-10]</sup>,涉及到食品方面的比较少见。王俊山等<sup>[11]</sup>讨论了不同螺棱间隙对挤出机总产量的影响,发现当螺棱间隙扩大到一定值时会对总产量产生较大影响。Ishikawa等<sup>[12]</sup>数值模拟了螺棱间隙对双螺杆挤压混合能力的影响,认为螺棱间隙应根据挤压物料的不同进行优化。以上针对螺棱间隙的研究并未使用非牛顿流体数值模拟或并未针对某些具体食品物料,而文章利用非牛顿流体数值模拟专用软件 POLYFLOW,对单螺杆挤压食品熔体的流场和混合情况进行模拟,研究结果对于单螺杆食品挤压加工更具有实际指导意义。

本研究拟运用有限元软件 POLYFLOW 对单螺杆食品挤压膨化机的熔体输送段进行流场计算,探索单螺杆挤压膨化机在不同螺棱间隙条件下的流场分布情况。运用粒子示踪技术(PAT),观察粒子运动情况,并运用统计分析,得出流场中的停留时间、分散准数和分离尺度的概率分布,进一步分析螺棱间隙对混合行为的影响,以便根据不同食品物料与添加剂的混合要求选择合适的螺棱间隙,节约了试验成本与时间。

## 1 模型构建

### 1.1 物理模型

根据模拟需要,将计算模型分为流体域和螺杆两部分,其中流体域为计算域,螺杆为运动部件。

在螺杆的直径、螺槽的深度和螺纹导程相同的条件下,与单头螺纹相比,多头螺纹对物料的输送能力更大,并可减少物料的倒流现象。另外,多头螺纹对熔体流场的混合和均化效果比单头螺纹要好。所以根据模型的几何结构与尺寸参数,将该计量均化段螺杆设计为双头,来研究螺棱间隙对熔体流场的影响。

本研究所模拟的熔体输送段螺杆的几何模型如图 1 所示,螺杆长 100 mm,导程 40 mm,螺槽深 15 mm,螺棱法向宽度 10 mm,螺杆根径 70 mm,螺杆外径 100 mm,螺棱断面为矩形。

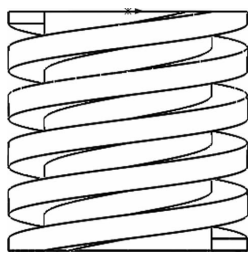


图 1 螺杆几何模型

Figure 1 Screw geometry model

为了研究螺棱间隙对熔体输送的影响,选取 3 种具有不同外径(机筒内径)的流体域进行数值模拟,流体域基本几何参数见表 1。其中,对模型命名规则见图 2。

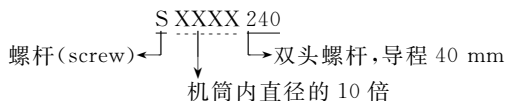


图 2 模型命名规则示意图

Figure 2 Model naming rules

表 1 流体域基本参数

Table 1 Basic parameters of flow zone

模型名称	长度/ mm	内径/ mm	外径/ mm	螺棱单面 间隙/mm
S1008240	100	70	100.8	0.4
S1016240	100	70	101.6	0.8
S1024240	100	70	102.4	1.2

### 1.2 数学模型

为了便于计算,同时使得计算结果能够满足工程要求,通常将物料在流道内的运动过程作如下简化<sup>[13-14]</sup>:

- (1) 流体为非牛顿黏性流体,其流变特性满足 Bird-Carreau 本构模型;
- (2) 流体为不可压缩流体,且在流体域内做层流运动;
- (3) 流体充满整个流道,忽略重力、惯性力;
- (4) 机筒内壁与螺杆表面无滑移;
- (5) 流场为等温流场。

在以上假设的基础上,流体运动的控制方程见式(1)~(6):

$$\text{连续性方程: } \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\text{运动方程: } -\nabla P I + \nabla \cdot \tau = 0 \quad (2)$$

$$\text{应力张量 } \tau = 2\eta(\dot{\gamma})D \quad (3)$$

$$\text{剪切速率 } \dot{\gamma} = \sqrt{2D : D} \quad (4)$$

$$\text{变形速率张量 } D = (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)/2 \quad (5)$$

$$\text{Bird-Carreau 本构模型: } \eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^n} \quad (6)$$

式中:

$\mathbf{v}$ ——速度向量, m/s;

$P$ ——压力, Pa;

$\tau$ ——应力张量, Pa;

$D$ ——变形速率张量,  $s^{-1}$ ;

$\eta$ ——表观黏度,  $Pa \cdot s$ ;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率,  $s^{-1}$ ;

$\eta_0$ ——零剪切黏度,  $Pa \cdot s$ ;

$\lambda$ ——松弛时间, s;

$I$ ——单位张量;

$n$ ——非牛顿指数。

### 1.3 有限元模型

1.3.1 稳态有限元模型 为了保证对流场数值模拟结果的准确性和精度,研究采用稳态有限元模型来模拟并分析流场中的压力、剪切速率和黏度分布。其几何模型(图 3)为流道与螺杆重叠部分以外的几何区域,网格划分采用正四面体和正六面体混合网格,边界条件与插值方法与瞬态有限元模型相同。

1.3.2 瞬态有限元模型 为了分析比较不同流场的混合能力,研究采用瞬态有限元模型,建立流场随时间变化的关系。为了减少网格数量和提高计算速度,将螺杆中间掏空,对于规则的流体域采用正六面体网格,对于形状不规则的螺杆采

用正四面体网格。采用 POLYFLOW 软件提供的网格叠加技术(mesh superposition technique),对流体域和运动部件(螺杆)分别进行网格划分,再根据实际运动情况将二者叠加到一起(见图 4)。在 POLYFLOW 子程序 POLYDATA 中对螺杆和流体域分别进行相关设置,来区分有限元单元是属于螺杆还是流体域。这样,在运动过程中,当流道变化时,软件会自动根据螺杆转速和 POLYDATA 中设置的时间步长来重新生成新的流体域实体和相应的有限元网格,大大减少了网格处理的工作量、计算时间和计算误差。

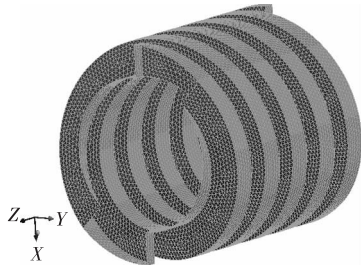


图 3 稳态有限元几何模型

Figure 3 Steady FEM geometry model

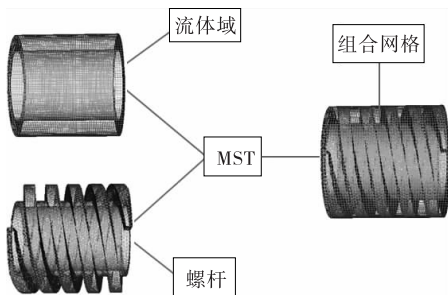


图 4 组合网格文件生成示意图

Figure 4 MST technique illustration

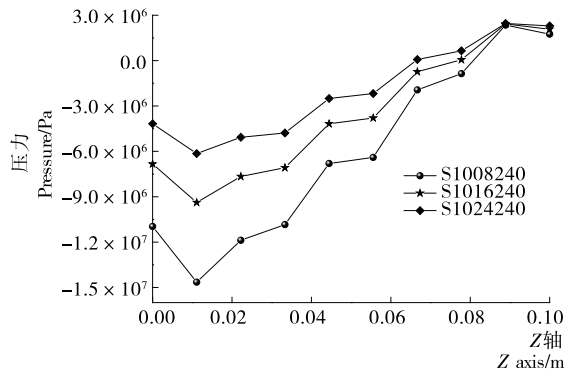
为了便于计算,速度采用 mini-element 插值,压力采用线性插值,黏度采用 Picard 迭代,方程(1)~(6)采用隐式欧拉法联合求解离散化的方程。螺杆转速设为 600 r/min,入口设置为质量流量入口,出口设置为恒定压力。模拟的物料为面粉熔体,选择 Bird-Carreau 本构方程。采用粒子示踪法(PTA)统计分析不同模型对应流道内粒子的混合状态,并用 POLYFLOW 子程序 POLYSTAT 对各项混合指标进行统计与处理。

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 流场模拟结果及分析

熔体沿 Z 轴正向挤出,流体域入口中心为坐标原点。利用 POLYFLOW 软件求出的结果为压力场、黏度场和剪切速率场,分别对其进行比较分析,以探索不同螺棱间隙对熔体流场的影响。

**2.1.1 压力场分析** 由图 5 可知,压力由入口处到出口处逐渐增加,熔体沿 Z 轴正方向输送,螺杆具有建压能力。螺棱间隙在 0.4~1.2 mm,对应的流道进出口压力差为 -7.5~-13.5 MPa,说明流道中轴向压差随着螺棱间隙的减小而增大,导致螺杆建压能力下降。这是因为螺棱间隙越小,物料

图 5  $X=50$  mm 轴线的压力分布Figure 5 Pressure plot of the  $X=50$  mm axis

挤出过程中所受到的阻力越大,导致轴向输送能力变差。

**2.1.2 剪切速率场分析** 由图 6 可知,螺棱附近剪切速率最大,靠近螺杆根部,剪切速率变小。对比 3 种不同螺棱间隙对应的剪切速率场,螺棱间隙的变化对流场的剪切速率分布有一定的影响。其中,螺杆根部剪切速率分布大体相似,螺棱附近剪切速率分布随螺棱间隙的变小而增大。由图 7 可知,螺棱间隙从 0.4 mm 增大到 1.2 mm,对应流场中食品熔体的平均剪切速率从  $1976.36 \text{ s}^{-1}$  下降至  $799.17 \text{ s}^{-1}$ 。

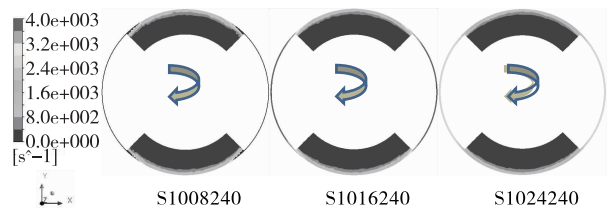
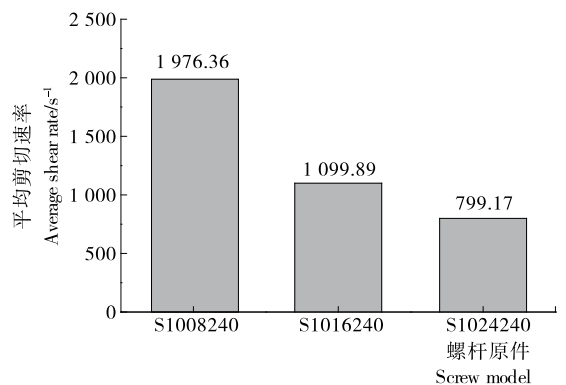
图 6  $Z=60$  mm 截面的剪切速率云图Figure 6 Shear rate contours at the cross section of  $Z=60$  mm

图 7 各流场的平均剪切速率

Figure 7 Average shear rate of different flow fields

由以上分析可知,螺杆对物料的剪切作用主要发生在螺棱顶端附近,减小螺棱间隙,有利于增加流场平均剪切速率。一方面可以增强对物料的“撕裂”作用,促进物料的降解和熔融,改善物料流动性,提升加工混合效果;另一方面可以促进物料的黏性生热,有利于食品物料的熟化,提高膨化食品质量。

2.1.3 黏度场分析 黏度场能反映物料在流场中不同区域内受剪切的程度。由图8可知,物料黏度由螺棱间隙向螺杆根部逐渐增大,其中螺槽中间位置的物料黏度最大。由图9可知,螺棱间隙由0.4 mm增大到1.2 mm时,对应流场中食品熔体的平均黏度由1 329.78 Pa·s升至2 607.65 Pa·s。

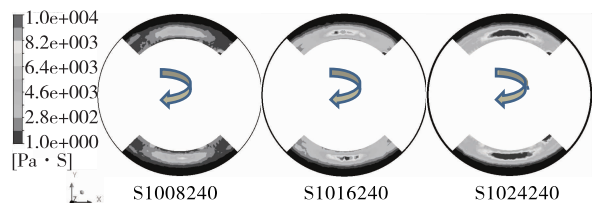


图8 Z=60 mm截面的黏度云图

Figure 8 Viscosity contours at the cross section of Z=60 mm

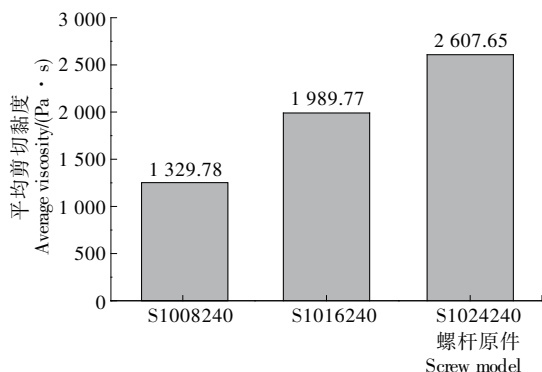


图9 各流场的平均黏度

Figure 9 Average viscosity of different flow fields

通过以上分析可知,随着螺棱间隙的减小,熔体流场黏度分布越均匀,平均黏度越小。说明螺棱间隙越小,螺杆对食品物料的“剪切变稀”效果越好,物料熔体的流动性越好,有助于熔体的均匀混合和稳定输送。因此,改变螺棱间隙能使物料黏度场发生变化,合适的黏度场不仅能改善食品物料的加工性,并且有利于食品物料的膨化。

### 2.2 混合动力学对比分析

在求得流场分布后,为进行混合表征,利用粒子示踪技术(PTA),计算初始时在流体域入口随机释放1 500个粒子,计算粒子在计算域内的流动轨迹。然后使用POLY-FLOW子程序POLYSTAT统计获得物料在出口处的停留时间分布函数 $F(t)$ 、分散指数 $\lambda_{MZ}$ 和分离尺度 $S_{(t)}$ 。

2.2.1 停留时间分布 在流道中,粒子停留时间分布是评价螺杆混合能力的一项重要指标<sup>[15]</sup>,它反映了所有被加工物料经历的时间范围,即各部分暴露到各给定剪切条件下的时间。停留时间分布函数 $F(t)$ 按式(7)计算,其中 $C(t)$ 是示踪物质浓度。

$$F(t) = \frac{\sum_0^t C\Delta t}{\sum_0^\infty C\Delta t} \quad (7)$$

式中:

$C(t)$ ——示踪物质浓度,  $m^{-3}$ ;

$t$ ——时间,  $s$ 。

由图10可知,3种螺棱间隙对应的流道中粒子开始流出的时间基本相同,90%粒子通过流道的时间由小到大分别为22(S1016240),45(S1008240),55(S21024240) s。可以看出,螺棱间隙越大,流道中粒子停留时间越短,即熔体受到的阻力越小,输送越顺畅。但是当螺棱间隙过大时,流道中粒子停留时间反而变长,这是因为螺棱间隙增大到一定程度后,流道中熔体的漏流量增大,导致物料的停留时间增大,对物料熔体的稳定输送和产量有一定的不利影响。

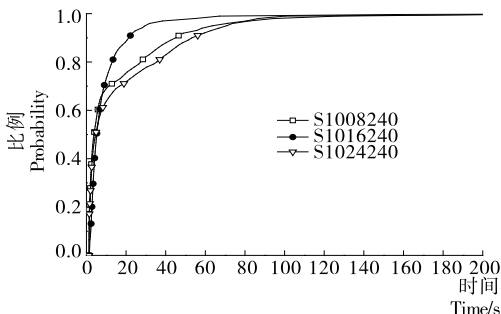


图10 螺棱间隙对累计停留时间分布的影响

Figure 10 The effect of screw gap on cumulative RTD

2.2.2 分散指数 分散性混合又称强烈混合,是依靠剪切和拉伸作用使粒子粒径不断减小的过程<sup>[16]</sup>。粒子所受拉伸作用的大小可通过分散指数 $\lambda$ <sup>[17]</sup>来衡量,按式(8)计算:

$$\lambda_{MZ} = \frac{|\bar{D}|}{|\bar{D}| + |\bar{\omega}|} \quad (8)$$

式中:

$|\bar{D}|$ ——应变速率张量,  $s^{-1}$ ;

$\bar{\omega}$ ——涡量,  $s^{-1}$ 。

$\lambda_{MZ}$ 的变化范围为0~1, $\lambda_{MZ}=0$ 表示纯旋转流动; $\lambda_{MZ}=0.5$ 表示拉伸流动与剪切流动相当; $\lambda_{MZ}=1$ 表示流动为纯拉伸流动,混合效果最好。

由图11可知,3种模型的分散指数均在0.5附近发生突变,并且当 $\lambda_{MZ}=0.5$ 时,3种模型对应的比例均为45%,说明在3种模型对应流道内均有65%的区域的混合指数大于0.5。可见,在3种模型对应流道内均以拉伸流动为主,且3种模型的分散性混合能力相差不大。

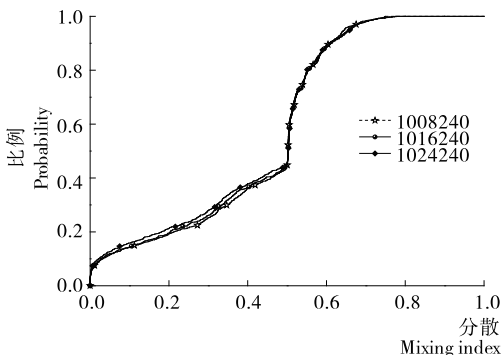


图11 螺棱间隙对分散指数的影响

Figure 11 The effect of screw gap on cumulative mixing index



2.2.3 分离尺度 分布性混合又称广泛混合,是指混合物组分间相互位置的重排,减小非均匀性。分离尺度  $S_{(r)}$ <sup>[18]</sup> 是混合物中相同组分区平均尺寸的一种度量,并且随着混合程度的提高而减小,可用相距为  $r$  的两质点处的浓度(体积百分数)相关系数的积分来表示,按式(9)计算:

$$S_{(r)} = \int_0^r R_{(r)} dr \quad (9)$$

相关系数  $R_{(r)}$  表示两点浓度的相关度:

$$R_{(r)} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(x_i'' - \bar{x}'')}{NS^2} \quad (10)$$

式中:

$x'$ 、 $x''$ ——两点上的浓度,  $m^{-3}$ ;

$\bar{x}$ ——平均浓度,  $m^{-3}$ ;

$N$ ——浓度总对数, lg;

$S^2$ ——方差。

由图 12 可知,3 种模型对应流道内粒子的分离尺度总体呈下降趋势,其中 S1008240 的分离尺度低于 S1016240 和 S1008240。S1008240 的曲线下落最快,在最短的时间内达到稳定状态,其次为 S1016240,表明分布性混合能力由高到低依次为 S1008240、S1016240、S1024240。说明螺棱间隙越小,对应流道内的熔体物料各组分的混合和均化越好,对于含有各种添加剂的食品物料来说,得到的产品品质更加均一和稳定。

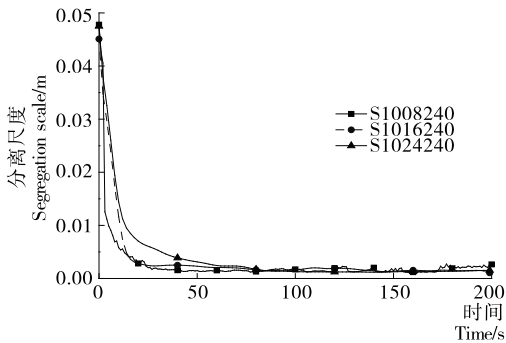


图 12 螺棱间隙对分离尺度的影响

Figure 12 The effect of the screw gap on segregation scale

### 3 结论

(1) 使用 POLYFLOW 软件数值模拟了具有不同螺棱间隙的单螺杆食品挤压膨化机熔体输送段流场的压力、剪切速率和黏度分布,经过对比分析可以看出:当螺棱间隙由 0.4 mm 增大到 1.2 mm 时,流道的进出口压力差从 -7.5 MPa 增大到 -13.5 MPa,对应流场内食品熔体的平均剪切速率为  $1\,976.36 \sim 799.17 \text{ s}^{-1}$ ,平均黏度为  $1\,329.78 \sim 2\,607.65 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。说明螺棱间隙越小,螺杆的轴向输送能力越差,对物料的剪切作用越大,食品熔体的平均黏度也越小。

(2) 利用粒子示踪技术对流场的混合特性进行表征,并使用 POLYSTAT 对粒子进行统计,得出流场的累计停留时间分布、分散准数和分离尺度的曲线。通过分析可知,螺棱间隙对流场的分散混合影响不大,对累计停留时间分布和分离尺度有一定的影响。螺棱间隙在 0.4~0.8 mm,物料停留

时间随着螺棱间隙的增大而减小,对食品物料的分散性混合效果也越差,但是螺棱间隙过小,物料停留时间将过长,物料可能出现焦糊,并且生产率也将降低。当螺棱间隙增大到 1.2 mm 时,物料的停留时间反而较间隙值为 0.4 mm 时还要大,说明螺棱间隙过大,物料的停留时间将难以控制,同时对各物料组分的混合效果也相对较差。

(3) 螺棱间隙与熔体输送和产品质量密切相关,针对不同的物料,选择合适的螺棱间隙对于食品挤压膨化机来说非常重要。目前结果显示,螺棱间隙为 0.8 mm 时,既能保证对熔体的输送能力,又能保证良好的流场分布和混合效果,为本次数值模拟单螺杆挤压面粉熔体的较优螺棱间隙值。实际生产当中,可根据挤压机结构以此间隙值为基础进行适当调整,以获得适用于单螺杆挤压面粉的最佳螺棱间隙。

### 参考文献

- [1] 韩国亮, 杨成德. 塑料挤出机螺杆与机筒间隙的影响[J]. 塑料制造, 2015(4): 62-64.
- [2] Ramos-De Valle L F. Principles of Polymer Processing[M]// Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013: 451-461.
- [3] Sastrohartono T, Jaluria Y, Essegir M, et al. A numerical and experimental study of three-dimensional transport in the channel of an extruder for polymeric materials[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1995, 38(38): 1 957-1 973.
- [4] Peng Jiong, Chen Jin-nan. Numerical simulations of polymer melt conveying in Co-rotating twin screw extruder[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 11(2): 189-192.
- [5] Ghoshdastidar P S, Ghai G, Chhabra R P. Computer simulation of three-dimensional transport during moistened defatted soy flour processing in the metering section of a single-screw extruder[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2000, 214(2): 335-349.
- [6] Emin M A, Schuchmann H P. Droplet breakup and coalescence in a twin-screw extrusion processing of starch based matrix[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(1): 118-129.
- [7] 王洪武, 林炳鉴. 大豆蛋白质单螺杆挤压熔体输送段的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 75-78.
- [8] 朱向哲, 谢禹钧. 食品加工用三螺杆挤压三维流场数值模拟[J]. 食品与机械, 2005, 21(3): 45-48.
- [9] 吴明星. 微型挤出熔体流变行为分析及螺杆优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 42-55.
- [10] Winter H H. Temperature-induced pressure gradient in the clearance between screw flight and barrel of a single screw extruder[J]. Polymer Engineering & Science, 1980, 20(6): 406-412.
- [11] 王俊山, 王小龙, 任家骏. 单螺杆螺棱间隙漏流数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2010(11): 86-89.
- [12] Ishikawa T, Nagano F, Kajiwara T, et al. Tip-clearance effect on mixing performance of twin screw extruders[J]. International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society, 2006, 21(4): 354-360.

(下转第 76 页)

对输出端电压的影响提高了。

### 3 实验验证

搭建实验模型见图6。直流电压源为20V,电容C为1μF,R为100Ω,4个耐压800V的IGBT管。课题组自行缠绕的变压器,初级绕组 $N_1$ 匝数为单层4圈,次级绕组 $N_2$ 为单层12圈,辅助绕组 $N_3$ 匝数为单层3圈,辅助绕组 $N_4$ 匝数为单层3圈。

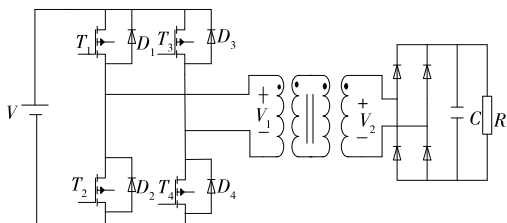
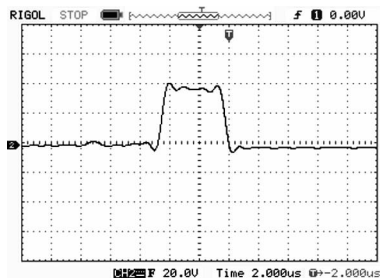


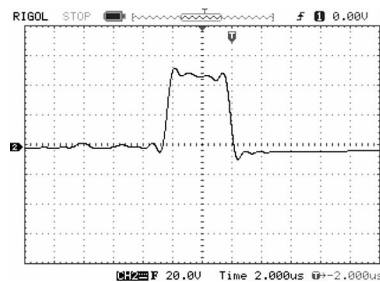
图6 实验电路拓扑

Figure 6 The experimental topology circuit

图7(a)为没有辅助绕组情况下脉冲变压器的输出电压波形,图7(b)为有辅助绕组情况下脉冲变压器的输出电压波形。脉冲信号为占空比5%、频率10kHz的方波脉冲。由图7(a)可以看出脉冲上升时间约为0.6μs;由图7(b)可以看出脉冲上升时间约为0.4μs。有辅助绕组的情况下,脉冲变压器的输出上升沿时间比无辅助绕组的情况下减少了200ns。无辅助绕组的情况下,输出电压的峰值约为36V;有辅助绕组时约为46V。



(a) 无辅助绕组



(b) 有辅助绕组

图7 实验波形

Figure 7 Experimental waveform

### 4 结论

以法拉第电磁感应原理为理论基础,利用数学模型讨论并提出了增加两个辅助绕组改变对脉冲变压器输出电压波形的影响。结果表明,辅助绕组减小了脉冲变压器输出电压的上升沿时间,增加了输出电压幅值,对输出电压波形的影

响非常明显。

### 参考文献

- [1] 金伟,平雪良,吉祥,等. 高压脉冲电场杀菌系统的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 247-249.
- [2] 杜存臣,吴清. 食品冷杀菌用高压脉冲发生器的研制[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 176-178.
- [3] 余林林,方婷,陈锦权. 高压脉冲电场处理室的研究进展[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 95-100.
- [4] 米伦. 200 kV 脉冲变压器的研制[J]. 变压器, 2004, 41(11): 21-23.
- [5] 孙筱琳,李国勇,王志海. 高频开关电源变压器的设计分析[J]. 自动化技术应用, 2008, 27(6): 53-56.
- [6] 胡君臣. 高频变压器的设计与制作[J]. 电气开关, 2005, 33(1): 8-13.
- [7] 张冰,李东升,严亮. 10 kV 高压脉冲变压器制作[J]. 技术与应用, 2006(10): 129-131.
- [8] 刘宏伟,谢卫平,李洪涛. 紧凑型电感隔离快 Marx 发生器[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1 436-1 439.
- [9] Pawelek D B, Wouters P A A F, Pemen A J M, et al. Design of compact transmission line transformer for high voltage nanosecond pulses[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2006, 34(5): 522-525.
- [10] Stadler A, Albach M. The influence of the winding layout on the core losses and the leakage inductance in high frequency transformers[J]. IEEE Trans. Magn, 2006, 4(42): 735-738.
- [11] Redondo L M, Margato E, Silva J F. Low-voltage semiconductor topology for pulse generation using a leakage flux corrected step-up transformer[J]. IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., 2000, 1: 326-331.
- [12] Lu H Y. Experimental determination of stray capacitances in high frequency transformers[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2003, 5(18): 1 105-1 112.

(上接第72页)

- [13] 杨绮云,赵静静. 食品双螺杆挤出机内物料停留时间及其分布研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 175-186.
- [14] 喻慧文,徐晋平,何亮,等. 非对称同向双螺杆端面造型对混合行为影响数值模拟[J]. 化工学报, 2012, 63(5): 1 622-1 629.
- [15] Shearer G, Tzoganakis C. Relationship between local residence time and distributive mixing in sections of a twin-screw extruder[J]. Polymer Engineering & Science, 2001, 41(12): 2 206-2 215.
- [16] Danckwerts P V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures[J]. Applied Scientific Research, Section A, 1952, 3(4): 279-296.
- [17] Cheng J, Manas-Zloczower I. Hydrodynamic analysis of a banbury mixer 2-D flow simulations for the entire mixing chamber [J]. Polymer Engineering & Science, 1989, 29(15): 1 059-1 065.
- [18] 王建,郭迪,陈晋南. 数值模拟研究螺筒结构对单螺杆挤出机性能的影响[J]. 塑料科技, 2012, 40(10): 74-78.