

带捏合块的渐加速型单螺杆三维流场分析

Three-dimensional flow field analysis of a progressively accelerating single screw with kneading blocks

田 东 郭树国 王丽艳

TIAN Dong GUO Shu-guo WANG Li-yan

(沈阳化工大学机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

(College of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang, Liaoning 110142, China)

摘要:目的:提高单螺杆挤出机的混合性能和工作效率。
方法:设计了一种利用行星轮组件和混合元件的同轴渐加速单螺杆,利用 Ansys/cfx 对其流道进行了三维流场分析,得到了宏观压力场、速度矢量图、速度流线图以及轴向速度变化曲线并与传统单螺杆进行了对比,**结果:**随着螺杆转速的不断变大,物料在机筒内停留时间变短,渐加速螺杆的挤出效率得以提高 20%~25%,使得耗能大大减少,由于捏合块的存在,物料在捏合块处被反复挤压,使得渐加速型单螺杆在增加产能的同时混合性能又可以得到保证。**结论:**同轴渐加速单螺杆高速旋转的捏合块可使物料混合更充分,且能缩短物料在螺杆中的停留时间,提高产量。

关键词:单螺杆挤出机;三维流场;捏合块;行星轮组

Abstract: Objective: In order to improve the mixing performance and work speed of a single screw extruder increase. **Methods:** A coaxial gradual acceleration single screw using planetary wheel assemblies and mixing elements was designed. Using ansys/cfx to conduct the three-dimensional flow field analysis of the flow channel, the macro pressure field, speed vector diagram, speed streaming diagram and axial speed changes, were finished, which was compared to the only traditional pillar. **Results:** As the speed of the pillar continues to increase, the time for the material to stay in the barrel becomes shorter, and the extrusion efficiency of the gradual acceleration screw can be improved by 20% to 25%, so that the energy consumption is greatly reduced, due to the presence of the kneading block, the material is repeatedly squeezed at the kneading block, so that the gradual acceleration

of the single screw in the increase in production capacity at the same time the mixing performance can be guaranteed.

Conclusion: The coaxial gradual acceleration of the single screw high-speed rotation of the kneading block can make the material mix more fully, and can shorten the residence time of the material in the screw, improve the output.

Keywords: single screw extruder; three-dimensional flow field; kneading block; planetary wheel assembly

单螺杆挤出机由于结构简单、操作方便、占地面积少,在塑料、化工、食品领域得到了广泛应用^[1-3],但是由于双螺杆以及多螺杆挤出机在挤出效率、混合性能等表现远远优于单螺杆挤出机,近年来,单螺杆挤出机逐渐淡出了市场^[4-6]。为提高单螺杆的混合性能以及挤出效率,学者们作出了诸多探索,但都只针对螺杆的某一方面进行了研究,如:潘龙等^[7]提出提高螺杆转速可以提高螺杆对物料的剪切速率,提高生产效率;黄元昌^[8]提出在螺杆中加入混炼元件可以使物料更好的混合,提高其混合效率。

研究拟整合前人研究并加入行星轮组,以 SolidWorks 为建模平台,以带捏合块的渐加速单螺杆为试验对象,以传统单螺杆为参照对象,以黏性流体力学为基础,用 Ansys 为仿真平台,模拟物料在螺杆中的运动情况,以期为提高单螺杆挤出机的挤出效率提供理论依据。

1 模型及参数

1.1 几何模型和流道有限元模型

图 1 为带捏合块的渐加速型单螺杆的 SolidWorks 三维模型,单螺杆总长 500 mm,普通输送段和加速输送段长度均为 210 mm,螺距 30 mm,根径 58 mm,外径 74 mm,捏合块元件由 8 个捏合盘组成,单个捏合盘厚度为 10 mm,形状与螺杆切面相同,捏合盘之间的错位角为 90°。

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(编号:2022-MS-288,2021-MS-253,2019-ZD-0085)

作者简介:田东,男,沈阳化工大学在读硕士研究生。

通信作者:郭树国(1978—),男,沈阳化工大学副教授,博士。

E-mail: guoshuguo@126.com

收稿日期:2022-05-23 **改回日期:**2022-10-22

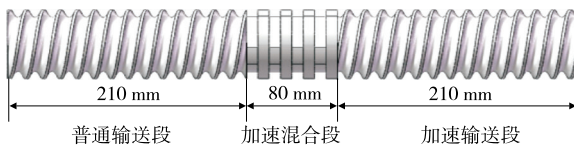
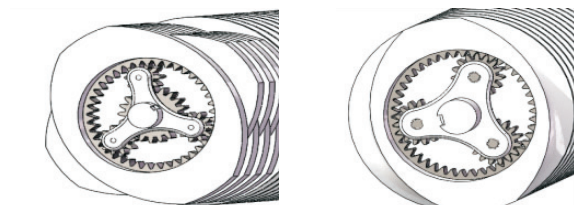


图 1 带捏合块的渐加速型单螺杆三维模型

Figure 1 Three-dimensional model of a progressively accelerating single screw with a pinch block

图 2 为加速混合段和加速输送段的行星轮组三维模型图,行星轮组的各齿轮齿数以及模数根据螺杆的尺寸大小以及传动速度确定,加速混合段行星轮组的中心太阳轮齿数为 20,周围小行星轮齿数为 10,圈轮齿数为 40,加速输送段行星轮组太阳轮齿数为 10,周围小行星轮齿数为 10,外部齿圈齿数为 30,行星轮组所有齿轮模数均为 1。



(a) 加速混合段行星轮组 (b) 加速输送段行星轮组

图 2 行星轮组

Figure 2 Planetary wheels

图 3 为带捏合块的渐加速型单螺杆的网格划分后的流道有限元模型,将单螺杆的三维模型导入到 Ansys geometry 中,进行机筒填充和布尔操作得到流道模型后,导入 mesh 中进行四面体网格划分得到节点数 53 631,元素数 215 802。

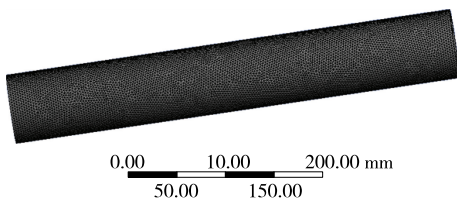


图 3 网格划分后的流道模型

Figure 3 Meshed runner model

1.2 基础状态假设

物料选用豆粕,豆粕属于幂律流体中的膨胀流体,其流体黏度随剪切速率的增加而增加且不可被压缩,在流道中的运动可以当作层流^[9]。流道内可以看作稳态,等温流场,对螺杆表面和机筒内壁均无滑移。

1.3 数学模型

由于在加速混合段和加速输送段存在行星轮组,所以要对行星轮组进行传动比计算,根据其传动比去确定加速混合段和加速输送段的速度。

$$\beta_1 + \alpha\beta_2 = (1 + \alpha)\beta_3, \quad (1)$$

式中:

β_1 ——太阳轮转速, r/min;

β_2 ——齿圈转速, r/min;

β_3 ——行星架转速, r/min;

α ——齿圈齿数与太阳轮齿数的比值。

根据单螺杆挤出机的实际工作条件和边界无滑移的条件给出以下边界条件:

(1) 螺杆转速为 $n_1 = 120$ r/min。

(2) 根据螺杆转速以及传动比代入式(1)计算得出加速混合段转速 $n_2 = 180$ r/min,加速输送段 $n_3 = 240$ r/min。

(3) 物料进口速度 $u = 0.05$ m/s,出口压力为 0.5 MPa。

(4) 螺杆和捏合块表面无滑移,机筒转速为 0。

对于等温层流的幂律流体,如忽略其体积力,则连续方程可简化为:

$$\frac{\partial \mathbf{V}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{V}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{V}_z}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

运动方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}. \quad (5)$$

幂律流体本构方程为:

$$\tau = \mu \Upsilon^n, \quad (6)$$

式中:

\mathbf{V} ——速度矢量, m/s;

τ_{ij} ——直角坐标系下剪切应力的矢量(下角标 i, j 对应坐标轴);

p ——静压力, Pa;

Υ ——剪切速率, s^{-1} ;

μ ——物料黏度, Pa · s;

n ——幂律指数。

联立式(2)~式(6)即可得出立体域的压力场和速度场。

2 模拟结果与分析

2.1 宏观压力场

螺杆的宏观压力场表示一个螺杆的压力分布状况和建压能力强弱,从图 4 中可以看出,两种螺杆的压力在总体上都是呈逐渐增加状态,说明物料在螺杆挤出力的作用下可以向前推进并最终被挤出。普通单螺杆挤出压力大小逐渐增加且均匀分布,说明物料在螺杆中被均匀挤出且不存在回流,不能被反复挤压。而新型单螺杆挤出压力总体上是逐渐增加的(先缓慢增加再急剧增加),前期的缓慢增加是由于在螺杆中部增加了捏合块,捏合块本身不存在建压能力,物料只能由螺杆挤出力向前推进,这就造成了物料在捏合块处被反复挤压,提升了混合性

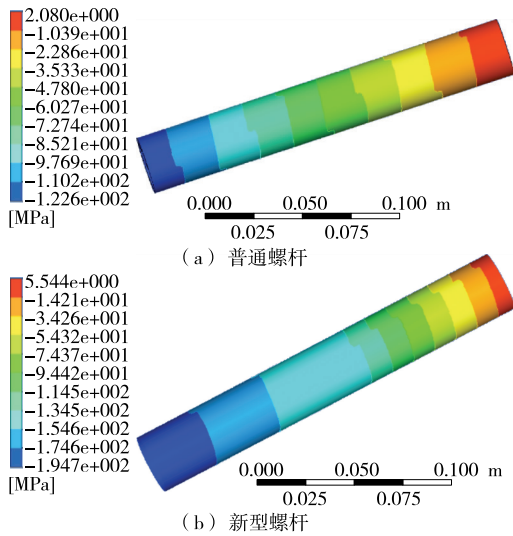


图 4 螺杆宏观压力图对比
Figure 4 Screw pressure chart comparison

能。后期螺杆压力急剧增加,是由于行星轮组的加入,使得螺杆的速度变大建压能力大大增强,使物料被快速挤出。在同样的条件设置下,普通螺杆和新型螺杆挤出力从入口端到出口端的压力差分别为 3.306,7.630 MPa,因此新型螺杆的运输能力强于普通螺杆。

2.2 速度场分析

2.2.1 速度矢量 从图 5 可以看出,传统单螺杆挤出机速度均匀,基本无变化且速度较小,所以传统单螺杆挤出机对于物料的运输比较缓慢且混合性能较差。新型单螺杆挤出机速度呈规律性逐渐增大,是由于在行星轮组的作用下使得混合段和加速输送段的速度增加,在速度变化时由于存在速度差,物料从低速到高速时可以被充分混合,而且速度的增加,相当于减少了物料的运输行程,从而加大单螺杆挤出机的产量。在新型单螺杆挤出机中

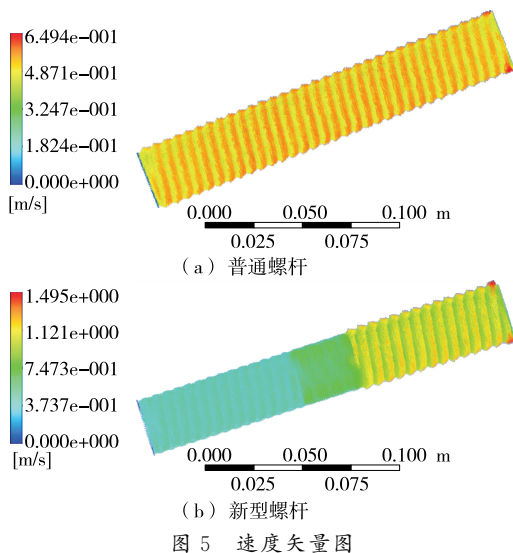


Figure 5 Velocity vector graphics

间段速度方向发生变化,是由于捏合块本身不具有运输能力,所以物料在捏合块处可以被反复挤压,提高螺杆挤出机的混合性能。

2.2.2 轴向速度 由图 6 可以看出,新型螺杆单螺杆和普通单螺杆在轴向距离 < 0.05 m 时,轴向速度曲线基本重合,说明普通螺杆和新型螺杆在普通输送段的速度并无差异,在轴向速度 > 0.05 m 时,新型螺杆的轴向速度逐渐大于普通螺杆的,说明在加速段物料可以被迅速挤出,大大提高了螺杆挤出机的挤出性能。

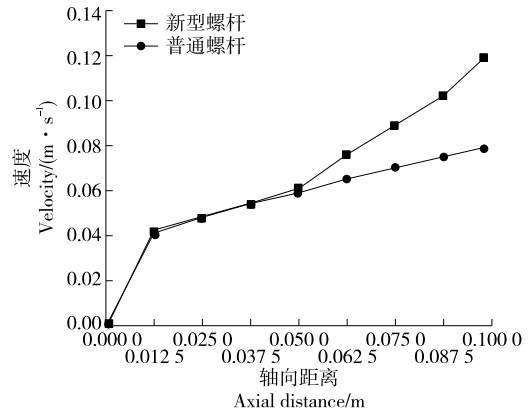


图 6 轴向速度对比图
Figure 6 Axial velocity comparison chart

2.2.3 速度流线 如图 7 所示,传统单螺杆挤出机的速度流线是比较均匀且连续无间断的,说明物料在螺杆中均匀缓慢前进且不能充分混合剪切。相对于传统单螺杆,新型螺杆的速度有明显的增加。如图 8 所示,新型单螺杆中间捏合块处速度流线密集且无前进趋势,说明物料在捏合块处被反复混合剪切,物料的混合性能和产品质量得到提高。在加速输送段,螺杆的速度有了显著增加,使得物料被迅速挤出,增加螺杆挤出机产量。

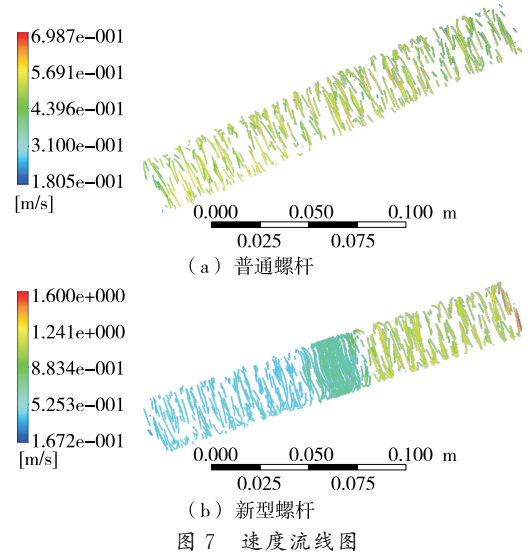


Figure 7 Velocity streamlined graph

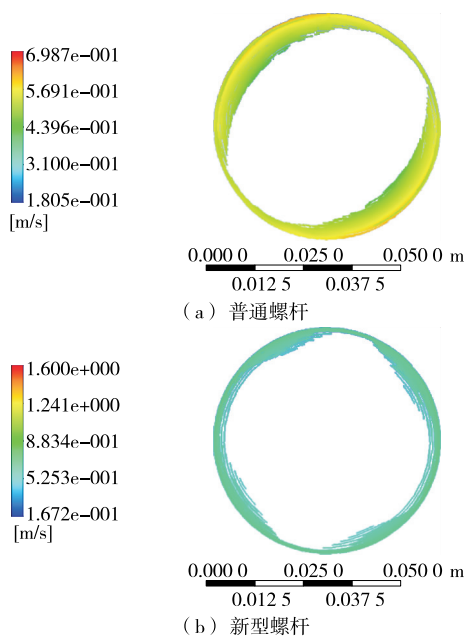


图 8 速度流线图在 -240 mm 的局部平面图
Figure 8 Velocity streamline diagram in -240 mm local plan diagram

3 实验验证

为了验证仿真结果的可靠性,以豆粕为研究对象,在 SYSLG30-IV 型单螺杆挤出机设备上对比试验。工作电机安装在螺杆入口处,并检测电机的耗能以及工况。将温度设置为 80 °C,物料进口速度 10 kg/h,分别记录新型螺杆挤出机和普通螺杆挤出机在同一转速、同一入口处,70,90,110,130,150 r/min 转速时物料通过新型螺杆的时间,通过对比物料从入口到出口的时间来比较螺杆的运输速度,结果如图 9 所示。利用天平分别记录新型螺杆在 10 min 内转速分别为 70,90,110,130,150 r/min 时的挤出产量,结果如图 10 所示。

通过图 9 可以看出,在同等转速以及电机耗能相同

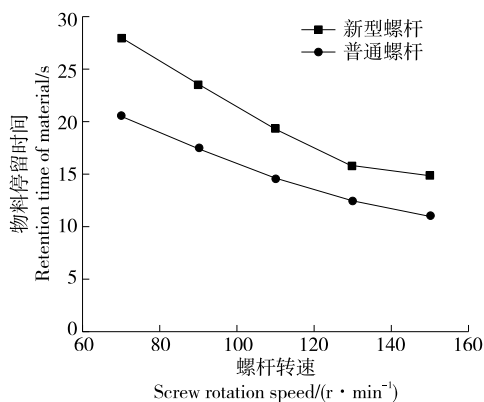


图 9 螺杆挤出机不同转速下物料停留时间关系图
Figure 9 The dwell time of the material in the ordinary screw and the new screw barrel

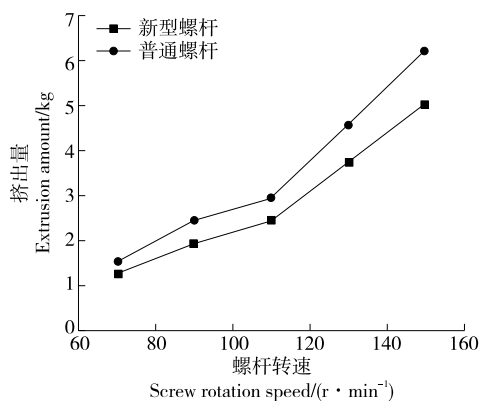


图 10 螺杆挤出机不同转速下挤出量对比图
Figure 10 Comparison of extrusion volume of new screw and ordinary screw

的情况下,物料在新型螺杆的停留时间要小于普通螺杆,表明螺杆的挤出速度越快,物料在机筒内的停留时间越短,螺杆挤出效率越高。在不同转速下,新型螺杆的物料停留时间总是小于普通螺杆,物料的停留时间越短,螺杆挤出机的挤出性能越优。

通过图 10 可以分析出,随着螺杆挤出机转速的不断变大,螺杆挤出机挤出量随之变大,说明螺杆转速是螺杆挤出机挤出量的一个重要影响因素,在相同转速以及电机耗能相同的情况下,新型螺杆的挤出量总是要优于普通螺杆,经计算,新型螺杆的挤出量约比普通螺杆高 24%,与仿真结果大致相同,同时也证明了新型螺杆可以提高螺杆挤出机的挤出性能,节约能源。

4 结论

通过 Ansys 对带捏合块的渐加速型单螺杆的三维流场分析以及实验验证,可以准确地模拟出物料在新型螺杆中的运动状态。与传统单螺杆相比,新型螺杆中所添加的加速混合段和加速输送段,通过高速旋转的捏合块使得物料充分混合并缩短了物料在螺杆中的停留时间,使得物料在得以充分混合的情况下又可以迅速被充分挤出,与传统的挤压膨化机相比,带有新型螺杆的挤压膨化机在相同时间和转速内可以提高 20%~25% 的产量。但是对于加速剪切段和加速输送段的长度和在螺杆中的选择位置,以及对于是否可以应用到更多种类的螺杆挤出机中,还需要进一步的探索。

参考文献

[1] 郭树国, 张召, 王丽艳. 基于 ANSYS 的豆粕双螺杆膨化机的三维流场分析[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 213-216, 240.
GUO S G, ZHANG Z, WANG L Y. Three-dimensional flow field analysis of soybean meal twin-screw extruder based on ANSYS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(6): 213-216, 240.

(下转第 90 页)

- Engineering, 2021, 57(6): 26-51.
- [2] 张杰, 郝明涛, 江保全, 等. 具有典型结构压力容器的疲劳分析设计[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(2): 5-10, 21.
ZHANG J, HAO M T, JIANG B Q, et al. Fatigue analysis and design of pressure vessel with typical structure[J]. Petro-Chemical Equipment, 2021, 24(2): 5-10, 21.
- [3] 张振华, 史建新, 李小龙, 等. 增压锅炉冷态启动过程中耦合应力及疲劳分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(7): 997-1 002.
ZHANG Z H, SHI J X, LI X L, et al. Coupling stress and fatigue analysis during cold start-up of the supercharged boiler[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(7): 997-1 002.
- [4] NEWMAN J C, RAJU I S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1976, 15(1/2): 185-192.
- [5] 谢阳, 龙伟, 赵波, 等. 压力容器疲劳加载下埋藏裂纹扩展规律的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(2): 149-154.
XIE Y, LONG W, ZHAO B, et al. Research on embedded crack propagation law of pressure vessel under fatigue loading[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2021, 58(2): 149-154.
- [6] SUSMIKANTI M, HIMAWAN R, HARTINI E, et al. Analysis of 3d semi-elliptical crack on reactor pressure vessel wall with load stress and crack ratio[J]. Journal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, 2019, 21(1): 33-38.
- [7] 杨玉强, 李张治, 李德雨, 等. 基于 ANSYS 含体积型缺陷波纹管疲劳寿命研究[J]. 压力容器, 2020, 37(11): 33-38, 64, 69.
YANG Y Q, LI Z Z, LI D Y, et al. Research on fatigue life of bellows containing volumetric defects based on ANSYS[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(11): 33-38, 64, 69.
- [8] WU E, ZHAO Y, ZHAO B, et al. Fatigue life prediction and verification of high-pressure hydrogen storage vessel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(59): 30 412-30 422.
- [9] LIU K T, HUANG M, LIN J J, et al. The effects of thermal stress on the crack propagation in AP1000 reactor pressure vessel [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 110: 102798.
- [10] 李荆礼, 张丽梅, 吴丹, 等. 有裂纹立式杀菌锅的力学特性与可靠性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 109-113, 161.
LI J L, ZHANG L M, WU D, et al. Study of mechanical characteristics and reliability on cracked vertical retort[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 109-113, 161.
- [11] AINSWORTH R A, ZERBST U. Review on fracture and crack propagation in weldments: A fracture mechanics perspective[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 132(2): 200-276.
- [12] 邱海飞, 韩斌斌. 模具用弓形架结构拓扑优化及疲劳分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 99-103.
QIU H F, HAN B B. Topology optimization and fatigue analysis of bow frame for die[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 99-103.
- [13] PARIS P. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.
- [14] 赵少汴. 抗疲劳设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 266.
ZHAO S B. Fatigue design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 266.
-
- (上接第 84 页)
- [2] 刘睿. 螺杆挤出机优化设计的现状[J]. 塑料科技, 2016, 44(3): 85-88.
LIU R. Present situation of optimal design of screw extruder[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(3): 85-88.
- [3] 黄志刚, 刘凯, 付晓宇, 等. 单螺杆挤出机固体输送段的优化设计[J]. 中国塑料, 2014, 28(11): 104-107.
HUANG Z G, LIU K, FU X Y, et al. Optimization design of single-screw extrusion mechanism on the solid conveying section[J]. China Plastics, 2014, 28(11): 104-107.
- [4] 王华峰, 周才根. 多螺杆挤出机的研究与应用[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(9): 85-88.
WANG H F, ZHOU C G. The research and application of multi-screw extruders[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(9): 85-88.
- [5] 陈怡, 刘廷华. 多螺杆挤出机的开发与应用进展[J]. 中国塑料, 2004(6): 29-32.
CHEN Y, LIU Y H. The development and application progress of multiple-screw extruders[J]. China Plastics, 2004(6): 29-32.
- [6] 郭树国, 于森, 王丽艳, 等. 带有开槽中性捏合块和反向螺纹双螺杆挤出机的三维流场分析[J]. 沈阳化工大学学报, 2020, 34(4): 358-362.
GUO S G, YU M, WANG L Y, et al. Three dimensional flow field analysis of twin screw extruder with slotted neutral kneading block and reverse thread[J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2020, 34(4): 358-362.
- [7] 潘龙, 张玉霞, 金志明, 等. 单螺杆挤出机高速挤出技术研究进展[J]. 中国塑料, 2009, 23(8): 1-6.
PAN L, ZHANG Y X, JING Z M, et al. technological progress in high speed extrusion of single-screw extruders[J]. China Plastics, 2009, 23(8): 1-6.
- [8] 黄元昌. 单螺杆挤出机混炼效果[J]. 橡塑技术与装备, 2014, 40(6): 37-39.
HUANG Y C. Mixing effect of single-screw extruder[J]. Plastics Technology and Equipment, 2014, 40(6): 37-39.
- [9] 汤霖森, 郭树国, 王丽艳. 基于 ANSYS 的带行星轮同轴变速单螺杆挤出机三维流场分析 [J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 107-110.
TANG L S, GUO S G, WANG L Y. Three-dimensional flow field analysis of coaxial variable speed single screw extruder with planetary gears based on ANSYS[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 107-110.