

工艺·设备

制备再生橡胶的单螺杆挤出机喂料段 流场分析及结构参数优化

李成宇¹, 吕晓龙², 吕柏源¹

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 青岛科技大学 中德科技学院, 山东 青岛 266061)

摘要:利用有限元分析软件Fluent分析制备再生橡胶的单螺杆挤出机喂料段螺槽深度(H)、螺杆导程(S)和螺棱宽度(e)对物料输送效率的影响。通过正交试验和单因素试验,优化设计出单螺杆挤出机喂料段的 H 为27 mm, S 为170 mm, e 为9.0 mm,优化设计后的单螺杆挤出机喂料段物料流动速度加快,输送效率提高。该研究结果可以用来指导制备再生橡胶的单螺杆挤出机喂料段设计。

关键词:再生橡胶;单螺杆挤出机;喂料段;结构参数;输送效率;流场分析;优化设计

中图分类号:TQ330.4⁺4

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2023)01-0056-06

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.01.0056



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

螺杆挤出机是橡胶加工的重要设备,广泛应用于轮胎、胶管、密封胶条、电线电缆等橡胶制品以及再生橡胶的制造。其中,螺杆是核心部件,对挤出机的性能起着决定性作用^[1-5]。在单螺杆挤出机挤出制备再生橡胶的过程中,喂料段十分重要,在很大程度上影响着再生橡胶的产量和生产效率^[6-9]。喂料段螺杆设计过程中,影响生产效率的参数主要有螺槽深度(H)、螺杆导程(S)和螺棱宽度(e)。

本工作采用有限元分析软件Fluent对 $\Phi 150$ mm单螺杆挤出机喂料段进行流场分析和结构参数优化,研究 H 、 S 和 e 对物料流动行为和流动速度的影响,比较各模拟结果并得到各参数对喂料段输送效率的影响,为优化制备再生橡胶的单螺杆挤出机喂料段结构提供参考。

1 建立模型

1.1 几何模型

本工作基于的单螺杆销钉挤出机制备再生橡胶所用的模型,喂料段螺杆采用等距等深,长径比为4(螺杆直径和长度分别为150和600 mm),通过改变 H 、 S 和 e 模拟物料最大流动速度,并讨论这3个参数对喂料段输送效率的影响。

单螺杆喂料段几何模型如图1所示。

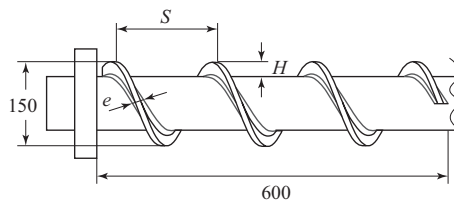


图1 单螺杆喂料段模型

Fig. 1 Model of single screw feeding section

作者简介:李成宇(1998—),男,黑龙江佳木斯人,青岛科技大学在读硕士研究生,主要从事高分子材料加工技术与设备的研究。

E-mail:275658282@qq.com

引用本文:李成宇,吕晓龙,吕柏源.制备再生橡胶的单螺杆挤出机喂料段流场分析及结构参数优化[J].橡胶工业,2023,70(1):56-61.

Citation:LI Chengyu, LYU Xiaolong, LYU Baiyuan. Flow field analysis and structural parameter optimization of feed section in single screw extruder for preparing reclaimed rubber[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(1): 56-61.

1.2 数学模型

在进行流场模拟计算时,因考虑到流场几何形状、物料性质、流动状态和加工条件等因素造成的流场复杂性,同时流场物料流动过程需满足工程的近似要求,做基本假设如下^[10-12]:

- (1) 聚合物为非牛顿流体;
- (2) 聚合物熔体为紊流流动;
- (3) 忽略惯性力和重力的影响;
- (4) 聚合物在流道中全部充满。

描述流场连续性方程、运动方程和能量方程为

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau = 0 \quad (2)$$

$$\tau = 2\eta(\dot{\gamma})D \quad (3)$$

式中, v 为物料流动速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), p 为压力(Pa), τ 为应力张量(Pa), $\eta(\dot{\gamma})$ 为剪切速率作用粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), D 为形变速率张量(s^{-1})。

为既能描述在高剪切速率下假塑性流体的流变性质,又可描述在低剪切速率下牛顿流体的流变性质,选用Carreau模型表征 $\eta(\dot{\gamma})$:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + \lambda(\dot{\gamma})^2]^{n-1/2} \quad (4)$$

式中, η_{∞} 为物料无穷剪切粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), η_0 为零剪切速率时的粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), λ 为粘弹性特征时间(s), n 为非牛顿指数。

1.3 网格划分

本工作模型采用智能网格划分,同时使用线尺寸控制单元格大小,并对必要位置进行网格加密,以达到均匀划分网格和提高计算精度的目的^[13]。喂料段流体域网格实体模型如图2所示。

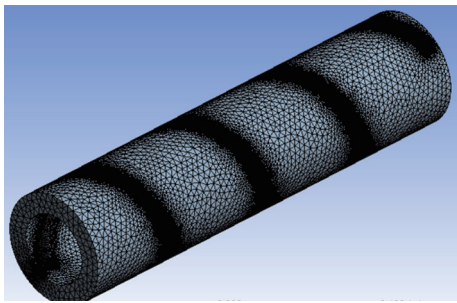


图2 喂料段流体域网格实体模型

Fig. 2 Solid model of fluid domain of feeding section

1.4 边界条件确定

物料与机筒内表面为无滑移边界,即相对于

机筒内表面与机筒内表面接触的物料流动速度为零,且与螺槽底部和螺棱侧面分别接触的物料随螺杆作圆周运动^[14-15]。螺杆表面转速随螺杆转速的变化而变化,假定螺杆转速为 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2 模拟结果分析

2.1 H对喂料段输送效率的影响

在 e 和 S 分别取10.5和180 mm的条件下,采用数值模拟方法分析 H 对单螺杆挤出机喂料段输送效率的影响, H 变化范围以 $H \approx (0.125 \sim 0.170)d^{[7]}$ (d 为螺杆直径)为基础进行计算设定。图3为 H 取不同值时单螺杆挤出机喂料段流场流动速度矢量图。

从图3可以看出:随着 H 的增大,喂料段流场流动速度分布规律变化不大;当 H 取27 mm时物料平均流动速度为 $0.293 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当 H 取30 mm时物料平均流动速度为 $0.272 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当 H 取33 mm时物料平均流动速度为 $0.245 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;随着 H 的增大,流场内物料最大流动速度减小,喂料段输送效率降低。

2.2 S对喂料段输送效率的影响

在 e 和 H 分别取10.5和27 mm的条件下,采用数值模拟方法分析 S 对单螺杆挤出机喂料段输送效率的影响, S 变化范围以 $S = \pi d \tan \theta$ ($\theta \approx 17^\circ \sim 22^\circ$)^[7]为基础进行计算设定。图4为 S 取不同值时单螺杆挤出机喂料段流场流动速度矢量图。

从图4可以看出:随着 S 的增大,喂料段流场流动速度分布规律变化不大;当 S 取170 mm时物料平均流动速度为 $0.305 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当 S 取180 mm时物料平均流动速度为 $0.293 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当 S 取190 mm时物料平均流动速度为 $0.279 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;随着 S 的增大,流场内物料最大流动速度减小,喂料段输送效率下降。

2.3 e对喂料段输送效率的影响

在 S 和 H 分别取170和27 mm的条件下,采用数值模拟方法分析 e 对单螺杆挤出机喂料段输送效率的影响, e 变化范围以 $e = (0.06 \sim 0.08)d^{[7]}$ 为基础进行计算设定。图5为 e 取不同值时单螺杆挤出机喂料段流场流动速度矢量图。

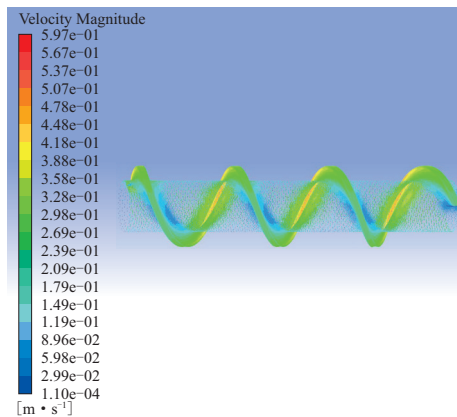
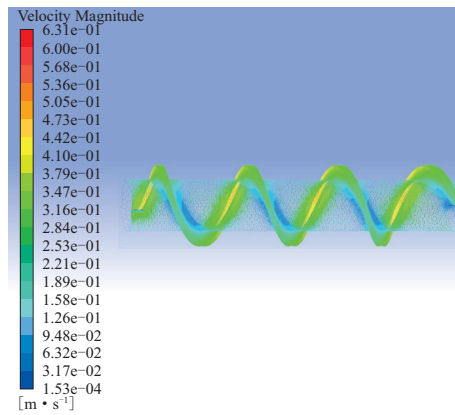
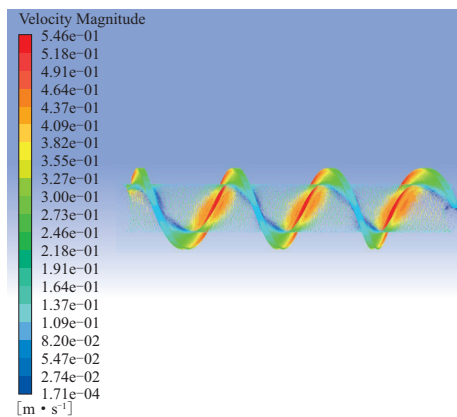
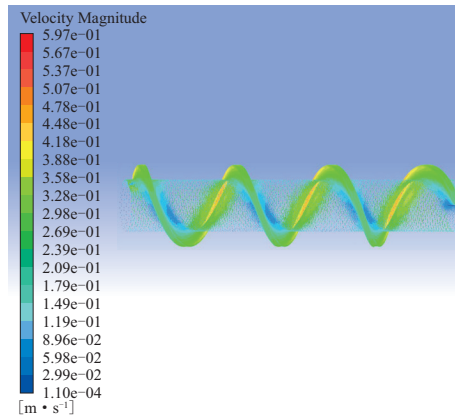
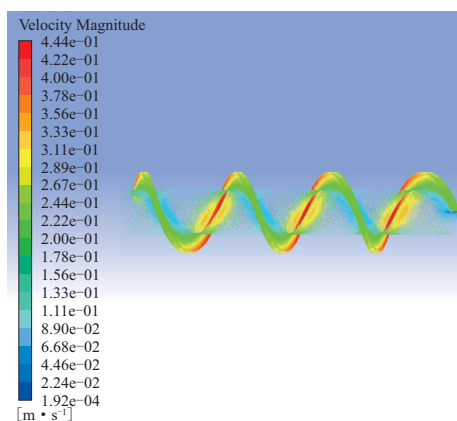
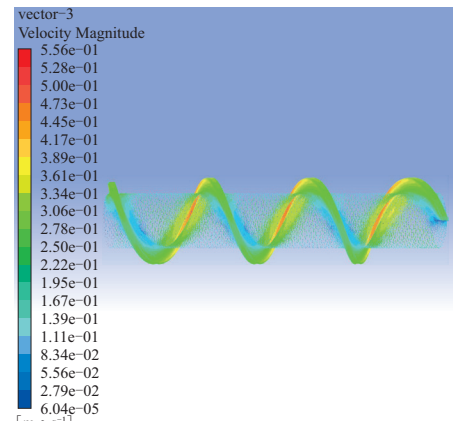
(a) $H=27$ mm(a) $S=170$ mm(b) $H=30$ mm(b) $S=180$ mm(c) $H=33$ mm(c) $S=190$ mm

图3 H 取不同值时单螺杆挤出机喂料段
流场流动速度矢量图

Fig. 3 Flow velocity vector diagrams of flow field of
feeding section in single screw extruder with
different values of H

从图5可以看出:随着 e 的增大,喂料段流场流动速度分布规律变化不大;当 e 取9.0 mm时物料平均流动速度为 $0.309 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当 e 取10.5 mm时物料

图4 S 取不同值时单螺杆挤出机喂料段
流场流动速度矢量图

Fig. 4 Flow velocity vector diagrams of flow field of
feeding section in single screw extruder with
different values of S

平均流动速度为 $0.305 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当 e 取12.0 mm时物料平均流动速度为 $0.307 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,即随着 e 的增大,流场内物料流动变化并不明显。

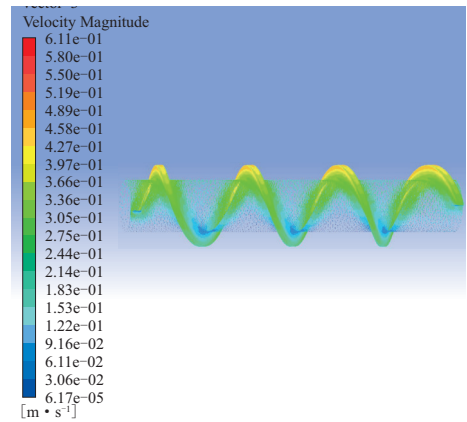
3 结构参数优化

3.1 正交试验

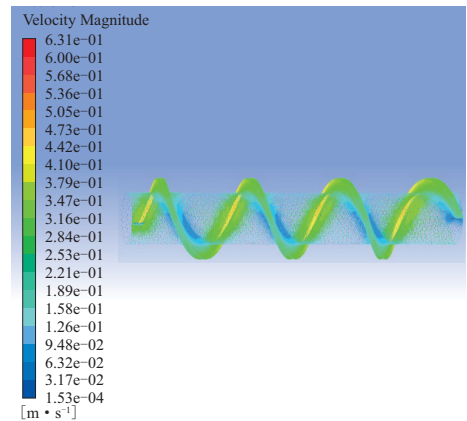
采用正交试验方法^[16-17]对挤出机喂料段结构

参数进行优化,正交试验参数设计如表1所示。

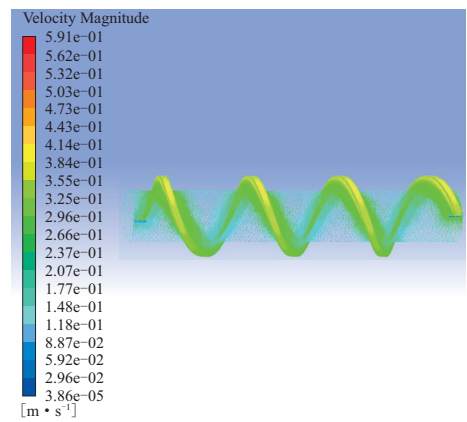
表1 正交试验参数设计				
Tab.1 Design of orthogonal experimental parameters				
试验方案	<i>H</i> /mm	<i>S</i> /mm	<i>e</i> /mm	物料平均流动速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	27	170	9.0	0.309
2	27	180	10.5	0.293
3	27	190	12.0	0.278
4	30	170	10.5	0.289
5	30	180	12.0	0.274
6	30	190	9.0	0.263
7	33	170	12.0	0.254
8	33	180	9.0	0.243
9	33	190	10.5	0.231



(a) $e=9.0\text{ mm}$



(b) $e=10.5\text{ mm}$



(c) $e=12.0\text{ mm}$

图5 e 取不同值时单螺杆挤出机喂料段
流场流动速度矢量图

Fig.5 Flow velocity vector diagrams of flow field of
feeding section in single screw extruder with
different values of e

3.2 单因素试验

以正交试验方案1为基础,确定 H 为27 mm和 S 为170 mm,改变 e 的取值,得出物料平均流动速度随着 e 变化的曲线如图6所示;确定 H 为27 mm和 e 为9.0 mm,改变 S 的取值,得出物料平均流动速度随着 S 变化的曲线如图7所示;确定 S 为170 mm和 e 为9.0 mm,改变 H 的取值,得出物料平均流动速度随着 H 变化的曲线如图8所示。

3.3 优化结果

在选择最优方案时,物料流动速度是考察喂料段输送效率的最主要因素。

从图6—8可以看出, H 和 S 对喂料段输送效率影响较大, e 对物料流动速度影响不大。考虑到螺槽有效输送容积, e 应较小为好。当 H 、 S 和 e 分别取值为27、170和9.0 mm时,喂料段输送效率较大。

4 结论

采用有限元分析软件Fluent,对制备再生橡胶

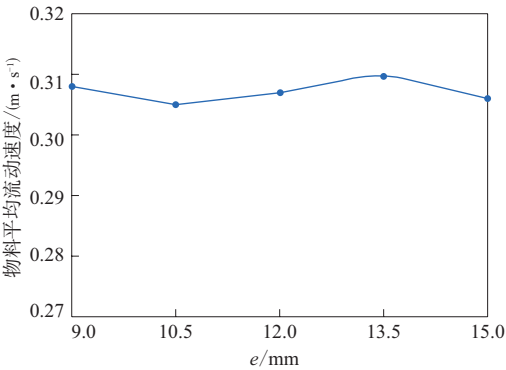
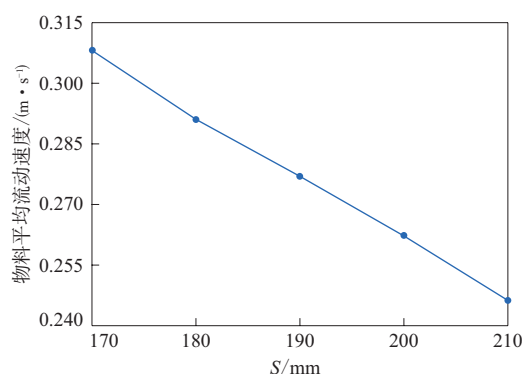
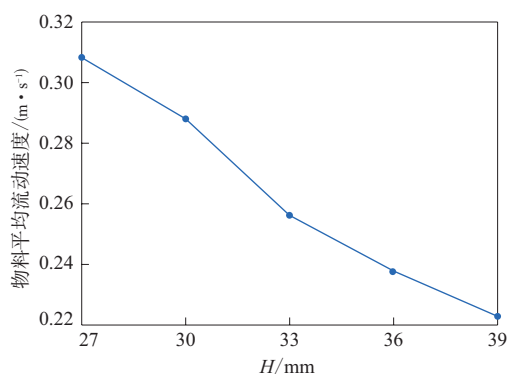


图6 物料的平均流动速度随着 e 变化的曲线
Fig.6 Curve of average flow velocities of material with e

图7 物料的平均流动速度随着 S 变化的曲线Fig. 7 Curve of average flow velocities of material with S 图8 物料的平均流动速度随着 H 变化的曲线Fig. 8 Curve of average flow velocities of material with H

的 $\Phi 150$ 单螺杆挤出机喂料段三维流场进行模拟,可得出以下结论。

(1) H 对喂料段输送效率影响较大,随着 H 的增大,流场内物料平均流动速度减小,喂料段输送效率下降;随着 S 的增大,流场内物料平均流动速度减小,喂料段输送率下降;随着 e 的增大,流场内物料平均流动速度变化并不明显,但为了增大螺槽有效输送容积,在保证其强度和刚度的前提下,应尽可能减小 e 。

(2) 采用正交试验法,得出单螺杆挤出机喂料段优化结构参数为: H 27 mm, S 170 mm, e 9.0 mm。采用该优化设计的单螺杆挤出机可提高再生橡胶的生产效率。

参考文献:

- [1] 吕柏源,郑晓斐,闵鹏峰,等. 橡胶挤出机螺杆构型分析及其几何参数的确定(上)[J]. 橡塑技术与装备, 2011, 37(10): 18-24.
- LYU B Y, ZHENG X F, MIN P F, et al. Configuration analysis and geometric parameters determination of rubber extruder screw (Part

one)[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2011, 37(10): 18-24.

- [2] 吕晓龙. 单螺杆挤出脱硫制备再生胶及其结构与性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [3] 杨晓彤. 脱硫胶粉螺杆挤出机内连续精炼挤出流场模拟与实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [4] 刘有山. 螺杆挤出方法制备再生胶的工艺及螺杆优化[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [5] 蒋欣. 单螺杆挤出机螺杆的设计与改进[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(20): 72-74, 78.
- JIANG X. Design and improvement of screw of single screw extruder[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(20): 72-74, 78.
- [6] 吕炜帅, 刘红彬. 挤出机喂料段动态流场分析[J]. 轮胎工业, 2015, 35(1): 50-56.
- LYU W S, LIU H B. Analysis of dynamic flow field in feeding zone of extruder[J]. Tire Industry, 2015, 35(1): 50-56.
- [7] 范之海, 宋广军, 吕贤滨, 等. 橡胶冷喂料挤出机螺杆结构几何参数分析与选择[J]. 橡塑技术与装备, 2011, 37(1): 5-11.
- FAN Z H, SONG G J, LYU X B, et al. Analysis and selection of geometrical parameters of cold feed extruder screw[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2011, 37(1): 5-11.
- [8] 刘彦昌, 于芳, 马冲, 等. 冷喂料橡胶挤出机的喂料行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(10): 103-108.
- LIU Y C, YU F, MA C, et al. Feeding behaviour of cold-feed rubber extruders[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(10): 103-108.
- [9] 艾罡. $\Phi 90$ 机筒销钉式冷喂料橡胶挤出机的设计[J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(1): 32-36.
- AI G. Design of $\Phi 90$ barrel pin type cold feeding rubber extruder[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2020, 46(1): 32-36.
- [10] 钱欣, 许王定, 金杨福. POLYFLOW基础及其在塑料加工中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [11] XU B P, HE L, WANG M G, et al. Numerical simulation of chaotic mixing in single screw extruders with different baffle heights[J]. International Polymer Processing, 2016, 31(1): 108-118.
- [12] 吕炜帅. 橡胶挤出机喂料装置有限元分析与优化[J]. 轻工科技, 2019, 35(5): 42-43, 47.
- LYU W S. Finite element analysis and optimization of feeding device of rubber extruder[J]. Light Industry Science and Technology, 2019, 35(5): 42-43, 47.
- [13] 刘浩. ANSYS15.0有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [14] KIM S J. Dimensionless analysis of three-dimensional residence time distribution in single-screw extrusion processes[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2018, 30(3): 179-188.

- [15] 王贺祥, 彭炯, 葛震, 等. 双螺杆挤出过程数值模拟研究进展[J]. 中国塑料, 2020, 34(9): 96-102.
WANG H X, PENG J, GE Z, et al. Research progress in numerical simulation of twin screw extrusion process[J]. China Plastics, 2020, 34(9): 96-102.
- [16] WANG J, GONG Y G, LIU D S, et al. Optimization of staggered tooth of sleeper molds based on FEM[C]. Proceedings of Advanced Polymer Processing International Forum. Qingdao, China, 2012: 234-238.
- [17] 覃清仪, 范希营, 曹艳丽, 等. 基于正交试验的注塑成型质量多目标影响因素研究[J]. 中国塑料, 2020, 48(10): 17-20.
QIN Q Y, FAN X Y, CAO Y L, et al. Research on multi-objective influencing factors of injection molding quality based on orthogonal experiment[J]. China Plastics, 2020, 48(10): 17-20.

收稿日期: 2022-07-24

Flow Field Analysis and Structural Parameter Optimization of Feed Section in Single Screw Extruder for Preparing Reclaimed Rubber

LI Chengyu, LYU Xiaolong, LYU Baiyuan

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The effects of the screw groove depth (H), screw lead (S) and screw edge width (e) of the feeding section in the single screw extruder for preparing reclaimed rubber on the material conveying efficiency were analyzed by using finite element analysis software Fluent. Through orthogonal test and single factor test, the H , S and e of the feeding section were optimized to 27 mm, 170 mm and 9.0 mm, respectively. The optimized single screw extruder could speed up the material flow of the feeding section and improve the conveying efficiency. The research results could be used to guide the design of the feeding section of single screw extruder for preparing reclaimed rubber.

Key words: reclaimed rubber; single screw extruder; feeding section; structural parameter; conveying efficiency; flow field analysis; optimal design

专利2则

由深圳合丰橡胶制品有限公司申请的专利(公布号 CN 114251400A, 公布日期 2022-03-29)“一种用于汽车悬架的高密封高耐磨减震用橡胶衬套”, 涉及的橡胶衬套包含两个主撑板, 两个主撑板相向面的前后两端均活动连接有两个副撑板, 两个主撑板的外表面活动套接有密封套, 密封套外表面的顶部活动套接有密封垫, 密封套的顶部螺纹套接有密封盖, 密封盖的底部与密封垫的顶部活动连接。在密封套与密封盖的配合下可以对橡胶衬套内部结构进行密封, 从而使其具有良好的密封效果; 在密封垫的作用下可以提高密封套与密封盖之间的密封性能, 从而进一步提高对内部主撑板和副撑板的密封效果。

由西北化工研究院有限公司申请的专利(公布号 CN 114230735A, 公布日期 2022-03-

25)“苯乙烯-异戊二烯-丁二烯三元集成橡胶乳液接枝共聚物的制备方法及应用”, 提供了苯乙烯-异戊二烯-丁二烯三元集成橡胶乳液接枝共聚物的制备方法: (1) 采用种子乳液聚合法先聚合制备三元共聚物种子乳液, 然后聚合制备苯乙烯-异戊二烯-丁二烯三元共聚物集成胶乳; (2) 采用乳液接枝法先进行聚合反应, 经过滤、凝聚和真空干燥得到苯乙烯-异戊二烯-丁二烯三元集成橡胶乳液接枝共聚物。本发明采用两阶段的种子乳液聚合法制备苯乙烯-异戊二烯-丁二烯三元共聚物集成胶乳, 通过控制聚合过程实现了对苯乙烯-异戊二烯-丁二烯三元共聚物集成胶乳的尺寸和分布的控制, 由接枝聚合得到的苯乙烯-异戊二烯-丁二烯三元集成橡胶乳液接枝共聚物作为ABS树脂的原料, 提高了ABS树脂的拉伸强度和抗冲击强度。

(本刊编辑部 赵 敏)