

工艺·设备

## 注射成型模具中胶料沿流道压力损失的研究

曹广如<sup>1</sup>,李勇<sup>1</sup>,雷军玉<sup>2</sup>,李斌<sup>1</sup>,林胜<sup>1</sup>,刘文松<sup>2</sup>

(1. 株洲时代瑞唯减振装备有限公司,湖南 株洲 412007;2. 株洲时代新材料科技股份有限公司,湖南 株洲 412007)

**摘要:**对注射成型模具中胶料沿流道压力损失(简称胶料压力损失)进行研究。结果表明:胶料压力损失与胶料注射速度、胶料温度、流道长度、流道截面参数及胶料流变参数有关;在特定工艺参数(注射压力120 MPa、注射时间60 s、塑化温度70 ℃、模具温度160 ℃、注胶量220 mL)下,每经过10 mm流道长度,胶料压力损失为0.649 MPa;注射过程中胶料压力损失实测值小于理论计算值,稳定后的胶料压力损失误差在8 MPa内;胶料压力损失对胶料注射时间、塑化温度、模具温度较为敏感,注射时间越短,胶料压力损失越大,塑化温度、模具温度越高,胶料压力损失越小。

**关键词:**注射成型模具;胶料压力损失;工艺参数;理论计算;实测

**中图分类号:**TQ330.4<sup>+1</sup>

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-890X(2023)08-0621-06

**DOI:**10.12136/j.issn.1000-890X.2023.08.0621



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

与胶料模压成型和压铸成型相比,胶料注射成型在生产效率、自动化、节约胶料和提高产品质量等方面具有显著的优势<sup>[1-6]</sup>。但胶料注射成型是一个复杂的过程,大量工艺因素如胶料注射压力、胶料温度、充模速度、流道结构等对模具型腔(简称模腔)中胶料压力有不同程度的影响<sup>[7-11]</sup>,从而对橡胶制品性能产生不同程度的影响。因此,模腔中胶料压力已成为影响橡胶制品性能的重要因素和整个注射过程中的重要反馈信息,是胶料注射成型中重要的工艺参数<sup>[12-13]</sup>。

很多学者对注射成型模腔中胶料压力进行了研究。安琪等<sup>[14-15]</sup>借鉴塑料熔融注射技术,研究了胶料粘弹性引起的注射成型模腔入口附加压力降和模腔壁面滑移对充模过程的影响,建立了薄矩形模腔中胶料充模流动的数学模型,对注射成型模腔中胶料压力变化进行了试验研究。1988年,A. I. ISAYEV等<sup>[16]</sup>开发了模拟薄层橡

胶零件胶料注射充模和硫化的程序,测得的模腔中胶料压力与模拟值具有良好的一致性。1996年,A. I. ISAYEV等<sup>[17-18]</sup>通过研究发现实测与预测的注射成型模腔中胶料压力损失及硫化程度吻合,同时提出一种模拟模腔充填的新方法,发现预测与实测的胶料压力轨迹具有良好的一致性。1998年,A. I. ISAYEV等<sup>[19]</sup>又将胶料流变特性引入注射成型仿真中以提高分析质量。A. ARRILLAGA等<sup>[20]</sup>利用Moldflow软件对注射成型模具螺旋形模腔中胶料压力变化进行模拟,并对充模后期浇口附近的胶料压力衰减现象进行了分析。

目前的研究大多是对注射成型模腔中胶料压力的影响因素进行仿真分析,对注射成型模具中胶料沿流道压力损失(简称胶料压力损失)的理论计算涉及很少。因此,本工作针对胶料压力损失进行研究,为胶料注射成型模具设计及工艺参数

**基金项目:**湖南省科技成果转化与产业化项目(2020GK4062)

**作者简介:**曹广如(1984—),男,山东临沂人,株洲时代瑞唯减振装备有限公司高级工程师,硕士,主要从事橡胶减振制品的工艺研究和管理工作。

**E-mail:**1073769330@qq.com

**引用本文:**曹广如,李勇,雷军玉,等.注射成型模具中胶料沿流道压力损失的研究[J].橡胶工业,2023,70(8):621-626.

**Citation:** CAO Guangru, LI Yong, LEI Junyu, et al. Study on pressure loss of compound along runner in injection molding mold[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(8): 621-626.

选择提供指导。

## 1 胶料压力损失的理论计算模型

结合塑料流变学设计理论和文献<sup>[21-22]</sup>建立了胶料压力损失的理论计算公式。

流经一定长度圆形流道的胶料压力损失( $P_L$ )为:

$$P_L = \left(Q \frac{3n+1}{\pi n}\right)^n \frac{2KL}{R^{3n+1}} \left[1 + c \left(\frac{v}{L}\right)^m f\right] \quad (1)$$

其中

$$K = Ae^{-E/R_1T} \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{\sigma + 1} \quad (3)$$

$$\sigma = b \left(\frac{v}{L}\right)^m \quad (4)$$

式中, $Q$ 为胶料体积流量, $n$ 为非牛顿指数, $K$ 为胶料熔体稠度系数, $L$ 为流道长度, $R$ 为圆形流道半径, $v$ 为胶料平均流动速度, $c$ 、 $b$ 和 $m$ 为胶料粘弹性能表征参数, $A$ 为指前因子, $E$ 为表观活化能, $R_1$ 为理想气体常数, $T$ 为胶料温度。

流经一定长度矩形流道(宽度和高度分别为 $W$ 和 $2h$ )的胶料压力损失为:

$$P_L = \left(Q \frac{2n+1}{2Wn}\right)^n \frac{2KL}{h^{2n+1}} \left[1 + c \left(\frac{v}{L}\right)^m f\right] \quad (5)$$

从式(1)~(5)可以得出,胶料压力损失与胶料注射速度、胶料温度、流道长度、流道截面参数和胶料流变参数有关。

## 2 实验

### 2.1 注射模型

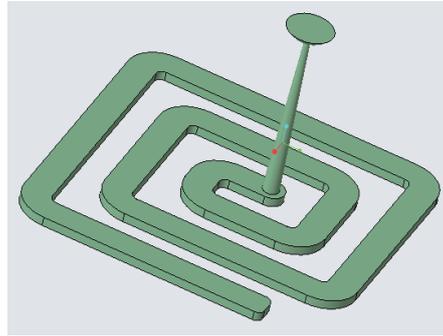
注射模型如图1所示。本工作胶料体积为 $161.8 \text{ cm}^3$ ,选取位置1,2,3记录注射过程中胶料压力。

针对等截面矩形流道,本工作胶料流经一定当量流道长度(包含直线流道长度和非直线流道长度,如 $90^\circ$ 转向处)时产生的压力损失( $\Delta P$ )可简化表示为:

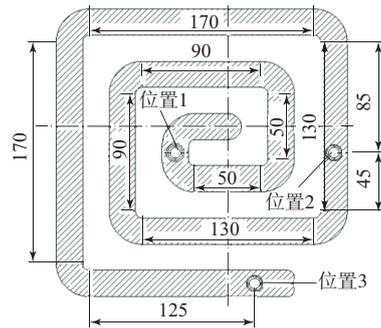
$$\Delta P = f(t, T) L_1 = \eta L_1 \quad (6)$$

式中: $t$ 为胶料注射时间; $T$ 为胶料温度; $\eta$ 是 $t$ 和 $T$ 的函数; $L_1$ 代表当量流道长度,对于 $90^\circ$ 转向的流道,其 $L_1$ 等于 $2d_e$ ( $d_e$ 为当量直径)。

本工作试验模型中流道拐弯处的当量流道长



(a) 胶料充填模型



(b) 胶料压力计算位置

图1 注射模型

Fig. 1 Injection model

度为:

$$L_1 = 2d_e = 2.47 \text{ cm} \quad (7)$$

### 2.2 原材料

天然橡胶(NR),马来西亚产品;高耐磨炭黑,天津海豚炭黑有限公司产品;胶粘剂(底胶CH205和面胶CH6108),洛德化学(上海)有限公司产品;金属骨架(铁件),株洲时代新材料科技股份有限公司产品;其他材料,市售品。

### 2.3 主要设备与仪器

K4型密炼机,英国法雷尔公司产品;XK-450型开炼机,宜兴阳昇机械有限公司产品;600T型注射硫化机,衡阳华意机械有限公司产品;PT124B-128-M14-27.5/460型熔融压力传感器,上海朝辉压力仪器有限公司产品;CSS-55100型电子万能试验机,长春试验机研究所有限公司产品;毛细管流变仪,德国高特福公司产品。

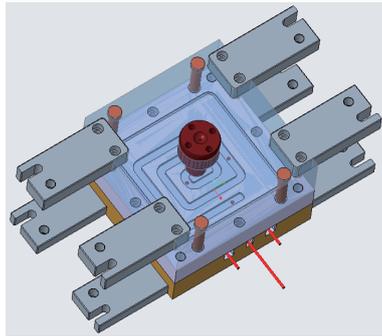
### 2.4 胶料配方

胶料配方(用量/份)为:NR 100,高耐磨炭黑 26,改性剂 3,氧化锌 8,硬脂酸 2,防老剂4010NA 1.8,防老剂RD 1.5,不溶性硫黄

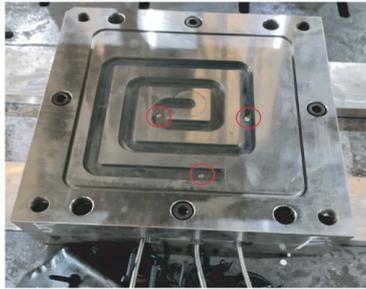
2.5,促进剂CBS 2,促进剂DPG 0.3,其他 2。

### 2.5 试验方法

根据试验模型进行模具的三维建模和加工,并在流道3个位置预埋压力传感器(分别为传感器1,2和3),传感器量程均为0~150 MPa,最大误差均为0.75 MPa。注射成型模具及传感器安装位置如图2所示。



(a) 模具的三维造型



(b) 模具实物及传感器安装位置

图2 注射成型模具及传感器安装位置  
Fig.2 Injection molding mold and installation places of sensors

按照注射压力120 MPa、注射时间60 s、塑化温度70 °C、模具温度160 °C、注胶量220 mL的工艺参数进行胶料注射试验,记录3个传感器处的胶料压力变化。

### 3 结果与讨论

采用毛细管流变仪测得本工作胶料在130和160 °C时的流变曲线,如图3所示。其中, $\tau$ 为胶料剪切应力, $\dot{\gamma}$ 为胶料剪切速率<sup>[23]</sup>。 $\tau$ 和 $\dot{\gamma}$ 的关系为:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (8)$$

式中, $k$ 为胶料流动常数。

在160 °C的胶料流变曲线上任取2个点,根据式(8)可得 $n$ 为0.15, $c$ , $b$ , $m$ 分别为18,21.9和1.2。

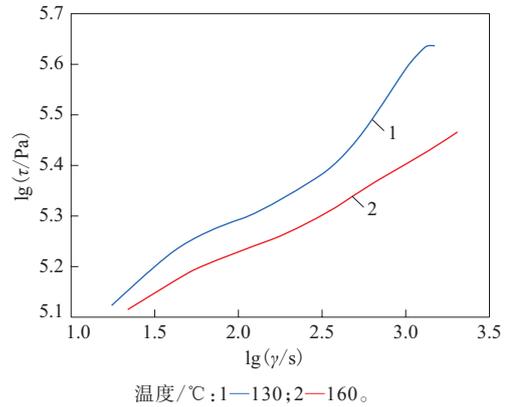


图3 不同温度下胶料流变曲线  
Fig.3 Rheological curves of compound under different temperatures

将各参数代入式(6)可得 $\eta$ 为0.649,即在注射模型中胶料压力损失可表示为:

$$\Delta P = 0.649L_i \quad (9)$$

即在注射压力120 MPa、注射时间60 s、塑化温度70 °C、模具温度160 °C、注胶量220 mL的工艺条件下,本工作胶料每经过10 mm流道长度的压力损失为0.649 MPa;同时,3个传感器之间的胶料压力损失为:胶料从位置1流经位置2( $L_1$ 为47 cm)的压力损失为30.5 MPa,从位置2流经位置3( $L_1$ 为55.75 cm)的压力损失为36.18 MPa。

试验测得3个传感器处的胶料压力变化曲线如图4所示。

从图4可以看出,在注射成型中,胶料在固态、熔融态和固态间变化,其中固态向熔融态的转变过程是体积膨胀变化,从熔融态到固态的转变过程是体积收缩变化,因此模腔中胶料充满后仍需

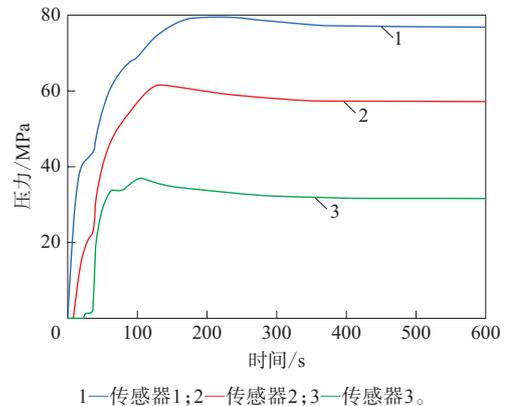


图4 传感器1,2,3处实测胶料压力变化曲线  
Fig.4 Pressure change curves of compound measured at sensors 1,2 and 3

要一定体积的胶料继续充填。

以传感器3为例,其胶料压力变化曲线放大图见图5。

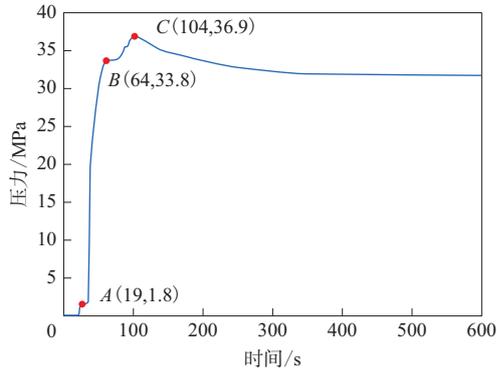
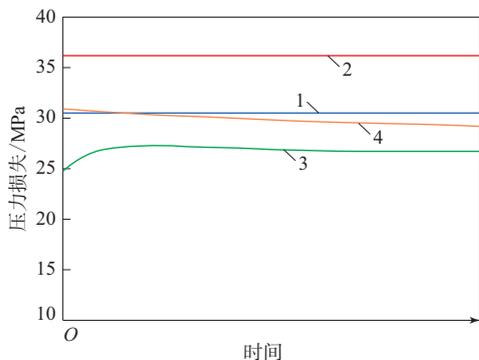


图5 传感器3处胶料压力变化曲线

Fig. 5 Pressure change curve of compound at sensor 3

从图5可以看出:胶料压力变化曲线的前面数据为0,表示胶料还没有流到传感器3;数据从0变化到A点时,表示胶料已经充满模腔;A-B段表示额外的胶料继续充填,此时胶料密度增大,压力急剧增大,同时在B点胶料注射完成并进行保压;B-C段表示一系列初期化学变化可能引起胶料体积膨胀进而使压力增大;C点以后胶料开始固化,胶料体积收缩,导致模腔中胶料压力缓慢降低并最终稳定。

胶料压力损失的理论计算曲线与实测曲线如图6所示。曲线1为从位置1(传感器1)到位置2(传感器2)的胶料压力损失曲线,曲线2为从位置2(传感器2)到位置3(传感器3)的胶料压力损失曲线。



1—理论计算曲线1;2—理论计算曲线2;3—实测曲线1;  
4—实测曲线2。

图6 胶料压力损失的理论计算曲线与实测曲线

Fig. 6 Theoretical calculation curves and measured curves of pressure losses of compound

从图6可以看出,注射过程中胶料压力损失实测值小于理论计算值,稳定后的压力损失误差在8 MPa内。这是因为理论计算中的参数选择与实际情况存在一定的误差,同时在硫化过程中相关化学反应使得胶料体积膨胀,从而在一定程度上对胶料压力损失进行了补偿。通过与试验对比,可以验证在误差允许范围内本工作前期理论模型的准确性。

为进一步研究工艺参数对胶料压力损失的影响,设置塑化温度、模具温度分别为70,150 °C和85,160 °C,然后在注射时间为50,55,60和70 s时进行试验。

不同工艺参数组合下3个传感器处实测胶料压力如图7所示。

从图7可以看出:在一定误差范围内,采用相同的注射压力,注射时间越短,胶料压力损失越大;塑化温度、模具温度越高,胶料压力损失越小。

#### 4 结论

(1) 胶料压力损失与胶料注射速度、胶料温度、流道长度、流道截面参数和胶料流变参数有关。

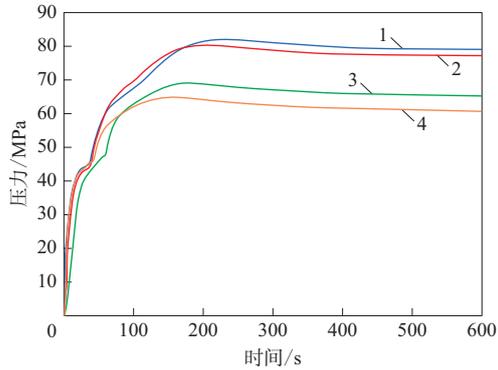
(2) 在注射压力120 MPa、注射时间60 s、塑化温度70 °C、模具温度160 °C、注胶量220 mL的工艺条件下,本工作胶料压力损失为 $\Delta P = 0.649L_1$ ,即每经过10 mm流道长度,胶料压力损失为0.649 MPa。

(3) 注射过程中胶料的压力损失实测值小于理论计算值,稳定后的胶料压力损失误差在8 MPa内。

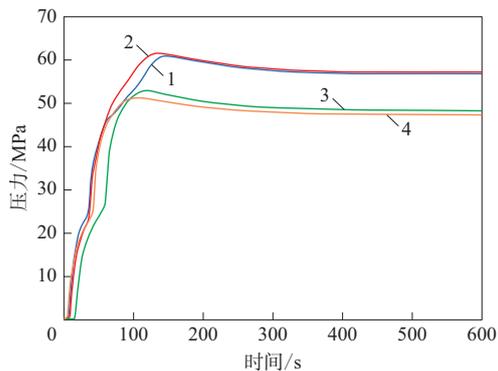
(4) 胶料压力损失对胶料注射时间、塑化温度、模具温度较为敏感,注射时间越短,胶料压力损失越大,塑化温度、模具温度越高,胶料压力损失越小。

#### 参考文献:

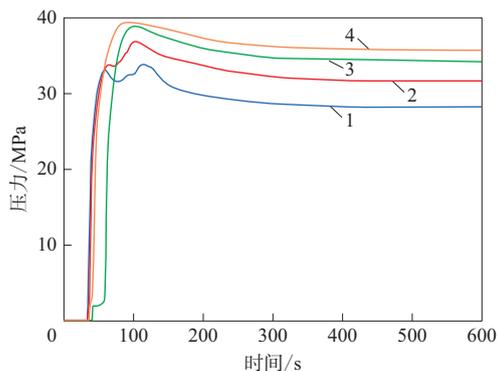
- [1] 黄亮亮,田星宇.热压铸成型工艺质量的影响因素探究[J].现代制造技术与装备,2019(12):141-142.  
HUANG L L, TIAN X Y. Study on the influencing factors of hot die casting process quality[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(12):141-142.
- [2] 刘莹.大尺寸异形橡胶密封件真空模压成型工艺研究[J].设备管



(a) 传感器1处



(b) 传感器2处



(c) 传感器3处

注射时间 (s) / 塑化温度 (°C) / 模具温度 (°C) : 1—55, 70, 150; 2—70, 70, 150; 3—60, 85, 160; 4—50, 85, 160。

图7 不同工艺参数组合下3个传感器处胶料压力  
Fig.7 Pressures of compound measured at three sensors under different process parameter combinations

理与维修, 2021 (10) : 18-20.

LIU Y. Study on vacuum molding process for large-sized irregular rubber seals[J]. Plant Maintenance Engineering, 2021 (10) : 18-20.

[3] 贾超, 徐甜, 方菊. 现代制造技术在胶料注射成型设备的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2018 (7) : 148-149, 151.

JIA C, XU T, FANG J. Application of modern manufacturing

technology in rubber injection molding equipment[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018 (7) : 148-149, 151.

[4] 赖锦柱. 自动化连续转射注射的胶料注射成型机[Z]. 广德: 磐石油压工业股份有限公司, 2019.

[5] 佚名. 一种快速散热型胶料注射成型机[J]. 橡塑技术与装备, 2021, 47 (11) : 64-65.  
Anon. A fast heat dissipation rubber injection molding machine[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2021, 47 (11) : 64-65.

[6] 冯丁飞. DS2005全自动小吨位橡胶注射机[Z]. 宁波: 宁波斗士油压有限公司, 2021.

[7] 陈明同, 姜晓妍, 赵羽劲, 等. 基于正交试验的高铁橡胶外风挡注射成型工艺参数优化[J]. 橡胶工业, 2021, 68 (3) : 168-174.

CHEN M T, JIANG X Y, ZHAO Y J, et al. Optimization on injection molding process parameters of rubber outer windshield for high-speed train based on orthogonal test[J]. China Rubber Industry, 2021, 68 (3) : 168-174.

[8] 焦冬梅, 李冬燕, 张涛, 等. 振动对橡胶注射流动的影响[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2021, 42 (1) : 93-98, 107.

JIAO D M, LI D Y, ZHANG T, et al. Effect of vibration on rubber injection flow[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42 (1) : 93-98, 107.

[9] 孙翌. 橡胶注射机注射系统的数值模拟及分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.

SUN Y. Numerical simulation and analysis of the injection system of a rubber injection machine[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022.

[10] 张屹, 侯明英, 陈亚楠, 等. 注射成型工艺对橡胶制品质量的影响[J]. 橡胶科技, 2021, 19 (9) : 448-451.

ZHANG Y, HOU M Y, CHEN Y N, et al. Influence of injection molding process on quality of rubber products[J]. Rubber Science and Technology, 2021, 19 (9) : 448-451.

[11] 李溪斌, 陈谦, 韩露, 等. 一步法注射成型胶料在机筒内的温度场分析[J]. 橡胶科技, 2019, 17 (4) : 214-219.

LI X B, CHEN Q, HAN L, et al. Temperature field analysis of one-step injection molding of compound in barrel[J]. Rubber Science and Technology, 2019, 17 (4) : 214-219.

[12] 王金荣. 基于模腔压力的微注塑制品质量表征方法研究[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2020.

WANG J R. Study on quality characterization method of micro injection molding products based on mold cavity pressure[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2020.

[13] 张丽青. RTM注胶树脂对铺层织物变形的影响研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.

ZHANG L Q. Study on the effect of RTM resin injection on the

- deformation of layered fabrics[D]. Tianjin: Tiangong University, 2021.
- [14] 安琪,程源. 橡胶注射充模过程的数值分析[J]. 合成橡胶工业, 1996,43(1):30-33.  
AN Y, CHENG Y. Numerical simulation of filling for injection molding of rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 1996, 43(1):30-33.
- [15] 程源,安琪,王定国. 橡胶注射过程中压力变化的研究[J]. 橡胶工业,1996,43(7):387-396.  
CHENG Y, AN Y, WANG D G. Study on pressure variation in rubber injection moulding[J]. China Rubber Industry, 1996, 43(7):387-396.
- [16] ISAYEV A I, SOBHANIE M, DENG J S. Two-dimensional simulation of injection molding of rubber compounds[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1988, 61(5):906-937.
- [17] ISAYEV A I, WAN M. Injection molding of rubber compound with rheology affected by vulcanization: Part I, Material characterization[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1996, 69(2):277-293.
- [18] WAN M, ISAYEV A I. Injection molding of rubber compound with rheology affected by vulcanization. Part II: Modeling and experiment[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1996, 69(2):294-312.
- [19] ISAYEV A I, WAN M. Injection molding of a natural rubber compound: Simulation and experimental studies[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1998, 71(5):1059-1072.
- [20] ARRILLAGA A, ZALDUA A M, ATXURRA R M, et al. Die pressure losses during injection molding of rubber mixes[J]. GAK Gummi Fasern Kunststoffe, 2010, 63(3):162-167.
- [21] 唐志玉. 塑料模流变学设计[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
- [22] 杨伟鑫,鄢瑞勤,李瑞海. 不同融指LLDPE对UHMWPE流动性和力学性能的影响研究[J]. 塑料科技,2022,50(5):19-22.  
YANG W X, YAN R Q, LI R H. Effect of different LLDPE on fluidity and mechanical properties of UHMWPE[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(5):19-22.
- [23] 雷刚,刘莹,胡鹏,等. 橡胶衬套动态特性研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(7):74-78.  
LEI G, LIU Y, HU P, et al. A study on dynamic characteristics of rubber bushing[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(7):74-78.

收稿日期:2023-04-01

## Study on Pressure Loss of Compound along Runner in Injection Molding Mold

CAO Guangru<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, LEI Junyu<sup>2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, LIN Sheng<sup>1</sup>, LIU Wensong<sup>2</sup>

(1. Zhuzhou Times Ruiwei Vibration Reduction Equipment Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China; 2. Zhuzhou Times New Materials Technology Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** The study on the pressure loss of the compound along the runner in the injection molding mold (referred to as the pressure loss of the compound) was introduced. The results showed that the pressure loss of the compound was related to the injection speed of the compound, temperature of the compound, runner length, runner cross-sectional parameters and rheological parameters of the compound. Under specific process parameters (injection pressure of 120 MPa, injection time of 60 s, plasticizing temperature of 70 °C, mold temperature of 160 °C and injection volume of the compound of 220 mL), the pressure loss of the compound was 0.649 MPa for every 10 mm runner length. The measured pressure loss of the compound during the injection process was smaller than theoretical calculation value, and the error of the stabilized pressure loss of the compound was within 8 MPa. The pressure loss of the compound was more sensitive to the injection time, plasticizing temperature and mold temperature. The shorter the injection time was, the greater the pressure loss of the compound was, and the higher the plasticizing temperature and mold temperature were, the smaller the pressure loss of the compound was.

**Key words:** injection molding mold; pressure loss of compound; process parameter; theoretical calculation; measure