

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.014

微结构注塑件充填不平衡实验

徐斌,薛松,邓爱林,袁超

(西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室,四川绵阳 621010)

摘要:针对微尺度充填不平衡现象,采用微细电火花铣削技术设计制造了一模八腔的带有微圆柱孔的注塑模具。以聚丙烯为原料进行单因素充模流动工艺实验,研究了模具温度和注射速率对直径为 200 μm 微圆柱孔充填高度的影响规律。结果表明,当模具温度为 30℃和注射速率为 60% (注塑机最大注射速率的百分数) 时,对称分布的两个型腔中同一位置微圆柱孔充填高度差别较大,最大差值达到了 101 μm ,充填不平衡现象明显。随着模具温度和注射速率的升高,当模具温度为 50℃和注射速率为 90% 时,对称分布的两个型腔中同一位置微圆柱孔充填高度差别变小,最小差值达到了 1 μm ,充填不平衡现象在减弱。

关键词:微注塑;充填不平衡;模具温度;微圆柱;注射速率

中图分类号: TG76, TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0077-06

Unbalanced Filling Experiments of Injection Plastic Parts with Microstructure

Xu Bin, Xue Song, Deng Ailin, Yuan Chao

(Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract : Aiming at the micro scale filling unbalance phenomenon, a eight cavity injection mould with micro-cylinder holes was designed and manufactured by micro EDM milling technology. Polypropylene (PP) was used to carry out single factor filling flow experiments. The effects of mould temperature and injection rate on filling heights of micro-cylinder holes with diameter of 200 μm were studied. The results show that the filling heights of micro-cylinder holes at the same position in two symmetrically distributed cavities vary greatly when the mould temperature is 30℃ and the injection rate is 60% (percentage of maximum injection rate of injection machine), the maximum height difference reaches 101 μm , and the filling imbalance is obvious. With the increase of mould temperature and injection rate, the filling heights of micro-cylinder holes at the same position in two symmetrically distributed cavities have little difference when the mould temperature is 50℃ and injection rate is 90%, the minimum difference reaches 1 μm , and the filling imbalance is weakening.

Keywords : micro injection molding ; filling imbalance ; mould temperature ; micro cylinder ; injection rate

微注塑是微成型领域中高效、高一致性的成型微小精密塑料制件的加工方法之一^[1-2]。随着微纳科学技术的快速发展以及应用领域的扩大,微注塑制品的结构特征越来越复杂,特征尺寸亦越来越小^[3-5]。微注塑制品有两种,一种是整体结构尺寸较小,在微米量级;另一种是整体尺寸较大,但有微米量级结构。目前微注塑研究主要集中在模具设计与成型工艺方面^[6-7]。

与传统注塑相比,微注塑工艺过程会涉及到微

尺度聚合物熔体的流动,涉及到微尺度下熔体的传质、动量传递和能量输运过程。它不但具有传统注塑充模流动的特点,如大的应变率、熔体温度变化显著等,而且还具有自身独特的特征,一个典型特征是熔体流动剪切速率较传统注塑高,在微尺度效应的作用下,由于型腔表体比显著增大,导致流变特性、黏性耗散等因素受注射压力、注射速度等各种外场因素的强烈作用,与宏观注塑充模流动显著不同^[8-13],从而会带来充模流动新的平衡问题。目前注

基金项目: 四川省教育厅重点项目 (13zd1001)

通讯作者: 徐斌,博士,主要从事高分子材料成型方面的研究 E-mail : haroldexu@163.com

收稿日期: 2019-04-17

引用格式: 徐斌,薛松,邓爱林,等. 微结构注塑件充填不平衡实验 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7) : 77-82.

Xu Bin, Xue Song, Deng Ailin, et al. Unbalanced filling experiments of injection plastic parts with microstructure[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7) : 77-82.

塑充填不平衡研究主要集中在传统注塑成型^[14-20],但关于微注塑过程中的流动不平衡研究报道较少。

为此笔者设计了一模多腔带有微圆柱孔阵列的注塑模具,选用聚丙烯(PP)材料进行了微注塑实验,开展了不平衡现象研究。由于型腔表体比较大,热量容易散失,模具温度和注射速率对微尺度流动影响较大^[7]。采用单因素实验方法,以微圆柱孔充填高度为指标,研究模具温度、注射速率对充填高度的影响,定性分析了各工艺参数对充模流动的影响规律。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP:T30S,大连石化公司。

1.2 主要仪器及设备

精密注塑机:MA600 II-SMS型,最大注射速率为51 g/s,海天集团;

偏光显微镜:BX51型,日本OLYMPUS公司;

表面轮廓仪:Newview 5022型,ZYGO公司。

1.3 模具设计

模具采用镶拼结构,镶块如图1所示,设计一模八腔的平衡式流道系统,每个型腔分布有6个微圆柱孔,如图2所示。采用的注塑件为一个方形平板,长宽高尺寸分别为12 mm,12 mm,1 mm,包括6个微圆柱,每个微圆柱高度为500 μm 。为了研究不同微特征直径下的充填流动,分别设计了直径为200 μm 的微圆柱孔阵列。采用微细电火花铣削技术加工微孔,通过偏光显微镜测量其直径如图2所示。对于直径为200 μm 的微圆柱孔,最大直径为220.5 μm ,最小直径为216.7 μm 。微孔表面粗糙度经加工试样剖切测量,用表面轮廓仪测量结果为表面粗糙度为0.273 μm ,型腔表面粗糙度为0.453 μm 。注塑模具如图3所示,推出时直接顶在流道中的凝料将塑件推出。

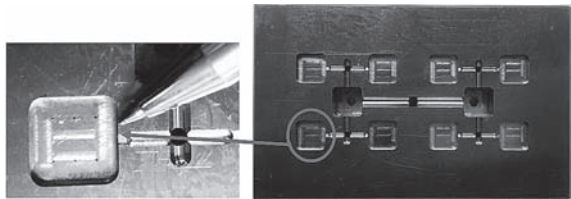


图1 镶块结构

1.4 单因素实验

实验前,采用酒精对微型腔进行多次擦洗,然后用丙酮溶液进行清洗,以防止灰尘或塑料小颗粒留在型腔内,影响实验结果,最后喷洒脱模剂。

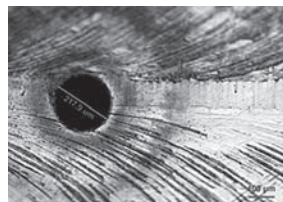


图2 显微镜测量微孔直径

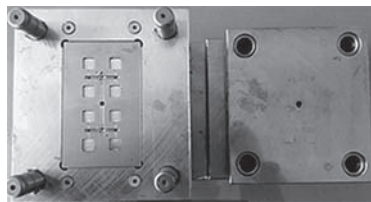


图3 微结构塑件注塑模具

将PP经干燥后进行注塑。为了研究关键影响因素对微尺度充填不平衡影响,一方面需采用短射实验,另一方面由于微尺度聚合物熔体流动热量极易散失以及微注塑时需较高的注射速率,因此在前期研究的基础上设置了如表1的注塑工艺参数。研究了模具温度、注射速率对微圆柱孔阵列充填质量的影响规律。以充填高度作为试验指标,确定工艺参数对充填高度的影响规律。

表1 微注塑充填实验工艺参数

序号	注射速率 / % ¹⁾	模具温度 / $^{\circ}\text{C}$	熔体温度 / $^{\circ}\text{C}$	注射时间 / s
1 [#]	60	30	230	0.4
2 [#]	60	40	230	0.4
3 [#]	60	50	230	0.4
4 [#]	70	30	230	0.4
5 [#]	70	40	230	0.4
6 [#]	70	50	230	0.4
7 [#]	90	30	230	0.4
8 [#]	90	40	230	0.4
9 [#]	90	50	230	0.4

注:1) 注射速率以注塑机最大注射速率的百分数表示,下同。

1.5 微圆柱高度测试

为减少实验过程中外界干扰对实验结果的影响,对相同工艺条件下的每组进行多次实验,直到填充形状稳定后再选取塑件进行测量。选取图4中所标识的模具型腔I与II中的微孔充填结果进行分析,并且对每个孔的位置进行了编号。注塑充填试样结果如图5所示。采用偏光显微镜测试微圆柱的高度,可得型腔微圆柱孔充填高度。在测量时,将塑件插在橡皮泥中并固定在显微镜工作台上,调整倍率测量微圆柱的高度。

2 结果与讨论

2.1 模具温度对充填不平衡的影响

根据测量的高度尺寸,不同模具温度下在不同型腔位置的微圆柱孔充填结果如图6所示。

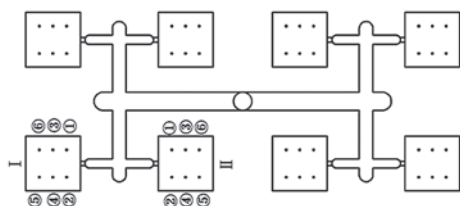
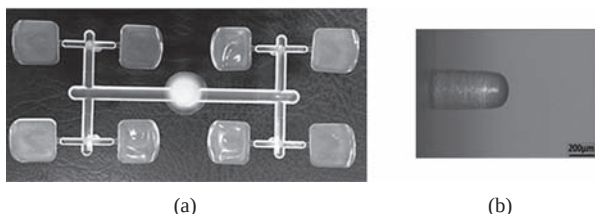
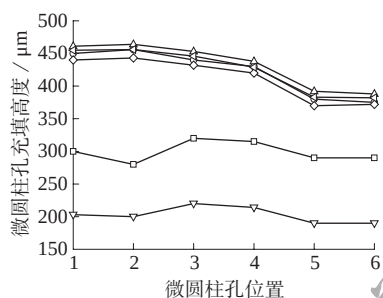


图4 模具型腔布局示意图

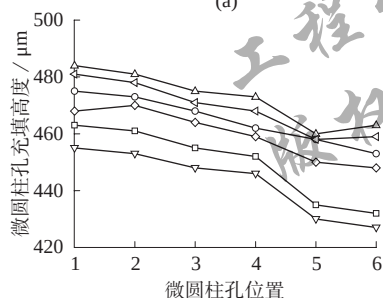


a—整体充填; b—微圆柱孔充填

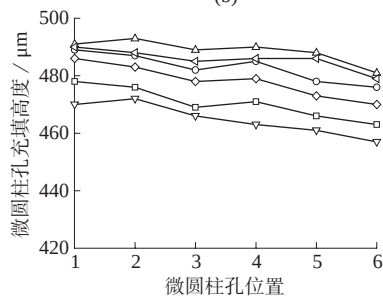
图5 注塑充填图片



(a)



(b)



(c)

□—30℃—I型腔; ○—40℃—I型腔; △—50℃—I型腔;
▽—30℃—II型腔; ◇—40℃—II型腔; ◀—50℃—II型腔

注射速率: a—60%; b—70%; c—90%

图6 不同模具温度下不同型腔位置的微圆柱孔充填高度

从图6可以看出,对于同一型腔同一位置的微圆柱孔,其充填高度随着模具温度的升高而增加。总体上,距离浇口位置越远的位置,微圆柱孔的充

填高度越低。当注射速率为60%,模具温度由30℃增加到40℃时,I型腔中微圆柱孔的充填高度最大增加值为176 μm,最小增加值为85 μm,II型腔中微圆柱孔的最大充填高度增加值为243 μm,最小增加值为180 μm;当模具温度由40℃增加至50℃时,I型腔中的最大增加值为13 μm,最小增加值为8 μm,II型腔中的最大增加值为15 μm,最小增加值为9 μm。可见随着模具温度的升高,各个型腔的充填高度值都有所增加,但模具温度增加越高,其高度增加值越小,即充填高度增加越缓慢,且其充填高度接近于500 μm。这是由于熔体黏度对温度的敏感性,随着温度升高,熔体黏度降低,在流道中的流动阻力逐渐减小,更加有利于型腔的充填;而在模具温度较低时,熔体黏度较大,流动性差,因此当模具温度由低温逐渐升高时,充填高度有一个较大的变化。当注射速率为70%和90%,其微圆柱孔充填高度随温度的变化有着相似的变化规律,即升高模具温度可以增加微圆柱孔的充填高度。

采用 Δl 表示同一注塑工艺中I型腔和II型腔对应位置的微圆柱孔充填高度差,即 Δl 也代表了充填不平衡程度,如图7所示。从图7可以看出,在注射速率60%下,当模具温度为30℃时, Δl 的最小值为80 μm,最大值为101 μm,当模具温度升高至40℃时, Δl 的最大值为13 μm,最小值为3 μm,当模具温度继续升高至50℃时, Δl 的最大值为9 μm,最小值为6 μm。可见随着模具温度的升高, Δl 值逐渐减小,且接近于零,特别是当模具温度由30℃升高至40℃时, Δl 值变化较大,表明升高模具温度可以减小 Δl 值,从而减小充填不平衡的程度。当注射速率分别为70%和90%时,升高模具温度, Δl 值总体上也在逐渐减小,接近于零,可见对于不同的注射速率,随着模具温度的升高,I型腔和II型腔微圆柱孔的充填高度值都在减小。表明升高模具温度可以促进熔体的流动平衡。根据现有研究表明,当模具型腔呈对称分布,在高速注射时,造成充填不平衡的原因是流道内因剪切热造成熔体温度分布不对称。塑料熔体在流动过程中会与模具壁面发生对流换热,若保持注射速率不变,则两个型腔中的塑料熔体产生的剪切摩擦热是定量的,故当模具温度低时,换热较多,导致熔体的黏度增加较大,从而使两个型腔中熔体流动性差距变大;当模具温度升高时,换热变少,导致熔体的黏度增加较少,从而使两个型腔中熔体流动差距变小。因而,升高模

具温度,两个模具型腔中微圆柱孔的充填高度差在减小,充填不平衡现象在减弱。

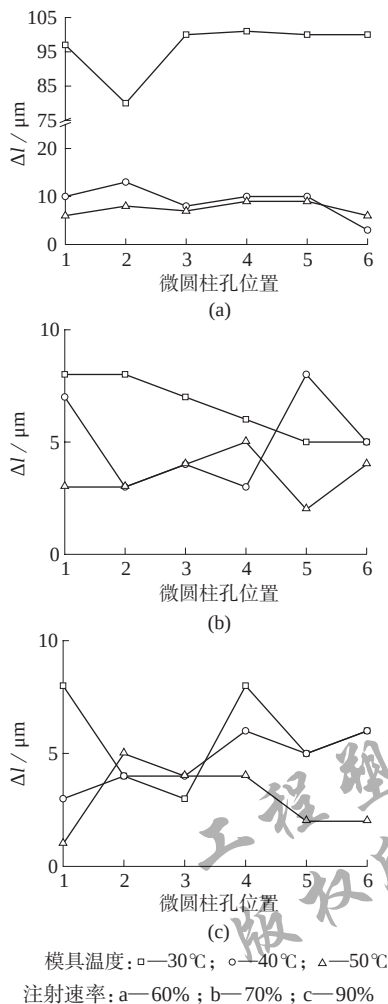


图7 不同模具温度的 Δl 值

2.2 注射速率对充填不平衡的影响

在不同的模具温度下,通过增加注射速率进行微注塑实验,根据测量的微圆柱高度尺寸绘制不同注射速率下的充填高度曲线,如图8所示。从图8可以看出,模具温度保持不变时,随着注射速率的增加,其微圆柱孔的充填高度也逐渐增加。当模具温度为30℃、注射速率由60%升高到70%时,I型腔中微圆柱孔的充填高度增加的最大值为181 μm ,最小增加值为135 μm ,II型腔中微圆柱孔的充填高度的增加值最大为253 μm ,最小值为228 μm ;当注射速率由70%升高至90%时,I型腔中最大的充填高度差值为31 μm ,最小充填高度差值为14 μm ,II型腔中充填高度最大差值为31 μm ,最小差值为15 μm 。可见,注射速率较低时,熔体的流动性较差,当注射速率增加,熔体受到剪切生热的作用,产生剪切热,使得熔体黏度下降,更有利于充

填,因此注射速率由较低速率增加时,其充填高度的差值变化较大。当模具温度为40℃和50℃时,其充填高度的变化与模具温度为30℃有着相似的变化规律。

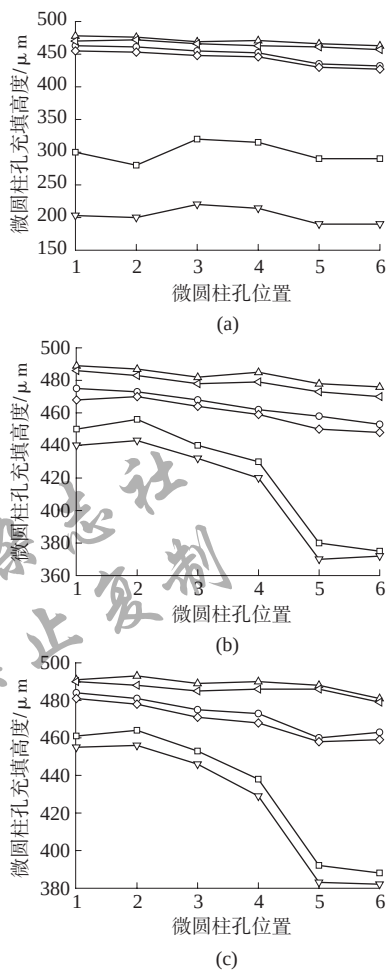


图8 不同注射速率下不同型腔位置的微圆柱孔充填高度

从图8还可以看出,随着注射速率的增加,两个型腔中的充填高度都随之增加,但I型腔中微圆柱孔充填高度大于II型腔中微圆柱孔充填高度。仍然用 Δl 表示I型腔和II型腔中微圆柱孔充填高度之差,如图9所示。从图9可以看出,当模具温度为30℃、注射速率为60%时,I型腔中微圆柱孔充填高度明显大于II型腔中微圆柱孔填充高度, Δl 的最大值为101 μm ,最小值为80 μm ;当注射速率为70%时, Δl 的最大值为8 μm ,最小值为5 μm ;当注射速率升高至90%时, Δl 的最大值为8 μm ,最小值为3 μm 。可见,随着注射速率的增加, Δl 值逐渐减小,接近于零,表明I型腔和II型腔的充填

高度值随着注射速率的增加逐渐接近。当模具温度为 40℃ 和 50℃, Δl 值的变化与模具温度为 30℃ 时有着相似的规律, 模具温度升高, Δl 值也减小, 当模具温度为 50℃, 注射速率为 90% 时, Δl 的最小值仅为 1 μm 。

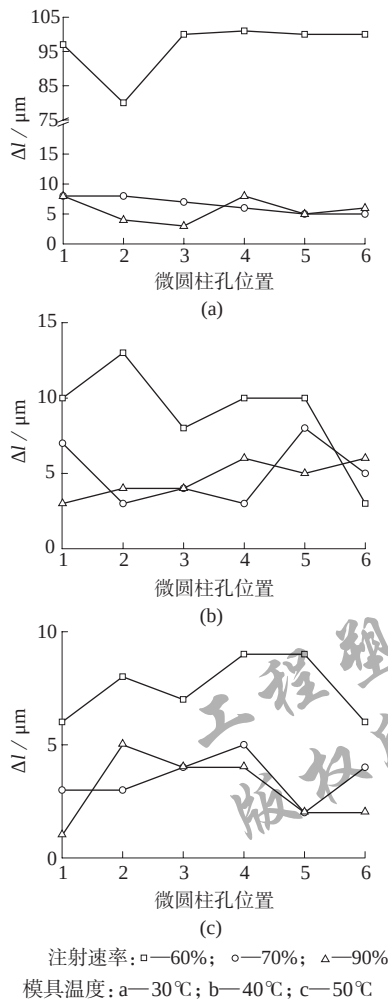


图9 不同注射速率的 Δl 值

从上述分析可以看出,当模具温度不变时,对于低的注射速率,两个型腔中的微圆柱孔充填高度差值大,当注射速率达到 70% 时,两个型腔中的微圆柱孔充填高度比较接近。造成这种现象的解释机理与前面相似,也是由于流道内因剪切热造成熔体温度分布不对称。低注射速率时,一方面熔体因低剪切速率作用的黏度偏大,另外一方面熔体在流道以及模具型腔中产生的剪切摩擦热较少,当模具温度不变时,在熔体与模具发生热交换后,熔体的黏度升高,从而熔体的流动性变差。当注射速率升高到 70% 时,一方面熔体在流道以及模具型腔中产生的剪切摩擦热增多,熔体与模具发生热交换后,熔体的温度降低幅度减小,从而黏度增大的较少;另一方

面熔体因高剪切速率作用的黏度减小。由于这两方面的作用,两个型腔中熔体的流动性差别变小,从而随着剪切速率的增加,型腔 I 与型腔 II 的充填不平衡现象在减弱。可见,增加注射速率有助于改善充填不平衡现象。

3 结论

设计了带有直径为 200 μm 的微圆柱孔的注塑模具,通过采用 PP 进行微注塑实验,发现模具温度和注射速率会显著影响充填不平衡现象。在较低的模具温度和注射速率时,微圆柱孔的充填不平衡现象明显,两个型腔的充填高度差最高达到了 101 μm 。随着模具温度和注射速率的升高,充填不平衡现象在减弱,当模具温度为 50℃,注射速率为 90% 时,两个型腔的微圆柱孔充填高度差最小值仅为 1 μm 。

参考文献

- [1] Liu Junhui, Chen Xindu, Diao Shipu. Ultrasonic vibration technology for the polymer replication of high aspect ratio micro-structured surface[J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(5):2 253–2 264.
- [2] Gao Shan, Qiu Zhongjun, Ma Zhuang, et al. Development of high efficiency infrared-heating-assisted micro-injection molding for fabricating micro-needle array[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(1–4):831–838.
- [3] Surace R, Bellantone V, Trotta G, et al. Replicating capability investigation of micro features in injection moulding process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 28:351–361.
- [4] De Santis F, Pantani R. Development of a rapid surface temperature variation system and application to micro-injection molding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237:1–11.
- [5] Nguyen Q M P, Chen X, Lam Y C, et al. Effects of polymer melt compressibility on mold filling in micro-injection molding[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2011, 21(9):095019–095027.
- [6] Yang Can, Yin Xiaohong, Cheng Guangming. Microinjection molding of micro system components:new aspects in improving performance[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2013, 23(9):93 001–93 021.
- [7] Maghsoudi K, Jafari R, Momen G, et al. Micro-nanostructured polymer surfaces using injection molding:A review[J]. *Materials Today Communications*, 2017, 13:126–143.
- [8] Zhang N, Gilchrist M D. Characterization of thermo-rheological behavior of polymer melts during the micro injection moulding process[J]. *Polymer Testing*, 2012, 31:748–758.
- [9] Yousfi M, Alix S, Lebeau M, et al. Evaluation of rheological properties of non-Newtonian fluids in micro rheology

- compounder: Experimental procedures for a reliable polymer melt viscosity measurement[J]. *Polymer Testing*, 2014, 40: 207–217.
- [10] 徐斌, 王敏杰, 于同敏, 等. 微尺度效应对聚合物熔体壁面滑移的影响研究[J]. *材料工程*, 2008(10): 16–20, 24.
Xu Bin, Wang Minjie, Yu Tongmin, et al. Study on micro-scale effect on the impact of polymer melt wall Slip[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008(10): 16–20, 24.
- [11] Zhao Danyang, Jin Yifei, Wang Minjie. Study on viscosity of polymer melt flowing through micro channels considering the wall-slip effect[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2012, 52(8): 1806–1814.
- [12] Meng L, Wu D, He X, et al. Effect of surface tension on filling flow of carboxymethyl cellulose solution in microchannel[J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 19(2): 1034–1039.
- [13] Xu Bin, Wang Minjie, Yu Tongmin, et al. Viscous dissipation influencing viscosity of polymer melt in Micro Channels[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(7): 1417–1423.
- [14] Yang W M, Yokoi H. Visual analysis of the flow behavior of core material in a fork portion of plastic sandwich injection molding[J]. *Polymer Testing*, 2003, 22(1): 37–43.
- [15] 陈静波, 申长雨, 横井俊秀. 多型腔注射模充填不平衡试验[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 170–174.
Chen Jingbo, Shen Changyu, Yokoi Hidetoshi. Experimental study on filling imbalance in multi-cavity injection mold[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 170–174.
- [16] 姜开宇, 横井俊秀. 注射成型过程熔体前沿充填不平衡现象的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 294–300.
Jiang Kaiyu, Yokoi Hidetoshi. Experiment study on filling imbalance phenomenon of melt front during injection molding process[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 294–300.
- [17] Knights M. What to do when the mold just won't fill right[J]. *Plastics Technology*, 2004, 50(2): 41–42.
- [18] Chen C S. Determination of the injection molding process parameters in multi-cavity injection molds[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, 25(13): 1367–1373.
- [19] Park S R, Kim J H, Lyu M Y. A novel runner design for flow balance of cavities in multi-cavity injection molding[J]. *Polymer Korea*, 2009, 33(6): 561–568.
- [20] Yao D G, Kim B. Scaling issues in miniaturization of injection molded parts[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(4): 733–738.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿邮箱为 www.epa1973.net。本刊未委托任何机构和从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿邮箱网址,辨别来电属地,不要给个人账户汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)

(上接第53页)

- Guo Xintao, Li Lei. Synthesis and property of transparent polyurethane elastomers based on HMDI-PTMEG[J]. *China Plastics Industry*, 2010, 38(10): 6–8, 12.
- [8] 陈海良, 张芳, 陈伟, 等. IPDI 在透明聚氨酯弹性体中的应用研究[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2005, 3(5): 26–27, 31.
Chen Hailiang, Zhang Fang, Chen Wei, et al. Application of IPDI in transparent polyurethane elastomer[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2005, 3(5): 26–27, 31.
- [9] 程国华, 刘学鹏, 徐瑞祥, 等. 聚醚软段对 HMDI 基透明聚氨酯弹性体性能的影响[J]. *聚氨酯工业*, 2016, 31(4): 40–43.
Cheng Guohua, Liu Xuepeng, Xu Ruixiang, et al. Effect of polyether soft segments on the properties of HMDI based transparent polyurethane elastomers[J]. *Polyurethane Industry*, 2016, 31(4): 40–43.
- [10] 叶耘峰, 李乐, 唐果东, 等. 高折射率透明聚氨酯弹性体的制备及性能研究[J]. *聚氨酯工业*, 2018, 33(6): 9–11.
Ye Yunfeng, Li Le, Tang Guodong, et al. Preparation and properties of transparent polyurethane elastomers with high refractive index[J]. *Polyurethane Industry*, 33(6): 9–11.
- [11] 姚小虎, 张龙辉, 张晓晴, 等. 航空透明聚氨酯胶片动态力学性能实验研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(7): 2236–2242.
Yao Xiaohu, Zhang Longhui, Zhang Xiaoqing, et al. Experimental study on dynamic mechanical behavior of aerospace-transparent polyurethane interlayer[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2015, 36(7): 2236–2242.
- [12] 欧迎春, 马晓娜, 张延芳等. 紫外辐照下透明聚氨酯胶片老化机理[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(1): 93–98.
Ou Yingchun, Ma Xiaona, Zhang Yanfang, et al. Degradation Mechanisms of Transparent Polyurethane Interlayer under UV Irradiation[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(1): 93–98.
- [13] 刘丹, 袁永朝, 曹红宝. 红外光谱法研究聚氨酯脲氢键[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2009, 7(6): 60–63.
Liu Dan, Yuan Yongchao, Cao Hongbao. Study on hydrogen bond in polyurethane urea by FT-IR[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2009, 7(6): 60–63.