

注射成型技术专题

## 物理可视化技术在聚合物模塑成型分析中的应用

杨磊, 姜开宇, 王龙飞

(大连理工大学 模塑制品教育部工程研究中心, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了克服传统注塑成型过程的不可见性,在模具或者注塑机的料筒上人为添加视窗,在视窗位置用石英玻璃代替传统的金属材料,使用摄像机来记录聚合物的填充或塑化过程。主要介绍了物理可视化技术在模塑成型中的应用:利用高速摄像机拍摄得到熔体的充模过程,选取一定数量的图片,根据图片的时间差和流动前沿的位置变化,可以获得熔体流动前沿的填充形态和填充速度;利用椰果壳活性炭颗粒作为示踪粒子,可以得到熔体内部流场的流动轨迹和流动速度等重要参数;利用物理可视化技术结合模具关键位置的温度压力传感器,可以直观地解释填充不平衡现象产生的原因和规律。

**关键词:** 注塑成型; 可视化; 流变特性; 成型分析

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.01.001

**中图分类号:** TQ320.66

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2016)01-0001-06

## Application of Physical Visualization Technology in Polymer Molding Analysis

YANG Lei, JIANG Kai-yu, WANG Long-fei

(Molded Products Engineering Research Center of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**ABSTRACT:** In order to study the flow behavior of polymer melt in the cavity of mold and overcome the invisibility of conventional molding process, windows were designed on the mold or the barrel, with quartz glasses inserted in the location of windows, realizing the visualization of injection molding. This paper mainly introduced the applications of physical visualization in molding forming technology: high speed camera was used to capture the filling of the polymer during injection, and then a number of pictures with same time interval were chosen to be used for data handling; the morphology and speed of the melt front were acquired according to the time interval and the changes in the position of melt front. Important parameters, such as flow trajectory, injection speed and so on, could be acquired using active charcoal particle of coconut shell as tracer. Filling imbalance has been a difficult problem for research fellow, but combining with temperature and pressure sensors, physical visualization could be used to explain the reason for this phenomenon and the law.

**KEY WORDS:** injection molding; visualization; rheological properties; molding analysis

模塑成型可视化技术,是利用摄像机通过特殊设计的模具或者注塑机的视窗,使本不可见的聚合物填

充和塑化过程,通过影像数据呈现出来<sup>[1-4]</sup>。

聚合物熔体在型腔中的填充过程的影响因素比

收稿日期: 2015-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(51475071)

作者简介: 杨磊(1990—),男,硕士生,主要研究方向为聚合物复合材料成型的可视化。

通讯作者: 姜开宇(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为模具设计与制造、材料成型加工技术。

较多,填充规律复杂,单纯的理论计算或者模拟往往与实际情况会有一些出入。利用物理可视化技术,可直观地观察到熔体充模过程的具体形态,分析熔体流动过程中出现的各种现象及其机理,大大减少了注塑成型参数调整和模具优化设计的难度,结束了传统注塑参数调整的“黑盒操作”,减少了设计和操作人员的工作量;物理可视化技术是研究聚合物熔体在模具中填充的重要方法,不仅在单一材料的注塑工艺中有应用,在辅助注射成型和发泡成型等多组分材料成型方面也有应用<sup>[5-7]</sup>。

1951年, Gilmore 和 Spencer 首先提出透明模具的概念,虽然实际应用效果并不理想,但这为可视化技术在模塑领域的发展奠定了基础。截至目前,国外在该领域的研究已经取得了丰硕的成果:日本东京大学的横井秀俊等人<sup>[8-11]</sup>自1989年开始研究可视化技术,并在可视化模具设计、聚合物塑化和填充的可视化方面都取得了很多成果;东京大学的佐藤熏<sup>[12]</sup>首先将可视化技术用于注塑缺陷的研究,利用可视化技术得出了波流痕的产生机理,近年来,国内也利用可视化技术对注塑过程中出现的各种缺陷进行了诸多研究<sup>[13-17]</sup>;美国俄亥俄州立大学的 Koelling 等人<sup>[18]</sup>将可视化技术应用于气体辅助成型,拓展了可视化技术在模塑成型领域的应用范围;土耳其的 Ozdemir 等人<sup>[19]</sup>将可视化实验与 CAE 相结合,研究聚合物的充模过程,发挥了实验分析和模拟分析各自的优势。

我国对于可视化技术在模塑成型中的应用研究起源于20世纪70年代,也取得了比较显著的成果。1979年,北京化工大学的朱华复等人<sup>[20]</sup>开始研究物理可视化技术在聚合物挤出成型中的应用,研究了聚合物颗粒在挤出机料筒中的塑化过程,并于后期创建了我国首个聚合物加工可视化实验室。1980年,西北工业大学的林德宽<sup>[21]</sup>设计了一套可视化模具,并利用高速摄像机对聚合物填充型腔的过程进行了一系列的研究。北京化工大学的杨卫民<sup>[22-23]</sup>利用物理可视化技术研究了充填不平衡现象;本课题组从2005年开始致力于聚合物复合材料和超声振动对填充影响的可视化研究,通过物理可视化技术,建立了复合材料填充和超声振动对填充影响的一系列成果。文中根据作者课题组在可视化方面所取得的研究成果,介绍一下物理可视化技术在模塑成型中的应用。

## 1 物理可视化试验平台

图1为本课题组自行开发的可视化试验平台,该



图1 可视化试验平台

Fig.1 Platform for visualization experiments

平台主要包括注塑机、可视化模具、高速摄像机、数据采集装置等。数据采集装置用于采集并存储注塑过程的图像和温度压力数据以及后期的数据处理;高速摄像机为日本NAC公司的fxK4型高速摄像机,用于拍摄熔体在模具型腔中的填充过程,拍摄的最大速率为每秒2万帧。可视化模具的结构如图2所示,采用斜导柱结构实现模具侧向开模,在照明装置的辅助下,高速摄像透过模具上的石英玻璃视窗,拍摄熔体在模具型腔内的充填过程。利用该可视化试验平台,可对聚合物填充过程中的流动前沿、流场、填充不平衡,以及注塑制品模内收缩等现象进行研究。

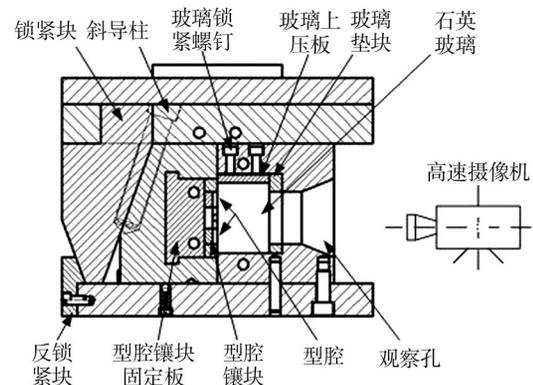


图2 注塑成型可视化模具结构

Fig.2 The structure of visualization mold

## 2 物理可视化技术在模塑成型过程分析中的应用

### 2.1 熔体流动前沿分析

在熔体填充型腔的过程中,为保证塑件的质量,型腔中的压力比较大,聚合物熔体一般认为是不可压

缩的,所以,对于垂流动方向截面面积不变的型腔,熔体流动前沿的速度在一定程度上可以表征其内部的流动速度。利用图形处理软件将填充过程中不同时刻的图像拼合在一起,根据熔体前沿的位置变化和时间间隔,即可得到流动前沿的填充速度<sup>[24]</sup>。

利用高速摄像机的电脑端软件将拍摄的专门格式的视频转化为一系列图片,根据填充时间的长度,选取出一定数量的图片,将熔体的流动前沿利用图像处理软件 PhotoShop 叠加到同一张图片上,得到的结果如图 3 所示,利用 Image-Pro Plus 软件,根据图片中已知的尺寸设置比例尺,求出各个流动前沿与浇口的距离,流动前沿距离浇口的距离差值除以对应的时间差,即可得到这段时间内流动前沿的平均速度,求出流动前沿在不同位置的速度,得到流动过程的速度曲线;根据计算得到的熔体填充速度作出熔体填充过程中流动前沿的速度曲线如图 4 所示。任意 2 个流动前沿间的平均流动速度为:

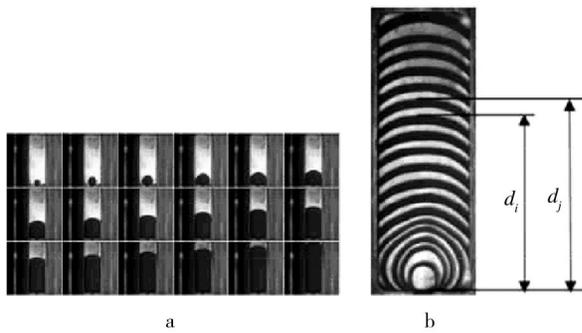


图3 熔体流动前沿的叠加

Fig.3 The superposition of the frontier of melt

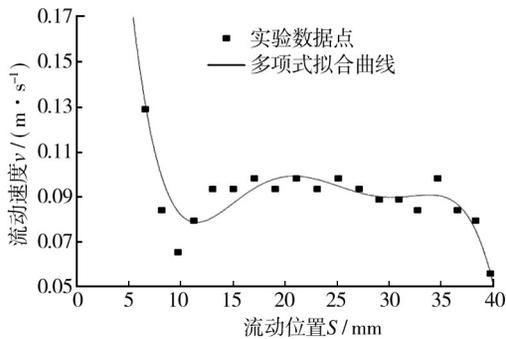


图4 熔体填充过程中流动前沿的速度曲线

Fig.4 The filling speed of the frontier of melt during molding

$$V_i = \frac{d_j - d_i}{t_j - t_i} \quad (1)$$

其中:  $d_j$  和  $d_i$  分别表示 2 个流动前沿与浇口的距离,  $t_j$  和  $t_i$  分别表示流动前沿对应的填充时刻。

## 2.2 流场分析

聚合物在模具中填充的过程中为熔融状态,熔体在模具中的流动过程对聚合物制品的最终性能影响非常大<sup>[25-27]</sup>,掌握流动轨迹对聚合物制品整体性能的研究有非常重要的作用。为了直接观测聚合物熔体内部的流场,实验过程中,在塑料原料中均匀混入适量的椰果壳活性炭颗粒作为示踪粒子,来对熔体填充过程中的内部流场进行表征。

将拍摄得到的视频转换为图片,间隔相同的时间抽取一系列的图片,选择有效的示踪颗粒,在不同的图片进行追踪并记录坐标位置,追踪不同位置的示踪颗粒即可得到熔体填充过程中内部的流场,根据同一示踪粒子不同时刻的位置和时间间隔,利用式(1)得出熔体内部的流动速度,进而得到填充过程的速度场。图 5 为熔体填充过程中选择的图片和利用示踪粒子表征的内部流场,图 6 是根据各个示踪粒子的运动速度得到的熔体内部的速度场<sup>[28-30]</sup>。

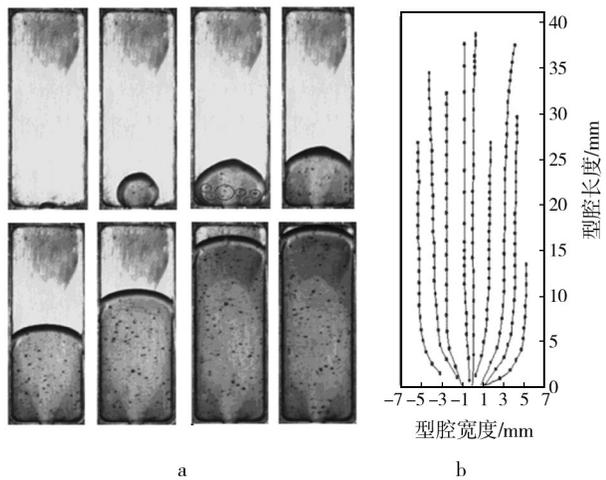


图5 填充过程中示踪粒子的流动(a)和熔体流动轨迹(b)

Fig.5 The fluid of the tracer particles during filling process (a) and the path of the melt (b)

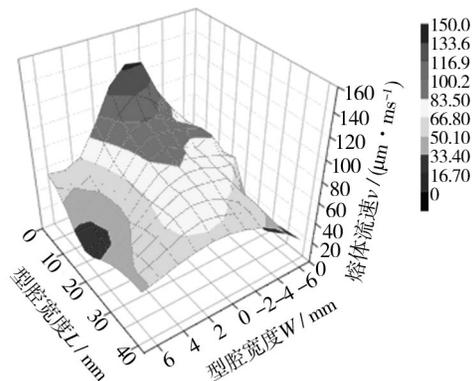


图6 塑件内部流场3D数据

Fig.6 3D figure schematic diagram of the flow field

## 2.3 填充不平衡现象

为了提高注塑工艺的生产效率,常常采用一模多腔的模具结构,为了使各个型腔制件的性能相同,模具型腔布置一般采用平衡式结构。然而在实际应用中,即使模具的多个型腔在几何结构上是平衡的,但熔体的实际填充过程却是非平衡的。为了揭示这种现象产生的原因,可以通过物理可视化技术对该现象进行分析<sup>[31-32]</sup>。

采用一个H型平衡流道的两型腔结构模具研究填充不平衡现象,利用dS, dSL和dSR( $dS=SL-SR$ ,  $dSL=SL1-SL2$ ,  $dSR=SR1-SR2$ )3个指数表征型腔填充不平衡的程度。利用可视化试验平台拍摄熔体填充型腔的过程,分析型腔厚度和注射速度对填充不平衡现象的影响,图7为熔体流动前沿的叠加图。根据熔体流动前沿的叠加图求出不同时刻的dS, dSL和dSR,充填不平衡曲线如图8所示;对比不同厚度型腔中熔体的填充过程,型腔厚度对低速注射时的不平衡现象的趋势没有影响,只影响不平衡的程度;型腔厚度对高速注射时的不平衡现象的程度和趋势均没有影响,尺寸效应比注射速度对填充不平衡现象的影响更加明显<sup>[33-35]</sup>。

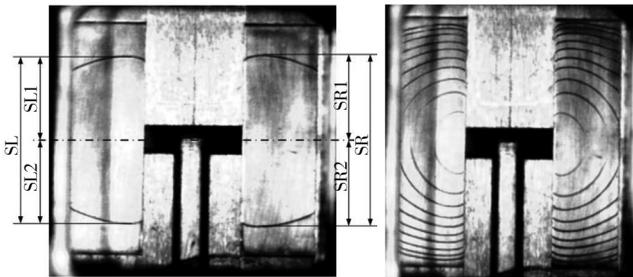


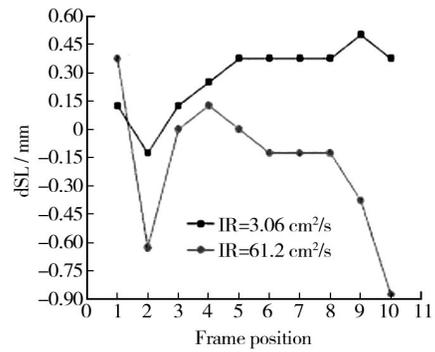
图7 流动前沿叠加

Fig.7 Superposition of the frontier of melt

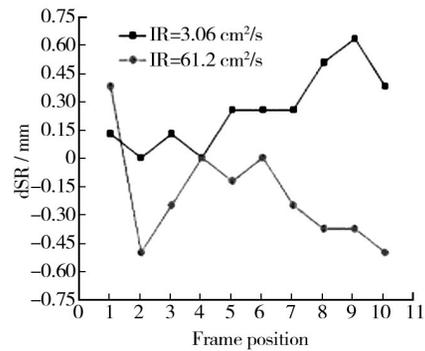
## 2.4 聚合物制件的模内收缩

聚合物熔体在凝固的过程中,体积会缩小,收缩对聚合物制品的最终尺寸影响比较明显,利用可视化装置拍摄聚合物在模具中的收缩过程<sup>[36-38]</sup>,根据不同时刻的收缩轮廓和制件不同位置的移动变化,可得出制件收缩的动态过程和各个位置的收缩方向和收缩量。

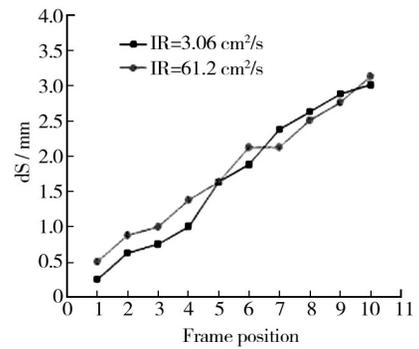
在PP原料中均匀添加椰壳活性炭颗粒,根据注塑的填充阶段结束到制件完全从石英玻璃上脱离的过程,获得示踪粒子在收缩前后的位置变化,得出各个示踪粒子所在位置的收缩量并绘制塑件在模内收缩的云图,如图9所示,根据收缩云图中的颜色分布,即可判断出塑件中的收缩趋势和方向,这对成型参数和



a



b



c

图8 充填不平衡曲线(制件壁厚为3.5 mm)

Fig.8 Filling imbalance curve (the plastic with a wall thickness of 3.5 mm)

模具结构的合理设计具有重要意义<sup>[38]</sup>。同样,该方法也适用于聚合物弹性体浇注成型过程中的收缩计算<sup>[39-40]</sup>。

## 3 总结与展望

自20世纪末期,可视化技术开始应用于模塑领域,将本不可见的注塑过程以图像的形式呈现出来,并且,在最近10年的发展非常迅速,应用到了模塑领域的各个方面,已成为一种不可或缺的重要研究方法。现在采用的可视化模具均采用在部分位置镶嵌石英玻璃的方式实现视窗位置的可视化,但这种方法不太适用于尺寸较大和结构复杂的塑件,相信随着材料的发展,模具可以采用透明材料制造,实现注塑过程中的全方位可视化;未来物理可视化技术的应用一

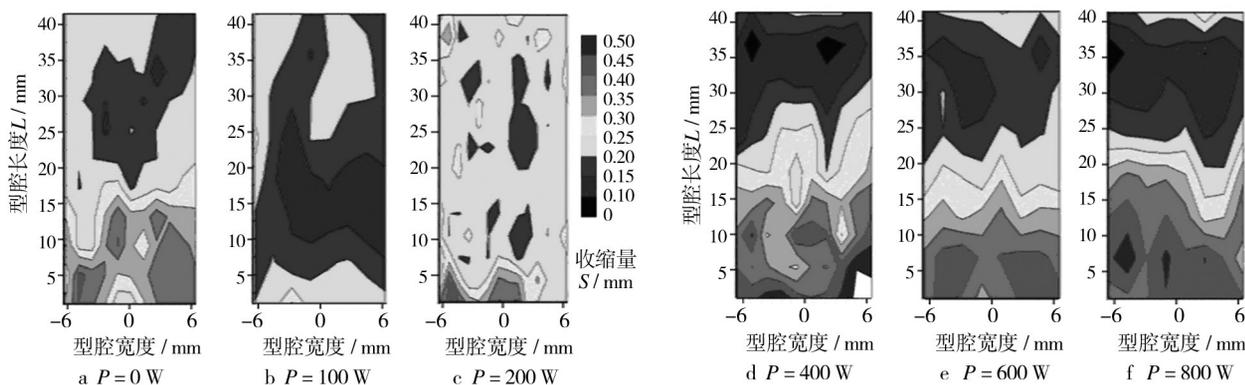


图9 塑件收缩方向

Fig.9 The shrinkage orientation of the plastic parts

定不只局限于聚合物成型,还会应用于其他材料的成型,例如冶金、铸造等。

#### 参考文献:

- [1] 冯刚,林克伟,王华峰,等.注塑成型可视化技术的最新研究进展及前景预测[J].塑料工业,2014,42(12):9—12.  
FENG Gang, LIN Ke-wei, WANG Hua-feng, et al. The Latest Technological Advances and Prospect of Injection Molding Visualization Technology[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(12):9—12.
- [2] GAO Fu-rong, JIN Zhi-ming, CHEN Xi. A Visual Barrel System for Study of Reciprocating Screw Injection Molding[J]. Polymer Engineering and Science, 2000, 40(6):13334—1343.
- [3] 金志明,朱复华,高福荣.注塑成型塑化过程的可视化实验研究(I)[J].中国塑料,2003,17(4):86—90.  
JIN Zhi-ming, ZHU Fu-hua, GAO Fu-rong. Visualization Study of the Plastication during Injection Molding(I)[J]. China Plastics, 2003, 17(4):86—90.
- [4] 金志明,马艳娥,高福荣.注塑成型塑化过程的可视化实验研究[J].中国塑料,2005,19(9):73—76.  
JIN Zhi-ming, MA Yan-e, GAO Fu-rong. Visualization Study of the Plastication during Injection Molding[J]. China Plastics, 2005, 19(9):73—76.
- [5] LIU Shih-jung, WU Yi-chuan. Dynamic Visualization of Cavity-Filling Process in Fluid-Assisted Injection Molding—Gas Versus Water[J]. Polymer Testing, 2007, 26:232—242.
- [6] MEHDI M, AMIR BEHRAVESH H, MOHAMMAD REZA-VAND S A, et al. Visualization of Bubble Dynamics in Foam Injection Molding[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116:3346—3355.
- [7] LIU Shih-jung, LIN Shih-po. Study of 'Fingering' in Water Assisted Injection Molded Composites[J]. Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36:1507—1517.
- [8] YOKOI H, HAYASAKI S, TAKAHASHI H. Visual Analysis of Plasticating Process in Injection Molding Machine by Using a Glass Inserted Heating Cylinder[C]//Polymer Processing Society Fifth Annual Meeting. Kyoto, 1989.
- [9] YOKOI H, HAYASAKI S, KURODA A. Visualization of Screw-Plasticating Process of Plastics Pellets by Glass-Inserted Heating Cylinder[J]. Journal of Flow Visualization and Image Processing, 2000, 7:231—241.
- [10] YOKOI H, MASUDA N, MITSUHATA H. Visualization Analysis of Flow Front Behavior during Filling Process of Injection Mold Cavity by Two-Axis Tracking System[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130—131:328—333.
- [11] YOKOI H, MURATA Y, OKA K, et al. Visual Analysis of Weld-line Generating and Vanishing Processes Using a Glass-Inserted Visual Mold[J]. Seikei-Kakou, 1997, 9(4):290—298.
- [12] TREDOUX L, SATOH I, KUROSAKI Y. Investigation of Wave-Like Flow Marks in Injection Molding: Flow Visualization and Micro-Geometry[J]. Polymer Engineering and Science, 1999, 39(11):2233—2241.
- [13] 孙翔,杨卫民,丁玉梅,等.基于可视化的注射成型制品缺陷及其产生机理的研究[J].中国塑料,2005,19(12):64—68.  
SUN Xiang, YANG Wei-min, DING Yu-mei. Study on Defects of Injection Molded Parts and Their Generation Mechanism Based on Visualization[J]. China Plastics, 2005, 19(12):64—68.
- [14] 利瓦伊,郭奎,陈红,等.基于可视化技术的注塑成型冷接痕的研究[J].中国塑料,2008,22(12):67—70.  
LI Wa-yi, GUO Kui, CHEN Hong, et al. Study on the Cold Weld Line Defect in Injection Molding Based on Visualization Technology[J]. China Plastics, 2008, 22(12):67—70.
- [15] XIE Lei, GERHARD Z. A Visual Mold with Variotherm System for Weld Line Study in Micro Injection Molding[J]. Micro-syst Technol, 2008, 14:809—814.
- [16] 严志云,谢鹏程,丁玉梅,等.基于可视化技术对注射成型喷射现象的研究[J].塑料,2010,39(3):103—106.

- YAN Zhi-yun, XIE Peng-cheng, DING Yu-mei, et al. The Jetting Phenomenon of Injection Molding Based on Visualization Technology[J]. *Plastics*, 2010, 39(3): 103—106.
- [17] 左军超. 聚合物熔体绕环形腔充填流动特性的可视化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- ZUO Jun-chao. Visualization Study on Polymer Filling Flow Behaviors of Injection Molding in Ring-shape Cavity[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [18] KOELLING K. True 3D CAE Visualization of Filling Imbalance in Geometry-balanced Runners[C]//Annual Technical Conference 2005 Conference Proceedings. Connecticut, 2005: 51—55.
- [19] OZDEMIR A, ULUER O, GULDAS A. Flow Front Advancement of Molten Thermoplastic Materials Parts[J]. *Measurement*, 2005, 38: 1—14.
- [20] 朱复华, 刘廷华, 郭奕崇, 等. 同向双螺杆挤出可视化研究[J]. *塑料*, 1996(4): 9—16.
- ZHU Fu-hua, LIU Ting-hua, GUO Yi-chong, et al. A Visual Study on the Intermeshing Co-rotating Twin Screw Extrusion[J]. *Plastics*, 1996(4): 9—16.
- [21] 林德宽, 马天保. 以透明模研究塑料注射充模行为[J]. *工程塑料应用*, 1981(2): 15—23.
- LIN De-kuan, MA Tian-bao. Study on the Filling Behavior of Polymer Using Hyaline Mold[J]. *Plastics Industry*, 1981(2): 15—23.
- [22] 杨卫民, 谢鹏程, 杨高品. 注射成型多模腔充填不平衡现象的产生机理( I )—模具流道系统中熔体流动行为的研究[J]. *中国塑料*, 2004, 18(11): 93—99.
- YANG Wei-min, XIE Peng-cheng, YANG Gao-pin. Mechanism of Filling Imbalance of Plastics Injection Molding in Multi-cavity Molds ( I )—A Study on Flow Behavior of Melt in Runner Systems of Mold[J]. *China Plastics*, 2004, 18(11): 93—99.
- [23] 杨卫民, 谢鹏程, 杨高品. 注射成型多模腔充填不平衡现象的产生机理( II )—模具流道系统中熔体温度分布的研究[J]. *中国塑料*, 2004, 18(12): 81—85.
- YANG Wei-min, XIE Peng-cheng, YANG Gao-pin. Mechanism of Filling Imbalance of Plastics Injection Molding in Multi-cavity Molds ( II )—A Study on Temperature Distribution in Runner System of Mold[J]. *China Plastics*, 2004, 18(12): 81—85.
- [24] 李豪. 超声外场作用下 GF/PP 复合材料注塑成型特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- LI Hao. Experiment Study of the Effect of Ultrasonic Field on the GF/PP Composite Materials' Injection Molding Characteristics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [25] YOKOI H, MURATA Y, NAGAYA M. Visual Analysis of Melt Flow Behavior in a Split Runner Portion Using a Glass-Inserted Mold[J]. *Seikei-Kakou*, 1997, 9(7): 557—563.
- [26] YOKOI H, UMEYAMA H, UTAKA Y, et al. Visual Analysis of Three Dimensional Melt Flow Behavior Using a Glass-Inserted Mold[J]. *Yashuo Kurosaki*, 1997, 9(3): 232—237.
- [27] YANG Wei-min, 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: 37—43.
- [28] 姜开宇, 吉智, 李豪, 等. 超声外场对聚合物注塑充型流动速度场分布影响的物理可视化表征与分析[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14): 23—28.
- JIANG Kai-yu, JI Zhi, LI Hao, et al. Representation and Analysis of Polymer Flowing Velocity Distribution Based on Physical Visualized Technology in Ultrasonic Assisted Injection Molding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 23—28.
- [29] 姜开宇, 李豪, 左军超, 等. 超声振动对玻纤增强聚丙烯复合材料注射成型特性影响的试验研究[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5): 1330—1340.
- JIANG Kai-yu, LI Hao, ZUO Jun-chao, et al. Experiment Study on Effect of Ultrasonic Vibration on Injection Molding Characteristics of Glass Fiber Reinforced PP Composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(5): 1330—1340.
- [30] 姜开宇, 李豪, 吉智, 等. 超声外场对复合材料注射成型流动行为影响的可视化实验[J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(1): 98—102.
- JIANG Kai-yu, LI Hao, JI Zhi, et al. Visual Experiment of the Effect of Ultrasonic Field on Melt Filling Flow Behavior in the Composite Materials[J]. *Polymer Material Science and Engineering*, 2015, 31(1): 98—102.
- [31] 陈静波, 申长雨, 横井秀俊. 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 Jing-bo, SHEN Chang-yu, YOKOI H. Experimental Study on Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Mold[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 170—174.
- [32] 姜开宇, 横井秀俊. 注塑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 Kai-yu, YOKOI H. Experiment Study on Filling Imbalance Phenomenon of Melt Front during Injection Molding Process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 294—300.
- [33] 姜开宇, 段飞, 田净娜, 等. 注射成型过程中复合材料在型腔内流动行为的可视化实验[J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(11): 130—132.
- JIANG Kai-yu, DUAN Fei, TIAN Jing-na, et al. Visualization Experiment of the Filling Behavior of Composite Materials during Injection Molding Process[J]. *Polymer Material Science and Engineering*, 2012, 28(11): 130—132.
- [34] 姜开宇, 田净娜, 马家家, 等. 尺寸效应对多型腔注射成型

- WANG Tao, CAO Wei, YAN Yue, et al. Rheological Behavior of Polycarbonate Melt Under Squeeze Flow[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 5(5): 73—77.
- [9] GUAN W S, HUANG H X. A Proposed Technique to Acquire Cavity Pressure Using a Surface Strain Sensor during Injection-Compression Molding[J]. J Manuf Sci Eng, 2013, 135: 1—6.
- [10] 陈宇宏, 袁渊, 刘小艳, 等. 注射成型和注射压缩成型透明件的光学性能对比与分析[J]. 航空材料学报, 2011, 31(2): 55—60.
- XHEN Yu-hong, YUAN Yuan, LIU Xiao-yan, et al. Comparison on Optical Properties of Injection Molded and Injection Compression Molded Transparencies[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2): 55—60.
- [11] KIM I H, PARK S J, CHUNG S T. Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-gated Disk: Part I. Injection Molding with Viscoelastic Compressible Fluid Model [J]. Polymer Engineering and Science, 1999, 39: 1930—1942.
- [12] KIM N H. Injection-Compression And Co-Injection Moldings Of Amorphous Polymers: Viscoelastic Simulation and Experiment[D]. Ohio: University of Akron, 2009: 123—135.
- [13] LI Y, ZHANG Y, LI D. Shrinkage Analysis of Injection-Compression Molding for Transparent Plastic Panel by 3D Simulation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 44—47: 1029—1033.
- [14] 周华民, 奚国栋, 李德群. 玻壳压制成型中残余应力的数学建模与模拟方法[J]. 中国科学, E 辑, 2007, 37(3): 409—421.
- ZHOU Hua-min, XI Guo-dong, LI De-qun. Science in China: Series E, 2007, 37(3): 409—421.
- [15] KIM N H, ISAYEV A I. Birefringence in Injection-Compression Molding of Amorphous Polymers: Simulation and Experiment[J]. Polymer Engineering and Science, 2013, 53: 1786—1808.



(上接第6页)

- 过程影响的可视化实验[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(11): 122—125.
- JIANG Kai-yu, TIAN Jing-na, MA Jia-jia, et al. Visualization Experiment for the Impact of Scale Effect on Filling Imbalance of Injection Molding[J]. Polymer Material Science and Engineering, 2011, 27(11): 122—125.
- [35] JIANG Kai-yu, TIAN Jing-na, WANG Min-jie, et al. Influence of Scale Effect on Filling Behavior of Injection Molding by Visualization Method[J]. International Polymer Processing, 2012, 27(1): 1—5.
- [36] FATHI S, BEHRAVESH A H. Visualization of In-Mold Shrinkage in Injection Molding Process[J]. Polymer Engineering and Science, 47(5): 750—756.
- [37] 祝铁利, 盛占辉, 刘永云, 等. 图像处理在注塑制品模内收缩研究中的应用[J]. 中国塑料, 2008, 22(11): 52—55.
- ZHU Tie-li, SHENG Zhan-hui, LIU Yong-yun, et al. Application of Image Processing in the Study of In-Mold Shrinkage of Injection Molded Plastic Parts[J]. China Plastics, 2008, 22(11): 52—55.
- [38] 吉智. 超声辅助注射成型充模流动特性的可视化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- JI Zhi. Visualization Research on Polymer Filling Flow Characteristics of Ultrasonic Assisted Injection Molding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [39] 姜开宇, 孙合庆, 段飞. 模塑制品内部成型收缩特性的可视化测定方法[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(11): 84—87.
- JIANG Kai-yu, SUN He-qing, DUAN Fei. Visual Measurement for Inner Molding Shrinkage of Plastic Molding Products [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2013, 29(11): 84—87.
- [40] 段飞. 聚氨酯弹性体模塑成型收缩规律的可视化实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- DUAN Fei. Visualization Experiment Study for Rule of Shrinkage of Polyurethane Elastomer Moulding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.