DOI: 10.3901/JME.2015.14.023

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*

姜开宇 吉智 李豪 王敏杰 于同敏

(大连理工大学模塑制品教育部工程研究中心 大连 116024)

摘要: 以物理可视化技术为基础, 开发一种用于观测超声外场作用下注射成型过程的新型可视化试验分析平台, 分析超声振动对聚丙烯(Polyethylene, PP)注射成型流动过程速度场分布的影响, 并结合示踪粒子标记法和 Kringring 插值提出一种充型流动速度场的表征分析方法, 研究结果表明, 注射成型过程中 PP 熔体速度分布呈中间高, 两边低, 近浇口高, 远浇口低的变化趋势; 施加超声振动后, PP 熔体流动速度显著提高, 沿流动方向, 熔体流动速度变化梯度减小; 超声振动有助于降低熔体黏度, 但黏度的降低不利于剪切热的生成, 因此并非超声功率越大, 对内部熔体速度的提升越大。同时, 超声功率的提升还会导致聚合物材料性能的改变, 影响制件的最终质量。对于本研究条件下的 PP 材料而言, 超声功率在 200~400 W 时, 对成型效果的改善比较明显。

关键词: 超声振动; 注射成型; 可视化; 流变特性; 速度场分布

中图分类号: TQ320

Representation and Analysis of Polymer Flowing Velocity Distribution Based on Physical Visualized Technology in Ultrasonic Assisted Injection Molding

JIANG Kaiyu JI Zhi LI Hao WANG Minjie YU Tongmin

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

Abstract: Based on physical visualized technology, a new visualization device is developed to understand polymer melts flowing behavior in ultrasonic vibration assisted injection molding. The impact of ultrasonic vibration on polyethylene (PP) melts flowing velocity distribution is studied. Combined with tracer particles marking and Kringring interpolation method, a new method is proposed to analyze melts flowing velocity field during injection molding process as well. The results show that the distribution of PP melts flow velocity tends to be high in the middle and near the entrance of the cavity, while low on both sides and the end of cavity. Thermoplastic melts flow is promoted by ultrasonic vibration in mold cavity, and the gradient of melts flow velocity is decreased along melts flow direction as well. Meanwhile, ultrasonic vibration has a benefit on reducing melts viscosity. But, the reduction of melts viscosity goes against to the generation of shear heat. So it is not true that the higher the ultrasonic power is, the greater the speed of melts velocity is. At the same time, the performance of polymer material is changed by the ascent of ultrasonic power which influences the final quality of parts. On the condition of this research, there is a noticeable effect on PP melts shaping when ultrasonic power is between 200 W and 400 W.

Key words: ultrasonic vibration; injection molding; visualization; rheological properties; velocity distribution

0 前言

近年来, 为改善注射成型塑料制品的充填效

果, 提升成型质量, 很多研究者将超声振动引入到注射成型过程中, 开展了大量的相关试验研究, 并取得了一定成果。STAO 等^[1-2]将超声振动引入到微注塑成型中, 发现超声振动作用下, 塑件微结构复制率最高可达 95%, 比无超声时微结构复制率提高 8%; 在其对透镜的注塑试验中发现, 超声振动后, 塑件表面粗糙度由 16 μm 降低为 12 μm , 透镜焦距

* 国家自然科学基金(51175060)和国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2012CB025905)资助项目。20140729 收到初稿, 20150127 收到修改稿

更接近设计标准, 塑件成型质量更高。WENLAI 等^[3]在喷嘴和模具之间对熔体施加超声振动探讨了超声振动对聚丙烯/三元乙丙橡胶(Polyethylene/Ethylene-propylene-diene monomer, PP/EPDM)共混的影响, 结果表明, 超声振动增强了分子间的增容作用, 制品屈服强度和抗拉强度有所提高。LU 等^[4-5]研究了超声振动对高密度聚乙烯(High density polyethylene, HDPE)和聚苯乙烯(Polystyrene, PS)共混熔体的流变特性和制品力学性能的影响, 结果发现, 超声振动使得挤出共混熔体表观黏度降低, 分子间内部黏附力增强, 熔体之间的相容性更均匀, 塑件抗拉强度提高。LEE 等^[6]利用 I-deas 模拟发现, 施加超声振动后熔体流场分布更均匀, 熔体黏度有所降低, 型腔表面熔体冷却速度变缓。仇中军等^[7]通过超声菲涅尔透镜试验得知, 超声振动后塑件充填面积提高了 6.91%, 超声振动促进了熔体在型腔内的流动。然而由于相关试验手段的欠缺, 迄今为止, 还鲜有学者对超声外场作用下的聚合物注射成型充填流动过程进行过直接的观察, 这在很大程度上限制了超声外场对注射成型作用机理研究工作的深入进行, 而物理可视化技术, 则可以为克服超声辅助注射成型研究工作所面临的困难提供有效手段。所谓物理可视化技术就是通过专门设计的模具, 使光线能进入模具型腔内, 利用高速摄像机拍摄熔体充填过程影像, 直接观察模具内熔体成型的一种研究方法^[8-9], 它可以实现对注射成型过程中熔体流动状态的观测和表征^[10-14]。本文将物理可视化技术与超声辅助成型技术相结合, 开发了一种用于超声外场作用下注射成型过程的新型可视化试验分析平台, 并提出了一种对充型流动速度场进行表征及分析的新方法。以此为基础, 研究超声外场作用下, 超声功率参数与熔体流动速度场变化之间的内在规律, 为超声辅助注射成型技术研究工作的进一步发展提供可靠依据。

1 试验装置与试验参数

1.1 超声辅助注射成型可视化试验装置

本文以一模一腔塑件的注塑成形过程为研究对象, 塑件尺寸为 $42\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ 。图 1 为可视化试验模具结构示意图^[15-16], 模具采用哈夫块式结构, 通过斜导柱实现模具的开合动作, 结合直视式可视化光线回路, 便可清晰观测熔体在型腔内充填流动行为; 超声振动施加方式如图 2 所示, 超声振子与型腔镶块通过双头螺柱连接, 由超声振子端面的振动带动型腔块在型腔中心线方向产生几十微米的振动量, 超声振子由上海生析超声仪器有限公司订做, 频率为 19.5 kHz, 超声功率 0~800 W 可

调, 最大振动幅度 $52\text{ }\mu\text{m}$ 。试验中采用 NAC 公司的 fxK4 型 hotshot 512sc 高速摄像机, 通过模具上观察窗口, 记录成形过程中聚合物熔体的动态流动过程, 试验拍摄帧数为 3000 帧/s。注塑成型机为德国 Dr.Boy GmbH & Co.KG 生产的 BOY12A 型微注塑机。可视化试验平台及其组成如图 3 所示, 为了防止超声衰减, 注射成型开始前 1~2 s 起动超声发生器, 同时利用高速摄像机进行记录。

图 1 注塑模具结构示意图

图 2 超声振动施加方式图

图 3 可视化试验平台

1. 数据采集装置 2. 超声发生器 3. BOY12 注塑机 4. 超声振子
5. 可视化模具 6. 照明装置 7. 高速摄像机

1.2 试验材料与试验参数

试验材料选用中国石油天然气集团公司大庆分公司生产的 PP, 牌号 T30S, 密度为 1.15 g/cm^3 。

试验中为了获得熔体流动过程中熔体流动信息, 在熔体中加入示踪颗粒作为标记点, 以标记点反映的数据信息, 表征标记点附近熔体的流动信息。为减小示踪颗粒对熔体流动的影响, 选用直径在 $0.20\sim 0.30\text{ mm}$ 的椰壳活性炭作为示踪颗粒。

为了研究超声功率对聚合物充填流动行为的影响, 本研究将试验过程分为 4 组, 超声频率为 19.5

kHz, 注射速度(Injection rate, IR)为 $5.175 \text{ cm}^3/\text{s}$, 超声功率参数分别为 0 W、200 W、400 W、800 W。注塑工艺参数如表 1 所示。

表 1 试验工艺参数

注射压力/ MPa	保压压力/ MPa	保压时间/ s	料筒温度/ ℃	模具温度/ ℃
80	110	0.5	220	60±1

2 熔体流场速度分布的表征方法

图 4 为利用高速摄像机所拍摄的聚合物熔体在型腔内充填流动过程的可视化图像。图 4a~4h 依次表示熔体流动过程的不同位置, 图 4a 表示聚合物熔体刚从浇口流入型腔, 图 4c 表示聚合物熔体恰好与型腔两侧壁接触, 图 4h 表示聚合物熔体刚好与型腔末端接触, 充填过程结束。图像中小黑点即为示踪颗粒, 通过获得图像中同一示踪颗粒在不同时刻的流动位置信息, 即可获得这颗示踪颗粒附近熔体的流动速度信息。

图 4 示踪颗粒充填过程图像

为了准确表征熔体流场的速度分布, 选择熔体流入型腔, 刚好与型腔侧壁接触时作为计算初始位置, 如图 4c 所示; 以聚合物前沿熔体恰好流动至型腔末端为计算终止位置, 如图 4h 所示。然后按时间等分 17 份, 时间间隔为 20 ms, 选取对应的图像表

征熔体的整个充填过程。

本文以图 5 为例对示踪颗粒是否为有效数据标记点的判定方法加以说明。由图 5a 中熔体流动位置可以得知, 此时熔体正处于充填前中期, 熔体流动速度相对较大, 理论上两相邻时刻示踪颗粒会有明显的位置变动, 如图 5 中示踪颗粒 1 所示, 而示踪颗粒 2 在两相邻流动位置图片中位置变化不大, 且在后续的流动过程中, 示踪颗粒 2 的位置也几乎不变, 所以认为此示踪颗粒黏附于型腔壁面, 不能表征此处熔体的实际流动状态, 因此示踪颗粒 1 为有效标记点, 示踪颗粒 2 为无效标记点。

图 5 相邻两计算时刻熔体流动位置

选定计算初始图片中某一有效标记点, 利用图像数据处理软件(Image pro-plus)获取此标记点在计算初始图像中的坐标值(x_0, y_0), 然后依次获得此有效标记点在各流动位置图像中的坐标值(x_n, y_n), 这样就获得了同一有效标记点在不同时刻的坐标值; 以坐标值为基础, 计算相邻两图像中同一有效标记点的距离差, 如式(1)所示; 用计算所得的距离值与流动时间差(相邻两帧图像之间的时间差)的比值作为此有效标记点在中间位置的速度值, 如式(2)所示, 依次类推, 得到同一有效标记点在整个流动过程中的 16 个位置点及对应速度值; 为了确保有效标记点能够准确表征整个型腔内熔体的流动信息, 选取 6~8 个均布在型腔宽度方向的有效标记点, 依次计算其在不同位置的坐标值及对应速度值, 将所有有效标记点的速度值汇总后, 对数据进行 Kringing 插值处理, 得到整个型腔平面内熔体流动速度值, 利用数据处理软件(Origin 8.5)可以绘制出熔体流场速度场 3D 彩色映射曲面图和速度等高线云图, 从而可以表征型腔内全部熔体的速度信息。

$$\Delta s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

$$v_t = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 P_1, P_2 ——相邻两图像同一有效标记点;
 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ —— P_1, P_2 坐标值;

v_t —— P_1, P_2 中间位置流动速度值;

Δs —— P_1, P_2 两点之间距离差;

Δt —— P_1, P_2 两点之间时间差。

3 试验结果与讨论

图 6 为根据可视化示踪试验结果所得到的不同超声功率参数下, 熔体流动速度场 3D 彩色映射曲面图, 由曲面上某一点向 x 、 y 、 v 轴分别作垂线, 即得到了曲面图像上此点的数据值, 也即曲面上某点的含义是坐标值为 (x, y) 处的熔体, 其流动速度大小为 v 。可以看出, 熔体流动速度场呈中间高、两边低、近浇口高、远浇口低的变化趋势; 施加超声振动后, 熔体流动速度场 3D 彩色映射曲面图更“鼓”, 即熔体速度更高; 而未施加超声振动的熔体进入型腔后的速度下降幅度明显比施加超声振动的熔体大。

图 6 注射速度为 $5.175 \text{ cm}^3/\text{s}$, 型腔平面熔体流动速度场 3D 彩色映射曲面图

为更加直观地表征型腔内熔体的速度场分布, 可以将图 6 所对应的型腔内部熔体流动速度场分布三维曲面图转化为如图 7 所示的二维等高线云图。通过对型腔内部熔体流动速度场的进一步观察, 可以看出: ① 施加超声振动后, 高速区域 ($v \geq 0.10 \text{ m/s}$ 的图像区域) 明显增大: 若将无超声时高速区域的图像面积设为 a , 则超声振动功率为 200 W 的图像区域面积为 $7a$, 400 W 的图像区域面积为 $2.5a$, 800 W 的图像区域面积为 $3a$; ② 沿 y 轴方向施加超声振动后, 不同颜色区域间隔变小, 即速度变化梯度变小; ③ 施加超声振动后, 型腔两侧壁处熔体低速区域 ($v \leq 0.033 \text{ m/s}$ 的区域) 面积变小, 而且超声振动后, 低速熔体区域距浇口距离更长, 与无超声时相比, 低速熔体出现得更晚。总体而言, 从熔体流动速度的大小以及速度分布的均匀性角度上讲, 当注射速度为 $5.175 \text{ cm}^3/\text{s}$ 时, 200 W 功率超声对 PP 内部流场改善效果最明显, 400 W 、 800 W 次之, 且均好于传统注射成型熔体流动速度场分布。

图 7 注射速度为 $5.175 \text{ cm}^3/\text{s}$, 型腔平面熔体流动速度场等高线图

试验发现, 超声振动辅助注射成型熔体流动速度大于传统注射成型, 超声振动能促进内部熔体流动, 使流动方向熔体速度变化梯度变小; 超声振动能显著提高两侧壁处熔体流动速度; 超声振动有助于降低熔体黏度, 但黏度的降低不利于剪切热的生成。

熔体充填过程中, 型腔侧壁处熔体, 不仅与型腔上下壁面接触, 还与型腔侧壁接触, 与型腔中间部位熔体相比, 熔体流动阻力大, 热传导面积大, 能量损失多, 因此, 侧壁处熔体温度下降快, 黏度大, 型腔侧壁处熔体流动速度比中间熔体小, 表现为如图 6 所示的熔体速度场分布呈中间高、两边低的变化趋势。

分析认为, 超声作用后, 一方面, 型腔镶块沿长度方向做连续脉动运动, 使得型腔不规则表面对型腔内部熔体的挤压是波动性的, 熔体与型腔壁面的黏附力减弱, 熔体流动阻力减小, 同时, 超声振动使聚合物熔体受到交替变化的压缩和伸张产生的正压和负压作用, 大分子链获得不同程度的运动加速度, 运动速度提高; 另一方面, 由于超声的传播过程实际是能量传递的过程, 聚合物吸收超声传递的能量, 熔体能量增加, 温度升高, 流动活化能升高, 大分子链段运动能力增强, 加之超声作用对大分子链团交替变化的压缩和伸张作用使大分子链沿流动方向取向程度增强, 分子链旋转半径增大, 分子链间缠结减少, 自由体积增大, 链段自由运动空间增大, 宏观上表现为熔体流动速度增大; 同时, 相邻不同流速层间熔体剪切作用增强, 剪切热增多, 熔体温度上升, 黏度降低。因此, 超声以及熔体间剪切热共同作用使得型腔内熔体流速增大, 速度下降速度减小, 速度变化梯度减小。而型腔侧壁处熔体与中间熔体相比, 超声作用对熔体与壁面间黏附力的降低幅度更大, 所以两侧壁处熔体流动速度的提升比中间熔体更明显。

试验发现, 200 W 功率超声对熔体内部速度场分布的改善效果最好。分析认为, 超声作用及热效应虽然会使得熔体温度上升, 黏度下降, 流动速度提高, 但是, 黏度的降低不利于剪切热的生成。黏度越小, 相邻熔体之间的剪切作用越小, 生成的剪切热总量减小。由剪切力定义可知, 聚合物成型过程中, 剪切力的大小与熔体温度、熔体黏度以及高聚物间速度梯度有关。因此, 虽然 800 W 功率超声时, 对熔体的黏度影响最大, 黏度的降低有利于熔体的流动; 但是由于熔体黏度较低, 以及相邻熔体间速度梯度小, 产生的剪切热比 200 W 功率超声时要少, 超声作用和剪切热综合作用对熔体温度的提升不如 200 W 明显, 导致速度场改善有限。

4 结 论

超声外场下注射成型流动过程的物理可视化试验分析表明, 超声振动对注射成型过程聚合物充型流动行为有很好的改善作用, 具体结论如下。

(1) PP 聚合物熔体在型腔内流动的流场速度分布呈中间高、两边低、近浇口高、远浇口低的变化趋势。

(2) 超声外场下注射成型内部流场速度高于传统注射成型, 且超声振动能促进内部熔体流动, 使熔体在流动方向上速度变化梯度变小; 超声振动能显著提高两侧壁处熔体流动速度。

(3) 超声振动有助于降低熔体黏度, 但黏度的降低不利于剪切热的生成, 因此并非超声功率越大, 对内部熔体速度的提升越大。同时, 超声功率的提升还会导致聚合物材料性能的改变, 影响制件的最终质量。对于本研究条件下的 PP 材料而言, 超声功率在 200~400 W 时, 对成型效果的改善比较明显。

参 考 文 献

- [1] STAO A, AKAGUCHI H, ITO H, et al. Evaluation of replication properties on moulded surface by ultrasonic injection moulding system[J]. *Plastics Rubber and Composites*, 2010, 39(7): 315-320.
- [2] STAO A, ITO H, KOYAMA K. Study of application of ultrasonic wave to injection molding[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2009, 49(4): 768-773.
- [3] WENLAI F, ISAYEV A I. In-situ ultrasonic compatibilization of unvulcanized and dynamically vulcanized PP/EPDM blends[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 44(11): 2019-2028.
- [4] LU Chang, YU Xiaofeng, GUO Shaoyun. Ultrasonic improvement of weld line strength of injection-molded polystyrene and polystyrene/polyethylene blend parts[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2005, 45(12): 1666-1672.
- [5] LU Chang, YU Xiaofeng, GUO Shaoyun. The mechanism of ultrasonic improvement of weld line strength of injection molded polystyrene and polystyrene/polyethylene blend parts[J]. *Journal of Polymer Science Part B-polymer Physics*, 2006, 44(10): 1520-1530.
- [6] LEE J, KIM N. Prediction of charging rate in ultrasonic vibration of injection molding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(3): 710-715.
- [7] 仇中军, 郑辉, 房丰洲, 等. 纵向超声波辅助微注塑方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(2): 170-176.
- QIU Zhongjun, ZHENG Hui, FANG Fengzhou, et al. Longitudinal ultrasound-assisted micro-injection moulding method[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(2): 170-176.
- [8] TREDOUX L, SATOH I. Investigation of wave-like flow marks in injection molding: Flow visualization and micro-geometry[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1999, 39(11): 2233-2241.
- [9] TREDOUX L, SATOH I. Investigation of wave-like flow marks in injection molding: A new hypothesis for the generation mechanism[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2000, 40(10): 2261-2274.
- [10] WHITE J L, DEE H B. Flow visualization for injection molding of polyethylene and polystyrene melts[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1974, 14(3): 212-222.
- [11] YOKOI H, HAYASHI T, HIRAOKA H. Visual analysis of the process of plastic flow inside an injection mold[J]. *Production Research*, 1987, 39(7): 20-23.
- [12] OZDEMIR A, ULUER O, GULDAS A. Flow front advancement of molten thermoplastic materials during filling stage of a mold cavity[J]. *Polymer Testing*, 2004, 23(8): 957-966.
- [13] 姜开宇, 横井秀俊. 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.
- JANG Kaiyu, 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.
- [14] 姜开宇, 田净娜, 马家家, 等. 尺寸效应对多型腔注射成型过程影响的可视化研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2011, 27(11): 122-125.
- JIANG Kaiyu, TIAN Jingna, MA Jiajia, et al. Visualization experiment for the impact of scale effect on filling imbalance of injection molding[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2011, 27(11): 122-125.
- [15] 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 Jingbo, SHEN Changyu, YOKOI H. Experiment study on filling imbalance in multi-cavity injection molding process[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(2): 170-174.
- [16] 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): 129-132.
- JIANG Kaiyu, DUAN Fei, TIAN Jingna, et al. Visualization experiment of the filling behavior of composite materials during injection molding process[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2012, 28(11): 129-132.

作者简介: 姜开宇(通信作者), 男, 1971 年出生, 副教授。主要研究方向为先进成形技术。

E-mail: jiangky@dlut.edu.cn