

纵向超声波辅助微注塑方法

仇中军, 郑 辉, 房丰洲, 王寰宇

(精密测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘 要: 微注塑过程中, 聚合物熔体在微小腔体中流动时充模阻力比常规注塑大, 这影响了熔体填充效果, 同时热量损失的不均衡性和不确定性容易导致注塑精度不高. 提出了纵向超声波辅助微注塑方法, 并对超声波振动对聚合物熔体的作用机理进行了探讨, 分析了超声换能器结构对应力、振幅和响应频率的影响. 基于对微注塑过程的模拟结果, 开发了纵向超声波辅助微注塑装置. 通过在微注塑过程中纵向超声波对熔体的能量作用降低熔体黏度, 改善了熔体流动和充填性能. 为了验证超声波辅助微注塑的效果, 进行了菲涅尔透镜实际注塑实验. 实验结果表明, 相同的注塑工艺条件下, 超声辅助微注塑过程中聚合物熔体的充填性能提高了 6.91%.

关键词: 微注塑; 超声波振动; 充填性能; 菲涅尔透镜

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1672-6030(2012)02-0170-07

Longitudinal Ultrasound-Assisted Micro-Injection Moulding Method

QIU Zhong-jun, ZHENG Hui, FANG Feng-zhou, WANG Huan-yu

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments(Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: Polymer melt flowing in micro/nano structures in micro-injection moulding is relatively insufficient in mould filling, compared with that in a conventional injection moulding, since the flow resistance of polymer melt flowing in micro-channel is larger, and product quality is affected by uncertainty and non-uniformity of heat loss. In this paper, a longitudinal ultrasound-assisted micro-injection moulding method was proposed, the mechanism of ultrasonic vibration affecting polymer melt was presented, and the effects of ultrasonic amplitude transformer on stress condition, amplitude and resonance frequency were analyzed. An ultrasound-assisted micro-injection moulding system was developed based on the simulation result of micro-injection moulding process. The system decreased the viscosity of polymer melt and improved fluidity and mould filling capability due to the energy exchange between longitudinal ultrasound and polymer melt. In order to verify the effect of ultrasound-assisted micro-injection moulding, an ultrasound-assisted micro-injection moulding experiment on Fresnel lens was conducted. Experimental results show that the mould filling capability of polymer melt in micro-injection moulding process is improved by 6.91% with the same injection parameters.

Keywords: micro-injection moulding; ultrasonic vibration; mould filling capability; Fresnel lens

随着聚合物材料在微系统中的广泛应用, 作为聚合物材料微结构常用制造方法的微注塑成型技术, 近年来逐渐成为微系统领域的研究热点^[1]. 微注塑成型

技术是一种可以批量生产精密微细结构塑件的制造技术, 具有工艺简单、生产效率高以及成本低等特点^[2]. 然而微注塑成型技术和传统常规注塑技术相比, 由于

收稿日期: 2011-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905125); 教育部预研项目(625010309).

作者简介: 仇中军(1974—), 男, 博士, 副教授, qiuzhongjun@tju.edu.cn.

通讯作者: 房丰洲, 教授, fzfzang@tju.edu.cn.

微型塑件体积比较小,聚合物熔体在微小模具腔体里流动时其黏度和充模阻力就会增大,严重影响熔体填充效果^[3,4];而且微注塑过程中热量损失的不均衡性和不确定性容易导致注塑精度不高.为了保证聚合物熔体能够充满型腔,目前主要采用提高聚合物熔体的熔融温度和模具温度方法,这虽然在一定程度上改善了熔体充模效果,但较高的模具温度不仅增加了加热时间,也增加了脱模时的冷却时间,不仅浪费能源且生产效率低下,同时也给微注塑成型系统的设计和制造提出了较高的要求^[5-7].

因此,本文提出将纵向超声振动加入到微注塑成型过程中的超声波辅助微注塑成型方法,在不提高聚合物熔融温度和模具温度的情况下,通过在微注塑成型过程中将超声能量作用在熔体上来降低熔体黏度,以超声场的作用促进熔体流动性能,使聚合物熔体能够顺利完成高质量充模,简化微注塑成型系统,提高微注塑成型质量.

1 超声波辅助微注塑原理及装置

1.1 超声波辅助微注塑原理

超声波作为声波的一部分,遵循声波传播的基本规律,而且和可听声波相比,超声波的频率极高,在很小的几何尺寸中传播的方向性可以得到非常好的保证,同时由于超声波在传播过程中介质质点振动的加速度非常大,能够对介质材料瞬间施加较大的能量影响,因此把超声波作用在聚合物熔体上,通过超声波与聚合物熔体间能量交换可以改善熔体流动性能^[8-10].基于以上考虑,本文在微注塑成型过程中,利用超声波对模具实施高频振动,超声波在聚合物熔体中传播时和聚合物熔体间产生能量交换,从而改善熔体流动性,提高聚合物熔体的充模性能,进而改善微注塑件的成型质量.

为保证超声波的传递效率,本文将超声波振动直接作用在聚合物熔体上,超声波作用方向垂直于聚合物熔体流动方向(纵向).同时,由于微注塑的塑件或其上的微结构的尺寸比较小,当聚合物熔体温度降低到玻璃态温度以下时,超声波模芯的振动会影响塑件的形状质量,因此将超声波的作用设定在从合模开始后的聚合物熔体射出以及保压阶段.具体的超声波辅助微注塑成型过程如图1所示.

1.2 超声波辅助微注塑装置

从上述超声波辅助微注塑原理可知,超声波作用只发生在熔体注射和保压阶段,对于传统的注塑过程中的塑化、合模、冷却、开模和塑件顶出等过程不作干

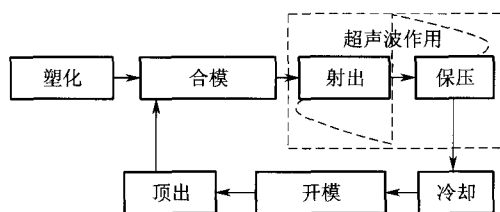


图1 超声波辅助微注塑成型过程

预,实际上只是对聚合物熔体进入模具后施加超声波作用.因此本文将超声波振动通过模芯直接作用在聚合物熔体上,这样不仅可以提高超声波的传递效率,而且可以简化模具的结构,避免在模具局部引起应力集中和温度分布不均衡,从而改进微注塑成型效果.

一般来说,超声波系统包括超声波发生器、超声波振动系统2部分,而超声波振动系统由超声波换能器、变幅杆组成.本文开发的纵向超声波辅助注塑模具系统如图2所示.模具采用两段式结构,超声波作用主要通过安装在动模上的超声波振动系统施加给聚合物熔体,振动系统通过引出线和超声波发生器连接.超声振动系统通过支架固定在动模固定板上,由于动模固定板是和注塑机固定台板相连,因此可以保证振动系统可产生稳定的超声波振动.变幅杆和超声波换能器被压紧在固定支架上,微注塑模芯被直接加工在变幅杆端部或者通过焊接的方法和变幅杆相连接,从而保证超声波振动通过变幅杆可以直接作用在聚合物熔体上,提高超声波振动对聚合物熔体的作用效果.

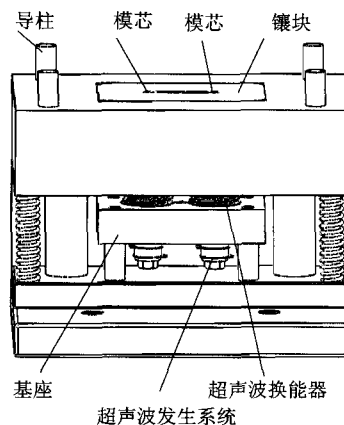


图2 纵向超声波辅助注塑模具系统示意

对于常规注塑模具来说,一般由成型系统、浇注系统、冷却系统、排气系统、导向和脱模机构等部分组成.如图2所示,纵向超声波辅助注塑模具系统是将超声波变幅杆和模芯连为一体,因此,其浇注系统、冷却系统、排气系统、导向和脱模机构与常规模具系统基本类似,在此不再赘述.本文将重点论述纵向超声波辅助注

塑模具的超声振动系统的设计。

2 微注塑模具超声波振动系统

超声振动系统的作用是通过接收超声波发生器产生的一定功率和频率的电信号,并将其转化为超声波振动,以提供微注塑成型过程中所需要的能量。它主要由超声波换能器、超声变幅杆以及超声支架组成。其中换能器的作用是将交流电信号转换为超声振动的机械能,它决定了超声波振动产生的形式及能量转化的效率。由于受到模具整体空间的限制,在换能器的选择上需要体积小、转换效率高的换能器,因此本文选择压电陶瓷换能器作为微注塑模具超声波振动系统的换能器。换能器结构采用夹心式的朗之万换能器结构,将压电材料做成一定厚度的圆环形状,若干个圆环压电片极化方向两两相反,中间夹持圆环电极,通过螺栓连接在一起,安装时通过螺栓的旋紧程度控制施加给压电材料的预紧力。这样的结构使换能器在工作时不会受到太大的张力,可以降低换能器的谐振频率,同时能够增加换能器的机械强度,避免压力过大引起压电陶瓷片的破裂。由于换能器产生的机械振动幅度较小,因此还需要变幅杆将这个机械振动进行放大以保证将超声振动能量传递给聚合物。超声支架的作用是使变幅杆的振动节点固定,保证超声波振动系统稳定、高效地将机械振动传递给聚合物熔体。

2.1 微注塑模具超声波振动系统变幅杆设计

在设计超声波辅助注塑模具系统中,注塑模芯和超声振动系统的超声变幅杆是一体的,直接和聚合物熔体发生作用,因此变幅杆是影响超声波辅助注塑效果的重要部件。变幅杆一方面可以将换能器产生的超声波振动通过变幅杆的作用将机械振动质点(模芯)的位移量和运动速度进行放大;另一方面将超声波能量聚集在模芯处较小的面积上,产生聚能作用,提高超声波对聚合物熔体的作用效果。其工作原理是假设在不发生传播损耗的情况下,超声波在弹性杆上每一截面的振动能量是固定不变的,因此截面越小,能量密度越大。变幅杆截面能量密度为

$$\rho_e = \rho u \omega^2 \xi^2 \quad (1)$$

式中: ρ 为介质密度; u 为波速; ω 为振动角频率; ξ 为振幅。

从式(1)中可以看出,截面小的地方由于能量密度大,振幅就得到了放大。为实现振幅放大,微注塑模具超声振动系统的变幅杆应为截面不同的多段式结构,且要保证和聚合物熔体发生作用处的截面积为最小。

图3所示为纵向超声波辅助微注塑模具的多段复

合阶梯型变幅杆的形状。其中, L 为变幅杆长度, L_0 为法兰盘宽度,用于固定节点, L_1 为圆柱段长度, L_2 为圆锥过渡段长度, L_3 为执行段长度(固定不变),和模芯连为一体。在纵向超声波辅助微注塑过程中,为使超声振动无损失地传递给模芯端部,故将变幅杆端部与模芯设计为一体,即在变幅杆端部加工制品形状或者将模芯和变幅杆焊接在一起,这就要求变幅杆需部分跟模具镶块进行过渡配合,且直径为制品直径大小(本文设定为 $\phi 5 \text{ mm}$),如图3所示的 L_3 部分。同时这部分变幅杆长度受限于模具的整体结构,如冷却水管的排布以及与分型面的距离,因此设计时这部分变幅杆在确定合理的长度之后作为不变段;变幅杆底部为换能器结合段以及节点固定部分,这段直径需考虑换能器的连接以及流道间距的大小以及拉料杆的位置,本文中为 $\phi 16 \text{ mm}$ 。在变幅杆的底部,需要设计一个法兰盘以便用于变幅杆和模具的固定,而为了不使超声振动损失,在法兰盘上设定隔振槽,在安装时,通过固定法兰盘的边缘,使得振动损失达到最小。

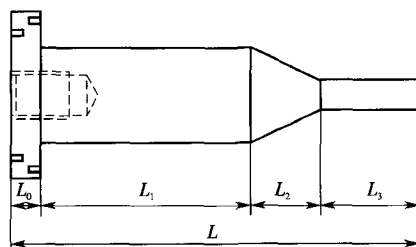


图3 多段复合阶梯型超声变幅杆

为保证变幅杆在工作时满足抗疲劳强度高、声阻抗率和材料损耗小的要求,变幅杆的材料选择钛合金。根据振动理论,变幅杆在其固有频率等于激振频率时,变幅杆产生谐振,从而能够使变幅杆端部达到最大振幅。因此为了使变幅杆能够在相同的能量下产生最大的振幅,在设计时尽量使变幅杆在共振状态下工作,以提高效率及能量利用率。设计时,考虑超声波辅助微注塑模具系统的紧凑性,同时保证能够获得最大的放大系数和输入力阻抗,将变幅杆设计为 $1/4$ 波长变幅杆。为此应使变幅杆的长度等于超声波的 $1/4$ 波长或其整数倍,即

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{C}{4f} \quad (2)$$

式中 C 为超声波在变幅杆中的传播速度; f 为超声波振动频率。

超声波在钛合金棒中的传播速度为 5120 m/s ,由式(2)得到变幅杆长度 L 为 $51 \sim 85 \text{ mm}$,由于超声辅助微注塑振动系统受到注塑机行程、模具系统整体空

间的限制,因此变幅杆各部分长度和直径需要综合考虑模具结构空间及超声波振动参数等因素.

2.2 微注塑模具超声波振动系统变幅杆的有限元分析

在超声波辅助微注塑模具系统中,变幅杆和模芯是一体的,因此变幅杆一方面在超声振动系统中起到放大超声波振幅、聚集能量的作用,另一方面在模具成型系统中起着承受注塑及保压压力,完成微结构塑件成型的作用. 因此在设计确定复合变幅杆各部分具体尺寸时需要综合考虑应力、谐振和放大系数等因素的影响. 本文所设计的变幅杆属于多段复合型变幅杆,形状比较复杂,同时由于安装需求,端部需要设计法兰盘通过螺栓和注塑机台板固定,因此通过传统的解析法进行设计难度较大,笔者根据多段复合变幅杆设计理论,利用有限元分析方法综合分析应力、谐响应状态和执行端位移等因素,以确定变幅杆的各部分尺寸.

直接在 ANSYS 中进行建模,通过创建关键点,由关键点生成线,由线生成面,通过回转体的方式得到变幅杆模型. 在材料选择方面,由于钛合金的弹性模量比较小,是合金钢的一半左右,但抗拉强度却是合金钢的 2 倍,在工作频率范围内的损耗小,材料的疲劳强度高,声阻抗率小,同时易于机械加工,抗腐蚀能力强,故最终选定钛合金 TC4 作为变幅杆的材料. 其材料特性如表 1 所示.

表 1 TC4 的材料参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比
TC4	4 400	110	5 120	0.32

采用 SOLID95 单元对变幅杆进行自由映射网格单元划分,网格大小设置为 smartsize1 以保证分析的可靠性,图 4 为划分网格后的模型图.

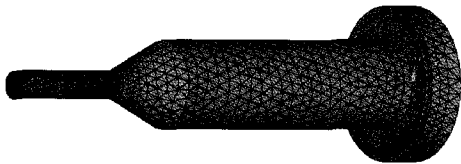


图 4 超声辅助微注塑振动系统变幅杆有限元模型

2.2.1 变幅杆应力分布

在微注塑过程中,从聚合物注射阶段开始,会通过模芯传递给变幅杆较大的不稳定脉动循环变应力,容易造成变幅杆的疲劳失效和塑性变形失效. 因此在设计过程中一方面通过选择强度较高的材料作为变幅杆材料,另一方面设计合理的结构和尺寸,尽量减少局部

过大应力的产生. 因此,需要预先对变幅杆的结构进行应力分析,根据变幅杆的应力分析优化变幅杆的结构和尺寸. 本文利用所建立有限元模型对超声波辅助微注塑系统的多段复合变幅杆的应力进行了分析. 应力分析时,将法兰处固定,在变幅杆端部(模芯, $\phi 5 \text{ mm}$)施加 100 MPa 的载荷(微注塑过程中保压压力的模拟值),以过渡段 L_2 为变量,得到的变幅杆应力分布如图 5 所示.

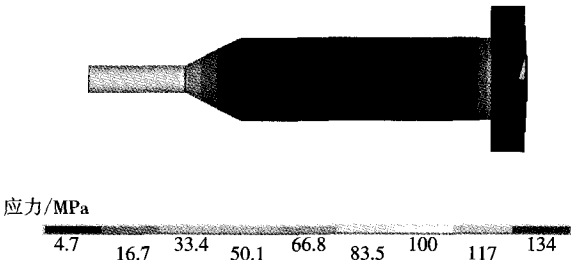


图 5 变幅杆应力分布

由应力分布图可以看出,纵向超声波辅助微注塑过程中,变幅杆的最大应力发生在执行段 L_3 和过渡段 L_2 相交部位,其大小随着 L_2 长度的变化而变化. 改变过渡段 L_2 的长度进行有限元仿真,可以得到变幅杆在保压压力作用下,最大应力变化情况如图 6 所示. 在相同压力作用下,随着过渡段 L_2 的增大,发生在变幅杆执行段 L_3 和过渡段 L_2 交界处的最大应力逐渐减小,并且逐渐趋于平缓,不再发生急剧变化. 因此,从降低变幅杆局部最大应力角度来说,尽量选择过渡段 L_2 稍大的结构($>10 \text{ mm}$),以避免变幅杆形状发生急剧变化而引起应力集中.

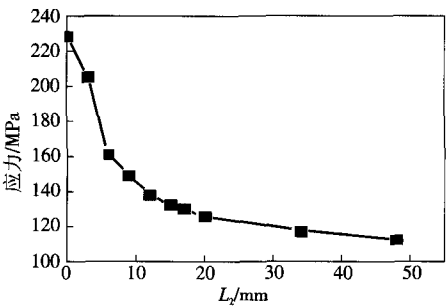
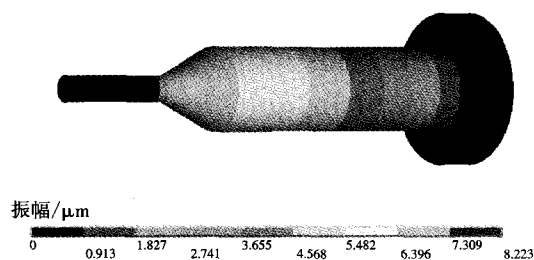


图 6 变幅杆最大应力变化情况

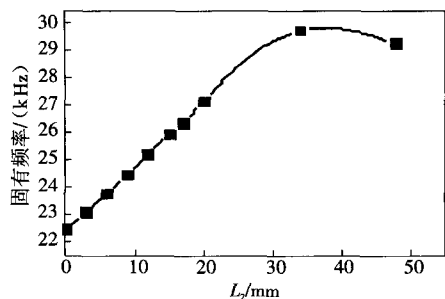
2.2.2 模态分析

为使外激振动频率和变幅杆的固有频率接近,实现变幅杆在谐振或者接近于谐振状态下工作,需要获得不同状态下变幅杆的固有频率及其振型的振动特性. 利用 ANSYS 自底向上建立模型,单元类型采用 SOLID95,分别创建不同 L_2 值的变幅杆结构,并依次对

它们进行模态提取,根据超声波对聚合物的作用特点,频率搜索区间定为 15 ~ 30 kHz,对搜索的结果进行校验,找出在纵向均匀振动的振型,此阶次的固有频率即研究所需要的固有频率,振型图及固有频率如图 7 所示.



(a) 振型图



(b) 固有频率

图 7 变幅杆振动模式

由图 7(a)可以看出,变幅杆各段所对应的振幅比较均匀,能够在纵向均匀振动,形成良好的振型.以过渡段 L_2 为变量,分别得到各个过渡段所对应的良好振型,其固有频率变化见图 7(b).由图中可以看出,随着过渡段长度的增加,其结构改变的同时,变幅杆固有频率逐渐增大.当阶梯型变幅杆只剩模芯段和过渡段时,即过渡段长度最长时,固有频率有所下降.这是因为整体结构发生了变化,变幅杆由 3 段变为 2 段所引起的.

2.2.3 谐响应分析

从振动理论可知,一个确定的结构在已知频率振动激励下,当达到谐振响应时,可以获得变幅杆的自由端面的最大输出振幅和放大系数.从变幅杆的模态分析可知,当变幅杆的结构尺寸发生变化时,变幅杆的固有频率也随之发生变化,因此不同结构变幅杆发生谐振的频率和最大输出振幅也是不同的.为了给新型变幅杆的设计、优化提供近似实际实验结果的数据参考,对不同结构尺寸的变幅杆进行了谐响应分析.对换能器与变幅杆接触面施加纵向振幅为 $2 \mu\text{m}$ 的位移,分析其最大输出振幅.为了使谐响应分析能更准确地反应位移放大情况,将频率范围缩小到图 7(b)中各结构尺寸下对应的固有频率 10 Hz 以内,提取每个频率点

上的输出位移响应.图 8 为不同结构尺寸下变幅杆的最大输出振幅.

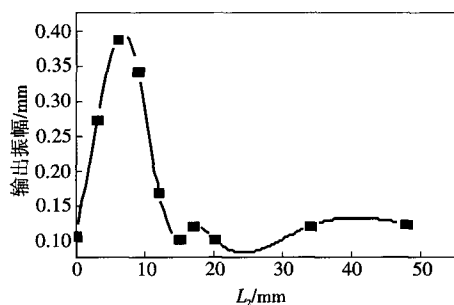


图 8 变幅杆执行端最大输出振幅

图 8 中所示的输出振幅的变化趋势和振动理论略有不同,没有随着结构尺寸 L_2 的增大(固有频率增大)而单纯减小,而是随着结构尺寸 L_2 长度增大,变幅杆端部(模芯)输出振幅先增加到一最大处($L_2 = 6 \text{ mm}$)后减小.其原因是由于和单纯的变幅杆相比,如图 3 所示的变幅杆端部增加了固定法兰盘,从而导致了输出振幅变化趋势的改变.

综合比较上述应力、固有频率以及输出振幅分析结果,可以发现,在目标工作频率范围内,最大应力随着过渡段长度 L_2 的增加呈下降趋势,而执行端位移在经历一个波峰后也呈下降趋势.综合应力和输出振幅分析结果,可以得到 L_2 在 9 ~ 12 mm 之间时,不论从应力大小还是振幅放大来说都比较合适,而且在此区间的变幅杆固有频率不高,可以很容易实现谐振效应,获得相对较大的输出振幅和放大系数.因此,对于本文来说,变幅杆设计时,结构尺寸 L_2 应优先考虑采用在 9 ~ 12 mm 之间的值.

根据以上分析结果,为注塑机 FANUC ROBOSHOT S-2000i 50 设计的超声波辅助微注塑模具(动模)系统实物照片如图 9 所示.

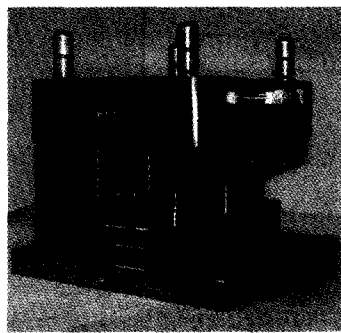


图 9 超声波辅助微注塑模具系统实物照片(动模)

3 超声波辅助微注塑实验及讨论

为了验证超声波辅助微注塑模具的效果,进行了菲涅尔透镜的超声波辅助微注塑实验.设计的菲涅尔透镜模具如图 10 所示,由一系列同心环构成,为了更直观地比较超声波对微注塑过程中充模效果的影响,调整微注塑工艺参数,使注塑过程中发生充模不满的情况,这样就可以通过测量塑件的面积比较不同情况下的充模效果.

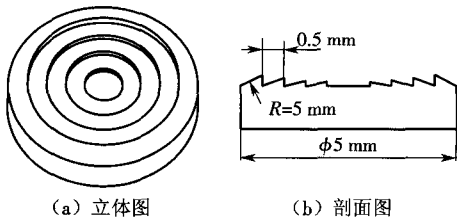


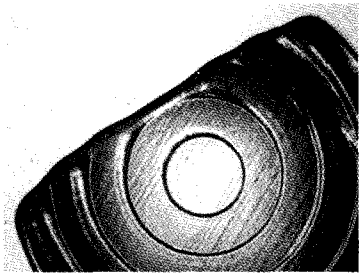
图 10 菲涅尔透镜模具示意

利用 MOLDFLOW 对充模过程仿真,获得在无超声辅助注塑情况下充模不满的注塑工艺条件.取其中一组参数(见表 2)分别进行 5 组无超声、有超声(超声波频率设定为 27 kHz)2 种情况下的菲涅尔透镜注塑实验.获得的菲涅尔透镜塑件如图 11 所示.

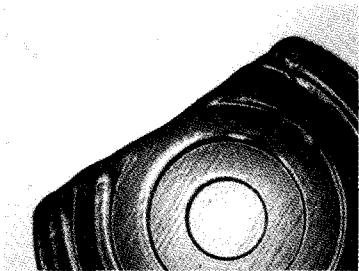
表 2 菲涅尔透镜微注塑实验参数表

材料	模具温度/℃	熔体温度/℃	注射速度/(mm·s ⁻¹)	压力切换/MPa	保压压力/MPa	保压时间/s	冷却时间/s	锁模力/t
Zeonex480R	90	250	10	15	20	2	10	30

观察菲涅尔透镜塑件可知,由于实验中设定的为充模未满足的注塑参数,因此 2 种方法都造成了塑件在距离浇口的远端形成了豁口,但是超声波辅助微注塑方法获得的塑件的豁口明显要小于传统的微注塑方法(未加超声波),从其形状来看,常规注塑方法的菲涅尔透镜塑件只是形成 2 个同心圆区域,而超声波辅助微注塑方法则形成 3 个同心圆.充模面积的测量结果也证明了这一点.使用 OGP smartscope CNC 200 对所得塑件制品进行拍照并进行边缘矢量提取后,导入 Autocad 中,利用 Autocad 面积计算功能即可获得塑件的面积.其结果显示,传统微注塑方法(不加超声)形成的平均面积为 31.689 mm²,而超声波辅助微注塑塑件的平均面积为 33.878 mm²,因此,和传统微注塑方法相比,相同的工艺参数情况下,在超声波作用下聚合物熔体的充模能力(充模面积)提高了 6.91%.



(a) 常规微注塑



(b) 超声波辅助微注塑

图 11 菲涅尔透镜塑件

超声波能够提高微注塑过程中的充模性能,主要是因为微注塑过程中,超声波对聚合物熔体产生了几方面的作用:①能量交换作用,在超声波作用下,聚合物熔体中的质点以很大的加速度发生激烈震荡,使高分子聚合物结构和性能发生变化,降低熔体的表观黏度,从而改善熔体流动性能;②超声波与高聚物熔体作用后,将降低口模压力,减少出口膨胀率,抑制不稳定流动;③由于超声波是纵向直接作用在聚合物熔体上,因此沿着振动的方向,聚合物的分子链将会发生定向迁移,在低温下也能实现聚合物材料的“流动”.相当于增加了模具温度降低到玻璃态温度的时间,聚合物熔体可流动时间增长.

从图 11 塑件的成型结果中可以看出,施加超声后更利于熔体充模.

4 结 语

为提高微注塑成型过程的聚合物熔体的流动性和充模性能,提高微结构注塑件的成型质量,本文提出了纵向超声波辅助微注塑成型方法.超声波振动通过端部为模芯的变幅杆直接作用在聚合物熔体上,通过能量交换,抑制不稳定流动行为等方式,改善聚合物熔体的流动和充模性能.基于超声波振动系统的仿真结果,设计开发了纵向超声波辅助微注塑成型装置.利用开发的超声波辅助微注塑模具系统进行了菲涅尔透镜微注塑成型实验.实验结果表明,和传统的微注塑方法相比,超声波辅助微注塑成型方法有效地提高了注塑成

型过程中的充模性能. 在菲涅尔透镜超声波辅助注塑过程中, 相同的注塑工艺参数下, 聚合物的充模性能提高了 6.91%.

参考文献:

- [1] Giboz J, Copponnex T, Mélé P. Microinjection molding of thermoplastic polymers: A review [J]. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2007, 17(6): R98-R107.
- [2] Trotta G, Surace R, Modica F, et al. Micro injection moulding of polymeric components [C] // *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT2010)*. Paris, France, 2010: 1273-1278.
- [3] Shen Y K, Chang C Y, Shen Y S, et al. Analysis for micro-structure of microlens arrays on micro-injection molding by numerical simulation [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35(6): 723-727.
- [4] Lin H Y, Young W B. Analysis of the filling capability to the microstructures in micro-injection molding [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33(9): 3746-3755.
- [5] Yoo Y E, Kim T H, Je T J, et al. Injection molding of micro patterned PMMA plate [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2011, 21(Suppl): 148-152.
- [6] Chen C S, Chen S C, Liao W H, et al. Micro injection molding of a micro-fluidic platform [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37(9): 1290-1294.
- [7] Yu M C, Young W B, Hsu P M. Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 460/461: 288-295.
- [8] Eby R K. Ultrasonic technique for the melting transition and melt of polymers [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1963, 35(11): 1883.
- [9] Alejandro A, Orías E, Renaud J E. An optimization study of the ultrasonic welding of thin film polymers [C] // *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference* 2004. Salt Lake City, UT, USA, 2004: 75-84.
- [10] Yu H W, Lee C H, Jung P G, et al. Polymer microreplication using ultrasonic vibration energy [J]. *J Micro/Nanolith MEMS MOEMS*, 2009, 8(2): 021113-1-10.