

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2010.02.001

# 微注塑制品微结构重复性影响因素的研究进展

谭宇<sup>1,2</sup>, 黄汉雄<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;  
2. 华南理工大学塑料橡胶装备及智能化研究中心, 广东 广州 510640)

**摘要:**从工艺参数、成型模具、成型材料3方面的影响综述了微注塑制品微结构重复性的研究进展,并对未来的研究方向进行了展望。工艺参数方面侧重于熔体温度、模具温度和注射速度等,成型模具方面则集中在模具结构和模腔粗糙度。图4参26

**关键词:**塑料工业;微注塑;工艺参数;成型模具;材料

中图分类号:TQ320.66

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2010)02-0001-05

## Research Advance on Affection Factors for Micro-structure Replication in Micro-injection Molded Parts

TAN Yu<sup>1,2</sup>, HUANG Han-xiong<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Center of Polymer Processing Equipment and Intellectualization, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The research advance of the effects of processing parameters, mold and materials on micro-structure replication of micro-injection molded parts was reviewed, the prosperous development of this technology was also presented. The processing parameters were put emphasis on the melt temperature, mold temperature and injection velocity, and mold was focused attention on mould structure and surface roughness of mold cavity. [Ch, 12 fig. 26 ref.]

**Key words:** plastics industry; micro-injection molding; molding processing parameter; mold; materials

### 0 引言

制品尺寸微型化是注塑的发展方向之一,但传统注塑制品在尺寸或质量精度上达不到相应的要求,而微注塑不仅适合成型微型化制品,也适合成型带有微型化部件的大中型制品<sup>[1]</sup>,其制品可达到精度要求,目前已有微注塑制品应用于微光学、生物医疗等领域。随着科学技术的不断发展,微注塑制品的尺寸或质量精度必将向更高级别的方向发展,微注塑设备、成型模具、成型材料、成型工艺控制等方面也将迎来新的挑战<sup>[2]</sup>。微注塑制品与传统注塑制品在整体或者局部尺寸上有着巨大的差异,影响微注塑制品成型的因素也较多,比传统注塑更复杂。前人对微注塑进行了大量的研究,也取得了一定的成效,本文将分别从工艺参

数、成型模具和成型材料3个方面阐述微注塑制品微结构重复性的研究进展。

### 1 工艺参数的影响

#### 1.1 模具温度

传统注塑熔体充模时间非常短,流动分析时常简化成等温充模,然而,这种简化在微注塑中不适用。微注塑制品微结构流道尺寸小,表面积对体积比大,单位体积熔体散热面积大。当熔体注入微结构中,熔体体积小,所含的热量较少,此时熔体温度会急剧降低到模腔壁的温度,同时迅速形成冷凝层。李又民<sup>[3]</sup><sup>26</sup>以聚丙烯(PP)为例,根据公式(1)估算得出微结构中冷凝层的厚度可能和微结构尺寸相当,这就必然影响微结构的填充。

收稿日期:2009-09-15;修回日期:2009-12-18

作者简介:谭宇(1984),男,湖南株洲人,在读硕士研究生,主要从事高分子加工方面的研究。E-mail:huanling21@163.com

$$\delta_i = \sqrt{\pi \alpha t} \quad (1)$$

式中,  $\delta_i$  为冷凝层厚度/m,  $\alpha$  为热扩散系数/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )。

Shen<sup>[4]</sup>采用微注塑(MIM)和微注射压缩(MICM)成型具有微结构的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)导光板。实验发现模具温度对微结构的重复性具有显著影响,如图1所示,可以看出,随着模具温度的提高,制品微结构重复性得到较大的改善;微注塑压缩中,模具温度也是显著影响因素之一,如图2所示,可以看出,随着模具温度的升高,制品微结构重复性得到较大的改善,但是改善的幅度没有前者大。

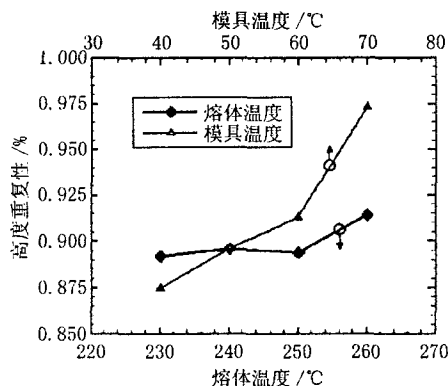


图1 MIM中模具温度对高度重复性的影响

Figure 1 Effect of mold temperature on height replication of parts in MIM

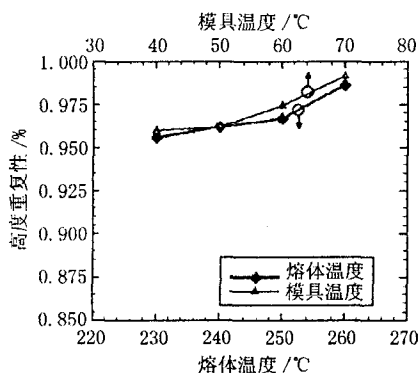


图2 MICM中模具温度对高度重复性的影响

Figure 2 Effect of mold temperature on height replication of parts in MICM

Xie等<sup>[5]</sup>采用可视化装置观察PP熔体在微流道中熔接痕的形成,并根据模具特点设计出模具加热冷却装置。研究发现当模具温度低于聚合物玻璃化温度时,即使将注射压力增加很大,微流道也不能被完整填充;当模具温度高于聚合物玻璃化温度时,在较低的注射压力下也能获得填充较好的微流道。其他学者也通过实验研究得出模具温度对制品微结构重复性具有显

著影响<sup>[6-8]</sup>。

## 1.2 熔体温度

Theilade等<sup>[9]</sup>认为,熔体温度对PP制品微结构填充性有较大影响。注射速率设定为 $35 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,当熔体温度从 $220^\circ\text{C}$ 提高到 $280^\circ\text{C}$ 时,微结构填充高度从 $3.9 \mu\text{m}$ 增加到 $7.3 \mu\text{m}$ ;同一温度下,增大注射速度也能增加微结构的填充高度,但在较低的熔体温度下,如当熔体温度在 $220^\circ\text{C}$ 到 $250^\circ\text{C}$ 之间,注射速度增大对微结构填充效果的改善不是太明显,在较高熔体温度下,如当熔体温度在 $250^\circ\text{C}$ 到 $280^\circ\text{C}$ 之间,增大注射速度能很好改善微结构的填充高度,但是熔体温度的提高对微结构填充效果的影响要比增大注射速度大。

Jung等<sup>[10]</sup>探讨了工艺参数对PP熔体在微流道中流动长度的影响。作者结合Moldflow模拟和多次实验研究,考察熔体温度、注射压力、模具温度和熔体流率4个影响因素,发现熔体温度和注射压力对微注塑制品微结构重复性有较大影响,并得到了最优的加工参数:熔体温度 $290^\circ\text{C}$ ,注射压力 $200 \text{ MPa}$ ,模具温度 $80^\circ\text{C}$ ,体积流率 $41.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。

## 1.3 注射速度

Han等<sup>[11]</sup>采用可视化系统研究PMMA熔体填充V型微结构的行为。研究发现,起始时熔体填充微结构的速度较快,但是当填充高度超过微结构高度的一半后,由于阻力加大,填充缓慢;当增加注射速度时,熔体填充的高度随之增加,同时缩短了填充到最大高度所需的时间,如图3所示。他们认为随熔体注射速度的增加,经过喷嘴时熔体快速流动产生较大的剪切热,从而带入模具中的热量较多,熔体流动性好,填充较容易。Sha等<sup>[12]</sup>研究了熔体温度、模具温度、注射速度对PP、聚甲醛(POM)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)制品微结构填充性的影响,发现增加注射速度能提高微结构的重复性。

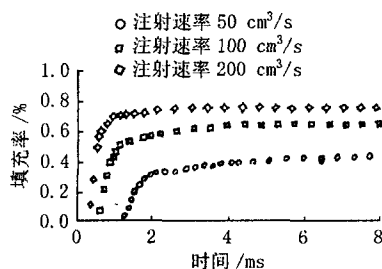


图3 注射速度对填充率的影响

Figure 3 Change of the filling ratio with time at different injection rates

### 1.4 其他工艺参数

大量的研究表明,除模具温度、熔体温度和注射速度外,保压压力、注射量、保压时间等因素对微注塑制品微结构重复性也有一定的影响,但具体的实验条件不同,影响程度也不尽相同。Chen 等<sup>[13]</sup>研究了环烯烃共聚物(COC)、聚碳酸酯(PC)和聚苯乙烯(PS)熔体在矩形槽微结构中的填充行为。研究发现,保压压力对微注塑制品微结构的重复性有较大的影响。同时发现,熔体填充过程中抽真空能够很好改善制品微结构的重复性。Zhang 等<sup>[14]</sup>在不同工艺参数下研究了PP制品的表面形貌和内部缺陷。研究发现,注射压力对制品微结构填充影响较大,增加注射压力能使制品的表面形貌更完整,没有采用抽气装置成型的制品存在缺陷(如图4所示),采用抽气装置则此缺陷消失,同时抽气能够节省成本和成型周期。Lin 等<sup>[15-16]</sup>在光纤卡套成型中采用增加保压压力、保压时间和注射压力等措施弥补热收缩带来的缺陷,并发现提高锁模力可使制品重量增加和收缩率降低。



(a) 采用抽气装置的制品

(b) 没有采取抽气装置的制品

图4 采取抽气装置后的制品对比

Figure 4 Comparison of the part to the mold vacuum

## 2 成型模具的影响

### 2.1 微结构特征

在微注塑中,为了有利于微结构中熔体充模,模具温度应设置高些,因此模壁表面形成的冷凝层很薄,此时必须考虑壁面滑移效应。随着微结构尺寸减小,熔体表面张力的作用逐渐大于体积力的作用,此时必须考虑表面张力的影响。微结构尺寸越大,熔体形成的冷凝层对其流动性影响越小,因此微结构重复性越好。Young<sup>[17]</sup>在忽略黏度变化及熔体在微通道中壁滑效应的基础上,建立了分析模型用来评估微圆柱的填充高度,分析了模具温度、注射速度、模具热交换和微通道的直径等因素对熔体填充性的影响。结果发现,填充高度对模具热交换有很强的依赖性;圆柱半径对填充高度有显著影响,随着微圆柱半径的减少,填充高度急剧减小;减少制品的厚度能增加制品微结构的填充高度。

Chen 等<sup>[18]</sup>采用模拟和实验相结合的方法研究了PMMA导光板V型沟槽对导光板光线流量和亮度的影响。通过实验发现,V型沟槽的角度对流量和亮度有较大的影响,而宽度对两者的影响较小;V型沟槽之间的宽度越窄,导光能力越强和导光板亮度分散性越好;同时发现,模拟和实验存在一定的差异。Lin 等<sup>[19]</sup>也研究了PC导光板V型沟槽不同布局对其重复性的影响,结果发现,微结构重复性随布局的不同而不同,重复性较好的V型沟槽平行于熔体流动方向。

### 2.2 模腔粗糙度

在传统注塑中,模腔表面粗糙度的轮廓尺寸相对于模腔尺寸非常微小,当模具温度较低时,熔体在模腔表面形成冷凝层,因此表面粗糙度对熔体宏观充模的影响较小。在微注塑中,模腔表面对熔体充模流动的影响主要表现为:一是使熔体产生相对壁面的滑移速度,二是熔体与模腔接触面因粗糙度而产生的逆流效应等所形成的阻力和扰动。因此模具微结构型腔表面粗糙度不可忽略<sup>[3]28</sup>。

Zhang 等<sup>[20-21]</sup>采用有限元模拟和实验相结合,分析了POM熔体在3种不同粗糙度的模具嵌件中的流动情况。结果发现模拟结果和实验结果相一致;模具嵌件表面粗糙度对熔体填充行为有显著影响,忽略嵌件表面粗糙度可能导致对熔体填充位置和填充压力的预测不精确;表面粗糙度对模具和熔体热交换有很大的影响,从而影响熔体的黏度、温度等参数;表面粗糙度的影响主要取决于粗糙度的有效高度,和粗糙度轮廓没有太大关系。同时发现,在短射过程中平滑部分嵌件的熔体流量大于粗糙部分;表面粗糙度对微结构中熔体充模的影响程度与模具温度、熔体温度和模腔厚度有关,提高模具温度和熔体温度可以减小表面粗糙度对熔体填充性的影响。Griffiths 等<sup>[22]</sup>采用PP、ABS和PC3种材料研究了熔体流动长度与模腔表面粗糙度之间的关系。结果发现,熔体充模流动方式和模腔表面粗糙度有关,粗糙度越大,熔体流动过程中越容易产生波动和涡流,熔体壁面滑移对熔体流动的影响越大,熔体流动长度越短。

### 3 成型材料的影响

如同传统注塑,成型材料对微注塑微结构重复性的影响主要取决于黏度,黏度越低,微结构的重复性越好。影响黏度的主要因素包括温度、压力和剪切速率。Murakami 等<sup>[23]</sup>研究了4种不同分子质量的PC对微结构重复性的影响。结果发现,模具温度升高,四种不同分子质量的PC制品微结构重复性都得到提高;分

子质量影响熔体的流动性能,从而影响制品的填充性,分子质量增加,填充性降低,但将熔体温度和模具温度分别提高到 320℃ 和 140℃ 时,分子质量高的 PC 制品微结构的重复性达到 90% 以上,与分子质量低的 PC 制品微结构重复性相同。

Kalima 等<sup>[24]</sup>采用了 PC、环烯烃聚合物(COP)、苯乙烯丙烯腈(SAN)和六氟丙烯、四氟乙烯和三元乙丙橡胶共聚物(HEP-TFE-ET)4 种不同的材料,调节工艺参数进行了多组实验,采用原子力显微镜测量制品微结构的重复性。结果表明,材料对微结构填充性具有显著影响,其中 PC 的填充性最好,SAN 的填充性最差。Jung<sup>[25]</sup>对 PP 和聚乳酸(PLA)2 种不同的材料进行微注塑比较,结果发现 PLA 成型后有明显的分子质量减小,而 PP 分子质量没有变化,分子质量的变化导致了微结构重复性的不同。分子质量的减小可能和加工过程中 PLA 的降解有关。

Kim 等<sup>[26]</sup>对 PS、聚酰胺 6(PA6)纳米复合材料、PC 和 PMMA 4 种材料微注塑医用针头进行了研究。采用有限元软件 Ansys 对针头的失稳情况进行模拟分析,并采用欧拉失稳理论进行验证,发现用 2 种方法得出的结论非常接近。另外通过比较发现 PA6 纳米复合材料注塑制品的稳定性稍差,这可能是由于这种材料吸潮性较大。

#### 4 结论与展望

前人对微注塑的研究主要集中于工艺参数对制品微结构重复性的影响。已有少量学者研究熔体在微结构中的流动行为,聚合物熔体的黏度和流变行为在宏观和微观尺寸下有很大的区别,因此其在微观状态下流动机理和流变行为的研究应加强。对微结构中微观形态研究较少。对微结构的脱模问题研究较少,由于微注塑制品微结构尺寸小,部分材料成型制品的微结构脱模存在困难,容易发生断裂等现象。需要进一步研究开发微注塑新材料,目前大多数研究局限于部分热塑性聚合物,需要进一步研究不同的材料对微注塑制品微结构重复性的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] GIBOZ J, COPPONNEX T, MELE P. Microinjection molding of thermoplastic polymers; a review [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(6): 96-109.
- [2] 庄俭. 微注塑成型充模流动理论与工艺实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [3] 李又民. 微注塑成型充模流动理论建模与模拟分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [4] SHEN Y K. Comparison of height replication properties of micro-injection moulding and micro-injection-compression moulding for production of microstructures on lightguiding plates [J]. *Plastics Rubber and Composites*, 2007, 36(2): 77-84.
- [5] XIE L, ZIEGMANN G. A visual mold with variotherm system for weld line study in micro-injection molding [J]. *Microsystem Technology*, 2008, 14(6): 809-814.
- [6] CHEN S C, JONG W R, CHANG Y J, et al. Rapid mold temperature variation for assisting the micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2006, 16(9): 1783-1791.
- [7] LIO A C, CHEN R H. Injection molding of polymer micro- and sub-micron structures with high-aspect ratios [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28(11): 1097-1103.
- [8] YANG S Y, LIEN L. Effects of cooling time and mold temperature on quality of moldings with precision contour [J]. *Advances in Polymer Technology*, 1996, 15(4): 289-295.
- [9] THEILADE U A, HANSEN H N. Surface microstructure replication in injection molding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(1): 157-166.
- [10] JUNG W C, HEO Y M, SHIN K H, et al. An experimental study on micro injection parameters [C]// Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference. Cincinnati: Society of Plastics Engineers, 2007: 639-643.
- [11] HAN X, YOKOI H. Visualization analysis of the filling behavior of melt into microscale v-grooves during the filling stage of injection molding [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2006, 46(11): 1590-1597.
- [12] SHA B, DIMOV S, GRIFFITHS C, et al. Investigation of micro-injection moulding: factors affecting the replication quality [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183(2): 284-296.
- [13] CHEN S C, CHANG J A, CHANG Y J, et al. Micro injection molding of micro fluidic platform [C]// Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference. Boston: Society of Plastics Engineers, 2005: 556-560.
- [14] ZHANG K F, ZHEN L. Analysis of morphology and performance of PP microstructures manufactured by micro injection molding [J]. *Microsystem Technology*, 2008, 14(2): 209-214.
- [15] LIN Z G, TSENG S C, WANG J, et al. A study of micro injection molding for high-aspect-ratio optical fiber ferrules [C]// 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. Columbus: AIP Conference Processes, 2004: 1547-1551.
- [16] LIN Z G, TSENG S C, PENG A, et al. A study of micro injection molding optical fiber ferrules [C]// Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference. Boston: Society of Plastics Engineers, 2005: 828-832.
- [17] YOUNG W B. Analysis of filling distance in cylindrical microfeatures for microinjection molding [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(9): 1798-1806.
- [18] CHEN S C, HU C H, CHANG M, et al. Study on the optical performance of light guide plate with double-side micro feature design [C]// Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference. Cincinnati: Society of Plastics Engineers, 2007: 693-697.

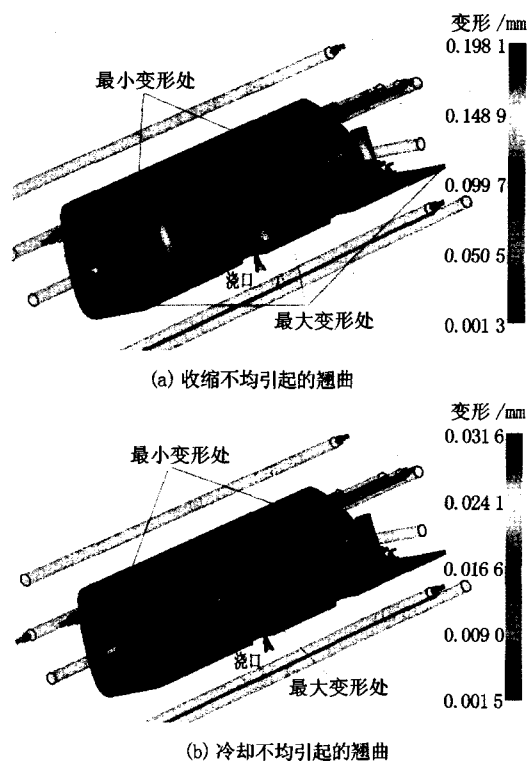


图7 第2次翘曲变形  
Figure 7 The further warpage result  
of the second analysis

### 参考文献 (References):

- [1] 李德群. 塑料注塑成型工艺及模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [2] 张晓陆. Moldflow 软件在冷却分析中的应用[J]. 模具工业, 2009, 35(2): 57-60.
- [3] 贾文友, 刘莉, 徐振法. 机械产品设计中基于材料替代的成本控制[J]. 轻工机械, 2009, 27(3): 112-114.
- [4] 贺华波, 邓益民, 李红林. 基于 Moldflow 的薄壁注塑件成型工艺优化设计[J]. 电加工与模具, 2006(1): 38-41.
- [5] 周大路, 何柏林, 李树桢, 等. 基于 Moldflow 注射器翘曲分析[J]. 塑料, 2007, 36(2): 95-98.
- [6] 郑文, 郁炜, 吕迅. 电话机注塑模具浇口的优化设计[J]. 轻工机械, 2009, 27(2): 17-19.
- [7] 楼建勇, 林江, 钱雄伟. 注塑成型模具计算机辅助设计与工艺仿真[J]. 轻工机械, 2008, 26(4): 24-28.
- [8] 李德群. 现代塑料注塑成型的原理、方法与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005.
- [9] 詹春毅, 岑运福. 塑料注射成型充模阶段中熔体流动的研究[J]. 轻工机械, 2006, 24(2): 26-29.
- [10] Autodesk Co Ltd. Moldflow Insight 2010 Help System [G]. MA: Autodesk Co Ltd, 2009.
- [11] 俞鸿斌. 用注塑成型模拟分析技术优化注塑成型工艺参数[J]. 轻工机械, 2007, 25(4): 33-36.
- [12] 徐冰冰, 孙祖铭, 胡树根, 等. 两种神经网络在注塑产品工艺参数确定中的应用[J]. 机电工程, 2008, 25(11): 91-93.
- [13] 张玉龙. 塑料品种与性能手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

(上接第4页)

- [19] LIN T H, ISAYEV A I, MEHRANPOUR M. Luminance of injection-molded V-groove light guide plates [J]. Polymer Engineering and Science, 2008, 48(8): 1615-1623.
- [20] ZHANG H L, ONG N S, LAM Y C. Effects of surface roughness on microinjection molding [J]. Polymer Engineering and Science, 2007, 47(12): 2012-2019.
- [21] ZHANG H L, ONG N S, LAM Y C. Experimental investigation of key parameters on the effects of cavity surface roughness in microinjection molding [J]. Polymer Engineering and Science, 2008, 48(3): 490-495.
- [22] GRIFFITHS C A, DIMOV S S, BROUSSEAU E B, et al. The effects of tool surface quality in micro-injection moulding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1): 418-427.

(上接第8页)

### 参考文献 (References):

- [1] 高月华, 王希斌. 注塑制品的翘曲优化设计进展[J]. 中国塑料, 2006, 20(11): 8-12.
- [2] 李海梅, 刘永志, 申长雨, 等. 注塑件翘曲变形 CAE 研究[J]. 中国塑料, 2003, 17(3): 53-58.
- [3] 张勇, 邓益民. 薄壳注塑件翘曲变形优化[J]. 轻工机械, 2009, 27(4): 18-22.
- [4] HUANG Mingchih, TAI Chingchih. The effective factors in the warpage problem of an injection molded part with a thin shell feature [J]. Materials Processing Technology, 2001, 110(1): 1-9.

- [23] MURAKAMI O, KOTAKI M, HAMADA H. Effect of molecular weight and molding conditions on the replication of injection moldings with micro-scale V-groove features [J]. Polymer Engineering and Science, 2008, 48(4): 697-704.
- [24] KALIMA V, PIETARINEN J, SIITONEN S, et al. Transparent thermoplastics: replication of siffractive optical elements using microinjection molding [J]. Optical Materials, 2007, 30(2): 285-291.
- [25] JUNG C Y. Effect of gate dimensions on the physical properties of micro injection molded poly(l-lactic) acid [D]. Massachusetts: University of Massachusetts-lowell, 2005.
- [26] KIM H, COLTON J S. Fabrication and analysis of plastic hypodermic needles [J]. Journal of Medical Engineering and Technology, 2005, 29(4): 181-186.

- [5] LIAO S J, CHANG D Y, CHEN H J. Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts [J]. Polymer Engineering and Science, 2004, 44(5): 917-928.
- [6] 王桂龙, 赵国群, 李辉平, 等. 薄壁注塑制品翘曲影响因素分析与工艺优化[J]. 中国机械工程, 2009, 20(4): 488-492.
- [7] 吴真繁, 孙宝寿, 陈哲. 基于 Moldflow 的注塑件翘曲优化及影响因素分析[J]. 轻工机械, 2009, 27(6): 5-9.
- [8] 季正伟, 张益华, 徐成, 等. 基于翘曲的注塑工艺优化与均值估计[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(1): 31-34.
- [9] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994.