

文章编号 1004-924X(2013)07-1825-06

工艺参数对平板微小器件注塑翘曲的影响

徐 征¹, 王继章¹, 吕治斌², 刘军山^{2*}, 王林刚¹

- (1. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116085;
2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116085)

摘要:对显著影响平板微小器件注塑成型的翘曲现象进行了研究。为了减少翘曲量,以带十字微沟槽的微流控芯片的基片为研究对象,研究了注塑工艺涉及的工艺参数。从注塑残余应力角度分析了翘曲变形的产生机理与演化过程。然后,以数值仿真和工艺实验为手段,建立了平板微小器件翘曲的测量方法。设计加工了基于硅型芯的注塑模具,以翘曲测量方法为基础,利用正交试验获得了最优注塑工艺参数。最后,通过极差分析法定量分析工艺参数对翘曲的影响。实验显示,通过工艺优化获得的最小翘曲量为 141 μm ,工艺参数对翘曲的影响由大到小依次为:保压时间、模具温度、保压压力、熔体温度、冷却时间。该研究成果为平板微小器件注塑工艺提供了参考依据。

关键词:注塑成型;平板微小器件;翘曲;极差分析法

中图分类号:TQ320.662;TN405 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1825

Effect of processing parameters on warpage of flat micro-mini parts in injection molding

XU Zheng¹, WANG Ji-zhang¹, LÜ Zhi-bin², LIU Jun-shan^{1*}, WANG Lin-gang¹

- (1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;
 2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)
- * Corresponding author, E-mail: liuj@s@dlut.edu.cn

Abstract: This paper explored the warpage which has significant influence on the quality of inject molding for flat micro-mini parts. To control the warpage to an acceptable level, the warpage of a microfluidics plate with a cross-shaped microchannel was researched and the effect of processing parameters on the warpage was considered in detail. First, the generation mechanism and evolution course of the warpage from injection molding was analyzed based on residual stress. Then, the warpage measurement method was established according to simulation technologies and experimental methods. A Si-core based injection mold was designed and fabricated and the optimum processing parameters were obtained with orthogonal experimental method to achieve the minimum warpage. Finally, the quantitative correlations between the warpage and the processing parameters were investigated by extreme difference analysis. Experimental results indicate that the minimum warpage is 141 μm after optimum

收稿日期:2013-01-26;修订日期:2013-02-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91023046, No. 51075056, No. 91023017);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA040406);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. DUT12ZD212)

processing and the sequence of from strong correlation to weak correlation is: holding time, mold temperature, holding pressure, melting temperature and cooling time. The result is helpful to optimize the injection processing of polymer flat micro-mini parts.

Key words: injection molding; flat micro-mini part; warpage; extreme difference analysis

1 引言

整体尺寸在毫米或厘米量级、局部表面带有微细结构的平板微小器件,在生化分析、微光学传感器等方面有广泛用途。例如:可用于疾病诊断和药物筛选的微流控芯片可以通过注塑工艺在平板上形成开放的微沟槽(基片),然后再与另一块平板(盖片)封合形成。再如,利用注塑工艺可在平板上形成有亚微米级特征间隔的沟槽阵列,然后经过填充、镀膜等工艺处理,可作为偏振光栅等微光学器件。

注塑成型微小器件具有周期短、效率高、成型一致性好等优势,受到广泛关注^[1-2]。但注塑成型也会产生结构复制不完全、翘曲、表面熔接痕等缺陷^[3],严重影响器件使用性能。其中,翘曲是平板类制件注塑成型的主要缺陷,翘曲过大会导致此类制件整体变形,降低使用效能,影响后续的封装。比如对于表面有微沟槽结构微流控芯片的基片,翘曲会使之随后与盖片键合困难,导致局部区域封合失效,产生液体泄漏等问题。

近年来,一些学者针对注塑成型薄壁器件的翘曲变形开展了研究,但对于表面具有微细结构的、整体尺寸在厘米量级平板器件的翘曲变形研究不多。多数研究采用数值模拟的方法,所得到的分析结果存在差异,主要影响因素包括材料组成、注塑速度、模具与熔体温度、保压压力与保压时间等。Ozcelik^[4]等通过正交试验方法,分析注塑参数对手机外壳翘曲的影响,认为保压压力是影响翘曲的重要因素。Sánchez^[5]等研究了矩形薄壁件翘曲问题,确认冷却时间对翘曲变形的影响最大。Tang^[6]等对熔体温度、保压压力等进行正交试验,认为对翘曲影响最大的工艺参数是熔体温度。申长雨等^[7]分析了熔体注塑填充问题,构建了计算注塑内应力的力学模型和预测方法。蒋炳炎等通过实验研究了微特征结构对导光板翘曲变形的影响^[8]。Eghbal 和 Abu^[9]利用田口实验法,对微小齿轮注塑翘曲问题开展数值模拟研

究,探明注塑材料特性与翘曲的关系,认为非晶态多组分聚合物注塑产生的翘曲要比共聚甲醛等结晶态聚合物产生的翘曲小。Reddy 等采用神经网络模型预测注塑翘曲量,其预测准确度在 97.5% 左右^[10]。Kramschuster 等研究了 2 种注塑方法中的翘曲问题,认为对于微孔发泡注塑成型,氮含量和注塑速度是产生翘曲的主要原因,而常规注塑中合模压力与保压时间则是最重要影响因素^[11]。

本文以具有十字微沟槽的平板器件(毛细管电泳微流控芯片部件)为对象,针对平板微小器件注塑成型的翘曲问题开展研究。分析了微小平板器件注塑翘曲的产生机理,选择模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间等为试验因素,建立一种平板微小器件翘曲的测量方法。通过计算和实验,确定了工艺参数对翘曲影响的权重顺序,为工艺优化提供依据。

2 翘曲分析与正交实验设计

注塑产生的翘曲变形与热传输、高压填充条件、收缩不均等许多因素有关,这些因素都会引起局部应力,而在应力释放过程中产生翘曲,因此制件的残余热应力是产生翘曲的主要来源。如图 1 所示,在注塑充型过程中,与型腔侧壁接触的熔体冷却速率快,中心熔体冷却速率慢。在冷却阶段,与模具侧壁接触的部分先形成冷凝层,并从边缘向中心扩展,阻碍熔体的自由收缩。在不平衡收缩条件下,残余热应力呈现的非对称分布,最终导致翘曲变形。

如图 2 所示,本文选择器件整体尺寸为 35.0 mm×20.0 mm×1.2 mm(长×宽×高),表面带横截面 100 μm×100 μm 的十字微沟槽。注塑材料为聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethylmethacrylate, PMMA; 比热容: 1465 J·(kg·K)⁻¹; 热传导率: 0.192 W·(m·K)⁻¹)。PMMA 具有良好的透光性(可见光透过率可达 93%),常温下具有良好的韧性和机械强度,适合制作微光学器件以及微流体器件等。

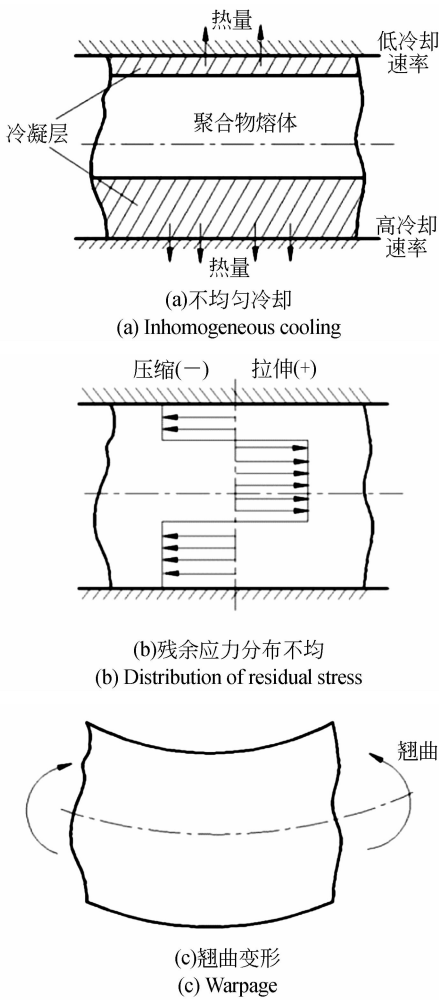


图 1 残余热应力产生平板翘曲的原理
Fig. 1 Warpage caused by residual thermal stress

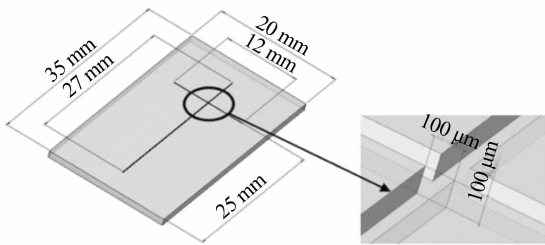


图 2 具有十字微沟槽的平板器件
Fig. 2 Flat part with a cross shaped microchannel

选取模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间及冷却时间为正交试验的因素,每个因素选取 4 个水平,受实验配置所限,本文的注塑压力设为与保压压力相等。选取正交表 L16(4⁵)为试验方案,如表 1 所示。

表 1 正交试验设计表

Tab. 1 Orthogonal experimental table

因素	因素 1	因素 2	因素 3	因素 4	因素 5
水平	模具温度	熔体温度	保压压力	保压时间	冷却时间
	$\theta_1 / ^\circ\text{C}$	$\theta_2 / ^\circ\text{C}$	$p(\text{MPa})$	t_1 / s	t_2 / s
1	55	210	50	2.0	12
2	60	215	55	2.5	13
3	65	220	60	3.0	14
4	70	225	65	3.5	15

3 翘曲仿真计算试验

采用 Pro/E 对图 2 所示器件建模,再将模型导入 Moldflow 软件,进行网格划分,如图 3 所示,几何模型的粗分网格特征长度为 $50 \mu\text{m}$,对局部细节修补后,微沟槽附近网格特征尺度为 $10 \mu\text{m}$ 左右。然后,根据表 1 的设计参数依次进行计算,完成表 1 中 16 组仿真试验。

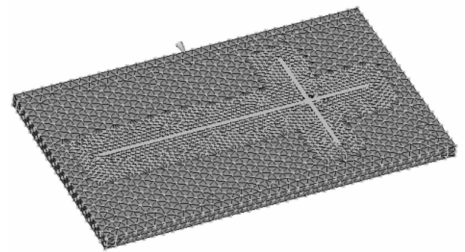


图 3 对模型进行网格划分
Fig. 3 Meshing result of a flat micro-mini part

仿真计算结果如表 2 所示,最大翘曲量 Wp_{\max} 为 $113 \mu\text{m}$,最小翘曲量 Wp_{\min} 为 $36 \mu\text{m}$ 。对于本文设计的平板器件,使翘曲变形最小的工艺参数为:模具温度 $55 \text{ }^\circ\text{C}$,保压压力 65 MPa ,冷却时间 15 s ,保压时间 3.5 s ,熔体温度 $215 \text{ }^\circ\text{C}$ 。工艺参数对翘曲变形的影响采用极差分析法确定。极差分析法是通过目标变化幅度—极差值 R 来衡量影响趋势, R 越大,该因素对试验指标的影响越大,第 i 列因素极差值 R_i 为:

$$R_i = \max(\overline{wp}_{i1}, \overline{wp}_{i2}, \dots, \overline{wp}_{ij}) - \min(\overline{wp}_{i1}, \overline{wp}_{i2}, \dots, \overline{wp}_{ij}), \quad (1)$$

式中: \overline{wp}_{ij} 为 i 因素在 j 水平的平均值。

表 2 通过正交仿真试验得到的翘曲结果

Tab. 2 Results of warpage from orthogonal simulation experiment

因素 1	因素 2	因素 3	因素 4	因素 5	$Wp/(mm)$
1	1	1	1	1	0.110
1	2	2	2	2	0.083
1	3	3	3	3	0.053
1	4	4	4	4	0.036
2	1	2	3	4	0.061
2	2	1	4	3	0.048
2	3	4	1	2	0.100
2	4	3	2	1	0.088
3	1	3	4	2	0.046
3	2	4	3	1	0.061
3	3	1	2	4	0.101
3	4	2	1	3	0.113
4	1	4	2	3	0.090
4	2	3	1	4	0.110
4	3	2	4	1	0.063
4	4	1	3	2	0.092

极差分析结果如图 4 所示, K_{ij} 表示第 i 列 j 水平, 工艺参数对翘曲变形影响的大小顺序为: 保压时间、模具温度、保压压力、熔体温度、冷却时间。在注塑中采用较长的保压时间能使制件组织更加致密, 抵抗收缩变形, 降低残余热应力, 从而减小翘曲值。

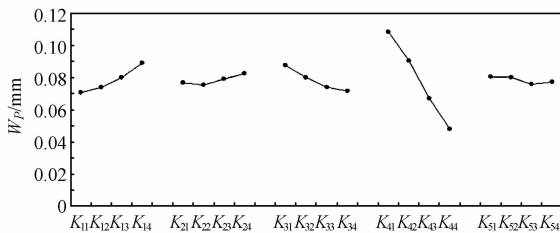


图 4 工艺参数对翘曲值影响的仿真结果

Fig. 4 Effect of process parameters on warpage in simulation

4 注塑成型与翘曲测量实验

4.1 实验装置与方案

实验所用微注塑机为活塞式注塑机 Babyplast 610, 具有参数控制准确的特点。所用模具为研制的基于硅型芯的注塑模具, 如图 5 所示, 模具分为模架和型芯两部分。模架包括定模、动模

和脱模机构 3 部分^[12]。浇注单元布置在定模上, 采用扇形浇口; 排气单元布置在动模上; 为保证模温均匀和减小温度应力, 在动模和定模上分别布置热流道温控单元。具有微结构的模具型芯采用深反应离子刻蚀制造而成, 切割后嵌在模架定模中, 注塑得到的塑件保留在动模上, 通过 4 个顶杆顶出脱模。注塑材料采用英国路彩特公司生产的 PMMA 粒料 (CP-51)。翘曲量通过工具显微镜 (分辨率: $0.1 \mu\text{m}$) 测量。

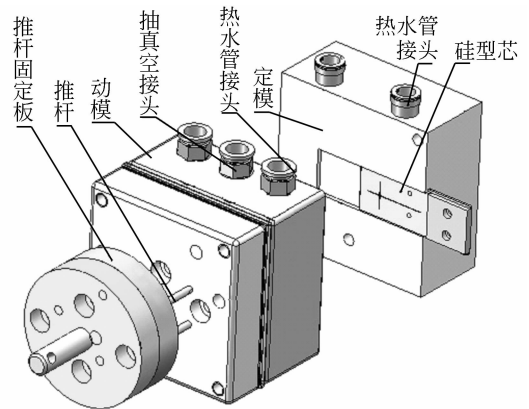


图 5 基于硅型芯注塑模具

Fig. 5 Injection mold with a silicon insert

翘曲量是指注塑制件在某方向的变形量, 对于具有一定厚度的平板微器件, 由于塑件上下表面都具有不同平面度误差 δ , 并且尺度与翘曲相当或相近, 这样用上表面或下表面作为等效测量平面是不合适的。本文采用中间层为测量等效面, 并将上下表面的平面度误差 δ 的影响考虑进来。由上下表面对应两点的中值确定等效面位置。如图 6 所示, 测量时在器件表面选取一系列点 P_1, P_2, \dots, P_n , 将器件置于标准平板上, 以标准平板为基准面, 依次测出点 P_i 处, 上表面距测量基准面的距离 La_i , 以及上下表面间距 (平板厚度) Lb_i , 等效面的翘曲计算如式 (2) 和式 (3) 所示。

$$L = La_i - Lb_i/2 + \delta, \quad (2)$$

$$Wp = \max(L_1, L_2 \dots L_n) - \min(L_1, L_2 \dots L_n), \quad (3)$$

式中: L_i 为 P_i 位置处等效曲面距测量基准面的距离, δ 为平面度误差, Wp 为翘曲值。

本文以器件平面中心为基准, 等间距在上下表面各取 9 点 $P_1 \sim P_9$ (长度方向间距 10 mm、宽度方向间距 5 mm) 为测点。

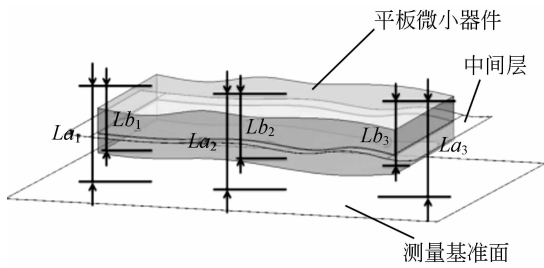


图 6 翘曲测量方法

Fig. 6 Measurement method of warpage

4.2 测量结果分析

按表 1 的正交试验设计,对注塑的平板微器件每个试验点取 3 个试样,每点测 3 次,取平均值作为翘曲值,如表 3 所示,对于本文设计的平板器件,使翘曲变形最小的实验工艺参数与计算分析一致,即:模具温度 55 °C,保压压力 65 MPa,冷却时间 15 s,保压时间 3.5 s,熔体温度 215 °C,此时得到的最小翘曲值为 141 μm。

表 3 翘曲实验测量结果

Tab. 3 Results of warpage from measurement

因素 1	因素 2	因素 3	因素 4	因素 5	Wp/(mm)
1	1	1	1	1	0.222
1	2	2	2	2	0.167
1	3	3	3	3	0.154
1	4	4	4	4	0.141
2	1	2	3	4	0.204
2	2	1	4	3	0.186
2	3	4	1	2	0.202
2	4	3	2	1	0.194
3	1	3	4	2	0.162
3	2	4	3	1	0.178
3	3	1	2	4	0.195
3	4	2	1	3	0.233
4	1	4	2	3	0.204
4	2	3	1	4	0.209
4	3	2	4	1	0.186
4	4	1	3	2	0.200

参考文献:

[1] ZEMA L, LORETI G, MELOCCHI A, et al.. Injection molding and its application to drug delivery [J]. *Controlled Release*, 2012, 159(3): 324-331.

[2] LOPPMANN J M, GEIGER E J, PISANO A P. Polymer investment molding: method for fabricating hollow, microscale parts [J]. *Sensors and Ac-*

同样地,采用极差分析法分析工艺参数对翘曲影响。由结果可知:如图 6 所示,影响顺序依次为:保压时间、模具温度、保压压力、熔体温度、冷却时间,这与计算趋势是一致的。

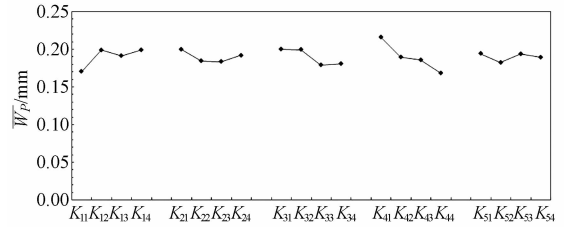


图 7 注塑工艺参数对翘曲值影响的实验结果

Fig. 7 Effect of processing parameters on warpage

5 结 论

本文以具有十字微沟槽的平板器件为研究对象,通过仿真和实验来研究工艺参数对平板微小器件注塑成型的翘曲影响。设计加工了基于硅型芯的注塑模具,并通过正交试验,研究了注塑工艺参数对器件翘曲变形的影响,并对注塑参数进行优化,获得所选因素中最佳参数组合,通过工艺优化获得最小翘曲量 141 μm。计算和实验结果均表明:注塑工艺参数对翘曲变形影响的大小顺序依次为:保压时间、模具温度、保压压力、熔体温度、冷却时间。我们的研究结论与 Kramschuster^[11]和 Ozcelik^[4]等的研究相比,影响因素的趋势基本一致,合模压力与保压时间是对注塑翘曲影响显著的因素。但由于器件尺寸和所用机器不同,所得到的最佳参数与翘曲绝对值是有差别的。受实验条件所限,我们尚未能通过直接测得应力分布来深入分析产生翘曲的物理机制,下一步拟在硅基型芯上制造多压阻单元,进一步实验研究注塑过程中应力分布和释放应力的途径。

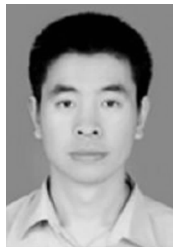
tuators A: *Physical*, 2007, 134(1): 2-10.

[3] SONG M C, LIU Y, ZHU T L. Injection molding of plastic microfluidic chip [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(4): 329-334.

[4] BABUR O, SONAT I. Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding [J]. *Materials and Design*, 2009, 30(2): 367-375.

- [5] SANCHZE R, AISA J, MARTINEZ A, *et al.*. On the relationship between cooling setup and warpage [J]. *Measurement*, 2012, 45(5): 1051-1056.
- [6] TANG S H, TAN Y J, SAPUAN S M, *et al.*. The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage [J]. *Materials Processing Technology*, 2006, 182(1-3): 418-426.
- [7] 申长雨, 吴海宏, 赵振峰. 注塑制品内应力计算的非线性黏弹性本构方程[J]. *化工学报*, 2007, 58(2): 490-494.
SHEN C Y, WU H H, ZHAO Z F. Non-linear viscoelastic constitutive equation to calculate internal stress of injection molded articles [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, 58(2): 490-494. (in Chinese)
- [8] 蒋炳炎, 沈龙江, 罗建华, 等. 微特征结构对导光板翘曲变形的影响[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 180-185.
JIANG B Y, SHEN L J, LUO J H, *et al.*. Effects of different micro-structure structures on warpage and deformation of light guide plate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 180-185. (in Chinese)
- [9] HAKMIAN E, SULONG A B. Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method [J]. *Materials & Design*, 2012, 42: 62-71.
- [10] REDDY B S, KUMAR J S, REDDY V K, PADMANABHAN G. Application of soft computing for the prediction of warpage of plastic injection molded parts [J]. *Engineering Science and Technology Review*, 2012, 2(1): 56-62.
- [11] KRAMSCHUSTER A, CAVITT R, ERMER D, *et al.* Quantitative study of shrinkage and warpage behavior for microcellular and conventional Injection molding [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2005, 45(10): 1408-1418.
- [12] 徐征, 王继章, 杨铎, 等. 辅助溶剂对 PMMA 微流控芯片模内键合的影响[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 321-328.
XU ZH, WANG J ZH, YANG D, *et al.*. Effect of assistant solvent on in-mold bonding of PMMA microfluidic chips [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 321-328. (in Chinese)

作者简介:



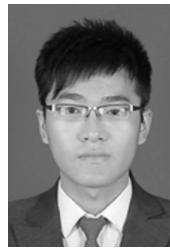
徐 征(1973—), 男, 河南郑州人, 博士, 副研究员, 1997 年于吉林工业大学获得学士学位, 2000 年于吉林工业大学获得硕士学位, 2004 年于大连理工大学获得博士学位, 主要从事微纳制造和微纳流体等研究工作。E-mail: xuzheng@dlut.edu.cn



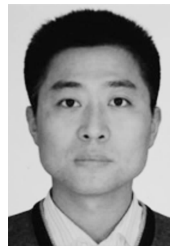
王继章(1987—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 2009 年于河南科技大学获得学士学位, 主要从事微注塑成型与微模具设计制造方面的研究。E-mail: jizhang_wang@163.com



吕治斌(1988—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 2011 年于三峡大学获得学士学位, 主要从事微注塑成型方面的研究。E-mail: lvzhibin@mail.dlut.edu.cn



王林刚(1989—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 2012 年于山东理工大学获得学士学位, 主要从事微模具设计制造方面的研究。E-mail: wanglingang1213@126.com



刘军山(1975—), 男, 辽宁大连人, 博士, 副教授, 1998 年于西安理工大学获得学士学位, 2001 年于西安理工大学获得硕士学位, 2005 年于大连理工大学获得博士学位, 主要从事微纳制造方面研究。E-mail: liujunshan@dlut.edu.cn