

文章编号 1004-924X(2015)02-0452-07

聚合物超声压印非成形面熔融缺陷形成机理及抑制

祁 娜¹, 罗 怡^{2*}, 王晓东¹, 王立鼎²

- (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 116023;
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 116023)

摘要:分析了聚合物超声压印工艺中基片非成形面产生熔融的原因,并提出了相应的抑制方法。基于超声波产热机理指出非成形面熔融现象是由超声工具头—基片界面摩擦引起的,据此提出“摩擦系数差法”来抑制非成形面的熔融现象并通过在聚合物基片非成形面增加表面保护膜(背膜)的手段实现了“摩擦系数差法”。为了对背膜进行优化选择,对比研究了 4 种背膜条件对聚合物软化时间的影响。提出了超声工具头位移—时间曲线极小值点对应聚合物软化时间的观点,并通过测量超声压印过程中基片—模具界面温度进行了实验验证。实验结果表明,使用 Sekisui # 622E—50 保护膜可缩短聚合物软化时间 3.4 s,使用 Sekisui # 622WB 保护膜则可降低软化时间误差 0.64 s。实验显示,增加背膜不仅有效地避免了非成形面的熔融现象,同时缩短了超声压印过程中的聚合物软化时间并提高了软化时间重复性。

关键词:聚合物;超声压印;软化时间;超声摩擦产热;非成形面熔融;表面保护膜

中图分类号: TB559; TH706 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0452

Mechanism and avoiding of polymer melting on non-forming surface during ultrasonic embossing

QI Na¹, LUO Yi^{2*}, WANG Xiao-dong¹, WANG Li-ding²

- (1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
 2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)
- * Corresponding author, E-mail: luoy@dlut.edu.cn

Abstract: This paper analyzes the reason why the polymer is melted on a non-forming surface during ultrasonic embossing and proposes a method to inhibit the polymer melting. On the basis of the heating mechanism of ultrasonic, it points out that the polymer melting phenomenon on non-forming surface is resulted by the friction in a horn-substrate interface. Then, it proposed the method “two interfaces of different friction coefficients” to inhibit the polymer melting and implemented the method by coatings surface protection films on the non-forming surface. To optimize the protection films, and the influences of the four coating film conditions on the softening time are examined through Taguchi method. The results show that the Sekisui # 622E-50 film shortens the softening time by 3.4 s and

收稿日期:2014-06-09;修订日期:2014-07-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975037);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA040406)。

the Sekisui # 622WB film reduces the softening time error by 0.64 s. It demonstrates that surface protection films coated can avoid polymer melting on the non-forming surface, and improve the process replication ability and the process stability in ultrasonic embossing.

Key words: polymer; ultrasonic embossing; softening time; ultrasonic friction heating; melting on non-forming surface; surface protection film

1 引言

聚合物微器件制造技术是微机电系统(MEMS)领域的热点问题。传统的聚合物微器件制造技术包括微热压^[1]、微注塑^[2-3]、微模塑^[4-5]等。其中,微热压和微注塑适用于大多数热塑性工程塑料,是最有希望实现产业化生产的聚合物微器件制作技术。然而,微热压工艺中模具和基片的升温、降温过程需要时间较长,大大降低了其生产效率。微模塑工艺中微模具的设计和制作较为困难、且需要额外的真空设备等^[6],造成设备成本投入大、工艺过程较为复杂等问题,不利于工艺的推广应用。因此,有必要研究其他可替代微器件制作技术作为后备和补充。

超声波加热聚合物具有较高的产热速率,可实现聚合物材料的快速升温 and 软化。此外超声的高频特性可降低聚合物熔体的黏度,对提高复制精度有一定促进作用。因此,近年来利用超声波进行聚合物微纳结构压印的研究逐渐增多。根据聚合物基片预热温度和压印能量的主要来源,超声波压印主要分为超声压印(室温条件下的超声压印工艺)、热辅助超声压印和超声辅助热压印。

Shih-Jung Liu 等采用机加工金属模具利用超声压印工艺在聚合物基片上复制了金字塔毫微结构,并研究了工艺参数、板材厚度和聚合物种类对压印精度的影响^[7]。随后,其课题组采用超声压印实现了高性能单面和双面聚合物导光板的快速制作^[8-9]。Young Hak Cho 等采用相似工艺制作了聚合物超疏水表面,并研究了微通道间距对疏水性的影响^[10]。Harutaka Mekarū 采用 Ni 模具研究了不同种类聚合物基片的超声纳米压印,发现同工艺参数下玻璃化转变温度越高的聚合物复制质量越差^[11]。Chien-Hung Lin 进行了超声纳米光刻压印,在 mr-I-8030 薄膜上复制了纳米圆柱和纳米沟槽^[12]。随后他研究了预热温度在聚合物玻璃化转变温度以下的超声压印,提出了

热辅助超声纳米压印光刻^[13]。研究结果显示,提高压印压力和热板温度均可提高工艺的压印质量。Harutaka Mekarū 对微米和纳米结构的超声辅助热压印进行了较多研究。采用 Ni 模具对 PC 平板塑料进行了微米结构复制,证明了在热压印中引入超声振动可以明显提高工艺的压印质量^[14-15]。接着,他采用 Si 模具对 0.5 mm 厚 PC 薄膜进行了超声辅助热纳米压印,证明了超声开始时间和超声振幅是影响压印质量的重要因素^[16]。

目前,关于超声波微纳结构压印技术的研究主要集中在压印方法以及不同类型微器件的制作两方面,针对压印过程中的成型缺陷鲜有报道。本课题组在超声压印工艺的研究中发现,在聚合物基片与超声工具头接触的表面,即聚合物基片的非成形面出现了熔融现象,而非成形面的熔融缺陷将降低器件性能或限制后续工艺的选择,是压印过程中应当尽量避免的缺陷。因此,本文研究了超声压印工艺中非成形面的熔融缺陷的形成机理及其抑制方法,对其他非室温条件下的超声压印方法具有很好的借鉴作用。

2 聚合物超声压印工艺中非成形面熔融缺陷形成机理及抑制方法

2.1 超声压印工艺中的非成形面熔融现象

图 1 所示为聚合物超声压印原理图。聚合物基片放置在超声工具头和微模具之间,然后施加超声振动载荷,聚合物基片在超声振动的作用下产热而软化,最终在压力的作用下流动并完成微结构的填充成形。

然而,压印后的聚合物基片与超声工具头接触的非成形面出现熔融现象,如图 2 所示(彩图见期刊电子版)。总结大量超声压印实验发现,基片非成形面熔融缺陷与模具图形关系密切。当复制微流控芯片通道等孤立凸起结构时,几乎不发生

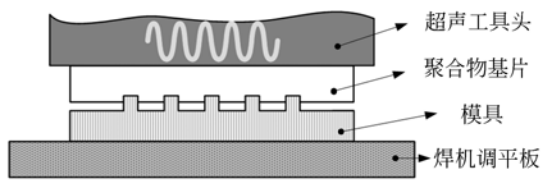


图 1 超声产热压印原理图

Fig. 1 Schematic of ultrasonic embossing

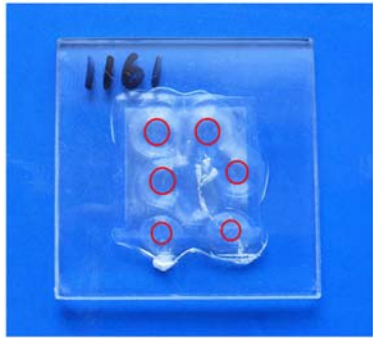


图 2 基片非成形面的熔融现象(红色区域为“热点”)

Fig. 2 Melting phenomenon on non-forming surface of polymer substrate (red circles are “hot points”)

熔融现象;当成形凹模具或密集微结构凸模具时,非成形面几乎全部出现熔融现象。此外,非成形面的熔融区域存在数个“热点”,“热点”附近有聚合物软化后向周围区域流延的痕迹,表明“热点”处具有比附近区域更高的温度。熔融现象导致基片表面不平度增大和透光性变差,影响微器件的性能并限制其使用场合。例如,用于激光诱导荧光法检测的微流控芯片需要具有很高的透光性^[17]。

2.2 非成形面熔融现象的形成原因及抑制方法

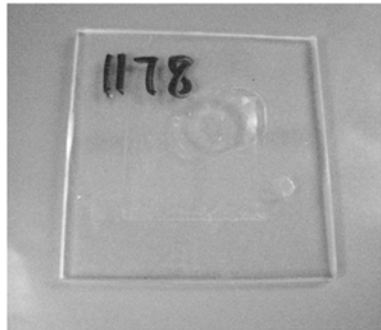
现有的热塑性聚合物超声焊接产热机理认为,聚合物在其温度低于玻璃化转变温度时主要为界面摩擦产热,高于玻璃化转变温度后主要为黏弹性产热^[18]。基于摩擦产热为超声压印工艺启动热源的理论,凹模具或密集微结构凸模具超声压印工艺中出现非成形面熔融现象的可能原因:在孤立凸起结构的超声压印过程中,相对超声工具头-基片接触面,基片-模具接触面的面积更小、应力集中程度更高,因此其摩擦产热速率更高。基片成形面温度远高于非成形面温度,在非成形面不发生软化的条件下即可完成微结构的复

制。相对而言凹模具或密集微结构凸模具的凸起面积大很多,势必减小超声工具头-基片界面和基片-模具界面的应力差。此外,由于机加工的超声工具头不平度较大,因此在超声工具头-基片界面上出现应力集中现象,使得基片上、下表面的应力集中程度更为接近。最终,由于超声工具头-基片界面和基片-模具界面摩擦产热速率相差不大,导致基片上、下表面的软化时间接近,成形微结构的同时在非成形面上发生聚合物的软化甚至熔融。而聚合物基片非成形面的数个“热点”正是超声工具头-基片界面的应力集中点。

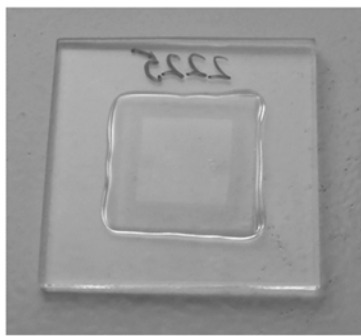
基片非成形面熔融的初始热量来源于超声振动导致的界面摩擦产热,因此,解决的途径为缓解或消除基片非成形面的摩擦现象。文中提出“摩擦系数差法”来消除基片非成形面的摩擦现象,具体实施手段为在聚合物基片与超声工具头之间增加辅助的聚合物薄膜。薄膜与聚合物基片的摩擦系数大大超过薄膜与超声工具头(铝合金材质)的摩擦系数。由于超声工具头-薄膜界面与薄膜-基片界面具有相同的压力,使得超声工具头-薄膜界面较薄膜-基片界面更易发生相对位移。如果两界面的摩擦系数差足够大则可以保证相对位移只发生在超声工具头-薄膜界面,从而避免聚合物基片非成形面的摩擦产热。符合以上特性的薄膜首选表面保护膜,这种复合薄膜由基材和压敏胶两层不同材质组成,基材具有较小的黏附力而压敏胶具有较大的黏附力。以 Sekisui # 622E-50 保护膜为例进行的摩擦角测试实验显示, Sekisui # 622E-50 薄膜的 PE 层与超声工具头的摩擦系数约为 0.453,而薄膜的 EVA 层与 PMMA 的摩擦系数高达 3.58。

超声压印实验前,表面保护膜通过压敏层黏附在基片的非成形面,称其为“背膜”。采用 Sekisui # 622E-50 表面保护膜进行背膜有效性试验。超声振幅为 18 μm 、超声压力为 500 N、超声时间为 10 s、保压压力为 600 N、保压时间 30 s,压印结果如图 3 所示。从图中可清晰地观察到,无背膜的聚合物基片非成形面有明显的熔融现象而成形面几乎没有微结构,而带有 Sekisui # 622E-50 表面保护膜的基片非成形面平滑且微结构成形明显。因此,背膜不仅成功地避免了基片

非成形面的熔融现象,且同工艺参数下还具有改善工艺复制精度的作用。



(a) 无膜
(a) Without film



(b) Sekisui #622E-50 表面保护膜
(b) Sekisui #622E-50 surface protection film

图3 背膜对超声压印基片非成形面熔融现象的抑制作用

Fig. 3 Inhibiting effect of surface protection film on the melting on non-forming surface

3 背膜的优化选取

背膜的引入成功地解决了基片非成形面熔融的问题,但其有可能影响工艺的产热过程,进而影响压印质量。聚合物的玻璃化转变温度为聚合物压印成形工艺合理温度范围的下限,聚合物温度在玻璃化转变温度以上的时间为实际成形时间。定义聚合物材料达到玻璃化转变温度所需的超声加载时间为软化时间,则工艺参数相同的条件下,软化时间越短越有利于微结构的成形。此外,根据超声黏弹产热理论,超声黏弹产热速率只与超

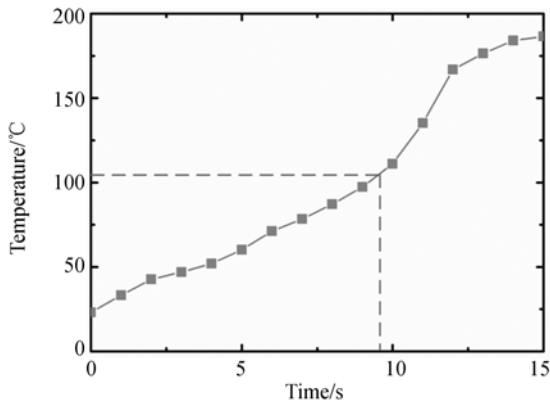
声振幅、频率和聚合物温度有关;而表面保护膜材质声阻抗与大多数聚合物相近,对基片内超声信号的影响很小,可认为其对黏弹产热速率无显著影响。因此,背膜主要通过影响聚合物软化时间而对工艺的成形质量产生影响。为了考察有无背膜、背膜种类和厚度对软化时间的影响,对比了4种背膜条件下工艺参数对聚合物软化时间的影响。分别为无背膜、板材自带 $50\ \mu\text{m}$ 保护膜、Sekisui #622E-50 保护膜和 Sekisui #622WB 保护膜。所使用基片材料为旭化成公司(上海)的 $2\ \text{mm}$ 厚聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)挤压板材。

3.1 测量聚合物软化时间的“极小值”法

观察超声压印过程中超声工具头位移-时间曲线,发现位移-时间曲线存在极小值点。而在恒应力条件下,超声工具头位移与聚合物基片纵向形变方向相反、大小相同,即聚合物形变-时间曲线存在极大值点。这应该与聚合物变温蠕变实验中材料达到玻璃化转变温度而在形变-时间曲线上出现极大值点的原因相同^[1],是由于材料的弹性模量在玻璃化转变温度附近突然急剧减小导致基片压缩变形增大造成的。为了验证以上推论,进行了超声压印工艺过程中聚合物基片成形区的测温实验。

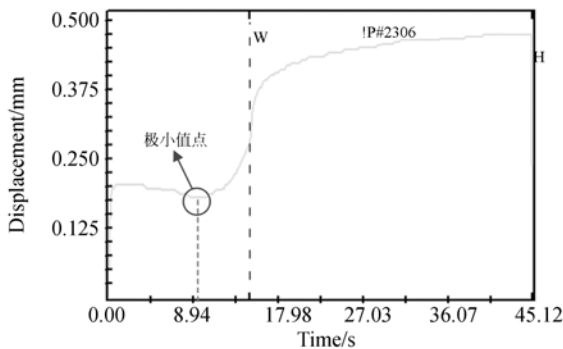
图4(a)所示为利用 OMEGA 公司的 Chal-0005 型镍硅/镍铬微细热电偶测量得到的超声压印工艺过程中基片-模具界面温度-时间曲线图,工艺参数为超声振幅 $15\ \mu\text{m}$ 、超声压力 $450\ \text{N}$ 、超声时间 $15\ \text{s}$ 。从图中可知,经过 $9.2\ \text{s}$,基片-模具界面温度由室温上升至 $105\ ^\circ\text{C}$,即达到 PMMA 材料的玻璃化转变温度。图4(b)所示为同组实验的超声工具头位移-时间曲线,曲线的极小值点出现在超声工具头与基片接触后 $9.5\ \text{s}$ 左右。由于超声振动在超声工具头与基片间压力达到设定的触发压力后才开始施加,因此界面升温开始时间延迟于超声工具头位移/压力开始记录时间。将触发压力设置为 $44\ \text{N}$,对应的延迟时间约为 $0.2\ \text{s}$,即位移曲线极小值对应的超声加载时间为 $9.3\ \text{s}$;这与温度-时间曲线上达到聚合物玻璃化转变温度的时间吻合。因此,聚合物软化时间可大致估计为超声工具头位移-时间曲线上的极小值时间。可见,利用聚合物形变-时间曲线极大值

点来判断聚合物温度是否达到其玻璃化转变温度的方法同样适用于超声波压印成形。



(a) 温度-时间曲线

(a) Temperature-time curve



(b) 位移-时间曲线

(b) Displacement-time curve

图 4 超声压印过程中基片-模具界面温度-时间曲线和超声工具头的位移-时间曲线

Fig. 4 Temperature-time curve in substrate-mold interface and displacement-time curve of horn during ultrasonic embossing

3.2 背膜对软化时间的影响

分别在 4 种背膜条件下进行了工艺参数对聚合物软化时间影响的正交试验, 每组试验重复 2 次, 最终结果取 2 次试验平均值。表 1 所示为 4 种背膜条件不同工艺参数对应的聚合物软化时间。背膜条件分别为无背膜、50 μm 自带保护膜、Sekisui # 622E-50 保护膜和 Sekisui # 622WB 保护膜。无背膜条件下超声振幅和超声压力对软化时间的影响无明显规律, 且发生了非成形面的熔

融现象。其他 3 种情况下, 聚合物软化时间均随超声振幅的增大而显著减小。

表 1 不同背膜条件下的聚合物软化时间

Tab. 1 Softening time using different films

超声压力/N	聚合物软化时间/s			
	15 μm 超声振幅	18 μm 超声振幅	21 μm 超声振幅	
无背膜	300	15.75	10.39	6.05
	400	11.84	12.9	9.37
	500	13.15	7.775	7.775
自带保护膜	300	12.935	8.91	6.51
	400	11.17	6.945	4.76
	500	14.51	8.185	5.69
# 622E-50	300	8.935	8.275	4.905
	400	9.635	6.09	4.225
	500	10.985	7.255	4.07
# 622WB	300	9.41	8.295	6.65
	400	9.89	7.135	4.425
	500	11.405	6.83	4.385

为了进一步对比 4 种背膜条件对聚合物软化时间的影响, 对上述实验结果进行方差分析, 结果如表 2 所示。从表中可得出以下结论:

1) 背膜条件影响聚合物基片的软化速度, 按软化时间由长到短依次为 Sekisui # 622E-50、Sekisui # 622WB、50 μm 自带保护膜和无背膜。其中, Sekisui # 622E-50 与 Sekisui # 622WB 相差较小, 这可能是由于两者的材料和薄膜结构相同, 仅在厚度上有所差异。

2) 背膜条件影响软化时间的重复性, 重复性从好到坏依次为 Sekisui # 622WB、Sekisui # 622E-50、50 μm 自带保护膜和无贴膜, 其中厚度略厚的 Sekisui # 622WB 稍好于 Sekisui # 622E-50。这可能是因为较厚较软的薄膜有利于增大界面接触面积, 因此提高了工艺的重复性。

3) 不同背膜条件下工艺参数对软化时间的影响规律不同。Sekisui # 622E-50 与 Sekisui # 622WB 作为背膜时, 工艺参数按照其显著度由大到小依次为超声振幅、交互作用和超声压力; 背膜为自带保护膜时依次为超声振幅、超声压力和交互作用; 无背膜时为超声振幅、交互作用和超声压力。显然, 有无背膜以及背膜的种类会改变超声摩擦产热过程中超声振幅和超声压力的作用方式或程度。

表2 背膜条件对聚合物软化时间的影响

Tab.2 Effects of surface protection films on softening time

	影响因素的 F(2,9)检验值			实验误差 方差(s ²)	均值(s)
	超声 压力	超声 振幅	交互 作用		
无背膜	2.865	29.414	6.157	1.750	10.556
自带表面 保护膜	7.978	63.411	1.509	1.467	9.065
#622E-50	1.627	63.451	2.713	0.703	7.153
#622WB	3.180	86.818	5.917	0.448	7.603

背膜选择软化时间较短的 Sekisui #622E-50 可提高超声压印工艺的复制精度和成形能力,选择软化时间重复度高的 Sekisui #622WB 可提高工艺的重复性。实际上两者在软化时间及软化时间的重复度上相差不大,均远远优于自带保护膜和无背膜条件。因此, Sekisui #622E-50 和 Sekisui #622WB 均适合作为超声压印工艺的背膜材料。

参考文献:

- [1] 罗怡, 王晓东, 杨帆, 等. 变温蠕变实验 COP 微流控芯片热压制备[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1090-1095.
LUO Y, WANG X D, YANG F, et al.. Variable temperature quasi-creep experiment for fabrication of microfluidic chip using Cyclo-Olefin Polymer (COP) [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1090-1095. (in Chinese)
- [2] 宋满仓, 刘莹, 祝铁丽, 等. 塑料微流控芯片的注塑成形[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(4): 229-334.
SONG M C, LIU Y, ZHU T L, et al.. Injection molding of plastic microfluidic chip [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(4): 229-334. (in Chinese)
- [3] 蒋炳炎, 申瑞霞, 沈龙江, 等. 注射成型工艺参数对微结构零件复制度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 249-256.
JIANG B Y, SHEN R X, SHEN L J, et al.. Influ-

4 结论

本文分析了超声压印工艺中聚合物基片非成形面熔融现象的原因,提出了“摩擦系数差法”,并通过增加背膜(聚合物基片非成形面增加表面保护膜)实现了上述方法并进行了验证。实验结果显示,背膜可以成功地避免非成形面的熔融现象。为了考察引入背膜对室温超声压印工艺的影响,研究了4种背膜对聚合物软化时间的影响。提出超声压印工艺中超声工具头位移-时间曲线极小值点对应聚合物软化时间的观点,通过超声压印过程中基片-模具界面的温度测试实验进行了验证。研究了背膜有无、种类和厚度对超声压印工艺聚合物软化时间的影响。研究结果表明, Sekisui 系列的表面保护膜对减小工艺软化时间和提高软化时间重复性影响显著。其中, Sekisui #622E-50 保护膜可缩短聚合物软化时间 3.4 s, Sekisui #622WB 保护膜可降低软化时间误差 0.64 s。因此,增加背膜可缩短超声压印工艺中聚合物的软化时间且提高其重复性,最终可达到提高工艺成形能力和工艺重复性的目的。

- ence of processing parameters in injection molding on replication fidelity of microstructure parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 249-256. (in Chinese)
- [4] 张平, 胡亮红, 刘永顺. 主辅通道型微混合器的设计与制作[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 872-879.
ZHANG P, HU L H, LIU Y SH. Design and fabrication of micromixer with main-assist channels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 872-879. (in Chinese)
- [5] 杨潞霞, 郝晓剑, 王春水, 等. 具有三维聚焦功能的微流控芯片[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2309-2316.
YANG L X, HAO X J, WANG CH SH, et al.. Three-dimensional focusing microfluidic chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2309-2316. (in Chinese)
- [6] YANG C, YIN X H, CHENG G M. Microinjection molding of microsystem components: new aspects in improving performance [J]. *J. Micromech. Micro-*

- eng, 2013, 23: 093001.
- [7] LIU SH J, DUNG Y T. Hot embossing precise structure on to plastic plates by ultrasonic vibration [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2005: 915-925.
- [8] LIU SH J, HUANG Y CH, YANG S Y, *et al.*. Rapid fabrication of surface-relief plastic diffusers by ultrasonic embossing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42: 794-798.
- [9] LIU S J, HUANG Y C. Manufacture of dual-side surface-relief diffusers with various cross angles using ultrasonic embossing technique [J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18083.
- [10] YOUNG H C, YOUNG S S, YONG M, *et al.*. Facile fabrication of superhydrophobic poly(methyl methacrylate) substrates using ultrasonic imprinting [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, 23: 055019-1-7.
- [11] HARUTAKA M, MASAHARU T. Ultrasonic nanoimprint on engineering plastics [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2009, 27(4): 785-792.
- [12] LIN CH H, CHEN R SH. Ultrasonic nanoimprint lithography: a new approach to nanopatterning [J]. *Microolith.*, *Microfab.*, *Microsyst.*, 2006, 5 (1): 011003-1-6.
- [13] LIN CH H, WANG CH Y, CHEN R SH. Assisted-heating for ultrasonic nanoimprint lithography [C]. *9th IEEE Conference on Nanotechnology*, 2009.
- [14] HARUTAKA M, OSAMU N, OSAMU M, *et al.*. Development of precision transfer technology of atmospheric hot embossing by ultrasonic vibration [J]. *Microsyst Technol.*, 2007, 13:385-391.
- [15] HARUTAKA M, HIROSHI G, MASAHARU T. Development of ultrasonic micro hot embossing technology [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84:1282-1287.
- [16] HARUTAKA M, TOSHIHIKO N, HIROSHI G, *et al.*. Effect of applying ultrasonic vibration in thermal nanoimprint lithography [J]. *Microsyst Technol.*, 2008, 14:1325-1333.
- [17] 李永新, 黎源倩, 渠凌丽, 等. 微流控芯片-激光诱导荧光快速检测 4 种食源性致病菌 [J]. *分析化学*. 2008, 36(12): 1667-1671.
- LI Y X, LI Y Q, QU L L, *et al.*. Microfluidic chip electrophoresis with laser-induced fluorescence detection for rapid analysis of four foodborne pathogenic bacteria [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2008, 36(12): 1667-1671. (in Chinese)
- [18] ZHANG Z B, WANG X D, LUO Y, *et al.*. Study on heating process of ultrasonic welding for thermoplastics [J]. *J. Thermoplast Compos. Mater.*, 2009, 23:647-664.

作者简介:



祁娜(1982—),女,山西长治人,博士研究生,2005年于河南科技大学获学士学位,2008年于大连理工大学获硕士学位,主要从事聚合物 MEMS 器件设计及加工工艺方面的研究, E-mail: qina1982@gmail.com

导师简介:



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授,院士,1960年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事微机电系统和精密机械相关研究, E-mail: wangld@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)