文章编号:1000-7032(2019)05-0616-07

等温等效替代热压印法成型 超薄导光板的工艺分析

李 楷,吴大鸣,刘 颖*,曹亚楠,许 红,赵中里,孙靖尧 (北京化工大学机电工程学院,高分子材料加工装备教育部工程研究中心,北京 100029)

摘要:针对超薄导光板微结构模具难加工的问题,结合等温热压印法,提出了一种新型的"等效替代"压印工 艺,即通过控制成型工艺参数来降低微结构复制高度,实现了在基片上成型出小于模具微结构尺寸的等效结 构,突破了热压印过程中模具微结构完全等大复制的思想禁锢,降低了微结构模具加工难度,从而革新了高 质量超薄导光板的成型工艺。以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为基片,设计具体实验,加工 0.25 mm 厚的导光 板,验证这一方法的可行性。实验结果表明,这种新型的"等效替代"压印工艺不仅可以降低模具的制造难度 和加工成本,而且可以大大改善超薄导光板的性能,与等温热压印工艺相比均匀度提高了 23%,整个成型时 间缩短到了 20 s。

关 键 词:等温热压印;等效替代热压印;超薄导光板;工艺参数;复制高度;均匀度 中图分类号: 0439 **文献标识码:** A **DOI**: 10.3788/fgxb20194005.0616

Analyses on Forming Process of Ultrathin Light Guide Plate by Isothermal Equivalent Substitution Hot Embossing

LI Kai, WU Da-ming, LIU Ying*, CAO Ya-nan, XU Hong, ZHAO Zhong-li, SUN Jing-yao (Engineering Research Center of Polymer Processing Equipment, Ministry of Education, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China) * Corresponding Author, E-mail: liuying@ mail. buct. edu. cn

Abstract: Aiming at the problem that the ultra-thin light guide micro-die is difficult to process, combined with the isothermal hot stamping method, a new "equivalent substitution" imprinting process is proposed, which is to reduce the microstructure replication height by controlling the molding process parameters. The equivalent structure smaller than the microstructure of the mold is formed on the substrate, which breaks through the idea of completely replicating the microstructure of the mold during the hot stamping process, reduces the difficulty of processing the microstructure mold, and thus innovates the high quality super forming process of a thin light guide plate. The specific experiment was designed with polymethyl methacrylate (PMMA) as the substrate, and the 0.25 mm thick light guide plate was processed to verify the feasibility of this method. The experimental results show that this new "equivalent substitution" imprint process can not only reduce the manufacturing difficulty and processing cost of the mold, but also greatly improve the performance of the ultra-thin light guide plate. Compared with the thermostatic upper and lower mold differential thermal imprint process, the uniformity was increased by 23% and the overall molding time was shortened to 20 s.

收稿日期: 2018-08-14;修订日期: 2018-10-13

基金项目:国家自然科学基金(51673020)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(51673020)

Key words: isothermal hot embossing; equivalent replacement hot stamping; ultra-thin light guide plate; process parameters; replication height; uniformity

1引言

近年来,在新一代智能手机"轻薄亮"的发展 趋势下^[1],制备出厚度更薄性能更好的导光板成 为了众多学者的研究热点^[23]。热压印工艺不仅 突破了导光板0.35 mm 的厚度瓶颈,还可以大幅 减小制品的内应力。热压印法凭借其优越的加工 性能和实现产业化的可操作性,在众多导光板的 成型方法中脱颖而出,引起了国内外众多研究者 的关注^[411]。

传统热压印方法主要遵循的是"高温压印— 低温脱模"这一思想,即先将聚合物加热到粘流 温度 T_f 或熔融温度 T_m 以上进行压印成型,然后 冷却到玻璃化转变温度 T。以下脱模。模具的缓 慢升温降温过程无形中拉长了导光板压印成型的 整个周期,降低了制品的生产效率,同时,利用这 种工艺成型的超薄导光板(厚度 < 0.35 mm)容易 出现翘曲、气泡、褶皱等缺陷,影响成型质量。过 去几年里,研究者们为改善这些缺陷,提出了多种 解决方案,但是大多是从设备角度出发,改善加热 冷却的方式,增加辅助设备来改善升降温的过程, 无疑增加了压印设备的复杂性和设备的生产成 本。基于此,北京化工大学吴大鸣教授团队从导 光板的成型工艺出发,创新性地提出一种等温热 压印法,突破了"高温压印—低温脱模"的思想束 缚,即采用恒温模具代替变温模具,使整个压印过 程模具温度保持在聚合物玻璃化转变温度 T。附 近,利用聚合物类固态的特性在适当的压力下,将 模具的微结构高精度地复制到基体表面,完成整 个热压印过程^[12-15]。

通常情况下,在保证导光板的显示效果的 条件下,导光板越薄,所需的微结构几何尺寸越 小,故要想压印厚度小于 0.35 mm 的超薄导光 板,微结构几何尺寸必须相应减小。微结构尺 寸越小,与其对应的模具加工难度就越大,同时 聚合物熔体充模也越困难。针对这些问题,笔 者在等温热压印的工艺基础上,经过不断的实 验探索总结出,可以通过控制相应的工艺参数 来降低微结构复制高度的方法以达到减小微结 构成型的效果。超薄导光板成型的过程中,压 印温度较难控制,必须通过大量实验调至适当 的温度才能使得聚合物完全充满模腔,又不至 于因温度过高导致脱模困难,而且重复性不是 很高。然而,利用上述增大微结构降低其复制 高度的方法既降低了微结构模具的加工难度, 又解决了等温热压印过程中模具升降温缓慢带 来的缺陷问题。我们将这种一举两得的方法称 之为"等效替代"热压印法。

"等效替代" 压印法成型导光板时,在整个压 印过程中成型温度、压力较传统的热压印工艺低 很多,所以在完成压印后,不必大幅冷却降温即可 脱模,这也符合等温热压印的理念,所以,"等效 替代"压印法是一种特殊的等温压印法。下面通 过设计具体的实验对这种成型工艺进行具体的分 析论证。

2 实 验

2.1 实验原料

PMMA 基板:光学级 PMMA,厚度 0.25 mm, 深圳铂邦塑料有限公司。

2.2 主要设备及仪器

微纳米热压印机:IHE-200A型,实验室自制; 光谱仪:MK350,东莞市广凌电子科技有限责 任公司;

原子力显微镜:BioScope Catalyst,美国 Bruker 公司。

2.3 实验流程

本实验采用上下模板差温的方法来压印导光 板,其中上模板的微结构是微透镜,球形半径为 18.5 μm,下模板的微结构是 V 形沟槽,微槽槽宽 和槽深均为17 μm。在保证成型制品质量的前提 下,通过调整压印过程中的工艺参数值,降低微结 构复制高度,以实现在较大微结构模板下成型出 适合超薄导光板的微结构。若要想降低微结构的 复制高度,主要控制的工艺参数值有3个,即温 度、压力、时间。所以该实验是在初始条件的基础 上按照顺序逐渐降低上模板温度、压强、时间和下 模板温度,直至成型的超薄导光板出现缺陷为止。 根据前期大量的等温热压印实验结果分析,实验 的初始条件定为:上模温度115℃、下模温度95

2.4 性能测试与与结构表征

按九宫格取样法,用 MK350 光谱仪测试导光 板上9个点的照度,并计算平均照度和均匀度。

在原子力显微镜下,测量微结构的尺寸,并计 算导光板微结构的复制率。

3 结果与讨论

温度、压力、时间是等温热压印过程中最为重要的工艺参数,为了使压印较大微结构的超薄导 光板的显示效果与其原本应匹配的微结构时的显 示效果能够等效,需要降低压印成型时的工艺参 数,从而降低微结构复制高度。下面分别依次向 下调节超薄导光板成型的各个工艺参数值,分析 各参数对导光板显示效果的影响,从而得到等效 替代法理想的工艺。

3.1 降低上模板温度对导光板性能的影响

选取上模板温度为研究对象,分别设置115, 110,105,100 ℃ 4 个温度等级,样品号依次记为 1,2,3,4。其他工艺参数均设置为:下模板温度 100 ℃;压印时间 80 s;压印压力 150 kN;脱模时 上模温度控制在 100 ℃。为减小因压印的外界环 境变化所产生的误差,该实验的样品都是在一次 开机的情况下依次完成的。为防止导光板因受到 外界环境的污染影响导光效果,制品取出后迅速 装袋。待4 组实验均完成,在洁净的环境下,按九 宫格法分别依次测量每块导光板相对应位置的 9 个点的照度,然后根据公式(1)计算平均照度和 均匀度,得到如表1所示的数据。

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\rm av}} \times 100\% , \qquad (1)$$

其中,U为照度均匀度; E_{min} 为最小照度值,lx; E_{av} 为平均照度值, lx_{o} 。

从表1中的数据分析易得,随着上模温度的

表1 降低上模温度后导光板质量检测表

Tab. 1 Light guide plate quality test table after lowering the upper mold temperature

样品	平均照度/lx	均匀度/%
1	2 701	52.56
2	2 840	53.35
3	2 823	55.62
4	2 916	61.25

降低,导光板平均照度和均匀度均逐渐上升。根据表1中数据,画出表征上模温度与导光板均匀 度关系图,如图1所示。



观察图1得出,导光板的均匀度与上模具温 度之间呈反比关系,证明了等温"等效替代"热压 印法的可行性。将上模温度设置到100℃以下 时,PMMA呈现为完全玻璃态,难以成型微结构, 故上模温度的下限应是100℃。用原子力显微镜 观察4组实验成品的同一位置,得到如图2的微 结构显微镜图。



图 2 降低上模温度的微结构图。(a)样品 1;(b)样品 2; (c)样品 3;(d)样品 4。

Fig. 2 Reducing the microstructure of the upper mold temperature. (a) Sampel 1. (b) Sampel 2. (c) Sampel 3. (d) Sampel 4.

观察微结构的显微镜图可以明显看出,随着 上模温度的下降,因温度产生的微小缺陷也逐渐 减少,整体微结构充模较完全。经扫描,测量其波 峰与波谷之间的垂直距离,将其定义为微结构的 复制高度。

根据所测得数据,绘出网点复制高度与均匀 度的关系曲线,如图3。通常情况下,模具的温度 越高,基材的流动性越好,越有利于微结构的填 充。上模温度降低,复制高度随之减小,微结构尺 寸就相应减小,逼近于0.25 mm 厚的导光板原本 相匹配的微结构尺寸,所以导光板整体的照度和 均匀度也就会随着增大,再一次证明了等温"等 效替代"热压印法的可行性。总而言之,等温"等 效替代"热压印工艺中,降低上模温度,有利于提 高导光板的均匀度和亮度。但是,由于材料本身 的特性,上模并不能无限降低,对于 PMMA 来说, 上模温下限为100 ℃,若低于玻璃化温度,微结构 无法压印成型。



图 3 降低上模温度后微结构复制高度与均匀度关系图

Fig. 3 Relationship between microstructure replication height and uniformity after lowering the upper mold temperature

3.2 降低压力对导光板性能的影响

聚合物基片经热压印加工后,由于内应力的 残存,往往会出现回弹现象,影响微结构成型精 度。因此,传统的热压印工艺引进了保压过程,聚 合物在该过程中发生应力松弛,当内应力降低到 一定程度(不足以使导光板产生缺陷)后,即可开 模完成打印过程。但是该等效替代压印工艺省略 了保压过程,因为材料的回弹特性正好减小了微 结构的复制高度,使微结构尺寸更趋近于超薄导 光板应匹配的微结构。以上一组实验最后得到的 参数为基准,逐渐降低压印的压力,分别设 100, 90,80,85 kN 4 个压力等级,记样品号为 5,6,7, 8。其他参数均为:上模板温度 100 ℃、下模板温 度 100 ℃、压印时间 80 s。

同样用九宫格法,依次测出成型制品的照度,

并计算出其平均照度和均匀度,如表2所示。对 比表2与表1中的数据易知,继降低上模温度的 实验后,降低压力的方法还能使导光板的平均照 度和均匀度再次提高。经原子力显微镜观察后得 到如图4所示的微结构图,可明显观察到随着压 印压力的降低,其微结构复制高度也明显减小,表 面逐渐变得平缓。测量微结构波峰到波谷的垂直 距离,得到了如图5所示的曲线图。

表 2 降低压力后导光板质量检测表

Tab. 2 Light guide plate quality test table after reducing pressure

样品	平均照度/lx	均匀度/%	
5	3 011.6	61.52	
6	3 155.0	67.21	
7	2 821.7	67.35	
8	3 407.3	70.14	



图 4 降低压力后的微结构显微镜图。(a)样品 5;(b)样品 6;(c)样品 7;(d)样品 8。

Fig. 4 Microstructure microscope after reducing pressure. (a) Sampel 5. (b) Sampel 6. (c) Sampel 7. (d) Sampel 8.

经观察发现,不同于上一组降低上模温度的 实验,这一组的7号样品对应的复制高度比较小, 但是与其他3组样品相比,均匀度也并未如想象 中那样理想。究其原因是压力值过小,造成微结 构压印不完全。压力值越小,微结构填充深度越 小,但当压力小于某一个值时,直接影响微结构的 成型效果,甚至造成微结构不能复制,压印失败。 另一方面,压印压力过小会放大设备的精度误差



图 5 降低压力后的微结构复制高度与均匀度关系图



对制品质量的影响程度。根据具体的实验,发现 压印压力降到 80 kN时,成型的导光板的局部照 度有所提升,但表面出现了多处压印不全的缺陷, 从而导致导光板整体的均匀度随之下降。针对这 一现象,尝试着稍微调高压力值。经过不断的尝 试,发现将压力值调到 85 kN 时压印不完全缺陷 得到了很大的改善,同时其均匀度也提高了 70% 左右,该样品号记为 8。因此,在保证超薄导光板 的导光质量的条件下,其最佳压印压力值为 85 kN。

3.3 减少压印时间对导光板性能的影响

"等效替代" 压印法的优点之一就是减少压 印时间,提高压印效率。故基于上一组降低压力 的实验,然后减少成型时间来设计对比实验。压 印时间设置为50,20,10,15 s 4 个等级,样品号分 别记为9,10,11,12。其他工艺参数均设置为:上 模温度 100 ℃、下模温度 100 ℃、压力 85 kN。然 后测出成型后样品的照度,计算平均照度及均匀 度,得到了表 3 所示的数据。

表 3	缩短时间后导光板质量检测表

Tab. 3 Light guide plate quality test table after reducing time

样品	平均照度/lx	均匀度/%
9	3 550.7	70.22
10	3 709.0	72.76
11	2 241.1	58.82
12	3 227.8	64.34

在整个压印过程中,模具温度相对较低,故压 印完成后,无需冷却,直接脱模。从数据中不难发 现导光板的均匀度一开始上升了两个百分点之后



图 6 缩短时间后的微结构显微镜图。(a)样品 9;(b)样品 10;(c)样品 11;(d)样品 12。

Fig. 6 Microstructural microscope image after time reduction. (a) Sample 9. (b) Sample 10. (c) Sample 11. (d) Sample 12.

大幅度下降。显而易见,出现这种现象主要是因为压印时间过短(<20s),熔体还未来得及充模就已经脱模,极大地影响了微结构的复制。

用原子力显微镜观察,得到了图6所示的微 结构填充图。结合时间与复制高度关系的波形图 7可以发现,当压印时间为10s时,熔体正准备填 充就已脱模,完全来不及成型,只能在边缘填充出 一圆形痕迹,高度仅为2.7μm左右,中间部分因 压印时间过短,完全未填充就已脱模。这种形似 火山口的结构对导光板的均匀度势必造成很大的 影响,所以压印时间为10s时,导光板的均匀度



图 7 压印时间过短时微结构的波形图。(a)压印时间为 10 s;(b)压印时间为 15 s。

Fig. 7 Waveform of the microstructure when the imprint time is too short. (a) Structure waveform diagram when the imprint time is 10 s. (b) Structure waveform diagram when the imprint time is 15 s. 发生了骤降。为了找到最佳的压印时间点,在10 s 的基础上逐渐增加压印时间,可以发现,当压印 时间为15 s 时,虽然微结构中间区域的填充状况 较10 s 时改善了很多,但仍然未能形成完整的微 透镜结构,并且边缘处的填充高度与压印时间10 s 时相比更低,仅有1.7 μm 左右。经过系列的试 验检测,发现20 s 就是一个压印时间的节点,当 压印时间低于20 s 时,微结构的填充状况就是这 种火山口形貌。所以在保证微结构复制完整的前 提下,最短压印时间为20 s。

3.4 降低下模板温度对导光板性能的影响

本实验模具的下模板微结构是 V 形沟槽,与 聚合物接触为线接触,比较容易充模,故前面 3 组 实验中下模温度都较低,仅为 100 ℃。在此基础 上设置 95,90 ℃两个温度等级进行实验,其他参 数均保持在最佳值。

成型后导光板经检测计算其平均照度和均匀 度得到表4的数据,从表4中可以发现,下模温度 降低后,导光板的平均照度和均匀度又得到了提 升。但是当下模温度为90℃时,再一次出现了压 印不全的缺陷。经试验发现,在保证导光板显示 质量的前提下,95℃是下模的最佳压印温度。将 各个工艺参数均设置为最佳参数进行实验,经对 成品扫描,得到图8所示的波形图。发现最佳 工艺参数下的导光板的V形沟槽结构的深度为

表4 降低下模温度后导光板质量检测表

Tab. 4 Light guide plate quality inspection table after lowering the lower mold temperature

	<u>^</u>	
样品	平均照度/lx	均匀度/%
13	3 505.8	75.52
14	3 415.77	75.79



- 图 8 下模温度为 95 ℃ 时微结构波形图。(a) V 沟槽结构波形图;(b)微透镜结构波形图。
- Fig. 8 Microstructure waveform at 95 °C. (a) V-groove structure waveform diagram. (b) Microlens structure waveform diagram.

3.735 μm, 微透镜结构深度为 4.723 μm。

4 结 论

等温热压印法成型超薄导光板,极大缩短了 成型时间,提高了成型效率。在此基础上提出了 "等效替代"压印法,突破了压印过程中微结构完 全等大复制的思想,降低了微结构模具的加工难 度,并且还解决了等温热压印法成型超薄导光板 时聚合物熔体充模困难及温度难精确控制的问 题,降低了该工艺对压印设备的精度要求。

利用"等效替代"压印法成型了仅为 0.25 mm 厚的导光板,摸索出了等温"等效替代"压印 法的最佳工艺参数,上模板温度为 100 ℃,下模 板温度为 95 ℃,压印压力为 85 kN,压印时间为 20 s。该工艺与等温热压印相比,不仅使导光板 的均匀度明显提高,还实现了快速脱模,缩短了 成型的时间,为超薄导光板的成型提供了全新 的思路。

参考文 献:

[1]潘婷玫. 二十一世纪显示器主流——液晶显示器(LCD) [J]. 世界电子元器件, 1996(1):6-9.

PAN T M. Twenty-first century display mainstream—LCD display [J]. Global Electron. China, 1996(1):6-9. (in Chinese)

[2]李晓建. 导光板的设计及制作方法研究 [D]. 苏州:苏州大学, 2009.

LI X J. Research on Design and Fabrication of Light Guide Plate [D]. Suzhou Soochow University, 2009. (in Chinese)

- [3] KÄLÄNTÄR K, MATSUMOTO S, KATOH T, et al. Backlight unit with double surface light emission using a single microstructured light-guide plate [J]. IEICE Trans. Electron., 2004,87:1954-1961.
- [4] 孙靖尧,吴大鸣,刘颖,等. 聚合物微纳制造技术 [J]. 橡塑技术与装备, 2016,42(10):1-9.
 SUN J Y, WU D M, LIU Y, et al. Polymer micro-nano manufacturing technology [J]. China Rubber/Plast. Technol.

Equip., 2016,42(10):1-9. (in Chinese)

[5]杨振洲.聚合物微结构平板热压印成型工艺研究 [D].北京:北京化工大学, 2015.

YANG Z Z. The Study of Polymer Micro-Structure Plate to Plate Hot Embossing Process [D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2015. (in Chinese)

- [6] 王晓伟,刘颖,吴大鸣,等. 聚合物微结构滚轮压印成型设备的研制 [J]. 塑料, 2011,40(5):113-115.
 WANG X W,LIU Y,WU D M, et al. Development of roller embossing machine for fabrication of polymer microstructures
 [J]. Plastics, 2011,40(5):113-115. (in Chinese)
- [7] 刘文龙,吴大鸣,刘颖. 聚合物挤出热压印成型工艺 [J]. 塑料, 2012,41(2):28-30.
 LIU WL, WU D M, LIU Y. The extrusion hot embossing process for the polymer [J]. *Plastics*, 2012,41(2):28-30. (in Chinese)
- [8]李焱.光学微结构成型压印研究及其应用[D].广州:华南师范大学, 2015.
 LI X. Research and Application of Optical Microstructure Forming Imprint [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2015. (in Chinese)
- [9] BECKER H, HEIM U. Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures [J]. Sens. Actuators A, 2000,83(1-3):130-135.
- [10] HE Y, ZHANG T, FU J Z, et al. Experimental study on the fabrication of the light guide plate with hot embossing method [J]. Appl. Mech. Mater., 2010,37-38:448-452.
- [11] YANG C H, YANG S Y. A high-brightness light guide plate with high precise double-sided microstructures fabricated using the fixed boundary hot embossing technique [J]. J. Micromech. Microeng., 2013,23(3):035033.
- [12] 吴大鸣,刘颖,郑秀婷,等. 一种快速聚合物微结构等温平板热压印工艺:中国,CN105058770A [P]. 2015-11-18.
 WU D M, LIU Y, ZHENG X T, et al. Process for quick hot stamping of polymer microstructure isothermal flat plate: China, CN105058770A [P]. 2015-11-18. (in Chinese)
- [13] 戴乐.聚合物类固态等温热压印工艺及原理 [D].北京:北京化工大学,2017.
 DAI L. The Technique and Principle of Polymer Isothermal Hot Embossing in Solid-like State [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] 任仰龙. 基于类固态热压印工艺的超薄导光板成型模具的研究 [D]. 北京:北京化工大学, 2017.
 REN Y L. Study on Forming Die for Ultra-thin Light Guide Plate Based on Solid-like State Hot Stamping Process [D].
 Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 江冲,吴大鸣,刘颖,等. 等温准热压印中聚合物微结构成型的分析 [J]. 高分子材料科学与エ程, 2016,32(10): 105-111.

JIANG C, WU D M, LIU Y, et al.. Forming analysis of microstructure in isothermal quasi-embossing conditions [J]. Polym. Mater. Sci. Eng., 2016,32(10):105-111. (in Chinese)



李楷(1992 -),男,山西长治人,硕 士研究生,2016年于太原科技大学 获得学士学位,主要从事聚合物微 纳结构压印成型方面的研究。 E-mail: buctlikai@163.com



刘颖(1963 -),女,山东荣成人,硕士, 副研究员,1990 年于北京化工大学获 得硕士学位,主要从事聚合微纳成型 工艺、聚合物精密挤出工艺、聚合物导 热、导电复合材料及疏水、光扩散等功 能材料的研究。

E-mail: liuying@ mail. buct. edu. cn