

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.11.021

温度对高压成型 PET 薄膜厚度与回弹性的影响

沈忠良^{1,2,3}, 张强¹, 郑子军³, 欧长劲³, 孙圣², 邓益民¹

(1. 宁波大学机械设计与力学学院, 浙江宁波 315211; 2. 宁波欧琳厨具有限公司, 浙江宁波 315000;
3. 浙江工商职业技术学院, 浙江宁波 315012)

摘要:以聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜为研究对象,自制了板式辐射加热装置辅助的模内与模外装饰一体的超高压成型机,采用控制变量法,在 6 种不同加热温度下进行高压成型实验,研究了 PET 薄膜对温度变化的敏感性,探讨与分析了温度对高压成型件周向厚度分布和回弹的影响。结果表明,在拉伸作用下,材料沿拉伸方向流动,高压薄膜厚度减薄明显,温度对薄膜的减薄有显著影响。当加热成型温度在 160℃ 时,周向厚度的减薄率出现最大值,为 47.6%;当温度为 60℃ 时,出现最小值,为 29.6%,并且减薄率和温度的升高成正比。回弹量在 160℃ 时出现最大值,为 6.3 mm;60℃ 时出现最小值,为 0.7 mm,且回弹量和温度的升高成正比。另外,实验发现,在温度超过 100℃ 时,回弹量的增长会骤然加快;在凹模圆角及其周边厚度减薄较小,回弹也较小。

关键词:聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜;厚度;回弹;温度;高压成型

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)11-0117-05

Effects of temperature on Thickness and Springback of PET Films under High Pressure Molding

Shen Zhongliang^{1,2,3}, Zhang Qiang¹, Zheng Zijun³, Ou Changjin³, Sun Sheng², Deng Yiming¹

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Oulin Kitchenware Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 3. Zhejiang Business Technology Institute, Ningbo 315012, China)

Abstract : The sensitivity of poly(ethylene terephthalate) (PET) film to temperature change was studied by the auxiliary plate radiation heating device within the die and mold decoration integrated high pressure film machine. PET film was used as the research object. The control variable method was used to conduct high-pressure molding experiments at 6 temperatures. The influences of temperature on circumferential thickness distribution and spring-back of high-pressure forming parts was discussed and analyzed. The results show that, under the action of stretching, the material flows along the stretching direction, the thickness of the film decreases obviously, and the temperature has a significant effects on the thinning of the film. When the heating molding temperature is 160℃, the thinning rate of circumferential thickness reaches the maximum value, which is 47.6%. When the temperature is 60℃, the minimum value is 29.6%, and the thinning rate is proportional to the increase of temperature. The maximum resilience is 6.3 mm at 160℃. The minimum value of 0.7 mm appears at 60℃, and the rebound is proportional to the increase of temperature. In addition, the experimental results show that when the temperature exceeds 100℃, the growth of resilience will be accelerated. The thickness of the round corner of the die and its periphery is smaller and the rebound is smaller.

Keywords : poly(ethylene terephthalate) film ; thickness ; springback ; temperature ; high pressure molding

高聚物薄膜的成型特性研究是模内装饰(IMD)技术的重要技术支撑^[1],而在高聚物薄膜的成型特性的影响因素中温度是重要参数^[2],厚度变化与回弹变化是仅次于成型过程中褶皱与破裂的关键实际

问题^[3],因此,开展温度对高聚物薄膜成型过程厚度变化与回弹变化的研究具有重要意义。

国内外学者在高聚物薄膜成型特性方面开展了各有特色的研究,主要的研究方法包括:基于厚

基金项目:浙江省高等教育十三五第一批教学改革研究项目(jg20180627),宁波市自然科学基金项目(2017A610086),宁波市软科学研究计划项目(2017A10015),浙江工商职业技术学院校级科研项目(2018Z01)

通讯作者: 沈忠良,博士后,副教授,主要研究方向为 IMD 薄膜成型技术研究 E-mail: superman_panda@163.com

收稿日期: 2019-09-22

引用格式: 沈忠良,张强,郑子军,等. 温度对高压成型 PET 薄膜厚度与回弹性的影响[J]. 工程塑料应用,2019,47(11): 117-121.

Shen Zhongliang, Zhang Qiang, Zheng Zijun, et al. Effects of temperature on thickness and springback of PET films under high pressure molding[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11): 117-121.

度测试仪^[4-5]、万能拉伸机^[6-8]等实验设备的实验研究;基于有限元软件的数值实验研究^[9]和基于本构模型等原理的理论研究^[10]等。J. H. Yoon等^[11]探讨了由于注塑过程引起高温而导致的高聚物薄膜变形(局部撕裂)特性研究,采用单向耦合的方法对聚合物膜的注射成型过程进行了数值模拟,给出了一种分析与预测薄膜变形的有效方法,同时从机理与微观角度给出了研究高聚物薄膜受温度变化影响的实验手段^[12]。Y. H. Lin等^[13]整合了万能拉伸机测试获得的塑料薄膜的力学特性,通过有限元数值实验的方式探讨了温度变化、温度的不对称性对高聚物塑料薄膜在IMD领域应用时成型特性的影响,结果表明,薄膜在温度不对称情况下引起的结晶度差异是导致薄膜变形与翘曲的主要原因。

C. O. Phillips等^[14]基于万能拉伸机所获得的材料力学性能数据与(电子)油墨印刷过程的相关参数,分析和探讨了适合油墨均匀印刷的关键技术,油墨印刷过程对高聚物薄膜成型特性的影响,之前他们^[15]还基于有限元数值模拟的方法开展了IMD工艺下高聚物薄膜的成型特性研究,利用拉伸试验数据建立的材料模型,对该键盘表面覆膜高压成型过程进行了仿真。结果表明,模具和薄膜之间的摩擦防止了薄膜的畸变,上述两者的界面是有效控制薄膜成型特性的关键界面。G. Kim等^[16]认为,薄膜插入成型(FIM)是提高产品表面功能或美学质量的方法之一,并采用黏弹性本构关系描述了聚合物膜的流变行为,采用恒速单轴高温拉伸试验方法获得了流变学参数,提出了一种可视化的模式变化预测方法,并与实际产品的分析结果进行了比较,验证了该方法的有效性。

T. Azdast等^[17]以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)片材作为研究对象,通过有限元数值模拟方法,利用自由成型和插塞辅助成型进行了高聚物变形过程中材料厚度的变化研究,研究了不同温度下自由成型和插塞辅助成型方法的不同组合,并根据每种方法在最终成型件总高度中所占的比例进行了最优化研究。S. C. Chen等^[18]探讨了0.125~0.2 mm厚度的IMD成型用高聚物薄膜深拉伸成型与模具温度、预涂膜加热温度、插塞速度、插塞保温时间、插塞热成型深度等的影响关系,研究了薄膜的壁厚变化规律和壁厚分布规律,结果表明,结晶温度对膜的拉伸比和膜厚变化率影响最大。

综上所述,温度对高聚物薄膜成型特性的影响

是塑料件IMD/模外装饰(OMD)成型的关键问题,且影响成型特性的因素较多,存在一定的相互作用关系。上述研究已给出了温度对高聚物薄膜成型影响的基本研究方法,但是,研究尚未明确给出温度对高聚物薄膜成型特性影响的作用关系。同时,表征高聚物薄膜的本构模型所采用的参数多数为常温下获取,并不能准确表征随着温度变化引起的高聚物薄膜力学参数变化对成型特性带来的影响。

笔者在上述研究的基础上,以聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜为研究对象,通过自主研发的超高压IMD/OMD一体高压成型机进行成型实验,开展了高聚物薄膜的厚度与回弹性对温度变化敏感性的研究,探讨了温度变化对薄膜厚度、回弹量的影响,同时探讨了薄膜成型结构对薄膜温度敏感性的影响。

1 实验方法

1.1 主要原材料

单面加硬防刮花PET薄膜:T60,厚度为250 μm ,表面无明显彩虹纹,拉伸强度 ≥ 160 MPa,标称加热收缩率 $\leq 1\%$,日本东丽株式会社。

1.2 主要仪器与设备

高压IMD/OMD气体成型一体机:HPFM-350C型,自制;

千分尺:103-137型,精度为 ± 2 μm ,日本Mitutoyo公司。

1.3 实验方法

通过进行不同温度下的高压成型实验研究高聚物薄膜热成型的规律。超高压IMD/OMD气体成型一体机的红外辐射加热部件的工作原理如下:以高熔点的合金材料作为辐射体,通电后由电阻发热而产生热辐射作为辐射源^[13]。与传统的加热方式相比,红外辐射加热可以透入薄膜表面一定深度,在薄膜厚度只有0.25 mm的情况下,具有非常好的加热效果。此外,红外辐射加热装置结构简单,设备维护方便,加热方式易于控制,并且加热的速度快、热量散失小,因此具有很高的加热效率。

膜片的加热需要一定的加热面积,因此在设计加热装置时,选用板式加热方式,将辐射元件按一定的秩序排列在一块方形板上,板式辐射使得膜片受热均匀,且结构简单,具体的结构简图如图1所示,加热装置共有6排辐射元件,每排5个,共30个,每个辐射元件的温度都可以单独控制,在实验时,通过

不断调整各区域的温度,以达到膜片最好的成型状态。

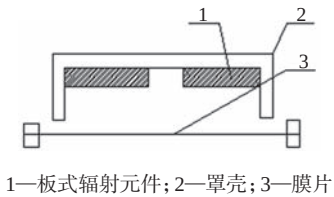


图1 板式辐射加热装置

实验采用的 PET 薄膜的玻璃化转变温度为 79℃,而热成型工艺温度通常控制在 100~150℃ 之间^[14],因此在进行高压成型实验时,选择的膜片加热温度分别为:60,80,100,120,140,160℃,实验过程中,上、下模的温度分别始终控制在 140℃ 和 130℃。

图2是高压成型实验的流程图,具体的实验步骤如下:

- (1) 放膜。首先将膜片放置在型腔中,并用夹边模具固定,利用夹边模具上的定位销定位,利用 Y 型密封圈实现装置的密封;
- (2) 加热膜片。弹出加热板,所有温度均采用红外辐射的方式来控制,同时可以实现分区控制;
- (3) 合模。利用液压缸控制开模、合模,并提供所需要的合模力;
- (4) 吹高压。合模完成后,通过气压泵向模具内吹高压,高压吹气压力为 30 MPa;
- (5) 保压。高压保压时间为 4 s;
- (6) 泄压开模。达到保压时间后,泄压 5 s,之后开模取件,更换膜片。保持其它工艺参数不变,仅改变加热温度,继续进行实验。

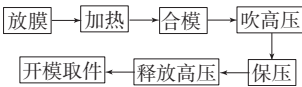


图2 高压成型实验流程图

2 结果与讨论

2.1 温度对厚度的影响

为了研究温度对高压成型件厚度的影响,定义减薄率(m)为:

$$m = \frac{d_0 - d}{d_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: d_0 ——高聚物薄膜的原始厚度;

d ——高聚物薄膜成型后的厚度。

以某产品成型件为例,将其沿周向切开,选取 40 个测量点,如图3所示,分别测量这 40 个点所在位置的壁厚。成型件薄膜的原始厚度为 0.25 mm,

选用千分尺作为测量工具。为了减小误差,每个点需要进行两次测量然后取平均值,记录并统计各个温度下壁厚的测量值。不同加热温度下高压成型件壁厚的分布如图4所示,其减薄率数据列于表1。

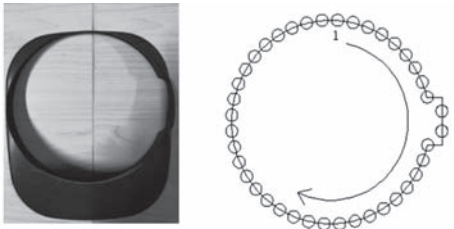


图3 成型产品与测量点分布

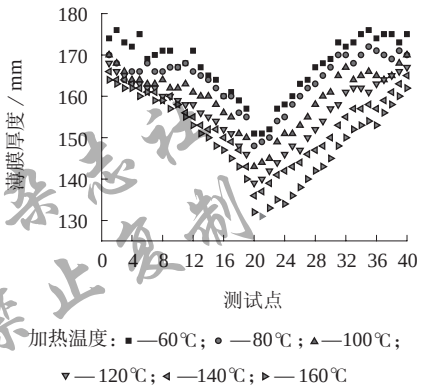


图4 不同加热温度下高压成型件壁厚的分布

表1 不同加热温度下高压成型件壁厚减薄率数据

项目	加热温度/℃					
	60	80	100	120	140	160
最小减薄率/%	29.6	31.2	32	32.8	33.6	34.4
最大减薄率/%	39.6	40.8	42.8	44.4	45.6	47.6

由图4和表1可以看出,随着加热温度的升高,高压成型件壁厚的减薄率越来越大,最小减薄率发生在 60℃ 时,最小减薄率为 29.6%;最大减薄率发生在 160℃ 时,最大减薄率为 47.6%。在高压成型件的成型高度最高处,60℃ 下成型后的厚度为 0.151 mm,160℃ 下的厚度为 0.131 mm,由此可见,温度对高压成型件壁厚的影响较大。

通过对 6 种不同加热温度下高压成型件壁厚分布曲线进行对比分析,可以得到如下结论:

- (1) 温度越高,高压成型件的厚度越来越薄,因此,最大减薄率和最小减薄率都随之升高;
- (2) 材料在成型时受到来自各个方向上的拉应力,通过厚度分布可以得出最容易产生破裂的区域,在工业生产中,该区域是需要重点关注的位置;
- (3) 分析高压成型件壁厚最薄处的成型情况,发现该区域材料的成型高度最高,由于拉伸作用,沿拉伸方向流动,在材料一定的情况下,该区域的厚度也

就变得薄。

2.2 温度对回弹性的影响

高压成型后部分产品会出现起皱,这是由于材料的回弹造成的,因此在研究薄膜的起皱现象时,实际上是在研究材料的回弹现象。材料的回弹性是一个相对复杂的过程,受到各种因素的影响,例如模具的形状、材料的厚度以及性能、摩擦力等众多因素。在成型完成后,当压力被卸载,累积在薄膜材料中的弹性能都会释放出来,使得零件的尺寸发生变化。在高压成型时,薄膜会发生弯曲作用,根据弯曲性能原理^[15],一定会产生回弹现象,只是回弹的程度有高低。因此,如何预测回弹是控制高压成型件质量的关键环节。

在预测和控制回弹方面,常用的方法有解析法、数值模拟法以及实验法。在运用解析法时,首先通过理论分析研究材料成型的过程,然后依靠数学模型揭示回弹产生的机理,但解析法在应用时有很大的局限性,只能适用于简单的冲压成型,对于复杂的成型,数学模型难以建立,计算太庞大,对技术人员的要求过高,且不适用于生产实际。数值模拟法通过建立模型进行计算机仿真研究,本质上也是从理论上研究问题,加工的环境过于理想化,经常与生产实际不符合。而实验法与前者不同,实验法立足于生产实际,理论结合实践,通过在实验中获得不同的工艺参数对回弹的影响,分析实验数据来研究回弹的规律。综上所述,实验法是研究回弹基本规律的可靠手段。

不同加热温度下高压成型件壁厚的回弹性如图5所示。

由图5a可以看出,随着加热温度的升高,高压成型件壁厚的回弹量增大。当加热温度低于100℃时,回弹量的增长较为缓慢,当加热温度超过100℃后,回弹量的增长会骤然加快。60℃时的回弹量为0.7 mm,160℃时上升到6.3 mm,表明加热温度对高压成型件壁厚的回弹量有显著的影响。

回弹百分比按式(2)计算:

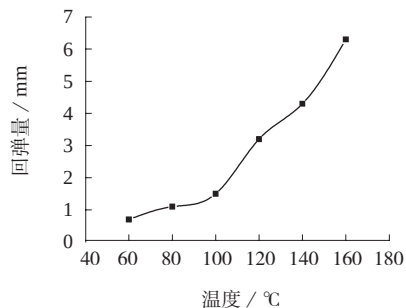
$$w = \frac{h}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: w ——回弹百分比;

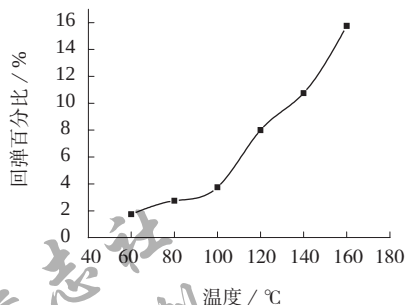
h ——回弹量;

h_0 ——高压成型件设计高度。

由图5b可以看出,高压成型件壁厚的回弹百分比与加热温度成正比,加热温度越高,回弹越严重。



(a)



(b)

a—回弹量; b—回弹百分比

图5 不同加热温度下高压成型件壁厚的回弹性

高压成型件壁厚回弹的本质是: 高压成型件成型后, 卸载高压空气, 在成型过程中储存的弹性变形能需要释放, 从而引起内应力的重新分布, 导致高压成型件的外形尺寸发生了相应的改变, 如图6所示。

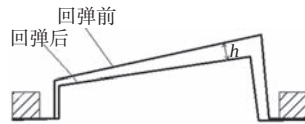


图6 高压成型件壁厚回弹示意图

随着高压成型过程中腔内的压力越来越大, 在成型高度越高的位置, 薄膜的减薄越严重, 该位置也是变形最大的位置。高聚物薄膜的成型方式是高压吹气成型, 现有的技术基本能保证厚度的均匀分布, 但在变形区域较大、成型高度较高的位置, 成型完成后残余的内应力越大, 当高压卸载完成后, 该区域的应力得到释放, 导致在变形较大的区域回弹越明显。但在凹模圆角及其周边的厚度减薄和变形程度则没有那么严重, 卸载后, 产生的回弹量较小。

3 结论

通过实验研究温度对高聚物薄膜成型件厚度分布和回弹的影响。设计了膜片加热装置, 使用自制超高压IMD/OMD气体成型一体机, 对6种不同加热温度下的高压成型进行实验, 得到如下结论:

(1) 在拉伸作用下, 材料需要不断沿拉伸方向补足, 并且材料是定量的, 因此在成型高度越高的位

置,厚度越薄,随着温度的升高,高压成型件的厚度变薄,在 160℃下具有最大减薄率,在 60℃时具有最小减薄率,通过分析厚度的分布情况,得到薄膜最易产生破裂的危险区域。

(2) 保压 4 s 后泄压,由于腔内持续高压,产生的内应力需要释放,因此成型件厚度出现回弹,在成型高度越高的位置,成型件厚度的变形量越大,产生的内应力越大,回弹量也越大,在凹模圆角及其周边厚度减薄较小,卸载后,回弹也较小。

参考文献

- [1] 卢剑. 基于薄膜外部成型工艺的模腔机构整体设计[J]. 塑料工业, 2017, 45(2):54-57.
Lu Jian. Design of cavity mechanism based on film external molding process[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(2):54-57.
- [2] 何丹辉. 薄膜表面装饰成型设备控制系统设计[J]. 塑料, 2017, 46(1):105-108.
He Danhui. Design of control system for film surface decoration forming equipment[J]. Plastics, 2017, 46(1):105-108.
- [3] 沈忠良, 郑子军, 欧长劲, 等. 基于双向拉伸的温度对高聚物薄膜热成型性能的影响研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(5):81-84, 88.
Shen Zhongliang, Zheng Zijun, Ou Changjin, et al. The effects of temperature on the properties of polymer film thermo-forming characteristics based on biaxial stretch[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(5):81-84, 88.
- [4] Nagarajan B, Castagne S, Wang Z, et al. Influence of plastic deformation in flexible pad laser shock forming-experimental and numerical analysis[J]. International Journal of Material Forming, 2017, 10(1):109-123.
- [5] Bonfanti A, Syngellakis S, Bhaskar A. Response and residual curvature of bent-stretched circular rods with applications to metal forming: Closed-form solutions for elastic-perfectly plastic and hyperbolic hardening materials[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 123:340-349.
- [6] 郭康丽, 张一辉, 张一铭, 等. 聚合物阻隔薄膜及其发展应用[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(1):128-133.
Guo Kangli, Zhang Yihui, Zhang Yiming, et al. Development and application of polymer barrier film[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(1):128-133.
- [7] 宋清华. IMD 膜成型后变形问题研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
Song Qinghua. Study on deformation of IMD film after forming[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [8] 徐生, 肖国华, 黄继军. 汽车空调触摸面板 IMR 成型组合模具设计[J]. 塑料科技, 2018, 46(1):90-96.
Xu Sheng, Xiao Guohua, Huang Jijun. Design of group mould for automobile air-conditioner control panel based on IMR moulding process[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(1):90-96.
- [9] Zecevic M, Knezevic M. Modeling of sheet metal forming based on implicit embedding of the elasto-plastic self-consistent formulation in shell elements: Application to cup drawing of AA6022-T4[J]. Jom, 2017, 69(5):922-929.
- [10] 苏占伟, 孟正华, 王辉, 等. 装饰薄膜对模内嵌膜产品力学性能的影响规律[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):51-56.
Su Zhanwei, Meng Zhenghua, Wang Hui, et al. Effect of decorative film on mechanical properties of in-mold film products[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):51-56.
- [11] Yoon J H, Hur N, Bae A H, et al. Coupled analysis of injection molding and film forming for identifying film deformation in IMD process[J]. Journal of Computational Fluids Engineering, 2013, 18(3):20-25.
- [12] Yoon J, Hur N, Bae A H, et al. A numerical analysis on the behaviors of polymer film and resin in an in-mold decoration process[C]// Conference proceedings of ASME 2013 fluids engineering division summer meeting. Incline Village, NV, USA: ASME Fluids Engineering Division. doi:10.1115/FEDSM2013-16399.
- [13] Lin Y H, Chen H L, Chen S C, et al. Effect of asymmetric cooling system on in-mold roller injection molded part warpage[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 61:111-117.
- [14] Phillips C O, Beynon D G, Hamblyn S M, et al. A study of the abrasion of squeegees used in screen printing and its effect on performance with application in printed electronics[J]. Coatings, 2014, 4(2):356-379.
- [15] Phillips C O, Bould D C, Claypole T C, et al. Finite element modelling of low temperature forming of polymer films with application in in-mould decoration[J]. Materials & Design, 2009, 30(3):537-550.
- [16] Kim G, Lee K, Kang S. Prediction of the film thickness distribution and pattern change during film insert thermoforming[J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(11):2 195-2 203.
- [17] Azdast T, Doniavi A, Ahmadi S R, et al. Numerical and experimental analysis of wall thickness variation of a hemispherical PMMA sheet in thermoforming process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1-4):113-122.
- [18] Chen S C, Huang S T, Lin M C, et al. Study on the thermoforming of PC films used for in-mold decoration[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(8):967-973.