

共注成型层厚分布影响因素分析

周国发, 柳和生, 何成宏, 魏常武
(南昌大学机电工程学院, 南昌 330029)

摘要:综合分析了聚合物熔体流动性能和过程参数对共注成型层厚分布的影响规律和影响机理,着重定性讨论了共注成型的多相分层流动的粘性包围(viscous escapulation)现象与界面不稳定性相互作用对层厚分布的影响,并提出基于三维粘弹性流动的机理模型是精确预测其相互作用机理的唯一途径。

关键词:共注成型; 层厚分布; 影响因素

概述

随着科学技术的发展,塑料制品将向高性能、高参数、多功能方向发展,而成型工艺将向清洁加工、绿色环保和低能耗方向发展,因此传统注塑工艺已难以适应这种新的发展趋势。共注成型技术作为适应这一潮流的新型注塑成型技术,近几年来在汽车、电子、包装、光学、机械、家具等行业的应用日趋广泛^[1~4]。

共注成型技术具有许多其它塑料成型技术无法比拟的特殊功能:(1)废旧塑料的回收利用是我国塑料工业目前重点优先鼓励和资助的研究领域之一,而共注成型技术可将废旧塑料做为芯层材料,将优质塑料做为壳层材料,不仅可降低产品成本,而且可在成型过程中解决废旧塑料回收利用问题,实现可持续发展;(2)工程上往往需要塑料制品具有高强度、耐热、耐腐和耐磨等优良的物理化学性能,或表面装饰美观和软接触的感观性能。而满足这些性能的工程树脂其材料价格高,如用传统的单相注塑成型技术,其产品价格昂贵,使其应用受到限制。而共注成型可将具有高表面性能的工程树脂作壳层材料,用普通聚合物材料作芯层,这样就可生产高表面性能的低成本注塑件,从而拓宽普通塑料的应用范围;(3)可综合利用共注成型的多层复合结构的各层特殊性能,实现塑料制品多功能特性,如生产具有电磁屏蔽功能的制品,以及同时具有隔光、隔氧、隔水蒸汽等多功能的保鲜食品容器^[5],还可用于复合自润滑高性能塑料齿轮的成型,壳层材料是填充尼龙,而芯层材料是玻璃-珠料-填充尼龙,芯层中的玻璃-珠料-填充尼龙材料收缩率极低,具有良好的尺寸稳定性,尼龙壳层赋予齿轮齿牙良好的润滑性能,并避免了珠料容易产生磨损问题。由此可见,共注成型技术是最有希望成为解决未来重大工程材料问题的聚合物成型方法之一。

共注成型技术的原理是同时或依次将多种不同的聚合物熔体注入模腔,并在模腔中,熔体以多相分层流动充模成型,最终固化成多层复合注塑件。先注入的熔体为壳层,而后者则为芯层。图1为依次共注成型工艺过程图。衡量共注成型产品质量的关键技术指标是壳层和芯层层厚分布及其均匀性(即层间界面形状)。均匀层厚分布是获得优质产品的前提,为此,开展共注成型层厚分布的影响规律和影响机理研究显得迫在眉捷。本文在多相分层流动理论和国外有关研究成果的基础

作者简介:周国发(1962年—),男,江西南昌,南昌大学环境化工学院副教授,在职博士,主要从事聚合物成型CAD/CAE研究。

上,综合系统地分析了影响共注成型层厚分布的诸因素及其影响机理。

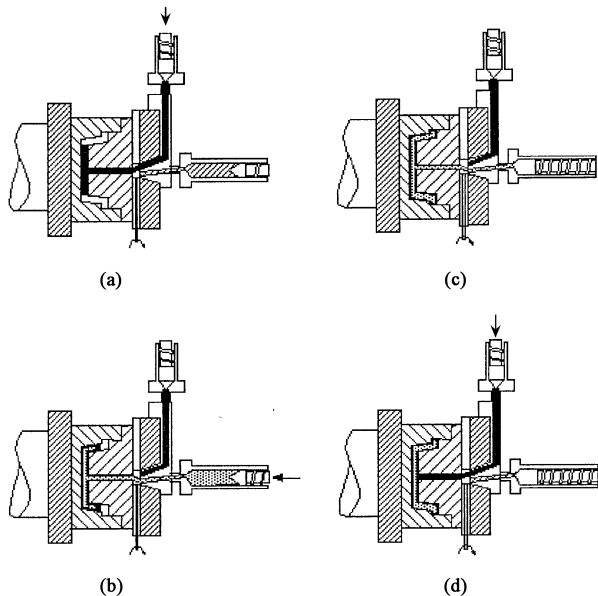


图 1 依次共注成型工艺过程图

1 影响因素及其影响机理分析

共注成型的充模成型过程属三维瞬态非等温多相分层流动,影响界面形状的因素诸多,其主要影响因素如图 2 所示,因这些因素对界面形状和层厚分布的影响机理极为复杂,国外有关研究非常有限,国内这方面研究报道非常罕见。下面主要从聚物流变性能和过程参数两方面,探讨共注成型层厚分布及其均匀性的影响因素和影响机理。

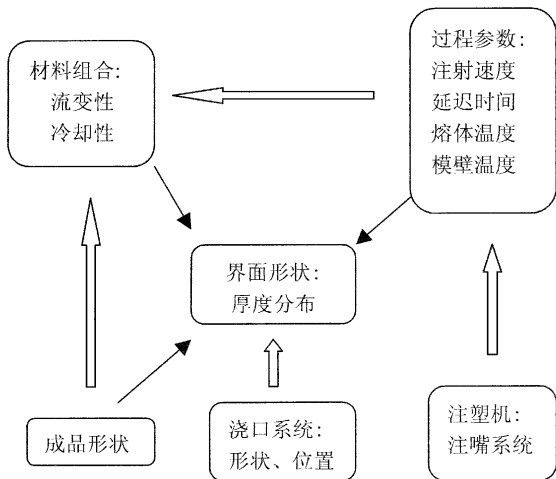


图 2 层状厚度分布影响因素

1.1 聚合物熔体流变性能的影响

1.1.1 聚合物熔体粘度的影响 共注成型充模流动过程属多相分层流动,其充模流动过程如图 3 所示。有关多相分层流动理论及试验研究表明:在多相分层流动中,将会产生一种粘性包围(viscous escapulation)现象^[6,7]。粘性包围现象是指低粘度聚合物熔体将包围高粘度聚合物熔体,这必然产生壳层和芯层的再分布,从而影响共注成型层厚分布及其均匀性。而产生粘性包围现象的主要原因之一是壳层和芯层熔体存在的粘度差。由此可见,壳层和芯层熔体的粘度差是影响共注成型层状分布的主要因素之一^[8~10]。图 4 为层厚分布与芯层和壳层熔体粘度比 R 的关系曲线,试验结果表明,随着粘度比 R 增加,芯层厚度增加,芯层熔体在壳层熔体内的穿入深度减小。芯层和壳层熔体粘度比主要影响芯层熔体穿入深度、前沿界面形貌、层厚分布和界面稳定性。下面分析其影响机理。

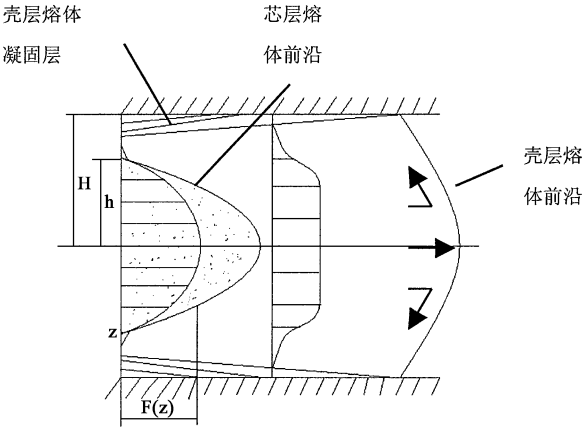


图 3 共注成型多相分层流动充模过程简图

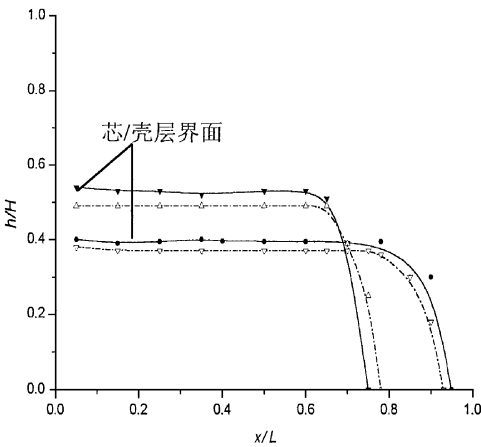


图 4 层状厚度分布与芯层和壳层熔体粘度比 R 关系曲线

试验值: ▼HDPE/PS, $R=25.24$; ●LDPE/PS, $R=1.30$
数值计算值: △HDPE/PS, $R=25.24$; ▽LDPE/PS, $R=1.30$
 h/H —相对厚度; x/L —相对深度

从聚合物加工流变学观点分析,芯层和壳层熔体粘度比 R 对芯层的穿入深度影响机理是:(1) 由于壳层熔体粘度远小于芯层熔体粘度,因而壳层熔体对芯层熔体前沿推进的变形阻力就小,芯层熔体前沿就可推动较多的壳层熔体,从而使壳层厚度减小而芯层厚度增加;(2) 由于芯层熔体前沿具有较多的壳层熔体,加上芯层前沿推进速度相对壳层前沿的推进速度要慢,因此芯层熔体在壳层熔体内的穿入深度就小。

Weltgen^[11]的实验结果表明,芯层熔体前沿界面形状明显受芯层和壳层熔体粘度比 R 影响,芯层和壳层熔体粘度比 R 增加时,芯层熔体前沿界面形状变尖凸(即前沿曲面曲率半径减小),而当芯层和壳层熔体粘度比 R 减小时,芯层熔体前沿界面形状趋于变平坦,其芯层熔体前沿界面形状与熔体粘度比 R 的关系可近似由 $F(z) = L[1 - (z/h)^{\exp}]$ 关系式确定(如图 3),指数 $\exp$ 与芯层和壳层熔体粘度比 R 成反比,随着芯层和壳层熔体粘度比 R 增大,指数 $\exp$ 减小,则芯层熔体前沿界面形状趋于变尖凸。在传统注塑中,一般高粘度熔体将以块形平坦前沿界面推进熔体前沿。然而在共注成形中,当芯层熔体粘度远高于壳层熔体时,芯层熔体将以尖凸的曲面前沿推进芯层熔体前沿,从聚合物加工流变学观点看,产生这一现象的机理可能有三方面因素,第一是由于粘差较大,原本以块状平坦前沿流动的二角受到来自于壳层熔体较大机械应力及摩擦的作用,由此产生的变形使平坦的芯层熔体前沿的二角变钝而使前沿界面变尖凸;第二,由于在流动方向,芯层熔体与壳层熔体流速不同,由此对流动中间层的芯层熔体产生牵引作用,这会在芯层熔体前沿产生拉伸作用,从而加剧芯层熔体前沿变尖凸;第三,由于壳层熔体粘度远小于芯层熔体粘度,因而壳层熔体对芯层熔体前沿推进的变形阻力就小,芯层前沿容易以尖凸前沿曲面穿入壳层熔体。

此外较低的芯层和壳层熔体粘度比 $R(R < 1)$ 还会使多相分层流趋于不稳定,这会导致层厚分布不均匀^[12]。当粘度比 R 太高时,壳层熔体层厚也会产生不均匀性问题。当粘度比 R 太小时,芯层熔体前沿易突破壳层熔体前沿而产生注破现象。由此可见,芯层和壳层熔体粘度比 R 存在一个最佳范围,获得合格共注件的最佳芯层和壳层熔体粘度比 R 范围为 $0.82 \sim 1.83$ ^[9,12]。

1.1.2 聚合物熔体粘弹性的影响 以前,材料性能对共注成形层状分布影响的研究主要集中在粘性差的影响,而忽视了粘弹性影响的研究。最近研究发现在共注成型中^[13~17],有可能存在二次流动现象,二次流动是一种与熔体推进方向垂直的熔体流动。共注成型的二次流动必然会引起层厚的再分布,从而影响共注成型的层厚分布。二次流动主要是由法向应力不平衡引起,显然这与熔体的粘弹性有较大关系。粘弹性流体的法向应力差引起的界面不稳定又与粘性包围现象相互作用,必将加剧共注成型的壳层/芯层界面不稳定,造成三维不规则波形界面,从而导致层厚分布不均。由此可见,聚合物熔体的粘弹性对共注成型的层厚分布有较大影响。界面的法向应力的不平衡直接与界面波的发生和衰减速度有关,Renardy^[18]提出的多相分层流动的界面应力平衡表达式为:

$$\left[1 - \left(\frac{dy_i}{dx}\right)^2\right] [(\tau_{12})_1 - (\tau_{12})_2]_{y_i} - \frac{dy_i}{dx} [(\tau_{11} - \tau_{22})_1 - (\tau_{11} - \tau_{22})_2]_{y_i} = 0 \quad (1)$$

其中, y_i 为界面的纵坐标,而 $\frac{dy_i}{dx}$ 为所研究点的界面斜率。对于平界面, $\frac{dy_i}{dx}$ 为零,则上式简化为:

$$[(\tau_{12})_1 - (\tau_{12})_2]_{y_i} = 0 \quad (2)$$

又由式(1)可知,由于粘性包围现象及三维粘弹性流动,必然使界面沿 x 方向波动,则生成的界面波会导致界面的剪应力和法向应力不平衡的趋势增加。根据流体运动稳定性理论可知,共注成型的界面不稳定性又正比于第一和第二法向应力差,由此可见,研究熔体弹性对共注成型层厚分布的影响是非常重要的,弹性影响与粘性影响同等重要。以上仅定性分析了熔体粘弹性对共注成型层

厚分布的影响机理,定量预测粘弹性对共注成型层厚分布的影响仍是一个急待解决的棘手工程问题,因为这涉及粘弹性流体的法向应力差引起的界面不稳定与粘性包围现象相互作用,这属三维非线性粘弹性流动及其运动稳定性问题。粘弹性对共注成型的影响机理尚未完全弄清。

综上所述,粘性包围现象显然与法向应力差引起的二次流动有关,而层间界面的不稳定也与法向应力差成正比。实验研究表明法向应力差与熔体的粘性和弹性均有密切关系。相同材料不同着色的 LDPE 熔体以不同流速挤入矩形流道,形成分层流动,其法向应力差变化趋势如图 5 所示,可见熔体粘度和弹性对法向应力差均有较大影响,由此可见,准确预测界面形状的前提是建立共注成型过程的三维粘弹性模型,以真实反映粘性包围现象和层间界面的不稳定现象的影响。而目前通用的纯粘性 Hele-Shaw 模型过于简化,缺乏可靠的理论依据。

1.2 过程参数的影响

1.2.1 熔体注射速度的影响 熔体注射速度是影响共注成型层厚分布的重要参数。实验结果表明^[3,9,10],随着注射速度提高,芯层厚度增加而壳层厚度减薄。产生这一结果可能有以下几个因素:(a 随着注射速度提高,模壁附近壳层熔体的剪切变形速率增大,而熔体粘度一般随剪切变形速率增加而减小,这会减低壳层熔体粘度,从而导致芯层和壳层熔体粘度比 R 增大,因而芯层厚度增加;(b 注塑速度减小会导致在充模流动中壳层熔体固化层厚度增大,因而增加壳层熔体消耗量,这会使壳层增厚而芯层变薄,相反,增加注射速度,芯层厚度增加而壳层厚度减薄;(c 高的注射速度将产生较大粘性耗散热,从而导致模壁附近及高粘性熔体的温度提高明显。如果低粘度熔体为壳层,则壳层熔体变得比芯层熔体温度高,这会增加芯层和壳层熔体粘度比 R 。反之,当高粘度熔体为壳层,较大的粘性耗散热将使粘度差减小。注射速度的影响大于粘度差和注塑温度的影响。这主要是壳层熔体与芯层熔体具有不同的剪切性能。

1.2.2 注塑温度的影响 注塑温度对共注成型的层厚分布的影响主要体现在粘度上,因为熔体的粘度是温度的函数。温度对熔体粘度的影响程度因聚合物品种不同而变化,如图 6 所示。由图可知,温度增加会导致 PS 熔体粘度减小较大,而对 LDPE 熔体的影响程度相对较小。如以 PS 作芯层而以 LDPE 为壳层,则随熔体温度增加,芯层和壳层熔体粘度比 R 趋于变小,由图 4 可知,芯层厚度将变小。

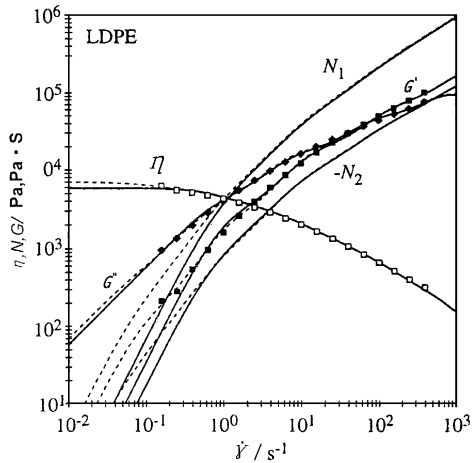


图 5 法线应力变化曲线图^[13]

η —剪切粘度($\square$), $Pa \cdot s$; N_1, N_2 —第一,第二法向应力差, pa ; G' —储能模量($\blacksquare$), Pa ; G'' —损耗模量($\blacklozenge$), Pa ; $\dot{\gamma}$ —剪切速率, s^{-1}

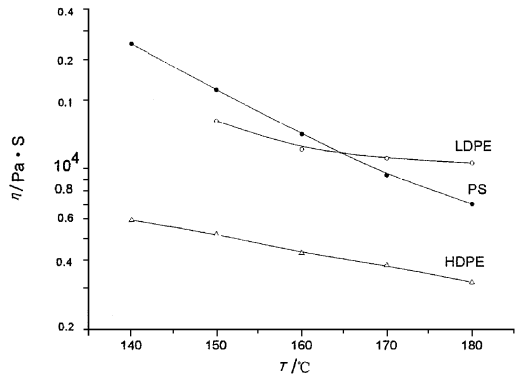


图 6 粘度与注塑温度关系

1.2.3 同时共注成型工艺的延迟时间的影响 同时共注成型工艺的延迟时间是指壳层熔体开始注塑时间与芯层熔体开始注塑时间的时间间隔。在同时共注成型中,同时共注成型工艺的延迟时间是影响层厚分布的主要因素之一,同时共注成型工艺的延迟时间主要取决于壳层与芯层前沿的相对推进速度以及芯层穿透深度。如果芯层熔体粘度远高于壳层熔体粘度,则芯层前沿推进速度相对壳层前沿的推进速度要慢,而且芯层熔体在壳层熔体内的穿透深度小,因而同时共注成型工艺的延迟时间应适当缩短。反之,如果芯层熔体粘度远低于壳层熔体粘度,则芯层前沿推进速度相对壳层前沿的推进速度要快,而且芯层前沿穿透深度大,因而同时共注成

型工艺的延迟时间应适当延长。如果太短,则芯层熔体前沿由于推进速度迅速而赶上或超过壳层前沿,这会导致注破现象。图 7 是同时共注成型工艺的延迟时间与界面形状和位置的关系曲线。由图可知,同时共注成型工艺的延迟时间太长,会使芯层穿入壳层熔体深度太小(如图中的曲线 3),造成层厚分布不匀。反之,同时共注成型工艺的延迟时间太短,则会产生注破现象(如图中的曲线 1)。由此可见,可以通过控制同时共注成型工艺的延迟时间,人为调节芯层与壳层的层厚分布。

2 共注成型理论研究存在的问题及解决思路

2.1 共注成型机理模型问题研究

共注成型过程模拟目前国外均采用单一的纯粘形非稳态 Hele-Shaw 二维近似模型,该模型并没有考虑粘性包围和界面不稳定等关键因素的影响^[19~30]。这种近似简化缺乏可靠的科学依据,导致理论模型的模拟结果难以与实际结果相符,因而远远满足不了用来指导共注成型工艺及模具设计的要求。目前这方面在很大程度上还依赖于经验,显现出一种技艺多于科学的状况。共注成型过程的影响因素较多,其粘性包围、界面不稳定和芯壳层熔体流变性能显著差异等因素的共同影响使得共注成型过程极为复杂。而这些因素对共注成型的层厚分布影响较大,从而直接影响最终产品的质量。因此要研究共注成型机理必须建立含彼此相互作用的多因素的复杂模型。而这又带来其数值模拟困难,为此必须研究新型有效的数值模拟技术。因此,深入研究共注成型的含彼此相互作用的多因素的机理模型及数值模拟技术,就显得迫在眉睫。

2.2 共注成型的稳定操作条件的问题研究

共注成型技术的主要质量指标之一是壳层和芯层的层厚分布,均匀的层厚分布是产生合格产品的前提。生产实践表明共注成型芯层与壳层层间界面易于产生界面不稳定,这对其产量和质量均有较大影响。因此,确定共注成型过程的稳定性操作的工艺条件是至关重要的环节。而目前确定这一条件的手段是通过长时间的反复试验来确定,这不仅耗费可观的人力物力,还未必达到理想效果,这必然以牺牲共注成型的生产效率为代价。建立共注成型过程的稳定性工艺条件的前提是弄清粘性包围和界面不稳定相互作用对层间界面形状的影响机理,并以此来预测界面高不稳定区,

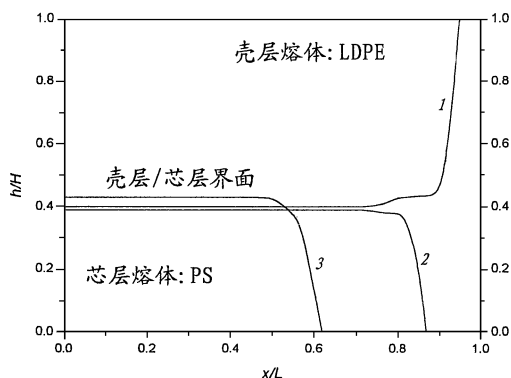


图 7 同时共注成型工艺的延迟时间对界面形貌影响^[9]

1. $T_{ist} = 0.417s$ (20% 壳层熔体)

2. $T_{ist} = 0.833s$ (40% 壳层熔体)

3. $T_{ist} = 1.111s$ (60% 壳层熔体)

通过流动控制,消除高不稳定区,提高多相分层流动的稳性,从而提高共注成型稳定操作的工艺参数范围,以实现高速稳定的共注成型的生产。因此,展开共注成型技术的稳定性操作的工艺条件研究具有十分重要的理论价值和应用价值。

2.3 共注成型过程全三维数值模拟问题研究

目前共注成型过程数值模拟主要使用 Hele-Shaw 模型在流动平面(xy)用 FEM 离散,而用有限差分法计算第三自由度(Z 方向)的温度。这属于二维半数值模拟。对于复杂三维注塑件、粘性包围和界面不稳定等问题,则难以通过二维数值模拟来预测。对于这些问题,必须对共注成型进行全三维数值模拟。共注成型过程全三维数值模拟是未来的发展趋势。由于计算机储存能力、CPU 时间以及数值发散等问题限制,使得对共注成型过程这种高度非线性问题进行全三维数值模拟仍难以实现。共注成型过程全三维数值模拟技术关键是:(1)针对共注成型过程这种高度非线性问题,研究一种快速收敛的数值模拟技术;(2)研究一种适用共注成型全三维数值模拟的纯有限元隐式前沿追踪技术。为此,应开展共注成型过程全三维数值模拟问题的研究。

2.4 解决思路

共注成型的理论研究必须重点解决以下问题:(1)预测模具内层状厚度分布;(2)预测内部界面层的稳定性;(3)预测成型过程中的粘性包围现象;(4)建立确定模具设计、操作条件、材料性能的准则。而要实现这一目标必须基于三维粘弹性流动及流体动力稳定性,建立包含粘性包围现象和界面不稳定性相互作用等彼此相互作用的多因素的复杂模型,并针对这一复杂模型,研究一种快速收敛的新型有效的数值模拟技术。

3 结论

分析结果表明,材料性能和过程参数是影响共注成型层厚分布的主要因素,而注塑速度和注塑温度主要是通过改变芯层和壳层熔体的粘性差来影响层厚分布。共注成型的多相分层流动的界面形貌与粘性包围现象和界面不稳定性相互作用有密切联系,粘性包围现象和界面不稳定性相互作用将使界面形貌变为三维波动曲面的趋势增强。因此,基于三维粘弹性流动的机理模型是精确描述和模拟共注成型充模成型过程的唯一途径。试验结果表明,随着芯层和壳层熔体粘度比 R 增大,芯层厚度增加,而芯层熔体在壳层熔体的穿入深度减小。依据这一影响规律,可通过合理选择聚合物材料和调节过程参数来人为控制壳层与芯层的结构。

参考文献:

- [1] Eckardt H. Symposium on New Technologies in Injection Moulding. Taipei, Bangkok, November 1990, 35.
- [2] Eckardt H. Gmbh B. J of Plastic, 1987, 23(December); 555.
- [3] Kuhmann K. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1998, 372.
- [4] Tung T T, Kudert F G. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1990, 760.
- [5] Takekuni S. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1995, 520.
- [6] James L W, Lee B L. Polymer Engineering and Science, 1975, 15(NO. 7); 481.
- [7] Kuhmann K, Ehrenstein G W. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1995, 372.
- [8] Selden R. Polymer Engineering and Science, 2000, 40(5); 1165.
- [9] Lee D J, Isayev A I, White J L. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1998, 346.
- [10] Schlatter G, Agassant J F, Davidoff A, et al. Polymer Engineering and Science, 1999, 39(NO. 1); 78.
- [11] Welton M. Investigation into the Material Specific Influential Factors on the Form-Filling Process during Co-injection Moulding. IKV. Tutor.

- A. Lanvers, 1991, 6.
- [12] Somnuk P, Smith G F. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1995, 760.
- [13] Benoit D, Joseph D. J Rheol, 1999, 43(6): 1525.
- [14] Matsunaga K, Kajiwaru T, Funatsu K. Polymer Engineering and Science, 1998, 38(7): 1101.
- [15] Mitsoulis E, Barakos G. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1995, 217.
- [16] Laura D, Joseph D. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1995, 189.
- [17] Joseph D. Polymer Engineering and Science, 1998, 38(7): 1060.
- [18] Renardy Y. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1988, 28: 99.
- [19] Schlatter G. ANTEC SPE. The Plastic Institute, 1995: 457.
- [20] Yuriko Y R, Michael R. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1999, 81: 215.
- [21] Schlatter G, et al. Numerical simulation of sandwich injection moulding process. European Regional Meeting of the Polymer Processing Society, France; Strasbourg, 1994, 180.
- [22] Turng L S, Wang V W, Wang K K. J of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1993, 115(1): 48.
- [23] Chen S C, Hsu K F. Numerical Heat Transfer. Part A, 1995, 128: 503.
- [24] Selden R. J of Injection Molding Technology, 1997(DEC): 52.
- [25] Emanuele F G, Suresh G A, John, et al. Polymer Composites, 1998 (DEC): 122.
- [26] Turng L S, Wang V W. Heat and Mass Transfer in Solidification Processing, ASME HTD-vol. 175, 1991, 76.
- [27] Himasekhar. Advance in Polymer Technology, 1993, 12(3): 233.
- [28] Chen S C, Chen N T, Hsu K F. AICHE Journal, 1996, 42(6): 1706.
- [29] Hieber C A, Shen S F. Isreal J Technology, 1978, 16: 248.
- [30] Hieber C A, Shen S F. J non-Newtonian Fluid Mech, 1980, 7: 1.

Analysis on the Factors Affecting the Layer Thickness Distribution in Co-injection Molding

ZHOU Guo-fa, LIU He-sheng, HE Cheng-hong, WEI Chang-wu

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: This paper is committed to analyze the effects of the material parameters and molding process parameters of co-injection on the layer thickness distribution. The emphasis is placed on the effect of the interaction between viscous encapsulation and interfacial instability on the layer thickness distribution. It is proposed that a three-dimensional viscoelastic model is the only way of predicting such an interaction precisely.

Key words: Co-injection molding; Layer thickness distribution; Influential element; Interfacial instability