

气辅共挤成型界面不稳定的数值模拟研究^{*}

蔡奎 周国发 钟序光 胡晨章 张效迅

(南昌大学环境科学与工程学院, 南昌 330029)

摘要 提出全新的气辅共挤成型工艺, 基于气辅共挤成型特点建立了理论模型, 通过数值模拟系统研究聚合物流变性能和工艺参数对气辅共挤成型界面不稳定性的影响规律, 揭示其影响机理。研究表明, 随着高粘层熔体与低粘层熔体粘度比的增大, 或温度比和速度比的减小, 界面不稳定性均会加剧, 气辅共挤成型粘度比比传统共挤成型可调节范围宽。

关键词 气辅共挤成型 传统共挤成型 数值模拟 界面不稳定

1 概述

目前塑料制品的应用越来越广泛, 其成型工艺也正向清洁、绿色环保和低能耗的环境友好方向发展。为了满足这一要求, 气辅注射成型、共注成型、共挤成型等聚合物多组分成型技术得到了极大的发展。特别是共挤成型, 由于能使产品具有特殊性能, 并能大幅度地降低生产成本, 因此获得了广泛的应用。

众所周知, 共挤成型就是将来自多台挤出机、已塑化好的不同品种塑料熔体送入一个“共用”挤出机头中, 经挤出定型获得多层复合材料制品的一类加工方法。而气辅挤出成型技术是英国的 R. F. Linag 等^[1]于 2001 年首次研发成功的。该技术的创新之处在于通过气体辅助挤出控制系统和气体辅助挤出模, 在挤出过程中, 使聚合物熔体和口模之间形成气垫膜层, 从而使现有的非滑移粘着剪切口模挤出方式转化为气垫完全滑移非粘着剪切口模挤出方式, 是一种有效的口模减粘降阻的先进技术手段, 也是一种极具发展潜力的聚合物成型技术。采用这种全新的口模挤出方式, 在特定的工艺条件下, 不仅可使口模压降减少 40% 左右, 而且可使挤出产品的内应力和翘曲变形大为降低, 离模膨胀基本消除^[2]。

鉴于气辅挤出成型技术的众多优点, 特别是其有效的减粘降阻性, 笔者将其应用于传统共挤成型技术, 即在共挤成型过程中, 使聚合物熔体和口模之间形成气垫膜层, 从而使传统的非滑移粘着剪切口模共挤出方式转化为气垫完全滑移非粘着剪切口模共挤出方式, 从而产生一种全新的同时具有气辅挤出成型与共挤成型优点的成型工艺——气辅共挤成型。由于气辅共挤成型将气辅挤出成型与传统的共挤成型融为一体, 所以它的挤出口模和气辅挤出口

模相似, 不同的是它将气辅装置和共挤出设备有机地结合起来。气辅共挤成型系统主要由气辅共挤出控制系统、传统的挤出机(多台)和气辅共挤出口模三部分组成, 气辅共挤成型流程如图 1 所示, 气辅共挤口模如图 2 所示。

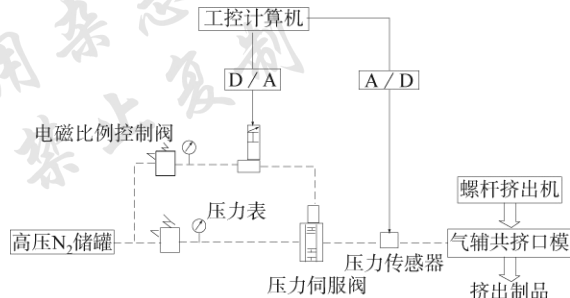


图 1 气辅共挤成型流程图

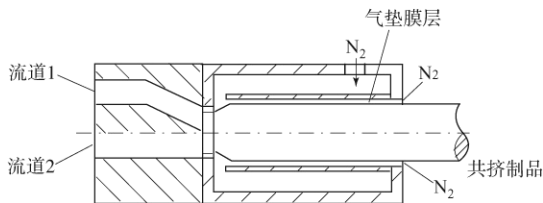


图 2 气辅共挤口模

由于聚合物具有不同的流变性能, 因此会导致多组分共挤成型过程中产生许多缺陷^[3], 而这其中由于界面不稳定引起的层厚不均是影响制品性能最普遍存在的问题。所谓界面不稳定是指在共挤出成型过程中, 各层熔体间由于流变性能、工艺参数等的不匹配而在相邻层熔体交界处产生类似河水波动面一样的三维波动现象。对于消除共挤成型分层界面的不稳定现象, 工程中除在选材时避免选择流变性差异较大的材料外, 尚无更好解决办法。因此对共挤成型相邻层熔体界面不稳定问题的研究具有重要

^{*} 国家自然科学基金项目 (20274016)

收稿日期: 2005-01-08

理论价值和应用价值。

笔者在对气辅共挤成型进行数值模拟研究中发现,气辅共挤成型也存在着与传统共挤成型相似的界面不稳定现象,并着重研究了聚物流变性能和工艺参数等对气辅共挤成型界面不稳定性的影响规律,以便能为气辅共挤成型在工程实际中的应用提供理论上的指导。

2 气辅共挤成型的数值模拟

2.1 理论模型

理论模型是针对气辅共挤成型充模流动过程的特点,基于聚物流变学理论和流体力学基本方程提出来的。

(1) 控制方程

聚合物的成型加工过程都遵循三大守恒定理,即质量守恒、动量守恒和能量守恒定理。在流体不可压缩的条件下,得到在欧拉坐标下的聚合物熔体流动成型控制方程^[4-7]:

连续性方程 $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ (1)

动量方程 $0 = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$ (2)

能量方程 $\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = K \nabla^2 T + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} : \mathbf{v}$ (3)

式中: ∇ 是哈密尔顿算子; $\mathbf{v}$ 是速度矢量, p 是压力, $\boldsymbol{\tau}$ 是偏应力张量, ρ 是熔体密度, C_p 是比热容, T 是温度标量、 K 是热导率。

(2) 本构方程^[6,7]

本构模型和粘度模型分别采用式(4)、(5)表示:

$\boldsymbol{\tau} = \eta(\dot{\gamma}, T) \dot{\gamma}$ (4)

$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} e^{T_0/T}$ (5)

式中: η 、 $\dot{\gamma}$ 、 k 、 n 、 T_0 分别为表观粘度、剪切速率、流体稠度、流动指数、参考温度。

(3) 边界条件

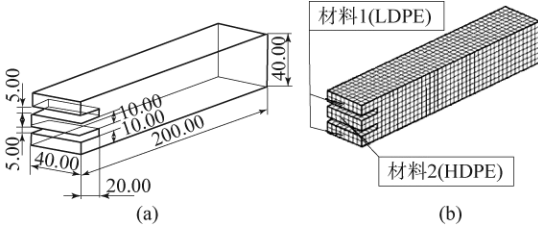
气垫膜层的作用可视为完全滑移非粘着的边界条件,即在口模模壁处:

$\boldsymbol{\tau} = 0$ (6)

假定在熔体分层界面处各层熔体间的速度、剪切应力和热流量是连续的。

2.2 数值模拟

采用的模型为长方体三层挤出口模。其中,挤出口模上下两层(即外层)为低粘层,其入口材料1为低密度聚乙烯(LDPE);中间层(即内层)为高粘层,其入口材料2为高密度聚乙烯(HDPE)。挤出口模的实体模型和有限元模型如图3所示,数值模拟的主要模拟条件如表1所示。



a—实体模型; b—有限元模型
图3 挤出口模的实体模型和有限元模型

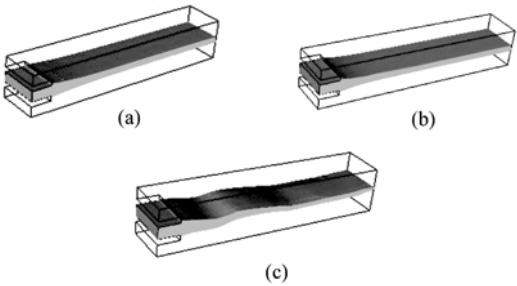
表1 主要模拟条件

选用材料	材料 1 (LDPE)	材料 2 (HDPE)
密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	735.37	743.81
比热容 / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	3400	3420
热导率 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.31	0.353
参考温度 / $^{\circ}\text{C}$	180	180
固化温度 / $^{\circ}\text{C}$	80	100
熔化温度 / $^{\circ}\text{C}$	180	180
流动指数	0.8268	0.8476
流体稠度	99.689	493.406
挤出速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3	1

3 界面不稳定的影响因素

3.1 熔体粘度比的影响

在共挤成型过程中,聚合物熔体的粘度比对界面不稳定性有着至关重要的影响^[8]。采用表1中的数据进行气辅共挤成型的数值模拟,数值模拟结果如图4a所示,其高粘层与低粘层的粘度比为5.714(剪切速率取 1000 s^{-1} ,下同)。由图4a可以看出,由于此时的粘度比并不算大,即内外层的粘性差异并不大,所以界面呈稳定状态。



a— $\eta_{\text{高粘层}} / \eta_{\text{低粘层}} = 5.714$; b— $\eta_{\text{高粘层}} / \eta_{\text{低粘层}} = 23.09$;
c— $\eta_{\text{高粘层}} / \eta_{\text{低粘层}} = 69.27$

图4 气辅共挤时不同粘度比下的界面形貌图

为了进一步研究粘度比对气辅共挤成型界面不稳定的影响规律,笔者通过改变模型中的流体稠度或流动指数来人为调节两种熔体的粘度比,进而系统地研究粘性差异对界面不稳定的影响规律。现保持低粘层LDPE的材料参数不变,通过增加高粘层熔体HDPE的流体稠度来增加高粘层与低粘层粘度比。数值模拟结果如图4b、图4c所示,其中图4c为消除层厚比的偶合影响,模拟过程已作相应调整。

模拟结果表明,随着高粘层与低粘层粘度比的增加,界面不稳定性呈增加趋势,而在粘度比为 69.27 时,界面已呈不稳定状态。由此可见,气辅共挤成型时粘度比对界面的影响趋势与传统共挤成型相似,即粘度比增加,界面不稳定性加剧^[9],但不稳定程度明显小于传统共挤成型。

国外的研究^[10]已经证实,产生界面不稳定的根本原因是由于界面处存在法向应力差。而试验结果也表明两种法向应力差与剪切速率有着密切的关系,即法向应力差随剪切速率的增加而迅速增加,其关系如式(7)、(8)^[11]所示:

$$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22} = \phi_1 \dot{\gamma}^2 \quad (7)$$

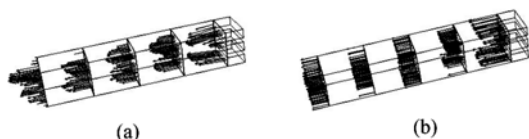
$$N_2 = \sigma_{11} - \sigma_{33} = \phi_2 \dot{\gamma}^2 \quad (8)$$

式中: N_1 、 N_2 分别为第一法向应力差、第二法向应力差, σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 为法向应力, ϕ_1 、 ϕ_2 分别为第一法向应力差系数、第二法向应力差系数, $\dot{\gamma}_1$ 、 $\dot{\gamma}_2$ 为两种熔体的剪切速率。

另外,根据聚物流变学理论可知,随着两种聚合物熔体粘度差异的增大,共挤横截面上两种熔体的剪切速率均会显著升高,从而使第一法向应力差和第二法向应力差均增大,引起界面不稳定性增加。因此,不论是传统共挤成型还是气辅共挤成型,只要高粘层与低粘层的粘度比增加,其界面不稳定性就会加剧。但是,对于气辅共挤成型而言,由于熔体与口模之间有气垫膜层,其边界处的阻力几乎可忽略,从而使其剪切速率的变化率也大大降低了。图 5 为粘度比为 23.09 时传统共挤成型与气辅共挤成型沿流动方向的速度矢量图。由图 5 可知,传统共挤成型的速度沿横截面呈抛物线分布,而气辅共挤成型的速度却趋于均匀分布,所以传统共挤成型两熔体的剪切速率明显比气辅共挤成型时要大,第一法向应力差和第二法向应力差与气辅共挤成型相比也更大,这正是气辅共挤成型界面不稳定程度明显小于传统共挤成型的主要原因。图 6 为粘度比 23.09 时传统共挤成型的界面形貌图。对比图 4 可知,当粘度比为 23.09 时,传统共挤成型界面呈不稳定状态,气辅共挤成型界面却为稳定状态;当粘度比增至 69.27 时气辅共挤成型界面才为不稳定状态,而且其不稳定的程度也明显小于粘度比 23.09 时的传统共挤成型界面。由此可见,气辅共挤成型界面稳定的粘度比范围较传统共挤成型更宽。

3.2 速度比的影响

共挤成型过程中,熔体的挤出速度是成型的重



a—传统共挤成型; b—气辅共挤成型

图 5 粘度比为 23.09 时沿流动方向的速度矢量图

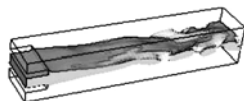
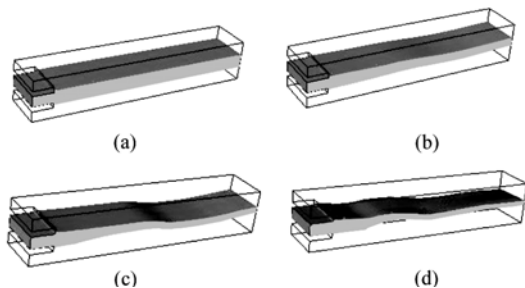


图 6 粘度比为 23.09 时传统共挤成型界面形貌图

要工艺参数之一,它直接影响着共挤成型各层熔体的层厚分布即层厚比,而熔体的层厚比又是影响界面稳定性的重要因素之一。以高粘层与低粘层粘度比 69.27 为基础,固定高粘层熔体的速度,逐渐增大低粘层熔体的速度,从而不断调节高粘层与低粘层熔体的挤出速度比来模拟其影响规律,模拟结果如图 7 所示。从图 7 可看出,高粘层与低粘层速度比对界面的不稳定性及层厚比均具有较明显的影响。 $v_{\text{高粘层}}/v_{\text{低粘层}} = 1:1$ 时,高粘层与低粘层厚度比和稳定性均达到相当理想的状态。随着高粘层与低粘层速度比的减小,高粘度的中间层厚度显著减小,且界面不稳定的趋势增加。由此可见,速度比对熔体的层厚比和界面不稳定性均有较大影响。



a— $v_{\text{高粘层}}/v_{\text{低粘层}} = 1:1$; b— $v_{\text{高粘层}}/v_{\text{低粘层}} = 1:2$;
c— $v_{\text{高粘层}}/v_{\text{低粘层}} = 1:3$; d— $v_{\text{高粘层}}/v_{\text{低粘层}} = 1:4$

图 7 气辅共挤成型速度比对界面形貌的影响

对气辅共挤成型而言,从流变学角度分析,高粘层与低粘层的速度比对界面不稳定性的影响机理主要为:

(1) 随着低粘层熔体挤出速度的增大,其剪切速率必然变大,而对于剪切变稀的熔体来说,其粘度的变化与剪切速率的变化呈反比,因此,低粘层熔体的粘度就变小,从而导致了高粘层与低粘层粘度比的增加,最终使界面的不稳定性加剧。

(2) 高的挤出速度将产生较大的粘性耗散热,从而导致模壁附近及低粘度熔体的温度明显提高。

本模拟中外层是低粘层,随着流动速度的提高,外层的温度升高,熔体变稀,粘度减小,从而也导致了高粘层熔体与低粘层熔体的粘度比增加,加剧了界面的不稳定程度。

3.3 温度比的影响

温度是影响聚合物熔体流变性能的主要参数,因而温度也是影响气辅共挤成型界面不稳定性的主要过程参数之一。以高粘层与低粘层粘度比 69.27 为基础,保持高粘层温度为 180℃ 不变,低粘层分别取 180、200℃ 和 220℃ 进行数值模拟,模拟结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着高粘层与低粘层温度比的减小,界面不稳定趋势增加,但内层厚度的变化并不明显。

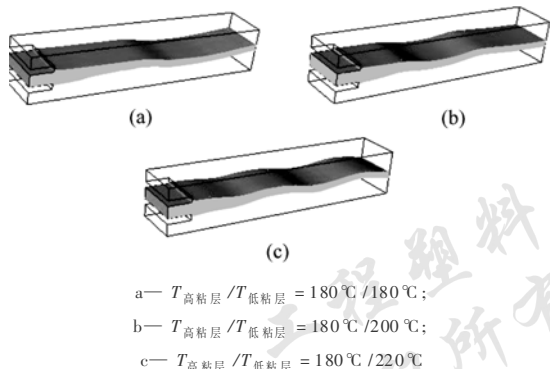


图 8 气辅共挤成型温度比对界面形貌的影响

由前面的分析已经知道,内外层熔体粘度差异较大是导致界面不稳定的主要因素,所以温度比对界面不稳定性的影响机理可以认为正是由于温度引起的粘度差异所致,因为粘度是温度的函数。在固定高粘层温度的条件下,随着低粘层温度的升高,低粘层粘度必然降低,从而使高粘层与低粘层的粘度比增大,最终导致界面的不稳定性加剧,因此,增加低粘层温度,界面不稳定性将会加剧。

4 结论

(1) 提出全新的气辅共挤成型工艺,基于气辅

共挤成型的特点建立了理论模型,并对其成型过程进行了数值模拟研究。

(2) 粘度比对界面的不稳定性有着重要影响。随着高粘层与低粘层粘度比的增加,气辅共挤成型的界面不稳定性加剧,但比传统共挤成型的粘度比可调范围宽。

(3) 速度比对熔体层厚比和界面不稳定性均有较大影响。随着高粘层与低粘层速度比的减小,高粘度中间层厚度显著减小,且界面不稳定的趋势增加。

(4) 固定高粘层温度的条件下,增加低粘层温度,界面不稳定性将会加剧。

参考文献

- 1 Linag R F, Mackley M R. The gas-assisted extrusion of molten polyethylene. *Journal of Rheology*, 2001, 45(1):211
- 2 鄢超,柳和生,黄兴元,等.聚合物气体辅助挤出成型. *中国塑料*, 2003, 17(11):15
- 3 朱文利,周南桥.共挤复合成型的界面不稳定性. *中国塑料*, 2002, 16(7):53
- 4 申长雨.塑料模具计算机辅助工程.郑州:河南科学技术出版社,1997.
- 5 周国发.聚合物多相分层流动成型理论及其数值模拟研究.[博士学位论文].南昌:南昌大学,2002.
- 6 徐佩弦.高聚物流变学及其应用.北京:化学工业出版社,2003.
- 7 赵素合.聚合物加工工程.北京:中国轻工业出版社,2001.
- 8 周国发.聚合物多相分层充模流动成型的界面不稳定性形成的数值分析. *化工学报*, 2003(7):1173
- 9 Wilson G M, Khomami B. An experimental investigation of interfacial instabilities in multilayer flow of viscoelastic fluids. II. Elastic and nonlinear effects in incompatible polymer systems. *Rheol*, 1993, 37:315
- 10 Ganpule H K. A theoretical investigation of interfacial in multilayer viscoelastic channel flows and its applications in coextrusion: [dissertation]. Washington: Washington University, 1998.
- 11 金日光.高聚物流变学及其在加工中的应用.北京:化学工业出版社,1986.

NUMERICAL SIMULATION OF INTERFACIAL INSTABILITY FOR GAS-ASSISTED CO-EXTRUSION

Cai Kui, Zhou Guofa, Zhong Xuguang, Hu Chenzhang, Zhang Xiaoxun

(School of Environmental Science & Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

ABSTRACT A new gas-assisted co-extrusion molding technique was put forward, and a theoretical model was established, based on the characteristics of gas-assisted co-extrusion. The influences of polymer rheological parameter and process parameters on interfacial instability of gas-assisted co-extrusion were studied by means of numerical simulation, and the influencing mechanism was disclosed. The simulation result showed that the interfacial instability would be more serious with the increasing of viscosity ratio or with the decreasing of velocity ratio and temperature ratio of high viscosity layer melt to low viscosity layer melt, and the viscosity ratio of gas-assisted co-extrusion had a wider adjusting range than that of traditional co-extrusion.

KEYWORDS gas-assisted co-extrusion, traditional co-extrusion, numerical simulation, interfacial instability