

超声在聚合物熔体检测与成型加工中的应用

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.05.008

黄新平 曾广胜

张靖倩

湖南工业大学

包装与材料工程学院

湖南 株洲 412007

摘要: 介绍检测超声与功率超声各自特点及其分别在聚合物熔体检测和成型加工过程中的应用,对超声实时检测、精准反馈聚合物熔体内部信息和提高熔体性能、成型制品质量等方面的作用机理和应用效果进行概述;并对超声在聚合物熔体检测与成型加工中的发展进行了展望。

关键词: 超声波; 聚合物熔体; 成型加工; 实时检测

中图分类号: TB559; TQ320.66

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2020)05-0059-07

引文格式: 黄新平, 曾广胜, 张靖倩. 超声在聚合物熔体检测及成型加工中的应用 [J]. 包装学报, 2020, 12(5): 59-65.

0 引言

聚合物熔体是指聚合物处于流动温度或熔点与分解温度之间,其内部的分子能克服分子间作用力而进行自由活动的一种状态。聚合物熔体的密度、黏度等参数不仅影响聚合物的加工性能,还直接影响其制品的质量。因此,实时、准确地监测聚合物熔体的参数是实现聚合物精密加工的关键。然而,聚合物熔融状态通常发生在高温(高达400℃)、高压(高达10 MPa)、高机械冲击的极端环境中,这无疑增加了实时检测聚合物熔体的难度。

超声波是一种可以在媒质中传播的弹性机械波。利用超声波具有非侵入式、反射能力强等特性,将超声波应用于聚合物熔体的检测过程中,在不破坏熔体结构的前提下实现对熔体内部信息的实时反馈^[1-2]。在聚合物熔体加工成型时,超声波的高振动频率特性能够引起聚合物熔体分子的振动,从而影响聚合物熔

体的流动性和黏弹性,有利于高分子材料的加工^[3-5]。因此,根据超声波对聚合物熔体的作用形式,可将其分为检测超声与功率超声两类^[6]。

检测超声的频率一般在0.25~15.00 MHz之间,这类高频低能的超声波具有非侵入式、反馈速度快、灵敏度高、信号稳定等特点,常作为信号载体用于高分子材料的检测,尤其是在高温、高压、高机械冲击的极端条件下,检测超声能做出快速准确地响应,达到检测要求^[7]。功率超声是一种低频高能的超声波,这类超声波在聚合物熔体中传播时,以能量形式与熔体相互作用,产生机械效应、空化效应、热效应以及化学效应^[8],再将产生的效应作用于聚合物熔体,进而改变熔体的某些物理化学性质,以提高聚合物熔体的加工性能及其产品特性。由于检测超声与功率超声的作用原理不同,它们在聚合物领域的应用也有所不同。检测超声主要应用于聚合物熔体的检测方面,检测聚合物在加工过程中的密度、流变性和共混均匀

收稿日期: 2020-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51973056),湖南省科技厅重点研究计划基金资助项目(2017WK2042)湖南省教育厅科研基金资助项目(18A258,18C0524),湖南省科研创新基金资助项目(CX20190843, CX20190844)

作者简介: 黄新平(1995-),男,湖南永州人,湖南工业大学硕士生,主要研究方向为聚合物加工成型,

E-mail: 82362815@qq.com

性, 并进行实时反馈; 功率超声则应用于聚合物的加工成型方面, 目前主要是应用于聚合物的挤出和注塑加工中。

1 检测超声的应用

检测超声对聚合物熔体的检测方式与传统的聚合物熔体检测方法有所不同。与传统的熔体黏度检测、DSC (differential scanning calorimetry) 分析等检测手段相比, 检测超声作为一种机械波, 在检测聚合物的结构与性能上具有高灵敏性和非破坏性的特点^[9-10]。此外, 超声检测设备还可以在常压高温下长期使用^[11]。因此, 检测超声在聚合物熔体加工检测上具有广阔的应用前景。

1.1 实时检测聚合物熔体的密度

精密注射过程中压力变化快、成型周期短, 因此熔体密度实时检测需做到快速精准。实时检测聚合物熔体的密度是超声波技术在聚合物加工检测领域的主要应用之一^[12]。

金艳等^[13]通过声学理论分析, 推导出超声波声速与聚合物熔体密度之间的公式, 并利用自行设计的超声波熔体测量装置(见图1)对聚丙烯(polyactic acid, PP)熔体进行实时测试, 验证了超声波声速与聚合物熔体密度的单值性, 从理论与实验两个方面验证了超声表征熔体密度的可行性。

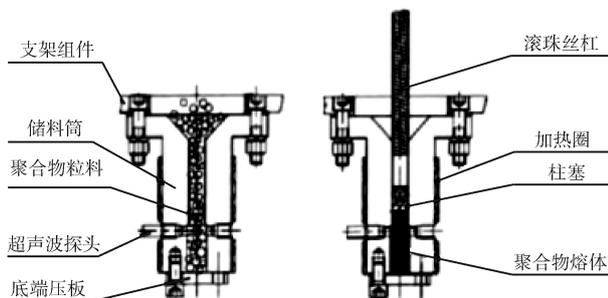


图1 超声装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic device

王克俭等^[14]在压强-体积-温度 (pressure-volume-temperature, PVT) 直接法测试装置上连接超声波系统对聚丙烯密度进行检测, 通过分析不同压力、温度下聚丙烯密度与超声波声速的测量结果, 发现熔融状态下的聚丙烯密度与超声波声速呈良好的线性关系。该方法验证了检测超声用于检测聚合物熔体密度的可能性, 也为优化工艺条件及实现精密加工过程中的质量控制提供了可能^[15]。

应济等^[16]基于超声信号幅值的变化测量注射模腔内聚合物熔体的密度, 并依据聚合物的PVT方程建立了以超声信号、模具温度和注射油缸压力为辅助变量, 模腔压力为主导变量的软测量方法, 并在不同注塑工艺和工况下进行实验, 发现根据超声信号幅值变化的软测量方法得到的理论值与实验值的最大误差不超过6%, 相关系数最低为0.994。

1.2 实时检测聚合物熔体的黏度

在聚合物熔体的加工过程中, 熔体的黏度是重要的加工参数。实时、准确地监测熔体黏度是实现聚合物熔体的精密加工的关键, 但目前的流变仪无法实时检测加工过程中聚合物熔体的黏度^[17-18]。

赵丽娟等^[19]采用检测超声与流变仪相结合的方式, 将带有超声传感器的狭缝口模(见图2)安装在毛细管流变仪料筒的出口处, 检测聚合物熔体黏度以及超声波在熔体中的声速, 并根据两者之间的关系建立了幂率公式, 进一步验证超声波声速定量检测聚合物熔体黏度的可能性。

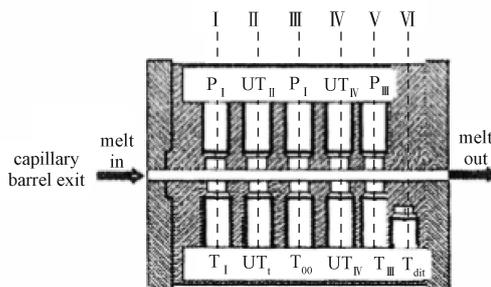


图2 狭缝口模示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the slit mouth die

N. Dogan等^[20]使用自制的超声波脉冲发生器/接收器, 在聚合物熔体中传播多个高频超声波脉冲, 将超声检测技术应用于在线聚合物熔体剪切黏度的测量。研究发现, 超声波测量的剪切黏度与锥板流变仪检测的相比误差在3%~9%之间, 与旋转流变仪测得的相比误差不超过8%。

王克俭等^[21]在前期研究的基础上, 应用S-S状态方程和Doolittle方程建立了黏度和超声波声速之间定量模型, 测试了高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE)、聚丙烯和聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 熔体中超声波的传递信号, 发现超声模型的拟合预测结果与实验数据具有较好的一致性。

1.3 表征聚合物熔体的共混均匀性

共混改性作为聚合物熔体加工改性的主要方式

之一, 改性后复合材料的性能能否达到预期效果还受到填充粒子分散状况的影响^[22-23]。

何伟^[24]将超声检测技术应用于熔融态聚合物的检测中, 并对添加不同填料(不同种类、表面处理、含量、粒径及分布)的复合体系进行超声纵波检测, 利用扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)分析和激光粒子分析法对熔融态复合体系的内部分散状态进行研究, 结果发现超声的声速对填料的种类、含量、粒径大小及分布等分散状态的变化并不敏感, 声衰减则能够表征分散相在基体中的分散均匀程度。

韩婧等^[25]通过分析单螺杆共混挤出过程中超声回波信号的变化, 建立螺杆结构与超声反射系数比的关系模型, 进而利用超声回波信号幅度的衰减变化表征熔体的混合均匀度, 并利用聚合物的电镜图对超声波检测结果进行了验证, 研究发现超声反射衰减系数的反差与聚合物混合均匀性成正比。

杨士山等^[26]研究了聚合物熔体与不同填充料、不同混合比混合物的超声回波情况, 并对聚合物熔体不同位置的填充料进行超声波检测得到超声回波的幅值, 发现超声信号的幅度均值差别越小聚合物熔体与填充料混合越均匀, 而填充料的种类、含量对幅值并没有明显的影响。

2 功率超声的应用

目前, 功率超声在聚合物熔体加工中的研究主要集中在挤出成型和注塑成型。在注塑与挤出的成型加工中, 功率超声能产生高能的振动场, 振动场对聚合物熔体施加与流动同向的剪切场, 促进熔体沿流动方向运动; 同时, 超声波还可从微观上影响聚合物熔体的链段活动, 改变聚合物熔体结构与性能, 进而降低聚合物熔体加工难度, 改善加工制品性能^[27-29]。

2.1 功率超声在挤出成型加工的应用

2.1.1 常规挤出成型

挤出成型是聚合物加工成型的主要加工方式之一。功率超声与挤出机的结合不仅可以提升共混物的混合效率, 还可以增强共混物的加工性能等^[30-31]。

Liang T. 等^[32-33]在天然橡胶/二氧化硅和二氧化硅/硅烷的共混挤出成型过程中引入超声波, 分析超声处理对聚合物材料的加工-结构-性能的影响。研究发现超声振动减少了束缚橡胶层的厚度, 加强了填料颗粒之间的絮凝和相互作用, 显著改善了填料

的分散性能, 共混物交联密度和凝胶分数明显减少, 进而降低模具压力, 提高挤出加工输出速率。

K. Gunes 等^[34]将超声波引入到挤出成型工艺中, 利用不同振幅的超声波挤压处理聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)、聚萘二甲酸乙二醇酯(polyethylene naphthalene, PEN)及其共混物, 并对反应过程及反应产物进行研究, 通过核磁共振与MALDI-TOF-MS(matrix-assisted laser desorption/ionization time of flight mass spectrometry)等方法对实验结果进行验证, 研究发现超声处理可以增加反应产生的羟基和羧基, 增强PET/PEN共混物的酯交换反应, 经超声振动处理的共混物的酯交换程度增加了31%。

2.1.2 微挤出成型

微挤出成型是指成型制品截面尺寸微小(外径 $\Phi \leq 2$ mm)、壁厚为微米级型材的微成型技术。由于微挤出制品通常尺寸小、中空内腔、截面形状复杂、壁厚不均匀、几何精度高, 传统挤出成型设计理论不再完全适用于微挤出成型。近年来, 将功率超声引入聚合物微挤出成型成为聚合物加工成型领域的研究热点之一。

魏灵娇^[35]将采用传统理论设计与ANSYS仿真相结合的方法, 将超声引入微挤出成型加工中, 自制超声辅助微挤出装置, 研究不同振幅超声及挤出工艺参数对聚合物微挤出加工性能的影响。研究发现, 超声辅助微挤出装置可降低出口处聚合物的出口膨胀率, 提高挤出制品的尺寸精度, 从仿真模拟与实验两个方面验证了超声可以提高熔体微挤出成型工艺精度。

傅志红等^[36]将超声与气辅微挤出工艺相结合, 并利用Polyflow仿真软件, 对超声辅助聚丙烯五腔导管气辅微挤出成型过程进行仿真, 并研究了不同超声功率、机头温度和挤出速率对聚合物制品成型尺寸的影响。研究发现, 不同超声功率下随机头温度的升高, 各部位的尺寸均存在一个最大值, 且该最大值以及对应的机头温度均会随超声功率的升高而降低。超声与气辅微挤出工艺的结合, 有效解决了口膜出口压力过大和无法精确控制挤出塑料制品尺寸变化的问题。

A. I. Isayev 等^[37]自行设计了超声辅助双螺杆微挤出装置制备了碳纳米管填充聚醚酰亚胺复合材料, 研究了超声对碳纳米管分散性能及复合材料流变性

能等的影响,并利用SEM对碳纳米管的形态和分散状态进行验证。研究发现,超声不仅能提高微挤出纳米复合材料的黏度、储存和损失模量,降低其阻尼性能,而且还能提高碳纳米管在聚醚酰亚胺基体中的分散性能。

2.2 功率超声在注塑成型加工的应用

2.2.1 常规注塑成型

注塑成型能加工外形复杂、尺寸精确或带嵌件的制品,且生产效率较高。大多数热塑性塑料和某些热固性塑料(如酚醛塑料)均可用注塑成型进行加工,但注塑的物料须具有良好的流动性,才能充满模腔以得到合格的制品。将功率超声应用于注塑成型加工中,是人们尝试改善注射成型制品的一种途径^[38]。

王海雄等^[39]针对手机导光板塑件注塑成型时产生的翘曲、填充不满等缺陷,设计了带有超声振动系统的模具。两个超声波换能器交错地安装于动、定模镶块两侧,对塑料熔体充模过程施加超声剪切振动。研究表明,在熔体充模阶段对其施加超声振动,可以降低熔体黏度,改善其流动性,并减小熔体与模具型腔表面的摩擦,避免塑件成型缺陷的产生。

吉智^[40]通过搭建的超声辅助注塑成型可视化平台进行注塑实验,研究超声振动对聚合物充模流动行为的影响。研究发现,超声振动可以改善型腔内部熔体速度场的分布,降低熔体的黏度,促进熔体的流动,从而改善注塑加工的条件。

姜开宇等^[41]将物理可视化技术与超声辅助成型技术相结合应用于注射成型加工过程中,并分析超声振动对聚丙烯熔体速度场分布的影响,结合示踪粒子标记法和Kringring插值法表征充型流动速度场。研究发现,超声外场的加入不仅有助于注塑成型工艺中内部熔体的流动,而且超声功率的提高会导致聚合物材料性能的改变,进而影响制品的最终质量。

2.2.2 微注塑成型

由于微制品的尺寸、体积和质量的微小,微注塑成型过程与传统注塑成型有较大区别。微制品精细的结构,使熔体在微型腔中的流动变得复杂,普通的工艺条件下容易出现填充不满的现象^[42-43]。

A. Stao等^[44-45]在微注塑成型过程中加入超声振动,发现超声振动可以使塑件的微结构复制率高达95%,比未加超声的复制率高8%左右。利用透镜观察注塑实验发现,加入超声振动后,塑件表面粗糙度降低4 μm。

蒋炳炎等^[46-47]研究了微注塑成型过程中超声功率与超声塑化速率、熔体质量之间的关系,并通过自制的聚合物超声塑化装置,分析聚甲基丙烯酸甲酯、聚丙烯和尼龙66在不同超声功率下的注塑工艺。研究发现,在相同工艺参数下,超声发生器对不同类型聚合物输出的功率不同,超声功率随聚合物材料声阻抗的增大而增大,超声塑化速率随超声功率的增大而增大。

仇中军等^[48]将纵向超声波与微注塑成型工艺相结合,设计了纵波超声波微注塑装置,在不提高模具温度的前提下,利用超声能量降低熔体黏度,改善了熔体的流动和充填性能,并进行了菲涅尔透镜超声波辅助微注塑实验,以验证超声波辅助微注塑的效果。实验结果表明,相同的注塑工艺条件下,超声辅助微注塑过程中聚合物熔体的充填性能提高了6.91%。

3 结论与展望

随着超声理论不断发展,超声波在聚合物熔体检测和加工领域的应用越来越广泛。在聚合物熔体加工检测领域,超声波作为一种检测手段,能在极端条件和不破坏熔体结构的前提下,对熔体的内部信息进行实时反馈,且具有穿透能力强,灵敏度高特点,这是传统的检测方式无可比拟的。在聚合物熔体加工成型领域,高振动频率的超声波以能量形式与熔体相互作用,引起聚合物熔体分子的振动,进而影响熔体的流动性和黏度,降低其加工难度,以此得到综合性优良的加工制品。与传统的加工方法相比,超声辅助加工表现出明显的优势,尤其在微成型工艺中。

在聚合物熔体加工检测和成型领域,超声应用具有重要意义,并表现出良好的应用前景,但目前超声波在聚合物领域的大规模应用仍受到制约,这主要体现在对超声条件的控制方面。在聚合物检测与加工过程中,聚合物受超声的功率、频率、振幅等影响较大,若对超声条件控制不精确,聚合物易产生凝胶或发生副反应、竞争性的降解反应等,熔体的混合及其检测性能等均受到影响。现阶段超声的机理研究还不能解决这些问题,仍需深入了解超声的作用机理及其外界影响因素,并进行理论探讨和实验检验,这将是超声技术在聚合物检测及加工领域需要进一步研究的核心问题。随着研究工作的不断深入和超声加工理论的完善,超声技术在聚合物检测与成型加工领域将会发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 李 姜, 梁 梅, 林 影, 等. 超声技术在高分子材料中应用研究进展 [J]. 应用声学, 2005, 24(1): 53-58.
LI Jiang, LIANG Mei, LIN Ying, et al. Recent Development of Application of Ultrasonic Technology to Polymer[J]. Applied Acoustics, 2005, 24(1): 53-58.
- [2] ALIG I, STEINHOFF B, LELLINGER D. Monitoring of Polymer Melt Processing[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(6). DOI: 10.1088/0957-0233/21/6/062001.
- [3] 高 山, 仇中军, 马 壮. 超声辅助微注塑成型中熔体壁面滑移行为的研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(5): 1057-1064.
GAO Shan, QIU Zhongjun, MA Zhuang. Study on Wall Slip Behavior of Polymer Melt in Ultrasonic-Assisted Micro-Injection Molding[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(5): 1057-1064.
- [4] APOSTOL S, PUTZ V, UNGER T, et al. Methoden Zur In-Line Untersuchung des Einflusses Der Molmasse Und Vorgeschichte von Wandgleitenden Kunststoffschmelzen Auf Deren Strömungsprofil[J]. Tm-Technisches Messen, 2016, 83(11). DOI: 10.1515/teme-2016-0027.
- [5] TORRES-SÁNCHEZ C, CORNEY J. Identification of Formation Stages in a Polymeric Foam Customised by Sonication via Electrical Resistivity Measurements[J]. Journal of Polymer Research, 2009, 16(5): 461-470.
- [6] 韩 科. 超声波在线测量聚合物熔体动态密度的实验方法研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
HAN Ke. Study on the Measurement of Polymer Melt Dynamic Density by Ultrasonic[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [7] KAZYS R, SLITERIS R, REKUVIENE R, et al. Ultrasonic Technique for Density Measurement of Liquids in Extreme Conditions[J]. Sensors, 2015, 15(8): 19393-19415.
- [8] SUSLICK K S, PRICE G J. Applications of Ultrasound to Materials Chemistry[J]. Annual Review of Materials Science, 1999, 29(1): 295-326.
- [9] KUMAR R, ISAYEV A I. Thermotropic LCP/CNF Nanocomposites Prepared with Aid of Ultrasonic Waves[J]. Polymer, 2010, 51(15): 3503-3511.
- [10] MICHAELI W, STARKE C. Ultrasonic Investigations of the Thermoplastics Injection Moulding Process[J]. Polymer Testing, 2005, 24(2): 205-209.
- [11] ZHAO Y, ZHAO P, ZHANG J F, et al. On-Line Measurement of Clamping Force for Injection Molding Machine Using Ultrasonic Technology[J]. Ultrasonics, 2019, 91: 170-179.
- [12] XU H, WU D M, ZHU Q X, et al. Research of Precision Injection Control System Based on the On-Line Measurement of Polymer Melt Density[J]. Advanced Materials Research, 2011, 383/384/385/386/387/388/389/390: 5136-5141.
- [13] 金 艳, 吴大鸣, 何亚东, 等. 超声波测量聚合物熔体密度 [J]. 塑料, 2011, 40(5): 102-105.
JIN Yan, WU Daming, HE Yadong, et al. Ultrasonic Measurement of Polymer Melt Density[J]. Plastics, 2011, 40(5): 102-105.
- [14] 王克俭, 许 菲. 超声检测在聚合物 PVT 关系测试中的应用 [J]. 塑料, 2010, 39(4): 4-6.
WANG Kejian, XU Fei. Application of Ultrasonic Monitoring in Testing PVT of Polymer[J]. Plastics, 2010, 39(4): 4-6.
- [15] KIM J G, KIM H, KIM H S, et al. Investigation of Pressure-Volume-Temperature Relationship by Ultrasonic Technique and Its Application for the Quality Prediction of Injection Molded Parts[J]. Korea Australia Rheology Journal, 2004, 16(4): 163-168.
- [16] 应 济, 孙明涛, 赵 朋. 基于超声信号的模腔压力软测量方法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 7-11.
YING Ji, SUN Mingtao, ZHAO Peng. Soft Measurement of Cavity Pressure Based on Ultrasonic Signal[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 41(2): 7-11.
- [17] KAŽYS R, REKUVIENĖ R. Viscosity and Density Measurement Methods for Polymer Melts[J]. Ultrasound, 2012, 66(4): 20-25.
- [18] ABU-ZAHRA N H. Real-Time Viscosity and Density Measurements of Polymer Melts Using Dielectric and Ultrasound Sensors Fusion[J]. Mechatronics, 2004, 14(7): 789-803.
- [19] 赵丽娟, 钟 琴, 庄红军, 等. 超声波在线检测聚合物材料在流变仪中的挤出行为 (II) [J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(4): 106-109.
ZHAO Lijuan, ZHONG Qin, ZHUANG Hongjun, et al. Real-Time Diagnosing Polymer Extruding Behaviour During Rheometer Processing (II)[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(4): 106-109.
- [20] DOĞAN N, MCCARTHY M J, POWELL R L. Measurement of Polymer Melt Rheology Using Ultrasonics-Based In-Line Rheometry[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(8): 1684-1690.

- [21] 王克俭, 胡 坤. 超声波速表征聚合物熔体黏度的方法 [J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(12): 121-124.
WANG Kejian, HU Kun. Viscosity of Polymer Melts Characterized by Ultrasonic Wave[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(12): 121-124.
- [22] 谢 云. 基于超声信号的无机粒子高填充聚合物分散状态表征研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
XIE Yun. Research on Ultrasonic Characterization of Particle in Highly Concentrated Polymer Composite[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [23] 朱光明, 辛文利. 聚合物共混改性的研究现状 [J]. 塑料科技, 2002, 30(2): 42-46.
ZHU Guangming, XIN Wenli. Present Status of Polymer Blending Modification[J]. Plastics Science and Technology, 2002, 30(2): 42-46.
- [24] 何 伟. 无机粒子填充聚合物复合材料熔融态超声测量与表征 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HE Wei. Ultrasonic Measurement and Characterization of Molten Polymer Composite[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [25] 韩 婧, 陈友兴, 王召巴, 等. 基于超声的单螺杆挤出机聚合物混合状态表征方法研究 [J]. 应用声学, 2013, 32(6): 488-494.
HAN Jing, CHEN Youxing, WANG Zhaoba, et al. Research on Measurement Methods of Polymer Compounding State in Single-Screw Extruder Based on Ultrasonics[J]. Applied Acoustics, 2013, 32(6): 488-494.
- [26] 杨士山, 陈友兴, 武秀全, 等. 聚合物熔体混合状态的超声波表征 [J]. 塑料工业, 2010, 38(3): 50-52, 56.
YANG Shishan, CHEN Youxing, WU Xiuquan, et al. Ultrasonic Characterization for Melt Compound State of Polymer[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(3): 50-52, 56.
- [27] CHEN Y Z, LI H L. Mechanism for Effect of Ultrasound on Polymer Melt in Extrusion[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2007, 45(10): 1226-1233.
- [28] 于同敏, 包 成, 黄晓超. 超声技术在聚合物成型加工中的应用研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(11): 173-177.
YU Tongmin, BAO Cheng, HUANG Xiaochao. Application Evolution of Ultrasonic Technology in Polymers Processing[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2012, 28(11): 173-177.
- [29] 李世辉, 张长春, 于 妍, 等. 超声波场致作用在聚合物加工中的最新进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(1): 71-75.
LI Shihui, ZHANG Changchun, YU Yan, et al. Advance in Research for the Effect of the Ultrasonic Field on the Processing of Polymer[J]. Polymeric Materials Science & Engineering, 2005, 21(1): 71-75.
- [30] ÁVILA-ORTA C, ESPINOZA-GONZÁLEZ C, MARTÍNEZ-COLUNGA G, et al. An Overview of Progress and Current Challenges in Ultrasonic Treatment of Polymer Melts[J]. Advances in Polymer Technology, 2013, 32(S1): E582-E602.
- [31] LIANG T, ISAYEV A I. Structure and Properties of Ultrasonically Extruded SBR/BR Blends and Prepared Compounds and Vulcanizates with Various Fillers[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2019, 51(7/8): 603-625.
- [32] LIANG T, ISAYEV A I. Ultrasonic Extrusion of NR Gum and Its Effect on the Structure and Properties of Unfilled and Silica-Filled NR[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(5): 925-934.
- [33] LIANG T, ISAYEV A I. Effect of Ultrasonically Aided Extrusion of NR/BR Blends on Structure and Properties of Silica-Filled Compounds and Vulcanizates[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(S2): 261-270.
- [34] GUNES K, ISAYEV A I, LI X P, et al. Fast in Situ Copolymerization of PET/PEN Blends by Ultrasonically-Aided Extrusion[J]. Polymer, 2010, 51(5): 1071-1081.
- [35] 魏灵娇. 超声波辅助挤出成型的数值分析与实验研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
WEI Lingjiao. Numerical Analysis and Experimental Study of Extrusion Assisted by Ultrasonic Vibration[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [36] 傅志红, 万 月, 张 磊, 等. 超声波辅助聚丙烯五腔导管的微挤出成型 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4): 52-57.
FU Zhihong, WAN Yue, ZHANG Lei, et al. Micro-Extrusion Molding of Ultrasonic-Assisted Polypropylene Five-Lumen Catheter[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4): 52-57.
- [37] ISAYEV A I, KUMAR R, LEWIS T M. Ultrasound Assisted Twin Screw Extrusion of Polymer-Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes[J]. Polymer, 2009, 50(1): 250-260.
- [38] SATO A, ITO H, KOYAMA K. Study of Application of Ultrasonic Wave to Injection Molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(4): 768-773.

- [39] 王海雄, 李积彬, 徐可可. 基于超声振动注射的手机导光板注射成型[J]. 模具工业, 2010, 36(9): 46-48, 51.
WANG Haixiong, LI Jibin, XU Keke. Injection Molding of Light Guide Plate of Mobile Phone Based on Ultrasonic Vibration[J]. Die & Mould Industry, 2010, 36(9): 46-48, 51.
- [40] 吉智. 超声辅助注射成型充模流动特性的可视化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
JI Zhi. Visualization Research on Polymer Filling Flow Characteristics of Ultrasonic Assisted Injection Molding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [41] 姜开宇, 吉智, 李豪, 等. 超声外场对聚合物注塑充型流动速度场分布影响的物理可视化表征与分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 23-28.
JIANG Kaiyu, JI Zhi, LI Hao, et al. Representation and Analysis of Polymer Flowing Velocity Distribution Based on Physical Visualized Technology in Ultrasonic Assisted Injection Molding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 23-28.
- [42] GIBOZ J, COPPONNEX T, MÉLÉ P. Microinjection Molding of Thermoplastic Polymers: a Review[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(6): 96-109.
- [43] SACRISTÁN M, PLANTÁ X, MORELL M, et al. Effects of Ultrasonic Vibration on the Micro-Molding Processing of Polylactide[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(1): 376-386.
- [44] SATO A, SAKAGUCHI H, ITO H, et al. Evaluation of Replication Properties on Moulded Surface by Ultrasonic Injection Moulding System[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2010, 39(7): 315-320.
- [45] SATO A, ITO H, KOYAMA K. Study of Application of Ultrasonic Wave to Injection Molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(4): 768-773.
- [46] 蒋炳炎, 齐鹏程, 张胜, 等. 超声功率对聚合物超声熔融塑化的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3224-3230.
JIANG Bingyan, QI Pengcheng, ZHANG Sheng, et al. Effect of Ultrasonic Power on Polymer Ultrasonic Plasticification[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3224-3230.
- [47] 蒋炳炎, 邹洋, 刘弢, 等. 超声塑化对聚合物熔融指数的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2670-2676.
JIANG Bingyan, ZOU Yang, LIU Tao, et al. Effect of Ultrasonic Plasticization on Melt Mass-Flow Rate of Polymers[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2670-2676.
- [48] 仇中军, 郑辉, 房丰洲, 等. 纵向超声波辅助微注塑方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(2): 170-176.
QIU Zhongjun, ZHENG Hui, FANG Fengzhou, et al. Longitudinal Ultrasound-Assisted Micro-Injection Moulding Method[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 10(2): 170-176.

(责任编辑: 李玉华)

Application of Ultrasound in Polymer Melt Detection and Molding Process

HUANG Xinping, ZENG Guangsheng, ZHANG Jinqian

(College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The respective characteristics of ultrasonic detection and power ultrasonic with their different applications in polymer melt detection and molding process were introduced. The action mechanism and application effects of ultrasonic real-time detection, accurate feedback of polymer melt internal information, improvement in melt performance, and quality of molded products were summarized. The future development trend of ultrasonic technology in polymer melt molding process and test was prospected.

Keywords: ultrasound; polymer melt; forming process; real-time detection