

Research Progress in Molding Technology of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: From Conventional static Molding to Dynamic Molding

Jianan Li Songxi Hu* Zhengjie Xiao Minghao Li Yibin Guo

School of Intelligent Engineering, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong, 512005, China

Abstract

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) with excellent performance poses significant processing challenges due to its extremely high melt viscosity and very low critical shear rate. Conventional static molding requires high temperatures and prolonged heating, which can disrupt the regularly arranged nascent phase structure of UHMWPE, leading to decreased crystallinity and mechanical strength of the products, along with low efficiency and high energy consumption. Dynamic molding technologies enable low-temperature processing by introducing dynamic force fields. However, high-velocity compaction (HVC) often results in poor interfacial fusion quality, while ultrasonic molding (UPM) may cause molecular chain scission. As an emerging dynamic molding technique, pulse vibration molding (PVM) applies a pulsed vibration pressure field during the process. This effectively promotes molecular chain motion and interfacial diffusion at relatively low temperatures, significantly improving interfacial fusion quality while better preserving the characteristic structure of the nascent phase. Consequently, PVM endows the products with high crystallinity, increased lamellar thickness, and superior mechanical strength and wear resistance. Optimizing PVM process parameters is crucial for enhancing the densification, interfacial bonding strength, and final properties of UHMWPE products, offering an effective pathway for the efficient production of high-performance UHMWPE items.

Keywords

Ultra-high molecular weight polyethylene; Molding; Dynamic force field; Properties

UHMWPE 模压成型技术研究进展：从静态模压到动态模压

李佳南 胡松喜* 肖正杰 李明豪 郭奕彬

韶关学院智能工程学院, 中国·广东 韶关 512005

摘要

性能优异的超高分子量聚乙烯(UHMWPE)因其极高的熔体粘度和极低的临界剪切速率给加工带来巨大挑战。采用传统静态模压成型需高温长时间加热,易破坏UHMWPE规整排列的初生相结构,导致制品结晶度下降,机械强度低,且效率低、能耗高。动态模压技术通过引入动态力场实现低温成型,但高速冲击模压(HVC)存在界面熔合质量差的问题,而超声模压(UPM)易导致分子链断裂。脉振模压(PVM)作为一种新兴动态模压技术,通过在模压过程中施加脉冲振动压力场,能在较低温度下有效促进分子链运动与界面扩散,显著改善界面熔合质量,同时更好地保留初生相特征结构,从而赋予制品高结晶度、厚晶片以及更优的力学强度和耐磨性。优化PVM工艺参数对提升UHMWPE制品的致密化、界面熔接强度及最终性能至关重要,也为实现高性能UHMWPE制品高效成型提供了有效途径。

关键词

超高分子量聚乙烯; 模压成型; 动态力场; 性能

【基金项目】广东省基础与应用基础研究基金(项目编号: 2025A1515012994、2024A1515011701); 韶关学院2025年度国家级大学生创新创业训练计划项目“脉振压力作用强制超高分子量聚乙烯(UHMWPE)取向的模压成型模具设计”(项目编号: 202510576003); 韶关学院博士科研启动费项目(项目编号: 440-9900064702)。

【作者简介】李佳南(2004-),女,中国河南周口人,在读本科生,从事机械设计制造及其自动化研究。

【通讯作者】胡松喜(1983-),男,中国福建诏安人,硕士,副教授,从事超高分子量聚合物高效模压成型装备设计及其过程控制研究。

1 引言

超高分子量聚乙烯(UHMWPE,分子量通常超过150万)作为一种性能卓越的热塑性工程塑料,具有出色的耐磨性、良好的抗冲击性(尤其是低温环境下)、耐化学腐蚀性及生物适应性等优点,使其在机械工业、医疗设备、航空航天和运动器材等领域获得广泛应用^[1-3]。

然而,UHMWPE极高的分子量,且熔体状态分子链极度缠结,熔体粘度极高,几乎不呈现典型的黏流状态,这使得采用传统的塑料加工技术加工UHMWPE变得异常困难^[4-6]。模压成型是目前UHMWPE制品最主要的生产方式

之一^[6-9]。传统的静态模压 (CM) 成型依赖于热传导实现物料的加热熔融, 通常需要在高温 (常高于 200℃) 下长时间保温 (数小时), 以克服分子链扩散能垒, 实现颗粒界面的良好熔合^[10]。然而, 这种高温长时间的加工条件会破坏 UHMWPE 原料中高度规整的初生相结构, 引起结晶度陡降, 使机械强度和耐磨性能降低^[11,12]。

为克服这些限制, 研究者们开发了多种动态模压成型技术, 包括高速冲击模压 (HVC)^[13-15]、超声模压 (UPM)^[16-18] 以及脉冲振动模压 (PVM)^[19-21] 等。这些方法通过引入动态力场, 旨在降低成型温度、缩短成型周期, 并更好地控制制品的微观结构。本文将系统回顾 UHMWPE 模压成型技术的研究进展, 重点关注不同成型方法对 UHMWPE 结构和性能的影响机理, 为 UHMWPE 制品的高性能化与高效加工提供理论依据和技术参考。

2 静态模压 (CM) 成型技术

静态模压 (CM) 成型是目前应用较广泛的 UHMWPE 成型方法, 将 UHMWPE 粉末装入模具中, 在一定温度和压力下保持一段时间, 使粉末颗粒熔融, 随后冷却得到制品^[1-3]。热传导是唯一的热量传递方式, 主要工艺参数包括成型温度、成型压力、保温时间和冷却速率。

成型温度是影响 CM-UHMWPE 性能的最关键因素。Fu 等人认为, 提高模压成型温度促进 UHMWPE 超长分子链在颗粒界面的扩散, 提高界面熔合质量, 改善制品的断裂韧性。然而, 当成型温度过高 (超过 200℃) 时, 会加剧熔体状态时分子链之间的物理缠结, 使得分子链在颗粒界面 "爬行" 扩散困难, 导致界面熔合缺陷难以消除^[5]。

保温时间对 UHMWPE 制品的结构和性能也有显著影响。Jaufrès 等人的研究表明, 通过提高成型温度并延长保温时间, 有利于 UHMWPE 分子链在颗粒界面充分扩散, 改善制品韧性, 但长时间高温成型会彻底消除高度规整排列的 UHMWPE 初生相结构, 抑制链段规整排列, 导致结晶度和晶片厚度降低, 从而弱化机械强度和耐磨性能^[14]。

冷却速率是影响 CM-UHMWPE 结晶行为的重要参数。采用较低的冷却速率并在 UHMWPE 结晶温度下保温一定时间, 有利于晶体结构的完善, 有助于提高结晶完整性, 可以使制品获得优异的耐磨性能^[4]。

总体而言, CM 成型方式存在成型效率低下及制品难以兼具高机械强度、良好的断裂韧性和优异的耐磨性能等问题。

3 动态模压成型技术

3.1 高速冲击模压 (HVC) 成型

高速冲击模压 (HVC) 成型是一种通过引入高速冲击力场实现 UHMWPE 低温成型的动态模压技术^[15]。Lame 等人的研究表明, HVC 成型过程中高速冲击力场使 UHMWPE 初生颗粒快速致密、嵌合, 加速颗粒界面熔合, 其成型温度

(约 130℃) 远低于 CM 成型温度 (210℃以上), 成型周期仅为几分钟^[13]。研究表明, 低于 UHMWPE 熔融温度的成型温度使 HVC 成型 UHMWPE 样品保留了初生相结构, 具有更高机械强度^[14]。

然而, HVC 成型也存在明显局限性。由于成型温度低, UHMWPE 分子链在颗粒界面处扩散缓慢, 颗粒界面熔合质量差, 使得制品的断裂韧性远低于 CM-UHMWPE^[13]。随着冲击次数的增加, 熔融再结晶相比比例增加, 导致 HVC-UHMWPE 的屈服强度和杨氏模量降低, 而断裂伸长率则呈上升趋势, 但仍明显低于 CM-UHMWPE^[14]。

3.2 超声模压 (UPM) 成型

超声模压 (UPM) 成型是通过将超声振动力场引入模压成型, 使物料颗粒产生剧烈摩擦生热及黏弹热, 提高塑化质量和效率^[16]。梁雄的研究表明, 超声振动力场促使 UHMWPE 颗粒边界处发生 "链膨胀", 并促进分子链段扩散形成共晶, 其制品同时存在 UHMWPE 初生相和熔融再结晶相, 并且随着超声振动周期延长, 界面处熔合质量提高, 制品韧性得到改善^[17]。然而, 由于超声波能量高, 易引起分子链断裂, 致使其制品机械性能下降。当施加超声振幅达到 100% 时, UHMWPE 分子量下降最大; FTIR 光谱也显示在超声波加工过程中 UHMWPE 分子链存在链断裂现象^[18]。

尽管超引入声力场加速熔融、塑化, 提高成型效率, 但引起分子链断裂问题限制了 UPM 技术在要求高强度和高耐磨性 UHMWPE 制品中的应用。

3.3 脉冲振动模压 (PVM) 成型

脉冲振动模压 (PVM) 成型针对上述问题, 通过引入脉冲振动压力场实现 UHMWPE 低温高效成型, 使 UHMWPE 初生态粒子在周期性变化的压力下经历致密化、烧结、冷却结晶等过程, 利用振动力场促进分子链运动, 实现低温下的高效界面熔合^[19-24]。

成型温度是影响 PVM-UHMWPE 性能的关键因素。胡松喜等人^[19]的研究表明, PVM 的低温成型能保留 UHMWPE 部分初生相特征结构, 提高整体结晶度和晶片厚度, 赋予 PVM-UHMWPE 样品更高的力学强度和抵抗磨损能力, 并且随着成型温度的提高, 颗粒界面熔合质量提升。

振动频率是 PVM 成型另一个重要参数。王瑞松发现在致密化阶段施加振动可促进颗粒相互运动并诱导生热, 提高致密化程度; 在烧结阶段施加振动可促进颗粒界面处分子链运动扩散, 当频率为 0.2 Hz 时, 熔体的损耗因子最大, 链段的运动能力最强; 在冷却结晶阶段施加振动有利于上侧熔体向下侧流动补缩, 诱导大分子链沿环向流动取向, 提高拉伸性能与耐磨性能^[20]。

4 技术对比与发展趋势

4.1 不同模压成型技术对比

不同模压成型技术对比见表 1。

表 1 UHMWPE 不同模压成型技术对比

技术特点	静态模压 (CM) ^[1-3]	高速冲击模压 (HVC) ^[13-15]	超声模压 (UPM) ^[16-18]	脉冲振动模压 (PVM) ^[19-21]
成型温度	高 (> 200°C)	低 (~130°C)	中低	低 (150-180°C)
成型周期	长 (数小时)	短 (数分钟)	短	较短
初生相保留	基本不保留	部分保留	部分保留	大量保留
界面熔合质量	良好 (高温长时间)	较差	中等	良好
分子量保持	良好	良好	易降低	良好
结晶度	较低	较高	中高	高
机械强度	高但耐磨性差	高硬度高模量	中等	高机械强度和高耐磨
主要局限性	效率低、能耗高	界面熔合差、韧性低	分子链可能断裂	工艺参数优化复杂

4.2 UHMWPE 模压成型技术的发展趋势

未来 UHMWPE 模压成型技术的发展将主要集中在以下几个方向:

低温高效成型是主要趋势。各类动态模压技术的研究表明,通过引入动态力场,可在远低于传统 CM 成型的温度下实现 UHMWPE 的有效成型,既能保留初生相结构,又能提高界面熔合质量,实现"自增强"效果。这一方向有望解决传统 CM 成型中高温与长时间保温导致的效率低下和结构破坏问题。

工艺优化与精准控制是动态模压技术实用化的关键。由于动态模压成型参数具有多样化、复杂化和耦合化等特点,如何快速确定最优工艺参数是一大挑战。新兴的优化方法,如通过构建产品性能响应面快速进行不同产品的性能最优参数选择,有望显著提高工艺优化效率。

模具设计与优化对制品性能的影响也受到越来越多关注。合理的模具设计可以在保持制品强度的同时提高其韧性。

5 结论与展望

本文系统综述了 UHMWPE 模压成型技术的研究进展,重点分析了静态模压 (CM)、高速冲击模压 (HVC)、超声模压 (UPM) 和脉冲振动模压 (PVM) 四种成型技术的特点及其对 UHMWPE 结构和性能的影响。CM 成型存在成型周期长及制品机械强度低等问题。动态模压技术通过引入动态力场,显著降低了成型温度,缩短了成型周期。在各类动态模压技术中,脉冲振动模压 (PVM) 技术在实现低温高效成型的同时,其制品兼具高机械强度和高耐磨性。未来 UHMWPE 模压成型技术的研究将更加注重低温高效成型、工艺精准控制以及制品性能可设计性。

参考文献

- [1] Nayak C, Ariharan S, Kundu B, et al. Radiation-induced effects on micro-scratch of ultra-high molecular weight polyethylene biocomposites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11(1): 2277-2293.
- [2] Yang S, Li J C, Qiu Z, et al. Effects of the sintering temperature on the superior cryogenic toughness of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE)[J]. Chemical Engineering Journal, 2022,

444: 136366.

- [3] Phillips R A. Morphology and melting behavior of nascent ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 2015, 36(3): 495-517.
- [4] Wahyudi M, Putra Y E, Arrohman S, et al. A comparison between mechanical properties of UHMWPE from ram extrusion process and UHMWPE from compression molding process for a hip joint liner[J]. Iop Conference, 2018, 432: 1-8.
- [5] Fu J, Ghali B W, Lozynsky A J, et al. Ultra-high molecular weight polyethylene with improved plasticity and toughness by high temperature melting[J]. Polymer, 2010, 51(12): 2721-2731.
- [6] 赵佳. 超高分子量聚乙烯模压成型研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [7] Kurtz S M. UHMWPE Biomaterials Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices[M]. 3rd ed. Oxford: Matthew Deans, 2016: 1-3.
- [8] Wood W. Processing, Wear, and Mechanical Properties of Polyethylene Composites Prepared with Pristine and Organosilane-treated Carbon Nanofibers[D]. Washington State University, 2012.
- [9] Kurtz S M. Editorial Comment: Advances in UHMWPE Biomaterials[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 2015, 473(3): 926-927.
- [10] Trainor A, Haward R N, Hay J N. The effect of density on the properties of high molecular weight polyethylenes[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 1977(15): 1077-1088.
- [11] Wu J J, Buckley C P, O'Connor J J. Processing of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: Modelling the Decay of Fusion Defects[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2002, 80(5): 423-431.
- [12] Galeski A. Strength and toughness of crystalline polymer systems[J]. Progress in Polymer Science, 2003, 28(12): 1643-1699.
- [13] Deplancke T, Lame O, Rousset F, et al. Diffusion versus cocrystallization of very long polymer chains at interfaces: experimental study of sintering of UHMWPE nascent powder[J]. Macromolecules, 2013, 47(1): 197-207.
- [14] Jauffrès D, Lame O, Vigier G, et al. Yield, creep, and wear

- properties of ultra-high molecular weight polyethylene processed by high velocity compaction[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 110(5): 2579-2585.
- [15] Jauffrès D, Lame O, Vigier G, et al. Microstructural origin of physical and mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene processed by high velocity compaction[J]. *Polymer*, 2007, 48(21): 6374-6383.
- [16] Liang X, Liu Y J, Chen S G, et al. Fabrication of microplastic parts with a hydrophobic surface by micro ultrasonic powder moulding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 180-188.
- [17] 梁雄. 聚合物微塑件超声模压粉末成型方法及其塑化机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [18] Sánchez X, Hernández A M, Elizalde L E, et al. Micro injection molding processing of UHMWPE using ultrasonic vibration energy[J]. *Materials and Design*, 2017, 132: 1-12.
- [19] 胡松喜, 李璞, 杨森泉. 成型温度对脉振模压成型自增强 UHMWPE结构与性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(4): 101-109.
- [20] 王瑞松. 超高分子量聚乙烯中空制件脉振模压成型及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [21] 冯彦洪, 江翎雯, 张桂珍. 超高分子量聚乙烯分子链缠结调控技术研究进展[J]. *高分子通报*, 2022, 6: 13-21.
- [22] 冯彦洪, 瞿金平, 殷小春, 等. 一种超高分子量聚合物异型制件成型方法及设备: 中国, CN107696378A[P]. 2018.02.16.
- [23] 冯彦洪, 王瑞松, 胡松喜, 等. 一种取向可控的超高分子量聚合物异型制件成型设备: 中国, CN113021725A[P]. 2021.06.25.
- [24] Hu S X, Feng Y H, Yin X C, et al. Structure and properties of UHMWPE products strengthened and toughened by pulse vibration molding at low temperature[J]. *Polymer*, 2021, 229: 124026.