

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.016

气体辅助技术对PVC-U管材挤出扩张成型的影响机制

彭佳彬¹, 匡唐清¹, 高聪², 高上森³, 黄佳伟⁴, 柳和生¹

(1. 华东交通大学机械与车辆工程学院, 南昌 330000; 2. 江西联塑科技实业有限公司, 南昌 330000;
3. 华东交通大学基础实验与工程实践中心, 南昌 330000; 4. 华东交通大学材料科学与工程学院, 南昌 330000)

摘要:针对硬质聚氯乙烯(PVC-U)管材传统挤出扩张成型工艺中普遍存在的拉伸强度不足、摩擦阻力大以及成型效率偏低等技术瓶颈,提出了一种气体辅助挤出扩张成型新工艺。传统成型过程中熔体与模具壁面间的强剪切作用易导致挤出胀大明显、壁厚分布不均及分子链取向紊乱,从而制约管材力学性能与生产效率。为系统揭示气体辅助成型的作用机制,本研究采用数值模拟方法,基于流体动力学理论建立了PVC-U熔体在扩张流道中的二维轴对称黏弹性模型,利用Polyflow软件对比分析传统扩张与气辅扩张两种模式下熔体的速度场、壁厚分布及第一法向应力差的变化规律。模拟结果表明,气辅扩张技术通过在模壁与熔体界面引入稳定气膜层,显著降低了熔体与模具间的摩擦阻力,有效抑制了挤出胀大现象;同时,熔体在扩张区域的轴向与径向速度分量均得到提升,促使大分子链沿流动方向择优取向,从而改善了熔体在扩张过程中的流动稳定性与壁厚均匀性。实验与性能测试结果表明,相较于传统工艺,气辅扩张成型管材的轴向拉伸强度提升约4.43%,环向拉伸强度提升约3.95%。为进一步优化成型效果,在扩张段引入冷却风环进行局部降温,使熔体温度场更趋合理,实验表明冷却后管材轴向拉伸强度相较于传统扩张成型的提升6.68%,环向拉伸强度提升11.5%。综上,气体辅助挤出扩张成型结合冷却风环调控可显著提升PVC-U管材的综合力学性能,为高性能塑料管材的绿色高效成型提供了新思路与技术支撑。

关键词:硬质聚氯乙烯管材;气辅扩张;拉伸强度;数值模拟;分子取向

中图分类号:TQ320.66 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)04-0143-09

Influence mechanism of gas-assisted technology on PVC-U tube extrusion expansion forming

PENG Jiabin¹, KUANG Tangqing¹, GAO Cong², GAO Shangsen³, HUANG Jiawei⁴, LIU Hesheng¹

(1. School of Mechatronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330000, China; 2. Jiangxi Liansu Technology Industrial Co., Ltd., Nanchang 330000, China; 3. Center for Basic Experiment Practice, East China Jiaotong University, Nanchang 330000, China; 4. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330000, China)

Abstract: A novel gas-assisted extrusion expansion molding process to address the prevalent technical challenges namely insufficient tensile strength, high frictional resistance and low forming efficiency, in the conventional extrusion expansion molding of unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U) pipes was proposed. The strong shear effect between the melt and the mold wall during traditional processing often leads to significant extrusion swelling, uneven wall thickness distribution, and disorder in molecular chain orientation, consequently compromising the mechanical properties and production efficiency of the pipes. To systematically elucidate the mechanism of the gas-assisted method, a two-dimensional axisymmetric viscoelastic model of PVC-U melt within the expansion channel was established based on fluid dynamics theory using numerical simulation. The velocity field, wall thickness distribution and first normal stress difference of the melt were comparatively analyzed under both conventional and gas-assisted expansion modes using Polyflow software. The simulation results indicate that by introducing a stable gas film layer at the interface between the mould wall and the melt, the gas-assisted expansion technology significantly reduces frictional resistance, effectively suppresses extrusion swelling and enhances both the axial and radial velocity components of the melt in the expansion region. This promotes the orientation of macromolecular chains along the flow direction, thereby improving flow stability and wall thickness

通信作者: 匡唐清, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为聚合物成型工艺

收稿日期: 2026-01-26

引用格式: 彭佳彬, 匡唐清, 高聪, 等. 气体辅助技术对PVC-U管材挤出扩张成型的影响机制[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(4): 143-151.

PENG Jiabin, KUANG Tangqing, GAO Cong, et al. Influence mechanism of gas-assisted technology on PVC-U tube extrusion expansion forming[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 143-151.

uniformity during the expansion process. Experimental results and performance tests demonstrate that compared to the conventional process, the axial tensile strength of pipes formed by gas-assisted expansion molding is increased by approximately 4.43%, and the hoop tensile strength is increased by approximately 3.95%. To further optimize the forming effect, a cooling air ring was introduced in the expansion section for localized temperature reduction, leading to a more favorable melt temperature field. The experiment show that axial tensile strength of the pipe after cooling is increased by 6.68% compared to traditional expansion molding, and the circumferential tensile strength is increased by 11.5%. In conclusion, the combination of gas-assisted extrusion expansion molding with cooling air ring control can significantly improve the comprehensive mechanical properties of PVC-U pipes, providing a novel approach and technical support for the green and efficient forming of high-performance plastic pipes.

Keywords: PVC-U pipe ; gas-assisted expansion ; tensile strength ; numerical simulation ; molecular orientation

硬质聚氯乙烯(PVC-U)管材在现代工业与基础设施建设中扮演着至关重要的作用,其性能的提升对高端装备的制造与运输有着重要意义^[1-2]。但是目前传统挤出的PVC-U管材已难以满足高环向强度和承压能力等需求^[3],管道自增强扩张成型技术是通过物理形变诱导分子链取向,实现管材力学性能的提升^[4-5],为此,国内外学者对其工艺流程开展了深入的研究^[6-8],Teoh等^[9]提出旋压成型法,通过旋压机对料胚进行取向增强,不仅节省了材料,且通过旋压成型的管件环向强度以及韧性都得到了提升。杨明华^[10]对PVC-U管材挤出机的机头进行改进,探究了PVC-U管材双轴取向自增强原理及生产装置,使管材的环向强度得到大大提高。张博^[11]提出PVC管布袋法连续扩张装置,通过对尼龙布袋内充入高压气体对处于高弹态的管坯进行径向扩张,然后放气以对管材进行连续的径向扩张。潘雨曦^[12]借助ANSYS-Polyflow软件,开发出一种创新的三段式环向扩张口模,仅凭口模内部的流场优化即诱导产生显著的分子链取向,实现了无需外力的管内自增强。

针对上述“二次成型”工艺的缺陷,本文提出一种“在线拉伸扩张”的新型工艺思路。其核心在于在PVC-U料胚挤出模口后,将其快速冷却至适宜的高弹态温度区间,随即直接进行扩张取向,最后进入真空水箱一次定型,这一思路旨在将材料的取向过程直接嵌入至连续挤出生产线中,可解决二次加热带来的效率与成本问题。而气体辅助挤出技术通过在口模内壁与熔体之间引入一层稳定的气体润滑膜,能有效消除熔体在口模内的应力集中,显著降低挤出胀大、抑制“鲨鱼皮”等熔体破裂现象^[13-16],使得在传统挤出过程中管坯刚从口模挤出、形状尚未稳定且对温度敏感的状态下实现均匀、稳定的挤出,且气辅技术能改善管材离开口模时的应力状态和外形尺寸,通过改变材料的流变状态,影

响其进入扩张段时的分子取向,进而影响管材的性能。本研究将气体辅助技术引入上述新型在线扩张工艺中(简称气辅挤出扩张),探索气辅润滑在管坯挤出段对后续扩张行为的影响机制。通过Polyflow软件建立PVC-U管材的二维轴对称气辅挤出扩张模型,对比传统与气辅挤出扩张两种模式下外形尺寸及物理场的变化,探究气辅技术在PVC-U管材挤出扩张中的影响机制及适用性。

1 模型建立与数值计算方法

1.1 几何模型建立

使用的有限元几何模型如图1所示,在口模内熔体的内直径为82 mm,扩张后管材的内直径为100 mm, $AA_1=DD_1=FF_1=4$ mm,扩张前后管材的壁厚不变。计算一共分为四个子域,其中 AA_1BB_1 为口模内熔体区域, BB_1CC_1 为熔体挤出口模后空冷段, CC_1DD_1 为熔体扩张区域,在气辅扩张时该区域 C_1D_1 为气辅段, DD_1FF_1 为扩张后的定型段。 $L_{AB}=L_{DE}=L_{EF}=20$ mm, $L_{BC}=100$ mm, $\angle_{B_1C_1D_1}=170^\circ$,扩张角为 10° ,记为 α 。

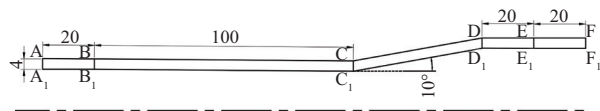


图1 熔体挤出扩张几何模型

Fig. 1 Melt extrusion expansion geometric model

1.2 控制方程与本构方程

由于在聚合物挤出成型过程当中熔体和气体耦合流动十分复杂,在实际模拟过程中难以描述其行为,因此需要将聚合物熔体简化成不可压缩流体,且忽略惯性力和重力对两种流体的影响。根据上述简化得出控制方程及本构方程如下。

连续方程见式(1)。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\nu} = 0 \quad (1)$$

动量方程见式(2)。

$$\nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

式(1)与式(2)中: ∇ 为哈密尔顿算子; ν 为速度矢量, m/s; p 为熔体静压力, kPa; τ 为偏应力张量, Pa。

由于熔体的高黏弹性,本构方程选用 Phan-Thien-Tanner 本构模型^[17], 见式(3)至式(7)。

$$\tau_1 + \tau_2 = \tau \quad (3)$$

$$\tau_2 = 2\eta_2 D \quad (4)$$

$$\eta_1 + \eta_2 = \eta_0 \quad (5)$$

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{\eta_1} \text{tr}(\tau_1)\right] \tau_1 + \lambda\left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \dot{\tau}_1 + \frac{\xi}{2} \dot{\tau}_1 = 2\eta_1 D \quad (6)$$

$$S = \frac{\eta_2}{\eta_0} \quad (7)$$

式(3)至式(7)中: τ 为总应力张量, Pa; τ_1 为弹性偏应力张量, Pa; τ_2 为黏性偏应力张量, Pa; $\dot{\tau}_1$ 为偏应力张量的上随体时间导数; $\text{tr}(\tau_1)$ 为 τ_1 的迹; λ 为松弛时间, s; ε 为相关材料拉伸参数; ξ 为相关材料剪切参数; η_0 为零剪切黏度, Pa·s; η_1 、 η_2 为零剪切黏度弹性和黏性分量, Pa·s; D 为形变速率张量, s⁻¹; S 为零剪切黏度中黏性分量比例。

温度相关的黏度 $H(T)$ 定律使用 Arrhenius 方程^[18], 见式(8)。

$$H(T) = \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_\alpha - T_0}\right)\right] \quad (8)$$

式中: α 为活化能(E_a)与气体常数(R)的比值, T_α 为 $H(T)=1$ 时的参考温度, K; T 为研究熔体的温度, K; T_0 为绝对零度(0 K)。

1.3 物性参数

聚合物熔体为 PVC-U, 实际生产中为了保证 PVC-U 管材的冲击强度与加工性能, 生产 PVC-U 管材的熔体由 PVC-SG5 型树脂(江西联塑科技实业有限公司生产)及其相关加工助剂组成, 密度为 1 430 kg/m³, 环境温度设定为 293 K, PTT 本构方程及 Arrhenius 方程参数见表 1 和表 2。

表 1 PTT 本构方程参数

Tab. 1 Parameters of PTT constitutive equation

η_0 /(Pa·s)	λ /s	ε	ξ	S
56 041	0.05	0.147	0.296	0.008 93

Notes: η_0 is zero-shear viscosity; λ is relaxation time; ε is relevant material extensional parameter; ξ is relevant material shear parameter; S is proportion of viscous component in zero-shear viscosity.

1.4 边界条件的设定

入口边界: 熔体入口边界 AA_1 设置为体积流率入口, 给定入口流率为 $Q=1\times 10^{-5}$ m³/s, 熔体入口温度 453 K。

表 2 Arrhenius 方程参数

Tab. 2 Parameters of Arrhenius equation

E /(kJ·mol ⁻¹)	k /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	C_p /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
20	0.15	2 800

Notes: E is activation energy; k is thermal conductivity; C_p is specific heat capacity at constant pressure.

壁面边界: 气辅扩张时 AB 、 A_1B_1 是挤出机口模为壁面无滑移边界, 切向速度 $v_s=0$, 法向速度 $v_n=0$, 温度设置为 453 K。 B_1F_1 为气辅滑移段, 采用简化的 Navier 滑移模型, 滑移系数为 $F_{slip}=10^4$ 。传统扩张时: AB 、 A_1B_1 、 B_1F_1 是挤出机口模壁面无滑移边界, 切向速度 $v_s=0$, 法向速度 $v_n=0$ 。

自由表面: 不管是传统扩张还是气辅扩张, BF 段都为自由表面, 熔体挤出口模后 BF 面的位置是未知的, 需要作为一部份解进行计算, $v_n=0$, 切向力 $f_s=0$, 法向力 $f_n=0$, 由于外界与熔体表面存在热交换, 将其设置为热通量条件, 外部环境设定为 293 K。

熔体出口: FF_1 为熔体出口, 传统扩张挤出与气辅扩张挤出牵引速度均设置为 $v_n=7$ mm/s, 由于熔体末端温度未知, 热边界条件设定为 outflow。

1.5 网格划分及无关性验证

本文的几何模型网格划分采用四边形结构化网格, 网格的密集程度会影响各局部物理场的数值精确度, 为了排除网格划分不合理造成的计算误差, 在确保较高的计算准确率前提下加快计算效率, 需要进行网格无关性分析用来获取合理的网格数量。分别对 848、2 029、3 392、5 677 和 7 829 五个不同网格数量的数值模型进行计算, 并在不同子域交界处进行网格加密, 以计算域终端管材熔体壁厚作为评判标准, 分析不同网格数量对计算结果准确度的影响, 结果如图 2 所示, 当网格数量大于 3 392

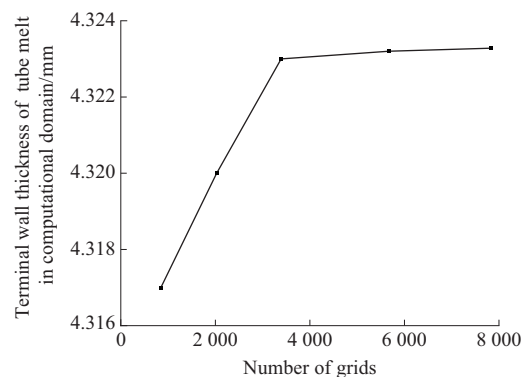


图 2 计算域终端管材熔体壁厚随网格数量的变化

Fig. 2 Variation of pipe extrudate melt wall thickness with number of mesh elements in computational domain terminal

时,计算域终端管材熔体壁厚变化不明显,可知在此网格数量条件下,可兼顾计算准确性与效率。网格划分如图3所示,数量为3 392。



图3 网格划分图

Fig. 3 Computational mesh diagram

2 模拟结果分析

2.1 速度场分析

2.1.1 对熔体轴向速度影响

相比于传统挤出,挤出扩张成型在挤出口模后面接入了扩张口模,传统挤出成型熔体受到挤出口模的影响,在熔体挤出口模后熔体的流速并不均匀,存在一定的速度差。同时由于扩张模具的存在使得熔体的流动更加复杂,在传统挤出扩张时熔体与扩张模具之间存在较大的摩擦,对熔体的流动影响较大。而气辅挤出扩张时高压气体在熔体与扩张模具之间形成气垫层,大大降低了熔体与口模之间的摩擦。如图4a和图4b所示,分别为传统挤出扩张熔体和气辅挤出扩张熔体在轴向上的速度云图。

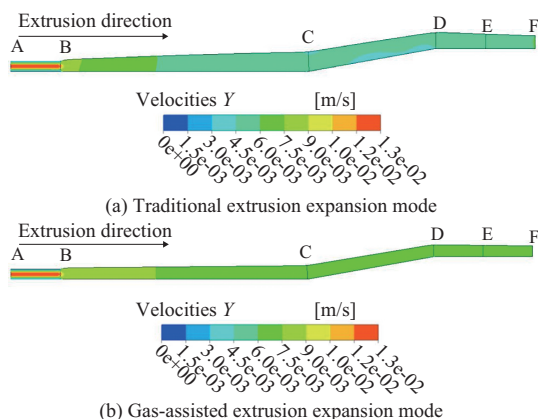


图4 不同模式下熔体沿挤出方向轴向速度云图

Fig. 4 Cloud diagram of axial velocity of melt along extrusion direction under different modes

气辅挤出扩张成型相比传统挤出扩张成型,熔体的轴向速度在扩张段更加均匀,且熔体的轴向速度呈梯度下降;而采用传统挤出扩张成型时熔体在扩张段轴向速度波动较大,尤其是在扩张的初始位置以及扩张的末端位置尤为明显。这是因为气体辅助通过壁面滑移消除了近壁区的速度死区,使轴向速度分布由抛物线变为平头状,同时通过降低法向应力抑制胀大、促进分子取向,从而整体提升了扩张段熔体的轴向输送效率与分布均匀性。

图5为气辅挤出扩张和传统挤出扩张过程中熔体内、外表面轴向速度变化曲线。由图5可知,熔体从口模被挤出后,内、外表面轴向速度突增,传统挤出扩张成型熔体内、外表面轴向速度分别从0 mm/s增大到8.20 mm/s以及8.22 mm/s。而气辅挤出扩张成型时熔体内、外表面轴向速度分别从0 mm/s增大到8.28 mm/s以及8.34 mm/s。不管是传统挤出扩张还是气辅挤出扩张,熔体的外表面速度增量都大于内表面速度,并且在口模出口达到最大值后开始呈下降趋势,离扩张段越近下降趋势越平缓。这是因为从几何路径看,扩张区(100~151 mm)外表面沿锥形模壁流动,其径向扩张幅度远大于内表面,为满足流量守恒,截面积剧烈增大迫使外表面熔体需要更大的轴向加速度来填补流道空间。从受力状态分析,外表面处于拉伸扩张主导区,轴向压力梯度更大,且径向拉伸会诱导轴向加速,而内表面靠近芯棒,受剪切或压缩阻滞更强,即使气辅降低了摩擦,但扩张带来的压力差依然存在。

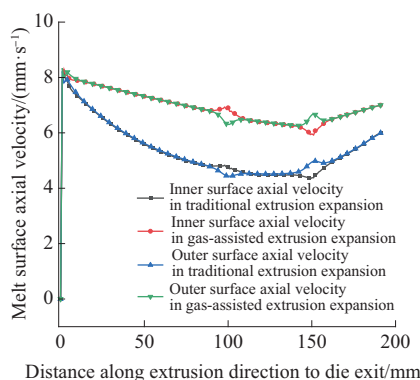


图5 不同挤出扩张模式下熔体表面沿挤出方向轴向速度分布曲线

Fig. 5 Axial velocity distribution curves of melt surface along extrusion direction under different extrusion expansion modes

此外,外表面熔体因靠近高温机筒且剪切生热显著,温度更高、黏度更低,在相同压差下更易被加速,内表面因芯棒冷却而黏度较高,动态响应较慢。气辅工艺虽通过气膜滑移同时提升了内、外表面的速度增量,但并未改变外表面扩张幅度大、驱动力强、流动性好的固有优势,因此其速度增量绝对值仍更大。在临近扩张段位置时由于扩张模具的存在对熔体的流动产生影响,熔体的上、下表面开始出现不同的变化趋势,贴近扩张模具的熔体内表面轴向速度呈先增大后减小趋势,远离扩张模具的熔体外表面轴向速度呈先减小后增大的趋势,在扩张段即 $x=100$ mm至 $x=151$ mm处,不管是传统挤出扩张还是气辅挤出扩张成型,熔体的内表面的轴向速

度最大值以及外表面轴向速度最小值都出现在扩张模具的初始段 $x=100\text{ mm}$ 处。在 $x=108\text{ mm}$ 至 $x=144\text{ mm}$ 时,同种模式下熔体的内、外表面的轴向速度趋于一致。在 $x=144\text{ mm}$ 至 $x=151\text{ mm}$ 时两种模式下熔体的内表面的轴向速度呈减小的趋势,直到 $x=151\text{ mm}$ 处时内表面轴向速度达到最小:传统挤出扩张时熔体内表面速度为 4.34 mm/s ,气辅挤出扩张时熔体内表面速度为 5.92 mm/s ,在 $x=144\text{ mm}$ 至 $x=151\text{ mm}$ 时两种模式下熔体的外表面轴向速度呈增大的趋势,在 $x=151\text{ mm}$ 时停止增大,此时气辅挤出扩张熔体外表面速度为 6.66 mm/s ,传统挤出扩张时熔体外表面速度为 4.98 mm/s 。随后两种模式下的外表面轴向速度呈先减小后增大的趋势,内表面轴向速度呈增大趋势。在 $x=162\text{ mm}$ 时两种模式下的内、外表面轴向速度趋于一致,且轴向速度在牵引的作用下持续增大,直至计算域终端;同时也可以发现在整个过程中气辅挤出扩张相比于传统挤出扩张在熔体被挤出口模后熔体的内、外表面的轴向速度都更大,在计算域终端气辅挤出成型的内(外)表面的轴向速度为 $v=6.98\text{ mm/s}$,而传统挤出扩张成型的内外表面的轴向速度为 $v=6.12\text{ mm/s}$ 。

2.1.2 对熔体径向速度的影响

为了分析挤出扩张对管材径向强度影响的内部机理,以及气辅在挤出扩张过程对熔体流动情况的影响,在数值分析后得到熔体挤出扩张以及气辅挤出扩张的径向方向上的速度云图,如图6a和图6b所示。在熔体被挤出口模后,熔体的外表面径向速度迅速向沿挤出方向正方向增大,而熔体的内表面径向速度则是迅速向沿挤出方向负方向增大。这是因为在口模内熔体积蓄了较大的弹性势能,在熔

体被挤出口模后弹性势能得到释放,发生挤出胀大现象,导致熔体的径向速度发生突变。

在空冷段从仿真结果的熔体径向云图中分别导出熔体的上、下表面径向速度数据,得到沿挤出方向的熔体内表面速度变化曲线,如图7所示。

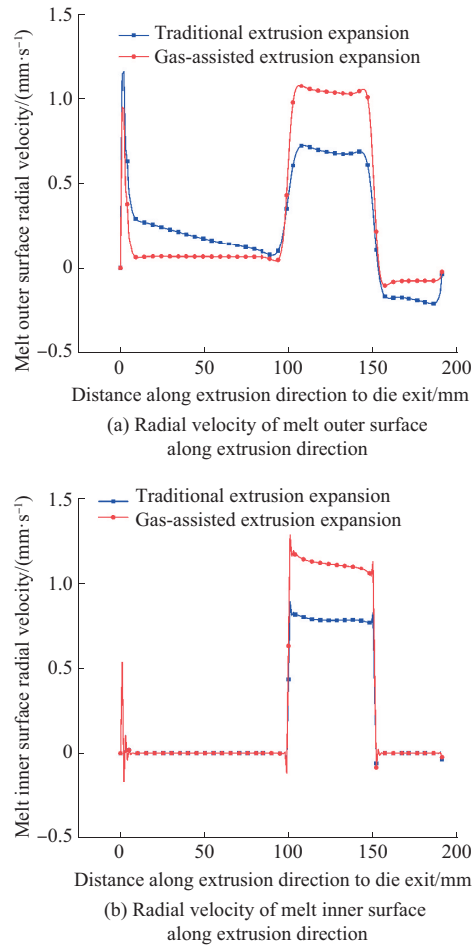


图7 不同挤出扩张模式下熔体沿挤出方向径向速度变化曲线
Fig. 7 Radial velocity variation curves of melt along extrusion direction under different extrusion expansion modes

从图7a可以看出,不管是挤出扩张成型还是气辅挤出扩张成型,熔体在离开口模后其外表面径向速度都急剧增大,且气辅挤出扩张增大后的值大于传统挤出扩张,随后熔体储存的弹性势能释放完毕后,熔体外表面的径向速度开始降低,且能发现气辅挤出扩张的降低速率大于传统挤出扩张;由图7b中可看出,在空冷段,两种模式下的扩张挤出熔体内表面径向速度变化几乎一致;在扩张段时,传统扩张还是气辅扩张熔体在扩张段的径向速度在扩张段的初始段都急速增大;结合图7a来看可发现熔体的内表面的增大速率大于熔体外表面的增大速率,这是因为熔体的内表面与扩张模具之间直接接

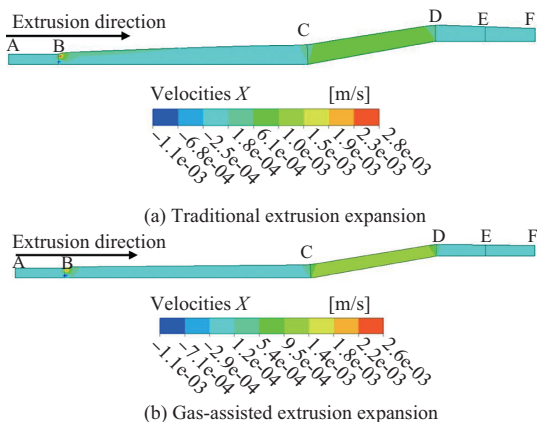


图6 不同模式下熔体沿挤出方向径向速度云图
Fig. 6 Contour map of radial velocity of melt along extrusion direction under different modes

触,所以熔体的内表面径向速度发生突增,而熔体的外表面不与扩张模具直接接触。在 $x=100\text{ mm}$ 处,熔体的内表面径向速度达到最大值,此时传统挤出扩张内表面径向速度最大值为 0.82 mm/s ,气辅挤出扩张内表面径向速度最大值为 1.25 mm/s ,而熔体外表面径向速度在 $x=108\text{ mm}$ 时才达到最大值。在扩张段,气辅挤出扩张熔体的径向速度要大于传统挤出扩张,这是因为气辅挤出扩张时,由于扩张段气辅的存在使得熔体与扩张模具之间的摩擦力大大减小,这就使得熔体在扩张时的阻力减小,所以气辅挤出扩张成型时熔体的表面径向速度大于传统挤出扩张成型的。同样地,在扩张段的末端熔体的径向速度急速减小,也是因为扩张模具对熔体的作用力突然减小导致熔体的径向速度也随之减小。虽然在扩张段的初始位置和末端位置,传统挤出扩张和气辅挤出扩张熔体的径向速度的增大的最大值与减小的最小值都相差不大,但是在扩张段的中间段,气辅挤出熔体的径向速度明显大于传统挤出扩张时熔体的径向速度,在扩张段熔体的径向速度的变化有助于熔体径向方向上获得更好的取向,而气辅扩张相比于传统扩张熔体的径向速度更大,所以气辅的存在不仅可以降低扩张时熔体与扩张模具之间的摩擦力,还更有助于获得更好的径向取向,提高制品的径向力学性能。

2.2 熔体壁厚分析

在对管材进行挤出扩张时,在扩张段管材受到的摩擦力较大,管材成型较为困难。在扩张段加入气辅可以有效地减小管材与扩张模具之间的摩擦力,同时因为气辅的存在对熔体的流动也会产生影响,而熔体流动情况的改变对熔体的壁厚也会有一定的影响。

通过数值模拟得到熔体在无气辅挤出扩张以及有气辅挤出扩张两种情况的熔体形貌变化图。传统挤出扩张熔体壁厚 x 沿挤出方向变化云图如图8a所示,气辅挤出扩张熔体壁厚 x 沿挤出方向变化云图如图8b所示。从图8中可以发现,不管是传统挤出扩张还是气辅挤出扩张,在熔体被挤出口模后都发生挤出胀大现象,而在扩张过程中传统挤出扩张与气辅挤出扩张熔体的壁厚大小变化却不一样。在测量熔体壁厚时,AC和DF段壁厚为内外表面径向尺寸之差,而扩张段即CD段壁厚计算公式见式(9),经过测量之后所得到不同工艺熔体的挤出胀大

率 B 由式(10)计算得出。

$$R_0 = (R_1 - R_2) \times \cos \alpha \quad (9)$$

式中: R_0 为扩张段处壁厚; R_1 为扩张段处外径尺寸; R_2 为扩张段处内径尺寸; α 为扩张角度。

$$B = \frac{R_3 - R}{R} \times 100\% \quad (10)$$

式中: R_3 为管材熔体末端壁厚; R 为管材熔体初始壁厚。

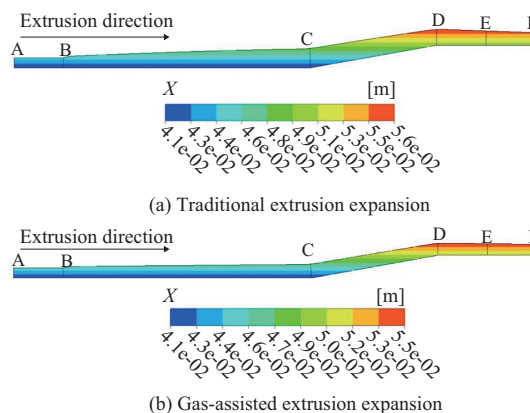


图8 不同挤出扩张模式下熔体壁厚 x 沿挤出方向变化云图

Fig. 8 Contour map of variation of melt wall thickness x along extrusion direction under various extrusion expansion modes

图9为沿挤出方向管材熔体壁厚变化曲线。从图9可以看出,在 $x=1\text{ mm}$ 时,熔体被挤出口模发生挤出胀大现象,熔体的壁厚迅速增大,在进入扩张段时,熔体壁厚开始减小,无论熔体壁厚增大还是减小,传统挤出扩张成型的壁厚变化的速率都大于气辅挤出扩张成型。在扩张段的初始位置以及扩张段的末端位置熔体的壁厚波动较大,在扩张段的初始位置也就是 $x=100\text{ mm}$ 时,熔体的壁厚的变化曲线出现一个波峰,此时传统、气辅挤出扩张熔体的壁厚分别为 7.61 、 5.47 mm 。在这之后,不管是传统挤出扩张还是气辅挤出扩张,熔体的壁厚开始减小。而在扩张段的末端位置,也就是 $x=151\text{ mm}$ 时,熔体的壁厚变化曲线出现一个波谷,此时传统和气辅挤出扩张成型熔体的壁厚分别为 6.11 、 4.61 mm 。在这个阶段熔体的壁厚变化与熔体的速度有关,根据图5可知,在扩张段的初始位置熔体的外表面速度也出现一个波谷,此时熔体的外表面轴向速度呈先减小后增大的趋势会导致熔体在该阶段出现少量堆积,而在扩张段的末端位置,熔体的外表面轴向速度呈先增大后再减小的趋势,熔体受到拉伸,使得在该处熔体的壁厚减小。在成型段的末端,传统挤出扩张成型熔体的壁厚为 5.01 mm ,熔体胀大

率为25.3%。气辅挤出扩张成型熔体的壁厚为4.32 mm,熔体胀大率为8%。从熔体胀大率的对比可以发现,气辅的存在可以有效降低熔体的壁厚,气辅挤出扩张成型可以有助于生产取向即力学性能更好且壁厚更均匀的管材制品。

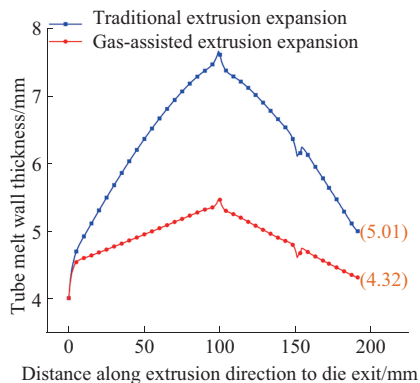


图9 沿挤出方向管材熔体壁厚变化曲线

Fig. 9 Variation curves of tube melt wall thickness along extrusion direction

2.3 第一法向应力差分析

在聚合物挤出成型中,第一法向应力差 $N1$ 通常用来表征熔体储存弹性势能的大小,弹性势能的释放会导致熔体发生胀大,于是通过 $N1$ 的大小可以判断熔体胀大的程度。如图10所示,为两种挤出扩张模式下扩张段熔体沿挤出方向 $N1$ 的分布云图,从图中可看出,无论是传统挤出扩张还是气辅挤出扩张, $N1$ 的最大值均发生在熔体进入至扩张段时,且不难发现熔体内表面的 $N1$ 变化比较剧烈,而熔体外表面变化较为平稳,在扩张过程中熔体的 $N1$ 变化不明显。这是因为内表面因强剪切边界、出口压力突变及压缩主导变形,导致 $N1$ 变化剧烈;外表面因完全滑移边界、气体压力平稳衰减及拉伸主导流动,维持应力变化的平稳性。这一差异是气辅扩张成型中内外表面力学响应不对称性的本质体现。

如图11所示,为扩张段熔体内表面 $N1$ 变化曲线,从图中不难看出在熔体刚进入扩张段时,其 $N1$ 开始发生剧烈的变化,且在扩张始末,传统挤出扩张 $N1$ 均大于气辅挤出扩张,这是因为传统挤出扩张因强剪切边界导致分子链过度拉伸储能,出口约束突变诱发应力尖峰,扩张区拖曳流动加剧应力集中,而气辅扩张通过边界滑移、流场转型与均匀承载,从源头抑制了弹性应变的积累与释放,这是其 $N1$ 显著低于传统工艺的主要原因。而在扩张过程与完成扩张时,二者 $N1$ 相等。结合图9可知,气辅

挤出扩张能有效消除熔体因 $N1$ 产生的形变。

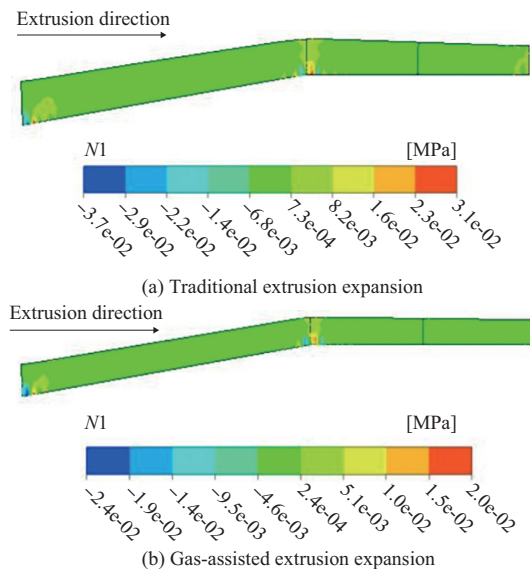


图10 不同挤出扩张模式下扩张段熔体沿挤出方向第一法向应力差分布云图

Fig. 10 Distribution contour plots of the first normal stress difference along extrusion direction in expansion zone under different extrusion expansion modes

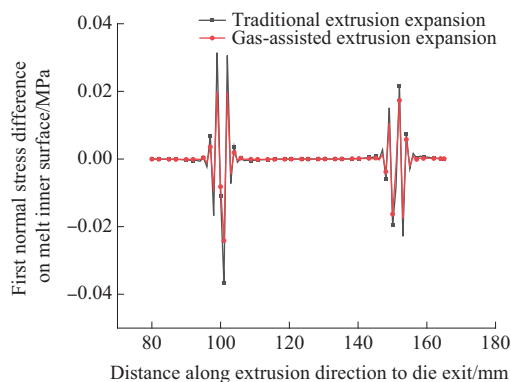


图11 扩张段熔体内表面沿挤出方向第一法向应力差变化曲线

Fig. 11 Variation curve of the first normal stress difference of inner surface of melt along extrusion direction in expansion zone

3 实验及性能测试

为验证气辅挤出扩张对管材成型的增强效果及数值模拟模型的可靠性,通过实验平台对比传统与气辅挤出扩张工艺差异,直观证实了气辅扩张的优越性。

3.1 实验过程

实验平台一共6个部分:挤出机、扩张模具、冷却水箱、进气系统、冷冻机、冷却风环。将挤出机熔体入口流率设置为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$,口模温度 180°C ,调节气体压力至 0.1 MPa 。按照步骤进行管材挤出扩张实验,得到管材挤出扩张过程如图12所示。图

12a为传统挤出扩张成型,熔体被挤出口模后经过一定的冷却到达扩张口模处,由于熔体与扩张口模直接接触存在较大的摩擦力,导致熔体在扩张口模处堆积,管材发生了破裂。图12b为气辅挤出扩张成型,在熔体与扩张模具之间形成了气垫层,熔体被挤出口模后到达扩张口模,但是与扩张模具之间没有直接接触,大大减小了熔体与扩张模具之间的摩擦力,可以有效地成型管材。

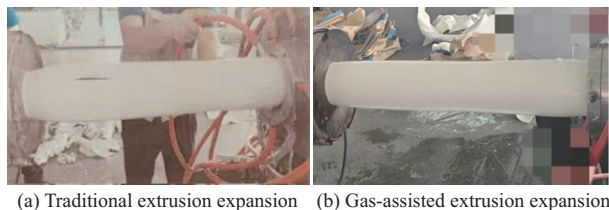


图12 两种挤出扩张模式实验对比

Fig. 12 Experimental comparison of two extrusion expansion mode

但在实验过程中通过测量扩张处管材表面温度时,发现其温度过高,熔体内部分子链的热运动比较剧烈,会导致已经形成的取向结构难以维持稳定,发生松弛现象,导致取向程度降低,影响制品最终的性能。为此,在现有实验条件下,于扩张段加装冷却风环,以降低管材表面温度。冷却风环及实验现象如图13所示。

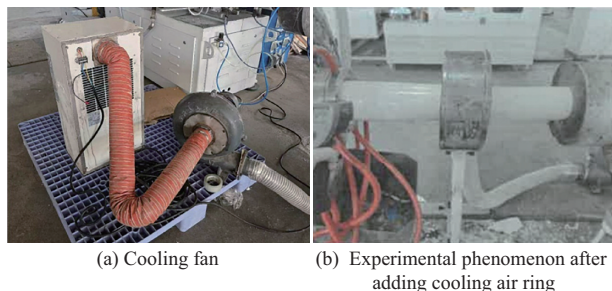


图13 冷却设备及实验现象

Fig. 13 Cooling equipment and experimental observations

3.2 性能测试

对不同条件下挤出扩张成型的管材进行了力学性能测试,重点测量了其轴向与环向拉伸强度。测试使用Zwick/Roell万能材料试验机,结果如图14所示。数据显示,普通挤出成型管材的轴向拉伸强度为45.21 MPa,而气辅挤出扩张成型管材则提高至47.21 MPa,增幅为4.42%。在环向性能方面,普通管材拉伸强度为44.56 MPa,气辅成型管材提升至46.32 MPa,增幅为3.95%。此外,降低扩张温度后,管材的轴向与环向强度均进一步上升,气辅挤出扩张成型工艺相较于传统挤出扩张工艺轴向强

度提升6.68%,环向强度提升11.3%。这是因为在较低温度下,熔体分子链热运动减弱,拉伸后的分子链在松弛前即被冷却定型,从而有利于提升拉伸强度。

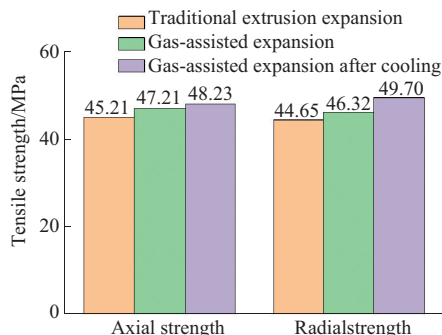


图14 不同条件下挤出扩张成型管材的轴向拉伸强度

Fig. 14 Axial and radial tensile strength of extruded expanded tubes under different conditions

4 结论

(1)从模拟结果来看,气辅扩张挤出技术通过降低挤出过程中熔体与扩张模具之间的摩擦,使得扩张段轴向速度分布更均匀,径向速度响应增强,为分子链取向提供了更优的流动环境;此外,气辅扩张挤出圆管熔体在流动过程中的第一法向应力差减小,使得熔体在离开口模时的胀大率减小,所得圆管壁厚尺寸更为精确。

(2)从实验结果来看,气辅挤出扩张使管材轴向与环向拉伸强度分别提升4.42%和3.95%;引入冷却风环降低扩张温度后,强度进一步提高,相较于传统挤出扩张工艺分别增加了6.68%和11.3%,说明了降低扩张温度后,能进一步抑制分子链松弛,增强取向效果,改善圆管的整体力学性能。

(3)以上研究在进行数值模拟时,将气体简化成完全滑移边界,且未对分子链取向演化机制做深入解析,未来可基于以上两点建立“气-液”两相耦合流动模型,结合微观结构表征手段,定量分析扩张过程中分子链取向的动态演化规律,探究各物理场与取向结构的本构关系。

参考文献

- [1] 白帆. 基于绿色施工理念的高层住宅建筑排水管道安装技术[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(17):62-64.
BAI Fan. Installation technology of drainage pipes in high-rise residential buildings based on green construction concept[J]. China Construction Metal Structure, 2025, 24(17):62-64.
- [2] 谢峰, 邓化清, 钟林, 等. 关于我国塑料管道行业企业标准技术要求的探讨[J]. 塑料工业, 2025, 53(6):31-37.

- XIE Feng, DENG Huaqing, ZHONG Lin, et al. Discussion on the technical requirements of enterprise standards in China's plastic pipeline industry[J]. *China Plastics Industry*, 2025, 53(6):31–37.
- [3] 毕广萍. 塑料管材管件的检测与应用探索[J]. *福建质量管理*, 2016(5). DOI:10.16686/j.cnki.35-1087/f.2016.05.141.
- BI Guangping. Detection and application of plastic pipes and fittings[J]. *Fujian Quality Management*, 2016(5). DOI: 10.16686/j.cnki.35-1087/f.2016.05.141.
- [4] 孙岩, 张友强, 刘美菱, 等. 自增强塑料管材的研究进展[J]. *中国塑料*, 2018, 32(1):1–6.
- SUN Yan, ZHANG Youqiang, LIU Meiling, et al. Research progress of self-reinforced plastic pipes[J]. *China Plastics*, 2018, 32(1): 1–6.
- [5] 刘斌, 谭景焕. 大直径塑料管道成型工艺的研究进展[J]. *塑料科技*, 2017, 45(6):112–117.
- LIU Bin, TAN Jinghuan. Progress in the research of forming process of large-diameter plastic pipes[J]. *Plastics Science and Technology*, 2017, 45(6):112–117.
- [6] ZATLOUKAL M, TZOGANAKIS C, VLČEK J, et al. Numerical simulation of polymer coextrusion flows: A criterion for detection of “wave” interfacial instability onset[J]. *International Polymer Processing*, 2001, 16(2):198–207.
- [7] ZARE L, AREFAZAR A, MOINI JAZANI O. Study on phase structure and properties of the toughened blends of polypropylene – polybutylene terephthalate (PP/PBT) [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2022, 31(2):153–167.
- [8] ZÁBOJ R. Influence of process conditions on the local shrinkage and on the pressure evolution inside the mold cavity of the injection molded polypropylene in two modifications -PP homopolymer; 40% talc filled PP[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 669:11–18.
- [9] TEOH S H, ONG E H. Tensile and pressure rupture behaviour of flow-formed high density polyethylene pipes[J]. *Polymer*, 1995, 36(1):101–107.
- [10] 杨明华. PVC-U管材双轴取向自增强原理及生产装置研究[D]. 成都:四川大学, 2003.
- YANG Minghua. Studying on self-reinforcement mechanism and processing equipment of biaxial stretching PVC-U pipes[D]. Chengdu:Sichuan University, 2003.
- [11] 张博. 双向自增强PVC管布袋法连续扩张装置的实验研究[D]. 北京:北京化工大学, 2009.
- ZHANG Bo. Experimental study on continuous expansion equipment of biaxial self-reinforcement pipes with cloth bag[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [12] 潘雨曦. 耐高温高性能工程塑料取向增强管道挤出研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
- PAN Yuxi. Study on orientation enhancement pipe extrusion of high temperature resistance and high performance engineering plastics[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2022.
- [13] JIANG S Y, LIU H S, HUANG X Y, et al. Improved die assembly for gas-assisted sheet extrusion using different up and down gas layer thicknesses[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2021, 61(5): 1 546–1 558.
- [14] LIU T K, HUANG X Y, LUO C, et al. The formation mechanism of the double gas layer in gas-assisted extrusion and its influence on plastic micro-tube formation[J]. *Polymers*, 2020, 12(2). DOI: 10.3390/polym12020355.
- [15] 邓小珍, 肖兵, 任重. 聚合物气体辅助挤出成型研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(3):151–158.
- DENG Xiaozhen, XIAO Bing, REN Chong(Zhong). Progress on polymer gas-assisted extrusion molding[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(3):151–158.
- [16] WEI Y B, BAI J G, ZHAO H T, et al. Study on the extrusion molding process of polylactic acid micro tubes for biodegradable vascular stents[J]. *Polymers*, 2022, 14(22). DOI: 10.3390/polym14224790.
- [17] 李萍, 承民联. 数值模拟中不同本构方程的应用[J]. *塑料科技*, 2000, 28(1):4–6.
- LI Ping, CHENG Minlian. The application of constitutive equations for polymer simulations[J]. *Plastics Science and Technology*, 2000, 28(1):4–6.
- [18] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
- XU Peixian. Polymer rheology and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.