

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.016

气体温度对 PP 圆管内外气辅挤出成型的影响

黄佳伟¹, 匡唐清², 高聪³, 高上森⁴, 柳和生¹, 彭佳彬²

(1. 华东交通大学材料科学与工程学院, 南昌 330013; 2. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013;
3. 江西联塑科技实业有限公司, 南昌 330100; 4. 华东交通大学基础实验与工程实践中心, 南昌 330013)

摘要: 以聚丙烯(PP)圆管为例,研究了气体温度对气辅挤出成型过程的影响机理。通过建立 PP 圆管的气辅挤出模型,模拟了在 413, 433, 453, 473, 493 K 五个不同气体温度下的挤出过程,研究了不同气体温度下挤出过程中熔体温度、产品外形尺寸、速度分布、第一法向应力差和剪切速率的变化。结果表明,气体温度显著影响熔体特性与产品质量。其根本原因在于,气体温度的改变直接导致熔体温度发生变化:温度升高使熔体黏度降低、流动性增强,进而影响熔体内速度分布、第一法向应力差和剪切速率。同时,圆管壁厚随气体温度升高而减小,且壁厚变化率与气体-熔体间的温差呈正相关。研究还揭示了气体具有“主动冷却”效应,即使气体与熔体温度相等,熔体在口模内的温度也不能保持不变。结合实验与数值模拟结果可知,在实际气辅挤出成型过程中气体温度应略高于熔体温度。

关键词: 气辅挤出;数值模拟;气体温度;熔体温度;聚丙烯圆管

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0117-08

Effect of gas temperature on gas-assisted extrusion processing of PP round tubes

Huang Jiawei¹, KUANG Tangqing², Gao Cong³, Gao Shangsen⁴, LIU Hesheng¹, Peng Jiabin²

(1. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Electromechanical and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Union Plastic Science and Technology Industrial Company Limited, Nanchang 330100; 4. Center for Basic and Engineering Practice, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract : This study investigated the influence mechanism of gas temperature on the gas-assisted extrusion molding process, using polypropylene (PP) round tubes as an example. A numerical model for the gas-assisted extrusion of PP round tubes was developed to simulate the process at five different gas temperatures (413, 433, 453, 473, and 493 K). The variations of melt temperature, product dimensions, velocity distribution, first normal stress difference, and shear rate were systematically analyzed at different gas temperatures. The results demonstrate that gas temperature significantly influences both the melt characteristics and the final product quality. This influence is primarily attributed to the alteration of melt temperature. An increase in melt temperature reduces melt viscosity to enhances fluidity, which consequently affects the velocity profile, the first normal stress difference, and shear rate distribution within the melt. Furthermore, the wall thickness of the round tube decreases with increasing gas temperature, and the rate of this thickness variation shows a positive correlation with the temperature difference between the gas and the melt. Another key finding is the inherent cooling effect of the gas. Even when the initial gas and melt temperatures are equal, the gas actively cools the melt, preventing it from maintaining a constant temperature within the die. Therefore, both experimental and simulation results suggest that for optimal process performance, the gas temperature should be set slightly above the melt temperature.

Keywords : gas-assisted extrusion ; numerical simulation ; gas temperature ; melt temperature ; polypropylene round tube

塑料圆管因其优异的力学性能与耐腐蚀性,在制造过程中,挤出成型凭借其高效率、低成本与过程稳定等优势,成为塑料圆管生产的首选方法^[4-5]。在众多领域已成为金属管道的理想替代品^[1-3];在各类

基金项目: 南昌市重大科技攻关项目[洪科字(2024)202号]

通信作者: 匡唐清,教授,博士生导师,研究方向为聚合物成型工艺

收稿日期: 2025-09-07

引用格式: 黄佳伟,匡唐清,高聪,等. 气体温度对 PP 圆管内外气辅挤出成型的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 117-124.

Huang Jiawei, KUANG Tangqing, Gao Cong, et al. Effect of gas temperature on gas-assisted extrusion processing of PP round tubes[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 117-124.

然而,传统的聚合物挤出过程常伴随挤出胀大、熔体破裂、鲨鱼皮^[6-9]等影响圆管质量的现象,严重影响了制品精度的提升。为克服这些难题,气体辅助挤出技术应运而生。该技术通过在挤出口模中注入高压气体,在熔体与模壁之间形成一层气膜,实现有效的“气膜润滑”,此举不仅能显著降低壁面摩擦,更有助于抑制挤出胀大,从而系统性改善传统挤出中的多种质量缺陷^[10-12]。

气辅挤出成型技术最早由Liang等^[13]提出,此技术使得熔体在口模处压降降低,挤出胀大现象得到明显改善。黄兴元^[14]通过圆棒气辅挤出实验证实,该技术能显著改善传统挤出缺陷,其研究表明,引入气体后挤出胀大率大大降低,且制品表面光洁度得到显著提升。卢臣^[15]搭建了异型材气辅挤出的数值模拟与实验平台,系统研究发现,气膜的形成能有效均衡异型材截面各点的流速,使壁厚均匀性提高,证明了该技术在复杂截面成型中同样具有良好的效果。任重^[16]首次将气辅挤出成型技术应用于微管中,建立了气-液两相的数值模型,通过内外双层气辅的方式取代完全滑移,大大减小了熔体在口模出口处的应力集中,对挤出过程中的气体压力、气体温度、螺杆转速等工艺参数进行了研究,验证了内外双层气辅在塑料微管挤出中的可行性。

基于上述气辅挤出成型技术的研究发现,气辅挤出研究与实践的核心关注点几乎全部集中于气体压力和流量的控制,均未系统揭示气体温度这一关键工艺参数对成型过程的内在影响规律。笔者将气

体温度作为与压力同等重要的独立核心工艺参数,探究了其在气辅挤出成型过程中对口模内部熔体流动的影响机理,建立了聚丙烯(PP)圆管“气-液-气”二维轴对称非等温黏弹模型,模拟在413,433,453,473,493 K五个不同气体温度条件下PP圆管气辅挤出成型过程,研究发现通过调控气体温度,可以在不改变压力参数的条件下,实现对PP圆管气辅挤出成型过程中产品壁厚、表面成型质量等的独立或协同控制。除此之外还发现高温气体在气辅挤出不仅扮演保温的角色,其自身的冷却作用同样影响着圆管熔体在口模内的流动。此研究完善了气辅挤出成型技术理论,为后续独立调控气体温度提供理论基础。

1 模型构建与数值计算方法

1.1 几何模型建立

图1所示的为PP圆管二维轴对称内外气辅挤出数值模型,此模型分为五个子域,其中ABCD为口模内无气辅熔体流动区域,CDML为口模内有气体辅助熔体流动区域,MLKJ为熔体流出口模后的自由段,EQOMDF为外气垫层,HCLNPG为内气垫层;此几何模型初始尺寸如下:圆管壁厚AB为3 mm,无气辅段长度AD为10 mm,气辅段长度DM为30 mm,进气角度 $\angle FDA$ 与 $\angle HCB$ 均为 15° ,内外气垫层厚度EF, HG为0.3 mm,自由段MJ为10 mm。圆管内径为6 mm,外径为9 mm。 d, r_1 与 r_2 分别为熔体离开口模后的圆管的壁厚、圆管熔体挤出过程中内径与外径。熔体流动方向设置为坐标轴的Y方向,径向方向设置为坐标轴的X方向。

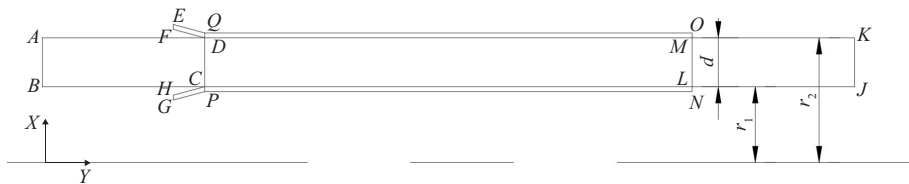


图1 二维轴对称模型

Fig. 1 Two-dimensional axially symmetric 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与气体都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:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

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

式(1)与式(2)中: ∇ 为哈密尔顿算子; $\mathbf{v}$ 为速度矢量,单位m/s; p 为熔体静压力,单位kPa; $\boldsymbol{\tau}$ 为偏应力张量,单位Pa; ρ_n 为密度,单位kg/m³。

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

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

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

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

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

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

式(3)~式(7)中: τ 为总应力张量,单位Pa; τ_1 为弹性偏应力张量,单位Pa; τ_2 为黏性偏应力张量,单位Pa; $\dot{\tau}_1$ 为偏应力张量的下随体时间导数; $\text{tr}(\tau_1)$ 为 τ_1 的迹; λ 为松弛时间,单位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,单位Pa·s; η_1, η_2 为零剪切黏度弹性和黏性分量,单位Pa·s; D 为形变速率张量,单位s⁻¹;S为零剪切黏度中黏性分量比例。

温度相关的黏度定律使用 Arrhenius 方程^[18]:

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

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

1.3 物性参数

聚合物熔体为PP,热变形温度为371 K,熔点为426 K,其密度为910 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

Parameters	η_0 /(Pa·s)	λ /s	ε	ξ	S
Value	4 688	0.1	0.15	0.44	0.12

Notes: η_0 is zero-shear viscosity; λ is relaxation time; ε is relevant material tensile parameters; ξ is shear parameters for related materials; S is proportion of viscous component in zero-shear viscosity.

表2 Arrhenius 方程参数

Tab. 2 Parameters of arrhenius equation

Parameters	E /(kJ·mol ⁻¹)	k /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	C_p /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
Value	20	0.35	2 800

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

1.4 边界条件设定

(1)入口边界。 AB 设置为熔体流量入口,温度

设定为453 K,其入口流量 $Q_m=1\times 10^{-5}$ m³/s; EF 外气垫层气体入口,设置为压力入口边界,进气压力设为1 000 Pa; HG 内气垫层气体入口,设置为压力入口边界,进气压力设为1 000 Pa;温度分别设定为上述的五个不同的气体温度值,气体黏度值取 2.6×10^{-5} Pa·s。

(2)壁面边界。在挤出口模中存在熔体与壁面;气体与壁面之间的滑移;在计算中使用Navier方程进行滑移设定,滑移系数取0;其中与熔体接触的壁面边界 AD 和 BC 温度设定为与熔体入口温度一致,即473 K;而与气体接触的壁面边界 EO, FD, GH 和 HC 温度设定为与气体入口温度一致。

(3)自由边界。 MJ 与 LK 段为自由表面,满足动力学边界条件:法向速度 $v_n=0$,切向力 $f_s=0$;此段为裸露在空气的熔体,与环境存在热交换,热边界条件设为热通量边界,其中热通量系数为20,环境温度设定为293 K。

(4)移动边界。 CL 与 DM 段分别为内外气体与熔体交界面,为移动边界,设置为Interface;热边界条件同样设置为Interface,且不考虑热辐射问题,内外气液交界处移动初始点分别为 D, C ;结束点分别为 M, L 。

(5)出口边界。熔体末端 JK ,内气辅末端 LN ,外气辅末端 OM 均设置为出口边界(Outflow),由于出口温度未知,热边界条件也设置为Outflow。

1.5 网格划分及无关性验证

本模型的划分采用四边形结构化网格,为了使计算更加准确及便于数值求解在不同子域的交界面对网格进行加密并进行网格无关性校验,对比了4个不同网格数量的划分方案,分别为1 568,3 676,8 532和12 584。以熔体在口模出口处厚度为评判标准验证网格无关性,图2为网格划分示意图,网格数量为8 532。图3为不同网格数量下熔体在口模出口处厚度,如图3所示,当网格数量大于8 532时熔体在口模出口处厚度几乎无变化,由此可知当网格数量大于8 532时,数值模拟具有较好的准确性。

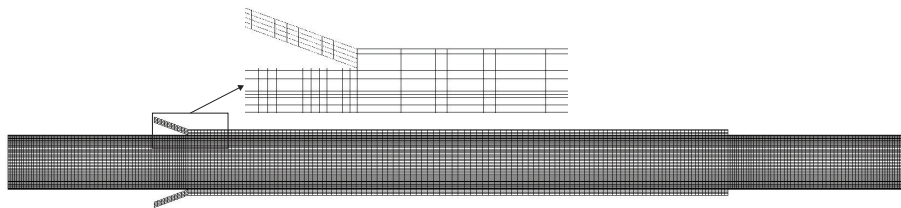


图2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid partitioning

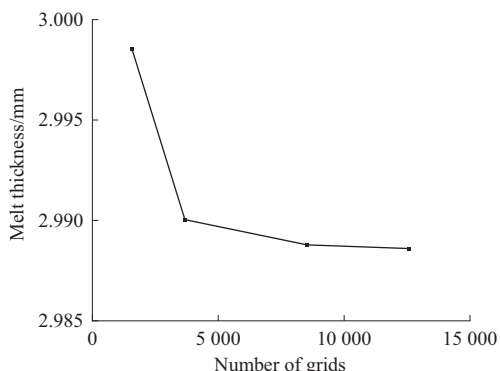
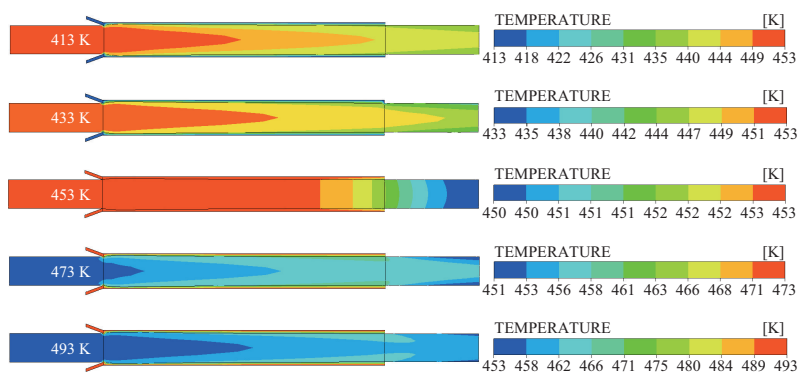
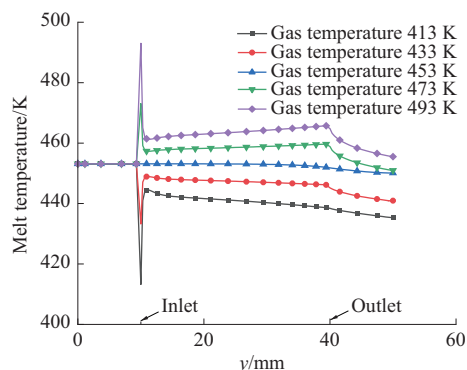


图3 不同网格数量下熔体在口模出口处厚度

Fig. 3 Melt thickness at die exit under different numbers of grid cells



(a) Contour map of melt temperature distribution in circular tubes at different gas temperatures



(b) Axial distribution curve of melt surface temperature in a circular tube

图4 不同气体温度对圆管熔体温度的影响

Fig. 4 Effect of different gas temperatures on melt temperature in a circular tube

由图4a温度云图可知,圆管熔体的温度是关于中心对称的,且由于熔体与气体之间存在热交换,当气体温度低于熔体温度时,熔体中心的温度要高于熔体表面,而当气体温度高于熔体温度时,熔体中心温度会低于熔体表面,当气体与熔体之间没有温度差时,熔体在口模的温度先保持不变,后在临近口模出口时温度略有下降。

从图4b熔体表面温度沿轴向分布曲线可知,没有气体作用下的熔体温度保持不变,直到不同温度的气体作用至熔体表面,熔体表面温度发生了变化。在气体温度为413K和433K时,此温度低于熔体温度453K,于是在气体作用于熔体表面时,熔体表面的温度先急剧下降,气温越低下降幅度越大,而后温度迅速上升,进气角度的存在使得高压气体刚进入口模时气体直接渗透到了熔体表面,此时温度急剧下降;然后经过低温气体的冷却作用熔体表面温度缓慢下降,最后熔体离开口模时,由于环境温度293 K远低于熔体温度,于是熔体表面温度在

2 模拟结果分析

为探究气体温度对PP圆管气辅挤出成型过程影响机理,首先将熔体温度设置为453 K,气体温度分别设置为413,433,453,473 K和493 K,通过数值模拟得出在5个不同气体温度下的熔体温度分布、外形尺寸变化、速度分布、第一法向应力差以及剪切速率分布情况,具体分析如下。

2.1 熔体温度分布

图4为5个不同气体温度下圆管的熔体温度分布情况,其中图4a为温度分布云图,图4b为圆管熔体表面温度沿轴向分布曲线。

与空气的热交换下迅速降低。在气体温度为473 K与493 K时,此时气体温度高于熔体温度,所以熔体表面温度迅速增大,而后又显著下降,在高温气体的升温作用下熔体表面温度缓慢上升,直至离开口模时迅速下降。当气体与熔体之间无温度差时,熔体在口模内的温度保持不变,但在气体作用一段时间后,熔体温度略有下降,这是由于在气体与熔体等温的条件下,PP材料自身黏度大,在挤出过程中会由于其剪切作用产生黏性耗散热,而气体的黏度极低,几乎没有黏性发热,但凭借其高流速可将热量带出口模,在气体作用的前一段时间,熔体的黏性发热要大于气体带走的热量,所以此时熔体温度保持不变,而当临近口模出口时,气体的“冷却效果”占主导作用,此时熔体温度略有下降。由此可见即使气液两相等温,熔体在口模内的温度也不能长时间保持不变。

2.2 外形尺寸变化

图5为不同气体温度下圆管外形尺寸变化规

律,其中图5a为圆管内径尺寸沿轴向变化曲线,图5b为圆管外径尺寸沿轴向变化曲线,图5c为不同气

体温度下圆管熔体出口处厚度,图5d为不同气体温度下圆管熔体出口处厚度变化率。圆管的厚度尺寸变化率(R)按式(9)计算。

$$R = \frac{3 - d}{3} \times 100\% \quad (9)$$

由图5a与图5b可知,对于不同气体温度作用下的圆管内外径变化趋势是一致的,即内径尺寸 r_1 先减小后增大;外径尺寸 r_2 先增大后减小。圆管熔体离开口模时,随着气体从口模出口处消散,内外径尺寸都保持不变。且不难发现在气体温度小于熔体温度时,气体出口处的 r_1 小于入口处的 r_1 、气体出口处 r_2 大于入口处 r_2 。气体温度大于熔体温度时,气体出口处的 r_1 大于入口处的 r_1 、气体出口处 r_2 小于入口处 r_2 。再由图5c可知,圆管出口处壁厚 d 随气体温度变化几乎呈线性变化,即随气体温度增大,圆管出口处壁厚 d 减小。当气温为413 K和433 K时,出口处壁厚 d 均大于3 mm,而气温为453,473 K和493 K时,出口处壁厚 d 均小于3 mm,这说明在只更改气体温度的条件下,气体温度小于熔体温度时,圆管出口处的壁厚会有胀大,而气体温度大于或等于熔体温度时,圆管出口处的壁厚会有收缩。具体变化率如图5d所示,当气体与熔体等温时,圆管出口处壁厚变化率为0.37%,在5个不同气体温度下为最小。在气体温度高于或低于熔体温度时,气体与熔体温差越大,变化率越大,当气体温度为493 K时,变化率最大为2.24%。出现这种情况的原因为当有温度气体进入口模时,熔体温度会产生变化,气温较低时,熔体受低温气体作用下温度下降,导致熔体黏度增大,流动性更差,间接导致气体压力作用力下降;反之,气温高于熔体温度时,黏度降低,熔体流动性更好。这是圆管外形尺寸变化的根本原因。

2.3 速度分布

图6为不同气体温度下熔体表面速度,其中图6a为熔体表面沿挤出方向轴向速度变化曲线,图6b为熔体内外表面沿挤出方向径向速度变化曲线。

由图6a可知,在不同气温作用下的熔体表面的轴向速度变化趋势是一致的,即先急剧增大后逐渐增大,直至圆管熔体离开口模轴向速度保持不变;由于气体在刚进入口模作用于熔体时,气体的水平流速远大于熔体,熔体表面受到气体的拖曳作用后会急剧向挤出方向(+Y方向)流动,体现为熔体表面轴向速度急剧增大,在气体稳定流动后,熔体表面

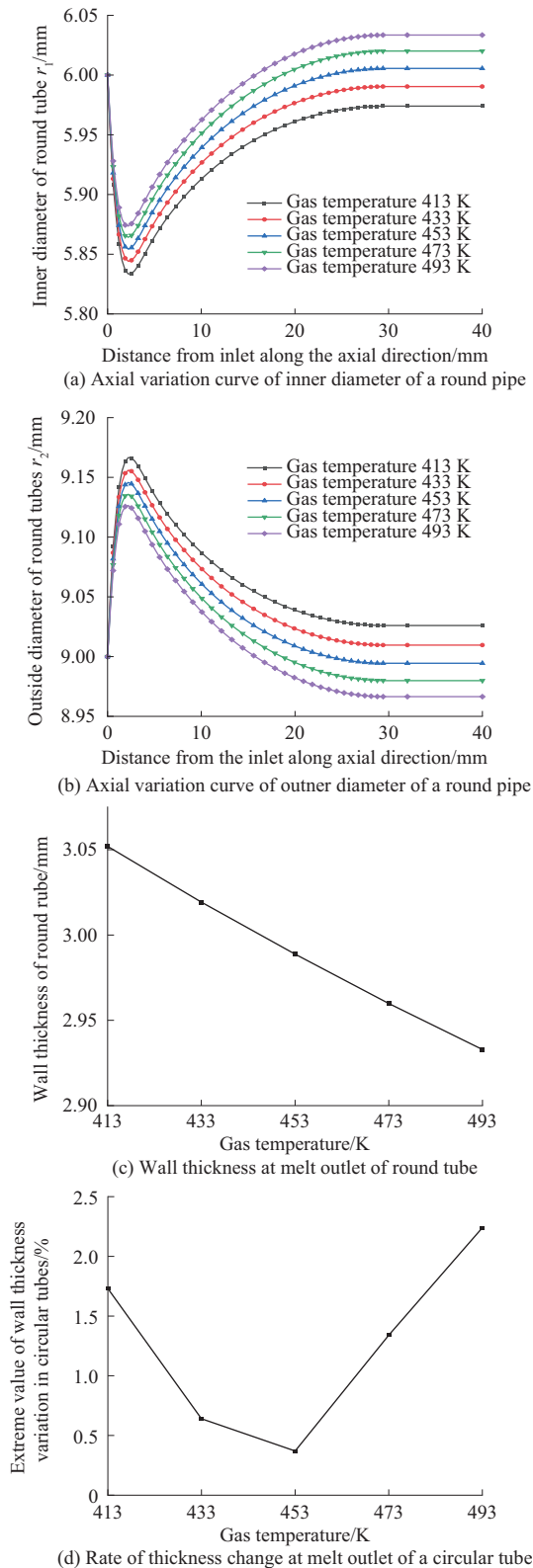


图5 不同气体温度下圆管外形尺寸变化
Fig. 5 Variation in outer dimensions of circular tubes at different gas temperatures

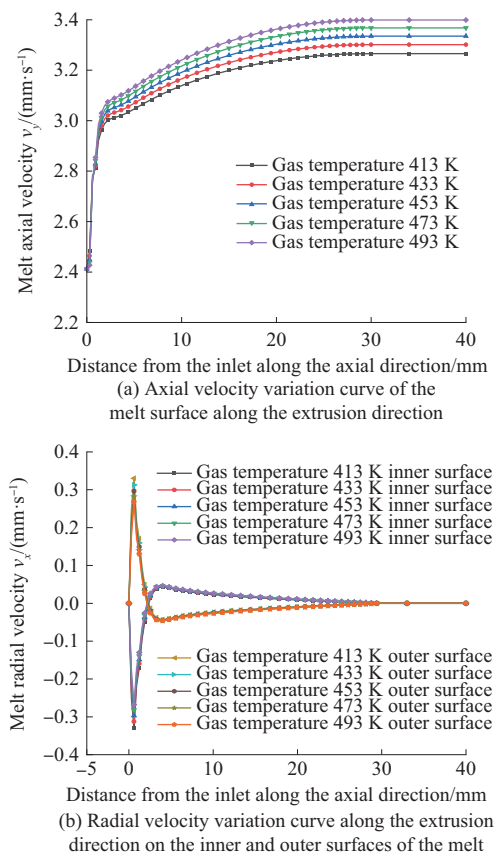


图6 不同气体温度下熔体表面速度

Fig. 6 Melt surface velocity at different gas temperatures

轴向速度由于气体的拖曳作用平缓增大,而熔体在不同气体温度下的流动性差异造成了轴向速度的不同,其中气温为413 K时,熔体表面轴向速度最小;气温为493 K时,熔体表面速度最大。通过图6b可以看出熔体内外表面的径向速度是呈中心对称分布的,熔体内表面沿挤出方向径向速度先增大至

负向极值(-X方向),出现这种现象的原因是由于PP熔体自身的高黏弹性,在没有了模具壁面的约束后,有向外膨胀(-X方向)的趋势。其中气温为413 K时负向极值最大,这也对应了上一节中其内径尺寸 r_1 变化极值最大;随后随着气体压力对熔体的作用力,熔体膨胀的趋势被逐渐抑制,直至熔体离开口模径向速度接近于零;熔体外表面沿挤出方向径向速度先增大至正向极值(+X方向),其中气温为413 K时正向极值最大,对应上一节中其外径尺寸 r_2 变化极值最大。由此可见气温低于熔体温度,会导致熔体表面的轴向速度减小、径向速度极值增大,轴向速度的减小不利于生产效率,径向速度极值的增大影响圆管壁厚的精度。

2.4 第一法向应力差分布(N1)

图7为不同气体温度下对熔体第一法向应力差的分布影响,其中图7a为不同气温下熔体法向应力差分布云图,图7b为熔体第一法向应力差最大值随气温变化曲线。

由图7a与图7b可知,圆管熔体的第一法向应力差集中于气体刚进入口模与熔体作用时,且第一法向应力差的最大值也出现在此处,不同气温下熔体第一法向应力差最大值随气温变化规律呈线性下降。第一法向应力差随气体温度升高而减小的现象,其原因在于温度对熔体流变行为的影响。具体而言,气体温度升高引起熔体黏度降低,进而导致其法向应力下降,最终表现为第一法向应力差的减小。聚合物在挤出成型工艺中,熔体的离模膨胀与其第一法向应力差有明显关联,由此可见在PP圆管

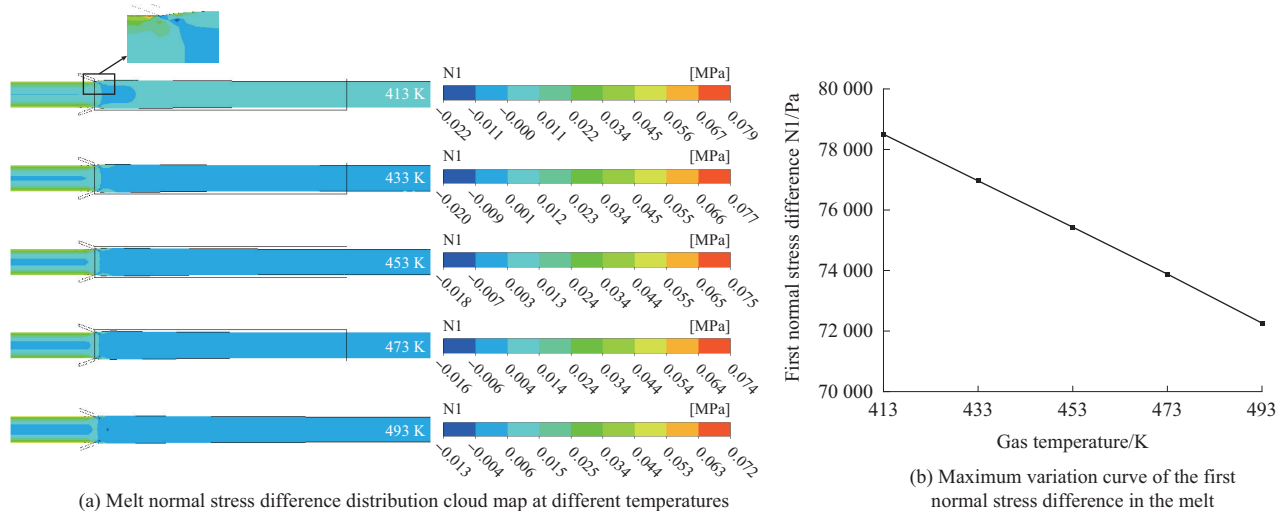


图7 不同气体温度下对熔体第一法向应力差的分布影响

Fig. 7 Effect of different gas temperatures on the distribution of the first normal stress difference in the melt

气辅挤出成型工艺中适当提高气体温度有利于第一法向应力差的减小,提高熔体的流动性,减小气液之间的波动,提升在气辅挤出成型过程中的稳定性。

2.5 熔体剪切速率分布

不同气温下熔体表面剪切速率沿挤出方向变化规律如图8所示,从图中不难发现,不同气温下,剪切速率的变化趋势是一致的,即在气体作用于熔体后剪切速率迅速增大,后缓慢下降直至气体离开口模时剪切速率趋于零;另外当气体温度为493 K时,剪切速率的峰值最大,气体温度为413 K时,剪切速率峰值最小,出现此现象的原因气体温度升高,熔体的温度略有增大,熔体流动性更好,此时气体对熔体的拖拽作用更为明显,所以气温升高,剪

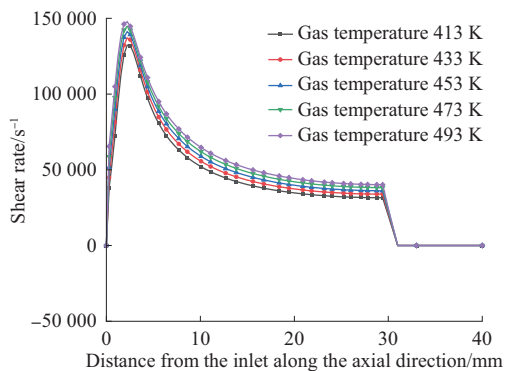


图8 不同气温下熔体表面剪切速率沿挤出方向变化规律

Fig. 8 Variation of melt surface shear rate along the extrusion direction at different temperatures

切速率会增大。由于过高的剪切速率会导致熔体在口模中流动不稳定,不利于圆管表面的成型质量。结合上一节的分析可得出气体温度并不是越高越好。

3 实验分析

为了验证气体温度对PP圆管内外气辅挤出成型影响数值模拟的可靠性,进行了在不同气体温度下PP圆管的气辅挤出成型实验。本次实验采用的是由东莞市华希塑料机械有限公司生产的塑料精密单螺杆挤出机,挤出机型号为GRQ-20PVC,气辅实验平台由气体加热器、调压阀、流量计、空压机、储气罐组成。将挤出机模头温度设定为453 K,进料入口流率为 1×10^{-5} m/s,内外气体入口压力均设置为0.11 MPa,通过气体温度控制器将气体温度分别设置为413,433,453,473 K与493 K,得到在五个不同气体温度下PP圆管熔体离开口模处的成型效果如图9所示。

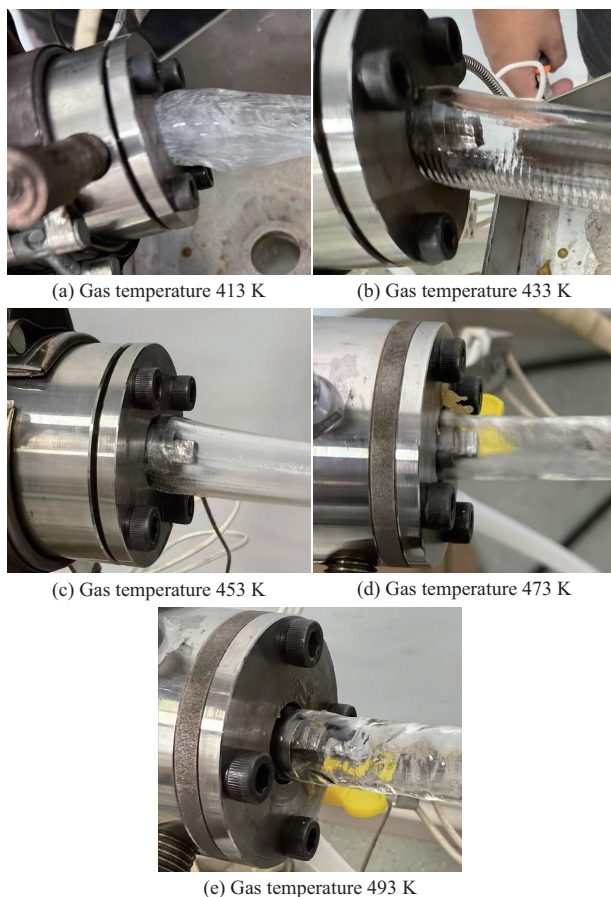


图9 不同气体温度下熔体离开口模处的成型状况

Fig. 9 Melt forming condition at die exit at different gas temperatures

如图9a和b所示,当气体温度低于PP熔体温度时,熔体表现出较差的流动性。尤其在气体温度为413 K时,熔体表面粗糙,呈现近似未完全熔融的状态,表明低温气体显著抑制了熔体的流动。图9c显示,当气体温度与熔体温度相等(453 K)时,熔体在口模出口附近仍可观察到轻微的形状不稳定现象,这主要是因为于气体流动所引发的主动冷却效应,导致熔体表层热量被带走,从而影响其表面平整度。随着气体温度进一步升高,如图9d和图9e所示,熔体流动性显著改善,挤出过程的连续性增强。然而,在473 K和493 K两种工况下,熔体表面开始出现不同程度的波纹缺陷,且温度越高,波纹现象越明显。这表明过高的气体温度虽然有利于提高熔体流动性、促进气垫形成,但也会导致熔体表层黏度过低,在气流作用下发生界面失稳,从而损害成型表现质量。

通过上述分析表明:气体温度较低时,熔体流动性不足,影响基本成型;气体温度适中时,成型状态改善;而气体温度过高时,虽流动性进一步提高,但会诱发表面波纹等缺陷,导致表现质量下降。上

述实验结果与数值模拟所得规律基本吻合,共同验证了气体温度对熔体流动行为与表面质量的影响因素。

4 结论

(1)通过数值模拟与实验结果来看,造成圆管熔体在挤出过程中各指标改变根本原因在于气温的改变导致圆管熔体在口模内的流动性变化,气温过低导致其冷却效果起主导作用,不利于圆管的成型;气温过高易使气体穿透,影响圆管表面质量。气体温度是调控圆管尺寸与表面质量的有效工艺参数。

(2)揭示了气体的“冷却效应”;在实际挤出中,应调整气体温度略大于熔体温度,这样既有效地提高熔体的流动性,又能很好地为熔体在口模内提供“保温”作用。

(3)以上研究尚未能精确量化气体与熔体之间的最优温差,也未揭示气体冷却效应从次要因素转变为主导机制的临界值,未来可基于以上两点深入开展多物理场耦合动力学模拟研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 熊熙,李建钢.塑料挤出成型[M].4版.北京:化学工业出版社,2024.
XIONG Xu, LI Jiangang. Plastic extrusion molding[M]. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2024.
- [3] 施珣若.聚氯乙烯塑料建材的现状和展望[J].中国塑料,2024,38(9):145-153.
SHI Xunruo. The current situation and prospect of poly(vinyl chloride) building materials[J]. China Plastics, 2024, 38(9):145-153.
- [4] 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.
- [5] 侯成龙,程玲玲,侯景杰,等.挤出成型技术发展综述[J].精密成形工程,2023,15(6):209-221.
HOU Chenglong, CHENG Lingling, HOU Jingjie, et al. Overview of extrusion molding technology development[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(6):209-221.
- [6] TANG D H, MARCHESINI F H, D'HOOGHE D R, et al. Isothermal flow of neat polypropylene through a slit die and its die swell: Bridging experiments and 3D numerical simulations[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2019, 266:33-45.
- [7] 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 Zhong. Progress on polymer gas-assisted extrusion molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(3):151-158.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 邓小珍,陈天荣,刘彪,等.多腔微管气体辅助挤出成型的影响机制[J].高分子材料科学与工程,2024,40(11):79-86.
DENG Xiaozhen, CHEN Tianrong, LIU Biao, et al. Influence mechanism of gas-assisted extrusion molding for multi-lumen microtube [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(11):79-86.
- [11] 蔡圳南,黄兴元,刘同科,等.微尺度下塑料微管气辅挤出成型的模拟及分析[J].工程塑料应用,2022,50(2):83-90, 105.
CAI Zhenan, HUANG Xingyuan, LIU Tongke, et al. Simulation and analysis of gas-assisted extrusion of plastic microtubes in micro-scale[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):83-90, 105.
- [12] REN Z, HUANG X Y, XIONG Z H. Experimental and numerical studies for the gas-assisted extrusion forming of polypropylene micro-tube[J]. International Journal of Material Forming, 2020, 13(2):235-256.
- [13] LIANG R F, MACKLEY M R. The gas-assisted extrusion of molten polyethylene[J]. Journal of Rheology, 2001, 45(1):211-226.
- [14] 黄兴元.聚合物气体辅助口模挤出成型的理论及实验研究[D].南昌:南昌大学,2006.
HUANG Xingyuan. Theoretical and experimental study on polymer gas-assisted die extrusion molding[D]. Nanchang: Nanchang University, 2006.
- [15] 卢臣.塑料异型材气辅挤出口模流动的理论及实验研究[D].南昌:南昌大学,2007.
LU Chen. Theoretical and experimental study on flow characteristics of gas-assisted extrusion molds for plastic profiles[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [16] 任重.塑料微管气辅挤出成型理论及实验研究[D].南昌:南昌大学,2017.
REN Zhong. Theoretical and experimental study on gas-assisted extrusion molding using plastic microtubes[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [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.