

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.013

成型工艺对液态二氧化碳辅助共注塑弯管形态与性能的影响

金海¹, 匡唐清¹, 柳和生¹, 杨帆², 高上森²

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013; 2. 华东交通大学基础实验与工程实践中心, 南昌 330013)

摘要: 为探究成型工艺对液态二氧化碳辅助共注塑弯管制件形态与性能的影响规律, 以长玻纤质量分数为20%的长玻纤增强聚丙烯为外层材料, 聚丙烯为内层材料, 分别采用液态二氧化碳驱动浮芯辅助共注塑(LCO₂-PACIM)短射法、溢流法和液态二氧化碳辅助共注塑(LCO₂-ACIM)短射法、溢流法四种工艺制备弯管制件, 研究了不同成型工艺对制件残余壁厚、玻纤取向及耐压性能的影响。结果表明, 在相同工艺条件下, 相比于短射法, 溢流法成型的管件残余壁厚沿熔体流动方向波动小, 玻纤沿流动方向取向度更高, 耐压性能更优。浮芯结构的引入减小了管件的残余壁厚, 使得LCO₂-PACIM工艺成型管件的耐压性能整体低于LCO₂-ACIM工艺, 但有利于提升玻纤沿流动方向的取向度和壁厚均匀性。研究结果可为LCO₂-ACIM弯管成型工艺方案选择提供参考。

关键词: 长玻纤增强聚丙烯; 液态二氧化碳辅助共注塑; 浮芯驱动; 弯管制件; 玻纤取向

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0119-09

Effects of molding process on morphology and property of elbow pipe by liquid carbon dioxide-assisted co-injection molding

JIN Hai¹, KUANG Tangqing¹, LIU Hesheng¹, YANG Fan², GAO Shangsen²

(1. School of Electromechanical and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Fundamental Experiment and Engineering Practice Center, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To investigate the effects of molding process on morphology and property of liquid carbon dioxide-assisted co-injection molded elbow pipe fittings, long glass fiber reinforced polypropylene (LGFPP) with long glass fiber with a mass fraction of 20% was used as the outer layer and polypropylene (PP) was used as the inner layer. Elbow pipe fittings were fabricated using four processes: liquid carbon dioxide-assisted co-injection molding with the short-shot method (LCO₂-ACIM-S), the overflow method (LCO₂-ACIM-O), liquid carbon dioxide-powered projectile-assisted co-injection molding with the short-shot method (LCO₂-PACIM-S), and the overflow method (LCO₂-PACIM-O). The effects of different molding processes on the residual wall thickness, glass fiber orientation and pressure resistance of the fittings were systematically investigated. The results show that, under identical processing conditions, compared with the short-shot method, the overflow method results in smaller fluctuations in residual wall thickness along the melt flow direction, higher glass fiber orientation along the flow direction, and superior internal pressure resistance. The introduction of the projectile structure reduces the residual wall thickness of the fittings, leading to an overall lower pressure resistance for fittings produced by the LCO₂-PACIM process compared with those produced by the LCO₂-ACIM process, but is beneficial for enhancing the orientation of glass fibers along the flow direction and wall thickness uniformity. The research results provide a reference for the selection of LCO₂-ACIM elbow pipe molding processes.

Keywords: long glass fiber reinforced polypropylene; liquid carbon dioxide-assisted co-injection molding; projectile-powered; elbow pipe fittings; glass fiber orientation

基金项目: 国家自然科学基金项目(52273033, 52163006), 江西省自然科学基金重点项目(20232ACB204004)

通信作者: 匡唐清, 教授, 博士生导师, 研究方向聚合物成型工艺

收稿日期: 2026-06-06

引用格式: 金海, 匡唐清, 柳和生, 等. 成型工艺对液态二氧化碳辅助共注塑弯管形态与性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 119-127.

JIN Hai, KUANG Tangqing, LIU Hesheng, et al. Effects of molding process on morphology and property of elbow pipe by liquid carbon dioxide-assisted co-injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 119-127.

长玻纤增强聚丙烯(LGFPP)是一种以聚丙烯(PP)为基体、长玻纤(LGF)为增强材料的高性能热塑性复合材料^[1]。通过引入长度大于1 cm的玻纤,可显著改善PP材料在强度、刚度和耐热性方面的不足^[2-3]。同时,LGF在基体中形成稳定的力学支撑结构,不仅能抑制低温条件下的脆性断裂,还可有效限制PP在冷却过程中的体积收缩^[4]。相较于短玻纤增强PP,LGFPP在制件中可保留更长的纤维剩余长度,易形成连续交织的增强骨架,有利于应力的有效传递并减弱局部应力集中,从而在冲击韧性、结构稳定性和耐蠕变性能方面表现出明显优势^[5-6]。PP具有良好的熔体流动性、成型性能和表面成型质量,且具有质量轻、耐化学腐蚀等特点,是注塑领域常用材料之一^[7-8]。对于注塑管件而言,不仅需要满足承载过程中的强度要求,同时还需兼顾内壁表面质量。因此,采用高力学性能的LGFPP作为管件外层材料,可利用LGF增强结构提高管件整体承载能力及抗变形能力;内层采用PP材料,则可避免玻纤裸露引起的内壁粗糙问题,获得光滑连续的流道表面。

目前工业生产中应用较为广泛的中空结构成型方法主要是水辅助注塑和气体辅助注塑工艺。水辅助注塑具有冷却速度快、成型效率高及壁厚均匀性较好的优点,但其材料适用范围受限,且水介质可能引发模具腐蚀,对工艺稳定性和过程控制要求较高^[9-10]。气体辅助注塑在一定程度上弥补了上述不足,但由于高压氮气热导率较低,在高温条件下易进入熔体并导致内壁发泡,成型效率亦受到限制^[11]。液态二氧化碳(LCO₂)辅助注塑兼具成型效率高和材料适应性强等优势,在一定程度上改善了水辅助和气体辅助注塑工艺的局限。目前,国外企业Linde plc已将LCO₂辅助注塑工艺成功应用于实际工业生产,表明该技术具备良好的工程可行性与应用前景。在此基础上引入流体驱动浮芯与共注塑技术,不仅可实现制件残余壁厚的有效调控^[12-13],还能够抑制LGF材料成型过程中易“浮纤”现象^[14],从而进一步改善制件内壁质量。具体而言,在成型过程中,流体驱动浮芯形成中空结构,通过调节浮芯尺寸实现管件壁厚的控制;共注塑通过引入与LGFPP基体相容性良好的PP内层熔体,使其覆盖于LGF增强层表面,减少玻纤直接暴露引起的“浮纤”缺陷。

目前,LCO₂辅助注塑对管件质量影响的研究主要集中于工艺参数和流体介质两方面。金廷翁等^[15]

通过单因素实验研究发现,LCO₂注射延迟时间对液态二氧化碳辅助注塑(LCO₂-AIM)管件壁厚影响较为显著,而熔体温度、LCO₂注射压力和模具温度影响较小,且工艺参数对壁厚均匀性的影响有限。徐俊文等^[15]对液态二氧化碳驱动浮芯辅助注塑(LCO₂-PAIM)、气体驱动浮芯辅助注塑(G-PAIM)和水驱动浮芯辅助注塑(W-PAIM)三种流体介质成型的LGFPP管件进行研究,发现流体介质会影响玻纤取向、剩余纤维长度、残余壁厚及耐压性能,其中LCO₂-PAIM管件具有较长的玻纤剩余长度和较优的耐压性能。上述研究表明,LCO₂辅助注塑可通过调控熔体流动行为改善管件成型质量。然而,现有研究主要局限于单一成型工艺,关于浮芯辅助穿透及熔体充填模式对管件成型质量影响的研究较少。此前,本课题组已通过数值模拟分析了LCO₂辅助注塑过程中的相间穿透机理,并利用可视化模具与高速摄像技术相结合,对流体及浮芯的动态穿过程进行了直观表征^[16-18]。相关可视化实验观察发现,在型腔环境满足LCO₂超临界转变条件时,LCO₂存在向超临界状态转变的现象。同时数值模拟结果与实验观察具有较好一致性,验证了相关分析方法的可靠性。基于上述研究基础,本文选取LCO₂驱动浮芯辅助共注塑短射法(LCO₂-PACIM-S)、溢流法(LCO₂-PACIM-O)和LCO₂辅助共注塑短射法(LCO₂-ACIM-S)、溢流法(LCO₂-ACIM-O)四种工艺进行对比,分析浮芯辅助穿透和熔体填充模式对管件成型质量的影响。其中,LCO₂驱动浮芯辅助共注塑(LCO₂-PACIM)与LCO₂辅助共注塑(LCO₂-ACIM)用于评价浮芯辅助穿透作用,短射法与溢流法用于比较不同熔体填充模式的影响。通过研究不同工艺下管件残余壁厚、玻纤取向及耐压性能的变化规律,为高性能聚合物管件制备提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

LGFPP:GB302HP,LGF质量分数20%,熔体流动速率5.2 g/10 min,沙特沙伯基础工业公司;

PP:PPH-T03,熔体流动速率3.3 g/10 min,中国石油化工股份有限公司;

浮芯:课题组采用机加工方式自行研制,浮芯结构参数为外径11 mm、内径8 mm、直线段长度8 mm,其具体结构如图1所示,材料为上海日晶公司生产的聚酰胺6,牌号B3GB1020。

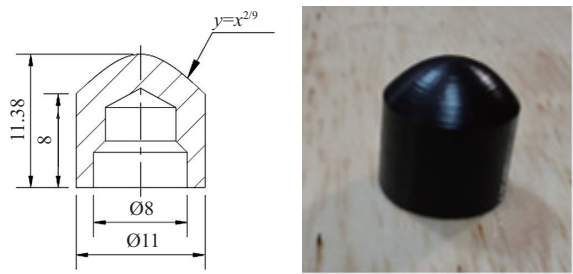


图1 浮芯示意图

Fig. 1 Schematic diagram of projectile

1.2 主要仪器与设备

双螺杆注塑机:MA1600M/380-E80,A螺杆直径40 mm,B螺杆直径26 mm,海天塑机集团有限公司;

镶块式弯管模具:课题组自行设计,模具直径16 mm,含30°与60°弯道,可通过控制末端封针的启闭,实现短射法与溢流法切换,具体结构如图2所示;

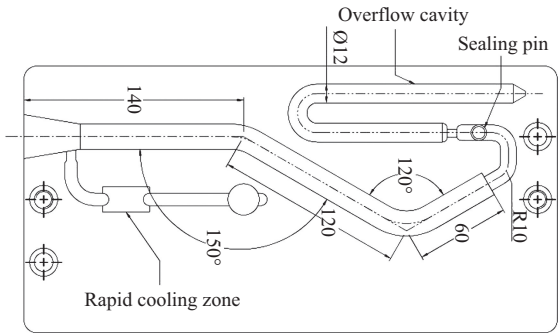


图2 弯管模具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of elbow pipe mould

模温机:BTM-09M,温度控制精度为±0.2 °C,深圳博瑞克机械有限公司;

LCO₂辅助控制设备:CPC-00,北京中拓模塑科技有限公司;

空气压缩机:V-0.6/8,浙江森隆机电有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU8010,日本日立公司;

耐压试验机:MTSH-06,天津美特斯试验机厂。

1.3 实验方案

采用LCO₂-PACIM与LCO₂-ACIM工艺,分别通过短射法与溢流法制备弯管制件,其工艺流程如图3所示,具体工艺参数见表1。对比四种工艺条件下弯管制件的壁厚分布、玻纤取向及耐压性能差异,探究

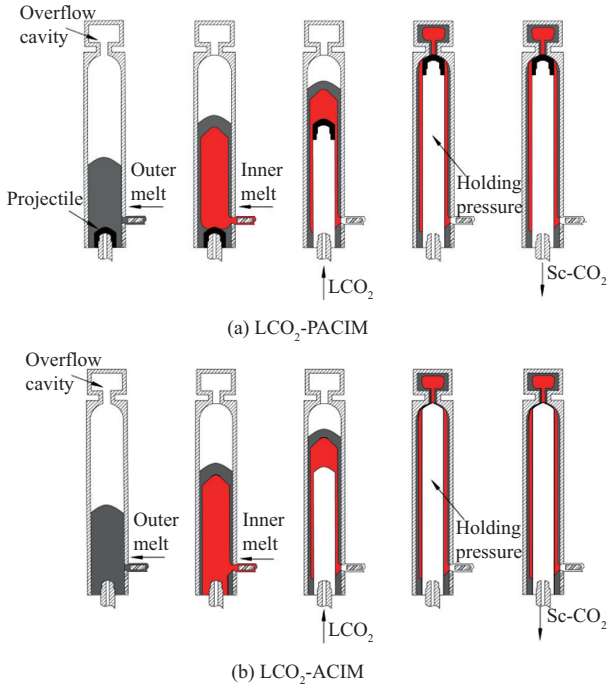


图3 工艺流程图

Fig. 3 Process flow diagram

表1 弯管成型工艺参数

Tab. 1 Molding parameters of elbow pipe

Process parameters	Value
Outer melt temperature/°C	270
Outer melt injection pressure/MPa	5.5
Inner melt temperature/°C	210
Inner melt injection pressure/MPa	10
Injection delay time of inner melt/s	3
Injection delay time of LCO ₂ /s	6
Injection pressure of LCO ₂ /MPa	8
Mold temperature/°C	50

成型工艺对LCO₂辅助共注塑弯管制件质量的影响。四种工艺的主要差异见表2。

1.4 表征与测试方法

1.4.1 弯管残余壁厚测量及壁厚均匀性表征

每种工艺选取3根弯管作为测试样品,图4为弯管制件壁厚测量示意图。如图4a所示,沿熔体流动方向选取5个直线段测量位置及2个弯曲段测量位置,在各位置处进行横向截断。为区分内外层结构,在内层材料中加入少量红色色母,使内层与外层在截面上形成明显对比。如图4b所示,在每个截

表2 四种工艺方案对比

Tab. 2 Comparison of four molding processes

Process	Projectile-assisted penetration	Melt filling method	Hollow structure formation method
LCO ₂ -PACIM-S	Yes	Short-shot method	LCO ₂ -powered projectile penetration
LCO ₂ -PACIM-O	Yes	Overflow method	LCO ₂ -powered projectile penetration
LCO ₂ -ACIM-S	No	Short-shot method	Direct LCO ₂ penetration
LCO ₂ -ACIM-O	No	Overflow method	Direct LCO ₂ penetration

面,沿周向等角度选取 $W1$ 至 $W4$ 四个测量方位,分别测量壁厚值。四个方位测量结果的平均值作为该位置壁厚,内层壁厚通过总壁厚与外层壁厚之差计算取得。为表征壁厚分布的均匀性,采用标准偏差对管件各测量位置的总壁厚数据进行统计分析。标准偏差能够反映数据相对于平均值的离散程度,标准偏差越小,说明壁厚分布越均匀;反之,则表明壁厚波动较大。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (1)$$

式中: σ 为壁厚标准偏差; N 为测量位置个数; X_i 为管件在第*i*个测量位置的壁厚; μ 为管件的平均壁厚。

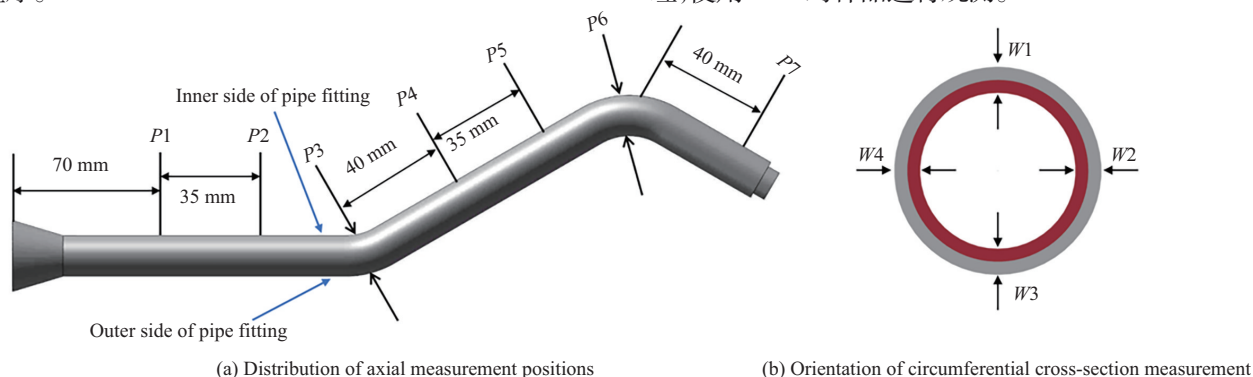


图4 弯管制件壁厚测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wall thickness measurement for elbow pipe

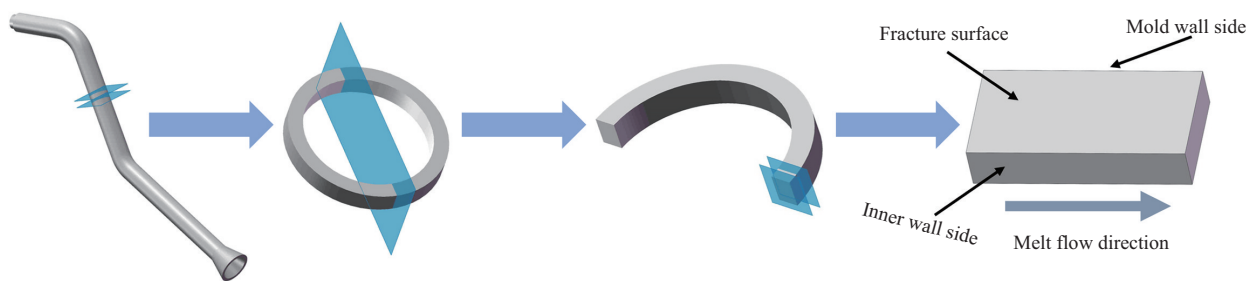


图5 SEM试样制备流程图

Fig. 5 Flowchart of SEM sample preparation

1.4.3 弯管耐压性能测试

参考 GB/T 6111-2018 进行弯管耐压性能测试。图6为耐压测试取样示意图,如图6所示,每根管件沿熔体流动方向在中间位置截取长度约 150 mm 的样品。样品置于 20 °C 恒温水箱中浸泡约 60 min 后,封闭管件两端,并通过耐压测试设备向内部持续加压直至破裂,同时记录最大承受水压。每种工艺选取 3 根样品,其最大爆破压力平均值作为该工艺管件的耐压

1.4.2 SEM试样制备与微观形态表征

图4为弯管制件壁厚测量示意图,图5为SEM试样制备流程图。为观察管件的微观形态,在管件 $P3$ 位置截取宽度约 5 mm 的圆环样品,置于液氮中冷却约 20 min,使其脆化,然后将圆环脆断,从断面截取约 2 mm 的薄片作为观测试样。为便于观察内部微观形貌,在室温条件下对试样进行刻蚀处理,刻蚀时间为 30 min。蚀刻溶液由高锰酸钾、浓磷酸、浓硫酸和蒸馏水配制而成,其中蒸馏水、浓磷酸和浓硫酸的体积比为 14:23:63,并加入质量分数 1% 的高锰酸钾粉剂。刻蚀完成后,依次采用蒸馏水、双氧水及丙酮对试样进行清洗,随后在室温下干燥。干燥后,将观测试样使用导电胶带固定于 SEM 载物台上,并进行喷金处理,使用 SEM 对样品进行观测。

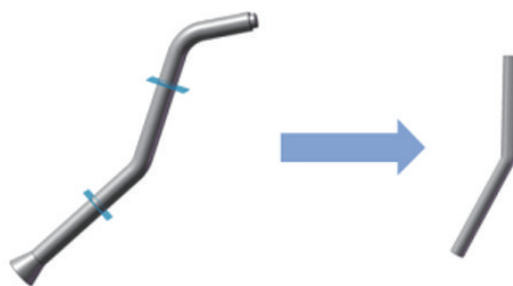


图6 耐压测试取样示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sampling for pressure resistance test

强度指标。

2 结果与讨论

2.1 成型工艺对弯管壁厚及均匀性的影响

采用上述实验方案制备了四种工艺条件下的 LGFP 弯管制件,其残余壁厚的测量结果如图 7 所示。

在 $\text{LCO}_2\text{-PACIM-S}$ 和 $\text{LCO}_2\text{-ACIM-S}$ 工艺条件下,沿熔体流动方向,弯管制件的总壁厚整体呈逐渐减小的变化趋势。其中,外层壁厚在 $P1$ 至 $P2$ 段出现小幅增加,随后在 $P2$ 至 $P7$ 段逐渐减薄,而内层壁厚变化幅度较小,仅表现出轻微波动,表明外层壁厚是影响管件壁厚分布的主要因素。在短射成型条件下,管件沿流动方向由前段向后段逐步成型。不同位置熔体进入型腔的时间存在差异,前段熔体进入型腔较早,冷却时间较长,在模壁作用下形成较厚的凝固层;而后段熔体与模壁接触时间较短,凝固层相对较薄。由于外层熔体直接与模壁接触,受冷却作用最为显著,其凝固层演化差异导致外层壁厚沿流动方向呈逐渐减小的趋势。相比之下,内层熔体主要位于流动中心区域,远离模壁,受模壁冷却作用较弱,凝固层演化程度较低,因此沿流动方向内层壁厚仅表现出轻微波动。

在 $\text{LCO}_2\text{-PACIM-O}$ 和 $\text{LCO}_2\text{-ACIM-O}$ 工艺条件下,沿熔体流动方向弯管制件的总壁厚整体保持稳定,但外层壁厚和内层壁厚呈现不同的变化规律。其中, $\text{LCO}_2\text{-PACIM-O}$ 工艺下,外层壁厚沿流动方向逐渐增加,内层壁厚相应减小; $\text{LCO}_2\text{-ACIM-O}$ 工艺在 $P1$ 至 $P5$ 段表现出相同变化趋势,而在 $P5$ 至 $P7$ 段外层壁厚略微下降,内层壁厚小幅增加。在溢流法中,熔体充满型腔后再进行穿透成型,总壁厚主要受型腔尺寸及穿透截面稳定性的影响;在总壁厚基本恒定的前提下,外层壁厚与内层壁厚呈现出明显的负相关关系,即外层壁厚增加必然伴随着内层壁厚的相应减小。在浮芯或 LCO_2 穿透形成中空结构的过程中,穿透由前段向后段依次进行,后段穿透相对滞后,外层熔体与模壁的接触时间增加,导致熔体黏度升高、流动性降低。且在穿透介质推动下,外层熔体被动地沿轴向向后段推移。受末端溢流腔尺寸较小的限制,外层熔体流入溢流腔受阻,易在后段区域发生累积,因此 $\text{LCO}_2\text{-PACIM-O}$ 工艺下外层壁厚沿流动方向逐渐增加,并导致内层壁厚相应减小。对于 $\text{LCO}_2\text{-ACIM-O}$ 工艺,由于不存在浮芯结构,后段熔体流动状态有所

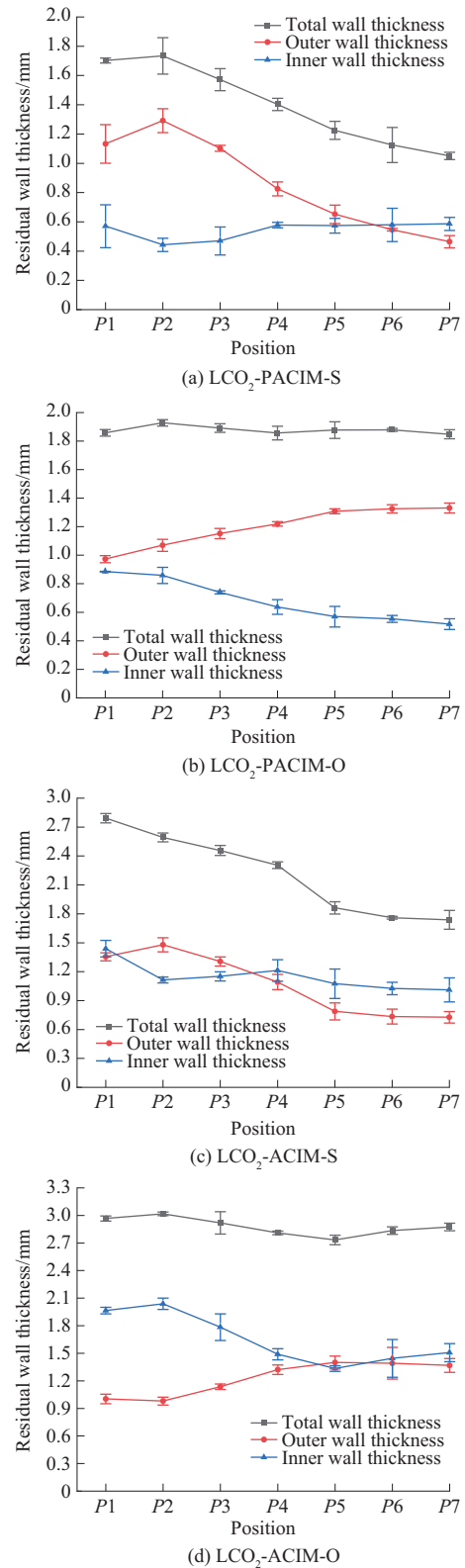


图7 四种工艺弯管制件的残余壁厚分布

Fig. 7 Residual wall thickness distribution of elbow pipes under four processes

差异。 $P5$ 至 $P7$ 段内层熔体局部累积,限制了外层熔体的分布,使外层壁厚略微下降,而内层壁厚小幅

增加。

相比于 LCO_2 -ACIM工艺, LCO_2 -PACIM工艺制件的总壁厚明显减小,其中内层壁厚差异是造成总壁厚变化的主要原因。这一差异本质上源于两种工艺穿透方式及其对应穿透截面形成机制的不同。在 LCO_2 -PACIM工艺中,中空结构由 LCO_2 驱动浮芯穿透形成,其穿透截面尺寸主要受浮芯几何尺寸的影响。浮芯作为实体结构,在穿透过程中与内层熔体直接接触,使内层熔体被迫沿溢流腔方向流动,从而显著减小内层残余壁厚。相比之下, LCO_2 -ACIM工艺中空结构由 LCO_2 直接穿透形成,其穿透截面主要受注气通道尺寸、注入压力及熔体流变特性等因素共同影响。由于缺乏实体结构对内层熔体的直接推动,内层熔体向溢流腔的流动程度相对有限,最终形成较大的内层壁厚和总壁厚。

图8为四种工艺弯管制件的壁厚标准偏差,如图8所示,四种工艺成型管件的总壁厚标准偏差存在明显差异。其中, LCO_2 -ACIM-S工艺的标准偏差最大,管件均匀性最差; LCO_2 -PACIM-O工艺的标准偏差最小,壁厚分布最为均匀。在相同注塑工艺下,短射法成型管件的壁厚均匀性低于溢流法管件。这主要与型腔内熔体填充状态及穿透过程稳定性差异有关。短射法中熔体注射量较少,在穿透前型腔未被完全充满,导致各位置处熔体储量和流动阻力分布不均。在驱动介质穿透过程中,容易沿阻力较小的一侧优先推进,使穿透路径产生一定偏移,进而造成管件截面两侧壁厚波动较为明显。而溢流法在穿透前熔体已注满型腔,型腔内熔体分布更加均匀,驱动介质在推进过程中所受阻力相对一致,穿透前沿稳定性和对中性更好,从而有利于形成均匀的中空结构,使管件整体壁厚分布更加均匀。

对比不同注塑工艺, LCO_2 -PACIM工艺管件的壁厚均匀性整体优于 LCO_2 -ACIM工艺管件。这主要与 LCO_2 在型腔内的相变行为有关。在 LCO_2 -ACIM工艺中, LCO_2 在高压条件下注入型腔并直接与高温熔体接触,局部温度和压力迅速升高,使其进入超临界状态。超临界二氧化碳(Sc-CO_2)兼具液体高密度和气体低黏度的特性,其渗透能力明显增强,从而使穿透前沿优先沿熔体温度较高、流动阻力较小的区域推进,导致截面上熔体分布不均,最终表现为管件壁厚均匀性较差。相比之下,在 LCO_2 -PACIM工艺中,浮芯在一定程度上隔离了 LCO_2 与高温熔体间的直接作

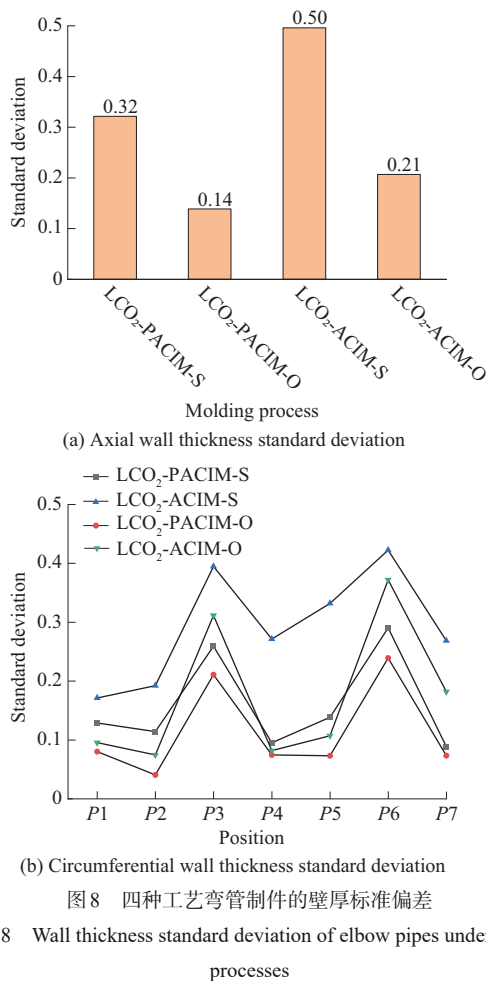


图8 四种工艺弯管制件的壁厚标准偏差
Fig. 8 Wall thickness standard deviation of elbow pipes under four processes

用,抑制了沿低黏度区域优先穿透的行为,使穿透前沿更加平稳、路径更可控,从而维持截面上熔体分布的一致性,使管件壁厚整体更加均匀。

如图8b所示,在两个弯曲处,管件的周向总壁厚标准偏差增幅较大。四种工艺弯曲处内外侧总壁厚见表2,由表2可知,弯曲处内外侧总壁厚差异明显,是导致该现象的主要原因。在弯曲段,由于内侧与外侧流动路径长度存在差异,熔体的流动状态存在显著不同。在 30° 偏转角处,外侧流动路径较长,熔体与模壁接触时间延长,热交换作用更强,导致熔体温度降低、黏度升高、流动性减弱,从而形成较大的残余壁厚;而在 60° 偏转角处,内侧流动路径相对较长,因此更容易形成较大的残余壁厚。尽管不同偏转角处残余壁厚较大的位置存在差异,但都会导致弯曲处周向总壁厚分布不均,从而使管件在弯曲段的壁厚均匀性显著变差。

2.2 成型工艺对弯管玻纤取向的影响

对四种工艺成型的弯管制件进行取样,经处理后,采用SEM对其外层玻纤取向进行观察,所有试样

表2 四种工艺弯曲处内外侧总壁厚

Tab. 2 Total wall thickness at inner and outer sides of elbow section under four processes

Molding process	Deflection angle/(°)	Outer-side total wall thickness/mm	Inner-side total wall thickness/mm
LCO ₂ -PACIM-S	30	1.95	1.39
LCO ₂ -PACIM-O	30	2.18	1.61
LCO ₂ -ACIM-S	30	3.09	2.05
LCO ₂ -ACIM-O	30	3.39	2.67
LCO ₂ -PACIM-S	60	0.77	1.36
LCO ₂ -PACIM-O	60	1.67	2.25
LCO ₂ -ACIM-S	60	1.5	2.47
LCO ₂ -ACIM-O	60	3.35	2.41

观测条件为放大倍数60倍,扫描电压10 kV。由于内层材料为PP,不含玻纤,因此本文仅对外层玻纤的取向特征进行分析,结果如图9所示。通过四种工艺制备的弯管,其外层区域沿壁厚方向可划分为近模壁层、中间层和近界面层。从整体上看,玻纤在壁厚方向上的取向程度呈现出由近模壁层向近界面层逐渐增强的趋势。在近模壁层玻纤团聚现象较为明显,大量玻纤交错分布,呈多方向取向;中间层中大部分玻纤沿熔体流动方向排列,但仍存在部分玻纤与流动方向呈一定角度分布;相比之下,近界面层中玻纤沿流动方向的取向程度最高,仅有少数玻纤偏离流动方向。这主要是由于近模壁层熔体首先与模具壁面接触并迅速冷却,黏度升高导致部分玻纤冻结,限制了玻纤的取向发展;近界面层位于外层熔体与内层熔体的交界处,由于二者流动状态存在差异,在驱动介质作用下该差异进一步增强,使界面附近形成较大的速度梯度和剪切作用,从而促进玻纤沿流动方向取向,因此近界面层的玻纤取向度最高,而中间层处于过渡

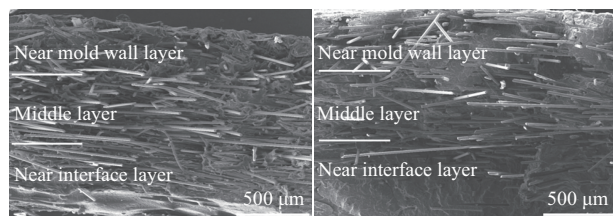
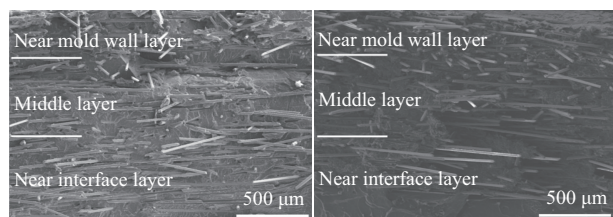
(a) LCO₂-PACIM-S(b) LCO₂-PACIM-O(c) LCO₂-ACIM-S(d) LCO₂-ACIM-O

图9 四种工艺弯管制件的SEM图像

Fig. 9 SEM images of elbow pipes under four processes

状态。

在相同注塑工艺条件下,与短射法相比,溢流法由于设置了溢流腔,使穿透过程中熔体能够持续向溢流腔排出,从而维持较为稳定的流动状态并减少局部紊动,有利于玻纤沿流动方向取向。此外,短射法成型的管件外层壁厚相对较小,在成型过程中与模具之间的热交换作用更为强烈,导致熔体温度下降较快、黏度增大,从而在一定程度上抑制了玻纤的取向。因此,溢流法管件相较于短射法管件玻纤整体取向度更高。对比不同注塑工艺,LCO₂-ACIM工艺中空结构主要由LCO₂直接穿透形成,而在LCO₂-PACIM工艺中,中空结构则由实体浮芯结构穿透形成。在该过程中,浮芯结构的引入使剪切应变率峰值位于浮芯表面,形成沿流动方向连续分布的高剪切区;相比之下,在纯流体穿透条件下,剪切应变率峰值则主要位于模具表面,其剪切作用分布相对分散^[9]。上述差异使得LCO₂-PACIM工艺中外层熔体在穿透过程中受到更稳定且持续的剪切作用,从而更有利于玻纤沿熔体流动方向取向。

2.3 成型工艺对弯管耐压性能的影响

耐压性能是评价中空管件成型质量的重要指标。本研究采用内耐压瞬时爆裂试验,对四种工艺条件下制备的LGFP弯管制件进行耐压性能测试,结果如图10所示。

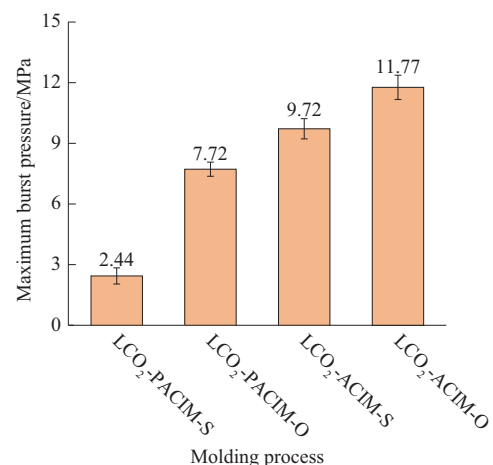


图10 四种工艺弯管制件的耐压性能

Fig. 10 Pressure resistance of elbow pipes under four processes

不同注塑工艺条件下弯管制件的最大瞬时爆破压力差异明显。在相同注塑工艺下,溢流法成型管件的耐压性能优于短射法;在注塑方法相同时,LCO₂-ACIM工艺管件耐压性能优于LCO₂-PACIM工艺管件。

管件的耐压性能受残余壁厚与玻纤取向的共同影响。结合图7可知,相比短射法,溢流法成型管件总壁厚更大且沿熔体流动方向波动较小,从而具备更高的整体承载能力。短射法成型管件后段壁厚明显减薄,易形成局部薄壁区域,在内压作用下更易发生破裂,尤其是 LCO_2 -PACIM-S工艺,其后段壁厚显著下降,导致耐压性能明显降低。此外,溢流法成型管件中玻纤取向度更高且分布更为密集,较小的纤维间距有利于形成连续的增强网络。与此同时,较高的玻纤取向能够促进载荷在纤维与基体之间的有效传递,延缓裂纹萌生与扩展,从而进一步提升管件的耐压性能。

在相同注塑方法下, LCO_2 -ACIM工艺管件耐压性能高于 LCO_2 -PACIM工艺管件,主要是因为其保留了较大的残余壁厚。较大的残余壁厚可有效降低管件在相同内压条件下所承受的环向应力,从而延缓管件达到材料强度极限,进而提高管件的耐压性能。在 LCO_2 -PACIM-O工艺中,虽然其总壁厚相较于 LCO_2 -ACIM-O工艺管件降幅较大,但仍然表现出较高的耐压性能。其原因在于浮芯的引入有利于调控中空结构的形成过程,促进玻纤沿流动方向排列,形成更加连续的增强结构,提高载荷传递能力。同时,浮芯辅助成型可改善管件壁厚均匀性,降低局部应力集中,使压力分布更加均匀,从而提升管件的耐压性能。

3 结论

(1)不同工艺对弯管制件耐压性能、玻纤取向、残余壁厚及均匀性具有显著影响。 LCO_2 -ACIM工艺可保持较大的壁厚,从而具有较高的耐压性能; LCO_2 -PACIM工艺通过浮芯辅助穿透改善壁厚均匀性,并促进玻纤沿熔体流动方向取向。

(2)四种工艺制备管件的玻纤取向均呈现由近模壁层向近界面层逐渐增强的规律。

(3)综合考虑壁厚调控、玻纤取向及耐压性能, LCO_2 -PACIM-O工艺在实现结构轻量化的同时保持较好的综合性能,具有较好的应用潜力。

参考文献

- [1] 仇永宏.长玻纤增强聚丙烯复合材料结构与性能[J].石化技术,2022,29(6):1-3.
QIU Yonghong. Structure and properties of long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Petrochemical Industry Technology,2022,29(6):1-3.
- [2] 侯旭秦,李桂丽,陈兴元,等.长玻纤增强塑料注射成型纤维断裂概述[J].高分子材料科学与工程,2019,35(5):179-183.
- [3] HOU Xuqin, LI Guili, CHEN Xingyuan, et al. Overview of the fracture of long glass fiber reinforced thermoplastics during injection molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(5): 179-183.
- [4] TSENG H C, CHANG R Y, HSU C H. Numerical prediction of fiber orientation and mechanical performance for short/long glass and carbon fiber-reinforced composites[J]. Composites Science and Technology, 2017, 144:51-56.
- [5] RYU Y, SOHN J S, KWEON B C, et al. Shrinkage optimization in talc-and glass-fiber-reinforced polypropylene composites[J]. Materials, 2019, 12(5). DOI:10.3390/ma12050764.
- [6] 安峻莹,孟征,苏昱.长玻纤增强聚丙烯复合材料力学性能的研究进展[J].工程塑料应用,2016,44(6):132-136.
AN Junying, MENG Zheng, SU Yu. Research progress of mechanical property of long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):132-136.
- [7] 刘琳,黄诚珑.长玻纤增强聚丙烯复合材料的制备及力学性能[J].工程塑料应用,2021,49(3):42-46.
LIU Lin, HUANG Chenglong. Preparation and mechanical properties of long glass fiber reinforced polypropylene composite[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3):42-46.
- [8] WANG G, DONG M Y, DENG H H, et al. Polypropylene foaming using supercritical carbon dioxide: A review on fundamentals, technology, and applications[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 8(1). DOI:10.1007/s42114-024-01117-9.
- [9] 董婧晗,刁帅,赵一权,等.应用于汽车行业的再生聚丙烯材料性能[J].材料导报,2025,39(增刊1):769-773.
DONG Jinghan, DIAO Shuai, ZHAO Yiquan, et al. Properties of recycled polypropylene materials for automotive industry[J]. Materials Reports, 2025, 39(Suppl 1):769-773.
- [10] 杨建根,曾祥瑞,于盛睿.水辅助注射成型技术研究进展[J].工程塑料应用,2023,51(12):170-175.
YANG Jiagen, ZENG Xiangrui, YU Shengrui. Advances in water-assisted injection moulding technology[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12):170-175.
- [11] ZHANG W, KUANG T Q, LIU H S, et al. Improved process moldability and part quality of short-glass - fiber-reinforced polypropylene via overflow short-shot water-assisted injection molding[J]. Journal of Polymer Engineering, 2022, 42(4):362-373.
- [12] 金廷翁,匡唐清,柳和生,等.液态二氧化碳辅助注射管件壁厚的工艺影响[J].高分子材料科学与工程,2025,41(1):91-98.
JIN Tingweng, KUANG Tangqing, LIU Hesheng, et al. Process impact of wall thickness of liquid carbon dioxide-assisted injection molding pipes[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2025, 41(1):91-98.
- [13] KUANG T Q, WANG J M, LIU H S, et al. Effects of processing method and parameters on the wall thickness of gas-projectile-assisted injection molding pipes[J]. Polymers, 2023, 15(9). DOI: 10.3390/polym15091985.

- [13] ZHANG W, WANG M Z, KUANG T Q, et al. The investigation of overflow water-powered projectile-assisted injection molded short-glass-fiber-reinforced polypropylene[J]. *Processes*, 2024, 12(11). DOI:10.3390/pr12112333.
- [14] 刘建萍,康鹏,高达利,等.玻纤增强聚丙烯复合材料表面“浮纤”的成因及其解决措施[J]. *塑料科技*, 2022, 50(5):108–112.
LIU Jianping, KANG Peng, GAO Dali, et al. Reasons and solutions of surface ‘floating fiber’ on glass fiber-reinforced polypropylene composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2022, 50(5): 108–112.
- [15] 徐俊文,匡唐清,柳和生,等.不同流体介质对长玻纤增强聚丙烯流体驱动浮芯辅助注塑管件的影响[J]. *工程塑料应用*, 2026, 54(5): 91–98, 125.
XU Junwen, KUANG Tangqing, LIU Hesheng, et al. Effects of different fluid media on long glass fiber reinforced polypropylene pipe fittings with fluid-projectile-assisted injection molding[J]. *Engineering Plastics Application*, 2026, 54(5):91–98, 125.
- [16] 梁健康.液态二氧化碳驱动浮芯辅助注塑实验平台的研制[D].南昌:华东交通大学,2024.
LIANG Jiankang. Development of experimental platform for liquid carbon dioxide-powered projectile-assisted injection molding[D]. Nanchang:East China Jiaotong University, 2024.
- [17] 邹泽芫,匡唐清,杨帆,等.液态二氧化碳辅助注塑相间穿透数值模拟[J/OL]. *化工进展*, 2025: 1–13[2026-05-04]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1278>.
ZOU Zeyuan, KUANG Tangqing, YANG Fan, et al. Numerical simulation on interphase penetration of liquid carbon dioxide assisted injection molding[J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025: 1–13[2026-05-04]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1278>.
- [18] 杨帆,柳和生,匡唐清,等.基于可视化的液态二氧化碳辅助注塑工艺穿透过程的研究[J]. *材料导报*, 2025, 39(21):35–41.
YANG Fan, LIU Hesheng, KUANG Tangqing, et al. Visualization-based study on the penetration process of liquid carbon dioxide-assisted injection molding process[J]. *Materials Reports*, 2025, 39 (21):35–41.
- [19] 朱瑶瑶.长玻纤增强聚丙烯流体辅助注塑成型工艺-形态-性能研究[D].南昌:华东交通大学,2023.
ZHU Yaoyao. Study on processing method-morphology-properties of fluid assisted injection molded pipe of long glass fiber reinforced polypropylene[D]. Nanchang:East China Jiaotong University, 2023.