

<http://pmse.scu.edu.cn>

## 液态二氧化碳辅助注射管件壁厚的工艺影响

金廷翁<sup>1</sup>, 匡唐清<sup>2</sup>, 柳和生<sup>2</sup>, 杨帆<sup>3</sup>, 梁健康<sup>2</sup>, 彭杰<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学 机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013;  
3. 华东交通大学 基础实验与工程实践中心, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 基于实验手段考察了液态二氧化碳辅助注射成型(LCO<sub>2</sub>-AIM)管件壁厚分布及其均匀性特点以及工艺参数影响。与气体辅助注射成型(GAIM)和水辅助注射成型(WAIM)管件对比发现, LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚沿流动方向呈先减小后增大的趋势, 而GAIM和WAIM管件壁厚沿流动方向逐渐增大, LCO<sub>2</sub>-AIM成型的管件壁厚比GAIM和WAIM成型的管件壁厚更薄、更均匀。通过单因素实验法发现, 熔体温度、注射延迟时间、LCO<sub>2</sub>注射压力、熔体注射压力和模具温度这5个工艺参数中, 注射延迟时间对LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚的影响显著, 管件壁厚随着注射延迟时间的增大而增大, 熔体温度、LCO<sub>2</sub>注射压力和模具温度对LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚影响较小; 工艺参数对管件壁厚均匀性影响较小。

**关键词:** 液态二氧化碳; 流体辅助注射成型; 壁厚; 工艺参数; 工艺方法

中图分类号: TQ320.66<sup>+</sup>2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7555(2025)01-0091-08

流体辅助注射成型(Fluid-assisted injection molding, FAIM)是为了克服传统注射成型(Conventional injection molding, CIM)局限性而发展起来的新型注射工艺, 与CIM相比, 流体介质的引入使其获得了更多的优势, 如产品无翘曲和收缩、成型效率高、节省原料和减轻产品质量等<sup>[1,2]</sup>。根据使用的流体介质类型, FAIM主要分为气体辅助注射成型(Gas Injection Assisted Molding, GAIM)、水辅助注射成型(Water injection assisted molding, WAIM)和液态二氧化碳辅助注射成型(Liquid carbon dioxide-assisted injection molding, LCO<sub>2</sub>-AIM)。GAIM工艺适用材料广, 但高压氮气热导率低, 在高温时易进入熔体导致内壁发泡<sup>[3]</sup>。WAIM工艺管件内壁面光滑, 成型周期短, 壁厚相对GAIM更薄<sup>[4,5]</sup>, 但其适用材料少, 需对制件进行额外的排水、干燥工序, 且存在漏水损坏模具的风险。液态二氧化碳辅助注射成型(LCO<sub>2</sub>-AIM)工艺是在气体辅助注射工艺和水辅助

注射工艺的基础上使用液态二氧化碳(Liquid carbon dioxide, LCO<sub>2</sub>)替代高压氮气和水衍生出来的一种新型注射工艺。LCO<sub>2</sub>-AIM工艺利用高压LCO<sub>2</sub>穿透熔体形成中空管件, 可以很好地解决GAIM工艺和WAIM工艺的缺陷<sup>[6,7]</sup>。与使用氮气的GAIM相比, LCO<sub>2</sub>-AIM具有更快的冷却速度, 成型周期可缩短20%~40%<sup>[6]</sup>; 与WAIM相比, LCO<sub>2</sub>-AIM材料适用性更广, 在成型完成后, 无需对制品进行额外的排水、干燥等工序<sup>[8]</sup>。

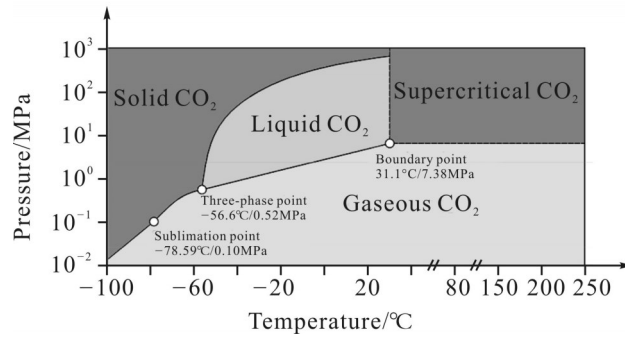
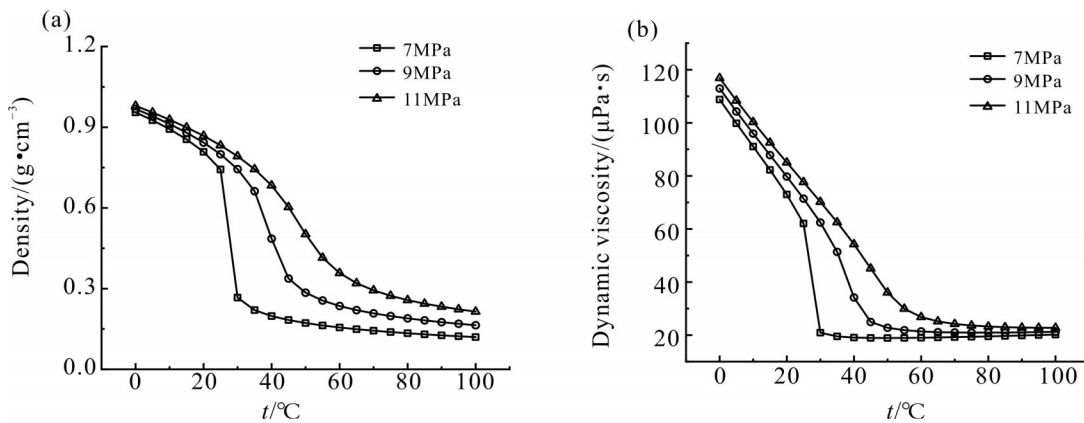
LCO<sub>2</sub>-AIM利用高压LCO<sub>2</sub>在型腔中穿透熔体以成型中空塑件, LCO<sub>2</sub>进入型腔后存在复杂的相变, 密度和动力黏度会随着压力和温度的改变而发生变化。Fig.1和Fig.2分别为CO<sub>2</sub>的相变图和物性随温度变化图。当压力超过7.38 MPa, 温度超过31.1 °C即处于超临界态<sup>[9]</sup>, 超临界二氧化碳(Supercritical carbon dioxide, SC-CO<sub>2</sub>)密度与液态接近, 还拥有气体的高扩散率和低黏度, 具有良好的流动、传质、传

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0252

收稿日期: 2024-01-07

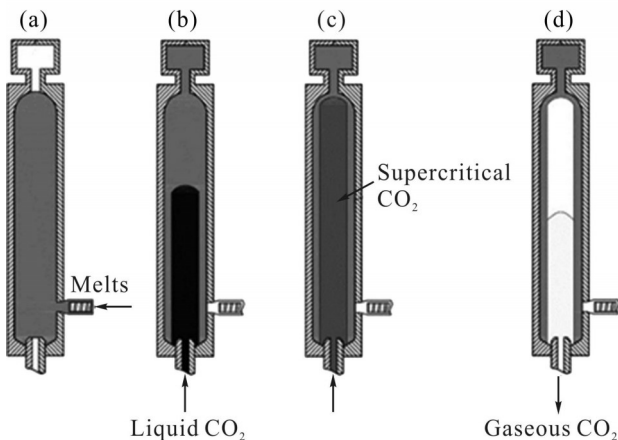
基金项目: 江西省自然科学基金重点项目(20232ACB204004); 国家自然科学基金资助项目(52273033); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBE51012); 国家自然科学基金资助项目(52163006)

通讯联系人: 匡唐清, 主要从事新型注塑工艺研究, E-mail: [tkuang@ecjtu.edu.cn](mailto:tkuang@ecjtu.edu.cn)

Fig. 1 CO<sub>2</sub> phase transition diagramFig. 2 Variation of CO<sub>2</sub> physical properties

(a): variation of CO<sub>2</sub> density with temperature at different pressures; (b): variation of carbon dioxide kinetic viscosity with temperature at different pressures

热性能<sup>[10,11]</sup>。因而 LCO<sub>2</sub>-AIM 工艺过程中存在 CO<sub>2</sub> 的相变 (LCO<sub>2</sub> 在熔体穿透过程中吸热转化为 SC-CO<sub>2</sub>, 卸压过程中由 SC-CO<sub>2</sub> 为气态 CO<sub>2</sub>)。

Fig. 3 Schematic diagram of LCO<sub>2</sub>-AIM process

(a): melt injection; (b): LCO<sub>2</sub> injection; (c): keep the pressure on; (d): open mold pickup

根据 LCO<sub>2</sub> 注入前是否将熔体充满模具型腔可将 LCO<sub>2</sub>-AIM 工艺方法分为短射法和溢料法。其溢

流法成型过程为: (a) 合模后, 型腔中注满熔体; (b) 从流体注射喷嘴注入 LCO<sub>2</sub>, LCO<sub>2</sub> 在熔体中穿透, 将熔体向溢料腔排挤形成中空; (c) 进入保压阶段, LCO<sub>2</sub> 吸收热量温度上升, 进入超临界状态; (d) 经短暂保压后卸压, SC-CO<sub>2</sub> 在卸压过后转为气态同时大量吸热, 迅速膨胀并从型腔中排出, 开模取件, 完成一个成型周期; 如 Fig.3 所示。

鉴于 FAIM 有着广泛的应用前景, 学者们对该工艺进行了深入研究, 但大都聚焦于 GAIM 和 WAIM。Adam 等<sup>[12]</sup>通过实验, 探究了气体辅助注射工艺中熔体温度、注气时间和注射延迟时间对气道位置、形状、尺寸及注射制品结构的影响。研究表明, 注射延迟时间越长, 气道形状越规则; 较长的注气时间导致“气指”现象, 并对制品造成负面的影响; 而降低熔体温度有利于减少气泡, 使气道表面更光滑。Yang 等<sup>[13]</sup>利用流体仿真学(CFD)方法对 WAIM 工艺短射管件残余壁厚进行模拟, 结果表明, 注水压

力、熔体注射量和熔体温度是影响残余壁厚的关键参数,注水压力和熔体温度的增加都会使残余壁厚明显减小,而熔体注射量的增加会导致残余壁厚增加;此外,延迟时间和模具温度对空心率的影响很小。匡唐清等<sup>[4]</sup>对圆管件的溢流法水辅助注射进行实验研究,探究了型腔截面大小对管件内表面质量、残余壁厚大小、变化和波动的影响及机理。

目前尚无对 LCO<sub>2</sub>-AIM 工艺的研究报道。而 LCO<sub>2</sub>与氮气、水迥异的性能及其在成型过程中发生的相变并引发性能上的巨变,使得 LCO<sub>2</sub>-AIM 工艺成型机理也迥异于 GAIM 和 WAIM。对此,本文基于自主搭建的实验平台探究了 LCO<sub>2</sub>-AIM 工艺管件壁厚分布的特点,并通过单因素法探究了工艺参数对 LCO<sub>2</sub>-AIM 管件壁厚分布及其均匀性的影响,以期 LCO<sub>2</sub>-AIM 实际生产提供指导,提高成型质量。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

成型材料为中国石化茂名公司生产的聚丙烯

(PP),牌号为 PPH-T03,其熔融指数 3 g/10 min,成型收缩率 1.65%,热变形温度 91 °C。

### 1.2 实验设备

自主搭建的 LCO<sub>2</sub>-AIM 实验平台由注射机、模具、模温机、空气压缩机和 LCO<sub>2</sub>注射组件组成。注射机:MA1600M/380-E80,海天集团有限公司;自行设计的直管模具,尺寸如图 4 所示;空压机:V-0.6/8,浙江森隆机电有限公司;二氧化碳气辅压力控制器:CPC-00,北京中拓模塑科技有限公司;模温机:BTM-09W,深圳博瑞克机械有限公司;LCO<sub>2</sub>注射组件包括 LCO<sub>2</sub>注射模块和喷嘴。

Tab. 1 Process parameters various molding process

Forming method	Overflow method
Melt temperature/°C	200
Injection delay time/s	2
Fluid injection pressure/ MPa	9
Melt injection pressure/ MPa	9
Mold temperature/°C	30
Liquid temperature/°C	25

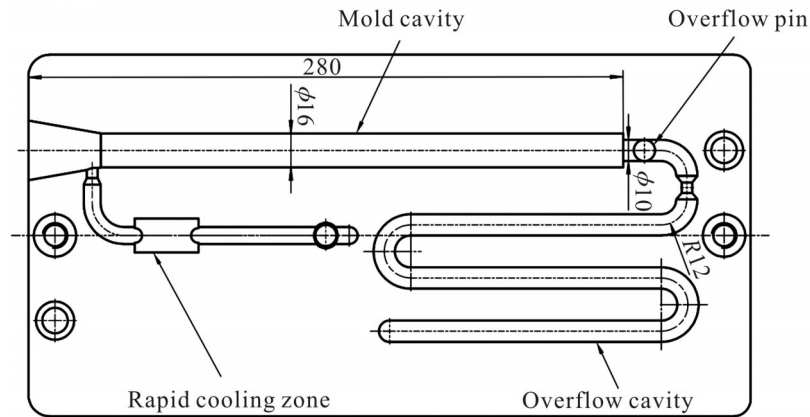


Fig. 4 Mold used in the experiments (unit: mm)

Tab. 2 Processing parameters for LCO<sub>2</sub>-AIM process

Process parameters	Level				
	1	2	3	4	5
Melt temperature /°C	185	190	195	(200)	205
Injection delay time /s	(2)	4	6	8	10
Melt injection pressure/ MPa	6*	7	8	(9)	10
LCO <sub>2</sub> injection pressure/ MPa	7	8	(9)	10	11
Mold temperature/°C	25	(30)	35	40	45

note: the value in parentheses is the basic value of each process parameter, \* indicates that the parameters of the molding tubing defects

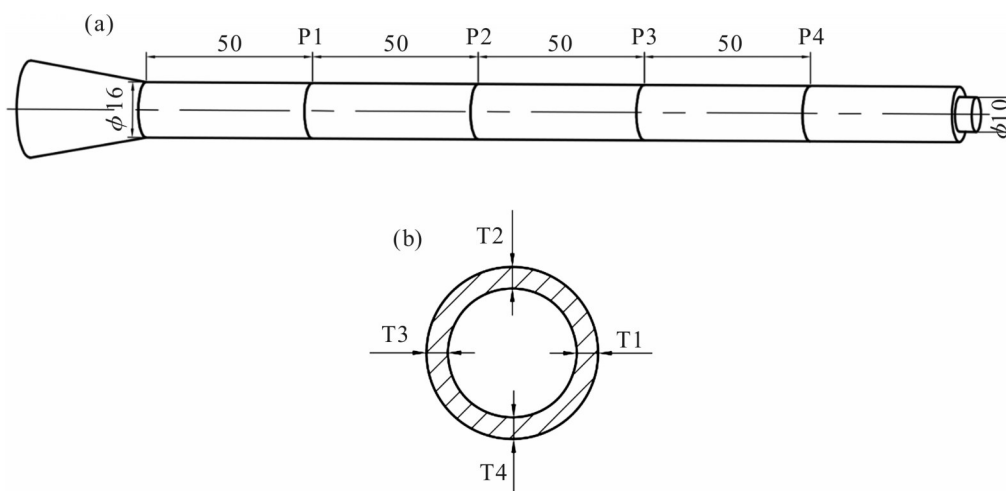


Fig. 5 Residual wall thickness measurement scheme (unit: mm)  
(a): pipe fitting measurement position; (b): section measurement point

### 1.3 实验方案

首先对 LCO<sub>2</sub>-AIM, GAIM 和 WAIM 这三种成型工艺的直管残余壁厚及壁厚均匀性进行对比。溢料法相比短射法表面质量更好,壁厚更均匀,因此采用相同的工艺参数进行溢料法试验,基本工艺参数如 Tab.1 所示。

而后采用单因素实验法探究各工艺参数对 LCO<sub>2</sub>-AIM 管件壁厚分布及其壁厚均匀性的影响。根据 PP 及 LCO<sub>2</sub> 的性质确定各工艺参数组合及其水平,其工艺参数如 Tab.2 所示。

### 1.4 壁厚测量与壁厚均匀性表征

**1.4.1 壁厚测量:** 每组实验取 3 根管件作为样品,每个样品取相对应的 3 个位置,如 Fig.5(a)所示,每个位置取 4 个方位用数显游标卡尺测量,如 Fig.5(b)所示。取每一组实验管件在相同位置的测量结果的算术平均值作为该组实验在该位置的平均残余壁厚;对每一组实验所测得的所有数据取算术平均值作为该组实验样品的总体残余壁厚。

**1.4.2 壁厚均匀性表征:** 管件壁厚的均匀性是评估管件质量的重要指标。管件壁厚的均匀性通过壁厚的标准偏差来表征,标准偏差越小,表示管件壁厚波动越小,壁厚越均匀,反之,则管件壁厚波动大,壁厚均匀性差。标准偏差的计算公式如式(1)

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

式中:  $\sigma_j$ ——壁厚标准偏差, mm;  $N$ ——测量位置个

数;  $X_i$ ——同一支管件在横截面第  $i$  处位置壁厚, mm;  $\mu$ ——总体平均壁厚, mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 LCO<sub>2</sub>-AIM 管件壁厚分布及其均匀性

LCO<sub>2</sub>-AIM, GAIM 和 WAIM 工艺方法所制备管件的纵剖图如图 Fig.6 所示,沿流动方向的平均壁厚结果如图 Fig.7 所示。

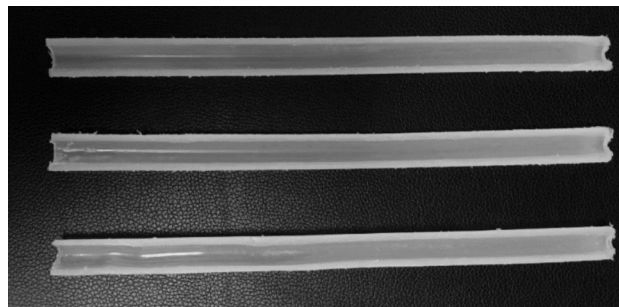


Fig. 6 Each process formed sample and its longitudinal section diagram (from top to bottom are LCO<sub>2</sub>- AIM, GAIM, WAIM, respectively)

由 Fig.7 可知, LCO<sub>2</sub>-AIM 工艺成型的管件壁厚沿流动方向呈先减小后增大的趋势,整体变化幅度较小;而 GAIM 工艺和 WAIM 工艺成型的管件壁厚沿流动方向呈逐渐增大的趋势,整体增大幅度较大。LCO<sub>2</sub>-AIM 工艺成型的管件壁厚呈先减小后增大的原因主要是 LCO<sub>2</sub> 在模具型腔初始阶段使熔体内表面快速冷却形成凝固层,由 Fig.1 和 Fig.2 可知, LCO<sub>2</sub> 吸热使温度和压力超过临界点进入超临界态,

相态变化引起体积膨胀挤压凝固层,壁厚略微变薄;而随着温度的升高,SC-CO<sub>2</sub>密度变化趋缓,且SC-CO<sub>2</sub>可压缩,体积膨胀对凝固层的挤压作用逐渐减小,穿透截面逐渐收缩,因此P2位置后壁厚逐渐增大。由Fig.7还可知,LCO<sub>2</sub>-AIM比GAIM和WAIM工艺成型的管件壁厚要薄,这可能是LCO<sub>2</sub>在高温条件下相变吸热,相态变化伴随着体积膨胀,推动熔体沿模壁方向径向流动,导致穿透截面更大,因而管件壁厚更薄。

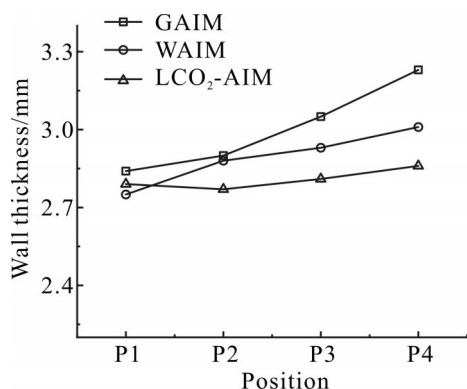


Fig. 7 Effect of process methods on the wall thickness of pipes

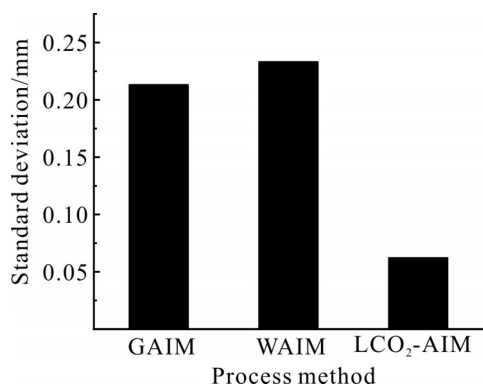


Fig. 8 Effect of process methods on the uniformity of pipe wall thickness

Fig.8为各工艺成型的管件壁厚标准偏差。由Fig.8可知,LCO<sub>2</sub>-AIM管件残余壁厚标准偏差最小,WAIM管件残余壁厚标准偏差最大。这表明LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚均匀性最好,WAIM管件壁厚均匀性最差。WAIM工艺管件壁厚均匀性较差是由于WAIM充模流动过程中存在高压水和熔体的分层流动,黏度差异大,高压水和熔体接触后易产生流动漩涡,多个强弱不一的流动漩涡在熔体和高压水的分层面上下往复变化,导致穿透过程中出现了不稳定波动,因此WAIM管件壁厚均匀性较差<sup>[15]</sup>。而LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚均匀性优于GAIM和WAIM管件是由

于在LCO<sub>2</sub>-AIM中,LCO<sub>2</sub>注入模具型腔中受热快速相变为SC-CO<sub>2</sub>,以超临界态在熔体中穿透;对SC-CO<sub>2</sub>在加热管道竖直向上流动的研究发现,SC-CO<sub>2</sub>密度分布不均导致的流动加速效应会削弱近壁面区域剪切应力,进而影响近壁面区湍流的生成与扩散<sup>[16]</sup>,SC-CO<sub>2</sub>在穿透熔体过程中,流体温度沿流动方向增加,流体密度随着流动距离的增加而逐渐下降,使得流体速度逐渐增大,流体与熔体间的剪切作用被调度到提高流体速度,与熔体间的剪切作用减小,削弱了湍流强度,因而SC-CO<sub>2</sub>穿透过程较为稳定,管件壁厚均匀性较好。

## 2.2 工艺参数对管件残余壁厚及其均匀性的影响

在熔体注射压力为6 MPa时,由于压力过低,熔体未能完全充满型腔(即为短射),导致LCO<sub>2</sub>注入后管件前后段壁厚差异明显,均匀性差,不符合溢流法工艺要求,在此不考虑。在溢料法中,熔体注射压力对壁厚大小及其均匀性的影响结果如Fig.9所示。由Fig.9可知,随着熔体注射压力的增大,管件壁厚总体呈略增大趋势。这是因为一方面当熔体注射压力增大,熔体流动速度加快,熔体与模具剪切作用增强,熔体温度升高,熔体流动性好;另一面是熔体注射压力的增大使得熔体与模具贴合地更紧实,黏度变大,熔体流动性降低。两方面相互抵消,导致熔体注射压力对LCO<sub>2</sub>的壁厚影响不明显。由Fig.9可知,标准偏差随着熔体注射压力的增加在0.1 mm上下波动,影响不大。

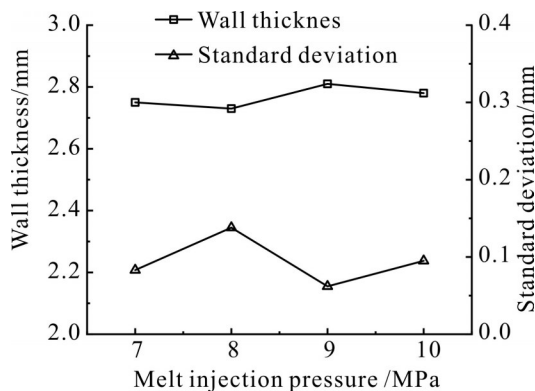


Fig. 9 Effect of melt injection pressure on the wall thickness and uniformity of pipes

熔体温度对壁厚大小及其均匀性的影响结果如Fig.10所示。从Fig.10可知,随着熔体温度的增加,管件残余壁厚呈先减小后增加的趋势。这可以从两

方面来进行分析。一方面随着熔体温度的升高,熔体黏度更低,流动性更好,流体介质可推动更多的熔体前进,管件壁厚也就更薄;另一方面注射压力为9 MPa的 $\text{LCO}_2$ 注入熔体后受热相变为 $\text{SC-CO}_2$ ,且温度越高,其物性越趋近气态 $\text{CO}_2$ ,穿透能力就越差,壁厚就越厚。在熔体温度略低时,熔体温度的升高对其黏度的影响要比对 $\text{SC-CO}_2$ 物性的影响更大,因而壁厚变薄;而在熔体温度较高时,熔体温度的升高对其黏度的影响要比对 $\text{SC-CO}_2$ 物性的影响更小,因而壁厚变厚。由Fig.10可知,壁厚标准偏差随着熔体温度的升高先减小后增大。其原因可能是:熔体温度越高, $\text{LCO}_2$ 更快转化为 $\text{SC-CO}_2$ ,温度的升高使得 $\text{SC-CO}_2$ 流动速度加快, $\text{SC-CO}_2$ 压力下降越多,湍流强度削弱<sup>[17,18]</sup>,因而穿透稳定性更好,标准偏差减小;但熔体温度过高,熔体黏度较低, $\text{LCO}_2$ 在穿过程中易进入熔体内部形成气泡,造成管件壁厚偏大,因而标准偏差增大。

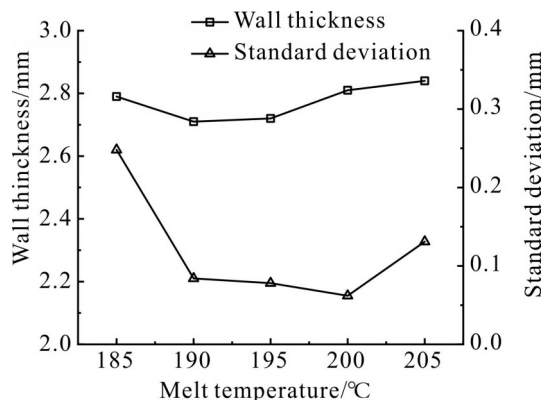


Fig. 10 Effect of melt temperature on the wall thickness and uniformity of pipes

$\text{LCO}_2$ 注射压力对壁厚大小及其均匀性的影响结果如Fig.11所示。从Fig.11可知,随着 $\text{LCO}_2$ 注射压力从7 MPa增加到11 MPa,管件残余壁厚总体上呈先增加后减小的趋势。这可能有两方面的原因:一方面随着 $\text{LCO}_2$ 注射压力的增大,可以推动更多的熔体向前,从而获得更大的穿透截面,壁厚相应变薄,正如 $\text{LCO}_2$ 注射压力从8 MPa增加到11 MPa的结果;另一方面是 $\text{LCO}_2$ 注入后发生相变引起的变化, $\text{LCO}_2$ 注射压力为7 MPa时,其注入熔体中受热直接相变为气态 $\text{CO}_2$ ,而注射压力达到8 MPa及以上时,其注入熔体中受热相变为 $\text{SC-CO}_2$ ,相变为气态 $\text{CO}_2$ 时会吸收更多的热量,体积膨胀也更大,因而在穿透

前沿形成更厚的凝固层推动更大截面的熔体向前,使得7 MPa注射压力时的残余壁厚比8 MPa更薄。由Fig.11可知,壁厚标准偏差随 $\text{LCO}_2$ 注射压力升高存在波动,但总的说来都在0.1以下,影响较小。

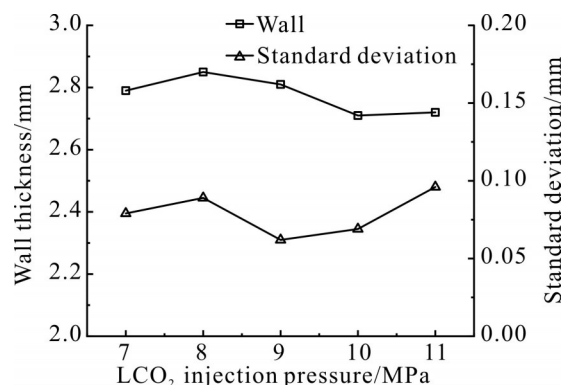


Fig. 11 Effect of  $\text{LCO}_2$  injection pressure on the wall thickness and uniformity of pipes

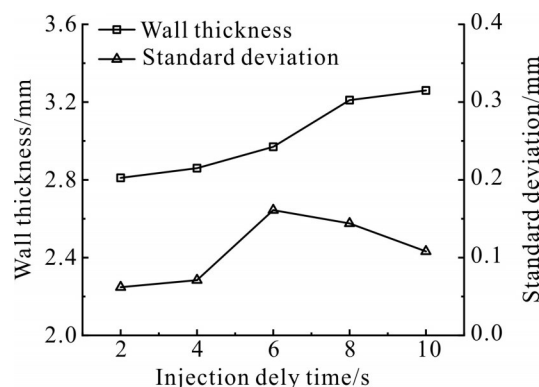


Fig. 12 Effect of injection delay time on the wall thickness and uniformity of pipes

$\text{LCO}_2$ 注射延迟时间对壁厚大小及其均匀性的影响结果如Fig.12所示。从Fig.12可知, $\text{LCO}_2$ 注射延迟时间对管件残余壁厚的影响明显,随着注射延迟时间从2 s增加到10 s,管件残余壁厚从不足2.8 mm逐渐增加到3.2 mm以上。这是因为随着注射延迟时间的增加,熔体与模具的接触时间越长,温度下降更多,凝固层加厚,黏度增大,流动性降低, $\text{CO}_2$ 推动熔体前进的阻力增大,穿透截面更小,相应管件残余壁厚更厚。由Fig.12可知,壁厚标准偏差随着 $\text{LCO}_2$ 注射延迟时间的增大总体上呈先增大后减小的趋势。这可能是由于:在较短的 $\text{LCO}_2$ 注射延迟时间范围内,随着注射延迟时间的延长,实际模温的不均匀性导致熔体温度的不均匀性更为突出,从而使得近模壁处熔体黏度的不均匀性增加, $\text{CO}_2$ 在熔体中的穿透不稳定性更凸显,导致壁厚不均匀;在较长的

LCO<sub>2</sub>注射延迟时间范围内时,随着延迟时间的增加,实际模温更趋均匀,近模壁处熔体黏度差异也 smaller,CO<sub>2</sub>在熔体中的穿透更为稳定,因而壁厚标准偏差逐渐减小。

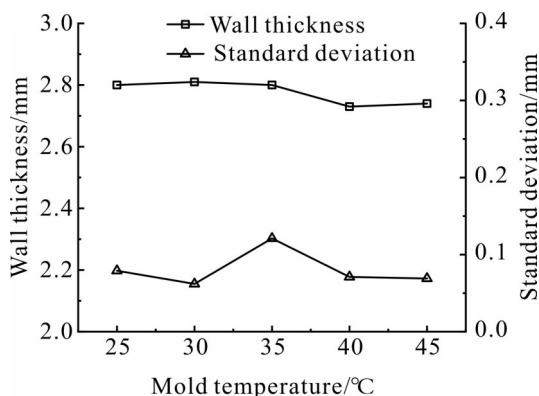


Fig. 13 Effect of mold temperature on the wall thickness and uniformity of pipes

模具温度对壁厚大小及其均匀性的影响结果如图13所示。从Fig.13中可知,模具温度对管件壁厚的影响不太明显,总体上残余壁厚随模具温度升高呈略微变薄的趋势。这是因为随着模具温度的升高,近壁面熔体与模具间的温度差变小,熔体冷却速度变慢,近模壁处熔体黏度增速变缓,熔体流动阻力相对更小,CO<sub>2</sub>能推动更多的熔体,导致残余壁厚略微变薄。从Fig.13中可知,管件标准偏差存在波动,但总体上随着模具温度升高而减小。这主要是由于随着模具温度的提高,熔体与模壁间的热交换速率变慢,熔体温度下降更慢,熔体温度分布更均匀,熔体黏度波动小,CO<sub>2</sub>在其中的穿过程较为稳定,因而壁厚波动小。

### 3 结论

通过实验探究了工艺方法及工艺参数对LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚分布及其均匀性的影响,可以为LCO<sub>2</sub>-AIM及其衍生工艺提供技术指导,推动LCO<sub>2</sub>-AIM工艺向实际生产迈进,其研究结果如下。

(1)在溢料法中,LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚沿流动方向呈先减小后增大的趋势,不同于GAIM和WAIM管件壁厚沿流动方向逐渐增大的趋势;LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚比GAIM和WAIM管件壁厚要薄且壁厚均匀性更好。

(2)LCO注射延迟时间对LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚

的影响较为显著,注射延迟时间越长,壁厚越厚;而熔体温度、LCO<sub>2</sub>注射压力和模具温度对其壁厚影响不太明显。

(3)工艺参数对LCO<sub>2</sub>-AIM管件壁厚均匀性的影响较小。

#### 参考文献:

- [1] Olley P. An approximation to the PTT viscoelastic model for gas assisted injection moulding simulation[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2020, 278: 104246.
- [2] 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: 362-373.
- [3] 邓丽霞. 气体辅助注射成型技术的研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(6):54-58.  
Deng L X. The research overview of gas-assisted injection molding[J]. Engineering Plastics Applications, 2013, 41(6): 54-58.
- [4] Czepiel M, Bankosz M, Sobczak-Kupiec A. Advanced injection molding methods: review[J]. Materials. 2023, 16: 5802.
- [5] Liu X H, Pan Y M, Zheng G Q, *et al.* Overview of the experimental trends in water-assisted injection molding[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 303: 1-13.
- [6] Farish M. Linde offers a novel approach to gas injection molding [EB/OL]. (2016-07-26). <https://insights.globalspec.com/article/2961/linde-offers-a-novel-approach-to-gas-injection-molding?srchwebhitid=1330989266&srchitem=1>.
- [7] Laird K. An evolution in gas injection molding- gas injection molding- archive[EB/OL]. (2017-09-18). <https://www.polyestertime.com/gas-injection-molding/>.
- [8] Xiao F, Sun, Lih-Sheng, *et al.* Novel injection molding foaming approaches using gas-laden pellets with N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>+ CO<sub>2</sub> as the blowing agents[J]. Polymer Engineering & Science, 2014, 54: 899-913.
- [9] 刘斌, 王彦玲, 巩锦程, 等. 超临界CO<sub>2</sub>增稠剂研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(5): 181-190.  
Liu B, Wang Y L, Gong J C, *et al.* Effect of supercritical CO<sub>2</sub> temperature on structure and properties of viscose fabric[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(5): 181-190.
- [10] 熊奥, 阮建, 丁亚军, 等. 超临界二氧化碳辅助挤出制备微孔醋酸纤维素[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(3): 24-31.  
Xiong A, Ruan J, Ding Y J, *et al.* Microcellular cellulose diacetate foaming with supercritical carbon dioxide in extrusion process[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(3): 24-31.

- [11] Polikhronidi N, Batyrova R, Aliev A, *et al.* Supercritical CO<sub>2</sub>: properties and technological applications - a review[J]. *Journal of Thermal Science*, 2019, 28: 394-430.
- [12] Gnatowski A, Stachowiak T. The influence of gas- assisted injection molding parameters on the structure and thermomechanical properties of hollow parts[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2013, 53: 257-262.
- [13] Yang J, Yu S, Yu M. Study of residual wall thickness and multiobjective optimization for process parameters of water-assisted injection molding[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 2020: 3481752.
- [14] 匡唐清, 黄淑慧, 余春丛. 圆管件溢流法流体辅助注射实验分析[J]. *塑料工业*, 2015, 43(2):45-48.  
Kuang T Q, Huang S H, Yu C C. Experimental study of overflow fluid-assisted injection molding circular tubes[J]. *China Plastics Industry*, 2015, 43(2): 45-48.
- [15] 张增猛, 周华, 高院安, 等. 水辅助注射成型充模流动的仿真与分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(8): 140-146.  
Zhang M Z, Zhou H, Gao Y A, *et al.* Simulation analysis on cavity filling process in water- assisted injection molding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(8): 140-146.
- [16] Jackson J D. Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2013, 264(11): 24-40.
- [17] 洪瑞, 袁宝强, 杜文静. 垂直上升管内超临界二氧化碳传热恶化机理分析[J]. *化工学报*, 2023, 74(8): 3309-3319.  
Hong R, Yuan B Q, Du W J. Analysis on mechanism of heat transfer deterioration of supercritical carbon dioxide in vertical upward tube[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(8): 3309-3319.
- [18] 张开宇. 超临界CO<sub>2</sub>二元混合工质密度场分布及浮升力影响研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.  
Zhang K Y. Study on density field distribution and buoyancy influence of supercritical CO<sub>2</sub> binary mixing medium[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2023.

## Process Impact of Wall Thickness of Liquid Carbon Dioxide-Assisted Injection Molding Pipes

Tingweng Jin<sup>1</sup>, Tangqing Kuang<sup>2</sup>, Hesheng Liu<sup>2</sup>, Fan Yang<sup>3</sup>, Jiankang Liang<sup>2</sup>, Jie Peng<sup>1</sup>

(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. Center for Basic and Engineering Practice, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**ABSTRACT:** The wall thickness distribution and its uniformity characteristics of liquid carbon dioxide-assisted injection molding (LCO<sub>2</sub>-AIM) pipes and influence of process parameters were investigated based on experimental means. Comparison with gas injection assisted molding (GAIM) and water injection assisted molding (WAIM) pipes shows that the wall thickness of LCO<sub>2</sub>-AIM pipes decreases and then increases along the flow direction, while the wall thickness of GAIM and WAIM pipes increases gradually along the flow direction, and that the wall thickness of LCO<sub>2</sub>-AIM molded pipes is thinner and more homogeneous than that of GAIM and WAIM molded pipes. Through the one-way experimental method, it is found that among the five process parameters: melt temperature, injection delay time, LCO<sub>2</sub> injection pressure, melt injection pressure and mold temperature, the injection delay time has a significant effect on the wall thickness of the LCO<sub>2</sub>-AIM pipes, and the wall thickness of the pipes increases with the increase of the injection delay time, while the melt temperature, LCO<sub>2</sub> injection pressure, and mold temperature have a smaller effect on the wall thickness of LCO<sub>2</sub>-AIM pipes; the process parameters have a small effect on the wall thickness uniformity of pipes.

**Keywords:** liquid carbon dioxide; fluid-assisted injection molding; wall thickness; process parameters; process method