

# 玻纤质量分数对长玻纤增强聚丙烯水驱动弹头辅助共注塑管件的影响

廖钱生<sup>1,3</sup> 柳和生<sup>2</sup> 匡唐清<sup>2\*</sup> 刘家豪<sup>2</sup> 张伟<sup>2</sup>

1.华东交通大学交通运输工程学院,南昌,330013

2.华东交通大学机电与车辆工程学院,南昌,330013

3.南昌工程学院机械工程学院,南昌,330029

**摘要:**为研究玻纤质量分数对以长玻纤增强聚丙烯为外层材料、纯聚丙烯为内层材料的水驱动弹头辅助共注塑成形(W-PACIM)管件的影响,采用试验方法分析了玻纤质量分数对管件残余壁厚、玻纤取向分布规律及管件耐压性能的影响规律及影响机理,结果表明:随着玻纤质量分数的增大,管件总残余壁厚先减小后增大;管件外层根据玻纤取向的分布特点可分为近模壁层、中间层和近界面层,且玻纤沿熔体流动方向的取向由外而内逐层升高,随着玻纤质量分数的增大,外层玻纤分布均匀性降低;管件的耐压性能先增后减,玻纤质量分数为20%时,管件耐压性能最好。

**关键词:**玻纤质量分数;水驱动弹头辅助共注塑成形;残余壁厚;玻纤取向;耐压性能

**中图分类号:**TQ320.66

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.020

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Effects of Glass Fiber Mass Fraction on W-PACIM Pipes of Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene

LIAO Qiansheng<sup>1,3</sup> LIU Hesheng<sup>2</sup> KUANG Tangqing<sup>2\*</sup> LIU Jiahao<sup>2</sup> ZHANG Wei<sup>2</sup>

1.School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013

2.School of Mechanical & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013

3.School of Mechanical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, 330029

**Abstract:** To study the effects of glass fiber mass fraction on W-PACIM pipes with long glass fiber reinforced polypropylene as the outer material and pure polypropylene as the inner material, the influences of glass fiber mass fraction on the residual wall thickness, the orientation distribution of glass fibers and the pressure resistance of the pipes were analyzed by experimental methods. The results show that with the increases of glass fiber mass fraction, the total residual wall thickness of the pipes decreases first and then increases. The outer layer of the pipes may be divided into near the mold wall layer, the middle layer and the near interface layer according to the distribution characteristics of the glass fiber orientations, the orientation of the glass fiber along the melt flow direction increases gradually from the outside to the inside, the uniformity of the distribution of the outer glass fiber decreases with the increase of glass fiber mass fraction. The pressure resistance of pipes increases first and then decreases, when the glass fiber mass fraction is 20%, the pressure resistance of pipes is the best.

**Key words:** glass fiber mass fraction; water-powered projectile assisted co-injection molding (W-PACIM); residual wall thickness; glass fiber orientation; pressure resistance

### 0 引言

玻纤增强聚丙烯是一种以纯聚丙烯(polypropylene, PP)为基体,玻璃纤维为增强相,通过特定工艺生产的高分子复合材料。根据玻璃纤维的长度,玻纤增强聚丙烯可分为短玻纤增强聚丙烯

(SGFRPP)和长玻纤增强聚丙烯(long glass fiber reinforced polypropylene, LGFRPP)。LGFRPP具有成本低、密度小的优点,同时也具备良好的加工性能和力学性能<sup>[1]</sup>,广泛应用于家电、汽车等领域<sup>[2-3]</sup>。

水驱动弹头辅助共注塑成形(water-powered projectile-assisted co-injection molding, W-PACIM)是由本课题组近年提出的一种结合水辅助共注塑工艺(WACIM)和水驱动弹头辅助注塑工艺的新型注塑工艺<sup>[4-5]</sup>,该工艺综合了以上两种

收稿日期:2024-06-03

基金项目:国家自然科学基金(52163006,52273033,52303038);  
江西省重点研发计划(20223BBE51012);江西省自然科学基金  
重点项目(20232ACB204004)

工艺的优点,克服了各自的局限,可成形双层恒定中空截面的管件。以 LGFRPP 为外层材料、PP 为内层材料的 W-PACIM 管件,既有良好的力学性能,也有光滑的内表面质量。

纤维含量对纤维增强复合材料注塑制件的影响得到了许多研究者的关注。PARK 等<sup>[6]</sup>通过试验研究了不同纤维长度、纤维含量和加工方法对制件物理性能和力学性能的影响,发现 LGFR-PP 的剪切黏度随着玻纤质量分数的增大而提高。陈生超等<sup>[7]</sup>通过观测发现,玻纤质量分数的增大加剧了长玻纤的断裂,增加了玻纤在制品中的团聚。HAMLAOUI 等<sup>[8]</sup>通过试验研究了玻纤质量分数对玻纤增强 PBT (polybutylene terephthalate) 复合材料机械性能和物理性能的影响,研究发现,随着玻纤质量分数的增大,复合材料的熔体流动指数减小,进而影响注塑制件的表面质量。对于共注塑成形,纤维含量的差异也影响内外层材料的充填过程,进而影响内外层材料的分布。PATCHARAPHUN 等<sup>[9-10]</sup>通过试验研究了玻纤质量分数对共注塑成形中内外层材料分布和机械性能的影响,发现外层材料玻纤质量分数越高,其凝固层越厚,这可归结于因玻纤质量分数不同而导致的传热特性差异,且玻纤质量分数、玻纤取向及玻纤剩余长度都会影响制件的机械性能。匡唐清等<sup>[11]</sup>通过试验研究了玻纤质量分数对 SGFR-PP 溢流法水辅成形管件的壁厚及玻纤取向分布的影响,发现随着玻纤质量分数的增大,管件壁厚逐渐减小;玻纤在管件厚度方向的分布分为近模壁层、中间层和近水道层三个区域,近模壁层和近水道层的玻纤沿填充方向的取向度较高,中间层取向度较低。部分研究人员采用数值模拟的方法对纤维含量的影响进行了研究。江青松等<sup>[12]</sup>通过数值模拟发现注塑制件的翘曲变形随纤维含量的增大而降低。赵建等<sup>[13]</sup>通过数值模拟研究了纤维含量对纤维取向及制件残余应力的影响,发现随着纤维含量的增大,纤维制件的相互作用减弱,纤维取向程度升高。

本文通过试验以不同玻纤质量分数的 LGFRPP 为外层材料、PP 为内层材料制备系列 W-PACIM 管件,比较分析同等试验条件下玻纤质量分数差异对管件残余壁厚、壁厚均匀性、玻纤取向分布规律及管件耐压性能的影响规律及机理。

## 1 试验方法与材料

### 1.1 W-PACIM 工艺过程

W-PACIM 的工艺过程是:先将弹头放置于

喷水口处,接着按顺序注入外层熔体和内层熔体,再注入高压水驱动弹头在内层熔体中穿透,形成具有中空结构的内外层结构,保压冷却后进行排水。根据内外层熔体注射后型腔是否注满分为短射法和溢流法,其中溢流法又可分为外层短射溢流法和外层满射溢流法,为节省材料,本文采用外层短射溢流法,工艺过程如图 1 所示。

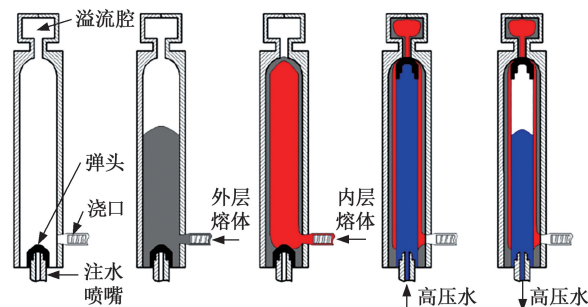


图 1 外层短射溢流法 W-PACIM 工艺的成形过程<sup>[5]</sup>

Fig.1 The forming process diagram of the W-PACIM process of outer melt short shot overflow method<sup>[5]</sup>

### 1.2 材料

外层材料为玻纤质量分数分别为 10%、20%、30%、40% 的 LGFRPP,粒料长度为 12 mm,玻纤初始长度为 12 mm,由沙特沙伯基础公司生产,牌号分别为 GB301HP、GB302HP、GB303HP、GB304HP。内层材料的粒料直径为 4 mm,由中国石油化工股份有限公司生产,牌号为 PPH-T03。内外层材料的主要物理性能参数如表 1 所示。

表 1 内外层材料的物理性能参数

Tab.1 Physical property parameters of inner and outer materials

材料	熔体流动速率/ (g · (10 min) <sup>-1</sup> )	加工温度范围/℃	类型
PPH-T03	3.3	160~220	等规
GB301HP	11.7	230~280	等规
GB302HP	5.2	230~280	等规
GB303HP	3.8	230~280	等规
GB304HP	3.3	230~280	等规

注:熔体流动速率数据通过南京炯雷仪器设备有限公司 JL-RR 熔体流动速率仪测得,执行标准为 GB368.1-2018; PPH-T03 的测试条件中砝码规格为 2.16 kg、230 ℃,其他为 3.8 kg、230 ℃。

### 1.3 成形试验平台

成形设备平台包括注塑机、自行设计的模具及自研注水系统。注塑机由海天塑机集团有限公司生产,型号为 MA1600M/380-E80,具备共注塑的能力。模具用于成形直径为 16 mm、长度为 245 mm 的圆形直管件。注水系统主要由人机界面(human machine interface, HMI)、PLC、电动机、高压柱塞泵、调压阀、压力变送器、压力控制器及电磁开关阀组成,其工作原理如图 2 所示。

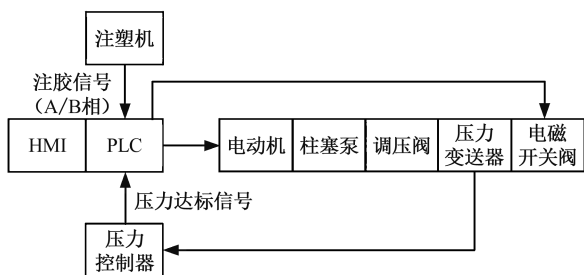


图2 注水系统工作原理图

Fig.2 Schematic diagram of water injection system

1.4 分析测试仪器

扫描电子显微镜(SEM)型号为 Nova Nona SEM 450,由荷兰 FEI 公司生产;金相显微镜型号为 BX53M,由奥林巴斯公司生产;管材耐压试验机型号为 MTSH-06,由天津美特斯试验机厂生产,测量精度为±0.01MPa。

1.5 以 PP/LGFRPP 为内外层材料的 W-PACIM 管件成形

将原有的 W-PAIM 试验平台<sup>[14-18]</sup>中单注注塑机替换为可共注的注塑机,升级控制系统之后,可进行 W-PACIM 注塑成形。以 PP 为内层材料,玻纤质量分数为 10%、20%、30%、40% 的 LGFRPP 为外层材料,采用外层短射溢流法制备系列 W-PACIM 直管,如图 3 所示。

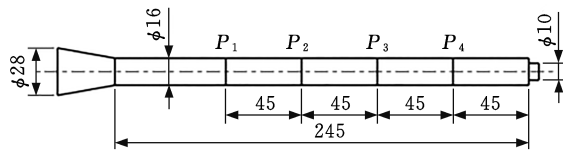


图3 长玻纤增强聚丙烯 W-PACIM 管件及其残余壁厚测量位置

Fig.3 Long glass fiber reinforced polypropylene pipe by W-PACIM and its residual wall thickness measurement position

注塑机料筒温度设置如下(从进料口至喷嘴):A 料筒为 230 °C、240 °C、250 °C、260 °C、255 °C、250 °C,B 料筒为 200 °C、210 °C、220 °C、230 °C、220 °C,其他成形工艺参数如表 2 所示。

表 2 W-PACIM 工艺参数

Tab.2 W-PACIM processing parameters

工艺参数	值	工艺参数	值
外层熔体温度/°C	250	水温/°C	25
外层熔体注射压力/MPa	5.5	注水压力/MPa	7
内层熔体温度/°C	220	模具温度/°C	50
内层熔体注射延迟时间/s	3	外层熔体注射速率	60%
内层熔体注射压力/MPa	9	内层熔体注射速率	60%
注水延迟时间/s	5		

注:熔体注射速率是以最大注射速率的百分比来表示的,A 料筒最大注射速率为 184 g/s,B 料筒最大注射速率为 122 g/s。

1.6 玻纤断裂长度及表征

截取一小部分已冷却的管件或熔体置于马弗炉中,缓慢升温至 600 °C,持续 2 h,去除 W-PACIM 管件中的 PP 材料,将剩下的玻纤置于水溶液中进行溶解分散,通过金相显微镜和 Image-Pro Plus6.0 软件对玻纤长度进行测量,每个试样测量约 500 根玻纤的长度,取其算术平均值作为最终的剩余玻纤长度,并对其玻纤长度的分布范围进行分析。

1.7 残余壁厚测量

管件的残余壁厚(residual wall thickness, RTW)指的是熔体被水驱动弹头穿透形成中空截面后,内壁与外壁之间的厚度。在共注塑成形情况下,总残余壁厚分为内层残余壁厚和外层残余壁厚,其测量方法一致,内层残余壁厚为内壁与内外层界面之间的厚度,外层残余壁厚为内外层界面与外壁之间的厚度。

每组试验中,取 3 根管件作为壁厚测量的试样,在管件的 4 个位置( $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ )进行横向切断,如图 3 所示。在每个切断面上取 4 个方位的等分点对每个方位进行壁厚值测量,最终的壁厚取四个等分点壁厚的算术平均值。测量壁厚时需要测量试样的总壁厚及外层壁厚,而内层壁厚通过差值计算可得。

1.8 SEM 试样制备及微观观测

在管件中段截取高为 5 mm 的圆环,并在沿壁厚方向上切一个小口,置于盛有液氮的器皿中进行冷却处理,约 20 min 后取出,沿小口处将其脆断,此时再沿直径方向切取厚度为 2 mm 的薄片,如图 4a 所示,将薄片置于贴有导电胶的载物台上,进行喷金处理后再利用 SEM 对试样进行观测,试样结构如图 4b 所示。

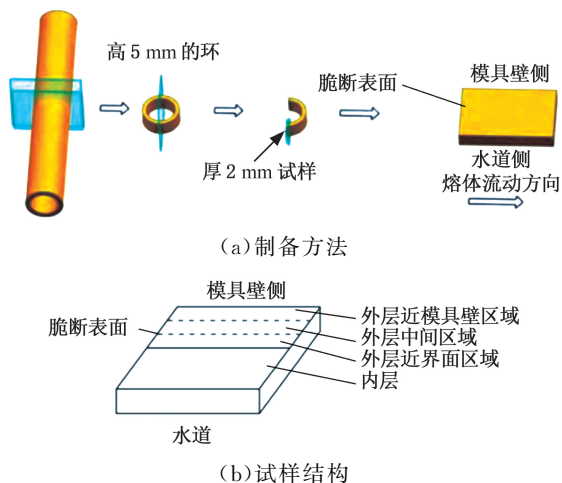


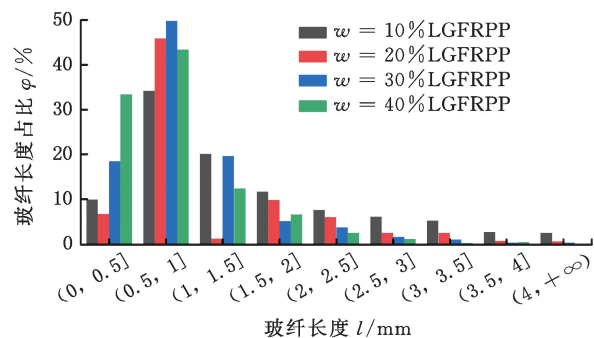
图4 SEM 试样制备方法

Fig.4 Preparation of SEM sample

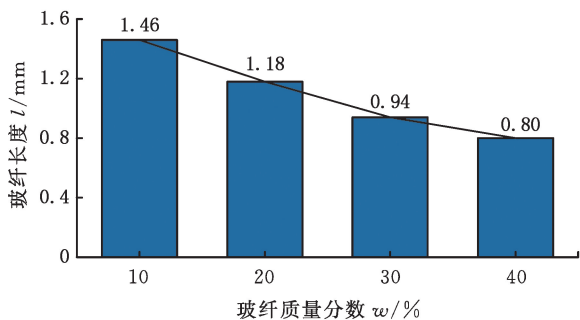
## 2 试验结果与讨论

### 2.1 玻纤质量分数对 W-PACIM 管件玻纤断裂长度的影响

玻纤质量分数对 W-PACIM 管件玻纤断裂长度的影响如图 5 所示。由图 5a 可知,玻纤质量分数  $w$  为 10% 时,94.8% 的玻纤断裂长度在 0~3.5 mm 范围内;玻纤质量分数为 20% 时,93.7% 的玻纤断裂长度在 0~2.5 mm 范围内;玻纤质量分数为 30% 时,93% 的玻纤断裂长度在 0~2 mm 范围内;玻纤质量分数为 40% 时,95.4% 的玻纤断裂长度在 0~2 mm 范围内。随着玻纤质量分数的增加,玻纤剩余长度大于 1 mm 的玻纤数量由质量分数为 10% 的 55.9% 减小到质量分数为 40% 的 23.2%。由此可知,随着玻纤质量分数的增大,玻纤断裂长度分布范围变窄,且更趋于集中在较短的玻纤长度范围内。由图 5b 可知,玻纤质量分数由 10% 增长到 40%,其平均玻纤断裂长度由 1.46 mm 减小至 0.80 mm,呈逐渐减小的趋势。这是因为随着玻纤质量分数的增大,玻纤密度增大,玻纤增强塑料在料筒中螺杆剪切塑化、流道中剪切流动及型腔中充填剪切流动过程中,熔体中的玻纤相互干涉的机率增加,使得平均剩余玻纤长度减小。



(a) 玻纤断裂长度分布



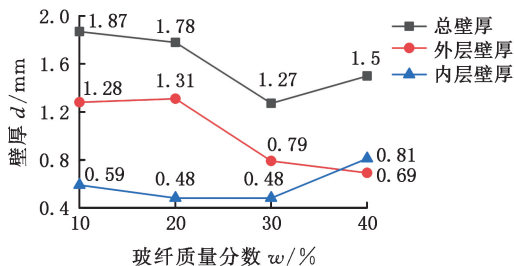
(b) 平均玻纤断裂长度

图 5 玻纤质量分数对玻纤断裂长度的影响

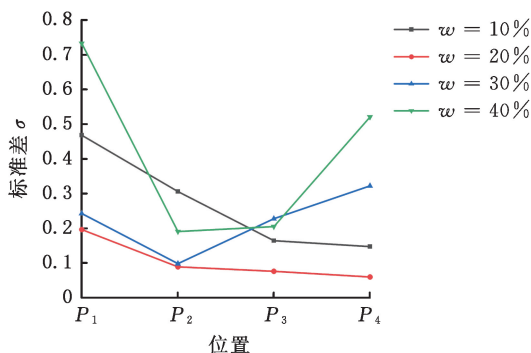
Fig.5 Effects of glass fiber mass fraction on glass fiber breaking length

### 2.2 玻纤质量分数对 W-PACIM 残余壁厚的影响

根据上述试验方案,对外层材料为不同玻纤质量分数的 W-PACIM 管件进行测量,结果如图 6 所示。由图 6a 可知,玻纤质量分数为 10% 和 20% 时,W-PACIM 管件的 inner 壁厚和外层壁厚变化不大。当玻纤质量分数上升至 30% 后,外层壁厚下降明显。玻纤质量分数由 10% 增大到 30% 时,内层壁厚变化不大,在玻纤质量分数为 40% 时,内层壁厚有所增大。



(a) 玻纤质量分数对管件残余壁厚的影响



(b) 玻纤质量分数对管件总残余壁厚标准偏差的影响

图 6 玻纤质量分数对管件残余壁厚及总残余壁厚标准偏差的影响

Fig.6 Effect of glass fiber content on RTW of the pipe and standard deviation of total RTW

玻纤质量分数的增大对外层壁厚的影响可从三方面进行分析:①外层熔体的黏度随玻纤质量分数的增大而提高<sup>[8]</sup>,流动性随熔体黏度的增大而降低(表 1),内层熔体推动外层熔体减少,使壁厚增大;②由图 5b 可知,外层熔体平均玻纤断裂长度随玻纤质量分数的增大而减小,从而使熔体黏度降低,壁厚减小;③随着外层熔体玻纤质量分数的增大,内层熔体在外层熔体中穿透时能推动更多的外层熔体,使壁厚减小。当玻纤质量分数为 10% 和 20% 时,三个方面的影响基本相当,使外层壁厚相近。当玻纤质量分数增大到 30% 以上时,平均玻纤剩余长度进一步减小,内外层熔体界面结合强度更高,二者的影响超过因黏度升高对壁厚的影响,使得外层壁厚下降明显。当玻纤质量分数为 40% 时,外层熔体黏度较大,内外层

熔体界面结合强度较高,内层熔体在外层熔体中穿透推动更多外层熔体的同时,也使较多的内层熔体留在了型腔内,使型腔末端内层熔体壁厚增大,如图 7 所示。

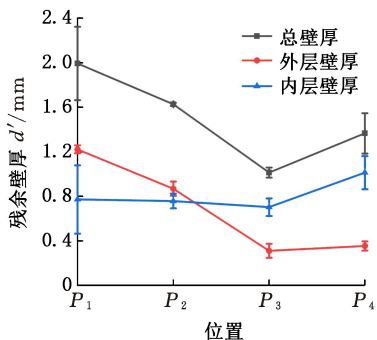


图 7 质量分数为 40% 的玻纤 W-PACIM 管件沿穿透方向 RTW

Fig.7 The RTW of 40t% mass fraction glass fiber W-PACIM pipe along the penetration direction

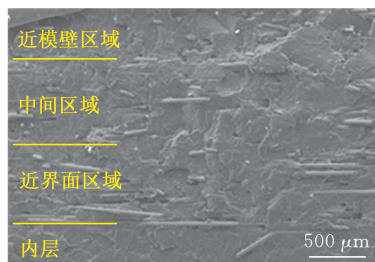
文献[9]以短玻纤增强聚碳酸酯为外层、纯聚碳酸酯为内层,通过共注塑成形工艺制备了薄板制件,发现外层厚度随着外层材料玻纤质量分数的增大而增大。与本研究外层壁厚随玻纤质量分数的增大先增后减的趋势有所不同,其原因可能是型腔和玻纤长度差异所导致。玻纤长度越大,内外层界面结合强度越高,使内层熔体推动的外层熔体更多,使外层壁厚减小。

### 2.3 玻纤质量分数对 W-PACIM 外层玻纤取向分布的影响

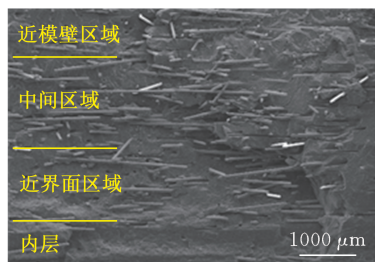
对外层材料为不同质量分数 LGFRPP、内层为 PP 的 W-PACIM 管件进行取样,通过 SEM 对其脆断截面的微观形态和玻纤取向分布进行观测,结果如图 8 所示,由于试样壁厚不同,为保证良好的观测效果,各图比例尺稍有差异。

由图 8a 可知,玻纤质量分数为 10% 时,试样整个脆断面区域仅有少量玻纤裸露在外。近模壁区域的玻纤以非熔体流动方向取向为主,近界面区域玻纤基本沿熔体流动方向取向,裸露的玻纤较长,并伴随着因较长玻纤剥离基体材料之后留下的长凹槽。中间区域的玻纤取向分布情况介于二者之间,裸露在外的玻纤及凹槽比近界面区域短,紧邻近模壁区域处有少量孔洞。随着玻纤质量分数的提高(20%~40%),脆断面上裸露在外的玻纤明显增多。由图 8b 可知,玻纤质量分数为 20% 的试样脆断面上玻纤分布比较均匀,未见明显的玻纤团聚现象。近模壁区域和中间区域部分玻纤近似垂直于脆断面取向,形成典型的三维立体交叉结构,近界面区域玻纤基本沿穿透方向取向。由图 8c 可知,玻纤质量分数为 30% 的试样

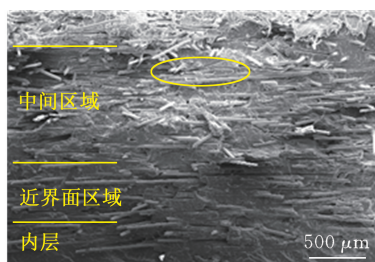
脆断面上玻纤分布均匀性相较于玻纤质量分数 20% 的试样有所降低,出现玻纤团聚现象,如图中所圈部分。近模壁区域较多玻纤近似垂直脆断面取向;中间区域的玻纤取向度有所提高,靠近近模壁区域仍有部分玻纤近似垂直脆断面取向,越靠近近界面区域,越多玻纤沿熔体流动方向取向;近界面区域的玻纤取向度高,玻纤分布较为分散且均匀,绝大部分玻纤都与流动方向平行整齐排列。由图 8d 可知,玻纤质量分数为 40% 的试样脆断面上玻纤分布均匀性进一步降低,出现明显的玻纤团聚现象,如图中圈选部分所示。外层近模壁



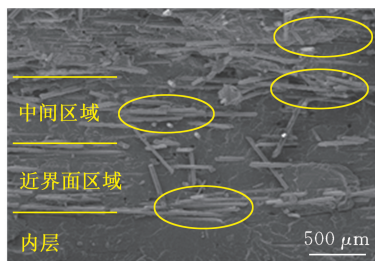
(a)玻纤质量分数为 10%



(b)玻纤质量分数为 20%



(c)玻纤质量分数为 30%



(d)玻纤质量分数为 40%

图 8 LGFRPP 的 W-PACIM 试样 SEM 图像 (注:熔体流动方向平行于图片宽度方向)

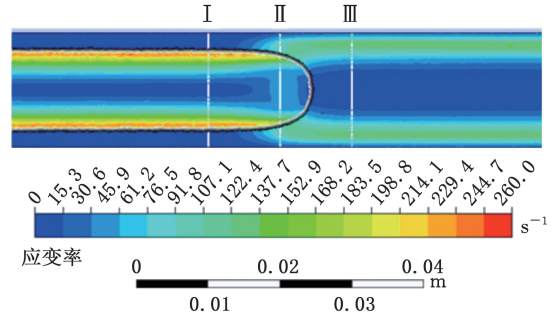
Fig.8 SEM image of W-PACIM sample with outer layer of LGFRPP (note: melt flow direction parallel to the image's width)

区域的玻纤部分沿熔体流动方向取向,部分沿其近似垂直脆断面取向;中间区域玻纤大部分沿熔体流动方向取向,少数垂直于脆断面取向;近界面区域的玻纤多数沿熔体流动方向取向。

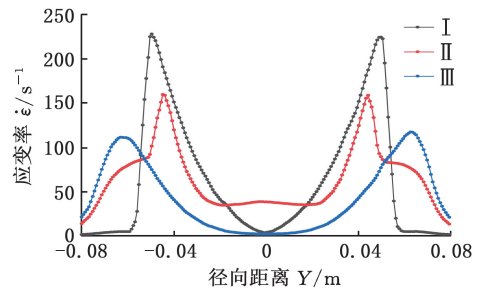
综上所述,不同玻纤质量分数,以 LGFRPP 为外层材料的 W-PACIM 管件的外层分布都可分为近模壁区域、中间区域和近界面区域。近界面区域玻纤取向度最高,近模壁层玻纤取向度最低,中间层受到近模壁层和近界面层的影响,玻纤取向度沿厚度方向由外而内呈逐渐升高的趋势。随着玻纤质量分数的增大,试样脆断面上玻纤分布均匀性逐渐降低,玻纤团聚现象逐渐增加。由此可见,W-PACIM 管件外层玻纤的分布及取向与所处位置及玻纤质量分数有关。

外层近模壁层的玻纤取向主要形成于外层熔体注射阶段,主要受喷泉流的影响。外层熔体流动前沿因喷泉流效应而趋向模壁,与模壁接触后因剧烈的热交换而使近模壁层熔体迅速固化,纤维来不及充分取向,而紧挨着近模壁层的纤维受到拉伸流和剪切流的影响<sup>[19]</sup>,沿熔体流动方向的取向得到改善。近界面层的玻纤取向受到内层熔体穿透的影响,内层熔体在外层熔体中穿透时穿透前沿附近的速度分布<sup>[4]</sup>和应变率分布,如图 9 和图 10 所示。内层熔体在外层熔体穿透时,穿透界面外侧的外层熔体区域内速度呈线性分布,如图 9b 中圈选部分所示,说明穿透前沿处外层熔体

呈拖曳流状态,外层熔体受到内层熔体强烈的剪切作用。由图 10 可知,已穿透及正穿透区域的应变率峰值位于内外层熔体界面处,而未穿透区域应变率峰值位于近模壁处,说明已穿透和正穿透区域的内外层熔体界面处存在较强的剪切作用,使外层近界面区域的玻纤易于沿熔体流动方向取向<sup>[20-21]</sup>。



(a) 应变率云图



(b) 应变率分布

图 10 内层熔体在外层熔体中穿透的应变率分布

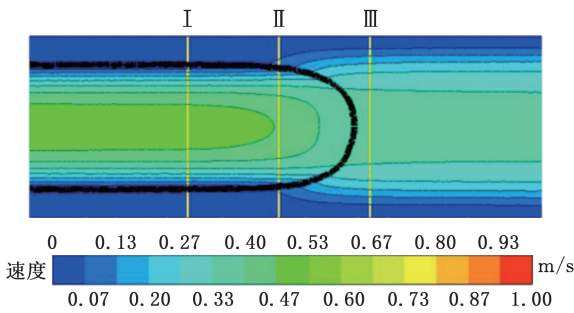
Fig.10 Strain rate distribution of the inner melt penetration through the outer melt

通过与文献[22]的对比分析发现,W-PACIM 工艺与 WACIM 工艺制件外层熔体玻纤取向基本相同,由此可以认为,由于内层熔体起到外层熔体和弹头的隔离作用,W-PACIM 工艺中弹头的穿透对外层玻纤取向分布基本没有影响。

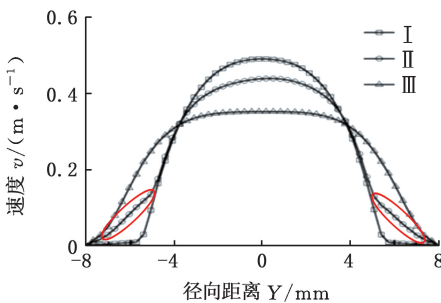
### 2.4 玻纤质量分数对 W-PACIM 管件耐压性能的影响

对外层材料质量分数为 10%、20%、30%、40% 的 LGFRPP W-PACIM 管件进行瞬时爆破试验,得到其最大耐水压力如图 11 所示。可知随着玻纤质量分数的增大,W-PACIM 管件的耐压力先增后减,玻纤质量分数为 20% 时,W-PACIM 管件的耐压性能最好,玻纤质量分数为 40% 时,W-PACIM 管件的耐压性能最差。

当玻纤质量分数较低时(10%~20%),管件的耐压性能随着玻纤质量分数的增大而提高。一是因为玻纤质量分数低于 20% 时,基体中玻纤密度比较低,玻纤分布较为均匀,玻纤质量分数的增大可使管件承受的载荷传递到更大的区域,进而



(a) 速度云图



(b) 速度分布

图 9 内层熔体在外层熔体中穿透的速度分布<sup>[4]</sup>

Fig.9 Velocity distribution of the inner melt penetration through the outer melt<sup>[4]</sup>

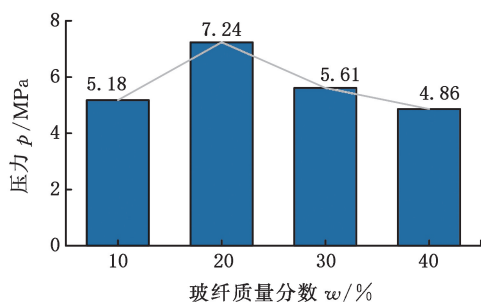


图 11 不同玻纤质量分数 W-PACIM 管件的耐压性能

Fig.11 Pressure resistance performance of W-PACIM pipes with different glass fiber content

提高管件的耐压性能；二是由图 5 可知，玻纤质量分数为 20% 时，管件的外层壁厚较大，壁厚均匀性更佳，管件耐压性能较好。玻纤质量分数为 30% 时，管件壁厚，尤其是外层壁厚，由 20% 时的 1.31 mm 下降至 0.79 mm，管件的壁厚均匀性也显著降低，使得管件耐压性能下降。由图 8c 可知，质量分数为 30% 的玻纤分布均匀性较玻纤质量分数为 20% 时的均匀性有所降低，有玻纤团聚情况出现，在进行瞬时爆破试验时易在薄弱处出现爆破特征。当玻纤质量分数增大至 40% 时，其外层壁厚进一步下降至 0.69 mm。由图 8d 可知，脆断截面的玻纤分布更为不均，玻纤团聚现象较 30% 时更加明显，耐压性能进一步减弱。

文献[23]指出，玻纤的长径比会影响纤维增强复合材料的应力传递效率和弹性模量。玻纤平均剩余长度越短，长径比越小，进而使得复合材料的应力传递效率降低，对管件的耐压性能具有负面影响。虽然平均玻纤剩余长度随玻纤质量分数的增大而减小，但玻纤质量分数为 20% 的管件爆破压力比 10% 的管件高出近 40%，这说明外层壁厚大小、壁厚均匀性及玻纤分布均匀性对 W-PACIM 管件的耐压性能影响较大，而平均玻纤断裂长度对耐压性能的影响较小，这主要是因为管件的耐压性能是通过瞬时爆破试验来表征的，而爆破特征主要出现在管件薄弱处，玻纤断裂长度对管件的影响是整体性的，并不会对薄弱处有特殊影响。

### 3 结论

1) 随着玻纤质量分数的增大，平均玻纤断裂长度逐渐减小，玻纤断裂长度分布范围变窄，且更趋于集中在较短的玻纤长度范围内。这主要是因为随着玻纤质量分数的增大，增加了 W-PACIM 工艺过程中玻纤之间的相互“碰撞”的概率，玻纤断裂长度减小。

2) 玻纤质量分数为 10% 和 20% 时，其残余壁

厚相差不大，玻纤质量分数增大至 30% 和 40% 时，外层壁厚减小，内层壁厚增大。玻纤质量分数的变化影响了外层熔体黏度和内外层界面结合强度，进而导致管件残余壁厚的变化。

3) 外层玻纤取向可分为近模壁区域、中间区域及近界面区域，玻纤沿熔体流动方向的取向度沿壁厚方向由外而内逐渐提高，随着玻纤质量分数增大，玻纤分布均匀性变差；近模壁区域的玻纤取向主要受喷泉流的影响，而近界面区域的玻纤取向主要受内层熔体在外层熔体中穿透的影响。

4) 以长玻纤增强聚丙烯 (LGFRRP) 为外层材料的 W-PACIM 管件的耐压性能随着玻纤质量分数的增大呈先增后减的变化，在玻纤质量分数为 20% 时最佳。管件的耐压性能与管件的残余壁厚及其均匀性、玻纤分布及平均玻纤断裂长度等因素有关，其中平均玻纤断裂长度的影响较小。

### 参考文献:

- [1] 许升, 章建忠, 樊家澍, 等. 玻纤形态对 PP/GF 复合材料的性能影响与优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11):51-55.  
XU Sheng, ZHANG Jianzhong, FAN Jiashu, et al. Influence and Optimization of Glass Fiber Morphology on Properties of PP/GF Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):51-55.
- [2] 陈涛, 匡莉, 戴婷, 等. 长玻纤增强 PP 材料机械可靠性的各向异性行为研究[J]. 塑料工业, 2022, 50(2):107-111.  
CHEN Tao, KUANG Li, DAI Ting, et al. Study on Anisotropic Behavior of Mechanical Reliability of Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(2):107-111.
- [3] 张中伟, 何书珩. 长玻纤增强 PP 材料界面行为对其力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(8):114-118.  
ZHANG Zhongwei, HE Shuheng. Effect of Interfacial Behavior on Properties of Long Glass Fiber Reinforced PP[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(8):114-118.
- [4] 匡唐清, 张庆伟, 柳和生, 等. 水驱动弹头辅助共注塑工艺相间穿透机理的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(4):146-153.  
KUANG Tangqing, ZHANG Qingwei, LIU Hesheng, et al. Numerical Simulation of Interphase Penetration Mechanism of Water-projectile Assisted Co-injection Molding Process[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(4):146-153.
- [5] 胡礼彬. 水驱动弹头辅助共注塑工艺相间穿透的数

- 值模拟研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2022
- HU Libin. Numerical Simulation of Interphase Penetration in Water Powered Projectile Assisted Co-injection Molding Process[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [6] PARK S Y, SONG Y S. Fabrication and Analysis of Long Fiber Reinforced Polypropylene Prepared via Injection Molding [J]. *Macromolecular Research*, 2020, 28:1-2.
- [7] 陈生超, 杨永良, 陈金涛, 等. 纤维含量对长玻纤增强聚丙烯注塑制品性能影响[J]. *工程塑料应用*, 2013, 41(12):44-48.
- CHEN Shengchao, YANG Yongliang, CHEN Jintao, et al. Effects of Fiber Content on Properties of Long Glass Fiber Reinforced PP Injection Molded Parts[J]. *Engineering Plastics Application*, 2013, 41(12):44-48.
- [8] HAMLAOUI O, KLINKOVA O, ELLEUCH R, et al. Effect of the Glass Fiber Content of a Polybutylene Terephthalate Reinforced Composite Structure on Physical and Mechanical Characteristics[J]. *Polymers*, 2021, 14:17.
- [9] PATCHARAPHUN S. Influence of Processing Parameters and Glass-fiber Content on Material Distribution in Sandwich Injection Molding[J]. *Journal of Research in Engineering and Technology*, 2005, 2(3):262-275.
- [10] PATCHARAPHUN S, GÜNTER M. Properties Enhancement of Short-glass-fiber Reinforced Thermoplastics by Sandwich Injection Molding Technique[J]. *Polymer Composites*, 2005, 26(6):823-831.
- [11] 匡唐清, 冯强, 徐盼, 等. 玻纤含量对短玻纤增强聚丙烯复合材料水辅注塑制品壁厚与微观形态的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(2):105-111.
- KUANG Tangqing, FENG Qiang, XU Pan, et al. Influence of Glass Fiber Content on the Residual Wall Thickness and Microscopic Morphology of Water-assisted Injection Molding Pipes of Short-glass-fiber Reinforced Polypropylene Composites [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(2):105-111.
- [12] 江青松, 柳和生. 长纤维增强聚合物注塑件翘曲变形数值模拟[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(10):126-131.
- JIANG Qingsong, LIU Hesheng. Numerical Simulation on Warpage Deformation of Long-fiber-reinforced Polymer Injection-molded Parts[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(10):126-131.
- [13] 赵建, 曲敏杰, 夏英, 等. 纤维含量对注塑制品残余应力影响的数值模拟[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(4):127-131.
- ZHAO Jian, QU Minjie, XIA Ying, et al. Numerical Simulation of the Effect of Fiber Content on Residual Stresses in Fiber Reinforced Injection Molding[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2014, 30(4):127-131.
- [14] 杨帆, 匡唐清, 刘文文, 等. 水驱动弹丸辅助注塑弯管的壁厚分布[J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(11):112-118.
- YANG Fan, KUANG Tangqing, LIU Wenwen, et al. Distribution of Residual Wall Thickness of Water-projectile-assisted Injection Molding Pipes with Curved Sections[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(11):112-118.
- [15] 匡唐清, 潘俊宇, 刘文文, 等. 溢流法水驱动弹头辅助注塑管件残余壁厚的形成与工艺参数影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(4):108-114.
- KUANG Tangqing, PAN Junyu, LIU Wenwen, et al. Formation Mechanism of Residual Wall Thickness of Overflow Water-projectile-assisted Injection Molding Pipe and the Effects of Processing Parameters[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(4):108-114.
- [16] 胡礼彬, 匡唐清, 赖家美, 等. 弹头材料对溢流法水驱动弹头辅助注塑制件的影响[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(5):87-91.
- HU Libin, KUANG Tangqing, LAI Jiamei, et al. Influence of Projectile Material on Overflow Water-projectile Assisted Injection Molding Pipes[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(5):87-91.
- [17] 王彦卿, 匡唐清, 赖家美, 等. 水驱动弹丸辅助注塑管件壁厚的弹丸影响[J]. *中国塑料*, 2021, 35(1):60-66.
- WANG Yanqing, KUANG Tangqing, LAI Jiamei, et al. Effect of Projectile on Residual Wall Thickness of Water Projectile Assisted Injection Molded Pipes[J]. *China Plastics*, 2021, 35(1):60-66.
- [18] 匡唐清, 赖德炜, 潘俊宇, 等. 水驱动弹头辅助注塑管件壁厚的工艺影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(12):106-111.
- KUANG Tangqing, LAI Dewei, PAN Junyu, et al. Effects of Processing Method and Parameters on the Residual Wall Thickness of Water-projectile-assisted Injection Molding Pipes[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2018, 34(12):106-111.
- [19] PATCHARAPHUN S, MENNIG G. Properties

Enhancement of Short Glass Fiber-reinforced Thermoplastics via Sandwich Injection Molding[J]. Polymer Composites, 2005, 26:823-831.

[20] WANG Jianchuan, GENG Chengzhen, LUO Feng, et al. Shear Induced Fiber Orientation, Fiber Breakage and Matrix Molecular Orientation in Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528:3169-3176.

[21] 朱涵睿, 顾轶卓, 孟庆宇, 等. 注塑成形长玻纤/尼龙复合材料车轮纤维分布规律研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(11):50-57.

ZHU Hanrui, GU Yizhuo, MENG Qingyu, et al. Study on Fiber Distribution in Injection-molded LGF/PA Composite Wheel. [J]. Composites Science and Engineering, 2018(11):50-57.

[22] 匡唐清, 朱瑶瑶, 柳和生, 等. 玻纤质量分数对短玻纤增强聚丙烯水辅助共注塑管件的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10):4551-4560.

KUANG Tangqing, ZHU Yaoyao, LIU Hesheng, et al. Effect of Glass Fiber Mass Fraction on the Water Assisted Co-injection Molding Pipes of Shortglass Fiber Reinforced Polypropylene[J]. Ac-

ta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4551-4560.

[23] 王昊康. 玻璃纤维增强复合材料力学性能研究进展[J]. 合成纤维, 2022, 51(11):40-43.

WANG Haokang. Research Progress in Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Composites [J]. Synthetic Fiber in China, 2022, 51(11):40-43.

(编辑 王艳丽)

作者简介:廖钱生,男,1983年生,博士研究生。研究方向为高分子成形加工。E-mail:liaoqiansheng@163.com。匡唐清\*(通信作者),男,1977年生,教授。研究方向为机械工程、材料加工工程、CAE技术。E-mail:tkuang@ecjtu.edu.cn。

本文引用格式:

廖钱生,柳和生,匡唐清,等.玻纤质量分数对长玻纤增强聚丙烯水驱动弹头辅助共注塑管件的影响[J]. 中国机械工程,2025,36(6):1329-1337.

LIAO Qiansheng, LIU Hesheng, KUANG Tangqing, et al. Effects of Glass Fiber Mass Fraction on W-PACIM Pipes of Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1329-1337.

(上接第 1328 页)

[14] WANG Kaiming, LIU Wei, HONG Yuxiang, et al. An Overview of Technological Parameter Optimization in the Case of Laser Cladding[J]. Coatings, 2023, 13(3):496.

[15] HUANG Haibo, WANG Wei, WANG Yangxiao, et al. Crack Sensitivity Control of Nickel-based Laser Coating Based on Genetic Algorithm and Neural Network[J]. Coatings,2019, 9(11):728.

[16] LI Shichun, MO Bin, WANG Kunming, et al. Nonlinear Prediction Modeling of Surface Quality during Laser Powder Bed Fusion of Mixed Powder of Diamond and Ni-Cr Alloy Based on Residual Analysis[J]. Optics and Laser Technology, 2022, 151:107980.

[17] 毛恺奕, 杜彦斌, 何国华, 等. 基于 GWO-RFR 的激光熔覆多道成形层形貌的预测方法[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(2):174-183.

MAO Kaiyi, DU Yanbin, HE Guohua, et al. Prediction Method for Multi-track Laser Cladding Layer Morphology Based on GWO-RFR [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(2):174-183.

[18] 焦留成, 邵创创, 程志平. 一种求解连续空间约束优化问题的蚁群算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1):20-23.

JIAO Liucheng, SHAO Chuangchuang, CHENG Zhiping, et al. Ant Colony Algorithm for Solving Continuous Space Constrained Optimization Problems[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2015, 36(1):20-23.

(编辑 王艳丽)

作者简介:李涛,女,1977年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为激光增材修复技术、产品可持续评价方法。E-mail:litao\_dlut@163.com。邓林辉\*(通信作者),男,1997年生,硕士研究生。研究方向为激光增材修复技术。E-mail:denglinhui321@163.com。

本文引用格式:

李涛,邓林辉,莫彬,等.基于混合遗传蚁群优化随机森林算法的激光熔覆 Ni60 裂纹预测与工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2025,36(6):1322-1328.

LI Tao, DENG Linhui, MO Bin, et al. Prediction of Cracks and Optimization of Processing Parameters in Laser Cladding of Ni60 Based on HGA-ACO-RFA[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1322-1328.