

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.027

水辅助注射成型技术研究进展

杨建根¹, 曾祥瑞¹, 于盛睿²

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2. 景德镇陶瓷大学机械电子工程学院, 江西景德镇 333403)

摘要: 随着水辅助注射成型技术的发展, 多工艺方法融合的新型水辅助注射成型技术也取得了一定进展。对传统水辅助注射成型技术从制品的质量、形态结构和纤维取向等方面进行归纳。针对多工艺方法融合的新型水辅助注射成型技术, 着重对水辅助共注射成型技术和水驱动弹头注射成型技术的成型原理以及目前的发展现状进行归纳。水辅助共注射成型将传统水辅注射成型与共注射成型结合, 水驱动弹头注射成型通过引入弹头代替高压水对熔体穿透, 这两种技术可进一步提高制品性能。最后对两类成型技术的不足和未来发展方向进行展望。

关键词: 水辅助注射成型; 多工艺方法; 共注射成型; 水驱动弹头注射; 制品性能

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0170-06

Advances in Water-Assisted Injection Moulding Technology

Yang Jiange¹, Zeng Xiangrui¹, Yu Shengrui²

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333403, China)

Abstract : New water-assisted injection moulding with multi process methods fusion has made some progress with the development of water-assisted injection moulding. For the traditional water-assisted injection moulding, the quality, morphological structure and fiber orientation of water assisted products were summarized. For the new water-assisted injection moulding integrating multiple process methods, the forming principle and current development status of water-assisted co-injection moulding and water-powered projectile-assisted injection moulding were summarized. The water-assisted co-injection moulding combined traditional water-assisted injection moulding with co-injection moulding, and the water-powered projectile-assisted injection moulding penetrated the melt by introducing the projectile instead of high pressure water. The two technologies further improved product performance. Finally, the shortcomings and future development of the two technology were prospected.

Keywords : water-assisted injection moulding ; multi process methods ; co-injection moulding ; water-powered projectile-assisted injection ; product performance

水辅助注射成型(WAIM)技术是一种加工中空聚合物零件的先进成型方法, 具有成型周期短、成型质量好等优点。WAIM最早萌芽于20世纪70年代, 为得到更加优质的中空零件, 提出将液体注射到聚合物熔体中经过冷却、固化, 加工中空塑件的想法^[1], 但由于气体辅助注射成型的发展, WAIM一直被搁置, 直到1998年德国亚琛理工大学提出WAIM技术^[2]后WAIM逐渐进入高速发展时期。

越来越多的学者投入到WAIM研究, 在计算机模拟、试验研究、工艺参数、聚合物的形态和纤维取向等方面取得了长足进展。随着工艺创新与新一代技术的发展, 人们已不仅局限于传统WAIM研究, 许多新型WAIM技术也随之出现, 包括水辅助共注射成型(WACIM)技术^[3]和水驱动弹头注射

成型(W-PAIM)技术^[4]。针对WAIM发展, 许多学者对WAIM原理与应用、数值模拟、成型设备以及聚合物材料等方面进行了论述^[5-9], 但是对于上述研究, 均未涉及新型WAIM技术方法和工艺原理等方面。

笔者归纳了WAIM技术当前的发展现状, 包括传统WAIM和新型WAIM技术两方面。对于传统WAIM技术, 从工艺参数的影响、制品性能和质量、成型件的形态结构及纤维取向进行阐述; 而对于新型WAIM技术, 从水辅助共注射、水驱动弹头注射及水驱动弹头共注射成型技术进行阐述。

1 传统水辅助注射成型

1.1 工艺参数的影响

工艺参数对注射成型聚合物产品质量具有重要影响, 主

通信作者: 于盛睿, 教授, 主要从事聚合物先进成型与创新设计研究

收稿日期: 2023-09-18

引用格式: 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 Jiange, Zeng Xiangrui, Yu Shengrui. Advances in water-assisted injection moulding technology[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 170-175.

要包括注射速度、注射压力、水压、注水流量、冷却时间、保压时间、熔体温度以及水针尺寸等。这些工艺参数均为 WAIM 过程中的关键因素,通过改变上述工艺参数可对熔体充模流动、水的穿透长度、残余壁厚产生重要影响,许多学者在工艺参数方面进行深入研究。

刘旭辉等^[9]通过试验研究熔体温度对水穿透的影响,认为提高熔体温度可增加水穿透时间;而当熔体温度减小到一定程度,水穿透过程中会产生“折线”水道。匡唐清等^[10]通过建立水辅助注射填充模型,发现提高注水速度也可增加水的穿透长度。对于 WAIM 成型过程,水的穿透可分为一次穿透和二次穿透^[11]。匡唐清等^[12]通过短射法发现熔体预注量增加可使一次穿透变短、二次穿透增加,而延长注水延迟时间则效果恰恰相反。以上对 WAIM 的研究主要集中在短射法和溢流注射法,并未涉及到回流注射法和流动注射法,因为这两种注射成型方法对模具结构要求较高,且工艺更复杂。

Lin 等^[13]研究模具温度对流体辅助注射成型管弯曲截面上残余壁厚分布均匀性的影响,结果表明,采用不同模具温度可改善 WAIM 零件残余壁厚均匀性。周海迎等^[14]通过溢流注射法,研究工艺参数对残余壁厚影响,发现影响残余壁厚主要因素为注水压力、延迟时间及注水温度,而受熔体温度及模具温度的影响较小。Park 等^[15]发现提高熔体温度和注水压力均可增加水穿透长度、减小残余壁厚,此外,通过与常规气体辅助注射成型对比发现, WAIM 在成型效率和成型质量方面均更优。蔡圳南等^[16]通过改变水针口径对 WAIM 数值模拟,发现水针针口的尺寸对水的穿透影响显著,控制针口尺寸为 7 mm,可使残余壁厚更薄,水穿透长度更长。此外,蔡圳南等^[16]等还发现增加水压、升高熔体温度以及缩短注水延迟时间在促进水穿透熔体的同时,可以成型壁厚更薄的管件。影响 WAIM 机理的因素,不仅体现在水针尺寸,水针的结构优化也尤为重要。

由上可知,目前对工艺参数的研究大多只涉及通过改变单工艺因素研究对 WAIM 成型的影响,而同时改变多因素,对 WAIM 成型机理的研究还较少。此外,零件几何形状、水针位置和角度以及模具结构都会对 WAIM 产生影响,综合考虑上述因素对 WAIM 的影响仍是今后的重点研究方向。

1.2 制品性能和质量

制品的性能和质量关乎成型件在使用中的稳定性和可靠性,其不仅会受到前文提到的工艺参数的影响,加工方法、材料特性、模具结构和尺寸等因素的改变也可能导致空心孔、不规则壁厚等缺陷的产生,而这些缺陷将会降低制品性能和质量。

由于 WAIM 过程水穿透分为两次穿透,会造成少量水渗透并进入未穿透区域,冷却后成型件将产生收缩缺陷。Huang 等^[17]发现 WAIM 短射法由于不存在溢流腔、保压时间长、末端熔体残留量较大,导致水在二次穿透的过程中受到压力的作用,进而对冷却好的成型件前沿部分进行渗透,产生空心孔。采用溢流注射法或使用黏度更高的硅油来替换

高压水可有效避免空心孔的产生^[18]。此外,Huang 等^[17]还将 WAIM 与气体辅助注射成型进行对比,发现成型弯曲角度更大的管件,在弯曲处残余壁厚偏差率更小,制品质量更好。Mulyana 等^[19]利用活性炭的吸附性将水和活性炭混合,根据所需工艺条件来控制水的含量,此方法不仅可成型出性能和质量更好的制品,而且成型设备相较于其他 WAIM 设备更简单,只需采用普通注射成型设备即可完成。

目前 WAIM 制品多为单支路管件,当管件为多支路或结构更复杂的成型件时,其制品性能和质量将显著降低。Pascoal-Faria 等^[20]设计了“Y”字型管件,并采用小角“X”射线和广角“X”射线对管件不同位置的成型质量进行观察,发现采用单个注水口与两个溢流腔,可降低生产成本,同时提高了成型质量和力学性能。针对多支路管件,其注射时可采用多个水针分别注水导向各个分支,进而缩短成型时间。由于多个水针的引入,每个水针的注水顺序则需要更精确的控制。收缩率和翘曲变形作为成型件质量的重要影响因素,Huang 等^[21]通过对短纤维聚合物成型研究,发现当注水压力为 4 MPa,注水延迟时间为 5 s、熔体温度为 210 °C、模具温度为 35 °C、纤维质量分数为 40% 时,收缩率达到最小且发生的翘曲变形最小。对于聚丙烯制品,经常会产生空心孔、翘曲变形等质量缺陷,采用高性能聚合物进行成型,可有效减少质量缺陷。

残余壁厚作为评价制品质量的重要指标,主要受工艺参数的影响,为了更好地对工艺参数进行优化,需要建立残余壁厚和工艺参数之间的映射关系。Zhou 等^[22]使用标准差描述残余壁厚的均匀性,分别使用人工神经网络、响应面法以及人工神经网络-遗传算法建立熔体温度、模具温度、延迟时间、水压、水温等五个参数与标准差之间的关系,发现人工神经网络-遗传算法对标准差的预测效果最好。Yang 等^[23]采用拉丁超立方实验设计方法,使用响应面模型、径向基函数神经网络模型和 Kriging 模型建立了工艺参数与残余壁厚、空心率之间的函数关系,通过粒子群算法对参数进行优化,发现可有效提高空心率、减小模压过程中的残余壁厚偏差。此外,Yang 等^[24]还通过径向神经网络模型以设计期望的制品质量为输入,来预测相应的工艺参数,并通过交叉验证检测了该模型的准确性。以上研究通过建立模型反映工艺参数和制品质量之间的关系,从而对工艺参数或制品质量进行预测,可极大节省时间成本,提高生产效率。

1.3 形态结构和纤维取向

在水辅助注射过程中,聚合物熔体会受到剪切场和温度场的影响,对 WAIM 制品内部形态结构的形成产生显著影响。Liu 等^[25]使用小角 X 射线对高密度聚乙烯成型件进行研究,结果显示,成型件有明显的表-芯-水通层结构。此外,贾振华等^[26]研究了 WAIM 聚丙烯制品,不仅发现了表-芯-水通层结构,还对每层的结晶形态进行了分析:对于表层和水道层,在高压水的填充过程中,当水压较低时,其带来的剪切速率也比较低,从而导致水道层的串晶结构明显低于表层;对

于芯层,高压水穿透和熔体填充所带来的剪切作用对该部分的影响相对较少,从而使芯层结晶表现为球晶结构。Yu等^[27]结合黏弹性本构方程White-Metzner和iARD-RPR纤维取向模型的分析,发现短玻纤增强聚丙烯制品中的纤维取向的分布也呈现出水道层、芯层和表层的分层结构。此外,Yu等^[27]还发现熔体短射尺寸对纤维取向的影响最大,其次是注水延迟时间,最后是注水压力。Yuan等^[28]对高分子量高密度聚乙烯的WAIM进行研究,发现在垂直水穿透方向上,该聚合物成型件中存在大量串晶结构,该结构可有效提高成型件的力学性能,且与普通注射成型对比,发现WAIM成型件中串晶结构明显更多。除串晶结构外,由于聚合物和加工方法的不同,可能还存在类竹子结构^[29],探究工艺参数、成型方法等因素对这些结构的影响机理也是以后的重点研究方向。

陈忠仕等^[30]通过对比溢流法和短射法,发现溢流法可使成型件的纤维取向更稳定。Huang等^[31]研究发现随着纤维质量含量的减少和注水延迟时间的缩短,纤维沿流动方向取向度更高。Zhang等^[32]通过短射法对短玻纤增强聚丙烯WAIM中的纤维取向形成机理进行研究,发现纤维取向分布也呈现出明显的表-芯-水通层的分层结构,并且越靠近注水口的位置,这种分层结构就越明显。此外,Zhang等^[32]还通过溢流法对短玻纤增强聚丙烯成型件进行了研究,发现水道层的纤维取向倾向于无序分布,而表层和芯层的纤维取向分布则更连续且有序。总的来说,为了更好地使纤维取向分布平行于流动方向,对于短射法而言,可减小熔体注射量和注水延迟时间、降低熔体温度以及适当提高水压,而对于溢流注射法而言,可通过适当提高熔体温度、缩短注水延迟时间、增大水压促进纤维形成有序取向^[34]。

2 新型水辅助注射成型技术

2.1 水辅助共注射成型

WACIM技术是在WAIM的基础上发展而来,它是WAIM技术和共注射技术的结合,既具有共注射成型能够综合不同材料性能、设计更自由的优点,同时又保留了WAIM成型周期短、效率高的优点。WACIM技术可以分为两种类型,分别为短射法和溢流注射法。短射法与溢流注射法相比,缺少了溢流腔,因此短射法成型的零件质量也不如溢流注射法的成型件。图1为WACIM溢流注射工艺成型过程,首先往模具型腔中进行第一次熔体注射(即外层熔体),待熔

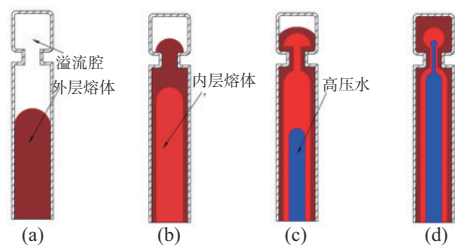
体充满型腔后,再第二次充入熔体(即内层熔体)对外层熔体进行穿透,当内层熔体穿透完毕后,充入高压水对内层熔体进行穿透,最后进行保压和冷却。WACIM可更好地兼容不同特性的材料,加工出具有双层结构的中空高性能塑件。

对于WACIM技术,一些学者也命名为双层水辅助注射成型(2K-WIT),Naitove^[35]和Lang等^[36]利用2K-WIT首次加工出直径为35 mm的双层结构发动机冷却管。由于在实际生产中,模壁之间存在一定温差,为探究模壁温差对WACIM影响,周国发等^[37]发现改变内、外层熔体黏度,使内、外层熔体黏度比大于1,可使内层熔体在穿过程中阻力更加平衡,这样不仅可更好抵抗模壁温差的干扰,且有利于熔体充满型腔。此外,周国发等^[38]还通过有限元模型对WACIM进行数值模拟,发现增加注水温度和内层熔体注射温度,均可使水的穿透长度增加。章凯等^[39]发现WACIM过程中注水延迟时间对残余壁厚和水穿透长度影响较大,主要是由于延长注水延迟时间会造成熔体温度降低;此外,当注水延迟时间增大时,所需要的注水压力也会增大,这就促进了水对熔体进行穿透,同时使内层熔体厚度更加均匀。

Kuang等^[40-41]通过对WACIM溢流注射法进行CFD模拟和试验验证,发现在弯曲处内层熔体和水穿透更靠近内凹面,且外凸侧残余壁厚相对内凹侧更均匀,增大弯曲角度可提高外凸侧残余壁厚均匀性,增大弯曲半径可提高内凹面残余厚度均匀性,这是因为增大弯曲半径,会使弯曲和直线过渡长度增加,从而更有利于水进行穿透。此外,对于弯管,随着内层熔体注射延迟时间的减小,弯管内凹面外层熔体变薄、内层熔体变厚,这与陈碧龙^[42]通过设备对五种截面型腔试验得到的结果一致。对于直管,增大直径、提高水压、缩短注水延迟时间以及提高内层熔体速度和温度都会促进水和内层熔体穿透率增大,进而使成型件的中空率增大、穿透长度更长,总残余壁厚和内层熔体残余壁厚也会随着直径的增大而增大。对于不同截面形状的管件,圆形截面成型件的残余壁厚相较于其他形状截面成型件更均匀,由于成型件截面形状不同,内层熔体穿透形状更趋向于截面形状,水穿透形状则趋向于圆形,通过CFD软件模拟也可发现非圆形截面成型件的残余壁厚随着水穿透深度的深入而变薄。

由于WACIM内、外层熔体采用的是不同性质的材料,两种材料的特性和性质都会对成型件产生很大影响。Kuang等^[43-44]使用聚丙烯和高密度聚乙烯作为熔体材料,通过改变两种材料的注射顺序发现,当黏度较低的聚丙烯作为外层熔体时,得到的成型件内、外层的残余壁厚会产生较大波动,进而降低残余壁厚的均匀性。目前由于WACIM采用的是内、外双层熔体注射,若对其使用软件进行数值模拟则可能会产生较大误差,这也反映出目前适用于WACIM的仿真软件不足的问题。

WACIM制品分为内、外两层结构,为更准确方便地测量,Xia等^[45]提出了一种无损检测的方法,通过建立两个目标函数,采用超声波技术不仅可实现对不同截面形状WACIM



a—第一次熔体注射;b—第二次熔体注射;
c—高压水注射;d—冷却和保压^[42]

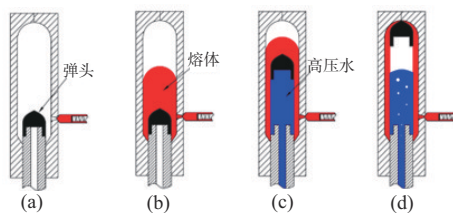
图1 溢流法WACIM成型过程

制品壁厚的测量,还可准确测量出沿着水穿透方向残余壁厚的变化趋势。与WAIM类似,影响WACIM制品内、外层壁厚的工艺参数与WAIM相似,因此袁知焕等^[46]以聚丙烯/聚酰胺6共混物为材料,通过正交试验法发现外层熔体温度、内层熔体注射压力、注水压力、模具温度升高会造成外层残余壁厚减小,而注水延迟时间、内层熔体注射压力增大则会使内层残余厚度增大。

总的来说,WACIM技术的发展还不够完善,目前研究主要为工艺参数对水和内层熔体穿透以及残余壁厚的影响,对于工艺参数的优化以及制品的微观结构的研究还相对较少。

2.2 水驱动弹头注射成型

W-PAIM技术是在传统WAIM基础上引入弹头(也称浮芯),先将弹头放置在注水口处,随后将熔体注入模具型腔内,待熔体完全充满模具型腔,注入高压水推动弹头对熔体进行穿透,经过保压、冷却后将水排出,如图2所示。相较于传统WAIM,W-PAIM使用弹头对熔体进行穿透,有效避免了熔体和水直接接触,保证中空通道形成之后高压水再进入,大大提高了中空率。此外,WAIM加工直径较大的成型件时,会出现残余壁厚不均匀、内表面粗糙等问题,W-PAIM更好地解决了此问题。W-PAIM对材料的要求远远低于WAIM,在提高成型件质量的同时也降低了成本,且WAIM由于高压水穿透的局限性,只能生产圆形通道的成型件,而W-PAIM可通过改变弹头形状来改变中空通道,得到具有特定中空通道的成型件,但W-PAIM技术也有一定的局限,由于弹头尺寸和结构不可改变,无法成型出可变截面管件和多支路管件等典型结构特征。



a—弹头放置;b—熔体注射;c—高压水注射和保压阶段;d—水排出^[53]

图2 W-PAIM成型过程

刘文文等^[47]对W-PAIM进行了试验,发现相比于气体驱动弹头注射技术,W-PAIM得到的直管成型件具有更加均匀的壁厚,由于弹头的引入,W-PAIM并不会像WAIM存在二次穿透,避免了在末端未穿透部分产生空心孔。此外,还发现熔体注射量和穿透长度存在反比关系,可以通过调整熔体注射量实现对穿透长度的精确控制。杨帆等^[48]通过对W-PAIM弯管进行试验,得到的成型件除壁厚更加均匀,在弯曲处内侧壁厚相对于外侧壁厚也更加薄,且二者之差随着弯曲半径的增大而减小。丁加新等^[49]通过模拟和试验验证,发现通过控制弹头直径和成型件外径之间的关系可更好地控制残余壁厚的均匀性和厚度。对于弯管弯曲处内、外两侧壁厚不同的问题,不仅存在于W-PAIM制品中,WAIM制品也是如此,这主要是由于在注射过程中高压水的不稳定穿透所造

成的制品缺陷。胡礼彬等^[50]通过对不同材料水辅弹头注射成型研究,发现在选择弹头时应避免弹头和熔体的材料一样,或者二者材料性质相似,这主要是由于在高温环境下,弹头和熔体之间容易产生相容,从而影响成型质量,此外,当弹头为金属材料时,由于其具有较高的热传导率,在弹头表面容易形成凝固层,穿过程中受到剪切力作用容易剥落,导致内壁粗糙,当弹头材料为树脂时,其与残余壁厚的维卡软化点温度存在强相关,树脂的维卡软化点的温度越低,残余壁厚越薄。

目前,生产功能化的复杂中空弹性体成型件,例如用于输送流体介质的耐高温、高压部件,通常采用复杂工序制造,成本较高。Hopmann等^[51]研究发现,W-PAIM作为一种特殊的注塑工艺,提供了一种生产复杂中空弹性体成型件的新方法,通过一步工艺即可成型;此外,弹性成型件的性能主要取决于工艺参数,例如高压水的流量、注水延迟时间、水压大小、熔体温度和水温以及保压时长,由于零件和材料的特性,所得成型件可用于高压与高温环境。Oliveira等^[52]通过试验发现,WAIM技术由于水穿透不稳定,导致管件内径尺寸发生波动,而W-PAIM采用弹头穿透可有效解决此问题。

Kuang等^[53-54]通过对W-PAIM制品的残余壁厚的形成机理进行研究,发现随着熔体温度升高,弹头在穿透的过程中发生熔化,管壁的残余壁厚先减小后增大;增加熔体注射压力可使残余壁厚减小,而过大的熔体注射压力则会使残余壁厚增大;随着模具温度升高,残余壁厚先减小后趋于稳定;随着注水延迟时间增加,残余壁厚则会增大;随着管件弯曲角度增大,外凸侧和内凹侧的压力差也会变大,导致弯曲处内外两侧壁厚差变小。此外,通过对弹头穿透行为的模拟,发现当弹头直径小于10 mm时,穿透熔体时会发生一定偏转,造成残余壁厚不均匀,弹头穿透时,由于在弯管的弯曲处内外侧速率峰值的差异,从而导致弹丸在穿透时更靠近内侧^[55]。匡唐清等^[56]还将W-PAIM和WACIM技术结合,对水驱动弹头共注射成型工艺过程模拟,发现相比于WACIM技术,W-PACIM成形件总体残余壁厚更加均匀,且内、外两层壁厚也更薄,同时弹头的加入使初始阶段的穿透更加稳定。Jorge等^[57]通过设计多尺寸的弹头形状对W-PAIM进行了研究,发现增加弹头的长度可更好地控制弹头轨迹,避免弹头发生偏转。

对于W-PAIM而言,受到的压力场更复杂,由于整个弹头处在高压水和熔体之间,其前端和后端均会受到剪切力的作用,为了成型更好的制品,如何更好地控制弹头所受到的剪切力也尤为重要。此外,W-PAIM中的弹头形状不仅仅局限于半球形,其形状也可以是圆锥形、球形,只要其最大直径满足成型产品的内径即可。并且W-PAIM成型设备中水针和模具腔体之间需要紧密连接,以方便高压水能推动弹头穿过该区域。

综上所述,W-PAIM的研究主要集中在工艺参数、弹头材料等因素对壁厚的影响,由于弹头的引入,其工艺过程的

控制变得更加困难,寻求工艺参数优化的最佳方案还有待解决。

3 结语

传统 WAIM 技术目前已取得了一定研究成果,但适用 WAIM 技术的材料还相对有限,对其研究也较少,包括一些高黏度材料以及复合材料的研究。此外,水辅注塑制品仍然存在质量缺陷,例如空心孔、指形化以及不均匀壁厚等,如何更精确的对制品的质量和性能优化或通过外界因素(例如超声波、电磁等)进行干扰以得到质量更优的成型制品仍是未来研究热点。

目前对于新型 WAIM 技术的研究还相对比较少,像 WACIM 技术,其研究以高压水和内层熔体的穿透长度以及残余壁厚为主;而 W-PAIM 技术,则主要以不同参数对残余壁厚的影响为主。由于新型 WAIM 涉及到多工艺方法融合,相比于传统 WAIM,其工艺的复杂性及难度将进一步增加,因此新型 WAIM 成型制品可能产生更多缺陷。目前,对于其制品缺陷产生机理以及微观结构研究还比较少。此外,多工艺方法融合不只限于文中所提到的几种成型方法,在多工艺方法融合方面开展工艺创新将是今后的研究热点。

参考文献

- [1] Yasuike A. DE-OS 611580[P]. 1973-07-05.
- [2] Michaeli W, et al. Kunststoffe, 1999, 89(9):18-20.
- [3] 匡唐清,等. 中国塑料, 2013, 27(1):105-110.
Kuang Tangqing, et al. China Plastics, 2013, 27(1):105-110.
- [4] 冯强. 水驱动弹头辅助注塑工艺成型机理及关键技术[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
Feng Qiang. Molding mechanism and key technology of water projectile-assisted injection moulding process[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [5] 熊爱华,等. 工程塑料应用, 2009, 37(10):83-86.
Xiong Aihua, et al. Engineering Plastics Application, 2009, 37(10): 83-86.
- [6] 贾振华,等. 现代塑料加工应用, 2009, 21(5):60-63.
Jia Zhenhua, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2009, 21(5):60-63.
- [7] 杨建根,等. 工程塑料应用, 2012, 40(2):43-47.
Yang Jiangen, et al. Engineering Plastics Application, 2012, 40(2): 43-47.
- [8] Liu S J. International Polymer Processing, 2009, 24(4):315-325.
- [9] 刘旭辉,等. 中国塑料, 2010, 24(4):65-69.
Liu Xuhui, et al. China Plastics, 2010, 24(4):65-69.
- [10] 匡唐清,等. 中国塑料, 2014, 28(2):96-100.
Kuang Tangqing, et al. China Plastics, 2014, 28(2):96-100.
- [11] 张亚民. 水辅助注射成型工艺及制品性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
Zhang Yamin. Study on processing conditions and products properties of water assisted injection molding[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [12] 匡唐清,等. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(4):121-126.
Kuang Tangqing, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31(4):121-126.
- [13] Lin K, et al. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36(5):491-497.
- [14] 周海迎,等. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(11):109-115.
Zhou Haiying, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(11):109-115.
- [15] Park H, et al. Advances in Materials Science and Engineering, 2015(4). DOI:10.1155/2015/161938.
- [16] 蔡圳南,等. 中国塑料, 2020, 34(2):54-60.
Cai Zhennan, et al. China Plastics, 2020, 34(2):54-60.
- [17] Huang S H, et al. Engineering Reports, 2022, 5(2). DOI:10.1002/ENG2.12571.
- [18] Park H, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86:9-12.
- [19] Mulyana R, et al. Advanced Injection Molding Technologies, 2019. DOI:10.3139/978156 9906040.005.
- [20] Pascoal-Faria P, et al. AIP Conference Proceedings, 2019, 2116 (1). DOI:10.1063/1.5114228.
- [21] Huang D Y, et al. Advances in Materials Science and Engineering, 2022(7). DOI:10.1155/2022/6 596464.
- [22] Zhou H Y, et al. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020(3). DOI:10.1155/2022/6596464.
- [23] Yang J G, et al. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020: 1-11.
- [24] Yang J G, et al. Polymer Engineering and Science, 2020, 60(12): 3 159-3 169.
- [25] Liu X H, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125(3). DOI:10.1002/app.36408.
- [26] 贾振华,等. 合成树脂及塑料, 2011, 28(2):67-70.
Jia Zhenhua, et al. Synthetic Resins and Plastics, 2011, 28(2): 67-70.
- [27] Yu Z, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(47). DOI:10.1002/app.49555.
- [28] Yuan H. Bulletin of Materials Science, 2019, 42(40):1-5.
- [29] Jing J. Polymer Testing, 2018, 67:183-189.
- [30] 陈忠仕,等. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(2):112-119.
Chen Zhongshi, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2020, 36(2):112-119.
- [31] Huang D Y, et al. Advances in Polymer Technology, 2022, 2020 (4). DOI:10.1155/2022/9968902.
- [32] Zhang W, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139 (24). DOI:10.1002/APP.52359.
- [33] Zhang W, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138 (38). DOI:10.1002/APP.50960.
- [34] 黄东有. 短纤维增强聚合物弯管水辅助注射成型机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.

- Huang Dongyou. Study on mechanism of water-assisted injection molding of short fiber reinforced polymer curved pipe[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [35] Naitove M H. *Plastics Technology*, 2004, 50(12):40–42.
- [36] Lang S, et al. *Plastics, Rubber and Composites*, 2015, 34(6): 232–235.
- [37] 周国发,等. *工程塑料应用*, 2015, 43(7):40–45.
Zhou Guofa, et al. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(7): 40–45.
- [38] 周国发,等. *工程塑料应用*, 2013, 41(1):47–50.
Zhou Guofa, et al. *Engineering Plastics Application*, 2013, 41(1): 47–50.
- [39] 章凯,等. *高分子材料科学与工程*, 2013, 29(6):173–177.
Zhang Kai, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2013, 29(6):173–177.
- [40] Kuang T Q, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132 (34). DOI:10.1002/app.42468.
- [41] Kuang T Q, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 133 (1). DOI:10.1002/app.42866.
- [42] 陈碧龙. *造纸装备及材料*, 2020, 49(6):58–60.
Chen Bilong. *Paper Equipment and Materials*, 2020, 49(6):58–60.
- [43] Kuang T Q, et al. *Journal of Polymer Engineering*, 2016, 36(2): 139–148.
- [44] Kuang T Q, et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 267(4). DOI:10.1088/1755-1315/267/4/042164.
- [45] Xia N, et al. *Journal of Engineering*, 2019, 135(33). DOI:10.1002/app.46540.
- [46] 袁知焕,等. *中国塑料*, 2021, 35(11):77–83.
Yuang Zhihuan, et al. *China Plastics*, 2021, 35(11):77–83.
- [47] 刘文文,等. *塑料工业*, 2016, 44(11):138–142.
Liu Wenwen, et al. *China Plastics Industry*, 2016, 44(11):138–142.
- [48] 杨帆,等. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(11):112–118.
Yang Fan, et al. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33(11):112–118.
- [49] 丁加新,等. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(4):937–945.
Ding Jiaxin, et al. *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, 2017, 51(4):937–945.
- [50] 胡礼彬,等. *工程塑料应用*, 2021, 49(5):87–91.
Hu Libin, et al. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(5): 87–91.
- [51] Hopmann C, et al. *Manufacturing of fibre-reinforced, elastomeric parts using the injection moulding process*[C]//*Proceedings of the Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*. Melville, nY: AIP Publishing, 2015:1 728–1 732.
- [52] Oliveira D, et al. *Procedia Manufacturing*, 2017(12):141–149.
- [53] Kuang T Q, et al. *International Polymer Processing*, 2020, 35(1): 2–15.
- [54] Kuang T Q, et al. *Polymer Engineering and Science*, 2019, 59(2): 295–303.
- [55] Kuang T Q, et al. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 2020 (9):1–15.
- [56] 匡唐清,等. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(4):146–153.
Kuang Tangqing, et al. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2023, 39(4):146–153.
- [57] Jorge C, et al. *Development of smart projectiles for multi-dimensional water-assisted injection moulding*[C]//*International Conference on Polymers and Moulds Innovations*. Melville, nY: AIP Publishing, 2018:2–8.