

水辅助注射成型技术的研究进展

熊爱华 柳和生 黄兴元 赖家美 徐 磊

(南昌大学机电工程学院聚合物成型研究室,南昌 330031)

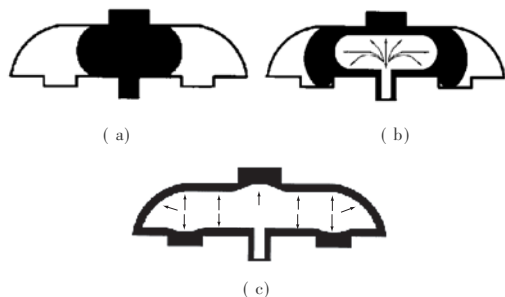
摘要 介绍了水辅助注射成型的基本原理、成型方法及特点和应用。综述了水辅助注射成型的实验研究和数值模拟研究的进展,指出了水辅助注射成型技术的关键、难点和今后的工作方向。

关键词 水辅助注射成型 水穿透长度 残留壁厚 微观组织 数值模拟

随着人们对注塑制品质量要求的提高及环保要求,出现了新型的注射成型技术,如流体辅助注射成型[包括气体辅助注射成型(GAIM)和水辅助注射成型(WAIM)]、微孔发泡注射成型、超冷气辅助注射成型等。虽然 WAIM 技术比 GAIM 技术的概念提出得早,但其商业应用却比 GAIM 技术晚,这是由于当初所用的柱塞和注射装置产生的压力太高,而流速太低,使用并不十分令人满意;同时制品上具有无限的水孔,但改用气体后却能获得良好的效果,因此 WAIM 技术被搁置在一旁。近年来,由于注射设备的改进、控制水平的提高及 GAIM 技术在中暴露出的一些不足,如冷却慢、周期长、制品易发泡、残留壁厚较大等,研究人员又将目光转向 WAIM 技术。

1 WAIM 技术原理及应用

WAIM 技术的原理与 GAIM 基本相似,只是使用的流体介质不同^[1-2],其基本原理是先注入聚合物熔体,再注入水,注入的水以不蒸发的方式在熔体中穿透,由于水的冷却作用,在水和熔体接触的过渡段,形成了一层高粘度的薄膜,它像一个高粘度的型芯推动聚合物熔体向前流动,充填型腔,再经过冷却、脱模后获得制品,其原理示意图如图 1 所示。WAIM 除了具有 GAIM 的节省原料、防止缩痕、降低制品内应力、减小锁模力、提高生产效率、降低生产成本等优点外,还具有明显缩短成型周期、提高制品质量、设计自由度大等优点;此外 WAIM 还可成型壁厚更薄、更均匀的中空制品,更能节省原料,制品内表面非常光滑^[3-6],不足之处主要是增加了排水工艺。



a—熔体注入; b—水注入; c—水保压

图 1 WAIM 原理示意图

由于 WAIM 的众多优点,近年来这种新型技术备受人们的关注,其应用范围正在不断扩大。从理论上讲,凡是

GAIM 能成型的制品也可以用 WAIM 加工^[3],但目前 WAIM 只是 GAIM 的一个有力的补充,其主要应用领域涉及汽车工业、家用电器、办公和体育运动器材,如汽车输油管、水管套及洗衣机和洗碗机的介质导管、计油游标、车椅扶手、门把手和办公椅把手、行李架、变速杆、挡风刮水器、驾驶杆支持架、复印机和打印机的输纸辊等办公用具,还有曲棍球棒、高尔夫球棒、童车等^[7-10]。

2 WAIM 技术研究进展

2.1 实验研究

WAIM 相对于传统注塑有很多优势,但由于介质水的引入也使得该工艺更为复杂。衡量 WAIM 制品质量的关键指标是水的穿透长度、残留壁厚分布及均匀性等。目前 WAIM 的实验研究主要集中在各工艺参数对成型质量的影响规律及水前沿穿透的动力学研究,国内外许多学者通过实验在这方面开展了一些研究,并取得了一定的研究成果,如德国亚琛大学的 Michaeli Walter、台湾长庚大学的 Liu Shih-Jung 及华南理工大学的黄汉雄等。

(1) 工艺参数对水穿透长度的影响

以台湾长庚大学的 Liu Shih-Jung^[11-14]为首的科研组从 2003 年起,先后研究了各种不同材料、不同截面形状型腔的 WAIM 过程,通过改变各主要工艺参数来研究水穿透长度的变化规律,采用正交实验设计法,通过信噪比分析,获得了最佳工艺参数。实验结果表明,熔体注射量对水穿透长度的影响最大,其次是注水延迟时间,再次为熔体注射温度、熔体注塑压力、注水压力等。增大熔体注射量,使得能够注入到熔体中的水减小,水穿透长度减小;增加注水延迟时间,水在熔体中的穿透长度呈增加的趋势,这主要由于水道中空率的变化而产生。由于影响中空率的因素很多,且各因素之间具有相互交织作用,从而使得成型变得非常复杂,如增加注水压力,水穿透长度一般会增加,但如果注水压力过高,水径向挤压熔体的作用力增大,增大了水道的中空率,水穿透长度反而有减小的可能性。若提高模具温度和注水的温度,则熔体冷却的时间延长,减小了熔体的冷却速率和熔体的粘度,增加了水道的中空率,水穿透长度减小。

华南理工大学以黄汉雄、曲杰等^[15-21]为核心的科研小

组2006年采用自主研发的WAIM设备,研究了短射法WAIM聚丙烯(PP)弯管主要工艺参数对制品水穿透长度的影响。结果表明,熔体注射量对水穿透长度影响最大,其次是注水延迟时间,而熔体注射温度和注水压力的影响不大,实验结果与Liu Shih-Jung等的研究结果基本相似。2008年黄汉雄等^[17]采用Taguchi正交实验设计方法和S-N信噪比及ANOVA方差分析确定了实现水穿透长度最大的实验最佳工艺参数。

从以上分析可知,工艺参数对水穿透长度的影响非常复杂,既可以表现为有利的作用,又存在不利的影响,需要从中空率、残留壁厚及冷却固化等方面综合考虑分析。

(2) 工艺参数对残留壁厚的影响

2003年,R. Protte等^[22]研究了WAIM和GAIM的区别及WAIM工艺参数与制品壁厚的关系。实验结果表明,工艺参数对WAIM制品残留壁厚的影响并不重要,而材料本身的特性对制品残留壁厚的影响较为明显。随着注水压力的增大,制品残留壁厚减小;增加注水延迟时间,制品残留壁厚也会减小;其它工艺参数如熔体注射温度、模具温度、保压时间等对制品残留壁厚没有明显的影响。

邓志武等^[18,20-21]研究了主要工艺参数对WAIM PP弯管的残留壁厚和壁厚偏差率的影响。研究结果表明:①影响制品残留壁厚最明显的工艺参数是注水延迟时间,随后依次是熔体注射温度和熔体注射量,而注水压力对制品残留壁厚的影响不明显。②沿水穿透方向的制品残留壁厚具有逐渐减小的趋势,PP弯管前段部位壁厚变化比较平稳,后段部位变化比较明显。这主要是由于形成前段残留壁厚的熔体由注塑机在注水前注入,该熔体与模壁有较长的接触时间,导致其固化层增厚,而形成后段残留壁厚的熔体是由高压水推动内部熔体向前移动的部分,由于高压水充填速度较快,该部分熔体没有足够充分的时间与模壁接触散热,从而导致固化层较薄,因此在高压水的作用下,该部位的残留壁厚明显减小。③制品的结构对壁厚偏差率影响较大,平直段的壁厚偏差率明显低于弯曲段的壁厚偏差率。

(3) 可视化技术研究熔体的充填行为

为了能够有效、实时研究熔体充填行为,许多学者采用了不同的可视化技术来进行研究和观测成型过程中水的穿透行为。2005~2007年Liu Shih-Jung等^[23-24]应用可视化技术研究WAIM过程中水在聚合物熔体中的穿透行为。研究表明:①WAIM可以分为熔体注入、水注入和保压冷却3个阶段;并且发现水注入熔体后会产生一次渗透和二次渗透行为。②当制品厚度发生改变时,无论是WAIM还是GAIM都会发生膨胀现象,但WAIM比GAIM膨胀的现象更明显,这是由于水是不可压缩流体。③水的穿透过程是不稳定的,在水穿透过程中,外界微小的干扰都会影响水的穿透行为,工艺参数对水穿透的稳定性存在不同程度的影响。④对于对称结构的制品,水的穿透流动是不对称的,且WAIM流动的对称性比GAIM的对称性高。虽然按照充填流动动力学理

论,对称结构熔体流动具有自动调整、恢复平衡的机理,但实际上流体辅助注射成型充填过程中总是存在一端处于领先的领导地位,导致产生不对称的流动现象。

2007年L. Mulvaney-Johnson等^[25]采用集成的超声传感器系统实时观测研究了WAIM/GAIM的充填行为和制品残留壁厚,预测了流体前沿流动的速度。2006~2007年Liu Xuhui等^[19,26]采用简单的可视化方法,研究了不同工艺条件下WAIM熔体的流动模型,可以明显看出水在熔体中的喷泉流动及一次渗透和二次渗透的痕迹。

(4) 制品的微观组织和力学性能

2002年,T. Juntgen等^[27]研究了WAIM制品的微观组织形态分布。研究表明,靠近模壁和水道处的制品晶体结构较细,而中间处较粗,这主要是由于水较大的热容量引起的聚合物熔体冷却速率较快所致。

2007年Liu Shih-Jung等^[14]研究了熔体注射温度、模具温度和注水温度对WAIM制品的微观组织和力学性能的影响。结果表明,WAIM制品的结晶度比GAIM的低,这是由于水的冷却能力比气体大,冷却速度快;随着熔体注射温度和注水温度的升高,制品的结晶度增加;制品的拉伸屈服强度、断裂伸长率和弯曲强度随着注水温度的增加而降低;模具温度对结晶度的影响不明显;同时靠近模具内表面/制品界面处比靠近水/制品界面处的结晶度要高。实验还观察了质量分数为15%的玻璃纤维(GF)增强聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)复合材料WAIM制品中的纤维三层取向分布规律,其不同于普通注射成型的两向取向。在靠近模具内表面/制品界面处,由于在充填过程中熔体受到较大的剪切力作用,纤维呈平行于水流动方向取向;靠近水/制品界面处熔体受到的剪切力较弱和速度较大,纤维取向呈垂直于水流动方向;而在这两者的中间区域,纤维呈随机分布。但这与Liu Shih-Jung在2004年的另一篇文章^[12]中研究由含质量分数20%和30%的GF增强PP复合材料的WAIM制品的纤维取向时得出的结论正好相反,虽然在该文中作者进行了分析,但至于这两篇文章之间的差别和联系,作者并没有进一步探讨,而文献[28]认为可能是材料流变性不同所致。因此这个问题非常有必要进行更深入的研究和探讨。

黄汉雄等^[17,21]利用自主研制的WAIM实验装置,采用差示扫描量热(DSC)分析法,研究了成型PP弯管的结晶组织。结果表明:①弯管前段的结晶度小于末端的结晶度。②弯管横向方向中间部位的结晶度高于外壁面和内壁面的结晶度。③弯管前段部位的结晶度沿壁厚方向呈对称分布,而末端沿壁厚方向的结晶度差别不大。这些差别的原因主要是聚合物在冷却过程中的冷却速度不同而导致。

2.2 数值模拟研究

数值模拟是解决成型工艺问题的一种有效方法。由于WAIM中介质水的冷却作用,使得WAIM过程比较复杂,传统的注射成型、共注射成型及GAIM的理论都不适用于WAIM,目前还未见关于WAIM数值模拟专业软件及完整理

论体系的报道, WAIM 数值模拟的关键难题就是如何建立合理的理论模型。2003 年王大中等^[29]建立了 WAIM 大直径介质导管制品的冷却物理模型,研究了靠近模具型腔内壁附近及水/聚合物界面附近四个固液相分界面的冷却,并对冷却过程进行理论分析计算。结果表明, WAIM 工艺可以明显缩短注射周期,降低制品壁厚,允许制品有更大的实际直径,但用国外的实例验证时却不是非常成功。

2004 年, Chang Rong-Yeu 等^[30]假设熔体流动符合非等温条件下粘性非牛顿流体的广义 Hele - Shaw 流动模型,采用基于流动连续性的数值技术跟踪水/熔体边界,采用混合的有限差分/控制体有限元法对控制方程进行数值求解,针对 PP 和聚苯乙烯(PS)两种材料采用修正的 Cross 模型来表征熔体粘度与压力、温度和剪切速率之间的关系,通过 MOLDEX3D 软件对 WAIM 过程进行模拟研究。此过程忽略水与熔体之间的热传递作用,忽略注水过程中水压力损失并将水对聚合物的作用简化为在聚合物和水的边界上向聚合物施加的均布压力,没有研究聚合物熔体流变性能与壁厚的关系。2006 年 Wu Yi-Chuan 等^[31]以无定形的 PS 和半结晶的 PP 为例,采用数值模拟方法研究了在不同工艺条件下 WAIM 制品的中空截面形状。研究结果表明,与 GAIM 制品中空截面倾向于圆形相比, WAIM 制品中空截面形状更加类似于流道形状。2007 ~2008 年 A. Polynkin 等^[32-33]采用 Fluent 软件对 WAIM 制品的水穿透长度和残留壁厚进行数值模拟,采用超声波传感器进行实际检测,结果表明两者比较吻合。2007 年黄汉雄等^[34]采用一种遗传算法和神经网络算法相结合的逆向神经网络技术,通过大量的交叉试验结果,建立 WAIM 过程的模型,通过输入 WAIM 制品不同位置的厚度值,利用该模型可快速地预测相应的工艺参数,并对实验值和预测值进行比较验证,结果基本吻合。2007 ~2008 年华东交通大学匡唐清等^[35-37]基于 Hele - Shaw 流动模型,采用广义牛顿流体本构方程,建立了三维薄壁塑料制品的 WAIM 充模和保压过程的数学模型,对梯形截面水道的薄壁平板制品的 WAIM 流动过程进行了模拟,模拟得到的熔体前沿位置(形状)与 Chang Rong-Yeu 等^[30]的实验结果比较吻合,验证了该数学模型和数值模拟方法的有效性,验证了 WAIM 的优越性。

3 WAIM 技术的难点及今后的研究方向

3.1 技术难点

(1) 对与水相关的工艺参数如水温、水压(水液压比)、注水方式、注水位置、水的流动速率等进行精确控制。水温的高低、水流动速率的大小直接影响熔体与水的热交换,从而影响其冷却速率和成型周期,而冷却速率及水温的高低也影响了制品的微观组织,从而影响到制品的性能;正确的注水位置、注水方式及良好的水道和喷嘴设计,对 WAIM 技术来说也是亟待解决的问题;同时控制水的泄露也是一个大难题。

(2) 研发、拓宽能适用 WAIM 技术的材料类型。目前能

适用于 WAIM 的材料类型非常有限,远不如 GAIM 的种类广泛。

(3) 在进一步研发 WAIM 相关硬件设备的同时,要注重数值模拟软件的研发,研制出商业应用的模拟软件。

3.2 今后工作的研究方向

(1) 进一步研究 WAIM 中熔体的充填流动机理,建立合理的数学物理模型。

(2) 开展 WAIM 制品的微观组织及性能的研究,探究微观组织形态的演化机理。

4 结语

WAIM 技术是一种新型、高效的注射成型方法,该项技术具有很好的应用前景,目前的研究已经显示出 WAIM 技术的优势。虽然国内外已经有一些学者开始对 WAIM 进行研究,并且取得了一定的研究成果,但到目前为止,还未对该技术的成型机理、技术的关键和难点等取得突破性进展,使得该技术不够完善,制约着 WAIM 技术的广泛应用。尤其是 WAIM CAE 研究刚刚起步, WAIM 技术目前还没有大量进入工业化,其应用范围有待进一步推广,因此全面了解这一技术的实质和关键问题,对加快这一新技术的推广应用和普及必将产生重要的影响。

参考文献

- [1] Knights M. *Plastics Technology*, 2002, 48(4): 42 - 47, 62 - 63.
- [2] Michaeli W, et al. *Kunststoffe Plastic Europe*, 1999, 89(4): 20 - 21.
- [3] 钟世云. *中国塑料*, 2002, 16(12): 18 - 22.
- [4] 江进成. *国外塑料*, 2001, 19(4): 22 - 23.
- [5] 吴清鹤, 等. *国外塑料*, 2006, 24(9): 66 - 67, 70 - 71.
- [6] 周建源, 等. *模具工业*, 2007, 33(2): 40 - 44.
- [7] 孙玲, 等. *工程塑料应用*, 2006, 34(9): 78 - 81.
- [8] 钟世云. *上海塑料*, 2005, 6(2): 9 - 14.
- [9] 郑建华, 等. *工程塑料应用*, 2003, 31(7): 65 - 68.
- [10] 王玉洁, 等. *广东化工*, 2007, 34(2): 31 - 33.
- [11] Liu Shih-Jung, et al. *Plastics, Rubbers and Composites*, 2004, 33(6): 260 - 266.
- [12] Liu Shih-Jung, et al. *Composites: Part A*, 2004(35): 171 - 180.
- [13] Liu Shih-Jung, et al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008, 27(9): 985 - 999.
- [14] Liu Shih-Jung, et al. *Composites Science and Technology*, 2007, 67: 1415 - 1424.
- [15] Huang Hanxiong, et al. Penetration length, thickness and crystallization behavior of water-assisted injection molded part [C] // ANTEC 2007-Conference Proceedings. Cincinnati, Ohio: *Plastics Engineering*, 2007: 2529 - 2533.
- [16] 曲杰, 等. *高分子材料科学与工程*, 2008, 24(7): 20 - 23.
- [17] Huang Hanxiong, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 108(1): 228 - 235.
- [18] 邓志武, 等. *中国塑料*, 2006, 20(8): 55 - 59.
- [19] Liu Xuhui, et al. Fountain flow in water-assisted melt filing [C] // ANTEC 2007-Conference Proceedings. Cincinnati, Ohio: *Plastics*

Engineering, 2007: 671 – 674.

[20] 黄汉雄,等. 塑料加工新技术的研究[C] // 2006 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集. 济南:《工程塑料应用》杂志社, 2006: 34 – 35.

[21] 黄汉雄,等. 水辅助注塑的实验研究[C] // 高分子材料科学与工程研讨会论文集. 2006: 364 – 365.

[22] Protte R, et al. Water-assisted injection molding-an innovative process technology for productivity improvement developments in processing[C] // ANTEC 2003-Conference Proceedings. Nashville, Tennessee: Plastics Engineering, 2003: 404 – 408.

[23] Liu Shih-Jung, et al. Polymer Testing, 2007, 26: 232 – 242.

[24] Wu Yi-Chuan, et al. Plastics, Rubber and Composites, 2005, 34 (5): 227 – 231.

[25] Mulvaney-Johnson L, et al. Plastics, Rubber and Composites, 2007, 36(3): 111 – 121.

[26] Liu Xuhui, et al. Flow patterns and water penetration in water-assisted melt filling using an emulated mold[C] // The 2006 Annual Meeting. San Francisco: Engineering Sciences and Fundamentals, 2006: 101 – 106.

[27] Juntgen T, et al. The water injection technique(WIT) as an attractive alternative and supplement to gas-assisted injection molding(GAIM) [C] // ANTEC 2002-Conference Proceedings. San Francisco: Plastics Engineering, 2002: 386 – 391.

[28] 刘旭辉,等. 塑料, 2008, 37(4): 69 – 71, 52.

[29] 王大中,等. 塑料工业, 2003, 31(6): 21 – 24.

[30] Chang Rong-Yeu, et al. The investigation of flow behavior of polymeric melts in the water assisted injection molding[C] // Annual Technical Conference Proceeding. Boston Massachusetts: USENIX and SAGE, 2004: 566 – 569.

[31] Wu Yi-Chuan, et al. Plastics, Rubber and Composites, 2006, 35 (10): 425 – 431.

[32] Polynkin A, et al. Plastics, Rubber and Composites, 2008, 37 (2): 131 – 141.

[33] Polynkin A, et al. Developments in water assisted injection molding process technology and simulation[C] // ANTEC 2007-Conference Proceedings. Cincinnati, Ohio: Plastics Engineering, 2007: 2 538 – 2 542.

[34] 黄汉雄,等. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 23 – 28.

[35] 匡唐清,等. 塑料工业, 2007, 35(12): 39 – 42.

[36] 匡唐清,等. 模具工业, 2008, 34(4): 1 – 5.

[37] 匡唐清,等. 模具工业, 2008, 34(1): 1 – 5.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF WATER-ASSISTED INJECTION

Xiong Aihua, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, Lai Jiamei, Xu Lei

(Polymer Processing Research Lab, College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT The principle, process, characteristics and application of water-assisted injection were introduced. The recent development of investigation on experiment and simulation of water-assisted injection was summed up. The key issues and difficulty problems and following research were pointed out.

KEYWORDS water-assisted injection, water penetration length, residual wall thickness, microstructure, simulation

英牛奶巨头力推塑料环保牛奶壶

英国乳业巨头 DairyCrest 公司近日宣布, 将 JUGIT 环保牛奶壶的使用范围扩大到牛奶递送服务。采用环保牛奶壶的牛奶将首先在普利茅斯郡递送, 随后将继续扩大其递送范围。2008 年 4 月份, 这种环保牛奶壶就在英国 35 家超市中发行, 然而, 直到最近才获得进一步推广。

虽然这种环保牛奶壶去年发布后不久就在英国超市开始销售, 但是 DairyCrest 公司表示需要更多时间来构建供应链, 以满足英国市场对这种环保牛奶壶快速增长的需求量。DairyCrest 公司近日的决定意味着, JUGIT 环保牛奶壶即将进入一个快速发展期。

JUGIT 是 DairyCrest 公司参与开发的一种创新环保牛奶包装系统。该系统由可反复利用的塑料牛奶壶与可回收的牛奶袋构成。与普通塑料牛奶壶相比, JUGIT 牛奶壶可以减少 75% 的包装垃圾。不仅如此, JUGIT 能够迅速获得消费者的青睐还有另一个原因, 就是这种经过精心设计的牛奶壶开启和倾倒都非常方便, 可封闭的壶盖还有利于牛奶的保存。DairyCrest 公司表示, 这种包装概念不仅适用于牛奶, 还可以推广到更多饮料。

(慧聪网)

聚氨酯发泡材料构造绿色车内环境

汽车内的环境问题一直被消费者所忽视, 但是车内空气的污染隐患对于人体健康所构成的危害已经日趋严重, 根据之前的一项调查显示, 对超过 50 个品牌的汽车进行检测, 在检测分析的甲醛、苯、甲苯、二甲苯和 TVOC 五项车内有害元素中, 50 款车型中有 42 款存在不同检测项超标问题, 超标率达到 82%。其中, 甲醛的超标现象最为严重, 93% 的被测新车车内空气中所含的甲醛含量都超过室内甲醛国际限量值, 此外, 22% 的被测新车车内空气中苯含量超标。

国内最大的汽车座椅制造商之一延锋江森公司的相关技术人员在南京的汽车内饰产业论坛上也表示, 聚氨酯(PUR) 泡沫材料在整个汽车环境中占有很大比重, PUR 材料中有机物的挥发是影响车内空气质量的重要因素, 研究和控制 PUR 材料中有害气体种类和挥发性问题对于整个汽车车内环境的改善有着重要意义。

相关技术人员介绍, 汽车座椅的有机物挥发主要来自于 PUR 合成过程的胺类催化剂及低活性多元醇、硅油等物质, 通过减少胺类催化剂的用量及控制聚醚中单体含量等措施, 都能够有效减少汽车座椅有害气体的挥发。

(慧聪网)