

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.09.014

水辅助注射成型制品缺陷机理

杨建根¹, 贺宗贵²

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2. 宁波舜宇模具股份有限公司, 浙江宁波 315400)

摘要: 水辅助注射成型是生产中空塑料制品的新方法, 具有制品质量更轻、壁厚更均匀以及成型周期更短等优点。由于新的工艺参数的引入, 制品质量变得更加难以控制, 容易产生一系列的制品缺陷问题。归纳总结了水辅助注射成型的主要制品质量缺陷问题, 如不规则残留壁厚、指形化和空心孔等, 对这些缺陷问题进行了机理分析。此外, 从聚合物的材料特性、制品的结构尺寸, 以及成型工艺参数等方面提出了避免缺陷的改进措施及方法。

关键词: 水辅助注射成型; 制品缺陷; 机理

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)09-0072-05

Mechanism for Product Defects in Water-Assisted Injection Molding

Yang Jiange¹, He Zongui²

(1. Mechanical and Electronic Engineering Department, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Ningbo Sunny Mould Co. Ltd., Ningbo 315400, China)

Abstract: Water-assisted injection molding is a new way to produce hollowed plastics products with the advantages of lighter quality, more uniform wall thickness and shorter molding cycle. For the introduction of new processing parameters, it is more difficult to control product quality and easier to cause a series of product defects. The main product defects were summarized, such as irregular residual wall thickness, fingering, void and double wall thickness, and the mechanism of product defects were analysed. Furthermore, the ways of avoiding defects were suggested by material characteristic of polymer, structure and dimension of product, and molding processing parameters.

Keywords: water-assisted injection molding; product defects; mechanism

水辅助注射成型技术最初萌芽于 20 世纪 70 年代初, 当时发明了一种专利^[1], 采用向模具型腔中注射液体的方法来生产中空塑料制品。但注射装置无法提供合乎要求的水流量, 制品的缺陷非常明显。此外, 气体辅助注射成型技术发展迅猛, 水辅助注射成型技术从而被人遗忘。1998 年, 采用水辅助注射成型技术成型直径较大的中空结构件在德国被成功开发, 水辅助注射成型技术迎来了发展的新时代^[2]。

水辅助注射成型技术经历近 20 年的发展, 在理论分析、模拟计算及实验研究中取得了巨大的进展。不少研究学者对水辅助注射成型技术的成型原理、成型特点、成型工艺和设备进行了论述^[3-5], 并建立了数学模型、分析了数值模拟方法及实验方法^[6-7]。

然而, 以上研究仅仅只是对水辅技术发展的综述, 对成型制品的各种质量缺陷问题并未涉及。目前, 制品缺陷问题愈发受到重视, 但现有的研究仅仅局限于某一方面孤立的缺陷问题, 局限于对质量缺陷的表象进行论述^[8], 忽略了某些质量缺陷问题^[9]。

笔者对制品质量缺陷问题的研究进行了归纳, 总结出制品的质量缺陷主要包括不规则残留壁厚、指形化、空心孔、双壁等。此外, 对这些缺陷问题进行了机理分析, 提出了避免缺陷的改进措施及方法, 从而使水辅助注射成型技术变得更加可控和预测。

1 不规则残留壁厚

制品的不规则残留壁厚如图 1 所示。此缺陷主要发生在水注射入口附近, 但有时候整个制品内部

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51741505)

通讯作者: 杨建根, 博士, 副教授, 研究方向为塑料注塑成型技术 E-mail: jgyang@shou.edu.cn

收稿日期: 2019-06-12

引用格式: 杨建根, 贺宗贵. 水辅助注射成型制品缺陷机理 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(9): 72-76.

Yang Jiange, He Zongui. Mechanism for product defects in water-assisted injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9): 72-76.

都可能会产生残留壁厚不均匀的现象。

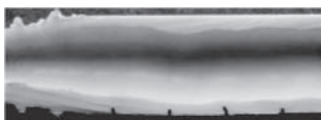


图1 不规则残留壁厚

周华等^[10]通过建立的水辅助注射成型充模流动的仿真模型,预测了注射水穿透熔体的初始阶段产生了界面不稳定的现象,在注射口的两侧容易形成大小不同的几个漩涡。Yang Jiange等^[11]利用模拟发现在靠近水注射入口附近,不稳定的水穿透导致了不均匀的残留壁厚。离开注射入口后,水穿透直径基本是同样的大小。刘旭辉等^[12]采用可视化系统观察了水对聚合物熔体的穿透,在穿透前端界面不稳定,其它位置的穿透则很均匀,这与A. Ahmadzai等^[13-14]的实验研究结果非常类似。无论是在模拟计算还是在实验研究中,均产生了由于水的不规则穿透而导致的壁厚不稳定现象。

C. Tzoganakis等^[15]和周国发^[16]分析了聚合物多相分层充模流动的界面不稳定现象,水辅成型则是水和聚合物熔体的两相分层非定常流动。根据流体力学相关知识,水的雷诺数(Re)计算如式(1)^[17]:

$$Re = \rho v l / \mu \quad (1)$$

式中: ρ ——水的密度;

v ——水在注射入口的速度;

l ——水道直径;

μ ——水的黏度。

v 的表达式如式(2)^[18]:

$$v = \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (2)$$

式中: Δp ——水的静压和注射压力之差。

在水辅助注射成型中,水的注塑压力为兆帕级,相对于气体,水的密度也大得多,由公式计算得到的雷诺数往往大于湍流临界值4000。所以,充填的实质为水、聚合物熔体和空气耦合的多相分层非定常流动^[19]。

在高压水注入模具型腔后,随即产生的高黏度薄膜推动熔体向前流动。湍流漩涡易发生在充模流动过程中,且这些漩涡的强弱和中心位置在分层界面上交替变化。基于此,在水注射的入口处,湍流状态的水在垂直流动方向易产生运动,注射过程不稳定,不规则壁厚也就产生了。此外,随着黏度比的增大和塑料熔体相对残留壁厚的减小,产生不规则残留壁厚的趋势增大^[20]。

2 指形化

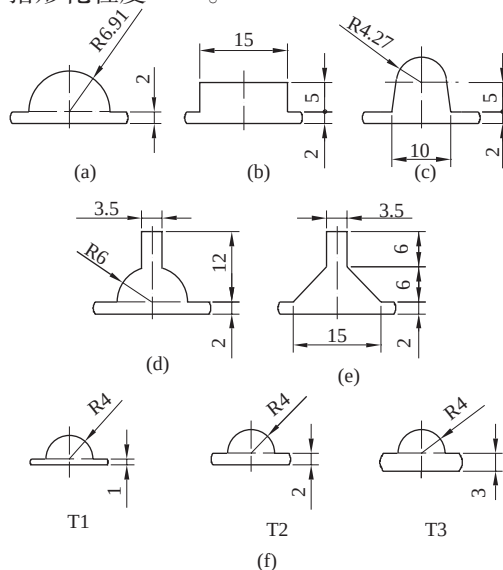
指形化是指高压水并未按设定的水道流动,而是穿透进入了塑料件的薄壁区域,此现象严重影响了塑料件的刚度和强度^[21]。聚合物的材料特性、制品的几何形状和尺寸,以及成型工艺参数等均会对指形化产生影响。

2.1 聚合物材料特性的影响

聚合物中的玻璃纤维对指形化有一定的影响,添加了玻璃纤维的聚合物指形化程度比没有添加的要高,随着玻璃纤维含量的增加,指形化程度相应也会增加。指形化产生差异是因为黏度小的流体穿透进入黏度大的熔体,黏度小的流体具有更大的动能,水与添加了玻璃纤维的聚合物黏度差异明显大于水与未添加玻璃纤维的聚合物^[22]。

2.2 制品的几何形状和尺寸的影响

图2为各种不同形状及尺寸的水道。由图2可见,半圆形和矩形水道的指形化程度类似,顶部带半圆形结构的梯形水道(图2c)指形化程度稍有增加,顶部带筋板的半圆形水道(图2d,图2e)指形化程度最少。此外,水道的尺寸也是影响指形化的重要因素,增大水道的总高度与底板厚度的比值(如图2f)能有效减少指形化程度^[21-23]。



a—半圆形水道; b—矩形水道; c—顶部为半圆形的梯形水道;
d—顶部带筋板的半圆形水道; e—顶部带筋板的三角形水道;
f—不同尺寸水道

图2 各种不同形状及尺寸水道

2.3 成型工艺参数的影响

指形化随熔体温度、模具温度、水温及水压的增加而增加,随水注射延迟时间、短射量的提高而减

少。其中最主要的影响工艺参数是延迟时间、短射量和水压,通过减小这些工艺参数可降低此现象发生的几率^[21,23]。

指形化随水压时间的延长而增加,机理是延迟水压时间使水与熔体的接触时间及冷却时间增加,水更容易穿透进入制品的薄壁区域以补偿熔体的体积收缩。此外,指形化随流率的降低而增加,这是因为降低流率使制品的残留壁厚增加,更厚的残留壁厚导致熔体的体积收缩加剧,从而容易形成指形化^[24]。

此外,增强水的抗静电性能可以有效减少制品的指形化缺陷。水的抗静电性能使水和聚合物熔体的接触更加充分,它们之间的热交换也就变得更快。因此,损坏残留壁厚的爆裂蒸汽层得以避免,从而形成稳定的聚合物熔体凝固层。

3 空心孔

制品的空心孔缺陷一般单独包裹于制品残留壁的内部,或者通过微通道沿制品轴向相连成一片,严重影响制品的成型质量。空心孔缺陷主要产生于弯曲制品的外侧,可由模具型腔内的空气或者水导致。

3.1 水产生的空心孔

水产生的空心孔通常比较大且沿制品的轴向分布,可能完全包裹于制品残留壁厚内部,通过微通道相连。在水辅助注射成型过程中,首先水推动熔体阶段为一次穿透,在保压阶段聚合物熔体的收缩会产生二次穿透。在水的一次和二次穿透过程中,均可能产生空心孔。在水的一次穿透阶段,水喷射进入制品残留壁厚中,随后在模具型腔内一定的压力和温度条件下气化^[9,25],从而形成空心孔,水的气化所产生的空心孔如图3所示。

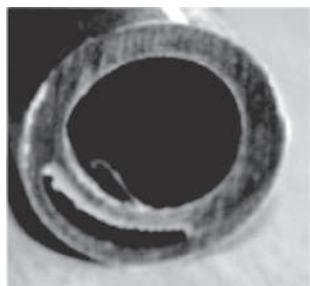


图3 水的气化所产生的空心孔

此外,在水的二次穿透阶段空心孔的明显特征是它们通过微通道相连。机制是注射进入壁厚的水补偿了熔体的体积收缩,当型腔内压力降低时易形成水气,空心孔沿制品的轴向被放大。

当注水压力过低、注水流量过小、熔体温度过高、熔体材料过多时,水容易气化从而产生空心孔。

基于以上机理,为缓解制品由于水所产生的空心孔现象,关键是要使模具型腔内的水不易气化。因此提高注水压力和流量^[25-26]、成型小截面制品^[27]能使空心孔现象减少直至消除。

3.2 空气产生的空心孔

空气产生的空心孔一般比较小,并且完全包裹于制品残留壁厚的内部,主要产生于二次穿透阶段,体积收缩所产生的空心孔如图4所示。机理是在水的快速冷却下,熔体内壁易先凝固,从而阻碍了体积收缩的补偿,制品的厚度方向产生大的体积收缩差异^[28]。

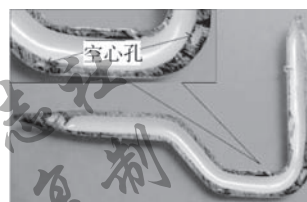


图4 体积收缩所产生的空心孔

另一方面,将水替换为热传导率和热容量都更小的空气或硅油后^[26,28],空心孔现象基本消失。主要原因是低热容量和热传导率的流体使内壁的聚合物熔体凝固速度放缓,结果导致了顺畅的体积收缩补偿,降低了制品的体积收缩差异。

此外,在注射过程中如果混入了空气,则制品内部很容易产生空心孔。匡唐清等^[29]发现在注水装置调试的初期,制品内产生了大量的空心孔,且这些空心孔与制件的中空部分相通,孔内无液态水的存在,混入空气所产生的空心孔如图5所示。

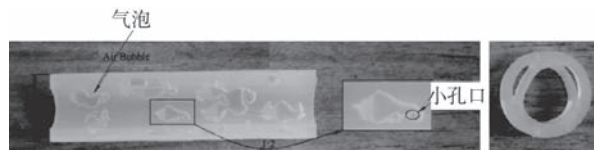


图5 混入空气所产生的空心孔

通过分析计算发现,在高压下型腔内的水没有达到沸点,空心孔的产生并不是由于水的气化,而是水针内混入了空气所造成的^[30]。在注射过程中,混入的空气困在残留壁厚中,而随着水压的降低,这些空气冲破内壁的薄凝固层与制件的中空部分相通。为此,经过改进的注水装置保证纯水的注入后,空心孔现象得到了消除。

4 结论

水辅助注射成型制品的质量缺陷主要包括不规则壁厚、指形化和空心孔等,这些缺陷问题来源于聚合物的材料特性、制品的结构尺寸,以及成型工艺参数等方面的不合理设置。基于缺陷产生的机理分析,所总结出的各种避免缺陷的改进措施及方法是可行的,从而使水辅成型技术变得更加可控和预测。

以上研究将制品的质量缺陷问题孤立地进行讨论,并未将多个质量缺陷在一起进行综合讨论。这将导致在某些成型条件下这些质量缺陷互相干涉,难以同时满足多种质量要求。为了获得综合质量较高的制品,需要进一步对成型过程进行优化,这也是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] Yasuike A. Verfahren zur herstellung geformter gegenstaende aus synthetischen harzen:German, DE-OS 24611580[P]. 1973 / 75.
- [2] Michaeli W, Brunswick A, Pohl T. A comparision of gas and water[J]. Kunststoffe, 1999, 89(9):18-20.
- [3] 孙玲,刘东雷. 水辅注射成型技术综论 [J]. 工程塑料应用, 2006, 34(9):78-81.
Sun Ling, Liu Donglei. Summarization of water assisted injection molding technology[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(9):78-81.
- [4] 周建源,匡唐清,熊国良. 水辅助注射成型技术及其研究现状 [J]. 模具工业, 2007, 33(2):40-44.
Zhou Jianyuan, Kuang Tangqing, Xiong Guoliang. Water assisted injection molding technology and status quo of study[J]. Die & Mould Industry, 2007, 33(2):40-44.
- [5] 贾振华,郑国强,郝晓琼. 水辅注射成型技术的特点及研究进展 [J]. 现代塑料加工应用, 2009, 21(5):60-63.
Jia Zhenhua, Zheng Guoqiang, Hao Xiaoqiong. Characteristics and research development of water assisted injection molding technology[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2009, 21(5):60-63.
- [6] 杨建根,王冉,周雄辉. 水辅助注射成型技术研究 [J]. 工程塑料应用, 2012, 40(2):43-47.
Yang Jianguen, Wang Ran, Zhou Xionghui. Research of water assisted injection molding technology[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(2):43-47.
- [7] Liu S j. Water assisted injection molding:A review[J]. International Polymer Processing, 2009, 24(4):315-325.
- [8] 杨建根,周雄辉. 水辅助注射成型制品质量及工艺优化研究 [J]. 塑料工业, 2015, 43(11):1-3.
Yang Jianguen, Zhou Xionghui. Study of optimization of product quality and processing in water assisted injection molding[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(11):1-3.
- [9] Sannen S, Puyvelde P V, Keyzer J D. Defect occurrence in water assisted injection molded products:Definition and responsible formation mechanisms[J]. Advances in Polymer Technology, 2015, 34(1):21 476-21 487.
- [10] 周华,陈英龙,张曾猛,等. 水辅成型非圆截面制件残余壁厚的仿真与试验研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(18):169-176.
Zhou Hua, Chen Yinglong, Zhang Zengmeng, et al. Simulaton and experimental analysis on non-circular parts residual wall thickness of water assisted injection molding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18):169-176.
- [11] Yang Jianguen, Zhou Xionghui, Niu Qiang. Model and simulation of water penetration in water-assisted injection molding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67:367-375.
- [12] 刘旭辉,黄汉雄. 水辅助注射成型中水穿透行为的可视化研究 [J]. 中国塑料, 2009, 23(3):58-61.
Liu Xuhui, Huang Hanxiong. Visualization analysis of water penetration behavior in water assisted injection molding[J]. China Plastics, 2009, 23(3):58-61.
- [13] Ahmadzai A, Behraves A H. An experimental investigation on water penetration in the process of water assisted injection molding of polypropylene[J]. Polimery, 2009, 54(7-8):564-572.
- [14] Ahmadzai A, Behraves A H. Effect of processing parameters on water penetration in water assisted injection molding of ABS[J]. Polimery, 2011, 56(3):232-239.
- [15] Tzoganakis C, Perdikoulis S J. Interfacial instabilities in coextrusion flows of low-density polyethylenes:Experimental studies[J]. Polymer Engineering and Science, 2000, 40(5):1 056-1 064.
- [16] 周国发,孙懋. 聚合物全三维非稳态非等温多相分层流动成型过程的理论模型和数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(9):16-22.
Zhou Guofa, Sun Mao. 3D-dimensional unsteady non-isothermal theoretical model and simulation of polymer multiphase-multilayer flow molding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9):16-22.
- [17] Rott N. Note on the history of the reynolds number[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1990, 22:1-12.
- [18] 韩占忠. Fluent: 流体工程仿真计算实例与分析 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009.
Han Zhazhong. Fluent:Examples and analysis of fluid engineering simulation computation[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [19] 杨建根. 水辅助注射成型型穿透机理及工艺稳健优化研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2009:19-20.
Yang Jianguen. Study of penetration mechanism and processing

- robust optimization for water assisted injection molding[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2009:19–20.
- [20] 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 Zengmeng, Zhou Hua, Gao Yuanan, et al. Simulation and analysis on cavity filling process in water assisted injection molding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8):140–146.
- [21] Liu Shih-Jung, Lin Shih-Po. Study of ‘fingering’ in water assisted injection molded composites[J]. Composites, 2005, 36:1 507–1 517.
- [22] Liu S J, Lin M J, Wu Y C. An experimental study of the water-assisted injection molding of glass fiber filled poly-butylene-terephthalate (PBT) composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67:1 415–1 424.
- [23] Liu S J, Lin S P. Factors affecting the formation of fingering in water-assisted injection molded thermoplastics[J]. Advances in Polymer Technology, 2006, 25(2):98–108.
- [24] Sannen S, Keyzer J D, Puyvelde P V. The influence of melt and process parameters on the quality and occurrence of part defects in water-assisted injection molded tubes[J]. International Polymer Processing, 2011(5):551–559.
- [25] Polynkin A, Bai L, Pittman J F T, et al. Water assisted injection molding:development of insights and predictive capabilities through experiments on instrumented process in parallel with computer simulations[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2008, 37:131–141.
- [26] Liu S J, Lin C H. An experimental study of water-assisted injection molding of plastic tubes with dimensional transitions[J]. Journal of Reinforce Plastics and Composites, 2007, 26(14):1 441–1 454.
- [27] 张增猛.水辅成型充模流动的纯水液压比例压力控制[D].杭州:浙江大学,2009:112–113.
Zhang Zenmeng. Water hydraulic proportional pressure control for cavity-process of water-assisted injection molding[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2009:112–113.
- [28] Park H P, Cha B S, Park S B, et al. A study on the void formation in residual wall thickness of fluid-assisted injection molding parts[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 37:1–6.
- [29] 匡唐清,余春丛.水辅助注塑气泡与二次穿透的分析[J].高分子材料科学与工程,2014,30(11):112–116.
Kuang Tangqing, Yu Chuncong. Analysis of air bubble and secondary penetration of water in water assisted injection molding process[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014, 30(11):112–116.
- [30] 李根义.水44辅成型水液压系统的研制[D].杭州:浙江大学,2008:112–113.
Li Genyi. Development of water hydraulic system for WAIM[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2008:112–113.
-
- (上接第 71 页)
- Continuous-Extrusion Process[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2010, 49(5) : 2 186–2 193.
- [4] Blander M, Katz J L. Bubble nucleation in liquids[J]. AIChE J, 1975, 21(5) : 833–848.
- [5] Blander M, Katz J L. The thermodynamics of cluster formation in nucleation theory[J]. Journal of Statistical Physics, 1972, 4(1) : 55–59.
- [6] Amon M, Denson C D. A study of the dynamics of foam growth : Analysis of the growth of closely spaced spherical bubbles[J]. Polymer Engineering and Science, 1984, 24(13) : 1 026–1 034.
- [7] Leung S N, Park C B, Xu D L, et.al. Computer Simulation of bubble-growth phenomena in foaming[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, 45(23):7 823–7 831.
- [8] Joshi K, Lee J G, Shafi M A, et al. Prediction of cellular structure in free expansion of viscoelastic media[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 67(8) : 1 353–1 368.
- [9] Sun Y, Ueda Y, Suganaga H, et al. Experimental and simulation study of the physical foaming process using high-pressure CO₂[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 107 : 733–745.
- [10] Shafi M A, Lee J G, Flumerfelt R W. Prediction of cellular structure in free expansion polymer foam processing[J]. Polymer Engineering and Science, 1996, 36(14):1 950–1 959.
- [11] Leung S N, Park C B, Li H. Numerical simulation of polymeric foaming processes using modified nucleation theory[J]. Plastics Rubber and Composites, 2006, 35(3) : 93–100.
- [12] Shimoda M, Tsujimura, I Tanigaki M, et al. Polymeric Foaming Simulation for Extrusion Processes[J]. Journal of Cellular Plastics, 2001, 37(6) : 517–536.
- [13] Feng J J, Bertelo C A. Prediction of bubble growth and size distribution in polymer foaming based on a new heterogeneous nucleation model[J]. Journal of Rheology, 2004, 48(2) : 439–462.
- [14] 杨学成.聚合物间歇微发泡过程数值模拟[D].郑州:郑州大学,2018.
Yang Xuecheng. Numerical simulation of batch micro-foaming process of polymer[D]. Zhengzhou : Zhengzhou University, 2018.
- [15] Stephen C, Bhattacharya S N, Khan A A. Mathematical modeling and numerical simulation for nucleated solution flow through slit die in foam extrusion[J]. Polymer Engineering and Science, 2010, 46(6) : 751–762.
- [16] 周诣平.发泡工艺与结晶对PCL/PLA共混体系发泡行为的影响[D].郑州:郑州大学,2018.
Zhou Yiping. Effect of foaming process and crystallization on microcellular foaming behavior of PCL / PLA blends[D]. Zhengzhou : Zhengzhou University, 2018.