

精密滴灌灌水器注塑工艺模拟与优化^{*}

伍志刚 史玉升 魏青松 董文楚 黄树槐

【摘要】 通过正交优化试验设计,以注塑工艺模拟代替实物进行试验,研究了注塑工艺参数对LDPE材料灌水器制品收缩率的影响。模拟确定了各工艺参数对制品收缩率及收缩率变化的影响度,并优化取得了最佳的注塑工艺参数。在模拟结果的基础上一试模成功,灌水器制品的流道部分精度达到 ± 0.01 mm。

关键词: 滴灌灌水器 注塑工艺 体积收缩率

中图分类号: S275.6; TQ320.66⁺²

文献标识码: A

Simulation and Optimization of Injection Molding for Precise Drip Emitters

Wu Zhigang¹ Shi Yusheng¹ Wei Qinsong¹ Dong Wenchu² Huang Shuhuai¹

(1. Huazhong University of Science and Technology 2. Wuhan University)

Abstract

Controlling the volumetric shrinkage of injection parts effectively is the key step of ensuring high forming precision for drip-emitters, and the injection molding determines directly the volumetric shrinkage. Adopting an orthogonal experimental design method, and by using injection simulations instead of practical experiments, the effects of some important process parameters, such as holding pressure, fill time, holding pressure time etc. on the volumetric shrinkage of emitters in LDPE were studied. The optimum process parameters and the influence degree of process parameters on the average volumetric shrinkage and the volumetric shrinkage variation were obtained. On the basis of the injection simulations, the work of molding trial was succeeded at one time, and the precision of the emitter channel was lower than ± 0.01 mm.

Key words Drip emitters, Injection molding, Volumetric shrinkage

引言

滴灌是最具节水、增产效应的先进灌溉技术之一,其关键部件——灌水器的流道尺寸微小,成型精度高(± 0.01 mm),属于精密注塑的范畴^[1]。精密注塑主要是指其成型制品的精度和表面质量要求非常高的注塑成型工艺^[2]。塑料制品的收缩率既是决定塑料制品尺寸精度的主要因素,又是影响塑料制品

表面质量的关键问题,因而精密注塑过程中有必要对注塑制品的收缩率进行深入细致的研究。注塑工艺条件,如保压压力、保压时间及注射速度等都直接影响制品的收缩率^[3]。王利霞等^[4]研究了注塑工艺对聚丙烯(PP)制品收缩率的影响,发现保压时间对收缩率的影响最大,其次是模具温度,熔体温度和注射时间。张克惠等^[5]针对聚苯乙烯(PS)制品的收缩率进行了类似的研究,结果表明注射压力影响最为

收稿日期: 2005-12-12

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2002AA6Z3083)

伍志刚 华中科技大学材料科学与工程学院 硕士生, 430074 武汉市

史玉升 华中科技大学材料科学与工程学院 教授 博士生导师

魏青松 华中科技大学材料科学与工程学院 博士生

董文楚 武汉大学水利水电学院 教授, 430072 武汉市

黄树槐 华中科技大学材料科学与工程学院 教授 博士生导师

显著,保压时间、熔体温度及模具温度影响较小。付兴中等^[6]通过试验研究了聚甲醛(POM)制品收缩率与工艺参数的关系,结果发现各工艺参数对制品收缩率影响的次序为:注射时间、熔体温度、模具温度、冷却时间。所有这些研究结果表明在注塑过程中,注塑工艺参数的设定对制品收缩率有很大的影响,而且针对不同的注塑材料,各个工艺参数对收缩率产生的影响也不尽相同。因此,为了获得较高成型精度的灌水器制品,有必要系统地研究注塑工艺参数对灌水器制品收缩率的影响,并优化生产灌水器制品的最佳注塑工艺参数。

1 理论背景

注塑制品均匀的体积收缩只会引起体积上的变化,而不均匀的体积收缩是引起制品翘曲变形的主要原因。在精密注塑中,为了保证较高的尺寸精度,一般要求注塑制品的平均收缩率和收缩率的变化(体积收缩率的最大值和最小值的差值)越小越好^[7]。低密度聚乙烯(LDPE)为结晶型的各向异性塑料,成型过程中会产生较大的各向异性收缩,其塑料件翘曲变形的倾向较非结晶型塑料大得多,因而在LDPE材料的注塑过程中,尤其要注意对收缩率的控制。

注塑CAE技术是根据塑料加工流变学和传热学的基本理论,建立塑料熔体在模具型腔中的流动、传热的数理模型,利用数值计算理论构造其求解方法,完成注塑过程模拟^[8]。通过对注塑过程进行动态仿真分析,可以预测模具设计及工艺条件对成型质量的影响,为模具的优化设计及成型过程控制提供可视化依据。

2 材料与方法

2.1 灌水器及其模具结构

以华中科技大学开发的新型涡流滴箭式灌水器^[9]为例,其结构示意图如图1。外形尺寸为10 mm×10 mm×100 mm,零件体积为16.8×10³ mm³。该灌水器可分为涡体流道部分和箭矢固定部分。其关键工作部分为流道,截面尺寸为0.8 mm×0.6 mm。注塑材料为LDPE,该灌水器制品的流道要求其精度达到±0.01 mm。模具设计收缩率为1.5%,采用一模四腔结构,其模具型腔布置示意图如图2所示。

2.2 注塑工艺优化过程

采用注塑模拟软件MPI(moldflow plastics insight)进行注塑过程模拟。先在MPI中建立的Fusion网格模型,网格数为5 084个,配比率为

90.5%。后进行多模腔布置、添加冷却水道和流道,所得的数值模拟试验模型如图3所示。实验材料选用美国Dow chemical公司生产的LDPE 4012。

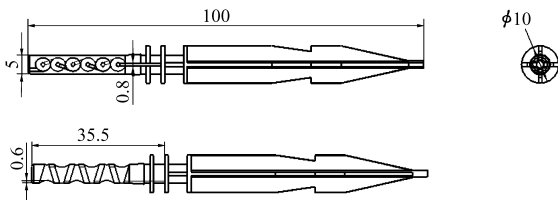


图1 涡流滴箭式灌水器示意图

Fig. 1 Structure of the emitter with eddy channels

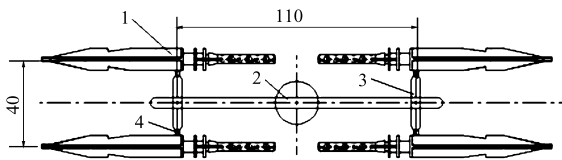


图2 涡流滴箭式灌水器模具型腔布置示意图

Fig. 2 Structure of mold and cavity layout

1. 灌水器型腔 2. 主流道 3. 分流道 4. 浇口

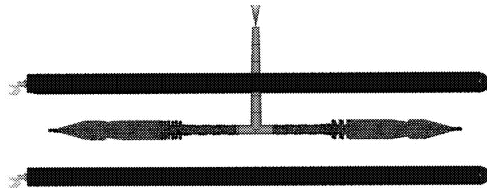


图3 数值模拟试验模型

Fig. 3 Models of the numerical experiment

采用正交试验对灌水器的注塑工艺进行优化设计,先分别优化取得平均收缩率最小和收缩率变化最小工艺参数,再将两者以一定的方法加以优化组合,最终获得最佳工艺参数。试验选用熔体温度、注射时间、保压时间、保压压力、模具温度5个工艺参数进行相关试验,试验因素及水平设置见表1所示。

表1 试验因素及水平设置

Tab. 1 Optimal parameters and their levels

代码	因素	水平代号				
		1	2	3	4	5
A	熔体温度/°C	175	190	205	220	235
B	模具温度/°C	50	55	60	65	70
C	注射时间/s	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
D	保压时间/s	2	4	6	8	10
E	保压压力/MPa	30	35	40	45	50

根据要求选用的L₂₅(6⁵)正交表如表2所示。其他工艺参数设置为:开模时间为5 s,冷却水温度25°C,入口雷诺数Re为10 000。以收缩率及收缩率变化为质量指标,将各组工艺参数依次输入到MPI中,以C-F-W的分析流程完成各组方案的模拟,

最终得到的平均收缩率和收缩率变化结果如表 2 所示。

表 2 正交表及试验结果

Tab. 2 Orthogonal table and the results of experiments

试验号	1	2	3	4	5	6	平均收缩率/%	收缩率变化/%
	A	B	C	D	E	/		
1	1	1	1	1	1	1	3.043	12.368
2	1	2	2	2	2	2	2.679	12.489
3	1	3	3	3	3	3	2.438	13.036
4	1	4	4	4	4	4	2.027	12.289
5	1	5	5	5	5	5	1.665	12.359
6	2	1	2	3	4	5	1.953	12.909
7	2	2	3	4	5	1	1.631	13.063
8	2	3	4	5	1	2	2.664	12.579
9	2	4	5	1	2	3	2.678	12.696
10	2	5	1	2	3	4	2.328	13.352
11	3	1	3	5	2	4	2.362	12.891
12	3	2	4	1	3	5	2.622	12.679
13	3	3	5	2	4	1	1.846	12.526
14	3	4	1	3	5	2	1.660	13.820
15	3	5	2	4	1	3	2.704	13.219
16	4	1	4	2	5	3	1.563	13.145
17	4	2	5	3	1	4	2.513	13.010
18	4	3	1	4	2	5	2.358	13.759
19	4	4	2	5	3	1	2.094	13.970
20	4	5	3	1	4	2	2.558	13.711
21	5	1	5	4	3	2	2.000	13.645
22	5	2	1	5	4	3	1.819	14.536
23	5	3	2	1	5	4	2.646	13.916
24	5	4	3	2	1	5	2.456	13.642
25	5	5	4	3	2	1	2.238	13.651

3 数据处理与结果分析

对模拟计算的结果使用均值分析^[10]进行数据处理,将各因素在各个水平的结果求和并平均得到一系列 K 值(均值)。不同水平上 K 的变化可以反映出该因素数值的变化对相应质量指标的影响趋势。由此可得各因素上的极差,根据要求还可初选出相应的最佳水平。极差越大,该因素对结果的影响就越大。但这种均值分析只能得出定性的结论,要获得定量的结果需进一步对试验数据进行方差分析^[11]。方差分析可得出各因素对试验指标的影响是否显著。如果某因素对指标影响不显著,那么讨论试验指标随它的变化趋势是毫无意义的。

3.1 以平均收缩率为优化方向

对试验所得平均体积收缩率进行均值分析,各因素在不同水平下的 K 值分布如图 4 所示。对表 2 中平均收缩率结果进行进一步的方差分析,结果如表 3 所示。

从表 3 中各因素的 F 值得出,各工艺参数对平均收缩率的影响度大小排列次序为:保压压力、保压时间、注射时间、模具温度、熔体温度。其中保压压力、保压时间属显著因素,其他工艺参数为非显著因素。所得优化案为 A4B4C5D5E5,通过对照表 1 中的因素及水平设置可得平均收缩率最小的工艺参数组合 I,如表 4 所示,对该组参数进行模拟得其平均收缩率为 1.534 6%,收缩率变化为 13.03%,收缩率分布如图 5 所示。

3.2 以收缩率变化为优化方向

对试验所得收缩率变化结果进行均值分析,各因素在不同水平下 K 值的分布,如图 6 所示。对表 2 中收缩率变化结果进行进一步的方差分析,结果如表 5 所示。

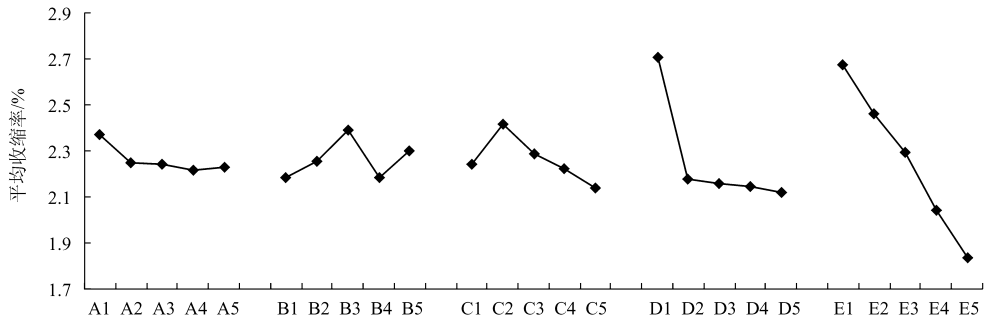


图 4 各因素水平的平均收缩率分布

Fig. 4 Standard deviation of average volumetric shrinkage

从表 5 中各试验因素的 F 值得出,各工艺参数对收缩率变化的影响度大小排列次序为:熔体温度、注射时间、保压压力、模具温度、保压时间。其中

熔体温度和注射时间属显著因素,其他均为非显著因素。所得优化案为 A1B1C5D2E1,同理可取得收缩率变化最小工艺参数组合 II,如表 6 所示,对其进

行模拟可得平均收缩率为 2.806 0%，收缩率变化为 11.682 6%，收缩率分布如图 7 所示。

表 3 平均收缩率结果方差分析

Tab. 3 Variance analysis of average volumetric shrinkage

方差来源	离差平方和 S	自由度 f	平均离差平方和 MS	F 值	显著性
A	0.077	4	0.019	0.57	
B	0.151	4	0.038	1.13	
C	0.204	4	0.051	1.53	
D	1.260	4	0.315	9.44	*
E	2.232	4	0.558	16.7	**
误差	0.134	4	0.033	1	
总和	4.057	24	0.169		

注：临界值 $F_{0.01}(4,4)=15.98, F_{0.1}(4,4)=4.11$ ，** 表示非常显著，* 表示显著。

表 4 平均收缩率最小注塑工艺参数 I

Tab. 4 Optimum parameters' levels I

工艺参数	数值	工艺参数	数值
熔体温度/℃	220	模具温度/℃	65
注射时间/s	0.6	保压时间/s	10
保压压力/MPa	50		

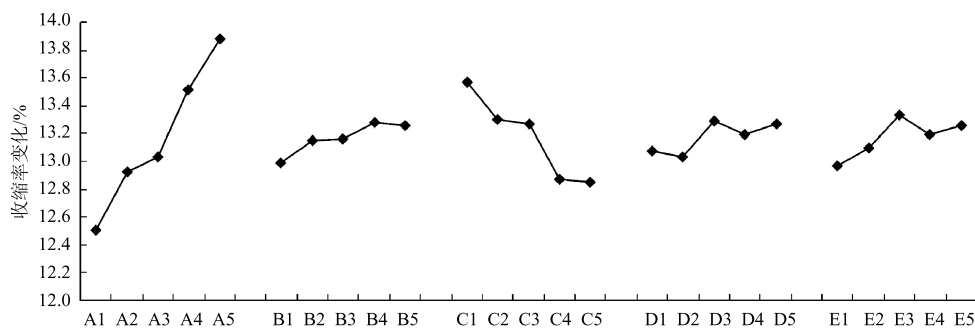


图 6 各因素水平的收缩率变化分布

Fig. 6 Standard deviation of volumetric shrinkage variation

表 5 收缩率变化结果方差分析

Tab. 5 Variance analysis of volumetric shrinkage variation

方差来源	离差平方和 S	自由度 f	平均离差平方和 MS	F 值	显著性
A	5.720	4	1.430	22.97	**
B	0.264	4	0.066	1.06	
C	1.897	4	0.474	7.62	*
D	0.260	4	0.065	1.04	
E	0.421	4	0.105	1.69	
误差	0.249	4	0.062	1	
总和	8.811	24	0.367		

3.3 综合平均收缩率和收缩率变化为优化方向

综合以上两种情况，分析各工艺参数对两个质量指标影响的显著性及 I、II 两组工艺参数，熔体温度和注射时间在 II 中属显著因素，而 I 中不是，因而取 II 中的数值 175℃、0.6 s。保压时间、保压压力在 I 中属显著因素，而在 II 中不是，因而取 I 中的数值 10 s、50 MPa。模具温度在 I、II 两组中均为非显著因素，从生产效率角度考虑取较低的模具温度 50℃。由此优化出最佳工艺参数如表 7 所示。对该组工艺参数进行模拟可得其平均收缩率为 1.664 1%，收缩率的变化为 12.354 3%。其结果与 25 组试验数据相比较，综合水平处于较理想状态，平均收缩率与模具设计收缩率误差仅为 0.164 1%，处于精度控制范围之内。其收缩率分布如图 8 所示，可以看出灌水器流道部分的体积收缩率较小，且分布均匀。

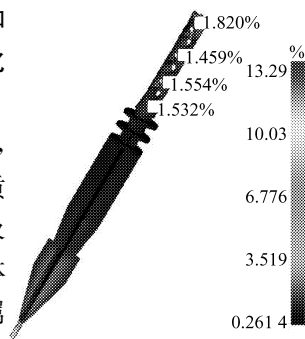


图 5 I 组参数收缩率分布

Fig. 5 Distribution of volumetric shrinkage for case I

表 6 收缩率变化最小注塑工艺参数 II

Tab. 6 Optimum parameters' levels II

工艺参数	数值	工艺参数	数值
熔体温度/℃	175	模具温度/℃	50
注射时间/s	0.6	保压时间/s	4
保压压力/MPa	30		

最后利用所得试验结果进行实际试模。通过光测量法对成型灌水器制品的流道进行抽样测量，测得流道的精度为 ±0.01 mm，达到了产品的生产要求。

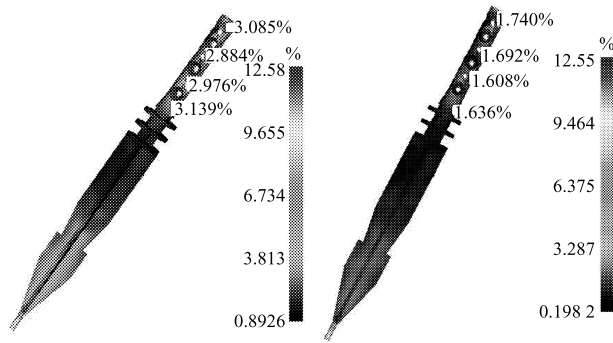


图7 II组参数收缩率分布

Fig. 7 Distribution of volumetric shrinkage for case II

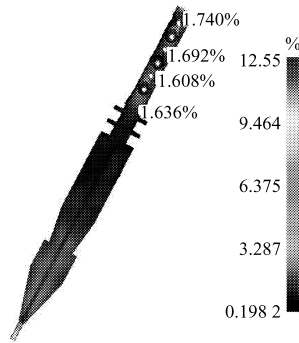


图8 最佳注塑工艺参数收缩率分布

Fig. 8 Optimized distribution of volumetric shrinkage

表7 最佳注塑工艺参数

Tab. 7 Optimum parameters' levels

工艺参数	数值	工艺参数	数值
熔体温度/ $^{\circ}\text{C}$	175	模具温度/ $^{\circ}\text{C}$	50
注射时间/s	0.6	保压时间/s	10
保压压力/MPa	50		

4 结论

(1) 通过模拟分析发现,注塑工艺参数对灌水器制品收缩率的大小及分布有显著的影响。对LDPE材料灌水器制品,各工艺参数对其平均收缩率的影响度排列次序为:保压压力、保压时间、注射时间、模具温度、熔体温度;对其收缩率变化的影响度排列次序为:熔体温度、注射时间、保压压力、模具温度、保压时间。

(2) 通过CAE优化后可得出最佳的注塑工艺参数,大大减少了试模次数,提高了一次试模成功率,保证了灌水器制品的成型精度。

参 考 文 献

- 鲁俊,史玉升,魏青松,等. 滴灌灌水器精密注塑模具设计与开发[J]. 中国农村水利水电,2005(7):1~6.
- 奚永生. 精密注塑模具设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,1997.
- 祝铁丽,王敏杰. 注塑成型的收缩规则[J]. 塑性工程学报,2001,8(4):72~76.
- 王利霞,申长雨,王蓓. 工艺参数对注塑制品质量的影响研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2003,24(3):62~65.
- 张克惠,寇开昌. 注塑参数对聚苯乙烯收缩率的影响[J]. 中国塑料,1995,9(4):45~49.
- 付兴中,王学文. 减少聚甲醛注塑制品收缩率的工艺研究[J]. 工程塑料应用,2001,29(6):17~18.
- 汪琦. 注塑塑料制品的收缩特性[J]. 现代塑料加工应用,1994,6(5):48~52.
- 王利霞,余晓容,申长雨,等. CAE技术在注塑成型中的应用[J]. 化工进展,2004,23(6):260~266.
- 史玉升,魏青松,鲁俊,等. 农业节水产品(灌水器)低成本快速开发方法研究[J]. 节水灌溉,2004(5):31~32.
- 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- 郑少华,姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京:中国建材工业出版社,2004.