

面向制造的灌水器产品快速定型与模具 CAE 研究\*

魏正英 吴松坡 刘霞 唐一平 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

【摘要】 对3种滴灌灌水器进行了线性回归分析,得到了收缩率和壁厚的数学模型,为灌水器滴片结构优化提供了理论依据;通过注塑成型工艺参数的正交试验设计得到了最佳注塑工艺参数;由极差与方差分析得到影响尺寸精度的主要因素,为实际生产提供参考依据。针对迷宫灌水器微细流道精细复杂的特点,应用快速成型 RP 与数控线切割 NC 相结合的方法制作精密原型,结合快速模具 RT 技术进行灌水器试制,并通过灌水器水力性能和抗堵性能试验对产品进行了性能验证。

关键词: 灌水器 数控线切割 快速成型 快速模具

中图分类号: S277.9+5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0056-07

Rapid Finalization and Mold CAE for Manufacture-oriented Emitter Products

Wei Zhengying Wu Songpo Liu Xia Tang Yiping Lu Bingheng

(State Key Laboratory of Manufacturing System Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract

Linear regression analysis of the three types of emitter was done, the mathematical model of the volumetric shrinkage and the wall thickness were obtained, the theory for optimization was provided, orthogonal test for investigation of the influence of processing parameter was designed, and the optimal injection molding process parameters were gained. Range analysis and analysis of variance were used to find out the main factors which affected the dimensional accuracy, and a theoretical basis for the production to ensure product dimensional accuracy was provided. According to the complex features of labyrinth emitter mini-channel, rapid prototyping and CNC wire cutting were used to produce precise prototype. With rapid tooling and the technology of rapidly producing, prototype emitter was manufactured. The performance of the product was verified by the hydraulic characteristics and clogging experiments.

Key words Emitter, CNC wire cutting, Rapid prototyping, Rapid tooling

引言

滴灌灌水器流道尺寸较小,一般流道宽度只有1 mm左右,微细流道精细微小<sup>[1]</sup>,内部流场复杂,制造精度要求高,实际生产的灌水器水力性能和使用寿命往往不理想,这可能是由整体结构设计不合理和设计过程中试验误差引起的。目前,节水设备制造单位在灌水器整体结构设计时,大多靠设计人员的经验设计,最终产品的尺寸精度主要依靠反复试

模来得到<sup>[2]</sup>。而试验室灌水器,主要使用光固化快速成形技术制造灌水器 RP 原型样件,直接进行水力性能试验<sup>[3~4]</sup>。由于快速成型是逐层叠加原理(层厚0.1 mm)的制造方法,故制造的灌水器存在明显的台阶效应,导致灌水器粗糙度较大,对于流道宽度只有0.5 mm的小尺寸流道,可能导致灌水器的试验性能与实际性能有较大差异。另外 RP 材料的亲水性与灌水器实际材料的亲水性有较大差异<sup>[4]</sup>。这也可能导致灌水器试验水力性能与实际水力性能

收稿日期: 2010-05-05 修回日期: 2010-07-15  
\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA100214-5)、国家自然科学基金资助项目(50975227)和长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0646)  
作者简介: 魏正英,教授,博士生导师,主要从事灌水器堵塞机理、结构优化和快速开发研究,E-mail: zywei@mail.xjtu.edu.cn

有差异。

针对以上问题,本文应用计算机辅助工程设计 CAE 的方法,对灌水器整体结构进行工艺性优化设计,采用快速成型 RP 与数控加工 NC 相结合的方法,使用快速模具技术进行灌水器试制,通过精度检验,并设计新的试验方案进行贴近实际的水力性能和抗堵性能试验。

1 灌水器结构优化与最佳注塑工艺参数确定

国家行业标准 SL/T 67.1—1994,微灌灌水器——滴头规定,灌水器流道尺寸误差应在企业规定值的 5% 以内<sup>[5]</sup>。灌水器生产成型过程中的收缩不均匀是影响灌水器尺寸误差较大的主要原因之一,而灌水器结构设计不合理是导致收缩不均匀的主要原因之一<sup>[6~7]</sup>。因而设计合理的灌水器结构是保证滴片生产精度的前提。本文将从壁厚、加强筋两方面优化灌水器的结构设计。灌水器成型精度受注塑工艺参数的影响也很大,在灌水器设计过程中工艺参数选择是否合理将影响产品的最终生产精度,选取最优的注塑工艺参数成为提高灌水器尺寸精度的前提条件。

本文通过灌水器壁厚差值的控制,达到对收缩率的控制,基于离散的样本控制采用多元线性回归方法获取关系模型。并通过正交试验法,得到注塑过程中最佳的浇注工艺参数,同时得到工艺参数中对灌水器尺寸影响的主次因素,以便在生产中加以控制,确保产品的尺寸精度。

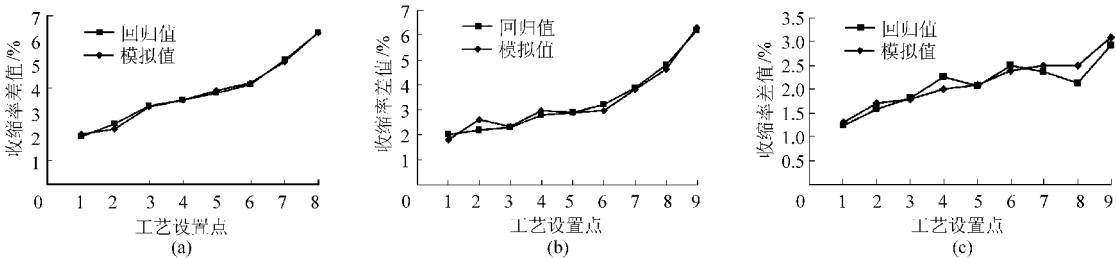


图1 灌水器模拟与回归对比图

Fig. 1 Comparison of the shrinkage simulation results and the regression results

(a) 圆弧形 (b) 对齿形 (c) 斜齿形

1.2 最佳浇注工艺参数正交试验

1.2.1 极差分析

根据注塑成型的工艺特点,本文根据经验选择了对制品质量有可能影响较大的 5 个因素,分别是注塑时间、保压时间、保压压力、模具温度和熔体温度。选择了 4 水平 5 因素正交试验,得到的极差如表 1 所示。

由表 1 可以看出,圆弧形流道的影响因素排序为  $D > E > C > A > B$ ,保压压力的极差最大,说明保

1.1 灌水器收缩率与壁厚回归模型

灌水器变量数对回归模型的建立很重要。根据工艺需要,恰当的变量数有助于提高模型精度。灌水器剖面结构包括  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  和  $h_4$  4 个壁厚和加强筋的高度  $h_5$ 。根据注塑件设计壁厚均匀一致的原则,设  $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = x_1$ ,  $h_5 = x_2$ 。

建立灌水器壁厚与灌水器收缩率差值的二次多项式回归模型,依 Moldflow 软件的模拟结果,在 SPSS 平台上总结出灌水器壁厚与灌水器收缩率关系模型。以下经验公式分别是圆弧形、对齿形、斜齿形流道灌水器的壁厚与收缩率差值的回归模型。

圆弧形

$$y = 13.065 - 35.273x_1 + 23.744x_2 + 8.93x_1^2 - 19.36x_2^2 + 14.175x_1x_2 \tag{1}$$

对齿形

$$y = -381.829 + 659.267x_1 + 190.846x_2 - 273.947x_1^2 - 22.606x_2^2 + 173.404x_1x_2 \tag{2}$$

斜齿形

$$y = 52.216 + 12.945x_1 - 125.596x_2 - 1.14x_1^2 + 79.144x_2^2 - 15.006x_1x_2 \tag{3}$$

采集一组样本数据对模型进行检验,以判断其精度和稳定性。验证方法是采集工艺设置点,代入模型求得收缩率差值,然后与 Moldflow 软件模拟结果中采集到的收缩率差值相比较,以确定模型的优劣。图 1 可以看出模拟值与回归值非常接近,回归模型能很好地描述壁厚与收缩率差值之间的关系。

压压力对圆弧形流道灌水器的收缩率差值影响最大;对齿形流道的影响因素排序为  $A > D > C > B > E$ ,斜齿形流道的影响因素排序为  $A > D > E > B > C$ ,对齿形和斜齿形注塑时间的极差最大,说明注塑时间对其收缩率差值影响最大。分析影响 3 种灌水器收缩率差值最大因素不同的原因,是因为圆弧形流道灌水器的长度尺寸较小,注塑在很短时间内可以充满,所以后期的保压压力成为影响其收缩的主要因素。而对齿形和斜齿形流道灌水器长度尺寸较

大,需要的注塑时间较大。因此保压压力是影响圆弧形灌水器尺寸精度的主要因素,注塑时间是影响对齿形和斜齿形灌水器尺寸精度的主要因素。实际生产中应分别加以控制。

表 1 3 种灌水器的极差

| 流道<br>结构 | 因素    |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 注塑时间  | 模具温度  | 熔体温度  | 保压压力  | 保压时间  |
|          | A     | B     | C     | D     | E     |
| 圆弧形      | 0.325 | 0.225 | 0.575 | 1.400 | 0.600 |
| 对齿形      | 3.150 | 0.875 | 0.925 | 1.125 | 0.150 |
| 斜齿形      | 3.275 | 0.425 | 0.375 | 1.500 | 0.875 |

1.2.2 方差分析

通过方差分析得到各个参数的 Sig. ,可进行显

著性检验,圆弧形流道灌水器保压压力的 Sig. 为 0.02 属于一般显著,对齿形流道灌水器注塑时间的 Sig. 为 0.002 属于一般显著,斜齿形流道灌水器注塑时间的 Sig. 为 0.001 属于显著,其他因素属于非显著因素。

通过极差分析与方差分析结果,在实际的生产时,圆弧形流道灌水器应加强保压压力的控制,对齿形和斜齿形流道灌水器应加强注塑时间的控制。

1.3 灌水器优化结果分析

通过以上的结构优化和最佳注塑工艺参数进行注塑过程的模拟仿真,得到了比较理想的收缩率。图 2 为 3 种灌水器优化前(左图)和优化后(右图)收缩率对比图,可以看出优化后的收缩率比较均匀,流道和流道边缘的收缩率差值在 1% 左右。

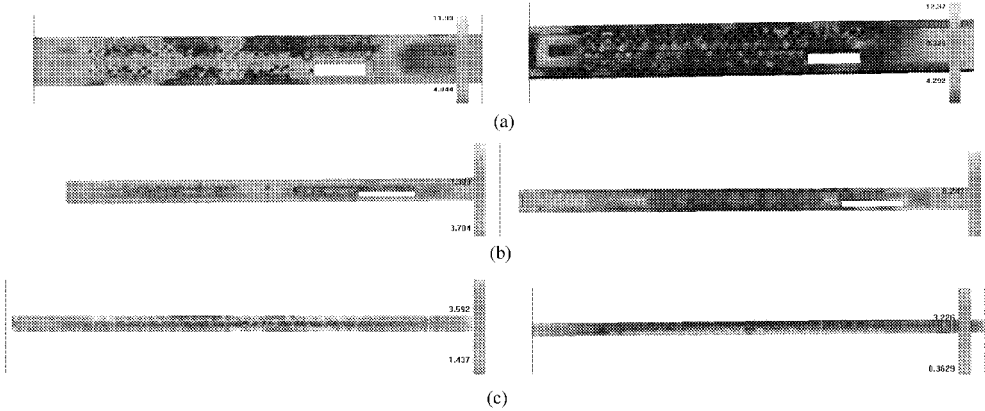


图 2 3 种灌水器滴片优化前后收缩率对比  
Fig. 2 Shrinkage ratios of the original and optimal emitters of three types  
(a) 圆弧形 (b) 对齿形 (c) 斜齿形

2 灌水器滴片精密流道 NC/RP 制作

2.1 圆弧网格滴片流道 RP 制作

对于圆弧网格灌水器流道,由于流道尺寸较大且规整,经过测量 RP 滴片,其误差均在 5% 以内,快速成型能够满足其精度要求。圆弧流道的主要尺

寸精度有圆弧间距离,流道宽度,测量结果如图 3 所示,圆弧间的水平距离设计为 1 mm,圆弧间的竖直距离设计为 1 mm,圆弧间的对角距离设计为 0.71 mm,流道宽度设计为 2 mm。测量结果与实际设计尺寸进行对比,测量误差应在 5% 以内,测量结果如表 2 所示。

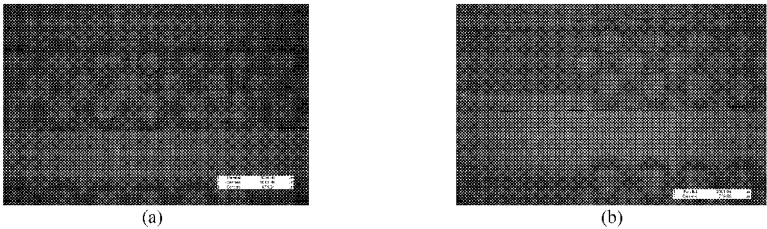


图 3 圆弧流道精度测量  
Fig. 3 Dimension measurements of arc-channel emitter  
(a) 水平距离与竖直距离 (b) 对角距离和流道宽度

2.2 斜齿和对齿灌水器原型的 NC/RP 设计制作

斜齿形和对齿形灌水器流道尺寸比较小且形状变化较大,用快速成型制作流道的部分尺寸不能满

足误差小于 5% 的要求。灌水器流道的粗糙度对灌水器的性能有重要的影响,滴灌中使用灌水器滴片经过注塑模具生产,其表面粗糙度较小。为了减小

试验与实际误差,本文采用与生产注塑模具相同的工艺数控线切割加工出流道,与利用快速成型 RP 可以加工形状复杂制件的滴片的基体进行组装,把线切割与 RP 基体组合成滴片作为制造快速模具的精密原型,如图 4 所示。

3 基于快速模具 RT 的产品试制

硅橡胶模具制造工艺是一种快速模具制造方法,在新产品试制或单件小批量生产时,它可以降低

成本,大大缩短产品周期<sup>[8]</sup>,具有良好的仿真性、强度和极低的收缩率<sup>[9]</sup>。

3.1 快速模具 CAE 分析

将仿真软件 Moldflow 应用于快速模具设计制造中,改变了以往靠经验设计的弊端,从而提高产品成功率和精度。对真空注塑工艺过程中最佳浇口以及成型过程中可能存在的问题进行分析,可对后续真空注塑工艺进行理论指导,找出可能在注型中出现的缺陷而加以避免。

表 2 圆弧流道测量结果  
Tab.2 Measurement results of channel structural dimensions mm

| 参数      | 次数    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 圆弧间水平距离 | 1.013 | 0.974 | 1.001 | 0.982 | 0.978 | 0.988 | 1.031 | 0.978 | 0.988 |
| 圆弧间竖直距离 | 0.974 | 0.988 | 0.992 | 1.033 | 1.021 | 1.011 | 0.991 | 0.973 | 0.973 |
| 流道宽度    | 2.001 | 2.099 | 2.085 | 2.075 | 2.013 | 1.998 | 1.985 | 1.964 | 1.933 |

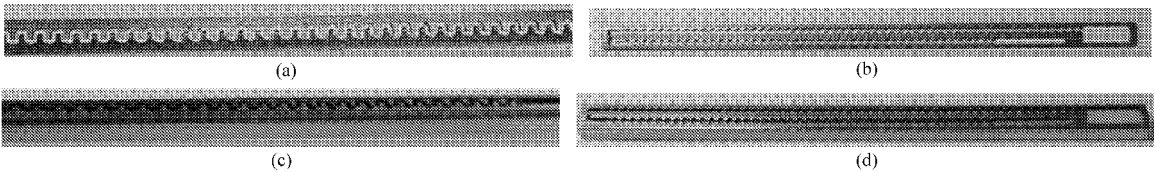


图 4 数控线切割与 RP 组合

Fig.4 Combination of CNC linear cutting with RP

(a) 斜齿流道 (b) 对齿流道 (c) 斜齿滴片组合体 (d) 对齿滴片组合体

(1) 模拟仿真参数的设定

真空注塑工艺中所采用的注型材料以及模具材料在 Moldflow 数据库中并不存在,需要根据实际模拟的需要建立相应的数据库。硅橡胶模具材料的设定主要是材料的性能参数,包括材料密度、比热、热传导率、弹性模量、泊松比、热膨胀系数。注型材料选用型号为 DPI400 型真空浇注树脂,因为其物理性质与灌水器实际使用的材料极为相似<sup>[10]</sup>,可以减小

材料的物理性质对试验结果的影响。

(2) 最佳浇口位置分析

经过模拟分析后,可以获得真空注塑过程的几个重要的分析结果,其中浇口位置是影响成型质量的关键因素。图 5 为滴片最佳浇口位置分析结果,图中的深色部位为最佳浇口位置,该位置在滴片的中心位置。浇口位置设置在滴片的背部中间位置。

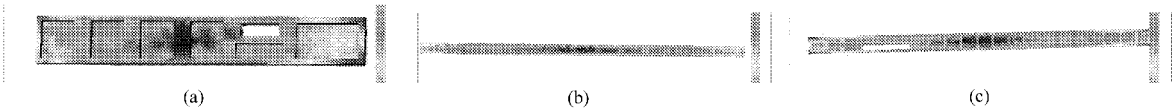


图 5 最佳浇口位置

Fig.5 Best position of pouring gate

(a) 圆弧形 (b) 斜齿形 (c) 对齿形

(3) 气穴分析

气穴的存在会使滴片产生空洞,图 6a 为 Moldflow 模拟分析得到的气穴位置,图 6b 为实际注塑过程中的气穴位置。气穴主要分布在注塑件侧壁边缘。在模具设计时,要特别注意这些部位的排气问题,在这些位置开设容气槽,在注型完毕后去除该槽,可获得较理想的制件。

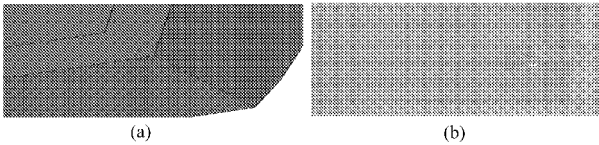


图 6 气穴位置

Fig.6 Cavitation position

(a) 模拟 (b) 实际

3.2 快速模具制造

通过斜齿和对齿组合体精密原型制作出的硅橡胶模具

胶模具如图 7 所示,由于圆弧形的 RP 尺寸精度满足要求,所以直接用 RP 件制作硅橡胶模具。

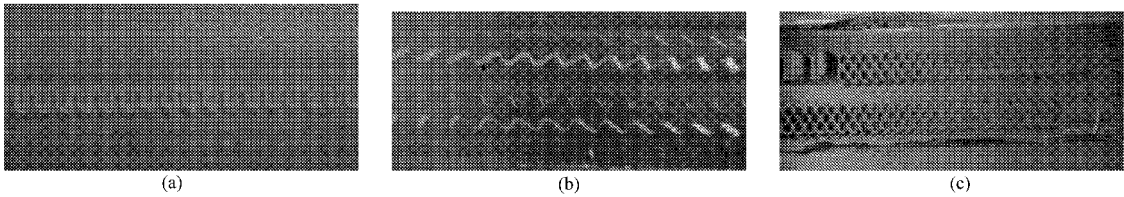


图 7 硅橡胶模具图

Fig. 7 Silastic die

(a) 斜齿形 (b) 对齿形 (c) 圆弧形

3.3 RT 小批量生产灌水器滴片

分别用上述制造出的 3 种快速模具进行翻模,得到 3 种流道结构形式的灌水器滴片。

(1) 尺寸精度检测

斜齿形流道主要参数有圆弧直径和流道宽度,流道宽度设计为 0.4 mm,圆弧直径为 0.17 mm,如

图 8 所示。对齿形流道主要尺寸有圆弧半径、流道宽度,圆弧半径设计为 0.3 mm,流道宽度为 0.5 mm,如图 9 所示。通过光镜分别测量其成型主要尺寸精度误差均在 5% 之内,表明成型质量良好。斜齿流道与对齿流道的测量结果分别如表 3 和表 4 所示。

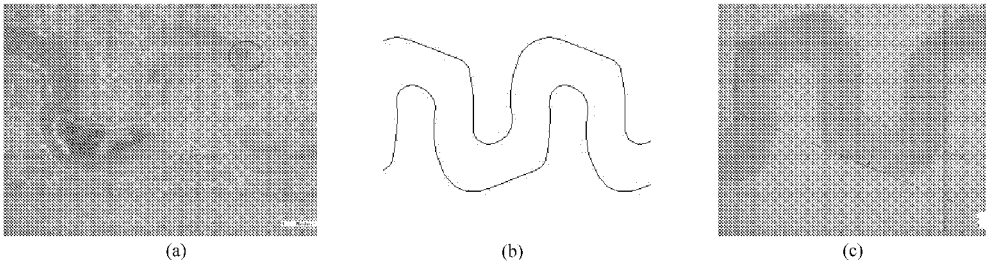


图 8 斜齿滴片 RP 件与 RT 件测量精度比较

Fig. 8 Measurement accuracy comparison of oblique tooth-channel emitters obtained by RP and RT

(a) RP 件 (b) 设计图 (c) RT 件

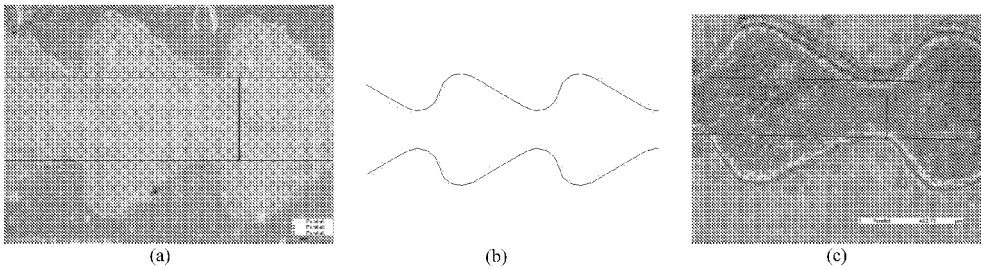


图 9 对齿滴片 RP 件与 RT 件测量精度比较

Fig. 9 Measurement accuracy comparison of mirror symmetry tooth-channel emitter obtained by RP and RT

(a) RP 件 (b) 设计图 (c) RT 件

表 3 斜齿流道测量结果

| Tab. 3 Measurement results of oblique tooth-channel emitter |       |       |       |       |       |       |       |       | mm    |
|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 参数                                                          | 次数    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                                                             | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 流道宽度                                                        | 0.409 | 0.412 | 0.412 | 0.410 | 0.402 | 0.396 | 0.396 | 0.411 | 0.404 |
| 圆弧直径                                                        | 0.178 | 0.178 | 0.161 | 0.162 | 0.172 | 0.171 | 0.169 | 0.179 | 0.168 |

表 4 对齿流道测量结果

| Tab. 4 Measurement results of mirror symmetry tooth-channel emitter |       |       |       |       |       |       |       |       | mm    |
|---------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 参数                                                                  | 次数    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                                                                     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 流道宽度                                                                | 0.482 | 0.512 | 0.521 | 0.510 | 0.511 | 0.186 | 0.487 | 0.492 | 0.496 |
| 圆弧直径                                                                | 0.304 | 0.310 | 0.311 | 0.307 | 0.311 | 0.299 | 0.296 | 0.289 | 0.296 |

(2)粗糙度检测

通过 VHX - 600E 型数码显微镜,分别对 LDPE 滴片、聚氨酯滴片和 RP 滴片粗糙度进行测量,测量结果如图 10 所示。LDPE 灌水器表面粗糙度  $R_y$  为  $29.5\text{ }\mu\text{m}$ ,聚氨酯灌水器表面粗糙度  $R_y$  为  $37.1\text{ }\mu\text{m}$ ,快速成型 RP 生产灌水器表面粗糙度  $R_y$  为  $102.2\text{ }\mu\text{m}$ 。聚氨酯灌水器与 LDPE 灌水器粗糙度相差  $7.6\text{ }\mu\text{m}$ ,RP 加工的灌水器与 LDPE 灌水器表面粗糙度差值为  $78.7\text{ }\mu\text{m}$ 。RT 加工工艺与实际相差较小,可减小灌水器粗糙度对试验结果的影响。

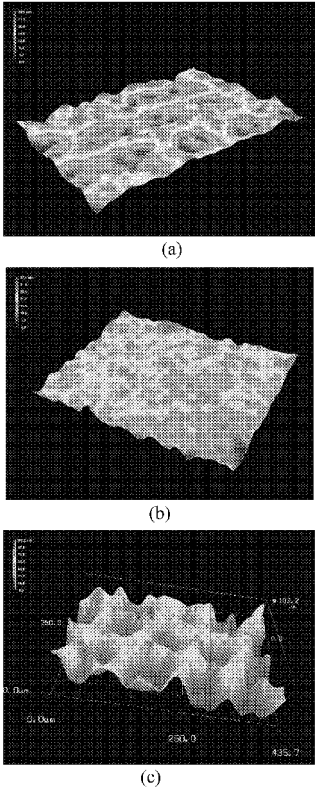


图 10 表面粗糙度测量

Fig. 10 Surface roughness measurement

(a) LDPE 滴片 (b) 聚氨酯滴片 (c) RP 滴片

4 贴近实际的水力性能和抗堵性能试验

为了减少灌水器滴片材料对试验的影响,本试验所用的滴片材料聚氨酯型号为 DPI400,与农业中实际使用的灌水器滴片低密度聚乙烯的物理性能极为相似。管道的密封材料选用聚乙烯胶带,与实际密封材料一致。

4.1 试验方案设计

对 3 种流道灌水器滴片进行贴近实际的水力性能试验,将滴片安装在管道的凹槽内如图 11 所示。用聚乙烯胶带进行密封,采用墨水进行灌水器的水力性能和抗堵性能试验,通过对流道的观测可以看到其密封性良好,如图 12 所示。

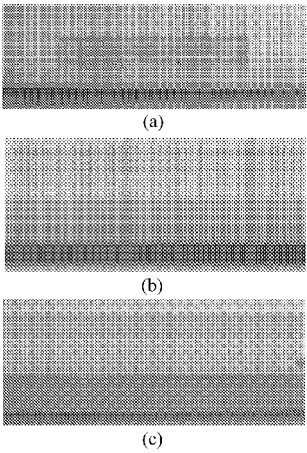


图 11 滴片装配图

Fig. 11 Assembled sheet-emitter  
(a) 圆弧形 (b) 斜齿形 (c) 对齿形

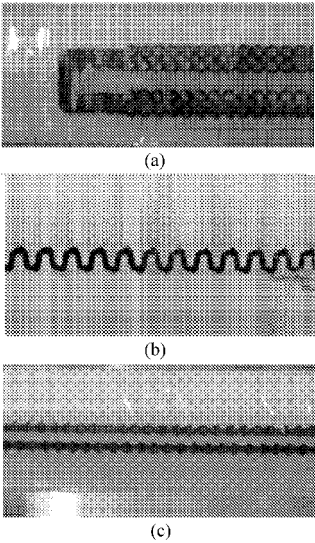


图 12 密闭性检验

Fig. 12 Leakproofness experiments  
(a) 圆弧形 (b) 斜齿形 (c) 对齿形

4.2 灌水器的水力性能和抗堵性能试验

灌水器水力性能试验结果如图 13 所示。对齿形流道的流态指数为 0.473 2、斜齿形流道的流态指数为 0.576 2、圆弧形流道的流态指数为 0.447 9,说明对齿形流道对压力的变化最不敏感,具有较为优秀的水力性能。通过抗堵性能试验可知经过 8 个阶段抗堵性能试验后,3 种灌水器的流量均为额定流量的 80% 以上,如图 14 所示,仍具有较好的抗堵性能。

5 结束语

通过注塑过程的模拟仿真对灌水器结构进行了优化设计,通过分析得到 3 种流道的收缩率与壁厚的回归公式。并通过注塑工艺参数的正交试验得到最佳浇注工艺参数和对结果影响较大的浇注工艺因

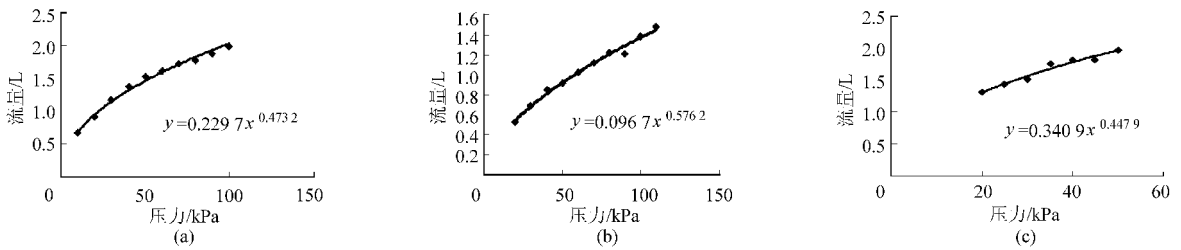


图13 水力性能试验结果

Fig. 13 Hydraulic performance experiments

(a) 对齿形 (b) 斜齿形 (c) 圆弧形

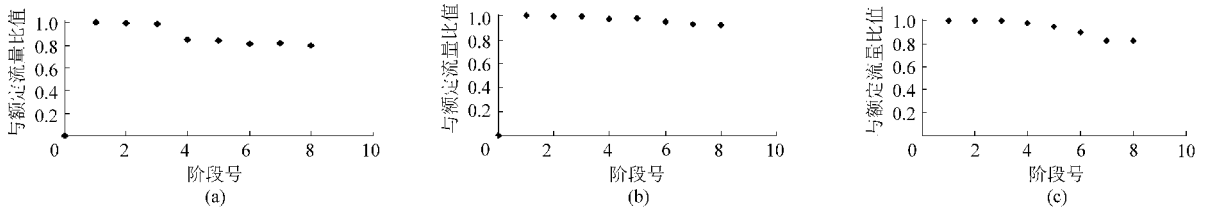


图14 抗堵性能试验结果

Fig. 14 Anti-clogging experiments

(a) 对齿形 (b) 斜齿形 (c) 圆弧形

素,为实际生产提供了理论依据,保证了灌水器的生产精度。对硅橡胶模具进行了填充流动分析,为制作硅橡胶模具提供了依据。把快速成型、数控线切

割、快速模具应用到灌水器的小批量生产中,制造出精度较高的灌水器,进行了贴近实际的水力性能试验,所设计的3种灌水器水力性能和抗堵性能良好。

### 参 考 文 献

- 魏正英,唐一平,赵万华,等. 迷宫型灌水器水沙两相流场分析及结构改进[J]. 机械工程学报,2009,45(8):89~94.  
Wei Zhengying, Tang Yiping, Zhao Wanhua, et al. Visualized experimental analysis of water-sand flow behaviors for labyrinth emitters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8) 89~94. (in Chinese)
- 王春香. 基于实例的注塑模具 CAD/CAE 关键技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2008.  
Wang Chunxiang. An applied research for injection mold CAD/CAE based on an actual example [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 魏正英,唐一平,李涤尘,等. 农业节水灌溉微滴头的快速开发[J]. 农业机械学报,2001,32(6):45~48.  
Wei Zhengying, Tang Yiping, Li Dichen, et al. Rapid developing technique for mini-emitters of water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 45~48. (in Chinese)
- 魏正英,温聚英,唐一平,等. 微压滴灌灌水器设计及快速开发平台技术[J]. 农业机械学报,2008,39(10):59~64.  
Wei Zhengying, Wen Juying, Tang Yiping, et al. Structural design and rapid development platform of emitters under lower water pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):59~64. (in Chinese)
- SL/T 67.1—1994 微灌灌水器——滴头[S].
- 刘洁,芦刚,魏青松,等. 微细结构灌水器水力试验样件的制造误差研究[C]//第七次全国微灌大会,北京,2007.
- 杨凤霞,片春媛. 结晶型塑料注射制品收缩率影响因素分析[J]. 模具工业,2005(11):31~34.  
Yang Fengxia, Pian Chunyuan. Analysis of influencing factors on the shrinkage ratio of crystalline plastics injection molding products [J]. Die & Mould Industry, 2005(11):31~34. (in Chinese)
- 崔怡,赵娟,张月娥. 硅橡胶模具快速制作工艺[J]. 模具工业,2009(5):68~72.  
Cui Yi, Zhao Juan, Zhang Yuee. Rapid tooling technology for silicone rubber[J]. Die & Mould Industry, 2009(5):68~72. (in Chinese)
- 孙文磊,蔡咏梅,黄艳华. 硅橡胶模具快速制造及质量因素分析[C]//第四届全国快速成形与快速制造学术会议,广州,2006.
- 欧智华. 硅胶快速模具真空注塑过程 CAE 分析[D]. 天津:天津大学,2008.  
Ou Zhihua. CAE analysis of the processing of vacuum casting for rapid tooling [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)