

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.021

果树嫁接辅助生长装置中定位套的注塑工艺优化及模具设计

魏娟¹, 王云龙¹, 马廷军², 王新岭¹, 王珊珊²

(1. 西安科技大学机械工程学院, 西安 710000; 2. 佳县林木种苗工作站, 陕西榆林 719200)

摘要: 设计了由定位套、挂钩、双头螺母组成的果树嫁接辅助生长装置, 选择生物可降解材料作为该装置的材料, 在嫁接幼苗成活后, 辅助装置自动降解, 避免了对环境造成污染。以定位套为例, 通过模流分析进行了注塑工艺仿真分析与优化, 然后设计了相应的注塑模具。利用 Moldflow 软件进行成型窗口分析、填充分析、冷却分析和优化、保压分析和优化及翘曲分析, 获得定位套的最佳注射时间为 2.469 s, 型腔填充时间为 0.813 7 s, 填充时最大锁模力为 11.73 t, 优化后的冷却参数为冷却介质温度 18 ℃、冷却时间 30 s、冷却水路直径 10 mm, 总体优化后定位套的最大翘曲变形量由优化前的 2.636 0 mm 降至 0.833 2 mm, 满足设计要求(不大于 1 mm)。模具设计中, 针对定位套环形槽处仅上下端与塑件主体连接的 4 个小圆柱(直径 8 mm、高度 20 mm)的脱模难题, 设计了一种具有二次抽芯结构的斜导柱驱动滑块侧抽芯系统。开模时, 斜导柱先驱动一次滑块移动 15 mm, 由此带动滑块镶件同步内缩, 完成小圆柱中间柱体部位的初步脱离; 随后通过限位块触发二次滑块继续运动, 实现小圆柱的完全脱模, 彻底解除小圆柱与模具的径向及轴向约束, 避免传统抽芯导致的塑件拉伤、断裂或变形问题, 有效解决复杂结构脱模难题。利用 UG 软件设计了定位套注塑模具的浇注、冷却、顶出、排气等辅助系统。其中, 浇注系统采用“点浇口+针阀式热流道”组合实现均匀填充并防止熔体倒流, 排气系统通过分型面间隙与定模排气槽组合排出型腔空气。以上系统化模具设计方法提高了定位套模具设计的成功率。

关键词: 果树嫁接; 注塑工艺优化; 模流分析; 注塑模具; 生物可降解材料

中图分类号: TQ330.4+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0167-11

Injection molding process optimization and mould design of positioning sleeve in auxiliary growth device for fruit tree grafting

WEI Juan¹, WANG Yunlong¹, MA Tingjun², WANG Xinling¹, WANG Shanshan²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China;

2. Jiaxian Forest Seedling Workstation, Yulin 719200, China)

Abstract : An auxiliary growth device for fruit tree grafting, consisting of positioning sleeve, hooks, and double-ended nuts, was designed and the biodegradable materials were selected for the device which automatically degraded after successful grafting without causing environmental pollution. Using the positioning sleeve as an example, simulation analysis and optimization of the injection molding process were conducted through mold flow analysis, followed by the design of the corresponding injection mould. Through forming window analysis, filling analysis, cooling analysis and optimization, holding analysis and optimization, and warpage analysis with using Moldflow software, the optimal injection time of the positioning sleeve was obtained as 2.469 s, the mould cavity filling time was 0.813 7 s, and the maximum clamping force during filling was 11.73 t. The optimized cooling parameters included cooling medium temperature of 18 ℃, cooling time of 30 s, cooling water channel diameter of 10 mm. After overall optimization, the maximum total warpage deformation of the positioning sleeve decreased from 2.636 0 mm before optimization to

基金项目: 陕西省科技计划(2024NC-YBXM-208)

通信作者: 魏娟, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能装备设计及应用、机器人技术及应用等

收稿日期: 2025-09-11

引用格式: 魏娟, 王云龙, 马廷军, 等. 果树嫁接辅助生长装置中定位套的注塑工艺优化及模具设计[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 167-177.

WEI Juan, WANG Yunlong, MA Tingjun, et al. Injection molding process optimization and mould design of positioning sleeve in auxiliary growth device for fruit tree grafting[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 167-177.

0.833 2 mm, meeting the design requirements of no more than 1 mm. In the mould design, to address the demolding challenge of 4 small cylinders ($\varnothing 8\text{ mm}\times 20\text{ mm}$) located in the annular groove of the positioning sleeve, which were connected to the main plastic part only at their top and bottom ends, the angle pin driven slider side core-pulling system with secondary core-pulling structure was designed. During mould opening, the angle pin first drove the primary slider to move 15 mm, which driving the slider insert to synchronously shrink inward, achieving preliminary disengagement of the middle part of the small cylinders. Subsequently, a stop block activated the secondary slider to continue moving, realizing the complete demolding of the small cylinders. This process completely eliminated radial and axial constraints between the small cylinders and the mould, avoiding issues such as part pulling, fracture, or deformation caused by conventional core-pulling methods, effectively addressing demolding challenges for complex structures. Accordingly, using UG software, the auxiliary systems including gating, cooling, ejection, and venting were designed for the positioning sleeve injection mould. In the gating system, an integrated "pin-point gate with valve-gated hot runner" gating configuration was employed to achieve uniform melt filling while prevent melt backflow. The combination of parting-line clearances with fixed mould vent grooves was used in the venting system for effective cavity air evacuating. The above systematic mould design approach significantly enhances the success rate of the positioning sleeve mould development.

Keywords : fruit tree grafting ; injection molding process optimization ; mold flow analysis ; injection mould ; biodegradable materials

在果树嫁接工艺中,辅助生长装置对提升幼苗成活率、优化果实品质具有关键作用。作为该装置的核心部件,定位套承担着固定幼枝、传导拉力的重要功能,其成型质量直接影响嫁接效果。然而,传统定位套存在结构复杂导致脱模困难、材料不可降解引发环境负担等问题,因此开展定位套的注塑工艺优化与模具设计研究,对推动果树嫁接技术绿色化、智能化发展具有重要意义。

在注塑成型工艺优化与模具设计领域,国内外学者针对工艺参数调控、模具结构创新及材料应用等方向开展了大量研究。部分学者通过模流分析多学科交叉方法提升优化效率:包括浇口位置与冷却系统的协同优化^[1-4]以及通过优化工艺参数有效降低翘曲变形并减少熔接痕^[5-8]。植才华^[9]、吕镓均等^[10]采用热流道、侧浇口等实现了高效成型;张云等^[11]、林权等^[12]、朱军等^[13]、赵利平等^[14]采取哈夫滑块侧抽芯和液压驱动内螺纹抽芯、“一内三外”侧抽芯、多组动定模抽芯及侧向复合二次抽芯等结构,实现注塑模具的高效脱模;吴桂勇^[15]、朱姚等^[16]通过数字化设计、数字孪生技术构建注塑模具监控系统,提高了模具精度。

尽管现有研究在工艺优化与模具设计方面取得显著进展,但针对采用生物可降解材料的定位套成型工艺仍缺乏系统性研究,传统模具设计中冷却效率不足、保压控制粗放等问题尚未完全解决。笔者依靠 Moldflow 模流分析与 UG 数字化设计平台,通过多物理场耦合仿真(成型窗口分析-填充-冷却-

保压-翘曲全流程优化)与绿色材料应用(生物可降解材料选型),构建定位套“工艺仿真-模具设计-性能验证”一体化开发体系,为果树嫁接辅助装置的产业化提供借鉴。

笔者首先选择生物可降解材料作为定位套材料,然后基于 Moldflow 软件对定位套的注塑过程进行了模流分析,获取最佳注塑工艺参数,最后利用 UG 软件对模具辅助系统进行设计,提高了定位套模具设计的成功率。

1 辅助生长装置的结构功能分析及材料选择

采用的辅助生长装置用于果树嫁接后幼苗生长的后续管理,主要是针对幼苗的生长状态进行调整,使幼苗保持一定的方向生长,其次避免幼枝因遭受暴风等自然灾害的破坏而弯折,起到一定的保护作用^[17]。

1.1 装置结构分析

本装置由4部分组成,分别是大挂钩1、双头螺母2、小挂钩3和定位套4,如图1所示。中间部分的定位套4为主要的固定装置,定位套4放置于砧木主杆上,其内部的锥型结构适合不同直径的砧木,主要用于嫁接幼枝位置距离主杆顶端有一段距离的情况。定位套4的外部有环形槽,布置3~5个圆柱,主要承受来自小挂钩3的拉力。

定位套与幼苗之间通过双头螺母和大、小挂钩连接,其中与幼枝配合的为双头螺母一端,双头螺母一端与双头螺母配合,双头螺母两端的螺纹分别为左旋和右旋,小挂钩与定位套上的圆柱配合。使用时通过顺时针或逆时针旋转挂钩中间部分的双头

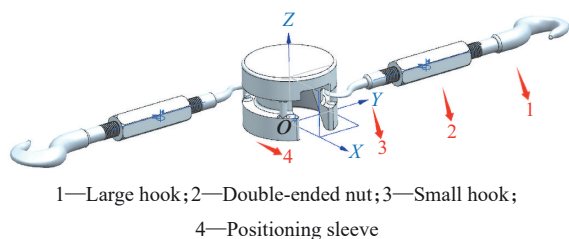


图1 辅助生长装置组成及定位套结构

Fig. 1 Composition of auxiliary growth device and structure of positioning sleeve

螺母来调整幼枝与砧木之间的距离,使幼苗能固定地朝着某方向生长。

定位套结构描述如下:在一个圆柱体(直径 100 mm、高度 70 mm)内,挖去一个圆台(上底直径 34 mm,下底直径 80 mm),在环形槽处去掉一个圆环柱(内圆直径 70 mm,外圆直径 100 mm,高度 20 mm),然后在圆柱体内部一侧去掉一个等腰立体梯形体(梯形上底边长 32 mm,下底边长 40 mm,高度 55 mm);在环形槽处添加 4 个小圆柱(直径 8 mm,高度 20 mm),小圆柱位置到圆柱体 XOZ 面与到圆柱体 YOZ 面的距离均为 32.5 mm,且与外圆柱相切,圆柱体环形槽内侧上部与下部分别设直径 5 mm 与 3 mm 的边倒圆,在圆柱体有开口的一侧上部两侧设直径为 3 mm 的边倒圆,开口下部外侧两边设直径为 3 mm 的边倒圆,圆柱体下表面内侧设直径为 5 mm 的边倒圆,上表面设直径为 3 mm 的边倒圆,环形槽的小圆柱上下各设直径为 2.5 mm 的边倒圆。

1.2 材料选择

果树嫁接幼枝的固定需要对定位套有一定的拉力,且拉力随着幼枝的生长会不断变化,必要时还需调整双向螺母,使拉杆长度适应不断生长的幼枝的变化。因此装置应该具有一定的强度和韧性。为保护环境,装置采用可降解材料,在幼枝逐渐长大,与主干的结合强度足够时,装置失去作用,逐渐降解。

聚乳酸(PLA)和聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)均属于可生物降解的塑料材料,它们能够与自然环境中的微生物和酶相互作用,转化为对环境无害的产物。通过将这两种材料按照不同的比例混合可制得 PLA/PBAT 合金材料,由于 PBAT 聚酯结构的易降解性,其降解速度比 PLA 快,决定着材料的可降解性能和降解周期。

综合考虑材料强度和降解周期,选择 PLA/PBAT 质量比为 75/25 的合金材料作为辅助生长装

置的材料,PLA/PBAT 合金材料的压力-体积-温度(PVT)曲线和黏度曲线如图 2 所示,其主要力学性能、注塑工艺参数见表 1 和表 2。

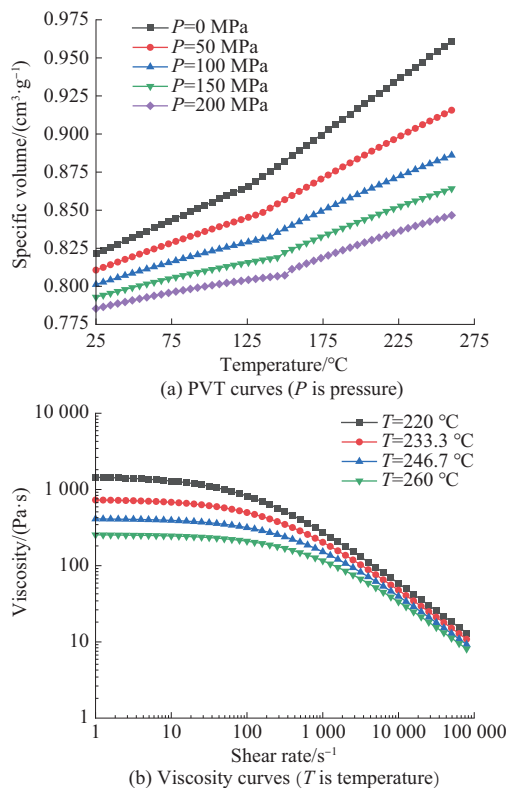


图2 PLA/PBAT 合金材料的PVT曲线与黏度曲线

Fig. 2 PVT curves and viscosity curves of PLA/PBAT alloy material

表1 PLA/PBAT 合金材料主要力学性能

Tab. 1 Main mechanical properties of PLA/PBAT alloy material

Mechanical properties	Values
Density/(g·cm ⁻³)	1.2
Tensile modulus/GPa	2.5
Poisson's ratio	0.45
Tensile strength/MPa	54
Elongation at break/%	5
Shear strength/MPa	0.5

表2 PLA/PBAT 合金材料主要注塑工艺参数

Tab. 2 Main injection molding parameters of PLA/PBAT alloy material

Parameters	Values
Mould temperature/°C	50
Injection pressure at thick wall thickness/MPa	70~80
Injection pressure at thin wall thickness/MPa	80~100
Injection speed/(mm·s ⁻¹)	20~100
Holding pressure/MPa	50~70
Holding time/s	5~12
Cooling time/s	10~25

2 定位套注塑过程的模拟分析与工艺优化

2.1 成型窗口分析

在 Moldflow 中进行成型窗口分析,如图 3 所

示,将模具温度设定为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,熔体温度为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,图3中的曲线先快速上升至峰值,随后逐渐下降,呈现单峰型曲线特征。在注射时间为 2.469 s 时,曲线达到最大值,表明该时间点为理论最佳注射时间。故确定的最佳注射时间为 2.469 s 。

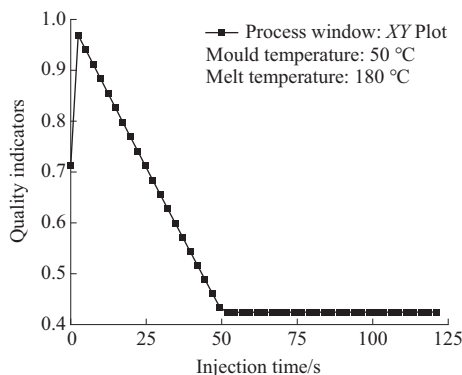


图3 成型窗口
Fig. 3 Forming window

2.2 填充分析

在填充分析中,通过模拟熔融材料在模腔中的流动行为,以优化注塑工艺参数。以定位套顶面中心为浇注口,注射时间设为 2.469 s 进行模拟,获得的填充分析仿真结果如图4所示。

由图4a可知,熔融材料在模具型腔内的填充过程耗时 0.813 s ,材料从浇注口向四周均匀流动,最终充满整个型腔,表明流动均衡,浇口设计合理;由图4b可知,速度/压力转换阶段的压力分布相对一致,无明显压力突变或局部高压/低压区域,说明在填充过程中压力控制稳定,有助于保证材料填充的均匀性和制品的质量;由图4c可知,注塑过程中最大锁模力为 11.73 t ,锁模力在填充开始后迅速上升,达到峰值后趋于稳定,该数值在注塑机的合理工作范围内,符合注塑机的锁模力标准,为注塑机选型提供了重要参考;由图4d可知,产品壁厚的剪切应力分布均匀,且均小于PLA/PBAT合金材料允许的最大剪切应力 0.5 MPa 的要求,表明材料在流动过程中不会因剪切应力过大而发生降解或性能劣化,保证了制品的力学性能。

2.3 冷却分析与优化

采用单因素法,设计3组实验,分别改变冷却水路直径、冷却周期和冷却介质温度,与原始对照组对比,探究冷却系统各因素对该系统冷却性能的影响。仿真实验设计方案见表3。

冷却分析仿真实验得到的结果如图5所示,整理相关结果数据见表4。

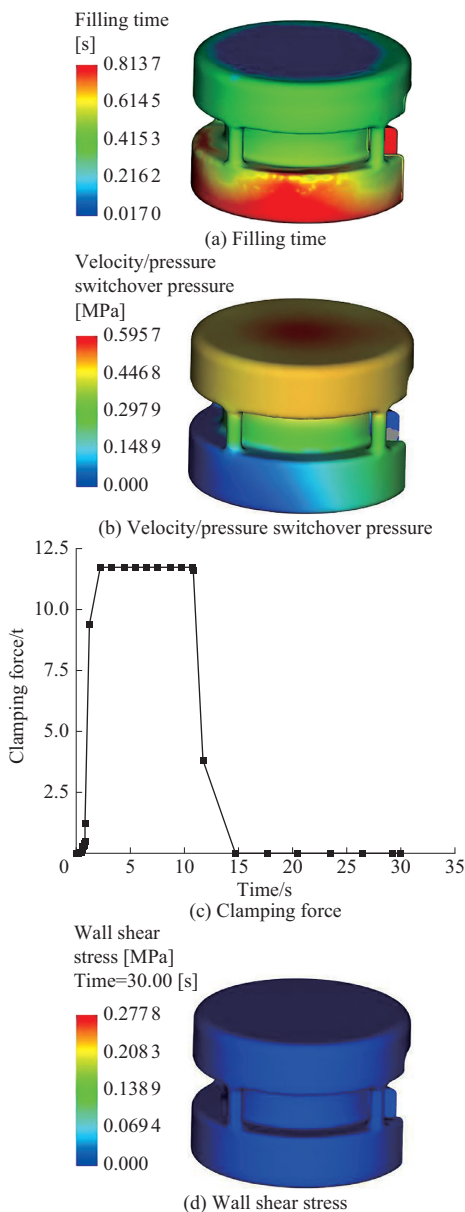


图4 填充分析结果

Fig. 4 Filling analysis results

表3 冷却分析仿真实验设计方案

Tab. 3 Experimental design plan of cooling analysis simulation

Experiment number	Cooling water channel diameter/mm	Cooling cycle time/s	Cooling medium temperature/ $^{\circ}\text{C}$
Control group	10	30	25
Experiment 1	12	30	25
Experiment 2	10	35	25
Experiment 3	10	30	20

根据表4可以看出,调整冷却介质的温度即实验3对模腔温度有显著影响,其中型腔表面的平均温度与对照组相比降低 $7.999\text{ }^{\circ}\text{C}$;调整冷却周期即实验2对模腔温度有一定的影响,型腔表面的平均温度与对照组相比降低 $1.539\text{ }^{\circ}\text{C}$;冷却水路直径的

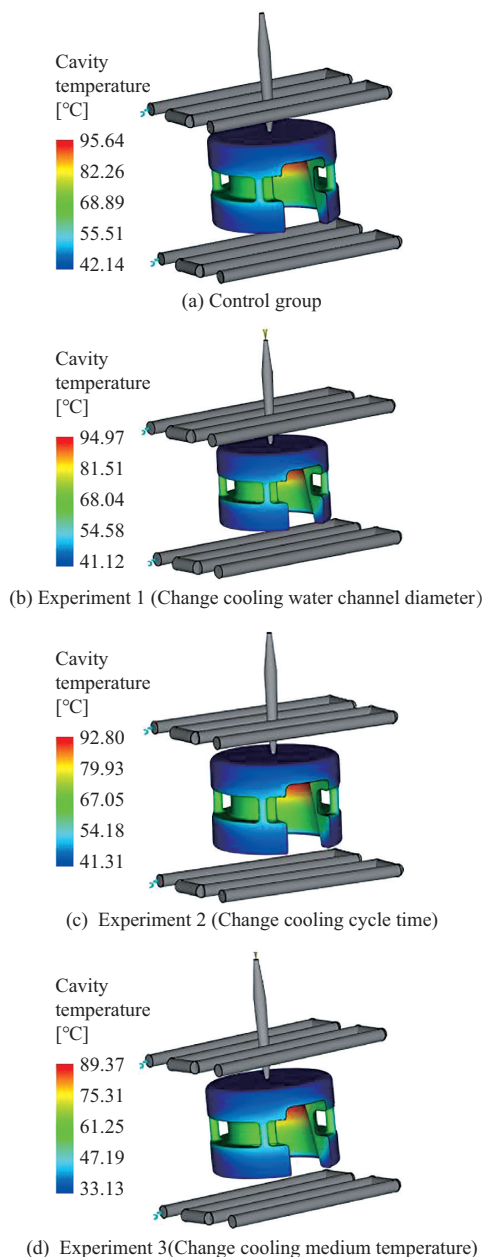


图5 冷却分析仿真实验结果

Fig. 5 Experimental results of cooling analysis simulation

表4 冷却分析仿真实验结果数据

Tab. 4 Data of experimental results of cooling analysis simulation

Experiment number	Maximum cavity surface temperature/°C	Minimum cavity surface temperature/°C	Average cavity surface temperature/°C
Control group	95.636 0	42.137 9	58.968 3
Experiment 1	94.966 9	41.119 9	57.893 6
Experiment 2	92.797 0	41.311 6	57.429 3
Experiment 3	89.366 1	33.131 7	50.969 1

变化对模腔表面温度的影响相对较小,模具型腔表面的平均温度仅降低了1.074 7 °C。实验结果表明,冷却介质温度对模腔温度影响最显著,冷却周期次

之,冷却水路直径影响较小。

根据上述实验结果,模具型腔表面平均温度在50 °C以上,而PLA/PBAT合金材料的推荐模具温度为50 °C,需要对冷却介质温度再进行调整,根据上述实验的结果,把冷却介质温度调至18 °C、冷却时间设置为30 s、冷却水路直径设置为10 mm,通过分析得出图6所示的模具型腔温度,可以看出,所得结果符合要求。

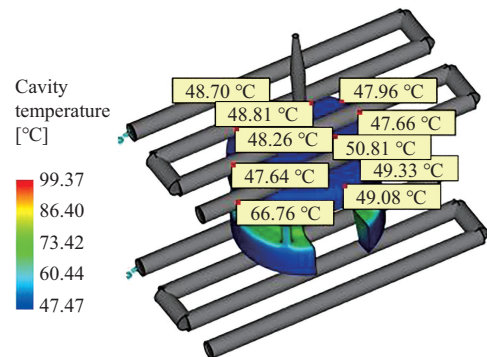


图6 冷却系统优化后的模具型腔温度

Fig. 6 Optimized mould cavity temperature after cooling system optimization

2.4 保压分析与优化

保压过程的分析与优化可以有效减少制品的体积收缩不均和内部残余应力。保压压力设置为填充压力的80%,保压时间等于浇口冻结时间减去注射时间,模具表面温度和熔体温度保持不变,设定注射时间为3 s,保压时间为50 s。保压分析结果如图7所示。

图7a显示制品顶出后的体积收缩率最大为16.55%;图7b显示浇口的冻结时间为29 s,由于注射时间为2.469 s,故实际保压时间为26.531 s,曲线基本呈线性增长,表明浇口处熔体冷却速率均匀;图7c显示保压压力设置为填充压力的80%,压力随熔体冷却收缩而衰减,导致浇口未凝固时熔体倒流,影响收缩率控制;图7d显示填充末端压力随流程长度增加总体呈递减趋势,表明流动阻力均匀,浇口设计合理。

优化保压曲线(先恒压,后衰减),恒压保压时间为压力最大值与最小值对应时间之和取平均值,最大压力10.32 MPa,对应时间2.22 s,最小压力0 MPa,对应时间14.71 s,恒压保压时间 $[(2.22+14.71)/2]-2.469=5.996$ s,剩余时间线性衰减,得到衰减至0 MPa的保压曲线,如图8所示。

保持其他工艺参数不变,进行优化后的保压仿

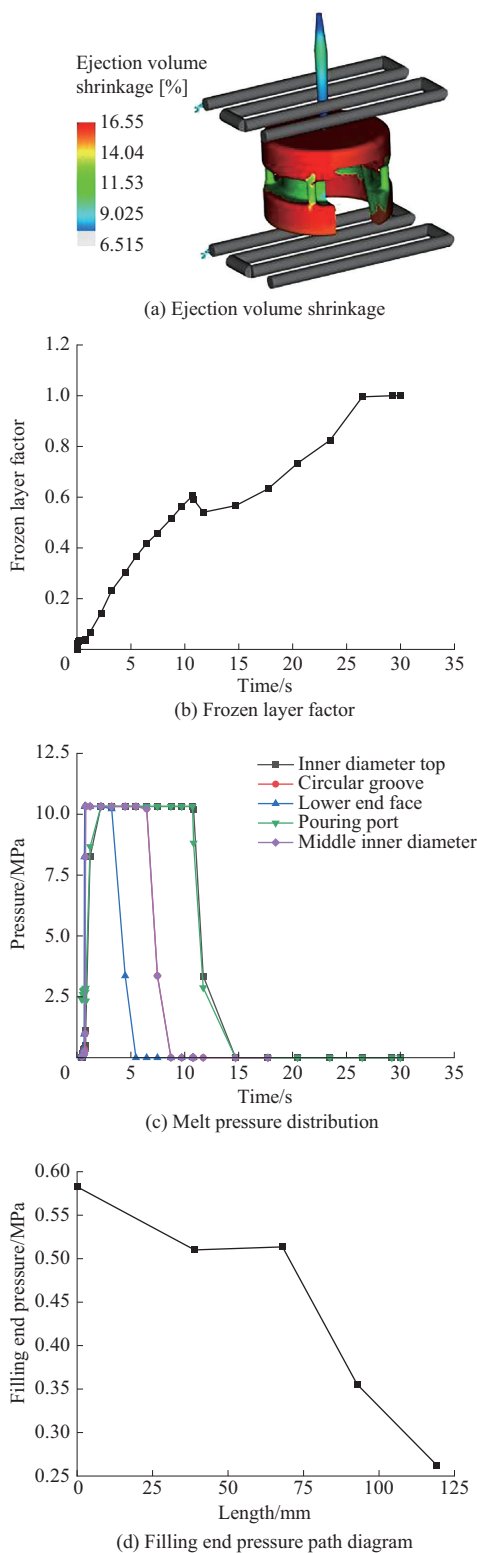


图7 保压分析结果

Fig. 7 Pressure holding analysis results

真分析,其分析结果如图9所示。由图9可知,优化后的最大体积收缩率降至16.31%,最大熔体压力为7.740 MPa,保压时间为20.535 s,填充压力分布改善,证明了保压曲线优化合理。

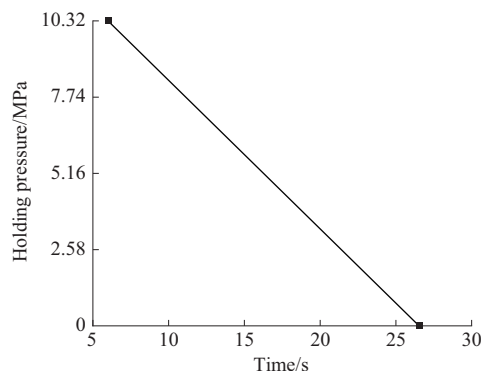


图8 衰减至0 MPa的保压曲线

Fig. 8 Holding pressure curve attenuated to 0 MPa

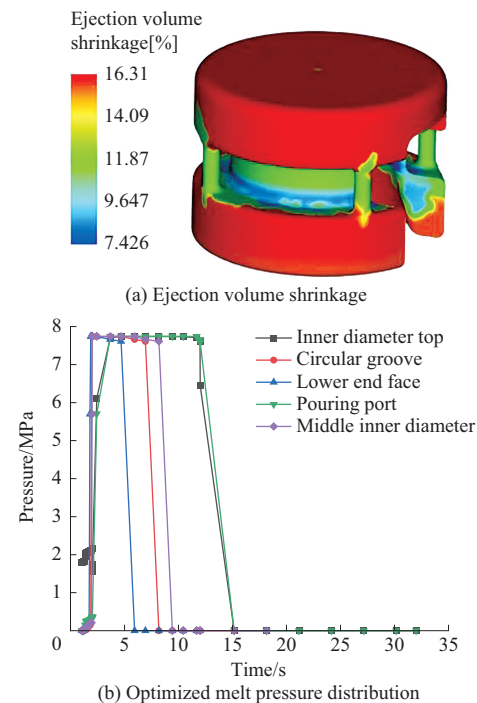


图9 优化后保压分析

Fig. 9 Optimized holding pressure analysis

2.5 翘曲分析

翘曲现象主要是注塑过程中冷却不均、收缩不均、取向差异等造成的。利用上述各节分析优化得到的工艺参数进行翘曲分析,翘曲分析结果如图10所示。通过对比优化前后的翘曲变形量,优化前翘曲变形量在0.055 3~2.636 0 mm范围内,优化后翘曲变形量在-0.999 4~0.833 2 mm范围内,优化后的翘曲变形量在1 mm之内,而产品要求的翘曲变形量不高于1 mm即可,故满足要求。

3 定位套注塑模具设计

利用Moldflow进行模流分析,优化得到了定位套的注塑工艺参数,然后在UG中进行定位套的注塑模具设计。

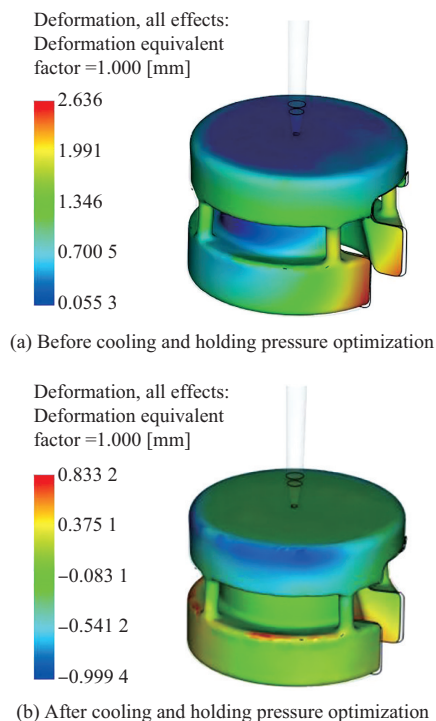


图10 翘曲分析结果

Fig. 10 Results of warping analysis

定位套模具设计难点为结构复杂(含环形槽、小圆柱等)导致脱模与填充困难,生物可降解材料(PLA/PBAT)对温度敏感易降解且冷却不均易翘曲。

采用的主要设计思路包括:采用一模一腔结构,通过UG设计浇注(点浇口单点进浇)、冷却(随形水路)、顶出、排气系统,利用Moldflow优化工艺参数(如注射时间2.469 s、冷却介质温度18℃),解决填充、冷却及脱模问题,确保制品精度与降解性能。

3.1 型腔数量、开模方向及分型面

定位套的尺寸规格为 $\phi 100\text{ mm} \times 70\text{ mm}$,归类为中型塑料制品。采用一模一腔的方式,定位套的开模方向为图1的Z轴方向。定位套的分型面选择下表面。

3.2 斜导柱驱动滑块抽芯系统

定位套的环形槽处布置有4个小圆柱(直径8 mm,高度20 mm),其位置对称分布于圆柱体XOZ与YOZ面对称轴线上,距两平面距离均为32.5 mm,且与外圆柱面相切。由于小圆柱仅上下两端与塑件主体相连,中间柱体部位即“柱位”悬空,无侧向支撑,传统顶出或简单抽芯易造成塑件拉伤、断裂或变形,故这4个小圆柱的脱模是该模具脱模的最大难点。

为解决小圆柱脱模难题,采用“斜导柱驱动+二次滑块侧抽芯”的复合脱模方案。其基本思路为:开模时,斜导柱首先驱动一次滑块完成小圆柱柱位

的初步脱离;一次滑块运动至一定距离后,通过限位机构触发二次滑块继续运动,完成小圆柱胶位的完全脱出,从而避免强制脱模造成的制品损伤。

据此思路,设计了一套专用于环形槽处小圆柱成型与脱模的斜导柱驱动滑块侧抽芯系统,如图11所示。

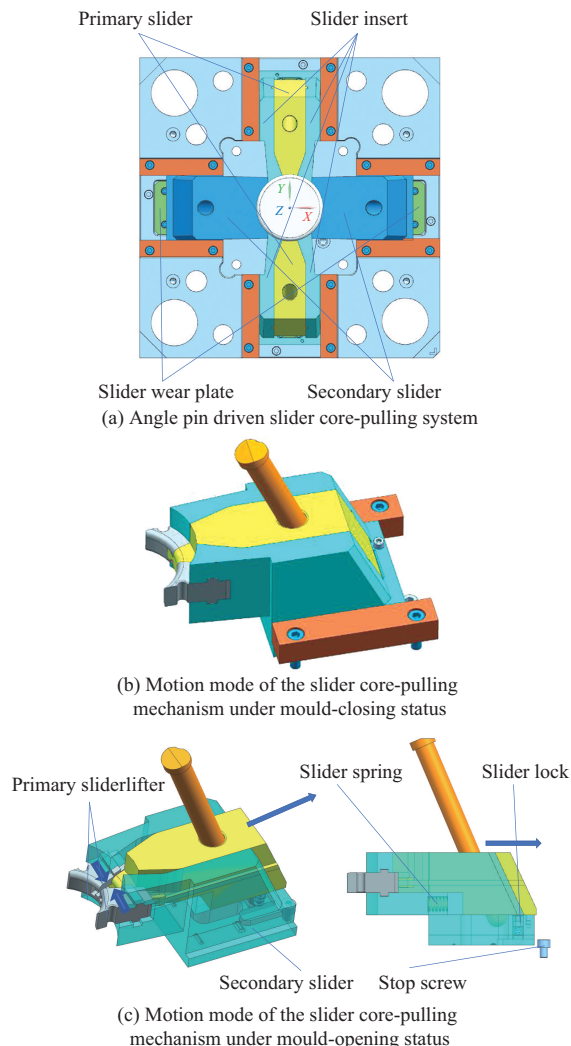


图11 斜导柱滑块侧抽芯系统在合模及开模状态下的运动过程

Fig. 11 Motion sequence of angle pin driven slider core-pulling mechanism during mould closing and opening

3.2.1 主要零件及作用

斜导柱:驱动滑块侧向运动;

一次滑块:带动滑块镶件完成初步抽芯;

二次滑块:在一次滑块运动到位后继续抽芯,完成小圆柱完全脱出;

滑块镶件:成型小圆柱的“柱位”部分;

滑块锁与滑块弹簧:用于滑块定位与复位;

滑块耐磨块:减少滑块运动摩擦,提高寿命;

滑块斜顶:滑块运动到位后,斜顶在模具顶出

系统的作用下,沿滑块内的导向槽作斜向运动,解决产品内部更深或不同方向的倒扣脱模问题。

3.2.2 合模时的系统工作原理

合模时,斜导柱完全插入一次滑块的斜孔内,通过斜向定位使一次滑块保持靠近型腔的位置;滑块锁将一次滑块与二次滑块锁定为整体,二者无相对运动;4件滑块镶件合围形成定位套环形槽处4个小圆柱的成型型腔,与定位套其他部位的模具结构共同组成完整注塑空间。

3.2.3 开模时的系统工作原理

(1)开模初期:注塑机驱动动模后退,定模与动模开始分离;固定在定模侧的斜导柱随定模运动,其斜向表面对一次滑块的斜孔产生侧向推力,带动一次滑块沿水平方向(垂直于开模方向)向远离型腔的方向移动;此时滑块锁解锁,一次滑块与二次滑块解除锁定,但二次滑块暂未运动。

(2)一次抽芯:一次滑块在斜导柱驱动下持续移动,当移动距离达到15 mm时,一次滑块与固定在定模侧的限位块接触;在此过程中,一次滑块带动底部连接的4件滑块镶件同步内缩,滑块镶件从环形槽内的小圆柱“柱位”脱离,即完成第一步脱离“柱位”,小圆柱与模具的径向约束被解除。

(3)二次抽芯:动模继续后退,限位机构通过与一次滑块的接触,带动二次滑块沿开模方向(Z轴方向)向后运动;二次滑块与一次滑块通过滑动结构配合,在二次滑块运动过程中,进一步带动滑块镶件沿侧抽芯方向移动,彻底抽离小圆柱与定位套主体连接的部位,即完成第二步小圆柱的完全脱模。此时,小圆柱与模具的所有约束完全解除,随定位套主体一同被顶出。

3.3 浇注系统

注塑模具的浇注系统涉及定位环、浇口套、面板、水口板、A板、定模仁、流道等。此浇注系统采用点浇口单点进胶。定位环与注塑机喷嘴对齐,浇口套入口倒圆角,主流道设 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 锥度;流道为梯形截面,浇口位于定位套顶面中心。设计过程基于模流分析结果,确定最佳注射时间2.469 s、填充时间0.813 7 s,通过优化浇口位置为顶面中心实现熔体均匀填充,采用针阀式热流道防止保压后熔体倒流,提升成型质量。图12是模具浇注系统。

3.4 冷却系统

图13展示了定模、动模的冷却系统透视图(图

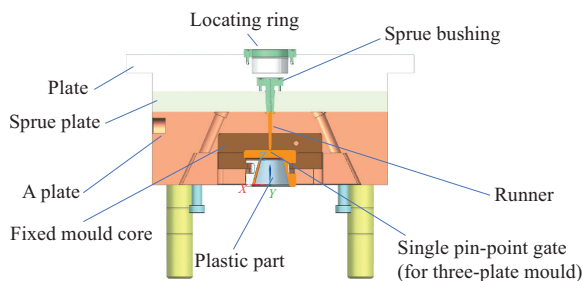


图12 模具浇注系统

Fig. 12 Mould gating System

中IN为入水口,OUT为出水口),定模、动模各布置1条冷却水路,能够确保整个塑件冷却均匀,采用橡胶密封圈用于水路进出口密封。根据前述冷却分析可知,选择合理的冷却水路直径、冷却周期及冷却介质温度,可以使模具型腔表面平均温度更接近PLA/PBAT材料所推荐的模具温度 50°C ,能够更好地控制塑件收缩率,满足冷却均匀性和效率要求,减少制品翘曲变形。本方案将冷却介质温度调至 18°C ,冷却水路直径选为10 mm,冷却时间定为30 s。

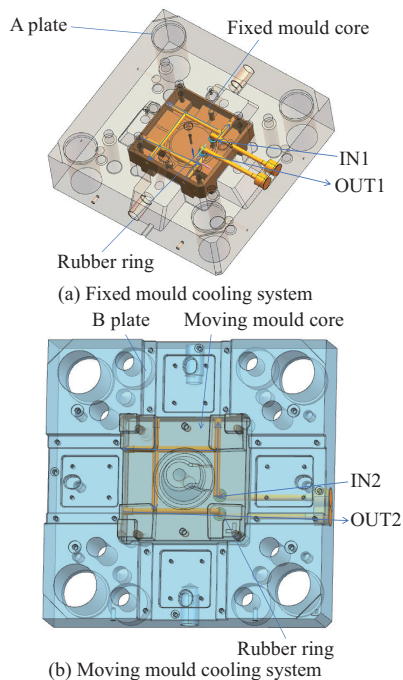


图13 冷却系统透视图

Fig. 13 Cooling system cutaway view

3.5 顶出系统

顶出机构用于确保塑料制品在完成注塑成型后,能够顺利地从模具中脱离。推杆布置于定位套底部及环形槽周边,避开冷却水路和型芯结构,通过推杆面板与推杆底板连接传动,复位杆实现推杆复位。设计过程中,根据定位套尺寸($\varnothing 100\text{ mm}\times 70\text{ mm}$)

和模具布局,确定推杆直径6 mm、数量1根,位于制品顶部内表面中央处,确保顶出力均衡;通过UG三维建模模拟顶出行程30 mm,避免与型芯、滑块干涉,同时在顶针底板与动模座板间设置推板导柱,提升顶出平稳性,确保定位套脱模时不变形、不粘模。

图14展示了顶出系统的剖面视图,主要包括动模仁、推杆、B板、复位杆、推板导柱、垫块、推杆面板、推杆底板、底板、推杆连接柱等。

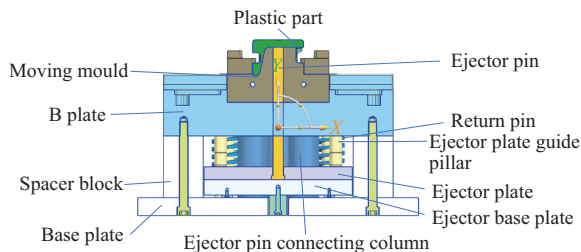


图14 顶出系统剖面视图

Fig. 14 Sectional view of ejection system

3.6 排气系统

注塑模具的排气功能旨在将熔融塑料前沿的空气从模具中排出,确保塑料能够高效且迅速地填充模腔。排气系统主要通过分型面自然排气与固定模板开设排气槽相结合的方式实现。分型面沿定位套下表面设置,利用模具合模间隙(0.02~0.05 mm)排出空气;在定模上开设矩形排气槽,外圈排气槽深0.5 mm、宽5 mm,边距排气槽深0.4 mm、宽4 mm,环绕产品一周开设了深度为0.02 mm的排气槽,分布于型腔周围及熔体流动末端(如环形槽、小圆柱附近),图15为定模排气系统。

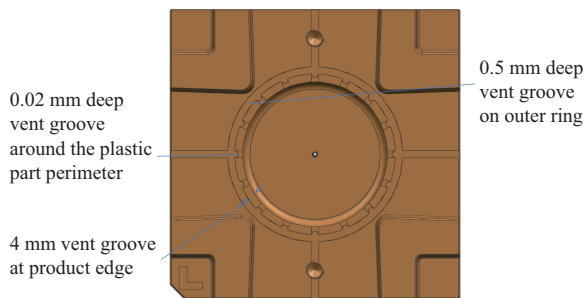


图15 定模排气系统

Fig. 15 Fixed mould venting system

3.7 定位套模具总体结构及工作原理

模具的整体尺寸为550 mm×450 mm×530 mm,归类为中型精密倒置结构注塑模具。模具设计采用了单腔布局方式。由于产品壁厚较厚,为防止保压后浇口未凝固,造成熔体倒流,浇注系统采用针阀式热流道,阀针的直径规格为10 mm,模具整体布

局合理。图16为定位套注塑模具的总装配图。

定位套模具的工作原理和过程如下。

(1)合模。动模侧以动模底板1为基础承载整体结构,注塑机驱动动模板6向定模板9移动,通过导柱34与导套35的精准配合实现导向定位,确保合模精度。斜导柱25插入滑块26的斜孔内,驱动滑块向内移动,使滑块上的型芯7与定模仁贴合,形成完整的型腔8(用于成型定位套)。定位环13与注塑机喷嘴对齐,浇口套14通过内六角圆柱头螺钉15固定在定模侧,且与喷嘴紧密接触,形成密封的浇注通道,为熔体注入作准备。

(2)注射与保压。熔融的PLA/PBAT合金材料(质量比75/25)经注塑机喷嘴注入定位环13,再通过浇口套14进入主流道(锥度3°~5°),随后经梯形分流道(上底8 mm、下底10 mm、深6 mm),最终从定位套顶面中心的点浇口注入型腔8开始填充,整个填充过程耗时0.813 7 s,注射总时间为2.469 s。浇注系统采用针阀式热流道阀针(直径10 mm),保压阶段阀针保持开启,熔体压力为7.740 MPa,保压时间20.535 s,补偿熔体冷却收缩量,同时防止浇口未凝固时熔体倒流,确保定位套成型密度均匀。

(3)冷却。定模、动模内部均设计冷却水路(直径10 mm),通过快速接头17接入18℃冷却介质,经水路循环带走热量;水路进出口由密封环18密封,避免冷却介质泄漏。冷却过程持续30 s,使型腔8表面平均温度稳定在50℃左右(符合PLA/PBAT合金材料推荐模具温度),确保定位套各部位(如环形槽、小圆柱)均匀冷却,减少因温差导致的翘曲变形。

(4)开模。注塑机驱动动模后退,动模板6与定模板9分离,斜导柱25从滑块26、滑块28的斜孔中抽出,滑块在滑块弹簧30与滑块锁29的限位作用下停止移动,完成侧向抽芯(脱离定位套环形槽结构)。动模继续后退,型腔8与成型后的定位套分离,流道凝料(已冻结)在流道推板10作用下与定位套从浇口处拉断,凝料随定模运动,定位套则留于动模侧的型芯7上。

(5)顶出。注塑机顶出机构推动推杆底板2与推杆面板3,带动直径6 mm的推杆38向上移动,推杆头部接触定位套底面及环形槽周边,将定位套从动模型芯7上顶出。顶出过程中,推板导柱22与推板导套21配合,确保推杆运动平稳,避免与冷却水路、型芯干涉;限位柱39限制顶出最大行程,防止推杆

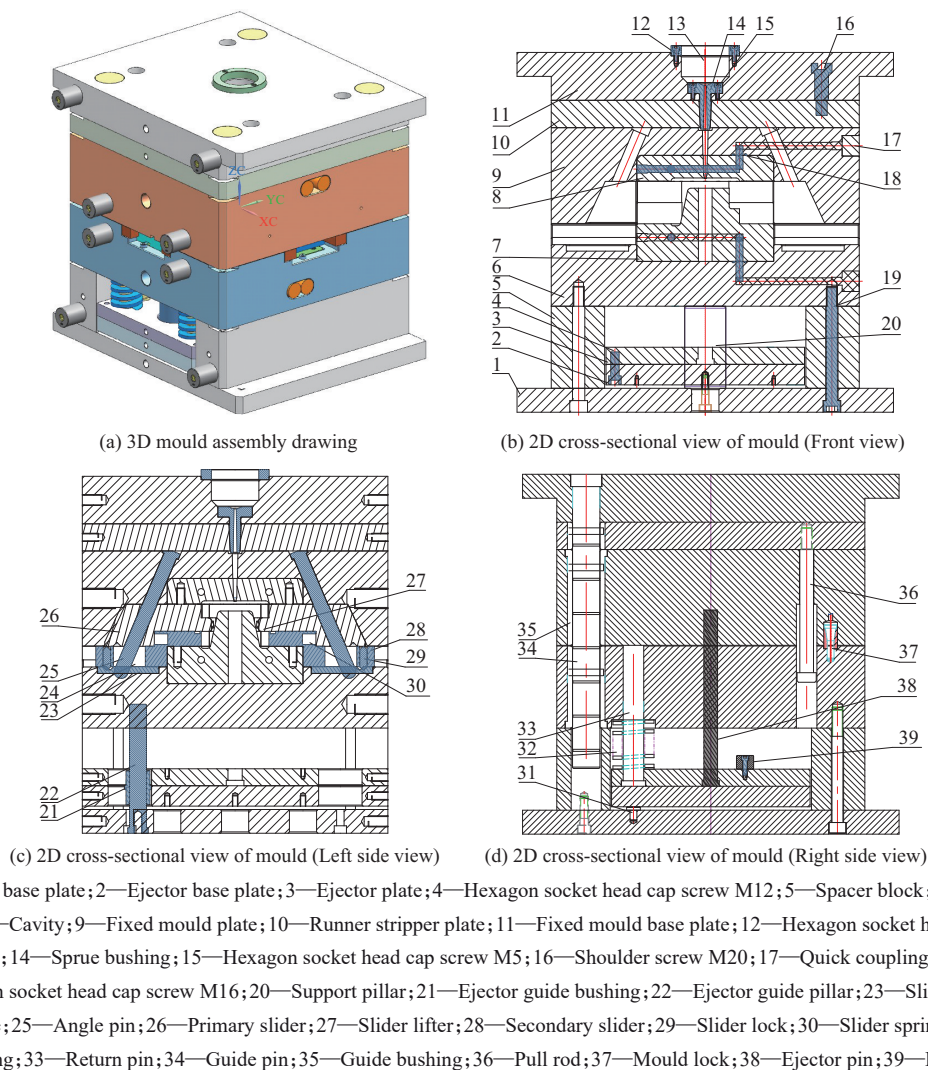


图16 模具总装配图

Fig. 16 General assembly diagram of mould

过度顶出导致定位套变形。

(6)复位与闭模。顶出完成后,复位杆33在弹簧32的弹力作用下推动推杆面板3与推杆底板2复位,推杆38退回至初始位置。注塑机驱动动模再次向定模移动,斜导柱25重新插入滑块26斜孔,驱动滑块复位,导柱34与导套35再次导向定位,动模板6与定模板9闭合,模具恢复至合模状态,进入下一注塑循环。

4 结语

(1)设计了由定位套、大小挂钩、双头螺母组成的果树幼苗嫁接辅助装置,能够在嫁接幼苗成活过程中起到辅助作用,提高幼苗的成活率。选择可降解的PLA/PBAT合金材料作为辅助装置的材料(即也作为定位套的材料),在满足辅助装置强度和韧性的条件下,能够在幼苗生长稳定后自然分解,不会对土壤和环境带来污染。

(2)在Moldflow软件中对定位套进行注塑工艺分析及优化,通过成型窗口分析、填充分析、冷却分析与优化、保压分析与优化和翘曲分析,获得最佳注射时间为2.469 s,模具型腔填充时间为0.813 7 s,填充时最大锁模力为11.73 t。优化了冷却参数和保压参数,设定冷却水路直径10 mm、冷却周期30 s,并将冷却介质温度优化至18 ℃,有效降低了产品成型过程中的翘曲,仿真验证塑件最大翘曲变形量为0.833 2 mm,满足要求,为模具设计和注塑机的注塑过程提供了科学的依据,提高了定位套模具设计的成功率。

(3)基于Moldflow模流分析与UG三维建模完成定位套注塑模具设计,设计了浇注、冷却、顶出、排气系统。在设计过程中,对关键的斜导柱驱动滑块侧抽芯机构进行了针对性设计:针对定位套环形槽处4个对称分布的小圆柱成型问题,通过滑块抽

芯系统中的4件滑块镶件合围,与模具其他型腔结构共同形成小圆柱的完整成型空间,确保小圆柱与定位套主体的一体化成型,满足结构精度要求;针对小圆柱仅上下端与塑件主体连接、中间柱体部位悬空无侧向支撑,传统脱模易导致塑件拉伤、断裂的难题,采用“斜导柱驱动+二次滑块联动”的复合抽芯结构,彻底解除小圆柱与模具的径向及轴向约束,实现无应力脱模,成功解决复杂结构的脱模难题,保障了定位套成型质量。针对浇注系统采用点浇口单点进胶结构,并引入针阀式热流道控制浇口冻结时间,避免保压后熔体倒流,确保填充压力均匀;针对排气系统,通过分型面间隙(0.02~0.05 mm)与前模排气槽(外圈深0.5 mm、边距深0.4 mm)组合排气,有效排出型腔空气,防止困气缺陷。

参考文献

- [1] 黄海松,张鲁滨,姚立国.基于灰色关联分析的注塑成型工艺多目标优化[J].塑料科技,2019,47(1):104-110.
HUANG Haisong, ZHANG Lubin, YAO Ligu. Multi-objective optimization of injection molding process based on grey relational analysis[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(1):104-110.
- [2] 韩明刚,党世红.基于田口试验的盒盖薄壁件注塑工艺优化与模具设计[J].模具技术,2024,(5):16-21.
HAN Minggang, DANG Shihong. Optimization design of injection mold for poker box cover based on Taguchi method[J]. *Die and Mould Technology*, 2024, (5):16-21.
- [3] 张晓光,程志超,孟泉,等.无人机灭火弹饰盖模流分析及注塑模具设计[J].塑料科技,2024,52(4):121-126.
ZHANG Xiaoguang, CHENG Zhichao, MENG Xiao, et al. Mold-flow Analysis and Injection Mold Design for UAV Fire-Fighting Grenade Cover[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(4):121-126.
- [4] 孔凡超,陈佳春,林诗济,等.电源外壳注塑成型模具设计[J].现代制造技术与装备,2024,60(9):14-17.
KONG Fanchao, CHEN Jiachun, LIN Shiji, et al. Design of Power Supply Shell Injection Molding Die[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2024, 60(9):14-17.
- [5] 王新超.基于3D打印的注塑模具设计与工艺参数优化[D].烟台:烟台大学,2024.
WANG Xinchao. Design of injection molds and optimization of process parameters based on 3D printing[D]. Yantai: Yantai University, 2024.
- [6] 赵勇杰,陈荣创,伍长彬,等.发动机减振器环形轴承注塑模具设计及工艺参数优化[J].工程塑料应用,2025,53(4):124-129.
ZHAO Yongjie, CHEN Rongchuang, WU Changbin, et al. Injection mould design and process parameter optimization of engine vibration damper annular bearing[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(4):124-129.
- [7] 田玉晶,董浩,孙晓宇.热敏打印机电底壳注塑模具设计及工艺优化[J].塑料科技,2025,53(1):152-156.
TIAN Yujing, DONG Hao, SUN Xiaoyu. Injection mold design and molding process optimization of thermal printer bottom shell[J]. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(1):152-156.
- [8] 刘晓坤,孙正阳,于洋洋,等.复杂交错格栅的滤芯托架热流道注塑模具设计[J].工程塑料应用,2024,52(5):115-120.
LIU Xiaokun, SUN Zhengyang, YU Yangyang, et al. Design of hot runner injection mold for complex staggered thin-walled grille filter element bracket[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(5):115-120.
- [9] 植才华.汽车保险杠模具结构设计[J].工程塑料应用,2022,50(8):97-102.
ZHI Caihua. Automobile Bumper Mould Structure Design[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(8):97-102.
- [10] 吕稼均,张世阳,陈荣创,等.商用车后视镜背壳结构设计与注塑模具设计[J].工程塑料应用,2023,51(1):93-97,103.
LV Jiajun, ZHANG Shiyang, CHEN Rongchuang, et al. Structure design and injection mould design of rear view mirror backshell for commercial vehicle[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(1):93-97, 103.
- [11] 张云,熊建武,夏凯,等.汽车通风管接头注塑模具设计[J].塑料,2023,52(5):74-78.
ZHANG Yun, XIONG Jianwu, XIA Kai, et al. Design of injection mold for automobile vent pipe joint[J]. *Plastics*, 2023, 52(5):74-78.
- [12] 林权,刘其南,林丽敏,等.多孔隔板注射成型随形水路优化及模具结构设计[J].工程塑料应用,2023,51(2):84-90.
LIN Quan, LIU Qinan, LIN Limin, et al. Optimization of conformal channel for injection molding of porous barrier and design of mould structure[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(2):84-90.
- [13] 朱军,黄可.汽车用前保险杠注塑模具设计及试验验证[J].工程塑料应用,2024,52(11):116-121.
ZHU Jun, HUANG Ke. Design and test verification of injection mould for automobile front bumper[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(11):116-121.
- [14] 赵利平,胡邓平,侯贤州.电动工具塑件的复合次抽芯注塑模具设计[J].塑料,2024,53(3):44-49.
ZHAO Liping, HU Dengping, HOU Xianzhou. Design of Compound Recore-Pulling Injection Mold for Electric Tool Plastic Parts[J]. *Plastics*, 2024, 53(3):44-49.
- [15] 吴桂勇.注塑模具数字化设计与智能制造技术分析[J].中国设备工程,2023(10):45-47.
WU Guiyong. Analysis of digital design and intelligent manufacturing technology for injection molds[J]. *China Plant Engineering*, 2023(10):45-47.
- [16] 朱姚,郭巍,刘小锐,等.基于数字孪生的注塑模具监控系统研究[J].机床与液压,2024,52(16):13-20.
ZHU Yao, GUO Wei, LIU Xiaorui, et al. Research on Monitoring System of Injection Mould Based on Digital Twin[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2024, 52(16):13-20.
- [17] 马廷军,魏娟,张智锋,等.一种用于果树嫁接的幼枝生长辅助装置:CN218277911U[P]. 2023-01-13.
MA Tingjun, WEI Juan, ZHANG Zhifeng, et al. A growth-assisting device for young branches in fruit tree grafting: CN218277911U[P]. 2023-01-13.