

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.012

基于Moldex3D可降解国际象棋的注塑仿真模拟

许珂,付倩,李秉辉,黄兆阁

(青岛科技大学高分子科学与工程学院,山东青岛 266042)

摘要: 选用生物降解塑料作为原材料,将构建的国际象棋棋子三维模型导入Moldex3D软件,根据模型结构特点设计流道和冷却水路等,修复和生成网格,再依据材料特性设置成型条件,模拟国际象棋的注射成型过程。根据初始模流分析结果,对流动波前温度、充填压力、凹痕位移和翘曲进行讨论。结果发现,在初始成型条件下制品表面存在严重的凹痕和翘曲问题。因此基于以上实验结果,调整成型条件,以保压时间(A)、最大保压压力百分数(B)(代表实际保压压力)和冷却时间(C)为控制因子,设计三因子三水平的正交试验,并利用方差分析进行验证。通过极差R分析发现3个控制因子对凹痕位移的影响程度为 $R(B) > R(A) > R(C)$,对翘曲的影响程度为 $R(A) > R(C) > R(B)$,确定了成型参数的最优组合为 $A_3B_3C_3$,即当保压时间为20 s,最大保压压力百分数为77%,冷却时间为30 s时,国际象棋棋子的质量最好,凹痕位移最大值为0.041 mm,比初始结果降低了84.4%;翘曲总位移最大值为1.342 mm,比初始结果降低30.5%。方差分析显示对凹痕位移和翘曲影响最大的分别为最大保压压力百分数和保压时间,与正交试验的极差分析结果一致,验证了分析的准确性。

关键词: Moldex3D; 国际象棋; 生物降解塑料; 正交试验; 方差分析

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0073-06

Injection Molding Simulation of Degradable Chess based on Moldex3D

Xu Ke, Fu Qian, Li Binghui, Huang Zhaoge

(School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract : Using biodegradable plastic as the raw material, the constructed 3D model of chess pieces was imported into Moldex3D software. Based on the structural characteristics of the model, flow channels and cooling waterways were designed, and grids were repaired and generated. Then, molding conditions were set based on material properties to simulate the injection molding process of chess pieces. Based on the initial model flow analysis results, the convective wavefront temperature, filling pressure, indentation displacement, and warpage were discussed. It is found that there were serious dents and warping issues on the surface of the product under initial molding condition. Therefore, based on the above experimental results, the molding conditions were adjusted, with holding time(A), maximum holding pressure percentage(B) (representing actual holding pressure), and cooling time (C) as control factors. A three factor and three level orthogonal experiment was designed and validated using analysis of variance. Through range(R) analysis, it is found that the influence of three control factors on the displacement of dents is $R(B) > R(A) > R(C)$, and the influence on warping is $R(A) > R(C) > R(B)$. The optimal combination of forming parameters was determined to be $A_3B_3C_3$, that is, when the holding time is 20 seconds, the maximum holding pressure percentage is 77%, and the cooling time is 30 s, the quality of chess pieces is the best, with the maximum displacement of dents being 0.041 mm, a decrease of 84.4% compared with the initial result; The maximum total displacement of warping is 1.342 mm, which is 30.5% lower than the initial result. Analysis of variance shows that the factors maximum holding pressure percentage and holding time have the greatest impact on dent displacement and warping, respectively, which are consistent with the range analysis results of orthogonal experiments and verify the accuracy of the analysis.

Keywords : Moldex3D ; chess ; biodegradable plastics ; orthogonal test ; variance analysis

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE079)

通信作者: 黄兆阁,副教授,主要从事高分子工程材料和功能材料研究

收稿日期: 2023-06-12

引用格式: 许珂,付倩,李秉辉,等.基于Moldex3D可降解国际象棋的注塑仿真模拟[J].工程塑料应用,2023,51(7):73-78.

Xu Ke, Fu Qian, Li Binghui, et al. Injection molding simulation of degradable chess based on Moldex3D[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 73-78.

随着科技的发展,计算机辅助工程在工业生产中的作用越来越重要,各种新颖的软件涌入市场,为现代化生产注入了不竭的动力,例如用于工业设计和机械设计的Solidworks, CATIA 软件和UG软件等^[1-2]。Moldex3D 软件适用于塑料注塑行业,通过模拟塑料注射成型的过程,预测制品可能出现的问题。使用者可以通过软件了解塑料熔体在模腔里的状态、查看制品在注塑过程中温度、压力、熔融区域等参数的分布,再根据实验结果分析及时调整生产工艺,减少实际生产中出现的质量问题,达到缩短成型周期、降低生产成本的目的。Moldex3D 软件以其分析快速、简单易学的特点,为短时间提供优化方案、节约模具修改时间提供可能,在塑料注塑行业和模具生产中有广阔的发展前景^[3-5]。

生物基可降解材料如聚乳酸(PLA)、聚羟基脂肪酸酯(PHA)、纤维素、全淀粉基等,已广泛地用于包装、生物医药、纺织业等领域^[6-9]。生物基可降解材料废弃后能被土壤中的微生物和水分子分解成小分子,对环境无污染,属于环境友好材料^[10-11]。PLA/聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)复合材料兼具 PLA 的高强度、良好的加工性能和 PBAT 的韧性^[12-13],拉伸强度达到 41.5 MPa,断裂伸长率达到 147%,具有良好的力学性能。将其作为国际象棋等玩具的生产原料,能缓解传统不可降解塑料给环境带来的压力。笔者利用自制的 PLA/PBAT 可降解复合材料为原料,将其性能数据导入 Moldex3D 数据库,模拟国际象棋的注射成型过程,根据结果分析,得到最佳成型工艺条件。

1 模型建立与前处理

1.1 产品参数及模型

根据图1的国际象棋棋子图纸,用CATIA绘图软件分别建立国际象棋6种棋子的三维立体模型,将其导入Moldex3D。6个模型底座直径最大46.5 mm,最小39 mm,厚度分布在2.599~46.5 mm,平均厚度19.581 mm,其中棋子马的头部厚度为12 mm。具体尺寸见图1。仿真模拟用的材料为PLA/PBAT复合材料,其质量比为80/20,将性能参数[熔体流动速率(170 °C, 38 N)为20 g/10 min,结晶温度为100 °C,泊松比=0.36等]导入软件,模拟国际象棋的注塑过程。塑料熔体温度为160~230 °C,模具温度为20~40 °C,推荐模具温度为30 °C,顶出温度为80 °C。图2为国际象棋棋子模型图。

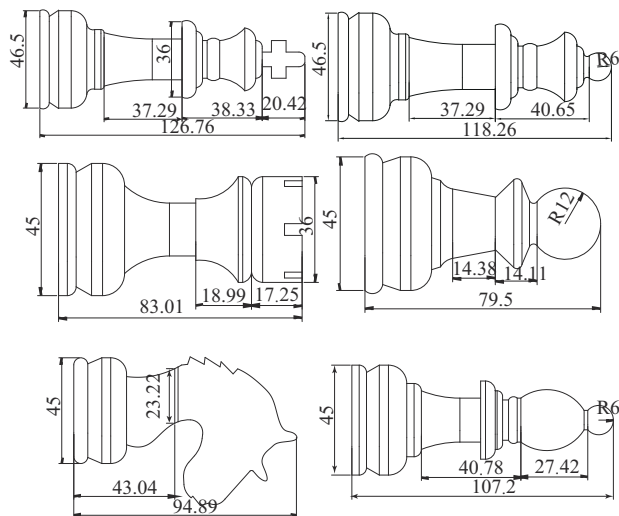


图1 国际象棋棋子图纸

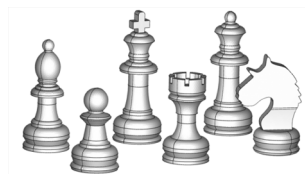
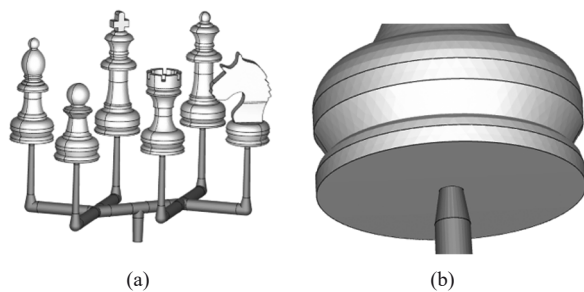


图2 国际象棋棋子模型图

1.2 浇注系统及冷却管道的建立

为了减少在浇注过程中发生熔体流动不平衡现象,将流道设计为平衡流道,如图3所示。采用一模六腔的设计进行生产,模拟每个棋子的注射成型过程。流道选择圆形,主流道直径为10~12 mm,横流道直径为12 mm,竖流道直径为6~8 mm。因为棋子为实心结构,壁厚大,所以流道设计为热流道。热流道能准确地控制塑料熔体的温度,使熔体状态均匀地流进模腔,并且热流道注塑压力损耗较低。另外,根据棋子结构特点,选择针点浇口,可以在注射完成时使流道和浇口自动分离,浇口位置位于象棋底部,直径为4~6 mm。



a—流道;b—浇口

图3 流道和浇口设计

冷却水路设计如图4所示。冷却水路设计为环形水路,直径为8 mm。冷却系统中用水作为冷却液,水路温度为40 °C,流量为100 cm³/s。

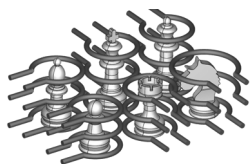


图4 冷却水路设计

1.3 模型的修复与网格的建立

将CATIA绘制的国际象棋模型导入CAD doctor,修复模型表面缺陷。模型导出回到Moldex3D Studio界面,撒点生成表面网格,随后用修复精灵或者手动操作对表面网格进行优化,建立流道和模型塑件实体网格。网格长度2 mm,总计实体网格数量637 372个,图5为棋子模型的网格建立和修复。



图5 棋子模型的网格建立和修复

1.4 工艺条件

6个国际象棋棋子的总体积为389.62 cm³,热流道的体积为76.95 cm³。根据材料特性和工艺经验设定以下参数:充填时间1.2 s,保压时间10 s,最大保压压力170 MPa,实际保压力以最大保压压力百分数表示设为49.3%,塑料温度195 ℃,模具温度40 ℃,冷却时间9 s,开模时间3 s。分析顺序自定义为冷却、充填分析、保压分析、冷却、翘曲变形。

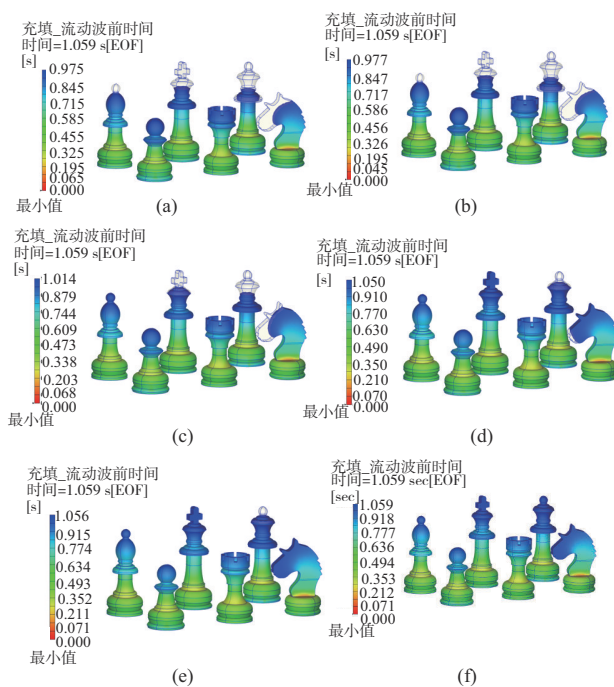
2 基于Moldex3D软件的模流分析结果

2.1 流动波前时间分析

流动波前时间为从熔体进入浇口开始最前端到达各个位置所用的时间。通过流动波前时间分析,可以了解熔体在注塑过程中不同时刻的流动波前位置,检视是否有短射、缝合线、包封、流动不平衡等问题的发生,除此之外还可以得到每个浇口贡献度的大小。虽然有6个浇口,但每个浇口对应独立的制品,又因为棋子为实心圆柱体,所以不存在

浇口贡献度差别大或者流动不均匀的问题。

流动波前时间分析如图6所示。通过充填流动波前时间演示得到6个棋子完全充满的时间为0.975,0.977,1.014,1.050,1.056,1.059 s,充填时间最大值与最小值仅相差0.084 s,基本同时充模完成。所以证明流道设计合理,不存在短射或者过度充填的情况。



流动波前时间:a—0.975 s;b—0.977 s;c—1.014 s;d—1.050 s;
e—1.056 s;f—1.059 s

图6 流动波前时间分析

2.2 充填压力分析

通过压力分布图可以了解塑件在充填过程的压力分布情况,从而判断压力传递情形,避免熔胶保压过度或者出现毛边。充填压力能提高熔体的流动性和填充率,减小流动阻力。注塑压力应在一定范围之内,能保证熔体充填速度即可,压力过大则会对机器产生不利影响。通过图7分析充填压力可以看出,进浇点处充填压力最大为29.766 MPa,浇口处压力为20 MPa左右,流道压力降较小,说明流道设计合理。

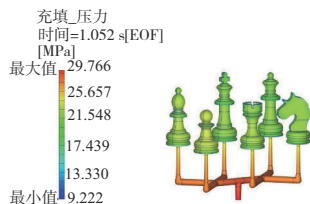


图7 充填压力分析

2.3 缝合线分析

缝合线也被称作熔接线、熔接痕或结合线,当两个熔体流动波前相遇时,便产生了缝合线。关于影响缝合线的因素,一方面,相遇的两股熔体的温度差异越大,缝合线越严重;其次,熔体分子链相互作用力越大,缝合线越明显;最后,添加玻纤的材料容易产生缝合线。由图8知,棋子表面没有缝合线,这是因为棋子表面无孔洞、加强筋等复杂的结构,熔体流动过程中阻力小,没有分开的流动波前;另外在本产品原料中没有纤维的加入,所以产品表面没有缝合线的出现。

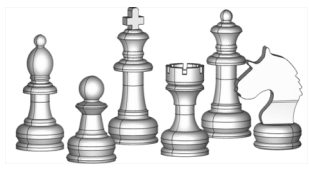


图8 缝合线分析

2.4 凹痕位移分析

在制品生产的过程中,凹痕是出现频率最高的表面缺陷。由于注射进模腔的熔体冷却不均匀,先冷却的部分表面变硬,导致内部产生气泡,冷却慢的熔体在气泡方向收缩,形成了凹痕。因为棋子体积较小,用凹痕位移能较好地表示制品的外观质量。从模拟结果可以看出,此成型条件下的制品外观质量较差,凹痕位移达到0.263 mm,表面缺陷肉眼可见。这是由于棋子是实心结构,保压压力不足导致材料发生冷缩,从而制品表面凹痕位移较大。后续优化设计可以从延长保压时间或者提高保压压力入手。

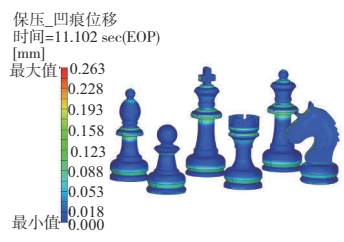
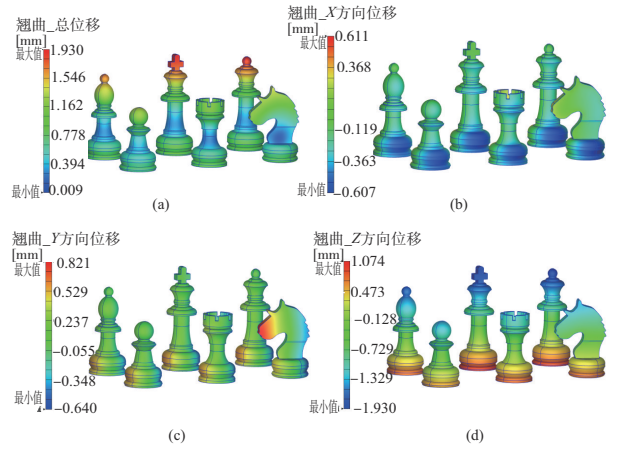


图9 凹痕位移分析

2.5 翘曲分析

翘曲变形分析是考察制品质量和工艺最直接的数据,同时是对产品的形貌和性能产生较大影响的一项指标。翘曲受温度、压力、纤维配向、产品设计等因素控制,根本原因是熔体生产过程中的不均匀收缩。在生产过程中,应尽量避免翘曲位移对产品外观质量产生的不利影响。

翘曲总位移代表了所有效应导致的翘曲分布如图10所示,翘曲总位移最大值为1.930 mm, X轴方向翘曲位移最小,为-0.67~0.611 mm, Z轴方向翘曲最大,为-1.930~1.074 mm,翘曲的正负值表示两个相反的方向。翘曲严重的部分位于较高三个棋子的上方,因为该部位离浇口较远,保压压力不足,导致发生翘曲。



a—翘曲总位移;b—翘曲X方向位移;c—翘曲Y方向位移;
d—翘曲Z方向位移

图10 翘曲结果分析

3 基于Moldex3D的正交试验

3.1 正交试验设计

正交试验是一种多因素多水平的试验设计方法,所选的数据具备分散均匀、整齐可比的特点,对于科学研究来说正交试验是高效而经济的设计方法^[14-16]。基于初始分析结果,发现棋子的表面存在较严重的凹痕和翘曲变形,影响制品的外观质量。为了得到表面质量良好的制品,根据凹痕和翘曲的影响因素,调整保压时间、最大保压压力百分数和冷却时间,设计一个三因素三水平的正交试验,具体列于表1。因为初始分析时设定的最大保压压力

表1 正交试验因素与水平

因素水平	保压时间(A)/s	最大保压压力百分数(B)/%	冷却时间(C)/s
1	10	69.9	10
2	20	73.5	15
3	30	77	20

百分数为49.3%,也就是保压压力为83.81 MPa,压力值过小,导致凹痕位移较严重,所以正交试验中将最大保压压力百分数提高到69.9%~77%左右,避免实验范围过大。

3.2 凹痕位移和翘曲总位移极差分析

对于体积小的产品来说,表面凹痕位移大于

0.06 mm是比较明显的缺陷,严重影响制品性能。表2为正交试验的结果,发现增大保压时间和最大保压压力百分数后,凹痕位移显著下降,最小达到0.043 mm,说明优化效果显著。表3为凹痕位移极差分析。由表3知,三个因子的极差 R 大小顺序分别为 $R(B) > R(A) > R(C)$,这说明 B (最大保压压力百分数)对凹痕位移的影响最大, C (冷却时间)的影响最小,最优组合为 $A_3B_3C_1$,即当保压时间30 s、最大保压压力百分数为77%、冷却时间为10 s时,产品的凹痕位移最小。

表2 凹痕位移和翘曲总位移正交试验结果

试验号	A	B	C	D(空白列)	凹痕位移/mm	翘曲总位移/mm
1	1	1	1	1	0.097	1.896
2	1	2	2	2	0.079	1.799
3	1	3	3	3	0.062	1.732
4	2	1	2	3	0.094	1.645
5	2	2	3	1	0.072	1.578
6	2	3	1	2	0.053	1.712
7	3	1	3	2	0.079	1.457
8	3	2	1	3	0.058	1.579
9	3	3	2	1	0.043	1.513

表3 凹痕位移极差分析

项目	A	B	C	D(空白列)
k_1	0.079	0.09	0.069	0.071
k_2	0.073	0.070	0.072	0.070
k_3	0.060	0.053	0.071	0.071
R	0.019	0.037	0.003	0.001

注: k_1, k_2, k_3 分别表示3个水平对应试验指标数值之和的平均值, R 为极差,下表同。

表4为翘曲总位移极差分析。正交试验结果显示,最佳组合为 $A_3B_3C_3$ 或 $A_3B_3C_3$ 。由表4可知,3个

表4 翘曲总位移极差分析

项目	A	B	C	D(空白列)
k_1	1.809	1.666	1.729	1.662
k_2	1.645	1.652	1.652	1.656
k_3	1.516	1.652	1.589	1.652
R	0.293	0.014	0.140	0.010

因子的极差 R 大小顺序分别为 $R(A) > R(C) > R(B)$,说明因子 A 对翘曲总位移的影响最大, B 对翘曲总位移的影响最小。严重的翘曲对塑料制品的组装产生不利影响,影响其使用性能。所以针对翘曲总位移严重的产品,可考虑提高保压时间和冷却时间。综合考虑凹痕位移和翘曲总位移两个因素,确定最佳组合 $A_3B_3C_3$ 为后续优化试验的成型条件。

3.3 凹痕位移与翘曲总位移方差分析

方差分析与极差分析相比更具准确性,利用方

差分析可以将因素水平改变引起的变化与实验误差引起的数据变化区别开来。凹痕位移方差分析列于表5。发现因素 B (最大保压压力百分数)的离差平方和最大,说明其对凹痕位移的影响最大。在表6对翘曲总位移的方差分析中发现,因素 A (保压时间)对其影响最大。这与极差分析结果一致,证明了方差分析的准确性。

表5 凹痕位移方差分析

因素	离差平方和	自由度	均方值	F	p 值	显著性
A	5.83×10^{-4}	2	2.91×10^{-4}	374.714 3	2.66×10^{-3}	显著
B	2.09×10^{-3}	2	1.08×10^{-3}	1 347.571	7.42×10^{-4}	显著
C	1.09×10^{-5}	2	5.44×10^{-6}	7	1.25×10^{-1}	
误差	1.56×10^{-6}	2	7.78×10^{-7}	1	0.5	

表6 翘曲总位移方差分析

因素	离差平方和	自由度	均方值	F	p 值	显著性
A	0.129	2	6.46×10^{-2}	792.60	1.26×10^{-3}	显著
B	3.83×10^{-4}	2	1.91×10^{-4}	2.35	2.95×10^{-1}	
C	2.95×10^{-2}	2	1.47×10^{-2}	181.04	5.49×10^{-3}	显著
误差	1.63×10^{-4}	2	8.14×10^{-5}	1	0.5	

3.4 凹痕位移与翘曲总位移优化后结果

经过极差分析和方差分析,选取最佳成型参数组合 $A_3B_3C_3$ 进行模拟实验,结果如图11和图12所示,当保压时间30 s、保压压力最大百分数为77%、冷却时间为20 s时,凹痕位移最大值为0.041 mm,翘曲总位移最大值为1.342 mm,与初始分析比较,分别降低了84.4%和30.5%。这说明利用极差分析和方差分析改善制品质量的方法,适用于本试验。总的来说,导致制品发生凹痕位移和翘曲变形的主要原因要有两个方面:一方面由于棋子为实心主体结构,厚度较大,需要足够大的保压压力和保压时间来确保制品能充分进行保压补缩;另一方面,厚

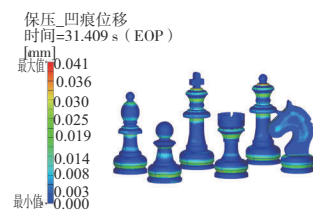


图11 凹痕位移优化分析

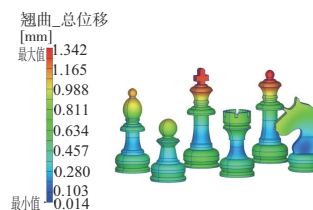


图12 翘曲总位移优化分析

度较大的产品相应的冷却时间需要延长。所以注射成型需要综合考虑各种工艺参数,才能生产出外观质量和使用性能符合要求的产品。

4 结论

(1)调整生产工艺并设计正交试验,经过极差分析和方差分析发现因素 B (最大保压压力百分数)对凹痕位移影响最大,因素 A (保压时间)对翘曲变形的影响最显著。

(2)通过分析得出结论,当保压时间为30 s、最大保压百分数为77%、冷却时间为20 s时,凹痕位移最大值为0.041 mm,比初始结果下降84.4%,翘曲总位移最大值为1.342 mm,比初始结果降低30.5%。

参考文献

- [1] 施政达,史磊,黄炜.以UG软件为基础的塑料模具设计加工研究[J].塑料工业,2019,47(3):62-64.
Shi Zhengda, Shi Lei, Huang Wei. Study of plastic mold design and manufacturing based on UG software[J]. China Plastic Industry, 2019, 47(3):62-64.
- [2] 张信群.基于SolidWorks配置功能建立塑料模具标准件库[J].西昌学院学报(自然科学版),2015,29(3):20-23,31.
Zhang Xinqun. Establishing a plastic mold standard parts library based on solidworks configuration function[J]. Journal of Xichang University (Natural Science Edition), 2015, 29(3):20-23, 31.
- [3] 王良柱,徐静.基于Moldflow的汽车仪表板本体骨架变形分析及结构改进[J].塑料工业,2021,49(3):59-63,68.
Wang Liangzhu, Xu Jing. Deformation analysis and structural improvement of the instrument panel frame based on Moldflow[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(3):59-63, 68.
- [4] Liu Q, Gao L, Qin Y, et al. Incorporation of oxidized debranched starch/chitosan nanoparticles for enhanced hydrophobicity of corn starch films[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 35. DOI: 10.1016/j.fpsl.2023.101032.
- [5] 叶星,汪健,李兵兵,等.基于Moldflow的连接过渡管成型质量分析及模具设计[J].工程塑料应用,2023,51(3):88-93.
Ye Xing, Wang Jian, Li Bingbing, et al. Moulding quality analysis and mould design of connecting transition pipe based on Moldflow[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3):88-93.
- [6] Jiang J, Zhang X, Gao S, et al. Effects of adding methods and modification types of cellulose on the physicochemical properties of starch/PBAT blown films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 223:1 335-1 343.
- [7] 翟豪瑞,葛晓宏,陈长秀,等.基于Moldex3D碳罐本体优化分析及模具设计[J].模具工业,2018,44(1):40-45,52.
Zhai Haorui, Ge Xiaohong, Chen Changxiu, et al. Optimization analysis of carbon canister based on Moldex3D and the mould design[J]. Die & Mould Industry, 2018, 44(1):40-45, 52.
- [8] 晏永祥,贺哲,张跃飞,等.可生物降解塑料PBAT共混改性研究进展[J].工程塑料应用,2021,49(5):158-161.
Yan Yongxiang, He Zhe, Zhang Yuefei, et al. Progress of blending modification of biodegradable plastic PBAT[J]. Engineering Plastic Application, 2021, 49(5):158-161.
- [9] Wan Lun, Zhang Yanhua. Jointly modified mechanical properties and accelerated hydrolytic degradation of PLA by interface reinforcement of PLA-WF[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 88:223-230.
- [10] 张玉萍,肖光洋,王丹,等.可降解塑料的降解机理及影响降解过程的因素[J].绿色包装,2021,71(11):17-21.
Zhang Yuping, Xiao Guangyang, Wang Dan, et al. The degradation mechanism of degradable plastics and the factors affecting the degradation process[J]. Green Packaging, 2021, 71(11):17-21.
- [11] 李求恩.生物可降解材料研究进展及国内外产业现状分析[J].湖南包装,2021,36(2):31-34.
Li Qiuen. Research progress of biodegradable materials and analysis of domestic and foreign industry status[J]. Hunan Packaging, 2021, 36(2):31-34.
- [12] 付凯妹,王秋红,慕彦君,等.PBAT生产技术现状及其研究进展[J].化工进展,2021,40(6):25-29.
Fu Kaimei, Wang QiuHong, Mu Yanjun, et al. Status and research development of PBAT production technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(6):25-29.
- [13] 史鹏伟,郭品强,汤俊杰.高环氧基功能聚合物对PBAT/PLA复合材料性能的影响[J].工程塑料应用,2022,50(7):140-146,153.
Shi Pengwei, Guo Pinqiang, Tang Junjie. Influence of high epoxy groups functional polymer on the properties of PBAT/PLA composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):140-146, 153.
- [14] 明五一,沈帆,何文斌,等.绿色电火花成型加工多目标工艺参数优化[J].机床与液压,2020,48(1):23-28.
Ming Wuyi, Shen Fan, He Wenbin, et al. Optimization of multi-objective process parameters in green-EDM process[J]. Mechanical Tools and Hydraulics, 2020, 48(1):23-28.
- [15] 修雪颖,汪圣尧,黄兆阁.基于Moldflow的注塑阀门应用与仿真[J].现代塑料加工应用,2020,32(5):56-59.
Xiu Xueying, Wang Shengyao, Huang Zhaoge. Application and simulation of injection valve based on Moldflow[J]. Modern Plastics Processing and Application, 2020, 32(5):56-59.
- [16] 孙晋,李永泉,李峰.注塑成型工艺参数对汽车保险杠翘曲变形的影响研究[J].塑料工业,2011,39(5):49-53.
Sun Jin, Li Yongquan, Li Feng. Effect of the injection molding processing parameters on automobile bumper warpage deformation[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(5):49-53.