

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.014

注塑工艺对POM齿轮弯曲疲劳寿命的影响规律

郭磊¹, 曹伟¹, 沈亚强^{1,2}, 陆志强², 张世勋¹

(1. 郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002; 2. 深圳市兆威机电股份有限公司, 广东深圳 518105)

摘要: 为了研究注塑工艺对聚甲醛(POM)齿轮弯曲疲劳寿命的影响, 采用了DOE实验设计方法, 并参考GB/T 14230-2021《齿轮弯曲疲劳强度试验方法》中的运转型试验方式来制定试验方案和设计测试装置。按照设计的实验计划, 进行了齿轮弯曲疲劳寿命的试验, 并获得POM齿轮寿命实验数据。通过Minitab软件对实验数据进行分析, 得到弯曲疲劳寿命的主效应图和Pareto图。分析结果表明, 模具温度和保压压力是影响POM齿轮弯曲疲劳寿命的两个主要工艺参数。为改善这些工艺参数对齿轮性能的影响, 对模型进行了优化改进, 并建立了回归方程来描述模具温度和保压压力对齿轮弯曲疲劳寿命的影响。通过实验验证发现, 通过Minitab的响应优化得到数据模型预计最佳值及最优工艺配置: 模具温度120℃, 保压压力120 MPa。在工艺优化后, POM齿轮的弯曲疲劳寿命提高了约59%。这表明, 经优化后的注塑工艺, 可以显著改善POM齿轮的性能, 并延长其使用寿命。

关键词: 注塑工艺; DOE试验设计; 聚甲醛齿轮弯曲疲劳寿命; 最优工艺

中图分类号: TG76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0085-06

The Influence Law of Bending Fatigue Life of POM Gears by Injection Molding Process

Guo Lei¹, Cao Wei¹, Shen Yaqiang^{1,2}, Lu Zhiqiang², Zhang Shixun¹

(1. National Engineering Research Center for Advanced Polymer Processing Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Shenzhen Zhaowei Machinery & Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518105, China)

Abstract : To investigate the influence of the injection molding process on the bending fatigue life of polyoxymethylene (POM) gears, the design of experiments (DOE) methodology was employed and the rotational testing method outlined in GB/T 14230-2021 "Test method for bending fatigue strength of gears" was referred to develop the experimental plan and design the testing apparatus. According to the designed experimental plan, bending fatigue life tests of the gears were conducted, and experimental data on the lifespan of POM gears were obtained. The experimental data were analyzed using Minitab software to generate main effects plots and Pareto charts for bending fatigue life. The analysis results indicate that mold temperature and holding pressure are the two main process parameters affecting the bending fatigue life of POM gears. To improve the impact of these process parameters on gear performance, the model is optimized and improved, and a regression equation is established to describe the influence of mold temperature and holding pressure on bending fatigue life. Through response optimization in Minitab, the predicted optimal values of the data model and the corresponding optimal process configuration are obtained: mold temperature of 120 °C and holding pressure of 120 MPa. Experimental validation reveals an approximately increase by 59% in the bending fatigue life of POM gears after optimizing the injection molding process parameters. This demonstrates that the optimizes injection molding process parameters can significantly improve the performance and extend the lifespan of POM gears.

Keywords : injection molding process ; DOE-based experimental design ; bending fatigue life of polyoxymethylene gears ; optimal configuration of process parameter

聚甲醛(POM)齿轮作为一种合成树脂齿轮, 在汽车座椅调节系统中具有广泛的应用潜力。它具有

有低摩擦系数、较低的密度和良好的耐磨性等优势, 这些特点使得POM齿轮能够提供平稳、静音的

通信作者: 张世勋, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为聚合物成型数值仿真的理论和算法和聚合物加工流变学

收稿日期: 2023-06-16

引用格式: 郭磊, 曹伟, 沈亚强, 等. 注塑工艺对POM齿轮弯曲疲劳寿命的影响规律[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(7): 85-90.

Guo Lei, Cao Wei, Shen Yaqiang, et al. The influence law of bending fatigue life of POM gears by injection molding process[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 85-90.

运动传递,并且能够减轻整个座椅系统的质量^[1]。

然而,在汽车座椅调节系统中使用POM齿轮仍然存在一些挑战。其中一个主要问题是其使用寿命的可靠性。座椅调节系统是一种频繁使用的装置,POM齿轮在长时间高频率的工作条件下可能面临着疲劳、磨损和变形等问题,这可能导致其寿命受到限制。

在POM齿轮的设计和制造过程中,注塑工艺起着至关重要的作用,注塑工艺直接影响POM齿轮的形状、结构及性能,并且和齿轮的寿命密切相关。在POM齿轮的注塑工艺中,关键的参数包括模具温度、保压压力、注射速度和冷却时间等,这些工艺参数的合理选择对于POM齿轮的疲劳寿命具有重要影响。现今注塑行业中,对于注塑工艺参数的设定大部分都是采用经验法,根据工程师长期的工作经验来设定,这对于产品性能控制极不稳定,因此优化注塑工艺、改善POM齿轮的质量和寿命意义重大^[2-3]。

齿轮疲劳寿命测试研究得到了国内外的广泛关注,取得了一系列进展。1980年Nelson^[4]提出累计失效模型,并将该模型应用于加速寿命疲劳测试。1990年Nelson将最小二乘法等不同统计方法应用于寿命试验的分析中^[5]。1994年,卢玉明等^[6]研制了航空发动机减速器的加速寿命试验台,可以有效缩短试验周期。2004年Kramberger等^[7]基于有限元及边界元法对齿轮的疲劳寿命进行分析。2009年,李国云等^[8]研制了风力发电机齿轮箱的加速寿命试验台。2021年,石照耀等^[9]研制了一种塑料齿轮加速疲劳试验机,可以实现多种条件下的疲劳测试试验。

工业生产中,注塑工艺的调控可以有效保证塑料齿轮的高品质^[10]。徐钺等^[11]研究了注塑工艺对注塑成型体积收缩率的影响。马文博等^[12]研究了抑制POM齿轮缩孔的工艺参数,发现通过增大保压压力、降低熔体温度可以显著抑制POM齿轮的缩孔缺陷。朱红萍等^[13]研究了注塑工艺对产品熔接线及翘曲变形的影响。张琦等^[14]研究了注塑工艺对于产品的力学性能的影响,通过优化工艺改善力学性能,提高产品质量。

针对注塑工艺POM齿轮弯曲疲劳寿命影响研究的不足,笔者拟应用DOE试验设计及弯曲疲劳试验方法^[15-16]开展针对POM齿轮的弯曲疲劳试验及

DOE分析工作,以找出最优注塑工艺配置,提高POM齿轮的弯曲疲劳寿命。

1 运转型疲劳寿命试验

1.1 运转型疲劳寿命试验机及试验原理

研究的POM齿轮材料采用美国杜邦公司的Delrin 100P NC010,材料物理性能见表1,齿形基本参数列于表2。试验仪器采用的是齿轮副疲劳寿命试验台,设备示意图如图1所示。

表1 材料物理性能参数表

物理性能	额定值
密度/(g·cm ⁻³)	1.42
熔体流动速率/(g·10 min ⁻¹)	2.6
熔融体积流率(MVR)(190 °C/2.16 kg)/[cm ³ ·(10 min) ⁻¹]	2.20

表2 齿形基本参数表

参数	数值
模数	1.48
齿数	33
压力角/(°)	29
变位系数	-0.971
分度圆直径/mm	48.84
齿顶圆直径/mm	48.636 +0/-0.1
齿根圆直径/mm	42.586 +0/-0.1

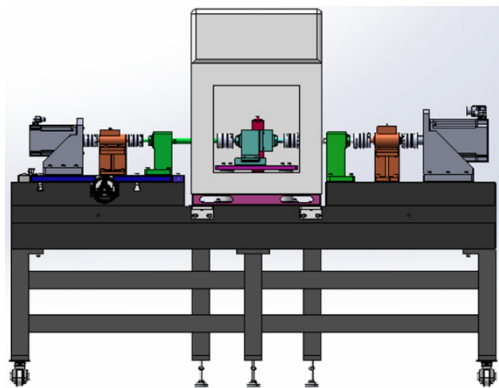


图1 齿轮副疲劳寿命试验台

试验所用的疲劳试验机主要由机械系统、温度调控、数据处理、测量与控制等组成。试验机的输入端配备驱动电机以及转矩传感器,输出端装有转矩传感器及负载电机,运转试验所需动力由驱动电机提供,输出端的转矩由负载电机提供,转矩传感器收集测量位于试验齿轮副两端的转矩数值,温控箱位于中间,放置有试验齿轮工装。

进行疲劳试验时,以POM齿轮作为被动齿轮,金属齿轮作为主动齿轮,啮合装配于试验工装,将装有试验齿轮的工装安装于温控箱中,然后将温控箱中温度调至所需值,待其稳定后,分别对输入端输出端电机进行设定启动,其中输入端的驱动电机

以转速模式启动,位于输出端的负载电机则以转矩模式启动,试验齿轮在实验过程中以相反方向旋转,相互挤压,其原理图如图2所示。随着试验的进行,齿轮表面温度升高,齿轮相互挤压磨损变形,达到齿轮的疲劳破坏程度时,齿轮断裂、试验终止。

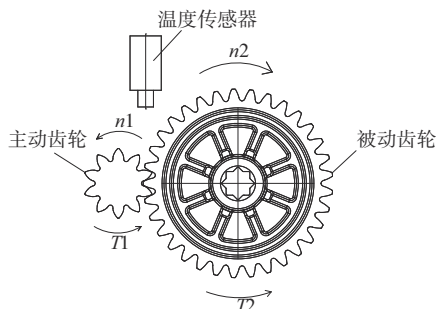


图2 试验原理图

运转型疲劳寿命试验是将试验齿轮副安装在运转式试验机上进行载荷施加的一种试验方式。试验中,在指定载荷下运行一定循环次数后齿根出现弯曲疲劳失效或达到评定循环次数而未失效时试验终止,并获得轮齿在该试验应力下的一个寿命数据。

1.2 试验方案及结果分析

基于DOE试验设计方法和试验方案,选取模具温度、保压压力、注射速度以及冷却时间4个因子,高低两水平,一个中心点进行全因子试验设计,其中保压速度为注射速度的1/4,并不作为额外因子考虑。试验疲劳寿命测试方法按照GB/T 14230-2021齿轮弯曲疲劳强度试验方法中的运转型试验,使用塑料齿轮加速疲劳寿命试验机进行试验,试验输入速度为150 r/min,输出转矩为20 N·m。由于不同工艺的POM齿轮齿顶圆、齿根圆等参数有差异,为保证弯曲应力一致,需计算不同工艺齿轮副中心距。试验方案及结果列于表3。

2 基于DOE的工艺优化

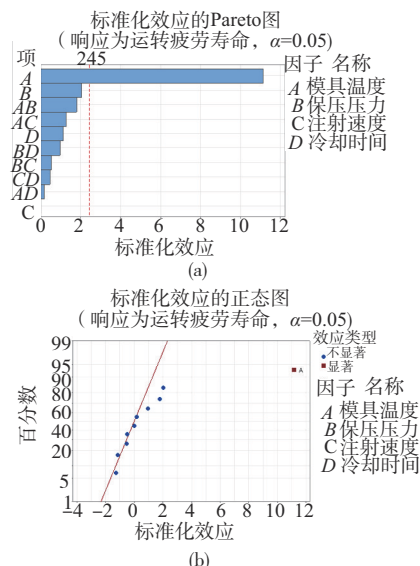
2.1 模型初步分析

将动态疲劳寿命试验所得数据导入Minitab中进行DOE的全因子分析,全因子分析不考虑三阶及以上的交互作用,因此阶数设置为2,只考虑因子二阶交互作用,因子A、B、C、D分别为模具温度、保压压力、注射速度、冷却时间。分析后得到如图3所示的标准化效应的Pareto图及效应的正态图。正态图表明起主导作用因子为A,该因子位于拟合线右侧,表明影响为正效应,即模具温度越高运转疲劳寿命越高。由Pareto图可知当显著水平 $\alpha=0.05$ 时,只有

表3 试验方案及结果

组号	模具温度/℃	保压压力/MPa	注射速度/(mm·s ⁻¹)	冷却时间/s	中心距/mm	运转疲劳寿命(周期)
1	80	80	108	40	30.603	44 874
2	80	80	36	20	30.555	43 140
3	80	120	36	20	30.601	46 121
4	120	120	108	40	30.609	69 734
5	80	120	108	20	30.594	46 251
6	80	80	36	40	30.600	41 867
7	120	120	36	40	30.610	68 289
8	120	80	108	20	30.512	65 142
9	120	80	36	40	30.555	62 965
10	120	80	108	40	30.552	55 229
11	120	120	108	20	30.598	65 070
12	80	120	36	40	30.648	44 273
13	80	120	108	40	30.640	44 246
14	80	80	108	20	30.540	49 284
15	120	120	36	20	30.601	70 352
16	120	80	36	20	30.515	62 594
17	100	100	72	30	30.631	60 202

因子A为显著因子。



a—Pareto图;b—正态图

图3 标准化效应图

2.2 模型优化

模型初步分析结果表明因子A显著,因子B、C不显著,交互作用不显著。对模型中的“项”进行修改以优化模型,去除A以外所有项,只保留显著项A,进行重新计算分析,得到表4所示的修改前后效果比较表。

经表4数据对比,删减后 $R-Sq$ 一定程度减小,属正常变化, $R-Sq$ (调整)减小,未按预期有所提升,且S由3 570.96增至3 904.11,由此知模型修改未提升回归效果。修改优化方案,保留前三种影响更为显

表4 全模型与删减模型效果比较表

参数	全模型	初次删减模型
$R-Sq$	95.78%	87.4%
$R-Sq(\text{调整})$	88.76%	86.56%
S	3 570.96	3 904.11

注: $R-Sq=SS_{\text{Model}}/SS_{\text{Total}}$ 为拟合总效果多元相关系数,其中 SS_{Model} 为模型的离差平方和, SS_{Total} 表示总的离差平方和; $R-Sq(\text{调整})$ 表示调整的多元相关系数; S 表示 σ^2 的无偏估计量的平方根。

著因子,即 A 、 B 及 AB 的交互作用,再进行重新计算,得到下表5再次修改后效果比较表。

表5 再次修改后全模型与删减模型效果比较表

参数	全模型	二次删减模型
$R-Sq$	95.78%	92.64%
$R-Sq(\text{调整})$	88.76%	90.94%
S	3570.96	3206.06

经第二次删减修改后,新模型的 $R-Sq$ 有微小的降低,符合预期, $R-Sq(\text{调整})$ 由88.76%增至90.94%,可见删除其余项,保留前三个因子使回归效果更好,且 S 值由之前的3 570.96降为3 206.06,再次证明新模型的回归效果更好。

按照先前步骤重新生成标准化效应的正态图及标准化效应的Pareto图,如图4所示。与先前相比,先前不显著因子 B 变为正效应显著因子,因子显著性得到提升。

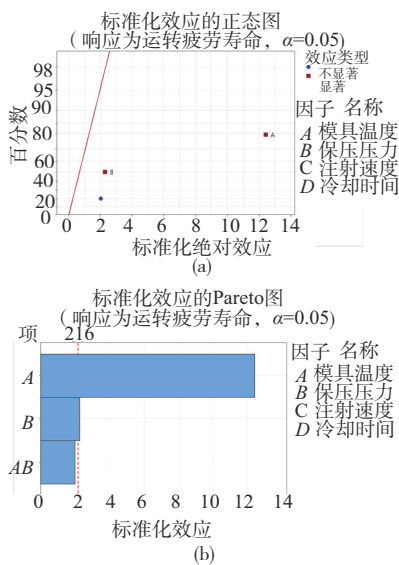


图4 标准化效应图

2.3 数据模型

经过模型优化后,保留了 A 、 B 、 AB 三个因子,其余因子均舍去,根据各因子参数的特征,可以简单认定此模型为一个简单的二元线性回归方程,其函数表达式为:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2$$

式中, Y 为运转疲劳寿命, x_1 为模具温度, x_2 为保压压力, b_0, b_1, b_2, b_3 为回归参数,对上述方程进行最小二乘法估值。根据Minitab软件的运算效应及系数估计数据,可以计算出运转疲劳寿命的回归方程如下:

$$Y = 36643 + 95x_1 - 312x_2 + 4.03x_1x_2$$

表6 模型汇总的效应和系数的估计评价

S	$R-sq$	$R-sq(\text{调整})$	$R-sq(\text{预测})$
3206.06	92.64%	90.94%	87.88%

2.4 解释模型

首先通过Minitab软件导出优化模型的主效应图如图5所示。从图5可以看出,塑料齿轮的运转疲劳寿命与模具温度及保压压力成正相关,即运转疲劳寿命的均值在模具温度及保压压力因子取高水平值时比其低水平时的值要大。在此图中可以看出,模具温度的斜率明显大于保压压力,说明模具温度的主效果要比保压压力的主效果大,因此模具温度对响应运转疲劳寿命的影响更为显著。

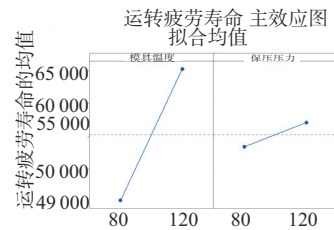


图5 运转疲劳寿命主效应图

在实际应用中,塑料齿轮的疲劳寿命越长越好,针对齿轮疲劳寿命的试验研究工艺参数,目的是得到高疲劳寿命产品,因此该响应运转疲劳寿命值为望大值。通过Minitab的等值线图及响应优化器分析,通过Minitab输出模型的等值线图,如图6所示。从图6可以看出疲劳寿命在模具温度趋近120℃、保压压力趋近120 MPa时最大,即图中深绿色部分。

通过Minitab中的响应优化器来实现最优化,优

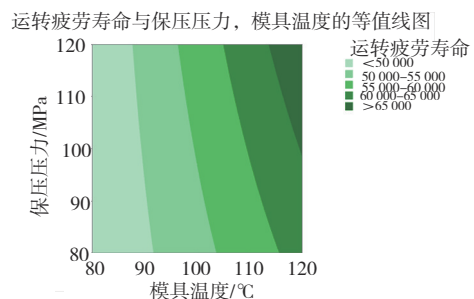


图6 响应变量等值线图

化目标运转疲劳寿命是望大型,因此,设望大为最优目标,经过计算后,得到如图7所示的最优图,图中表明当因子A为120℃,因子B取120MPa时,运转疲劳寿命会使平均运转疲劳寿命达到最大值68 670,该值为预计最佳值,试验结果中第15组齿轮寿命值达到70 352,比预计最大值要大,这是因为试验的误差性,该实验结果具有偶然性,偏大。优化图所得出的预计最大值是综合考虑所有试验结果,评估误差状况,并考虑了显著因子效应计算出来的。 d 值为0.702 86, d ($0 \leq d \leq 1$)为渴求函数最大值,越接近设定目标, d 值越接近1。

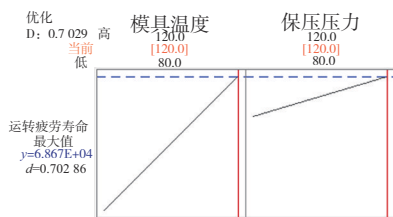


图7 优化图

2.5 试验验证

通过前文分析得到影响POM齿轮疲劳寿命的两个显著因子,为模具温度及保压压力。为验证优化后工艺对POM齿轮弯曲疲劳寿命的提升,对工艺优化前后分别设计验证试验,为减小试验误差带来的影响,分别设置三组相同条件试验,结果取平均值。

优化前按照实际注塑生产时的工艺进行试验,优化后模具温度为120℃,保压压力为120MPa。因注射速度及冷却时间均为非显著因子,为进行对比,优化后注射速度及冷却时间与优化前保持一致。试验条件列于表7。

表7 优化前后注塑生产工艺条件

工艺参数	优化前数值	优化后数值
模具温度/℃	80	120
保压压力/MPa	80	120
注射速度/(mm·s ⁻¹)	72	72
冷却时间/s	30	30

试验结果列于表8。优化前疲劳寿命平均值为43 136,优化后疲劳寿命的平均值达到68 724,比优化前提升约59%,且该值与优化图中的预计平均疲劳寿命的最大值68 670十分接近,经过优化后的工艺对于POM齿轮弯曲疲劳寿命的提升十分显著。所以经过优化后的工艺可以使POM齿轮的平均弯曲疲劳寿命达到预计最大值,可以有效提升POM齿轮弯曲疲劳寿命。

表8 优化前后疲劳寿命结果

组号	优化前疲劳寿命/周期	优化后疲劳寿命/周期
1	42 186	65 306
2	45 260	69 780
3	41 962	71 086

3 结论

基于DOE研究了注塑工艺对POM齿轮弯曲疲劳寿命的影响,通过Minitab分析得到疲劳寿命回归方程,及注塑工艺参数最优配置。

(1)基于DOE试验设计POM齿轮弯曲疲劳寿命试验,通过对试验结果的分析发现,注塑工艺中模具温度与保压压力对疲劳寿命影响显著,模具温度与保压压力越大,疲劳寿命周期越长。因此,可以通过提高模具温度及保压压力实现POM齿轮弯曲疲劳寿命的增加。

(2)通过对DOE数据模型的优化,分析得到运转疲劳寿命的回归方程: $Y = 36643 + 95x_1 - 312x_2 + 4.03x_1x_2$,通过Minitab的响应优化得到数据模型预计最佳值及最优工艺配置:模具温度120℃,保压压力120MPa。

(3)通过试验验证,经过DOE试验设计方法优化后的工艺,对于POM齿轮弯曲疲劳寿命的提升显著,经试验结果对比,优化前后疲劳寿命提升约59%。

参考文献

- [1] 佚名. 聚甲醛传动齿轮推动城市超轻车辆发展[J]. 国外塑料, 2011, 29(6):72.
Anon. Polyoxymethylene transmission gears promoting the development of urban ultra-light vehicles[J]. World Plastics, 2011, 29(6):72.
- [2] 王勇. 微型齿轮注塑成型工艺实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
Wang Yong. Experiment research on injection molding process of micro-gear[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [3] 冯玮. 塑料齿轮成型工艺参数优化及注塑模具设计[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2009, 31(5):744-747, 765.
Feng Wei. Process parameters optimum of injection molding and injection mould design of plastic gear[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition), 2009, 31(5):744-747, 765.
- [4] Nelson W. Accelerated life testing-step-stress models and data analyses[J]. IEEE transactions on reliability, 1980, 29(2):103-108.
- [5] Nelson W. Accelerated testing: statistical models[J]. Test Plans & Data Analysis Wiley, 1990, 56(8):50-52.
- [6] 卢玉明, 吴克坚, 曹正康, 等. 航空发动机体内减速器的加速等效试验技术[J]. 中国机械工程, 1994(2):46-48, 80.

- Lu Yuming, Wu Kejian, Cao Zhengkang, et al. Acceleration equivalent test technology of internal reducer of aeroengine[J]. China Mechanical Engineering, 1994(2):46–48, 80.
- [7] Kramberger J, Šraml M, Potrč I, et al. Numerical calculation of bending fatigue life of thin-rim spur gears[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71 (4). DOI: 10.1016/S0013-7944(03)00024-9.
- [8] 李国云, 秦大同. 风力发电机齿轮箱加速疲劳试验技术分析[J]. 重庆大学学报, 2009, 32 (11): 1 252–1 256.
- Li Guoyun, Qin Datong. Analysis of accelerated fatigue test technology for wind turbines gearbox[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1 252–1 256.
- [9] 石照耀, 王伟, 于渤, 等. 塑料齿轮加速疲劳寿命试验机研制及试验研究[J]. 机械传动, 2021, 45(12): 130–135.
- Shi Zhaoyao, Wang Wei, Yu Bo, et al. Design and experiment research of accelerated fatigue life tester for plastic gear[J]. Mechanical Transmission, 2021, 45(12): 130–135.
- [10] 王利霞, 王蓓, 申长雨. 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 (3): 62–66.
- Wang Lixia, Wang Bei, Shen Changyu. Influence of processing parameter on quality of plastic injection molded parts[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2003(3): 62–66.
- [11] 徐铖, 程智虎, 陆金桂. 聚酰胺66齿轮注塑工艺参数优化设计方法研究[J]. 机械传动, 2018, 42 (1): 69–72.
- Xu Cheng, Cheng Zhihu, Lu Jingui. Study on optimization design method of PA66 gear injection molding process parameter[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(1): 69–72.
- [12] 朱红萍, 王星星. 基于田口实验的水盒盖注塑工艺参数优化与模具设计[J]. 塑料科技, 2022, 50 (12): 80–84.
- Zhu Hongping, Wang Xingxing. Optimization of injection process parameters and mold design for water-box cover based on taguchi method[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(12): 80–84.
- [13] 马文博, 曹伟, 沈亚强, 等. 抑制聚甲醛齿轮塑件缩孔的工艺参数研究[J]. 模具工业, 2022, 48(3): 42–46.
- Ma Wenbo, Cao Wei, Shen Yaqiang, et al. Research on processing parameters of suppressing voids in POM injection molding gears [J]. Die & Mould Industry, 2022, 48(3): 42–46.
- [14] 张琦, 李源, 夏礼栋, 等. 注塑工艺对碳纤维增强聚酰胺10T复合材料力学性能的影响[J]. 中国塑料, 2023, 37(5): 83–89.
- Zhang Qi, Li Yuan, Xia Lidong, et al. Effect of injection process on mechanical performance of carbon-fiber-reinforced polyamide 10T composites[J]. China Plastics, 2023, 37(5): 83–89.
- [15] 许寒飞, 何煦, 李扬, 等. 正交试验设计(DOE)对熔融混炼工艺参数的优化研究[J]. 信息记录材料, 2021, 22(11): 10–12.
- Xu Hanfei, He Xu, Li Yang, et al. Study on optimization of melting and mixing process parameters by orthogonal design of experiments (DOE)[J]. Information Recording, 2021, 22(11): 10–12.
- [16] 唐振国, 张跃春, 左晃. 一种确定加速弯曲疲劳试验载荷的方法[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(3): 66–69.
- Tang Zhenguo, Zhang Yuechun, Zuo Huang. A method to identify the load of accelerate bending fatigue testing[J]. Machine Design and Research, 2015, 31(3): 66–69.