

模具结构和工艺参数对大芯数细长型连接器翘曲的影响

张 义¹ 张春辉² 张 磊² 韩培培²

(1 中国航天宇航元器件工程中心, 北京 100094)

(2 中航光电科技股份有限公司, 洛阳 471003)

文 摘 针对大芯数细长型连接器绝缘基座翘曲变形的问题,开展了玻纤增强聚苯硫醚(GFRPPS)绝缘基座成型过程翘曲机理分析,通过Moldflow仿真分析确定了最佳浇口位置和大小,基于成型工艺参数正交试验极差分析,确定了料筒温度、模具温度、注射压力等工艺参数对翘曲变形的影响,经生产验证得出了理论上较优的成型工艺组合参数。结果表明:模具设计时应采用单浇口一端进料的方式,可有效避免翘曲变形;成型过程中料筒温度和注射压力对翘曲变形的影响较大,生产过程中应结合产品的翘曲变形和表面外观状态,确定最优成型工艺参数;模具采用油温加热,通过调整静模和动模的温差,抵消壁厚不均造成的收缩,从而减少翘曲变形。

关键词 大芯数细长型连接器, GFRPPS, 模具结构, 工艺参数, 翘曲变形, Moldflow, 正交试验

中图分类号: V46

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.012

Influence of Mold Structure and Process Parameters on Warpage of Long and Thin Connectors With a Large Number of Cores

ZHANG Yi¹ ZHANG Chunhui² ZHANG Lei² HAN Peipei²

(1 China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100094)

(2 AVIC Jonhon Optronic Technology Co., LTD, Luoyang 471003)

Abstract Aiming at the problem of warping deformation of the insulating base of the slender-type connector with a large number of cores, the warping mechanism of the glass fiber reinforced polyphenylene sulfide (GFRPPS) insulating base during the molding process was analyzed. The optimal gate position and size were determined through Moldflow simulation analysis. Based on the range analysis of the orthogonal test of the molding process parameters, the influences of process parameters such as barrel temperature, mold temperature and injection pressure on warping deformation were determined. Through production verification, the theoretically superior combination parameters of the molding process were obtained. The results show that when designing the mold, the feeding method of one end and a single gate should be adopted, which can effectively avoid warping deformation. During the molding process, the barrel temperature and injection pressure have a significant impact on warping deformation. In the production process, the optimal molding process parameters should be determined in combination with the warping deformation and surface appearance state of the product. The mold is heated by oil temperature. By adjusting the temperature difference between the static mold and the moving mold, the shrinkage caused by uneven wall thickness is offset, thereby reducing warping deformation.

Key words Large-core thin and long connector, GFRPPS, Mold structure, Process parameters, Warpage deformation, Moldflow, Orthogonal test

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-06-27

基金项目: 国产大尺寸高密度印制电路连接器基座防翘曲变形工艺及应用技术攻关(1807WR0019)

第一作者简介: 张义, 1982年出生, 学士, 高级工程师, 主要从事宇航用元器件质量保证工作。E-mail: zy_pb@163.com

通信作者: 张春辉, 1986年出生, 硕士, 工程师, 主要从事宇航用元器件产品的开发工作。E-mail: zhangchunhui0618@163.com

0 引言

随着航天电子产品向高载荷、大容量和高性能方向发展,高密度、窄间距化及大芯数细长型连接器也随之应运而生。大芯数细长型连接器一般指节点间距不大于1.905 mm、芯数不少于200芯、长度在100 mm以上(最大长:宽:高=22.9:1:1.5)^[1]的连接器。GFRPPS具有耐高温、耐辐射、电性能优良、成型加工性能好等特点,因此以GFRPPS为绝缘材料加工成型的大芯数细长型连接器已被广泛选用在航天、兵器等应用环境较为苛刻的领域。

大芯数细长型连接器(简称连接器)为较细较长结构,绝缘基座是连接器的一个零件,在注射成型过程中,模具结构、成型工艺参数最小窗口^[2-6]等因素会导致绝缘基座收缩不均匀^[7-10],诱发内部残余应力的产生,在内部残余应力^[11]作用下使绝缘基座形位误差过大,而连接器直接的表现形式即为翘曲变形,翘曲变形导致连接器的力学性能和电气性能的下降(如插拔力变大、电接触长度缩短等)^[3],甚至严重情况下不能正常插合使用^[4-6]。这些问题已成为大芯数细长型连接器国产化研制与应用的瓶颈问题,并对航天型号单机电装使用及在轨的长期可靠性带来隐患和不确定性因素。

国内外在影响绝缘基座翘曲变形方面进行了相关研究,主要从材料特性、仿真分析、模具结构的设计等方面进行。雷永涛等^[1]通过机理分析、进口与国产原材料的对比试验,提炼出了影响绝缘基座翘曲变形的GFRPPS关键材料特性;杨忠坤等^[12]通过Moldflow仿真分析得出绝缘基座局部结构、工艺温度设置不合理导致绝缘基座产生收缩不均及冷却不均,引起翘曲变形量较大的结论;关兴举等^[13]通过对浇注系统中的流道类型和尺寸、进浇点设置等方面进行合理设计与优化,避免由于冷却不均导致绝缘基座的尺寸收缩和翘曲变形。

本文以某国产宇航用CRM362(206芯)型连接器绝缘基座为研究对象,以最大翘曲量作为质量指标,采用Moldflow有限元分析软件并结合生产验证分析确定最佳工艺参数及模具结构,拟为大芯数细长型连接器绝缘基座成型过程中翘曲变形的解决提供依据。

1 注射成型过程翘曲机理分析

1.1 材料各向异性导致的不同方向收缩差异

绝缘基座材料GFRPPS为耐高温的结晶性高分子材料。在分子材料的应用过程中通常加入各种无机填充材料(如纤维等)以提高材料强度的目的。当高分子熔融流动时,玻璃纤维等长径比较大的填充材料发生平行于流动方向的取向,该取向对树脂的收缩产生限制,导致低收缩率材料在平行于流动方向的分布更多,因此该方向收缩率的降低更显著,

如图1所示。在流动方向发生取向之后,分子链在与流动方向垂直的方向上,变得更加紧密,因此更容易发生结晶收缩,从而使平行于流动方向和垂直于流动方向的收缩产生差异,这种不均匀收缩差异导致了残余应力的产生。

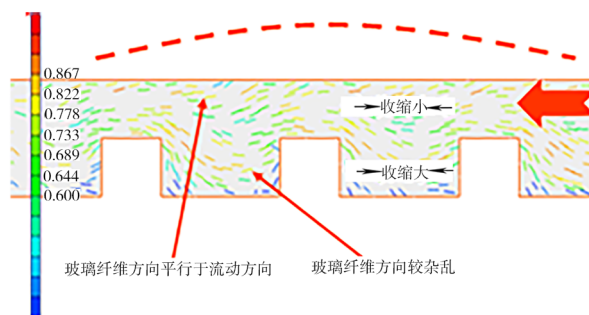


图1 玻璃纤维分布图

Fig. 1 Glass fiber distribution diagram

1.2 不同区域温度导致不同的收缩差异

绝缘基座在注射成型后的冷却阶段,受模具加热方式和零件结构等的影响,各区域温度不均匀,温度高的区域收缩变形大,温度低的区域收缩变形小,见图2。绝缘基座不同区域的温度差异引起不均匀收缩,进而产生残余应力。

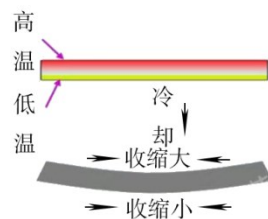


图2 冷却不均零件的变形情况

Fig. 2 Deformation of uneven cooling parts

1.3 绝缘基座壁厚方向上收缩率的差异

绝缘基座因壁厚的差异造成冷却速率的不同,厚壁冷却慢,薄壁冷却快,从而导致不同壁厚收缩的差异。图3所示的零件结构壁厚不均匀,零件较厚部位冷却速度慢,高分子有更多的时间进行有序排列,结晶度较大,因此收缩程度更大,而零件较薄部位,其冷却速度较快,收缩程度小,这种壁厚方向上不均匀收缩产生了残余应力。



图3 壁厚不均零件的变形情况

Fig. 3 Deformation of parts with uneven wall thickness

2 注射成型模具结构分析及设计优化

2.1 Moldflow仿真分析

Moldflow是基于科学的数学模型进行有限元分析宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第3期

析的软件,可以对浇道口、溢料槽、流道等相关参数进行辅助优化设计,并预测产品的翘曲变形趋势和大小,从而提高模具设计质量。

利用 Moldflow 软件对绝缘基座进行仿真分析,分析不同浇口开设位置对翘曲变形的影响,结果见图4。

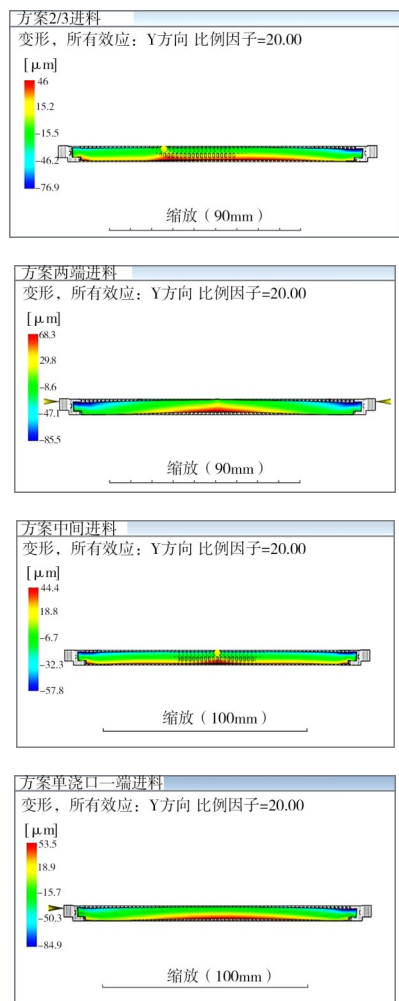


图4 不同浇口下的翘曲变形仿真图
Fig. 4 Simulation diagram of warpage deformation under different gates

由图4可以看出,四种浇口方式分别为2/3处进料、两端进料、中间进料、单浇口一端进料;四种浇口方式下的翘曲变形量分别为19、72、25和32 μm。其中2/3处进料和中间进料的绝缘基座翘曲变形最小,但中间部位壁厚太薄,不适合设置浇口。根据仿真分析结果,绝缘基座采用单浇口一端进料,这样符合浇口位置设置在产品壁厚区域的原则,GFRPPS内的玻璃纤维排布尽量均匀,有利于GFRPPS充填,保证产品的翘曲度在控制范围内。

2.2 注射成型模具优化设计

基于 Moldflow 仿真分析结果,结合矩形细长形绝缘基座模具浇口设计规范规定的模具设计要求,绝缘基座的模具设计应从浇口位置和大小、模具加

热方式等方面进行优化。

2.2.1 模具浇口位置和浇口尺寸优化

浇口的开设位置直接决定了熔融塑料在模具型腔中的流动取向,基于 Moldflow 仿真分析结果,绝缘基座较优的浇口位置为单浇口一端进料。因绝缘基座长度较长(149.4 mm),孔间壁厚较薄,材料在流动过程中阻力较大,浇口太小时,熔融的GFRPPS材料在浇道口封闭之前不易填满模具腔体,从而引起翘曲变形,因此,结合绝缘基座侧端面的尺寸(6.5 mm×5 mm)和矩形细长绝缘基座模具浇口设计规范中浇口大小设置的原则,即浇口长宽尺寸应为所在面长宽尺寸的60%左右,将浇口尺寸设定为4 mm×3 mm,见图5。

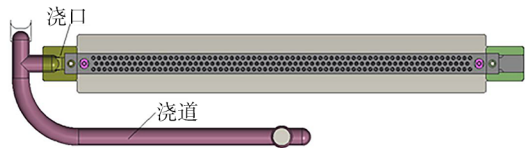


图5 模具浇口图
Fig. 5 Mold gate drawing

2.2.2 模具流道优化

绝缘基座模具设计规范中明确一级流道有效内切圆为Φ5~6 mm,二级流道有效内切圆为Φ4~5 mm,为避免注射过程中材料在流道的压力损失过大,应尽可能加大流道直径,因此绝缘基座的模具在原有的模具基础上进行优化,确定一级流道有效内切圆为Φ6 mm,二级流道有效内切圆为Φ5 mm,在两级流道相交处,一级流道往前延伸约10 mm,避免料流前端冷料直接冲击浇口。

2.2.3 模具加热方式

模具加热方式有电加热和油温加热,电加热温度波动大,温度不均匀,易造成注射成型的绝缘基座的不同位置在冷却收缩不均匀时产生翘曲变形,因此在模具优化设计时,为保证模具温度均匀、温度梯度小,在模具上开设油路调节模具温度,油路应均匀排布在型腔周围,见图6。

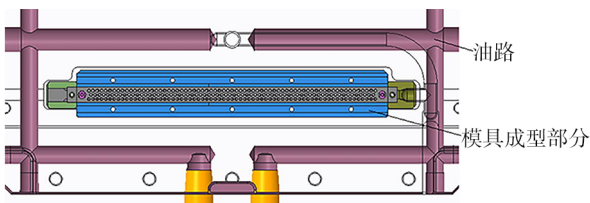


图6 绝缘基座模具油路排布图
Fig. 6 The oil circuit layout diagram of the insulating base mold

3 试验

3.1 注射成型工艺参数分析

3.1.1 料筒温度影响

料筒温度越高,熔体流动性越好,在模腔流动时分子间取向不一致的现象减少,从而降低了残余应

力;料筒温度越低,熔体的黏度就会增大,在模腔流动时分子间取向不一致的现象增加,从而产生过大的残余应力,导致绝缘基座翘曲变形;但料筒温度过高,容易使GFRPPS降解,绝缘基座冷却后的收缩量会增大,这也导致翘曲变形量的增大。

3.1.2 模具温度影响

注射过程中模具温度较低,会造成熔融材料快速降温,黏度提高、流动性急剧下降,剪切力变大,使绝缘基座产生较大的残余应力;提高模具温度,有利于降低绝缘基座残余应力,但过高的模具温度不能使绝缘基座及时冷却定型,影响生产效率。对于壁厚不均匀的绝缘基座可通过调整动静模的温度差,使其产生的收缩速率差来抵消壁厚不均造成的收缩,从而减小翘曲变形。

3.1.3 注射压力的影响

注射压力是保证绝缘基座成型良好的重要参数,注射压力过低会造成绝缘基座缩坑等外观缺陷,提高注射压力有利于熔体充模,增加绝缘基座的密度,减少收缩,提高绝缘基座的尺寸稳定性,但绝缘基座残余应力也随之增加。因此为了降低绝缘基座的残余应力,减小翘曲变形,在调试中应该选择合适的注射压力。

3.1.4 注射速度的影响

注射速度会影响绝缘基座中的分子排列方向及表面状态,对于大尺寸高密度绝缘基座,孔间壁厚较薄,只有0.3 mm左右,如果注射速度太慢,料流还未充满模腔就已经开始分层凝固,导致成型不良或成型后两端收缩差异较大。

3.1.5 保压压力的影响

保压压力小,会造成绝缘基座部分缺胶,绝缘基座致密度不够,局部收缩变大,绝缘基座变形;保压压力过大,造成浇口附近致密度过大,该部分收缩率变小,其他地方收缩率相对较大,从而造成收缩不均匀,产生翘曲变形。

通过以上对翘曲变形影响显著的成型工艺参数的分析可以看出,只有对这些工艺参数进行优化和严格的控制,才能得到残余应力小、翘曲变形小的绝缘基座。

3.2 正交试验

为了得到残余应力小、翘曲变形小的绝缘基座,需要在现有工艺参数基础上进行优化研究。采用正交试验的方法,不仅能大幅度地减少试验次数,还可以增加试验的可靠与准确性。Moldflow 软件可以精确高效地模拟注射过程,因此选取对翘曲变形影响显著的料筒温度、模具温度等五项参数开展试验,工艺参数优化方案如图7所示。

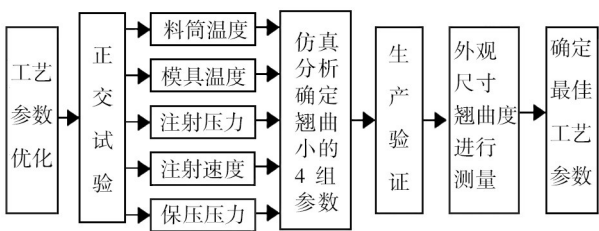


图7 工艺参数优化改进方案

Fig. 7 Optimization and improvement scheme of process parameters

3.2.1 正交试验方案及结果

正交试验确定的因素为料筒温度、模具温度、注射压力、注射速度和保压压力,分别用A、B、C、D、E表示;水平数为4。因孔间壁厚较薄,为了减小GFRPPS材料的流动阻力,设置料筒温度范围为280~310℃。模具温度、注射压力、注射速度和保压压力依据实际生产的正常工艺参数进行设置。设置的绝缘基座因素水平表见表1,按 $L_{16}(4^5)$ 正交表,安排试验及仿真分析结果见表2。

表1 影响因素正交试验设计表

Tab. 1 Orthogonal test influencing factors design table

水平	因素				
	A料筒温度/℃	B模具温度/℃	C注射压力/MPa	D注射速度/mm·s ⁻¹	E保压压力/MPa
1	280	125	12	80	4.5
2	290	135	13	90	5.5
3	300	145	14	100	6.5
4	310	155	15	110	7.5

表2 模拟试验结果

Tab. 2 Simulation test results

试验号	料筒温度/℃	模具温度/℃	注射压力/MPa	注射速度/mm·s ⁻¹	保压压力/MPa	翘曲变形量/μm
1 [#]	280	125	12	80	4.5	65
2 [#]	280	135	13	90	5.5	67
3 [#]	280	145	14	100	6.5	58
4 [#]	280	155	15	110	7.5	78
5 [#]	290	125	13	100	7.5	51
6 [#]	290	135	12	110	6.5	48
7 [#]	290	145	15	80	5.5	54
8 [#]	290	155	14	90	4.5	54
9 [#]	300	125	14	110	5.5	22
10 [#]	300	135	15	100	4.5	27
11 [#]	300	145	12	90	7.5	37
12 [#]	300	155	13	80	6.5	22
13 [#]	310	125	15	90	6.5	53
14 [#]	310	135	14	80	7.5	48
15 [#]	310	145	13	110	4.5	41
16 [#]	310	155	12	100	5.5	28

3.2.2 试验结果分析

正交试验结果极差分析见表3。可见,取出各因素对应的均值最小的水平,即在该水平条件下翘曲变形量最小。从而得出在仿真试验所取工艺参数范围内,为使翘曲变形量最小,最优工艺参数组合为 $A_3B_4C_1D_3E_2$,其次是 $A_4B_2C_2D_1E_3$ 、 $A_2B_3C_3D_4E_1$ 。对以上极

差分析所得的三组较优的工艺参数组合 $A_3B_4C_1D_3E_2$ 、 $A_4B_2C_2D_1E_3$ 和 $A_2B_3C_3D_4E_1$ 进行二次仿真分析,翘曲变形量分别为23、37、57 μm ,将其变形量与正交试验中的变形量进行比较,确定变形量较小的四组工艺参数组合见表4。

表3 试验结果极差分析
Tab. 3 Test results range analysis table

因素	K_1	K_2	K_3	K_4	k_1	k_2	k_3	k_4	极差R
A 料筒温度	0.268	0.207	0.108	0.170	0.067	0.052	0.027	0.043	0.04
B 模具温度	0.191	0.190	0.190	0.182	0.048	0.048	0.048	0.046	0.002
C 注射压力	0.016 8	0.018 1	0.018 2	0.022 2	0.004 2	0.004 5	0.004 6	0.005 6	0.001 4
D 注射速度	0.189	0.211	0.164	0.189	0.047	0.053	0.041	0.047	0.012
E 保压压力	0.018 7	0.017 1	0.018 1	0.021 4	0.004 7	0.004 3	0.004 5	0.005 4	0.001 1

表4 翘曲变形较小的四组工艺参数
Tab. 4 Four groups of process parameters with small warpage deformation

组号	料筒温度 $^{\circ}\text{C}$	模具温度 $^{\circ}\text{C}$	注射压力 MPa	注射速度 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	保压压力 MPa	翘曲变形量/ μm
1	300	125	14	110	5.5	22
2	300	155	13	80	6.5	22
3	300	155	12	100	5.5	23
4	300	135	15	100	4.5	27

3.3 生产验证

采用仿真试验得出的四组较优的工艺参数组合进行生产验证,因仿真试验和实际生产存在一定的出入,在对这四组较优的工艺参数组合进行验证时,需结合绝缘基座翘曲变形量、外观、尺寸等综合评估,适当对这些参数进行调整。采用表4中仿真优化后翘曲变形量较小的的四组工艺参数进行生产验证,其结果见图8。

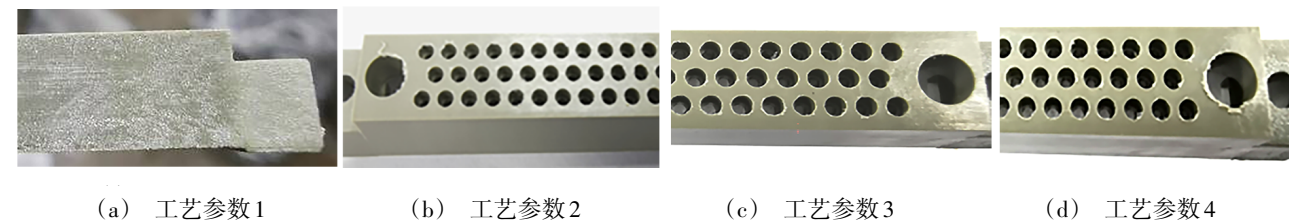


图8 不同工艺参数注射对比试验

Fig. 8 Injection molding contrast test with different process parameters

比较四组工艺参数下注射后绝缘基座的外观和翘曲变形量,具体结果见表5,四组参数下翘曲变形量差异不大,翘曲变形方向一致,具体见图9。

表5 四组工艺参数下绝缘基座的外观和翘曲变形量

Tab. 5 The appearance and warping deformation of the insulating base under four sets of process parameters

组号	翘曲变形量/ μm	绝缘基座表面状态
1	103 ~ 125	表面状态粗糙
2	105 ~ 128	个别孔口有毛刺
3	105 ~ 128	外观状态良好
4	102 ~ 126	孔口毛刺较多



图9 绝缘基座翘曲方向示意图

Fig. 9 Schematic diagram of warping direction of insulation base

从以上生产验证结果看出,工艺参数1成型的绝缘基座由于模具温度较低,绝缘基座表面比较粗糙,尤其在成型末端更严重;工艺参数2成型的绝缘基座个别孔口有毛刺;工艺参数3成型的绝缘基座外观状态良好;工艺参数4因注射压力较大,成型后的绝缘基座孔口存在较多的毛刺。目前通过四组参数的对比验证,工艺参数3的整体效果较好。针对该组参数,需要调整模具动模和静模的温差,即在GFRPPS材料推荐的模具温度范围内,调整静模温度 160°C ,动模温度 140°C ,使其产生的收缩速率差来抵消壁厚不均造成的收缩,从而减少翘曲变形。

通过对较优的工艺参数3进一步优化调整,控制模具静模温度 160°C 、动模温度 140°C ,料筒温度 300°C 、注射压力 12 MPa 、注射速度 100 mm/s 和保压压力 5.5 MPa ,成型后的绝缘基座表面光滑,无局部缩坑、无成型不良的现象,翘曲变形量控制在 $45\sim90\text{ }\mu\text{m}$ 。

4 结论

(1) Moldflow 仿真分析对大芯数细长型连接器模具设计有一定的指导意义,此类产品模具设计时应采用单浇口一端进料的方式,可有效避免翘曲变形。

(2) 成型工艺参数中料筒温度和注射压力对翘曲变形的影响较大,生产过程中应结合产品的翘曲变形和表面外观状态,确定最优成型工艺参数。

(3) 模具采用油温加热,使模具温度达到材料的结晶要求,可通过调整静模和动模的温差,如将壁厚较厚收缩大的一侧模具温度降低至 140℃,将收缩小的一侧模具温度提高至 160℃,使其产生的收缩速率差来抵消壁厚不均造成的收缩,从而减少翘曲变形。

参考文献

- [1] 雷永涛,张静静,王旭. PPS 材料特性对绝缘体翘曲变形的影响及控制措施[J]. 塑料机电元件,2018,38(6):39-43.
- LEI Y T, ZHANG J J, WANG X. PPS the influence of material properties on the warpage deformation of insulators and control measures [J]. Electromechanical Components, 2018, 38(6):39-43.
- [2] 李吉泉,李德群,郭志英. 面向翘曲变形的注塑模具浇口位置优化研究[J]. 电加工与模具,2007(2):47-49.
- LI J Q, LI D Q, GUO Z Y. The Research on gate location optimization of injection molding based on warpage [J]. Electromachining & Mould, 2007(2):47-49.
- [3] 骆燕燕,王振,李晓宁,等. 电连接器热循环加速试验与失效分析研究[J]. 兵工学报,2014,35(11):1908-1913.
- LUO Y Y, WANG Z, LI X N, et al. Accelerated thermal cycling test and failure analysis of electrical connectors [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(11):1908-1913.
- [4] 王海雄,王军力,黄启欣. 电吹风手柄后盖逆向工程建模与模具设计[J]. 中国塑料,2018,32(11):131-135.
- WANG H X, WANG J L, HUANG Q X. Reverse engineering modeling and mold design of handle back cover of hair dryer[J]. China Plastics, 2018, 32(11):131-135.
- [5] 盘承军,李炜,杨达飞. 基于正交试验法和神经网络的上饰板注塑工艺优化[J]. 塑料,2018,47(3):92-97.
- PAN C J, LI W, YANG D F. Optimization of injection molding process for upper trim based on orthogonal experiment method and neural network[J]. Plastics, 2018, 47(3):92-97.
- [6] 孙首群,张书魁,黄梅仙. 基于信噪比及灰关联度的注塑工艺参数优化[J]. 塑性工程学报,2016,23(1):141-145.
- SUN S Q, ZHANG S K, HUANG M X. Optimization of injection molding process parameters based on signal-to-noise ratio and gray correlation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23(1):141-145.
- [7] 张红英,欧阳八生. 注塑成型工艺中的翘曲变形[J]. 模具技术,2016(3):46-51.
- ZHANG H Y, OUYANG B S. The warping deformation in injection molding process[J]. Die and Mould Technology, 2016(3):46-51.
- [8] 贾林玲. 基于逆向工程和 Moldflow 的玩具兵人躯干设计及注塑成型预测研究[J]. 塑料科技,2016(6):66-71.
- JIA L L. Design and prediction of injection molding of toy soldier torso based on reverse engineering technology and moldflow [J]. Plastics Science and Technology, 2016(6):66-71.
- [9] 王晓花,陈文琳,周香. 基于正交法的薄壳类注塑产品翘曲变形控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2015(11):1468-1471.
- WANG X H, CHEN W L, ZHOU X. Warpage controls of thin shell injection parts based on Taguchi method [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015(11):1468-1471.
- [10] 刘苗苗,安琪,杨卫民,等. 基于正交法的塑料储罐封头注塑工艺参数的优化[J]. 塑料科技,2016(1):90-92.
- LIU M M, AN Y, YANG W M, et al. Parameter optimization for plastic tank head in injection molding based on orthogonal method [J]. Plastics Science and Technology, 2016(1):90-92.
- [11] NELSON C. BALDWIN. Plastics designing & processing. Thermal Stresses, 1974, 25:12-23.
- [12] 刘琼. 塑料注射 Moldflow 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- LIU Q. Plastic injection moldflow practical tutorial [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.
- [13] 金杨福,钱欣. Moldflow Insight2010 注射成型分析基础[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- JIN Y F, QIAN X. Moldflow Insight 2010 fundamentals of injection molding analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.