

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.011

气体辅助注射成型时间参数的 CCD 响应面法多目标优化

任青海¹, 刘秋珍², 耿铁³

(1. 安阳职业技术学院机电工程学院, 河南安阳 455000; 2. 郑州金泰制罐有限公司, 郑州 450007;

3. 河南工业大学机电工程学院, 郑州 450007)

摘要: 相比于传统塑料注射成型, 延迟时长和注气时长是气体辅助注射成型(简称气辅成型)特有的工艺参数, 增加了气辅成型的复杂性。为了精确设计延迟时长和注气时长的取值, 获得理想的气体穿透效果和气指幅度, 以具有典型气辅结构的塑件为研究对象, 首先采用气辅成型全三维 CAE 研究了延迟时长和注气时长对气辅成型质量的影响。结果表明, 适当增加延迟时长, 可以减小或消除气指缺陷, 提高气体穿透深度行程, 但过长的延迟时长会导致“短射”, 过短的延迟时长则会导致严重的气指缺陷; 增加注气时长可以提高气体穿透效果, 减少表面缺陷, 降低内应力和翘曲变形, 但注气时长过长时, 气指内部的高压氮气会导致其撕裂而形成严重的气指缺陷, 更甚者会使气辅塑件膨胀而报废。采用 CCD 响应面法进行多目标优化, 精确设计了延迟时长和注气时长的取值, 延迟时长为 4 s、注气时长为 10.37 s。通过 CAE 分析和成型试验验证, 精确取值下成型的气辅塑件的气体穿透效果和气辅成型质量良好, 提高了气辅成型质量和效率, 可用于气辅成型实际生产。

关键词: 延迟时长; 注气时长; 气体辅助注射成型; 响应面法; 多目标优化

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0069-06

Multi-objective optimize gas-assisted time parameters with CCD response surface method

REN Qinghai¹, LIU Qiuzhen², GENG Tie³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China;

2. Zhengzhou Jintai Canmaking Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract : Compared to traditional plastic injection molding, delay time and gas injection time are unique parameters for gas-assisted molding, which increases the complexity of gas-assisted molding. In order to accurately design the values of delay time and injection time, and achieve ideal gas penetration effect and gas finger amplitude, the plastic part with typical gas-assisted structures were taken as research object. Firstly, the effects of delay time and gas injection time on the quality of gas-assisted molding were studied by gas-assisted molding full three-dimensional CAE. The results show that properly increasing the delay time can reduce or eliminate the gas finger defects and improve the penetration length, but too long delay time will lead to "short shot", and too short delay time will lead to serious gas finger defects. Increasing the gas injection time can improve the gas penetration effect, reduce surface defects, and reduce internal stress and warping deformation. However, if the gas injection time is too long, the high-pressure nitrogen part inside the gas finger will tear it to form serious gas finger defects, and even cause the plastic part to expand and become scrapped. Then, the CCD response surface method was used for multi-objective optimization, and the optimal values of delay time and gas injection time were obtained as 4 s and 10.37 s, respectively. The optimized values are verified through CAE and experiments, and the gas penetration effect and gas assisted molding quality under the optimized values are good, which improves the quality and efficiency of gas-assisted molding and can be used for actual production of gas-assisted molding.

Keywords : delay time ; gas injection time ; gas-assisted injection molding ; response surface method ; multi-objective optimization

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375143), 河南省高等学校重点科研项目(23B460021), 郑州市创新领军团队项目

通信作者: 耿铁, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为材料成型过程的数值模拟和工艺优化

收稿日期: 2024-02-24

引用格式: 任青海, 刘秋珍, 耿铁. 气体辅助注射成型时间参数的 CCD 响应面法多目标优化[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 69-74.

REN Qinghai, LIU Qiuzhen, GENG Tie. Multi-objective optimize gas-assisted time parameters with CCD response surface method[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 69-74.

气体辅助注射成型(简称气辅成型)是一种新型的塑料成型技术。相比于传统的塑料注射成型,气辅成型过程中增加了注入高压惰性气体(实际生产中常用氮气)工艺,从而成型出内部空芯的结构,获得质量轻、强度高的塑件^[1-4]。因此,气辅成型技术从结构上提高了塑件的强度,同时也减少了塑料材料的消耗,从而能够有效减少碳排放。由于气辅成型过程中引入了注入高压氮气环节,所以注入时间点、注入时长等因素都决定了成型质量^[4-6]。延迟时长决定了在成型过程中注入高压氮气的时间点,而注气时长决定了注入多长时间。延迟时长和注气时长对成型质量产生影响的同时,二者之间也相互作用影响成型质量。任清海等^[3-4,8]从单因素影响的角度分别定性研究了延迟时间和注气时间对气体穿透效果的影响情况。Li等^[6]从一次气体穿透及二次气体穿透的角度研究了气辅成型工艺参数的定性影响。肖清武等^[7]研究了延迟时间和气体保压时间对制品的翘曲与凹痕的影响;黄淑慧等^[9]着重研究了延迟时间与内层熔体和气体穿透率之间的关系。周海迎等^[10]重点研究了延迟时间是影响残余壁的主要参数。王子剑等^[11]采用BBD二次回归响应面试验和方差分析对气辅成型的6个工艺参数进行了精准优化设计,在一定程度上指导了实际成型生产中的工艺参数规划。总之,从这些相关研究文献来看,研究气辅成型时间参数主要是研究其对气辅制品某一表征特性的影响,且主要是定性的,而鲜有定量的研究,即使文献[11]进行了工艺参数的设计取值,但在精确程度的预设计上还存在较大差距,所以这方面的研究需要进一步深入并加强。因此,笔者采用气辅成型全三维CAE和成型试验先研究了延迟时长和注气时长各自对气辅成型质量的影响,再在此基础上进行Central Composite Design (CCD)响应面方差分析^[12-16],并多目标优化,精确设计工艺参数,为提高成型生产的一次成功率,有效降低碳排放提供依据。

1 研究对象及气辅成型CAE数学模型

气辅成型制品通常具有半圆形截面的气道,或者借助其加强筋、壁厚区域作为气道等典型结构。为了使研究结果具有普适性,以图1所示的几何结构的塑料制品为研究对象,以广泛用于汽车、家电及日用品领域的透明塑料聚丙烯(PP)为研究材料。根据图1所示的结构和尺寸在Solid Works中设计几

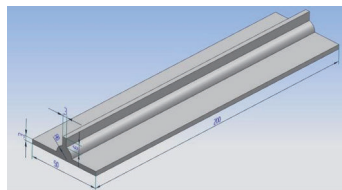


图1 气辅塑件的3D模型和尺寸(单位:mm)

Fig. 1 3D geometric model and size of experimental product (unit:mm)

何模型,转换成STL格式文件导入Moldflow API/3DGAS进行离散网格模型并全三维CAE分析,其中网格模型由11.97万个图2所示的四节点四面体网格单元构成。气辅成型过程全三维数值模拟CAE控制方程^[2-3,7]见式(1)~式(3)。

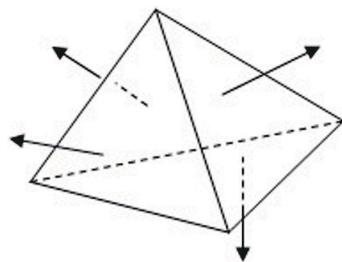


图2 四面体单元示意图

Fig. 2 4-node tetrahedral element

$$\operatorname{div} \vec{V}=0 \quad (1)$$

$$\operatorname{div} P=\operatorname{div}[\tau] \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt}=K(\operatorname{div} \vec{V})^2+\eta \bar{\gamma}^2 \quad (3)$$

式中: $\vec{V}$ 为速度矢量; P 为压力; ρ 为熔体密度; T 为温度; η 为黏度; t 为时间; C_p 为比热容; $\bar{\gamma}$ 为剪切速率。

2 延迟时长对气辅成型质量的影响

相比于塑料注射成型,延迟时长是气辅成型特有的工艺参数之一。延迟时长的长短对气辅成型质量有着显著的影响。因此,在保持其他工艺参数不变(熔体预注射量85%、熔体温度240℃、注气压力3 MPa、模具温度40℃、注气时长10 s)的条件下,延迟时长分别取值0,1,2,3,4,5 s进行CAE分析和成型试验。

图3和图4为延迟时长分别取0,1,2,3,4,5 s时的数值模验结果以及延迟时长与气体穿透行程之间的影响曲线。从两图可以看出,随着延迟时长增加,气体穿透行程在4 s时达到最大,随后又急剧减小。表明适度增大延迟时长能增强气体的穿透效果,但高压氮气穿透熔体形成的中空气道直径较小。这是因为随着延迟时长的增大,充填的熔融塑料有较长的时间冷却,形成较厚的凝固层,从而增

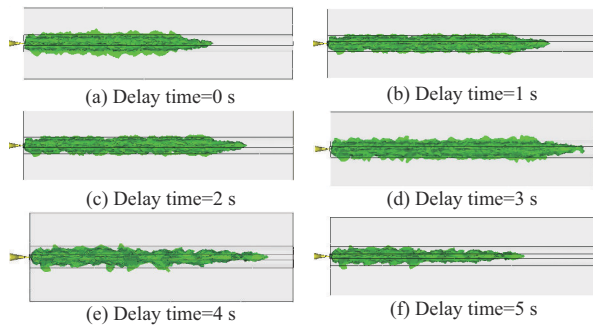


图3 延迟时长分别取值0,1,2,3,4,5 s时的CAE分析结果

Fig. 3 CAE results for delay times of 0, 1, 2, 3, 4, 5 s, respectively

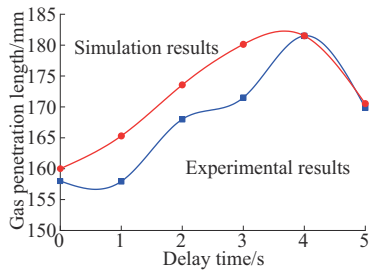


图4 延迟时长与气体穿透行程的影响曲线

Fig. 4 Relationship between delay time and gas penetration length

加了高压氮气向四周穿透熔体的阻力迫使高压气体有更多的压力穿透熔融状态的熔体芯部形成直径细长气体穿透行程。但延迟时长大到一定程度,即在高压氮气进入熔体之前,熔融的塑料已经冷却形成较厚的凝固层,阻止了高压气体的穿透,穿透行程很短,造成“短射”,不符合气辅成型质量要求。当延迟时长太短时,熔融的塑料还没有来得及冷却形成一定厚度的凝固层,这使得高压气体进入熔体后缺少凝固层的约束而任意向四周穿透并快速泄压,这会造成气体穿透行程很短,也不符合气辅成型质量要求。

图5为延迟时长与最大气指长度之间的影响曲线关系。从图5可以看出,随着延迟时长增加,最大气指长度在逐步减小,说明增大延迟时长能减轻气指缺陷。这是因为随着延迟时长的增大,充填的熔融塑料有较长的时间冷却,形成较厚的凝固层,从

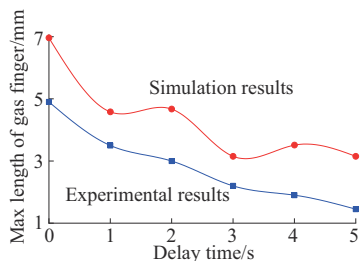


图5 延迟时长与最大气指长度的影响曲线

Fig. 5 Relationship between delay time and max length of gas finger

而增加了高压氮气向四周穿透熔体的阻力,减轻了气指缺陷的形成。而延迟时长太短时,熔融的塑料还没有来得及冷却形成一定厚度的凝固层,这使得高压气体进入熔体后缺少凝固层的约束规范而任意向四周穿透并快速泄压,造成高压气体穿破气道区域而进入壁厚较薄的部位形成严重的气指缺陷。所以,合理并适度增大延迟时长才能成型出气体穿透行程长而气指缺陷小的高质量气辅制品。

3 注气时长对气辅成型质量的影响

相比于传统塑料注射成型,注气时长也是气辅成型特有的工艺参数之一。注气时长的长短决定了注入熔体内部高压氮气的时间长短和多少,对气辅成型质量有着显著的影响。因此,在保持其他工艺参数不变的条件下(熔体预注射量85%、延迟时长4 s、熔体温度240 °C、注气压力3 MPa、模具温度40 °C),注气时长分别取值5, 10, 15, 20, 25 s进行CAE分析和成型试验。

图6和图7为注气时长分别取5, 10, 15, 20, 25 s时的数值模验结果以及注气时长与气体穿透行程之间的影响曲线。从两图可以看出,随着注气时长的增加,气体穿透行程逐步增长,但是在20 s到25 s这段时间内,气体穿透行程的增长变得平缓,甚至出现不变的情况。这是因为随着注气时长的增加,

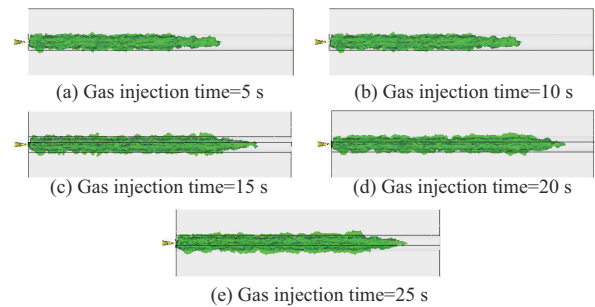


图6 注气时长分别取值5, 10, 15, 20, 25 s时的CAE结果

Fig. 6 CAE results for gas injection times of 5, 10, 15, 20, 25 s, respectively

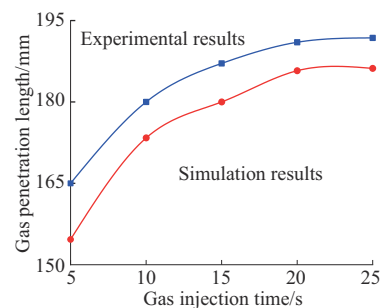


图7 注气时长与气体穿透行程的影响曲线

Fig. 7 Relationship between gas injection time and gas penetration length

有更多的高压氮气进入熔体内部而置换出更多的熔体并有更长的时间来推动熔体向前穿透扩展而形成更大的气体穿透行程。然而注气时长增大到一定程度后,熔融的塑料从外到内逐步凝固,凝固的塑料阻止了气体的进一步穿透,所以气体穿透行程的增长就变得比较平缓,当凝固层达到一定厚度时就会出现高压气体无法推动穿透凝固的熔体而停止气体穿透行为。另外,长时间地注入高压氮气在一定程度上对熔体的冷却定型从内部起到了保压补缩的作用,实现了内外双面成型,进而抑制气辅成型塑件表面收缩的产生,降低了内应力,减少了表面缺陷和翘曲变形。

图8为注气时长与最大气指长度之间的影响曲线。从图8可以看出,随着注气时长的增加,最大气指长度也逐步增长,在20~25 s这段时间内,最大气指长度的增长也变得平缓。这是因为随着注气时长的增加,进入熔体内部的高压氮气的体积增加并且具有充足的时间向熔体前方穿透排空,同时也会在气道两侧穿破气道区域形成严重的气指缺陷,另外,随着时间的延长,熔体逐步冷却,凝固层加厚,使得高压气体进一步撕裂气指空间而加重气指缺陷程度。然而注气时长增大到一定程度后,熔融的塑料从外到内逐步凝固,凝固的塑料阻止了气体的进一步穿透,所以最大气指长度的增长就变得比较平缓。

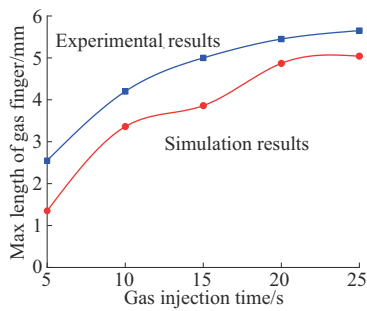


图8 注气时长与最大气指长度的影响曲线

Fig. 8 Relationship between gas injection time and max length of gas finger

但是注气时长过长的话,虽然可以获得长的气体穿透行程和少的气指缺陷,但是在成型结束开模后高压氮气来不及完全释放,而模具型腔壁对塑件的作用力因开模而消失,从而使得气道内高压氮气向外施压,使得气辅成型塑件发生膨胀而报废,如图9所示。

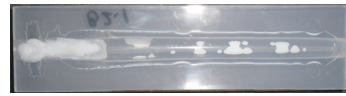


图9 注气时长过长而发生膨胀照片

Fig.9 Excessive gas injection time leads to expansion

4 CCD 响应面法多目标优化并试验验证

气体穿透行程和最大气指长度是评价气辅成型质量的两个重要指标,气体穿透行程越大、最大气指长度越小,说明气体穿透效果越理想,即气辅成型质量越好;反之,说明气辅成型质量低,甚至是成型失败。为了获得注气时长和延迟时长对气辅成型质量的影响规律,并获得二者的优选值,在前面研究的基础上,采用CCD响应面法进行多目标优化分析,由于延迟时长为0 s时,气体穿透行程太短,且气指缺陷的幅度值太大,明显成型出的塑件效果不理想,故在CCD响应面分析中只分析1,2,3,4,5 s。为此,设计了CCD响应面分析试验因素水平表,见表1。根据CCD设计,试验方案共有13组不同的因素组合,在相同的注射、冷却、保压等条件下,采用Moldflow API/3DGAS对这13组参数组合分别进行模流分析,并对所有试验因素和具体目标值进行二次回归函数拟合,优选气辅成型时间工艺参数取值。CCD响应面试验结果见表2。

表1 CCD响应面分析因素水平表

Tab. 1 CCD response surface analysis factor level

Factor	Level				
	-1.414	-1	0	1	1.414
Delay time(A)/s	1	2	3	4	5
Gas injection time(B)/s	5	10	15	20	25

表2 CCD响应面试验结果表

Tab. 2 CCD response surface test results

Test number	A/s	B/s	Gas penetration length/mm	Max length of gas finger/mm
1	-1.414	0	156.69	3.15
2	0	0	190.09	6.87
3	0	1.414	174.65	3.67
4	-1	1	171.65	6.21
5	0	0	190.10	6.88
6	-1	-1	190.33	8.06
7	1.414	0	122.56	1.03
8	0	0	189.97	6.79
9	1	-1	65.97	1.5
10	1	1	188.12	6.75
11	0	-1.414	61.37	1.5
12	0	0	189.95	6.80
13	0	0	190.06	6.77

对试验结果进行二次回归响应面方差分析,结果见表3、表4。

表3 气体穿行程的二次回归CCD响应面方差分析

Tab. 3 Quadratic regression CCD response surface analysis of variance for gas penetration length

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value
Model	25 549.76	5	5 109.95	35.64	<0.000 1
A	1 594.20	1	1 594.20	11.12	0.012 5
B	1 625.29	1	1 625.29	11.34	0.012 0
AB	4 958.27	1	4 958.27	34.59	0.000 6
A ²	3 693.11	1	3 693.11	25.76	0.001 4
B ²	7 506.09	1	7 506.09	52.36	0.000 2
Residual	1 003.50	7	143.36		
Lack of fit	1 003.48	3	334.49	69 253.48	<0.000 1
Pure error	0.019	4	4.83×10 ⁻³		
Cor total	26 553.27	12			

Note: *df* is the degree of freedom in the variance of CCD response surface.

表4 最大气指长度的二次回归CCD响应面方差分析

Tab. 4 Quadratic regression CCD response surface analysis of variance for max length of gas finger

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value
Model	70.04	5	14.01	16.79	0.000 9
A	0.76	1	0.76	0.91	0.370 9
B	4.21	1	4.21	5.04	0.059 6
AB	12.60	1	12.60	15.11	0.006 0
A ²	31.09	1	31.09	32.27	0.000 5
B ²	24.84	1	24.84	29.77	0.000 9
Residual	5.84	7	0.83		
Lack of fit	5.83	3	1.94	786.77	<0.000 1
Pure error	0.009 88	4	0.002 47		
Cor total	75.88	12			

从表3、表4可以看出,CCD响应面试验的 P 值都小于0.05,根据统计学原理,表明本次CCD响应面拟合度良好并且试验设计合理,获得的多目标优化具有指导意义。根据表2的结果进行二次回归拟合,获得气体穿行程 R_1 、最大气指长度 R_2 的回归方程,具体见式(4)和式(5)。

$$R_1 = 132.96 - 69.65A + 13.14B + 7.04AB - 12.70A^2 - 0.72B^2 \quad (4)$$

$$R_2 = 3.51 - 1.52A + 0.67B + 0.35AB - 1.16A^2 - 0.042B^2 \quad (5)$$

方差分析中, P 值的大小表明了对应试验因素的影响程度, P 值越小,其对应的试验因素对成型质量的影响程度越大。而拟合的回归方程中的各试验因素的系数也反映了该试验因素对其响应值的影响程度,系数越大,影响越大。根据表3、表4和式(2)、式(3)可知:注气时长相比延迟时长对气体穿行程和最大气指长度的影响都要显著,即注气时长对气辅成型质量的影响要大于延迟时长的影响。

为了获得最佳气辅成型时间工艺参数,采用CCD响应面优化器对两个最佳目标进行优化预测,设置 R_1 和 R_2 的优化目标值分别为最大化 and 最小化,获得的优化预测结果见表5。

表5 CCD响应面优化预测结果

Tab. 5 Optimization prediction results of CCD response surface

A/s	B/s	Gas penetration length/mm	Max length of gas finger/mm
4.00	10.37	184.13	3.75

因此,延迟时长和注气时长的优选值分别为4 s和10.37 s。经CAE分析和成型试验验证,延迟时长取4 s、注气时长取10.37 s时气体穿透效果和塑件成型质量良好,延迟时长取4 s、注气时长取10.37 s时的数值模拟和试验结果如图10所示。

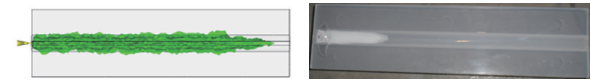


图10 延迟时长取4 s、注气时长取10.37 s时的数值模拟和试验结果
Fig. 10 Numerical simulation and experimental results with delay time of 4 s and gas injection time of 10.37 s

5 结论

(1)增加注气时长可以提高气体穿透效果,也能够从气辅塑件内部增强补缩效果,减少因收缩造成的表面缺陷,同时也提高气辅成型塑件组织致密性,并减小内应力和翘曲变形,但注气时长过长时,气指内部的高压氮气会对其进行撕裂形成严重的气指缺陷,更甚者会使气辅塑件膨胀而报废。

(2)适当增加延迟时长,可以减小或消除气指缺陷,提高气体穿透深度行程,但过长的延迟时长会导致“短射”,过短的延迟时长则会导致严重的气指缺陷。

(3)通过CCD响应面法方差分析,获得延迟时长和注气时长的优选值分别为4 s和10.37 s,精确设计了工艺参数,为提高气辅成型生产的一次成功率、有效降低碳排放提供依据。

参考文献

- [1] JACK A. 气体辅助注射成型原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
JACK A. The principle and application of gas-assisted injection molding[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2003.
- [2] 任清海,耿铁. 气辅新增参数对气辅注射成型质量的影响[J]. 塑料, 2021, 50(1):6-11.
REN Qinghai, GENG Tie. The influence of new gas-assisted parameters on the quality of gas-assisted injection molding[J]. Plastics, 2021, 50(1):6-11.

- [3] 任青海,耿铁.延迟时间对气辅注射成型气体穿透行为影响的数值模拟和实验研究[J].中国塑料,2016(8):70-74.
REN Qinghai, GENG Tie. Numerical simulation and experiment of the influence of delay time on gas penetration in gas-assisted injection molding[J]. China Plastics, 2016, 30(8):70-74.
- [4] 任青海,耿铁.注气时间对气辅成型气体穿透影响的数值模拟和实验研究[J].塑料科技,2019,47(8):76-79.
REN Qinghai, GENG Tie. Numerical simulation and experiment about the influence of gas injection time on gas penetration in gas-assisted injection molding[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(8):76-79.
- [5] 任重,黄兴元,柳和生,等.气体压力对聚合物气辅挤出成型影响实验及模拟[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(1):200-207.
REN Zhong, HUANG Xingyuan, LIU Hesheng, et al. Experiment and simulation on the effect of gas pressure on polymer gas assisted extrusion forming[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(1):200-207.
- [6] LI C T, SHIN J W, ISAYEY A I, et al. Primary and secondary gas penetration during gas-assisted injection molding—part II: Simulation and experiment[J]. Polymer Engineering and Science, 2004, 5: 992-1 002.
- [7] 肖清武,柳和生,黄益宾,等.注气工艺对外部气体辅助注射成型制品翘曲与凹痕的影响[J].高分子材料科学与工程,2019,35(8): 112-117.
XIAO Qingwu, LIU Hesheng, HUANG Yibin, et al. Influence of gas-injection processing conditions on warpage and sink mark of part by external gas-assisted injection molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(8):112-117.
- [8] 任青海,王子剑,耿铁.注气参数对气辅成型气体穿透影响的研究[J].现代塑料加工应用,2020,32(5):36-39.
REN Qinghai, WANG Zijian, GENG Tie. Research on the influence of gas injection parameters on gas penetration in gas-assisted injection molding[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 32(5):46-48.
- [9] 黄淑慧,匡唐清,林军,等.圆管件溢料法气辅共注塑工艺的实验分析[J].塑料,2015,44(6):111-114.
HUANG Shuhui, KUANG Tangqing, LIN Jun, et al. Experimental investigation of overflow gas assisted co-injection molding circular tubes[J]. Plastics, 2015, 44(6):111-114.
- [10] 周海迎,柳和生,江青松,等.工艺参数对溢流法水辅注塑残余壁厚影响[J].塑料,2020,49(3):47-51.
ZHOU Haiying, LIU Hesheng, JIANG Qingsong, et al. Effect of process parameters on residual wall thickness in overflow water-assisted injection molding[J]. Plastics, 2020, 49(3):47-51.
- [11] 王子剑,任青海,耿铁.基于响应面法模型精准优化气辅成型工艺[J].工程塑料应用,2023,51(12):72-78.
WANG Zijian, REN Qinghai, GENG Tie. Precise optimization of gas assisted forming process based on response surface model[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12):72-78.
- [12] 徐伟,王乾.基于正交试验的塑料接线盒翘曲变形优化控制[J].塑料,2019(5):74-77.
XU Wei, WANG Qian. Warpage optimization of plastic junction box based on orthogonal test[J]. Plastics, 2019(5):74-77.
- [13] 郑永粮,张铃欣,周海超,等.采用响应面法的非充气轮胎的固有频率分析[J].橡胶工业,20123,70(10):825-832.
ZHENG Yongliang, ZHANG Lingxin, ZHOU Haichao, et al. Analysis of natural frequency of non-pneumatic tire using response surface method[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(10): 825-832.
- [14] 李杨.基于响应面法的无背索斜拉桥节段施工计算模型修正[D].郑州:郑州大学,2022.
LI Yang. Update of segmental constriction calculation model of cable-stayed bridge without back cable based on response surface method[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2022.
- [15] FILIPE R, LUC G P, MEREDITH R, et al. Trainer-exerciser relation - ship: The congruency effect on exerciser psychological needs using response surface analysis[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2020, 31(1): 226 - 241. DOI: 10.1111/SMS.13825.
- [16] 马志锋,李兆灿,于建民,等.基于CCD的复杂异形件预成形结构优化[J].锻压技术,2023,48(7):13-21.
MA Zhifeng, LI Zhaoan, YU Jianmin, et al. Optimization on pre-formed structure for complex special-shaped parts based on CCD [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(7):13-21.