

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.012

基于响应面法模型精准优化气辅成型工艺

王子剑¹, 任清海^{1,2}, 耿铁²

(1. 安阳职业技术学院机电工程学院, 河南安阳 455000; 2. 河南工业大学机电工程学院, 郑州 450007)

摘要: 气辅成型过程中不同的工艺参数对整个气辅塑件的质量和性能有非常大的影响。为精准设计气辅成型工艺参数, 提高成型生产的一次成功率, 有效降低碳排放, 针对具有典型气辅结构塑件的气体穿透及气指缺陷问题, 利用响应面模型方法对气辅成型的6个工艺参数(熔体预注射量、注气时间、熔体温度、注气压力、延迟时间、模具温度)进行6因素5水平响应面法试验和Box-Behnken Design线性回归拟合, 分析6个工艺参数各自对气体穿透效果的影响程度, 得出熔体预注射量和注气时间为显著影响因素以及其优选值, 然后在此基础上, 对另外4个工艺参数进行考虑参数间交互作用的4因素2水平响应面法试验和Box-Behnken Design二次回归拟合, 获得最佳成型工艺为: 熔体预注射量85%、注气时间10 s、熔体温度240 °C、注气压力3 MPa、延迟时间4 s、模具温度40 °C。经数值模拟和成型试验验证, 最佳成型工艺下得到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, 可以有效降低碳排放, 可用于气辅成型实际生产。

关键词: 气辅成型; 成型工艺; 响应面法; 精准优化

中图分类号: TQ320.662 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0072-07

Precise Optimization of Gas Assisted Forming Process Based on Response Surface Model

Wang Zijian¹, Ren Qinghai^{1,2}, Geng Tie²

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

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

Abstract : The different process parameters in the gas assisted molding process have a significant impact on the quality and performance of the entire gas assisted plastic part. In order to accurately design gas assisted molding process parameters, improving the one-time success rate of molding production, effectively reducing carbon emissions, aiming at the gas penetration and gas finger defects of plastic parts with typical gas-assisted structures, the response surface model method was used to analyze the six process parameters of gas-assisted molding: melt pre-injection volume, gas injection time, melt temperature, gas injection pressure, delay time and mold temperature. Firstly, 6-factor 5-level response surface method and Box Behnken Design linear regression fitting were conducted to analyze the degree of influence of each of the 6 parameters on the gas penetration effect. It is found that the melt pre-injection volume and gas injection time are significant factors and their optimal values. Then, 4-factor 2-level response surface method and Box Behnken Design quadratic regression fitting were conducted on the other 4 parameters, considering the interaction between parameters. The optimal molding process is obtained as follows: melt pre-injection volume is 85%, gas injection time is 10 s, melt temperature is 240 °C, gas injection pressure is 3 MPa, delay time is 4 s, and mold temperature is 40 °C. Through numerical simulation and molding experiments, the results show that the gas penetration effect and gas assisted molding quality of the gas assisted plastic parts obtained under the optimal molding process are good, improving the quality and efficiency of gas assisted molding, effectively reducing carbon emissions, and can be used for actual production of gas-assisted molding.

Keywords : gas-assisted injection molding ; molding process ; response surface method ; precise optimization

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(23B460021), 国家自然科学基金项目(51375143)

通信作者: 任清海, 副教授, 主要研究方向为塑料及玻璃成型过程数值模拟及结果数据可视化

收稿日期: 2023-10-18

引用格式: 王子剑, 任清海, 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.

气体辅助注塑成型技术(简称气辅成型)是在传统的注塑成型过程中注入高压惰性气体,在塑料制品内部(通常是增设的气道或制品肉厚部位)形成中空结构,达到内外双面成型效果,实现消除制品缩痕、降低内应力、减少甚至消除翘曲变形,从而获得轻量、高强度且外观好塑料制品的革命性新型成型技术^[1-4]。因此,气辅成型技术是一种能够有效减少碳排放的塑料成型新技术,同时也是一种绿色低碳制造技术,符合我国加快降低碳排放、倡导绿色技术创新的“双碳”战略目标。然而相比传统注塑成型,气辅成型增加了注入高压氮气环节,在模腔内同时存在熔融塑料和高压氮气双流体的充模流动,成型的复杂程度大大增加,各个工艺参数不仅仅单独影响成型质量,而且参数间的交互作用对成型质量也有显著的影响。

从目前的相关研究文献^[5-8,16]来看,研究各工艺参数单独对气辅成型质量影响的居多,而参数间的交互作用影响的研究很少。因此,用具备典型气辅构造特征的塑件作为研究模型,基于气辅成型全三维数值模拟和成型试验,采用响应面法试验^[9-11],研究气辅工艺参数交互作用下的工艺优化,为精准设计气辅成型参数提供依据,从而提高气辅成型质量和效率,提高成型生产的一次成功率,有效降低碳排放。

1 研究对象

气道是气辅注塑制品区别于传统注塑制品的典型特征,通常是在特定的位置增设横截面为半圆形气道或者利用制品肉厚部位作为气道,从而获得性能优异的塑料制品。研究对象为某具有半圆形典型气道结构的塑件,以便获得广泛指导意义的研究结论。用UG三维CAD软件建立其几何模型,其结构和尺寸如图1所示。用Moldflow API/3DGAS进行气辅成型全三维数值模拟,图2为全三维数值

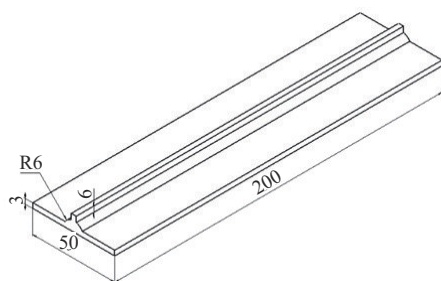


图1 气辅塑件的3D模型和尺寸(单位mm)

模拟时采用的3D网格模型,由119 702个四面体单元构成。

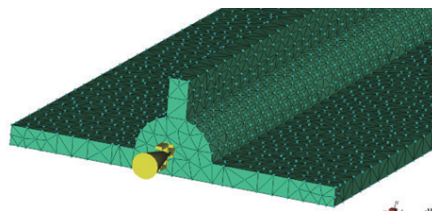


图2 气辅塑件的3D网格模型和浇口进气口位置

采用SK公司生产、牌号为Yuplene R370Y的聚丙烯(PP)作为试验材料^[1]。PP塑料是一种透明性高的聚丙烯,由于其强度高、化学稳定性高、加工成型性好、经济性好等特点,在通讯、家电、汽车及日用品领域得到广泛应用。并且由于PP的加工成型性能优越,被行业广泛应用于气辅成型,其材料性能参数见表1,推荐成型工艺参数见表2。

表1 PP的主要参数

材料名	生产商	牌号	熔体流动速率(MFR)/ (g·10 min ⁻¹)	熔融密度/ (g·cm ⁻³)	固态密度/ (g·cm ⁻³)
PP	SK Corporation	Yuplene R370Y	18	0.737 64	0.899 25

表2 PP的推荐成型工艺参数

成型工艺参数	推荐值
模具表面温度	40 °C
熔体温度	230 °C
模具温度范围	30~50 °C
熔体温度范围	210~250 °C
绝对最大熔体温度	270 °C
最大剪切压力	0.25 MPa
最大剪切速率	100 00 s ⁻¹

2 响应面法试验

响应面法(RSM)是一种综合试验设计和数学建模的优化方法,可考虑不同因子的主效应与交互效果,从而找到试验指数与各因子之间的定量规律,以确定最佳试验水平范围^[9]。相比于其它的试验方法,响应面法的优点是可以通过较少的试验次数得到较好的结果,降低了时间和物力投入^[10]。响应面分析也有助于处理多变量的拟合过程问题^[11]。

2.1 线性回归的响应面模型建立

选择对气辅成型效果影响较大的6个工艺参数:熔体预注射量(A)、熔体温度(B)、模具温度(C)、延迟时间(D)、注气压力(E)、注气时间(F)作为试验因素,以气体穿透深度和最大气指幅度为响应值,结

合 PP 成型推荐参数有效取值范围内合理设计 6 因素 5 水平响应面试验,试验因素及水平见表 3。

表 3 响应面分析因素水平表

因素水平	A/%	B/°C	C/°C	D/s	E/MPa	F/s
1	80	220	20	0	3	3
2	85	230	30	1	5	5
3	90	240	40	2	10	10
4	95	250	50	3	15	15
5	100	260	60	4	20	20

实验方案根据 Box-Behnken Design (BBD)方法进行设计,并对所有试验要素和具体目标值进行线性回归函数拟合,分析得出各参数对成型质量的影响程度,即是否为显著影响因素。根据所选试验方法及水平,共有 25 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 25 组参数组合分别进行模流分析,结果列于表 4。

表 4 响应面模型试验结果表

试验号	A	B	C	D	E	F	气体穿透深度/mm	最大气指幅度/mm
1	1	1	1	1	1	1	190.46	6.99
2	1	2	2	2	2	2	190.33	8.06
3	1	3	3	3	3	3	190.09	6.87
4	1	4	4	4	4	4	188.12	6.75
5	1	5	5	5	5	5	186.24	7.9
6	2	1	1	1	1	1	174.65	3.67
7	2	2	2	2	2	2	166.38	2.51
8	2	3	3	3	3	3	179.14	2.99
9	2	4	4	4	4	4	156.69	3.15
10	2	5	5	5	5	5	171.65	6.21
11	3	1	1	1	1	1	146.02	2.38
12	3	2	2	2	2	2	144.58	3.21
13	3	3	3	3	3	3	134.93	2.53
14	3	4	4	4	4	4	155.36	2.56
15	3	5	5	5	5	5	155.36	3.1
16	4	1	1	1	1	1	111	2.01
17	4	2	2	2	2	2	122.97	2.45
18	4	3	3	3	3	3	135.59	2.69
19	4	4	4	4	4	4	112.66	1.8
20	4	5	5	5	5	5	111.78	2.57
21	5	1	1	1	1	1	65.97	1.5
22	5	2	2	2	2	2	122.56	1.03
23	5	3	3	3	3	3	127.18	2.63
24	5	4	4	4	4	4	109.66	2.16
25	5	5	5	5	5	5	61.37	1.5

2.2 线性回归的响应面方差分析

分别以气体穿透长度、气指最大幅度为响应值,对所设计的试验及结果进行分析,分析数据列于表 5、表 6。

从表 5、表 6 可以看出,此次所设计的响应面试验 P 值均小于 0.000 1,说明达到了显著水平,具有统计学的意义,证明设计的模型拟合度良好并且实验设计合理。根据表 4 的结果对数据进行分析,并对验因素及响应值进行线性回归拟合,本次试验对气体穿透长度($R1$)、最大气指幅度($R2$)的回归方程

见式(1)、式(2)。

$$R1 = 145.28 - 47.32A - 0.65B - 11.38C + 0.8D + 1.77E + 8.44F \quad (1)$$

$$R2 = 3.60 - 2.51A + 0.36B - 0.34C - 0.38D - 0.063E + 0.43F \quad (2)$$

根据表 5、表 6 和式(1)、式(2)可知,各参数对气体穿透深度的影响大小依次为:熔体预注射量(A)>模具温度(C)>注气时间(F)>注气压力(E)>延迟时间(D)>熔体温度(B),熔体预注射量(A)为显著影响因素,其它的为非显著影响因素;各参数对最大气指幅度的影响大小依次为:熔体预注射量(A)>注气

表5 气体穿透长度的响应面方差分析

变异来源	平方和	自由度	方差	F值	P值
回归模型	29 940.55	6	4 990.09	34.27	< 0.000 1
<i>A</i>	27 936.55	1	27 936.55	191.86	< 0.000 1
<i>B</i>	5.34	1	5.34	0.037	0.850 3
<i>C</i>	1 512.30	1	1 512.30	10.39	0.004 7
<i>D</i>	8.01	1	8.01	0.055	0.817 2
<i>E</i>	42.89	1	42.89	0.29	0.594 0
<i>F</i>	971.01	1	971.01	667	0.018 8
残差	2 620.90	18	145.61		
失拟项	3 256 145	24			

表6 最大气指幅度的响应面方差分析

变异来源	平方和	自由度	方差	F值	P值
回归模型	85.23	6	14.20	10.08	<0.000 1
<i>A</i>	78.87	1	78.87	5.99	<0.000 1
<i>B</i>	1.60	1	1.60	1.14	0.300 2
<i>C</i>	1.35	1	1.35	0.96	0.340 9
<i>D</i>	1.80	1	1.80	1.28	0.273 1
<i>E</i>	0.054	1	0.054	0.038	0.846 7
<i>F</i>	2.54	1	2.54	1.81	0.195 6
残差	25.35	18	1.41		
失拟项	110.56	24			

时间(*F*)>延迟时间(*D*)>熔体温度(*B*)>模具温度(*C*)>注气压力(*E*),熔体预注射量(*A*)和注气时间(*F*)为显著影响因素,其它的为非显著影响因素。通过综合考虑六因素对两个响应值(*R*₁,*R*₂)的影响并进行成型实验验证,显著影响因素熔体预注射量、注气时间的优选值分别为85%,10 s。

2.3 二次回归的响应面模型建立

根据作者前期研究结果^[12-15]和气辅成型线性回归响应面试验的研究结果,在气辅成型的所有参数中,熔体预注射量和注气时间的影响特别显著,往往会掩盖其它工艺参数的作用,并且熔体预注射量(*A*)取值85%、注气时间(*F*)取值10 s时为优。因此,本试验在设定熔体预注射量为85%、注气时间为10 s不变的情况下,研究熔体温度(*B*)、模具温度(*C*)、延迟时间(*D*)以及注气压力(*E*)等参数及其之间交互作用对气辅成型质量的影响。为此,设计了试验因素-水平表和考虑参数间交互作用的4因素2水平 L_{16} (2^{15})响应面法试验,所确定的实验因素及水平见表7。实验方案根据BBD设计,共有16组不同的因素组合,并对所有试验要素和具体目标值进行二次回归函数拟合,优选气辅成型参数组。在相同的注射、冷却、保压等条件下,采用Moldflow API/3DGAS对这16组参数组合分别进行模流分析,结果列于表

8。

表7 4因素2水平表

因素水平	<i>B</i> /°C	<i>C</i> /°C	<i>D</i> /s	<i>E</i> /MPa
1	220	40	0.5	3
2	240	60	4	20

气体穿透深度反映了高压氮气在气辅塑件内部的穿透程度,是衡量成型成败的首要指标;最大气指幅度反映了成型缺陷的大小,也是判断气辅塑件是否合格的直接指标。二者可以较全方位客观地反映气辅成型效果。

2.4 二次回归的响应面方差分析

由表8数据可知:16组数值模拟结果都不相同,其中试验号2,5,6,14的气体穿透深度太短,试验号9,10,12,13,15的最大气指幅度太大,不符合塑件气辅成型要求。只有试验号为1,3,4,7,8,11,16数值分析结果符合气辅成型质量要求,气体穿透深度和最大气指幅度良好。通过分别以气体穿透长度、气指最大幅度为响应值,对所设计的试验及结果进行分析,部分分析数据见表9和表10。

表9和表10分别为气体穿透深度的二次回归响应面方差分析表和最大气指幅度的二次回归响应面方差分析表,其中:*BC*表示熔体温度与模具温度的交互作用,*BD*表示熔体温度与延迟时间的交互作用,*BE*表示熔体温度与注气压力的交互作用,*CD*表示模具温度与延迟时间的交互作用,*CE*表示模具温度与注气压力的交互作用,*DE*表示延迟时间与注气压力的交互作用。从表9可以看出,*D*,*E*和*CD*依次为气体穿透深度的显著影响因素,其它参数影响程度相对较小。

气辅成型用模具除了模仿塑件的几何结构外,还起到热交换器的作用,*C*的变化直接影响塑料熔体凝固快慢程度,从而决定塑料熔体在高压气体的推动下流动的难易程度和推动熔体前进的体积多少;*D*的影响在一定范围内与模具温度的显著影响的原理是一致的,增长延迟时间,塑料熔体容易形成厚的凝固层,从而也显著影响塑料熔体在高压气体的迫使下的流动难易程度和压迫熔体向前流动的体积多少。所以*D*,*C*显著影响气体穿透长度这个评价指标。*CD*对气体穿透深度指标影响较大的原因是延迟时间和模具温度都显著作用的叠加。

从表10可以看出,*B*,*C*,*D*和*BD*,*BE*,*CD*,*DE*等参数依次为最大气指幅度的显著影响因素,其它参

表 8 参数间交互作用的试验数据及结果

试验号	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>BE</i>	<i>D</i>	<i>BD</i>	<i>ED</i>	<i>C</i>	<i>BC</i>	<i>EC</i>	<i>DC</i>	气体穿透深度/mm	最大气指幅度/mm
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	168.93	3.5
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	158.77	2.38
3	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	187.25	3.81
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	172.74	2.44
5	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	157.6	3.72
6	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	158.17	3.3
7	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	180.42	3.25
8	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	167.49	3.23
9	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	168.23	6.31
10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	162.07	4.97
11	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	186.98	3
12	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	178.3	4.26
13	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	161.52	4.9
14	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	158.38	3.87
15	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	176.88	4.78
16	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	162.23	3.42

表 9 气体穿透长度的二次回归响应面方差分析

变异来源	平方和	自由度	方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
回归模型	1 426.39	10	142.64	5.09	0.043 2
<i>B</i>	0.41	1	0.41	0.015	0.907 9
<i>C</i>	28.37	1	280.37	9.78	0.360 5
<i>D</i>	784.76	1	784.76	28.01	0.003 2
<i>E</i>	203.01	1	203.01	7.25	0.043 2
<i>BC</i>	92.20	1	92.20	1.01	0.129 4
<i>BD</i>	5.33	1	5.33	0.19	0.680 9
<i>BE</i>	9.60	1	9.60	0.34	0.583 7
<i>CD</i>	21.39	1	21.39	3.44	0.422 2
<i>CE</i>	96.50	1	96.50	0.76	0.122 6
<i>DE</i>	15.17	1	15.17	0.54	0.494 8
残差	140.07	5	28.01		
失拟项	1 566.46	15			

表 10 最大气指幅度的响应面方差分析

变异来源	平方和	自由度	方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
回归模型	12.96	10	1.30	2.39	0.032 26
<i>B</i>	5.44	1	5.44	3.37	0.024 8
<i>C</i>	0.013	1	0.013	2.87	0.881 2
<i>D</i>	1.30	1	1.30	2.4	0.182 3
<i>E</i>	0.001 361	1	0.001 361	0.002 513	0.962 0
<i>BC</i>	1.55	1	1.55	1.005	0.151 3
<i>BD</i>	1.08	1	1.08	1.99	0.217 6
<i>BE</i>	0.50	1	0.50	1.80	0.380 4
<i>CD</i>	0.21	1	0.21	1.38	0.562 6
<i>CE</i>	0.97	1	0.97	0.80	0.237 7
<i>DE</i>	0.35	1	0.35	1.65	0.457 8
残差	2.71	5			
失拟项	15.67	15			

数影响程度不明显。*B*、*C*和*D*直接决定了塑料熔体的凝固快慢程度,决定了高压气体在气道侧翼穿透

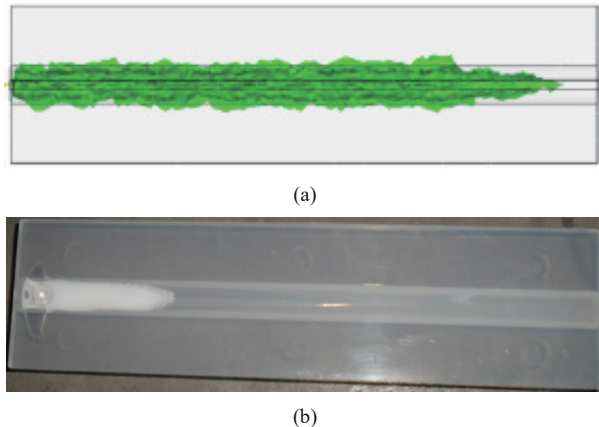
的容易程度,所以对气指缺陷起到显著影响。在全部参数间交互作用中,*BD*对最大气指幅度的影响作用最大,说明二者之间存在密切的相关性。熔体温度高,则需要适当延长延迟时间,以便熔体形成适当厚度的凝固层,从而减弱高压气体在气道侧翼的穿透而造成严重的气指缺陷,所以在设计这两个参数时避免同时出现高的熔体温度和短的延迟时间。*BE*对最大气指幅度的影响作用次之,因为熔体温度高的话,熔体的流动性好,便于高压气体在熔体内部穿透,所以较低的注气压力配合较高的熔体温度,可以有效降低气指缺陷。*CD*与*BD*对最大气指幅度的影响的原因相同,都直接影响熔体的流动性,也就决定了熔体的凝固快慢,从而影响气指缺陷的严重与否。*DE*也对最大气指幅度有较大的影响,是由于注气压力大,延迟时间短的话,高压气体容易在气道侧翼穿透熔体形成较大的气指缺陷,所以在规划参数时应该合理减少注气压力和延长延迟时间,从而减小或避免气指缺陷。

3 响应面实验验证

通过上面参数交互作用的气辅注塑工艺二次回归响应面方差分析,综合考虑BBD设计的16组数值模拟结果,试验结果表明,熔体温度 240 ℃,注气压力 3 MPa,延迟时间 4 s,模具温度 40 ℃时的气辅成型效果好。因此,气辅成型工艺参数的最优值分别为:熔体温度 240 ℃,注气压力 3 MPa,延迟时

间 4 s,模具温度 40 °C。

图 5 为最优参数组的数值模拟和成型试验结果。从图 5 可以看出:试验塑件的气体穿透深度理想、气指缺陷小,而且没有气体穿破发生,表面质量高,气体穿透效果和塑件成型质量良好,可用于指导实际气辅成型生产。



a—数值模拟结果;b—成型实验结果

图 3 采用最优工艺参数的气体穿透结果

4 结论

(1)气辅成型技术能够显著提升塑件强度及表面外观质量、减少塑料消耗和压缩成型生产周期。采用响应面法试验研究,能够得到参数间交互作用对气辅成型质量的影响规律,从而为精准规划气辅成型参数、优化气辅成型工艺提供指导。

(2)通过 $L_{25}(5^6)$ 线性回归响应面试验和响应面方差分析,熔体预注射量、注气时间为显著影响因素,其优选值分别为 85%、10 s。

(3)通过二次回归响应面试验和方差分析,参数间的交互作用对气体穿透深度的影响较小,而对气指缺陷的影响显著。 B, C, D 和 BD, BE, CD, BC 为气指缺陷的显著影响因素。

(4)最佳成型工艺为熔体预注射量 85%,注气时间 10 s,熔体温度 240 °C,注气压力 3 MPa,延迟时间 4 s,模具温度 40 °C。经数值模拟和成型实验验证,最优参数组下得到气辅塑件的气体穿透深度及最大气指幅度指标优良,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,有效降低了碳排放,可用于气辅成型实际生产。

参考文献

- [1] 任清海,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.

- [2] Ren Q H, Geng T. Key Technologies research on section display of full 3D gas-assisted injection molding simulation results[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 365-366: 580–583.
- [3] 耿铁,闫丽群,张艳云. 气辅注塑成型过程中气体穿透长度的MPI 三维数值模拟及实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(6): 4 727–4 731.
Geng Tie, Yan Liqun, Zhang Yanyun. The MPI 3D-simulation and experiment of the gas penetration length in gas-assisted Injection Molding[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(6): 4 727–4 731.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 黄淑慧,匡唐清,林军,等. 圆管件溢料法气辅共注塑工艺的试验分析[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.
- [7] 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.
- [8] 肖清武,柳和生,黄益宾,等. 注气工艺对外部气体辅助注塑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.
- [9] 覃柏英,秦文东,林贤坤,等. 基于BBD设计和响应面法的隔热罩冲压成型工艺参数优化[J]. 制造业自动化, 2015(15): 57–60.
Qin Boying, Qin Wendong, Lin Xiankun, et al. Optimization of process parameters in heat shield forming based on BBD design and response surface method[J]. *Manufacturing Automation*, 2015

- (15):57-60.
- [10] 谭小红.细长杆多腔模注塑成型工艺多因素多目标集成优化[D].苏州:江苏大学,2013.
- Tan Xiaohong. Integrated optimization method on multi-variety and multi-objective of multi-cavity slender rod injection molding process [D]. Suzhou: Jiangsu University, 2013.
- [11] Filipe R, Luc G P, Meredith R, et al. Trainer-exerciser relationship: The congruency effect on exerciser psychological needs using response surface analysis[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2021, 31(1):226-241.
- [12] 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, 30(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.
- [13] 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*, 2021, 32(5):46-48.
- 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.
- [14] 任青海,耿铁.气辅新增参数对气辅注塑成型质量的影响[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.
- [15] 任青海,耿铁.正交试验优选气辅成型工艺参数[J].*合成树脂及塑料*, 2022, 39(1):54-59.
- Ren Qinghai, Geng Tie. Optimization of the gas-assisted injection molding process parameters based on orthogonal test[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2022, 39(1):54-59.
- [16] 周大路.气辅成型中成型工艺对制品翘曲的影响[J].*塑料工业*, 2014, 42(10):65-67.
- Zhou Dalu. Effect of molding process on the warpage of product in the gas assistance formation[J]. *China Plastics Industry*, 2014, 42(10):65-67.