

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.015

基于GA-BP-GA的聚氨酯发泡机混合头的结构参数优化

江明会¹, 梅益¹, 罗彦英¹, 余书发², 胡大兵³

(1. 贵州大学机械工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州华云汽车饰件制造有限公司, 贵阳 550025;

3. 遵义精星航天电器有限责任公司, 贵州遵义 563125)

摘要: 针对现有聚氨酯发泡机混合头混合均匀度差的问题, 在某公司现有混合头结构的基础上, 对该混合头进行结构参数优化。首先, 设计正交试验, 对该混合头进行流场分析, 将得到的仿真试验数据进行极差分析, 得到该混合头的结构参数对混合指数的影响顺序。其次, 采用遗传算法(GA)优化BP神经网络后, 得到训练好的GA-BP预测模型, 用于预测该混合头的混合指数, 拟合出混合头的5个结构参数与混合指数之间的映射关系, 通过对比分析BP与GA-BP网络预测模型可知, BP网络模型的回归值 R 为0.564 6, 而GA-BP网络模型的 R 为0.990 3, GA-BP网络预测系统与直接使用BP网络预测系统相比, 有较高的预测准确性及稳定性。最后, 采用GA对GA-BP网络预测模型进行全局极值寻优, 得到较优的结构参数。GA-BP-GA优化后的混合指数与初始方案的混合指数相比, 降低了52%, 在一定程度上降低了该混合头混合指数, 提高了该混合头的混合效果, 通过对比Matlab中GA-BP-GA预测的混合效果0.165 3 mm与Fluent仿真所得值0.165 mm, 发现两者相对误差为0.18%, 验证了该优化方法的可行性。

关键词: 混合头; 流体分析; 正交试验

中图分类号: TQ315 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2023)12-0092-08

Optimization of Structural Parameters of Mixing Head of Polyurethane Foaming Machine Based on GA-BP-GA

Jiang Minghui¹, Mei Yi¹, Luo Yanying¹, Yu Shufa², Hu Dabing³

(1. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Huayun Automobile Trim Manufacturing Co., Ltd., Guiyang 550025, China;

3. Zunyi Jingxing Aerospace Electric Co., Ltd., Zunyi 563125, China)

Abstract : In order to solve the problem of poor mixing uniformity of the existing polyurethane foaming machine mixing head, the structural parameters of the mixing head were optimized based on the structure of the existing mixing head of a certain company. First, an orthogonal test was designed to conduct flow field analysis on the mixing head. The simulation test data would be obtained for range analysis to obtain the order in which the structural parameters of the mixing head affect the mixing index. Secondly, after using the genetic algorithm(GA) to optimize the BP neural network, the trained GA-BP prediction model was obtained, which was used to predict the mixing index of the mixing head and fitted the mapping relationship between the five structural parameters of the mixing head and the mixing index, through comparative analysis of the BP and GA-BP network prediction models, it can be seen that the R of the BP network model is 0.564 6, while the R of the GA-BP network model is 0.990 3. Compared with the direct use of the BP network prediction system, the GA-BP network prediction system has Higher prediction accuracy and stability. Finally, GA was used to perform global extreme value optimization on the GA-BP network prediction model to obtain better structural parameters. Compared with the mixing index of the initial scheme, the optimized mixing index of GA-BP-GA is reduced by 52%, which reduces the mixing index of the mixing head to a certain extent and improves the mixing effect of the mixing head. By comparing the GA in Matlab, the mixing effect predicted by GA-BP-GA is 0.165 3 mm and the value obtained by Fluent simulation is 0.165 mm. The relative error between the two is 0.18%, which verifies the feasibility of the optimization method.

Keywords : mixing head ; fluid analysis ; orthogonal test

基金项目: 贵阳科技计划项目(筑科合同[2022]5-38)

通信作者: 梅益, 教授, 博士, 研究方向为智能制造工艺及设备、制造业信息化、数值模拟技术

收稿日期: 2023-10-24

引用格式: 江明会, 梅益, 罗彦英, 等. 基于GA-BP-GA的聚氨酯发泡机混合头的结构参数优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12): 92-99.

Jiang Minghui, Mei Yi, Luo Yanying, et al. Optimization of structural parameters of mixing head of polyurethane foaming machine based on GA-BP-GA[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 92-99.

聚氨酯制品在实际生产过程中,会因原料混合不均导致后期制品的成型质量差,进而使最终产品的质量和产品的使用功能无法得到满足。为解决上述问题,除了改变原料在混合过程中混合头的操作参数^[1],还可改变聚氨酯发泡机混合头的结构,以此改善原料的混合效果,从而保证聚氨酯产品的质量。在以往对混合头结构优化的研究中^[2-4],混合头进料管与混合腔之间的夹角、进料口直径、混合腔直径、混合腔的长度、清洗杆在最上端时到撞击中心的长度等尺寸参数均影响着混合头的混合效果。国内外大部分研究方法均采用数值建模,结合计算流体动力学(CFD)模拟,将流场情况可视化,进而对相关结构与工作参数进行优化^[5-8]。此外,在一些试验研究中,为了将流场中流体浓度和流体速度可视化,采用定量表征^[9-10],通常采用平面激光诱导荧光、粒子图像测速等技术手段。而对于在一些由反应物合成的混合器研究中,为了准确地表征纳米粒子的成分及其尺寸分布^[11-12],通常采用透射电子显微镜、波长色散X射线荧光光谱仪的计算手段。但采取试验研究的方法不但耗费较长时间,还需消耗大量的财力物力。为此,围绕混合头的结构对混合头混合性能的影响,采用流体仿真,结合遗传算法(GA)和BP神经网络对混合头展开优化工作。首先,采用数值建模,结合CFD模拟,将混合头流场可视化;设计正交试验方案,根据试验方案进行流场分析,对模拟结果进行极差分析后,得到混合头的各结构参数与混合指数的影响关系。其次,采用建立的GA-BP网络模型来预测该混合头的混合指数^[13],该模型能够很好反映混合头的各结构参数和混合指数之间的非线性关系。最后,运用GA对GA-BP网络模型进行极值寻优,得到最优结构参数,并在一定程度上提高了混合头的混合效果。

1 混合头与数值模拟

1.1 物理模型及网格划分

(1)物理模型。

聚氨酯发泡机混合头的结构为L形,A,B两种溶液在高速高压下分别从两个进料口流入混合腔,在混合腔内发生撞击后混合。其工作原理如图1所示,在图1左端,AB两种液体流入混合头的混合腔内后回流,大活塞向上移动,阀门准备打开。在图中部,大活塞上升到顶部,其阀门全部打开,混合腔阀门即将打开。在图右端,混合腔阀门完全打开,使A,B两溶液能够在混合腔内高速对撞后混合,并

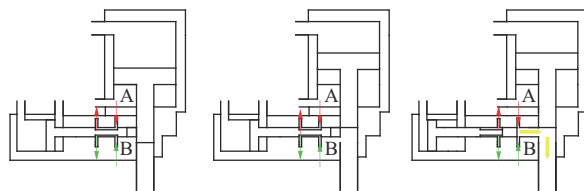
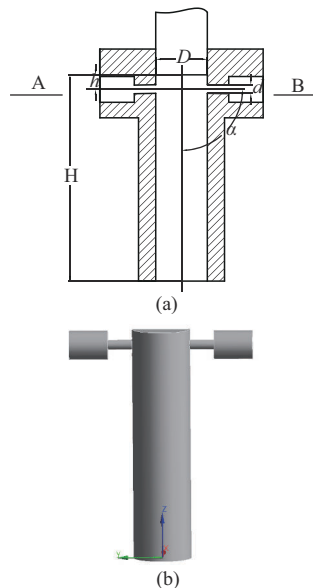


图1 混合头工作原理示意图

沿流道向左流出,由大活塞向下移动将其推至模具中。

为探究混合头的结构参数对混合效果的影响关系,并优化其混合头结构,对A,B两种液体在混合腔内高速对撞混合过程进行流体分析。其混合腔的几何结构模型如图2a所示。A,B两组分原料的进料口直径 d 为2 mm,混合腔直径 D 为12 mm,进料口中心线与混合腔的夹角为 90° ,撞击中心到清洗杆的高度 h 为3.2 mm,即混合腔长度 H 为48 mm。根据现实情况,将混合腔三维模型简化为图2b。



a—几何结构;b—三维图

图2 混合头几何结构及三维图

(2)网格划分。

混合腔部分采用了Fluent软件中的Mesh来对模型进行网格划分。由于该混合头中混合腔的流体碰撞区较复杂,且形状不规则。网格的数量和质量会影响流场后期求解过程精度和速度,因此,采用结构化网格划分,网格单元大小为设置为1 mm,单元类型为三角形,经划分完毕后,其网格的整体数量为101 281,结果如图3所示。

1.2 控制方程及边界条件

(1)控制方程。

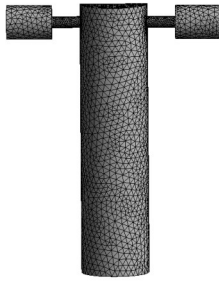


图3 混合头网格划分

控制方程选用标准 $k-\varepsilon$ 模型。

连续性方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程如式(2)、式(3)、式(4)所示。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (4)$$

式中: ρ 为密度; P 为压强。

运输控制方程如式(5)、式(6)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中: G_k 项由层流速度梯度产生; Y_m 表示在流场中湍流膨胀到全局时, 对其耗散率的影响^[14]; k 为湍动能方程; ε 为湍流耗散率方程; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 均为常数; σ_k 、 σ_ε 分别表示 k 和 ε 的普朗特数; G_b 因浮力产生; S_k 、 S_ε 为自定义的 k 项和 ε 项; x_i 、 x_j 是方向 i 和 j 上的位移量; u_i 为流动速度; μ_t 为湍流黏性系数。

μ_t 计算公式如式(7)所示。

$$\mu_t = \rho C_\mu + \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中: C_μ 为常数。

(2) 边界条件。

混合头混合腔流动的液体分别为聚醚多元醇和多异氰酸酯溶液, 两者体积比为 1:1, 两种溶液分别在高速高压条件下从进料管流入, 在混合腔内发生碰撞。将聚醚多元醇和多异氰酸酯分别定义为相一和相二, 入口定义为压力入口, 出口定义为压力出口, 操作压力为 14 MPa, 由于该混合头的流体区域沿 X 轴方向呈对称分布, 将该混合头流体区域沿 YOZ 平面设置对称面, 减少计算量, 其余其它面均设置为壁面。

2 模拟结果及分析

2.1 模拟结果

为提高混合头的混合效果, 对混合头中聚醚多元醇和多异氰酸酯碰撞混合过程进行流体分析, 在原尺寸的基础上, 通过改变混合头的进料管与混合腔之间的夹角、进料口直径、混合腔直径、混合腔的长度以及清洗杆在最上端时到撞击中心的长度等尺寸参数来探究混合头几何结构对混合头的混合效率的关系, 并进一步为提高混合头混合效果而优化混合头的结构参数, 对混合头中两种液体的混合过程进行流场分析。

在设置好边界条件后, 求解该混合过程。为更直观地观察聚醚多元醇和多异氰酸酯在混合头中的混合效果, 绘制在出口截面处聚醚多元醇(相一)的体积分数云图。为更好地使各种优化方案所对应的混合效果更加直观, 文中所有仿真云图均采用相一在出口截面处的体积分数分布云图, 其云图如图 4 所示。由图 4 可知, 从左到右, 体积分数的颜色带表明体积分数越来越大, 由于两者是 1:1 混合, 若两者充分混合, 聚醚多元醇的体积分数颜色带少且颜色带大部分应接近于 0.5 处所对应颜色带。图中, 出口截面左右两端, 高体积分数颜色带和低体积分数颜色带占比较多, 且体积分数颜色带繁多, 表明原混合头的混合效果较差, 需进一步优化。

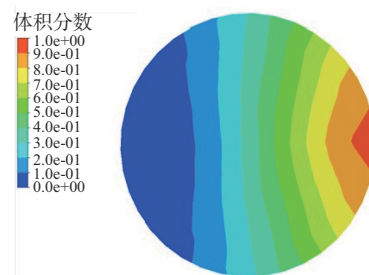


图4 原混合头出口截面流体相1体积分数分布图

为将混合效果量化,在出口截面上沿 y 轴方向,均匀取50个节点的聚醚多元醇的体积分数,通过计算其混合指数,采用混合指数的大小来评判其混合效果,其具体步骤在下文体现。经计算后,原有混合头的混合指数为0.344,表明原有混合头的混合效果较差,为提高其混合效果,对原有混合头的结构进行优化。

2.2 评价指标

分别采用定性和定量分析进行混合效果的评价,定性的方法是绘制出口截面的聚醚多元醇的体积分数分布云图,通过观察出口截面处聚醚多元醇的体积分数分布云图,进而可以对比其混合效果。

定量的方法采用借鉴标准差的概念来计算混合指数,用于衡量流体分布均匀程度,也就是流体混合程度,混合指数 M 如式(8)所示。

$$M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [C_a - C_0]^2} \quad (8)$$

式中: C_a 表示某相在出口截面上各点的浓度或体积分数; N 为出口截面上的节点数量; C_0 为出口截面上的浓度或者体积分数的期望值(C_0 为0.5)。

该混合头中,两种溶液1:1混合,若两种溶液完全混合,则某相在出口截面的任意节点上的体积分数应为0.5。若两种溶液完全混合,则 C_a 与 C_0 的值完全相等,即 $M=0$, M 的值越小,表明混合效果越好。若两种溶液完全不混合,则出口截面上任意节点的体积分数为0,即 $M=0.5$ 。

为计算混合指数,在数值计算完成后,将出口截面上沿 y 轴方向,均匀取50个节点的聚醚多元醇的体积分数的数值,将其导入Excel,通过混合指数计算公式进行混合指数的计算。

3 正交试验设计

3.1 正交试验方案设计

结合最原始的混合头尺寸以及参考以往混合头的结构优化研究的基础,设计了因素水平表见表1,确定了进料口与混合腔之间的夹角(A),进料口直

径(B),混合腔直径(C),混合腔的长度(D),清洗杆在最上端时到撞击中心的长度(E)范围。

通过Fluent流体分析得到试验样本及对应的混合指数见表2,由表2可知第16组混合指数最小。

表2 正交试验结果

序号	$A/^\circ$	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm	混合指数
1	60	0.5	6	24	0.8	0.347
2	60	1	10	48	4	0.300
3	60	1.5	14	72	1.6	0.331
4	60	2	18	40	5.6	0.413
5	60	2.5	8	64	2.4	0.213
6	60	3	12	32	4.8	0.368
7	60	3.5	16	56	3.2	0.385
8	65	0.5	18	64	4	0.339
9	65	1	8	32	1.6	0.302
10	65	1.5	12	56	4.8	0.324
11	65	2	16	24	2.4	0.413
12	65	2.5	6	48	5.6	0.201
13	65	3	10	72	3.2	0.200
14	65	3.5	14	40	0.8	0.334
15	70	0.5	16	48	1.6	0.389
16	70	1	6	72	4.8	0.178
17	70	1.5	10	40	2.4	0.321
18	70	2	14	64	5.6	0.341
19	70	2.5	18	32	3.2	0.415
20	70	3	8	56	0.8	0.218
21	70	3.5	12	24	4	0.409
22	75	0.5	14	32	4.8	0.386
23	75	1	18	56	2.4	0.375
24	75	1.5	8	24	5.6	0.331
25	75	2	12	48	3.2	0.348
26	75	2.5	16	72	0.8	0.357
27	75	3	6	40	4.8	0.219
28	75	3.5	10	64	1.6	0.250
29	80	0.5	12	72	2.4	0.256
30	80	1	16	40	5.6	0.413
31	80	1.5	6	64	3.2	0.180
32	80	2	10	32	0.8	0.349
33	80	2.5	14	56	4	0.361
34	80	3	18	24	1.6	0.423
35	80	3.5	8	48	4.8	0.256
36	85	0.5	10	56	5.6	0.283
37	85	1	14	24	3.2	0.422
38	85	1.5	18	48	0.8	0.386
39	85	2	8	72	4	0.196
40	85	2.5	12	40	1.6	0.365
41	85	3	16	64	4.8	0.368
42	85	3.5	6	32	2.4	0.231
43	90	0.5	8	40	3.2	0.277
44	90	1	12	64	0.8	0.219
45	90	1.5	16	32	4	0.425
46	90	2	6	56	1.6	0.182
47	90	2.5	10	24	4.8	0.384
48	90	3	14	48	2.4	0.377
49	90	3.5	18	72	5.6	0.240

表1 因素水平表

水平	因素				
	$A/^\circ$	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm
1	60	0.5	6	24	0.8
2	65	1	8	32	1.6
3	70	1.5	10	40	2.4
4	75	2	12	48	3.2
5	80	2.5	14	56	4
6	85	3	16	64	4.8
7	90	3.5	18	72	5.6

3.2 极差分析

极差分析能够简单、有效地分析不同因素对试验结果的影响^[15]。为了能够更直观地分析不同结构参数取值对混合指数的影响,对混合头流场模拟后的试验模拟结果进行极差分析,将混合头流场分析得到的每个水平下混合指数均值作为纵坐标,其5个结构参数对应水平作为横坐标,得到极差分析图,如图5所示。由图5可知, C, D 对应的两个结构参数的所有水平对混合指数影响较大,对应混合指数变化跨度大,其余三个结构参数变化对应混合指数跨度较小,但其对混合指数的影响不可忽略。可归结出各结构参数(A, B, C, D, E)对混合指数的影响顺序,其顺序如下:混合腔直径 $C >$ 混合腔长度 $D >$ 清洗杆在最上端时到撞击中心的长度 $E >$ 进料口直径 $B >$ 进料口与混合腔之间的夹角 A 。取各因素水平的最小值,得到最优结构参数组合 $A2B5C1D7E6$,即进料口与混合腔之间的夹角为 65° ,进料口直径为 2.5 mm ,混合腔直径为 6 mm ,混合腔长度为 72 mm ,清洗杆在最上端时到撞击中心的长度为 4.8 mm 。运用Fluent模拟得到混合指数为 0.169 ,且其混合效果小于表2中的任意一组结构参数对应的混合指数,由图6可知,其体积分数分布接近 0.5 ,说明其混合较均匀,与原混合头混合的体积分数相比,其结果得到优化^[16]。

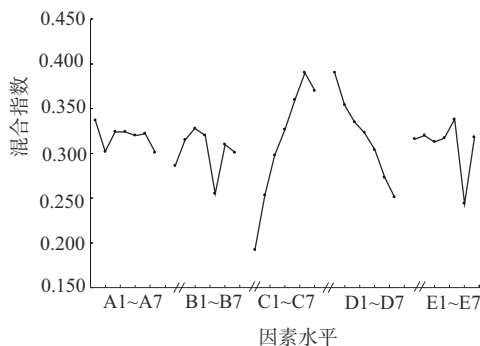


图5 各因素水平对混合指数的影响趋势

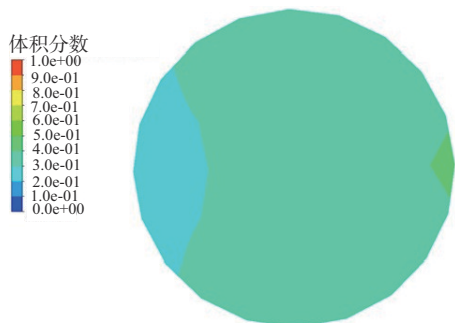


图6 极差分析优化出口截面流体相一体积分数分布图

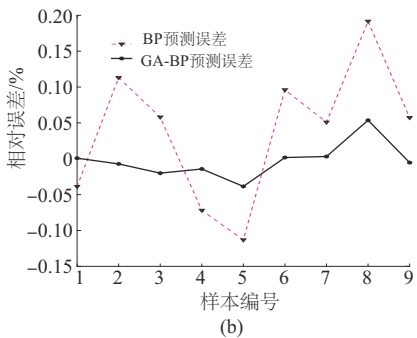
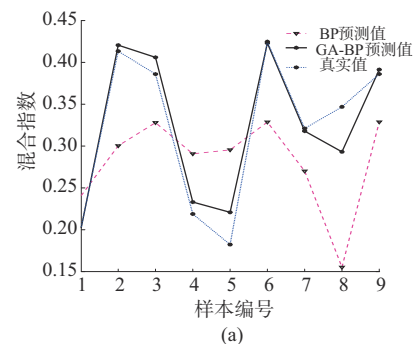
4 基于GA-BP-GA算法的结构参数优化

4.1 构建GA-BP网络预测模型

由于BP神经网络算法在模型训练的过程中搜索能力较差,还容易出现局部最优解的现象^[15]。而GA作为一种能够模拟生物进化过程的优化算法,拥有较强的全局寻优能力。因此,引入GA对BP神经网络的权值和阈值进行优化。将正交试验设计得到的样本及对应的混合指数分为测试集和训练集,用训练集训练BP模型,从而得到最优BP网络预测系统。

4.2 GA-BP预测结果

将表2中的前40组数据和后9组数据分别用来作为训练集和测试集。由表1和表2仿真结果表可知,混合头的五个结构参数和混合指数的数值分别作为输入与输出,得到5输入1输出,由此,将输入层节点数目和输出层节点数目分别设为5和1。通过公式 $N = 2n + 1$ 确定隐含层神经元数目为11,其中, N 为隐含层神经元数目, n 为输入神经元数目^[15]。由图7a中BP与GA-BP网络预测结果对比可以看出,BP网络模型预测的回归值(R)= 0.5646 ,与直接使用BP网络模型预测相比,GA-BP网络模型预测的 $R=0.9903$,预测的准确性较高。图7b是BP与GA-BP网络预测的相对误差图,从图7b可知,与



a—测试集的真实值与BP, GA-BP预测值对比图;

b—BP与GA-BP网络预测相对误差图

图7 BP与GA-BP网络预测结果对比

GA-BP网络预测相比,BP网络预测的相对误差较大,GA-BP网络预测的塑件混合指数相对误差均控制在0.2%以内。GA-BP网络模型对该混合头的混合指数预测的精度及效率较高,此GA-BP网络模型作为预测模型可以较好地反映混合头的结构参数与混合指数之间非线性关系,能够用于GA极值寻优的预测模型^[13]。

4.3 构建GA-BP-GA模型

GA-BP结合GA主要分为两步:GA-BP网络模型训练拟合;运用GA对GA-BP网络模型极值寻优^[17]。

(1) GA-BP网络模型训练拟合部分。GA-BP网络模型可看作一个非线性函数,混合头的结构参数输入看作该函数的自变量,混合指数输出看作函数的因变量。从图7可知,GA-BP网络模型预测值与真实值的误差小,表明其预测值贴近真实值,能够对较准确地预测混合指数,同时,表明GA-BP网络模型能够很好反映混合头的结构参数与混合指数之间非线性耦合关系。

(2) GA对GA-BP网络模型极值寻优部分。优化数学模型一共包含设计的目标、变量及约束条件3个因素^[18]。将混合头的混合指数取最小作为GA的优化目标,选取进料口与混合腔之间的夹角,进料口直径、混合腔直径、混合腔的长度、清洗杆在最上端时到撞击中心的长度作为5个设计变量。约束条件即为5个设计变量的取值范围。综上建立了GA的数学模型见公式(9)。

$$F_{\min} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$$

$$s. t \begin{cases} 60^\circ \leq x_1 \leq 90^\circ \\ 0.5 \text{ mm} \leq x_2 \leq 3.5 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \leq x_3 \leq 18 \text{ mm} \\ 24 \text{ mm} \leq x_4 \leq 72 \text{ mm} \\ 0.8 \text{ mm} \leq x_5 \leq 5.6 \text{ mm} \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别为进料管与混合腔之间的夹角、进料管直径、混合腔直径、混合腔的长度、清洗杆在最上端时到撞击中心的长度的参数值; $F_{\min}$ 表示混合指数; $F_{\min} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 为遗传算法的适应度函数。

将训练好的GA-BP网络模型预测输出作为个体适应度值,根据适应度值淘汰较差个体,得到较优个体。将种群规模设为200、变异概率设为0.2、交叉概率设为0.8、最大迭代次数设为400。最后,通过选择、交叉、变异后寻找最优个体^[15]。

GA具有良好的全局极值寻优能力,在寻优过程中,其需要一个适应度函数。将GA-BP神经网络和GA结合,将GA-BP神经网络拟合得到的非线性映射关系所建立出的数学模型作为GA的适应度函数,构建了GA-BP-GA算法。其流程图如图8所示。

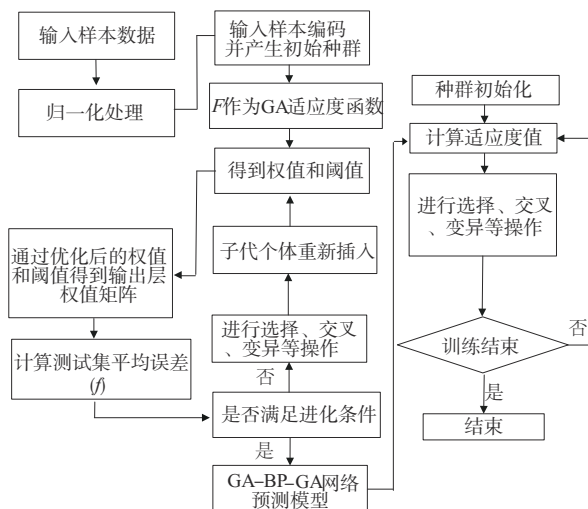


图8 GA-BP-GA流程图

4.4 GA-BP-GA寻优及结果

利用遗传算法对BP-GA网络预测模型进行全局极值寻优,得到寻优适应度曲线,如图9所示。当迭代至400代后,混合腔的混合效果评价指标收敛于0.1653处,对应的有混合头的结构尺寸A为61.85°,B为0.5mm,C为6mm,D为71.95mm,E为4.02mm。

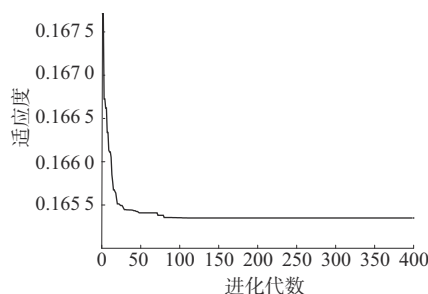


图9 适应度曲线

4.5 模拟验证

按照GA-BP-GA优化后的结果,在UG-NX中将5个混合头的结构参数修改,将最终得到的几何结构导入Fluent中进行仿真验证,得到优化后的相一在出口截面的体积分数云图和出口截面聚醚多元醇的体积分数数据,将其导入Excel数据处理后,得到出口截面的混合指数。图10为正交试验优化后的混合头对应的流体相一的体积分数分布云图,

由图10可知其混合效果较原混合头好,但不如GA-BP-GA优化的混合效果。由图11可知,优化前后混合腔出口截面聚醚多元醇的体积分数区别很大,优化前聚醚多元醇的体积分数分布范围广,较为分散,在优化后的聚醚多元醇体积分数较为集中于50%,由表3优化结果可知,优化前的混合指数为0.344,而优化后的混合指数仅为0.165 3,与原始方案相比,GA-BP-GA优化后的混合指数降低了52%。混合头的混合效果得到了一定的改善。通过对比Matlab中GA-BP-GA预测的混合效果0.165 3 mm与Fluent仿真值0.16 5 mm,两者相对误差为0.18%。综上,证明GA-BP预测系统的稳定性及可靠性较优,同时,通过GA-BP-GA对混合头的结构优化后,其混合头的混合效果也得到了良好的改善。

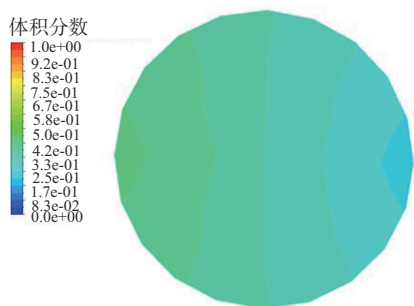


图10 正交试验优化的出口截面相一体积分数分布图

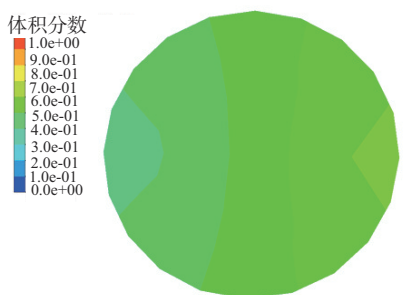


图11 GA-BP-GA优化的出口截面相一体积分数分布图

表3 优化结果

结构	$A/(^{\circ})$	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm	混合指数
原结构	90	2	12	48	3.2	0.344
正交试验最优组合	70	1	6	72	4.8	0.178
正交试验最优组合下混合指数下降幅度/%						48.2
GA-BP-GA最优组合	61.85	0.5	6	71.95	4.02	0.165
GA-BP-GA最优组合下混合指数下降幅度/%						52

5 结论

为提高聚氨酯发泡机混合头混合效果,对其混

合头进行结构参数优化。首先,在Fluent中对正交试验设计进行模拟分析,对其结果极差分析后得到结构参数对该混合头混合指数的影响程度为:混合腔直径 C >混合腔长度 D >清洗杆在最上端时到撞击中心的长度 E >进料口直径 B >进料口与混合腔之间的夹角 A 。接着,利用GA优化BP的权值和阈值,训练BP模型,得到GA-BP网络模型。结果表明:GA-BP网络模型预测相对误差最大值不超过0.2%,由此证明,所建立的GA-BP网络模型可用于该混合头的混合指数的预测。最后,采用GA对BP-GA网络模型极值寻优,得到GA-BP-GA优化后的混合头的结构参数(进料口与混合腔之间的夹角 61.85° 、进料口直径0.5 mm、混合腔直径6 mm、混合腔长度71.95 mm、清洗杆在最上端时到撞击中心的长度4.02 mm)及其对应的混合指数。Fluent模拟值为0.165,GA-BP-GA优化后的混合指数为0.165 3,相对误差约为0.18%,进一步验证了GA-BP-GA预测系统的可用性与准确性。对比优化效果,GA-BP-GA优化值为0.165 3 mm,与初始方案相比,混合指数降低了52%;与正交试验优化的结果相比,降低了7.13%。综上,GA-BP-GA优化程度最佳,该优化方法可行,并且能够在一定程度上提高混合头的混合效果。

参考文献

- [1] 邓世欣,王建,杨卫民,等.增强反应注射成型机混合头内流体高压高速碰撞过程模拟与分析[J].中国塑料,2022,36(6):130-136.
Deng Shixin, Wang Jian, Yang Weimin, et al. Simulation and analysis of fluid high-pressure and high-speed collision in mixing head cavity of enhanced reaction injection molding machine[J]. China Plastics, 2022, 36(6):130-136.
- [2] Trautmann P, Piesche M. Experimental investigations on the mixing behaviour of impingement mixers for polyurethane production[J]. Chemical Engineering & Technology, 2001, 24(11):1 193-1 197.
- [3] Pei K, Li R, Zhu Z. Effects of geometry and process conditions on mixing behavior of a multijet mixer[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014, 53(26):10 700-10 706.
- [4] Zhan X, Jing D. Influence of geometric parameters on the fluidic and mixing characteristics of T-shaped micromixer[J]. Microsystem Technologies-Micro and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems, 2020, 26(9):2 989-2 996.
- [5] 刘国君,赵天,王聪慧,等.Y型微混合器结构与工作参数在两相脉动混合中的优化[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(4):1 155-1 161.
Liu Guojun, Zhao Tian, Wang Conghui, et al. Optimization of structure and working parameters of Y tape micro-mixer in two-phase

- pulsating mixing[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2015, 45(4):1 155-1 161.
- [6] 郭栋. 新型撞击流反应器参数优化与流场特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- Guo Dong. The research of parameters optimization and flow characteristics on new impinging stream reactor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [7] 郭敏. 高聚物道路修复发泡机关键技术研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2011.
- Guo Min. The key technology study of high polymer roads repairing foaming machine[D]. Wuhan : Wuhan Institute of Technology, 2011.
- [8] 戴兵. 聚氨酯发泡设备的模块化设计与研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- Dai Bing. Modular design and research of polyurethane foaming equipment[D]. Suzhou: Suzhou University, 2020.
- [9] 张建伟, 牛聚超, 董鑫, 等. 撞击流反应器流场数值模拟及其混合性能优化[J]. 过程工程学报. 2022, 22(9):1 244-1 252.
- Zhang Jianwei, Niu Juchao, Dong Xin, et al. Flow field numerical simulation and mixing performance optimization of impinging stream reactor[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(9):1 244-1 252.
- [10] 张建伟, 尚盼龙, 闫俊杰, 等. 水平对置双向撞击流混合器的混合效果[J]. 过程工程学报. 2017, 17(5):959-964.
- Zhang Jianwei, Shang Panlong, Yan Junjie, et al. Mixing effect in two horizontal opposed impinging stream mixer[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(5):959-964.
- [11] Palanisamy B, Paul B. Continuous flow synthesis of ceria nanoparticles using static T-mixers[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 78:46-52.
- [12] 牛聚超. 撞击流反应器流场数值模拟分析与氢氧化钙纳米粉体制备研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2022.
- Niu Juchao. Numerical simulation analysis of flow field in impinging flow reactor and preparation of calcium hydroxide nano-powder[D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2022.
- [13] 梅益, 薛茂远, 甘盛霖, 等. 基于多目标的九轴五联动磨床整机分析与结构优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 25-36.
- Mei Yi, Xue Maoyuan, Gan Shenglin, et al. Whole machine analysis and structure optimization of nine-axis five-linkage grinder based on multi-objective[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2022, 49(6):25-36.
- [14] 许航. 喷涂设备喷枪流场仿真与结构优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- Xu Hang. Flow field simulation and structure optimization design of spray gun for spraying equipment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [15] 薛茂远, 梅益, 唐方艳, 等. 基于GA-ELM及遗传算法的注塑件成型工艺优化[J]. 塑料, 2022, 51(1):56-61.
- Xue Maoyuan, Mei Yi, Tang Fangyan, et al. Optimization of injection molding process based on GA-ELM and genetic algorithm [J]. Plastics, 2022, 51(1):56-61.
- [16] 廖生温, 王玉勤, 王可胜, 等. 基于BP神经网络的导管接头注塑工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3):65-70.
- Liao Shengwen, Wang Yuqin, Wang Kesheng, et al. Optimization of injection process parameters of catheter joint based on bp neural network[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3): 65-70.
- [17] 杨佳男, 马飞鸿, 胡斌, 等. 基于GA-BP神经网络的负氧离子浓度反演模型研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(8):62-64.
- Yang Jianan, Ma Feihong, Hu Bin, et al. Study on inverse model of negative oxygen ion concentration based on GA-BP neural network[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42 (8):62-64.
- [18] 王学兵, 张慧鹏, 王亚辉, 等. 基于BP神经网络与遗传算法的槽门框架结构优化设计[J]. 技术与市场, 2022, 29(8):1-5.
- Wang Xuebing, Zhang Huipeng, Wang Yahui, et al. Structural optimization design of slot frame based on BP neural network and genetic algorithm[J]. Technology and Market , 2022, 29(8):1-5.