平板磁选机平面挤压磁系结构参数优化研究*

莫民坤[1,2],滕家皇[1,2],梁超旭[1,2],黄福川[1,2]

(1.广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004;
2.广西大学 广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:为了提高平板磁选机的磁场性能并降低制造成本,运用有限元法、响应面法和多目标遗传算法(NSGA-Ⅱ)对平面挤压磁系结构设计参数进行多目标优化分析。首先,以挤压磁系设计参数为变量,进行响应面分析试验设计,并通过数值模拟计算面积场强和磁体效率密度的响应值,构建目标函数的回归模型,并用方差分析评估各回归模型的拟合精度。然后,构建以面积场强、磁体效率密度和磁极数量为目标的多目标优化模型,计算Pareto解集获得一系列优化方案。研究结果表明:面积场强和磁体效率密度的回归模型拟合精度较高,具有良好的预测能力;Pareto解集揭示了面积场强与磁体效率密度、磁极数量之间存在冲突关系;多目标优化模型与仿真结果误差值范围为0.73%~5.30%,验证了多目标遗传算法用于平面挤压磁系设计参数优化的可靠性。

关键词:平面挤压磁系;响应面法;NSGA-Ⅱ;多目标优化设计;面积场强

中图分类号:TD924 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)01-0230-08

Optimization Study on the Structural Parameters of the Planar Extrusion Magnetic System of the Flat Magnetic Separator

MO Minkun[1,2], *TENG Jiahuang*[1,2], *LIANG Chaoxu*[1,2], *HUANG Fuchuan*[1,2]

(1.School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
2.Guangxi Key Laboratory of Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: In order to improve the magnetic field performance of the flat magnetic separator and reduce its manufacturing costs, the finite element method, response surface method, and Nondominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ) were used to perform multi-objective optimization analysis on the structural parameters of the planar extrusion magnetic system. Firstly, a response surface analysis experiment was conducted using the structural parameters of the extrusion magnetic system as variables. The response values of the area field intensity and magnet efficiency density were calculated through numerical simulation, and a regression model of the objective function was constructed. The fitting accuracy of each regression model was evaluated using analysis of variance. Then, a multi-objective optimization model was constructed with the objectives of area field intensity, magnet efficiency density, and number of magnetic poles, and a Pareto solution set was calculated to obtain a series of optimization schemes. The research results indicate that the regression model of area field intensity and magnet efficiency density has a high fitting accuracy and a good predictive ability. The Pareto solution set reveals a conflicting relationship between the area field intensity with the efficiency density and number of magnetic poles of the magnet. The error range between the multi-objective optimization model with the simulation results is 0.73%-5.30%, which verifies the reliability of the multi-objective genetic algorithm in optimizing the design parameters of the planar extrusion magnetic system.

Key words: Planar extrusion magnetic system, Response surface method, NSGA-Ⅱ, Multi-objective optimal design, Area field intensity

0 前言

磁选是利用矿物的磁化率差异来进行选矿的工艺方法,相比于化学法,具有绿色环保的优点[1]。磁选设备是磁选工艺实现的基础,而磁系是磁选设备的核心部件。依照磁系划分,磁选机可分选电磁磁

* **收稿日期**:2024-02-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52063003)
作者简介:莫民坤(1997—),男,广西南宁人,硕士研究生,主要研究方向为选矿机械设计与优化。E-mail:1262269671@qq.com
通信作者:黄福川(1963—),男,广西富川人,博士,教授,主要研究方向为过程设备设计与优化和润滑与密封材料。E-mail:huangfuchuan@gxu.edu.cn

选机和永磁磁选机[2]。随着能耗问题的凸显,永磁磁选机逐渐成为主流选择[3]。其中,平板磁选机因具有分选高效、使用方便以及维修率低等优点,在非金属矿除铁和重介质回收等领域得到了广泛应用[4]。

挤压磁系是平板磁选机中常用的一种磁系结构,决定了平板磁选机的磁感应强度、磁场梯度和磁场方向等磁场分布特性[5]。因此,改变磁系的几何结构,以便获得更优的磁场分布特性,一直是提高磁选机性能的重要研究方向。程志勇等[6]利用COMSOL Mutiphysics对平面挤压磁系磁场进行仿真优化,通过对比垂直方向和水平方向上的磁感应强度,得出最佳磁体宽度和高度分别为30 mm和40 mm;但是,该研究并没有考虑导磁板尺寸对磁场的影响。MOHANRAJ等[7]、李玉永等[8]都通过有限元法研究不同导磁板宽度对磁场大小的影响,研究表明:随着磁极垫片宽度的增大,磁作用深度方向的磁感应强度会减弱。王芝伟等[9]通过固定磁体尺寸,采用仿真模拟探索了导磁板尺寸对磁场强度的影响,结果表明:导磁板高度与磁体高度之比为0.5~0.65时,磁感应强度较高;磁体宽度与导磁板宽度为4∶1时,磁场分布特性较好。

在以往的研究中,学者们主要研究了挤压磁系单个设计参数的变化对磁场的影响,且只是以磁感应强度大小为指标对磁系进行了优化设计,并未系统阐述挤压磁系所有设计参数与磁场大小之间的定量关系。随着磁选设备朝大型化发展[10],制造更大型的磁系需要消耗更多昂贵的稀土永磁材料,进而提高了磁选设备的制造成本。因此,磁系设计优化研究应将磁系材料的利用率作为优化目标,以实现磁选设备性能与成本效益的最优平衡。

为了提高平板磁选机的性能并降低其制造成本,本文通过COMSOL Multiphysics有限元软件建立了平面挤压磁系二维模型,并通过响应面法构建了平面挤压磁系的面积场强和磁体效率密度的回归模型,在此基础上,建立了考虑面积场强、磁体效率密度和磁极数量的多目标优化模型。最后,通过NSGA-Ⅱ算法对多目标模型进行优化,得到平面挤压磁系结构参数的Pareto前沿解集。本研究系统阐述了平面挤压磁系的磁系性能指标、磁系经济指标与设计参数之间的关系,以期为平面挤压磁系的设计与优化提供借鉴。

1 有限元模型

1.1 平面挤压磁系模型的建立

如图1所示,在COMSOL Multiphysics中构建平面挤压磁系的二维有限元模型,箭头为磁体的充磁方向,w_1为永磁体宽度,w_2为导磁板宽度,h_1为永磁体高度,h_2为导磁板高度。永磁体的剩余磁通密度B_r=1.35 T,矫顽力为875 kA/m,导磁介质为电工纯铁。

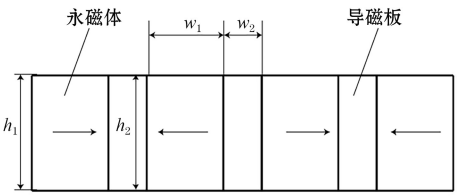


图1 平面挤压磁系的有限元模型

Fig.1 Finite element model of planar extrusion magnetic system

平板磁选机分选过程中,矿浆主要流经磁系中间的挤压磁极。如图2所示,磁感应强度极大值出现在挤压磁极的导磁板与永磁体交界处,在分选矿物时,磁性颗粒受磁场梯度驱动,向磁场强度较大处移动,最后吸附在磁极处。因此,本文的研究重点是中间挤压磁极的导磁板与永磁体交界处的磁场变化特征,以期优化磁选效率。

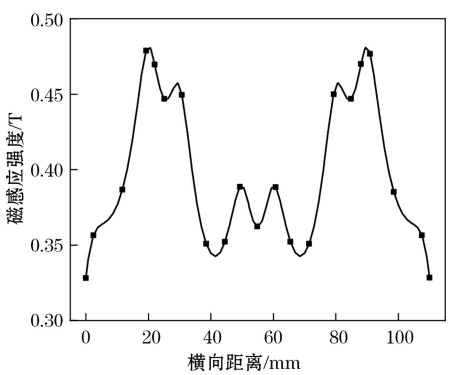


图2 水平方向的磁感应强度变化

Fig.2 Variation of magnetic induction intensity in the horizontal direction

1.2 模型有效性验证

为验证平面挤压磁系有限元模型的可靠性,将磁系在垂直方向上的磁感应强度与实际测量结果进行对比。由图3可看出,随着距磁极表面距离的增大,仿真结果与实测结果的分布曲线基本一致,这证实了模型的有效性,可采用该模型进行后续的研究。

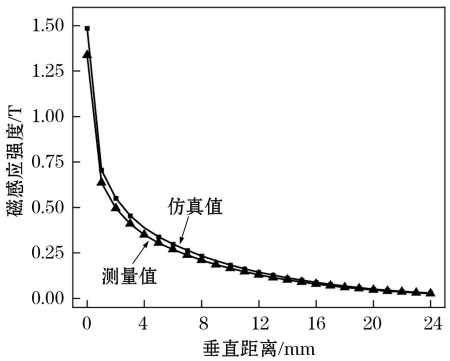


图 3 垂直方向的磁感应强度变化

Fig.3 Variation of magnetic induction intensity in the vertical direction

2 响应面模型

响应面法(RSM)是一种数学技术,通过构建模型来描述多个自变量与一个或多个响应之间的关系,该方法被广泛应用于解决多维设计空间的优化设计问题[11]。RSM 通过设计合理的试验方案并计算获得样本数据,采用数学模型(线性、平方多项式函数等)对试验结果进行拟合,通过统计分析技术对回归模型进行验证。该技术尤其适用于提高试验设计的流程效率。试验设计的基本理念是在一组设计的试验中,同时对所有重要参数进行多样化处理,通过建立数学模型将试验结果进行组合,该模型可以用于优化、预测或解释试验结果。RSM 通过聚集最重要的因素来减少过程中的变量数量,进而降低操作成本和试验时间。

2.1 因素和评价指标

为了全面量化平面挤压磁系的磁场强度,采用面积场强(E)[12]来表征平面挤压磁系在法向有效工作区内的磁场强度。面积场强即为挤压磁系表面区域[a, b]内磁感应强度法向分布曲线的积分值,积分区域为中间磁极的导磁板与磁体交界处,如图 4 所示。面积场强计算见式(1)。

$$E=\int_a^b B(s)\mathrm{d}s \tag{1}$$

式中:$B(s)$ 为磁场强度,T;s 为法向有效工作区域范围,mm。

平板磁选机运用了薄流膜选矿原理[13],其皮带厚度通常为 0.8~3 mm,假设皮带表面距离磁系表面约为 4 mm,选定距磁极 4~24 mm 的区域作为研究挤压磁系磁场作用深度的区间。

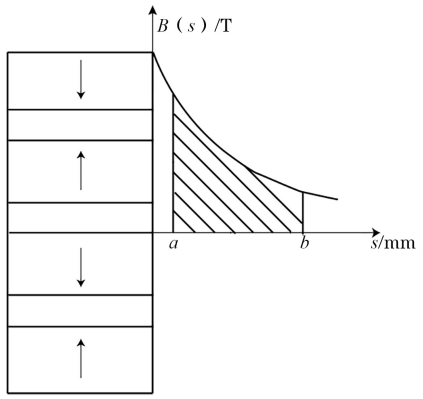


图 4 面积场强计算示意

Fig.4 Calculation of area field intensity

为了降低磁系制造成本,将磁系材料的利用率作为磁系的优化目标。采用磁体效率密度(U)来表征磁系材料的利用率,其表示面积场强与二维挤压磁系单元所占面积之比,计算方法见式(2):

$$U=\frac{E}{(4w_1+3w_2\alpha)h_1} \tag{2}$$

式中,α 为导磁板与永磁体的高度比,$\alpha=h_2/h_1$。

2.2 试验设计及结果

通过单因素试验和相关文献[6,9],确定了磁体宽度、磁体高度、导磁板宽度、导磁板与磁体高度之比的取值范围,设计因素及水平见表 1。采用中心复合试验设计方法(CCD)进行 4 因素 5 水平响应面分析试验设计,试验结果见表 2。

表 1 设计因素及水平

Table 1 Design factors and levels

水平	因素			
	磁体宽度(A)/mm	磁体高度(B)/mm	导磁板宽度(C)/mm	导磁板与永磁体的高度比(D)
−2	20	20	4	0.4
−1	40	40	6	0.5
0	60	60	8	0.6
1	80	80	10	0.7
2	100	100	12	0.8

2.3 响应面模型的构建与方差分析

根据表 2 的试验结果进行回归拟合,通过合并不显著因素到误差项中,可得到面积场强和磁体效率密度的简化二阶回归模型,见式(3)、式(4)。

$$\begin{aligned}E=&-2.357\ 55+0.188\ 482w_1+0.093\ 099h_1+\\&0.192\ 051w_2+9.74\times10^{-4}w_1h_1+\\&5.203\times10^{-3}h_1w_2-1.258\times10^{-3}w_1^2-\\&1.188\times10^{-3}h_1^2-0.021\ 098w_2^2\end{aligned} \tag{3}$$

$$U=2.751\ 46-0.0137\ 76w_1-0.036\ 41h_1+$$

$$0.010\ 286w_2+1.35\times10^{-4}w_1h_1+2.97\times10^{-4}h_1w_2-4.578\ 82\times10^{-6}w_1^2+1.22\times10^{-4}h_1^2-1.437\times10^{-3}w_2^2 \quad (4)$$

表 2　4 因素 5 水平试验结果

Table 2　Experimental results of four factors and five levels

试验方案	设计变量				评价指标	
	A/mm	B/mm	C/mm	D	E/(T·mm)	U/(mT/mm)
1	40	40	6	0.5	8.415	1.245
2	80	40	6	0.5	11.369	0.864
3	40	80	6	0.5	8.941	0.661
4	80	80	6	0.5	13.518	0.514
5	40	40	10	0.5	8.746	1.249
6	80	40	10	0.5	11.425	0.853
7	40	80	10	0.5	10.138	0.724
8	80	80	10	0.5	14.338	0.535
9	40	40	6	0.7	8.480	1.228
10	80	40	6	0.7	11.407	0.857
11	40	80	6	0.7	9.012	0.653
12	80	80	6	0.7	13.553	0.509
13	40	40	10	0.7	8.845	1.222
14	80	40	10	0.7	11.492	0.843
15	40	80	10	0.7	10.296	0.711
16	80	80	10	0.7	14.419	0.529
17	20	60	8	0.6	5.473	0.966
18	100	60	8	0.6	14.167	0.570
19	60	20	8	0.6	7.371	1.449
20	60	100	8	0.6	12.494	0.491
21	60	60	4	0.6	10.747	0.725
22	60	60	12	0.6	12.245	0.780
23	60	60	8	0.4	11.616	0.776
24	60	60	8	0.8	11.765	0.756
25	60	60	8	0.6	11.842	0.776
26	60	60	8	0.6	11.936	0.782
27	60	60	8	0.6	11.851	0.776
28	60	60	8	0.6	12.669	0.830
29	60	60	8	0.6	11.801	0.773
30	60	60	8	0.6	11.705	0.767

面积场强和磁体效率密度的回归模型方差分析见表 3 和表 4。由表 3 和表 4 可知,面积场强和磁体效率密度的回归模型 P 值均小于 0.000 1,说明两个回归模型在整个回归区域内拟合良好,具有统计学意义[14]。两个回归模型的失拟项 P 值均大于 0.05,说明失拟项不显著,回归模型可接受。通过 F 值可以判断各因素对响应结果影响的主次顺序,对面积场强的影响从大到小依次为:磁体宽度(A)、磁体高度(B)、导磁板宽度(C);对磁体效率密度的影响由大到小依次为:磁体高度(B)、磁体宽度(A)、导磁板宽度(C)。

面积场强和磁体效率密度的回归模型误差统计分析见表 5。由表 5 可知,两个回归模型的决定系数 R^2 均接近 1,说明回归模型的拟合精度较高;校正决定系数 R^2_{adj} 分别为 0.972 6 和 0.988 1,即 97.26% 和 98.81% 的试验数据的变异性可用回归模型进行解释。变异系数 CV 作为衡量数据变异程度的重要指标,其理想值应小于 10%,且数值越小表明数据的稳定性和可信度越高。面积场强和磁体效率密度的变异系数分别为 3.2% 和 3.28%,表明试验的可信度和精确度较好。精密度 AP 是有效信号与噪声的比值,大于 4 时视为合理[16]。由表 5 可知,两个回归模型的精密度均达到较高水平。

表 3　面积场强回归模型方差分析

Table 3　Variance analysis of regression model of area field intensity

方差源	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	130.61	16.330 0	129.85	<0.000 1	* *
A	88.30	88.300 0	702.35	<0.000 1	* *
B	24.57	24.570 0	195.40	<0.000 1	* *
C	2.67	2.670 0	21.21	0.000 2	* *
AB	2.43	2.430 0	19.32	0.000 3	* *
BC	0.69	0.693 1	5.51	0.028 8	*
A^2	7.10	7.100 0	56.43	<0.000 1	* *
B^2	6.32	6.320 0	50.30	<0.000 1	* *
C^2	0.20	0.199 4	1.59	0.221 7	
残差	2.64	0.125 7			
失拟项	2.02	0.126 3	1.02	0.540 4	
纯误差	0.62	0.123 8			
总离差	133.25				

注:* * 表示该项极其显著(P<0.01);* 表示该项显著(P<0.05);0.05<P≤0.2,表示该项有弱影响[15],下同。

表 4　磁体效率密度回归模型的方差分析

Table 4　Variance analysis of regression model of magnet efficiency density

方差源	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1.730 0	0.215 9	302.24	<0.000 1	* *
A	0.370 9	0.370 9	519.23	<0.000 1	* *
B	1.230 0	1.230 0	1 726.46	<0.000 1	* *
C	0.002 5	0.002 5	3.49	0.075 6	
AB	0.046 8	0.046 8	65.49	<0.000 1	* *
BC	0.002 3	0.002 3	3.16	0.090 0	
A^2	0.000 1	0.000 1	0.131 5	0.720 5	
B^2	0.066 2	0.066 2	92.74	<0.000 1	* *
C^2	0.000 9	0.000 9	1.30	0.267 8	
残差	0.015 0	0.000 7			
失拟项	0.012 3	0.000 8	1.45	0.361 0	
纯误差	0.002 7	0.000 5			
总离差	1.740 0				

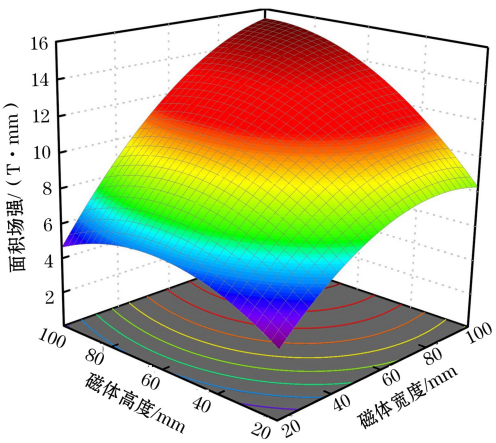
表 5　回归模型误差统计分析

Table 5　Statistical analysis of regression model errors

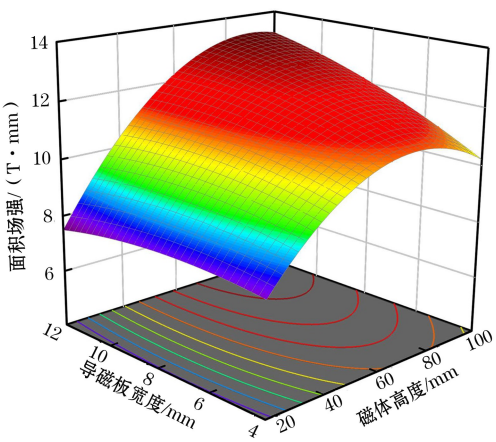
回归模型	决定系数 R^2	校正决定系数 R^2_{adj}	变异系数 CV/%	精密度 AP
面积场强回归模型	0.980 2	0.972 6	3.20	44.527 9
磁体效率密度回归模型	0.991 4	0.988 1	3.28	63.247 2

2.4 响应面分析

二元交互作用对面积场强和磁体效率密度的影响的响应面图见图 5 和图 6。由图 5 可知,图 5(a)比图 5(b)的曲面弯曲程度要更大,说明磁体宽度(A)和磁体高度(B)之间的交互作用对面积场强的影响较为显著。由表 3 可知,AB 的 F 值(19.32)大于 BC 的 F 值(5.51),AB 的 P 值(0.000 3)小于 BC 的 P 值(0.028 8)。



(a) 磁体宽度和磁体高度的交互作用



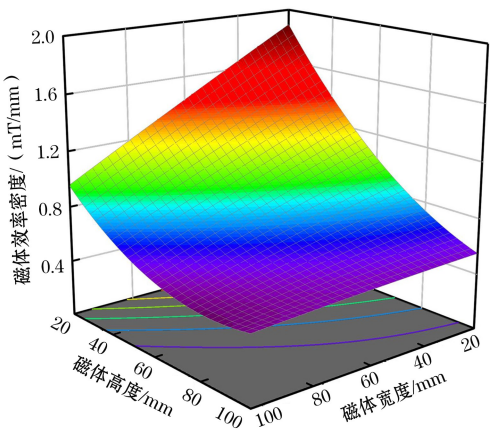
(b) 磁体高度和导磁板宽度的交互作用

图 5 二元交互作用对面积场强影响的响应面

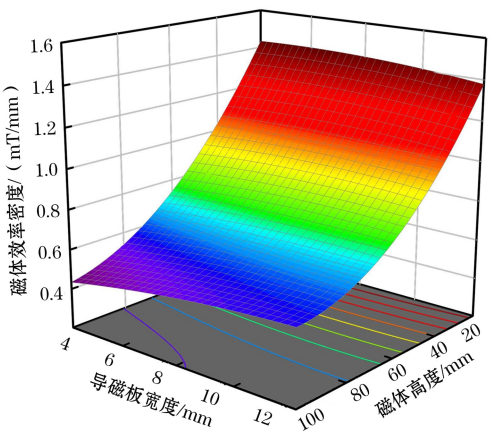
Fig.5 Response surface of the influence of binary interaction on area field intensity

由图 5(a)可知,当磁体高度较小时,面积场强随磁体宽度增加而缓慢变大;当磁体高度较大时,面积场强随磁体宽度的增加先快速增大后趋于平缓。这是由于磁动势随着磁体体积的增大而增加,且磁体宽度(即充磁方向的磁体厚度)对磁动势的影响要大于磁体高度(即磁极面宽度)。由图 5(b)可知,当导磁板宽度较小时,随着磁体高度的增大,面积场强先增大后减小;当导磁板宽度较大时,随着磁体高度的增大,面积场强增大后趋于平缓。这是因为磁体高度增大时,永磁体提供磁通的面积增大,总磁通的增大会提高磁场强度。而后磁场强度的下降可能是因为导磁板对磁场的疏导能力具有一定的阈值,当总磁通超过了导磁板的聚磁能力,加之磁路增大,漏磁现象加剧,导致分选区域的整体磁场减弱。因此,为获得较大的磁场作用深度,可选取导磁板宽度与磁体高度之比为 1∶5～1∶8,并同时增大磁体宽度。

由图 6 可知,图 6(a)比图 6(b)的曲面弯曲程度要更大,说明磁体宽度(A)和磁体高度(B)之间的交互作用对磁体效率密度的影响较为显著。由表 4 可知,AB 的 F 值(65.49)大于 BC 的 F 值(3.16),AB 的 P 值(<0.000 1)小于 BC 的 P 值(0.09)。



(a) 磁体宽度和磁体高度的交互作用



(b) 磁体高度和导磁板宽度的交互作用

图 6 二元交互作用对磁体效率密度影响的响应面

Fig.6 Response surface of the influence of binary interaction on magnet efficiency density

由图 6(a)可知,当磁体宽度较小时,磁体效率密度随着磁体高度的增大而急速减小;当磁体宽度较大时,磁体效率密度随着磁体高度的增大而缓慢减小。由此可知,随着磁体体积增大,磁体效率密度

将会降低,且磁体高度对磁体效率密度的影响大于磁体宽度。这是因为随着磁体高度的增加,底部磁体对分选区域磁场的增强作用大幅降低,单位磁体高度的变化对磁场的影响小于单位磁体宽度的变化。由图 6(b)可知,随着磁体高度增大,磁体效率密度在较小导磁板宽度下的降低速度比在较大导磁板宽度下的降低速度更快。这是因为狭窄导磁板虽然可增大磁极近表面的磁场,但是磁场衰减较快;而导磁板宽度较大时,尽管磁极近表面的磁场较小,但磁场衰减速度慢,可以获得较高的整体磁场。因此,为获得较大的磁场作用深度,提高磁体利用率,可选取大磁体宽度、大导磁板宽度和小磁体高度。

3 多目标遗传算法优化

目前,针对多目标优化问题的方法主要有遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等。非支配遗传算法(NSGA)基于 Pareto 最优理论,是解决多目标优化问题的有效方法,但该算法计算复杂度较高且缺乏精英策略。为了响应这一动机,Srinivas 等学者基于 NSGA 开发了具有精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)[17],该算法具有采样范围广、计算速度快等优点。因此,采用 NSGA-Ⅱ对优化模型进行求解。

3.1 多目标优化数学模型

平板磁选机分选过程中,磁性颗粒会吸附在永磁体与导磁板交接处的皮带表面[18]。由于磁性颗粒在磁场中会受到磁化并形成磁团聚,磁链在经过不同的磁极时会翻滚,翻滚行为有利于抛除磁链中夹杂着的脉石矿粒从而提高精矿品位[19]。磁极数量会影响磁选机的处理能力及磁选效果,以每米内磁极数量(N)来表示平面挤压磁系的设计指标,见式(5)。

$$N=\frac{1000-w_1}{w_1+w_2} \tag{5}$$

根据式(3)至式(5),建立多目标优化数学模型和约束条件:

$$F_{\max}=[E,U,N] \tag{6}$$

将上述多目标优化数学模型代入 NSGA-Ⅱ算法中进行求解,取种群规模为 150,迭代次数为 200,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.05。

3.2 Parato 最优解集讨论

Pareto 最优解集如图 7 所示。图中每个数据点都存在一组对应的磁系设计参数,目标函数将随着磁系设计参数的变化而不断变化。通过观察各数据点在坐标面的投影,可详细分析三个目标函数间的两两变化关系。由图 7 可知,面积场强与磁体效率密度、面积场强与磁极数量之间均存在冲突关系,即在各参数当前的取值范围内,面积场强的增大必然会导致磁体效率密度和磁极数量的减小。由此可知,磁系设计参数无法同时满足磁场强度、磁体有效利用率和磁极数量达到最大化的需求。因此,选取最优解时需要根据实际情况添加合适的约束条件进行决策。当矿物颗粒较大时,为提高处理能力,需要更大的磁场作用深度和更大的磁场力,可以选取具有较大面积场强的最优解;当矿物颗粒较小时,容易出现夹杂情况,为抛除夹杂物,在磁场强度满足分选要求的基础上,可选取具有较大磁极数量和磁体效率密度的最优解。针对不同矿物磁性和分选指标,应选取相匹配的磁系结构设计参数组合,这需要收集大量的矿物磁性分析数据和分选试验数据,从而搭建矿物磁性-磁系结构-分选指标三者相互关联的磁系设计流程,以便设计出更加高效的磁选设备。

将本研究所得的 Pareto 解集与前人研究成果进行对比(见图 7),对比结果表明,在相同的面积场强下,Pareto 解集可提供具有更高磁体效率密度或更多磁极数量的磁系设计参数组合;在相同的磁体效率密度下,Pareto 解集可提供具有更高面积场强或更多磁极数量的磁系设计参数组合。Pareto 解集有助于在优化平面挤压磁系时,提高设计优化效率。

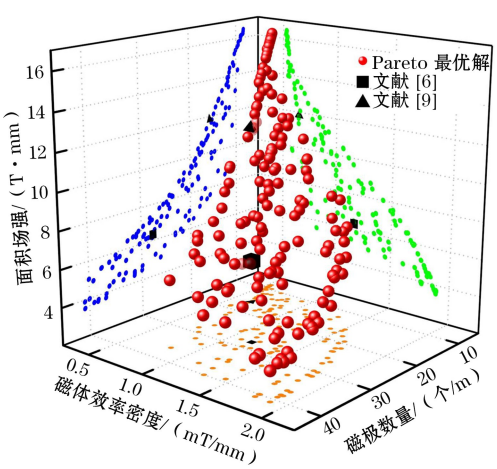


图 7 Pareto 最优解集

Fig.7 Pareto optimal solution set

3.3 优化结果验证

选取 Pareto 最优解集中的 3 组磁系参数设计组合,见表 6,采用 COMSOL Multiphysics 对其进

行仿真验证,结果见表 7。其中,磁极数量计算简单,算法优化结果与仿真结果非常接近,不再列出。由表 7 可知,面积场强的算法优化结果与仿真结果误差值范围为 0.73%～2.40%,磁体效率密度的算法优化结果与仿真结果的误差值范围为 0.73%～5.30%。结果表明,多目标遗传算法具有良好的全局寻优能力。

表 6 磁系参数设计组合

Table 6 Design combination of magnetic system parameters

设计方案	磁体宽度/mm	磁体高度/mm	导磁板宽度/mm
1	62.0	64.0	10
2	49.5	26.0	7
3	20.0	24.5	4

表 7 优化结果与仿真结果对比

Table 7 Comparison between optimization results and simulation results

设计方案	面积场强			磁体效率密度		
	优化值/(T·mm)	仿真值/(T·mm)	误差/%	优化值/(mT/mm)	仿真值/(mT/mm)	误差/%
1	12.590 33	12.499 00	0.73	0.734 14	0.739 56	0.73
2	8.018 42	8.099 10	1.00	1.423 53	1.464 39	2.80
3	3.894 51	3.990 10	2.40	1.768 70	1.867 67	5.30

4 结论与建议

为了充分考虑挤压磁系各结构设计参数对磁场影响的复杂相互作用,采用有限元法和响应面法明确了平面挤压磁系的磁场性能和经济性能的定量指标。构建了以面积场强、磁体效率密度和磁极数量为优化指标的多目标优化数学模型,通过 NSGA-Ⅱ计算获得 Pareto 最优解集,并与前人研究进行对比讨论,最后,对优化结果进行可靠性仿真验证。研究结果如下。

(1) 面积场强和磁体效率密度两个回归模型的拟合精度较高,具有较好的预测能力。各设计参数对面积场强的影响从大到小依次为:磁体宽度、磁体高度、导磁板宽度,因素交互作用的影响从大到小依次为:磁体高度与磁体宽度交互作用、磁体高度与导磁板宽度交互作用。设计参数对磁体效率密度的影响从大到小依次为:磁体高度、磁体宽度、导磁板宽度,因素交互作用的影响从大到小依次为:磁体宽度与磁体高度交互作用、磁体高度与导磁板宽度交互作用。研究发现大块的永磁体可以产生更强的整体磁场,但是扁平的磁块具有更好的磁体利用率。

(2) Pareto 最优解集揭示了面积场强与磁体效率密度、面积场强与磁极数量之间均存在冲突关系,应根据不同的矿物磁性和分选指标选取相匹配的磁系结构设计参数组合。选取 Pareto 最优解集中的 3 组磁系参数设计组合进行仿真计算,计算结果表明,面积场强、磁体效率密度的算法优化结果与仿真结果误差值范围分别为 0.73%～2.40%、0.73%～5.30%,验证了多目标遗传算法用于平面挤压磁系设计参数优化的可靠性。

(3) 随着磁选设备的专用化发展,后续优化可结合矿物特性和分选指标进一步研究,构建矿物磁性-磁系结构-分选指标的磁选设备设计框架,从而提高磁选设备的针对性和分选效率。

参考文献(References):

[1] LIU Jianjun, XIE Shunping, LI Xudong, et al. Separating efficiency of ferromagnetic particles and principle of low-intensity dry magnetic separator under different air supply modes: based on multi-physical modeling [J]. Powder Technology, 2023, 415: 118155.

[2] 李凤久.磁电选矿[M].北京:化学工业出版社,2021:53-54.
LI Fengjiu. Magneto electric beneficiation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021: 53-54.

[3] 胡永会,冉红想.永磁辊筒式强磁选设备的发展[J].有色金属(选矿部分),2019(5):114-118.
HU Yonghui, RAN Hongxiang. Development of permanent roll and drum high-intensity magnetic separators [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5): 114-118.

[4] CHEN Luzheng, YANG Ruoyu, ZENG Jianwu, et al. A wet belt permanent high gradient magnetic separator for purification of non-metallic ores[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 153: 66-70.

[5] 冉红想.永磁强磁选技术的发展[J].有色金属(选矿部分),2013(增刊 1):50-53.
RAN Hongxiang. Development of permanent magnet high intensity magnetic separation technology [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2013(Suppl.1): 50-53.

[6] 程志勇,卢东方,薛子兴,等.基于 COMSOL Mutiphysics 的履带式磁选机平面磁系磁场仿真与参数优化[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(4):1049-1057.
CHENG Zhiyong, LU Dongfang, XUE Zixing, et al. COMSOL Mutiphysics-based magnetic field simulation and parameter optimization of planar magnetic system of crawler magnetic separator[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(4): 1049-1057.

[7] MOHANRAJ G T, RAHMAN M R, JOLAOARASHI S, et al. Design and fabrication of optimized magnetic roller for permanent roll magnetic separator (PRMS): finite element method magnetics (FEMM) approach[J]. Advanced Powder Technology, 2021, 32(2): 546-564.

[8] 李玉永,刘风亮,辛青,等.基于 ANSYS 的强磁板式磁选机的磁场仿真分析[J].现代矿业,2021,37(2):147-150.
LI Yuyong, LIU Fengliang, XIN Qing, et al. Analysis of magnetic field simulation of high intensity magnetic plate magnetic separator based on ANSYS[J]. Modern Mining, 2021,37(2):147-150.

[9] 王芝伟,冉红想.永磁强磁选机磁系仿真模拟及结构优化[J].有色金属(选矿部分),2015(5):73-76.
WANG Zhiwei, RAN Hongxiang. Simulation and optimization of magnetic system of high-intensity permanent magnetic separator [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2015(5):73-76.

[10] 沈海榕,高利坤,饶兵,等.永磁磁选设备的研究现状及发展趋势[J].有色金属(选矿部分),2021(5):103-110.
SHEN Hairong, GAO Likun, RAO Bing, et al. Research status and development tendency of permanent magnetic separation equipment [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2021(5):103-110.

[11] WITEK-KROWIAK A, CHOJNACKA K, PODSTAWCZYK D, et al. Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process [J]. Bioresource Technology,2014,160:150-160.

[12] CAO Bin, YUAN Yi, YERBOL A, et al. Optimization of Halbach magnetic roller for eddy current separation based on the response surface method and multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:123531.

[13] SHI Changliang, CHEN Shihao, MA Jiao, et al. Recovery of heavy medium in coal washing plant using a flat plate magnetic separator and optimization of flow and magnetic fields[J]. Fuel,2023,333(2):126414.

[14] 王晓军,马晓霞,孙燕飞,等.基于 RSM-BBD 的全尾砂絮凝沉降效果多因素耦合分析[J].矿业研究与开发,2023,43(6):62-67.
WANG Xiaojun, MA Xiaoya, SUN Yanfei, et al. Multi-factor coupling analysis on flocculation and sedimentation effect of whole tailings based on RSM-BBD [J]. Mining Research and Development,2023,43(6):62-67.

[15] 刘文卿.实验设计[M].北京:清华大学出版社,2005:30.
LIU Wenqing. Design of experiments[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2005:30.

[16] 谢江维,李春利,黄国明.响应面法耦合 NSGA-Ⅱ算法的隔壁塔结构优化[J].化工进展,2020,39(8):2962-2971.
XIE Jiangwei, LI Chunli, HUANG Guoming. Structural optimization of dividing wall column using response surface methodology coupled with NSGA-Ⅱ algorithm[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2020,39(8):2962-2971.

[17] ZHAO Xinyang, ZHU Yi, MEI Zhiyuan. A many-objective joint parallel simulation method for acoustic optimization design of sound-absorbing structures[J]. Applied Sciences, 2022,12(14):6892.

[18] 叶方平,李宸宇,曾剑武,等.基于 Comsol 的平板高梯度磁选机的仿真与实验研究[J].金属矿山,2021(10):155-161.
YE Fangping, LI Chenyu, ZENG Jianwu, et al. Simulation and experimental research of flat plate high gradient magnetic separator based on Comsol[J]. Metal Mine,2021 (10):155-161.

[19] 尚红亮,李国平,沈政昌,等.旋转磁场特性及其磁选行为影响规律[J].中国矿业大学学报,2022,51(3):599-606.
SHANG Hongliang, LI Guoping, SHEN Zhengchang, et al. Characteristics of the rotating magnetic field and its influence on magnetic separation behavior[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2022,51(3):599-606.