

基于正交试验的电工级氧化镁改性粉配比优化

刘 权¹, 刘百宽^{1,2}, 田晓利², 李志勋², 许 雨¹

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 濮阳濮耐高温材料(集团)股份有限公司, 河南 濮阳 457100)

摘要: 为改善电工级氧化镁普粉电性能的不足, 使改性后电工级氧化镁粉更加适配电热管制造行业, 通过加入白炭黑、电工级氧化镁用添加剂和硅油的方法对普粉进行改性, 采用正交试验法设计 25 组配比组合进行试验。通过极差法分析单一指标(冷态绝缘耐压强度、泄漏电流和热态绝缘耐压强度)下的最优配比, 并利用矩阵分析法实现多目标综合分析优化, 得到优化后的组合配比, 运用指标值预估法预测最终配比的电工级氧化镁改性粉的电性能。结果表明: 以冷态和热态绝缘耐压强度为指标时, 白炭黑掺量为主要影响因素; 以泄漏电流为指标时, 硅油掺量为主要影响因素, 其次是电工级氧化镁用添加剂掺量。多目标优化选择的改性粉配比为白炭黑掺量 0.25% (质量分数, 下同), 电工级氧化镁用添加剂掺量 2%, 硅油掺量 0.25%。最终配比电工级氧化镁改性粉电性能预估值为冷态绝缘耐压强度 3365 V, 泄漏电流 0.112 mA, 热态绝缘耐压强度 2399 V。

关键词: 电工级氧化镁改性; 正交试验; 极差法; 矩阵分析法; 指标值预估; 最优配比

中图分类号: TQ132.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)10-0826-07

引用格式: 刘权, 刘百宽, 田晓利, 等. 基于正交试验的电工级氧化镁改性粉配比优化[J]. 中国材料进展, 2023, 42(10): 826-832.

LIU Q, LIU B K, TIAN X L, *et al.* Optimization Research of Modified Electrical Grade Magnesium Oxide Powder Ratio Based on Orthogonal Test[J]. Materials China, 2023, 42(10): 826-832.

Optimization Research of Modified Electrical Grade Magnesium Oxide Powder Ratio Based on Orthogonal Test

LIU Quan¹, LIU Baikuan^{1,2}, TIAN Xiaoli², LI Zhixun², XU Yu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. Puyang Refractories Group Co., Ltd., Puyang 457100, China)

Abstract: To improve its insufficient electrical property and make it more suitable for the electric heating tube manufacturing industry after modification, the plain electrical grade magnesium oxide powder was modified by adding silica, additive used in electrical grade magnesium oxide powder and silicone oil. Therefore, 25 groups of ratios were designed to carry out combined experiments. On the basis of the orthogonal experiment method. Analyze the optimal ratio under a single indicator (normal withstand voltage, leakage current and heating withstand voltage) with the range method. Also the matrix analysis method was used to analysis and optimize to obtain the optimal ratio, and the index value prediction method was used to predict the electrical property of the final ratio of modified electrical grade magnesium oxide powder. Finally, the results showed that the content of silica is the main influencing factor when the normal and heating withstand voltage is used as the indicator. However, when using leakage current as an indicator, the content of silicone oil is the main influencing factor, followed by the content of additive used in electrical grade magnesium oxide powder. In addition, the final parameters of the optimally selected backfill are as follows: 0.25wt% of silica, 2wt% of additive used in electrical grade magnesium oxide powder, 0.25wt% of silicone oil. Its estimated values of electrical properties of the final ratio of modified electrical grade magnesium oxide powder are normal withstand voltage of 3365 V, leakage current of 0.112 mA, heating withstand voltage of 2399 V.

Key words: electrical grade magnesium oxide powder modification; orthogonal test; range method; matrix analysis method; index value prediction method; optimal mix proportion

收稿日期: 2021-08-18 修回日期: 2021-12-06

第一作者: 刘 权, 男, 1997年生, 硕士

通讯作者: 刘百宽, 男, 1961年生, 教授级高工, 硕士生导师,

Email: liubaikuan@punai.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202108018

1 前言

菱镁矿是一种以碳酸镁为主要成分的天然矿物^[1],

根据结晶状态不同, 一般分为晶质和非晶质 2 种^[2]。我国川藏地区的菱镁矿矿石致密, 细腻有润滑感, 坚硬但质脆, 具有均匀的陶土状宏观结构, 同时具有典型的晶格常数和完整的结晶形貌, 被称为微晶菱镁矿^[3]。普通电熔镁砂可以采用菱镁矿作为原料, 在电熔炉中经熔融和缓慢冷却而制得^[4-6], 具有纯度高、熔点高(2800 ℃)、结晶晶粒大、结构致密、耐高温、化学性能稳定、耐压强度大和绝缘性能好等特点, 基于这些优良性能, 该材料广泛应用于高温电气绝缘材料^[7]。电工级氧化镁是由电熔氧化镁制备而来的, 具有高电阻、高导热性、耐高压和低泄漏电流等优良电热特点, 广泛应用于家用及工业用电热器, 是理想的绝缘材料^[8]。

一直以来, 国内电工级氧化镁行业的发展相对于电热管行业存在着滞后。随着国内对电加热元件品质要求的提升, 许多企业生产的电工级氧化镁质量并不达标, 主要原因有原矿开采品位无法保证、选用浮选法优化低品位菱镁矿、电熔氧化镁冶炼时间变短以及以电熔氧化镁皮砂为原料^[9]。为了提高电工级氧化镁的品质, 相关研究主要从两方面进行。一方面, 提升电熔氧化镁的品质, 通过提升电熔冶炼技术以及优化配制电熔时的菱镁矿矿石配比, 从而合理控制电熔氧化镁的各项化学指标。另一方面, 电工级氧化镁改性, 通过有机硅化物对电工级氧化镁进行表面处理, 达到防潮效果, 主要研究包括有机硅化物的种类、用量、涂覆方式以及新的耐高温高分子材料的研制等; 通过添加无机物添加剂提高电工级氧化镁电性能, 主要研究包括无机物添加剂的种类、用量及制备方法等^[10, 11]。目前以川藏地区微晶菱镁矿为原料制备电熔氧化镁的相关研究已经开展^[12], 以此电熔氧化镁为原料制备电工级氧化镁的相关研究也开始起步。

本试验以提升电工级氧化镁的电性能为目标, 在电工级氧化镁中掺加白炭黑、电工级氧化镁用添加剂及硅油, 对它进行改性, 通过正交试验设计配比试验方案。在通过极差法和方差法分析每种指标(冷态绝缘耐压强度、泄漏电流和热态绝缘耐压强度)影响因素的主次顺序、影响程度以及最优配比的基础上, 利用多指标单一化的矩阵分析法确定最终配比, 并运用指标值预估法预估最终配比改性粉的电性能, 从而为川藏地区微晶菱镁矿的后期大规模工业生产电工级氧化镁提供理论依据和指导。

2 实验

2.1 原材料

电熔氧化镁购自青海濮耐高新材料有限公司, 体积密度为 3.47 g/cm³, 主要化学成分和物相组成见表 1 和图 1; 白炭黑、电工级氧化镁用添加剂和硅油分别购自沈阳市华铭新化工产品有限公司、营口松辽镁业公司和上海三荣化工科技有限公司; 其中电工级氧化镁用添加剂的主要成分是含镁硅酸盐^[13]。

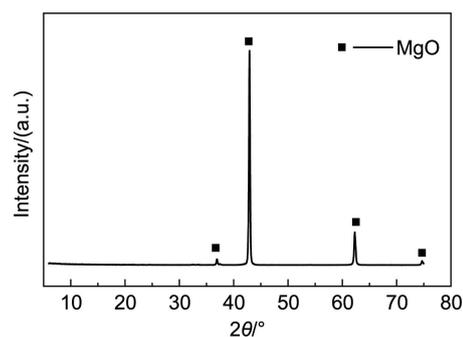


图 1 电熔氧化镁原料的物相组成

Fig. 1 The XRD pattern of the fused magnesium oxide

表 1 电熔氧化镁原料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of the fused magnesium oxide(w /%)

Composition	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
Percentage	97.56	1.58	0.58	0.07	0.03	0.03	0.03	0

2.2 试样制备

试验选取白炭黑、电工级氧化镁用添加剂、硅油 3 种改性材料的掺量为考察因子, 分别以 A、B、C 表示, 每个因子设置 5 个水平, 选择 L₂₅(5⁶) 正交表前 4 列设计正交试验, D 为空白组, 如表 2 所示。

电工级氧化镁改性粉试样制备流程如下: 将电熔氧化镁原料破碎筛分至 40~325 目, 制得电工级氧化镁普粉。根据正交试验设定的掺量添加改性材料, 混合均匀, 即可得电工级氧化镁改性粉, 按照正交表分为 25 组, 依次标记为 A₁~A₂₅。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 The factor level table of orthogonal experiment

Level factor	A	B	C	D
	Silica content/(wt%)	Additive used in electrical grade magnesium oxide powder content/(wt%)	Silicone oil content/(wt%)	Blank
1	0.05	0.5	0.05	0
2	0.1	1	0.1	0
3	0.15	1.5	0.15	0
4	0.2	2	0.2	0
5	0.25	2.5	0.25	0

2.3 电性能测试

将制得的 25 组试样装管、缩管、平头、1050 °C 过炉 20 min 后制得相应的电热管，每组 3 支，共 75 支。对每支电热管进行相关电性能检测分析(管表负荷为 9 W/cm³)，利用 ZHZ8A 型耐电压测试仪检测冷态和热态绝缘耐压强度，利用 PA30 型数字泄漏电流测试仪检测泄漏电流。以 3 次检测的平均值作为结果，试验结果中超出平均值 ±10% 的，应剔除后再取平均值作为试验结果。

3 结果与讨论

3.1 正交试验结果

冷态绝缘耐压强度、泄漏电流和热态绝缘耐压强度均为电工级氧化镁粉的电性能指标，能够表征其绝缘性能，绝缘耐压强度越高越好，泄漏电流越小越好。通过上述试验测量并计算获得了冷态和热态绝缘耐压强度和泄漏电流参数，如表 3。

表 3 正交试验结果

Table 3 The results of orthogonal experiment

Group	A	B	C	D	Normal withstand voltage/V	Leakage current /mA	Heating withstand voltage/V
A ₁	1	1	1	1	2390	0.349	2065
A ₂	1	2	2	2	2793	0.201	2270
A ₃	1	3	3	3	2847	0.137	2260
A ₄	1	4	4	4	2617	0.124	1960
A ₅	1	5	5	5	2720	0.108	1980
A ₆	2	1	2	3	3070	0.240	2130
A ₇	2	2	3	4	3213	0.140	2205
A ₈	2	3	4	5	2423	0.113	2255
A ₉	2	4	5	1	2970	0.098	2105
A ₁₀	2	5	1	2	2840	0.200	1995
A ₁₁	3	1	3	5	2805	0.219	2240
A ₁₂	3	2	4	1	2687	0.161	2075
A ₁₃	3	3	5	2	3243	0.135	2070
A ₁₄	3	4	1	3	2833	0.211	2160
A ₁₅	3	5	2	4	2933	0.175	2340
A ₁₆	4	1	4	2	2795	0.205	2380
A ₁₇	4	2	5	3	3340	0.158	2300
A ₁₈	4	3	1	4	3140	0.222	2260
A ₁₉	4	4	2	5	3117	0.162	2340
A ₂₀	4	5	3	1	3003	0.140	2313
A ₂₁	5	1	5	4	2830	0.188	2565
A ₂₂	5	2	1	5	3050	0.251	2400
A ₂₃	5	3	2	1	3483	0.187	2423
A ₂₄	5	4	3	2	3415	0.138	2520
A ₂₅	5	5	4	3	3680	0.121	2380

3.2 极差分析

极差分析简称 R 法，根据 R 的大小可以判断因素重要性的主次，R 越大，该因素对试验指标影响越大。极差的计算如式(1)和式(2)所示：

$$k_{mn} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

$$R_m = \max(k_{m1}, k_{m2}, \dots, k_{mn}) - \min(k_{m1}, k_{m2}, \dots, k_{mn}) \quad (2)$$

式中： k_{mn} 为第 m 个因素第 n 水平对应指标值的平均值； P_i 为指标值； R_m 为第 m 个因素的极差值。

根据式(1)和式(2)对表 3 正交试验结果进行极差分析，结果见表 4，D 代表未考虑的因素，如果该因素的极差大于已知因素，则说明还有更重要的因素未考虑到，反之亦然。根据表 4 做出指标趋势图，见图 2。从表 4 可以看出，以冷态绝缘耐压强度为指标时，影响因素的主次顺序为： $A>D>B>C$ ，其中未考虑因素影响不是最大的，根据 k 值大小选取最优解为 A5B5C2。以泄漏电流为指标时，影响因素的主次顺序为： $C>B>A>D$ ，其中未考虑因素影响不是最大的，根据 k 值大小选取最优解为 A2B4C5。以热态绝缘耐压强度为指标时，影响因素的主次顺序为： $A>C>B>D$ ，其中未考虑因素影响不是最大的，根据 k 值大小选取最优解为 A5B1C3。从图 2a 和 2c

表 4 极差分析结果

Table 4 The results of range analysis

Factor	Level	A	B	C	D
Normal withstand voltage/V	k ₁	2673	2778	2851	2907
	k ₂	2903	3017	3079	3017
	k ₃	2900	3027	3057	3154
	k ₄	3079	2990	2840	2947
	k ₅	3292	3035	3021	2823
	R	619	257	239	331
Leakage current/mA	k ₁	0.184	0.240	0.247	0.187
	k ₂	0.158	0.182	0.193	0.176
	k ₃	0.180	0.159	0.156	0.173
	k ₄	0.178	0.147	0.145	0.170
	k ₅	0.177	0.149	0.138	0.171
	R	0.026	0.093	0.109	0.017
Heating withstand voltage/V	k ₁	2107	2276	2176	2196
	k ₂	2138	2250	2301	2247
	k ₃	2177	2254	2308	2246
	k ₄	2319	2217	2210	2266
	k ₅	2458	2202	2204	2243
	R	351	74	132	70

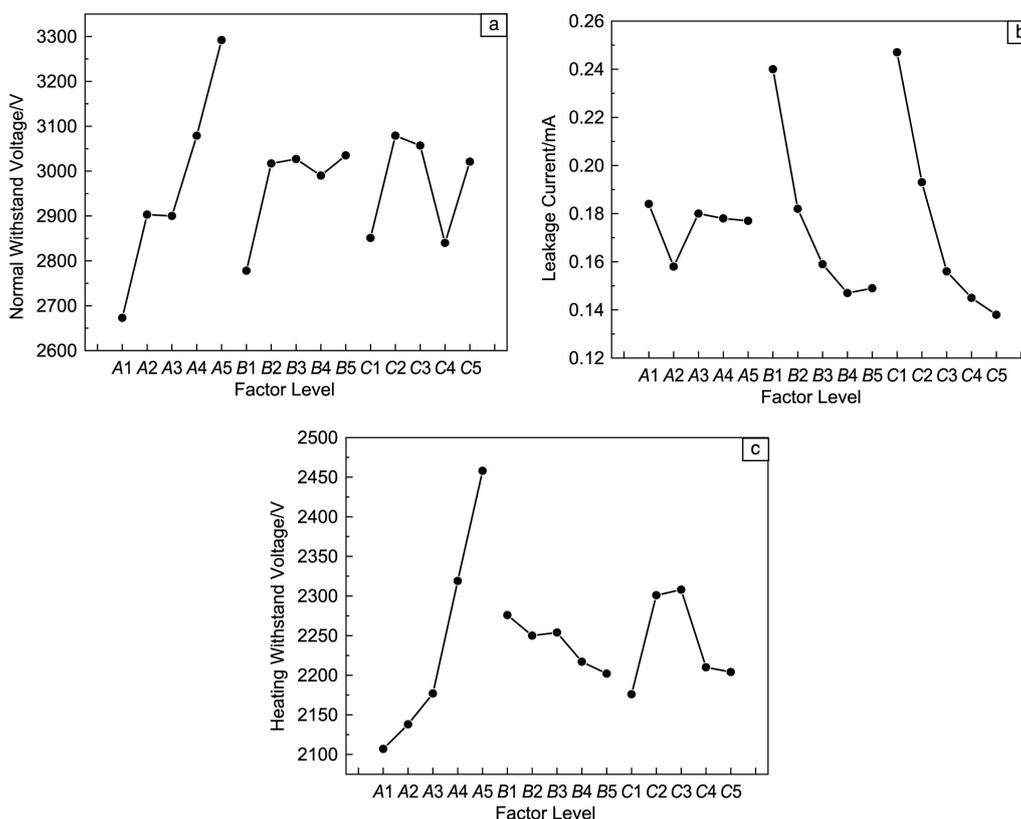


图 2 因素与性能指标的关系：(a)冷态绝缘耐压强度指标，(b)泄漏电流指标，(c)热态绝缘耐压指标

Fig. 2 Relationship between factors and performance indicators; (a) normal withstand voltage, (b) leakage current, (c) heating withstand voltage

可以看出，随着白炭黑掺量的增多，绝缘耐压强度不断增大。白炭黑基于其小粒径和高表面能来吸附在粉体表面并形成一层，提高了粉体分散性，从而使电工级氧化镁获得较好的流动性，提高其电性能^[14]。从图 2b 中可以看出，随着电工级氧化镁用添加剂掺量的增多，泄漏电流先减小后增大，在 B4 出现拐点，而电工级氧化镁用添加剂通常利用硅、镁化合物进行合成，可通过调节电工级氧化镁化学成分尤其是硅和钙的物质的量的比来提高其电性能^[15]，说明 B4 对应的硅和钙的物质的量的比最合适。从图 2b 中还可以看出，随着硅油掺量的增多，泄漏电流不断减小，但减小速率有所下降，硅油是通过吸附作用包裹于颗粒表面，显著提高粉体表面的亲油性，从而达到改善氧化镁的防潮效果，提高电工级氧化镁电性能^[16]。

3.3 方差分析

方差分析是一种检验多个总体均值是否相等的统计方法，对表 3 正交试验结果用 Minitab 软件进行方差分析，结果见表 5。由表 5 中计算得到的 F 值与给定显著水平的标准 F 值相比较可知，A 对改性粉的冷态绝缘耐压强度影响显著，对热态绝缘耐压强度影响明显，即在工作状态下，A 对绝缘耐压强度影响更显著；对泄漏电流影响明显的是 C，其次是 B。

表 5 方差分析结果

Table 5 The results of variance analysis

Index	Factor	Square sum	DOF	F	Critical value
Normal withstand voltage/V	A	1 063 060	4	3.96 *	
	B	234 866	4	0.88	
	C	265 179	4	0.99	
Leakage current/mA	A	0.001 98	4	2.54	$F_{0.10} = 2.48,$
	B	0.0303	4	38.88 **	$F_{0.05} = 3.26,$
	C	0.0409	4	52.53 **	$F_{0.01} = 5.41$
Heating withstand voltage/V	A	427 945	4	10.24 **	
	B	17 919	4	0.43	
	C	72 667	4	1.74	

Notes: F^{**} represents this factor influences index significantly; F^* represents this factor influences index modestly; F represents this factor influences index small.

3.4 矩阵分析

矩阵分析法主要用于解决多指标正交试验设计的方案优化问题，能够将多个指标单一化，使多指标问题简化。本工作将冷态绝缘耐压强度、泄漏电流和热态绝缘耐压强度 3 个指标单一化，获取 3 个指标下的最优配比

以及该配比下的因素影响重要性顺序。该方法需建立一个 3 层结构模型：指标层、因素层和水平层，根据各个层次的数据，矩阵定义如下^[17]：首先建立指标层，矩阵 M ：

$$M = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ K_{12} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{1n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{21} & \cdots & 0 \\ 0 & K_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & K_{2n} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{m1} \\ 0 & 0 & \cdots & K_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中，当指标越大越好时， $K_{mn} = k_{mn}$ ；当指标越小越好

时， $K_{mn} = 1/k_{mn}$ 。令 $t_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^n K_i}$ ，再建立因素层矩阵 T ：

$$T = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & t_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & t_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

$r_j = \frac{R_j}{\sum_{i=1}^m R_i}$ ，最后建立水平层矩阵 S ：

$$S = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

在 p 个指标中第 i 个指标的矩阵如下：

$$\omega_i = M_i T_i S_i \quad (6)$$

最终结果为：

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \cdots + \omega_p}{p} \quad (7)$$

根据以上公式可以得出矩阵分析结果，如表 6 所列。从表 6 中可以看出每个指标及平均值下的结果总和均等于 1，说明每个指标的重要性一致，在各指标重要性一致的条件下，各因素各水平下指标均值最大值分别为 A5 (0.0796)、B4 (0.0489)、C5 (0.0611) 和 D3 (0.0284)。根据各数值大小可以判断出影响因素重要顺序为 $A > C > B > D$ ，D 影响较小，因此最优解为 A5B4C5。

表 6 矩阵分析结果

Table 6 The results of matrix analysis

Group	Matrix analysis results			
	Normal withstand voltage	Leakage current	Heating withstand voltage	Index average
A1	0.0771	0.0202	0.1053	0.0675
A2	0.0837	0.0235	0.1069	0.0714
A3	0.0836	0.0206	0.1088	0.0710
A4	0.0888	0.0209	0.1159	0.0752
A5	0.0949	0.0210	0.1229	0.0796
B1	0.0333	0.0537	0.0240	0.0370
B2	0.0361	0.0708	0.0237	0.0435
B3	0.0362	0.0810	0.0238	0.0470
B4	0.0358	0.0876	0.0234	0.0489
B5	0.0363	0.0865	0.0232	0.0487
C1	0.0317	0.0605	0.0409	0.0444
C2	0.0343	0.0774	0.0433	0.0517
C3	0.0340	0.0958	0.0434	0.0577
C4	0.0316	0.1030	0.0415	0.0587
C5	0.0336	0.1082	0.0414	0.0611
D1	0.0448	0.0130	0.0219	0.0266
D2	0.0465	0.0138	0.0224	0.0276
D3	0.0486	0.0141	0.0224	0.0284
D4	0.0454	0.0143	0.0226	0.0274
D5	0.0435	0.0142	0.0224	0.0267

3.5 指标值预估

指标值预估是指按照已经确定的方案通过特定的公式进行各指标值预估，其计算公式如下^[18]：

$$\mu = \bar{x} + a_i + b_j + c_k + \cdots \quad (8)$$

式中， μ 为指标值预估值； \bar{x} 为试验数据值的总平均值； a_i 、 b_j 、 c_k 为各因素在最优水平下的效应值。其中各效应值计算如下：

$$\begin{aligned} a_i &= A_i - \bar{x} \\ b_j &= B_j - \bar{x} \\ c_k &= C_k - \bar{x} \\ &\dots \end{aligned} \quad (9)$$

式中， A_i 、 B_j 、 C_k 为各因素在最优水平下的指标平均值。将式(9)代入式(8)可得如下公式：

$$\mu = \sum_{i=1}^m V_i - (m - 1)\bar{x} \quad (10)$$

式中, m 为因素数; V_i 为各因素所选水平对应的指标平均值。

根据以上公式可以求出各最优解的预估值, 其中以矩阵分析法得出的最优解为例, 计算结果如表 7, 各最优解预估值结果如表 8。从表 8 中可以看出, 根据冷态绝缘耐压强度得出的最优解的预估值中泄漏电流较大; 根据泄漏电流得出的最优解的预估值中冷态和热态绝缘耐压强度都是最小的, 与试验值相比基本上一致; 根据热态绝缘耐压强度得出的最优解的预估值中泄漏电流是最

大的。综合所有因素来看, 矩阵分析法得出的最优解的预估值与单一指标得出的最优解的预估值相比, 各项指标值均接近最佳指标值, 因此, 矩阵分析法得到的最优解的预估值最好。

选取矩阵分析法得到的最优解 $A5B4C5$ 进行各项性能测试, 测试结果为冷态绝缘耐压为 3349 V, 泄漏电流为 0.115 mA, 热态绝缘耐压强度为 2420 V。该测试结果与指标值预估法得到的预估值基本一致, 表明指标值预估法合理。

表 7 矩阵分析法最优解的预估值过程及结果

Table 7 Process and results of optimal solution estimation by matrix analysis method

Factor	A	B	C	$\sum V$	\bar{x}	Estimated value
Normal withstand voltage/V	3292	2990	3021	9303	2969	3365
Leakage current/mA	0.177	0.147	0.138	0.462	0.175	0.112
Heating withstand voltage/V	2458	2217	2204	6879	2240	2399

表 8 各最优解的预估值

Table 8 Estimated values of each optimal solution

Factor	Estimated value			
	Optimal solution	Normal withstand voltage/V	Leakage current/mA	Heating withstand voltage/V
Normal withstand voltage	$A5B5C2$	3469	0.169	2481
Leakage current	$A2B4C5$	2976	0.093	2079
Heating withstand voltage	$A5B1C3$	3189	0.223	2562
Matrix method	$A5B4C5$	3365	0.112	2399

4 结 论

(1) 极差分析试验结果表明: 各因素对电工级氧化镁改性粉冷态绝缘耐压强度影响程度的顺序为: 白炭黑掺量>电工级氧化镁用添加剂掺量>硅油掺量; 对改性粉泄漏电流影响程度的顺序为: 硅油掺量>电工级氧化镁用添加剂掺量>白炭黑掺量; 对改性粉热态绝缘耐压强度影响程度的顺序为: 白炭黑掺量>硅油掺量>电工级氧化镁用添加剂掺量。

(2) 方差分析试验结果表明: 白炭黑掺量对冷态和热态绝缘耐压强度的影响最为显著, 并且在工作状态下, 白炭黑掺量对绝缘耐压强度影响更大; 泄漏电流的主要影响因素是硅油掺量, 其次是电工级氧化镁用添加剂掺量。

(3) 利用矩阵分析法优化得到的改性粉最终配比为: 白炭黑掺量 0.25%, 电工级氧化镁用添加剂掺量 2%, 硅油掺量 0.25% (皆为质量分数)。

(4) 运用指标值预估法计算得到最终配比下的指标值分别是冷态绝缘耐压强度 3365 V, 泄漏电流 0.112 mA, 热态绝缘耐压强度 2399 V。

参考文献 References

- [1] 高陟, 马北越, 任鑫明, 等. 耐火材料[J], 2020, 54(1): 88-92.
GAO Z, MA B Y, REN X M, et al. Refractories[J], 2020, 54(1): 88-92.
- [2] 胡庆福. 镁化合物生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 11-77.
HU Q F. Production and Application of Magnesium Compounds[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 11-77.
- [3] 郭杰, 刘百宽, 田晓利, 等. 非金属矿[J], 2019, 42(5): 45-48.
GUO J, LIU B K, TIAN X L, et al. Non-Metallic Mines[J], 2019, 42(5): 45-48.
- [4] 蒋小蒙. 菱镁矿熔炼电熔镁砂节能新工艺及方镁石结晶过程研究

- [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- JIANG X M. Study on Advanced Energy Conservation Technology for Fused Magnesia Smelt from Magnesite and the Crystallization Process of Periclase[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [5] FU Y, WANG N H, WANG Z, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2017, 244: 231-239.
- [6] CHAI T Y, WU Z W, WANG H. IFAC PapersOnLine[J], 2017, 50(1): 14992-14999.
- [7] 罗仙平, 李建康, 徐徽, 等. 盐业与化工[J], 2016, 45(8): 8-13.
- LUO X P, LI J K, XU H, *et al.* Journal of Salt and Chemical Industry[J], 2016, 45(8): 8-13.
- [8] 胡庆福, 宋丽英, 刘宝树, 等. 无机盐工业[J], 2009, 41(4): 8-10.
- HU Q F, SONG L Y, LIU B S, *et al.* Inorganic Chemicals Industry [J], 2009, 41(4): 8-10.
- [9] 宗俊. 特种镁化物(氧化镁)的现状与发展趋势[C]//2020年镁化合物行业年会暨专家工作会议论文集. 河北: 中国无机盐工业协会镁化合物分会, 2020: 11-22.
- ZONG J. The Current Situation and Development Trend of Special Magnesium Compounds (Magnesium Oxide) [C]//2020 Magnesium Compound Industry Annual Meeting and Expert Working Conference Proceedings. Hebei: Magnesium Compound Branch of China Inorganic Salt Industry Association, 2020: 11-22.
- [10] 胡庆福, 胡晓湘, 宋丽英, 等. 化工进展[J], 2005, 24(1): 28-31.
- HU Q F, HU X X, SONG L Y, *et al.* Chemical Industry and Engineering Progress[J], 2005, 24(1): 28-31.
- [11] 胡庆福, 刘景泽, 宋丽英, 等. 无机盐工业[J], 2006, 38(9): 13-16.
- HU Q F, LIU J Z, SONG L Y, *et al.* Inorganic Chemicals Industry [J], 2006, 38(9): 13-16.
- [12] 杨树, 刘百宽, 田晓利, 等. 硅酸盐通报[J], 2019, 38(9): 2777-2781.
- YANG S, LIU B K, TIAN X L, *et al.* Bulletin of the Chinese Ceramic Society[J], 2019, 38(9): 2777-2781.
- [13] 季克捷, 杜永平, 王洪元. 一种电工级氧化镁粉添加剂的制造方法: CN107200591B[P]. 2020-04-07.
- JI K J, DU Y P, WANG H Y. A Preparation Method for Electrical Grade Magnesium Oxide Powder Additive; CN107200591B[P]. 2020-04-07.
- [14] 倪忠伟, 王继奇, 史生川, 等. 一种防潮改性电工级氧化镁的制备方法以及应用: CN109135339A [P]. 2019-01-04.
- NI Z W, WANG J Q, SHI S C, *et al.* A Preparation Method and Application for Moisture-Proof Modified Electrical Grade Magnesium Oxide Powder; CN109135339A[P]. 2019-01-04.
- [15] 宗俊. 电工级氧化镁发展现状和趋势[C]//2006年中国镁盐行业年会暨新技术、新产品、新设备推介会论文集. 河北: 中国无机盐工业协会钙镁盐分会, 2006: 71-76.
- ZONG J. Development Status and Trend of Electrical Grade Magnesium Oxide Powder [C]//2006 China Magnesium Salt Industry Annual Conference and New Technology, New Products, New Equipment Promotion Conference Proceedings. Hebei: Calcium and Magnesium Salt Branch of China Inorganic Salt Industry Association, 2006: 71-76.
- [16] 郑水林, 王彩丽, 李春全. 粉体表面改性[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019: 12.
- ZHENG S L, WANG C L, LI C Q. Powder Surface Modification [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2019: 12.
- [17] 周玉珠. 数学的实践与认识[J], 2009, 39(2): 202-207.
- ZHOU Y Z. Mathematics in Practice and Theory[J], 2009, 39(2): 202-207.
- [18] 赵风文, 胡建华, 曾平平, 等. 中国有色金属学报[J], 2021, 31(4): 1096-1105.
- ZHAO F W, HU J H, ZENG P P, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2021, 31(4): 1096-1105.

(编辑 费蒙飞)