球团

钠化膨润土物化性能与生球性能的相关性研究

周隆林，莫 伟，冼 迪，王泽平，任汝龙，冯雨鑫
（广西大学 资源环境与材料学院，广西 南宁 530000）

摘要： 为探究膨润土物化性能指标与其生球性能指标的相关性，本文通过微波辅助半干法对膨润土进行钠化改性处理后与铁矿粉进行混合造球并开展相关性能指标测试分析。文中主要探究了钠化过程因素对膨润土物化性能指标的影响，并利用 R 语言对其物化性能指标与生球性能指标进行多元线性回归分析，建立两类指标的相关性模型。试验结果表明：改性后膨润土的膨胀容可由 6.3 mL/g 提升到 19.8 mL/g，胶质价由 12.2 mL/(3 g) 提升到 99.8 mL/(3 g)，吸水率由 134.8 % 提升到 390.8 %；胶质价是生球落下强度和生球抗压强度的关键影响因素，而吸水率是干球抗压强度的关键影响因素；通过逐步回归方程可粗略预测生球质量。

关键词： 膨润土； 物化性能； 铁矿球团； 生球性能； 相关性
中图分类号： TF046 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)03－0083－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.044

Correlation study between physical and chemical performance and green pellet performance of sodium bentonite

ZHOU Longlin, MO Wei, XIAN Di, WANG Zeping, REN Rulong, FENG Yuxin
(College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: In order to explore the correlation between physical and chemical performance indexes and green pellet performance of bentonite, the microwave-assisted semi-dry method is used to deal with sodium modification treatment for bentonite, followed by mixing with iron ore powder for pelletizing, and relevant performance index tests and analysis. The influence of sodium process factors on the physical and chemical performance indexes of bentonite is mainly explored, the R language is used to deal with multiple linear regression analysis on its physical and chemical performance indexes and the green pellet performance indexes, and the correlation model of the two types of indexes is established. The results show that the expansion volume of modified bentonite could be increased from 6.3 mL/g to 19.8 mL/g, the colloid index increased from 12.2 mL/(3 g) to 99.8 mL/(3 g), and the water absorption rate increased from 134.8% to 390.8%. Colloid index is the key influencing factor of falling strength and compressive strength of green pellets, while water absorption rate is the key influencing factor of dry pellet compressive strength. The stepwise regression equation could provide a rough prediction of the mass of the green pellet.

Key words: bentonite; physical and chemical performance; iron ore pellets; green pellet performance; correlation

膨润土目前仍是铁矿球团生产中应用最广泛、用量最多的无机黏结剂[1]。一般而言，采用膨润土为黏结剂可显著提高生球性能指标[2]。然而，对于如何评价球团用膨润土性能，不同国家的评价标准或评价指标并不一致[3]。例如：德国采用吸水率、流动黏度来评价；日本采用含水率、堆

收稿日期：2022－09－16；修回日期：2022－12－30
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51964005)
作者简介：周隆林(1998—)，男，硕士研究生，从事铁矿球团用膨润土方面的研究。
通信作者：莫 伟(1978—)，女，博士，副教授，从事粉体材料方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

密度、离子交换容量等指标来评价；俄罗斯采用碱性系数、差热曲线、膨胀倍、分散性、粒度、含硫量来评价；美国部分企业则以球团性能来评价膨润土质量；我国膨润土国标中主要采用膨胀容、吸蓝量、吸水率来评价膨润土黏结剂的优劣。国内马承胜等[4]分析了膨润土物化性能与生球落下强度的关系，结果表明生球落下强度与吸水率和黏度关系较为明显；蒙飞宇[5]的研究表明吸水率、胶质价、膨润值、比黏度、吸水速度、表观电动电位均能粗略判断球团用膨润土质量的优劣；蒋娜娜[6]探究了具有不同膨胀容的膨润土对生球质量的影响，结果表明在一定范围内，随着膨胀容的增加生球性能指标也随之增加，但超过一定值后，膨胀容的增大并不利于造球。张玉柱等[7]构建了生球性能指标与膨润土物化性能指标的数学模型，认为膨胀容和胶质价与生球抗压强度有一定关系，蒙脱石质量分数和胶质价与生球落下强度有一定关系，膨胀容与胶质价有一定关系。可见，由于评价指标众多，势必会因“一矿一试”而带来检测过程繁琐、标准较难统一、难以快速判断膨润土性能优劣等诸多问题。因此，深入探究铁矿球团用膨润土关键物化性能指标与其应用性能指标的相关性，并构建两类指标之间的相关性模型，对实现膨润土应用性能快速评价具有重要意义。

本文以广西某典型钙基膨润土为研究对象，结合球团生产实际，首先采用微波辅助半干法对膨润土进行钠化改性处理后测定不同改性条件下膨润土的物化性能指标，接着利用不同条件下的钠化膨润土与铁分别造球并测定其相应生球性能指标，最后通过 R 语言构建膨润土关键物化性能指标和铁矿球团性能指标之间的多元线性回归模型，以期能通过关键物化性能指标的测试初步预测其应用性能指标，从而优化铁矿球团用膨润土性能评价方法。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验用主要原料为膨润土(取自广西宾阳某膨润土企业)与铁精粉(取自广西某钢铁公司)，原料主要物化性能见表1～3。

表1 原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	S
膨润土	—	—	52.4	19.21	14.39	2.43	0.36	2.03	0.85	—
铁精粉	66.4	6.40	5.91	1.85	0.51	0.98	0.37	0.39	—	0.60

表2 膨润土的主要物化性能

Table 2 Main physicochemical properties of bentonite

蒙脱石质量分数/%	膨胀容/(mL·g^{-1})	吸蓝量/[g·(100 g)$^{-1}$]	胶质价/[mL·(3 g)$^{-1}$]	2 h吸水率/%
47.7	6.3	21.1	12.2	134.8

表3 铁精粉主要物理性质

Table 3 Main physical properties of iron concentrate

成球性指数	比表面积/(cm^2·g^{-1})	<0.074 mm质量分数/%
0.62	1 289	97.08

由表1可知，膨润土的主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3，分别达到52.4%和19.21%，铁精粉的TFe质量分数较高，达到66.4%，属高品位铁精粉。由表2、3可知，膨润土蒙脱石质量分数较低，仅为47.7%，且膨胀容等其它物化性能均偏低，属于低品质膨润土，铁精粉的成球性指数为0.62，属于良好成球性物料，粒度小于0.074 mm质量分数为97.08%，但比表面积偏低，仅为1 289 cm^2/g。

1.2 试验方法

试样采用微波辅助半干法钠化改性膨润土，其具体过程：称取100 g的干燥膨润土试样置于容器中，不断向其中喷洒一定比例的钠化剂溶液，期间不断搅拌、均化，然后置于微波炉中，在一定微波输出功率和时间下作用一定时间后，取出烘干、粉碎、过筛，即得钠化膨润土。文中吸蓝量、吸水率、膨胀容及胶质价的检测方法依据膨润土国标GB/T 20973—2020进行。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

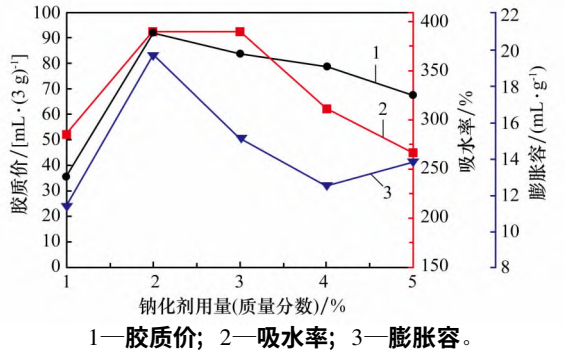
造球试验：将 2.5 kg 铁精矿粉，添加质量分数为 2 % 的膨润土在直径为 1 m，转速为 28 r/min，倾斜角度为 49°的圆盘造球机上造球，造球时间为 15 min，生球水分控制在 7.8% 左右，将直径为 10 ~ 12 mm 的生球作为合格生球。球团性能检测方法依据参考文献 [5] 中提及的相关方法进行。

2　结果与讨论

2.1　钠化过程膨润土主要物化性能的变化规律

2.1.1　钠化剂用量的影响

以 Na_2CO_3 为改性剂，在微波功率为 300 W，微波作用时间为 1.5 min，加水量为 32 % 的试验条件下，探究不同钠化剂用量对膨润土主要物化性能指标的影响，结果如图 1 所示。



1—胶质价；2—吸水率；3—膨胀容。

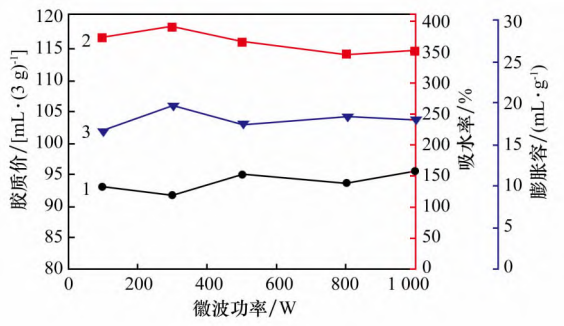
图 1　钠化剂用量对膨润土主要物化性能指标的影响

Fig. 1　Influence of sodiumizing agent usage on the main physicochemical performance of bentonite

由图 1 可知，在试验范围内，膨润土的膨胀容、吸水率以及胶质价在钠化剂用量为 2% 时均达到最大值，此后继续增加钠化剂用量时，膨胀容、胶质价吸水率均有所降低，虽然膨胀容在钠化剂用量为 4% 时出现回升的趋势，但回升幅度不大。这可能是由于膨润土的钠化改性即盐基交换反应，该反应过程可逆，随着 Na^+ 质量浓度的增大，平衡被打破，钠化效果也随之降低[8]。因此，后续试验钠化剂用量确定为 2% 。

2.1.2　微波功率的影响

在 Na_2CO_3 添加量为 2%，微波作用时间为 1.5 min，加水量为 32% 的试验条件下，考察不同微波功率对对膨润土主要物化性能指标的影响，结果如图 2 所示。



1—胶质价；2—吸水率；3—膨胀容。

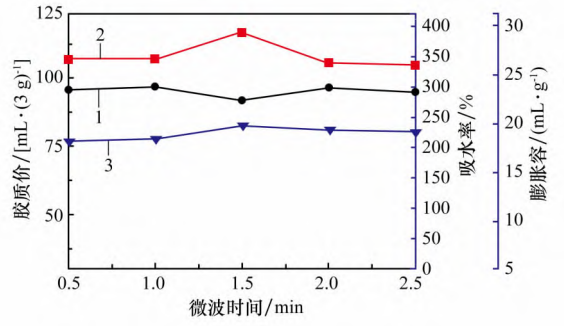
图 2　微波功率对膨润土主要物化性能的影响

Fig. 2　Influence of microwave power on the main physicochemical performance of bentonite

分析图 2 可知，试验条件下随着微波功率的增大，钠化土膨胀容、吸水率大体呈先上升后下降最后趋于平稳的趋势，而胶质价大体呈波动上升趋势。一般而言，微波作用强化了反应物在层间的扩散速度，当微波输出功率达到一定值时，反应物的扩散速度达到最大，此时钠化过程主要受盐基交换反应速度所控制[9]。综合分析将后续试验中微波功率均确定为 300 W。

2.1.3　微波作用时间的影响

在 Na_2CO_3 添加量为 2 %，微波功率为 300 W，加水量为 32 % 的试验条件下，考察不同微波作用时间对膨润土主要物化性能指标的影响，结果如图 3 所示。



1—胶质价；2—吸水率；3—膨胀容。

图 3　微波作用时间对膨润土主要物化性能指标的影响

Fig. 3　Influence of microwave time on the main physicochemical performance of bentonite

由图 3 可知，随着微波作用时间的延长，膨润土膨胀容和吸水率呈现增大后减小的趋势，而胶质价在 95 mL/(3 g) 附近上下波动，但变化幅度

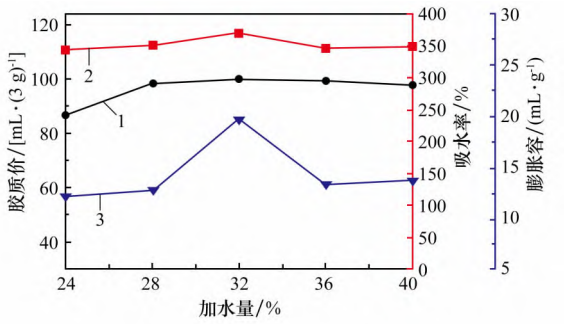
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

不大。当微波作用时间为 1.5 min 时，膨胀容和吸水率达到最大值。进一步分析认为，当微波作用时间较短时，内扩散尚未消除，盐基交换反应不能充分进行；当继续增加微波作用时间，钠化过程所加水量蒸发耗尽，膨润土自身温度迅速上升，破坏了原有的离子交换平衡，甚至破坏膨润土自身结构，导致膨润土的各项性能逐步降低。综合分析，将后续试验微波作用时间确定为 1.5 min。

2.1.4 加水量的影响

在 Na_2CO_3 添加量为 2%，微波功率为 300 W，微波作用时间为 1.5 min 的试验条件下，考察不同加水量对膨润土主要物化性能指标的影响，结果见图 4。

由图 4 可知，钠化土的吸水率、膨胀容随着加水量增加呈现先增大后趋于稳定的趋势，且当加水量为 32% 时，膨胀容和吸水率均达到最大值。分析认为，当加水量较少时，水分蒸发较快且无法均匀润湿膨润土，导致钠化不完全；当加水量较高时，进入膨润土层间的改性剂溶液浓度降低，残留在膨润土表面的改性剂溶液随着水分的汽化而重新结晶，导致钠化效果不佳，其物化性能亦随之降低。



1—胶质价；2—吸水率；3—膨胀容。

图 4 加水量对膨润土主要物化性能指标的影响

Fig. 4 Influence of water addition on the main physicochemical performance of bentonite

2.2 不同钠化条件下膨润土主要物化性能与球团性能的关系

将上述不同条件下所制备的钠化膨润土试样分别与铁精粉进行造球，并测试各样品的生球质量指标，结果如表 4 所示。

表 4 膨润土物化性能指标与生球性能指标

Table 4 Physicochemical properties indexes of bentonite and the green pellets properties indexes

编号	膨胀容/(mL·g⁻¹)	吸水率/%	胶质价/[mL·(3 g)⁻¹]	生球落下强度/[次·(0.5 m)⁻¹]	生球抗压强度/(N·P⁻¹)	干球抗压强度/(N·P⁻¹)
1#	11.50	285.40	35.60	3.10	8.99	55.70
2#	19.80	390.80	91.80	5.43	15.23	67.69
3#	15.20	390.50	83.65	4.53	14.45	62.90
4#	12.55	311.50	78.70	4.25	14.08	51.58
5#	13.90	266.70	67.30	4.07	12.86	46.01
6#	16.65	372.98	93.10	3.80	13.35	54.27
7#	17.50	366.20	95.10	5.00	12.65	63.70
8#	18.40	346.95	93.70	4.40	11.59	51.80
9#	18.10	353.08	95.60	5.15	13.90	64.74
10#	18.25	345.91	95.60	4.95	12.31	46.58
11#	18.45	346.60	96.70	5.10	12.97	59.21
12#	19.35	339.55	96.40	4.95	14.18	60.63
13#	19.15	337.26	94.90	4.85	12.36	41.58
14#	12.20	343.49	86.70	4.14	13.71	56.00
15#	12.80	351.81	98.60	4.91	13.98	57.27
16#	13.30	347.47	99.50	5.40	13.80	60.95
17#	13.80	349.77	97.80	5.95	14.13	61.66

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结合表 4 可知，17#膨润土的生球落下强度为 5.95 次/(0.5 m)，处于 17 组生球质量的最高值，而其自身膨胀容、吸水率、胶质价均不是最佳值；1#膨润土的物化性能均处在较低水平，其生球落下强度和抗压强度均最低；当配加膨胀容和吸水率最高的 2#膨润土时，其生球和干球抗压强度均达到最大值，生球落下强度也处于较高水平。综上分析可知，膨润土物化性能指标与生球性能指标关系复杂，因此，本文采用统计学软件 R 语言建立多元线性回归模型对其进一步深入探讨。

2.3　基于 R 语言的多元线性回归分析

本文采用统计学软件 R 语言建立多元线性回归模型。选取的多元线性回归模型如下[10]。

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots b_ix_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中：b_0 为常数项，b_1，$b_2 \cdots b_i$ 为偏回归系数，表示在其它预测变量不变时，每增加或减少一个 x_i 时 y 的平均变化量；ε 是独立同分布的误差项，描述观测值与预测值之间的差。

2.3.1　多元线性回归模型的建立

将生球性能指标如生球落下强度、生球抗压强度和干球抗压强度分别记为 y_1、y_2、y_3，将膨润土物化性能如膨胀容、吸水率、胶质价分别记为 x_1、x_2、x_3。文中的特殊标记符号如“***”、“**”、“*”以及“·”分别代表 $p < 0.001$、$p < 0.01$、$p < 0.05$ 以及 $p < 0.1$，即显著性随着星号的减少而逐级降低。

(1) 对表 4 中原始数据的相关性分析。为探究表 4 中数据是否具备多元线性回归的条件，利用 R 中的 cor( ) 函数对表 4 中的数据进行相关性分析，分析结果如表 5 所示。

表 5　原始数据的相关性分析

Table 5　Correlation analysis of raw data

项目	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
x_1	1					
x_2	0.463 64·	1				
x_3	0.516 55*	0.670 84**	1			
y_1	0.399 54	0.503 06*	0.770 81***	1		
y_2	0.155 28	0.554 00*	0.641 06**	0.610 52**	1	
y_3	0.067 88	0.569 86*	0.208 64	0.422 89·	0.454 85·	1

由表 5 可知，胶质价与生球落下强度有强相关性，其相关系数达到了 0.770 81；吸水率与胶质价、胶质价与生球落下强度、生球落下强度与生球抗压强度具有较强的相关性，其相关系数均大于 0.6；膨润土的三个物化性能之间也存在不同程度的相关性。此外，膨胀容与干球落下强度的相关性系数仅为 0.067 88，说明二者几乎没有相关性，亦即二者几乎独立。

(2) 多元线性回归模型的建立。采用 R 中的 lm( ) 函数和 summary( ) 函数对表 4 的数据进行多元线性回归分析，运行结果如表6～7所示。

由表 6～7 可知：

① 生球落下强度与膨润土物化性能多元线性回归模型：

$$y_1 = 0.001\ 466\ 1x_1 - 0.000\ 579\ 8x_2 + 0.034\ 093\ 0x_3 + 1.871\ 010\ 8 \quad (2)$$

模型总体 p 值为 0.006 911 0，且 $F \sim F_{0.01}(3,13) = 5.74 < 6.356$，说明模型总体显著；从各自变量系数的 p 值来看，胶质价在 0.01 水平上显著；整个模型调整后的决定系数为 0.501 1，说明自变量的变化仅能解释 50.11% 因变量的变化。此外，x_1、x_2 的 p 值均大于 0.9，说明膨胀容

表 6　因变量对自变量的回归系数表

Table 6　Regression coefficient table of dependent variable to independent variable

因变量	b_0	x_1	x_2	x_3
y_1	1.871 010 8	0.001 466 1	−0.000 579 8	0.034 093 0
y_2	6.380 460 0	−0.140 520 0	0.012 690 0	0.053 260 0
y_3	10.052 220 0	−0.465 860 0	0.018 576 0	−0.112 180 0

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表7 回归模型检验结果汇总表

Table 7 Summary of regression model test results

因变量	R^2	调整后 R^2	$F(3,13)$	模型 p 值	自变量	系数 t 值	系数 p 值
y_1	0.594 6	0.501 1	6.356	0.006 911 0	x_1	0.029	0.977 140 0
					x_2	−0.111	0.913 290 0
					x_3	3.134	0.007 910 0**
y_2	0.496 7	0.380 5	4.276	0.026 290 0	x_1	−1.221	0.243 600 0
					x_2	1.060	0.308 400 0
					x_3	2.136	0.052 300 0·
y_3	0.404 0	0.266 4	2.937	0.072 960 0	x_1	−0.730	0.478 600 0
					x_2	2.795	0.015 200 0*
					x_3	−0.810	0.432 300 0

与吸水率对生球抗压强度的影响不显著，可能是因为三个变量间存在严重的共线性，因此采用 R 中 DAAG 包的 vif( ) 函数对模型进行多重共线性诊断。一般来说，若 vif 值大于 10，则表明模型中有很强的共线性问题，vif( ) 函数的检验结果表明：x_1、x_2 和 x_3 的 vif 值分别为 1.412 0、1.882 3 和 2.015 4，表明三者间不存在严重的多重共线性，亦即膨胀容和吸水率对生球抗压强度的影响不显著。

② 生球抗压强度与膨润土物化性能多元线性回归模型：

$$y_2 = -0.140\,520\,0x_1 + 0.012\,690\,0x_2 + 0.053\,260\,0x_3 + 6.380\,460\,0 \quad (3)$$

该模型的 p 值为 0.026 290 0，且 $F \sim F_{0.05}(3,13) = 3.41 < 4.276$，说明该模型总体在 0.05 水平上显著；从各自变量系数的 p 值来看，胶质价在 0.1 水平上显著，但 x_1 和 x_2 的显著性不高；整个模型调整后的决定系数为 0.380 5，说明自变量的变化仅能解释 38.05% 的因变量的变化。

③ 干球抗压强度与膨润土物化性能多元线性回归模型：

$$y_3 = -0.465\,860\,0x_1 + 0.018\,576\,0x_2 - 0.112\,180\,0x_3 + 10.052\,220\,0 \quad (4)$$

该模型的 p 值为 0.072 960 0，且 $F \sim F_{0.1}(3,13) = 2.56 < 2.937$，说明模型在 0.1 水平上显著，从各自变量系数的 p 值来看，也仅有吸水率在 0.05 水平上显著；整个模型调整后的决定系数为 0.266 4，说明自变量的变化仅能解释 26.64% 的因变量变化。

2.3.2 多元线性回归模型的修正

为消除不显著的影响因子，进一步简化模型结构，采用 R 中的 step( ) 函数对上述模型进行逐步回归分析，再利用 summary( ) 函数提取相关的回归信息，得到最优回归方程。综合分析结果如表 8～9 所示。

由表 8～9 可知，修正后的生球落下强度与膨润土物化性能线性回归模型：

$$y_1 = 0.033\,447x_3 + 1.751\,983 \quad (5)$$

表8 模型修正后因变量对自变量的回归系数表

Table 8 Regression coefficient table of dependent variable to independent variable after model correction

项目	b_0	x_1	x_2	x_3
y_1	1.751 983	—	—	0.033 447
y_2	8.155 740	—	—	0.057 230
y_3	12.276 550	—	0.128 90	—

表9 模型修正后回归模型检验结果汇总表

Table 9 Summary of regression model test results after model correction

因变量	R^2	调整后 R^2	$F(3,13)$	模型 p 值	自变量	系数 t 值	系数 p 值
y_1	0.594 2	0.567 2	21.970	0.000 292 1	x_3	4.687 00	0.000 292 0***
y_2	0.411 0	0.371 7	10.470	0.005 551 0	x_3	3.235 00	0.005 551 0**
y_3	0.324 7	0.279 7	7.214	0.016 930 0	x_2	0.128 90	0.016 900 0*

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

经逐步回归后 x_1、x_2 被逐步剔除，根据 p 值和 F 值可以看出，模型总体显著性提高，且 x_3 的 p 值由 0.007 910 0 减小为 0.000 292 0，说明经修正后 x_3 对 y_1 的影响更为显著；调整后的决定系数也由 0.501 1 增加到 0.567 2，说明经过修正模型对 y_1 的解释程度变好。

修正后的生球抗压强度与膨润土物化性能线性回归模型：

$$y_2 = 0.057\ 230x_3 + 8.155\ 740 \quad (6)$$

经逐步回归分析后，x_1 和 x_2 被逐步剔除，模型的总体显著性从 0.026 290 0 减小到 0.005 551 00，说明模型的整体显著性变好，且 x_3 的 p 值由 0.052 300 0 减小为 0.005 551 0，说明经修正后 x_3 对 y_2 的影响更为显著；但调整后的决定系数稍微降低，说明 x_1 和 x_2 对 y_2 有较微弱的解释能力。

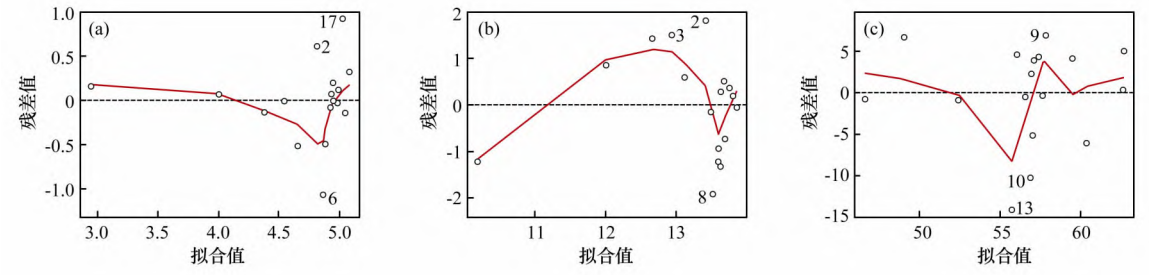
修正后的干球抗压强度与膨润土物化性能线性回归模型：

$$y_3 = 0.128\ 900x_2 + 12.276\ 550 \quad (7)$$

经逐步回归后，x_1 和 x_3 被逐步剔除，修正后的模型 p 值由 0.072 960 0 减小到 0.016 930 0，说明模型更加显著；调整后的决定系数略有提高，但 x_2 对 y_3 的解释能力并不高，仅为 28%。

2.3.3　多元线性回归模型的诊断

对于线性回归来说，应满足正态性、线性等假设[11]，本文采用 R 中的 plot( ) 函数对上述三个模型进行诊断，诊断结果如图 5 所示。



(a)　y_1；(b)　y_2；(c)　y_3

图 5　y_1、y_2 和 y_3 的回归模型诊断

Fig. 5　Diagnostic diagram of regression model of y_1、y_2 and y_3

由图 5 可知，图中各散点总体均匀分布在水平线 $y=0$ 的两侧，因此上述三个模型满足残差均值为 0 的基本要求；采用 R 中的 shapiro. test( ) 函数对模型残差的正态性进行检验。若统计量 w 的值越接近 1 且 p 值大于 0.05 时，就可认为数据服从正态分布。检验结果表明，三个模型的 w 值分别为 0.937 85、0.965 62、0.895 34 均接近 1，p 值分别为 0.293 6、0.738 2、0.056 8 均大于 0.05，因此可认为上述三个模型满足正态性假设。

2.3.4　验证试验

为验证上述模型的准确性，本文采取 9#样本数据、18#建平膨润土以及 19#田东膨润土进行验证试验，验证结果如表 10 所示。

表 10　验证试验结果表

Table 10　Table of validation test results

编号	吸水率/%	胶质价/[mL·(3 g) $^{-1}$]	生球落下强度预测/[次·(0.5 m) $^{-1}$]	生球落下强度实测/[次·(0.5 m) $^{-1}$]	生球抗压强度预测/(N·P $^{-1}$)	生球抗压强度实测/(N·P $^{-1}$)	干球抗压强度预测/(N·P $^{-1}$)	干球抗压强度实测/(N·P $^{-1}$)
18#	536.42	79.35	4.4	4.7	12.70	14.00	81.42	100.01
19#	387.60	76.65	4.3	3.5	12.54	13.31	62.64	73.01
9#	353.08	95.60	4.9	5.2	13.63	13.90	57.79	64.74

分析表 10 可知，3 种膨润土所生产的球团生球落下强度差值在 1 次/(0.5 m) 范围内；生球抗压强度差值分别为 1.30、0.77 和 0.27 N/P，模型总体对生球落下强度和生球抗压强度预测较为准确；对于干球抗压强度而言，除 18#外，其余两组数据干球抗压强度差值均大于 10 N/P，拟合效果

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

偏差，可见干球抗压强度还受其他因素影响，难以通过上述回归方程进行准确预测。

3 结 论

(1) 采用微波辅助半干法对膨润土进行钠化改性，在 Na_2CO_3 添加量为2%、微波功率为300 w、微博时间为1.5 min以及加水量为32%的试验条件下，改性后膨润土的膨胀容由6.3 mL/g提升到19.8 mL/g，胶质价由12.2 mL/(3 g)提升到99.8 mL/(3 g)，吸水率由134.8%提升到390.8%，改性效果显著，但造球结果表明膨润土物化性能与生球性能指标关系复杂。

(2) 膨润土的膨胀容、吸水率、胶质价具有一定的相关性；生球抗压强度、生球落下强度与胶质价相关性较好；干球抗压强度与吸水率的相关性较好；干球抗压强度与膨胀容的相关系数仅为0.07，说明二者几乎相对独立。

(3) 膨润土物化性能与铁矿球团性能指标的"最优"回归方程分别为 $y_1 = 0.033\ 447x_3 + 1.751\ 983$；$y_2 = 0.057\ 230x_3 + 8.155\ 740$；$y_3 = 0.128\ 900x_2 + 12.276\ 550$。调整后的决定系数不高，但各个自变量对因变量的影响显著，亦即在当前试验条件下胶质价是生球落下强度和生球抗压强度的关键影响因素，而吸水率是干球抗压强度的关键影响因素，通过逐步回归方程可粗略预测生球质量。

参考文献:

[1] SIVRIKAYA O, AROL A I. The bonding/strengthening mechanism of colemanite added organic binders in iron ore palletization [J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 110: 90 – 100.

[2] 陆启财，陈铁军，罗艳红，等. 低品位膨润土改性及其在球团中的应用研究 [J]. 烧结球团，2021，46(3)：39 – 46.
LU Qicai, CHEN Tiejun, LUO Yanhong, et al. Research on modification of low-grade bentonite and its application in pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(3): 39 – 46.

[3] 葛方红. 国内外膨润土指标对铁矿球团性能影响的探讨 [J]. 烧结球团，1996，21(5)：17 – 23.
GE Fanghong. Influence of bentonite indexes on the performance of iron ore pellets at home and abroad [J]. Sintering and Pelletizing, 1996, 21(5): 17 – 23.

[4] 马承胜，甘牧原，韦振宁，等. 膨润土物理性能对生球落下强度的影响 [J]. 烧结球团，2022，47(3)：43 – 50.
MA Chengcheng, GAN Muyuan, WEI Zhenning, et al. Influence of bentonite physical performances on the drop numbers of green pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(3): 43 – 50.

[5] 蒙飞宇. 铁矿球团用膨润土性效关系及作用机理研究 [D]. 长沙：中南大学，2010.
MENG Feiyu. Study on relationship between properties and effect of bentonite as iron ore pellet binder and its acting mechanism [D]. Changsha: Central South University, 2010.

[6] 蒋娜娜. 铁球团配加不同膨胀容膨润土试验研究 [J]. 福建冶金，2020，49(1)：11 – 13.
JIANG Nana. Experimental study on pellet adding different expansion capacity bentonite. Fujian Metallurgy, 2020, 49(1): 11 – 13.

[7] 张玉柱，边妙莲，刘鹏君，等. 膨润土理化性能对球团性能影响的研究 [J]. 烧结球团，2006，31(2)：21 – 24.
ZHANG Yuzhu, BIAN Miaolian, LIU Pengjun, et al. Influence of bentonite properties on pellet performance [J]. Sintering and Pelletizing, 2006, 31(2): 21 – 24.

[8] 杨晓静，莫伟，马少健，等. 广西钙基膨润土的钠化改性试验研究 [J]. 中国非金属矿工业导刊，2013(6)：16 – 19.
YANG Xiaojing, MO Wei, MA Shaojian, et al. Experimental study on sodium modification of calcium based bentonite in Guangxi [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2013(6): 16 – 19.

[9] 曹玉红，韦藤幼，吴旋，等. 微波辐射干法制备钠基蒙脱土 [J]. 化工矿物与加工，2004(6)：10 – 12.
CAO Yuhong, WEI Tengyou, WU Xuan, et al. Preparation of sodium montmorillonite by microwave radiation dry method [J]. Industrial Minerals & Processing, 2004(6): 10 – 12.

[10] 安广艳. 基于R语言的学历与收入相关性分析 [J]. 产业与科技论坛，2021，20(17)：89 – 90.
AN Guangyan. Correlation analysis of education and income based on R language [J]. Industrial&Science Tribune, 2021, 20(17): 89 – 90.

[11] 程乾，刘永，高博. R语言数据分析与可视化从入门到精通 [M]. 北京：北京大学出版社，2020：170 – 174.
CHENG Qian, LIU Yong, GAO Bo. R language data analysis and visualization: from beginner to proficient [M]. Beijing: Peking University Press, 2020: 170 – 174.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net