

# 拜耳法赤泥含碳冷固结球团力学性能的正交试验

叶成林, 潘家浩, 林郭强\*, 曾建民

广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁

收稿日期: 2022年5月10日; 录用日期: 2022年6月8日; 发布日期: 2022年6月15日

## 摘 要

在赤泥中加入水玻璃、水、水泥、碳, 原料经过混合后用对辊压球机压制冷固结球团。进行了4因素3水平的正交试验, 测试了球团静置1、2、3、5、7天后的抗压强度, 以及球团静置7天后的落下强度。试验结果表明: 在本文研究正交试验因素及其含量水平上, 对赤泥球团抗压强度影响最大的是水玻璃; 而对静置7天的赤泥球团的落下强度影响较大的因素是水和水玻璃, 水泥和碳对球团落下强度影响较小。静置168 h后, 球团抗压强度的最优配方组合为: 6%水玻璃 + 12%水 + 9%水泥 + 6%碳(质量分数, 外配, 下同)。静置168 h后, 球团落下强度的最优配方组合为: 6%水玻璃 + 15%水 + 3%水泥 + 6%碳。

## 关键词

赤泥, 赤泥球团, 制铝工业, 循环经济

# Orthogonal Experiment on Mechanical Properties of Red Mud Containing Carbon Cold-Bonded Pellets by Bayer Process

Chenglin Ye, Jiahao Pan, Guoqiang Lin\*, Jianmin Zeng

College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

Received: May 10<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 8<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Sodium silicate, water, cement and carbon are added to the red mud, and the raw materials are

\*通讯作者。

文章引用: 叶成林, 潘家浩, 林郭强, 曾建民. 拜耳法赤泥含碳冷固结球团力学性能的正交试验[J]. 冶金工程, 2022, 9(2): 122-130. DOI: 10.12677/meng.2022.92016

mixed and pressed into cold-bonded pellets by a pair of roller ball press machine. The compressive strength of pellets after 1, 2, 3, 5 and 7 days of static storage and the drop strength of pellets after 7 days of static storage were tested by orthogonal experiment with 4 factors and 3 levels. Experimental results show that in the orthogonal experiment factors and content levels studied in this paper, the compressive strength of red mud pellets is the biggest impact of the sodium silicate; water and sodium silicate had greater impact on drop strength of the pellets, cement and carbon less affected the drop strength. After 168 hours storage, the optimal factors combination of compressive strength of pellets was 6% sodium silicate + 12% water + 9% cement + 6% carbon (mass fraction). After 168 hours storage, the optimal factors combination of drop strength of pellets was 6% sodium silicate + 15% water + 3% cement + 6% carbon.

## Keywords

Red Mud, Red Mud Pellets, Aluminum Industry, Circular Economy

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

赤泥就是所谓的铝土矿渣，它是从含铝的铝土矿的碱性高压浸出液固液分离后得到的固态物，由于其赤铁矿含量高，铝土矿渣的颜色偏红，因此被称作赤泥。根据主要矿床的矿物含量组分，一般需要 4~7 吨铝土矿以获得 2 吨氧化铝以生产 1 吨铝[1]。每吨生铝产生 1~2.5 吨赤泥[2]。常见赤泥中主要的相包括有铁化合物，如赤铁矿或针铁矿，可以通过碳热还原容易地回收[3]。铝土矿的通常颜色是粉红色，但是如果铁含量较低，它可能会变成带白色的颜色，随着铁的增加，它会变成红棕色[4]。

据估计，全球每年产生的赤泥达 7000 万吨，其中希腊有 70 万吨，印度 200 万吨[5]，澳大利亚 3000 万吨[6]，中国近 3000 万吨[7]。大量的赤泥的处置引起了严重的环境问题，包括土壤污染、地下水污染和悬浮在海洋中的细小颗粒。此外，在湖泊或池塘中储存的赤泥占用了大面积的土地，而且储存干燥的赤泥也会导致粉尘污染。赤泥中含有可提取利用的氧化物和多种有用金属元素，成为其再生利用的基础，同时具有矿物含量较高、颗粒分散性好、比表面积大、在溶液中稳定性好等特点，在环境修复领域具有广阔的应用前景。

X 射线衍射物相分析结果表明，赤泥中含有赤铁矿和针铁矿、一水硬铝石、水化石榴石、含水硅铝酸钠、氢氧化钙、方解石等物相，其中赤铁矿和水化石榴石含量较高。广西平果铝赤泥的 X 射线衍射物相分析显示，构成赤泥的主要矿物为硅酸钙、铝酸钙及碳酸钙，此外还伴存少量水合硅铝酸钠、水合氧化铁及铁铝酸四钙等矿物[8]。

赤泥中含有多种可再生利用的氧化物和有用金属元素，这成为赤泥再生利用的基础。利用赤泥中含有较高的 CaO、SiO<sub>2</sub>，可生产硅酸盐水泥及一些专用水泥；利用它的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO 含量特征及少量的 TiO<sub>2</sub>、MnO、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，可以生产特种玻璃；同时，赤泥中含有丰富的铁、钨、钛等有用金属元素[9]。对赤泥的处理有一个重要的方向，就是实现对赤泥中的有价元素例如铁的回收和开发，而这个过程所面临的一个难题就是如何把赤泥制作成符合高温还原要求的赤泥球团[10] [11]。

本文在赤泥中添加(外配)不同含量的水玻璃、水、水泥、碳，原料经过混合后，使用对辊压球机压制冷固结球团，进行了 4 因素 3 水平的正交试验。本文利用正交试验去研究球团的性质，期望获得高强

度的赤泥球团。通过对抗压强度的极差分析和落下强度的实验分析，为研究赤泥球团的力学性能提供理论指导，为工厂生产提供依据。

## 2. 实验材料与过程

### 2.1. 实验设备

X 射线衍射(XRD)使用的设备为日本理学 Rigaku D/MAX 2500V 型 X 射线衍射仪。压球使用的设备为河南华意机器制造有限公司生产的压球机，型号：290。球团抗压强度测试使用的是深圳三思纵横公司生产的电子万能试验机，型号：UTM5105。

### 2.2. 实验材料

实验研究的是广西平果铝的拜耳法赤泥经磁选得到的含铁量较低的那部分产物。采用 X 射线衍射(XRD)对赤泥中的物相进行了分析，结果如图 1 所示。可见赤泥中含有以下物相：赤铁矿，加藤石，钙霞石。

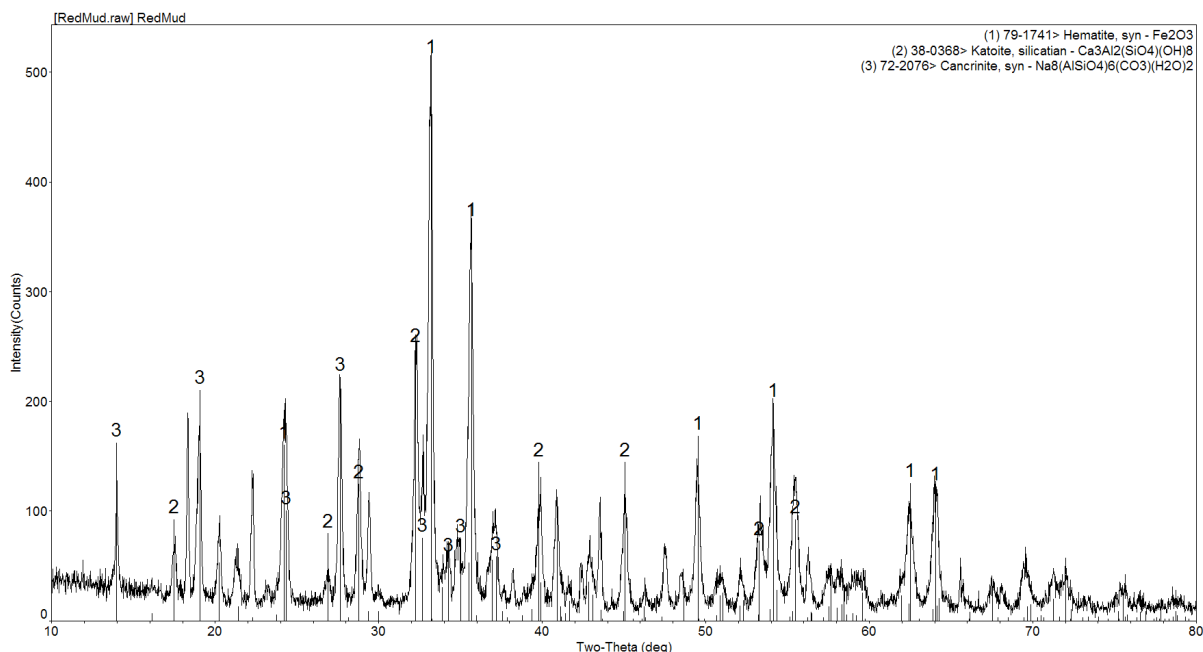


Figure 1. The XRD pattern of the red mud

图 1. 赤泥的 XRD 图谱

在本实验中，为了提高球团的强度，使用了多种粘结剂，包括：水泥、水玻璃。其中水泥是海螺牌水泥。本实验配制球团使用的碳为焦粉，加入碳的原因并不是为了做粘结剂，而是做球团中铁的还原剂。

### 2.3. 实验过程

#### 2.3.1. 用压球机制造生球团

压球使用的是河南华意牌的压球机，具体的压球步骤和过程如下：

- 1) 制定正交试验方案。
- 2) 计算称量试验样品，本试验用到了赤泥，水，水玻璃，焦粉，水泥。
- 3) 混料。压球的第一步就是把试验所用到的试验原料先均匀混合，这个步骤一般都在混料桶内进行，大约混合 5~10 min。

4) 压球。压球时倒入原料的速度为: 5 kg/2s~4s, 倒料的速度太慢, 则压不出好的球团, 倒料的速度太快, 则有可能损坏压球机的对辊, 减少压球机的寿命。

### 2.3.2. 用万能试验机测球团强度

使用万能试验机来检测球团的抗压强度。实验步骤如下:

1) 取样。为了减少试验误差, 每一次取同一个试验成分的球团 5 个, 分别测试 5 个球团的强度, 再取平均值。

2) 测试。万能试验机加载速度为 10 mm/min。

3) 计算球团抗压强度平均值。

为了探明随着时间变化, 影响球团强度的因素, 分别检测了球团放置 24 h, 48 h, 72 h, 120 h, 168 h 后的抗压强度。

### 2.3.3. 测量球团的落下强度

我们测量球团的落下强度, 是把球团样品从 500 mm 高的平台上, 让球团无初速度掉落到钢板上, 直到剩余的球团质量为原始球团质量的 1/2 以下为止, 然后记录球团的落下次数。实验一共选取了 5 个实验样品, 并分别测量它们的落下次数, 最后取平均值。

## 3. 实验结果与分析

### 3.1. 极差分析法分析球团抗压强度

利用正交试验获得的生球团, 分别测试球团静置 24 h, 48 h, 72 h, 120 h, 168 h 后的抗压强度, 用来测试球团随着时间变化, 其硬度的变化情况, 并分清球团抗压强度的主要影响因素。关于水玻璃, 水, 水泥和碳的 4 因素 3 水平的正交试验, 其具体参数如表 1 所示。

#### 3.1.1. 球团静置 24 h 后抗压强度

表 1 是球团静置 24 h 后的抗压强度数据以及利用极差分析法分析所得到的数据。试验数据表明: 1) 各个因素对球团 24 h 抗压强度的影响的大小顺序为: 水玻璃 > 水泥 > 水 > 碳; 2) 24 h 球团最佳抗压强度的最优配方组合为: 6% 的水玻璃 + 15% 的水 + 6% 的水泥 + 12% 的碳。

Table 1. The orthogonal experimental design and result of pellets with 24 h

表 1. 24 h 球团正交试验设计及结果

实验编号	因素				实验结果 抗压强度(N)
	A.水玻璃(g)	B.水(g)	C.水泥(g)	D.碳(g)	
1	2%	9%	3%	6%	40.584
2	2%	12%	6%	9%	96.694
3	2%	15%	9%	12%	78.193
4	4%	9%	9%	9%	90.867
5	4%	12%	3%	12%	83.314
6	4%	15%	6%	6%	133.548
7	6%	9%	6%	12%	180.471
8	6%	12%	9%	6%	155.053

## Continued

9	6%	15%	3%	9%	150.221
K1	215.47	311.92	274.12	329.19	
K2	307.73	335.06	410.71	337.78	
K3	485.75	361.96	324.11	341.98	
K1 平均	71.82	103.97	91.37	109.73	
K2 平均	102.58	111.69	136.90	112.59	$\Sigma = 1008.945$
K3 平均	161.92	120.65	108.04	113.99	
优水平	6%	15%	6%	12%	
Rj	90.09	16.68	45.53	4.26	
主次顺序		水玻璃	水泥	水	碳

## 3.1.2. 球团静置 48 h 后抗压强度

表 2 是球团 48 h 的抗压强度数据以及利用极差分析法分析所得到的数据。试验数据表明：1) 各个因素对球团 48 h 抗压强度的影响的大小顺序为：水玻璃 > 水 > 碳 > 水泥。2) 48 h 球团最佳抗压强度的最优配方组合为：6%水玻璃 + 12%水 + 9%水泥 + 6%碳。

Table 2. The orthogonal experimental result of pellets with 48 h  
表 2. 48 h 球团正交试验结果

实验编号	因素				实验结果 抗压强度(N)
	A.水玻璃(g)	B.水(g)	C.水泥(g)	D.碳(g)	
K1	254.73	273.09	357.48	490.06	
K2	340.85	442.10	385.60	331.40	
K3	553.69	434.08	406.20	327.81	
K1 平均	84.91	91.03	119.16	163.35	
K2 平均	113.62	147.37	128.53	110.47	$\Sigma = 1149.271$
K3 平均	184.56	144.69	135.40	109.27	
优水平	6%	12%	9%	6%	
Rj	99.65	56.34	16.24	54.08	
主次顺序		水玻璃	水	碳	水泥

## 3.1.3. 球团静置 72 h 后抗压强度

表 3 是压球第三天 72 h 的试验数据及极差分析法分析所获得的数据，结果表明：1) 各个因素对球团 72 h 抗压强度的影响的大小顺序为：水玻璃 > 水泥 > 水 > 碳。2) 72 h 球团最佳抗压强度的最优配方组合为：6%的水玻璃 + 12%的水 + 9%的水泥 + 6%的碳。

**Table 3.** The orthogonal experimental result of pellets with 72 h  
**表 3.** 72 h 球团正交试验结果

实验编号	因素				实验结果 抗压强度(N)
	A.水玻璃(g)	B.水(g)	C.水泥(g)	D.碳(g)	
K1	291.68	314.38	339.69	517.93	
K2	378.12	511.58	359.14	339.15	
K3	591.78	435.61	562.74	404.50	
K1 平均	97.23	104.79	113.23	172.64	
K2 平均	126.04	170.53	119.71	113.05	$\Sigma = 1261.575$
K3 平均	197.26	145.20	187.58	134.83	
优水平	6%	12%	9%	6%	
Rj	100.03	65.74	74.35	59.59	
主次顺序		水玻璃 水泥 水 碳			

### 3.1.4. 球团静置 120 h 后抗压强度

表 4 是压球第 5 天 120 h 的试验数据, 结果表明: 1) 各个因素对球团 120 h 抗压强度的影响的大小顺序为: 水玻璃 > 碳 > 水泥 > 水。2) 120 h 球团最佳抗压强度的最优配方组合为: 6%水玻璃 + 12%水 + 9%水泥 + 6%碳。

**Table 4.** The orthogonal experimental result of pellets with 120 h  
**表 4.** 120 h 球团正交试验结果

实验编号	因素				实验结果 抗压强度(N)
	A.水玻璃(g)	B.水(g)	C.水泥(g)	D.碳(g)	
K1	363.67	464.30	443.09	579.88	
K2	413.75	560.74	446.55	411.46	
K3	706.81	459.18	594.59	492.89	
K1 平均	121.22	154.77	147.70	193.29	
K2 平均	137.92	186.91	148.85	137.15	$\Sigma = 1484.221$
K3 平均	235.60	153.06	198.20	164.30	
优水平	6%	12%	9%	6%	
Rj	114.38	33.86	50.50	56.14	
主次顺序		水玻璃 碳 水泥 水			

### 3.1.5. 球团静置 168 h 后抗压强度

表 5 是压球第 7 天 168 h 的试验数据, 结果表明: 1) 各个因素对球团 168 h 抗压强度的影响的大小顺序为: 水玻璃 > 碳 > 水泥 > 水。2) 168 h 球团最佳抗压强度的最优配方组合为: 6%水玻璃 + 12%水 + 9%水泥 + 6%碳。

**Table 5.** The orthogonal experimental result of pellets with 168 h  
**表 5.** 168 h 球团正交试验结果

实验编号	因素				实验结果 抗压强度(N)
	A.水玻璃(g)	B.水(g)	C.水泥(g)	D.碳(g)	
K1	407.55	537.96	471.16	642.76	
K2	415.34	596.83	585.18	413.67	
K3	845.41	533.51	611.96	611.87	
K1 平均	135.85	179.32	157.05	214.25	
K2 平均	138.45	198.94	195.06	137.89	$\Sigma = 1668.298$
K3 平均	281.80	177.84	203.99	203.96	
优水平	6%	12%	9%	6%	
Rj	145.96	21.11	46.94	76.36	
主次顺序	水玻璃 碳 水泥 水				

### 3.2. 落下强度分析

表 6 是实验测量得到的赤泥球团静置 168 h 后的落下强度数据和使用极差分析法得到的数据结果。结果表明:

- 1) 各个因素对球团 168 h 落下强度的影响的大小顺序为: 水 > 水玻璃 > 水泥 > 碳。
- 2) 每个因素各水平对目标函数影响的好坏顺序分别是(根据它们的水平平均值):  
 水玻璃——3 水平最好, 2 水平次之, 1 水平最差;  
 水——3 水平最好, 2 水平次之, 1 水平最差;  
 水泥——1 水平最好, 2 水平次之, 3 水平最差;  
 碳——1 水平最好, 2 水平次之, 3 水平最差。
- 3) 168 h 球团最佳落下强度的最优配方组合为: 6% 的水玻璃 + 15% 的水 + 3% 的水泥 + 6% 的碳。

**Table 6.** Analysis of drop times data measured at 168 h of orthogonal pellets  
**表 6.** 正交球团 168 h 所测得的落下次数数据分析

实验编号	因素				实验结果 落下次数(次)
	A.水玻璃(g)	B.水(g)	C.水泥(g)	D.碳(g)	
1	2%	9%	3%	6%	2.6
2	2%	12%	6%	9%	1.8
3	2%	15%	9%	12%	2.8
4	4%	9%	9%	9%	1.6
5	4%	12%	3%	12%	2.6
6	4%	15%	6%	6%	5
7	6%	9%	6%	12%	3.2
8	6%	12%	9%	6%	4.2

## Continued

9	6%	15%	3%	9%	7.2
K1	7.2	7.4	12.4	11.8	
K2	9.2	8.6	10	10.6	
K3	14.6	15	8.6	8.6	
K1 平均	2.4	2.47	4.13	3.93	
K2 平均	3.07	2.87	3.33	3.53	$\Sigma = 31$
K3 平均	4.87	5	2.87	2.87	
优水平	6%	15%	3%	6%	
Rj	2.47	2.53	1.27	1.07	
主次顺序		水 水玻璃	水泥 碳		

## 4. 结论

1) 通过水玻璃、水分、水泥、还原剂焦粉的 4 因素 3 水平的正交试验, 得到影响球团抗压强度的大小顺序为: 水玻璃 > 水泥 > 水 > 碳(24 h); 水玻璃 > 水 > 碳 > 水泥(48 h); 水玻璃 > 水泥 > 水 > 碳(72 h); 水玻璃 > 碳 > 水泥 > 水(120 h); 水玻璃 > 碳 > 水泥 > 水(168 h)。综合来看, 水玻璃对球团抗压强度影响较大, 水对球团抗压强度影响较小。

2) 放置 7 天的球团, 抗压强度最优试验参数组合为: 质量分数为 6% 的水玻璃 + 质量分数为 12% 的水 + 质量分数为 9% 的水泥 + 质量分数为 6% 的碳。

3) 通过水玻璃、水分、水泥、还原剂焦粉的 4 因素 3 水平的正交试验, 得到影响球团落下强度的大小顺序为: 水 > 水玻璃 > 水泥 > 碳(168 h)。水和水玻璃对球团落下强度影响较大, 水泥和碳对球团落下强度影响较小。

4) 落下强度最优试验参数组合为: 质量分数为 6% 的水玻璃 + 质量分数为 15% 的水 + 质量分数为 3% 的水泥 + 质量分数为 6% 的碳。

## 基金项目

本论文得到了广西科技重大专项(桂科 AA17202001)的支持。

## 参考文献

- [1] 杨文远, 郑丛杰, 崔健, 等. 我国炼钢用氧技术的现状及今后工作的建议[J]. 炼钢, 2001, 17(3): 1-5.
- [2] 朱 荣, 刘润藻, 郁健, 等. 电弧炉炼钢高效化能量集成节能技术[J]. 河南冶金, 2009, 17(2): 1-5.
- [3] 许立志. 半钢炼钢转炉增大供氧强度的氧枪设计与使用[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(3): 60-63.
- [4] 冯聚和. 炼钢设计原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 10-24.
- [5] 许智芳, 苏爱玲, 张新峰, 等. 氧化铝赤泥的综合回收及利用现状[J]. 山东冶金, 2010, 32(3): 8-12.
- [6] 许智芳, 王科, 苏爱玲, 等. 化学品氧化铝的研究开发及应用[C]//全国铝工业新技术推广暨节能减排经验交流会, 2009: 3-6.
- [7] Li, X.B., Xiao, W., Liu, W., et al. (2009) Recovery of Alumina and Ferric Oxide from Bayer Red Mud Rich in Iron by Reduction Sintering. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19**, 1342-1347. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60447-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60447-1)
- [8] 黄柱成, 蔡凌波, 张元波, 等. 拜耳法高铁赤泥直接还原制备海绵铁的研究[J]. 金属矿山, 2009, 39(3): 173-177.



- [9] 王政, 徐安军, 贺东风. 不锈钢除尘灰冷固结团块抗压强度的影响因素[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(5): 25-29, 60.
- [10] 陈先利, 王南, 姜振强, 等. 电炉除尘灰冷固球团技术开发及应用[J]. 云南冶金, 2021, 50(6): 170-174.
- [11] 代梦博, 孙彩虹, 孟庆民, 等. 冷固结钛精矿高炉护炉球团制备研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(4): 41-46.