水洗脱酸对酸浸脱磷人工磁铁精矿表面性质及球团性能的影响

黄武胜[1]，陈青月[2]，延 黎[1]，潘 建[2]，朱德庆[2]，郭正启[2]，杨聪聪[2]
（1. 中钢设备有限公司，北京 100083；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要： 我国铁矿石通常经选矿后进行造块制备优质炉料，部分复杂铁矿需经酸浸或其它化学选矿才能产出高品质的铁精矿，该类型铁精矿由于表面亲水性弱而导致生球性能差。为了充分利用此部分矿种，本文采取水洗脱酸预处理酸浸脱磷磁铁精矿，考察水洗对铁精矿表面性质与球团性能的影响，为酸浸脱磷精矿球团制备提供理论依据和强化措施。研究结果表明：水洗脱酸预处理可使酸浸脱磷铁精矿细颗粒增加，比表面积从1 682 cm^2/g增加到1 853 cm^2/g，接触角从33.77°降低到31.82°，亲水性增强，颗粒的物理稳定性提高。经水洗脱酸，酸浸脱磷铁精矿生球强度与焙烧性能得到改善，落下强度由1.0次/(0.5 m)升高到5.8次/(0.5 m)，焙烧球强度从999 N/P提高到2 500 N/P以上。

关键词： 鲕状赤铁矿；酸浸脱磷；水洗脱酸；表面性质；球团
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)05－0040－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.069

Effect of water-washing deacidification on surface and pellet properties of artificial magnetite concentrate after acid leaching dephosphorization

HUANG Wusheng[1], CHEN Qingyue[2], YAN Li[1], PAN Jian[2], ZHU Deqing[2],
GUO Zhengqi[2], YANG Congcong[2]
(1. *Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*; 2. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: Iron ore is usually agglomerated after beneficiation to obtain the high-quality charge in China. Some complex iron ores need acid leaching or other chemical beneficiation to produce high-quality iron concentrate, this type of iron concentrate has the poor performance of green balls due to its weak surface hydrophilicity. To fully optimize this kind of miderals, in this paper, the magnetite concentrate after acid leaching dephosphorization is pretreated by water-washing deacidification, and the effect of water washing on the surface and pellet properties of iron concentrate is investigated in order to provide the theoretical basis and strengthening measures for pellet preparation of acid leaching dephosphorization concentrate. The results show that water-washing deacidification pretreatment can increase the ratio of the fine particles, and the surface area increased from 1 682 cm^2/g to 1 853 cm^2/g. The contact angle decreased from 33.77° to 31.82°, enhancing hydrophilicity and improving particles' physical stability. After water-washing deacidification, the strength of green balls and roasting performance of acid-leaching dephosphorized iron concentrate are improved. The drop strength increased from 1.0 times/(0.5 m) to 5.8 times/(0.5 m), and the compressive strength of fired pellets increased from 999 N/P to more than 2 500 N/P.

Key words: oolitic hematite; acid leaching dephosphorization; water-washing deacidification; surface properties; pellet

收稿日期： 2022－05－21；**修回日期：** 2022－07－03
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(52174329)
作者简介： 黄武胜(1982—)，男，高级工程师，从事矿业技术研发及应用研究相关工作。
通信作者： 潘 建(1977—)，男，教授，从事烧结球团与直接还原，资源综合利用与环保的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我国贫细杂铁矿中鲕状赤铁矿资源储量高达 100 多亿吨，约占国内铁矿资源总储量的 12%[1]，具有嵌布粒度极细，常与许多铁矿物紧密共生的特点，是全世界公认的难选铁矿石类型之一[2]。高磷鲕状赤铁矿中有害杂质磷元素的质量分数较高(0.4%~1.8%)，需要选矿脱磷才能对其加以利用[3]，目前脱磷的方法包括常规选矿法、浸出法、磁化焙烧—磁选法等[4]，目前，常采用联合的脱磷工艺如磁化焙烧—磁选—酸浸工艺，以此达到提铁降磷的效果[3]。高磷鲕状赤铁矿在经过细磨和选矿处理后，因粒度太细必须通过铁矿造块的方法，将铁精矿制备成供高炉炼铁使用的优质炉料。而球团法制备的球团矿具有强度好、热利用效率高、冶金性能良好等优点，因而其在现代钢铁冶金行业领域具有不可或缺的作用。

在球团生产过程中，造球工艺会影响成品球团矿的产、质量[5]。同时，铁矿粉的表面性质会直接影响到生球的性能。铁矿石在选矿后其表面通常会残留有浮选药剂、酸或碱等，此类物质在一定程度上会改变铁精矿的表面性质，使得铁精矿的成球性能变差，对生球制备产生不利影响。有研究表明，使用浮选后的铁精矿为原料造球，得到的生球性能下降、球团稳定性变差[6-8]。目前对酸浸脱磷铁精矿应用于球团的研究较少，尤其是对脱酸前后铁精矿表面性质的变化更缺乏系统的研究。为充分利用此类铁精矿，本文以国外某高磷鲕状赤铁矿经磁化焙烧—磁选—酸浸联合工艺得到的脱磷人工磁铁精矿为原料，探究水洗脱酸对铁精矿表面性质与球团性能的影响，为酸浸脱磷人工磁铁精矿作为球团原料应用提供理论依据。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验原料包括鲕状高磷赤铁矿磁化焙烧—磁选—酸浸的人工磁铁精矿(GD 精矿)、有机复合黏结剂(PAM)、石灰石熔剂。所有原料的物理、化学性能见表 1 和表 2，GD 精矿的微观颗粒形貌如图 1 所示。

表 1　原料的主要化学成分(质量分数)

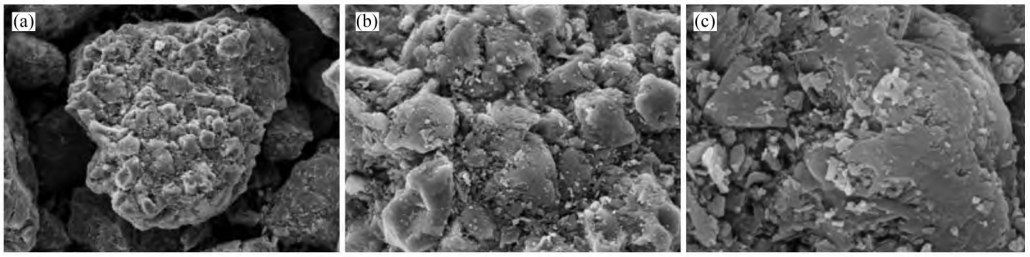
Table 1　Main chemical composition of raw materials　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P	S	烧损
GD 精矿	63.95	15.25	4.17	0.31	0.25	3.74	0.035	0.025	0.22	0.042	-0.89
石灰石	1.62	—	7.29	46.63	1.00	2.08	0.093	0.038	0.048	0.032	39.19

表 2　原料的粒度组成、比表面积和静态成球性指数

Table 2　Size distribution, specific surface area and static balling index of raw materials

原料名称	粒度组成(质量分数)/%		比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	最大毛细水(质量分数)/%	最大分子水(质量分数)/%	静态成球性指数
	-0.074 mm	-0.044 mm				
GD 精矿	87.38	59.29	1 682	22.17	9.71	0.78
石灰石	84.03	63.25	2 072	—	—	—



(a) 1 000 倍；(b) 3 000 倍；(c) 10 000 倍

图 1　GD 精矿的微观颗粒形貌

Fig. 1　Microscopic particle morphology of GD concentrate

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由表1可知：GD精矿铁品位较高，$w(TFe)/w(FeO)$为4.19，为弱磁性矿，表明磁化焙烧仍有改进空间；该铁精矿的脉石成分和P质量分数仍较高，若作为高品质精矿产品，则需要进一步降低P质量分数和有害杂质含量。由表2可知，GD精矿的粒度组成与比表面积均满足造球对细磨物料的要求，其成球性指数为0.78，属于具有较好成球性能的铁精矿。石灰石CaO质量分数较高，有害杂质较少。试验所采用的PAM，其主要有机成分为聚丙烯酰胺$(C_3H_5NO)_n$，相对分子质量为5×10^6，-0.2 mm粒级质量分数不小于5%，是一种线型高分子聚合物，具有强黏结性。

此外由图1可知，该矿颗粒较细，表面较为粗糙且疏松多孔，大颗粒表面黏附有较多微细颗粒物，有利于提高铁精矿的成球性能。

1.2 试验方法

1.2.1 表面性质表征

铁精矿的粒度组成采用湿筛法，比表面积参考GB/T 8074—2008标准进行测定，相对接触角采用Washburn动态法进行测量，静态成球性指数与最大分子水和最大毛细水有关，分别采用离心法与容量法测定，表面电位采用电渗法测定。

1.2.2 原料预处理

原料预处理包括水洗脱酸和高压辊磨。水洗脱酸是利用水的冲洗和浸透作用去除铁矿表面的水溶性物质[9-10]，脱除过程主要分为溶解和脱附两部分[11]，而酸浸常采用硫酸、盐酸等作为浸出剂，因此采用水洗的方法可以实现酸浸后的矿物表面的脱酸[12]。高压辊磨可以提高比表面积和改善颗粒表面活性，从而改善其成球性能与焙烧性能。

水洗脱酸预处理步骤：将铁精矿与去离子水按1∶3的配比进行混合，使用电动搅拌器以960 r/min的速率搅拌30 min，静置1 h使其沉淀，重复以上步骤3次后过滤，将滤出的铁精矿进行烘干，得到水洗脱酸处理后的铁精矿。高压辊磨机线压力为342 kN/m，给料速度为6 kg/min，入料水分为9.0%，在铁精矿单次通过辊压的条件下进行辊磨预处理。

1.2.3 球团试验

将原料与一定量的水分混合均匀，用于圆盘造球试验，造好的生球经过人工筛分，得到粒度为8~16 mm的合格生球。将生球取样测定其抗压强度、落下强度、爆裂温度和生球水分，通过优化工艺参数，得到最佳条件下的生球，将生球进行干燥以获得干球。预热焙烧试验在单节卧式管式炉中进行，将所得的干球置于刚玉瓷舟中，在设定的温度下进行预热、焙烧、均热，得到的焙烧球团冷却到室温后检测其抗压强度。

2 结果与分析

2.1 水洗脱酸对铁精矿表面性质的影响

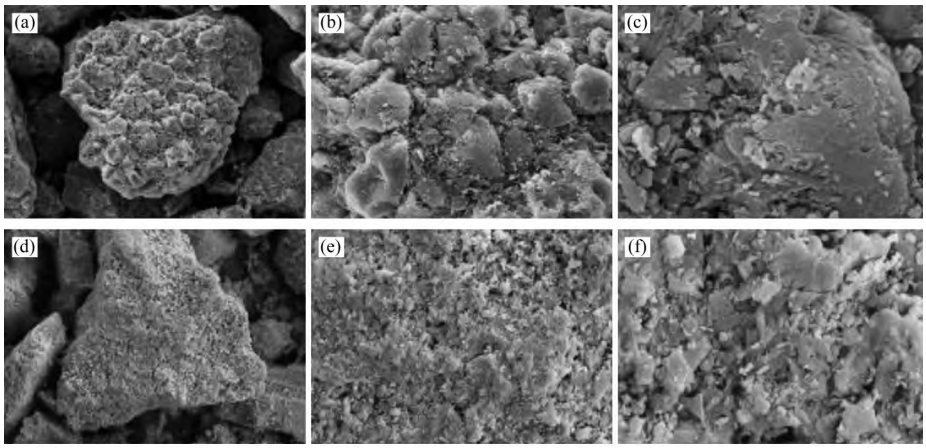
2.1.1 颗粒表面形貌变化

水洗脱酸前后的铁精矿微观颗粒形貌如图2所示。由图2可知，水洗脱酸后的铁精矿表面附着的细颗粒与片状颗粒明显增多，颗粒间更紧密，粒度更加均匀。这主要是因为该人工磁铁精矿中残留大量的残酸和可溶性盐，在水洗的过程中溶解到液体中，从而与铁精矿分离，导致铁精矿颗粒结构发生破坏，表面出现孔洞，产生大量微小颗粒，增加了比表面积，有利于改善成球性能和球团高温固结时Fe_2O_3再结晶的发展，提高了球团矿的结晶强度。

2.1.2 粒度组成与比表面积

水洗脱酸前后的铁精矿粒度与比表面积变化见表3。由表3可知，水洗脱酸后的铁精矿粒度变细，达到球团生产比表面积要求(1 500~1 900 cm^2/g)的高值范围，这些有利于改善铁精矿的成球性。产生这些变化的主要原因是铁精矿表面的大颗粒上黏附有一些小颗粒，小颗粒通过水洗搅拌与大颗粒分离，从而使得铁精矿粒度变细，比表面积升高。铁精矿粒度与比表面积的变化与其颗粒表面形貌的变化规律基本一致，因此预测水洗脱酸后的铁精矿会有更好的生球性能指标。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



水洗脱酸前：(a) 1 000 倍；(b) 3 000 倍；(c) 10 000 倍；
水洗脱酸后：(d) 1 000 倍；(e) 3 000 倍；(f) 10 000 倍

图 2　GD 精矿水洗前后的微观颗粒形貌

Fig. 2　Microscopic particle morphology of GD concentrate before and after washing

表 3　水洗前后原料的粒度组成与比表面积

Table 3　Size distribution and specific surface area of raw materials before and after washing

项目	粒度组成(质量分数)/%				比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
	+0.15 mm	−0.074 mm	−0.043 mm	−0.038 mm	
水洗前	0.26	87.38	59.29	44.75	1 682
水洗后	0.38	87.64	54.36	45.82	1 853

2.1.3　亲水性与静态成球性指数

水洗前后原料的接触角与静态成球性指数如表 4 所示。由表 4 可知，水洗后的铁精矿接触角有所减小，最大毛细水与最大分子水质量分数都有所增加，表明亲水性得到提高，有利于铁矿成球与生球强度的提高。水洗后的铁精矿静态成球性指数大大提升，远大于 0.80，属于优异成球性，这与颗粒形貌、粒度、比表面积及亲水性变化的规律完全吻合。

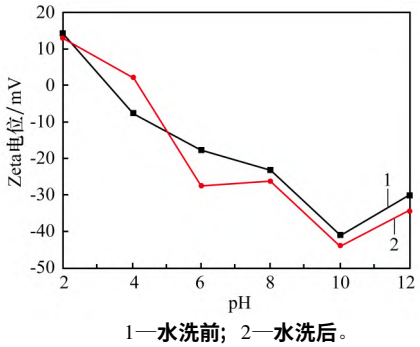
表 4　水洗前后原料的接触角与静态成球性指数

Table 4　Contact angle and static balling index of raw materials before and after washing

项目	接触角/(°)	最大毛细水(质量分数)/%	最大分子水(质量分数)/%	静态成球性指数
水洗前	33.77	22.17	9.71	0.78
水洗后	31.82	24.08	14.05	1.40

2.1.4　Zeta 电位

Zeta 电位可以反映出颗粒间的静电斥力与静电引力的强度，在一致的 pH 体系中，Zeta 电位的绝对值越高，表明该 pH 体系稳定性越好。水洗前后铁精矿的 Zeta 电位如图 3 所示。由图 3 可知，水洗前与水洗后的铁精矿零电点分别在 pH = 3.3 和 pH = 4.2 左右。在造球过程中会添加 PAM，造球体系偏碱性，因此考虑 pH ≥ 6.0 的情况。当 pH ≥ 6.0 时，二者都是表面荷负电，且水洗后铁精矿表面电位的绝对值比水洗前的大，表明粒子间的静电斥力变大，物理稳定性变好。研究表明，Zeta 电位与孔隙率呈



1—水洗前；2—水洗后。

图 3　水洗前后铁精矿的 Zeta 电位

Fig. 3　Zeta potential of iron ore concentrate before and after washing

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

负相关，Zeta 电位绝对值越大，得到的球团孔隙率越小[13]。因此水洗后的铁精矿 Zeta 电位绝对值较高，填料更紧密，制备的球团更光滑，孔隙率更小，有利于提高生球强度与焙烧球强度。

综上所述，水洗预处理使得铁精矿细颗粒增加，提高了原料的细度，增加了其比表面积，提高了其亲水性，也增强了颗粒的物理稳定性，有助于改善成球性能与焙烧性能，提高生球和焙烧球团强度。

2.2 水洗脱酸对生球性能的影响

在水分为 14.0%，固定碱度为 0.35，造球时间为 12 min 条件下进行造球，研究不同原料预处理方式与黏结剂用量下的生球性能[14]，结果如表 5 所示。由表 5 可知，原矿配加不同用量的黏结剂造球时，生球性能均不能满足生产要求，这主要是因为精矿表面残留的酸影响了铁精矿的表面性质，同时对黏结剂作用产生不利影响，以致生球性能指标变差。

表 5 原料预处理方式与黏结剂用量对生球性能的影响

Table 5 Effect of raw material pretreatment and binder dosage on the properties of green pellets

预处理方式	黏结剂用量（质量分数）/%	生球水分（质量分数）/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
无预处理	0.05	14.8	1.0	4.0	370
	0.10	14.5	1.1	4.8	<200
	0.30	15.0	1.0	4.5	<200
高压辊磨	0.30	14.0	2.3	8.3	325
水洗预处理	0.30	15.0	5.2	17.7	250
水洗预处理 + 高压辊磨	0.20	14.0	3.0	13.4	240
	0.30	14.0	5.8	15.5	305

适宜的原料预处理方式通常可改善球团性能，原料预处理方式包括水洗、高压辊磨、加热等。精矿中酸离子等有害元素主要以水溶性离子形式存在，采用水洗法对精矿进行预处理，可以清洗掉大部分可溶性成分，是一种有效的预处理方法[13]。高压辊磨通过机械化学活化铁精矿表面，也有利于球团性能的改善。

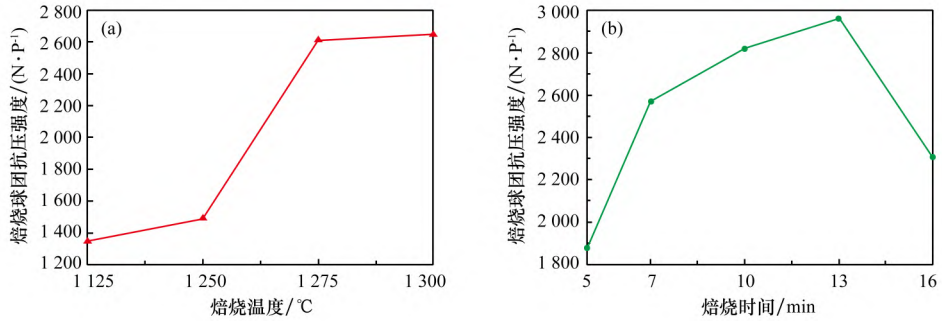
此外，由表 5 可知，相比不进行预处理的生球，仅高压辊磨，生球的落下强度变化较小，抗压强度有所增加，但仍未达到 10 N/P 的基本要求，不满足生产要求；只进行水洗脱酸预处理时，生球落下强度和抗压强度明显改善，可满足生球强度的要求；而采用水洗脱酸与高压辊磨联合预处理后，生球落下强度达到 5.8 次/(0.5 m)，抗压强度大于 15 N/P，爆裂温度为 305 ℃，综合指标最优，因此后续采用水洗脱酸与高压辊磨的组合方法进行生球制备试验。

2.3 水洗脱酸对球团预热焙烧性能的影响

以水洗脱酸和高压辊磨联合处理的铁精矿作为原料，通过控制变量法优化黏结剂用量、生球水分和造球时间，得到最佳造球参数：黏结剂用量为 0.3%，生球水分为 15%，造球时间为 12 min，碱度为 0.35，得到落下强度为 10.7 次/(0.5 m)、抗压强度为 19.4 N/P、爆裂温度为 250 ℃的合格生球用于管炉预热焙烧试验，考察水洗脱酸对球团预热焙烧性能的影响。

在预热温度为 850 ℃，均热温度为 1 050 ℃，均热时间为 2 min 条件下，考察焙烧温度与时间对焙烧球团抗压强度的影响，结果如图 4 所示。由图 4 可知，随着焙烧温度的提高，焙烧球团的抗压强度随之增加，在 1 275 ~ 1 300 ℃时，球团强度达到峰值［图 4(a)］。在强度比较高的情况下，考虑尽可能缩短时间，以此缩短带式焙烧机的面积，因此后续选择预热时间为 8 min。随着焙烧时间的增加，焙烧球团的抗压强度先增加后减小，通常在较高的焙烧温度下，焙烧时间可相应缩短。因此，适宜的焙烧温度为 1 275 ~ 1 300 ℃，焙烧时间为 7 ~ 10 min，此时焙烧球团强度可达到 2 500 N/P 以上。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

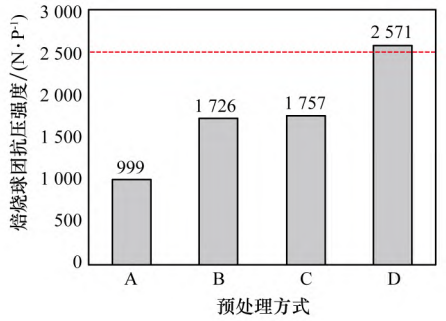


(a) 焙烧温度(预热时间为 10 min，焙烧时间为 10 min)；(b) 焙烧时间(预热时间为 8 min，焙烧温度为 1 275 ℃)

图 4　焙烧温度与焙烧时间对球团抗压强度的影响

Fig. 4　Effect of roasting temperature and time on compressive strength of pellets

在综合优化的预热焙烧制度(预热温度为 850 ℃，预热时间为 7 min，焙烧温度为 1 275 ℃，焙烧时间为 8 min，均热温度为 1 050 ℃，均热时间为 2 min)下，本文对比水洗脱酸、高压辊磨预处理及两者联合预处理对焙烧球团抗压强度的影响，结果见图 5。由图 5 可知：焙烧球团矿 A 强度最低，仅为 999 N/P；B、C 焙烧球团矿的强度均可提高 700～750 N/P 左右，达到 1 726～1 757 N/P，尽管球团焙烧性能得到明显改善，但仍不符合焙烧球团矿的抗压强度要求(≥2 500 N/P)；而焙烧球团矿 D 抗压强度则有了大幅度的提升，达到 2 571 N/P，满足了焙烧球团矿抗压强度的要求。由此可见，水洗脱酸和高压辊磨联合预处理，可解决酸浸脱磷铁精矿制备球团时难成球与难焙烧的问题。



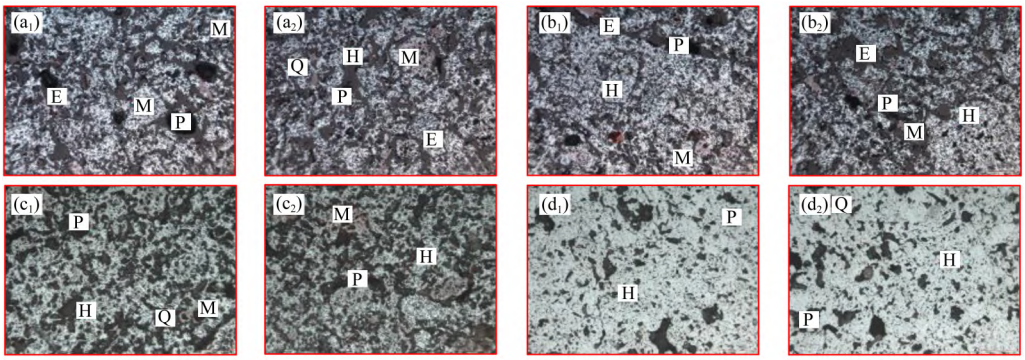
A—未水洗未辊压；B—未水洗已辊压；C—已水洗未辊压；D—已水洗已辊压。

图 5　原料预处理方式对球团抗压强度的影响

Fig. 5　Effect of pretreatment method of raw materials on compressive strength of pellets

2.4　球团矿矿相分析

球团矿的固结主要靠固相反应，Fe_2O_3 再结晶连接是磁铁矿氧化球团固结的主要形式[15]。为探究不同预处理方式制得的氧化球团固结机制的差异，对其进行矿相分析，结果如图 6 所示。由图 6 可见，这 4 种成品球主要由赤铁矿与少量的磁铁矿、石英组成。



(a₁)、(a₂) 未水洗未辊压；(b₁)、(b₂) 未水洗已辊压；(c₁)、(c₂) 已水洗未辊压；(d₁)、(d₂) 已水洗已辊压

H—赤铁矿；M－磁铁矿；Q—石英；P—孔洞；E—树脂。

图 6　球团矿相微观结构(200 倍)

Fig. 6　Mineral phase microstructure of pellets(×200)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

此外，由图[6(a1)]、[6(a2)]可知，未水洗未辊压的球团中赤铁矿晶桥发育较差，连接效果差，且同心圆与不规则孔隙较多，残余磁铁矿聚合成团块状集合体分布在赤铁矿粒间，氧化不完全。由图[6(b1)]、[6(b2)]和图[6(c1)]、[6(c2)]可知，未水洗已辊压和已水洗未辊压的球团中赤铁矿呈互联状，但其微晶结晶连接没有成片，其内部有气孔或石英等黏结相，结构较疏松，赤铁矿连接不紧密。由图[6(d1)]、[6(d2)]可知，水洗和辊压联合预处理的球团中赤铁矿结晶良好，互联程度高，基本连成片，单独粒状少，几乎未见有磁铁矿。由此可见，单一水洗和高压辊磨都能提高球团抗压强度，但联合水洗和高压辊磨预处理方式的效果最佳。

3 结 论

(1) GD精矿的化学成分、物理性能均满足造球对原料的要求，但酸浸后的铁精矿表面性质发生改变，使得铁精矿的成球性能变差，对其进行水洗脱酸预处理，可改变铁精矿表面性质，提高其成球性能。

(2) 水洗脱酸预处理提高了铁精矿的细度，增加了比表面积，接触角有所减小，最大毛细水与最大分子水含量变高，颗粒表面被水润湿的能力增强，亲水性得到提高，同时铁精矿表面Zeta电位绝对值变高，增强了颗粒的物理稳定性，填料更紧密，因而有利于改善酸浸脱磷铁精矿的成球性能与焙烧性能，提高了球团强度。

(3) 经水洗脱酸，酸浸脱磷铁精矿生球强度与焙烧性能得到改善，生球的落下强度由1.0次/(0.5 m)升高到5.8次/(0.5 m)，抗压强度由4.48 N/P增加到了15.5 N/P；在预热温度为850 ℃，预热时间为7 min，焙烧温度为1 275 ℃，焙烧时间为8 min，均热温度为1 050 ℃，均热时间为2 min，焙烧球强度从999 N/P提高到2 500 N/P以上，水洗脱酸和高压辊磨联合预处理的固结效果最佳，可解决酸浸脱磷铁精矿制备球团时难成球难焙烧的问题。

参考文献:

[1] 白春霞，李宏静. 高磷鲕状赤铁矿脱磷选矿工艺现状分析[J]. 现代矿业，2021，37(1)：117－119.
BAI Chunxia，LI Hongjing. Research status analysis of dephosphorization mineral processing of high phosphorus oolitic hematite[J]. Modern Mining，2021，37(1)：117－119.

[2] XIAO Junhui，ZOU Kai，WANG Zhen. Studying on mineralogical characteristics of a refractory high-phosphorous oolitic iron ore[J]. SN Applied Sciences，2020，2(6)：1－12.

[3] 刘东泉，李文博，韩跃新，等. 阿尔及利亚某高磷鲕状赤铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿冶工程，2020，40(4)：65－68；74.
LIU Dongquan，LI Wenbo，HAN Yuexin，et al. Process mineralogy of high-phosphorus oolitic hematite from algeria[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2020，40(4)：65－68；74.

[4] 周文涛，韩跃新，孙永升，等. 高磷鲕状赤铁矿提铁降磷研究综述[J]. 金属矿山，2019(2)：10－14.
ZHOU Wentao，HAN Yuexin，SUN Yongsheng，et al. Research prospect of enriched iron and dephosphorization of high phosphorus oolitic hematite[J]. Metal Mine，2019(2)：10－14.

[5] 陆帅帅. 纳米碳酸钙基铁矿球团黏结剂的黏结机制及性能强化[D]. 沈阳：东北大学，2017：7.
LU Shuaishuai. Binding mechanism and performance enhancement of nano-$CaCO_3$ based binders for iron ore pellets[D]. Shengyang：Northeastern University，2017：7.

[6] FORSMO S P E，FORSMO S E，BIÖRKMAN B M T，et al. Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet proper ties[J]. Powder Technology，2008，182(3)：444－452.

[7] 杨大兵，吴明，刘曙，等. 反浮选工艺对程潮铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团，2009，34(6)：29－31.
YANG Dabing，WU Ming，LIU Shu，et al. Effect of reverse flotation process on Chengchao iron ore pellet quality[J]. Sintering and Pelletizing，2009，34(6)：29－31.

[8] 范建军，郭宇峰，臧龙，等. 加热预处理对浮选赤铁矿粉造球性能的影响[J]. 钢铁研究学报，2018，30(9)：710－715.
FAN Jianjun，GUO Yufeng，ZANG Long，et al. Effect of heating pretreatment on ballability of hematite concentrate with flotation process[J]. Journal of Iron and Steel Research，2018，30(9)：710－715.

[9] 常威，刘宏辉，蒋旭光. 垃圾焚烧飞灰水洗脱氯及重金属浸出特性研究[J]. 无机盐工业，2022，54(3)：113－118.

(下转第52页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

TENG Fei, ZENG Zhiyan, GUO Peimin, et al. Experimental study on pellets performance of a kind of manganese-containing iron concentrate [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 47 – 53.

[5] 朱一民,王燕,张婧,等. 国外某悬浮焙烧—磁选高铝铁精矿降铝试验 [J]. 金属矿山,2019(8): 58 – 62.
ZHU Yimin, WANG Yan, ZHANG Jing, et al. Experiment on aluminum reduction of a suspension roasting magnetic separation high alumina iron concentrate abroad [J]. Metal mines, 2019(8): 58 – 62.

[6] 路明,于洪军,王兴锋,等. SiO_2 含量对铁矿球团性能影响的研究进展 [J]. 鞍钢技术,2022(4): 7 – 12.
LU Ming, YU Hongjun, WANG Xingfeng, et al. Research progress on the influence of SiO_2 content on the performance of iron ore pellets [J]. Angang Steel Technology, 2022(4): 7 – 12.

[7] 黄肖玲,代霞梅,纪国良,等. 基于“前港后厂”模式的进口铁矿石采购物流成本优化 [J]. 中国管理科学,2021, 29(8): 218 – 228.
HUANG Xiaoling, DAI Xiamei, JI Guoliang, et al. Logistics cost optimization of imported iron ore procurement based on the “front port and rear factory” model [J]. China Management Science, 2021, 29(8): 218 – 228.

[8] 邢伟,杨海龙,席振伟. 进口铁精矿细磨工艺技术研究 [J]. 矿业工程,2020,18(3): 43 – 46.
XING Wei, YANG Hailong, XI Zhenwei. Research on fine grinding technology of imported iron concentrate [J]. Mining Engineering, 2020, 18(3): 43 – 46.

[9] 王笑天,柴轶凡,罗果萍,等. 进口磁铁精矿球团配矿及工艺参数优化试验 [J]. 烧结球团,2022,(47): 16 – 23.
WANG Xiaotian, CHAI Yifan, LUO Guoping, et al. Ore blending and process parameter optimization test of imported magnetite concentrate pellets [J]. Sintering and pelletizing, 2022, 47(2): 16 – 23.

[10] 于洪军,路明,王兴锋,等. 铁矿粉粒度组成对球团矿性能影响的研究进展 [J]. 冶金能源,2022,41(1): 21 – 27.
YU Hongjun, LU Ming, WANG Xingfeng, et al. Research progress on the influence of particle size composition of iron ore fines on pellet properties [J]. Metallurgical Energy, 2022, 47(2): 21 – 27.

[11] 傅菊英. 含铁矿物成球性指数 K 的研究 [J]. 烧结球团, 1992,17(4): 4 – 7.
FU Juying. Study on ballability index K of iron ores [J]. Sintering and Pelletizing, 1992, 17(4): 34 – 38.

[12] 李光胜,徐超,朱幸福,等. 某矿山深部矿石球磨功指数和可磨度测定研究 [J]. 中国金属通报,2020(12): 293 – 294.
LI Guangsheng, XU Chao, ZHU Xingfu, et al. Study on determination of ball milling work index and grindability of deep ore in a mine [J]. China Metal Bulletin, 2020(12): 293 – 294.

[13] 许道刚,吕清纯,邹勤,等. 球磨机产能优化改造及应用 [J]. 中国钨业,2020,35(2): 36 – 39.
XU Daogang, LÜ Qingchun, ZOU Qin, et al. Optimization, transformation and application of ball mill capacity [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(2): 36 – 39.

(上接第46页)

CHANG Wei, LIU Honghui, JIANG Xuguang. Study on dechlorination and heavy metal leaching characteristics of MSWI fly ash during water-washing [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(3): 113 – 118.

[10] 郭莉. 基于过程强化的铜冶炼烟灰中砷选择性去除工艺及机理 [D]. 北京: 中国地质大学,2018: 32 – 36.
GUO Li. Technology and mechanism of arsenic selective leaching from copper smelter fly ash based on process intensification [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018: 32 – 36.

[11] SARKAR Santanu, SARKAR Supriya. Beneficiation of rejects slime of iron ore by means of sequential leaching [J]. Metallurgical Research & Technology, 2019, 116(2): 1 – 6.

[12] 刘敏媛,汤勇,吴云,等. 高压辊磨改善赤铁精性能研究 [J]. 矿业工程,2020,18(5): 54 – 57.
LIU Minyuan, TANG Yong, WU Yun, et al. Research on improving hematite concentrate performance by high pressure roller mill [J]. Mining Engineering, 2020, 18(5): 54 – 57.

[13] 闫天明,彭犇. 水洗除尘灰配入烧结对成矿性能的影响 [J]. 中国资源综合利用,2020,38(7): 29 – 32.
YAN Tianming, PENG Ben. Research on the influence of water washing dedusting ash combined with sintering process on metallogenic performance [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(7): 29 – 32.

[14] 侯静,吴恩辉,李军,等. 改性有机黏结剂对球团性能的影响分析 [J]. 烧结球团,2017,42(5): 35 – 38.
HOU Jing, WU Enhui, LI Jun, et al. Analysis of effect of modified organic binder on pelletizing properties [J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(5): 35 – 38.

[15] 乔波,罗果萍,柴轶凡,等. 不同精矿制备球团矿预热焙烧性能对比分析 [J]. 烧结球团,2021,46(2): 50 – 56.
QIAO Bo, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Comparison and analysis on preheating roasting performance of pellets prepared from different concentrates [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 50 – 56.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net