不锈钢酸洗污泥对氧化球团质量的影响

汤正怡，刘国栋，钟林涛
（安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002）

摘要：针对不锈钢酸洗污泥存在难以大宗量、资源化处理等问题，本文提出了采用氧化球团工序处理不锈钢酸洗污泥的技术思路，系统研究了添加不锈钢酸洗污泥对氧化球团生球质量、预热焙烧球团质量和化学成分的影响。结果表明：添加少量不锈钢酸洗污泥可以显著改善生球落下强度和抗压强度，提高预热球团和焙烧球团的抗压强度；加入酸洗污泥后，污泥中的 CaF_2 会降低球团内部多元系熔点，强化 Fe_2O_3 再结晶。确定最佳工艺参数：配加 4% 酸洗污泥，预热温度为 1 050 ℃，预热时间为 15 min，焙烧温度为 1 250 ℃，预热时间为 15 min。

关键词：不锈钢酸洗污泥；资源化利用；氧化球团；抗压强度
中图分类号：TF046.6；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0089－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.046

Influence of stainless steel pickling sludge on mass of oxidized pellets

TANG Zhengyi, LIU Guodong, ZHONG Lintao
(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract: For stainless steel pickling sludge, there are problems such as difficulty in bulk and resource treatment. A technical idea of using oxidized pellet process to treat stainless steel pickling sludge is proposed, and the effects of adding stainless steel pickling sludge on the mass of oxidized pellet green pellets, preheating and roasting pellet quality and chemical composition are systematically studied. The results show that adding a small amount of stainless steel pickling sludge can significantly improve the falling strength and compressive strength of green pellets, and improve the compressive strength of preheated pellets and roasted pellets. After the addition of pickling sludge, the CaF_2 in the sludge will reduce the melting point of multiple systems in the pellet and strengthen the recrystallization of Fe_2O_3. The optimal process parameters are determined to be the addition of 4% pickling sludge, the preheating temperature is 1 050 ℃, the warm-up time is 15 min, the roasting temperature is 1 250 ℃, the warm-up time is 15 min.

Key words: stainless steel pickling sludge; resource utilization; oxidized pellets; compressive strength

不锈钢酸洗污泥是不锈钢生产中酸洗钝化的副产物，其富含 Cr、Ni 等金属氧化物以及 CaF_2 和 $CaSO_4$ 等化合物，约占不锈钢产量的 2.5%～5.0%[1]，由于缺乏大规模资源化处理工艺，酸洗污泥处理成本高，目前我国酸洗污泥大部分尚处于堆存状态，不仅占用土地面积，而且会对自然环境和人类社会造成危害。自 2020 年 9 月 1 日新固废法实施以来[2]，我国对固体废弃物的处理提出更高的要求，如何资源化利用不锈钢酸洗污泥已成为不锈钢企业所面临的关键性难题。目前国内外处置工艺主要有固化稳定处理、建材资源利用、金属回收、冶金辅料协同循环等[3-5]。许香帅等[6]以酸洗污泥为原料制备水泥胶凝材料，可以有效调控水化过程初凝及终凝时间；施春红等[7]采用水浸—分步沉淀法从不锈钢酸洗污泥中回收镍、铁、铬，适宜条件下镍、铁、铬回收率

收稿日期：2024－01－15；**修回日期**：2024－03－12
基金项目：安徽省优秀科研创新团队(2023AH010016)
作者简介：汤正怡(2003—)，女，本科，从事冶金固废资源利用研究。

均在90%以上；张祎等[8]以生物质为还原剂，通过还原—磁选试验回收酸洗污泥中铁，所得产物中铁品位为67.72%、回收率达91.83%；李小明等[9]将酸洗污泥配入电炉作为造渣剂使用，回收铁、铬和镍，同时将CaO、CaF_2作为辅料使用。国外曾报道可采用国际金属再生公司(international metal reclamation company，INMETCO)工艺处理不同的残渣如污泥和粉尘，或改进后处理含CaF_2污泥[10]。北部湾新材料将酸洗污泥提取碳酸镍后返回烧结工序，由于烧结燃烧带是弱还原气氛，酸洗污泥中的CaF_2在烧结燃料高温燃烧带中会产生HF气体，腐蚀管道和烟气净化设备[11]。王曦等[12]提供了一个采用旋转克林电炉(rotary klin electric furnace，RKEF)工艺对不锈钢污泥进行资源化利用的工程案例，实现了不锈钢酸洗污泥的无害化、减量化、资源化利用。由于不锈钢酸洗污泥中含有铁、铬和镍等有价元素，其规模资源化的利用有望成为未来的发展方向。本文从处置危险废物和利用污泥中二次资源的角度，针对不锈钢酸洗污泥和钢铁工业长流程的特点，提出利用现有氧化球团制备工艺处理不锈钢酸洗污泥，为其规模资源化处理提供新的技术路线。

1 原料性能及研究方法

1.1 原料性能

试验原料分别为某不锈钢企业酸洗污泥以及某球团厂的铁精矿，黏结剂为膨润土，各原料主要化学成分如表1所示。由表1可知，酸洗污泥中铁、Cr_2O_3质量分数分别为22.56%和8.06%，同时含有碱性氧化物CaO和MgO，有一定利用价值。

原料的粒度组成如表2所示。由表2可知：不锈钢酸洗污泥粒度较细，小于43 μm的粒级质量分数为99.33%；铁精矿A粒度较粗，小于74 μm的粒级质量分数仅为44.72%；铁精矿B小于74 μm的粒级质量分数为82.82%；膨润土小于74 μm的粒级质量分数为99.04%。

原料的物理性质如表3所示。由表3可知，酸洗污泥的比表面积高达8 840 cm^2/g，成球性指数优异，最大分子水与最大毛细水较高，推测其原因为污泥较细的粒度组成和较大的比表面积导致其吸水性较好[13]。铁精矿比表面积较低，约为1 000 cm^2/g，成球性指数较低。酸洗污泥的配入可以改善造球原料的粒度组成和比表面积，有利于提高成球性。表4为试验所用膨润土的物理性能。由表4可知，该膨润土胶质价为95.40 mL/(15 g)，2 h吸水率为303.85%。

1.2 研究方法

配加酸洗污泥制备氧化球团的试验流程主要分为球团制备(生球及氧化球团)和性能检测分析两部分内容。首先将干燥好的酸洗污泥、膨润土和铁精矿按一定比例进行配料，再利用三维运动混合机混匀后，将混合料放入圆盘造球机(造球机直径为1 000 mm，高为150 mm，倾角为47°，转

表1 原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw material %

原料名称	TFe	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	CaF_2	S	P
酸洗污泥	22.56	34.74	2.79	3.17	1.23	8.06	14.01	0.12	0.04
铁精矿A	64.62	2.32	5.48	0.67	0.53	0.00	0.00	1.20	0.01
铁精矿B	65.51	0.84	4.39	0.65	0.55	0.00	0.00	0.57	0.00
膨润土	2.26	1.52	56.56	1.92	17.03	0.00	0.00	0.70	0.05

表2 原料粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size distribution of raw material %

原料名称	[0,43) μm	[43,74) μm	[74,150) μm	≥150 μm
酸洗污泥	99.33	0.61	0.05	0.02
铁精矿A	33.93	10.79	30.54	24.74
铁精矿B	58.15	24.77	14.71	2.37

表 3　原料物理性质

Table 3　Physical properties of raw material

原料名称	水分/%	堆密度/($g\cdot cm^{-3}$)	真密度/($g\cdot cm^{-3}$)	比表面积/($cm^2\cdot g^{-1}$)	最大分子水/%	最大毛细水/%	成球性指数
酸洗污泥	24.83	0.68	2.46	8 840	26.22	40.33	1.86
铁精矿 A	4.72	3.04	4.78	1 000	2.92	11.58	0.34
铁精矿 B	6.96	2.76	4.37	990	5.06	15.32	0.49

表 4　膨润土物理性质

Table 4　Physical properties of bentonite

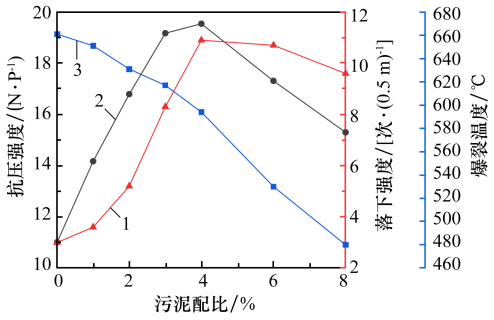
胶质价/[mL·(15 g)$^{-1}$]	膨胀倍数/(mL·g^{-1})	2 h 吸水率/%	吸蓝量/[g·(100 g)$^{-1}$]	蒙脱石质量分数/%
95.40	11.55	303.85	21.1	47.74

速为 24 r/min）中进行造球试验[物料水分为(7.9±0.5)%、造球时间为 13 min、膨润土用量为 1.2%，筛分选出 9～16 mm 的生球作为合格生球，取样测定生球的抗压强度、落下强度、爆裂温度和水分，探究酸洗污泥配比对生球质量的影响。得到的生球在 101－2AB 型电热鼓风干燥箱中于 105 ℃下干燥 12 h 至恒重。模拟链箅机—回转窑工艺，采用 CX-1400G 卧式管式炉进行预热焙烧试验。将干燥后的球团放入刚玉坩埚内，分5 次从石英管前端室温区推进预热区，每次停留1 min，在预热区设定温度下预热 15 min 后推进焙烧区，焙烧 15 min 后将球团拉回预热区，停留5 min，然后分 5 次拉回至室温区，防止球团降温过快。焙烧、冷却后的球团按照 GB/T 14201—2018 标准进行强度检测。通过蔡司 AX10 金相显微镜成像研究球团矿相结构。

2　结果及分析

2.1　酸洗污泥配比对生球质量的影响

酸洗污泥配比对生球质量的影响如图 1 所示。由图 1 可知，当不锈钢酸洗污泥配比从 0 增加到 8%时，生球落下强度和抗压强度均先升高后降低，生球爆裂温度逐渐降低。当污泥添加量由 0 提高至 4%时，落下强度由 3.0 次/(0.5 m)提高至 10.90 次/(0.5 m)，抗压强度由 11.01 N/P 提高至 19.54 N/P；当污泥添加量继续增加，两种强度均开始降低；当污泥添加量由 0 提高至 8%时，生球爆裂温度从 661 ℃降低至 480 ℃。因此，最佳污泥添加量选择为 4%。



1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

图 1　酸洗污泥配比对生球质量的影响

Fig. 1　Influence of pickling sludge ratio on the quality of green pellets

图 1 中出现的结果主要是因为，在酸洗污泥配比为 0～4%的范围内时，随着酸洗污泥配比的增加，小于 74 μm 粒级的比例增加，比表面积增大，表面自由能增加，将吸引其他颗粒，彼此间排列紧密、结构紧实，落下强度和抗压强度增大[14]。同时随着酸洗污泥的增加，混合料的最大毛细水提高，球团表面有薄膜水生成，塑性提高，落下强度增大。随着酸洗污泥配比进一步增加(大于4%)，小于 74 μm 粒级的百分比过大，混合料过细导致毛细管变窄，孔隙率变小，有效扩散系数降低[15]，将导致水分子迁移缓慢，内外水分不均匀，从而影响生球落下强度和抗压强度。随着不锈钢酸洗污泥配比增加，孔隙率下降，颗粒间黏结更紧密，强度增大，同时毛细管变窄，水分迁移变缓，加剧了生球加热时内部气压的增大[15]，造成生球爆裂温度下降。

2.2 酸洗污泥配比对氧化球团质量的影响

2.2.1 预热焙烧制度对酸洗污泥球团强度的影响

选取 4% 污泥添加量的生球作为基准进行预热焙烧试验，预热焙烧制度对酸洗污泥球团抗压强度的影响如图 2 所示。由图 2 可知，在预热 15 min 条件下，当预热温度从 950 ℃ 提高到 1 050 ℃时，预热球团的抗压强度从 270 N/P 上升到 507 N/P。当预热温度进一步提高至 1 100 ℃ 时，球团抗压强度提高缓慢，为 544 N/P。因此适宜的预热温度为 1 050 ℃。当预热时间从 12 min 逐步延长到 24 min 时，球团的抗压强度从 479 N/P 上升到 698 N/P。当预热时间为 15 min 时，球团抗压强度为 507 N/P，满足球团生产需求，因此，适宜的预热时间为 15 min。

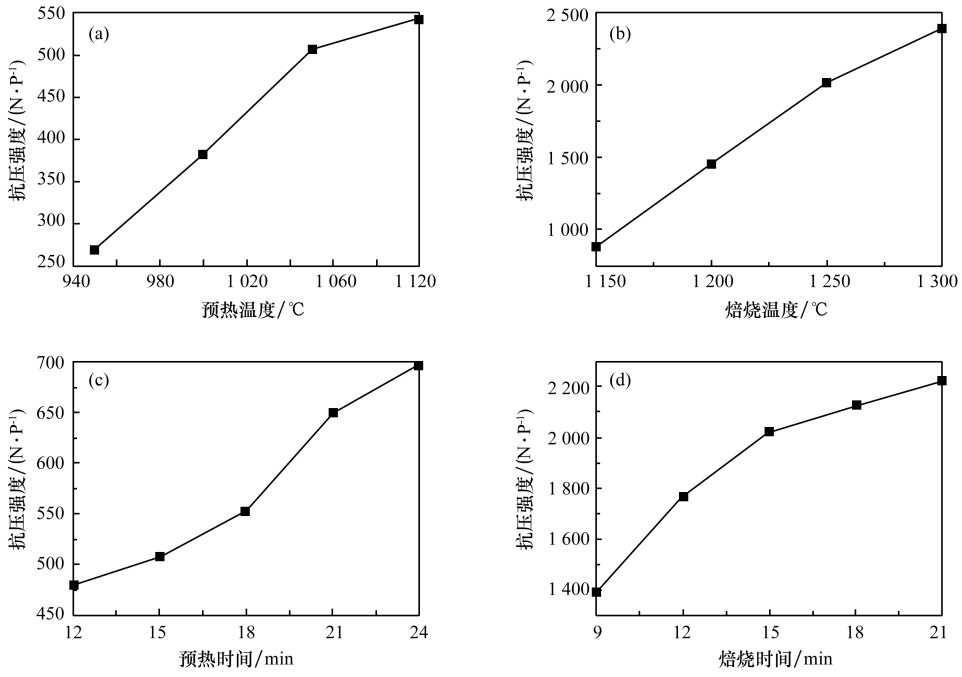
在预热温度为 1 050 ℃，预热时间为 15 min，焙烧为 15 min 条件下，随着焙烧温度从 1 150 ℃ 上升到 1 300 ℃，焙烧球团的抗压强度从 880 N/P 上升到 2 397 N/P。当焙烧温度为 1 250 ℃时，焙烧球团抗压强度为 2 025 N/P。在焙烧温度为 1 250 ℃条件下，随着焙烧时间从 9 min 延长至 15 min，焙烧球团的抗压强度从 1 390 N/P 上升到 2 025 N/P，继续延长焙烧时间至 21 min，焙烧球团抗压强度增长缓慢。因此适宜的焙烧时间为 15 min，对应抗压强度为 2 025 N/P。

2.2.2 酸洗污泥配比对球团强度的影响

在预热温度为 1 050 ℃，预热时间为 15 min，焙烧温度为 1 250 ℃，为取得较好实验结果，设置焙烧时间分别为 18 和 21 min，研究酸洗污泥配比对球团抗压强度的影响，结果分别如图 3 和图 4 所示。由图 3、4 可知，随着酸洗污泥配比的增加，预热球团和焙烧球团抗压强度均逐渐升高。当酸洗污泥配比从 0 增加到 8% 时，预热球团的抗压强度从 507 N/P 上升到 1 416 N/P；焙烧 18 min 的焙烧球团抗压强度从 2 125 N/P 上升到 2 845 N/P，焙烧 21 min 的焙烧球团抗压强度从 2 223 N/P 上升到 3 264 N/P。球团抗压强度与酸洗污泥配比呈正相关性，不锈钢酸洗污泥的配入可以改善氧化球团的质量。

2.3 球团化学成分分析

分别对焙烧后的基准球团和不同配比污泥球团进行化学成分分析，得到的结果如表 5 所示。根据GB/T 27692—2011，企业在实际生产中通常



（a）预热温度；（b）焙烧温度；（c）预热时间；（d）焙烧时间

图 2 预热焙烧制度对酸洗污泥球团抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of preheating and roasting parameters on the compressive strength of pickling sludge pellets

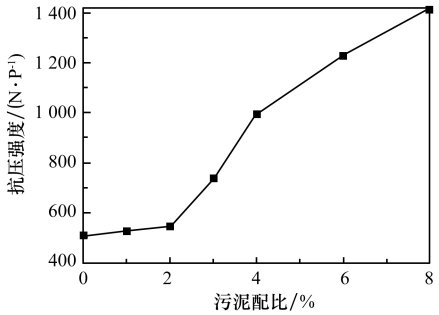
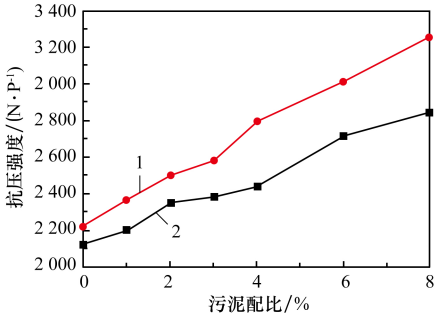


图 3　酸洗污泥配比对预热球抗压强度的影响

Fig. 3　Effect of pickling sludge ratio on compressive strength of preheating pellets



1—焙烧时间 18 min；2—焙烧时间 21 min。

图 4　酸洗污泥配比对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 4　Effect of pickling sludge ratio on compressive strength of roasted pellets

要求球团矿铁品位一般达到 62%，结合上文相关污泥球团生球强度和预热焙烧强度数据，酸洗污泥最大允许配比应为 6%。

经过预热焙烧工序后，球团中硫化物通过高温分解和氧的燃烧作用挥发，剩余 S 质量分数大约为原混合料的 5%，推测存在形式为 $CaSO_4$[11]。预热焙烧过程中，在 500～600 ℃时，开始固相反应，首先生成 CaO-Fe_2O_3，其生成量与温度关系如图 5 所示，可显著加快晶体长大[16-17]。CaF_2 的加入能降低球团内部多元系的熔点，焙烧过程中会出现部分液相，CaF_2 则进入渣相对球团矿相组织影响较小[18-19]。SiO_2 会使球团在焙烧过程中出现部分液相，对球团固结起辅助作用[20]。Al_2O_3 对球团强度影响相对较大，少量 Al_2O_3 会进入硅酸盐体系形成硅铝酸盐 $2FeO·2Al_2O_3·5SiO_2$，从而降低 FeO、Fe_3O_4 与 SiO_2 的结合量，减小铁橄榄石对 Fe_2O_3 再结晶和聚晶长大的抑制作用，球团矿抗压强度提高[21-22]。铬元素对球团的影响具有双面性，铬可能会抑制球团焙烧时产生空洞，同时也会使球团内部赤铁矿多数为小晶粒互联状，阻碍赤铁矿大范围联晶[23]。随着酸洗污泥配比的增加，可以将带入的 CaO 和 MgO 视作熔剂，会在焙烧过程中生成铁酸盐，显著加快晶体长大，提高球团强度[20]。配入酸洗污泥后焙烧球团内部液相生成温度降低，液相生成温度区间变宽，球团强度提高[18]。

2.4　酸洗污泥球团固结机理

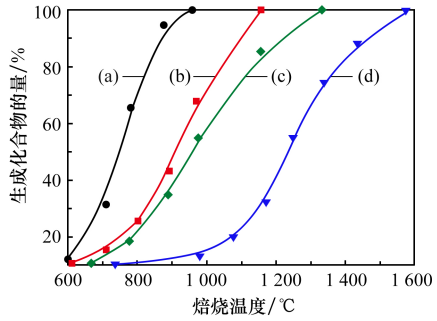
未添加酸洗污泥的基准球团和添加 4% 的酸洗污泥球团的光学显微结构分别如图 6(a)、(b)和图 6(c)、(d)所示。其中银白色部分为赤铁矿，少量的暗灰色部分为磁铁矿以及铁橄榄石和硅酸盐玻璃等渣相，氧化球团的固结机理主要为 Fe_2O_3 的长大、再结晶以及玻璃质、铁橄榄石等渣相黏结。对比图 6(a)和(c)可知，基准球团矿内部出现环缝[图 6(a)图中 Z 处]，而酸洗污泥的配入使这一情况得到改善，强度增大。经检测，添加 4% 的酸洗污泥后球团孔隙率降低，由基准的 22.56% 降低至 18.47%。

氧化球团抗压强度的宏观影响因素有物料组

表 5　焙烧球团主要化学成分(质量分数)

Table 5　Main chemical composition analysis of roasted pellets　　%

污泥配比	TFe	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	CaF_2	S	P
0	63.63	1.86	5.72	0.67	0.73	0.00	0.00	0.05	0.01
1	63.38	2.18	5.71	0.70	0.74	0.08	0.14	0.05	0.01
2	63.12	2.51	5.70	0.72	0.75	0.16	0.28	0.05	0.01
3	62.87	2.84	5.69	0.75	0.75	0.24	0.42	0.05	0.01
4	62.61	3.18	5.68	0.78	0.76	0.32	0.56	0.05	0.01
6	62.09	3.85	5.66	0.83	0.78	0.48	0.84	0.05	0.01
8	61.56	4.53	5.65	0.89	0.80	0.65	1.12	0.05	0.01



（a）$CaO \cdot Fe_2O_3$；（b）$2CaO \cdot SiO_2$；
（c）$MgO \cdot Fe_2O_3$；（d）$2MgO \cdot SiO_2$；

图 5 铁酸盐和硅酸盐的生成量与焙烧温度的关系[16]

Fig. 5 Ferrate and silicate production as a function of roasting temperature[16]

成和工艺制度，通过影响物料间的固结反应和球团的微观结构来对成品球团质量进行改善，其中固相反应程度影响较大。当球团固结类型相同时，则强度的大小取决于固相与空隙的分布以及固相本身的强度，即受微观抗压强度公式所决定[14]：

$$R = K \times d^{\alpha} \times \exp(-\varepsilon p)$$

式中：R 为抗压强度，N/P；ε 为空隙率，%；d 为晶粒半径，Å；K，α，p 为常数。

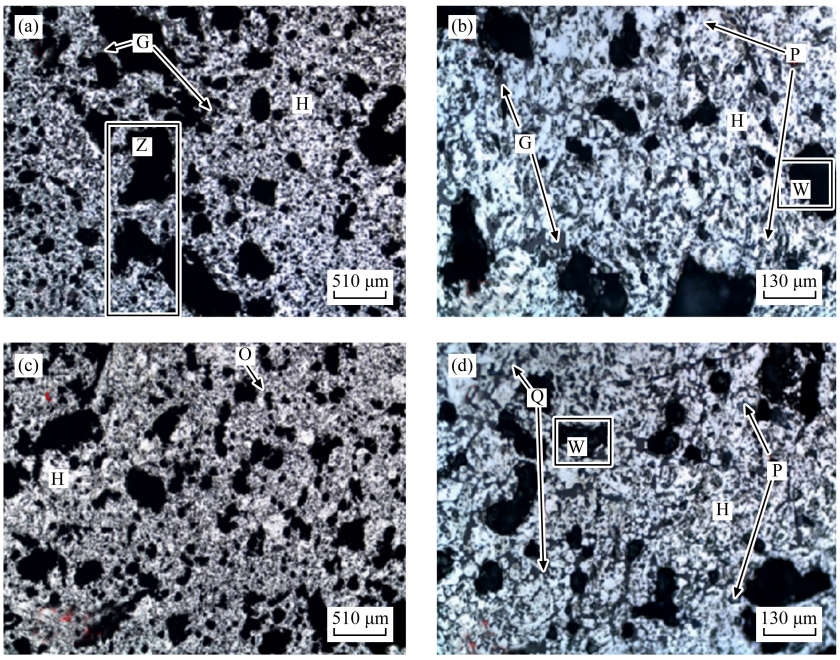
由于不锈钢酸洗污泥的粒度细，比表面能大，晶格缺陷严重，呈现活化状态，位移潜在趋势强烈，易向晶格内部扩散，导致球团矿紧密，空隙率下降，抗压强度增大，故掺有酸洗污泥的氧化球团抗压强度高于基准球团，且随着不锈钢酸洗污泥配比的增加，氧化球团抗压强度也随之增大。

3 结 论

（1）添加少量酸洗污泥可以显著改善生球落下强度和抗压强度。当污泥添加量由 0 提高至 4% 时，生球落下强度由 3.0 次/(0.5 m) 提高至 10.90 次/(0.5 m)，抗压强度由 11.01 N/P 提高至为 19.54 N/P。

（2）添加少量污泥可以改善预热球团和焙烧球团的抗压强度。随着酸洗污泥配比从 0 增加到 8%，预热球团的抗压强度从 507 N/P 上升到 1 416 N/P，焙烧 18 min 的焙烧球团抗压强度从 2 125 N/P 上升到 2 845 N/P，焙烧 21 min 的焙烧球团抗压强度从 2 223 N/P 上升到 3 264 N/P。

（3）基准球团矿和添加污泥球团矿的矿相组成都以赤铁矿为主，含有少量的磁铁矿以及硅酸盐等渣相。添加酸洗污泥后，球团孔隙率的降低



（a）基准球团(50 倍)；（b）基准球团(200 倍)；（c）4% 酸洗污泥球团(50 倍)；（d）4% 酸洗污泥球团(200 倍)
H—赤铁矿；G—玻璃质、铁橄榄石；P—磁铁矿；Q—钙铁橄榄石。

图 6 氧化球团显微结构

Fig. 6 Microscopic imaging of oxidized pellets

以及强化 Fe_2O_3 再结晶是焙烧球团抗压强度提高的主要原因。

参考文献：

[1] 王绍文．重金属废水治理技术[M]．北京：冶金工业出版社，1993.
WANG Shaowen. Heavy metal wastewater treatment technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.

[2] 张雪，高强，曹云霄，等．新固废法实施后我国地方固体废物管理进展与展望[J]．环境保护科学，2022，48(6)：4.
ZHANG Xue, GAO Qiang, CAO Yunxiao, et al. Progress and perspective of local solid waste management since the revised law on the prevention and control of environmental pollution by solid waste[J]. Environmental Protection Science, 2022, 48(6): 4.

[3] SU Peidong, ZHANG Junke, LI Yadong. Investigation of chemical associations and leaching behavior of heavy metals in sodium sulfide hydrate stabilized SSPS[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 123: 79 – 86.

[4] YUE Min, YUE Qinyan, QI Yuanfeng, et al. Preparation and properties of sewage sludge ceramic pellets[C]// IEEE. 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Chengdu: 2010: 1 – 5.

[5] ZHANG Junjie, ZHANG Xiaoyan, LIU Bo, et al. Phase evolution and properties of glass ceramic foams prepared by bottom ash, fly ash and pickling sludge[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(3): 563 – 573.

[6] 许香帅，赵峥，张延玲．不锈钢酸洗污泥与 AOD 渣协同制备硅酸盐水泥的研究[J]．炼钢，2022，38(5)：82 – 88.
XU Xiangshuai, ZHAO Zheng, ZHANG Yanling. Study on the synergistic preparation of portland cement with stainless steel pickling sludge and AOD slag[J]. Steelmaking, 2022, 38(5): 82 – 88.

[7] 施春红，周朔，左向萌，等．用水浸—分步沉淀法从不锈钢酸洗污泥中回收镍铁铬[J]．湿法冶金，2022，41(5)：419 – 426；432.
SHI Chunhong, ZHOU Shuo, ZUO Xiangmeng, et al. Recovery of nickel iron and chromium from stainless steel pickling sludge by water leaching-step precipitation[J]. Hydrometallurgy of China, 2022, 41(5): 419 – 426; 432.

[8] 张祎，宋强，舒新前．生物质还原—磁选不锈钢酸洗污泥[J]．过程工程学报，2019，19(6)：1111 – 1119.
ZHANG Yi, SONG Qiang, SHU Xinqian. Reduction-magnetic separation of stainless steel pickling sludge by biomass[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(6): 1111 – 1119.

[9] 李小明，王建立，吕明，等．不锈钢酸洗污泥用作炼钢造渣剂的试验[J]．钢铁，2019，54(3)：96 – 101.
LI Xiaoming, WANG Jianli, LÜ Ming, et al. Experiment on stainless steel pickling sludge used as steelmaking slagging flux[J]. Iron and Steel, 2019, 54(3): 96 – 101.

[10] 顾宝澍，彭程，王宁，等．不锈钢酸洗污泥的资源化处置现状及展望[J/OL]．钢铁研究学报，2024：1 – 15[2024 – 05 – 16]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001 – 0963.20230350.
GU Baoshu, PENG Cheng, WANG Ning, et al. Current status and prospect of resourceful disposal of stainless steel pickling sludge[J/OL]. Journal of Iron and Steel Research, 2024: 1 – 15[2024 – 05 – 16]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001 – 0963.20230350.

[11] 马叙叙，顾宝澍，宿珀诚等．利用高炉熔渣处理不锈钢酸洗污泥[J/OL]．钢铁，2024：1 – 10[2024 – 03 – 05]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan. issn0449 – 749x.20230616.
MA Xuxu, GU Baoshu, SU Pocheng et al. Treatment of stainless steel pickling sludge using blast furnace slag[J/OL]. Steel, 2024: 1 – 10[2024 – 03 – 05]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449 – 749x.20230616.

[12] 王曦，王云刚，朱学理，等．采用 RKEF 工艺处理不锈钢酸洗污泥工程案例[J]．清洗世界，2022，38(8)：54 – 57.
WANG Xi, WANG Yungang, ZHU Xueli, et al. Project case of stainless steel pickling sludge treatment by RKEF process[J]. Cleaning World, 2022, 38(8): 54 – 57.

[13] 温宝良，张晓萍，刘德楼，等．含硼磁铁矿对超细粒级磁铁矿球团性能的影响[J]．钢铁，2022，57(11)：33 – 41.
WEN Baoliang, ZHANG Xiaoping, LIU Delou, et al. Effect of boron-containingmagnetite on properties of ultrafine grained magnetite pellets[J]. Iron and Steel, 2022, 57(11): 33 – 41.

[14] 王介超．配加转炉污泥制备氧化球团的研究[D]．长沙：中南大学，2009：27 – 28.

WANG Jiechao. Investigation on preparing oxidized pellet with converter sludge [D]. Changsha: Central South University, 2009: 27 – 28.

[15] 傅菊英,姜涛,朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1996:38;130 – 135.
FU Juyin, JIANG Tao, ZHU Deqin. Sintering and Pelletizing[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996: 38; 130 – 135.

[16] 姜涛,范晓慧,李光辉. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2016:205 – 226.
JIANG Tao, FAN Xiaohui, LI Guanghui. Iron ore blocking [M]. Changsha: Central South University Press, 2016: 205 – 226.

[17] 温宝良,范子豪,李家新,等. 高硅超细铁精矿熔剂性球团矿固结行为及还原特性[J/OL]. 钢铁,2024:1 – 16[2024 – 03 – 13]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449 – 749x.20230559.
WEN Baoliang, FAN Zihao, LI Jiaxin et al. Solidification behaviour and reduction characteristics of high silica ultrafine iron ore concentrates with fusible pellets[J/OL]. Steel, 2024: 1 – 16[2024 – 03 – 13].

[18] 李小明,王翀,邢相栋,等. 不锈钢酸洗污泥对铁矿粉烧结液相生成的影响[J]. 烧结球团,2018,43(5):12 – 19.
LI Xiaoming, WANG Chong, XING Xiangdong, et al. Effect of stainless steel pickling sludge on sintered liquid phase generation of iron ore fines [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(5): 12 – 19.

[19] 王永斌,彭军,罗果萍,等. MgO、F、碱金属对球团矿相组织的影响[J]. 钢铁,2022,57(4):34 – 42.
WANG Yongbin, PENG Jun, LUO Guoping, et al. Influence of MgO, F and alkali metals on the phase organisation of pellet ores [J]. Iron and Steel, 2022, 57(4): 34 – 42.

[20] 刘竹林,蒋友源. 炼铁原料:第2版[M]. 北京:化学工业出版社,2013:159 – 170.
LIU Zhulin, JIANG Youyuan. Raw materials for ironmaking: 2nd edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 159 – 170.

[21] 潘建,马雯卓,朱德庆,等. Al_2O_3 对铁矿烧结球团及高炉冶炼的影响[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1095 – 1108.
PAN Jian, MA Wenzhuo, ZHU Deqing, et al. Effect of Al_2O_3 on iron ore sintering pellets and blast furnace smelting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1095 – 1108.

[22] 王振阳,邢相栋,张建良,等. 氧化铝对球团矿抗压强度的影响及其机理分析[C]//中国金属学会. 第九届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2013:382 – 387.
WANG Zhenyang, XING Xiangdong, ZHANG Jianliang, et al. The effect of alumina on the compressive strength of pellet ores and its mechanism analysis [C]//China Society for Metals. Proceedings of the Ninth Annual Conference of China Iron and Steel. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 382 – 387.

[23] 唐珏,储满生,欧聪,等. 钛、钒、铬对氧化球团三维显微矿相结构的影响[C]//中国金属学会. 第十二届中国钢铁年会论文集——1. 炼铁与原料. 北京:冶金工业出版社,2019:475 – 479.
TANG Jue, CU Mansheng, OU Cong, et al. Influence of titanium, vanadium and chromium on the three-dimensional micro-mineral phase structure of oxidised pellets[C]//Chinese Society for Metals. Proceedings of the 12th China Iron and Steel Annual Conference-1. Ironmaking and Raw Materials. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019: 475 – 479.

(上接第66页)

[10] 胡平,蒋赟. 软锰矿中频还原焙烧炉结构改进试验研究[J]. 管理及其他,2019(7):262 – 263;265.
HU Ping, JIANG Yun. Experimental study on structure improvement of pyrolusite medium frequency reduction roaster[J]. Management and Other, 2019(7): 262 – 263;265.

[11] 吕子虎,李成禄,赵登魁,等. 菱锰矿选冶技术研究现状[J]. 中国矿业,2023(7):105 – 111.
LÜ Zihu, LI Chenglu, ZHAO Dengkui, et al. Research status of dressing-metallurgy technology of rhodochrosite ore[J]. China Mining Magazine, 2023(7): 105 – 111.