节能环保与综合利用

含铁含碳冶金固体废物转底炉热还原协同处置

王啟胜[1]，张浩浩[2]，赵 波[1,3]，秦林波[1,3]，韩 军[1,3]
（1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 中冶南方都市环保工程技术股份有限公司，湖北 武汉 430000；3. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点试验室，湖北 武汉 430081）

摘要：针对转底炉处置冶金固体废物过程中金属化率低、脱锌率低、粉化率高等问题，本文通过优化原料结构配比，改善球团的成球特性及高温还原性能，采用固体废物粉尘物理性能分析试验和圆盘造球机成球试验，研究含铁含碳冶金固体废物球团的成球性能变化，并在高温还原炉中进行热还原试验，考察球团的金属化率、脱锌率及粉化率。结果表明，原料结构配比优化显著改善了球团的成球特性和高温还原性能。当黏结剂添加量为 6%，水添加量为 13% 时，生球性能最佳，其抗压强度、落下强度以及爆裂温度分别 4.6 N/P、3 次/(0.5 m) 和 442 ℃。在温度为 1 100 ~ 1 150 ℃，高温还原时间为 45 ~ 60 min 时，球团金属化率可达 88%，最佳脱锌率可达 96%，粉化率为 3%~5%。通过优化原料结构配比，可显著改善冶金固体废物球团的成球特性和高温还原性能，从而解决转底炉处置冶金固体废物的技术难题，为提高固体废物资源化利用提供技术支持。

关键词：含铁含碳；冶金固废；转底炉；球团；资源化处置
中图分类号：TF046.6；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2024)04 - 0093 - 08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.063

Synergistic treatment of iron and carbon containing metallurgical solid waste by rotary hearth furnace thermal reduction

WANG Qisheng[1], ZHANG Haohao[2], ZHAO Bo[1,3], QIN Linbo[1,3], HAN Jun[1,3]
(1. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. MCC Southern Urban Environmental Protection Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: In addressing the challenges of low metallization rate, low dezincification rate and high pulverization rate during the disposal of metallurgical solid waste in converter furnaces, this paper aims to improve the pelletizing characteristics and high-temperature reducibility of pellets by optimizing the composition and structure of the raw materials. Physical property analysis experiments on solid waste dust, along with pelletizing experiments using a disc pelletizer, were conducted to investigate the changes in the pelletizing performance of iron and carbon-containing metallurgical solid waste pellets. Additionally, thermal reduction experiments were performed in a high-temperature reduction furnace to examine the pellets' metallization rate, dezincification rate, and pulverization rate. The findings reveal that optimizing the raw material composition significantly enhances the pelletizing characteristics and high-temperature reducibility of the pellets. Optimal green ball properties were achieved with a binder addition of 6% and water addition of 13%, resulting in a compressive strength of 4.6 N/P, drop strength of 3 times/(0.5 m), and a burst temperature of 442 ℃. Under thermal reduction conditions ranging from 1 100 to 1 150 ℃ and a reduction time of 45 to 60 minutes, the pellets attained a metallization rate

收稿日期：2023 - 07 - 21；**修回日期**：2023 - 10 - 08
基金项目：湖北省重点研发计划资助项目(2021BCA131，2022BCA085，2023BCB106)
作者简介：王啟胜(1999—)，男，硕士研究生，从事转底炉直接还原工艺研究。
通信作者：赵 波(1987—)，男，副教授，从事固体废弃物处理与工业烟气污染物治理研究。

of up to 88%, an optimal dezincification rate of up to 96%, and a pulverization rate of 3% to 5%. By refining the raw material structure, the pelletizing characteristics and high-temperature reducibility of metallurgical solid waste pellets can be significantly improved. This approach addresses technical challenges associated with the converter furnace disposal of metallurgical solid waste and provides critical technical support for enhancing the resource utilization of solid waste.

Key words: metallurgical solid waste; containing iron and containing carbon; rotary hearth furnace; pellet; resourceful disposal

2022年，我国钢铁产量达10.18亿t，位居全球第一。钢铁冶炼过程中会产生多种含有Fe、Ca、C、Zn、Pb等有价成分的冶金固体废物[1]。其中，含铁含锌粉尘是产量最多、成分最复杂的冶金固体废物之一，约占钢产量的10%[2-4]。

目前冶金固体废物处置工艺主要包括：物理法、湿法和火法等。其中，将物理法和火法结合使用的转底炉直接还原工艺具有投资少、操作简便、生产成本低等优点，且能够充分利用钢铁企业生产出的不同类型固体废物，如高炉瓦斯灰、干熄焦除尘灰、炼钢灰等[5-7]。《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》鼓励钢铁企业采用该工艺，以构建废物循环利用体系，建设资源循环型社会[8]。

转底炉工艺能高效无害化处置冶金固体废物，生产金属化球团，实现有价元素Fe和Zn的回收利用[9]。已有研究发现球团金属化率与$n(C)/n(O)$和反应温度成正比[10-11]。粉化率则与孔隙率和内配还原剂易挥发成分比例呈负相关，这与球团在还原升温阶段，其内部产生的应力是否能被孔洞吸收有关[12]。但是上述研究中，转底炉直接还原球团均存在金属化率低，脱锌率低，粉化率高等问题。

基于此，本文拟采用含铁含碳冶金固废优化配料，以提高粉尘原料成球特性，提高生球强度，提高冶金固废中铁的回收效率和锌的脱除效率。从球团质量可靠性、资源利用高效性方面出发，寻求一种经济性且保证球团性能的造球方法，优化转底炉造球和还原工艺，为转底炉处理含铁尘泥工艺的改进和创新提供理论基础。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用冶金固废来源于武汉某钢厂，主要包括高炉瓦斯灰和干熄焦除尘灰(CDQ粉)，其主要化学成分和粒度组成分别如表1与表2所示。由表1可知，高炉瓦斯灰全铁含量高，可充分利用其含铁有价成分实现资源再生利用。CDQ粉碳质量分数高达58.4%，可与其他粉尘混合做内配还原剂，实现铁的还原和锌的脱除。粒度分布决定了粉尘颗粒的表面积和形态，从而直接影响含铁粉尘的成球性能及球团质量。由表2可知，大部分高炉瓦斯灰和CDQ粉的颗粒粒径集中在0.075 mm至0.177 mm的范围内，其质量百分比分别为79.61%和87.16%。这表明两种粉尘颗粒均细小且分布集中，具备优良的造球原料特性。

研究表明，为得到符合后续冶炼强度要求的球团，C/O应控制在0.9~2.0[13-14]，碱度控制在0.6~1.4[15]。综合考虑C/O和碱度对还原后强度和金属化率的影响，选择高炉瓦斯灰与CDQ粉4∶1混合造球，混合后原料成分见表3。此配比下混合原料中C与可还原O的比例为1.54，碱度为0.63。

表1 冶金固废主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of metallurgical solid waste raw materials %

原料名称	TFe	CaO	SiO_2	C	ZnO	S
高炉瓦斯灰	47.50	6.77	8.87	11.40	2.30	0.19
CDQ粉	3.79	6.38	7.64	58.40	0.58	1.58

表2 冶金固废粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size analysis of metallurgical solid waste %

原料名称	<0.075 mm	[0.075,0.109) mm	[0.109,0.125) mm	[0.125,0.177) mm	≥0.177 mm
高炉瓦斯灰	0.80	21.79	23.71	34.11	19.59
CDQ粉	3.19	11.55	37.30	38.31	9.65

表 3　混合原料主要化学成分(质量分数)

Table 3　Main chemical compositions of mixed pelletizing raw material　　%

Fe_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	K_2O	ZnO	S	C
18.20	31.49	6.51	10.32	1.35	4.60	0.50	2.88	0.45	20.00

1.2　试验方法

1.2.1　成球性能测试

引入成球性指数(K)对粉尘的成球性能进行评价：

$$K=\frac{W_{分}}{W_{毛}-W_{分}} \tag{1}$$

式中：$W_{分}$ 为粉尘最大分子水含量,%；$W_{毛}$ 为粉尘最大毛细水含量,%。

两种粉尘的各项物性参数见表 4。当 $K>0.8$ 时即代表该原料成球性良好[16]。由表 4 可知，试验所用造球原料均具备优良的成球性能。

1.2.2　造球试验

将高炉瓦斯灰、CDQ 粉和膨润土按比例称重，混匀后放入圆盘造球机中开始造球。造好的生球经过人工筛分，将 10.0 ~ 12.5 mm 的生球作为合格生球，测试生球抗压强度、落下强度、生球水分和爆裂温度等性能。

1.2.3　还原试验

在立式碳化硅电阻炉内开展高温还原试验，设置升温程序：当室温约为 600 ℃时，升温速率为 10 ℃/min；600 ℃至预定温度时，升温速率为 5 ℃/min。到达预定温度后，通过吊篮将适宜粒径的干球团放入炉膛中央，试验过程中通 N_2 作保护气体，流量设定为 1 L/min。到达反应时间后取出吊篮，再迅速放置到石墨坩埚中密封冷却，冷却取出球团进行物理性能和还原后性能分析。

生球性能包含落下强度、抗压强度、爆裂温度，测试方法借鉴柳明旭[17]所用的方法。金属化率采用三氯化钛还原重铬酸钾滴定法(GB/T 6730.65—2009)和三氯化铁分解重铬酸钾滴定法(GB/T 38812.2—2020)测量。脱锌率采用火焰原子吸收分光光度法(HJ 786—2016)测量。粉化率按照低温还原粉化率的测定动态试验法(GB/T 24204—2009)测量。

2　试验结果与讨论

2.1　黏结剂含量对球团强度的影响

黏结剂含量对生球强度的影响结果见图 1。由图 1 可知，随着膨润土添加量增大，生球抗压强度和落下强度提高，爆裂温度降低。在黏结剂添加质量分数为 6% 时，生球抗压强度、落下强度以及爆裂温度分别为 4.6 N/P、3 次/(0.5 m)和 442 ℃，达到转底炉直接还原工艺对生球团的强度要求[抗压强度≥4 N/P,落下强度≥3 次/(0.5 m)，爆裂温度≤600 ℃][17]。膨润土吸水后产生膨胀，降低了生球孔隙率，增加了颗粒间的毛细力和黏滞力[18-19]。同时，膨润土在造球过程中形成黏结桥，将尘泥颗粒紧密黏结在一起，提高了生球的抗压强度。吸水形成的黏结桥具有塑性，提高了生球的落下强度。

生球水分蒸发过程中，球团的内压力可由波伊索尔斯定理计算：

$$P=\frac{K\eta}{g}V\rho^2S^2\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}R \tag{2}$$

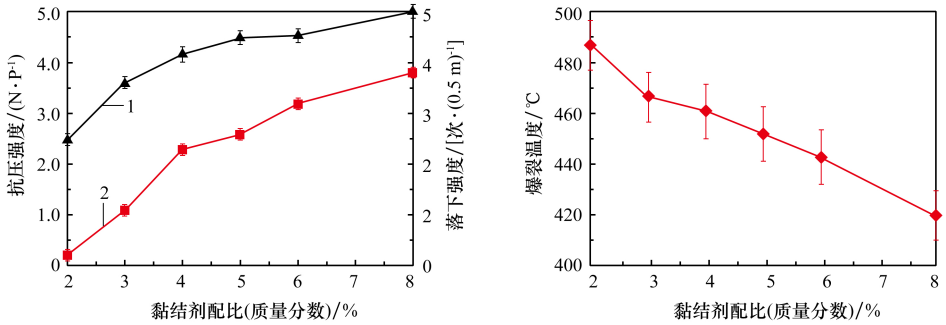
式中：P 为含铁尘泥生球干燥过程中的内压力，Pa；K 为科泽恩常数，无量纲；η 为水的黏度，Pa·s；g 为重力加速度，m/s^2；V 为脱水速度，m^3/s；ρ 为原料密度，kg/m^3；S 为比表面，m^2/g；ε 为气孔率，无量纲；R 为球团半径，cm。

在含铁尘泥生球干燥过程中，表面水分被蒸发，然后内部水分在毛细力的作用下逐渐向表面扩散。当水分扩散过快时，内压力急剧增大，若

表 4　造球原料物理性能

Table 4　Physical properties of raw materials for pelleting

原料名称	真密度/($g\cdot cm^{-3}$)	堆密度/($g\cdot cm^{-3}$)	孔隙率/%	毛细水/%	分子水/%	K
高炉瓦斯灰	3.11	1.16	62.57	29.33	16.26	1.24
CDQ 粉	2.16	0.94	56.77	27.05	15.00	1.24



1—抗压强度；2—下落强度。

图 1 黏结剂配比与生球强度变化关系

Fig. 1 Relationship between binder content and green pellet strength

超过球团的抗压强度，就会导致爆裂。内压力随气孔率的增大而减小，而膨润土的添加有效地减小了球团内部气孔率，所以爆裂温度随膨润土含量增加而逐渐降低。

2.2 配水量对球团强度的影响

配水量对生球强度的影响结果如图 2 所示。由图 2 可知，配水量与抗压强度、落下强度成正相关，与爆裂温度成负相关。在配水量达到 13% 时，抗压强度、落下强度以及爆裂温度分别为 4 N/P、3 次/(0.5 m) 和 465 ℃，均处于适宜区间。水分的黏性作用使原料粉尘结合在一起，增加了球团内部黏附力。同时，水的添加使膨润土膨胀程度增加，降低了球团孔隙率，提高了球团塑性。因此，球团能更好地承受外部冲击而不变形，从而提高了抗压强度和落下强度[20]。而热爆裂温度随着生球水分含量增加而加速降低，即在高温状态下水分转变为水蒸气急剧挥发而突破球团压力承受上限使生球破裂。

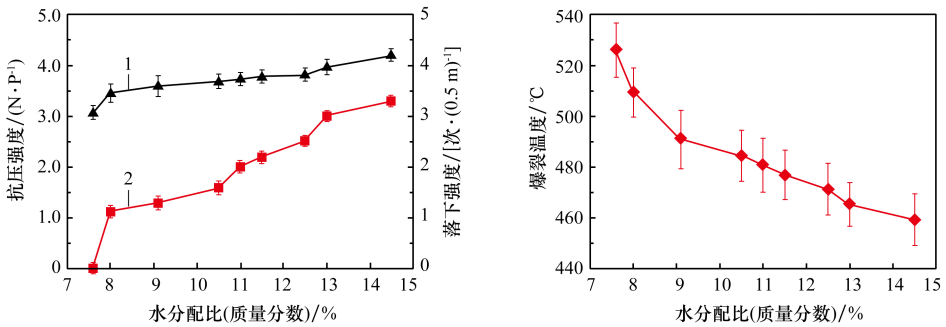
综上所述，为了满足实际生产要求，对于该原料，选择黏结剂配加质量分数为 6%，配水量为 13% 混合料进行造球。

2.3 高温还原后球团特性

2.3.1 反应温度与反应时间对金属化率的影响

不同温度下金属化率随反应时间的变化关系如图 3 所示。由图 3 可知，球团金属化率随反应温度的升高而升高，对于相同的还原温度，球团金属化率随反应时间的增加而升高。当还原温度高于 1 050 ℃时，球团的金属化率从 30 min 的 63% 迅速提高到 45 min 的 85%，60 ~ 90 min 则维持在 87% ~ 88%。当反应温度为 1 100 ~ 1 150℃时，金属化率随反应时间增加的增幅较小，保持在 86% ~ 89%。当还原温度高于 1 200 ℃时，球团的金属化率高于 90%，但是在长时间反应下会略微降低。在高温热还原过程中，铁和锌的氧化物可能发生的反应见表 5。

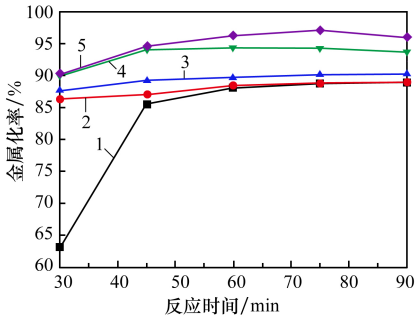
铁氧化物的还原反应都需要吸收热量，提高反应温度有利于复合型球团中内配碳的气化反应($C + CO_2 = 2CO$)进行，加速还原反应，提高金属



1—抗压强度；2—下落强度。

图 2 配水量与生球强度变化关系

Fig. 2 Relationship between water content and green pellet strength



温度/℃：1—1 050；2—1 100；3—1 150；4—1 200；5—1 250。

图 3　不同温度下金属化率随反应时间的变化关系

Fig. 3　Relationship between metallization rate and reaction time under different temperature

表 5　高温还原过程化学反应方程式

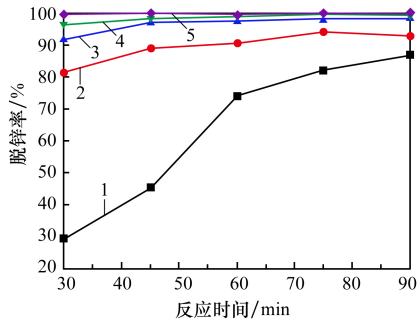
Table 5　Chemical reaction equations for high temperature reduction processes

反应类型	化学方程式	$\Delta G_r^\theta/(J\cdot mol^{-1})$
直接还原	$3Fe_2O_3 + C = 2Fe_3O_4 + CO$	$120\ 000 - 218.46T$
	$Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO$	$207\ 510 - 217.62T$
	$FeO + C = Fe + CO$	$158\ 970 - 160.25T$
	$ZnO + C = Zn + CO$	$348\ 480 - 286.1T$
间接还原	$3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2$	$-521\ 30 - 41T$
	$Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2$	$353\ 80 - 40.16T$
	$FeO + CO = Fe + CO_2$	$-131\ 60 - 17.21T$
	$ZnO + CO = Zn + CO_2$	$178\ 020 - 111.67T$
碳的气化	$C + CO_2 = 2CO$	$162\ 600 - 167.62T$

化率[21]。且反应温度升高，还原性气氛程度更佳，反应速率提高，不同粒度的直接还原球团金属化率均提高。但是在低温段时，由于反应时间短，会造成反应不彻底，金属化率低；而在高温段时，反应时间过长则会造成球团过烧，反应后球团品质下降，一定程度上也造成了球团金属化率降低[10,22]。

2.3.2　反应温度与反应时间对脱锌率的影响

不同温度下脱锌率随反应时间的变化关系如图 4 所示。由图 4 可知，球团的脱锌率整体随温度的升高而升高，相同温度下，随反应时间的增加而增加。当温度为 1 050 ℃时，脱锌率从 30 min 的 30%上升至 60 min 的 75%；在 1 100 ℃和 1 150 ℃时，脱锌率随温度变化不大，但均高于 80%；当温度高于 1 200 ℃时，脱锌率保持在 95%~98%。锌氧化物的直接还原是吸热反应，因而随着温度的升高，反应速率增加。且锌的沸点较低，为 907 ℃，在高温下会迅速挥发，有利于氧化锌的还原。



温度/℃：1—1 050；2—1 100；3—1 150；4—1 200；5—1 250。

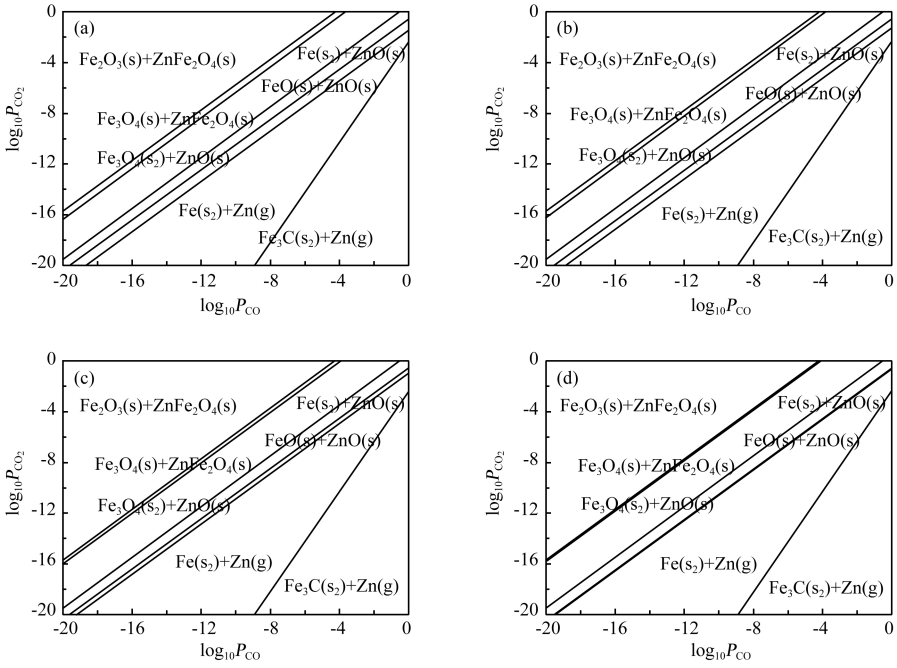
图 4　不同温度下脱锌率随反应时间的变化关系

Fig. 4　Relationship between dezincification rate and reaction time under different temperature

为了验证锌元素在球团高温还原阶段的脱除顺序，使用热力学软件模拟锌的还原步骤，结果如图 5 所示。由图 5 可知，锌氧化物按 $ZnFe_2O_4 \rightarrow ZnO \rightarrow Zn$ 的顺序逐级还原。在 907 ℃时，Zn 达到沸点开始挥发。热力学计算表明，ZnO 可以还原为 Zn 的最低温度为 945 ℃，高于 Zn 的沸点[23]。因此，ZnO 被还原为 Zn 后，Zn 会迅速气化挥发，有利于含铁含锌粉尘组成的复合型球团中锌的脱除和回收。温度越高，Zn 在反应过程中对 CO 类的还原性气体的需求越弱[24]；ZnO 直接还原和碳气化反应是强吸热反应，温度升高有利于 ZnO 还原，降低 $ZnFe_2O_4$ 和 ZnO 还原反应的活化能[23]，两种原因共同导致 Zn 在还原过程中对高温的依赖。

2.3.3　反应温度与时间对粉化率的影响

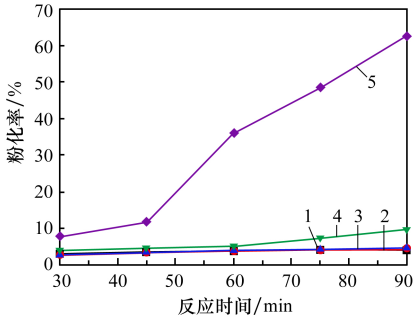
不同温度下粉化率随反应时间的变化关系如图 6 所示。由图 6 可知，粉化率整体随温度的升高而升高，同温度下随反应时间的增加而增加。当温度低于 1 150 ℃，反应时间在 30 ~ 90 min 时，粉化率保持在 3%~5%。当温度为 1 200 ℃时，粉化率由 60 min 的 5% 上升至 90 min 的 10%；而当温度为 1 250 ℃时，粉化率则由 45 min 的 10% 突增至 90 min 的 65%。



温度/℃：（a）1 050；（b）1 100；（c）1 150；（d）1 200

图 5 Zn – Fe – C – O 体系还原优势图

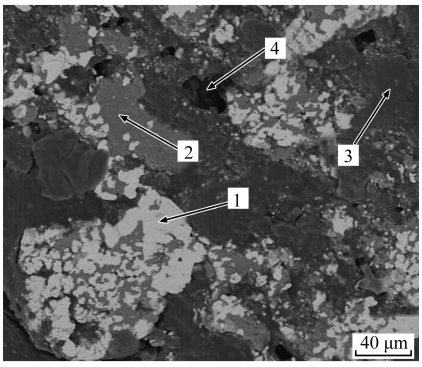
Fig. 5 Reduction advantage diagram of Zn – Fe – C – O system



温度/℃：（a）1 050；（b）1 100；
（c）1 150；（d）1 200

图 6 不同温度下粉化率随反应时间的变化关系

Fig. 6 Relationship between pulverization rate and reaction time under different temperature



1—金属铁；2—铁酸钙；3—残碳；4—孔洞。

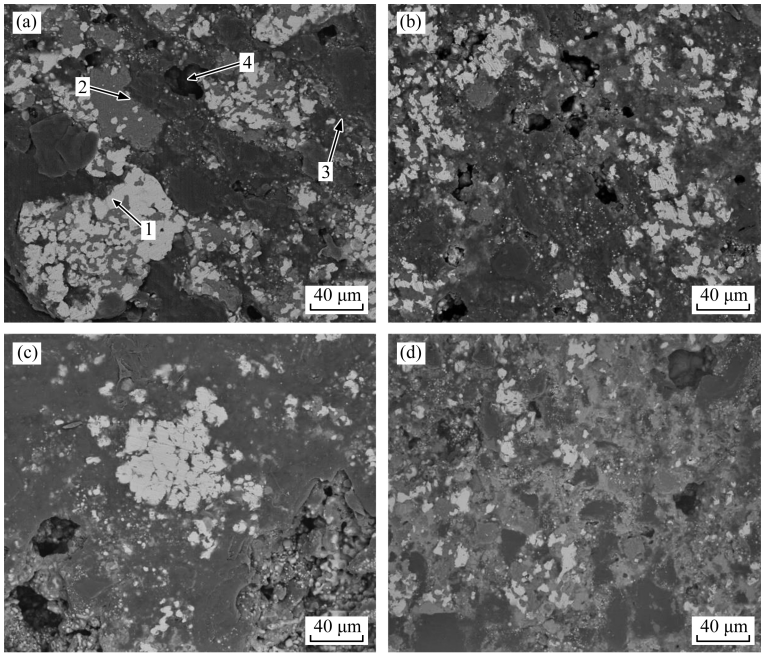
图 7 球团金属化外壳扫描电镜

Fig. 7 Scanning electron microscope energy spectra of metallized shells of pellets

为了探究球团粉化内在机理，取部分还原后球团进行金相结构分析，结果如图 7 所示。由图 7 可知，在此反应温度和时间中，球团外层金相中金属铁最多，铁酸钙和残碳次之，还伴随部分孔洞。

为了观察其微观形貌随反应时间的变化规律，选取反应温度为 1 150 ℃，不同反应时间的 4 组球团进行微观分析，结果如图 8 所示。由图 8 可知，在相同温度下，随反应时间增加，球团边缘金属化外壳变薄，在显微结构下观察到的白色亮点减少，灰点和孔洞增多。当反应时间为 30 min 时，金属铁与板状铁酸钙较多，相互间紧密交织，具有较高的强度，不易粉化[图 8(a)]。在反应时间达到 60 min 时，金属铁与铁酸钙含量减少，孔洞增多，球团金属化外壳开始收缩出现裂缝[图 8(b)]。反应时间继续增加，孔洞的比例超过金属铁和铁酸钙，且铁酸钙不再密集分布，导致球团质量下降，粉化率增加[图 8(c)，图 8(d)]。

SEM 表征结果表明，球团表面在炉内反应过程中固结出的金属面层在高温状态下继续长时间反应造成过烧，球团内部裂纹和孔洞逐渐增加，



1—金属铁；2—铁酸钙；3—残碳；4—孔洞。

反应时间/min：（a）30；（b）60；（c）75；（d）90

图 8　金属化外壳在光学显微镜下的形貌特征

Fig. 8　Morphological characteristics of metalized shell under optical microscope

粉末逐渐脱落，导致反应时间越长，粉化程度越高。

综上所述，可知转底炉直接还原工艺最适合的还原温度为 1 100 ~ 1 150 ℃，最合适的高温还原时间为 30 ~ 90 min，以达到实际生产中期望的高金属化率、高脱锌率和低粉化率。

3　结　论

（1）在黏结剂添加量为 6%，水添加量为 13%时，生球的抗压强度、落下强度以及爆裂温度分别为 4.6 N/P、3 次/(0.5 m)和 442 ℃，处于较为合适的区间，且符合转底炉直接还原工艺对生球团的强度要求。

（2）在温度处于 1 100 ~ 1 150 ℃时，反应时间在 30 ~ 90 min 时，金属化率可以保持在 86% ~ 88%，最佳脱锌率可以达到 96%，粉化率始终保持在 3% ~ 5%。能达到较高的转底炉直接还原工艺水平。在此区间内为满足实际生产的需求，可选择反应为温度 1 100 ~ 1 150 ℃，反应为 45 ~ 60 min。

参考文献：

[1]　张高鹏. 转底炉工艺处理转炉炼钢粉尘的相关基础研究[D]. 重庆：重庆大学，2020.
ZHANG Gaopeng. Fundamental study on the treatment of converter steelmaking dust by rotary hearth furnace process. Chongqing：Chongqing University，2020.

[2]　李正义，陈飚. 钢铁企业含铁污泥的综合利用技术与效益[J]. 中国资源综合利用，2004，22(1)：23 - 24.
LI Zhengyi，CHEN Biao. The technotogy and benefit of comprehensiv utilization of sludge containing iron from ironworks[J]. China Resources Comprehensive Utilization，2004，22(1)：23 - 24.

[3]　陈砚雄，冯万静. 钢铁企业粉尘的综合处理与利用[J]. 烧结球团，2005，30(5)：42 - 46.
CHEN Yanxiong，FENG Wanjing. On the centralized treatment and comprehensive utilization of metallurgical dust[J]. Sintering and Pelletizing，2005，30(5)：42 - 46.

[4]　刘百臣，魏国，沈峰满，等. 钢铁厂尘泥资源化管理与利用[J]. 材料与冶金学报，2006，5(3)：231 - 233.
LIU Baichen，WEI Guo，SHEN Fengman，et al. Comprehensive utilization and management of dust and sludge as resource in iron and steel plants[J]. Journal of Materials and Metallurgy，2006，5(3)：231 - 233.

[5]　曹克，胡利光. 水力旋流分离技术在瓦斯泥脱锌工程中的应用与研究[J]. 宝钢技术，2006(5)：16 - 19.

CAO Ke, HU Liguang. Application and research on hydrocyclone separation technology in the process of zinc removal from BF sludge[J]. Baosteel Technology, 2006(5):16 – 19.

[6] 王彩虹,杨云虎,秦彩霞. 酒钢冶炼工序除尘灰高效利用研究[J]. 矿冶工程,2015,35(3):103 – 105.
WANG Caihong, YANG Yunhu, QIN Caixia. Efficient utilization of dust from smelting processes in JISCO[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015, 35(3): 103 – 105.

[7] 佘雪峰,薛庆国,王静松,等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用及相关处理工艺比较[J]. 炼铁,2010,29(4):56 – 62.
SHE Xuefeng, XUE Qingguo, WANG Jingsong, et al. Comparison of comprehensive utilization and related treatment processes of zinc-containing dust in steel plants[J]. Ironmaking,2010,29(4):56 – 62.

[8] 张金元,程欣,宋腾飞,等. 我国钢铁行业发展状况分析及趋势预测[J]. 冶金经济与管理,2021(4):19 – 20.
ZHANG Jinyuan, CHENG Xin, SONG Tengfei, et al. Analysis and forecast of the development of China's iron and steel industry[J]. Metallurgical Economy and Management,2021(4):19 – 20.

[9] 胡俊鸽,杜续恩,周文涛. 工业化转底炉炼铁技术的现状及评述[J]. 烧结球团,2013,38(1):36 – 41.
HU Junge, DU Xuen, ZHOU Wentao. Present situation of industrialized RHF technology and its review[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(1):36 – 41.

[10] 张旭,张建良,郭豪,等. 铁碳复合球团直接还原试验研究[J]. 矿冶工程,2009,29(2):55 – 58.
ZHANG Xu, ZHANG Jianliang, GUO Hao, et al. Experimental investigation of direct reduction of iron-carbon composite pellet[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2009,29(2):55 – 58.

[11] 张旭,张建良,郭豪,等. 含碳球团生产工艺参数优化及固结机理研究[J]. 过程工程学报,2009,9(S1):25 – 30.
ZHANG Xu, ZHANG Jianliang, GUO Hao, et al. Experimental study on optimization of technological parameters and agglomeration mechanism of carbon-containing pellets[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2009,9(S1):25 – 30.

[12] 郭培民,庞建明,赵沛,等. 氢气还原1 ~ 3 mm铁矿粉的动力学研究[J]. 钢铁,2010,45(1):19 – 23.
GUO Peimin, PANG Jianming, ZHAO Pei, et al. Reduction kinetics of 1 ~ 3 mm ore fines with H_2[J]. Iron & Steel,2010,45(1):19 – 23.

[13] 彭亚环,苗壮,林培芳,等. 转底炉直接还原含锌尘泥的工艺参数优化[J]. 河北冶金,2022(1):14 – 21.
PENG Yahuan, MIAO Zhuang, LIN Peifang, et al. Optimization of process parameters for direct reduction of zinc containing dust and mud in rotary hearth furnace[J]. Hebei Metallurgy,2022(1):14 – 21.

[14] CHENG X L, ZHAO K, QI Y H, et al. Direct reduction experiment on iron-bearing waste slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2013,20(3):24 – 29.

[15] 潘向阳,龙跃,徐晨光,等. 碱度及焙烧温度对球团矿抗压强度影响的研究[J]. 钢铁钒钛,2017,38(3):88 – 93.
PAN Xiangyang, LONG Yue, XU Chenguang, et al. Study on the influence of basicity and roasting temperature on the strength of the pellets[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2017,38(3):88 – 93.

[16] 严照照. 邯钢球团矿质量优化研究[D]. 唐山:华北理工大学,2018.
YAN Zhaozhao. Study on pellet quality optimization of hansteel[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2018.

[17] 柳明旭. 碱性球团的落下强度与抗压强度的试验研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.
LIU Mingxu. Experimental study on the falling strength and compressive strength of alkaline pellets[D]. Shenyang: Northeastern University,2019.

[18] 孙智博,李菲,阎峰云. 黏结剂对碳硅复合球团强度的影响[J]. 有色金属工程,2022,12(7):18 – 25.
SUN Zhibo, LI Fei, YAN Fengyun. The effect of binder on the strength of carbon-silicon composite agglomerate[J]. Nonferrous Metals Engineering,2022,12(7):18 – 25.

[19] 李俊翰,孙宁,吴玫. 钒钛磁铁矿尾矿含碳球团强度性能研究[J]. 钢铁钒钛,2019,40(6):90 – 95.
LI Junhan, SUN Ning, WU Mei. Research on strength properties of vanadium-titanium magnetite tailings pellets with carbon-containing[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2019,40(6):90 – 95.

[20] TABAKAEV R, KAHN V, DUBININ Y, et al. High-strength fuel pellets made of flour milling and coal slack wastes[J]. Energy,2022,243:123071.

(下转第113页)

Properties and microstructure of steel slag powder-fly ash based geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(12):4044 – 4051.

[8] 邓永锋,赵余,刘倩雯,等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报,2018,31(11):11 – 20.
DENG Yongfeng, ZHAO Yu, LIU Qianwen, et al. Na_2SiO_4-and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization[J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(11):11 – 20.

[9] GUO X L,XIONG G Y. Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials,2021,269:121326.

[10] HUO B B,LI B L,CHEN C,et al. Surface etching and early age hydration mechanisms of steel slag powder with formic acid[J]. Construction and Building Materials,2021,280:122500.

[11] 刘建平,陈林,宇文超,等. 超声波增强炼钢渣中钙的浸出用于 CO_2 矿物封存[J]. 钢铁钒钛,2022,43(1):91 – 98.
LIU Jianping, CHEN Lin, YUWEN Chao, et al. Enhancement of leaching of Ca from steelmaking slag by ultrasonic for CO_2 mineral sequestration[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2022,43(1):91 – 98.

[12] CHEN J, FU C K, MAO T Y, et al. Study on the accelerated carbonation of MSWI fly ash under ultrasonic excitation: CO_2 capture, heavy metals solidification, mechanism and geochemical modelling[J]. Chemical Engineering Journal,2022,450:138418.

[13] 欧阳嵩. 水力空化效应对水泥性能的影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
OUYANG Song. Study on the influence of hydraulic cavitation effect on cement properties[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2018.

[14] MARTINOVIC S, VLAHOVIC M, BOLJANAC T, et al. Cavitation resistance of refractory concrete: Influence of sintering temperature[J]. Journal of the European Ceramic Society,2013,33(1):7 – 14.

[15] BENTZ D P,JENSEN O M,COATS A M,et al. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials I. Experimental and computer modeling studies on cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(6):953 – 962.

[16] PAPADAKIS V G. Effect of fly ash on Portland cement systems Part I. Low-calcium fly ash[J]. Cement and Concrete Research,1999,29(11):1727 – 1736.

(上接第 100 页)

[21] HUANG Z C, ZHONG R H, YI L Y, et al. Reduction enhancement mechanisms of a low-grade iron ore-coal composite by NaCl[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2018,49(1):411 – 422.

[22] 经文波,陈文亮. 提高低品位铁矿球团直接还原金属化率研究[J]. 江西冶金,2016,36(3):1 – 4.
JING Wenbo,CHEN Wenliang. Study on improving direct reduction metallization rate of low-grade iron ore pellet[J]. Jiangxi Metallurgy,2016,36(3):1 – 4.

[23] 陈子罗,张建良,刘征建,等. 含锌粉尘团块脱锌行为研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(7):1704 – 1711.
CHEN Ziluo, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Research on dezincification of zinc-bearing dusts composite briquettes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(7): 1704 – 1711.

[24] CHUN T J,ZHU D Q. New process of pellets-metallized sintering process (PMSP) to treat zinc-bearing dust from iron and steel company[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2015,46(1):1 – 4.