用煤泥作还原剂制备褐铁矿含碳球团

陈伟鹏,李光卫,赵增武,李保卫,武文斐
(内蒙古科技大学 能源与环境学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 为确定低品位褐铁矿制备含碳球团的最佳工艺参数,以煤泥为还原剂,湿球落下强度和干球抗压强度为评价指标,探索了煤泥添加量、原矿粒度、水用量、成球压力、膨润土用量对含碳球团强度的影响。结果表明:球团强度因煤泥种类不同而有一定差异,在煤泥B加入量为25%,原矿粒度 -0.074 mm 含量占76%、水用量为4%、成球压力为10 MPa、膨润土用量为4%条件下,可以获得湿球落下强度7.3次/P,干球抗压强度197.6N/P的冷固结含碳球团。煤泥的高灰分、高黏性有利于提高冷固结球团强度且利用废弃物煤泥作为还原剂再利用,可减少污染,提高经济效益。

关键词: 冷固结含碳球团;煤泥;褐铁矿;强度
中图分类号: TF046.4;TF09 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2016)05-0038-05
doi: 10.13403/j.sjqt.2016.05.062

Preparation of carbon-containing pellets made from limonite using coal slime as reducing agent

Chen Weipeng, Li Guangwei, Zhao Zengwu, Li Baowei, Wu Wenfei
(*College of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia*)

Abstract In order to work out the optimum parameters of carbon-containing pellets made from low-grade limonite, with the coal slime as the reducing agent, and with the drop strength of wet balls and compressive strength of dry ball as evaluating criteria, effects of dosage of coal slime, particle size of raw ores, water requirement, pellet pressure and bentonite consumption on strength of carbon-containing pellets are explored. The results show that the pellet strength is somewhat different due to different kind of coal slime, cold bonded carbon-containing pellets with drop strength of wet ball as 7.3 times/P and compressive strength of dry ball as 197.6 N/P can be obtained under the conditions of coal slime B addition 25%, particle size of -0.074 mm raw ores accounting for 76%, water requirement 4%, pellet pressure 10 MPa and bentonite consumption 4%. High ash content and high viscosity of coal slime are favorable for improving the strength of cold bonded pellets, and the recycling of waste coal slime as reductant can reduce pollution of environment and improve economic efficiency.

Key words cold bonded carbon-containing pellet; coal slime; limonite; strength

1 前 言

内蒙古包头地区褐铁矿资源较多,但铁矿石含铁品位较低,其密度和磁性均不及磁铁矿、赤铁矿、镜铁矿等铁矿物,而且磨矿过程中易泥化,选别指标较差,与共生的脉石分离困难[1,2],采用传统的物理选矿方法很难将铁精矿品位提高到60%[3]。而将矿粉破碎成一定粒度后直接进行还原焙烧,存在还原反应速度慢、不均匀、易氧化等问题[4],大大降低了其还原效果。近年来,冷固结含碳球团因其具有还原速率大、自还原及抗氧化能力强等特点[5,6],在直接还原工

收稿日期: 2016-08-12
基金项目: 内蒙古自治区创新团队计划资助项目(NMGIRT1406);内蒙古自治区应用技术研究与开发资金资助项目(20130310)
作者简介: 陈伟鹏(1974-),男,副教授,硕士,主要从事直接还原和高效洁净燃烧研究。

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

艺中得到较好的应用[7~10]，因此，能否生产强度合格的铁矿含碳球团对于褐铁矿的工业化应用有着重要意义。

环保和可持续发展要求煤炭洁净利用，煤炭洗选是洁净煤最重要的手段之一，煤泥是洗选过程的一种废弃物，其一般具有高灰分、黏度大、持水性强等特点，加上热值相对较低，严重影响煤泥的工业利用价值。但由于煤泥黏土类矿物较多，自身黏度大，对于生产直接还原的冷固结含碳球团是一种较好的原料。本文选取三种具有一定热值的煤泥作为褐铁矿的还原剂，用于制备褐铁矿含碳球团，研究了褐铁矿冷固结含碳球团湿球落下强度和干球抗压强度的影响因素，以期为煤泥的废物利用提供新方法，为褐铁矿煤泥球团的直接还原工业化应用提供理论基础。

2　实　验

2.1　实验原料

实验所用铁矿试样为包头地区褐铁矿原矿粉，其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，其 TFe 品位为 34.6%，属于低品位褐铁矿，原矿中 P 和 S 含量较低。图 1 为原矿的 X 射线衍射(XRD)分析图谱。由图 1 可知矿物的衍射峰比较弥散，主要含有石英和 Fe_2O_3，还含有少量的针铁矿。

表 1　褐铁矿的主要化学成分(%)

TFe	Al_2O_3	SiO_2	CaO	P	S	H_2O
34.6	1.78	29.9	0.5	0.09	0.11	3.8

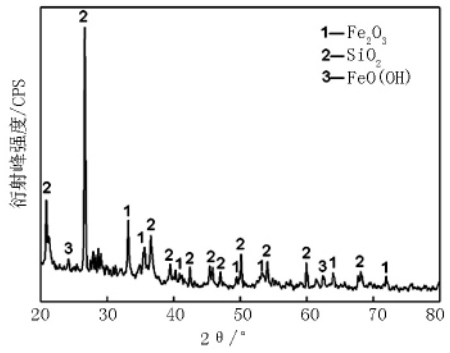


图 1　褐铁矿 XRD 图谱

还原剂选用神东集团内蒙地区的三种煤泥，分别记作煤泥 A、煤泥 B、煤泥 C，其工业分析结果如表 2 所示。由表 2 可知，三种煤泥成分差异比较大，煤泥 A 的挥发分含量最多，煤泥 C 的灰分含量最高，煤泥 B 的固定碳含量高于其他两种煤泥，这有利于对含碳球团的特性作对比。煤泥磨矿细度为 -0.074 mm 占 70% ~80%。

表 2　煤泥的工业分析结果(%)

煤泥	水分	固定碳	挥发分	灰分
A	3.57	46.06	35.66	14.71
B	4.84	57.53	21.32	16.31
C	0.62	50.65	20.61	28.72

实验所用无机黏结剂为工业上常用的膨润土。还原剂和膨润土以及添加的水量为占原矿的百分比。

2.2　实验设备

实验主要设备有 769YP -30T 型压片机、DZF -6020 型电热烘干箱、帕纳科 X´pert Powder X 射线衍射仪、MAC -3000 全自动工业分析仪与 YHKC -2A 型颗粒强度测定仪等。

2.3　实验方法

称取一定质量的褐铁矿原矿，并按质量比(占原矿的比例)加入还原剂煤泥和膨润土，混匀后加入一定质量的水搅拌均匀，装入压片机模具中，缓慢增加压力到规定值并保持 0.5 min 后泄压，压制成约 Φ10 mm × 10 mm 的柱形球团，此时即为湿球。湿球经电热烘干箱在105 ℃烘干 4 h 后所得球团即为干球。

实验中采用湿球落下强度和干球抗压强度作为冷固结含碳球团强度测定的指标。

3　结果与讨论

3.1　不同煤泥对含碳球团强度的影响

固定条件：煤泥加入量 30%，膨润土添加量 4%，水加入量 4%，成球压力 8 MPa，原矿粒度 -0.074 mm占 80%。不同煤泥对含碳球团强度的影响如表 3 所示。

从表 3 可以看出，从煤泥 A 到煤泥 C，含碳球团的湿球落下强度和干球抗压强度依次增加，煤泥 C 的湿球落下强度是煤泥 A 的将近 1.9

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

倍，而干球强度较其提高了28.8%。一般认为[8]，含碳球团的强度与其分子之间的作用力有较大关系，物料塑性越大，颗粒更加容易产生塑性变形，分子之间的黏结力作用也越大，而物料塑性很大程度上决定于所含的脉石成分，黏土或高岭土可以提高物料的塑性。煤泥是煤洗选副产品，灰分含量较高，灰分中黏土等无机矿物质含量较多，塑性较高，无机矿物质的提高增强了煤泥的亲水性，湿球中分子黏结力增大，湿球强度增大，黏土类矿物的黏结作用在一定程度上提高了干球强度。煤泥C中灰分含量最高，因此其含碳球团强度最大，煤泥B球团次之。考虑到煤泥固定碳和挥发分的还原作用，以及过量灰分对还原焙烧的不利影响，选择煤泥B含碳球团作为进一步研究对象。

表3 不同煤泥的含碳球团强度对比

煤泥	湿球落下强度/次·P^{-1}	干球抗压强度/N·P^{-1}
A	5.1	159.3
B	7.2	181.5
C	9.6	205.2

3.2 煤泥加入量对含碳球团强度的影响

固定条件：膨润土添加量4%，水加入量4%，成球压力8 MPa，原矿粒度 -0.074 mm 占80%。煤泥加入量对含碳球团强度的影响如图2所示。

由图2可知，随着煤泥加入量的提高，含碳球团的湿球落下强度和干球抗压强度变化幅度不大，但变化趋势大致相同，即都表现出先增大后减小的变化规律。煤泥用量25%时湿球落下强度和干球抗压强度分别达到最大的7.3次/P和194.7 N/P。这主要是由于一方面，增大煤泥的配比，球团中塑性较高的黏土或高岭土含量得到提高，物料塑性的增加和煤泥亲水性的增强都有利于球团强度的提高；另一方面，铁矿粉在冷固结含碳球团内起骨架作用，当煤泥加入量高于某一比例后，实验中其他条件固定，则矿粉和黏结剂配加量相对减小，骨架作用减弱，黏结剂提供的黏附力降低，导致球团强度降低。综合考虑，选用煤泥用量25%进行后续实验。

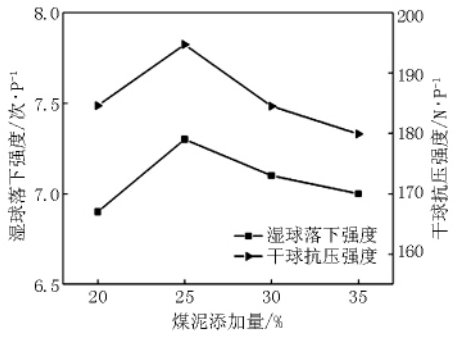


图2 煤泥添加量对球团强度的影响

3.3 原矿粒度对含碳球团强度的影响

固定条件：煤泥加入量25%，膨润土添加量4%，水加入量4%，成球压力8 MPa。原矿粒度为 -0.074 mm 所占比例对含碳球团强度的影响如图3所示。

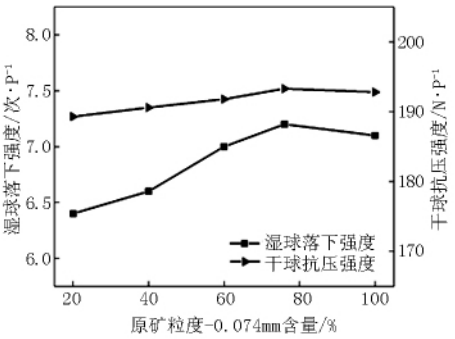


图3 原矿粒度对球团强度的影响

由图3可知，随着原矿中 -0.074 mm 粒级所占百分比的增加，湿球落下强度先增大后减小，粒度 -0.074 mm 占76%时达到最大值7.2次/P，干球落下强度变化趋势大致与之相同，但变化幅度较小。这主要是因为在一定范围内原矿细粒级的增加可以提高压球过程中颗粒的流动性，提高含碳球团的压实度，从而有利于提高球团强度。另外，原矿中易碎的大颗粒的减少，也有利于球团强度的提高[4,12]。在生产球团过程中，物料间分子结合水产生的分子结合力是生球具有一定强度的主要原因[13]，当磨矿使颗粒变得过细之后，矿物颗粒比表面积大大增加，因而需要的分子结合水变多，不改变水分加入量情况下，则由外加水带来的分子结合力相对减小，从而导致冷固结含碳球团强度减小，因此

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

当 -0.074 mm 粒级含量超过 76% 后，落下强度开始减少。由此可见，在一定范围内增加原矿中 -0.074 mm 粒度含量有助于提高球团强度，但过多的增加原矿中的细粒级含量，反而会降低其强度。

3.4　水加入量对含碳球团强度的影响

固定条件：煤泥加入量 25%，膨润土添加量 4%，原矿粒度 -0.074 mm 含量占 76%，成球压力 8 MPa。水加入量对含碳球团强度的影响如图 4 所示。

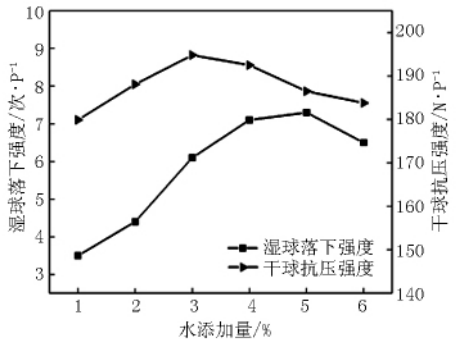


图 4　水分用量对球团强度的影响

由图 4 可知，随着球团中水用量的增加，湿球落下强度和干球抗压强度均呈现先增大后减小的变化趋势，分别在水用量 5% 和 3% 时达到对应的最大值。这主要是因为物料中水分过少（1% ~2%）时，压制球团排出的水量较少，矿物颗粒不能完全润湿，在一定压力下颗粒之间不能得到很好的密集，结合力不牢，球团成型效果差，强度低；继续提高球团中水的加入量，物料中的分子结合水含量逐渐升高，颗粒间形成的水膜提高了颗粒间的黏结强度，因此湿球落下强度不断增加，在 5% 时达到最大值 7.3 次/P；水加入量过高（≥6%）时，由于水是不可压缩的，过量的水导致颗粒间的水膜妨碍颗粒直接接触，颗粒间的分子黏结力大大降低，从而使得湿球落下强度减小，同时也会造成球团脱模困难。压球过程中添加的水分，经过烘干蒸发后会在球团内部留下空隙，水分越高烘干后留下的空隙越大，球团孔隙率的增加会使得干球抗压强度降低，因此球团加入水量高于 3% 以后，干球抗压强度逐渐减小。综合考虑选用 4% 作为球团合适的水加入量。

3.5　成球压力对含碳球团强度的影响

固定条件：煤泥加入量 25%，膨润土添加量 4%，原矿粒度 -0.074 mm 含量占 76%，水加入量 4%。压制球团压力对含碳球团强度的影响如图 5 所示。

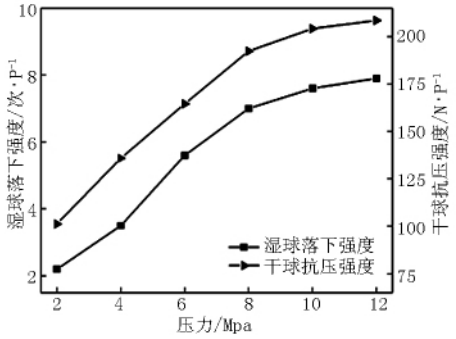


图 5　压力对球团强度的影响

由图 5 可知，成球压力对含碳球团强度影响较大，随着压力的不断提高，湿球落下强度和干球抗压强度均表现出连续增大的变化趋势，压力大于 8 MPa 后球团强度增长有所减缓。这主要是因为压力较小时，物料位移和变形较差，球团孔隙度较高，团块密度和强度均较低，且对生产过程中球团的搬运和还原焙烧过程中的传热不利；压力达 10 MPa 时，湿球落下强度和干球抗压强度都能达到较好的水平，如果继续提高成球压力，球团过于致密，强度会进一步有所提高，但是可能会不利于含碳球团在还原过程中还原气氛在物料颗粒之间的扩散，降低物料还原率，甚至在更高的压力下，压力超过细粒的临界应力值时[14]，球团内的颗粒不能承受过高的压力而发生开裂，颗粒间再行排列和相互填充，形成的新表面之间的内聚力非常小，使得球团强度大大降低。因此，成球压力不是越大越好，综合考虑选取 10 MPa 为球团最佳成球压力。

3.6　膨润土用量对含碳球团强度的影响

固定条件：煤泥加入量 25%，原矿粒度 -0.074 mm 含量占 76%，水加入量 4%，成球压力 10 MPa。膨润土用量对含碳球团强度的影响如图 6 所示。

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

由图6可知，球团强度随膨润土用量的增加而提高，添加4%的膨润土可使湿球落下强度和干球抗压强度分别达到7.3次/P和197.6 N/P，基本满足还原要求。若继续增加膨润土用量，强度在一定程度还会增加，但同时也会增加含碳球团中SiO_2等杂质的含量，使还原产物中产生过多的熔渣，因此不适宜过量使用。

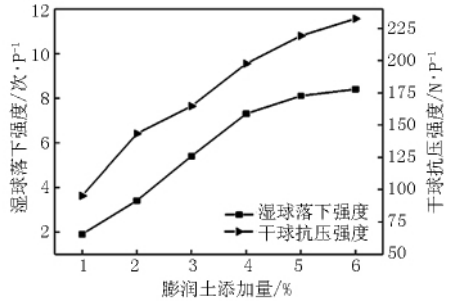


图6 黏结剂对球团强度的影响

4 结 论

以包头地区褐铁矿和神东集团洗选厂煤泥为主要原料生产褐铁矿含碳球团，通过研究煤泥种类及用量、原矿粒度、水加入量、成球压力、膨润土用量等因素对褐铁矿冷固结含碳球团强度的影响，得出如下结论：

1）以煤泥B为还原剂生产褐铁矿含碳球团，在煤泥B用量为25%、水用量为4%、成球压力为10 MPa、原矿粒度-0.074 mm含量占76%、膨润土用量为4%条件下，获得的含碳球团湿球落下强度为7.4次/P，干球抗压强度为197.6 N/P，可满足还原生产的要求。

2）煤泥是洗选废弃物，价格低廉，黏土类矿物较多，自身黏度大，是生产强度较高褐铁矿冷固结含碳球团的较好原料，同时可以减少环境污染，提高经济效益。

参考文献

[1] 孙炳泉. 近年我国复杂难选铁矿石选矿技术进展[J]. 金属矿山，2006(3)：11-13.

[2] 谢兴中，王毓华. 褐铁矿选矿研究现状与思考[J]. 金属矿山，2010(1)：6-10.

[3] 邱俊，吕宪俊，陈平，等. 铁矿选矿技术[M]. 北京：化学工业出版社，2009.

[4] 陈江安，曾 捷，龚恩民，等. 褐铁矿选矿工艺的现状及发展[J]. 江西理工大学学报，2010，10(5)：5-8.

[5] Aota J，MorinL，Zhuang Q，et al. Direct reduced iron production using cold bonded carbon bearing pellets part1-laboratory metallization[J]. Ironmaking and Steelmaking，2006(5)：426-428.

[6] Zhuang Q，Clements B，Aota J，et al. DRI production using cold bonded carbon Bearing pelletsPart 2-rotary kiln process modeling[J]. Ironmaking and Steelmaking，2006(5)：429-432.

[7] 陈伟鹏，谢智辉，张欢，等. 加入聚乙烯的含碳铁矿球团的直接还原[J]. 过程工程学报，2015，14(5)：823-828.

[8] 朱炳秀，魏国，姜鑫，等. 低配碳比含碳球团直接还原的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2012，33(2)：247-250.

[9] 王洪，余雪峰，赵晴晴，等. 高铁赤泥直接还原制备珠铁[J]. 过程工程学报，2012，12(5)：816-821.

[10] 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铁[J]. 过程工程学报，2009，9(增刊1)：25-30.

[11] 沈维华. 以含铁海砂为原料的含碳球团直接还原研究[D]. 重庆：重庆大学，2010.

[12] Singh M，Bjurkman B. Strength of cement bonded briquettes[J]. Minerals and Metallurgical Processing，2006，23(4)：203-213.

[13] 张义贤，饶家庭，何木光，等. 钒钛球团精矿适宜粒度研究[J]. 四川冶金，2011，33(6)：27-31.

[14] 沈远海. 新钢铁坑褐铁矿直接还原焙烧过程研究[D]. 赣州：江西理工大学，2007.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊（光盘版）电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版文章。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述声明。

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