烧结富矿粉细磨用于制备球团矿的试验研究

毛 瑞[1]，王 飞[1]，金 海[1]，张振伟[2]，施利军[2]
（1. 江苏省（沙钢）钢铁研究院，江苏 张家港 215625；2. 江苏沙钢集团有限公司，江苏 张家港 215625）

摘要：为降低球团矿的生产成本，本文基于氧化性球团生产工艺，研究巴卡粉和巴西混合粉两种烧结富矿粉细磨后作为球团矿生产原料对球团质量的影响。结果表明：细磨后，两种富矿粉的静态成球性指数低于一般的球团精矿粉，其分别为0.72和0.53；且随着使用占比的增加，造球需水量逐渐增加，合格生球的落下强度逐渐提高；不同焙烧温度下，两种富矿粉的固结强度与一般球团精矿粉存在差异，当焙烧温度超过1 300 ℃后，其固结强度出现劣化；当巴西混合粉和巴卡粉的使用占比分别达到20%、30%后，生球的爆裂温度均明显降低。综合考虑球团爆裂温度、成品球强度和还原性能，细磨烧结富矿粉的使用占比可控制在30%以内。

关键词：烧结富矿粉；球团；成球性；强度；爆裂温度
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0024－06
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.020

Experimental research on grinding rich ore powder originally used for sintering to prepare pellet

MAO Rui[1]，**WANG Fei**[1]，**JIN Hai**[1]，**ZHANG Zhenwei**[2]，**SHI Lijun**[2]
（1. *Research Institute of Iron and Steel of Jiangsu Province (Sha Steel)*, *Zhangjiagang* 215625, *Jiangsu*, *China*;
2. *Jiangsu Shagang Group Co.*, *Ltd.*, *Zhangjiagang* 215625, *Jiangsu*, *China*）

Abstract: In order to reduce the production cost of pellet, the effect on pellet quality of two rich ore powder for sintering, Baca fines and Brazilian mixed fines, is investigated after grinded as raw material for pellet production based on oxidative pellet production process. The results show that, the spheronization of these two rich ore powders are lower than those of general pelletizing concentrate powder after grinding, and their static spheronization indices are 0.72 and 0.53, respectively; and with the increase of the use ratio, the water required for balling gradually increases, and the falling strength of qualified fresh pellet gradually improves too; the consolidation strength of the two rich ore powders differs from that of general pelletizing concentrate powders under different roasting temperatures, and when the roasting temperature exceeds 1 300 ℃, the consolidation strength deteriorates; when the use of Brazilian mixed fines and Baca fines reached 20% and 30%, respectively, the bursting temperature of fresh pellet significantly reduces. Taking into account the pellet bursting temperature, finished ball strength and reduction performance, the use of finely ground rich ore powder for sintering can be controlled to within 30%.

Key words: rich ore powder used for sintering; pellet; spheronization; strength; decrepitation temperature

球团矿由于具有较高的品位以及良好的冶金性能，其在高炉炉料结构中的使用占比逐步升高[1]。磁铁精矿粉是生产氧化性球团矿的主要原料，但高品位磁铁矿资源日益稀缺，且价格昂贵。烧结用富矿粉一般为赤铁矿，粒度较粗，且资源丰富[2-3]，若将该富矿粉细磨后用

收稿日期：2020－10－29；**修回日期**：2021－02－23
作者简介：毛 瑞(1988—)，男，高级工程师，从事冶金资源综合利用方面的研究工作。

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

于球团矿的生产，不仅能够拓宽球团生产的矿粉来源，且能降低球团的生产成本。

一些研究人员已针对赤铁矿粉用于球团矿生产进行了相关研究。如：刘昌[4]研究发现，赤铁矿粉的使用会增加球团矿的孔隙率和还原膨胀率，降低预热球的抗压强度；马丽等[5]研究了细磨烧结用麦克粉用于球团矿生产，将其配比控制在 30% 以下能够满足生产要求；黄柱成等[6]研究了以赤铁矿为主配加磁铁矿对制备球团矿的影响，将磁铁矿的配比提高至 30%，球团预热后强度和焙烧后强度均明显提高；王代军[7]研究发现，通过添加蛇纹石提高球团 MgO 质量分数能够改善赤铁矿球团的抗压强度和冶金性能；彭道胜等[8]研究了细磨卡粉制备熔剂性球团，细磨卡粉配比提高到 45% 时仍能满足高炉冶炼要求，且细磨卡粉的配入可以改善球团还原性能和高温软熔性能。

本文通过分析巴西混合粉、巴卡粉和球团磁铁精粉基础性能的差异，研究配加两种细磨烧结富矿粉对球团性能的影响，以期为拓展该类型矿粉的生产应用提供理论指导。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验原料为 4 种球团精粉和两种烧结富矿粉，各原料的主要成分和粒度组成如表 1 所示。由表 1 可知，巴西混合粉和巴卡粉属于赤铁矿粉，其 FeO 质量分数较低，烧损相对较高，且 TFe 质量分数分别为 65.63% 和 63.32%，略低于其它 4 种球团精粉。

表 1　试验原料的主要化学成分、烧损和粒度组成(质量分数)

Table 1　Main chemical composition, burning loss and size distribution of experimental materials　%

原料名称	TFe	CaO	SiO_2	FeO	烧损	−0.074 mm 粒级占比
巴卡粉	65.63	0.02	1.62	0.77	3.2	76.76
巴西混合粉	63.32	0.04	4.88	0.36	3.5	85.65
澳洲精粉	64.77	0.2	8.54	26.65	−1.8	84.22
英美资源精粉	66.48	0.14	3.12	0.38	1.5	97.90
秘鲁精粉	69.62	0.33	1.00	29.42	−1.8	80.85
智利精粉	66.33	0.56	4.30	26.08	−1.6	94.03

球团矿生产要求原料具有较好的成球性能，以保证生球质量。球团精矿粉的成球性通常采用静态成球性指数进行定量评价。静态成球性指数能较好地反映固相和液相的相互作用，以及细粒物料的聚集过程，是综合体现物料粒度组成、比表面积和亲水性能的参数。静态成球性指数可区分物料成球的难易程度，其计算公式如下。

$$K = W_{分}/(W_{毛}—W_{分}) \quad (1)$$

式中：K 为静态成球性指数；$W_{分}$ 为最大分子水，%；$W_{毛}$ 为最大毛细水，%。

分别对细磨巴卡粉、巴西混合粉以及球团常用的 4 种精矿粉进行最大分子水和最大毛细水检测，并对比计算得到各种矿粉的静态成球性指数，结果如表 2 所示。

表 2　试验原料的成球性能

Table 2　Pelletization performance of experimental materials

项目	最大分子水(质量分数)/%	最大毛细水(质量分数)/%	吸水速率/($mm \cdot min^{-1}$)	静态成球性指数
巴卡粉	6.96	20.17	3.18	0.53
巴西混合粉	8.00	19.04	2.43	0.72
澳洲精粉	9.93	21.06	3.90	0.89
英美资源精粉	9.88	20.55	4.11	0.93
秘鲁精粉	8.25	16.25	4.74	1.03
智利精粉	8.50	19.53	5.24	0.77

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

由表 2 可知：巴卡粉和巴西混合粉细磨后的成球性指数均低于球团常用的 4 种精粉；巴卡粉细磨后的静态成球性指数为 0.53，属于中等成球性；巴西混合粉细磨后的静态成球性指数为 0.72，属于良好成球性。4 种常用精粉的成球性指数均较高，除智利精粉属于良好成球性外，其余 3 种精粉的成球性均属于优等成球性；巴卡粉和巴西混合粉的吸水速率相对较慢，分别为 3.18、2.43 mm/min，而 4 种常用精粉的吸水速率均较高，其中智利精粉的吸水速率最大，为 5.24 mm/min，澳洲精粉的相对较低，为 3.90 mm/min。通过对各矿粉的成球性分析可知，细磨的巴卡粉和巴西混合粉的成球性相对较差，吸水速率较慢，在工业应用过程中要相应的增加矿粉的润湿时间和造球加水量，保证成球效果。

1.2 试验方法

采用球磨机对烧结富矿粉进行细磨，球磨机筒体尺寸为∅500 mm×800 mm，筒体转速为 50 r/min，进料粒度小于 10 mm。每批次磨矿量为 5 kg，每间隔 10 min 取样进行粒度检测，分析磨矿时间对烧结富矿粉粒度的影响。

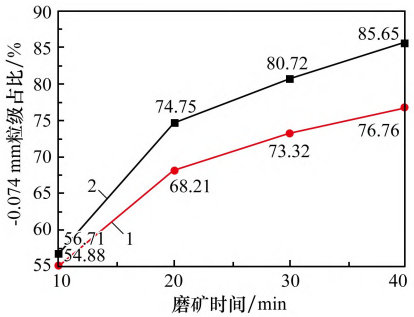
采用固结强度评价矿粉的高温固结性能。每次称取 1.0 g 矿粉，在 15 MPa 的压力下保压 2 min，制成∅5 mm×6 mm 的圆柱形压块，然后将压块送入焙烧设备；焙烧设备为可精确控温的高温烧结炉，温度控制范围为 1 100 ~ 1 350 ℃，保温时间为 10 min；在矿粉焙烧过程中通入空气，流量为 4 L/min。焙烧结束后将试样缓慢冷却至室温并取出，测量其径向抗压强度，多次测量取平均值记为该种矿粉对应温度下的固结强度。

将磨细的烧结富矿粉按不同配比配入球团原料中，使用 1.5% 的膨润土作为黏结剂，充分混匀后，采用圆盘造球机进行造球。圆盘造球机的主要参数：圆盘直径为 1 000 mm，转速为 23 r/min，边高为 150 mm，圆盘倾角为 47°，造球时间控制在 10 min 左右。取 10 ~ 12.5 mm 的合格生球，分别对生球含水率、落下强度和爆裂温度等指标进行检测。采用两级卧式管式炉(控温精度为 ±1 ℃)对不同条件下的生球进行高温焙烧试验。试验步骤：首先将生球放入中温管式炉炉口预热 3 ~ 5 min，在 1 000 ℃的温度下焙烧 10 min 后，将其迅速放入高温管式炉，在 1 280 ℃下焙烧 20 min，对焙烧反应后的球团样品进行性能检测。

2 结果与讨论

2.1 磨矿试验

针对巴卡粉和巴西混合粉开展磨矿试验，研究不同磨矿时间对两种烧结富矿粉 -0.074 mm 粒级占比的影响，结果如图 1 所示。由图 1 可知，巴西混合粉的整体可磨性要优于巴卡粉，随着磨矿时间的延长，巴西混合粉的 -0.074 mm 粒级占比增加较快，磨矿时间超过 20 min 后，矿粉 -0.074 mm 粒级占比较为平稳。



1—巴卡粉；2—巴西混合粉。

图 1 烧结富矿粉的可磨性对比

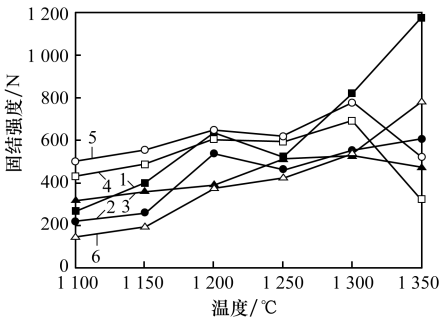
Fig. 1 Comparison of grindability of rich ore powders originally used for sintering

2.2 高温固结性能分析

球团矿的固结主要是固相黏结，通过固体质点的迁移扩散形成连接桥、化合物或固溶体把颗粒黏结起来[9]。分别对细磨烧结富矿粉和 4 种精粉进行高温固结强度检测，得到不同温度下各矿粉的固结强度如图 2 所示。

由图 2 可知，在 1 100 ~ 1 350 ℃范围内，随着温度的升高，4 种球团精粉的固结强度均呈逐渐增大的趋势，其中智利精粉和英美资源精粉的固结强度随焙烧温度的升高增加较为明显，秘鲁精粉的固结强度增加的趋势较小。巴卡粉和巴西混合粉随着焙烧温度的升高，固结强度增加趋势相对较小，且在焙烧温度升高至

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



1—智利精粉；2—澳洲精粉；3—秘鲁精粉；4—巴卡粉；5—巴西混合粉；6—英美资源精粉。

图 2　不同温度下烧结富矿粉和 4 种常用球团精粉的固结强度

Fig. 2　Solidification strength of rich ore powder originally used for sintering and 4 common pellet powders at different temperatures

1 350 ℃后，其固结强度均出现了明显的降低。导致这种情况的原因：① 赤铁矿粉中的 Fe_2O_3 物相在高温下分解为磁铁矿，晶格的转变导致了固结强度的劣化；② 矿粉中的脉石成分和赤铁矿分解生成的 FeO 在高温下形成熔融渣相，冷却过程中形成的渣相联结强度较低，从而导致矿粉的固结强度劣化。

巴卡粉和巴西混合粉均为赤铁矿，主要矿相是 Fe_2O_3，其在高温焙烧过程中主要靠颗粒间的烧结作用和 Fe_2O_3 晶粒的再结晶将相邻颗粒固结在一起。细磨烧结富矿粉颗粒具有较高的表面能，表面原子具有较高的迁移能力，这在高温下有利于颗粒间烧结作用的进行，并且可促进颗粒的再结晶。

对 1 350 ℃高温焙烧后的巴卡粉球团进行扫描电镜分析，结果如图 3 所示。

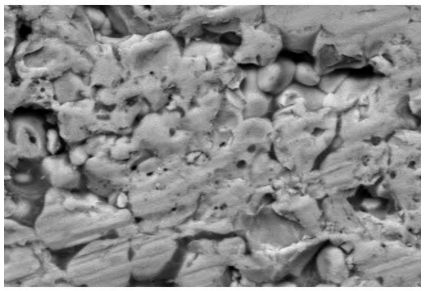


图 3　巴卡粉球团高温焙烧后的扫描电镜图片

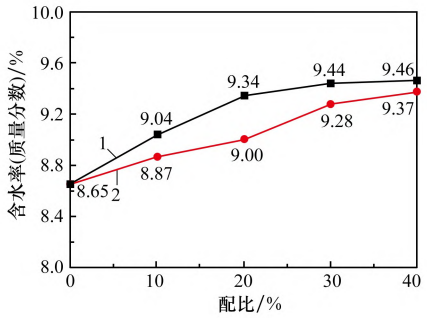
Fig. 3　Scanning electron microscope image of Barca powder pellets after high temperature roasting

由图 3 可看出，球团中出现了较多的微圆孔结构，这可能是高温下矿粉中 Fe_2O_3 分解形成 Fe_3O_4 和 O_2 后产生的，这也是造成成品球高温强度降低的直接原因。

在实际球团生产过程中，焙烧温度设定为 1 200 ~ 1 350 ℃。根据试验结果可知，在此温度范围内，巴卡粉和巴西混合粉的固结强度与不同种类的球团精粉存在一定差异。因此，单从矿粉固结强度的角度来分析，使用细磨烧结富矿粉生产氧化性球团要注意和不同的球团磁精粉进行搭配使用，优化矿粉的整体性能。

2. 3　模拟造球试验

将磨细的烧结富矿粉分别按 10%、20%、30% 和 40% 配入球团原料中，充分混匀后，进行造球试验。对制备的生球进行含水率、落下强度、爆裂温度以及成品球强度、还原性等检测，结果分别如图 4 ~ 8 所示。



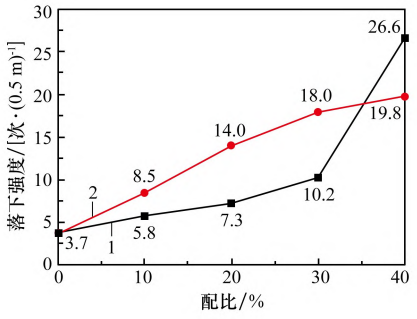
1—巴西混合粉；2—巴卡粉。

图 4　不同细磨烧结富矿粉配比对生球含水量的影响

Fig. 4　Effect of proportion of grinded rich ore powder originally used for sintering on water content of green ball

由图 4 可知，随着巴卡粉和巴西混合粉配比的增加，所得生球的含水率均缓慢增加，使用 40% 的巴卡粉和巴西混合粉时对应的生球含水率分别为 9. 37% 和 9. 46%。这说明使用细磨烧结富矿粉后，成球过程的需水量增加，这与细磨烧结富矿粉的成球性能结果相对应。由于巴卡粉和巴西混合粉的静态成球性指数较小，使用这两种矿粉在造球时需要加入相对多的水分，才能使母球进一步长大成为合格的生球。

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

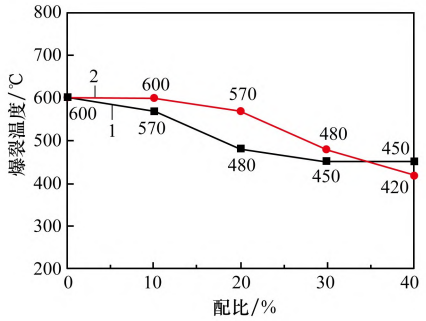


1—巴西混合粉；2—巴卡粉。

图 5 不同细磨烧结富矿粉配比对生球落下强度的影响

Fig. 5 Effect of proportion of grinded rich ore powder originally used for sintering on drop strenth of green ball

由图 5 可知，随着巴卡粉和巴西混合粉配比的增加，生球的落下强度均呈明显的上升趋势，当巴卡粉和巴西混合粉配比达到 40% 时，生球的落下强度分别为 19.8、26.6 次/(0.5 m)，远大于生产工艺中要求生球落下强度大于 3 次/(0.5 m)的工艺指标。

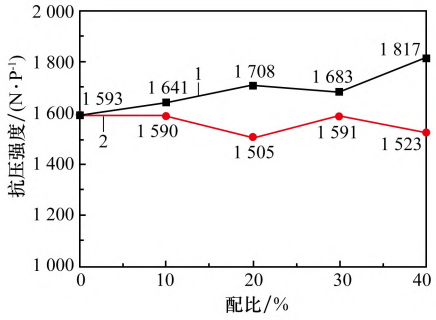


1—巴西混合粉；2—巴卡粉。

图 6 不同细磨烧结富矿粉配比对生球爆裂温度的影响

Fig. 6 Effect of proportion of grinded rich ore powder originally used for sintering on cracking temperature of green ball

由图 6 可知：随着两种细磨烧结富矿粉配比的增加，生球的爆裂温度均呈逐渐降低的趋势，说明使用细磨烧结富矿粉时会在一定程度上增加球团的爆裂粉化，影响生球的烘干效果。当细磨巴西混合粉配比超过 10% 时，生球的爆裂温度为 570 ℃，出现明显的降低；当其配比提高到 20% 时，生球爆裂温度从 570 ℃ 大幅降低到 480 ℃；而当细磨巴卡粉配比超过 20% 时，生球的爆裂温度也出现了较为明显的降低。当配比小于 30% 时，巴卡粉对球团爆裂温度的影响要小于巴西混合粉。



1—巴西混合粉；2—巴卡粉。

图 7 不同细磨烧结富矿粉配比对成品球抗压强度的影响

Fig. 7 Effect of proportion of grinded rich ore powder originally used for sintering on strength of pellets

从图 7 可知，随着细磨巴西混合粉配比的增加，成品球的抗压强度呈现缓慢增加的趋势；随着细磨巴卡粉配比的增加，成品球抗压强度变化不大，保持在同一水平。这一结果与前述烧结富矿粉的固结强度基本保持一致，说明采用细磨的烧结富矿粉造球，在一定配加范围内，其对成品球的抗压强度影响较小。

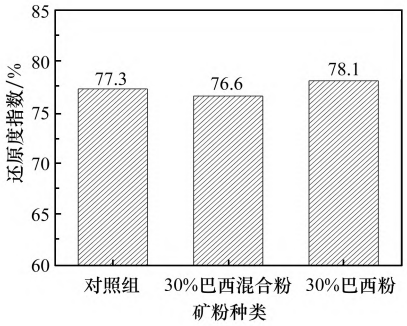


图 8 不同铁矿粉种类对成品球还原性能的影响

Fig. 8 Effect of iron ore powder types on reducibility of pellets

由图 8 可知：巴西混合粉和巴卡粉生产的成品球的还原度指数分别为 76.6% 和 78.1%，与磁铁矿粉生产的成品球的还原性相当。综合来看，使用细磨的烧结富矿粉制备氧化性球团是可行的。

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

3　结　论

（1）细磨巴西混合粉和巴卡粉的成球性指数低于球团常用精矿粉，巴卡粉细磨后的静态成球性指数为 0.53，属于中等成球性，巴西混合粉细磨后的静态成球性指数为 0.72，属于良好成球性。细磨后烧结富矿粉的吸水速率也均低于常用的球团精矿粉，随着使用占比的增加，造球需水量逐渐增加，合格生球的含水率也逐渐升高，对应生球的落下强度明显提升。

（2）在不同的温度区间内，细磨后的巴卡粉和巴西混合粉的固结强度与常用球团精矿粉存在一定差异，当焙烧温度超过 1 300 ℃后，细磨巴卡粉和巴西混合粉的固结强度均会出现显著降低，使用其生产氧化性球团时要注重和不同种类的磁精粉搭配使用，以保证球团矿的强度。

（3）配加细磨巴西混合粉和巴卡粉会导致生球的爆裂温度出现降低，巴卡粉对球团爆裂温度降低的影响要小于巴西混合粉；综合考虑球团爆裂温度、成品球强度和还原性等指标，使用细磨的烧结富矿粉制备氧化性球团是可行的，细磨烧结富矿粉的配比控制在 30% 以内能够保证工业生产的顺行。

参考文献：

[1] 朱德庆，黄伟群，杨聪聪，等．铁矿球团技术进展[J]．烧结球团，2017，42(3)：42－49.
ZHU Deqing，HUANG Weiqun，YANG Congcong，et al. Technical progress in iron ore pelletization[J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(3)：42－49.

[2] 孙海华．配加涞源富矿粉提高烧结矿强度[J]．烧结球团，2000，25(5)：43－45.
SUN Haihua. Proportioning of laiyuan rich ores to increase sinter strength[J]. Sintering and Pelletizing，2000，25(5)：43－45.

[3] 胡俊鸽，高战敏．马拉曼巴铁矿粉的特点及其在烧结中的应用[J]．钢铁研究，2008，36(5)：25－28.
HU Junge，GAO Zhanmin. Characteristics of Marra Mamba iron ore fines and the application technology in sintering process[J]. Research on Iron & Steel，2008，36(5)：25－28.

[4] 刘昌．赤铁矿配比对氧化性球团制备影响规律的研究[D]．长沙：中南大学，2011.
LIU Chang. Research on effect of hematite ratio on oxidation pellets[D]. Changsha：Central South University，2011.

[5] 马丽，青格勒，田筠清，等．球团配加细磨麦克粉的试验研究[J]．烧结球团，2019，44(2)：39－41.
MA Li，QING Gele，TIAN Yunqing，et al. Experimental study on pelletizing proportioned with grinded MAC fines[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(2)：39－41.

[6] 黄柱成，张元波，朱尚扑，等．以赤铁矿为主配加磁铁矿制备氧化球团的研究[J]．钢铁，2004，39(4)：9－13.
HUANG Zhucheng，ZHANG Yuanbo，ZHU Shangpu，et al. Study on mainly made from hematite based oxidized pellets with addition of some magnetite[J]. Iron and Steel，2004，39(4)：9－13.

[7] 王代军，吴胜利．赤铁矿制备镁球团矿的研究与应用[J]．钢铁，2015，50(10)：19－25.
WANG Daijun，WU Shengli. Preparation and application of magnesium pellets using hematite[J]. Iron and Steel，50(10)：19－25.

[8] 彭道胜，潘建，李军，等．细磨卡粉制备熔剂性球团的试验研究[J]．烧结球团，2021，40(4)：50－57.
PENG Daosheng，PAN Jian，LI Jun，et al. Experimental research on preparation of fluxed pellets from fine grinding Carajas powder[J]. Sintering and Pelletizing，2021，40(4)：50－57.

[9] 朱德庆，黄铮静，杨聪聪，等．GF88 赤铁精矿制备氧化球团的试验研究[J]．烧结球团，2020，45(6)：61－67.
ZHU Deqing，HUANG Zhengjing，YANG Congcong，et al. Research on production of oxidized pellets from GF88 hematite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(6)：61－67.

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