

添加不同配比的铜尾矿 PMC 应用于球团制备的研究

吕庆, 田野, 刘小杰, 李建鹏, 兰臣臣

(华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 针对铜尾矿 PMC 的利用问题, 开展了粒度为 0.074 mm PMC 精矿与司家营矿粉不同配矿比例造球对球团质量影响的研究。通过对两种矿粉进行基础性能检测可知: 两种矿粉均以磁铁矿为主且二者的造球性能均较好, 增加 PMC 精粉配比对提高成球性有利, PMC 精粉同化温度、黏结相强度和连晶强度较司家营高, 但其流动性指数过低。试验结果表明: 当 PMC 配比在 0.65-0.80 之间变化时, 随 PMC 的增加成球率、落下强度升高, 在 0.8 时达到最大, 爆裂温度降低, PMC 配比为 0.75 时, 球团抗压强度达到最大值。当焙烧温度在 1150 ~ 1225 °C 之间时, 不同 PMC 矿配比球团的抗压强度均在 2000 N/个以下, 当焙烧温度由 1225 °C 升高到 1300 °C 时, 随焙烧温度的升高, 不同 PMC 配比的球团抗压强度升高, 当 PMC 配比为 0.8, 焙烧温度为 1300 °C 时球团抗压强度达到最大值 2954.26N/个。

关键词: PMC; 成球性; 氧化焙烧; 抗压强度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.02.019

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文献编号: 1000-6532 (2018) 02-0086-05

球团矿具有冶金性能好, 生产过程中能耗低、污染小, 大规模生产的成本较低等优点。但我国高炉炉料配比球团矿在 15% 左右, 远远低于国外先进高炉球团配比。PMC 磁铁精粉是南非的一种铜尾矿, 数量较大、含铁品位较高, 同时含有较高钛、磷、铜、碱金属, 价格较低。司家营矿粉属冀东矿, 如果能将 PMC 与冀东精粉配合应用于球团生产, 将大大降低生产成本。关于磁铁矿球团氧化焙烧性能已有大量研究^[1-5], 而关于 PMC 精矿粉与司家营配矿的比例对球团生球性能及氧化焙烧行为影响的研究尚不多见, 因此研究 PMC 精矿粉与司家营矿粉不同配比球团的生球性能及其氧化焙烧行为, 对 PMC 精矿的利用具有重要意义。

1 试验原料基础特性

1.1 粒度形貌

采用 SSX-550 型扫描电镜观察产物的显微形貌, 并结合相应的能量散射谱 (EDS) 进行微区成

分分析, 在 50 倍放大条件下 PMC 和司家营矿颗粒比较均匀, 没有片状结构, 多为圆形、不规则形状, 司家营矿颗粒表面较 PMC 精矿粉圆滑。因此, PMC 精矿和司家营精矿造球性能较好。

1.2 原料粒度组成

利用 LS-230 型激光粒度分析仪对 PMC 铁矿粉、司家营矿粉进行了粒度分析, 结果见表 1。

表 1 精矿粉的粒度组成

Table 1 Grain-size composition of iron concentrates

体积分布 对应粒径 /μm	< 10%	< 25%	< 50%	< 75%	< 90%	平均
PMC 矿粉	12.38	20.91	38.86	64.91	93.08	35.99
司家营粉	10.35	23.19	51.23	87.80	136.6	43.92

适合造球的精矿其 -0.045 mm 部分应控制在 60% 以上^[6], 或 -0.074 mm 粒级控制在 85% 以上, 且要求精矿的 +0.25 mm 粒级含量近似于零^[7]。国外造球原料粒度较细, -0.074 mm 含量一般在 85% 以上; 国内造球原料粒度较粗, -0.074 mm 含量在 80% 以下^[8], 所以成球性能较差。由表 1 可知, PMC 精粉和司家营矿粉 -0.074 mm 80% 以下, 因此成球性能

收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1360205)

作者简介: 吕庆, (1954-) 男, 博士, 教授。

通讯作者: 田野 (1990-) 女, 硕士生。

较差, 但 PMC 精粉整体的粒度较司家营矿粉粒度细, 增加 PMC 精粉对比对提高成球性有利。

1.3 能谱分析

采用 X 射线衍射技术 (XRD) 对 PMC 精矿和司家营矿粉进行能谱分析, 其分析结果见图 1、2。

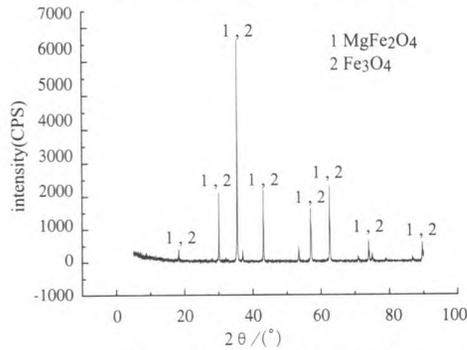


图 1 PMC XRD 衍射分析
Fig. 1 XRD analysis for PMC

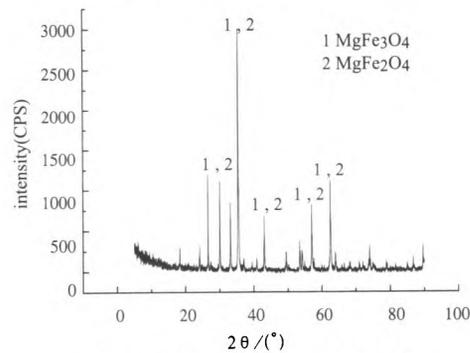


图 2 司家营矿 XRD 衍射分析
Fig. 2 XRD analysis for Sijiaoying mineral powder

由图 1、2 可知, PMC 精矿和司家营矿粉的矿物以磁铁矿为主。

利用 TSJ-3 型微型烧结设备对铁矿粉的同化温度、液相流动性、粘结相强度和连晶强度进行了检测, 基础特性检测结果见表 2。

表 2 铁矿粉基础特性
Table 2 Basic property of iron concentrates

矿粉名称	同化温度 / $^{\circ}\text{C}$	液相流动指数	粘结相强度 / N	连晶特性 / N
PMC	1370	0.00	2102	1832
司家营	1230	1.88	624	1402

烧结一般要求铁矿粉的同化温度在 $1275 \sim 1315^{\circ}\text{C}$ 比较合适。由表 2 可知, 司家营的同化温度最低为 1230°C ; PMC 的同化温度较高。PMC 的液相流动性指数过低, 小于 0.7, 属于液相流动能力较低的矿种; 司家营的液相流动性指数

为 1.88, 高于 1.6, 液相流动能力较强。

司家营连晶强度较低为 1402 N/ 试样, PMC 矿粉的连晶强度高于 1800 N/ 个试样, 但整体来讲这 2 种矿均属于磁铁矿, 连晶固结能力强。司家营矿中的脉石含量较高, 对铁矿物连晶发展有阻碍作用, 因此连晶强度较低。

1.4 矿相显微结构

采用蔡司高倍显微镜对 PMC 精粉矿和司家营精粉矿进行观察, 2 种矿粉矿相组成及含量见表 3, PMC 精粉矿相见表 3, 司家营精粉矿相见图 3。

表 3 铁精粉矿相组成及含量
Table 3 Mineral composition and volume percent of iron concentrates

矿粉名称	铁矿物 /%				脉石矿物 /%		
	磁铁矿	赤铁矿	褐铁矿	磁黄铁矿	石英	角闪石	其他硅酸盐矿物
PMC	78~82	8~12	—	—	1~2	3~5	4~6
司家营	75~80	3~5	微量	2~3	8~10	3~5	1~2

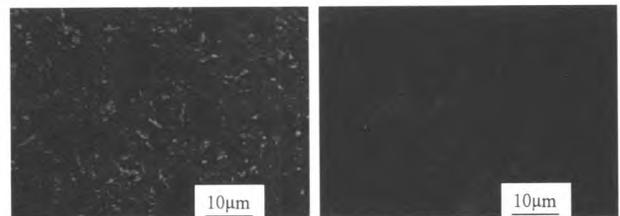


图 3 PMC 精粉的矿相
Fig. 3 Microstructure of PMC

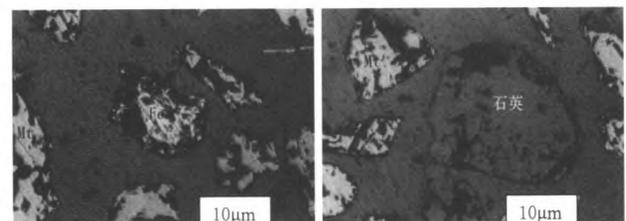


图 4 司家营精粉的矿相
Fig. 4 Microstructure of Sijiaoying mineral powder

由图 3 可知, PMC 以磁铁矿为主, 赤铁矿夹杂在磁铁矿中呈网格状分布。脉石矿物含量较少, 主要成分为石英和角闪石。由图 4 可知, 司家营铁精粉以磁铁矿为主, 脉石矿物以石英为主。赤铁矿多呈他形粒状和圆点状分布。而磁黄铁矿呈柱状分布。

2 试验方案

2.1 PMC 对比对生球质量的影响试验方案

PMC 配比对生球性能的影响主要通过改变 PMC 精矿与司家营矿粉的比例实现。选取较佳粘结剂含量 2%，较佳造球水分 8.4%，造球时间 12 min，以 PMC 精粉和司家营矿粉为原料，变化配比研究 PMC 配比对生球性能的影响。球团配矿方案，球团矿理论成分分别见表 4、5。

表 4 球团配矿方案 /%

Table 4 Ore blending scheme of pelletizing

编号	PMC 司家营	PMC	司家营	膨润土
1#	6.5:3.5	63.70	34.30	2.00
2#	7.0:3.0	68.60	29.40	2.00
3#	7.5:2.5	73.50	24.50	2.00
4#	8.0:2.0	78.40	19.60	2.00

表 5 球团矿理论成分 /%

Table 5 Theoretical composition of pelletizing

编号	Fe (tot)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	S	P ₂ O ₅	Cu	Na ₂ O	K ₂ O	V ₂ O ₅
1#	63.63	3.86	0.82	0.91	1.91	1.07	0.00	0.04	0.24	0.03	0.07	0.05	0.09
2#	63.65	3.60	0.83	0.96	2.02	1.15	0.00	0.04	0.23	0.03	0.06	0.05	0.09
3#	63.66	3.34	0.84	1.00	2.14	1.22	0.00	0.04	0.22	0.04	0.06	0.06	0.10
4#	63.67	3.09	0.85	1.04	2.25	1.29	0.00	0.04	0.21	0.04	0.06	0.06	0.11

2.2 PMC 配比对球团焙烧性质的影响试验方法

粘结剂含量为 2%，造球水分为 8.4%，造球时间为 12 min，预热时间为 15 min，预热温度 925 ℃，焙烧时间 20 min，焙烧温度分别为 1150 ℃、1175 ℃、1200 ℃、1225 ℃、1250 ℃、1275 ℃和 1300 ℃，以 PMC 精粉和司家营矿粉为原料进行试验，其中 PMC 精粉的配比分别为 0.8、0.9

和 1.0，研究 PMC 配比对球团抗压强度的影响。球团配矿方案见表 6。球团矿理论成分见表 7。

表 6 球团配矿方案 /%

Table 6 Ore blending scheme of pelletizing

编号	PMC 司家营	PMC	司家营	膨润土
5#	8:2	78.40	19.60	2.00
6#	9:1	88.20	9.80	2.00
7#	1:0	98.00	0.00	2.00

表 7 球团理论成分 /%

Table 7 Theoretical composition of pelletizing

编号	Fe (tot)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	S	P ₂ O ₅	Cu	Na ₂ O	K ₂ O	V ₂ O ₅
5#	63.67	3.09	0.85	1.04	2.25	1.29	0.00	0.04	0.21	0.04	0.06	0.06	0.11
6#	63.70	2.57	0.87	1.13	2.48	1.44	0.00	0.03	0.20	0.04	0.06	0.06	0.12
7#	63.73	2.05	0.90	1.21	2.70	1.59	0.00	0.03	0.18	0.05	0.05	0.06	0.14

3 结果与分析

3.1 PMC 配比对生球质量的影响

所做试验生球粒径均为 10~12.5 mm。

3.1.1 PMC 配比对球团成球率和爆裂温度的影响

PMC 配比与成球率和落下强度的关系见图 5。

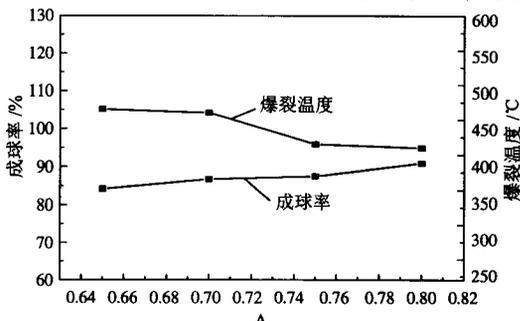


图 5 PMC 配比与成球率、爆裂温度的关系

Fig. 5 Relationship among ratio of PMC, pelletizing ratio and decrepitation temperature

由图 5 可知，随 PMC 配比的升高成球率升高，PMC 配比 8.0:2.0 时成球率最高为 91.00%。PMC 配比增加，球团中 CaO 含量增多，而 CaO 具有良好粘结性；另一方面，PMC 的各粒级尺寸及所占百分比均小于司家营矿粉，因此随 PMC 配比的升高成球率升高。

PMC 配比 0.25 时生球爆裂温度最高为 460 ℃，高于或低于此 PMC 配比爆裂温度都将降低。从生球爆裂温度考虑应选择 PMC 配比 0.25 的试验参数。亢立明^[9]研究铁矿粉粒度组成对球团爆裂温度的影响得出结论：随着粒径小于 75 μm 和小于 46 μm 比例的升高，球团的爆裂温度降低，而 PMC 矿粒径小于 75 μm 和小于 46 μm 比例均高于司家营矿粉，因此随 PMC 配比的增加，球团的爆裂温度降低。

3.1.2 PMC 配比对球团落下强度和抗压强度的影响

PMC 配比与落下强度和抗压强度的关系见图 6。

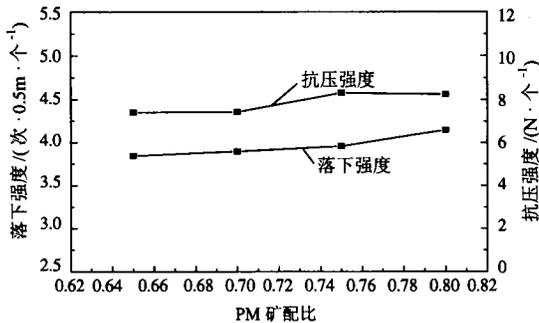


图 6 PMC 配比与生球落下强度、抗压强度的关系

Fig.6 Relationship among ratio of PMC, drop strength and crushing strength

由图 6 可知, 生球落下强度基本随 PMC 配比的增加而升高, 当 PMC 配比由 6.5:3.5 升高到 8.0:2.0 时, 落下强度由 3.85 次 /0.5m 个升高到 4.15 次 /0.5m 个。从落下强度考虑应选择 PMC 配比 7.5:2.5-8.0:2.0 的试验参数。

由图 6 可知, PMC 配比在 6.5:3.5-7.0:3.0 间生球抗压强度在 7.40 N/个左右, PMC 配比升到 7.5:2.5-8.0:2.0 时生球抗压强度在 8.30 N/个左右。从抗压强度考虑应选择 PMC 配比为 7.5:2.5 和 8.0:2.0 的试验参数。亢立明^[9]研究铁矿粉粒度组成对生球性能的影响得出结论: 随着粒径小于 75 μm 和小于 46 μm 比例的升高, 球团的落下强度和抗压强度均升高, 而 PMC 矿粒径小于 75 μm 和小于 46 μm 比例均高于司家营矿粉, 因此随 PMC 配比的增加, 球团的抗压强度和落下强度均升高。

3.1.3 灰色加权关联度法对 PMC 配比进行优化选择

生球 PMC 配比各指标权重见表 8。PMC 配比试验排序见表 9。

表 8 球团指标权重值
Table 8 Weighted value of pellets

项目	落下强度 / 次· (0.5m·个 ⁻¹)	抗压强度 / (N·个 ⁻¹)	成品率 / %	爆裂温度 / %
权重值	0.3	0.3	0.2	0.2

表 9 PMC 配比试验排序
Table 9 Rank of the different PMC ratio

编号	1#	2#	3#	4#
排序	4	3	2	1
相关系数	0.513	0.518	0.648	0.865

由表 9 可知, PMC 配比为 8.0:2.0 的球团质量最优。

3.2 PMC 配比对球团焙烧性质的影响

3.2.1 不同 PMC 配比条件下焙烧温度对球团抗压强度的影响

不同 PMC 配比球团矿的抗压强度随焙烧温度变化的曲线见图 7。

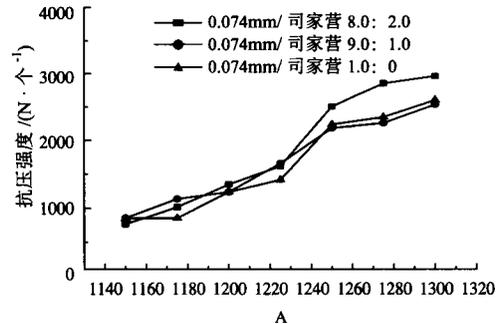


图 7 焙烧温度对球团矿抗压强度的影响

Fig. 7 Relationship between the roasting temperature and the crushing strength

由图 7 可知, 随焙烧温度的升高不同 PMC 配比的球团抗压强度均持续升高。焙烧温度由 1225℃ 升高到 1300℃ 时球团抗压强度上升幅度较大。因此对于 PMC 精粉添加司家营矿粉造球, 不同 PMC 配比的球团焙烧温度应高于 1250℃。

3.2.2 不同焙烧温度对 PMC 配比球团抗压强度的影响

不同焙烧温度对不同 PMC 配比球团矿抗压强度的影响曲线见图 8。

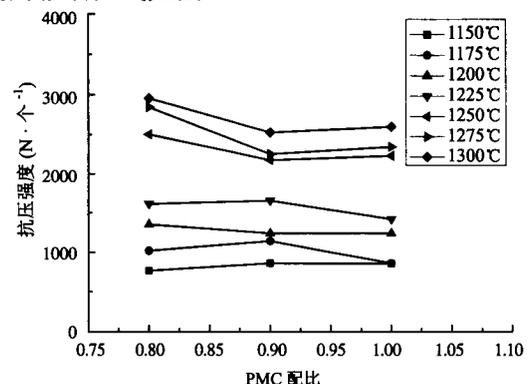


图 8 PMC 配比对不同焙烧温度球团矿抗压强度的影响
Fig. 8 Influence of different PMC ratio on the crushing strength in different roasting temperature

由图 8 可知, 当焙烧温度在 1150 ~ 1225℃ 之间时, 球团的抗压强度均在 2000 N/个以下, 普遍较低, 且球团抗压强度随 PMC 配比变化不大且规律性不强。郑红霞等研究结果表明: 低温时的恒温氧化或者升温时的氧化, 限制性环节是球团矿内磁铁矿颗粒的氧化^[10], 因此焙烧温度过低, 磁铁矿氧化不完全, 导致球团抗压强度较低。当焙

烧温度大于 1250℃ 时, 随 PMC 配比的升高抗压强度呈下降趋势。在球团矿的氧化焙烧过程中主要是 Fe₂O₃ 再结晶固结, 但同时也会生成一些低熔点化合物, 所以在球团矿中会有一些液相的存在。液相在球团矿固结中的作用主要是^[11]: (1) 加快结晶质点的扩散提高晶体长大速度; (2) 缩短矿石颗粒, 减小球团矿体积, 降低孔隙率, 进而使球团致密化; (3) 液相冷却凝固时粘结周围矿石颗粒。司家营熔性温度较低, 且液相流动能力强, 球团焙烧过程中易生成液相, 因此 PMC 精粉中配加少量司家营矿粉有利于增大球团强度。

3.2.2 对焙烧球团的矿相分析

利用蔡司高倍显微镜对焙烧温度分别为 1200℃ 和 1300℃ 不同 PMC 配比球团矿进行观察, 结果表明, 随着司家营矿粉配比增多, 焙烧温度升高, 球团内部连晶趋于均质化, 使球团矿强度增加。

4 结 论

(1) PMC 精粉整体的粒度较司家营矿粉粒度细, 增加 PMC 精粉配比对提高成球性有利。司家营的同化温度较低为 1230℃, PMC 的同化温度较高为 1370℃。PMC 的液相流动性指数较低, 司家营的液相流动性指数为 1.88, 液相流动能力较强。司家营连晶强度较低为 1402N / 试样, PMC 矿粉的连晶强度高于 1800 N / 个试样, 但整体来讲这 2 种矿均属于磁铁矿, 连晶固结能力强。

(2) 对于 PMC 精矿与司家营矿粉配矿生产的球团, 当粘结剂含量为 2%, 造球水分为 8.4%, 造球时间为 12 min 时, 综合考虑成球率、落下强度、抗压强度、爆裂温度, PMC 配比应选择 8.0:2.0。

(3) 对于 PMC 精粉添加司家营矿粉造球, 当预热温度为 925℃, 预热时间为 15 min, 焙烧时间为 20 min, 焙烧温度应选择 1300℃, PMC 配比选择 8.0:2.0。

(4) 综上所述, 当球团 PMC 配比为 8.0:2.0 时, 即生产出合格的生球和焙烧球团。

参考文献:

- [1] 刘曙光. 冀东铁精矿粉造球、氧化及焙烧机理的研究 [D]. 唐山: 河北理工大学, 2006.
- [2] 罗艳红. 磁铁精矿氧化球团的基础研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [3] 吕庆, 亢立明, 刘曙光, 等. 冀东磁铁精粉球团矿焙烧机理的研究 [J]. 钢铁研究, 2008, 36(1): 9-12.
- [4] 吕庆, 亢立明, 孙丽芬, 等. 冀东磁铁球团的氧化机理 [J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(8): 7-10.
- [5] 傅菊英, 李云涛, 姜昌伟, 等. 磁铁精矿球团氧化动力学 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 950-954.
- [6] 王昌安, 朱德庆. 润磨活化机理初探 [J]. 钢铁研究, 2003, 12: 23-27.
- [7] 王昌安, 罗廉明. 铁精矿粒度组成对球团质量的影响 [J]. 武汉化工学院学报, 2005, 27(2): 38-40.
- [8] 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.
- [9] 亢立明. 冀东磁铁精粉焙烧球团矿机理及工艺参数的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [10] 郑红霞, 汪琦, 潘喜峰. 磁铁球团矿氧化机理的研究 [J]. 烧结球团矿, 2003, 28(5): 13-16.
- [11] Taguchi K, Aketa K, Matsumoto T. 自熔性球团矿的生产及其高炉冶炼的性能 [J]. 国外链篦机—回转窑氧化球团矿译文集, 第 5 集. 渡口: 四川省渡口市科学技术情报研究所, 1978: 96-102.

Study on Producing Pellets with Different Ratio of PMC

Lv Qing, Tian Ye, Liu Xiaojie, Li Jianpeng, Lan Chenchen

(North China University of Science and Technology, TangShan, HeBei, China)

Abstract: The influence of different ratio of PMC whose particle-size is 0.074mm and Sijiaying mineral powder on pellet quality was studied to utilize PMC. Two kinds of iron's basic properties shows that pelletizing properties of two kinds of iron ore are good while PMC is better than Sijiaying. They are all mainly composed of magnetic, PMC' assimilation temperature, bond strength and crystal property are all higher than sijiaying while PMC liquid phase flow index is lower. Results show that, when the ratio of PMC increased from 0.65 to 0.80, the pelletizing ratio and drop strength increased, when the ratio is 0.80, they all reached to the maximum, while the decrepitation temperature decreased, when the ratio is 0.75, crushing strength reached up to the maximum; When roasting temperature changed from 1150 to 1225℃, the compressive strength of different ratio of PMC is below 2000 N/per, while the crushing strength increased with the roasting temperature increasing, as roasting temperature increased from 1225℃ to 1300℃, when the ratio of PMC is 0.80 and the roasting temperature is 1300℃ the crushing strength reached the maximum 2954.26 N/per.

Keywords: PMC; Pelletizing ratio; Oxidation roasting; Crushing strength