巴基斯坦某铁矿反浮选试验研究

高 平
(四川会理铅锌股份有限公司,四川 会理 615105)

摘 要: 巴基斯坦某铁矿中磁铁矿和赤铁矿的嵌布粒度细,通过磁选难以获得高品位铁精矿。为提高精矿品位,在对巴基斯坦某铁矿选矿工艺进行系统研究的基础上,确定"阶段磨矿-阶段选别"的工艺流程,全流程试验采用"两段磨矿,一段磁选抛尾,二段反浮选"方法提高精矿品位,获得了铁精矿品位为62.84%,铁回收率为70.04%的良好选矿指标。

关键词: 铁矿; 磁选; 阶段磨矿; 反浮选
中图分类号: TD951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2020)04-0065-06
doi: 10.13403/j.sjqt.2020.04.057

Experimental research on reverse flotation of an iron ore in Pakistan

Gao Ping
(*Sichuan Huili Zinc & Plumbum Co.,Ltd.,Huili* 615105,*Sichuan*)

Abstract The dissemination size of magnetite and hematite of an iron ore in Pakistan is fine,so it is difficult to obtain high-grade iron concentrate through magnetic separation. Based on the systematic mineral processing research to the beneficiation process of an iron ore in Pakistan,the process of stage grinding and stage separation is determined in order to improve the grade of concentrate. The process of improving its concentrate grade,that is, "two stages of grinding,one stage of magnetic separation and discarding tailings,and two stages of reverse flotation",is adopted during the whole process test,while a good beneficiation index with an iron grade of 62.84% and an iron recovery rate of 70.04% is obtained.

Key words iron ore; magnetic separation; stage grinding; reverse flotation

铁矿资源是支撑钢铁产业的重要原料来源,因此对铁矿石的合理利用与选矿研究对钢铁产业的可持续发展起着至关重要的作用。目前对磁铁矿型高品位铁矿的选矿回收主要采用磁选的方法,而赤铁矿型的铁矿资源由于存在品位低、嵌布关系复杂、矿物种类多[1-2]等问题,仅通过强磁选较难获得合格的精矿产品。因此加强关于赤铁矿的选矿研究对高效开发利用赤铁矿资源意义重大。对巴基斯坦某铁矿开展系统的可选性试验,重点研究反浮选对提高铁精矿品位的作用。

巴基斯坦某铁矿主要矿物以磁铁矿、赤铁矿为主,两者复杂连生或呈不规则状分布于脉石矿物中,嵌布粒度较细,需在-0.025 mm的磨矿细度条件下,90%以上的磁铁矿、赤铁矿才能获得较好的解离。针对脉石矿物质量分数高、磁铁矿和赤铁矿的嵌布粒度细、仅通过强磁选的方法难以获得高品位的赤铁精矿等问题,采用"阶段磨矿-阶段选别"的选矿工艺流程,一段磨矿后进行弱磁选-强磁选及时抛弃合格尾矿,从而减少二段磨矿的入磨矿量,二段再磨后进行反浮选提高精矿品位。

1 原矿性质

1.1 矿石的成分分析

矿石的主要化学成分如表1所示,铁的化学物相、主要矿物的质量分数如表2所示。

由表1、2可以看出:矿石中Fe的品位达

收稿日期: 2020-01-10
作者简介: 高 平(1968—),男,工程师,主要从事选矿生产技术管理方面的工作。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 矿石的主要化学成分(质量分数) %

Fe	FeO	SiO_2	S	P	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	Ba	TiO_2
27.80	9.70	38.21	0.69	0.12	8.74	2.15	2.06	3.31	1.27	0.031	0.39

表2 矿石中铁的化学物相分析结果(质量分数) %

项目	磁铁矿	赤铁矿	假象赤铁矿	硫化铁	碳酸铁	硅酸铁	Fe
质量分数	12.12	10.03	0.72	0.46	3.04	1.43	27.80
Fe分布率	43.60	36.08	2.59	1.65	10.94	5.14	100.00

到27.80%，可以通过选矿的方法进行回收；需要剔除的脉石组分主要是SiO_2和Al_2O_3，有害杂质S、P的质量分数分别为0.69%、0.12%，在选矿过程中需要注意它们在铁精矿中的质量分数；矿石中的Fe主要赋存于磁铁矿和赤铁矿中，其Fe分布率分别为43.60%、36.08%；赋存于碳酸铁中的Fe分布率为10.94%；赋存于硅酸铁、假象赤铁矿及硫化铁中的Fe较少，其Fe分布率分别为5.14%、2.59%、1.65%。

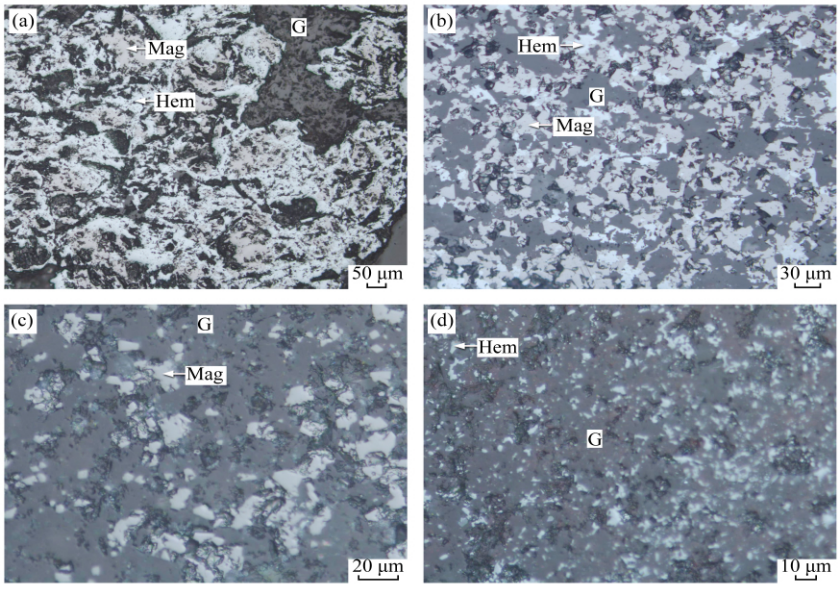
矿石的矿物组成中的金属矿物主要是磁铁矿、赤铁矿等，脉石矿物以石英、绢云母、长石为主。

1.2 主要矿物的嵌布特征

采用镜下观察分析的方法对有用矿物的嵌布特征进行分析，结果如图1所示。由图1可知：赤铁矿与磁铁矿相互交代包裹，两者复杂连生(图1(a))；磁铁矿和赤铁矿呈细粒状分布于脉石矿物中，分布较密集(图1(b))；磁铁矿呈细粒状分布于脉石矿物中，其粒度小于20 μm(图1(c))；赤铁矿呈微细粒状分布于脉石矿物中，分布均匀且较密集，粒度小于10 μm(图1(d))。

镜下分析表明磁铁矿在偏光显微镜下呈灰色带棕色色调，磁铁矿被赤铁矿沿其周边的裂隙交代；磁铁矿呈粒状、不规则状分布于脉石中，粒度主要在0.01~0.20 mm。赤铁矿在镜下呈灰白色带蓝色色调，产出形式主要有两种：赤铁矿呈不规则状沿磁铁矿周边的裂隙交代或呈乳滴状分布于脉石中。其中部分赤铁矿的嵌布粒度细小(粒度为0.001~0.020 mm左右)，导致其与脉石矿物解离困难，将影响铁精矿品位。

从嵌布粒度来看，在-0.025 mm的磨矿细度条件下，90%以上的磁铁矿、赤铁矿可获得较好的解离。



Mag—磁铁矿；Hem—赤铁矿；G—脉石矿物。

图1 赤铁矿、磁铁矿及脉石矿物的嵌布关系

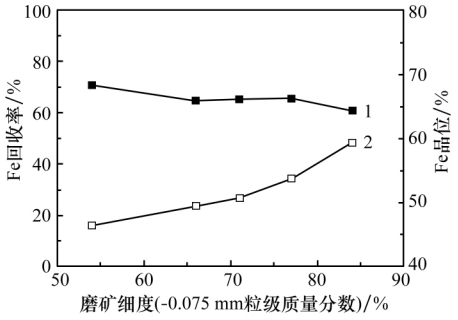
(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　选矿试验

由原矿的工艺矿物学分析可知，矿石中可通过选矿方法进行回收的主要元素是 Fe，其品位为 27.80%，原矿中 Fe 主要以磁铁矿和赤铁矿的形式分布，磁铁矿可通过弱磁选的方法回收[1]，赤铁矿可通过强磁选、重选、反浮选的方法进行回收[2]。磁铁矿、赤铁矿的嵌布粒度较细，需在 -0.025 mm 的磨矿细度条件下，90% 以上的磁铁矿、赤铁矿才可获得较好的解离。根据矿石性质可知，其适合采用弱磁 - 强磁的选矿工艺流程，而弱磁 - 强磁 - 反浮选工艺流程是目前比较先进的铁矿选别方法[3-5]，因此采用“阶段磨矿 - 阶段选别 - 弱磁选 - 强磁选 - 反浮选”的选矿工艺流程。重点进行弱磁 - 强磁 - 反浮选试验方案的研究，一段磁选抛尾，二段反浮选提高精矿品位。

2.1　磨矿细度试验

在弱磁选磁场强度为 1 300 Oe[5] 的条件下，进行一段选别的磨矿细度试验，以选择合适的磨矿细度，结果如图 2 所示。从图 2 可看出，随着磨矿细度的增加，弱磁选精矿产品的 Fe 品位逐渐提高，而Fe回收率随之下降。从品位和回收率两者综合考虑，一段磨矿细度定为(-0.075 mm 粒级占比) 71% 比较合适。

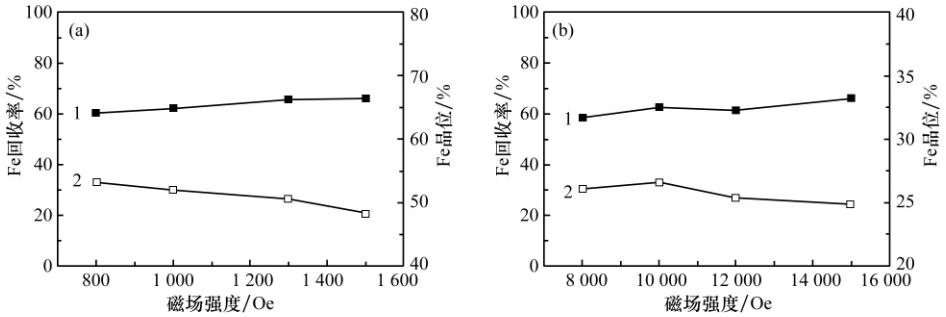


1—Fe 回收率；2—Fe 品位。

图 2　磨矿细度试验结果

2.2　磁选试验

在确定磨矿细度(-0.075 mm 粒级占比) 为 71% 的情况下，考查不同磁场强度对磁选结果的影响。矿石经磨矿后先进行弱磁选得到磁铁矿粗精矿产品[6-8]，尾矿再进行强磁选得到赤铁矿粗精矿产品[9-11]，试验结果如图 3 所示，其中强磁选试验中的回收率为作业回收率。从图 3 可以看出，不管是弱磁精矿产品，还是强磁精矿产品，两者的品位均随磁场强度的增加而下降，Fe 回收率则略有增加。从 Fe 品位和 Fe 回收率的角度综合考虑，选择弱磁选磁场强度为1 300 Oe，强磁选磁场强度为 10 000 Oe 比较合适。



(a) 弱磁选；(b) 强磁选

1—Fe 回收率；2—Fe 品位。

图 3　磁场强度试验结果

2.3　反浮选试验

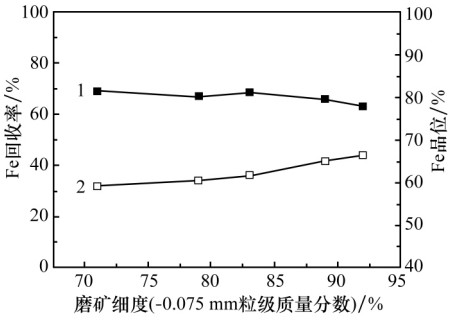
一段磁选获得的铁精矿产品均达不到标准质量要求，因此为了提高精矿品位，同时简化流程，考虑将弱磁精矿和强磁精矿合并进行反浮选。确定弱磁选 - 强磁选 - 反浮选的原则流程后，反浮选试验研究主要考察捕收剂种类及用量、调整剂用量对反浮选过程的影响。

2.3.1　二段磨矿细度试验

为反浮选过程选择合适的磨矿细度，进行二段磨矿细度试验，浮选药剂使用碳酸钠作为 pH 调整剂，将可溶性淀粉进行苛化处理后形成苛性淀粉作为铁矿物抑制剂[12]，使用 CA - 3 作

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为反浮选过程中的捕收剂，流程采用“一粗一精一扫”，试验结果如图4所示。由图4可知：当 -0.045 mm 粒级占比为89%时，其Fe回收率相对较低，但Fe品位较高，说明只有在较高的磨矿细度条件下，才能获得高品位的铁精矿。此后磨矿细度增加到 -0.045 mm 粒级占比为92%，精矿Fe品位增加幅度不大，而Fe回收率下降幅度明显。因此二段磨矿的最佳粒度条件定为(-0.045 mm 粒级占比)89%，在该条件下获得的铁精Fe品位为65.09%、Fe回收率为66.13%。



1—Fe回收率；2—Fe品位。

图4 二段磨矿细度试验结果

2.3.2 捕收剂种类试验

在二段磨矿细度(-0.045 mm 粒级占比)为89%，碳酸钠用量为500 g/t，苛性淀粉用量为1 000 g/t的条件下，选择几种常见的铁矿石反浮选捕收剂(R903、CK-1、RA715、CA-3)进行种类试验，结果如图5所示。其中：R903和CK-1是以油酸为原料，经过皂化反应和乳化反应后得到的脂肪酸类阴离子型捕收剂；RA715是以塔尔油为原料，经过氯化反应和氧化反应后得到的氯化脂肪酸捕收剂；CA-3是以十六胺、乙二胺、乙醇为原料加工处理后的产物，其是用于铁矿反浮选的改性阳离子捕收剂。由图5可知：当选用R903作为反浮选捕收剂时，虽然精矿的Fe回收率较高，但精矿Fe品位较低，未达到铁精矿Fe品位要求，因为R903是脂肪酸类药剂，选择性较差，需要添加 Ca^{2+} 活化部分可浮性差的石英；使用RA715、CK-1和CA-3时，获得精矿Fe品位较高。分析原因认为：铁矿石用阳离子捕收剂反浮选，一般适用于成分较复杂，入选品位高的含铁矿石的浮选；改性胺类捕收剂，如CA-3对石英等脉石矿物具有较好的选择性捕收作用，不需要添加多价金属离子进行活化，对矿浆的pH要求不高，只要求弱碱性介质，而使用脂肪酸等阴离子捕收剂则需要添加活化剂和在pH=11左右的环境中进行浮选，因此R903、RA715、CK-1等阴离子捕收剂在弱碱性介质中对未经活化的石英捕收效果差。

综合比较，CA-3得到的精矿Fe品位最高，回收率均也较高，选别效果较好。从二段反浮选提高品位的角度考虑，确定使用CA-3作为反浮选捕收剂。

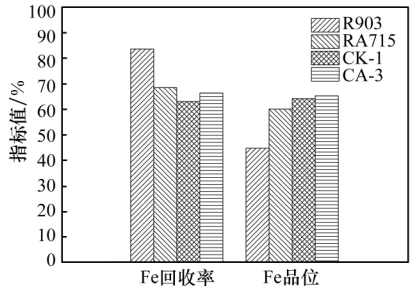
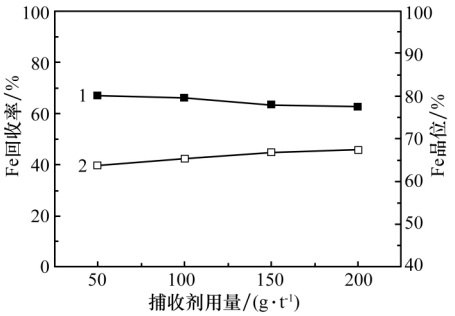


图5 捕收剂种类试验结果

2.3.3 捕收剂用量试验

捕收剂用量试验结果如图6所示。由图6可看出：随着捕收剂用量的增加，浮选精矿的Fe品位小幅度增加，当捕收剂用量为100 g/t时，选别指标较好；继续加大捕收剂用量时，Fe回收率下降较快，这是因为捕收剂用量增加时泡沫产率随之增加，机械夹带严重，造成铁精矿Fe回收率下降。因此捕收剂CA-3用量定为100 g/t为最佳条件。



1—Fe回收率；2—Fe品位。

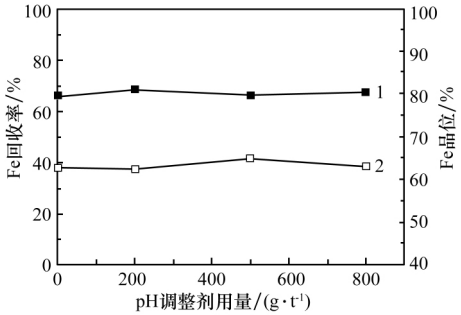
图6 捕收剂用量试验结果

2.3.4 调整剂用量试验

调整剂用量试验结果如图7所示。由图7

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可知：适宜的 pH 对浮选的指标影响较显著，当 Na_2CO_3 用量为 500 g/t 时，Fe 品位达到最高；再增加 Na_2CO_3 用量时，Fe 品位反而下降。因此 Na_2CO_3 用量选择为 500 g/t 较合适，此时矿浆的 pH = 8。

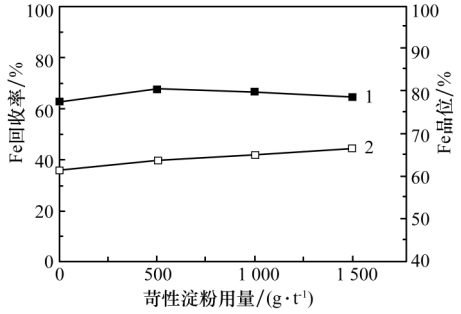


1—Fe 回收率；2—Fe 品位。

图 7　pH 调整剂用量试验结果

2.3.5　抑制剂用量试验

抑制剂用量试验结果如图 8 所示。由图 8 可知：当不添加抑制剂苛性淀粉时，获得的精矿的 Fe 品位和 Fe 回收率均较低；随着苛性淀粉用量的增加，浮选精矿 Fe 品位升高，回收率略有减少。因此综合考虑，抑制剂苛性淀粉用量定为 1 000 g/t 较为合适，此时苛性淀粉对铁矿物抑制效果较好。



1—Fe 回收率；2—Fe 品位。

图 8　苛性淀粉用量试验结果

2.4　全流程闭路试验

确定采用弱磁－强磁－反浮选的选别工艺流程，再根据两段条件试验所确定的最佳条件，进行全流程闭路试验，试验条件如图 9 所示，试验结果如表 3 所示。通过“两段磨矿，一段磁选，二段反浮选”的选别流程试验，获得 Fe 品位为 62.84%、Fe 回收率为 70.04% 的铁精矿产品。对推荐工艺流程所得到的精矿产品进行产品检查，精矿产品达到了铁精矿的质量标准要求，其中杂质 SiO_2、S 和 P 的质量分数均在标准范围内。

表 3　全流程试验结果(质量分数)　%

产品名称	产率	Fe 品位	Fe 回收率
精矿	31.26	62.84	70.04
尾矿	68.74	12.23	29.96
原矿	100.00	28.05	100.00

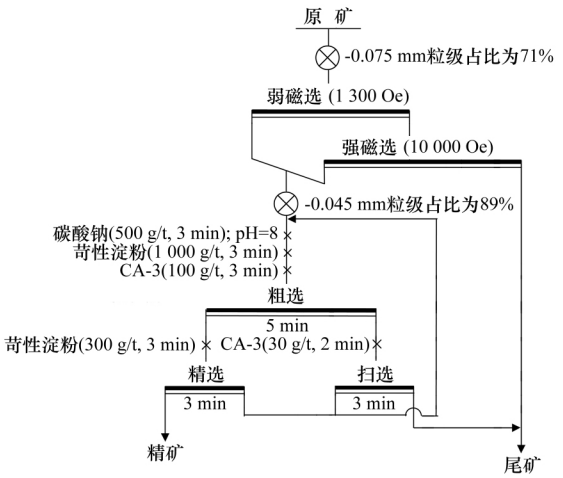


图 9　全流程试验工艺条件及工艺流程

3　结　论

(1) 由原矿工艺矿物学分析可知，巴基斯坦某铁矿中可供选矿回收的主要元素是 Fe，其品位为 27.80%，目的矿物主要是磁铁矿、赤铁矿，脉石矿物主要是石英、绢云母、长石。原矿中的 Fe 主要以磁铁矿和赤铁矿的形式分布，磁铁矿、赤铁矿的嵌布粒度较细，需在 －0.025 mm 的磨矿细度条件下，90% 以上的磁铁矿、赤铁矿才可获得较好的解离。

(2) 根据矿石性质特点确定采用“阶段磨矿－阶段选别－弱磁选－强磁选－反浮选”的选矿工艺流程，该工艺的特点：①使用阶段磨矿、阶段选别的工艺流程，一段磨矿后进行弱磁选－强磁选及时抛弃合格尾矿，减少二段磨矿量，二段通过反浮选提高精矿铁品位；②反浮选使用了选择性良好的捕收剂 CA－3，其对矿浆 pH 要求不高，只需要弱碱性环境，也不需要添加多价金属离子进行活化，减少了药剂的种类和用量。

(3) 通过小型试验研究，全流程闭路试验

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用“两段磨矿，一段磁选，二段反浮选－磁选”的工艺流程，获得铁精矿的Fe品位为62.84%，Fe回收率为70.04%的选矿指标。

参考文献

[1] 廖祥. 鄂西某高磷鲕状赤铁矿提铁降磷试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.

[2] 许满兴. 中国鲕状赤铁矿资源的特征与开发利用[J]. 烧结球团,2011,36(3):24－27.

[3] 刘太合,徐大波. 关宝山铁矿石工艺矿物学分析[J]. 现代矿业,2018,34(6):136－139.

[4] 彭海辉,陈泰年. 安徽霍邱刘寺铁矿反浮选试验工艺研究[J]. 安徽地质,2019,29(3):231－234;240.

[5] 吴师金,潘峰岗,陈昊庆. 江西某低品位铁矿主要矿物特征和选矿试验研究[J]. 中国金属通报,2019(10):65－66.

[6] 钟乐乐. 中东某鲕状赤铁矿选矿工艺试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

[7] 杨大兵,吴明,刘曙,等. 反浮选工艺对程潮铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团,2009,34(6):29－31.

[8] 高文义. 吉林临江羚羊铁矿石分选基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.

[9] 王亚琴. 河北某铁尾矿工艺矿物学研究[J]. 现代矿业,2018,34(6):134－135;139.

[10] 邓小龙. 从山东某铁尾矿中回收铁精矿的试验研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2018.

[11] 焦科诚. 国外某高磷硅鲕状铁矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程,2018,38(4):65－68.

(上接第54页)

[4] 利敏,王纪英,李祥. 带式焙烧机为何在我国发展缓慢[N]. 中国冶金报,2011－12－15(B02).

[5] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.

[6] 叶恒棣,范晓慧. 烧结球团节能减排先进技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.

[7] 刘瑚. 缔造高效智能球团工厂的最先进球团技术[R]. 上海:2019年全国烧结球团技术交流年会(第43届),2019.

[8] 周浩宇,贺新华,向锡,等. 氧化球团带式焙烧机热工数学模型的研发与应用[J]. 世界有色金属,2017(9月下):59－60.

[9] 叶恒棣,王兆才,刘前,等. 烧结烟气及污染物减量化技术研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):60－67.

[10] 解海波. 504 m^2 带式焙烧机设计理论模型的分析论证[J]. 中国冶金,2015,25(2):21－28.

[11] 叶匡吾. 烧结过程、球团过程的能量流和优化选择[J]. 烧结球团,2010,35(10):1－6.

[12] 王海东,余海钊,范晓慧,等. 铁矿烧结过程能耗数学模型的研究进展[J]. 钢铁,2018,53(10):1－7.

[13] 朱德庆,唐艳云,Vinicius Mendes,等. 高压辊磨预处理强化巴西镜铁矿球团[J]. 北京科技大学学报,2009,31(1):30－35.

[14] 宋文武,朱辛洲,刘福来,等. 秘细粉高压辊磨预处理研究与实践[J]. 烧结球团,40(5):32－34.

[15] 朱德庆,杨聪聪,潘建,等. 福建三钢带式焙烧机球团工艺研究[J]. 烧结球团,2020,45(4):27－34.

[16] 嵇建国,杨群,谢永生. 新型有机黏结剂在球团生产中的应用[J]. 烧结球团,2011,36(5):30－32.

[17] 白凯凯,罗果萍,王永斌,等. 有机添加剂对包钢巴润精矿球团矿冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2017,42(3):54－57.

[18] 谢小林,段婷,郑富强,等. 改性复合黏结剂制备磁铁矿氧化球团研究[J]. 金属矿山,2018(1):79－83.

[19] 刘杰,宫作岩,周明顺,等. 鞍钢球团生产配加有机黏结剂的研究[J]. 烧结球团,2015,40(5):28－31.

[20] 刘周利. 包钢带式焙烧机提高自产精矿配比试验研究[J]. 包钢科技,2018,44(2):41－44.

[21] 李新宇,张建良,刘依然,等. 带式焙烧机生产磁－赤型球团矿焙烧试验研究[J]. 烧结球团,2015,40(4):28－32.

[22] 潘建,王硕,甘牧原,等. 带式焙烧机制备镁质球团的工艺及机理研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):27－33.

[23] 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.

[22] 廖凯. 包钢不同生产工艺的镁质球团矿试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2014.

[25] 邬虎林,薛向欣,陈革,等. 含氟氧化镁球团矿的研究与实践[J]. 钢铁,2005,40(7):9－12;16.

[26] 李国玮,夏雷阁,青格勒,等. 京唐带式焙烧机原料方案及热工制度研究[J]. 烧结球团,2011,36(2):20－24.

[27] 夏雷阁,苏步新,李新宇,等. 首钢504 m^2 带式焙烧机热工制度的试验研究[J]. 矿冶工程,2014,34(3):69－75.

[28] 朱丛笑. 球团焙烧机温度控制的设计与实现[D]. 沈阳:东北大学,2014.

[29] 刘丕亮,臧日浩,崔桂梅,等. 带式焙烧机焙烧温度分析研究[J]. 烧结球团,2018,43(2):29－32;36.

[30] 陈子罗,韩基祥,任伟. 数值模拟在带式焙烧机球团工艺上的应用[J]. 世界金属导报,2019－4－16(B07).

[31] 胡德胜,刘前,张家元,等. 带式焙烧机燃烧室二次风道结构仿真优化研究[J]. 烧结球团,2017,42(3):50－53;58.

[32] 陈子罗,韩基祥,任伟. 带式焙烧机布料筛分系统离散元仿真研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):45－49;78.

[33] 刘丕亮,臧日浩,崔桂梅,等. 基于案例推理的球团质量预测模型研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):22－26;57.

[34] 崔桂梅,徐朝伟,陈智辉. 基于主成分分析法的球团矿质量综合评价[J]. 烧结球团,2017,42(5):29－34;50.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net