

无底柱分段崩落法开采上覆岩层力学参数研究

陈清运^{1,2}, 杨从兵³, 王水平⁴, 张电吉^{1,2}

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074;

2. 磷资源开发利用教育部工程研究中心, 湖北, 武汉 430074;

3. 武钢集团矿业有限责任公司程潮铁矿, 湖北 鄂州 436000;

4. 武钢集团矿业有限责任公司金山店铁矿, 湖北 大冶 435116)

摘要:受扰动的岩体力学参数是大型岩土工程设计和稳定性分析的基础与关键. 本文采用地质力学分类法(RMR)、经验强度准则(GSI)、现场承压板试验与室内结构面强度试验等方法, 综合确定金山店铁矿崩落法开采上覆岩层力学参数. 并依据西Ⅰ采区工程地质、开采技术条件和岩体力学参数建立3DFLAC计算模型, 验证岩层力学参数的可靠性. 当开采到-141.5 m水平时, 地表测点变形观测值与计算值在变化规律上一致, 误差在允许范围内. 因此, 采用上述方法确定的岩体力学参数可以用于金山店铁矿东区地下开采的地表变形规律研究.

关键词:无底柱分段崩落法; 上覆岩层; 力学参数

中图分类号: TD853

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.07.017

0 引言

岩体是具有一定结构、赋存于一定地质环境中的地质体. 岩体特性除受岩石力学性质、结构面力学性质和地质环境等因素影响外, 还存在空间尺寸效应. 岩体力学参数是进行岩土工程设计和稳定性分析的基础和关键, 但是岩体力学参数不像岩石力学参数那样容易获取, 确定受开采扰动的岩层力学参数就更难了. 目前经常采用的方法有经验折减系数法、大型原位试验法、位移反分析法和岩体分类法等.

经验折减系数法是在对岩体节理性状定量描述的基础上, 通过弱化岩石强度求取岩体强度, 虽然方法简单, 指标也易于获得, 但是精度常常达不到岩土工程设计和稳定法分析的要求. 大型岩体原位试验, 包括原位承压板变形试验和剪切试验, 用来研究岩体的变形特性、尺寸效应和软弱结构面力学性质等, 但是试验费用高, 次数有限. 位移反分析法以工程开挖过程中围岩变形观测数据为基础, 通过反演分析获得岩体力学参数和环境力学参数, 因综合了工程岩体各方面的信息, 具有重要的参考价值. 岩体分类法估计岩体力学参数是目前发展最快应用也最广的方法, Bieniawski

(1976, 1989)提出了地质岩体质量指标(RMR), 并依此进行地质岩体分类, 对不同的类别分别赋予不同的岩体力学参数值. Hoek和Brown(1980), 基于大量的试验数据, 提出了岩体经验强度准则, 建立了岩体的材料常数 m 、 s 、 a 与岩体质量指标之间的联系, 提出了一套估计岩体力学参数的方法. 随后, Hoek和Brown(1994, 2004)提出了以地质强度指标(GSI)为基础的广义经验强度准则, 提出了一套岩体分类和力学参数估计的方法^[1-2].

金山店铁矿东区地表建筑物与构筑物较多, 地下开采对地表影响范围与程度是矿山关注的重要问题, 正确确定岩层力学参数是合理评价地下开采岩层稳定性的关键.

1 工程地质背景

金山店铁矿张福山矿床以25勘探线为界将矿区分为东西两大采区, 在西采区又以16线为界, 分为西Ⅰ采区和西Ⅱ采区. 西Ⅰ采区的工程地质特征简述如下:

矿区地层主要由三迭系中—上统(T_{2-3})及侏罗系中—下统(J_{1-2w})地层组成. 其中分布最广的地层是三迭系中—上统薄圻群(T_{2-3PI}), 为一套砂页岩组合地层, 分布于矿体上盘. 对西Ⅰ采区影响

收稿日期: 2009-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 50974031)

作者简介: 陈清运(1964-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士. 研究方向: 采矿工程的教学与研究.

较大的地质构造有 F103 和 F₁₀₄ 断层。F₁₀₃ 断层走向北西, 倾向南西, 切割矿化带及矿体, 为一压扭性断层, 断层较紧闭, 局部充填糜棱岩。F₁₀₄ 断层分布于矿体上盘与蒲圻群地层的接触界面上, 断层走向与矿体走向近一致, 倾向南, 倾角 65 ~ 85°, 上陡下缓, 具有压扭性特征, 断裂带中发育有碎裂岩和糜棱岩。岩浆岩在区内以石英闪长岩分布最广, 组成矿体下盘围岩。

西 I 采区矿体特征为: I 号矿体是西 I 采区的主要矿体, 东西长 350 m, 走向 77 ~ 126°, 倾向 197 ~ 210°, 倾角 63 ~ 85°, 矿体平均厚 24.90 m。矿体出露地表, 呈似层状、脉状, 分枝复合现象明显。III 号矿体与 I 号矿体基本平行, 走向长度为 120 m, 平均厚度 15 m, 两矿体平均间距为 35 m, III 号矿体位于 I 号矿体的上盘。

此前对 19 ~ 23 - 1 勘探线之间出露地表的矿

体进行了露天开采, 最终开采境界为 +40 m 水平, 并逐年对露天坑进行了回填, 矿山目前采用无底柱分段崩落法进行回采。

2 上覆岩层力学参数研究

2.1 岩体力学参数

a. 基于岩体质量指标 (*RMR*) 的岩体力学参数估计。Bicniawski 地质力学分类法采用了 5 个分类参数: 完整岩石材料的强度 (或岩石点荷载强度指标)、岩石质量指标 (*RQD*)、节理间距、节理状态和地下水条件。因每个参数对岩体性状影响不同, 赋予了不同的权值, 参数指标之和为岩体质量指标, 根据岩体质量指标将岩体分五级。Serafim 和 Pereira (1983), 基于 Hoek-Brown 岩体经验强度准则, 根据岩体质量指标 (*RMR*), 提出了估计岩体强度的计算方法, 见表 1。

表 1 RMR 法估计岩体力学参数计算体系

Table 1 Computing suite for estimating rock mass mechanical parameters using *RMR* method

符号	名称及意义	计算方法	备注
m_i	完整岩石材料系数	查表	见文献[1]
m	岩石材料系数	$m = m_i \exp\left(\frac{RMR-100}{14}\right)$ $m = m_i \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right)$	对扰动岩体 对未扰动岩体
s	岩石材料系数	$s = \exp\left(\frac{RMR-100}{6}\right)$ $s = \exp\left(\frac{RMR-100}{9}\right)$	对扰动岩体 对未扰动岩体
II-B	Hoek-Brown 岩体经验强度准则	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + (m\sigma'_3\sigma_c + s\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}}$	
$\sigma_{c \max}$	岩体单轴抗压强度 (MPa)	$\sigma_{c \max} = \sigma_c \sqrt{s}$	
$\sigma_{t \max}$	岩体单轴抗拉强度 (MPa)	$\sigma_{t \max} = \frac{\sigma_c}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s})$	
σ'_{ni}	岩体破坏面上的正应力 (MPa)	在岩体屈服强度内等间距取值	$i = 1 \sim n$
τ'_i	岩体破坏面上的剪应力 (MPa)	$\begin{cases} h = 1 + \frac{16(m\sigma'_{ni} + s\sigma_c)}{3m^2\sigma_c} \\ \theta = \frac{90^\circ + \arctan(1/\sqrt{h^3 - 1})}{3} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{1}{4h\cos^2\theta - 1}\right) \\ \tau'_i = \frac{c(\tan\varphi - \cos\varphi)m\sigma_c}{8} \end{cases}$	$i = 1 \sim n$
φ	岩体内摩擦角 (°)	$\varphi = \arctan\left[\frac{n \sum_1^n \sigma'_{ni} \tau'_i - \left(\sum_1^n \sigma'_{ni}\right) \left(\sum_1^n \tau'_i\right)}{n \sum_1^n (\sigma'_{ni})^2 - \left(\sum_1^n \sigma'_{ni}\right)^2}\right]$	
c	岩体粘结力 (MPa)	$c = \frac{\sum_1^n \tau'_i}{n} - \frac{\sum_1^n \sigma'_{ni}}{n} \tan\varphi$	

其中: σ'_1 —破坏时有效最大主应力, MPa; σ'_3 —破坏时有效最小主应力, MPa;
 σ_c —完整岩石单轴饱和抗压强度, MPa; *RMR*—岩体质量指标; *n*—数据组数。

根据表 1, 编制相应程序进行计算, 结果见表 4.

b. 基于地质强度指标(GSI)的岩体力学参数估计. 1995年, Hoek和Brown提出了地质强度指标GSI, 岩体的地质强度指标与岩体结构、岩块的嵌锁状态和岩体中不连续面的性状有关. 由于该法在岩体结构等级和不连续面性状等级的划分上过于粗糙, Sonmez和Ulusay对这两个指标进行了

细化和定量化, 同时考虑不同的开挖方式对岩体地质强度指标GSI的影响, 提出了岩体地质强度指标GSI的修正方法.

随后, Hoek提出了适用范围更广的Hoek-Brown岩体经验强度准则, 并运用Balmer(1952)等以Mohr-Coulomb准则表示岩体力学极限平衡数学模型公式, 提出了估计岩体强度公式, 见表2. 根据表2, 编制相应程序进行计算, 结果见表4.

表2 GSI法估计岩体力学参数计算体系

符号	名称	计算方法	备注
m_i	完整岩石材料系数	查表	文献[1]
GSI	岩体地质强度指标	依SCR和SR等级查表求得 $GSI = RMR_{76}$ $GSI = RMR_{89} - 5$	$RMR_{76} > 18$ $RMR_{89} > 25$
m_b	岩体强度特性系数	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{14}\right)$	扰动
s	岩石材料系数	$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{6}\right)$ $s = 0$	$GSI > 25, a = 0.5$ 扰动 $GSI < 25, \alpha = 0.65 - \frac{GSI}{200}$
$\sigma_c \max$	岩体单轴抗压强度(MPa)	$\sigma_c \max = \sigma_c s^a$	
$\sigma_t \max$	岩体单轴抗拉强度(MPa)	$\sigma_t \max = \frac{\sigma_c}{2} \left(m - \sqrt{m^2 + 4s} \right)$ $\sigma_t \max = 0$	$GSI > 25$ $GSI < 25$
II-B	Hoek-Brown 岩体经验强度准则	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a$	1995年
σ'_{3i}	岩体破坏时最小主应力(MPa)	在岩体屈服强度内等间距取值	$i = 1 \sim n$
σ'_{1i}	岩体破坏时最大主应力(MPa)	依Hoek-Brown岩体经验强度准则求得	$i = 1 \sim n$
σ'_{ni}	岩体破坏面上的正应力(MPa)	$\sigma'_{ni} = \sigma'_{3i} + \frac{\sigma'_{1i} - \sigma'_{3i}}{\frac{\partial \sigma'_{1i}}{\partial \sigma'_{3i}} + 1}$	$GSI \geq 25, a = 0.5$ $GSI < 25, s = 0$ $i = 1 \sim n$
τ'_i	岩体破坏面上的剪应力(MPa)	$\tau'_i = (\sigma'_{ni} - \sigma'_{3i}) \sqrt{\frac{\partial \sigma'_{1i}}{\partial \sigma'_{3i}}}$	$i = 1 \sim n$
φ	岩体内摩擦角($^\circ$)	$\varphi = \arctan \left[\frac{n \sum_{i=1}^n \sigma'_{ni} \tau'_i - \left(\sum_{i=1}^n \sigma'_{ni} \sum_{i=1}^n \tau'_i \right)}{n \sum_{i=1}^n (\sigma'_{ni})^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma'_{ni} \right)^2} \right]$	
c	岩体粘结力(MPa)	$c = \frac{\sum_{i=1}^n \tau'_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n \sigma'_{ni}}{n} \tan \varphi$	

其中: σ'_1 —破坏时有效最大主应力, MPa; σ'_3 —破坏时有效最小主应力, MPa;
 σ_c —完整岩石单轴饱和抗压强度, MPa;RMR—岩体质量指标;n—数据组数.

c. 原位变形强度测试^[3]. 现场承压板变形试验是为了确定角岩和石英闪长岩变形模量, 这两种岩石组成金山店铁矿上下盘主要围岩, 其变形模量是影响岩层移动的主要因素. 原位变形试验选在-130m水平的7#穿脉中进行的, 上盘角页岩中选一点, 下盘石英闪长岩中选一点. 试洞准备: 上盘在距矿体40m处的角岩中, 下盘在距矿体50

m处的石英闪长岩中, 于巷道壁上开挖出宽×高×深=1.5m×1.4m×2.0m的试洞. 仪器设备: 加压系统有液压千斤顶(150T)、油压泵、管路、压力表; 测量系统有测表支架、千分表、百分表、磁铁表架、测量标点、基准工字钢梁; 传力系统有刚性承压板(Φ50cm)、垫板、传力柱、楔形块.

依据所测得的应力—应变曲线及计算公式(1),

即可求得岩体的变形(弹性)模量,试验结果见表3.

$$E_m = \frac{\pi(1-\mu^2)pd}{4w_0} \quad (1)$$

式(1)中: E_m —岩体变形(弹性)模量(Pa);

w_0 —岩体变形(m);

p —承压板上单位面积压力(Pa);

d —承压板直径(m);

μ —泊松比.

表3 现场承压板变形试验结果

Table 3 Result of the on-spot supporting-plate deformation test

岩性	弹性模量 E /MPa	变形模量 E_m /MPa	备注
角页岩	8 439.8	4 730.5	-130 m水平,7穿脉, 上盘距矿体40 m
石英闪长岩	13 321.1	7 581.7	-130 m水平,7穿脉, 下盘距矿体50 m

表4 岩体力学参数估计结果

Table 4 Result of the rock mass mechanics parameters calculated

岩体类型	基础数据			岩体强度(RMR)		岩体强度(GSI)		变形模量 E_m /GPa
	m_i	RMR	σ_c /MPa	c /MPa	φ /($^\circ$)	c /MPa	φ /($^\circ$)	
角页岩 A ₁	19	50	94.15	0.27	53.61	0.49	45.39	4.73
角页岩 A ₂	19	46	94.15	0.20	54.02	0.35	45.93	4.73
大理岩 B	9	42	70.86	0.13	44.08	0.18	39.19	4.45*
石英闪长岩 C ₁	28	60	92.75	0.62	55.84	0.79	53.02	7.58
石英闪长岩 C ₂	28	50	92.75	0.45	54.02	0.61	46.82	7.58
矿体 D	22	59	42.46	0.29	53.92	0.50	45.75	4.02*

注:*为岩石室内试验数据并适当折减后的结果.

由表4可知,采用地质力学分类法和经验强度准则法进行岩体力学参数估计,其值有一定的误差,取算术平均数,结果见表5.

表5 矿区岩体力学参数研究结果

Table 5 Result from study of the rock mass mechanics parameters in the mining zone

岩性	容重/ kN/m ³	抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa	变形模量/ GPa	μ	抗剪强度		
						C /MPa	φ /($^\circ$)	
角页岩	A ₁	26.3	94.15	0.4	4.73	0.27	0.38	50
	A ₂	26.3	94.15	0.4	4.73	0.27	0.28	50
大理岩	B	26.7	70.86	0.4	4.45	0.24	0.16	42
石英闪长岩	C ₁	25.8	92.75	0.4	7.58	0.24	0.71	54
	C ₂	25.8	92.75	0.4	7.58	0.27	0.53	50
矿体	D	35.1	42.46	0.1	4.02	0.20	0.39	37

2.2 结构面力学参数研究

结构面力学参数的研究是岩体力学参数研究的一个重要组成部分.经对张福山矿区几种主要

岩石的结构面进行了力学参数的测定,其结果如表6所示^[4,5].

表6 岩体结构面力学参数

Table 6 Structural plane mechanics parameters of the rock mass

岩性	峰值抗剪强度		残余抗剪强度		备注
	内聚力 C /MPa	内摩擦角 φ	内聚力 C /MPa	内摩擦角 φ	
角页岩 A	0.211	21°18'	0.341	15°35'	常规
大理岩 B	0.402	36°21'	0.175	35°29'	常规
石英闪长岩 C	0.182	35°49'	0.052	36°24'	常规
块状富磁铁矿 D	1.036	37°36'	0.170	39°12'	常规

3 岩体力学参数工程验证

3.1 计算模型的建立

计算范围的确定:西I采区开采18-1~23-1线之间的矿体,长200 m,包括I、III号两矿体.主要研究西I采区-141.5 m水平以上开采时岩层移动变形,但为今后研究方便,本次建立数值计算模型时从-500 m开始建立模型.根据类似工程条件下实测的地表边界角:垂直矿体走向为57°、沿着矿体走向为80°.以该值为初值,圈定模型的

计算范围,并适当放大,以计算过程中应力重分布不影响到模型的边界为原则,最后确定数值计算模型的范围为:

X : 3 334 600 ~ 3 335 600、 Y : 38 577 300 ~ 38 578 400、 Z : -500 ~ 60,即长×宽×高=1 100 m×1 000 m×560 m.

工程地质和边界条件:影响西I采区的断层有 F_{103} 和 F_{104} ,它们与矿体产状基本一致或小角度斜穿矿体,对上下盘围岩的影响比较小,因此在建模过程中可以不考虑断层的影响;为了模拟露天坑中散体的力学性

态,在建立三维数值计算模型时,上下盘以 65° 、端部以 80° 圈定露天坑散体,将之作为弹性体看待;破坏准则采用摩尔-库仑模型(Mohr - Coulomb);矿床在开采前要进行地下水的疏干,计算中可以不考虑地下水的影响;初始水平原岩应力按1.5倍自重应力赋初值.由于矿体不规则,用FLAC^{3D}建立数值计算模型比较困难,因此先用ANSYS建立数值模型,然后导入FLAC中建立用于FLAC^{3D}计算的模型,采用四面体单元对矿体和结构面进行拟合.在建立模型过程中主要依据矿区地形图、剖面图、各分段和阶段的平面图.建立的模型如图1~2所示,单元数为88 625个,节点数为15 576个.

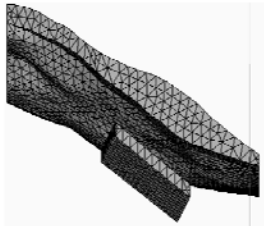


图1 西I采区矿体模型图

Fig.1 Modality of the ore body in West I mining zone

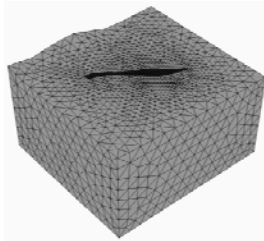


图2 西I采区数值计算模型网格图

Fig.2 Grid of the numeric computing modality of the ore body in West I mining zone

3.2 计算结果及分析

为了反映矿区整体地表变形情况,在三条测线上都选择了测点,同时兼顾到上下盘;另外,测线上位移变化较小的测点尽量不选,主要选择位移变化比较活跃的测点;同时,不选位移变化奇异的测点.综合分析,最后选择 A_4 、 A_5 、 B_3 、 B_{12} 、 C_2 等5点作为测点,主要是水平位移.

当西I采区开采至 -141.5 m水平时,在地表测点上,垂直矿体走向方向的水平位移计算值与实测值结果见表7,并将表7的结果绘成图3.地表移动变形规律见图4所示.

表7 计算值与实测值对比表

Table 7 Comparison between the result from calculation and survey

测点及编号	实测结果/mm	计算结果/mm	相对误差/%
A_4 (1)	134.929	150.140	11.27
A_5 (2)	304.981	330.690	8.43
A_8 (3)	-2.002	-1.779	11.14
B_3 (4)	6.000	5.649	5.85
B_{12} (5)	-1.800	-1.583	12.05
C_2 (6)	1 346.080	1 420.690	5.54

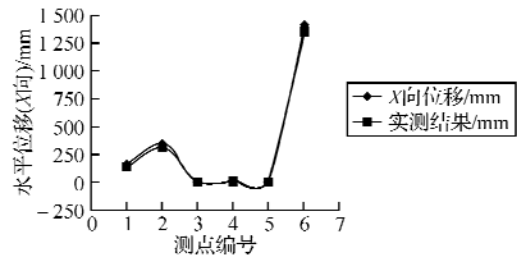


图3 地表垂直矿体水平位移计算值与实测值对比图
Fig.3 Comparison between the result from calculation and survey for the horizontal displacement on the surface above the vertical ore body

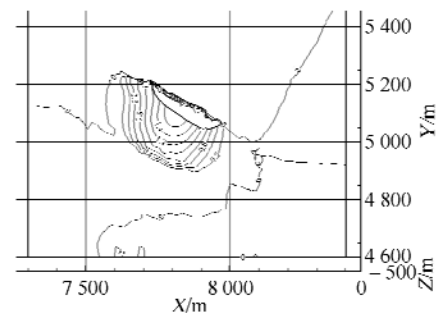


图4 地表垂直矿体水平位移等值线图

Fig.4 The isogram of the horizontal displacement of on the surface above the vertical ore body

由图3可见,两条曲线吻合比较好,变化规律一致,测点实测值与计算值相对误差在12%以下,对于采矿工程而言,这个精度是可以接受的.图4反映的地表变形范围与实际地表变形范围一致.因此,岩体力学参数值可以作为东区地下开采地表变形的计算基础数据.本结果为东区的地表变形分析提供重要的基础数据,保证东区分析的正确性.

参考文献:

- [1] 布雷迪 B H G, 布朗 E T. 地下采矿岩石力学[M]. 冯树仁,译.北京:煤炭工业出版社,1990:318-321.
- [2] Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for underground mining [M]. 3 edition. LONDON: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS,2004:135-139.
- [3] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 金山店铁矿张福山矿床地下采矿陷落角、错动角研究[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,1998.
- [4] 陈清远,何玉早. 地下开采地表变形数值模拟研究[J]. 金属矿山,2004(6):19-21.
- [5] 陈清远,徐腊明. 数值模拟法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 地下空间,1999,19(5):772-778.

Study on the mechanics parameters of the covering rock in mining with sublevel caving method

CHEN Qing-yun^{1,2}, YANG Cong-bing³, WANG Shui-ping⁴, ZHANG Dian-ji^{1,2}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Engineering Research Center for Exploitation and Utilization of Phosphorus Resources Ministry of Education, Wuhan 430074, China; 3. Chengchao Iron Ore Mine, Mineral & Company, Ltd. WISCO, Ezhu 436000, China;
4. Jinshandian Iron Ore Mine, Mineral & Company, Ltd. WISCO, Daye 435116, China)

Abstract: Mechanics parameters of the excavation-disturbed strata are the basis and key factor in large-scale rock and soil project design and its stability analysis. Using geological mechanics sorting method (RMR), experience strength criterion (GSI), on-spot supporting plate test and indoor structural face strength test method, etc, this paper determines the mechanics parameters of the covering strata in mining with sublevel caving method. A 3DFLAC computing modality is also established according to the engineering geological and mining technological situation as well as strata mechanics parameters of the west I mining zone in order to verify the reliability of the strata mechanics parameters. The surface deformation pattern acquired from calculation is in accord with the pattern acquired from the surveying result on the surface observation spots as mining activities proceed to the -141.5 m level, and the error is in the allowable scale. Therefore, the strata mechanics parameters determined with the above-mentioned method can be applied in the study of the surface deformation pattern of mining in the east zone of Jinshandian Iron Ore Mine.

Key words: sublevel caving; covering strata; mechanics parameters

本文编辑: 龚晓宁

☆

(上接第 64 页)

Research on preparation of high purity ferrous oxalate from desulphurization slag with high iron

ZHANG Li¹, DING Yao², DIAO Jie¹, PENG Feng-li¹

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Using desulfurization slag with high iron as raw material, ferrous oxalate with purity has been made over 99% by acid leaching, reduction reaction, centrifugal separation, purifying, crystallizing, synthesis reaction, filtration and drying. The effects of the dose, temperature and feeding time on the purity of ferrous oxalate were studied, and the regularity of these affecting factors was discussed. The results showed that appropriate leaching conditions are as follows: 14 g ferrous sulfate dissolved in 15 mL water, with 6 mL ammonia pre-treatment, 6.5 g oxalic acid dissolved in 25 mL water with 40 mL ethanol pretreatment. And then under 40 °C and feeding time 25 - 30 min, we got ferrous oxalate powder with purity of 99.1%, and average particle size of 5.0 μm.

Key words: high-iron desulfurization slag; ferrous sulfate; ferrous oxalate; the particle size

本文编辑: 龚晓宁