

# 1 段闭路磨矿筛分分级返砂磁选抛尾试验

张开路<sup>1</sup> 王化军<sup>1,2,3</sup> 张金华<sup>4</sup> 张明文<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院; 2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室;  
3. 钢铁冶金新技术国家重点实验室; 4. 首钢矿业公司)

**摘要** 根据首钢矿业公司大石河铁矿选矿车间1段闭路磨矿筛分分级返砂物料组成进行磁选试验,在127.39 kA/m的磁感应强度下,返砂磁选抛尾作业产率为31.64%,通过建立生产系统返砂磁选平衡状态下的数学模型,对返砂磁选抛尾工业应用进行预测。根据首钢矿业公司大石河铁矿选矿车间的生产数据,预测在增加返砂磁选抛尾作业后,选择返砂比为60.94%时,返砂磁选作业尾矿产率为18.75%,可增加1段球磨机新给矿处理能力20.36个百分点。返砂磁选抛尾可显著提高磨机生产能力,对矿山节能降耗、降低成本具有重要指导意义。

**关键词** 磁铁矿石 1段闭路磨矿 分级返砂 磁选 数学模型

## Discarding Test by Magnetic Separation of Returning Sand from First Stage Closed-circuit Grinding-screening Operation

Zhang Kailu<sup>1</sup> Wang Huajun<sup>1,2,3</sup> Zhang Jinhua<sup>4</sup> Zhang Guowen<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing;  
2. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education;  
3. State Key Laboratory of Iron and Steel Metallurgy Technology; 4. Shougang Mining Company)

**Abstract** Magnetic separation tests is conducted according to material composition of returning sand from first stage closed-circuit grinding-screening operation, Dashihe Iron Plant beneficiation workshop, Shougang Mining Company. Tailings discarding yield of 31.64% from magnetic separation for returning sand is obtained at the magnetic induction intensity of 127.39 kA/m. Through mathematical model establishment of the production system, industrial application forecast for magnetic separation tailings from returning sand is carried out. According to productivity data in Dashihe Iron Plant beneficiation workshop, Shougang Mining Company, tailings discarding yield of 18.75% from magnetic separation for returning sand and 20.36 percentage points increase of first stage mill capacity will achieved at the ratio of returning sand 60.94%. Tailings discarding through magnetic separation can increase the capacity of mill obviously, and have important guiding significance in saving energy and reducing costs for mines.

**Keywords** Magnetic iron ore, First stage closed circuit grinding, Returning sand from classification, Magnetic separation, Mathematical model

磁铁矿石是当前国内铁矿选矿厂最主要的人选矿石类型,近年来具有代表性的磁铁矿石选矿工艺为阶段磨矿—全磁选选别工艺,随着超细碎湿式磁选抛尾工艺的广泛应用,磁铁矿石入选品位越来越低<sup>[1]</sup>。我国磁铁矿石资源全铁品位总体偏低<sup>[2]</sup>,伴随着多年开采,具有开采利用价值的较高品位的磁铁

矿资源日趋枯竭,为了满足国内钢铁工业发展需求,一些通常认为没有开采利用价值的低品位磁铁矿也逐渐得到开发利用<sup>[3,4]</sup>。一些铁矿选矿厂通过提高生产作业率来增加铁精矿的产量,如南芬选矿厂的生产作业率高达96%但仍不能满足本钢炼铁需求<sup>[5]</sup>。遵循“能收早收、能抛早抛”的选矿原则,对于磁铁矿石“阶段磨矿、阶段磁选”中1段闭路磨矿分级返砂磁选抛尾的可行性已有研究报道<sup>[5,6]</sup>。这

张开路(1990—),男,硕士研究生,100083 北京市海淀区学院路30号。

部分返砂之中含有已经单体解离的脉石矿物(包括其集合体),已经单体解离的脉石矿物(包括其集合体)返回再磨会浪费磨机的处理能力,同时增加能耗。采用磁选的方式将 1 段闭路磨矿返砂中的合格尾矿(单体解离的脉石矿物及其集合体)及时抛除,是提高磨机处理能力、降低能耗及生产成本的有效途径。

1 试验矿样

试验矿样取自首钢矿业公司大石河铁矿选矿车间 1 段闭路磨矿分级直线振动筛筛上返砂。1 段闭路磨矿用 MQG2 700 mm×3 600 mm 格子型球磨机,分级用 ZKB1856A 直线振动筛。ZKB1856A 直线振动筛处理量约为 80 t/(台·h),筛面倾角为 5°,筛孔尺寸为 1.5~2.5 mm。

将返砂样品混匀、缩分,取出 3 kg 进行粒度分析试验,分析结果见表 1。

表 1 返砂粒度分析结果

粒级/mm	产率/%	全铁品位/%	全铁回收率/%
+5	15.36	20.60	15.34
-5+3	73.42	20.31	72.23
-3+2	10.33	22.91	11.47
-2	0.89	22.12	0.96
合计	100.00	20.64	100.00

由表 1 可知,返砂中矿石主要集中在 3~5 mm 粒级;+2 mm 粒级产率占 98% 以上,表明大石河铁矿选矿车间 1 段闭路磨矿分级采用直线振动筛筛分分级的分级效率较高;结合生产数据,1 段球磨机排矿中-0.074 mm 粒级含量为 22.00%,筛下产品中-0.074 mm 粒级含量为 39.04%,返砂-0.074 mm 粒级含量仅 0.70%;-3 mm 粒级返砂全铁品位比+3 mm 粒级返砂高出约 2.47 个百分点,表明细粒级中磁铁矿略有富集。

2 磁选抛尾试验结果

2.1 磁选抛尾产品粒度分析

采用板式磁选机对返砂进行了磁选抛尾试验。磁选抛尾试验采用的板式磁选机分选皮带表面磁感应强度为 95.54 kA/m,通过分选得到磁性返砂和返砂尾矿。采用磁选管法检测磁性铁品位,磁选管磁感应强度为 111.46 kA/m,返砂磁选试验结果见表 2,磁性返砂和返砂尾矿粒度分析结果分别见表 3、表 4。

由表 2~表 4 可知,返砂在较弱的分选磁感应强度条件下,可抛出大量的返砂尾矿。返砂尾矿中除-2 mm 粒级外,其余粒级的全铁品位均在 8% 以下,-2 mm 粒级全铁品位偏高的原因,可能是部分

表 2 返砂磁选试验结果

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TFe	mFe	TFe	mFe
磁性返砂	68.18	28.27	22.24	89.94	98.29
返砂尾矿	31.82	6.55	0.83	10.06	1.71
返砂	100.00	20.72	15.43	100.00	100.00

表 3 磁性返砂粒度分析结果

粒级/mm	产率/%	全铁品位/%	全铁回收率/%
+5	12.67	32.22	14.44
-5+3	76.10	27.61	74.33
-3+2	10.25	28.24	10.24
-2	0.98	28.50	0.99
合计	100.00	28.27	100.00

表 4 返砂尾矿粒度分析结果

粒级/mm	产率/%	全铁品位/%	全铁回收率/%
+5	17.71	7.94	21.46
-5+3	57.09	5.48	47.76
-3+2	23.18	7.82	27.67
-2	2.02	10.09	3.11
合计	100.00	6.55	100.00

细颗粒的磁铁矿黏附在单体解离的脉石矿物及其集合体颗粒上并随之进入到返砂尾矿中,在粒度分析筛分时脱落富集到-2 mm 粒级所致;其中产率最高的 3~5 mm 的全铁品位最低,是由于这个粒级内的贫连生体颗粒所受重力与其所受磁场力比较而言相对较小,在试验磁感应强度条件下容易得到磁选回收,所以返砂尾矿全铁品位相对较低;在+5 mm 粒级全铁品位略高,与较粗颗粒的贫连生体颗粒所受重力与其所受磁场力比较而言相对较大,在试验磁感应强度条件下不容易得到磁选回收,所以返砂尾矿全铁品位相对较高。磁性返砂中产率最高的 3~5 mm 粒级的全铁品位比+5 mm 粒级低了 4.61 个百分点,也略低于其他粒级;3~5 mm 粒级中脉石矿物与磁铁矿连生体占多数,该粒级物料需要通过返回再磨完成磁铁矿与脉石矿物的进一步分离,在这里磁选抛尾对于返砂的选择性作用可以避免一部分脉石矿物及其集合体返回再磨浪费磨机处理能力和能耗,同时对于 1 段磨矿分级直线振动筛的筛孔尺寸选择也具有指导意义。

根据表 2~表 4 结果可计算出磁性返砂和返砂尾矿中各个粒级的回收率,结果见表 5。

表 5 磁性返砂和返砂尾矿各粒级回收率

粒级/mm	全铁回收率/%	
	磁性返砂	返砂尾矿
+5	12.85	2.36
-5+3	66.16	5.25
-3+2	9.11	3.04
-2	0.89	0.34
合计	89.01	10.99

由表 5 可知,在 95.54 kA/m 的磁感应强度条件下,磁选抛尾试验的全铁回收率为 89.01%, +2 mm 粒级回收率占 88.12%;返砂尾矿中损失的铁主要集中在 3~5 mm 粒级,该粒级内磁铁矿与脉石矿物以连生体形式存在居多,磁铁矿在连生体中含量高会影响磁场力作用的大小,一些连生体中磁铁矿含量不足以使磁场力作用超过重力作用,从而进入到返砂尾矿中;提高磁感应强度则这些连生体可以进入磁性返砂中,因此需要找到合适的磁感应强度。

## 2.2 磁选抛尾磁感应强度试验

将返砂在不同磁感应强度条件下进行磁选抛尾试验,试验结果见表 6。

表 6 返砂磁选磁感应强度试验结果

磁感应强度 /(kA/m)	产品 名称	产率 /%	品位/%		回收率/%	
			TFe	mFe	TFe	mFe
63.69	磁性返砂	61.11	28.57	24.46	86.00	96.58
	返砂尾矿	38.89	7.31	1.36	14.00	3.42
	返砂	100.00	20.30	15.48	100.00	100.00
127.39	磁性返砂	68.36	27.95	22.70	91.14	98.53
	返砂尾矿	31.64	5.87	0.73	8.86	1.47
	返砂	100.00	20.96	15.75	100.00	100.00
191.08	磁性返砂	68.76	26.98	22.09	91.10	98.88
	返砂尾矿	31.24	5.80	0.55	8.90	1.12
	返砂	100.00	20.36	15.36	100.00	100.00
254.78	磁性返砂	69.28	26.18	21.81	91.17	99.27
	返砂尾矿	30.72	5.72	0.36	8.83	0.73
	返砂	100.00	19.89	15.22	100.00	100.00

由表 6 可知,随着磁感应强度的增加,返砂尾矿中的全铁品位和磁性铁品位降低,在磁感应强度为 127.39 kA/m 时,返砂尾矿的磁性铁品位降到了 0.73%,由增加磁感应强度带来的返砂尾矿磁性铁品位降低的边际效益变弱;综合考虑,选择返砂磁选抛尾的磁感应强度为 127.39 kA/m。

## 3 磨矿机生产能力数学模型

### 3.1 计算模型

图 1 所示计算模型为 1 段磨矿分级闭路循环的计算模型,其中磨矿机新给矿量为  $Q$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_0$ ;磨矿机给矿量为  $(Q+S)$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_1$ ;磨矿机排矿量为  $(Q+S)$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_2$ ;分级设备的筛下矿量为  $Q$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_3$ ;分级设备的筛上矿量为  $S$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_4$ ;闭路循环的返砂比为  $C_1$ ,  $C_1 = S/Q$ 。

图 2 所示的计算模型为增加磁选抛尾作业后 1 段磨矿分级闭路循环的计算模型,其中磨矿机新给矿量为  $(Q+X)$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_0$ ;磨矿

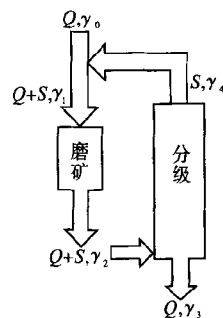


图 1 1 段闭路磨矿分级计算模型

机给矿量为  $[Q+X+(1-\theta)Y]$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma'_1$ ;磨矿机排矿量为  $[Q+X+(1-\theta)Y]$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_5$ ;分级设备的筛下矿量为  $(Q+X-\theta Y)$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_6$ ;分级设备的筛上矿量为  $Y$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_7$ ;返砂比为  $C_2$ ,  $C_2 = (1-\theta)Y/(Q+X)$ 。为方便进行理论计算,这里引入一个参数  $Z$ ,  $Z$  表示分级设备的筛上矿量  $Y$  与磨矿机新给矿量  $(Q+X)$  的比值,则有  $Z = Y/(Q+X)$ ,同时由返砂比  $C_2$  的表达式可知  $C_2 = (1-\theta)Z$ ;磁选作业的抛尾作业产率为  $\theta$ ,抛出尾矿量为  $\theta Y$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_8$ ;返回到磨矿机的磁性返砂量为  $(1-\theta)Y$ ,其中指定粒级以下含量为  $\gamma_9$ 。

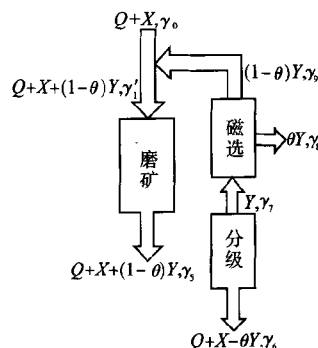


图 2 1 段闭路磨矿分级返砂磁选抛尾计算模型

### 3.2 理论计算

图 1 和图 2 所示计算模型采用的是同一台磨矿机和分级设备,不同的是图 2 中增加了对返砂的磁选抛尾作业。根据磨矿动力学原理,磨矿机的给矿粒度和磨矿机的排矿粒度应遵循一阶或二阶磨矿动力学方程<sup>[7]</sup>,即:

$$\frac{100 - R_0}{100 - R_1} = e^{-kt}, \quad (1)$$

或

$$\frac{100 - R_0}{100 - R_1} = e^{-k_m t}, \quad (2)$$

式中,  $R_0$ 、 $R_1$  分别为磨机给矿、排矿中指定粒级以下含量,%;  $t$  为磨矿时间;  $k$ 、 $m$  分别为与矿石性质相关

的系数,对于特定的矿石  $k, m$  是已知的。

对于图1和图2所示的计算模型,还存在指定粒级以下含量在物料分配时守恒。分级设备给矿、溢流(筛下)、沉砂(筛上)中指定粒级以下含量应服从物料守恒。

图1中的平衡关系式为:

$$(1 + C_1)\gamma_2 = \gamma_3 + C_1\gamma_4. \quad (3)$$

图2中的平衡关系式为:

$$(1 + C_2)\gamma_5 = (1 - \frac{\theta C_2}{1 - \theta})\gamma_6 + \frac{C_2}{1 - \theta}\gamma_7. \quad (4)$$

将返砂比  $C_2$  用参数  $Z = (1 - \theta)C_2$  替换后为:

$$[1 + (1 - \theta)Z]\gamma_5 = (1 - \theta Z)\gamma_6 + Z\gamma_7. \quad (5)$$

同理,磨矿机的新给矿、返砂、磨矿机给矿中指定粒级以下含量也服从物料守恒。

图1中的平衡关系式为:

$$(1 + C_1)\gamma_1 = \gamma_0 + C_1\gamma_4. \quad (6)$$

图2中,这里需要注意返砂并不是分级设备的沉砂(筛上),而是磁性返砂,平衡关系式为:

$$(1 + C_2)\gamma'_1 = \gamma_0 + C_2\gamma_9. \quad (7)$$

将式(7)中返砂比  $C_2$  用参数  $Z$  替换后为:

$$\gamma'_1[1 + (1 - \theta)Z] = \gamma_0 + (1 - \theta)Z\gamma_9. \quad (8)$$

图2所示计算模型中还有一个物料守恒条件,即磁选抛尾作业给矿、磁选返砂、磁选尾矿中指定粒

$$\frac{E[1 + (1 - \theta)Z]}{100(1 - \theta Z)}\gamma_5^2 - [1 + \frac{E[1 + (1 - \theta)Z]}{1 - \theta Z}]\gamma_5 + \gamma_6 = 0. \quad (13)$$

令  $n = \frac{E[1 + (1 - \theta)Z]}{1 - \theta Z}$ , 则有:

$$n\gamma_5^2 - 100(1 + n)\gamma_5 + 100\gamma_6 = 0. \quad (14)$$

这是一个关于  $\gamma_5$  的二次方程,求解:

$$\gamma_5 = \frac{100(1 + n) \pm \sqrt{10\,000(1 + n)^2 - 400n\gamma_6}}{2n}. \quad (15)$$

由后续验算,可知只有一个解具有实际意义,故  $\gamma_5$  表达式为:

$$\gamma_5 = \frac{100(1 + n) - \sqrt{10\,000(1 + n)^2 - 400n\gamma_6}}{2n}. \quad (16)$$

将式(16)带入式(12)中即可得到  $\gamma'_1$  的表达式。

假设在图1和图2模型中,磨矿机磨矿符合一阶磨矿动力学原理,即式(1),则图2模型磨矿时间  $t_2$  的计算式为:

$$t_2 = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{100 - \gamma_5}{100 - \gamma'_1}\right). \quad (17)$$

将  $\gamma_5$  和  $\gamma'_1$  表达式带入式(17)中即可得到  $t_2$  的表

级以下含量的平衡式:

$$\frac{1}{1 - \theta}\gamma_7 = \gamma_9 + \frac{\theta}{1 - \theta}\gamma_8. \quad (9)$$

磨矿分级流程计算中分级效率也是一个约束条件。结合大石河铁矿选矿生产实践<sup>[6]</sup>,将直线振动筛作为分级设备,其分级效率普遍高于水力旋流器和螺旋分级机,且在直线振动筛给矿处会有大量的冲洗水用于分散1段磨矿的高浓度排矿,直线振动筛的分级效率与筛上返砂矿量和新给矿量的比值之间存在近似的线性关系<sup>[8]</sup>。

考察图2计算模型的分级效率  $E$ ,根据分级效率的定义,图2中分级效率  $E$  的计算公式为:

$$E = \frac{100(\gamma_5 - \gamma_7)(\gamma_6 - \gamma_5)}{\gamma_5(100 - \gamma_5)(\gamma_6 - \gamma_7)} \times 100\%. \quad (10)$$

根据式(8)、(9),得到  $\gamma_7$  的表达式为:

$$\gamma_7 = \frac{\gamma'_1[1 + (1 - \theta)Z] - \gamma_0}{Z} + \theta\gamma_8. \quad (11)$$

根据式(5)、(8)、(9),得到  $\gamma'_1$  的表达式为:

$$\gamma'_1 = \gamma_5 + \frac{\gamma_0 - (1 - \theta Z)\gamma_6 - \theta Z\gamma_8}{1 + (1 - \theta)Z}. \quad (12)$$

将式(11)中的  $\gamma'_1$  用式(12)表达,并将其带入分级效率  $E$  的表达式(10)中,化简得到:

达式。同理可以得到磨矿时间  $t_1$  的计算式为:

$$t_1 = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{100 - \gamma_2}{100 - \gamma'_1}\right). \quad (18)$$

根据生产数据可以得到  $t_1$  值,由产品中指定粒级以下含量能够计算出  $k$  值。当磨矿机相同,且磨矿机给料性质基本稳定和磨矿机产品质量要求相同时,磨矿机的生产率与给矿通过磨矿机的时间成反比<sup>[9]</sup>,即:

$$\frac{(1 + C_2)Q_2}{(1 + C_1)Q_1} = \frac{t_1}{t_2}, \quad (19)$$

式中,  $Q_1$  和  $Q_2$  是表示磨矿机总生产率。而以新给矿计算的生产率  $Q_x$  计算公式<sup>[9]</sup>为:

$$Q_x = \frac{Q_z}{\beta_p - \beta_c}, \quad (20)$$

式中,  $\beta_p$  为磨矿机排矿中指定粒级以下含量,%;  $\beta_c$  为磨矿机新给矿中指定粒级以下含量,%;  $Q_z$  为磨矿机总生产率。

### 3.3 验证计算

首钢矿业公司大石河铁矿选矿车间第九系列1

段闭路磨矿分级,磨矿机与分级用筛分机型号规格及主要技术参数同前。磨机台时处理能力为 80 t/h,新给矿 -0.074 mm 粒级占 8%,磨机排矿 -0.074 mm 粒级占 22%,筛下产品要求 -0.074 mm 粒级占 39.04%,筛上产品 -0.074 mm 粒级仅为 0.7%,1 段磨矿分级返砂比  $C_1$  为 0.8,即 80%。

由试验室返砂磁选抛尾试验可知在磁感应强度为 127.39 kA/m 的条件下,磁选抛尾产率  $\eta = 31.64\%$ ,返砂尾矿中 -0.074 mm 粒级含量为 0.4%。

在图 2 所示计算模型中,磁选抛出尾矿由两个部分组成,一是由新给矿经过磨矿筛分分级后筛上进入磁选机得到的返砂尾矿,二是由磁性返砂经过再磨、筛分分级后筛上给到磁选机得到的尾矿。由试验室磁选抛尾试验结果可知,磁性返砂经过再磨、筛分分级后给入磁选机得到的返砂尾矿量很少,在本项模拟计算中可忽略不计。只考虑由新给矿经磨矿筛分分级后进入到磁选机的部分,根据试验室返砂磁选试验,在返砂比为  $C_1$  条件下的 1 段闭路磨矿分级返砂可以抛除  $\eta$  的尾矿, $\eta$  表示试验室返砂磁选试验抛尾产率抛除的是由  $(1 + C_1)Q$  的 1 段磨矿

机给矿经磨矿、分级、磁选得到  $\eta C_1 Q$  尾矿量,因此由新给矿  $Q$  产生的尾矿量为  $\frac{1}{1 + C_1} \eta C_1 Q$ 。因此,当新给矿性质稳定时,由新给矿经磨矿、分级、磁选形成的尾矿对于新给矿的产率是保持稳定的,即为  $\frac{1}{1 + C_1} \eta C_1$ 。

综合上述结论,在图 2 计算模型中,筛上返砂量与新给矿量比值为  $Z$ ,磁选抛尾作业产率为  $\theta$ 。此时抛除的尾矿对于新给矿的产率  $\theta Z$ 。由前文推论,抛除的尾矿是由新给矿产生的,可以推出式(21)

$$QZ = \frac{1}{1 + C_1} \eta C_1 \quad (21)$$

求解得:

$$\theta = \frac{\eta C_1}{Z(1 + C_1)} \quad (22)$$

根据式(11)、(12)、(16)、(22),对增加返砂磁选抛尾作业的 1 段闭路磨矿分级循环进行预测。根据图 1 所示计算模型中已知的 1 段磨矿分级生产数据,以  $t_1$  为 0.5 h 计算,式(18)中系数  $k$  的值为 0.399 5。参数  $Z$  从 0.45 开始计算,每次增加 0.05,至 1.00 为止,带入各参数的计算公式中,所得结果见表 7。

表 7 1 段闭路磨矿筛分分级返砂磁选抛尾模拟计算结果

参数 $Z$	分级效率 $E$	尾矿产率 $\theta$	返砂比 $C_2$	参数 $n$	磨机排矿 -0.074 mm 粒级含量 $\gamma_5/\%$	磨机给矿 -0.074 mm 粒级含量 $\gamma'_1/\%$	直线振动筛筛上 -0.074 mm 粒级含量 $\gamma_7/\%$	磨矿时间 $t_2$ /h
0.45	0.410 3	0.312 5	0.309 4	0.625 1	26.782 2	7.226 1	3.373 2	0.592 6
0.50	0.423 1	0.281 2	0.359 4	0.669 3	26.123 2	7.286 1	3.921 9	0.568 5
0.55	0.444 5	0.255 7	0.409 4	0.729 0	25.272 5	7.104 1	3.761 0	0.544 8
0.60	0.465 9	0.234 4	0.459 4	0.791 2	24.432 2	6.886 4	3.510 0	0.522 6
0.65	0.487 3	0.216 3	0.509 4	0.855 9	23.605 4	6.640 2	3.198 4	0.502 0
0.70	0.508 7	0.200 9	0.559 4	0.923 1	22.794 6	6.373 8	2.850 5	0.482 7
0.75	0.530 1	0.187 5	0.609 4	0.992 7	22.003 4	6.092 7	2.482 3	0.464 7
0.80	0.551 7	0.175 8	0.659 4	1.065 3	21.227 0	5.795 9	2.092 2	0.447 8
0.85	0.573 3	0.165 4	0.709 4	1.140 3	20.473 7	5.493 3	1.701 8	0.432 0
0.90	0.594 9	0.156 2	0.759 4	1.217 9	19.742 5	5.187 7	1.315 1	0.417 2
0.95	0.604 2	0.148 0	0.809 4	1.272 1	19.259 0	5.106 7	1.364 5	0.404 3
1.00	0.618 1	0.140 6	0.859 4	1.337 3	18.704 8	4.933 0	1.228 7	0.391 7

由表 7 可知,参数  $Z$  为 0.75 时,磨矿机的排矿粒度接近原 1 段磨矿分级时磨矿机的排矿粒度,从维持工艺稳定性考虑,选择参数  $Z$  为 0.75,此时返砂比  $C_2$  为 0.609 4,即 60.94%, $t_2$  为 0.464 7 h。

根据式(19)、式(20)可以计算得出 1 段磨矿机新给矿处理能力由 80 t/h 提升至 96.29 t/h,提高了 20.36 个百分点,返砂磁选作业尾矿产率为 0.187 5,即 18.75%,对于原矿的抛尾产率为 14.06%。返砂磁选抛尾可显著提高磨矿机生产能力,并有利于粗粒尾矿的利用和减少微细粒尾矿的

产生量,延长尾矿库服务年限,对矿山选矿节能降耗降低成本生产技术改造具有重要指导意义。

#### 4 结 论

(1)首钢矿业公司大石河选矿厂第九系列 1 段磨矿分级直线振动筛筛上返砂磁选可以抛出 31.64% 的返砂尾矿,返砂尾矿的磁性铁含量为 0.73%。

(2)建立了铁矿石 1 段闭路磨矿分级返砂磁选抛尾数学模型,根据 1 段闭路磨矿分级生产数据以及返砂磁选抛尾试验结果,可以(下转第 157 页)

打 20 多个钻孔,长度 4 ~ 16 m,倾角  $6^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,钻孔方向垂直于煤壁。由于暴露的巷道断层倾向、走向受地质影响里外不一致,钻孔只要打过松动圈就可以;对顶板裂隙,钻  $6^{\circ} \sim 45^{\circ}$  钻孔,采用加固 1# 泵进行充填加固,充填能达到一定高度;对于煤壁,深 4 m、倾角  $6^{\circ} \sim 10^{\circ}$  的钻孔效果最佳,最多一孔注料 2 t。利用注料方法封闭断层,可彻底消除断层对抽放钻孔影响,充填半径达到 30 ~ 50 m,既可注顶板断层又可注煤壁断层,使断层处于封闭状态(注料泵压力为 20 MPa),注料示意图 1。

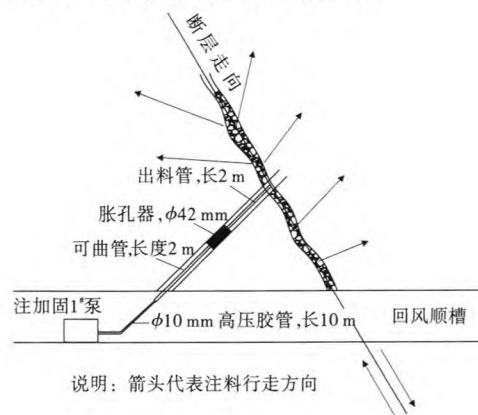


图 1 断层注料示意

→注料行走方向

#### 4 瓦斯治理效果

(1) 充填加固材料后,保证了成孔率,避免钻孔到断层破碎带就不回水,使钻孔半道夭折造成废孔,钻孔深度不到裂隙带影响抽放效果。通过计算,注料与不注料的断层抽放瓦斯纯量相差  $10 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

(2) 有效堵塞了瓦斯非正常涌出通道。根据瓦检员实测,未注料断层瓦斯涌出浓度为  $3\% \sim 5\%$ ,在采煤机破煤到断层处瓦斯大量涌出,

造成瓦斯超限;在注料后的断层处,瓦斯浓度和其他煤壁处基本没有变化,在跟踪断层时又发现远离注料的断层进入工作面后,瓦斯依然较大,这就说明断层注料起到很好的效果。

(3) 通过采面过断层现场检测,断层在回采期间上隅角瓦斯浓度一直保持在  $1\%$  左右,工作面瓦斯浓度一直保持在  $0.6\%$  左右,回风顺槽瓦斯浓度保持在  $0.5\%$  左右,基本和回采工作面未到断层期间瓦斯浓度保持一致,保证了工作面正常回采。瓦斯排放没有影响正常回采,且抽放效果及抽放率非但没下降反而升高。经验证,未进断层前钻孔抽放纯量为  $28 \sim 30 \text{ m}^3/\text{min}$ ,进断层后为  $31 \sim 36 \text{ m}^3/\text{min}$ 。注料前后各点瓦斯参数见表 1。

表 1 注料前后各地点瓦斯参数对比

进入断层 /d	未注料/%			注料/%		
	工作面	上隅角	回风顺槽	工作面	上隅角	回风顺槽
1	0.7	2	0.72	0.5	1	0.52
2	0.75	3	0.77	0.55	2	0.57
3	0.8	2.5	0.8	0.6	1.5	0.62
4	0.8	2	0.8	0.6	1.5	0.62
5	0.7	2	0.75	0.5	1	0.55

#### 5 结 论

①注料后,断层面围岩形成一体,710 回顺的高位钻孔保证了很好的成孔率,增加了抽放效率;②在断层进入工作面后,有效的堵塞了瓦斯非正常涌出渠道,使瓦斯直接进入采空区,利用高位钻孔抽出,保证了工作面瓦斯不超限。

综上所述,加注料是煤矿治理断层瓦斯非正常涌出的一项实用性很强的技术,同时与高位钻孔与采空区预埋管抽放相结合,能很有效的治理综采工作面瓦斯,保证矿山正常生产。

(收稿日期 2014-07-04)

(上接第 74 页)模拟计算出增加返砂磁选抛尾作业后,在选定返砂比条件下的返砂磁选抛尾作业产率和磨矿机生产能力提高幅度,为生产改造提供理论依据。

(3) 根据首钢矿业公司大石河铁矿选矿车间第九系列 1 段闭路磨矿筛分分级返砂磁选抛尾试验结果及生产数据,预测在增加返砂磁选抛尾作业后,返砂比为  $60.94\%$  时,1 段磨矿机生产能力提升  $20.36$  个百分点,返砂磁选抛尾作业产率为  $18.75\%$ 。返砂磁选抛尾对于矿山选矿节能降耗,降低成本,生产技术改造具有重要意义。

#### 参 考 文 献

[1] 武桂芳. 我国铁矿山选矿技术的新进展[J]. 科技信息, 2013

(9):431.

- [2] 崔立伟,夏浩东,王克聪,等. 中国铁矿资源现状与铁矿实物地质资料筛选[J]. 地质与勘探, 2012, 48(5): 894-905.
- [3] 马淮湘. 超贫磁铁矿选矿技术新进展与思考[J]. 现代矿业, 2011(4): 33-34, 42.
- [4] 王得志. 超贫磁铁矿湿式粗粒预选工艺研究[J]. 中国矿业, 2013, 22(3): 91-94.
- [5] 李淑艳,周铁宾,牟景春,等. 南芬选矿厂提质增效的探索[J]. 本钢技术, 2012(2): 1-3.
- [6] 卢 斌. 密地选矿厂沉砂抛尾试验研究[J]. 矿产综合利用, 2014, 2(4): 37-41.
- [7] 李茂林,冯定五,向文娟. 磨矿分级回路中最佳循环负荷理论分析与数值计算[J]. 矿冶工程, 2012, 32(8): 32-36.
- [8] 王 耀,崔振立. 1 段磨矿分级使用直线振动筛的实践[J]. 金属矿山, 2011(6): 308-310.
- [9] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.

(收稿日期 2014-11-17)