金属矿地下开采采场灾害预警系统的研究

王宝山[1]，黄志伟[1]，谢本贤[2]，周国军[1]

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070;2. 中南大学 安全与资源工程学院,湖南 长沙 410083)

摘　要:采场冒落是金属矿地下开采安全事故的主要形式.在对其影响因素影响分析的基础上,提出了岩体质量、岩体时效特性、采场暴露面积与爆破冲击为影响采场稳定性的主要因素,并应用岩石力学、损伤力学与数值模拟等方法,结合现场声波测试,从上述 4 个主控因素着手构建了其影响度函数与其影响权重,然后给出了采场稳定性综合评判方法与评判标准,并根据各影响因素的影响度,揭示了待采采场潜在的隐患与诱因,而后提出了相应的防范措施.最后以我国大冶铜绿山铜铁矿的应用为例介绍了该系统的使用方法.图 2,表 6,参 10.

关键词:安全预警;岩体质量;爆破冲击;采场暴露面积;时效特性;采场稳定性

中图分类号:TD 327　　文献标识码:A　　文章编号:1672-9102(2006)04-0005-05

地下矿山采场的稳定性对矿山安全生产有着重要的影响,尤其是采场的片帮冒顶一直是硬岩矿山最主要的安全问题. 据统计,2006 年上半年全国非煤矿山重大事故主要集中在冒顶片帮(坍塌)事故和放炮事故上,其中冒顶片帮(坍塌)事故 17 起,死亡 59 人,分别占重大事故起数和死亡人数的 47% 和 46%[1].因此,加强矿山生产管理与安全防范的研究已成为当前极为重要的任务.

在矿山生产过程中,矿体未揭露前由于缺乏对矿体稳固性、弱面结构破坏与应力状态的了解,给合理的采矿设计与安全防范带来很大的难度.因此, 深入研究地下采场岩体失稳机理,建立合适的安全评价系统,预测不稳固或危险的部位,进行安全预报预警,对合理地指导设计施工,有效避免采场失稳灾害事故的发生,确保采矿安全生产有着重要的意义.

1　地下开采灾害预警系统的构建

地下采场岩体失稳垮塌、冒落,实质上是岩体强度、节理弱面条件、水文状况,以及围岩应力等因素共同作用的结果,其中岩体的工程地质条件、围岩的应力状况起着重要的作用,而采场与巷道围岩岩层的复杂多变性与不确定性,是造成采场与空区冒顶片帮等事故的主要原因. 其影响因素可分为地质条件与采矿开挖两个方面.前者主要包括:岩体类型与性质、结构面及其组合、地应力场以及地下水状况等.后者主要指采场布置、采场结构参数、采矿工艺与支护形式等.大量研究表明[2-3],岩体质量、采场暴露面积、爆破冲击和岩体时效特性为其主要影响因素.因此, 作者以此来构建采矿灾害预警系统.

1.1　岩体质量影响度

采场岩体质量是影响采场稳定性的关键因素之一.采用 Z.T.Bieniaski 的地质力学分级方法[4-5],通过对其岩石单轴抗压强度、岩石质量指标、节理间距、节理状况与地下水状态等影响因素的调查分析,计算其岩体质量评价指标(RMR),而后用下式来表示岩体质量对采场稳定性的影响度.

$$R_r=1-RQ. \tag{1}$$

式中,RQ 为岩体质量系数,且定义 RQ=RMR/100;R_r 为岩体质量的影响度.

收稿日期:2006-05-16
基金项目:大冶有色公司攻关项目(2004050020)
作者简介:王宝山(1981—),男,湖北仙桃人,硕士研究生,主要从事地下采矿和安全方面的研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2 采场暴露面影响度

在采矿开挖过程中，随着采场暴露面积的增加、采场围岩中的应力随之重新分布，应力集中日益突出，采场的稳定性则呈逐步降低趋势[6]. 因此，研究采场暴露面影响度，首先需要分析开挖后采场围岩体中应力分布状况、失稳判据及与采场暴露面的关系.

采用有限元程序模拟计算采场岩体开挖后的应力状态与分布规律.根据岩体失稳原理，采场围岩中的应力超过其极限值，就可能发生失稳现象，因此其安全系数可用下式计算：

$$F_s=\begin{cases}[\sigma_c]/\sigma_c & (a)\\ [\sigma_t]/\sigma_t & (b)\end{cases}. \qquad (2)$$

式中，(a) 为最大主应力为压应力时；(b) 为最大主应力为拉应力时；σ_c 为岩体承受压应力；$[\sigma_c]$为岩体抗压强度；σ_t 为岩体承受拉应力；$[\sigma_t]$为岩体抗拉强度.

根据安全系数的涵义，采场稳定性的影响指数可用下式表示：

$$S_r=1/F_s. \qquad (3)$$

式中，S_r 为应力对采场稳定性的影响指数，即采场暴露面的影响度.

为了研究的需要，现规定采场处于临界破坏 ($F_s=1$) 状态时，采场暴露面的影响度为 0.99；而处于危险状态 ($F_s<1$) 时，采场暴露面的影响度为 1.所以，采场暴露面对采场稳定性的影响度可以表示如下：

$$S_r=\begin{cases}1/F_s & (F_s>1)\\ 0.99 & (F_s=1)\\ 1 & (F_s<1)\end{cases}. \qquad (4)$$

1.3 爆破冲击影响度

在采矿开挖过程中总伴随着频繁的爆破活动.其瞬间巨大的爆力与冲击力，常导致采场岩体或产生破裂，或使其原生裂隙进一步扩展，大幅度地降低采场岩体质量，削弱采场的稳定性，甚至引起采场大规模的冒落.据爆破震动测试和声波探测观察表明[7]，爆破活动在采矿开挖过程中是影响采场稳定性关键因素之一.

爆破效应主要表现为对岩体质量的损伤. 引用损伤力学中损伤变量的计算方法[8]，采用下式来计算采场围岩受爆破冲击损伤的程度：

$$B_r=1-(V_m/V_0)^2. \qquad (5)$$

式中，B_r 为爆破岩体质量损伤变量；V_m 为开采过程中采场岩体内声波纵波速度，m/s；V_0 为采动前采场岩体中声波纵波速度，m/s.

爆破损伤变量 B_r 反映了爆破冲击对采场稳定性的影响度，所以也可称之为爆破冲击影响指数.

1.4 岩体开挖时效特性

岩体开挖揭露后其强度会随着时间的推移而逐步降低[9]，这种特性称为岩体时效特性.由于岩体的时效特性主要取决于岩体的风化与蠕变特性，因此，采用岩体风化影响度与岩体蠕变影响度来描述岩体开挖时效特性。

(1) 岩体风化影响度

随着岩体风化程度的增加，岩体声波传播的波阻抗也逐步增大。保加利亚伊利耶夫[9]提出的岩体风化系数计算公式如下：

$$I=(V_0-V_w)/V_0. \qquad (6)$$

式中，I 为风化系数；V_0 为新鲜岩石超声波速度值；V_w 为风化岩石超声波速度值.

岩体的风化程度随着采场开采时间增加逐步增大，具有时效特征.下式采用风化系数相对变化率来表示该时效特征：

$$\eta=(I_i-I_0)/(I_m-I_0). \qquad (7)$$

式中，η为岩体风化系数相对变化率；I_0 为未开挖岩体的风化系数；I_i 为不同开采阶段岩体风化系数；i 为开挖步骤；I_m为岩体出现自然剥落时的最大危险风化系数. η值的内涵是岩体实际风化程度的变化量与其允许变化量的比值.显然，实际风化系数变化量越大、允许变化量越小，则其影响度越大，因此，可用其来度量岩体风化影响度.

(2) 岩体蠕变影响度

岩体蠕变主要表现为岩体承压后呈现的缓慢塑性变形.鉴于不能进入采空区测定其变形，采用有限元来模拟，以分析其变形及对采场稳定性的影响.

假定采场某一部位某一时刻变形量为 u，且设岩体允许变形量为 U，当变形量为 0 时，其不改变采场稳定状况，此时对采场稳定性的影响也为 0；而当变形量达到或超过允许变形量时，岩体将破坏，其对稳定性的影响度为 1.据此，岩体变形对采场稳定性的影响度 λ可以表示如下：

$$\lambda=\begin{cases}u/U & (u<U)\\ 1 & (u\geq U)\end{cases}. \qquad (8)$$

综合上述两因素对岩体时效特性的影响，引入参数 T_c 来表示采场岩体时效特性影响度，其表述式如下：

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$T_c = W_w \cdot \eta + W_s \cdot \lambda \tag{9}$$

式中，W_w，W_s 分别为岩体风化和岩体蠕变对岩体时效特性影响的权重，且满足 $W_w + W_s = 1$. 根据矿山实际经验，W_w 取 0.2，W_s 取 0.8.

1.5 采场稳定性评判与灾害预警

(1) 稳定性函数及其权重

为了综合评价各种因素的影响度，采用综合指数法[10]来构造采场稳定性函数，如下所示：

$$D_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i U_i}{\sum_{i=1}^{n} N_i}. \tag{10}$$

式中，D_r 为各因素综合影响指数；U_i 为各因素影响度；N_i 为各影响因素权重.

D_r 表征了各因素对采场的综合影响程度，该值越大，采场越危险，采场的稳定程度越低. 反之，亦然.

因此，如果令采场稳定程度为 W_r，则采场稳定性影响指数 D_r 与采场稳定程度 W_r 的关系如下所示：

$$W_r = 1 - D_r. \tag{11}$$

每个影响因素对采场稳定性的影响度是各不相同的，其影响程度用其相对权重值来描述. 权重值的选取方法采取专家评分法：各专家对不同的因素进行评分，分值为 0～100 之间，各因素得分值按式 (12)，(13) 进行处理即可得权重，如表 1 所示.

表 1 岩体质量评价因素影响度权值

Tab.1 Weight of influence index to rock mass

岩体质量	时效性	暴露面积	爆破冲击
0.45	0.05	0.15	0.35

$$N_i = S_i / \sum_{i=1}^{n} S_i, \tag{12}$$

$$N_i = N_i' / N. \tag{13}$$

上两式中，S_i 为各因素的得分值，n 为影响因素的个数，N 为参与评分的专家个数.

(2) 采场稳定性评判及安全预警

为了评价未揭露矿体的稳定性，现对铜绿山矿已揭露矿体和采场按照上述方法进行了稳定性评价，评价的已揭露采场总数为 14 个，由于篇幅所限，其稳定性指数未列出. 然后，对其结果进行模糊聚类分析，可以将采场的稳定性归为 4 类，依此可得出采场稳定性评判标准，如表 2 所示. 根据这个标准，可预测出未揭露采场开采时的稳定性状况，及是否可沿用以前的工艺开采. 同时，还可以设立稳定性指数警戒线对采场进行灾害预警.

表 2 采场稳定性评判标准

Tab.2 Assessment criterion for stope stability

稳定性指数 /%	100-71	70-61	60-51	50-0
稳定性状况	稳定	中等	不稳定	极不稳定

2 灾害预警系统在大冶铜绿山铜铁矿中的应用

我国大冶铜绿山铜铁矿目前主要采用 VCR 法开采. 近年来由于采深的增加与地质条件的恶化，不少采场在回采中出现垮塌，同时波及相邻采场，部分甚至冒落至上部采场，严重影响了矿山的正常安全生产. 为此，应用上述方法对 7313 采场进行了分析，在开挖前揭示其矿岩质量及回采时可能的稳定性与安全性，以便事前采用合适的防范措施.

2.1 采场致灾因子影响度分析

2.1.1 岩体质量评判

通过对 7313 采场周边工程地质结构的素描与裂隙水的调查，及相近采场勘探钻孔岩芯统计分析，根据式 (1)，该采场岩体质量的评判分析结果见表 3.

表 3 7313 采场岩体质量分级及其影响度

Tab.3 Rock mass quality assessment result for 7313 stope

岩性	矿体	大理岩	矽卡岩
RMR	64	60	35
岩体分级	II	II	IV
岩体质量影响度 /%	36	40	65

从表 3 可看出，由于矽卡岩岩性较差，其岩体质量对采场稳定性有较大的影响.

2.1.2 采场暴露面影响度

运用 ANSYS8.1 有限元软件进行模拟分析. 计算模型尺寸为 100 m × 120 m，划分了 7 256 个单元，14 768 个节点，对采矿 11 个主要开挖过程、18 个关键部位进行了模拟计算 (见图 1). 其模拟开挖过程是先掘堑沟和硐室，然后在沿矿体垂直的方向上，每隔 3 m 进行分层落矿，直至完成采场回采。

模拟计算结果表明，开采初期，采空区和凿岩硐室周围出现初步的应力集中；进入开采中期后，随着采场暴露面的增大，采场顶板出现了较大的应力集中，而帮壁则出现了大范围的应力降低区；开采结束后，采场暴露面积达到最大，采空区顶板应力集中系数升高到 7，处于较危险的状况.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

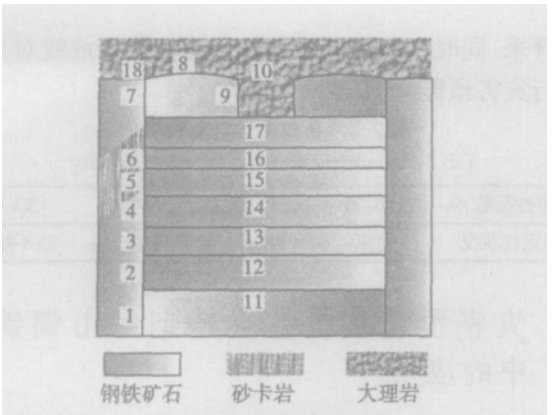


图 1　7313 采场分析模型

Fig.1　The analytic model for 7313 stope

根据取得的应力应变数据，由式 (4) 可计算出暴露面对采场稳定性的影响度，由于篇幅所限，表 4 仅列出了影响较为突出的 4 个关键部位 4 个开采阶段的暴露面影响度.

表 4　采场暴露面对采场的影响度 (单位 %)

Tab.4　Stope exposure area influencing index (unit %)

开采阶段	关　键　部　位			
	5	7	8	10
0	12.08	22.71	31.77	14.18
5	20.60	23.13	29.50	14.91
9	3.90	22.70	38.45	17.20
11	2.17	23.56	100.00	49.36

2.1.3　爆破冲击影响度

为得出爆破落矿的损伤程度，采用 RSM-SY5 智能型声波检测仪对 3 个重要目标点爆破落矿前后的纵波速度[7]进行了测试.测试 A 布置在 1 号位，测试 B 布置在 7 号位，测试 C 布置在 10 号位 (见图 1)，分别对矿柱、硐室帮壁以及硐室顶板的情况进行了测试.测试步骤如下：(1) 采准阶段纵波速度的测试；(2) 第一分层开采的纵波速度的测试；(3) 每隔一分层纵波速度的测试.其测试的结果见表 5 (仅列出影响显著的 4 个阶段的影响度).

表 5　不同开采阶段的声波速度 (单位 m/s)

Tab.5　The acoustic velocity in several mining stage (unit: m/s)

测试时间	A	B	C
采准结束	4 525	4 662	4 412
5 分层结束	3 406	4 406	4 210
9 分层结束	3 092	4 021	4 006
回采结束	2 820	3 325	3 521

根据表 4 与式 (5) 计算，主要测点的爆破冲击影响度见表 6.

2.1.4　采场岩体时效特性影响度

(1) 岩体风化与蠕变影响度

按时序采取 7313 采场 3 种类型的岩石进行了超声波测试，再按式 (7) 计算其风化系数.结果表明，风化系数变化非常小，最大风化系数影响度仅为 0.033.同时按 2.1.2 节所述，采用有限元模拟计算其最大变形值，用式 (8) 计算其岩体蠕变影响度，其岩体蠕变影响度也仅为 0.042.

表 6　各开采阶段的爆破冲击影响度 (单位 %)

Tab.6　Explosion impact influence index in several mining stage (unit %)

测试部位	开采阶段							
	0	1	3	5	7	9	10	11
A	0	17	39	43	50	53	59	61
B	0	1	6	11	17	26	35	49
C	0	0	4	9	11	18	25	36

(2) 岩体时效特性影响度

根据上述计算结果，按式 (9) 计算其岩体时效特性影响度为 0.04.显然，就本研究对象而言，岩体时效特性对采场稳定性影响很小.

2.2　采场稳定性评判与灾害预警

(1) 采场稳定性评判

根据式 (11) 与表 1 可求得采场各关键点的稳定指数，并得其平均稳定性指数为 65.6.再根据表 2 可得知，该采场稳定性可予开采，但其数值接近中等程度上限，必须做好必要的安全防范工作.

(2) 采场安全性预警

为揭示采场可能失稳的危险阶段，选取了 4 个最危险的关键点，根据采场稳定评判函数 (10)，结合表 2 对采场各开挖阶段的稳定程度进行了分析.分析结果示图 2.图中将稳定指数分为 4 个区域：①安全区 (0 线以上的区域)；②橙色警报区 (即中等稳定区，为 0 线到 1 线之间的区域)；③黄色警报区 (即不稳定区，为 1 线到 2 线之间的区域)；④红色警报区 (即极不稳定区，为 2 线以下的区域).

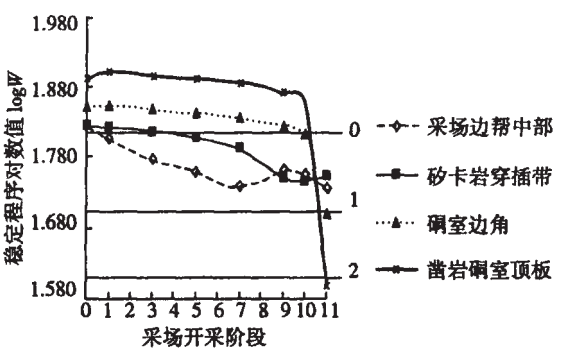


图 2　采场重要部位稳定性变化规律

Fig.2　Stope stability change rule in key spot

图 2 表明：(1) 各关键点在开采初期处于安全稳定状况，但随着开采的推进，其稳定性呈下降趋势，特

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

别是在开采末期,硐室顶板、硐室边角的稳定性急剧下降;⑵矽卡岩穿插带与采场边帮在整个开采阶段中稳定性较低;⑶采场破顶时,所有的关键部位的稳定性均进入警报区,硐室边角进入黄色警报区,而凿岩硐室顶板则进入了红色警报区,处于非常不稳定状态,在施工中尤应重视.

3 结语

近年来,随着国内外对矿山安全的日益重视,采矿灾害预警系统的研究成为国内外研究的热点.然而目前大多数研究仍处于理论研究阶段,实际工程仍主要采用地压监测的方法,对部分不稳固采场开采过程进行跟踪观察,预报可能出现的危险.可以认为,矿山尤其是地下开采矿山灾害预警实际缺位,是目前地下开采事故频发主要原因之一.

本文对金属地下开采灾害预警理论体系推演与灾害预警系统构建进行了初步的探索.从其在铜绿山铜铁矿初步的应用来看,该系统还是适用成功的.当然,其中仍不乏不足之处,欢迎同行指正.

由于地下采场的稳定性与安全性受到诸多因素的影响,并随着应用的工艺不同而各不相同.本文由于时间与水平有限,主要针对大直径深孔采场的稳定性进行了事前评判与灾害预警分析.期望能抛砖引玉,推动地下采矿安全预警理论体系与安全评判系统的进一步完善,以确保矿山安全稳定的生产.

参考文献:

[1] 国家安全生产监督管理局,国家煤矿安全监察局.2006年上半年全国非煤矿山安全生产形势简要分析和下半年重点工作安排[EB/OL]. (2006-08-03) [2006-09-01]. http://www.chinasafety.gov.cn/anquanfenxi/2006-08/03/content_185333.htm.

[2] 方建勤.地下工程开挖灾害预警系统的研究[D].长沙:中南大学资源与安全工程学院,2004.
FANG Jian-qin. Study on Pre-warning System of Underground Engineering Excavating Disaster[D]. Changsha: Department of Resource and Safety, Central South University, 2004.

[3] HOEK E, BROWN E T.岩石地下工程[M].连志升,田良灿,王维德,等译.北京:冶金工业出版社,1986.
Hoek E, Brown E T. Underground Engineering for Rock [M]. LIAN Zhi-sheng, TIAN Liang-chan, WANG Wei-de, et al. Beijing: Press of Metallurgical Industry, 1986.

[4] LAUBSCHER. Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-Mining Applications, Trans[J]. Insten Min Metal, Section A: Mining Industry, 1977, 86: 1-8.

[5] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
CAI Mei-feng. Rock Mechanics and Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.

[6] BRAND, BROWN. Rock Mechanics for Underground Mining [M]. London: George Allen & Unwin Ltd, 1985.

[7] 郭学彬,肖正学,张家达.房柱法落矿爆破对矿柱稳定性影响的声波测试[J].矿业研究与开发,1999,10(5):11-14.
GUO Xue-bing, XIAO Zheng-xue, ZHANG Jiada. Ultrasonic Test for the Influence of Ore Production Blasting [J]. Mining Research and Development, 1999, 10(5): 11-14.

[8] 杨 军,金乾坤,黄风雷.岩石爆破理论模型及数值计算[M].北京:科学出版社,1999.
YANG Jun, JIN Qian-kun, HUANG Feng-lei. Blasting Theory Model and Numerical Calculation for Rock [M]. Beijing: Science Press, 1999.

[9] 叶长锋.洪口水电站坝址区风化岩体工程地质研究及建基面的合理优化[D].南京:河海大学土木工程学院,2005.
YE Chang-feng. Engineering Geological Research of Weathered Rocks of Hongkou Hydropower Station Dam Site and the Reasonable Optimization of Dam Foundation Surface[D]. Nanjing: Department of Civil Engineering, Hehai University, 2005.

[10] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
QIAN Min-gao, SHI Ping-wu. Mine Pressure and Stratum Controlling [M]. Xuzhou: Press of China University of Mining and Technology, 2003.

Study on Disaster Pre-Warning System for Underground Rock Mining

WANG Bao-shan[1], HUANG Zhi-wei[1], XIE Ben-xian[2], ZHOU Guo-jun[1]

(1. Department of Resource & Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Department of Safety & Resource Engineering, Central South University of Technology, Changsha 410012, China)

Abstract: Stope rock-fall is the main style of safety accidents in underground metal mine. Based on analyzing influencing factors, rock mass, time-dependent effect, exposure area and explosion impact were taken as main influencing factors for stope stability. The influencing function and influencing weight were deduced based on the four main control factors by the methods of rock mechanics, damage mechanics and numerical simulation, associated with acoustic testing in site. Then the assessment method and assessment criterion were put forward. The potential hidden troubles and inducements of stope to be mined were revealed, and relevant safety precautions were put forward based on each influencing factor index. At the end, an application at Tonglushan copper-iron mine in China was introduced as an example. 2 figs., 6 tabs., 10 refs.

Key words: disaster pre-warning; rock mass; explosion impact; stope exposure area; time-dependent effect; stope stability

Biography: WANG Bao-shan, male, born in 1981, M.E., underground mining and safety.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net