

文章编号: 0253-9993(2008)09-0971-06

基于三维模拟技术的矿岩可崩性评价

冯兴隆, 王李管, 毕林, 尚晓明, 龚元翔

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 用一种新的数据结构和方法重现三维工程岩体模型和块段模型, 采用空间数据插值方法对三维地质块段模型中的各评价参数进行有效估值, 最后应用可崩性评价方法对矿岩的可崩性进行评价。针对通过不同岩性区域实体模型和块段模型的建立及不同指标的插值, 建立了金川Ⅲ矿区矿岩可崩性评价的三维模型。以此模型为基础, 应用此种方法对金川Ⅲ矿区矿岩可崩性分级表明, 矿岩可崩性属于中等偏上, 与生产实际相符。

关键词: 三维模拟; 可崩性评价; 块段模型; 空间插值

中图分类号: TD853.36

文献标识码: A

Cavability of rock mass based on 3D simulation technology

FENG Xing-long, WANG Li-guan, BI Lin, SHANG Xiao-ming, GONG Yuan-xiang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: 3D engineering rock mass model and block model were reconstructed by a new data structure and method. Each parameter in each block was estimated by geostatistical technique. Finally, cavability of rock and ore was predicted by using cavability estimation method. Based on solid and block model of each region divided by ore or rock and the value of each parameter in each block, cavability estimation 3D model of Jinchuan No. 3 mine area was built. Based on the 3D model, the grading results of orebody cavability in Jinchuan No. 3 mine area indicate that ore and rock cavability belong to extremely apt-medium-sized caving. The result is in conformity with reality.

Key words: 3D simulation; cavability estimation; block model; spatial interpolation

三维可视化技术是近年随着现代技术的进步而发展起来的一种仿真技术, 已广泛应用于矿业工程、环境工程、土木工程和城市建筑等工程中。三维可视化技术的广泛应用, 为工程岩体质量评价提供了强有力的工具和手段, 使用三维可视化技术对工程岩体进行分级评价, 克服了传统手段在辨识上的繁琐。目前, 利用现代技术建立矿山岩体模型, 实现计算机图形可视化, 为岩土工程计算和设计提供模型资料, 并将计算成果可视化, 这些已成为国内外岩土工程界开发研究的热点^[1-2]。本文将岩体质量评价中需要考虑的大量复杂因素, 在地质数据库中集中体现, 在进行评价时, 先预先建立含有各个评价指标的三维可视化实体模型和块段模型, 再按照空间数据插值方法对三维块段模型中的各评价指标进行估值, 之后按照岩体质量分级标准, 对岩体质量进行可视化评价。

1 三维可视化建模

所谓三维可视化建模是指采用适当的数据结构在计算机中建立能反映地质构造的形态和各要素之间关

收稿日期: 2007-09-28 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50490270)

作者简介: 冯兴隆(1980—), 男, 山东巨野人, 博士研究生。E-mail: fxl-001@163.com

系以及地质体物理、化学属性空间分布等地质特征的数学模型^[3]。利用地质体三维可视化技术以直观的方式展示地下三维空间极其不规则的地质构造、矿体、勘探工程（槽探、井探、坑探、钻探）、巷道等实体。随着三维建模及可视化基础理论研究的深入，国内外矿业界开始在生产领域采用三维可视化技术，涌现了众多地质采矿三维可视化方面的软件。比较有代表性的有澳大利亚 SURPAC 公司的 Surpac 软件、MicroMine 公司开发的 MicroMine 软件以及英国 MICL 公司的 DataMine 软件等。

1.1 地质数据库

地质数据库主要包含的信息有：孔口位置、测斜信息、样品信息、岩性信息和工程地质信息（包括节理间距、节理面的空间展布状态、 R_{QD} 值和地下水情况等）。三维可视化地质数据库就是将不同的地质数据信息按照一定的有机关系，共同表示钻孔完整信息的数据集合。

为了满足对矿岩可崩性评价的需要，建立地质数据库时，在岩性信息结构中添加了许多非地质信息的字段。这样就可以在同一模型里根据不同的需要显示和统计分析具体的岩石类型、 R_{QD} 值、节理间距、节理密度等一系列的岩石评价指标参数。通过建立详细的地质岩性模型，为开采区域的岩体质量评价提供可靠的数据保障。

1.2 三维可视化实体模型

三维可视化实体模型实际上就是表面模型内外包裹互不透气的三维线框实体模型，因此它的建模方法实际上是通过表面模型的逼近规则，加上自身的缝合和包裹技术来实现的^[4]。在通常情况下，对岩体进行质量评价还需要建立以岩石为要素单一划分基础上的三维岩体模型。地质调查和观察所得到的资料和数据主要是各岩层、断层的分界面的数据，且这些数据具有有限、稀疏、不规则等特点。建模中将不同的数据资料进行有效的表示，弄清楚各个地质体之间原始数据的对应关系，然后按照三维实体建模的数据要求进行组合和处理，最后经过坐标变换还原成建模所需的实际数据，然后在软件中进行实体模型连接的创建。三维模型的建立过程如图 1 所示。

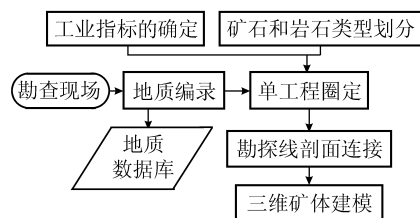


图 1 三维矿岩模型的建立

Fig. 1 Establishment of 3D ore-body model

2 三维块段模型和空间数据插值方法

一般情况下，块段模型用于对品位的估值，本文将这种方法引入到矿岩可崩性评价中。在建立了反映各种不同区域（包括上盘、下盘、矿体等）位置、形态的实体模型后，用实体模型进行边界约束，建立整个评价区域的块段模型。在存储有各种岩性属性的地质数据库基础上，应用空间数据插值方法对评价区域的每个块段进行估值。

2.1 块段模型的建立

地质体块段模型实际上就是对目标地质体进行三维栅格化处理，目前国内外一些地质建模软件如英国的 DataMine、澳大利亚的 MicroMine 等都是采用六面体来表达这些体元，其方法是：首先将研究的范围形成最小包络长方体，将其定义为原型；然后根据地质勘探网度、采矿方法、地质条件以及地质统计学等方面对块段要求来确定单元块尺寸，以此对原型进行三维栅格化；然后对地质体进行块段划分时，用地质体表面模型（包括矿体、地层和断面等模型）对实体模型进行边界约束，在边界处进一步细分，以逼近地质体的空间形态；通过样品组合、样品分析、变异函数计算、选择正确的估值方法、确定估值参数等一系列过程对块段进行属性估值^[5-6]。

2.2 空间数据插值方法

空间数据的插值^[7-8]可描述为：给定 1 组已知空间离散点数据，从这些数据中找到 1 个函数关系式，使该关系式最好地逼近这些已知的空间数据，并根据该函数关系式推求出区域范围内其它任意点的值。对

地质数据进行空间数据插值时，不能简单地套用现成的自动插值方法，必须考虑许多制约因素及相关的地质学原理，如某些地质现象中有一定的趋势构造走向（这种趋势称为各向异性），在进行数据插值时应加入这种各向异性，这样才可形成与现有地质解释相一致的模型。依据空间插值的基本假设和数学本质可将空间内插分类为：几何方法、统计方法、空间统计方法、函数方法、随机模拟方法、物理模型模拟方法和综合方法。其中以几何方法和空间统计方法在地学领域最为常用。

地质统计学估值时要求所有参与插值的样品具有相同的承载，即样品具有相同的样长。而地质勘探阶段获取的原始样品一般是非等长的，为此，需要按一定的长度采用一定的方法对原始样品进行组合。样品组合有多种方法，如“沿钻孔组合”、“按台阶组合”和“混合组合”等。组合样长度要考虑多种因素，如单元块的尺寸、原始样本容量和平均原始样长等。王李管等研究发现，组合样品长度的大小对方差的计算结果有很大的影响，经过研究认为，组合样品长度取和块段尺寸大小相同时较合理^[9]。

3 基于三维模拟技术的矿岩可崩性评价

三维模拟技术的矿岩可崩性评价基本过程：① 对评价区域进行详细的地质构造调查，搜集需要的地质特征信息，如节理间距、节理面的张开度和地下水状况等；② 采用三维矿山工程软件，对评价区域内进行地质数据库创建，将收集到的地质信息全部录入到地质数据库中；③ 采用三维矿山工程软件对评价区域的矿体和岩体进行实体模型创建，还原模拟地质体；④ 采用三维矿山工程软件进行块段模型创建（采用实体模型进行约束）；⑤ 对地质数据库的钻孔和槽探数据进行组合分析，选择数据插值方法；⑥ 采用地质统计学方法对矿岩评价区域内的矿岩分不同指标进行估值，选择一种或多种矿岩质量评价分类方法对矿岩进行分级评价。

3.1 矿岩可崩性评价方法

目前，用于矿岩可崩性评价的各种方法最初大都是在隧道围岩质量评价的基础上引申和发展起来的，把工程地质条件和岩体力学性质参数联系起来，并借鉴工程的经验或教训对矿岩可崩性进行分类。岩体分类是综合不同的地质因素进行岩体质量评价或稳定性预测技术，是进行工程地质分区和崩落性研究的基础。到现在，岩体分类技术已经得到很快发展，岩体分类从单因素到多因素，从定性发展为定量，使得岩体分类方法逐步发展成为实用的复杂岩体评价技术，已成为工程岩体参数的预测重要手段之一。用于矿岩可崩性研究的方法有RMR法（Rock Mass Rating）、地质强度指标法（Geological Strength Index）、Mathews稳定图法、Laubscher崩落图法、矿山岩体分类系统法（The Mining Rock Mass Rating）等。

3.2 评价指标的选择和指标值的计算

一般来说，有5个主要的因素影响岩石的特性，即完整岩石强度、节理面的密度、节理面剪切强度、节理面几何关系和地下水状况。因此在采集数据时，必须满足下列条件：① 所有的参数将对矿岩的可崩性和块度大小有影响；② 数据应该容易从坑道调查和钻孔岩芯中获得；③ 数据应该可以被量化；④ 数据必须对可崩性指标敏感；⑤ 获得的数据必须满足评价模型的需要。

根据这个条件，在本研究中，选择完整岩石强度、 R_{QD} 值、节理间距、节理面的摩擦角、节理面的张开度和地下水状况6个参数来评价矿岩的可崩性。原始数据的搜集原则和处理方法如图2所示。其中， R_{QD} 值、节理间距、节理表面特性和岩石的

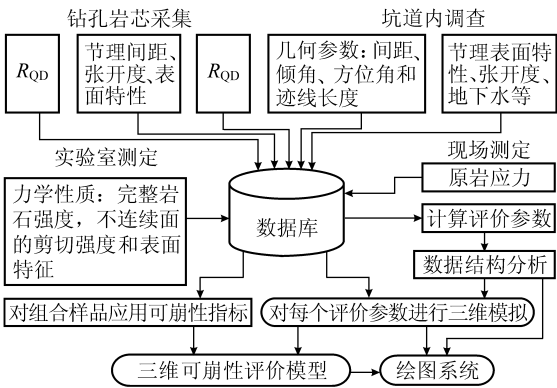


图2 岩石力学数据的搜集原则和处理系统流程

Fig. 2 The flowchart of rock mechanics data collection and processing system

单轴抗压强度从钻孔岩芯中获得。通过大量的实验室试验确定完整岩石的强度,应用岩石力学测试系统确定各种类型岩石节理的剪切强度。完整岩石的摩擦角和内聚力的大小通过三维压力试验获得,节理的内聚力大小通过直剪试验获得。根据获得的节理表面特性可以计算出节理面的摩擦角。在坑道调查中,应用详细线观测方法,可以获得 R_{QD} 值、节理的地质力学参数和节理的表面特征参数。

4 工程应用实例

4.1 工程地质特征

金川Ⅲ矿区主要有 1, 12, 18 号和 58 号矿体,镍金属储量占金川矿区储量的 3.97%。其中 1 号矿体规模最大,主要赋存于岩体中上部到底部,走向长 463 m,延深多于 600 m,矿体厚度东部为 100~150 m,中部 28 m,西部逐渐增大至 86 m。走向 N27°W,矿体倾角上部较缓为 50~60°,1 580 m 以下逐渐变陡达 70~80°。矿体埋藏较浅,地表以下 100 m 见矿,矿体上部为氧化矿,厚度 40~50 m。应用于此次可崩性评价研究的为 1 554 m 水平以上的矿体和岩体。

4.2 评价指标的搜集和计算

本研究应用的原始数据是岩石力学工作队搜集的。工作队主要由金川Ⅲ矿区、中南大学的地质和岩石力学方面的专业人员组成。为了搜集完整岩石强度、 R_{QD} 值、节理间距、节理面的摩擦角、节理面的张开度和地下水状况有关的数据,共采集了长 3 128 m 的钻孔岩芯,调查了长 359 m 的坑道。坑道调查结合井下开拓工程的施工进行,通过详细线观测法共获得了 1 134 条记录。为了全面了解生产区及其影响区中的岩体构造、力学参数、水文条件,为Ⅲ矿区采用自然崩落法开采可行性研究提供地质依据,在Ⅲ矿区 4~12 行勘探线范围总共设计了 13 个钻孔(其中 3 个为机动钻孔)。

原始数据选择“沿钻孔组合”方法,采用平均原始样长作为组合样长度。岩芯单轴抗压强度的组合样长为 0.16 m,其它参数的为 1.2 m。各参数组合样分布形式如图 3 所示。由图 3(a)可知,Ⅲ矿区节理间距在 0~1.4 m,但多数在 0~1.0 m,占 99.9%。整体服从对数正态分布,均值 0.15,标准差 0.151。由图 3(b)可知,Ⅲ矿区 R_{QD} 在 0~100,但 4 以下的数据很多,占 39%。此后基本服从均匀分布, R_{QD} 均值 29.25,标准差 30.912。由图 3(c)可知,Ⅲ矿区摩擦角在 0~43°,均值 39.45°,标准差 2.41。由图 3(d)可知,Ⅲ矿区抗压强度在 0~125 MPa,均值 34.53 MPa,标准差 25.933。

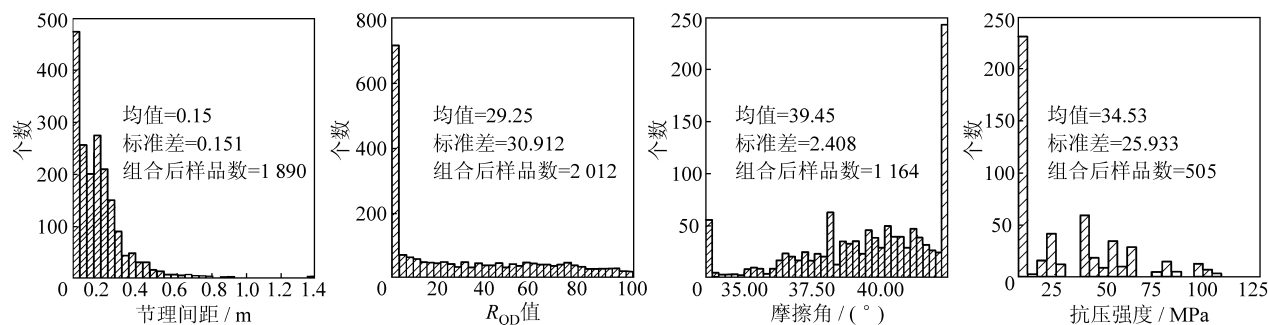


图 3 参数组合样分布

Fig. 3 Composite sample distribution

经过对各参数结构进行变异性分析后发现参数的结构性不是很强,所以不能采用克力格 (Kriging) 法进行估值,因此各参数的值是对三维状态下的各点应用距离幂平方反比法进行插值得到的。

4.3 三维块段模型的建立

在确定块段模型的尺寸时,主要考虑以下几方面的因素:① 矿体层状或似层状特征;② 不同的开采方式及相应的矿块划分尺寸;③ 矿区的勘探网度,单元块段的大小一般为勘探网度的 1/2~1/4;④ 变异函数的特征,单元块段的大小一般为变程的 1/4 左右。

为了能比较精确地控制及圈定各类岩体边界，选择相对小的单元块尺寸更有利于对边界的控制。综合考虑 1554 水平以上的特征及可崩性评价的需要后，最终确定块段模型原点坐标为 4 630 × 8 570 × 1 545，模型大小为 420 m × 600 m × 260 m (*xyz*)，模型方位 N55°E，单元块尺寸为 5 m × 5 m × 5 m，可分解的最小单元块尺寸为 1.25 m × 1.25 m × 1.25 m。

4.4 基于 RMR 指标的矿岩可崩性分级模型

在 MicroMine 软件平台的基础上，应用搜集的原始数据建立金川Ⅲ矿区矿岩的块段模型，并应用距离幂平方反比法对每个块段的评价指标进行估值后，然后按照 RMR 方法中关于分类参数及其等级的规定取值对每个块段的评价参数进行打分^[10]。由于 RMR 评价体系中节理面状态是定性描述的，因此本研究中进行了量化。对节理面状态的评价，考虑节理面粗糙度和张开度 2 个指标，两者所占的总分为 RMR 体系中关于节理面状态的总分，即 30 分，其中粗糙度（用摩擦角表示）占 20 分，张开度占 10 分。取值规定见表 1。

表 1 分类参数及其等级
Table 1 Sorting parameter and rank

参 数		取值范围						
完整岩石	点载荷强度	>10	4~10	2~4	1~2	对较低范围进行单轴压缩实验		
强度/MPa	单轴压缩强度	>250(15)	100~250(12)	50~100(7)	25~50(4)	5~25(2)	1~5(1)	1(0)
<i>R</i> _{QD} 指标/%		90(20)	75(17)	50(13)	25(8)	<25(3)		
节理间距/cm		>200(20)	60~200(15)	20~60(10)	6~20(8)	<6(5)		
摩擦角/(°)		>41(20)	39~41(15)	37~39(10)	35~37(6)	<35(2)		
张开度		很紧闭(10)	紧闭(9)	中等张开(8)	张开(5)	张开很大(2)		
地下水	一般条件	完全干燥(15)	湿润(10)	潮湿(7)	滴水(4)	流水(0)		

注：表中（）数值为对应参数的评分。

劳布施尔（Laubscher）根据 RMR 指标的取值，将矿岩可崩性分为 5 级，并给出了每个级别相应的可崩性、破碎块度、二次爆破量、初始拉底面积等的描述，见表 2。

根据此标准对每个块段进行赋值后就可以得到整个矿岩的可崩性模型。对金川Ⅲ矿区各等级所占的比例进行分析后发现，金川Ⅲ矿区评价区域的矿岩可崩性可分为 4 级，即Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级，各级别特征统计值见表 3。

表 2 劳布施尔评价标准
Table 2 Laubscher evalution standard

参 数	RMR 值				
	100~80	80~60	60~40	40~20	<20
可崩性级别	I	II	III	IV	V
可崩性	不可崩	差	较好	好	很好
破碎块度		大	中	小	很小
二次爆破量		高	不定	低	很低
初始拉底面积/m ²		>30	20~30	8~20	8

表 3 按可崩性等级分类统计
Table 3 The statistic result by cavability class

可崩性等级	RMR 值范围	体积/m ³	占百分比/%	RMR 均值
I	80~100	0	0	
II	60~80	1 039 250	1.88	64.0
III	40~60	22 404 207	40.52	49.0
IV	20~40	15 180 447	27.46	28.0
V	0~20	16 667 229	30.14	18.0
合计		55 291 133		39.8

由表 3 可知，Ⅱ级可崩性矿岩体积占评价区域总体积的 1.88%，Ⅲ级可崩性矿岩体积占 40.52%，Ⅳ级可崩性矿岩体积占 27.46%，Ⅴ级可崩性矿岩体积占 30.14%。Ⅲ矿区的 RMR 均值为 39.8，Ⅱ级可崩性矿岩所占比例极少，只有 1.88%，而其它 3 级可崩性矿岩占评价区域的绝大部分，即金川Ⅲ矿区评价区域的矿岩可崩性处于中等偏上，可崩性较好到很好。

5 结 论

阐述了一种基于三维可视化模型,采用距离幂平方反比法对块段模型估值,最后应用 RMR 指标方法对矿岩的可崩性进行评价的新方法。初步研究显示,当搜集到大量实际工程的岩石力学数据的情况下,地质统计学的工具对整个区域的可崩性评价有很大的帮助。应用本文介绍的评价方法对金川Ⅲ矿区 1 554 水平以上矿岩进行了可崩性评价,评价结果显示,评价区域的矿岩可崩性处于中等偏上,可崩性较好到很好。由于基于三维可视化模型的可崩性评价方法对矿岩各个区域可崩性都有反映,因此,更加准确地对矿山进行开采设计、巷道支护和开采成本评价有重大的意义。

参考文献:

- [1] 柴贺军,黄地龙. 大型矿山岩土工程可视化模型与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (14): 2 526-2 530.
Chai Hejun, Huang Dilong. 3D visualization model of mining geotechnique and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (14): 2 526-2 530.
- [2] 贾明涛,潘长良,肖智政. 基于三维地质统计学的开创建模实践研究 [J]. 金属矿山, 2002 (8): 42-44.
Jia Mingtao, Pan Changliang, Xiao Zhizheng. Study on the ore desposit modelling practice based on three-dimension geological statistics [J]. Metal Mine, 2002 (8): 42-44.
- [3] 张宝一,尚建嘎,吴鸿敏. 三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用 [J]. 地质与勘探, 2007, 43 (2): 76-81.
Zhang Baoyi, Shang Jianga, Wu Hongmin. Application of 3D geological modeling and visualization in solid mineral resource estimation [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43 (2): 76-81.
- [4] 王李管,曾庆田,贾明涛,等. 复杂地质构造矿床三维可视化实体建模技术 [J]. 金属矿山, 2006 (12): 46-49.
Wang Liguan, Zeng Qingtian, Jia Mingtao, et al. Technology of three-dimensional visualized solid modeling for mineral deposit with complicated geological structure [J]. Metal Mine, 2006 (12): 46-49.
- [5] 陈少强,李琦,苗前军,等. 矢量与栅格结合的三维地质模型编辑方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17 (7): 1 545-1 548.
Chen Shaoqiang, Li Qi, Miao Qianjun, et al. An editing method of 3D geological model with the union of vector and grid [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17 (7): 1 545-1 548.
- [6] Pauli S, Pekka L. Geostatistics and block modeling in rock mechanics, 16th World Min. Cong [M]. Paris, 1999.
- [7] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化 [J]. 地学前缘, 2000 (S): 271-277.
Li Peijun. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects [J]. Earth Science Frontiers, 2000 (S): 271-277.
- [8] 李新,程国栋,卢玲. 空间内插方法比较 [J]. 地球科学进展, 2000, 15 (3): 260-264.
Li Xin, Cheng Guodong, Lu Ling. Comparison of spatial interpolation methods [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15 (3): 260-264.
- [9] Wang Liguan, Sugimoto F, Yamasita S. Estimation of cavability by using a block model and fuzzy sets [J]. Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, 2002, 118 (7): 481-489.
- [10] Brown E T. Block caving geomechanics [M]. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Centre, 2003.