

文章编号: 1000-7598(2014)10-2901-08

一种基于块体化程度理论的裂隙岩体 巷道顶板稳定性分级方法研究

陈庆发, 韦才寿, 牛文静, 陈德炎, 冯春辉, 范秋雁

(广西大学 资源与冶金学院, 南宁 530004)

摘 要: 岩体完整性是进行巷道顶板稳定性分级的一个重要指标, 当前分级方法均是从一维角度对岩体结构进行描述, 不能全面刻画出三维空间上顶板围岩的完整性。针对这一缺陷, 引入裂隙岩体块体化程度理论, 以块体化程度代替常规标准中表征岩体完整性的岩体质量 RQD 值和节理间距两项子指标, 开展裂隙岩体巷道顶板稳定性分级研究, 创新形成了一种适用于裂隙岩体顶板稳定性分级的 BT 分级方法。以块体百分比和块体体积曲线为基本依据, 构建出裂隙岩体巷道顶板围岩块体化程度的解算流程; 运用 AHP 法对稳定性影响因素权重进行了排序, 制定出稳定性分级方法与标准。以铜坑矿 92 号矿体裂隙岩体试验区巷道顶板结构面调查数据和岩石力学参数为基础, 运用传统分级方法 RMR 法和 BT 法分别对各试验区巷道顶板稳定性进行评价, 对两种分级结果进行比较分析, 结果表明: 与传统的 RMR 法相比, BT 法在稳定性描述、分级准确性和安全管理指导作用等方面更为优越, 更能够客观真实地反映出裂隙岩体巷道顶板稳定性。研究成果可为复杂裂隙岩体条件下的巷道顶板安全分级与管理提供更为可靠的科学依据。

关 键 词: 裂隙岩体; 顶板; 稳定性分级; BT 分级法; 块体化程度

中图分类号: TD 45

文献标识码: A

Stability classification of roadway roof in fractured rock mass based on blockiness theory

CHEN Qing-fa, WEI Cai-shou, NIU Wen-jing, CHEN De-yan, FENG Chun-hui, FAN Qiu-yan

(College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Rock mass integrity is an important indicator for the stability classification of roadway roof, however, the current grading methods just describe from the one-dimensional angle of rock mass structure, which cannot fully reflect the integrity of the roof rock in three-dimensional. In order to overcome the limitation, the stability classification of roadway roof in fractured rock mass is studied by using blockiness as a rock mass integrity index instead of the two sub-indicators of rock mass quality RQD value and joint spacing in the conventional grading method, creating a kind of innovation especially suitable for the fractured rock mass stability classification methods called BT classification methods. According to the block percentage and block volume distribution curve, a solving process of the blockiness of the roadway roof surrounding rock in fractured rock mass is built. An AHP method is applied to determine the weights of the stability factors. The method and the standard of stability classification are constructed. Based on structure surface data and rock mass mechanical parameters of the roadway roof in four fractured rock mass experimental zones in the ore body No. 92 of Tongkeng mine, using the RMR method in the traditional classification methods and the new development method of roadway roof stability classification for each test area, two different classification results are comparatively analyzed, the results show: compared with the traditional RMR classification methods, BT method is more superior to the stability of the description, classification accuracy and safety management guidance, it can more truly and objectively reflect the fractured rock mass roadway roof stability. Research results can provide more reliable scientific basis for the condition of complex fractured rock mass of roadway roof safety classification and management.

Key words: fractured rock mass; roof; stability classification; BT classification method; blockiness

收稿日期: 2013-07-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41402306); 广西自然科学基金重点项目(No. 2014GXNSFDA118034)。

第一作者简介: 陈庆发, 男, 1979 年生, 博士后, 副教授, 主要从事矿山岩石力学和采矿工艺的教学与科研工作。E-mail: chqf98121@163.com

1 引言

我国矿山约 70% 为地下开采, 顶板稳定性分级一直是矿山安全管理的重要内容。在金属矿山领域, 许多学者对顶板稳定分级进行了积极探索, 如: 胡平安^[1]采用定性分析与定量分析相结合的方法对顶板稳定性分级进行研究; 王红汉等^[2]提出了顶板稳定性分级指标和分级方法; 王永清^[3]依据围岩结构类型将矿山顶板安全管理分为 3 级; 孟中华等^[4]提出了实施顶板动态分级管理方法; 王宁等^[5]提出了声发射神经网络顶板安全分级新方法。

上述研究中, 岩体完整性程度均作为顶板稳定性分级的一个重要指标, 在评价该因素对顶板围岩稳定性影响时, 以节理间距、岩体质量指标 RQD^[6-7]值等进行量衡, 但量衡方法均是从一维角度对岩体结构进行描述, 难以准确反映岩体三维空间上受结构面的切割情况, 对岩体完整性程度描述不够真实客观, 且靠钻孔的办法来获取 RQD 要耗费大量的资金和时间。

为能够更加客观真实描述岩体的完整性程度, 克服传统描述方法中存在的不足。引入裂隙岩体块体化程度分级理论^[8], 开展了基于该理论的裂隙岩体巷道顶板稳定性分级研究, 从而创新形成了一种特别适用于裂隙岩体工程顶板稳定性分级的 BT 分级方法, 并将其应用于广西华锡集团铜坑矿 92 号矿体裂隙巷道顶板稳定性分级评价中。

2 BT 分级方法理论基础

2.1 裂隙岩体块体化程度理论

(1) 块体百分比

岩体块体化程度的指标: 块体百分比 K , 其定义为岩体中被结构面切割圈闭形成有限块体的体积和与岩体总体积的比值, 范围为 0~100%^[8], 其表达式为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中: v_i 为各有限块体的体积; n 为块体个数; V 为人为划定或岩体模拟中的岩体总体积。

(2) 块体体积曲线

块体体积曲线是将土力学中用来分析土的粒径级配分布的级配曲线引入岩体研究领域而提出的概念。它比块体百分比反映信息多, 除了能够描述岩体的完整性程度以外, 还能够反映出岩体被裂隙切割形成块体的规模, 即在岩体内形成的块体体积大小、数目以及各个块体体积差距大小等。在块体体积曲线

中横坐标对应块体的体积大小, 纵坐标表示小于某体积的块体的累积百分含量。纵坐标为 10%、30%、60% 所对应的块体体积大小 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为有效体积、中值体积、限定体积。

通过曲线形状可以判断岩体中块体不均匀程度: 曲线越陡表示岩体中块体体积越均匀; 反之, 则表示岩体中块体体积越不均匀。

2.2 块体化程度分类标准

文献^[8]给出了块体化分类, 如表 1 所示。该分类标准与以往经常用岩体内部不连续面的信息来划分顶板岩体类型相比更准确直接, 这对裂隙岩体自然块度描述更加全面, 能够更客观地刻画岩体完整性。

表 1 裂隙岩体块体化程度分类表
Table 1 Blockiness classification of fractured rock mass

块体化程度分类描述	d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 存在情况	块体百分比/%
非块状化岩体	d_{10} 不存在	0~10
轻度块状化岩体	d_{10} 存在, d_{30} 不存在	10~30
中度块状化岩体	d_{30} 存在, d_{60} 不存在	30~60
块状化岩体	d_{60} 存在	60~100

2.3 块体化程度解算流程

根据裂隙岩体块体化程度理论, 构建出裂隙岩体巷道顶板块体化程度解算流程, 如图 1 所示。

(1) 巷道顶板结构面调查

采用精测网法对巷道顶板结构面进行调查^[9], 图 2 为精测网法示意图, 图中 $A(x_a, y_a)$, $B(x_b, y_b)$ 为一条裂隙迹线的两个端点的坐标。

(2) 结构面数据初步整理

建立裂隙岩体数学模型需对岩体中各确定结构面几何参数进行数学描述, 包括结构面的空间位置、方向、形状、大小等。运用 Dips 软件对结构面调查数据进行分组后, 用 Excel 软件对各分组数据进行统计计算, 确定各组结构面的具体参数, 掌握结构面分布规律。

(3) 表征单元体尺寸确定

某一参数达到基本稳定时, 岩体范围临界尺寸称为该参数的表征单元体(REV)^[10-11]。块体百分比的表征单元体是指块体百分比达到基本稳定时岩体的临界尺^[12]。从统计角度来看, 岩体范围太小, 结果随机性大, 统计规律失真; 但太大的岩体范围又受到计算机能力限制。从块体化程度角度, 大多数裂隙岩体的 REV 大小在 4 倍与 12 倍裂隙间距之间, 不超过 12 倍间距^[13]。

(4) 裂隙岩体数学模型的建立

基于一般块体理论开发的 GeneralBlock 软件^[14]

是目前惟一能在有限延展裂隙条件下识别出所有块体的软件,将实际调查的结构面相关参数及选定的表征单元体尺寸输入到软件中,建立裂隙岩体数学模型,识别出所有块体,计算出各块体体积。利用 Excel 软件对体积数据进行处理并绘图,分析可得块体百分比与体积曲线,对列表 1 得出岩体块体化程度类型。

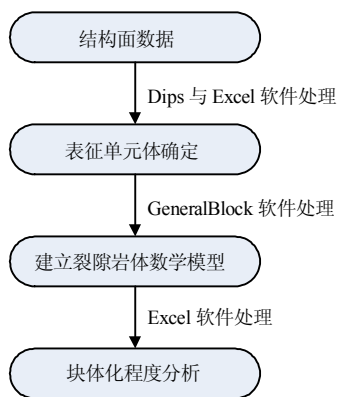


图 1 裂隙岩体巷道顶板块体化程度解算流程
Fig.1 Blockiness solving process of roadway roof in fractured rock mass

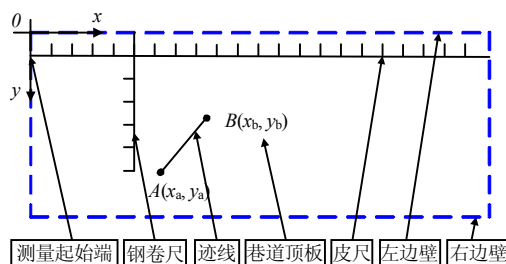


图 2 精确网法
Fig.2 Precise and accurate network method

3 BT 分级方法

BT 分级方法是以裂隙岩体块体化程度理论为基础,是以岩体块体化程度、岩石抗压强度、节理条件、地下水条件为重要指标的一种特别适用于裂隙岩体稳定性分级的评价体系。该方法以工程现场调查数据为依据,按照一定的评分准则对各指标进行取值,综合计算出所研究对象的总分值,对照相关标准进行巷道顶板稳定性评价。

3.1 工程现场调查

实地踏勘裂隙岩体巷道工程现场,掌握裂隙岩体巷道稳定状况,开展工程地质调查,收集相关结构面数据资料。

3.2 BT 分级指标确定

目前,在矿岩体稳定性分级的各种方法中,多以岩体质量指标 RQD 值、岩石单轴抗压强度、节理间

距、节理特征和地下水作为稳定性分级的主要指标。

基于块体化程度在三维上描述顶板围岩结构面的优势,BT 分级法采用块体化程度指标代替表征岩体的完整性的岩体质量 RQD 值和节理间距两项子指标,从而形成以岩体块体化程度、岩石单轴抗压强度、节理条件和地下水条件等代表性分级指标。

3.3 BT 分级方法各指标评分值计算

(1) 分级指标权重确定

为合理反映各项指标(影响因素)影响程度,利用层次分析法(AHP 法)确定裂隙岩体巷道顶板稳定性分级指标权重分配。

首先,构建裂隙岩体巷道顶板稳定性分级指标的层次分析模型,如图 3 所示, A 代表目标层, B_i 代表指标层。

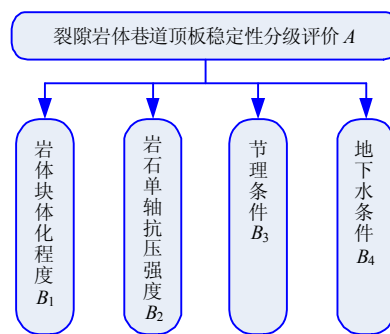


图 3 裂隙岩体巷道顶板稳定性主要影响因素层次分析模型
Fig.3 Main factors hierarchical analysis model affecting the roadway roof stability in fractured rock mass

然后,参照岩体地质力学(RMR)分类方法中各指标的最高评分值的大小,对各指标重要程度进行两两比较,构建判断矩阵,其中岩体块体化程度的重要性依据岩体质量指标 RQD 值和节理间距两个指标的最高评分值之和进行评价。按照层次分析法计算步骤计算出各项指标权值。

最后,根据判断矩阵计算出各因素权值 w , 求出最大特征值 $\lambda_{\max} = 4$, 一致性指标 $CI = 0$, 进行一致性和随机检验, 随机一致性比率 $CR = CI/RI = 0 \leq 0.1$, 计算结果具有满意的一致性。最终,得到各影响因素指标的权重分配,各因素对目标的权重向量 $W = (W_1, W_2, W_3, W_4) = (0.4, 0.15, 0.3, 0.15)$, 如表 2 所示。

表 2 BT 分级法各指标权重分配表

Table 2 Weight distributions of the BT classification method

A	B_1	B_2	B_3	B_4	W	$\lambda_{\max}=4$
B_1	1	8/3	4/3	8/3	0.40	$CI=0$
B_2	3/8	1	1/2	1	0.15	$CR \leq 0.1$
B_3	3/4	2	1	2	0.30	具有满意的 一致性
B_4	3/8	1	1/2	1	0.15	

(2) 各项指标取值原则

根据已确定的分级指标, 对各指标进行等级划分。依据各等级的优劣程度确定评分值 (采用百分制), 对巷道稳定越有利评分值越高, 最有利的取 100 分, 最不利的等级取 0 分。

岩体块体化程度和单轴抗压强度两项指标的易量化表示, 为使取值尽可能精确, 先对各参数进行区间划分, 再确定各参数区间相应取值范围。节理面条件和地下水条件两项指标不易采用定量表示的指标, 则需定性划分后再进行量化。表 3 为裂隙岩体巷道稳定性分级各指标取值表。

(3) 各指标分值确定

根据具体工程各项指标的情况, 对照取值标准表直接进行评分取值, 当同一指标存在多种情况时, 该指标的分值还需要按照各种情况出现的比例加权平均计算后确定。各指标分值向量 $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)$, u_i 为第 i 项因素评分值。其中岩体块体化程度的分值

u_1 按式 (2) 计算:

$$u_1 = 100(1 - K) \quad (2)$$

式中: K 依据式 (1) 分析计算所得。

(4) 总评分值计算

BT 分级法总评分值计算公式如下:

$$F = UW^T \quad (3)$$

式中: F 为 BT 分级法总评分值; U 为各指标的分值向量; W 为各因素对目标的权重向量。

3.4 BT 分级法评价标准

参照传统分级方法的标准, 整合我国部分矿山在顶板稳定性的分级的研究成果, 将裂隙岩体巷道顶板的稳定性划分 4 个等级, 即为极稳定 (I 级)、中等稳定 (II 级)、不稳定 (III 级) 和极不稳定 (IV 级) 4 个级别, 稳定级别的综合评分值采用等区间划分。

表 4 为推荐采用的裂隙岩体巷道顶板稳定性分级标准表, 具体应用根据工程具体情况适当修正。

表 3 BT 分级法各指标取值表

Table 3 Index values of the BT classification method

岩体块体化程度 B_1	块体百分比 $K/\%$	评分值 u_1	岩石单轴抗压强度 /MPa	评分值 u_2	节理条件 B_3	评分值 u_3	地下水条件 B_4	评分值 u_5
非块状化	0~10	90~100	>200	100	节理面粗糙, 不连续, 闭合, 力学性质高	100	干燥	100
轻度块状化	10~30	70~90	100~200	70	节理面稍粗糙, 张开度<1 mm, 节理面岩石坚硬	70	潮湿	70
中度块状化	30~60	40~70	50~100	40	节理面波状光滑, 张开度<1 mm, 中等连续性, 含较硬的充填物。	40	渗水	40
块状化	0~30	0~40	10~50	10	节理面平滑光滑或含厚度<5 mm 的软弱夹层, 张开度 1~5 mm, 节理连续。	10	滴水	10
			<10	0	含厚度>5 mm 的软弱夹层, 节理连续。	0	流 (涌) 水	0

表 4 BT 分级法评价标准表

Table 4 Evaluation standards of the BT classification method

评分值	分级	稳定性评价	巷道顶板特征描述
75~100	I	极稳定	围岩坚硬, 结构面不发育, 完整性好; 岩石强度高; 顶板干燥; 可长期保持稳定, 一般无碎块掉落, 无需支护。
50~75	II	中等稳定	围岩较坚硬, 结构面较发育, 岩体完整性中等; 或岩体硬度一般, 但完整性好。结构面条件较好, 受地下水、风化作用等不利因素影响较小, 可长期保持稳定; 但若无支护, 在局部位置可能出现片落掉块现象, 一般可进行适当支护或不支护; 或比较破碎, 已进行较好支护, 也可长期保持稳定。
25~50	III	不稳定	围岩较坚硬, 但结构面发育, 岩体较破碎; 或完整较好, 围岩较软弱; 结构面条件较差; 巷道形成后形成较多不稳定块体, 或者出现严重变形, 自稳能力差, 若无支护或支护强度达不到要求, 受地下水、风化作用等不利影响较大, 在采动或爆破震动作用下, 局部位置将出现一定规模的冒顶塌方现象, 需要采取有针对性支护措施。
0~25	IV	极不稳定	结构面极为发育, 围岩极破碎, 自稳能力较差, 巷道形成后若不及时支护, 则会出现冒落坍塌现象, 在其他不利因素作用下则会大面积冒落失稳; 即使进行支护, 若支护设计达不到要求, 也会出现失稳现象。开挖后需及时进行支护, 且支护设计须达到要求。

4 工程应用

4.1 工程概况

铜坑矿是广西华锡集团股份有限公司下属的二级单位, 属国有大型矿山企业, 年生产能力为

220×10⁴ t。铜坑矿有上中下 3 个大型矿体, 依次分别为细脉带矿体、91 号富矿体和 92 号巨型贫矿体。前矿体开采已经结束, 目前正在大量开采 92 号矿体。

铜坑矿 92 号矿岩体硬度大, 部分区域节理裂

隙极为发育，岩体完整性差。崩落法回采过程中，凿岩巷道经常出现冒顶、整体跨塌的现象，甚至在局部破碎区域采用加固措施后仍出现灾害现象，极大影响了矿山安全生产工作。通过现场实地勘察发现，部分巷道出现有松动掉块、顶板离层冒落、挂网破裂、锚杆失效等失稳破坏形式，如图 4 所示。为保证巷道顶板安全稳定，需对裂隙巷道的稳定性进行分级，旨在能为巷道顶板的支护管理提供更加科学依据，以促进矿山安全生产。

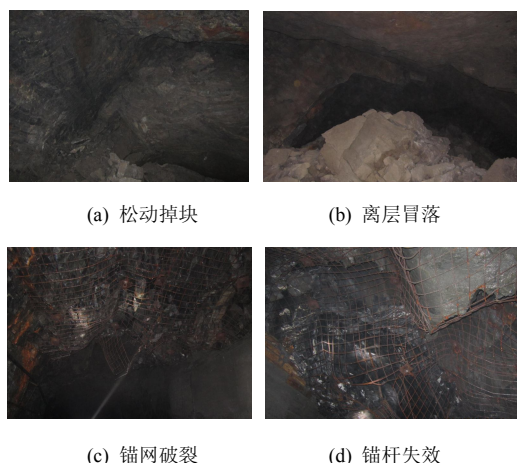


图 4 92 号矿体裂隙岩体部分巷道顶板破坏失稳现象
Fig.4 Destruction instability phenomena of the part roadway roof in the fractured rock mass of ore body No. 92

4.2 裂隙岩体巷道顶板结构面调查分析

实践中对 92 号矿体裂隙岩体选择了 4 个试验区，采用精细网法对巷道顶板结构面进行了详细调查，利用 Dips 软件对各试验区结构面进行分组，对结构面各性质进行统计分析。

1[#]试验区结构面按倾向可分为 4 组，分别为 1 组 10°~20°、2 组 30°~40°、3 组 280°~290°、4 组 300°~310°，其中 1、2 组为优势组，倾角集中在 45°~65°。结构面力学性质总体呈压性；间距为很密级别，迹长以中等连续性为主，隙宽为裂开级别，粗糙度以平直光滑和光滑波状为主，结构面干燥。

2[#]试验区结构按倾向可分 3 组：1 组 10°~20°、2 组 110°~120°、3 组 180°~190°，其中 1、2 组为优势组，倾角主要集中在 40°~60°。结构面类型主要为层理面，局部为脉岩充填的裂隙充填物，硬度较大，力学性质以压性为主；结构面间距密集、隙宽为裂开级别，潮湿状态，较粗糙，部分为平直光滑；连续性较低。

3[#]试验区结构面按倾向可分为 3 组，分别为 1

组 330°~340°、2 组 110°~120°、3 组 150°~160°，其中 1 组为优势组，倾角主要集中在 20°左右。结构面主要由压性的层理面构成；结构面间距很密，中等连续性，隙宽以裂开级别为主，结构面平直光滑，顶板为滴水状态。

4[#]试验区结构面按倾向可分为 3 组，倾向分别为：1 组 180°~190°、2 组 210°~220°、3 组 100°~110°，其中 1、2 组为优势组。结构面类型主要为层理面和矿脉充填裂隙，充填物较硬，力学性质以压性为主，少部分为张性；结构面间距很密，以中等连续性为主，隙宽为裂开级别；结构面平直光滑为主，且均为渗水状态。

4.3 基于传统分类方法的巷道顶板稳定性评价

(1) RMR 分级方法

目前，国内外常用的工程岩体分级（分类）方法有许多种，如 RQD 法、Q 法、RMR 法等^[15]。本文采用得到广泛应用的 RMR 法对各试验区巷道顶板稳定性进行评价，然后将其评价结果与新分级方法的评价结果进行对比。

地质力学 RMR 分级方法由比尼奥斯基于 1973 年间提出，该分级方法共有 5 个基本指标：岩块单轴抗压强度、岩体质量指标 RQD、节理间距、节理面性状、地下水条件及节理产状^[16]。5 个基本指标的分值都是根据工程实际情况按照标准取定，求和得到岩体的 RMR 总评分值，然后按照节理的产状对工程稳定的影响进行修正，将修正后的总分对照表 5 求得所研究对象岩体质量级别。

表 5 RMR 岩体质量分级表
Table 5 Rock mass classifications of RMR

级别	RMR 值	岩体分级	稳定时间
I	81~100	很好	15 m 跨度，20 a
II	61~80	好	10 m 跨度，1 a
III	41~60	一般	5 m 跨度，7 d
IV	21~40	差	2.5 m 跨度，10 h
V	0~20	很差	1 m 跨度，30 min

(2) 不同试验区巷道顶板 RMR 分级

以铜坑 92 号矿体工程地质资料和结构面调查数据为基础，根据 RMR 系统的取值标准，计算出不同试验区巷道顶板 RMR 值，评价其工程稳定性。

92 号矿体不同试验区巷道顶板均属于硅质岩，单轴抗压强度约为 80 MPa；RQD 值分别为 28.7%、69.5%、40.6%、28.7%，其他指标具体情况可由结构面调查分析结果确定。不同试验区巷道顶板 RMR 分类法分值计算如表 6 所示。

由表 6 的评分结果，1[#]~4[#]试验区巷道顶板岩体 RMR 总分值分别为 43、48、32、45，对照表 5

的分级标准可知,除了 3#试验区顶板岩体为Ⅳ级外,其它三个试验区顶板岩体均为Ⅲ级。RMR 的分级结果表明:3#试验区顶板的稳定性最差,属于较不稳定的岩体;其他 3 个试验区的稳定相差不大,属于一般稳定性岩体。通过现场调查也表明,3#试

验区顶板的稳定确实是最差,这与工程实际相符合。但现场 3#顶板在巷道刚形成时已出现较大规模的掉块现象,已被迫立即采用锚网支护,而其他 3 个试验区顶板的稳定性则明显不一致,这与 RMR 分级标准对工程稳定性描述有一定偏差。

表 6 不同试验区巷道顶板 RMR 评分表

Table 6 The RMR scores of the roadway roof in different tests

试验区	岩块单轴抗压强度/ 评分表 (MPa/分值)	岩体质量指标 RQD/ 评分表 (%/分值)	节理间距/评分表 (cm/分值)	节理条件/评分表 (条件/分值)	地下水条件/ 评分值	按节理产 状修正值	总分值
1 [#]	81/7	28.7/8	8.7/8	节理宽度大部分为 0.1 cm; 平直光滑和光滑波状,中等 连续/10	干燥/15	一般/-5	43
2 [#]	82/7	69.5/13	15/8	节理宽度小于 1 mm, 节理 面较粗糙,低连续/20	潮湿/10	不利/-10	48
3 [#]	85/7	40.6/8	15/8	节理面宽度小于 5 mm; 平 直光滑;中等连续/10	滴水/4	一般/-5	32
4 [#]	79/7	28.6/8	5.7/5	节理不发育,结构面宽度小 于 1 mm;中等连续/20	渗水/7	有利/-2	45

4.4 基于 BT 分级法的巷道顶板稳定性评价

(1) 裂隙岩体模型建立

在表征单体尺寸的取值规定下,试验区表征单元体尺寸在计算机能力范围之内尽量取大值,1[#]~4[#]试验区的表征单元体尺寸分别为 4 m×4 m×4 m、4.5 m×4.5 m×4.5 m、6.5 m×6.5 m×6.5 m、5 m×5 m×5 m。利用 GeneralBlock 软件建立各试验区的数学模型,将各组结构面调查参数输入到模型中,如图 5 所示。识别所有块体,输出各块体体积。

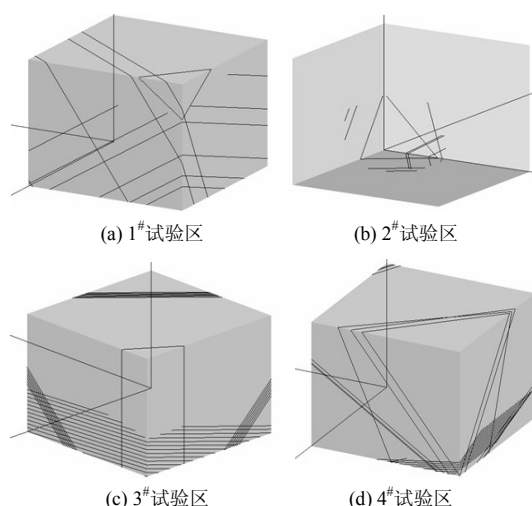


图 5 各试验区裂隙岩体模型图

Fig.5 Fractured rock mass models of each test area

(2) 块体化程度计算结果分析

利用 GeneralBlock 软件识别出各试验区裂隙岩体模型中的所有块体,输出各块体的体积,利用相关软件绘制出各试验区顶板块体体积曲线。图 6 为

92 号矿体各试验区顶板块体体积曲线,表 7 为块体化程度计算结果。由图 6 和表 7 可知,1[#]~4[#]试验区巷道顶板块体百分比分别为 62.25%、74.9%、92.04%、16.3%。参照表 1,1[#]~3[#]试验区巷道顶板均属于块状化岩体,4[#]试验区巷道顶板属于轻度块状化岩体,其他试验区巷道顶板围岩均比较破碎。

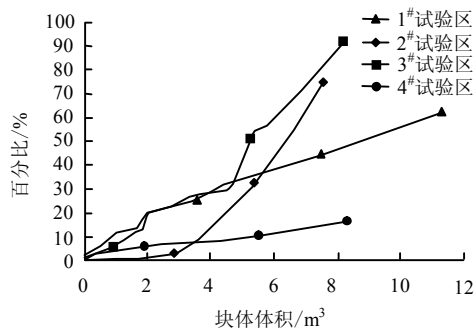


图 6 92[#]矿体各试验区巷道顶板块体体积曲线图
Fig.6 Volume curves in roadway roof of each test area in the ore body No. 92

结合块体体积曲线形状还可知,各试验区块体体积大小和均匀程度。1[#]试验区块体体积曲线较平直,块体化程度较高,存在大量小块体;2[#]试验区块体百分比最大,块体体积曲线最陡,块体体积比较均匀,小块体极少,块体体积集中分布在一定区段,顶板容易出现大块体松石掉落的失稳现象;3[#]试验区顶板块体百分比最大,达到了 92.04%,说明顶板完整性极差,处于支离破碎的状态,且块体体积不均匀,这与现场情况极为吻合。4[#]试验区顶板块体百分比最小,仅为 16.3%,仅存在极少数的块

体，顶板完整性较好。

(3) 不同试验区巷道顶板稳定性评价

以各试验区裂隙岩体块体化程度、结构面调查数据和岩石力学参数为依据，按照表 3 的取值标准对各项指标进行评分，其中 u_1 分值按照式(2)计算，分别确定各试验区分值向量 U ，最后根据式(3)的计算方法算出总评分值，对照表 5 对各试验区巷道顶板的稳定性进行分级。表 8 给出了 4 个试验区巷道顶板各指标取值情况和稳定性分级结果。结果表明：1[#]~4[#]试验区巷道顶板稳定性分别为不稳定（III

级）、不稳定（III级）、极不稳定（IV级）和中等稳定（II级）。

表 7 各试验区巷道顶板块体化程度计算结果

Table 7 Blockiness integration results of the roadway roof in each test area

试验区编号	块体百分比/%	顶板块体化程度类别
1 [#]	62.25	块状化岩体
2 [#]	74.9	块状化岩体
3 [#]	92.04	块状化岩体
4 [#]	16.3	轻度块状化岩体

表 8 铜坑 92#号矿体 4 个试验区巷道顶板稳定性分级结果表

Table 8 Roadway stability classification results of four pilot area in ore body No. 92 of Tongkeng mine

试验区编号	U	u_1	u_2	u_3	u_4	$F=U \times W^T$	稳定性级别
1 [#]	U_1	37.8	40	40	100	48.12	III级(不稳定)
2 [#]	U_2	25.1	40	10	40	25.04	III级(不稳定)
3 [#]	U_3	7.96	40	10	10	13.68	IV级(极不稳定)
4 [#]	U_4	83.7	40	40	40	57.48	II级(中等稳定)

4.5 传统 RMR 法与 BT 法评价结果比较分析

采用 RMR 法和 BT 分级方法对铜坑矿 4 个试验区的巷道顶板稳定性进行分级评价，结果均表明，3[#]试验区巷道顶板稳定性最差，这与现场情况吻合，但从整体上看，BT 法比 RMR 法更为优越。

(1) 稳定性描述

如 3[#]试验区，现场岩体十分破碎，在巷道掘进过程中，顶板持续出现较大规模冒落掉块现象，在 RMR 法分级结果中属于差岩体（IV级），巷道自稳时间约为 10 h；在 BT 分级法的结果中属于极不稳定级别（IV级），自稳能力极差，在无支护条件下巷道形成后随即失稳。

(2) 分级准确性

在 RMR 法分级结果中 1[#]、2[#]和 3[#] 3 个试验区巷道顶板均属于III级岩体，稳定性相差不大；在 BT 分级法的分级结果中，1[#]和 2[#]试验区巷道顶板属于不稳定级别（III级），4[#]试验区巷道顶板属于中等稳定级别（II级），现场调查表明，这些试验区巷道顶板稳定有较大差别，特别是 4[#]试验区顶板完整性较好，基本上不需要支护，而 1[#]和 2[#]试验稳定性稍差。1[#]试验区顶板破坏形式主要是出现大小不一松石掉落，2[#]试验区顶板主要在局部位置出现离层冒落。

(3) 安全管理指导作用

对于裂隙岩体而言，BT 分级法不仅能够对巷道顶板稳定性进行分级，且通过计算分析出岩体的块体化程度，深入刻划出巷道顶板完整性，对巷道顶板的安全管理具有较强的针对性指导作用。具体描述如下：1[#]试验区结构面条件较良好，顶板很干

燥，但由于其顶板岩体块体化程度较高，存在大量小块体（是引起巷道不稳定的最重要原因），对于这类巷道则应在锚网支护的基础上适当喷浆，以防止大量不稳定小块体掉落；2[#]试验区顶板岩体完整性较差，危险块体体积较大，对于该巷道则应当采取锚网支护，在支护时应适当提高锚杆长度和密度；3[#]试验区巷道顶板支离破碎，稳定性最差，该巷道应当采取锚喷网支护，在支护时应适当提高锚杆长度和密度，增大喷浆厚度。4[#]试验区巷道顶板完整性较好，无需要采取特别支护措施，通过加强管理及时处理松石掉块即可保证巷道安全稳定。

5 结 论

(1)将块体化程度理论应用于裂隙岩体巷道顶板稳定性分级研究，提出了以块体化程度代替表征常规标准岩体完整性的岩体质量 RQD 值和节理间距两项子指标，创新形成了一种特别适用于裂隙岩体稳定性分级的 BT 分级方法，弥补了当前分级方法在三维空间上描述顶板围岩完整性的不足。

(2)系统提出了 BT 分级法的评价体系，分析了影响裂隙岩体巷道顶板稳定性因素，运用 AHP 法确定各指标的权重，制定了各指标的取值准则和稳定性评价标准。

(3)运用传统分级方法中 RMR 分级法和本文提出 BT 分级法，完成了铜坑矿 92 号矿体裂隙岩体试验区巷道顶板稳定分级研究，对两种分级结果进行比较分析，结果表明：BT 分级法在稳定性描述、分级准确性和安全管理指导作用等方面比传统

RMR 分级法更符合工程实际。

(4) BT 分级法用于评价工程稳定性时, 如与现场试验、数值模拟等手段相结合, 将会为地下矿山裂隙岩体巷道顶板安全管理提供更加可靠的依据。

参考文献

- [1] 胡平安. 矿山顶板分级管理方法初探[J]. 工业安全与防尘, 2000, 12(12): 19—22.
HU Ping-an. Tentative exploration of mine roof grading management method[J]. **Industrial Safety and Dustproof**, 2000, 12(12): 19—22.
- [2] 王红汉, 董小明. 磷矿矿山顶板稳定性分级方法[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(4): 54—56.
WANG Hong-han, DONG Xiao-ming. Stability classification method for mine roof of phosphorus mine[J]. **Industrial Safety and Environmental Protection**, 2006, 32(4): 54—56.
- [3] 王永清. 矿山顶板安全管理分级思考[J]. 矿山压力与顶理, 2004, 16(4): 27—31.
WANG Yong-qing. Thinking of mine roof safety management grade[J]. **Mine Pressure and Top Management**, 2004, 16(4): 27—31.
- [4] 孟中华, 卢立松, 耿立峰. 金属矿山深井开采过程的顶板事故浅析[J]. 采矿技术, 2010, 10(4): 63—64.
MENG Zhong-hua, LU Li-song, GENG Li-feng. Analysis on the roof accident in deep mining process of metal mine[J]. **Mining Technology**, 2010, 10(4): 63—64.
- [5] 王宁, 韩志型. 采场顶板岩体安全分级的声发射神经网络方法[J]. 有色金属(矿山部分), 2003, 55(6): 17—19.
WANG Ning, HAN Zhi-xing. Acoustic emission neural network method for mine roof rock mass safety grade [J]. **Nonferrous Metal (mine section)**, 2003, 55(6): 17—19.
- [6] DEERE D U, HENDRON A J, PATTON F D, et al. Design of surface and near surface construction in rock[C]//Proceedings of 8th U.S. Symp. Rock. Mech. New York: Soe. Min. Engineers, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engineers, 1967: 237—302.
- [7] DEER D U, MILLER R P. Engineering classification and Index properties of rock[R]. Albuquerque, NM: Air Force WeaPons Laboratory.
- [8] 刘晓菲. 裂隙岩体块体化程度研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- [9] 李建斌, 蔡靖疆, 巨广宏, 等. 岩体硬性结构面精测及量化处理[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 144—147.
LING Jian-bin, CAI Jing-jiang, JU Guang-hong, et al. Precise measurement and quantization about joints of rock masses[J]. **Chengdu University of Technology**, 2001, 28(2): 144—147.
- [10] 张丽, 张辛, 于青春, 等. 非常低延展性裂隙岩体 REV 存在性研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(5): 20—25.
ZHANG Li, ZHANG Xin, YU Qing-chun, et al. Determining of the REV for fracture rock mass of very low ductility[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2011, 38(5): 20—25.
- [11] 夏露, 刘晓菲, 于青春. 基于块体化程度确定裂隙岩体表征单元体[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3993—4005.
XIA Lu, LIU Xiao-fei, YU Qing-chun. Determining representative elementary volume of fractured rock mass based on blockiness analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3993—4005.
- [12] 卢波, 葛修润, 朱冬林, 等. 节理岩体表征单元体的分形几何研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1355—1361.
LU Bo, GE Xiu-run, ZHU Dong-lin, et al. Fractal study on the representative elementary volume of jointed rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(8): 1355—1361.
- [13] 向文飞, 周创兵. 裂隙岩体表征单元体研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5687—5692.
XIANG Wen-fei, ZHOU Chuang-bing. The advances in investigation of representative elementary volume for fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.2): 5687—5692.
- [14] 于青春, 薛果夫, 陈德基. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [15] 藏秀平, 阮含婷, 李萍, 等. 岩体分级考虑因素的现状 & 趋势分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2245—2248.
ZANG Xiu-ping, RUAN Han-ting, LI Ping, et al. Status quo and trends analysis of factors considered in rock mass classification methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2245—2248.
- [16] 陈昌彦, 王贵荣. 各类岩体质量评价方法的相关性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1894—1900.
CHEN Chang-yan, WANG Gui-rong. Discussion on the interrelation of various rock mass quality classification systems at home and abroad[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1894—1900.