基于传统稳定性分级方法及分形理论的岩体质量评价①

郝益民[1]，章跃芬[2,3]，朱永生[1]，郝书玉[4]，芮福鑫[5]，宋卫东[6]，田济扬[2,3]
（1.雅江清洁能源科学技术研究（北京）有限公司，北京 100038；2.中国水利水电科学研究院，北京 100038；3.水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心，北京 100038；4.中南财经政法大学 信息工程学院，湖北 武汉 420100；5.天津大学 建筑工程学院，天津 300350；6.北京科技大学 土木与资源工程学院，北京 100083）

摘　要：以山东鑫汇金矿为工程背景，采用 ShapeMetriX 3D 系统对现场 20 处节理裂隙进行扫描测量，获得了岩体产状和节理几何数据；分别利用 BQ 分级法、Q 分级法和 RMR 分级法对矿岩稳定性进行分级评价，并引入分形理论分析节理裂隙空间分布特征。结果表明，3 种分级方法所得岩体质量等级较为一致，整体稳定性介于一般至差。其中上盘及其接触带稳定性基本为Ⅳ级及以上；矿体稳定性以Ⅲ级为主；下盘围岩稳定性相对较好，部分为Ⅱ级。分形维数小于 1.1 时岩体质量较好；分形维数大于 1.1 时岩体质量较差。基于以上研究结果，初步提出了依据岩体节理裂隙分布的分形维数为分级指标的岩体质量评价方案。

关键词：岩体稳定性；岩体分级；岩体质量评价；BQ 分级法；Q 分级法；RMR 分级法；节理岩体；分形理论；分形维数
中图分类号：TD313　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.008
文章编号：0253-6099(2026)02-0052-08

Evaluation of Rock Mass Quality Based on Traditional Stability Classification and Fractal Theory

HAO Yimin[1], ZHANG Yuefen[2,3], ZHU Yongsheng[1], HAO Shuyu[4], RUI Fuxin[5], SONG Weidong[6], TIAN Jiyang[2,3]
(1.*Yajiang Clean Energy Science and Technology Research (Beijing) Co., Ltd.*, *Beijing* 100038, *China*; 2.*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*; 3.*Research Center on Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction of the Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100038, *China*; 4.*School of Information Engineering*, *Zhongnan University of Economics and Law*, *Wuhan* 420100, *Hubei*, *China*; 5.*School of Civil Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300350, *China*; 6.*School of Civil and Resource Engineering*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: For the Shandong Xinhui Gold Mine, 20 joints and fractures in rock mass were scanned and measured by using the ShapeMetriX 3D system, and the rock mass occurrence and geometric data of joints were obtained. Then, three traditional stability classification systems (BQ classification, Q classification, and RMR classification) were adopted to evaluate the rock mass stability, and fractal theory was introduced to analyze the spatial distribution characteristics of joints. The results show that rock mass quality is evaluated as relatively the same grade by three classification methods, with the overall stability rated from average to poor. Specifically, the stability of the hanging wall and its contact zone is basically rated as grade Ⅳ or above; the ore body stability is mainly rated as grade Ⅲ; the stability of the surrounding rock of footwall is rated as relatively good, with some as grade Ⅱ. The rock mass with fractal dimension less than 1.1 is good in quality; while the rock mass with fractal dimension more than 1.1 is poor in quality. Based on the above research results, a rock mass quality evaluation scheme with the fractal dimension of joint fracture distribution as the classification index is primarily proposed.

Key words: rock mass stability; rock mass classification; rock mass quality evaluation; BQ classification system; Q classification system; RMR classification system; jointed rock mass; fractal theory; fractal dimension

① **收稿日期**：2025-11-13
基金项目：中国博士后科学基金(2024M752373)；国家重点研发计划(2024YFC3082200)；中国水利水电科学研究院五大人才计划项目(JZ0199A022021)
作者简介：郝益民(1994—)，男，山西晋中人，博士，主要从事岩石力学研究。E-mail：934060679@qq.com

岩体稳定性是矿山开采中的关键指标之一,它直接关系到矿山的安全生产和经济效益。随着矿山开采深度持续增加,矿山工程面临的地质条件愈发复杂多变,围岩稳定性问题更加突出[1]。准确评估岩体的稳定性成为保障矿山安全生产、优化支护设计、合理规划开采方案的重要基础。传统的岩体稳定性分级方法,如 BQ 法、Q 分类法和 RMR 法,广泛应用于矿山工程中。这些方法通过对岩体节理发育、岩体结构、岩性等进行量化描述,评估岩体的稳定性,为矿山安全开采提供了重要的决策依据[2]。已有研究表明,岩体中的节理裂隙呈现自相似特征,因此可以利用分形理论揭示其空间分布特征,从而有效量化结构面的复杂性[3]。通过计算分形维数,研究者们提出了多种方法来量化岩体质量,增强了传统评价方法的客观性与准确性。部分研究使用了如盒维数法与三维随机不连续面网络模拟等技术,结合分形理论,成功实现了对岩体结构面分布和质量的定量化分析[4-6]。这些方法不仅能反映岩体的空间分布特征,还能为不同尺度的结构面提供对比分析,从而为岩体质量评价提供新视角。通过与传统分级方法的结合,分形维数已成为一种可靠的岩体质量判据,能够有效补充现有评价体系[7-8]。

本文针对山东鑫汇金矿深部矿岩,综合运用多种传统分级方法和分形理论对岩体质量进行评价。首先,采用 ShapeMetriX 3D 系统对现场节理裂隙进行扫描测量,获取岩体结构面的几何数据;其次,采用 BQ 分级法、Q 分级法和 RMR 分级法对岩体稳定性进行分级评价,并引入分形理论分析节理裂隙的空间分布特征;最后,采用盒维数法对节理分布规律进行研究,推导出能够反映岩体质量评价的分形维数。

1　工程背景

1.1　矿山概况

山东鑫汇金矿Ⅰ号脉矿体赋存于大庄子断裂控制的构造蚀变带中,矿体多呈透镜状、脉状及网脉状,局部存在分支复合、膨胀夹缩现象,形态复杂。含矿蚀变带内部构造岩极为发育,主要岩性包括硅化大理岩质碎裂岩、角砾岩、硅化碎裂岩、糜棱岩及其碎裂化变种,构造蚀变作用强烈。根据鑫汇金矿Ⅰ号脉-620~-670 m 中段地质探矿结果,深部矿体沿走向展布长度约 252 m,倾向 96°~122°,倾角 16°~42°,受后期构造活动影响,局部呈小幅弯曲形态。矿体具有较好的连续性,但厚度变化显著,水平厚度 2.0~51.0 m,矿化表现出明显的非均质性。其中,17~25 勘探线矿体相对连续且较厚,17 线以西及 25 线以东矿体水平厚度较小。根据岩性组合,2 条主矿体主要由灰白色硅化大理岩质碎裂岩与灰黑色石英质角砾岩构成。本文以鑫汇金矿-620~-670 m 水平矿体及围岩为研究对象。

1.2　矿体条件

鑫汇金矿-620~-670 m 水平矿体由近南北向的破碎蚀变带控制,岩性一般为蚀变碎裂岩,局部石墨矿化,节理十分发育。矿体靠近上盘位置石墨化严重,下盘节理面愈合紧密,仅表面存在轻微染色。基于上述矿体赋存条件,该中段采用上向水平分层充填法进行采矿。开挖时整体区域较干燥,仅局部区域存在微量渗水,水压较低。经实地采样测算,计算得到矿区主要矿岩物理力学参数,如表 1 所示。

表 1　鑫汇金矿主要矿岩物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of main ores and rocks in Xinhui Gold Mine

材料	天然密度/(g·cm^{-3})	抗拉强度/MPa	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿石	2.69	6.78	53.04	33.90	0.36	14.20	43.87
围岩	2.77	11.14	78.79	49.14	0.26	12.89	32.07

2　岩体数据获取

2.1　ShapeMetriX 3D 系统

作为一种先进的岩体测量技术,ShapeMetriX 3D 系统通过非接触式三维扫描方式建立岩体表面数字模型,并借助专业分析软件进行数据处理,最终输出高精度的几何测量结果,目前已被广泛应用于岩土工程和测量等方面[9]。

该系统的核心组件包括成像单元、软件系统以及用于标准化模型的标杆,其基于立体摄影测量原理进行岩体结构面分析。首先在岩体表面 2 个位置拍摄数字影像,导入软件后利用三点成像原理进行三维合成,再依据标杆实测距离与罗盘倾向数据校正模型方位与尺寸,实现岩体表面三维重构。在此基础上,通过交互式操作完成结构面的识别、分组与拟合,提取产状、迹长、间距等几何参数,并进行统计分析[10]。ShapeMetriX 3D 系统立体图像合成原理[11]如图 1 所示。

利用 ShapeMetriX 3D 系统对鑫汇金矿多个采场进行优势结构面产状、间距及迹长等参数测量与分析,以便为岩体稳定性评价提供数据基础。

2.2　选取测点

本文选取测点的基本原则包括以下三点。

1)代表性原则:优先选择能够反映不同岩体结构

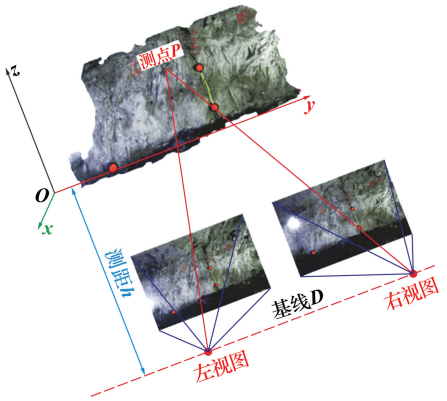


图 1 ShapeMetriX 3D 系统立体图像合成原理

Fig. 1 Principle of 3D image synthesis with ShapeMetriX

特征的区域(如上盘围岩、矿体、中间接触带、下盘围岩)。

2) 空间均匀性原则:在-620~-670 m 中段的主要巷道与采场中合理布设,确保调查范围均匀覆盖整个研究区域。

3) 可操作性原则:综合考虑照明条件、节理面裸露度、设备布设条件等,剔除受限区域,确保数据获取质量。

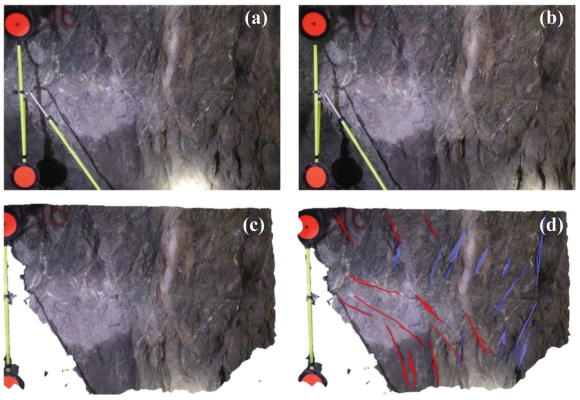
此次矿岩结构面信息调查区域位于鑫汇金矿-620 m~-670 m 水平 15~23 勘探线,共选取 16 个测区,共获得 23 个测点,区域包括 2104 采场、1701 采场、15 线穿脉上盘围岩、23 线穿脉上盘围岩、19 线穿脉下盘围岩和 24 线穿脉下盘围岩等。由于矿区光线设备等不可抗力因素,最终合成 20 个测点位置的节理面扫描图,共测得 503 条结构面,根据节理相似程度分为 35 组。

2.3 节理岩体表面三维合成

节理岩体表面三维合成如图 2 所示。首先在预设测量位置利用多视角摄影技术获取岩体的左视图与右视图,确保图像的清晰度与覆盖范围。然后,针对岩体中特定的露头结构面,采用地质罗盘精确测量其倾向,并记录标杆上下控制点间的准确距离,以确保数据的空间精度与可靠性。最后,将采集的图像与测量数据导入三维建模软件中,利用软件的高级建模功能进行数据融合与处理,通过多视图重建技术精确构建节理岩体表面的三维模型[12]。

2.4 数据分析

在岩体节理特征研究中,采用专业分析软件对基于数字成像系统采集的测点数据进行系统化处理,可实现对调查区域岩体节理参数的定量统计与综合分析。节理参数统计方法如下。



(a) 左视图;(b) 右视图;
(c) 岩体三维合成图;(d) 节理分布图

图 2 节理岩体表面三维合成

Fig. 2 3D reconstruction of jointed rock mass surface

1) 节理迹长:在由 ShapeMetriX 3D 系统扫描生成的结构面模型中,利用图像处理模块测量节理线段在三维空间中的真实长度。为提高精度,采用多测线平均法进行统计,并剔除因遮挡或误差造成的离群值。

2) 节理间距:基于节理面正交方向布设测线,记录相邻可识别节理的投影距离。每组节理间距数据不少于 30 个样本,最终结果取其平均值;对测点样本进行偏度与峰度分析,确认数据符合正态或偏态分布。

3) 节理分类与分组:采用节理产状(倾向±10°,倾角±10°)为分类依据,将同一组节理视为统计单元,便于后续体积节理数(J_V)与分形维数分析。

采用上述统计方法对获取数据进行处理,并基于 ShapeMetriX 3D 系统对由成像单元获得的测点数据进行分析,统计调查区域内的岩体节理信息,并绘制节理极射赤面投影图,如图 3 所示。基于节理间距分布图精确表征不同岩组节理的几何特征参数,包括节理长度和平均间距等;极射赤面投影图则能有效揭示测区节理的优势产状特征,包括倾向和倾角的分布规律。

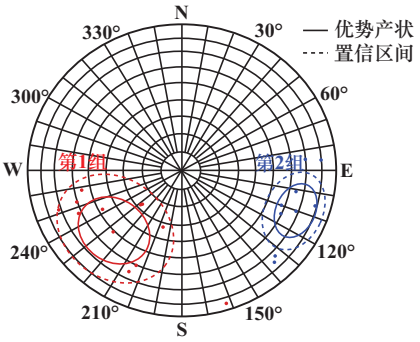


图 3 节理极射赤面投影图

Fig. 3 Stereographic projection plot of joints

节理平均间距计算公式[13]为:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{L} \tag{1}$$

式中:L 为测线长度;i 为计数值,取值范围为 $1 \sim n$;d_i 表示第 i 条节理与第 $i-1$ 条节理之间的距离。节理密度 λ 通过平均间距的倒数求得,用于后续体积节理数(J_V)的精确计算。对于节理密度 λ,假设节理在研究区域内空间分布均匀,测线长度足够长(大于节理平均间距的数倍),测线方向与节理分布无系统偏差,节理可视为连续延伸的平面。体积节理数 J_V 与 λ 值之间的关系式为:

$$J_V = \sum_{i=1}^{n} \lambda \tag{2}$$

体积节理数 J_V 与 RQD 值的关系式为:

$$\mathrm{RQD} = 115 - 3.3J_V \tag{3}$$

通过对 20 个测点的数据进行计算,得到鑫汇金矿岩体结构面参数见表 2。

通过对 20 个测点共 503 条结构面的系统调查与统计分析,采用 ShapeMetriX 3D 系统配套的结构面分析模块,首先将每条节理的倾向、倾角数据投影至极射赤面投影图,并生成等密度图进行聚类识别。以倾向 ±10°、倾角±10°作为分组阈值,将几何特征相近的节理归为同一组,共获得 3 组优势节理集。在此基础上,采用矢量平均法计算每组内所有节理的单位法向量合矢量方向,最终确定各组优势产状。结果表明,鑫汇金矿 −620~−670 m 水平岩体结构面优势产状主要有 3 组,依次为:第 1 组倾向 70.71°、倾角 56.94°,第 2 组倾向 168.76°、倾角 57.90°,第 3 组倾向 265.98°、倾角 53.02°。3 组优势节理产状相关参数见表 3。

表 2　鑫汇金矿岩体结构面参数

Table 2　Structural plane parameters of rock mass in Xinhui Gold Mine

测点编号	组别	倾向/(°)	倾角/(°)	迹长/m	间距/m	节理线密度/(个·m^{-1})	节理体密度/(个·m^{-3})	条数/个
1	1	147.22	79.54	0.52	2.63	0.38	0.38	27
2	1	48.55	41.27	0.82	0.28	3.57	6.27	19
	2	211.04	45.19	0.35	0.37	2.70		10
3	1	157.12	55.53	0.57	0.27	3.70	6.56	16
	2	251.45	69.07	0.46	0.35	2.86		17
4	1	88.37	54.36	0.35	0.25	4.00	8.17	23
	2	254.18	45.90	0.35	0.24	4.17		11
5	1	177.44	62.56	0.41	1.51	0.66	2.99	19
	2	262.32	34.96	0.44	0.43	2.33		14
6	1	150.50	72.10	0.45	0.33	3.03	5.66	20
	2	202.22	28.75	0.55	0.38	2.63		13
7	1	289.08	43.71	0.79	0.25	4.00	5.75	9
	2	159.62	67.21	0.46	0.57	1.75		8
8	1	96.97	75.37	0.37	0.13	7.69	11.86	13
	2	79.29	22.57	0.49	0.24	4.17		8
9	1	86.81	72.61	0.31	0.12	8.33	16.03	18
	2	213.77	34.71	0.26	0.13	7.69		12
10	1	140.13	58.81	0.47	0.38	2.63	5.20	17
	2	49.01	61.25	0.30	0.39	2.56		15
11	1	193.88	50.55	0.32	0.23	4.35	7.20	14
	2	62.06	67.35	0.31	0.35	2.86		11
12	1	154.06	49.79	0.32	0.42	2.38	2.38	15
13	1	46.70	50.69	0.38	0.27	3.70	7.40	11
	2	290.44	68.79	0.38	0.27	3.70		9
14	1	36.11	72.72	0.50	0.31	3.23	3.23	18
15	1	127.08	62.52	0.35	0.15	6.67	9.44	10
	2	317.98	51.84	0.35	0.36	2.78		8
16	1	145.74	72.60	0.36	0.37	2.70	7.46	25
	2	199.09	19.56	0.64	0.21	4.76		14
17	1	325.42	73.05	0.31	0.24	4.17	8.01	24
	2	117.12	23.83	0.76	0.26	3.85		7
18	1	155.19	72.93	0.53	0.85	1.18	4.75	13
	2	256.39	21.33	0.60	0.28	3.57		7
19	1	321.75	28.22	0.46	0.27	3.70	3.70	13
20	1	130.63	45.57	0.48	0.24	4.17	4.17	15

表 3　优势节理产状相关参数

Table 3　Parameters related to occurrence of dominant joints

组别	倾向/(°)	倾角/(°)	迹长/m	间距/m	线密度/(个·m^{-1})	数量/条	占比/%
1	70.71	56.94	0.41	0.25	4.68	118.00	33.82
2	168.76	57.90	0.43	0.67	2.83	171.00	36.67
3	265.98	53.02	0.48	0.31	3.41	60.00	17.19

3　岩体稳定性分级

本文采用 Q 分级法、RMR 分级法以及 BQ 分级法进行矿岩稳定性分级。

3.1　Q 分级法

Q 分级法[14]是一种以岩体结构面特征、块体尺寸、地下水影响及原位应力条件为核心的岩体质量评价方法,广泛应用于地下洞室和隧道工程围岩分级及支护设计。其基本思想是:岩体稳定性并非由单一强度参数决定,而是由岩块尺寸、结构面抗剪条件、地下水软化效应以及应力环境共同控制,包含 6 个指标,分别为 RQD 岩体质量指标、节理粗糙度、节理含水折减系数、节理组数、节理蚀变系数以及应力折减系数,采用多参数乘除组合形式[见式(4)]反映岩体质量。

$$Q = \frac{\mathrm{RQD}}{J_n}\frac{J_r}{J_a}\frac{J_w}{\mathrm{SRF}} \tag{4}$$

式中:J_n 为节理组数;J_r 为节理粗糙度;J_a 为节理蚀变系数;J_w 为节理含水折减系数;SRF 为应力折减系数。

Q 值越大,表明岩体质量越好、围岩整体稳定性越高。

Q 分级法的优点在于参数物理意义明确,尤其适用于地下工程围岩稳定性评价与支护参数选取。但其对结构面调查质量较为敏感,且在强风化、软岩及明显各向异性岩体中的适用性需结合工程经验修正。根据鑫汇金矿赋存条件,Q 分级法稳定性分级结果如表 4 所示。

表 4 Q 分级法稳定性分级结果

Table 4 Stability classification with Q classification system

位置	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q 值	等级
15 线穿脉上盘围岩	48.33	6	1.0	4	1	2.5	0.81	Ⅳ
23 线穿脉上盘围岩	60.63	6	1.5	3	1	2.5	2.02	Ⅲ
19 线穿脉下盘围岩	71.64	6	1.0	1	1	1.0	9.52	Ⅲ
24 线穿脉下盘围岩	68.32	6	1.0	1	1	1.0	10.51	Ⅱ
1701 采场	70.51	3	1.0	3	1	2.5	3.13	Ⅲ
2104 采场	74.59	9	1.0	4	1	2.5	0.83	Ⅳ

3.2 RMR 分级法

RMR 分级法[15]核心原理是:岩体工程稳定性可以通过若干关键地质力学指标的评分累加进行综合评价,各指标分值反映不同因素对岩体质量的贡献,最终总分直接对应岩体等级。该方法兼顾了岩石强度、岩体完整性、结构面状态、地下水及结构面产状等因素,具有较强的系统性和工程适用性。RMR 值可表示为:

$$\mathrm{RMR} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \tag{5}$$

式中:R_1 为岩石单轴抗压强度评分;R_2 为 RQD 评分;R_3 为节理间距评分;R_4 为节理条件评分;R_5 为地下水条件评分;R_6 为节理产状修正值。其中,前五项主要反映岩体的内在质量,最后一项则考虑结构面与工程布置关系对稳定性的影响。RMR 值越大,说明岩体质量越好,围岩自稳能力越强。

RMR 分级法的优势在于评价体系完整、适用范围广,尤其适用于隧道、边坡和地下工程初步设计阶段的围岩质量划分。但该方法仍带有一定经验性,不同参数评分之间存在一定主观判断空间,且对高地应力、强时效性或爆破扰动显著条件下的适应性有限,实际应用中常需与现场监测和数值分析相结合。结合鑫汇金矿地质条件,RMR 分级法稳定性分级结果如表 5 所示。

3.3 BQ 分级法

BQ 分级法[16]核心思想是以岩体基本质量指标 BQ 作为定量基础,综合反映岩石坚硬程度与岩体完整程度对工程岩体质量的控制作用。与 Q 分级法和 RMR分级法相比,BQ分级法更符合我国工程地质勘察与规范化分级体系。

表 5 RMR 分级法稳定性分级结果

Table 5 Stability classification with RMR classification system

位置	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	RMR 值	等级
15 线穿脉上盘围岩	7	8	10	5	0	−3	27	Ⅳ
23 线穿脉上盘围岩	7	12	8	5	3	−5	30	Ⅳ
19 线穿脉下盘围岩	12	15	15	15	6	−7	56	Ⅲ
24 线穿脉下盘围岩	15	20	20	15	7	−5	72	Ⅱ
1701 采场	10	10	10	8	4	−10	32	Ⅳ
2104 采场	4	3	8	0	15	−12	18	Ⅴ

BQ 值通常表示为:

$$\mathrm{BQ} = 90 + 3\sigma_{cw} + 250K_V \tag{6}$$

式中:σ_{cw}为岩石单轴饱水抗压强度,MPa;K_V 为岩体完整性系数。

岩体完整性系数的定量化确定主要采用 2 种方法:一是通过岩石与岩体纵波波速比的实测计算;二是基于体积节理数与岩体完整性指数间的对应关系进行取值,其计算式如下:

$$K_V = \begin{cases} 1.0 - 0.083J_V & J_V \leqslant 3 \\ 0.75 - 0.029(J_V - 3) & 3 \leqslant J_V \leqslant 10 \\ 0.55 - 0.02(J_V - 10) & 10 \leqslant J_V \leqslant 20 \\ 0.35 - 0.013(J_V - 20) & 20 \leqslant J_V \leqslant 35 \\ 0.15 - 0.007\,5(J_V - 35) & J_V > 35 \end{cases} \tag{7}$$

式(7)表明,BQ 分级法认为工程岩体质量主要取决于两方面:一是岩体强度,即岩体抵抗破坏的能力;二是岩体完整程度,即结构面切割对岩体力学性能连续性的削弱程度。

在工程应用中,BQ 值计算后,通常还需结合地下水、主要结构面产状、初始应力状态及工程轴线夹角等因素进行修正,得到最终工程岩体分级结果。结合鑫汇金矿地质情况,BQ 分级法稳定性分级结果如表 6 所示,表中 σ 为岩石单轴抗压强度。

表 6 BQ 分级法稳定性分级结果

Table 6 Stability classification with BQ classification system

位置	J_V	K_V	σ/MPa	σ_{cw}/MPa	BQ 值	修正 BQ 值	等级
15 线穿脉上盘围岩	4.22	0.71	81.69	40.845	390.03	298.36	Ⅳ
23 线穿脉上盘围岩	7.42	0.62	54.36	27.18	326.54	347.54	Ⅳ
19 线穿脉下盘围岩	9.36	0.57	75.62	67.81	435.93	367.24	Ⅲ
24 线穿脉下盘围岩	10.24	0.55	93.68	72.84	446.02	432.66	Ⅱ
1701 采场	4.56	0.70	51.72	25.86	342.58	282.49	Ⅳ
2104 采场	10.42	0.54	95.38	79.69	464.07	320.04	Ⅳ

通过 3 种分级法的分析发现,鑫汇金矿岩体整体

稳定性介于Ⅲ~Ⅳ级,其中矿体和靠近上盘围岩稳定性较差,下盘围岩稳定性相对较好,部分测点为Ⅱ级,在进行开采时应及时采取适当的支护。

3.4　基于分形理论的岩体稳定性分级

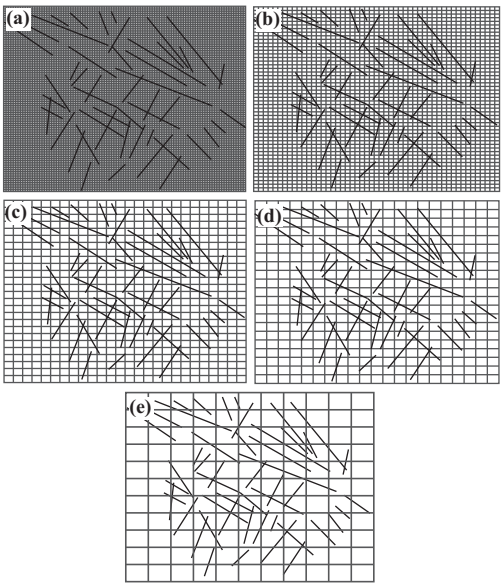
分形理论是一种描述复杂不规则结构的数学方法,强调结构在不同尺度上的自相似性。分形理论在岩体稳定性评价中的应用主要体现在其对岩体结构面网络复杂性的描述上。实际应用中,分形理论通过对岩体结构面网络模型的分析,利用盒维数法确定结构面分布的分形维数。这种方法不仅能够揭示岩体的三维结构特征,而且计算过程简便实用。采用相似维数表示分形维数 D:

$$D = \dim F(r) = \lim_{r\to 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r} \tag{8}$$

式中:r 为矩形边长;$N(r)$ 为对应矩形边长 r 的格子数;$F(r)$ 为任意非空有界子集。

分形维数 D 主要计算步骤:将研究区域结构面等分成小矩形,计算被节理所切割的矩形个数 $N(r)$。改变矩形尺寸,计算相应的 $N(r)$,并绘制 $\ln r$-$\ln N(r)$ 关系曲线。

对 2104 采场、15 线穿脉上盘围岩、23 线穿脉上盘围岩、24 线穿脉下盘围岩、19 线穿脉下盘围岩和 1701 采场分别进行分形计算,将边长分别进行 100、50、25、20、10 等分,可得到该节理面的分形结果,如图 4 所示,分形维数计算结果如表 7 所示,其节理面的 $\ln r$-$\ln N(r)$ 关系曲线如图 5 所示。



(a) 100 等分;(b) 50 等分;(c) 25 等分;(d) 20 等分;(e) 10 等分

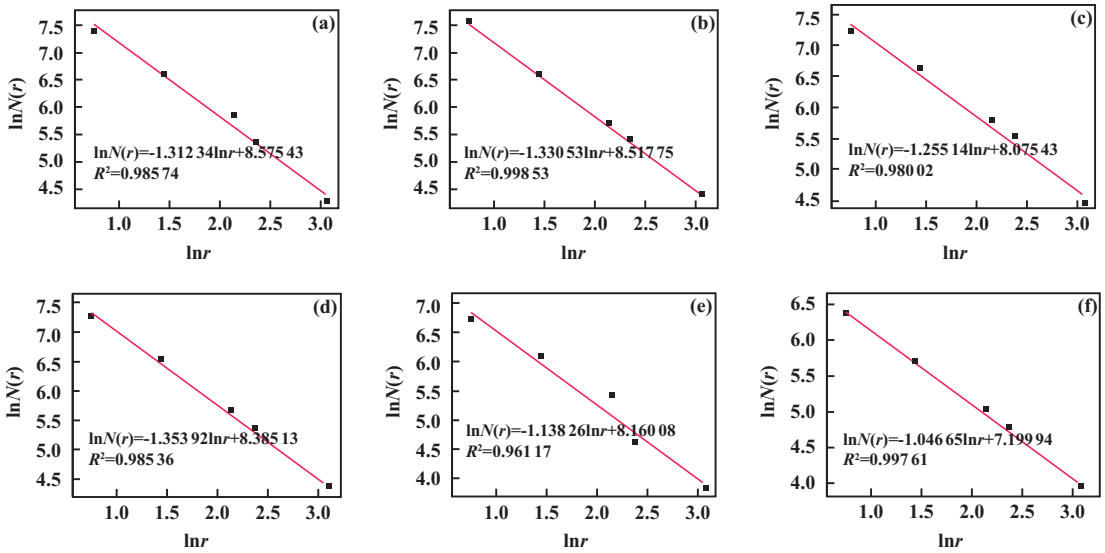
图 4　节理面分形结果

Fig. 4　Fractal result of joint plane

表 7　分形维数计算结果

Table 7　Calculation result of fractal dimension

位置	不同等分下的 $N(r)$				
	100 等分	50 等分	25 等分	20 等分	10 等分
15 线穿脉上盘围岩	1 511	708	296	229	83
23 线穿脉上盘围岩	1 390	758	329	252	85
1701 采场	1 455	780	323	233	77
2104 采场	1 467	740	351	261	86
19 线穿脉下盘围岩	837	460	234	104	46
24 线穿脉下盘围岩	790	397	252	116	52



(a) 2104 采场围岩;(b) 15 线穿脉上盘围岩;(c) 23 线穿脉上盘围岩;(d) 1701 采场;(e) 19 线穿脉下盘围岩;(f) 24 线穿脉下盘围岩

图 5　$\ln r$-$\ln N(r)$ 关系曲线

Fig. 5　$\ln r$-$\ln N(r)$ relationship curve

根据图 5,研究区域内节理数量的对数与基准长度的对数呈现显著线性相关性,其拟合程度较高,表明该岩体结构面分布具有统计自相似特征。其中,拟合直线斜率的绝对值即为该区域岩体结构面的分形维数。进一步分析发现,分形维数与结构面发育密度存在相关关系:分形维数较大,反映结构面节理分布较为密集。

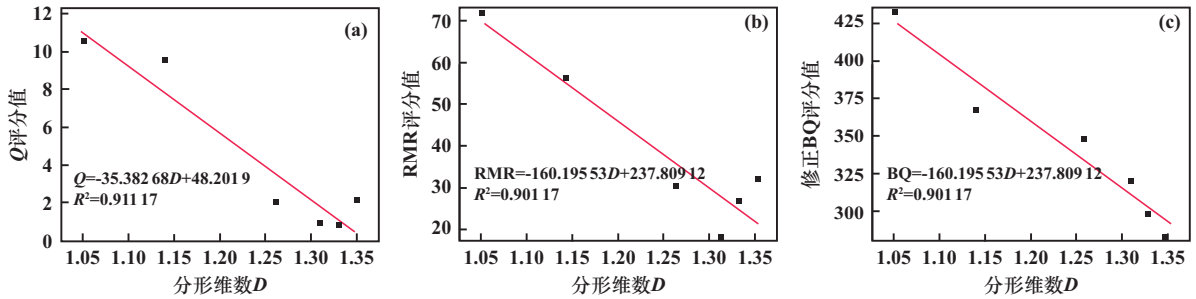
3.5 各分级结果与分形维数的对比

将各分级方法获得的分级结果与分形维数进行对比,如表 8 所示。分形维数小于 1.1 时,岩体质量较好;分形维数大于 1.1 时,岩体质量一般或较差。对各分级方法评分值与分形维数进行拟合,结果如图 6 所示。各分级评分值与分形维数均呈负线性关系,随着各岩体质量评分体系中评分值增大,相应的分形维数减小,即岩体的稳定性逐渐增强。在各分级评分值与分形维数的拟合关系中,决定系数均大于 0.9。其中,修正 BQ 分级法与分形维数的拟合程度最高。

表 8 各分级方法获得的分级结果与分形维数对比

Table 8 Comparison between classification results obtained by different classification systems and fractal dimension

位置	Q 分级法		RMR 分级法		修正的 BQ 分级法		*D*
	评分值	等级	评分值	等级	评分值	等级	
15 线穿脉上盘围岩	0.81	Ⅳ	27	Ⅳ	298.36	Ⅳ	1.33
23 线穿脉上盘围岩	2.02	Ⅲ	30	Ⅳ	347.54	Ⅳ	1.26
19 线穿脉下盘围岩	9.52	Ⅲ	56	Ⅲ	367.24	Ⅲ	1.14
24 线穿脉下盘围岩	10.51	Ⅱ	72	Ⅱ	432.66	Ⅱ	1.05
1701 采场围岩	2.13	Ⅲ	32	Ⅳ	282.49	Ⅳ	1.35
2104 采场围岩	0.97	Ⅳ	18	Ⅴ	320.04	Ⅳ	1.31



(a) Q 分级法;(b) RM 分级法;(c) 修正 BQ 分级法

图 6 各分级方法评分值与分形维数拟合

Fig. 6 Fitting between scores of different classification systems and fractal dimension

结合鑫汇金矿岩体稳定性分级计算结果,初步提出了依据岩体节理裂隙分布的分形维数为分级指标的岩体质量评价方案,具体如表 9 所示。

表 9 基于分形维数的岩体质量评价方案

Table 9 Rock mass quality evaluation scheme based on fractal dimension

分形维数	岩体质量
<1.05	很好
1.05~1.1	较好
1.1~1.3	一般
1.3~1.4	差
>1.4	很差

4 结论

1) 鑫汇金矿-620~-670 m 水平节理优势产状主要有 3 组,其中以 168.76°∠57.90°结构面最多,节理平均间距为 0.67 m,节理平均迹长为 0.43 m,节理线密度为 2.83 个/m。

2) 采用 BQ 分级法、RMR 分级法和 Q 分级法对鑫汇金矿岩体质量的分级结果基本一致。其中上盘及其接触带稳定性基本为Ⅳ级及以上;矿体稳定性以Ⅲ级为主,局部(如 2104 采场)更差;下盘围岩稳定性相对较好,部分测点为Ⅱ级。

3) Q 分级法、RMR 分级法和 BQ 分级法分级结果与分形维数的拟合结果近似呈负线性关系,随着各分级方法的评分值增大,分形维数减小,即稳定性逐渐增强。

4) 分形维数小于 1.1 时岩体质量较好,分形维数大于 1.1 时岩体质量一般。初步提出了依据岩体节理裂隙分布的分形维数为分级指标的岩体质量评价方案。

5) 由于现场调查条件限制,本文仅对鑫汇金矿-620~-670 m 部分采场进行评价,由于地质条件的不同,对更深矿井岩体的分形维数与岩体质量分级的关系仍有待进一步研究。

参考文献(References):

[1] 王胜开,刘家明,朱志根,等. 超深巷道围岩应力变化规律及支护技术[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):54-59.

WANG Shengkai, LIU Jiaming, ZHU Zhigen,et al. Stress variation law and support technology for surrounding rock in ultra-deep roadways[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):54-59.

[2] EHLEN J. Fractal analysis of joint patterns in granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000,37(6):909-922.

[3] 谢和平,周宏伟. 基于分形理论的岩石节理力学行为研究[J]. 中国科学基金, 1998,12(4):247-252.
XIE Heping, ZHOU Hongwei. Research on mechanical behaviors of rock joints based on fractal theory[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 1998,12(4):247-252.

[4] 刘艳章,盛建龙,葛修润,等. 基于岩体结构面分布分形维的岩体质量评价[J]. 岩土力学, 2007,28(5):971-975.
LIU Yanzhang, SHENG Jianlong, GE Xiurun, et al. Evaluation of rock mass quality based on fractal dimension of rock mass discontinuity distribution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(5):971-975.

[5] 胡德茂,吴发名,李洪涛,等. 基于分形理论的岩体原生节理分布特征研究:以长河坝水电站为例[J]. 科学技术与工程, 2020,20(12):4826-4832.
HU Demao, WU Faming, LI Hongtao, et al. Distribution characteristics of primary joints of rock mass based on fractal theory: Taking Changheba hydropower station as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(12):4826-4832.

[6] 张超,宋卫东,付建新. 分形理论在岩体质量评价中的研究[J]. 矿业研究与开发, 2020,40(2):71-75.
ZHANG Chao, SONG Weidong, FU Jianxin. Study on fractal theory in rock mass quality evaluation[J]. Mining Research and Development, 2020,40(2):71-75.

[7] 王伟,胡斌,张腾,等. 基于分形的岩体质量评价及广义 RQD 阈值确定[J]. 人民长江, 2014,45(17):70-73.
WANG Wei, HU Bin, ZHANG Teng, et al. Evaluation of rock mass quality and determination of RQD threshold based on fractal theory[J]. Yangtze River, 2014,45(17):70-73.

[8] 周福军,陈剑平,徐黎明,等. 基于岩体不连续面三维分形维岩体质量评价研究[J]. 岩土力学, 2012,33(8):2315-2322.
ZHOU Fujun, CHEN Jianping, XU Liming, et al. Study of rock masses quality evaluation based on 3D fractal dimension of rock discontinuity distribution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(8):2315-2322.

[9] 王运森,郑贵平,李元辉,等. 金属矿山岩体质量评价方法进展与展望[J]. 中国矿业, 2019,28(8):149-153.
WANG Yunsen, ZHENG Guiping, LI Yuanhui, et al. Advances and prospects for rock mass evaluation methods in metal mines[J]. China Mining Magazine, 2019,28(8):149-153.

[10] 徐东,范文涛. 基于数字摄影测量的岩体结构面信息获取及岩体质量评价[J]. 黄金, 2022,43(9):43-48.
XU Dong, FAN Wentao. Acquisition of rock mass structural plane information and rock mass quality evaluation based on digital photogrammetry[J]. Gold, 2022,43(9):43-48.

[11] 曹俊,陈国良,万串串,等. ShapeMetriX3D 系统在甲玛矿工程地质调查中的应用[J]. 中国矿业, 2018,27(增刊 1):320-326.
CAO Jun, CHEN Guoliang, WAN Chuanchuan, et al. Application of ShapeMetriX3D system in the engineering geology survey of Jiama copper mine[J]. China Mining Magazine, 2018,27(S1):320-326.

[12] 赵兴东,郝明涛,赵子乔,等. 基于岩体质量分级和三维激光数字测量的大型洞室稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2016,36(11):55-59.
ZHAO Xingdong, HAO Mingtao, ZHAO Ziqiao, et al. Stability analysis of large carven based on rock mass classification and 3D laser digital survey[J]. Mining Research and Development, 2016,36(11):55-59.

[13] GUO S Q, QI S W. A-BQ, a classification system for anisotropic rock mass based on China national standard[J]. Journal of Central South University, 2020,27(10):3090-3102.

[14] BARTON N. Recent experiences with the Q-system of tunnel support design[J]. Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering,1976,1:107-117.

[15] BIENIAWSKI Z T. Estimating the strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974,11(8):A160.

[16] 朱丰浩,叶聪林,谭玉叶,等. 基于 ShapeMetriX 3D 及修正 BQ 分级法的节理岩体稳定性分级[J]. 化工矿物与加工, 2024,53(6):37-44.
ZHU Fenghao, YE Conglin, TAN Yuye, et al. Stability classification of jointed rock masses based on ShapeMetriX 3D and modified BQ grading method[J]. Industrial Minerals & Processing, 2024,53(6):37-44.

引用本文:郝益民,章跃芬,朱永生,等. 基于传统稳定性分级方法及分形理论的岩体质量评价[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):52-59.
HAO Yimin, ZHANG Yuefen, ZHU Yongsheng, et al. Evaluation of rock mass quality based on traditional stability classification and fractal theory[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):52-59.