

# 基于多维度的围岩岩体质量分级及强度估计

Multi-dimensional-based Quality Classification and Strength Estimation of Ore and Rock Masses

洪大华<sup>1</sup>, 王峰<sup>1</sup>, 张忠政<sup>1</sup>, 王宇驰<sup>1</sup>, 王会来<sup>2</sup>, 傅子群<sup>3</sup>

(1. 鞍钢集团矿业弓长岭有限公司露天分公司, 辽宁 辽阳 111008; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;  
3. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**本文以弓长岭铁矿露天开采工程为研究对象,基于定量GSI指标和Hoek-Brown(H-B)强度准则,计算获得H-B强度参数,继而通过数学拟合方法转换为等效Mohr-Coulomb(M-C)强度参数,为工程设计与施工提供理论依据。并引入可拓学理论,结合多种传统分级方法,基于D-S证据理论融合各岩体质量分级结果建立岩体质量综合评价模型。研究结果表明:采用岩体声波测试,其结果表明目标钻孔岩体完整性的分布特征,为矿山工程稳定性评估和开采设计提供了关键的地质力学依据;建立地质强度指标(GSI)定量化方法与Hoek-Brown(H-B)强度准则相结合的评估体系,精确测定了目标岩体的H-B强度特征值。基于数值拟合,进一步推导出与之等效的Mohr-Coulomb(M-C)强度参数,为岩体稳定性数值模拟奠定了可靠的数据基础;采用RMR、Q、BQ、可拓学理论及D-S证据理论综合评价进行多维度分级,最终明确各目标岩体的质量等级。

**关键词:**岩体强度; H-B强度准则; GSI; M-C强度参数

中图分类号: TD854

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)06-0061-09

**Abstract:** Therefore, taking the open-pit mining project of Gongchangling Iron Mine as the research object, based on quantitative GSI index and Hoek Brown (H-B) strength criterion, the H-B strength parameters were calculated and obtained, and then converted into equivalent Mohr Coulomb (M-C) strength parameters through mathematical fitting method, providing theoretical basis for engineering design and construction. And by introducing the theory of extension and combining various traditional grading methods, a comprehensive evaluation model for rock mass quality is established based on the D-S evidence theory and the fusion of various rock mass quality grading results. The research results indicate that the use of rock acoustic testing reveals the distribution characteristics of the integrity and weathering degree of the target borehole rock mass, providing key geomechanical basis for the stability assessment and mining design of mining engineering; A quantitative evaluation system combining Geological Strength Index (GSI) and Hoek Brown (H-B) strength criterion was established to accurately determine the H-B strength characteristic values of the target rock mass. Based on numerical fitting, the equivalent Mohr Coulomb (M-C) strength parameters were further derived, laying a reliable data foundation for numerical simulation of rock mass stability; Using RMR, Q, BQ, extension theory, and D-S evidence theory for comprehensive evaluation, multi-dimensional grading is carried out to ultimately determine the quality level of each target rock mass.

**Key words:** rock mass strength; hoek-brown strength criterion; GSI; mohr-coulomb strength parameters

## 1 前言

岩体质量作为工程地质特性的综合体现,对矿山安全开采活动具有决定性影响,其优劣直接关系到围岩稳定状态<sup>[1-2]</sup>。目前岩体质量评价体系已发展出近百种分级方法,在我国岩土工程实践中,以下三类方法具有较高的应用普及率: BQ分级、RMR分级、Q系统分级<sup>[3-7]</sup>。这些方法由于考虑方面不同,存在各自的局限性,如BQ分级法主要侧重岩体坚硬强度与结构完整性评价,但对复杂地质因素采用

相对简化的修正系数处理方式; RMR分级方法在评价硬质岩体质量时具有较高可靠性,但其应用于软弱岩层时存在明显局限性,所得结果往往趋于保守; Q系统分类方法主要考虑结构面发育程度、表面粗糙特征及充填物性质等参数,然而该方法未能有效反映岩体结构的方位特性<sup>[8]</sup>。因此,当前岩体质量分级方法多采用多因素综合评价体系,相较于单一指标评价方法,其优势在于综合考虑多种影响因素,显著提升了分级结果的准确性。这种基于多

[作者简介] 洪大华(1970—),男,鞍钢集团鞍山矿业公司生产部工程师,主要从事煤矿安全生产管理工作。

[基金项目] 弓长岭独木采区西北帮地下开采及地质环境影响研究(项目编号:2023-科 A04)

[引用格式] 洪大华,王峰,张忠政,等. 基于多维度的围岩岩体质量分级及强度估计[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):61-69.

参数联合分析的评估模式,能够更系统地反映岩体的实际工程特性。可拓学理论与 D-S 证据理论正是基于这一新思路建立的。曹文贵等<sup>[9]</sup>应用 D-S 证据理论,构建了新型岩体质量分级综合评价体系。该研究不仅拓展了组合评价方法的应用范围,同时推动了岩体质量分级理论体系的完善与发展。石飞等<sup>[10]</sup>通过引入可拓学理论,构建了适用于巷道工程的岩体质量分级体系。该研究基于可拓学原理,提出了一种新的岩体质量聚类分析方法。

节理岩体因其复杂的结构特性,导致力学参数的精确测定面临显著困难。室内外力学试验由于方法本身的局限性,往往难以全面反映岩体的真实力学行为。这种参数获取的不确定性,使得节理岩体力学性质的表征及其变形破坏机制解析,成为当前岩石力学研究中亟待解决的关键科学问题<sup>[11]</sup>。Hoek 等<sup>[12]</sup>于 1980 年提出的强度估算方法,即 Hoek-Brown(H-B)强度准则,至今仍被广泛应用。工程应用表明,通过整合岩体节理的空间分布特征并考虑实际工程条件,可将结构面方位特性及复杂环境影响因素纳入 Hoek-Brown 强度准则的修正体系。这种改进方法显著提升了该准则在复杂地质条件下的适用性和准确性<sup>[13-17]</sup>。郭建强等<sup>[18]</sup>基于弹性应变能建立了广义 M-C 强度准则。H-B 准则与地质强度指标理论(GSI)、Mohr-Coulomb(M-C)强度准则相结合,使其成为岩土工程领域最具影响力的强度理论体系。本研究选取弓长岭铁矿围岩作为研究对象,通过系统的岩体工程地质调查,综合应用 BQ、Q 和 RMR 三种分级体系对岩体质量及稳定性进行综合评价。基于地质强度指标(GSI)的定量分析和 Hoek-Brown 强度准则,建立了岩体强度评估模型,确定了相应的 H-B 强度参数。进一步采用数值拟合技术,将所得参数转换为等效 Mohr-Coulomb 强度准则参数,为矿山开采方案优化和采场稳定性数值模拟提供了重要的力学参数依据。

## 2 工程概况

### 2.1 地质概况

弓长岭铁矿位于辽宁省辽阳市弓长岭地区,地处华北地台辽东台隆的鞍山-本溪铁矿带,其矿体走向延长约 4 800 m,厚度 5 ~ 160 m,垂向深度在 1 500 m 以上,最低开采标高达 -900 m。该矿床以露天开采为主,矿层形态相对简单,呈层状分布,铁矿层连续性好、厚度稳定,且矿石致密坚硬,抗风化能力较强。

区域构造背景较为复杂,主要由鞍山群和辽河群构成近东西向展布的复背斜构造,其中弓长岭背斜和三道岭-一下马塘背斜是主要褶皱形态。受后期断裂活动影响,原始褶皱构造遭受强烈改造,导致岩层局部缺失或发生大规模位移。矿区内主要岩性为含铁石英岩类,其分布广泛,构成矿床的主体部分<sup>[19]</sup>。变质作用以区域变质为主,矿区铁矿层上下盘形成花岗岩、斜长片岩、绿泥云母等中低级变质岩,构成矿区多样化的岩性组合。这些变质岩的力学性质差异显著,尤其在饱水状态下易发生软化。鞍山-本溪地质图如图 1 所示,区域成矿地质图如图 2 所示。

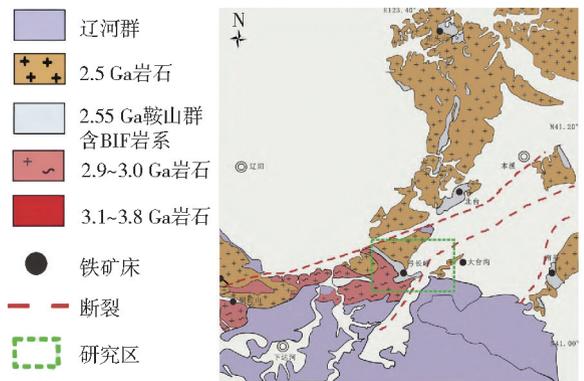


图 1 鞍山-本溪地质简图(据沈其韩,1998 修改)

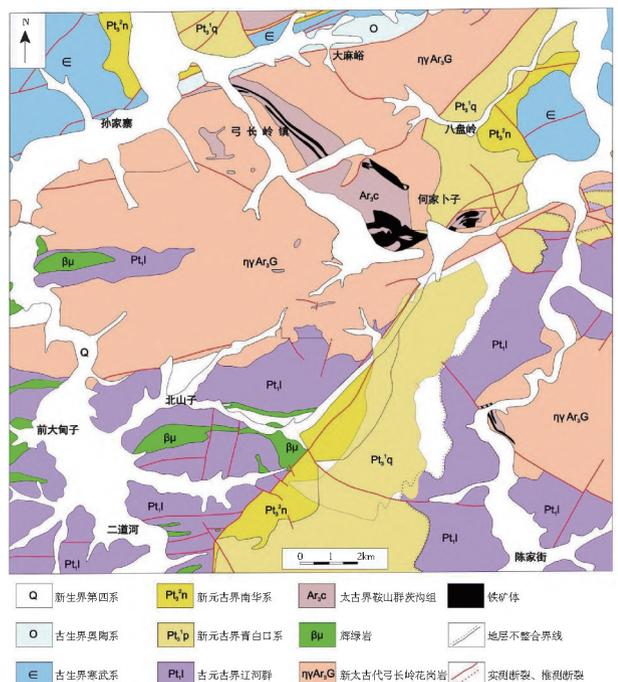


图 2 区域成矿地质简图(据区域地质资料,2003 修改)

### 2.2 围岩物理力学性质

各围岩物理力学参数表 1。根据表格观察可知,花岗岩结构致密,抗压强度较高,但微裂隙使其

抗拉强度显著低于抗压强度;绿泥云母和斜长片岩抗压强度相对较低,其中绿泥云母因片状结构易滑动,遇水强度进一步降低;斜长片岩垂直片理方向强度较高,但整体受片理构造和水化作用影响显著。

表1 各围岩物理力学参数

围岩种类	状态	抗压强度 $\sigma/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比
花岗岩	天然	143.09	19.20	0.23
绿泥云母	天然	115.56	32.54	0.23
斜长片岩	天然	81.65	20.57	0.12

弹性模量方面,绿泥云母数值较高,抵抗变形能力较强,而花岗岩和斜长片岩数值较小,抵抗变形能力低;泊松比差异反映变形特性,花岗岩和绿泥云母横向应变较大,具一定塑性,斜长片岩横向应变较小,稳定性更优。

综上所述,矿山在施工设计过程中,对于质量较差的围岩需重点关注。依据这些特性差异,能够对不同地层的围岩进行科学合理的质量分级,为矿山开采、地下工程建设等提供重要的设计依据和安全保障。

### 2.3 声波测试

利用岩体声波测试的基本理论和技术,通过对弓长岭铁矿 SZK34-1 钻孔不同深度岩体波速的测量和分析,对钻孔不同深度岩体进行岩性描述,描述结果见表2。根据表2可知,该钻孔波速大于5000 m/s的测段占比48.8%;波速介于4000~5000 m/s的测段占比31.2%;波速介于2000~4000 m/s的测段占比20.4%。也就是说该钻孔48.8%的岩体岩质新鲜,未见内化痕迹,31.2%的岩体组织结构未变,20.4%组织结构部分破坏。

## 3 基于 H-B 强度准则的岩体强度估计

### 3.1 H-B 强度准则

Hoek-Brown 强度准则是一种广泛应用于岩土

表2 不同深度岩体岩性描述

深度/ m	占比/ %	岩体声波波速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	岩性描述
0~115			
140~192	48.8	>5000	岩质新鲜,未见内化痕迹
347~362			
377~440			
192~347	31.2	4000~5000	组织结构未变,裂隙发育
362~377			
115~140	20.4	2000~4000	组织结构部分破坏
440~500			

工程的岩石强度准则,其一般形式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$  为最大主应力; $\sigma_3$  为最小主应力; $\sigma_{ci}$  为单轴抗压强度(UCS); $m_b$  为 Hoek-Brown 常数,与岩石类型和地质条件有关; $s$ 、 $a$  为经验参数,与岩体完整性和地质条件有关。

GSI 为岩体地质强度指标,根据岩体质量分级结果(RMR 或  $Q$  值)估算 GSI。通常,GSI 与 RMR 的关系为: $GSI = RMR - 5$ (当  $RMR > 23$ );参数  $D$  表征岩体受工程扰动影响的损伤程度,其取值范围界定在 $[0,1]$ 区间。具体而言,当岩体处于原始未扰动状态时, $D$  取值为0;当遭受强烈爆破扰动时, $D$  取值为1。在实际工程应用中,需根据开挖方式、爆破强度等扰动因素综合评估确定  $D$  值。基于工程经验,对于中等扰动工况,采用  $D = 0.5$  的保守取值,以确保计算结果的可靠性; $m_i$  为岩性材质指标,可根据岩体岩性查表取值计算。公式如下:

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[ \exp \left( -\frac{GSI}{15} \right) + \exp \left( -\frac{20}{3} \right) \right] \quad (4)$$

根据已知参数,计算岩体材质特性的 H-B 常数,结果见表3。

表3 天然状态下不同岩石的 H-B 常数

岩石类型	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	GSI	$D$	$m_i$	$m_b$	$s$	$a$
花岗岩	143.09	59	0.5	32	4.540	0.0042	0.503
绿泥云母	115.56	37	0.5	8	0.389	0.00002	0.514
斜长片岩	81.65	42	0.5	10	0.630	0.0004	0.510

综上所述,花岗岩单轴抗压强度较高, $m_b$ 值、 $s$ 值较高,适用于自稳性较好的工程区域;绿泥云母单轴抗压强度较低, $m_b$ 和 $s$ 值均较小,表明岩体质量较差,需注意支护和防水措施;斜长片岩单轴抗压强度最低, $m_b$ 和 $s$ 值也较低,工程中需特别关注其稳定性。

### 3.2 M-C 强度估算方法

Mohr-Coulomb(M-C)强度准则是岩土工程中最经典的强度理论之一,用于描述岩土材料在剪切破坏时的力学行为。Hoek 提出 Hoek-Brown 准则可通过等效方法转换为 Mohr-Coulomb 参数,在当  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3max}$  内,将 H-B 非线性强度曲线近似为 M-C 线性包络线。公式如下(适用于  $GSI > 25, D = 0.5$ ):

$$(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi = 2c \cos \phi \quad (5)$$

为便于线性拟合,式(5)可改写为:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

结合式(5)(6),可得:

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (7)$$

$$b = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (8)$$

采用上述方法,即可得到与 H-B 强度等效的岩体 M-C 强度参数  $c$  和  $\phi$ 。

### 3.3 岩体强度估算结果

M-C 准则的核心是通过线性关系表示剪切强度与正应力的关系,通过对不同岩体的 Hoek-Brown 强度参数进行等效转换,获得了相应的 Mohr-Coulomb 强度参数,其拟合结果如图 3 所示。分析结果表明,四类岩样的强度参数拟合直线均表现出极佳的线性相关性,决定系数  $R^2$  值均达到 0.99 左右。高拟合优度充分验证了强度参数转换方法的可靠性,为后

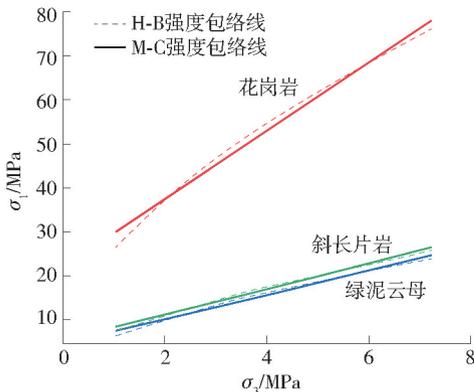


图3 等效 M-C 强度与 H-B 强度拟合结果

续工程应用提供了可信的力学参数依据。

基于 Mohr-Coulomb 强度拟合直线的斜率  $k$  和截距  $b$ ,通过公式(7)和(8)计算得到各岩体的等效黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$ ,具体数值详见表 4。分析表明,所得强度参数的变化趋势与理论预测高度吻合,这不仅验证了本文提出的参数转换方法的正确性,同时也证实了计算结果的可靠性,这种一致性为工程岩体稳定性分析提供了有力的理论支撑。

表 4 等效 M-C 强度参数计算结果

岩石类型	等效 $\phi/(\circ)$	等效 $c/\text{MPa}$
花岗岩	50.67	1.54
绿泥云母	27.73	1.23
斜长片岩	29.07	1.30

## 4 岩体质量分级结果

### 4.1 可拓学理论

可拓学理论从可行性与优化维度对研究对象进行综合评估,实现了定性分析与定量计算的有机统一。该理论通过物元可拓特性建立定性计算框架,并基于可拓集合理论,借助关联函数实现精确的量化分析。可拓学方法包括经典域和节域,经典域是指每种岩体质量等级的各评价指标标准区间,节域指岩体质量评价指标标准值范围。其经典域、节域与现场实测参数之间位置关系变化可通过关联函数式(9)计算,以量化表征分级指标间连续或离散的相似程度。该评价方法创新性地实现了多指标体系的相容性转换,借助建立物元模型,能够获得与工程实际情况高度吻合的分析结果。

$$k_i(v_j) = \begin{cases} \frac{\rho(v_j, V_{ij})}{\rho(v_j, V_{pj}) - \rho(v_j, V_{ij})} & v_j \notin V_{ij} \\ a_{ij} - b_{ij} & v_j \in V_{ij} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $v_j$ 为岩体评分数值; $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 为经典域; $V_{pj} = \langle a_{pj}, b_{pj} \rangle$ 为节域; $\rho(v_i, V_{ij})$ 为岩体评分数值  $v_j$ 与经典域  $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 在空间上的距离,计算公式见式(10); $\rho(v_i, V_{pj})$ 为岩体评分数值  $v_j$ 与节域  $V_{pj} = \langle a_{pj}, b_{pj} \rangle$ 在空间上的距离,计算公式见式(11)。通过岩体实测指标与经典域区间值相比,获得无量纲评价指标值,进而根据式(12)计算获得各评价指标所占权重  $W_{ij}$ 。

$$\rho(v_j, V_{ij}) = \left| v_j - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \left| \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \right| \quad (10)$$

$$\rho(v_j, V_{pj}) = \left| v_j - \frac{a_{pj} + b_{pj}}{2} \right| - \left| \frac{b_{pj} - a_{pj}}{2} \right| \quad (11)$$

$$W_{ij} = \frac{\frac{x_{ij}}{v_{ij}}}{\sum_{j=1}^4 \frac{x_{ij}}{v_{ij}}} \quad (12)$$

式中,  $x_{ij}$  为岩体某一实测指标, 如单轴抗压强度等;  $i$  为评价指标编号;  $j$  为岩体质量等级编号;  $v_{ij}$  同上。通过无量纲指标值与权重的乘积, 获得属于不同岩体质量等级的关联度, 计算公式见式 (13)。关联度值越大, 表明岩体属于该岩体质量等级越可靠。采用可拓学理论进行岩体质量分级时各等级划分标准见表 5, 各水平围岩参数实测值见表 6。

$$K_{ij} = \sum W_{ij} \frac{x_{ij}}{v_{ij}} \quad (13)$$

表 5 可拓学理论分级划分标准表

级别	$\sigma_c$ /MPa	RQD/%	摩擦角 $\theta$ /(°)	$E$ /GPa
I	120 ~ 200	90 ~ 100	60 ~ 90	33 ~ 60
II	60 ~ 120	75 ~ 90	50 ~ 60	33 ~ 20
III	30 ~ 60	50 ~ 75	39 ~ 50	20 ~ 6
IV	15 ~ 30	20 ~ 50	27 ~ 39	6 ~ 1.3
V	0 ~ 15	0 ~ 20	0 ~ 27	0 ~ 1.3

表 6 各水平围岩参数实测值

岩石类型	$\sigma_c$ /MPa	RQD/%	内摩擦角 $\theta$ /(°)	$E$ /GPa
花岗岩	143.09	90	51.8	19.20
绿泥云母	115.56	60	35.2	32.54
斜长片岩	81.65	65	36.4	20.57

最终, 基于可拓学理论, 根据式 (9) ~ 式 (13) 算获得花岗岩、绿泥云母、斜长片岩岩体质量等级关联度, 结果见表 7。分析发现: 花岗岩、绿泥云母、斜长片岩岩体质量分级中 I 级、III 级、II 级关联度分别最大。因此采用可拓学理论花岗岩、绿泥云母、斜长片岩岩体质量分级结果分别为 I 级、III 级、II 级。

表 7 各围岩质量分级结果

岩石类型	I	II	III
花岗岩	0.75	0.25	-0.30
绿泥云母	-0.20	0.40	0.60
斜长片岩	-0.05	0.65	0.25

## 4.2 RMR 法、Q 法和 [BQ] 法分级

### 4.2.1 单一分级方法分析

#### 1) 岩体地质力学 RMR 分级

RMR (Rock Mass Rating) 分级又称 CSIR 分级,

由南非科学和工业研究委员会 (CSIR) 的宾尼亚夫斯基 (Bieniawski) 提出。主要考虑五个基本参数分别为: 岩块单轴抗压强度  $R_1$ 、岩体的 RQD 值  $R_2$ 、结构面间距  $R_3$ 、节理状态  $R_4$ 、地下水状况  $R_5$ 、结构面性状及张开情况  $R_6$ , 根据上述 6 个参数的岩体评分值之和就得到岩体质量 RMR 的值。

$$RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (14)$$

根据现场钻孔电视结果, 岩体最终 RMR 评分结果见表 8。

结果表明, 绿泥云母属于 III 级岩体, 斜长片岩属于 III 级岩体, 花岗岩属于 II 级岩体。

#### 2) 巴顿岩体质量 Q 分级

挪威岩土工程研究所 (Norwegian Geotechnical Institute) 的 Barton、lien 和 Lunde 等人, 根据大量工程实例, 提出了 Q 分类方法, 该分级方法中, 岩体质量指标 Q 的评分值按式 (15) 计算。

$$Q = \frac{RQD J_r J_w}{J_n J_a SRF} \quad (15)$$

式中, RQD 为岩芯质量指标;  $J_n$  为节理组数;  $J_r$  为节理粗糙度;  $J_a$  为最脆弱节理面蚀度程度或填充情况;  $J_w$  为裂隙水折减系数; SRF 为地应力影响因素。

由表 9 可知, 绿泥云母属于 II 级岩体, 斜长片岩属于 II 级岩体, 花岗岩属于 II 级岩体。

#### 3) 岩体基本质量 BQ 分级 (及 [BQ] 法)

长江科学院曾主持制定了我国《工程岩体分级标准》国家规范。该规范提出的岩体质量评价方法中, 岩体的基本质量指标 BQ 的计算严格遵循公式 (16) 的规定要求。

$$BQ = 100 + 3\sigma_c + 250K_v \quad (16)$$

式中,  $\sigma_c$  为完整岩块的抗压强度, MPa;  $K_v$  为岩体完整性指标。

其中包含两个限制: 当  $\sigma_c > 100K_v + 30$  时, 将  $\sigma_c = 100K_v + 30$  代入计算 BQ 值; 当  $K_v > 0.04\sigma_c + 0.4$  时, 将  $K_v = 0.04\sigma_c + 0.4$  带入可计算 BQ 值, 并对其进行修正, 得到 [BQ] 值, 见公式 (17)。

$$[BQ] = BQ - 100 \times (K_1 + K_2 + K_3) \quad (17)$$

式中,  $K_1$  为地下水影响修正系数 (查表确定, 如干燥状态为 0, 渗流状态为 0.1 ~ 0.2);  $K_2$  为主要软弱结构面产状修正系数 (根据结构面与工程轴线夹角查表, 不利产状时为 0.1 ~ 0.4);  $K_3$  为初始应力状态修正系数 (高地应力时取 0.5 ~ 1.0)。

天然状态不同岩石 BQ 法与 [BQ] 岩体质量分级计算结果见表 10。

表8 天然状态下不同岩石质量 RMR 法评分

岩体类型	分类参数	数值	评分
绿泥云母	完整岩石强度	115.56	12
	节理间距	30 ~ 100 cm	15
	节理条件	节理面光滑或含厚度 < 5 mm 的软弱夹层, 节理开口宽度 1 ~ 5 mm, 节理连续	8
	地下水	中等湿润	7
	总分		42
斜长片岩	完整岩石强度	191.97	12
	节理间距	30 ~ 100 cm	15
	节理条件	节理面光滑或含厚度 < 5 mm 的软弱夹层, 节理开口宽度 1 ~ 5 mm, 节理连续	10
	地下水	中等湿润	10
	总分		47
花岗岩	完整岩石强度	143.09	12
	节理间距	100 ~ 200 cm	20
	节理条件	节理面稍粗糙排, 宽度 < 1 mm, 节理面岩石软弱	20
	地下水	轻微潮湿, 局部湿润	12
	总分		64

表9 Q 法与 RMR 岩体质量类别对应关系

Q 值	> 40	40 ~ 10	10 ~ 4	4 ~ 1	1 ~ 0.001
Q 法岩体质量描述	特好 ~ 极好 ~ 很好	好	一般	差 ~ 很差	极差 ~ 特差
RMR 岩体质量类别	I	II	III	IV	V

表10 天然状态不同岩石岩体质量 BQ 法与 [BQ] 法评分

岩体类型	分类参数	特征	数值
绿泥云母	$\sigma_c$	单轴抗压强度	115.56
	$K_v$	较完整	0.6
	BQ		596.68
	$K_1$	潮湿点滴漏水	0.1
	$K_2$	结构面走向与洞轴线夹角 > 60°, 结构面倾角 > 75°	0.1
	$K_3$	初始应力状态	0.5
	[BQ]		526.68
斜长片岩	$\sigma_c$	单轴抗压强度	191.97
	$K_v$	较完整	0.7
	BQ		850.91
	$K_1$	潮湿点滴漏水	0.1
	$K_2$	结构面走向与洞轴线夹角 > 60°, 结构面倾角 > 75°	0.1
	$K_3$	初始应力状态	0.5
	[BQ]		780.91
花岗岩	$\sigma_c$	单轴抗压强度	143.09
	$K_v$	较完整	0.7
	BQ		704.27
	$K_1$	潮湿点滴漏水	0.1
	$K_2$	结构面走向与洞轴线夹角 > 60°, 结构面倾角 > 75°	0.1
	$K_3$	初始应力状态	0.5
	[BQ]		634.27

结果表明:绿泥云母属于 I 级岩体斜长片岩属于 I 级岩体,花岗岩属于 I 级岩体。

该分级方案融合了定性与定量分析技术,在工程岩体质量评价中展现出显著优势,其核心特征在于参数获取便捷且实用性强。研究数据表明,该方法对硬岩、软岩及各类特殊地质体具有良好适用性,但在实际应用过程中仍存在若干限制:一方面,各修正参数的取值范围较宽且数据离散特征明显,特别是在应力场非均匀分布区域,相关参数的准确标定面临挑战;另一方面,现有评价体系尚未将土质围岩纳入适用范围,这在一定程度上制约了其工程应用的广度。从工程实践角度考量,该方法在复杂地质条件下的适应性仍需进一步验证和完善。

#### 4.2.2 分级方法比较

根据 RMR 法、Q 法、[BQ]法和可拓学理论等经典岩体质量分级方法对花岗岩、绿泥云母、斜长片岩岩体进行质量分级,分级结果见表 11。分析发现:各种岩体质量分级方法划分岩体质量均存在差异。不同岩体质量分级方法产生差异的原因可从以下几个方面分析:

表 11 岩体质量分级评分数值汇总表

水平	方法			
	RMR 法	Q 法	[BQ]法	可拓学理论
绿泥云母	Ⅲ	Ⅱ	I	Ⅲ
斜长片岩	Ⅲ	Ⅱ	I	Ⅱ
花岗岩	Ⅱ	Ⅱ	I	I

(1)评价指标侧重点不同。RMR 法主要选取岩体单轴抗压强度、RQD、结构面间距、节理状态、地下水状况以及结构面产状作为评价指标;Q 系统法侧重于岩芯质量、节理组数、节理粗糙度、节理蚀变度、裂隙水条件及地应力因素;[BQ]法则以岩石抗压强度和岩体完整性指标为核心;可拓学理论依赖于经典域(分级标准)和节域设定的合理性。

(2)参数敏感性存在差异。不同分级方法因其指标体系的差异,对同一岩体物理力学参数的反应程度截然不同。绿泥云母在三种方法中分别被评为Ⅲ级(RMR)、Ⅱ级(Q)和 I 级([BQ])。在[BQ]法中,完整性指标( $K_p=0.6$ )较高,影响显著,故被评为 I 级,而在 RMR 法中,节理条件评分较低,导致结果偏保守;斜长片岩的分级差异同样显著,在三种方法中分别被评为Ⅲ级(RMR)、Ⅱ级(Q)和 I 级([BQ])。其单轴抗压强度以及完整性指数较高,

故评定为 I 级,而在 RMR 法中节理条件较差导致评级较低,使得评价结果趋于保守。

(3)地质条件适应性差异。不同岩体类型因其结构、力学行为等差异,与各种分级方法的契合程度也各不相同。对于硬岩(如花岗岩)这类岩石,[BQ]法由于其对岩石强度赋予的极高权重,倾向于给出更高级别的评分(多为 I 级);中等强度岩体(如斜长片岩)通常表现为岩石强度中等,结构面发育程度也属中等,各方法评级相对一致(多为Ⅱ级);软弱岩体(如绿泥云母)往往表现出复杂的力学行为,如强度对水的敏感性、显著的流变性、以及结构面对整体强度的控制性作用等,导致不同方法评级差异较大(I-Ⅲ级)。

### 4.3 D-S 证据理论岩体综合评价

#### 4.3.1 D-S 证据理论

为进一步保证工程岩体质量分级的准确性,基于可拓学理论、D-S 证据理论融合多种岩体质量分级结果,最终确定岩体质量等级。

D-S 证据理论的核心特征在于运用数学逻辑方法对不确定性及不完整信息实施融合分析。为深入探究该理论优势,基于 D-S 证据理论框架并结合组合评估策略,构建岩体质量分级的数学模型如下:

$$N = \begin{bmatrix} m(F_1) \\ m(F_2) \\ \vdots \\ m(F_5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(A_1, A_2, A_3, F_1) \\ f(A_1, A_2, A_3, F_2) \\ \vdots \\ f(A_1, A_2, A_3, F_5) \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中:

$$f(A_1, A_2, A_3, F_i) = \frac{1}{1-K} \sum_{F_i \cap \dots \cap F_h = F_i} m(A_1(F_i)) \cdots m(A_3(F_h)) \quad (19)$$

$$K = \sum_{F_j \cap \dots \cap F_h = \emptyset} m(A_1(F_j)) \cdots m(A_3(F_h)) \quad (20)$$

式中, $A_k$ 为第  $k$  种基础分级方法; $F_j$ 为岩体质量第  $j$  个等级; $m(A_k(F_j))$ 为基础分级方法  $A_k$ 对岩体质量等级  $j$  级的基本概率分配函数; $K$ 为 3 种基础分级方法之间的冲突程度; $f(A_1, A_2, A_3, F_i)$ ,  $m(F_i)$ 为 3 种基础分级方法对岩体质量等级为  $i$  级的支持概率; $N$ 为 6 种岩体质量等级所获得的支持概率  $m(F_i)$ 所组成的支持概率向量。

基于 D-S 证据理论的组合评估模型分析过程,首先对支持概率向量  $N$  进行分量解析,确定各岩体质量分级方法的基本分配概率,进而采用式(18)~

式(20)计算获得工程岩体处于岩体质量各等级的可信度,计算结果见表12。根据最大支持概率决策准则,最终判定岩体质量等级为 $F_i$ 。该判定结果综合了多种分级方法的评估信息,具有更高的可靠性。分析发现:花岗岩、绿泥云母、斜长片岩岩体质量等级分别处于I级、Ⅲ级、Ⅱ级时支持概率最大。因此基于D-S证据理论,综合考虑RMR、Q、[BQ]和可拓学理论等经典岩体质量分级结果,最终判断:花岗岩、绿泥云母、斜长片岩岩体质量等级岩体质量等级分别为I级、Ⅲ级、Ⅱ级。

表13 各围岩多维度分析结果及多维度分级方法优势分析

围岩类型	RMR法	Q法	[BQ]法	多维度分析法	优势分析
花岗岩	Ⅱ	Ⅱ	I	I	①融合多种指标评价,确认其高质量等级; ②克服[BQ]法对高强度岩石可能评级偏高的倾向; ③与实际工程稳定性表现一致
绿泥云母	Ⅲ	Ⅱ	I	Ⅲ	①识别出[BQ]法对软弱岩体评级偏高的风; ②考虑其遇水软化特性,与实际工程表现更吻合; ③避免单一Q法可能高估其质量的风险
斜长片岩	Ⅲ	Ⅱ	I	Ⅱ	①平衡不同方法评级差异,提供适中评价; ②考虑其各向异性特征,评级更符合实际; ③相比单一RMR法评级更合理

(1)有效降低单一方法的局限性影响实现综合评价。任何单一的分级方法都不可避免地存在理论视角的局限性和评价指标的侧重性。多维度分级方法的核心优势在于集成了不同方法的视角,弥补了单一方法的盲区。这种评价结果包含了丰富工程信息的、具有实际意义的判断,显著降低了因依赖单一方法而产生的误判风险。

(2)提高分级结果的可靠性与稳健性。在工程实践中,当不同分级方法对同一岩体得出不一致的结论时,决策往往存在较强的主观性。多维度分析方法为解决这一难题提供了客观、量化的工具。这种基于多维度分析合成的决策稳健性较高,为工程决策提供了更为坚实的依据,减少了因分级结果不确定性导致的工程风险。

(3)增强对复杂地质条件的适应性。多维度分级方法的强大之处在于其具有较高的适应性。对于岩性组合复杂的工程,该分级方法能够灵活地调整不同评价方法在最终结果中的权重,在处理复杂地质条件时具备高适应能力和精准判别能力。

(4)提升分级结果与实际工程表现的吻合度。单一分级方法由于自身的局限性,其结论有时会与

表12 各围岩质量等级可信度

岩石类型	I	Ⅱ	Ⅲ
花岗岩	0.60	0.40	0.00
绿泥云母	0.10	0.30	0.60
斜长片岩	0.10	0.60	0.30

#### 4.3.2 多维度分级方法优势总结

相较于传统单一分级方法,多维度分级方法在复杂围岩质量评价中展现出显著优势,具体见表13,具体体现在以下五个方面:

工程现象出现偏差。多维度分级方法通过综合考量,其分级结果能够更全面、更辩证地反映岩体的真实工程行为,为指导施工和支护设计提供了更贴近实际的输入条件。

(5)为数值模拟与工程设计提供更准确的力学参数。岩体质量分级结果的可靠性直接决定了后续力学参数取值和数值模拟分析的可信度,基于可靠分级结果确定的力学参数,故而更能代表岩体的真实力学特性。多维度分级方法通过对基础分类的精细处理,为整个工程的定量化分析与科学决策奠定了坚实的数据基石。

## 5 结论

(1)采用岩体声波测试,结果表明该钻孔48.8%的岩体岩质新鲜,未见内化痕迹;31.2%的岩体组织结构未变,裂隙发育;20.4%组织结构部分破坏,裂隙高度发育。采用RMR、Q、BQ及修正版[BQ]法进行多维度分级,结合可拓学理论和D-S证据理论综合评价,明确了围岩岩体质量等级。研究结果可为矿山设计、施工安全及资源高效利用提供支撑,保障工程的安全性、经济性与可持续性。

(2)采用地质强度指标(GSI)定量化方法与

Hoek-Brown(H-B)强度准则相结合的评估体系,精确测定了目标岩体的 H-B 强度特征值。基于数值拟合,进一步推导出与之等效的 Mohr-Coulomb(M-C)强度参数。这一研究成果为矿山开采方案优化提供了关键力学依据,同时为岩体稳定性数值模拟奠定了可靠的数据基础。

(3)采用 RMR、Q、BQ 及修正版[BQ]法进行多维度分级,结合可拓学理论和 D-S 证据理论综合评价,明确了围岩岩体质量等级。研究结果可为矿山设计、施工安全及资源高效利用提供支撑,保障工程的安全性、经济性与可持续性。

#### [参考文献]

- [1] 游淳淋,黄明清,丘浩禹. 基于多元数据归一化处理的破碎岩体质量分级[J]. 中国矿业,2022,31(8):158 - 164.
- [2] 冷建民,何顺斌,况丹阳,等. 基于三维随机裂隙网络模型的岩体质量分级与支护研究[J]. 矿业研究与开发,2018,38(8):62 - 66.
- [3] Bieniawski Z T. Engineering Rock Mass Classification [M]. New York:John Wiley&Sons Inc.,1989.
- [4] 李华,朱自强,李键. TSP203 系统在岩体分级中的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2005,2(6):449 - 453.
- [5] Bienawski Z T. 工程岩体分类[M]. 吴立新,王建锋,刘殿书,等译. 徐州:中国矿业大学出版社,1993.
- [6] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mech.,1974,6(4):183 - 236.
- [7] ieniawski Z T. Engineering Rock Mass Classification [M]. New York:John Wiley&Sons Inc.,1989.
- [8] 谭文辉,武洋帆,刘景军,等. 深部岩体质量分级 Q 系统的改进[J]. 中国矿业,2020,29(2):161 - 165.
- [9] 曹文贵,杨伟康,翟友成. 基于 D-S 证据理论的岩体质量分级组合评价方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):86 - 91.
- [10] 石飞,陈忠,刘洋. 巷道围岩岩体质量分级的可拓学模型及其应用[J]. 有色金属(矿山部分),2012,64(1):59 - 62.
- [11] 柴波,陶阳阳,杜娟,等. 基于 Hoek-Brown 准则的节理岩体能量参数估算[J]. 地质科技通报,2020,39(1):78 - 85.
- [12] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1997,34(8):1165 - 1186.
- [13] Cai M, Kaiser P K, Uno H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2004,41(1):3 - 19.
- [14] Marinos V, Marinos P, Hoek E. The geological strength index: Applications and limitations [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 64(1):55 - 65.
- [15] Dinc O S, Sonmez H, Tunusluoglu C, et al. A new general empirical approach for the prediction of rock mass strengths of soft to hard rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2011,48(4):650 - 665.
- [16] Jiang H. A failure criterion for rocks and concrete based on the Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 95:62 - 72.
- [17] 周广照,彭云晖,许思勇,等. Hoek-Brown 准则在岩石强度各向异性评价中的应用[J]. 地质科技情报,2017,36(2):285 - 292.
- [18] 郭建强,刘新荣,黄武锋,等. 基于弹性应变能的 Mohr-Coulomb 强度准则讨论[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(9):1168 - 11.
- [19] 王志猛. 弓长岭铁矿资源开发利用方案浅析[J]. 中国金属通报,2024(6):71 - 73.