

# 中关铁矿首采区岩体力学参数确定

王志国<sup>1,2</sup>, 卢聚强<sup>1,2\*</sup>, 王瑞<sup>1,2</sup>, 方博然<sup>1,2</sup>, 吴仪慧<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山

<sup>2</sup>河北省矿业开发与安全工程实验室, 河北 唐山

收稿日期: 2023年5月30日; 录用日期: 2023年6月29日; 发布日期: 2023年7月6日

## 摘要

确定可靠的岩体力学参数对中关铁矿岩体稳定性分析和后期开挖模拟等具有重要作用。本文通过采集首采区13号穿脉地质钻孔岩心, 获取-230水平矿体、上盘围岩和下盘围岩的岩石力学参数。在室内岩石力学试验和BQ岩体质量分级的基础上, 利用BQ与RMR的关系式计算GSI值, 运用RocData程序确定中关铁矿首采区的岩体力学参数, 比较矿岩体的经验估算值和试验值。结果表明, Hoek-Brown强度准则估算值和BQ线性插值结果基本一致, 可将BQ值直接应用到Hoek-Brown准则的岩体力学参数确定中, 为矿体开挖模拟和类似工程应用提供依据。

## 关键词

室内岩石力学试验, BQ值, Hoek-Brown强度准则, GSI值, 岩体力学参数

# Determination of Mechanical Parameters of Rock Mass from Zhongguan Iron Mine First Mining Area

Zhiguo Wang<sup>1,2</sup>, Juqiang Lu<sup>1,2\*</sup>, Rui Wang<sup>1,2</sup>, Boran Fang<sup>1,2</sup>, Yihui Wu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

<sup>2</sup>Mining Development and Safety Engineering Laboratory of Hebei Province, Tangshan Hebei

Received: May 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 29<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 6<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Determining reliable rock mass mechanical parameters plays an important role in the stability

\*通讯作者。

analysis and post-excavation simulation of Zhongguan iron ore rock mass. In this paper, the rock mechanical parameters of -230 horizontal ore body, upper plate surrounding rock and lower disk surrounding rock are obtained by collecting the geological drilling core of No. 13 in the first mining area. On the basis of indoor rock mechanics test and rock mass classification, the GSI value is calculated using the relationship between BQ and RMR, and the RocData program is used to determine the rock mass mechanical parameters in the first mining area of Zhongguan iron mine, and compare the empirical estimates and test values of the ore body. The results show that the estimated Hoek-Brown strength criterion is basically the same as the BQ linear interpolation results, and the BQ value can be directly applied to the determination of rock mass mechanical parameters, providing a basis for ore body excavation simulation and similar engineering applications.

## Keywords

Indoor Rock Mechanics Test, BQ Index, Hoek-Brown Strength Criterion, GSI Index, Rock Mass Mechanical Parameters

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

为了开展数值模拟试验和岩体稳定性分析,室内岩石力学试验、岩体质量分级以及岩体力学参数确定是至关重要的。当前,在国内外地下工程中应用较多的岩体分级方法主要有:Q分级、RMR分级、我国工程岩体BQ分级标准(GB/T50218-2014)和地质强度指标(GSI)。与其他分级方法相比,GSI可直接定量计算岩体力学参数。

为获取准确的岩体力学参数,一些学者采用Hoek-Brown准则获取岩体力学参数,如张成良等[1][2]通过引入结构面条件 $J_{Cond}$ 和RQD值量化处理GSI值,进而确定岩体力学参数;周念清等[3]基于GSI和RMR值计算岩体力学参数;赵国彦等[4]利用Hoek-Brown非线性方程改进 $m_b$ 、 $s$ 的取值,进而确定岩体力学参数;杨帆等[5]在现场原位试验和工程经验类比法的基础上,得出一般边坡工程可采用Hoek-Brown强度准则的经验公式确定岩体力学参数,对于重要边坡工程应以现场原位试验确定岩体力学参数。也有学者在室内岩石力学试验的基础上,结合其他方法来获取岩体力学参数,如刘先珊等[6][7]在室内试验测得的岩石力学参数基础上,结合工程类比法、正交试验法、等效岩体技术和3DEC程序确定岩体力学参数。一些学者采用岩体质量分级和数值模拟方法解决Hoek-Brown准则中GSI难以量化的问题,如姜光成等[8]结合遗传算法与FLAC3D数值模拟软件,进行岩体力学参数反演;严秋荣等[9]将节理岩体单元离散为岩块和节理两种类型,通过室内试验和数值计算得出节理岩体的力学特性;钟正强等[10]利用Hoek-Brown非线性准则和数值拟合方法,得出GSI、 $m_i$ 、剪切强度参数和黏结力之间的关系;崔少东等[11]通过Q围岩分级和GSI围岩分级之间的关系,将Q结果引入到Hoek-Brown准则中,结合Mohr-Coulomb准则,计算岩体力学参数;许宏发等[12]基于内摩擦角等效原则和变形模量等效原则,通过非线性拟合方法,得出RMR和BQ之间的关系方程;张占荣等[13][14]在BQ工程岩体质量分级的基础上,通过相关性分析确定岩体力学参数。综上所述,学者主要通过节理状态、岩石质量指标与GSI的关系式,GSI分级与其它分级方法的关系式,非线性方法改进Hoek-Brown参数指标以及数值模拟等方法确定岩体力学参数。

中关铁矿的矿床直接赋存于奥陶系灰岩之下,涌水量大,水文地质条件十分复杂,矿区奥陶系中石

灰岩为矿床的直接顶板，是主要含水层，中关铁石灰岩含水层分布广、厚度大、裂隙发育不均一，在垂向也不均一[15]。矿区开展了点荷载和岩石力学实验，由于缺少结构面条件  $JCond_{g9}$  的相关数据，无法通过经验公式直接确定 GSI 值。为了分析中关铁矿采场稳定性，利用 BQ 与 RMR 关系式定量化确定 GSI 值，在室内岩石力学试验和 BQ 岩体质量分级的基础，采用 Hoek-Brown 强度准则确定首采区的岩体力学参数，为采场稳定性分析和矿体开挖数值模拟做准备。

## 2. Hoek-Brown 准则的基本原理

### 2.1. Hoek-Brown 强度准则简介

为了解释低应力区、拉应力区和最小主应力对岩体强度的影响，Hoek 等人在 Griffith 经典强度理论的基础上，将岩块力学参数折减成岩体力学参数，从而弥补了 Mohr-Coulomb 强度准则的不足，其基本公式为：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad [16] \tag{1}$$

式中：

- $\sigma_1$ ——岩体破坏时最大主应力，MPa；
- $\sigma_3$ ——岩体破坏时最小主应力，MPa；
- $\sigma_{ci}$ ——岩石的单轴抗压强度，MPa；
- $m$ 、 $s$ 、 $a$ ——岩体质量的无量纲常数。

$$m = m_i \exp\left(\frac{GIS - 100}{28 - 14D}\right) \quad [17] \tag{2}$$

$$s = \exp\left(\frac{GIS - 100}{9 - 3D}\right) \quad [17] \tag{3}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GIS/15} - e^{-20/3} \right) \quad [17] \tag{4}$$

式中：

- $D$ ——岩体扰动系数，取值为 0~1；
- $m_i$ ——岩石完整性系数，由岩石类型和特征决定，其取值可参考表 1。

**Table 1.** Hoek-Brown constant  $m_i$  determined by rock type

**表 1.** 由岩石类型所决定的 Hoek-Brown 常数  $m_i$

岩石类型	岩石性状	岩石化学特征	结构			
			粗糙的	中等的	精细的	非常精细
沉积岩	碎屑状	有机的 碳化的 化学的	砾石 22	砂岩 19	粉砂岩 9	泥岩 4
	非碎		角砾岩 22	煤 8~21		
变质岩	屑状	大理岩 9		石灰岩 8~10	硬石膏 13	
	非层状		角页岩 19	石英岩 23		
	轻微层状		燧麻岩 30	闪石 25~31	糜棱岩 6	
火成岩	层状	花岗岩 33	片麻岩 33	片岩 4~8	千枚岩 10	板岩 9
	亮色的				流纹岩 25	
	暗色的	花岗闪长岩 30		闪长岩 25	英安岩 25	
		辉长岩 27		苏长岩 25	玄武岩 17	黑曜岩 19
	火成碎屑	砾岩 20	角砾岩 18	凝灰岩 15		

### 2.2. 抗剪强度参数 $c$ 、 $\rho$ 计算

通过对  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3\max}$  范围内的最小主应力设置一条线性相关的直线, 采用 Mohr-Coulomb 破坏准则, 推导出下面等效内摩擦角  $c$  和黏聚力  $\varphi$  的等式:

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m\sigma_{3n}] (s + m\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(1+a)\sqrt{1 + [6am(s + m\sigma_{3n})]^{a-1}} / [(1+a)(2+a)]} \quad [18] \quad (5)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am(s + m\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am(s + m\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad [18] \quad (6)$$

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3\max} / \sigma_{ci} \quad [18] \quad (7)$$

式中:

$\varphi$ ——内摩擦角,  $^\circ$ ;

$c$ ——黏聚力, MPa;

$\sigma_{3\max}$ ——最小主应力上限值, MPa。

### 2.3. 变形模量计算

Hoek 等人建立了  $\sigma_{ci} \leq 100$  与  $\sigma_{ci} > 100$  的两种情况的变形模量  $E_m$  与 GSI 之间的关系:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (\sigma_{ci} \leq 100) \quad (8)$$

$$E_m = 10^{(GSI-10)/40} \quad (\sigma_{ci} > 100) \quad (9)$$

考虑扰动影响因子  $D$  时:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (\sigma_{ci} \leq 100) \quad (10)$$

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{(GSI-10)/40} \quad (\sigma_{ci} > 100) \quad (11)$$

### 2.4. 岩体强度指标计算

当  $\sigma_3 = 0$  时即可得到岩体单轴抗压强度:

$$\sigma_1 = \sigma_{ci} s^a \quad (12)$$

当  $\sigma_1 = 0$  时即可得到单轴抗拉强度:

$$\sigma_3 = \sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_{ci} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad [19] \quad (13)$$

## 3. 首采区矿岩质量评价

为了对矿山岩体工程质量和稳定性进行评价, 同时也为矿房参数优化研究提供计算依据, 必须在对矿山矿体及上、下盘围岩以及各个中段进行工程地质调查, 全面掌握矿区节理裂隙的分布状况。根据《煤和岩石物理力学性质测定方法》-《GB/T23561.10-2010》及《GB/T23561.11-2010》国家标准、GB/T50266-2013《工程岩体试验方法标准》, 对中关村铁矿首采区岩石试件进行室内岩石力学试验, 获取岩石的密度、抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、黏聚力、内摩擦角、弹性模量和泊松比等岩石物理力学参数。

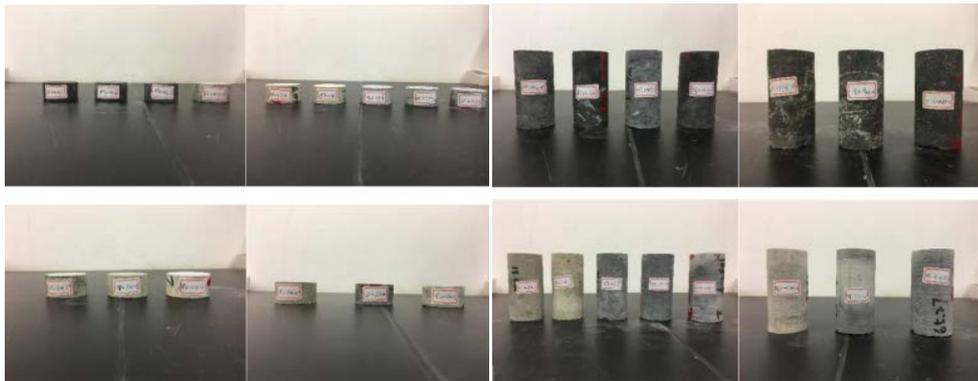
### 3.1. 岩石物理力学参数测定

为了评价岩体工程质量和稳定性,结合中关首采区地质勘探,采集了-230水平13号穿脉5个勘探孔的50段岩芯,其中上盘段12块,下盘段23块,矿体段15块,加工成直径50 mm、高度100 mm以及直径50 mm、高度25 mm的62块标准试件,具体数量情况见表2,加工完成试件如图1所示。

**Table 2.** Number of rock specimen test allocation blocks

**表 2.** 岩石试件试验分配块数

位置	单轴抗压强度试验	饱和单轴抗压强度试验	抗剪强度试验	抗拉强度试验(劈裂法)	饱和抗拉强度试验(劈裂法)
上盘	8	3	6	5	4
下盘	4	3	4	3	4
矿体	3	2	4	5	4



**Figure 1.** Test sample

**图 1.** 试验试样

#### 1) 密度测定

根据国家规程对试件尺寸和重量进行测量,由公式(13)计算岩石容重。

$$\gamma = \frac{W}{V} = \rho g \quad (14)$$

式中:

$\gamma$ ——岩石容重,  $\text{kN/m}^3$ ;

$W$ ——岩石重量,  $\text{kN}$ ;

$V$ 为岩样体积,  $\text{m}^3$ 。

#### 2) 抗拉强度试验

采用劈裂法,将钻孔上、下盘试验试件分为饱和与非饱和两种类型,由公式(14)计算岩石抗拉强度,部分破坏试件见图2。

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi Dh} \quad (15)$$

式中:

$\sigma_t$ ——岩石抗拉强度,  $\text{MPa}$ ;

$p$ ——破坏荷载,  $\text{N}$ ;

$D$ ——试件直径, mm;  
 $h$ ——试件厚度, mm。



**Figure 2.** Partially damaged specimens  
**图 2.** 部分破坏试件

### 3) 抗剪强度试验

为了测量岩石的内摩擦角和黏聚力, 选用变角板剪切试验方法, 对直径 50 mm, 高度 100 mm 的试件进行 50°、55°、60°、70°五个角度的抗剪试验, 破坏试件见图 3。



**Figure 3.** Damaged specimens  
**图 3.** 破坏试件

由公式(16)和(17)计算作用在每块岩石剪切面上的剪切力和正应力, 由公式(19)和(20)计算内摩擦角和黏聚力, 结合摩尔 - 库伦理论, 由公式(21)求解岩石的抗剪强度。

$$\tau = \frac{P}{A}(\sin \alpha - f \cos \alpha) \quad (16)$$

$$\sigma = \frac{P}{A}(\cos \alpha - f \sin \alpha) \quad (17)$$

$$f = \frac{1}{nd} \quad (18)$$

$$\varphi = \arctan \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \quad (19)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \quad (20)$$

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi \quad (21)$$

式中：

- $\tau$ ——剪应力，MPa；
- $\sigma$ ——正应力，MPa；
- $p$ ——试件破坏荷载，N；
- $\tau_f$ ——抗剪强度，MPa；
- $f$ ——滚轴摩擦系数；
- $A$ ——试件剪切面积， $\text{mm}^2$ ；
- $\alpha$ ——试件放置角度， $^\circ$ ；
- $n$ ——滚轴根数；
- $d$ 为滚轴直径，mm。

4) 单轴抗压强度试验

为了测量岩石的弹性模量、泊松比和单轴抗压强度，采用直径 50 mm，高 100 mm 圆柱形试件，开展饱和和自然状态单轴抗压强度试验，配合轴向、径向应变规进行试件轴向和径向应变测量，部分破坏试件见图 4。



Figure 4. Partially damaged specimens

图 4. 部分破坏试件

根据岩石试件纵向应力 - 纵向应变关系, 由公式(22)计算岩石弹性模量, 由公式(23)计算岩石弹性泊松比。

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (22)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{db} - \varepsilon_{da}}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (23)$$

式中:

$E$ ——弹性模量, MPa;

$\sigma_a$ 、 $\sigma_b$ ——应力值, MPa;

$\mu$ ——泊松比;

$\varepsilon_{ha}$ 、 $\varepsilon_{da}$ ——应力为  $\sigma_a$  时的纵向和横向应变值。

$\varepsilon_{hb}$ 、 $\varepsilon_{db}$ ——应力为  $\sigma_b$  时的纵向和横向应变值。

根据中关铁矿的矿床特征和地层状况, 该矿区矿体主要赋存在灰岩和蚀变闪长岩中。将岩体分为上盘围岩(主要为灰岩)和下盘围岩(主要为蚀变闪长岩) 2 大类, 取矿体、上、下盘测量的岩石力学参数平均值作为试验结果, 试验结果见表 3。

**Table 3.** Mechanical parameters of Zhongguan iron ore

**表 3.** 中关铁矿矿岩的力学参数

岩石名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	黏聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	泊松比	弹性模量 (GPa)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
上盘围岩	3.075	11.359	45.8	0.276	67.171	142.08	6.096
下盘围岩	2.757	7.741	47.8	0.268	48.506	113.96	8.413
磁铁矿	3.899	4.311	50.7	0.244	27.921	89.78	6.420

### 3.2. 岩体力学参数确定

#### 1) BQ 岩体质量分级

在室内力学试验和现场工程地质调查的基础上, 采用我国工程岩体 BQ 分级标准(GB/T50218-2014), 对中关铁矿首采区上盘围岩、下盘围岩和-230 矿体进行岩体质量评价, 确定岩体质量等级, 中关铁矿岩体质量分级结果见表 4。

**Table 4.** Rock mass grading table of Zhongguan iron ore

**表 4.** 中关铁矿矿岩体质量分级分析表

岩石名称	单轴抗压强度 $\sigma_{ci}$ (MPa)	岩石质量[BQ]	[BQ]均值	定性级别	稳定性特点
上盘围岩	142.08	154.08~390.94	304.828	IV	不稳定
下盘围岩	113.96	321.28	321.280	IV	不稳定
磁铁矿	89.780	81.17~360.94	231.320	V	极不稳定

#### 2) BQ 岩体力学参数确定

根据表 4 和表 5, 利用线性插值公式(24)对矿岩体力学参数进行插值, 插值结果见表 6。

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (24)$$

**Table 5.** Physico-mechanical parameters of mass [20]  
**表 5.** 岩体物理力学参数[20]

岩体基本质量级别	BQ 值	重力密度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	抗剪断峰强度		变形模量 E (GPa)	泊松比
			内摩擦角 $\varphi$ (°)	黏聚力 $c$ (MPa)		
I	>550	>26.5	>60	>2.1	>33	<0.20
II	451~550	>26.5	60~50	2.1~1.5	33~16	0.20~0.25
III	351~450	26.5~24.5	50~39	1.5~0.7	16~6	0.25~0.30
IV	251~350	24.5~22.5	39~27	0.7~0.2	6~1.3	0.30~0.35
V	≤250	<22.5	<27	<0.2	<1.3	>0.35

**Table 6.** Physico-mechanical parameters of BQ rock mass  
**表 6.** BQ 法岩体物理力学参数

岩体名称	BQ 均值	质量级别	重力密度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	抗剪断峰强度		变形模量 E (GPa)	泊松比
				内摩擦角 $\varphi$ (°)	黏聚力 $c$ (MPa)		
上盘岩体	304.828	IV	23.587	33.525	0.472	1.902	0.323
下盘岩体	321.280	IV	23.920	35.519	0.555	2.027	0.315
磁铁矿	231.320	V	20.819	24.983	0.185	0.743	0.361

3) 基于 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数确定

根据 Hoek-Brown 准则，确定岩体力学参数需要确定以下参数： $\sigma_{ci}$ 、GSI、 $m_i$  和  $D$ 。GSI 是确定岩体力学参数的关键所在。在岩体分级结果的基础上，由式(25)可以根据 BQ 值计算 RMR。

$$BQ = 170 \ln \frac{15 + 0.24RMR}{5.7 - 0.06RMR} \quad [12] \quad (25)$$

$$GSI = RMR - 5 \quad (RMR > 23) \quad (26)$$

$$GSI = -9 \ln Q + 44 \quad (RMR < 23) \quad (27)$$

中关铁矿矿床直接顶板为奥陶系中统石灰岩，矿体产于结晶灰岩或大理岩层间裂隙中，走向延长 435 m，宽度为 50 m~100 m，平均厚度 10~44.20 m。矿体形态以透镜状为主，局部呈“帽状”，走向近南东，倾向东，倾角 10°~15°。矿石为混合矿，主要为高硫高镁富铁石。

由表 1 确定  $m_i$  值，由 BQ 确定 GSI 值， $\sigma_{ci}$  通过点荷载和室内试验获取，生产爆破的抗扰动系数  $D$  取 0.7~1，Hoek-Brown 各计算参数见表 7，采用 RocData 程序计算分析，结果见表 8 及图 5。

以上盘围岩为例，上盘围岩 BQ 均值为 304.828，由式(25)计算得出 RMR 值为 32.051，由式(26)计算得出 GSI 值为 27.051，室内试验测得上盘围岩的  $\sigma_{ci}$  为 142.08 MPa，由表 1 确定上盘灰岩的  $m_i$  值为 10，抗扰动系数  $D$  取 0.7，通过 Hoek-Brown 准则计算得出上盘围岩的黏聚力为 0.415 MPa，内摩擦角为 33.65°，抗拉强度为 1.273 MPa，抗压强度为 6.819 MPa，弹性模量为 1.729 GPa。

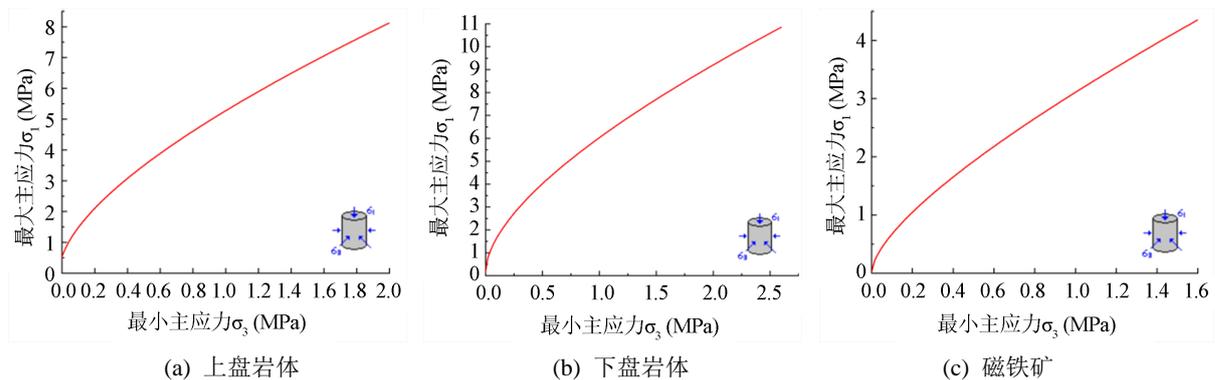
**Table 7.** Hoek-Brown calculation parameters

**表 7.** Hoek-Brown 计算参数

岩石名称	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$m_i$	GSI	D
上盘围岩	142.08	10	27	0.7
下盘围岩	113.96	25	31	0.9
磁铁矿	89.78	22	13	0.8

**Table 8.** Analysis results of mechanical parameters of ore rock mass  
**表 8.** 矿岩体力学参数分析结果

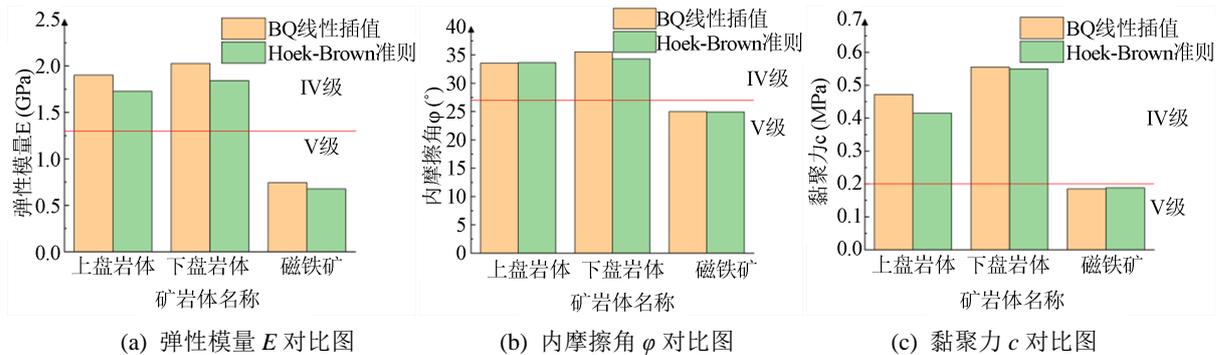
矿岩体类型	$c$ (MPa)	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$E_m$ (GPa)
上盘围岩体	0.415	33.65	-1.273	6.819	1.729
下盘围岩体	0.550	34.30	-1.342	7.177	1.842
磁铁矿	0.188	24.94	-1.088	2.645	0.676



**Figure 5.** Ore body Hoek-Brown yield curve fitting results

**图 5.** 矿岩体 Hoek-Brown 屈服曲线拟合结果

根据表 6 和表 8，对比分析 BQ 线性插值结果与 Hoek-Brown 准则估算结果，示意图见图 6。从图 6 可以看出，Hoek-Brown 准则估算的变形模量、内摩擦角相对 BQ 线性插值结果基本一致，其中弹性模量、内摩擦角和黏聚力的平均差值为 0.425 GPa、1.137°、0.059 MPa。鉴于此，可将 BQ 值直接应用到 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数确定中。



**Figure 6.** Comparison of BQ linear interpolation test values with Hoek-Brown criterion estimates

**图 6.** BQ 线性插值试验值与 Hoek-Brown 准则估算值比较

#### 4. 结论

- 1) BQ 岩体质量等级评价确定首采区的上盘围岩和下盘围岩为IV级，磁铁矿为V级。
- 2) 由 BQ 值与 RMR 值的关系式获取 GSI 值，可以将 BQ 值应用于 Hoek-Brown 确定岩体力学参数的经验公式中。
- 3) 对比分析 BQ 线性插值结果和 Hoek-Brown 准则估算值，两者弹性模量、内摩擦角和黏聚力基本一致，有效验证 BQ 线性插值确定岩体力学参数的合理性，解决 Hoek-Brown 准则参数指标难以获取的难题。

## 基金项目

河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2017060); 河北省钢铁冶金联合研究基金(E2018209351)。

## 参考文献

- [1] 张成良, 李鹏, 王亚宁, 等. 基于掌子面岩体结构扫描的隧道岩体力学参数确定方法研究[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(3): 21-26.
- [2] 姜光成, 胡乃联, 洪根意, 等. 基于 GSI 值量化和修正方法的岩体力学参数确定[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2211-2218.
- [3] 周念清, 杨楠, 汤亚琦, 等. 基于 Hoek-Brown 准则确定核电工程场地岩体力学参数[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1517-1522, 1532.
- [4] 赵国彦, 刘东锐, 董陇军. 爆破扰动下露天矿边坡岩体力学参数确定[J]. 科技导报, 2013, 31(3): 33-37.
- [5] 杨帆, 侯克鹏, 谢永利. 强风化云母石英片岩力学参数确定方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(2):29-33, 38.
- [6] 刘先珊, 乔士豪, 李俊平, 等. 鸡冠咀矿区岩体力学参数的确定及数值模拟反演分析[J/OL].安全与环境学报: 1-10.  
<https://kns.cnki.net/kns8/Detail?sfield=fn&QueryID=3&CurRec=1&recid=&FileName=AQHI20220415005&DbName=CAPJLAST&DbCode=CAPJ&vx=Y&pr=&URLID=11.4537.X.20220416.1747.001>, 2023-06-29.
- [7] 刘波, 杨亚刚. 基于离散裂隙网络与离散元耦合方法的礼让隧道岩体力学参数确定[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9567-9573.
- [8] 姜光成, 胡乃联, 林成浩, 等. 岩体力学参数确定的 GA-FLAC~(3D)位移反演方法[J]. 金属矿山, 2017(11): 37-41.
- [9] 严秋荣, 冯君, 杨涛, 等. 节理岩体力学参数确定的数值试验方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 188-194.
- [10] 钟正强, 彭振斌, 彭文祥. 基于非线性破坏准则的岩体剪切强度参数确定方法[J]. 科技导报, 2009, 27(15): 64-66.
- [11] 崔少东, 郭书太, 高剑锋. 基于 GSI 和 Q 系统岩体力学参数确定方法及应用[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(6): 43-47.
- [12] 许宏发, 陈锋, 王斌, 等. 岩体分级 BQ 与 RMR 的关系及其力学参数估计[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 195-198.
- [13] 张占荣, 杨艳霜, 赵新益, 等. 岩体变形参数确定的经验方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35: 3195-3202.
- [14] 邓文学, 杨天鸿, 南世卿, 等. 司家营铁矿东帮边坡岩体力学参数确定及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2016(3): 15-19.
- [15] 郭斌, 王立杰, 王福全, 等. 某铁矿采场节理裂隙调查及矿岩稳定性分析[J]. 现代矿业, 2022, 38(4): 207-210.
- [16] 蔡美峰, 主编. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 491.
- [17] Karrech, A., Dong, X., Elchalakani, M., et al. (2022) Limit Analysis for the Seismic Stability of Three-Dimensional Rock Slopes Using the Generalized Hoek-Brown Criterion. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32, 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.10.005>
- [18] 周火明, 等. 复杂岩体力学参数取值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(Z1): 2045-2048.
- [19] Wang, X.G., Wan, G.J.D., Feng, G.T., et al. (2017) A Modified Hoek-Brown Failure Criterion Considering the Damage to Reservoir Bank Slope Rocks Under Water Saturation-Dehydration Circulation. *Journal of Mountain Science*, 14, 771-781. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4206-x>
- [20] GB/T 50218-2014, 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社.