珊瑚钨矿岩体质量分级与基于 Hoek-Brown 强度准则的岩体强度估计*

雷显权[1,2],刘福春[1,2],熊有为[1,2],张军[3],刘恩彦[1,2]

(1.长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019;
2.深井矿山安全高效开采技术湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410019;
3.广西桂华成有限责任公司, 广西 贺州市 542611)

摘要:岩体强度是矿山工程安全稳定性分析的关键力学参数。结合珊瑚钨矿小型机械化开采技术攻关项目,在对岩体结构面进行详细调查的基础上,采用BQ、Q和RMR等3种方法进行岩体质量分级与稳定性评价,然后基于定量GSI和Hoek-Brown准则估计岩体强度,获得准确可靠的岩体强度参数。研究结果表明:(1)灰岩岩体的优势节理面走向为NNW-SSE或NW-SE,倾向为NE或SW,倾角较大,体积节理数 J_v 为7.07~9.88条/m^3,完整性系数 K_v 为0.55~0.63,岩体总体较完整;(2)灰岩岩体的[BQ]值、Q 值和 RMR_{89} 值分别为380.96, 5.58和59,岩体质量等级为Ⅲ级或一般;(3)根据BQ分级结果,当巷道或采场跨度小于5 m时,围岩可基本稳定;根据Q分级结果,巷道或采场的最大不支护跨度约为6.35 m;根据RMR分级结果,当巷道或采场跨度为5 m时,围岩平均自立稳定时间可达7 d;(4)基于定量GSI和Hoek-Brown准则估计岩体强度,获得了灰岩岩体的Hoek-Brown强度参数和等效Mohr-Coulomb强度参数,为采矿设计和岩体稳定性分析提供了准确可靠的力学参数。

关键词:岩体质量分级;岩体强度;Hoek-Brown强度准则;地质强度指标

中图分类号:TD313;TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)01-0158-07

Classification of Rock Mass Quality for the Shanhu Tungsten Mine and Strength Estimation Based on the Hoek-Brown Strength Criteria

LEI Xianquan[1,2], *LIU Fuchun*[1,2], *XIONG Youwei*[1,2], *ZHANG Jun*[3], *LIU Enyan*[1,2]

(1.CINF Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410019, China;
2.Hunan Provincial Engineering Research Center for Safe and Efficient Mining Technology of Deep Mines, Changsha, Hunan 410019, China;
3.Guangxi Guihuacheng Co., Ltd., Hezhou, Guangxi 542611, China)

Abstract: The rock mass strength is a key mechanical parameter for the safety and stability analysis of mining engineering. Combined with the key project of small-scale mechanized mining technology in Shanhu Tungsten Mine, based on the detailed investigation of rock mass structural plane, three methods of BQ, Q and RMR were used for classification of rock mass quality and stability evaluation. Then, the rock mass strength was estimated based on quantitative GSI and Hoek-Brown Criteria to obtain accurate and reliable parameters of rock mass strength. The research results are concluded as follows. Firstly, the dominant joint plane strikes NNW-SSE or NW-SE, inclines NE or SW, and the dip angle is large. The volume joint number J_v is 7.07-9.88/m^3, the integrity coefficient K_v is 0.55-0.63, and the integrity evaluation is relatively intact. Secondly, the [BQ] value, Q value, and RMR_{89} value of the limestone rock mass are 380.96, 5.58, and 59, respectively, and the grade of rock mass quality is III or average. Thirdly, according to the BQ classification results, when the span of roadway or stope is less than 5m, the surrounding rock can be basically stable. According to the Q classification results, the maximum unsupported span of roadway or stope is about 6.35 m. According to the RMR classification results, when the span of roadway or stope is 5 m, the average standing stability time of surrounding rock can reach 7 days. Finally, based on quantitative GSI and Hoek-

* **收稿日期**:2024-02-21
基金项目:中国有色矿业集团有限公司"揭榜挂帅"重大科技攻关项目(2022-JBGS-003)
作者简介:雷显权(1985—),男,河南信阳人,博士,正高级工程师,主要从事矿山地质及岩石力学方面的研究工作。E-mail:xqlei_11@163.com

Brown criteria，the Hoek-Brown strength parameters and equivalent Mohr-Coulomb strength parameters of limestone rock mass are obtained，which can provide accurate and reliable mechanical parameters for mining design and the stability analysis of rock.

Key words：Classification of rock mass quality，Rock mass strength，Hoek-Brown strength criterion，Geological strength index

0 引言

岩体强度是影响矿山井巷、采场、露天边坡等采矿工程安全稳定性的关键力学参数。准确可靠的岩体力学参数是矿山岩体稳定性分析的基础[1-2]。由于现场原位试验难度大、周期长、成本高，生产实践中通常采用基于小尺度岩块力学测试结果的经验折减法来间接获取相对准确可靠的大尺度岩体力学参数。刘硕等[3]结合现场调查和室内岩石力学试验结果，采用 Hoek-Brown 强度准则和地质强度指标法(GSI)估算硬石膏岩体强度。王贤来等[4]采用 Q 分级法、地质力学分类法(RMR)和地质强度指标法(GSI)进行岩体质量分级，在此基础上估算金川矿深部岩体力学参数。马毓婷等[5]通过 Hoek-Brown 强度准则折减计算岩体力学参数，分析研究岩体力学参数对某露天矿终了边坡稳定性的影响。项荣华等[6]基于室内试验和现场勘查结果，采用 CSMR 法、GSI 法、RMI 法进行岩体质量分级和评价，在此基础上综合确定边坡岩体力学参数。徐雷等[7]利用结构面粗糙度量化地质强度指标(GSI)取值，结合 Hoek-Brown 强度准则估算某露天矿边坡岩体力学参数，用以分析滑体落岩稳定性。李学锋等[8]结合 RMR 法岩体质量分级结果和 Hoek-Brown 强度准则，采用 Roclab 软件计算岩体强度参数，用于分析某高岭土矿露天边坡稳定性。

上述研究表明，基于岩体质量分级和量化 GSI 指标的 Hoek-Borwn 强度折减法是获取岩体强度参数的科学有效方法。本文以广西贺州钟山县珊瑚钨矿薄细矿体小型机械化开采技术攻关项目为工程背景，在对岩体结构面特征进行详细调查的基础上，采用 BQ、Q 和 RMR 等 3 种分级方法[9-14]进行岩体质量分级与稳定性评价，然后基于定量 GSI 和 Hoek-Brown (H-B)强度准则估计岩体强度，获得 H-B 强度参数，再采用拟合方法获取等效 Mohr-Coulomb (M-C)强度参数，以期为后续采矿工程设计和采场稳定性分析提供可靠依据。

1 工程概况

1.1 机械化留矿法开采工艺

珊瑚钨矿的工业矿脉平均脉幅为 0.42 m，平均倾角为 70°，矿体分支复合、尖灭再现情况普遍，产状变化较大，属于典型的急倾斜极薄难采矿体。为提高机械化开采水平和生产效率，降低劳动强度和安全风险，创新研发机械化留矿法开采新工艺，采用小型凿岩机器人和撬毛、平场多功能机器人进行机械化回采，以解决传统的人工作业留矿法开采劳动强度大、生产效率低、安全风险高的问题[15]。新工艺试验采场如图 1 所示，试验采场长度为 100 m，高度为 50 m，采幅控制在 1.2～1.5 m，预留 3 m 顶柱，不留底柱。凿岩机器人宽度为 800 mm，单杆凿岩深度为 1.5～2.0 m，电动驱动，履带底盘，遥控操作。采用无底柱平底出矿结构，1 m^3 电动铲运机出矿，采场两侧穿脉矿车组装矿。

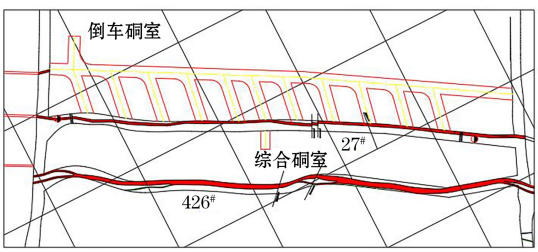


图 1 新工艺试验采场

Fig.1 Test stope of the new technology

1.2 围岩物理力学性质

试验采场上、下盘围岩均为硬质灰岩，现场采集围岩原样，加工制作成标准试样，通过室内岩石力学试验[16]，获得试样的基础物理力学参数，见表 1。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

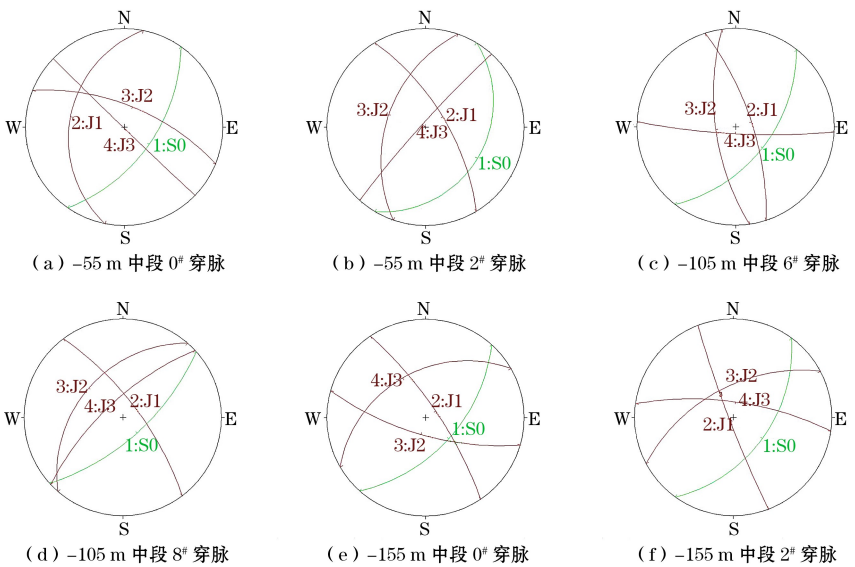
取样位置	试样编号	密度 ρ/(kg·m^{-3})	弹性模量 E/GPa	泊松比 υ	单轴抗压强度 σ_c/MPa
上盘	A-1	2 668	21.88	0.21	132.96
	A-2	2 662	25.18	0.23	194.51
	A-3	2 794	20.02	0.27	128.38
下盘	B-1	2 839	22.43	0.25	161.35
	B-2	2 761	14.11	0.31	66.99
	B-3	2 792	19.31	0.24	144.34
平均		2 753	20.49	0.25	138.09

1.3 岩体结构面特征

结合采切工程布置、试验采场位置以及岩体结

构面暴露情况,选择 6 处具有代表性的地质点进行岩体结构面调查,借助罗盘、数码相机等工具,采用测窗法统计结构面的产状、间距和迹长等信息。结果显示,调查点岩体为坚硬未风化灰岩,结构面类型主要为节理、裂隙,部分为层面,贯通程度为半贯通—贯通,粗糙系数为 6 左右,裂隙一般紧密闭合,大多无蚀变及充填物。

根据现场实测数据,对岩体结构面产状进行赤平投影分析,结果见图 2 和表 2。结果表明,岩体优势节理面走向主要为 NNW-SSE、NW-SE,倾向主要为 NE 或 SW,倾角较大,部分陡倾。优势节理走向与地层走向近于垂直或大角度相交,反映出优势节理的形成主要与垂直地层走向的构造挤压应力作用有关。岩体体积节理数 J_v 为 7.07～9.88 条/m^3,完整性系数 K_v 为 0.55～0.63,完整程度评价为较完整。



(a) -55 m 中段 0# 穿脉　(b) -55 m 中段 2# 穿脉　(c) -105 m 中段 6# 穿脉

(d) -105 m 中段 8# 穿脉　(e) -155 m 中段 0# 穿脉　(f) -155 m 中段 2# 穿脉

图 2　岩体结构面赤平投影图

Fig.2　Stereo-projection maps of structural planes of rock mass

表 2　岩体结构面特征调查结果

Table 2　Investigation results of structural plane characteristics of rock mass

中段位置	埋深/m	岩性	层面产状		优势节理面产状		节理间距/m	节理迹长/m	体积节理数 J_v/(条·m^{-3})	完整性系数 K_v
			倾向/(°)	倾角/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)				
−55 m	0# 穿脉	280	125	56	281	32	0.08～0.64	0.42～2.80	7.07	0.63
−55 m	2# 穿脉	280	121	27	59	67	0.11～0.48	0.45～2.01	8.41	0.60
−105 m	6# 穿脉	330	128	52	72	71	0.09～0.51	0.53～1.64	8.76	0.59
−105 m	8# 穿脉	330	138	66	53	72	0.07～0.65	0.38～2.56	7.67	0.62
−155 m	0# 穿脉	380	132	55	56	76	0.13～0.47	0.29～2.24	9.88	0.55
−155 m	2# 穿脉	380	126	50	249	85	0.12～0.56	0.54～1.50	8.05	0.61

2　岩体质量分级及稳定性评价

2.1　岩体基本质量 BQ 分级

根据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)[9],岩体基本质量考虑岩石坚硬程度和岩体完整程度 2 个因素,基本质量指标 BQ 按下式计算:

$$BQ=90+3R_c+250K_v \tag{1}$$

式中,R_c 为岩石单轴抗压强度,MPa。

需要注意的是,当 $R_c>90K_v+30$ 时,应以 $R_c=90K_v+30$ 和 K_v 代入式(1)计算;当 $K_v>0.04R_c+0.4$ 时,应以 $K_v=0.04R_c+0.4$ 和 R_c 代入式(1)计算。

考虑地下水条件、软弱结构面产状和初始应力状态的影响,可按式(2)进行修正,得到岩体基本质量指标修正值[BQ]:

$$[BQ]=BQ-100(K_1+K_2+K_3) \tag{2}$$

式中:K_1 为地下水影响修正系数;K_2 为主要软弱结构面产状影响修正系数;K_3 为初始应力状态影响修正系数。

根据岩石力学试验和节理裂隙调查结果,灰岩

单轴抗压强度 σ_c 的平均值为 138.09 MPa;岩体完整性系数 K_v 的平均值为 0.598;岩体表面较干燥,局部潮湿;节理产状与巷道轴向关系变化较大;埋深相对较浅,强度应力比较大。根据上述特征,参考《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)确定相关参数,得到岩体质量 BQ 分级结果,见表 3。

表 3 岩体质量 BQ 分级结果

Table 3 BQ classification results of rock mass quality

R_c/MPa	K_v	K_1	K_2	K_3	BQ	$[BQ]$	质量级别
138.09	0.598	0	0.6	0.5	490.96	380.96	Ⅲ

岩体质量 BQ 分级结果显示,灰岩岩体[BQ]值为 380.96,质量级别为Ⅲ级。据此评价,当巷道或采场跨度小于 5 m 时,围岩基本稳定;当跨度为 5～10 m 时,围岩可稳定数月,但可能发生局部块体位移以及小到中等规模的塌方。

2.2 巴顿岩体质量 Q 分级

巴顿岩体质量分级 Q 系统[11-12]主要考虑了岩石完整性、节理的数量、粗糙度、蚀变程度、裂隙水状态和应力强度折减等因素,分级指标 Q 值按如下公式计算:

$$Q=\frac{RQD}{J_n}\cdot\frac{J_r}{J_a}\cdot\frac{J_w}{SRF} \tag{3}$$

式中:RQD 为岩石质量指标,%;J_n 为节理组数;J_r 为节理面粗糙系数;J_a 为节理面蚀变系数;J_w 为裂隙水折减系数;SRF 为应力折减系数。

根据岩体结构面调查结果,岩石质量指标 RQD 约为 89.24%;主要发育 3 组节理,并有随机节理,节理面粗糙、平直;节理壁轻微变质,大多闭合,少有云母充填;岩体表面干燥,局部湿润,偶有渗水;岩石坚硬,地应力中等,强度应力比约为 10～15。据此对相关参数取值,得到岩体质量 Q 系统分级结果,见表 4。由表 4 可知,灰岩岩体 Q 值为 5.58,岩体质量一般。

表 4 岩体质量 Q 系统分级结果

Table 4 Q-system classification results of rock mass quality

RQD/%	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	质量描述
89.24	12	1.5	2	1	1	5.58	一般

工程实践表明,Q 值与地下工程稳定性具有较强的关联,因此可以利用 Q 值来估算地下开挖工程的最大不支护跨度,计算公式[11]为:

$$D_e=\frac{S_{max}}{ESR} \tag{4}$$

式中:D_e 为开挖工程当量尺寸,m;S_{max} 为开挖工程最大不支护跨度,m;ESR 为开挖支护率或支护比,ESR 取值范围为 1.6～2.0,对于永久性地下采矿工程,ESR 一般取 1.6。

当 $Q=5.58$ 时,利用 Q 系统支护图,求得不支护条件下的当量尺寸 $D_e\approx3.97$,ESR 取 1.6,代入式(4),算得 $S_{max}\approx6.35$。

据此估计,对于珊瑚钨矿的灰岩围岩巷道或采场,其最大不支护跨度约为 6.35 m。需要指出的是,对于具体的巷道或采场,还需要根据实际揭露的结构面发育特征、地应力环境和地下水状态来评估围岩的稳定性,有针对性地制定支护方案。

2.3 岩体地质力学 RMR 分级

岩体地质力学 RMR 分级系统[13-14]主要考虑岩石强度、RQD、节理间距、节理状态、地下水条件和节理产状等 6 个因素,分级指标 RMR_{89} 的计算公式如下:

$$RMR_{89}=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6 \tag{5}$$

式中:R_1 为完整岩块强度评分值;R_2 为岩石质量指标 RQD 评分值;R_3 为节理间距评分值;R_4 为节理状态评分值;R_5 为地下水状态评分值;R_6 为节理产状与地下工程走向关系修正值。

根据完整岩块强度和岩体节理裂隙发育特征,参照岩体质量 RMR 分级表对相关指标进行评分,得到岩体质量 RMR 分级结果,见表 5。由表 5 可知,灰岩岩体 RMR_{89} 值为 59,质量级别为Ⅲ级,岩体质量一般。据此估计,当巷道或采场跨度为 5 m 时,围岩平均自立稳定时间可达 7 d。

表 5 岩体质量 RMR 分级结果

Table 5 RMR classification results of rock mass quality

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	RMR_{89}	质量级别	质量描述
12	17	8	20	7	−5	59	Ⅲ	一般

综上所述,采用 BQ、Q 和 RMR 等 3 种不同方法进行岩体质量分级和稳定性评价,结果表明灰岩的岩体质量等级为Ⅲ级,岩体质量一般。

3 基于 H-B 强度准则的岩体强度估计

3.1 Hoek-Brown 强度准则

Hoek-Brown(H-B)强度准则是由国际著名岩

石力学专家 HOEK E 和 BROWN E T 于 1980 年首次提出,发展至今经历过多次修订和完善,在国内外隧道、边坡、采矿等岩石工程领域得到了广泛应用。H-B 强度准则反映了岩体破坏时极限主应力之间的非线性关系,其表达式[17]为:

$$\sigma_1=\sigma_3+\sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}}+s\right)^a \tag{6}$$

式中:σ_1 和 σ_3 分别为岩体的最大主应力和最小主应力,MPa;σ_{ci} 为完整岩块的单轴抗压强度,MPa;m_b、s 和 a 为反映岩体材质特性的 H-B 常数。计算公式如下:

$$m_b=m_i\exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \tag{7}$$

$$s=\exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \tag{8}$$

$$a=\frac{1}{2}+\frac{1}{6}\left[\exp\left(-\frac{GSI}{15}\right)+\exp\left(-\frac{20}{3}\right)\right] \tag{9}$$

式中:m_i 为岩性材质指标,可根据岩体岩性查表取值;GSI 为岩体地质强度指标;D 为反映岩体扰动损伤程度的扰动因子,取值范围为 0～1,当岩体未受扰动时为 0,当岩体受到爆破强烈扰动时为 1。

3.2 地质强度指标 *GSI* 取值

根据节理岩体的结构特征和结构面状态,可利用 GSI 分级系统图对 GSI 进行量化取值,但更为常用的方法是根据岩体质量分级结果与 GSI 值之间的经验关系来确定。HOEK 等[18]研究表明,GSI 值与巴顿岩体质量修正值 Q' 之间具有如下关系:

$$GSI=9\ln Q'+44 \tag{10}$$

式中,Q' 为不考虑裂隙水和应力折减因素的巴顿岩体质量修正值,即:

$$Q'=\frac{RQD}{J_n}\cdot\frac{J_r}{J_a} \tag{11}$$

3.3 M-C 强度参数估算方法

在岩石力学工程实践中,很多理论公式或数值分析软件都是按照 M-C 强度准则推导或开发的。因此,为了便于 H-B 强度准则的使用,可采用等效方法将 H-B 强度参数转化为 M-C 强度参数[19-20]。

研究表明,当 $\sigma_t<\sigma_3<\sigma_{3max}$ 时,M-C 强度曲线与 H-B 强度曲线非常接近,可进行线性拟合,即:

$$\sigma_1=k\,\sigma_3+b \tag{12}$$

式中,k 和 b 分别为拟合直线的斜率和截距。

上述 σ_t 为岩体抗拉强度,MPa;$\sigma_{3\,max}$ 为岩体最小主应力上限,MPa,其值与工程类型有关,对于隧洞或巷道等地下工程,σ_{3max} 可由下式[19]确定。

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}}=0.47\left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H}\right)^{-0.94} \tag{13}$$

式中:H 为隧洞或巷道埋深,m;γ 为岩体容重,MN/m^3;σ_{cm} 为岩体抗压强度,MPa。

$$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\frac{[m_b+4s-a\,(m_b-8s)]\,(m_b/4+s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \tag{14}$$

用主应力表示的 M-C 强度准则表达式为:

$$(\sigma_1-\sigma_3)-(\sigma_1+\sigma_3)\sin\varphi=2c\cos\varphi \tag{15}$$

式中:c 为岩体黏聚力,MPa;φ 为岩体内摩擦角,(°)。

为了便于线性拟合,式(15)可改写为:

$$\sigma_1=\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\sigma_3+\frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{16}$$

结合式(12)和式(16),可得:

$$\begin{cases}k=\dfrac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\\[2ex] b=\dfrac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi}\end{cases} \tag{17}$$

利用式(17)求解 c、φ,可得:

$$\begin{cases}\varphi=\sin^{-1}\left(\dfrac{k-1}{k+1}\right)\\[2ex] c=\dfrac{1-\sin\varphi}{2\cos\varphi}b\end{cases} \tag{18}$$

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 φ。

此外,利用地质强度指标 GSI 和扰动因子 D,还可以采用下式估算岩体的变形模量 E_m[17],即:

$$E_m=E_i\left\{0.02+\frac{1-D/2}{1+\exp[(60+15D-GSI)/11]}\right\} \tag{19}$$

式中,E_i 为完整岩块的弹性模量,GPa。

3.4 岩体强度参数估算结果

根据岩石力学试验结果,灰岩单轴抗压强度 σ_{ci} 取 138.09 MPa。参考岩性材质指标 m_i 取值表[19],灰岩 m_i 取 9。根据巴顿岩体质量 Q 分级相关参数取值结果,可得 $Q'=5.58$,代入式(10)算得 GSI 值为 59.47。考虑岩体受到不同程度的扰动损伤,扰动因子 D 分别取 0,0.5 和 1。将上述取值代入式(7)至式(9),即可得到灰岩岩体的 H-B 强度参数,见表 6。

表 6　灰岩岩体强度参数估计结果

Table 6　Results of parameter estimation of rock mass strength

弹性模量 E_i/GPa	泊松比 v	完整岩块单轴抗压强度 σ_{ci}/MPa	地质强度指标 GSI	扰动因子 D	H-B 常数				拟合斜率 k	拟合截距 b	岩体黏聚力 c/MPa	岩体内摩擦角 φ/(°)	岩体抗压强度 σ_{cm}/MPa	岩体变形模量 E_m/GPa
					m_i	m_b	s	a						
20.49	0.25	138.09	59.47	0.0	9	2.116 42	0.011 07	0.502 95	6.031 4	16.919 4	3.44	45.69	28.44	10.41
				0.5	9	1.306 33	0.004 50	0.502 95	5.164 1	11.674 5	2.57	42.50	21.79	5.41
				1.0	9	0.497 69	0.001 17	0.502 95	3.661 4	6.514 6	1.70	34.82	13.22	2.42

基于灰岩岩体的 H-B 强度估算结果，对其等效 M-C 强度进行拟合，结果见图 3。由图 3 可以看出，3 组 M-C 强度拟合直线的决定系数 R^2 均接近 0.99，拟合度非常高，表明估算结果可靠。

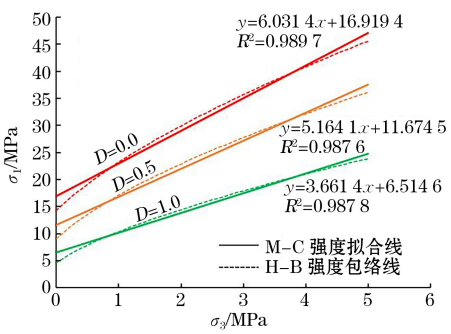


图 3　等效 M-C 强度与 H-B 强度拟合结果

Fig.3　Fitting results of equivalent M-C strength and H-B strength

根据 M-C 强度拟合直线的斜率 k 和截距 b，利用式(18)计算得到岩体的等效 M-C 强度参数 c、φ，并利用式(19)估算岩体的变形模量 E_m，结果见表 6。由表 6 可知，基于不同扰动因子 D 值估算的岩体强度具有一定差异。当 $D=1$，即岩体受扰动强烈时，岩体强度最小，黏聚力 c 为 1.70 MPa，内摩擦角 φ 为 34.82°，抗压强度 σ_{cm} 为 13.22 MPa；当 $D=0$ 时，即岩体受扰动微弱时，岩体强度最大，黏聚力 c 为3.44 MPa，内摩擦角 φ 为 45.69°，抗压强度 σ_{cm} 为 28.44 MPa。这种变化规律与理论预期结果一致，进一步表明了本文方法及结果的准确性和可靠性。

4　结论

(1) 岩体结构面调查和赤平投影分析结果显示，灰岩岩体的优势节理面走向为 NNW-SSE 或 NW-SE，倾向为 NE 或 SW，倾角较大，部分陡倾；优势节理面走向与地层走向近于垂直或大角度相交；体积节理数 J_v 为 7.07～9.88 条/m^3，完整性系数 K_v 为 0.55～0.63，岩体总体较完整。

(2) 岩体质量 BQ、Q 和 RMR 分级结果显示，灰岩岩体[BQ]值为 380.96，质量等级为Ⅲ级；Q 值为 5.58，岩体质量一般；RMR_{89} 值为 59，质量等级为Ⅲ级。由 3 种不同方法得到的结果基本一致。

(3) 根据 BQ 分级结果，当巷道或采场跨度小于 5 m 时，围岩可基本稳定；根据 Q 分级结果，巷道或采场的最大不支护跨度约为 6.35 m；根据 RMR 分级结果，当巷道或采场跨度为 5 m 时，围岩平均自立稳定时间可达 7 d。

(4) 采用基于定量 GSI 和 H-B 准则的岩体强度估计方法，获得了灰岩岩体的 H-B 强度参数，并通过拟合计算得到其等效 M-C 强度参数，研究结果可为后续采矿设计和岩体稳定性分析提供准确可靠的力学参数。

参考文献(References)：

[1] 尹延天，刘焕新，刘震，等.金属矿山采场稳定性评价方法进展与展望[J].中国矿业，2023，32(6)：96-103.
YIN Yantian, LIU Huanxin, LIU Zhen, et al. Advances and prospects of stope stability evaluation methods in metal mines[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(6): 96-103.

[2] 雷显权，刘福春，严庆文，等.超埋深高应力复杂地层巷道围岩损伤分区与承载结构特征研究[J].金属矿山，2023(8)：171-180.
LEI Xianquan, LIU Fuchun, YAN Qingwen, et al. Research on damage zone and load-bearing structure characteristics of surrounding rock mass of roadway in complex strata with overburied depth and high in situ stress [J]. Metal Mine, 2023(8): 171-180.

[3] 刘硕，王汉勋，张彬，等.基于 Hoek-Brown 强度准则的硬石膏采房群稳定性分析[J].长江科学院院报，2020，37(3)：162-169.
LIU Shuo, WANG Hanxun, ZHANG Bin, et al. Stability analysis of anhydrite cavern group based on Hoek-Brown failure criterion [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(3): 162-169.

[4] 王贤来，崔继强，张鹏强，等.金川二矿区深部巷道支护稳定性数值模拟研究[J].采矿技术，2022，22(1)：66-69.
WANG Xianlai, CUI Jiqiang, ZHANG Pengqiang, et al. Numerical simulation study on support stability of deep roadways in Jinchuan No. 2 mining area [J]. Mining Technology, 2022, 22(1): 66-69.

[5] 马毓婷，陈俊智，任春芳，等.露天矿岩体力学参数对终了边坡稳定性影响敏感性数值模拟[J].有色金属(矿山部分)，2022，74(4)：95-101.

MA Yuting, CHEN Junzhi, REN Chunfang, et al. Numerical simulation on sensitivity of mechanical parameters of open-pit slope rock mass to final slope stability[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2022,74(4):95-101.

[6] 项荣华,王健,史作言,等.基于岩体分类方法的节理岩体力学参数取值及应用[J].科技通报,2022,38(9):1-7.
XIANG Ronghua, WANG Jian, SHI Zuoyan, et al. Mechanical parameters determination of jointed rock mass based on rock mass classification systems and its application [J]. Bulletin of Science and Technology,2022,38(9):1-7.

[7] 徐雷,杜时贵,朱益军.露天矿山岩体力学参数估算法的应用研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):925-934+954.
XU Lei, DU Shigui, ZHU Yijun. Application research of rock mass mechanics parameter estimation in open-pit mines [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2022,18(3):925-934+954.

[8] 李学锋,宋勇军,李和群,等.露天矿边坡岩体强度参数确定及稳定性分析[J].广西大学学报(自然科学版),2022,47(6):1682-1691.
LI Xuefeng, SONG Yongjun, LI Hequn, et al. Determination of rock strength parameters and stability analysis of slopes in open-pit mines [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2022,47(6):1682-1691.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for engineering rock mass classification: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press,2014.

[10] 杨泽良,吕庆,沈佳轶,等.考虑节理影响的岩体基本质量指标定量评价[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3219-3225.
YANG Zeliang, LYU Qing, SHEN Jiayi, et al. Quantitative evaluation of rock mass basic quality index considering influence of joint surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42 (Suppl. 1): 3219-3225.

[11] BARTON N R, GRIMSTAD E. Q-system: An illustrated guide following 40 years in tunnelling[EB/OL].[2024-02-09]. http://www.nickbarton.com/publications_all.asp.

[12] 张小辉,姜春雨,程小辉.基于Q系统的岩体质量快速评价优化创新方法及应用[J].有色金属(矿山部分),2022,74(4):102-109.
ZHANG Xiaohui, JIANG Chunyu, CHENG Xiaohui. Optimization and innovation method and application of quality based on Q system rapid evaluation of rock mass[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2022,74(4):102-109.

[13] BIENIAWSKI Z T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering [M]. New York: Wiley,1989.

[14] 胡胜,王贻明,王少勇,等.岩体质量分级RMR法的修正及应用[J].矿业研究与开发,2022,42(5):127-131.
HU Sheng, WANG Yiming, WANG Shaoyong, et al. Modification and application of RMR method in rock mass rating[J]. Mining Research and Development,2022,42(5):127-131.

[15] 熊有为,刘福春,张军,等.急倾斜极薄矿脉机械化留矿法平底结构出矿相似模拟试验[J].矿业研究与开发,2024,44(2):14-19.
XIONG Youwei, LIU Fuchun, ZHANG Jun, et al. Similar simulation experiment on flat-bottom structure ore removal by mechanized shrinkage mining method in steeply inclined extremely thin veins[J]. Mining Research and Development, 2024,44(2):14-19.

[16] 郑虹,冯夏庭,陈祖煜.岩石力学室内试验ISRM建议方法的标准化和数字化[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2456-2468.
ZHENG Hong, FENG Xiating, CHEN Zuyu. Standardization and digitization of the ISRM suggested methods of rock mechanics tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(12):2456-2468.

[17] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI—2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2019,11(3):445-463.

[18] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: A. A. Balkema,1995.

[19] 吴顺川,张敏,张诗淮,等.修正Hoek-Brown准则的等效Mohr-Coulomb强度参数确定方法研究[J].岩土力学,2019,40(11):4165-4177.
WU Shunchuan, ZHANG Min, ZHANG Shihuai, et al. Study on determination method of equivalent Mohr-Coulomb strength parameters of a modified Hoek-Brown failure criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (11): 4165-4177.

[20] HOEK E. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts,1990,27(3):227-229.