

潘家田铁矿岩体工程地质特征及 RMR 岩体质量评价

Engineering Geological Characteristics and RMR Rock Mass Quality Assessment of
Panjiatian Iron Mine

罗阳勇¹, 刘育明², 陈小伟², 王恒涛², 王宏勋²

(1. 四川安宁铁钛股份有限公司, 四川 攀枝花 617299; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:本文以潘家田铁矿区为研究对象,在工程地质特征调查的基础上,采用RMR法对岩体质量评价。首先基于现代三维激光测试技术对矿区岩体结构面进行调查,获取岩体结构面结构面产状、间距、持续性等特征;并进一步对施工的工程地质钻孔DH01和DH02进行岩石质量RQD值的统计工作,选取具有代表性的岩样进行单轴压缩试验等方式获取RMR法岩体质量评价系统中的各个参数。RMR岩体质量评价结果表明,潘家田铁矿下盘岩体质量为中等,工业矿体岩体质量为中等,低品位矿体岩体质量为中等,上盘岩体(东)岩体质量为好的,上盘岩体(西)岩体质量为中等。本次岩体质量评价为后续工程设计参数的选取具有一定的指导意义。

关键词:岩体质量评价; RMR评价系统

中图分类号: P584

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)05-0054-07

Abstract: The article takes the Panjiatian Iron Mine area as the research subject and conducts rock mass quality evaluation using the RMR method based on the investigation of engineering geological characteristics. First, modern three-dimensional laser scanning technology is used to investigate the structural planes of the rock mass in the mining area, obtaining characteristics such as the strike, spacing, and persistence of the rock mass structural planes. Furthermore, statistical work on the rock quality RQD values of the engineering geological boreholes DH01 and DH02 is carried out, and representative rock samples are selected for uniaxial compression tests to obtain various parameters for the RMR rock mass quality evaluation system. The RMR rock mass quality evaluation results indicate that the quality of the lower plate rock mass in Panjiatian Iron Mine is moderate; the quality of the industrial ore rock mass is moderate; the quality of the low-grade ore rock mass is moderate; the quality of the upper plate rock mass (east) is good; and the quality of the upper plate rock mass (west) is moderate. This rock mass quality evaluation has certain guiding significance for the selection of subsequent engineering design parameters.

Key words: rock mass quality evaluation; RMR evaluation system

1 前言

工程岩体质量可客观地反映岩体的工程地质特征和岩体的力学特性,为岩体稳定性分析、工程设计参数的选取及岩体的开发利用等提供可靠的依据^[1]。岩体质量评价方法是一个由定性向定量,由单因素向多因素方向发展的过程。单因素岩体质量评价方法有岩石质量指标RQD法^[2]、岩体块度指数RBI法^[3]、完整性系数K_v法等方法,多因素岩体质量评价方法有RMR法^[4]、Q系统法^[5-6]、Z分级体

系^[7]、GSI体系法^[8-9]、BQ体系等方法。单因素评价系统涉及的参数少,且大多数易于确定,因此其应用较为方便,但单因素分级主观性太强,而影响岩体质量的因素却是复杂多变的,其很难全面、准确的体现岩体的所有情况;多因素评价系统涉及参数多、参数获取较困难,但其更能客观的反应岩体的特征。

本次以潘家田铁矿区为研究对象,在岩体工程地质特征调查的基础上,采用多因素评价RMR系统对潘家田铁矿进行岩体质量评价。在野外踏勘的基础上,于露天边帮上选取具有代表性的工程地质

[作者简介] 罗阳勇(1975—),男,高级经济师,主要从事钒钛磁铁资源综合利用率提升工作。

[引用格式] 罗阳勇,刘育明,陈小伟,等.潘家田铁矿岩体工程地质特征及RMR岩体质量评价[J].中国矿山工程,2025,54(5):54-60+79.

剖面进行工程地质特征调查,得到不同工程地质分区结构面产状、间距、迹长及密度等特征数据;在此基础上,选取合适位置施工工程地质钻孔,进行工程地质编录,对岩石质量指标(RQD)进行统计,并选取有代表性的岩样进行物理力学测试,评价结果具有可靠性。本次针对潘家田铁矿岩体开展工程地质调查及岩体质量评价为后续工程设计参数的选取具有一定的指导意义。

2 研究区概况

潘家田矿区北起大平坦,南至雷打石,西起观音包,东至中梁山,南北长约 2.8 km,东西宽约 1.7 km,实测矿区面积为 4.6 km²。位于米易县中心西南方向,平距约 24 km。地理坐标:东经 101°59'00" ~ 102°00'00",北纬 26°42'00" ~ 26°43'30",行政区划属于攀枝花市米易县垭口镇回管村管辖。

矿区出露地层主要有太古界垭口群马脖子组(Arykm)的混合片麻岩、混合岩及混合岩化变粒岩、浅粒岩,元古界米易群潘家田组(Pt₁myp)、纸房沟组(Pt₁myz)和安宁村组(Pt₁mya)的片岩、变粒岩、大理岩、角闪岩等。第四系以残坡积松散堆积层为主。

潘家田矿区出露的主要断层有 F₁、F₅、F₆ 和 F₇ 等。北东向的 F₆ 等断层形成较早,南北向的 F₁、F₅、F₇ 较晚。矿区岩浆岩主要有含钒钛磁铁矿基性—超基性岩(辉长—辉石岩)、正长岩—辉石正长岩及各类基性、碱性岩脉。

潘家田矿床为岩浆晚期分异层状矿床。矿体走向近东西向,向南倾斜,倾角约 40°。矿区范围内矿体地表出露沿走向长约 700 m,南北宽 400 m,中部较膨大,向东逐渐趋于尖灭。低品位矿体(Fe₁矿体)赋存于辉长岩相带中,工业矿体(Fe₂号矿体)赋存于辉石岩相带中,两矿体在中部均被 F₁ 断层切断为东西两部分。

3 岩体工程地质特征

3.1 岩体结构面调查方法

岩体结构面信息直观、量化的描述一直是岩体力学和工程地质领域发展的一个重要方向,对岩体结构面特征的研究始于 20 世纪 70 年代。结构面信息的获取是研究岩体结构特征的基础,国内外学者通过多种有效的技术手段开展了岩体结构面调查,岩体结构面调查主要包括的内容有:结构面产状、结构面间距、结构面持续性、结构面粗糙度、结构面张开度与充填情况以及结构面渗水性。

随着工程地质技术和其他相关领域先进技术的发展,针对岩体结构面调查的方法也逐渐丰富。常用的方法大致可以分为以下两大类:

①传统岩体结构面调查方法^[10-12],包括测线法、统计窗法和钻孔岩芯测定法等;②基于现代测试技术的岩体结构面调查方法,包括摄影测量法、钻孔摄像法以及激光扫描法^[13]等。本次结构面调查主要基于在现场调研的情况下,采用三维激光扫描法进行工程地质调查。

3.2 岩体工程地质调查

本次采用 MAPTEK XR3 脉冲式扫描仪,其每秒可采集 20 万个点,厘米级的点间距,在细节方面呈现效果好。其扫描仪采用主动发射扫描光源(激光),通过接受自身发射的激光回波信号来获取目标物体的数据信息。

对潘家田铁矿露天坑进行岩体三维激光扫描,将现场扫描获取的原始点云数据通过处理软件 Maptrek I-Site Studio 7.0 进行坐标转换、数据拼接配准、踢出噪点、过滤杂点等操作,得到真实的三维露天采坑模型。

结合野外实际调查情况,将潘家田铁矿划分为 4 个主要的工程地质分区,具体如图 1 所示,在三维露天采坑模型的基础上,针对不同的工程地质分区分别提取结构面特征信息,具体结构面特征信息见表 1。

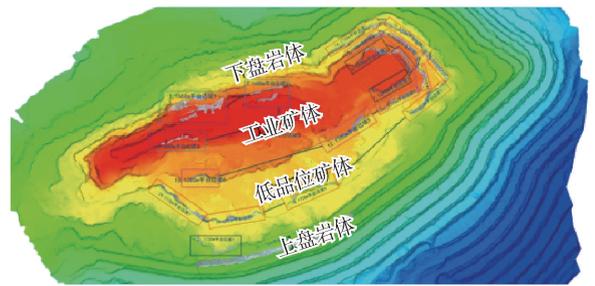


图 1 工程地质分区及扫描范围示意图

下盘岩体扫描长度为 730.9 m,扫描统计节理裂隙等结构面 403 条;工业矿体扫描长度为 189.4 m,扫描统计节理裂隙等结构面 330 条;低品位矿体扫描长度为 759.1 m,扫描统计节理裂隙等结构面 625 条;上盘岩体扫描长度为 614.5 m,扫描统计节理裂隙等结构面 488 条。将调查统计的节理裂隙导入到 Rockscience Dips 软件中,得到节理裂隙产状的 Schmidt 极点等密图与极点图、节理玫瑰花图,具体如图 2、图 3 所示。

表1 结构面特征信息统计表

工程地质分区	岩性	结构面信息	倾向/ (°)	倾角/ (°)	迹长/m	间距/m	条数/条	线密度/ 条·m ⁻¹	体密度/ 条·m ⁻³
下盘岩体	斜长角闪岩、 片岩、辉石岩、 变粒岩	第一组	205.06	39.46	6.57	0.84	126	1.19	4.17
		第二组	120.37	35.56	5.54	0.96	56	1.04	
		第三组	60.27	62.13	5.02	1.11	50	0.9	
		第四组	287.01	44.39	7.41	1.05	35	0.95	
		其他节理			7.67	10.6	136	0.09	
工业矿体	辉石岩	第一组	29.72	64.47	1.92	0.44	152	2.27	5.64
		第二组	112.69	28.2	3.54	1.06	33	0.94	
		第三组	99.67	64.37	4.88	2.38	16	0.42	
		第四组	194.76	51.04	1.32	0.66	60	1.52	
		其他节理			4.3	2.06	69	0.49	
低品位矿体	辉长岩	第一组	332.53	63.98	2.7	0.79	166	1.27	4.74
		第二组	28.71	64.93	2.23	0.94	96	1.06	
		第三组	79.26	69.91	3.83	1.87	62	0.53	
		第四组	98.32	26.62	3.48	1.13	92	0.88	
		第五组	190.46	53.06	3.34	1.49	38	0.67	
其他节理			4.73	2.99	171	0.33			
上盘岩体	正长岩、辉 长岩、变质 岩和辉绿岩	第一组	47.9	45.89	4.83	0.85	211	1.18	2.79
		第二组	309	46.91	3.43	1.4	100	0.71	
		其他节理			6.26	10.1	177	0.9	

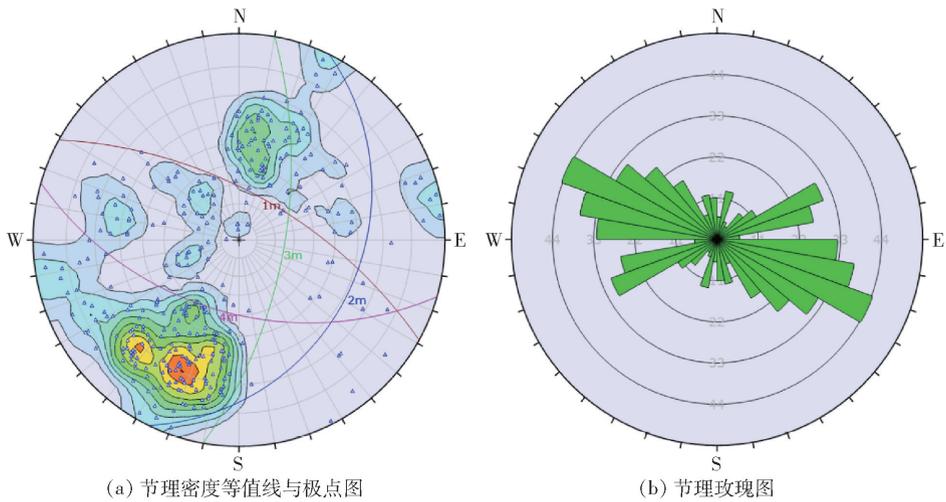


图2 工业矿体调查统计结构面产状投影图

将各工程地质分区的调查统计结构面数与体密度进行对比分析,具体如图4所示,可知工业矿体中体密度最高,为5.64条/m³;其次为低品位矿体,体密度为4.74条/m³;再次为下盘岩体,体密度为4.17条/m³;上盘岩体体密度最低为2.79条/m³。

4 岩体质量评价 RMR 系统

CSIR法(RMR-Rock Mass Rating)是众多岩体

工程质量分类方法中的一种,也是进行岩体质量评价和确定岩体变形参数的重要方法,于1973年由南非著名的岩石力学专家 Bieniawski 提出。RMR 值与完整岩石强度、岩芯质量指标(RQD)、节理间距、节理条件和地下水条件有关。其中,完整岩石强度由点荷载试验和抗压强度试验获得;岩芯质量指标 RQD 通常通过钻探资料获得;节理间距、节理条件和地下水条件通过现场工程地质测绘资料获得。由

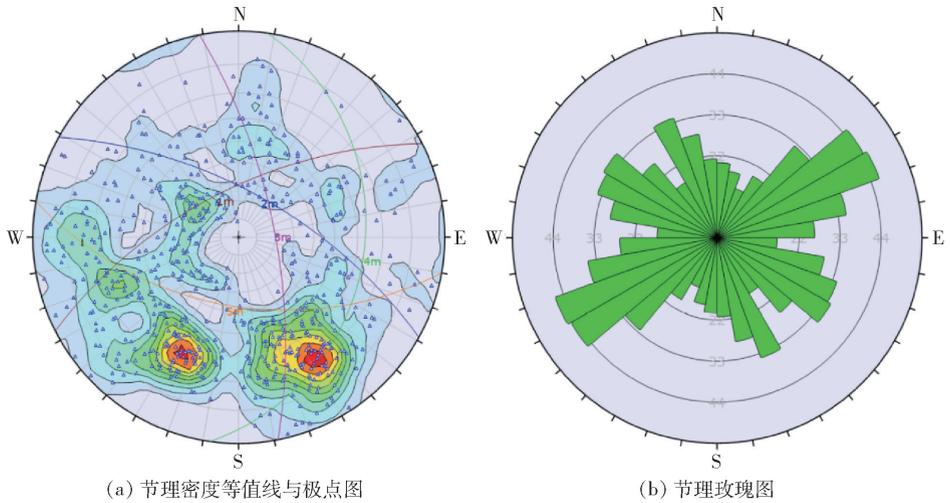


图3 低品位矿岩体调查统计结构面产状投影图

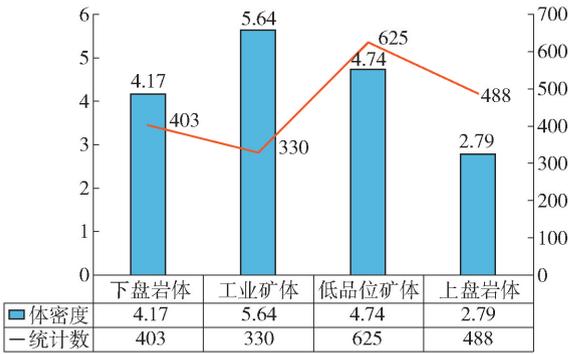


图4 潘家田铁矿岩体结构面体密度统计图

于该方法综合考虑了岩石强度、节理间距及特征、岩芯质量(RQD)、地下水条件等诸多地质因素的影响,是一种发展较快、应用较广、且比较完善的工程岩体分类方法。自1973提出以来,该方法经过了许多实例验证和修改,并于1989年提出了修正的RMR分类方法,得到了国际岩石力学学会(ISRM)的推荐,具体参数及岩体分级见表2和表3。

RMR分类系统的最大优点是在采矿工程分类易于应用,有助于采矿工程师、地质学家和岩土工程师进行交流。但在应用过程中,当RMR > 25时可

表2 节理岩体的岩石力学分类表(Bieniawski 1989)

序号		数值范围						
1	完整岩石材料强度	点荷载强度/MPa	>10	4~10	2~4	1~2	对于低值范围宜用单轴抗压强度	
		单轴抗压强度/MPa	>250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5
	指标	15	12	7	4	2	1	0
2	岩芯质量	RQD/%	90~100	75~90	50~75	25~50	<25	
		指标	20	15	10	8	3	
3	节理间距	/m	>2	0.6~2	0.2~0.6	0.06~0.2	<0.06	
		指标	20	15	10	8	5	
4	节理状态	表面很粗糙,不连续,无间隙、节理岩壁坚硬	表面微粗糙,间隙<1mm,节理岩壁坚硬	表面微粗糙,间隙<1mm,节理岩壁软弱	镜面或泥质夹层<5mm厚,节理张开度1~5mm连续展布	软泥质夹层,厚度>5mm,或节理张开度>5mm,连续展布		
		指标	30	25	20	10	0	
5	地下水	每10m隧道涌水量(L/min)	无	<10	10~25	25~125	>125	
		节理水压力与最大主应力之比	0	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	>0.5	
		一般条件	完全干燥	较干燥	潮湿(孔隙水)	中等压力水	地下水问题严重	
		指标	15	10	7	4	0	

表 3 SIR 法岩体分级表

指标	100 ~ 81	80 ~ 61	60 ~ 41	40 ~ 21	< 20
分级	I	II	III	IV	V
描述	很好岩石	好岩石	中等岩石	差岩石	很差岩石

靠性较高,但对较低的 RMR 值可靠性较差,当 RMR < 18 时则不再适用。

5 RMR 系统各参数获取及岩体质量评价

5.1 矿岩强度

潘家田铁矿区内出露的岩性主要为辉长岩、

辉绿岩、辉石岩等,根据其岩性特征及赋矿特征等地质条件,进一步分成 7 组进行单轴压缩试验,共测试分析岩样 25 件。样品加工精度符合规范要去,试样的高度和直径比均为 2:1,平行度控制在 0.02 mm 以内。

试验采用 WEP-600 微机控制屏显万能试验机,试验机采用先进的全数字测控技术,可以实时记录轴向力、轴应力、轴应变、径应变、轴变形、径变形、位移值,并同步绘制轴应力-轴应变、轴应力-径应变曲线等,测试结果见表 4。

表 4 岩石单轴抗压强度试验结果统计

实验编组	岩性	试验编号	直径/mm	高度/mm	破坏荷载/ kN	单轴抗压 强度/MPa	平均值/ MPa	标准差
HC-1	中粗粒辉长岩	1-1	49.78	100.2	143.61	73.79	156.37	27.13
		1-2	49.95	100.04	286.94	146.43		
		1-3	49.78	99.97	364.09	187.07		
		1-11	49.68	98.12	262.89	135.62		
HC-2	细粒辉长岩	2-1	49.75	100.12	232.9	119.81	111.28	18.43
		2-2	49.71	100.39	240.46	123.9		
		2-3	49.68	99.92	174.71	90.13		
HL-3	辉绿岩	3-1	50.15	100.02	117.96	59.72	106.66	13.17
		3-2	50.2	100.15	240.91	121.72		
		3-3	50.1	100	199.11	101		
		3-11	49.77	100.06	189.24	97.27		
DK-4	低品位矿体	4-1	49.5	99.82	216.33	112.41	98.45	19
		4-2	49.54	100.15	148.07	76.82		
		4-3	49.54	100.11	117.23	60.82		
		4-11	49.72	99.85	206.06	106.13		
GK-5	工业矿体	5-1	49.84	100.24	56.85	29.14	53.48	5.52
		5-2	49.83	99.95	109.93	56.37		
		5-3	49.55	100.08	90.84	47.11		
		5-11	49.87	98.28	111.24	56.95		
HF-6	辉绿玢岩	6-1	50.09	100.17	179.84	91.26	83.43	10.01
		6-2	49.91	100.03	141.18	72.16		
		6-3	49.9	100.09	169.9	86.88		
HS-7	辉石岩	7-1	49.94	99.97	189.98	96.99	114.63	25.03
		7-2	50.03	99.83	203.71	103.62		
		7-3	49.99	99.89	281.22	143.28		

5.2 岩石质量 RQD

对本次施工的工程地质钻孔 DH01 和 DH02 进

行岩石质量 RQD 值的统计工作,其统计信息表见表 5、表 6。

表5 DH01 钻孔岩心 RQD 统计信息表

序号	地层岩性	分层厚度/m	大于 10 cm 岩心长度/m	RQD/%
1	中风化中粗粒辉长岩	37.55	21.04	56.03
2	微风化中粗粒辉长岩	140.20	110.80	79.03
3	微风化辉绿岩	4.80	2.98	62.08
4	变粒岩	63.80	49.88	78.18
5	细粒辉长岩	90.10	70.47	78.21
6	正长岩脉	8.60	2.96	34.42
7	铁矿石(Fe_1)	86.73	72.13	83.17
8	铁矿石(Fe_2)	21.90	6.39	29.18
9	辉石岩	57.00	26.84	47.09

从表5中可知,上部细粒辉长岩、变粒岩及 Fe_1 铁矿石的RQD值较高,为78.18%~83.17%,其中统计的 Fe_1 铁矿石的RQD最高,达到83.17%;下部辉石岩、正长岩脉及 Fe_2 铁矿石的RQD值较低,为29.18%~47.09%,其中统计的 Fe_2 铁矿石的RQD最低,达到29.18%。

表6 DH02 钻孔岩心 RQD 统计信息表

序号	地层岩性	分层厚度	大于 10 cm 岩心长度/m	RQD/%
1	中风化角闪正长岩	61.60	34.03	55.24
2	中风化中粗粒辉长岩	15.50	4.50	29.03
3	微风化中粗粒辉长岩	65.00	41.50	63.85
4	细粒辉长岩	253.73	175.40	69.13
5	正长岩脉	9.20	4.64	50.43
6	铁矿石(Fe_2)	65.30	28.39	43.48
7	辉石岩	22.10	6.39	28.91

从表6中可知,上部中风化角闪正长岩、细粒辉长岩的RQD值较高,在55.24%~69.13%之间;下部辉石岩及 Fe_2 铁矿石的RQD值较低,为28.91%~43.48%。其中中风化中粗粒辉长岩的RQD值较低,为29.03%;DH02钻孔中见2段正长岩脉,其RQD均值为50.43%。

5.3 节理间距

本次对施工的DH01和DH02孔进行结构面统计工作,共统计结构面3736条,具体各岩性统计数据见表7、表8。

表7 DH01 钻孔结构面线距信息统计表

序号	地层岩性	统计样本数/条	最小值/m	最大值/m	均值/m	方差
1	中风化中粗粒辉长岩	130	0.02	2.65	0.32	0.36
2	微风化中粗粒辉长岩	412	0.00	2.20	0.32	0.30
3	微风化辉绿岩	21	0.05	1.40	0.20	0.34
4	变粒岩	217	0.05	2.45	0.28	0.36
5	细粒辉长岩	203	0.02	3.60	0.36	0.42
6	正长岩脉	37	0.05	1.35	0.27	0.29
7	铁矿石(Fe_1)	157	0.02	2.60	0.49	0.45
8	铁矿石(Fe_2)	21	0.02	0.50	0.17	0.14
9	辉石岩	327	0.02	3.45	0.21	0.30

表8 DH02 钻孔结构面线距信息统计表

序号	地层岩性	统计样本数/条	最小值/m	最大值/m	均值/m	方差
1	中风化角闪正长岩	388	0.03	1.15	0.15	0.15
2	中风化中粗粒辉长岩	179	0.05	0.40	0.07	0.05
3	微风化辉长岩	399	0.02	1.50	0.14	0.25
4	细粒辉长岩	858	0.01	2.10	0.35	0.38
5	正长岩脉	59	0.05	1.00	0.13	0.15
6	铁矿石(Fe_2)	346	0.02	1.90	0.22	0.31
7	辉石岩	111	0.05	2.20	0.19	0.32

通过表7和表8,可知DH01孔所统计的结构面线距都大于DH02孔所统计的数值。其中DH01

孔铁矿石(Fe_1)中结构面间距最大,为0.49m;铁矿石(Fe_2)中结构面间距最小,为0.17m;辉长岩

中结构面间距为 0.36 m;辉石岩中结构面间距为 0.21 m。

DH02 孔中铁矿石 (Fe_2) 中结构面间距为 0.22 m;辉长岩中结构面间距为 0.35 m;辉石岩中结构面间距为 0.19 m。

5.4 节理状态及地下水情况

结构面粗糙度可分为三大类,即台阶型、波浪型和平面型,每个大类又可分为三个亚类,即粗糙的、平坦的和光滑的。通过现场调查发现,潘家田铁矿结构面多以粗糙型为主,且结构面内无夹层,间隙 < 1 mm。

潘家田铁矿地下水主要以孔隙水为主,其裂隙多呈闭合或微张开状态。断裂破碎带、裂隙密集带、接触破碎带含弱的裂隙水。

5.5 岩体质量评价

鉴于露天边帮现场工程地质调查、钻孔岩心编录及结构面调查统计分析情况,可知,潘家田铁矿岩体质量受矿区内出露构造影响较大,如 F6 断层附近施工的 DH02 钻孔,其岩石质量明显低于 DH01 钻孔,DH01 钻孔中所统计的上盘辉长岩的 RQD 值为 78.12%,其在 DH02 钻孔中所统计的 RQD 值为 69.13%。因此,将上盘岩体进一步细分,分成东西两部分分别进行岩石质量评价。

根据矿岩岩石力学性质试验成果、钻孔岩芯 RQD 值以及本次现场调查的节理裂隙等结构面发育情况,通过 RMR 评价方法中各项指标评分来求得潘家田铁矿不同工程地质分区的 RMR 值。不同工程地质岩体的 RMR 值结果与分类见表 9。

表 9 RMR 分类法岩体参数及质量分级表

参数	取值	下盘岩体	工业矿体	低品位矿体	上盘岩体(东)	上盘岩体(西)
1	矿岩强度	8	5	6	8	8
2	岩心质量 RQD	6	6	13	13	9
3	节理间距	8	8	10	10	9
4	节理状态	20	20	20	20	20
5	地下水	7	7	10	10	10
	RMR 值	49	48	59	61	56
	分级	III	III	III	II	III
	质量描述	中等	中等	中等	好	中等

从上表 RMR 分类及评价中可知:下盘岩体 RMR 分类法评价值为 51,岩体质量为中等;工业矿体 RMR 分类法评价值为 48,岩体质量为中等;低品位矿体 RMR 分类法评价值为 59,岩体质量为中等;上盘岩体(东) RMR 分类法评价值为 61,岩体质量为好的;上盘岩体(西) RMR 分类法评价值为 55,岩体质量为中等。

6 结论

本文针对潘家田铁矿采用三维激光扫描法对工程地质特征进行调查,并进行岩体质量评价。评价过程中采用现场调查、三维激光扫描、岩心编录及室内单轴压缩试验等多种方法手段相结合的方式获取了 RMR 评价系统中的各个参数,进而对岩体质量进行评价。本次岩体质量评价可为后续采矿方法选择及工程设计参数选取具有一定的指导意义。

(1)下盘岩体内共发育 4 组优势结构面,优势

结构面的产状为: $205.6^\circ \angle 39.46^\circ$ 、 $120.37^\circ \angle 35.56^\circ$ 、 $60.27^\circ \angle 62.13^\circ$ 、 $287.01^\circ \angle 44.39^\circ$,结构面体密度为 4.17 条/ m^3 。工业矿体内共发育 4 组优势结构面,优势结构面的产状为: $29.72^\circ \angle 64.47^\circ$ 、 $112.69^\circ \angle 28.20^\circ$ 、 $99.67^\circ \angle 64.37^\circ$ 、 $194.76^\circ \angle 51.04^\circ$,结构面体密度为 5.64 条/ m^3 。低品位矿体内共发育 5 组优势结构面,优势结构面的产状为: $332.53^\circ \angle 63.98^\circ$ 、 $28.71^\circ \angle 64.93^\circ$ 、 $79.26^\circ \angle 69.91^\circ$ 、 $98.32^\circ \angle 26.62^\circ$ 、 $190.46^\circ \angle 53.06^\circ$,结构面体密度为 4.74 条/ m^3 。下盘岩体内共发育 2 组优势结构面,优势结构面的产状为: $47.90^\circ \angle 45.89^\circ$ 、 $309.00^\circ \angle 46.91^\circ$,结构面体密度为 2.79 条/ m^3 。

(2)RMR 岩体质量评价结果表明,潘家田铁矿下盘岩体质量为中等,工业矿体岩体质量为中等,低品位矿体岩体质量为中等,上盘岩体(东)岩体质量为好的,上盘岩体(西)岩体质量为中等。

(下转第 79 页)