

弓长岭井下矿岩物理力学参数试验研究

Experimental study on physical-mechanical parameters of the ore in
Gongchangling underground mine

田迎春¹, 陈小伟², 马东¹, 谢盛青², 胡世超¹, 李宗武¹, 范文录²

(1. 鞍钢集团矿业弓长岭有限公司, 辽宁 辽阳 111007; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:为了充分回收弓长岭井下矿富矿资源,提高矿山生产经济效益,需要对现有采矿方法进行更新优化,矿岩物理力学特性研究是矿山设计过程中采场结构参数确定及采场稳定性分析的前期重要工作。基于矿山前期勘查成果和生产实践揭露的岩性,在弓长岭井下矿现场采取了8种不同岩性的矿岩试样并开展了室内岩石物理力学特性参数测试试验,获得了大量的岩石物理力学性质参数,将为矿山后期采矿工程设计研究提供基础数据支撑。

关键词:岩石力学试验; 劈裂抗拉; 三轴压缩; 变形破坏

中图分类号: P859 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0050-04

Abstract: In order to fully recover rich resources of Gongchangling underground mine and improve its economic benefits of production, it is necessary to update and optimize the existing mining methods. The study of physical-mechanical properties of ore is an important preliminary work in determining stope structural parameters and analyzing stope stability in the process of mine design. Based on earlier exploration results of the mine and lithology revealed in production practice, laboratory test on rock physical-mechanical property parameters were conducted on ore samples of 8 different lithology types from Gongchangling underground mine and plenty of parameters on rock physical-mechanical property have been obtained, which will provide basic data for later mining engineering design study.

Key words: rock mechanics experiment; splitting tensile; triaxial compression; deformation failure

1 前言

弓长岭井下矿是一个拥有数十年生产历史的矿山,矿床赋存于太古界鞍山群茨沟组变质岩系中,为鞍山式沉积变质铁矿后期经热液交代富集的磁铁矿床。矿区出露地层主要为太古界鞍山群茨沟组变质岩系,少部分为奥陶系薄层灰岩、页岩及白云质灰岩,以及第四系冲、坡积层。矿体形态呈层状和似层状,总体走向 $120^{\circ} \sim 160^{\circ}$,倾向NE,倾角 $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。长期以来,采矿方法以无底柱分段崩落法为主,浅孔留矿法为辅,根据目前矿业生产形势需要,拟改为充填法采矿。通过现场取样和物理力学性质的测定试验,获得不同岩性岩组的物理力学参数,为后续充填法采矿设计和研究提供基础数据。

国内外学者在不同性质岩石的力学性质试验研究方面,取得了大量成果。刘云鹏^[1]等针对板裂原岩本身确有的各向异性特征,试验研究了加载应力

与板裂方向的关系与岩石破坏特征;韩忠英^[2]等对缺陷储层进行水力压裂,在较高的均匀压应力状态下,缺陷储层中新裂缝的产生方位可能与预置裂缝无关;张宇^[3]等对煤矿采区内砂岩的变形破坏性质进行了试验研究,并分析了岩爆倾向性;陈子全^[4]等揭示了水-力耦合作用下岩石的破坏机制和脆性破坏增强特征;张勇^[5]等研究认为蚀变、碎裂程度越大的岩石对温度周期循环作用越敏。综上认为,室内岩石力学试验是获得岩体在三向荷载状态下变形破坏特征的有效途径,岩石破坏过程的研究对采矿方案设计具有重要的意义。

岩样取自弓长岭井下铁矿,对磁铁富矿、贫赤铁矿、2层铁矿、4层铁矿、斜长片岩、底部片岩、绿泥片岩、角闪岩等矿岩进行了常规三轴压缩试验,分别研究了在三向应力状态下的力学特性,并进行了对比分析,为矿山的工程设计研究提供基础数据。

2 试验简介

2.1 主要试验设备

岩石物理力学参数测试试验在辽宁科技大学岩石力学试验室开展,主要设备为SAM-2000型微机

[作者简介] 田迎春(1973-),男,高级工程师,从事矿山开采工程技术与管理工作。

[引用格式] 田迎春,陈小伟,马东,等.弓长岭井下矿岩物理力学参数试验研究[J].中国矿山工程,2021,50(6):50-53.

控制岩石三轴试验机,具体如图1所示。设备主体采用整体式框架结构,框架刚度优于 1.0×10^{10} N/m,具有刚度大、响应频率快的特点,能够满足岩石三轴试验要求。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,可为此次岩样力学特征的研究提供了可靠的试验数据。



图1 SAM-2000型微机控制岩石三轴试验机

2.2 现场取样

根据弓长岭铁矿前期勘查成果、生产实践和项目研究需要,在矿山现场采取了8种矿岩试样(富磁铁矿、贫赤铁矿、2层铁矿、4层铁矿、斜长片岩、底部片岩、绿泥片岩和角闪岩),试验所需试样加工尺寸及精度符合《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)相关要求。



图2 -160 m 西区 6419 矿块 4 层铁矿取样点



图3 -244 m 东区 0 穿 05 采场绿泥片岩取样点

2.3 试验方案

试验项目包括岩石密度、单轴抗压强度、劈裂抗拉强度、三轴压缩强度(内聚力 C 和内摩擦角 ϕ)、

弹性模量和泊松比。

三轴试验中首先采用先位移控制、应力监控的方式加载到 3 MPa 的预加荷载下,待预加荷载稳定后以 0.5 MPa 的速率加载围压至预加值,而后切换为岩石 1 控制、岩石 1 监控的方式进行加载直至试件破坏,加载速率为 0.01 mm/min。

3 试验结果分析

3.1 岩石密度

岩石密度取决于组成岩石的矿物成分、孔隙发育程度及其含水量。岩石容重的大小,在一定程度上反映出岩石力学性质的优劣。一般地,岩石密度愈大,其力学性质愈好,反之则愈差。

岩石密度参数测定采用量积法,即分别测量的质量和体积(包括岩石内孔隙体积),计算式为

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1)$$

式中: γ ——岩石密度, g/cm^3 ;

W ——被测岩样的质量, g ;

V ——被测岩样的体积, cm^3 。

饱和密度试验结果见表1。

表1 饱和密度试验结果统计表

序号	岩样名称	平均值/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	标准差/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	最小值/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	最大值/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1	富磁铁矿	4.707	0.186	4.409	5.066
2	贫赤铁矿	3.428	0.128	3.099	3.537
3	2层铁矿	3.443	0.180	3.100	3.704
4	4层铁矿	3.486	0.124	3.204	3.680
5	斜长片岩	3.005	0.041	2.953	3.103
6	底部片岩	3.015	0.023	2.969	3.048
7	绿泥片岩	3.081	0.131	2.801	3.253
8	角闪岩	3.013	0.084	2.895	3.205

3.2 岩石抗拉强度

岩石的抗拉强度是指岩石试件在受到轴向拉应力后其试件发生破坏时的单位面积所能承受的拉力。测定岩石抗拉强度的常见方法主要是劈裂法。劈裂法也称作径向压裂法,由南美巴西人杭德罗斯(Hondros)提出,故又称为巴西劈裂法。

根据布辛奈斯克(Boursinesq)半无限体上作用集中力的解析解,求得试件破坏时作用在试件中心的最大拉应力(抗拉强度)为

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (2)$$

式中: σ_t ——抗拉强度;

P ——试件破坏时的极限压力;

D ——试件直径;

t ——试件厚度。

劈裂抗拉强度试验结果见表2。

表2 劈裂抗拉强度试验结果统计表

序号	岩样名称	平均值/ MPa	标准差/ MPa	最小值/ MPa	最大值/ MPa
1	富磁铁矿	10.79	2.916	5.89	14.25
2	贫赤铁矿	11.83	2.352	9.61	15.86
3	2层铁矿	13.13	2.846	8.97	16.80
4	4层铁矿	13.68	5.331	5.03	23.24
5	斜长片岩	9.94	2.898	6.32	13.31
6	底部片岩	6.80	2.326	3.19	10.76
7	绿泥片岩	3.28	1.195	1.64	4.91
8	角闪岩	7.99	2.347	5.61	12.22

3.3 岩石单轴抗压强度

岩石的单轴抗压强度是指岩石试件在无侧限条件下,受轴向力作用破坏时单位面积上所承受的荷载。即

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

式中: σ_c ——单轴抗压强度;

P ——无侧限条件下轴向破坏荷载;

A ——试件横截面积。

单轴抗压强度试验见表3。

表3 单轴抗压强度试验结果统计表

序号	岩样名称	平均值/ MPa	标准差/ MPa	最小值/ MPa	最大值/ MPa
1	富磁铁矿	78.14	10.073	67.92	88.06
2	贫赤铁矿	85.22	24.301	59.02	107.02
3	2层铁矿	80.85	33.939	51.94	128.68
4	4层铁矿	93.94	35.387	54.97	138.40
5	斜长片岩	33.98	2.556	31.39	36.50
6	底部片岩	38.70	9.924	23.37	49.54
7	绿泥片岩	52.12	5.839	47.06	58.51
8	角闪岩	70.40	3.416	66.68	73.39

3.4 岩石单轴压缩特性参数

应用引伸计连续自动测定岩样的纵向应变和横向应变,由试验机软件计算得到弹性模量 E_{50} 与泊松比 μ_{50} 。

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{y50}} \quad \mu = \frac{\varepsilon_{x50}}{\varepsilon_{y50}} \quad (4)$$

式中: E_{50} ——弹性模量;

μ ——泊松比;

σ_{50} ——相当于单轴抗压强度50%的应力值;

ε_{y50} 、 ε_{x50} ——应力为 σ_{50} 的轴向应变值和横向应变值。

弹性模量试验结果、泊松比试验结果分别见表4、表5。

表4 弹性模量试验结果统计表

序号	岩样名称	平均值/ GPa	标准差/ GPa	最小值/ GPa	最大值/ GPa
1	富磁铁矿	23.47	5.720	19.58	30.04
2	贫赤铁矿	26.65	4.237	23.56	31.48
3	2层铁矿	21.73	6.461	16.10	30.96
4	4层铁矿	22.41	8.107	12.84	33.54
5	斜长片岩	17.90	2.636	15.09	20.32
6	底部片岩	15.43	6.780	9.16	24.46
7	绿泥片岩	14.26	1.990	12.89	16.54
8	角闪岩	15.24	1.010	14.23	16.25

表5 泊松比试验结果统计表

序号	岩样名称	平均值	标准差	最小值	最大值
1	富磁铁矿	0.13	0.047	0.09	0.18
2	贫赤铁矿	0.28	0.125	0.15	0.40
3	2层铁矿	0.33	0.103	0.18	0.40
4	4层铁矿	0.12	0.026	0.08	0.14
5	斜长片岩	0.16	0.066	0.10	0.23
6	底部片岩	0.17	0.119	0.08	0.38
7	绿泥片岩	0.23	0.026	0.21	0.26
8	角闪岩	0.23	0.055	0.18	0.29

3.5 岩石三轴压缩特性参数

岩石的三轴压缩强度是指岩石在围压 σ_3 条件下(主要指压应力)所能抵抗的最大压应力 σ_1 。

以不同的 σ_3 值进行多块岩样的三轴压缩试验,即可得到多个相应的 (σ_1, σ_3) 数据点值,这样即可在 $\sigma_1 - \sigma_3$ 坐标系上作出它们的关系曲线,岩石的抗剪断强度关系曲线是一条弧形曲线,一般简化为直线形式,即斜直线型摩尔—库仑强度准则。

$$\sigma_1 = \frac{2Cc \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (5)$$

式中: ϕ ——岩石内摩擦角;

C ——岩石内聚力。

一般情况下,岩石三轴压缩强度的离散性较大,在应用原始散点进行初步回归计算后,应进行回归诊断。通过计算标准化残差、学生化残差、杠杆值、cook距离、Covratio统计量、Dffits统计量等手段,查找异常点(离群点)和强影响点,取舍后重新回归,建立改进后的模型;通过残差分析,用来验证模型的

基本假定,包括模型线性诊断、误差正态性诊断、误差方差齐性诊断和误差独立性诊断。

摩尔-库仑强度参数见表6。

表6 摩尔-库仑强度参数结果表

序号	岩样名称	应力 σ_3 范围/ MPa	内聚力 C / MPa	内摩擦角 $\phi/(\circ)$
1	富磁铁矿	5.0 ~ 17.5	15.71	42.91
2	贫赤铁矿	5.0 ~ 15.0	13.90	48.88
3	2层铁矿	5.0 ~ 17.5	25.05	43.25
4	4层铁矿	5.0 ~ 15.0	10.59	58.24
5	斜长片岩	5.0 ~ 17.5	3.93	34.24
6	底部片岩	5.0 ~ 17.5	5.64	43.48
7	绿泥片岩	5.0 ~ 17.5	8.28	41.96
8	角闪岩	5.0 ~ 15.0	2.77	43.955

4 结论

通过开展上述试验研究,可以得出以下结论:

(1)通过室内岩石力学试验获取了弓长岭井下矿8种矿岩的岩石物理力学性质基本参数,为矿山

工程设计研究提供基础数据。

(2)弓长岭井下矿铁矿石品位对其强度有一定影响,富磁铁矿强度相比其他品位矿石更低。

(3)岩石强度均表现出围压效应,即岩石强度随围压的增大而增加,受岩石性质差异影响幅度不同。

[参考文献]

- [1] 刘云鹏,邓辉,黄润秋,等. 板裂结构岩石力学试验及破裂断口细观形貌特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 3859-3861.
- [2] 韩忠英,薛世峰,朱秀星. 缺陷储层重复压裂实验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 567-570.
- [3] 张宇,应治中,杜强,等. 煤矿典型砂岩的单轴压缩试验研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(9): 104-106.
- [4] 陈子全,李天斌,陈国庆,等. 水力耦合作用下的砂岩声发射特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2815-2822.
- [5] 张勇. 温度循环作用后蚀变岩力学参数劣化规律的探究[J]. 工程地质学报, 2017, 5(2): 410-415.
- (上接第49页)
- [6] Hidekazu Tanaka, Atsushi Fujii, Satoshi Fujimoto, et al. Microwave-Assisted Two-Step Process for the Synthesis of a Single-Phase Na-A Zeolite from Coal Fly Ash [J]. Advanced Powder Technology, 2008, 19(1).
- [7] Natt Makul, Phadungsak Rattanadecho, Dinesh K. Agrawal. Microwave curing at an operating frequency of 2.45GHz of Portland cement paste at early-stage using a multi-mode cavity: Experimental and numerical analysis on heat transfer characteristics [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010.
- [8] Prinya Chindapasirt, Ubolluk Rattanasak, Sompop Taebuanhuad. Role of microwave radiation in curing the fly ash geopolymer [J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24(3).
- [9] Natt Makul, Phadungsak Rattanadecho, Amphol Pichaicherd. Accelerated microwave curing of concrete: A design and performance-related experiments [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 83.
- [10] Ahmed Graytee, Jay G. Sanjayan, Ali Nazari. Development of a high strength fly ash-based geopolymer in short time by using microwave curing [J]. Ceramics International, 2018, 44(7).
- [11] Jeevaka Somaratna, Deepak Ravikumar, Narayanan Neithalath. Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(12).
- [12] 杨磊,王静波,邱景平,等. 基于正交试验的全尾砂胶结充填材料配比优化 [J]. 矿产保护与利用, 2017(3): 21-25.
- [13] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究 [J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.