

# 基于水压致裂法地应力测量及其在岩爆分析中的应用

In-Situ Stress Measurement and Its Application to Rock Burst Analysis in Panjiatian Iron Mine

汪浩浩<sup>1,2</sup>, 罗阳勇<sup>3</sup>, 王宏勋<sup>1,2</sup>, 陈小伟<sup>1,2</sup>, 孙尧<sup>4</sup>, 王恒涛<sup>1,2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038; 3. 四川安宁铁钛股份有限公司, 四川 攀枝花 617299; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**潘家田铁矿将由露天转入地下开采,为更好的进行井巷工程开采设计,解决深部矿体开采时可能存在的岩爆风险,采用水压致裂法进行原岩应力测试,并结合岩石力学参数运用能量积聚模拟进行岩爆倾向性预测。在DH02孔和混合井勘探孔进行地应力测量,进行了19段的测试,2次印模试验。实测表明:矿区的原地应力以水平应力为主,DH02孔的最大水平主应力值为7.52~17.86 MPa;混合井勘探孔最大水平主应力值为7.08~15.8 MPa;最大水平主应力方向为近NW向。结果表明:矿区深部为无岩爆,适宜地下巷道施工。地应力测量可为潘家田铁矿深部巷道布置和巷道支护设计提供科学依据。

**关键词:**地应力;水压致裂地应力测量;岩爆

**中图分类号:** TD163 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0023-06

**Abstract:**The Panjiatian Iron Mine is transitioning from open-pit to underground mining. To better design the shaft and tunnel engineering and address the potential rock-burst risks associated with deep ore body extraction, hydrostatic fracturing is used for in-situ stress testing, and energy accumulation simulation combined with rock mechanics parameters is employed for rock-burst prediction. The test principles methods of hydro-fracturing in-situ stress measurement are briefly described. The results show that the horizontal stress is predominant, the maximum principal stress of DH02 is between 7.52 MPa and 17.86 MPa; and Multiplex drill hole is between 7.08 MPa and 15.8 MPa; the direction of the maximum principal stress is NW. Analyse probable rock burst of the ore-body according to the measured monitoring results and rock mechanical parameters, the results show that there is approximately no rock burst in the ore-body, and suitable for tunnel. In-situ stress measurement provides scientific basis for the tunnel layout and roadway support design in Panjiatian Iron Mine.

**Key words:** in-situ stress; hydro-fracturing in-situ stress measurement; rock burst

## 1 前言

地应力是指地层中未受到人为扰动的天然应力,其主要由构造应力、上覆岩层的重力等因素形成,是引起地下工程破坏和的变形根本作用力<sup>[1-3]</sup>。随着矿井开采深度的增加,地应力对巷道稳定性的影响越来越明显,高应力区容易引起岩爆、冲击地压、变形和位移等工程地质问题。因此,准确掌握矿区的地应力特征,对于地下采矿工程的设计、施工及安全生产有着重要的指导意义。

目前主流的地应力测量方法包括水压致裂法<sup>[4-5]</sup>、套芯应力解除法<sup>[6-8]</sup>、岩芯滞弹性恢复法(ASR)<sup>[9]</sup>等。其中水压致裂原位地应力测量是20世纪70年代发展起来的能够测量地壳深部二维应力可靠而有效的方法。该方法无需知道岩石的力学参数就可直接获得地层中现今地应力的多种参量,并具有操作简便、可在任意深度进行连续或重复测试、测量速度快、测值稳定可靠等特点,因此近年来发展很快,并取得了大量的成果。

四川安宁铁钛股份有限公司潘家田铁矿始建于1994年,采用分期建设的方式进行开采,目前露天开采至1690 m水平,生产能力为600万t/a,预计2029年露天闭坑,转入地下开采。近年来四川安宁铁钛股份有限公司持续投资开展对潘家田铁矿的技改扩能项目,为合理的开展井巷工程设计、岩石力学

[作者简介] 汪浩浩(1986—),男,湖北天门人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山采矿设计与技术研究。

[引用格式] 汪浩浩,罗阳勇,王宏勋,等.基于水压致裂法地应力测量及其在岩爆分析中的应用[J].中国矿山工程,2025,54(4):

研究、地压控制等,有必要对工程区域进行原位地应力测量,以掌握原岩应力场的基本特征,并对深部岩体岩爆倾向性进行预测,以便更好的指导矿山开采设计。

## 2 区域地质构造概况

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 km<sup>2</sup>。位于米易县中心 209°方向,平距约 24 km 的潘家田、雷打石一带。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箐村管辖。

潘家田含矿岩体为红格钒钛磁铁矿基性—超基性岩体的一部分,属红格岩体最北转折端部位。红格岩体在大地构造位置上属康滇地轴中段的中轴偏东部位。板块理论中的“攀西古裂谷带”,攀西古裂谷孕育于加里东期,发生于华力西期,发展于印支期—燕山期,消亡于燕山期。区内各时代地层都有发育并出露,地层、构造、岩浆组合类型多样,具备满足不同类型铁矿生成的区域地质条件。

潘家田矿区在大地构造位置上属康滇地轴中段的中轴偏东部位的攀西裂谷带中,区域上地质构造极其复杂,新构造运动强烈,主要形成一系列以北西—北西西向、南北向为主的断裂,断裂的活化、强烈的差异升降,一方面形成了独特的山谷地貌,另一方面控制了第四纪断陷盆地的形成和展布。小金河、箐河~程海、磨盘山、安宁河、小江深断裂分别通过本区西部和东部,宁会、则木河、黑水河等大断裂分布于本区内;康滇地块(康滇地轴)呈南北向展布于本区中部。主要呈南北向构造线展布,全长 720 km、宽 160 km,南端为红河断裂截断,其北止于宝兴附近,被印支期褶皱掩覆。安宁河断裂带仅相当于川滇构造带的北段四川境内部分。主要构造特征表现为:结晶基底为元古代,盖层为震旦系和古生代地层,其中发育南北向构造带,也是本区的主干断裂。东西向褶皱(复式背斜)中发育张性正断层,从而构成了攀西地区构造的基本特征。区内除安宁河、昔格达、攀枝花等南北向主干断裂外,还有许多次一级北东、北西和东西向的断裂。区域上多构成南北向深大断裂控制下的菱形网格构造系或“多”字型体系,导致“地堑式”断陷河谷及多级河谷阶地的发育,成为“纵向成条,条中有块,横向堑垒并举”

的构造格局。

南北向构造带对区内各种矿产,特别是含钒钛磁铁矿层状辉长岩杂岩体产出条件,分布规律的控制作用十分明显。主要有三方面的控制作用:

(1)南北向延伸的康滇地轴隆起带,具有一级构造控岩控矿意义,对岩浆岩和各种内生、外生、变质矿床起了定向的作用。

(2)南北向的边缘深大断裂,具有二级控矿意义,对基性超基性岩体群起了定带的作用。

(3)区内基性超基性岩体沿南北向断裂呈断续带状展布,似与追踪断裂剪切拉张开裂转弯部位相吻合。这种部位对产钒钛磁铁矿的辉长岩层状杂岩体起了定位作用,具有三级控矿意义。

## 3 现场水压致裂地应力测量

本次地应力测量采用水压致裂地应力测量,该方法是 1987 年国际岩石力学学会(ISRM)试验方法委员会颁布的确定岩石应力建议方法中所推荐的方法之一,是目前国际上能较好地直接进行深孔地应力测量的先进方法<sup>[10]</sup>。

### 3.1 水压致裂地应力测量设备及基本原理

水压致裂原地应力测量是以弹性力学为基础,以测量地点为依托,并以①岩石是线弹性和各向同性的;②岩石是完整的,压裂液体对岩石来说是非渗透的;③岩层中有一个主应力分量的方向和孔轴平行 3 个假设为前提,简化而成的一个平面应变的力学问题<sup>[11]</sup>。根据弹性力学原理,在钻孔压裂过程中,完整孔壁破裂时的瞬时压力为岩石的破裂压力  $P_b$ ,钻孔孔壁产生破裂后,裂缝会随着继续注水增压扩展。若停止注水增压,并保持整个压裂水路密闭,则裂缝停止延伸,并在地应力的作用下闭合。通常把裂缝处于临界闭合状态的平衡压力称为闭合压力  $P_s$ ,此压力即为该测点的水平最小主应力  $S_h$ <sup>[12]</sup>,其垂直于破裂面,即:

$$P_s = S_h \quad (1)$$

卸掉压裂段压力后重新注水加压,使裂缝重新张开,压裂段压力不再上升,此时得到重张压力  $P_r$ ,则根据弹性力学原理推导出该测点的水平最大主应力  $S_H$ 为

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0 \quad (2)$$

式中, $P_0$ 为该测点处的孔隙压力。

竖直应力  $S_v$ 可由上覆岩层的重力计算得出:

$$S_v = \rho g d \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为岩石密度;  $g$  为重力加速度;  $d$  为深度。

现场水压致裂地应力测量采用一对可膨胀的封隔器在选定的测量深度处将一段孔壁完整的钻孔注水封隔成密闭空间, 形成压裂测试段, 向测试段注水增压的同时通过数据采集器采集高频的压力数据, 获取特征压力参数, 进而获得测段的水平最大主应力、最小主应力、岩石原位抗拉强度的数值, 具体测量系统如图 1 所示。

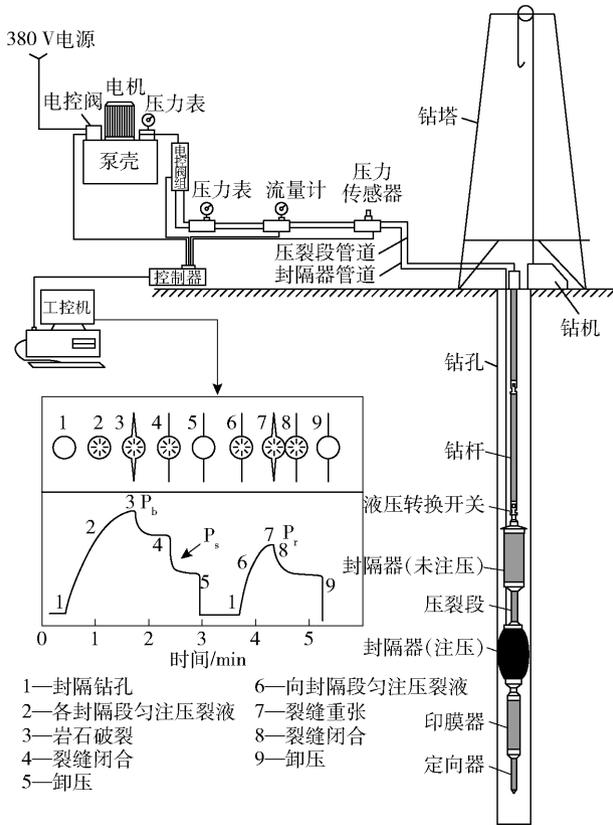


图 1 水压致裂地应力测量系统原理图

水平最大主应力的方向可通过裂缝印模, 根据定向器的标度方向及印模器上裂缝与定向器标度的相对角度共同确定, 破裂面的方向即为水平最大主应力方向。

### 3.2 测点选取与压裂过程

DH02 钻孔与混合井勘探孔确定为潘家田铁矿地应力测试孔。其中 DH02 钻孔孔口坐标 26.715°N, 101.990°E, 孔口高程 1862 m, 终孔深度 576 m; 混合井勘探孔钻孔孔口坐标 26.718°N, 101.986°E, 孔口高程 1778 m, 终孔深度为 852.49 m。结合现场地质资料、岩芯状况、岩芯柱状图、钻具情况, 共进行了 19 段的地应力测试, 2 次印模试验。

水压致裂实验从两个测试孔最浅的测点开始测

起, 依次向下进行压裂测试。压裂过程中水泵泵量控制在 10 L/min, 加压时管路及封隔器内压力快速上升, 到压力上升趋于停止时, 表明测点位置的岩石已压裂, 关泵, 保压, 持续 1 min, 泄压。每个测点重复 3 到 4 次此过程。实验总体测量效果理想, 各个循环重复测量的规律性较好, 可以清楚分辨出岩石压裂时的特征压力点。由此可以确定出各测点的应力状态, 压裂曲线如图 2 所示。

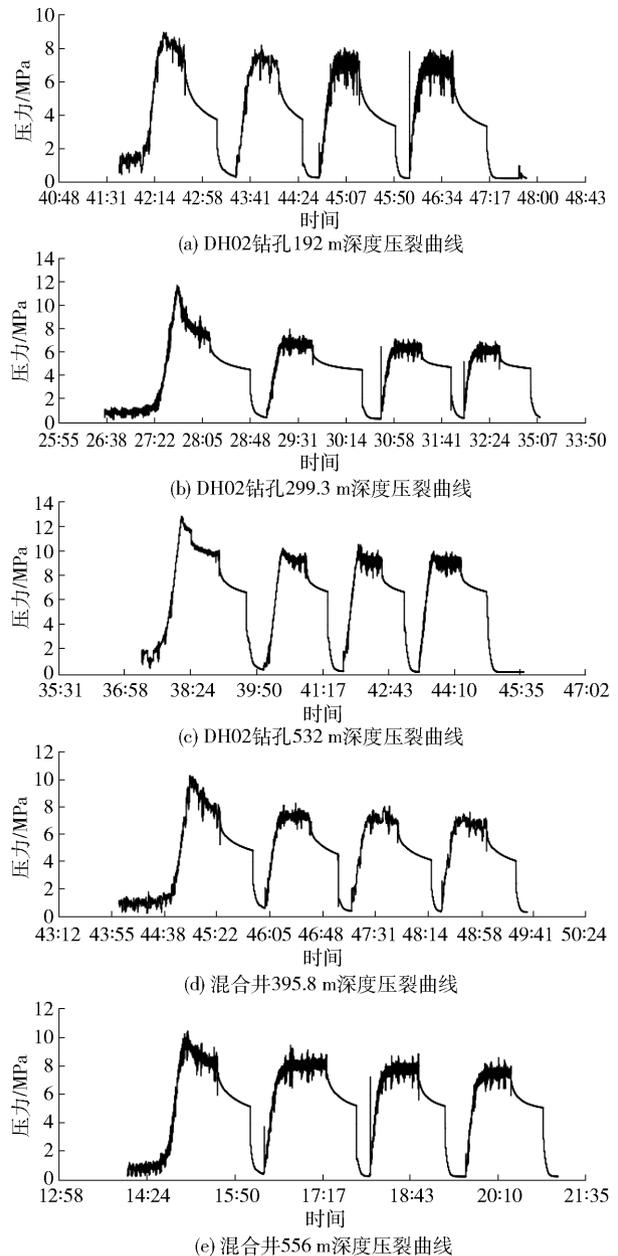


图 2 潘家田铁山水压致裂地应力测量压裂曲线

### 3.3 地应力测量结果

根据对测试资料的整理及计算分析, 得出各个测段的破裂压力 ( $P_b$ )、裂缝张压力 ( $P_r$ )、水压破裂

面的瞬时闭合压力( $P_s$ )、岩层的岩石孔隙压力( $P_0$ )以及测段岩石的原地抗拉强度( $T$ )等数据。根据测得的压力参数及相关公式,得到最大、最小水平主压力值( $S_H$ 、 $S_h$ )及铅直主应力值( $S_V$ ),测量结果详见

表1。其中铅直主应力值是根据水压致裂理论,按照上覆岩层的厚度计算得到的。计算中DH02钻孔岩石的容重取 $3.1\text{ g/cm}^3$ ,混合井勘探孔岩石的容重取 $2.9\text{ g/cm}^3$ 。

表1 潘家田铁矿水压致裂地应力测量结果

测量孔 编号	测段 深度/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂 方位/(°)
		$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_0$	$T$	$S_H$	$S_h$	$S_v$	
DH02 钻孔	70	10.85	4.73	3.85	0.69	6.12	7.52	4.54	2.13	
	117	9.49	5.81	4.57	1.15	3.68	9.06	5.72	3.55	
	155	9.12	5.89	4.62	1.52	3.23	9.49	6.14	4.71	
	192	9.11	7.48	5.68	1.88	1.63	11.45	7.56	5.83	
	245.4	11.74	6.22	4.84	2.40	5.52	10.69	7.24	7.46	
	299.3	11.91	6.92	5.30	2.93	4.99	11.92	8.23	9.09	
	346	15.82	9.16	6.79	3.39	6.66	14.60	10.18	10.51	
	396	15.95	9.67	7.13	3.88	4.38	15.60	11.01	12.03	N41.5°W
	439	16.53	9.74	7.17	4.30	6.79	16.08	11.47	13.34	
	495	14.88	9.51	7.02	4.85	5.37	16.39	11.87	15.04	
混合井勘探孔	532	13.28	10.64	7.76	5.21	2.64	17.86	12.98	16.16	
	249.2	7.58	4.30	3.67	2.44	3.28	9.16	6.12	7.08	
	290.2	12.46	4.46	3.80	2.84	7.99	9.78	6.65	8.25	
	315.5	6.42	4.20	3.66	3.09	2.22	9.88	6.75	8.97	
	342.6	10.69	6.22	4.89	3.36	4.47	11.82	8.25	9.74	
	395.8	10.04	7.65	5.79	3.88	2.39	13.61	9.67	11.25	
	450.2	11.33	6.82	5.34	4.41	4.51	13.60	9.75	12.79	N48.2°W
	535.4	14.43	8.45	6.38	5.25	5.98	15.93	11.62	15.22	
556	10.21	8.40	6.36	5.45	1.81	16.14	11.81	15.80		

按照水压致裂应力测量的基本原理,水压致裂所产生的破裂面的走向就是最大水平主应力的方向,即测区最大水平主应力方向为北西向,具体如图3所示。

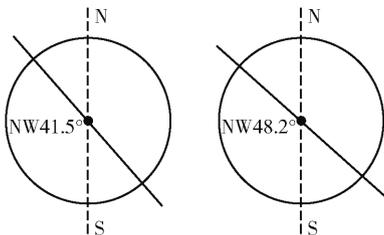


图3 潘家田铁矿矿区最大水平主应力方向

### 3.4 地应力场分布规律

实测得出DH02钻孔最大水平主应力值为 $7.52 \sim 17.86\text{ MPa}$ ,最小水平主应力值为 $4.54 \sim 12.98\text{ MPa}$ ,变化如图4所示;混合井勘探孔最大水

平主应力值为 $7.08 \sim 15.8\text{ MPa}$ ,最小水平主应力值为 $6.12 \sim 11.81\text{ MPa}$ ,具体变化曲线如图5所示。

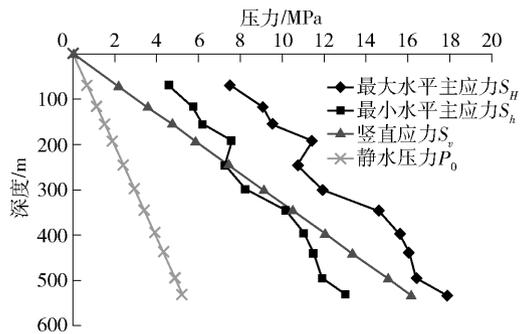


图4 潘家田铁矿DH02孔主应力值随深度变化图

DH02钻孔各测点的水平主应力最大值( $S_H$ )和最小值( $S_h$ )线性回归方程如下:

$$S_H = 5.97 + 0.023D \quad \text{相关系数 } R^2 = 0.9635$$

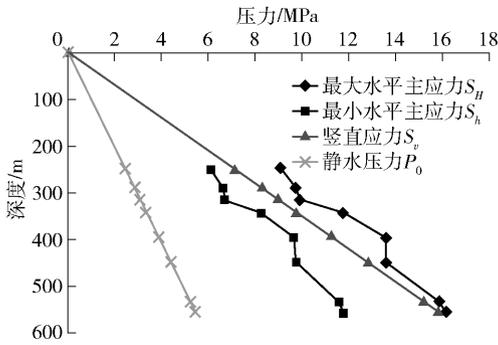


图5 潘家田铁矿混合井勘探孔主应力值随深度变化图

$$S_h = 3.35 + 0.018D \quad \text{相关系数 } R^2 = 0.9756$$

式中,  $D$  为钻孔深度(向下为正),单位为  $m$ 。

混合井勘探孔测点的水平主应力最大值 ( $S_H$ ) 和最小值 ( $S_h$ ) 线性回归方程如下:

$$S_H = 2.75 + 0.025D \quad \text{相关系数 } R^2 = 0.9596$$

$$S_h = 0.96 + 0.020D \quad \text{相关系数 } R^2 = 0.9654$$

通过对两个钻孔实测地应力数据的综合线性拟合,推测出潘家田铁矿矿区水平应力随深度的变化规律,具体如图6所示,具体如下:

$$S_H = 4.65 + 0.024D \quad \text{相关系数 } R^2 = 0.8689$$

$$S_h = 2.47 + 0.019D \quad \text{相关系数 } R^2 = 0.8265$$

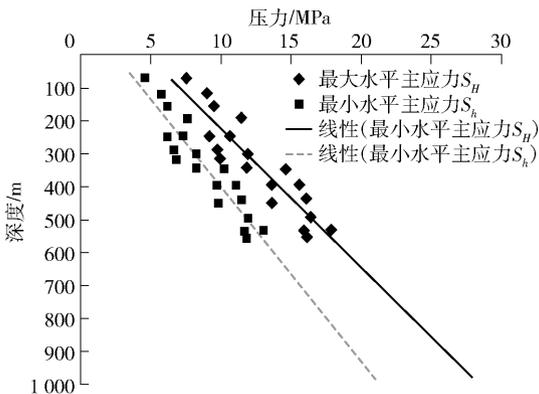


图6 潘家田铁矿矿区水平应力值随深度变化趋势图

由实测地应力结果可以看出,潘家田铁矿矿区最大主应力为北西向水平应力,其中200 m以浅最小主应力为竖直应力,随着深度增加竖直应力转变为中间应力。其中DH02钻孔最大水平主应力  $S_H$  与竖直主应力  $S_v$  的比值为1.09~3.54倍,平均为1.72倍。两个水平主应力的比值为1.38~1.66倍,平均为1.48倍;混合井勘探孔最大水平主应力  $S_H$  与竖直主应力  $S_v$  的比值为1.02~1.29倍,平均为1.14倍。两个水平主应力的比值为1.37~1.50倍,平均为1.43倍。实测测点中未发现局部应力集

中现象,与中国大陆地应力测试统计结果比较,测区内的地应力值属一般应力水平。

### 4 深部矿体岩爆倾向性分析

岩爆产生的外因是高地应力,岩体开挖引起硐室周围岩体应力重新分布和应力集中。岩爆发生的内因是硬岩弹性能突然脆性释放,导致岩块弹射,形成岩爆。岩爆具有突发性和不可预见性,很难有效防治和预测<sup>[13]</sup>,因此,本文通过基于能量积聚模拟的方式进行岩爆危险性预测。

考虑一个单位体积的岩体在外力作用下产生变形,假设该物理过程与外界没有热交换,外力功所产生的总输入能量为  $U$ ,根据能量守恒原理,可得:

$$U = U^d + U^e \quad (4)$$

式中:  $U^d$  为岩石耗散能;  $U^e$  为岩石可释放弹性应变能。为适合工程应用的岩体单元可释放应变能的计算,将弹性模量和泊松比分别取为  $E_0$  与  $\nu$ ,得到:

$$U^e = \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (5)$$

国内外学者研究表明:当岩体中可释放弹性应变能  $U^e$  达到岩体破坏所需的能量  $U_0$ ,岩体就会发生破坏。当  $U^e = U_0$  时,岩体发生静态破坏;当  $U^e > U_0$  时,岩体发生动态破坏,能量差额  $\Delta = U^e - U_0$  构成分裂岩体的动能。因此岩体发生岩爆破坏的准则为:

$$U^e > U_0 \quad (6)$$

单轴压缩条件下岩石极限储能经验公式:

$$U_0 = \frac{\sigma_c^2}{2E_0} \quad (7)$$

结合之前三轴围压试验结果,定义岩体的真实能量  $U$  与极限储存能  $U_0$  的比值为岩爆的能量指标,具体判据为:  $U/U_0 = 0.3$  (少量片帮, I级,弱岩爆);  $U/U_0 = 0.4$  (严重片帮, II级,中等岩爆);  $U/U_0 = 0.5$  (需要型支护, III级,强烈岩爆);  $U/U_0 \geq 0.7$  (严重破坏, IV级,严重岩爆)。式中:  $U$  为岩体储存的真实能量,为耗散能和弹性应变能之和,而耗散能在岩体开挖过程中形成岩石内部的损伤和塑性变形,该过程是不可逆的,故在计算过程中可用  $U^e$  代替。

以潘家田铁矿 DH02 钻孔为对象,根据钻孔岩芯编录结果,工业矿体埋深于480~540 m,综合DH02钻孔地应力测量结果及钻孔岩芯的弹性模量和泊松比,岩爆倾向性危险等级预测分析见表2。

其中岩芯弹性模量及泊松比数据来自同期北京科技大学实验室得到的岩石物理力学测试数据。

表2 潘家田铁矿深部矿体岩爆倾向性分析

岩性	深度/m	单轴抗压强度/MPa	泊松比	弹性模量	最大主应力/MPa	中间应力/MPa	最小主应力/MPa	极限储能/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性应变能/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$	$U/U_0$	岩爆倾向性
工业矿体	495	53.48	0.25	27.19	16.39	15.04	11.87	52.59	5.97	0.11	无岩爆
工业矿体	532	53.48	0.25	27.19	17.86	16.16	12.98	52.59	7.03	0.13	无岩爆

由上表得出,潘家田铁矿矿体在原生应力场环境下岩爆倾向性大体为无岩爆,深部开采巷道施工危险性较低。

### 5 结论

本文在基于实测 DH02 钻孔和混合井勘探孔原岩应力的基础上,对潘家田矿区原岩应力分布特征进行分析,得到矿区内原岩应力随深部的变化规律,最后结合矿体物理力学性质基于能量积聚模拟对矿区内岩爆危险性预测,得到如下结论。

(1)矿区内应力场主要以水平应力为主导,实测得出 DH02 钻孔最大水平主应力值为 7.52 ~ 17.86 MPa,混合井勘探孔最大水平主应力值为 7.08 ~ 15.8 MPa。竖直应力由最小主应力随深度增加过渡为中间应力,水平应力随深度增加基本呈线性增大。与中国大陆地应力测试统计结果比较,潘家田铁矿的地应力大小属于一般水平,实测测点中未发现局部应力集中现象。

(2)DH02 孔与混合井勘探孔地应力测试孔实测最大水平主应力方向分别为 NW41.5° 和 NW48.2°,表明矿区最大主应力方向为近 NW 向。这一结果符合本区震源机制解译得出的挤压应力场方向,与新构造活动所反映的区域构造应力场方向基本一致。同时,建议地下巷道设计时尽量平行于最大主应力方向,以减小片帮、底隆等地质风险。

(3)潘家田铁矿矿体在原生应力场环境下岩爆倾向性大体为无岩爆。同时需要注意后期地下巷道开挖后会对矿区原生构造应力场产生扰动,可能会产生局部应力集中现象,使局部主应力值大小及最大主应力方向发生变化。

#### [参考文献]

[1] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制——理论

与实践[M]. 北京:科学出版社,2001.

[2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005, 24(16):2803 - 2813.

[3] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京;煤炭工业出版社,1983.

[4] 王成虎,邢博瑞. 原生裂隙水压致裂原地应力测量的理论与实践新进展[J]. 岩土力学,2017, 38(5): 1289 - 1297.

[5] 彭华,马秀敏,姜景捷,等. 赵楼煤矿 1 000 m 深孔水压致裂地应力测量及其应力场研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011, 30(8):1638 - 1645.

[6] 乔兰,蔡美峰. 应力解除法在某金矿地应力测量中的新进展[J]. 岩石力学与工程学报,1995,14(1):25 - 32.

[7] 蔡美峰,郭奇峰,李远,等. 平煤十矿地应力测量及其应用[J]. 北京科技大学学报,2013,35(11):1399 - 1406.

[8] 白金朋,彭华,马秀敏,等. 深孔空心包体法地应力测量仪及其应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(5): 902 - 908.

[9] 孙东生,吕海涛,王连捷,等. ASR 和 DITF 法综合确定塔里木盆地 7 km 深部地应力状态[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(2):383 - 391.

[10] 蔡美峰. 地应力测量原理方法的评述[J]. 岩石力学与工程学报,1993,12(3):275 - 283.

[11] 彭华,崔巍,马秀敏,等. 南水北调西线第一期工程调水区水压致裂地应力测量及其工程意义[J]. 地质力学学报,2006,12(2):182 - 190.

[12] 王连捷,丁原辰,刘琦胜,等. 引黄隧洞地应力测量[J]. 地质力学学报,1996,2(1):62 - 64.

[13] 谢和平,鞠杨,黎立云. 基于能量耗散与释放的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报,2005,25(17):3003 - 3010.