

祝雨杭, 陈世万, 阮亮, 等. 鸡公岭磷矿岩爆倾向性评价研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 227-240. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.019

ZHU Yuhang, CHEN Shiwan, RUAN Liang, et al. The Rockburst Tendency Evaluation In Jigongling Phosphate Mine[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 227-240. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.019

# 鸡公岭磷矿岩爆倾向性评价研究

祝雨杭<sup>1,2</sup>, 陈世万<sup>1,2</sup>, 阮亮<sup>3</sup>, 田云雷<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室(贵州大学), 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州福麟矿业有限公司, 贵州 福泉 550500)

**摘要:**【目的】随着深部矿山开采活动的增多, 岩爆已成为威胁地下工程安全的主要隐患之一。为快速评价深部矿山岩爆倾向性, 提出了一种新的评价方法。【方法】通过量化深部岩心的卸荷损伤特征来确定地应力方向, 并结合变形率分析法(DRA)测定地应力大小, 综合其他岩石力学参数对贵州省鸡公岭磷矿岩爆倾向性进行评价。【结果】研究结果表明: (1)深部岩心的波速和孔隙度因卸荷损伤呈现一致的正交各向异性, 从而确定了水平主应力方向。(2)DRA 试验结果表明, 在 728~1 076.2 m 范围内, 最小水平主应力为 15.5~19.5 MPa, 最大水平主应力为 21.1~25.6 MPa。(3)基于 DRA 试验的弹性应变能指数  $W_{el}$ 、脆性指数  $F$ 、应力强度比  $R$  和岩体质量指标  $RQD$ , 对深部矿岩开展了岩爆倾向性评价, 该矿山岩爆倾向性主要为中等。【结论】该方法在矿山建设前期设计阶段可快速准确地测定地应力和岩爆评价关键参数, 为评价矿山深部岩爆倾向性提供重要支撑。

**关键词:** 地应力; 岩爆; 核磁共振; 变形率分析法; 影响因素; 变形

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TD311

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0227-14



## The rockburst tendency evaluation in Jigongling phosphate mine

ZHU Yuhang<sup>1,2</sup>, CHEN Shiwan<sup>1,2</sup>, RUAN Liang<sup>3</sup>, TIAN Yunlei<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment (Guizhou University), Ministry of Education, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Guizhou Fulin Mining Co., Ltd., Fuquan 550500, Guizhou, China)

**Abstract:** [Objective] With the increasing depth of mining activities, rockburst has become a major hazard threatening the safety of underground engineering. To quickly assess the rockburst tendency in deep mines, a new evaluation method is proposed. [Methods] The method determines the in-situ stress direction by quantifying the unloading-induced damage characteristics of deep rock cores and measures the stress magnitude using deformation rate analysis (DRA). It further integrates other rock mechanical parameters to evaluate the rockburst tendency in the Jigongling Phosphate Mine in Guizhou Province. [Results] The research results indicate that: (1) the wave velocity and porosity of deep rock cores exhibit consistent orthogonal anisotropy due to

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-08-29; 录用日期: 2024-11-18; 网络出版日期: 2025-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42162027); 贵州省科技计划(黔科合重大专项字[2018]3011, [2022] 212)

作者简介: 祝雨杭(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 13096730877@163.com

通信作者: 陈世万(1990—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事地下工程岩石力学方面的研究。E-mail: swchen@gzu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

unloading damage, thus determining the direction of horizontal principal stress; (2) DRA test result show that within the depth range of 728 m to 1 076. 2 m, the minimum horizontal principal stress is 15. 5~19. 5 MPa, and the maximum horizontal principal stress is 21. 1~25. 6 MPa; (3) based on the elastic strain energy index ( $W_{el}$ ), brittleness index ( $F$ ), stress intensity ratio ( $R$ ), and rock mass quality index ( $RQD$ ) obtained from DRA tests, the rockburst tendency of deep rock masses was evaluated, showing a predominantly moderate tendency. [ Conclusion ] The proposed method can quickly and accurately measure in-situ stress and key parameters for rockburst evaluation during the early design stages of mine construction, providing important support for assessing rockburst tendency in deep mines.

**Keywords:** in-situ stress; rockburst; nuclear magnetic resonance (NMR); deformation rate analysis; influencing factors; deformation

## 0 引言

岩爆是在高地应力条件下进行地下工程(采矿工程、深埋隧道、水工隧洞等)建设时,岩体在开挖过程中由于储存的大部分能量得到释放,导致岩石剧烈的脆性破坏,使得破碎的岩块碎裂弹出的现象<sup>[1-2]</sup>。岩爆常常造成井下作业人员的伤亡和设备损失,是制约深部工程建设的主要安全隐患。岩爆倾向性评价是深部资源开发和工程建设前的关键步骤之一。

近年来,学者们对岩爆倾向性评价开展了系统的研究。从不同角度综合地应力、岩体强度、岩体结构等要素分析了岩爆的机制,提出了各种评价方法(应力强度比法、能量法、脆性法等)。RUSSENS<sup>[3]</sup>提出以隧道周边最大切向应力 $\sigma_{\theta_{max}}$ 与岩石点荷载强度 $\sigma_{ci}$ 的比值建立岩爆分级标准。HOEK等<sup>[4]</sup>以 $\sigma_c$ 与 $\sigma_\theta$ 的比值作为判断岩爆发生的准则。柳禄湧等<sup>[5]</sup>综合钻孔岩芯样品单轴抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数,采用能量积聚方法,评判了钻孔不同深度的岩爆倾向性等级。张伟等<sup>[6]</sup>提出了一种基于地质强度指标(GSI)的施工阶段岩爆倾向性评价准则。LIU等<sup>[7]</sup>建立了考虑围岩应力梯度的应力-强度比新岩爆准则。KIDYBINSKI<sup>[8]</sup>提出了弹性应变能指数 $W_{el}$ 来评价岩爆的强度。宫凤强等<sup>[9]</sup>提出了基于线性储能定律的峰值弹性应变能指数 $W_{el}^p$ 计算方法。杜坤等<sup>[10]</sup>结合峰值弹性应变能指数 $W_{el}^p$ 和残余弹性能指数 $A_{EF}$ ,从能量角度分析了三种硬岩的岩爆倾向性。LEVEILLE等<sup>[11]</sup>基于金伯利岩的应变能指数 $W_{el}$ 和脆性指数 $RB$ ,研究了不同亚岩类的岩爆倾向性差异,发现脆性越高,岩爆倾向性越大。唐礼忠等<sup>[12]</sup>从变形角度将脆性指数定义为 $\sigma_c/\sigma_t$ 与峰值强度前总应变 $\varepsilon_f$ 与峰值强度后总应变 $\varepsilon_b$ 的乘积,并应用于冬瓜山铜矿岩爆倾向性评价中。周辉等<sup>[13]</sup>提出了一种基于应力-应变曲线,考虑岩石塑性屈服特性和应力状态的脆性指标。TARASOV等<sup>[14]</sup>从能量角度将脆性指数

$F$ 定义为峰后断裂能增量 $dW_f$ 和卸载弹性能增量 $dW_e$ 的比值。从应力角度,可将脆性指数 $F$ 定义为岩石单轴抗压强度 $\sigma_c$ 与抗拉强度之比 $\sigma_t$ <sup>[15]</sup>。李天斌等<sup>[16]</sup>综合应力系数、倾向性系数、岩体质量指标( $RQD$ )等物理力学参数评价雅砻江某水电站交通隧道的岩爆倾向性。基于以上研究,岩石的力学性质和地应力(或工程开挖引起的应力重分布)构成了岩爆倾向性评价的关键指标。

地应力是岩爆发生的主要驱动力之一。当外部应力(如地应力)超过岩体的强度极限时,岩体内部会产生应力集中区,导致岩石发生脆性破坏。此过程伴随着弹性应变能的急剧释放,从而引发岩石的剧烈爆裂和碎块弹射。这一现象在高地应力条件下尤为显著<sup>[17]</sup>。因此,准确可靠地测量地应力是深部地下工程设计和安全评价的前提。目前,国内外已经发展了大量地应力测量方法,主要分为原位的钻孔的水压致裂法、应力解除法,以及岩心的声发射法和应变恢复法等室内试验方法。FAIRHURST<sup>[18]</sup>提出水压致裂法测量地应力,因其设备简单、操作方便、可靠性高等优点,在各类工程中得到广泛应用<sup>[19-21]</sup>。1933年LIEURANCE等在Hoover Dam应用应力解除法进行地应力的测量,HAST等<sup>[22-23]</sup>进一步改进了应力解除法,国际岩石力学学会将应力解除法定为推荐方法<sup>[24]</sup>。通过对岩心开展室内试验测量地应力,是传统原位应力测量方法的有效替代方法<sup>[25-30]</sup>。KANAGAWA等<sup>[31]</sup>提出应用Kaiser效应测量地应力的方法。YAMAMOTO等<sup>[32]</sup>基于岩石变形记忆效应(DME),提出变形率分析法(DRA)测量地应力,实现通过岩心室内试验快速、准确测定原岩应力。然而,受限于岩心定向设备的复杂操作和昂贵价格,通过对岩石开展室内试验测定地应力尚需进一步发展<sup>[27-35]</sup>。

随着浅部矿产资源逐步枯竭,深部矿山建设中岩爆倾向性评价的重要性愈发突出。然而,在矿山建设的可行性研究阶段,往往缺乏开展深部原位地应力测

试的条件。因此,发展基于岩心物理力学参数的快速测试地应力并评价岩爆倾向性的方法具有重要意义。本文在此背景下提出了一种基于钻孔岩心卸荷损伤各向异性特征定向的方法,通过对定向岩心进行循环加卸载试验,结合应变记忆原理测量地应力、计算脆性指标与能量特征参数,并对鸡公岭磷矿的岩爆倾向性进行快速评价。这一方法为矿山建设前期的岩爆倾向性评估提供了重要的技术支持。

## 1 试验原理与方法

### 1.1 地应力方向确定方法

深部岩心在取芯过程中,由于钻孔卸荷,岩心在最大主应力和最小主应力方向上产生的损伤存在差异。利用岩心波速和孔隙度量化这个差异,可以确定岩心所受主应力方向。

#### 1.1.1 基于宏观各向异性特征确定地应力方向

声波在岩石中的传播速度对岩石内部微裂隙和孔隙的响应较为敏感,可用于确定岩石波速各向异性损伤特征。由于最大主应力方向上卸荷损伤大,微裂隙

密集,声波穿透时间较长;相反,最小主应力方向上卸荷损伤小,微裂隙稀疏,声波穿透时间较短<sup>[36]</sup>。如图1所示,通过测量岩心不同方向上的波速,可获得岩心各向异性损伤特征。

#### 1.1.2 基于微观各向异性特征确定地应力方向

近年来,低场核磁共振技术(LF-NMR)广泛应用于测量岩石内微观孔隙特征<sup>[37]</sup>。通过 LF-NMR 成像技术,可以精确获取岩心试样中孔隙的空间分布,这些孔隙的空间分布特征能够反映岩心所受的主应力方向。

如图2所示,对岩心核磁共振图像(MRI)进行预处理,通过矩形条框灰度值识别方法,编程计算不同方向上 MR 图像的孔隙度。具体步骤如下。

- (1) 读取 MRI 灰度图像,获取图像的高度和宽度。
- (2) 定义一个矩形区域,作为孔隙度计算的基准。
- (3) 定义旋转角度,从  $0^{\circ}$  ~  $359^{\circ}$ ,每隔  $10^{\circ}$  取一个值,以便计算不同方向的孔隙度。
- (4) 定义灰度阈值为 50,小于该阈值的定义为孔隙。
- (5) 计算旋转后的矩形范围内孔隙像素量以及

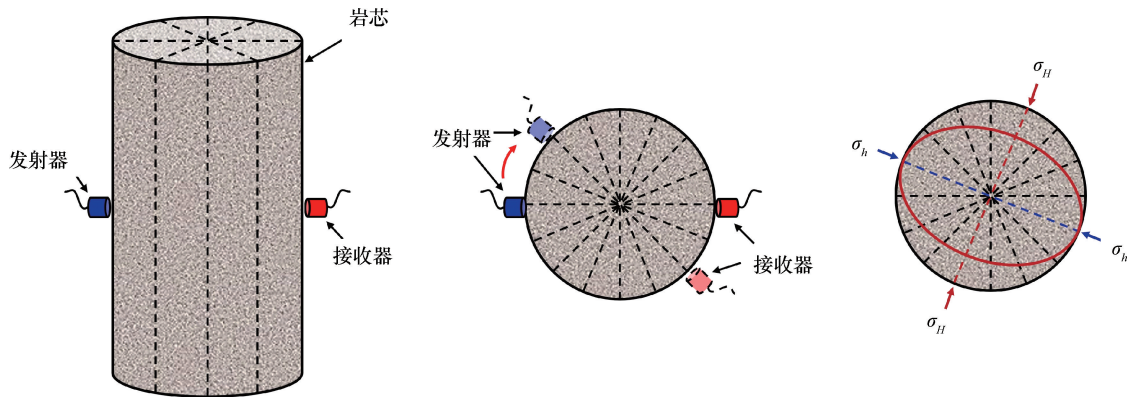


图1 岩心波速各向异性测试方法

Fig. 1 Method for anisotropic unloading damage measurement of rock sample

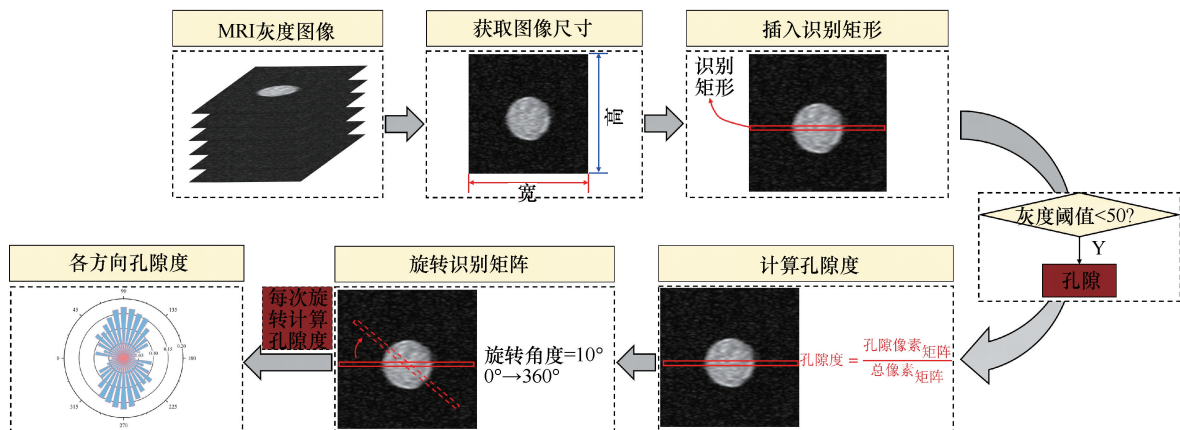


图2 通过核磁共振成像量化岩心各向异性损伤方法

Fig. 2 The anisotropic unloading damage measurement method using the MRI technique

总像素量, 将孔隙像素量与总像素量的比值定义为该方向的孔隙度。

### 1.1.3 DRA 加载

DRA 方法是一种基于岩石变形记忆效应的地应力测量方法<sup>[32]</sup>。当加载应力超过岩心先前所受的最大地应力时, 其变形规律将发生改变。DRA 方法的核心是计算两个加载周期之间的应变差, 并分析应变差与加载应力的关系, 以识别岩心先前所受的地应力<sup>[30]</sup>。在岩石试样确定的不同主应力方向进行 DRA 试验, 可得到 DRA 加载方向的地应力大小。应变差通过下列公式进行计算

$$\Delta\varepsilon_{1,2}(\sigma) = \varepsilon_2(\sigma) - \varepsilon_1(\sigma) \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为应力;  $\varepsilon_n(\sigma)$  为第  $n$  次循环应力对应的应变。

利用 DRA 方法确定地应力大小的关键在于准确判断 DRA 拐点的位置, 判断 DRA 拐点的位置需要考虑 DRA 曲线的形状特征, 如折点的数量、方向、强度等。DRA 曲线的形状特征受到岩石类型、历史应力路径、放置时间等因素的影响, 可能呈现出多种不同的情况。不同的 DRA 曲线形状可能对应不同的记忆信息。目前没有统一标准或方法来确定 DRA 拐点的位置, 不同的研究者可能会根据自己的经验或判断选择不同的拐点, 但是主观成分很大, 影响 DRA 法测量地应力的精度和可靠性<sup>[32-40]</sup>。本研究主要根据 SETO 等<sup>[28]</sup>总结的 DRA 曲线类型确定 DRA 曲线的拐点位置, 如图 3 所示。

## 1.2 试验设备与方案

### 1.2.1 试验设备

采用电液伺服压力试验机 WAW-1000[见图 4(a)]

进行力学加载, 最大加载试验力为 1 000 kN, 误差为  $\pm 0.5\%$ 。采用美国物理声学公司(PAC)声发射监测系统 PCI2-Main-12[见图 4(b)], 监测在 DRA 测量加载过程中试样的开裂情况。采用纽迈低场核磁共振成像分析仪 MesoMR12-060H-I[见图 4(c)]对岩石试样进行核磁共振成像, 该仪器磁场强度为  $0.3 \pm 0.05$  T, 主频率为 12 MHz, 岩石孔隙测量精度为微米级。

### 1.2.2 试验方案

如图 5 所示, 首先通过波速测试和核磁共振测试确定试样波速和孔隙度的各向异性特征, 以此确定最大主应力和最小主应力方向。在确定的主应力方向上, 将试样切割为方形试样, 同时加工部分圆柱试样以获取该深度范围的垂直主应力。部分试样采样深度与 DRA 加载方向如表 1 所列。

表 1 鸡公岭磷矿区主井试样采样深度表  
Table 1 Sampling depth of specimens in Jigongling Phosphate Main Shaft

试样编号	采样深度/m	岩性	平均密度/ $g \cdot cm^{-3}$	DRA 加载方向 (测量地应力方向)
CH-08	586	白云岩	2.71	最小主应力方向
CL-01	625	磷矿石	2.72	最小主应力方向
CS-17	728	泥质粉砂岩	2.66	最小主应力方向
CS-18	728	泥质粉砂岩	2.66	最小主应力方向
CS-19	728 </td <td>泥质粉砂岩</td> <td>2.66</td> <td>最大主应力方向</td>	泥质粉砂岩	2.66	最大主应力方向
CS-03	1 076	泥质粉砂岩	2.66	最大主应力方向

将制备好的试样沿着主应力方向进行 DRA 加载, 在岩样表面安装声发射探头、应变计, 加载速率为  $0.1 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 。加载至  $0.8\sigma_p$  后, 以同样的速率卸载, 然后再次加载至试样破坏。根据式(1)计算试样两次加载之间的应变差, 并绘制应变差与加载应力之间的

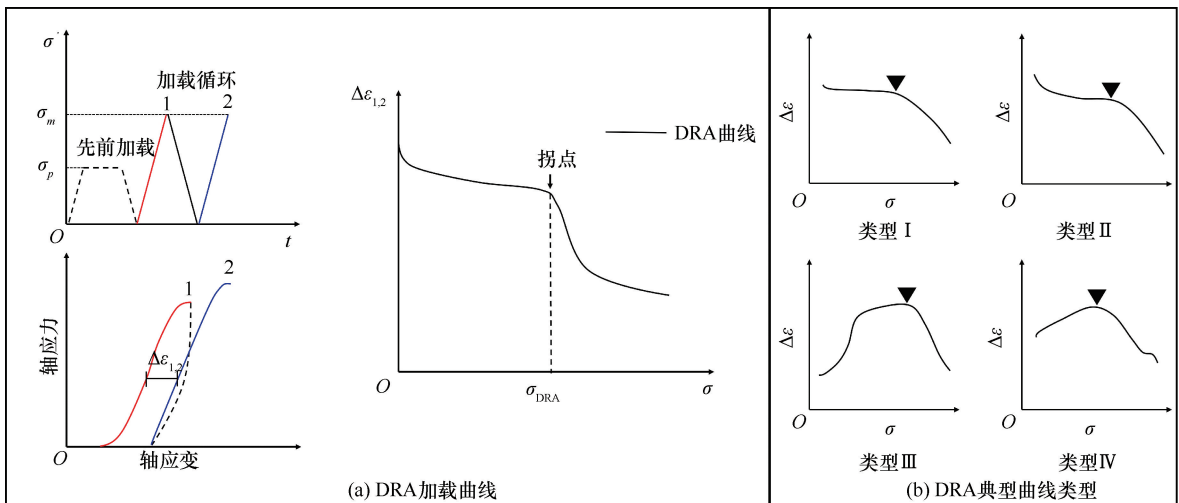


图 3 DRA 加载曲线和 DRA 典型曲线类型<sup>[28]</sup>

Fig. 3 DRA test procedure and typical DRA curves and inflection points



图 4 试验设备

Fig. 4 Experimental equipment

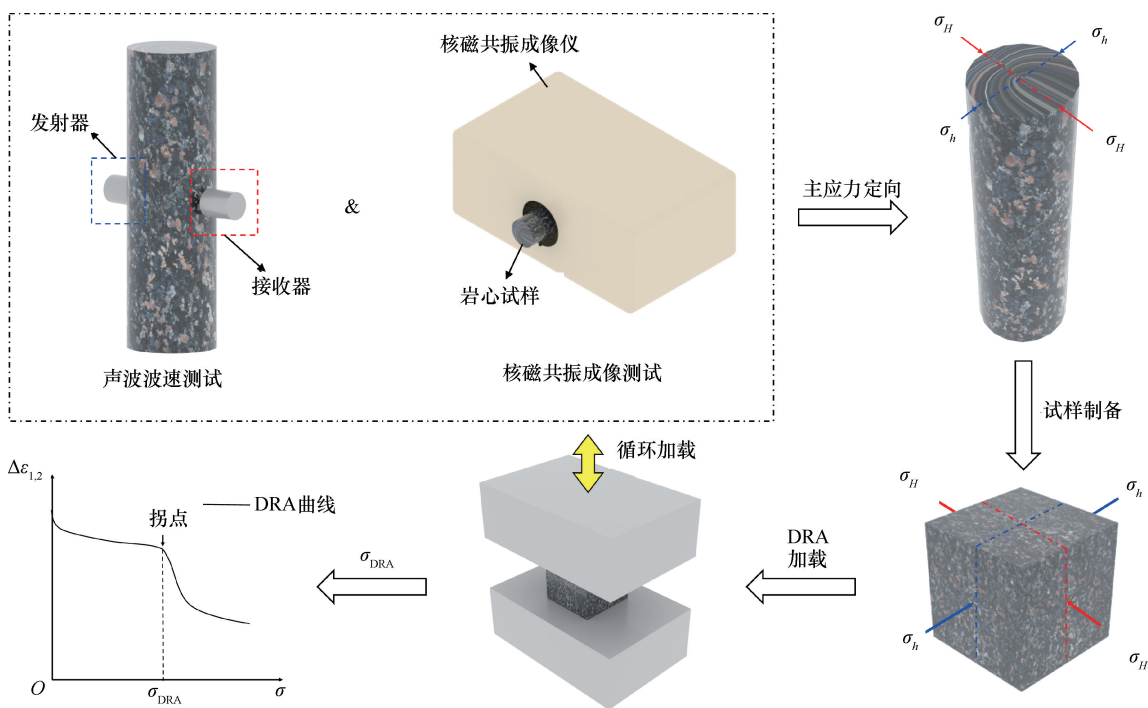


图 5 地应力测量试验主要步骤

Fig. 5 Experimental procedure of the in-situ stress measurement

关系曲线。应变差曲线的拐点即为该主应力方向下的应力大小。

## 2 方法应用：鸡公岭磷矿区岩爆倾向性评价

### 2.1 鸡公岭磷矿区地质条件

研究区位于贵州省福泉市鸡公岭磷矿区，矿区属侵蚀切割中山地貌类型，山脉走向与矿区主体构造走

向一致。矿区位于白岩背斜轴部偏东翼，总体为单斜构造。主井位于北东向山脊西侧坡面，地势东高西低。该研究区域内地应力数据较少，结合周边数据及该区域地质构造[见图 6(b)]可以判断研究区域内最大水平主应力的优势方向为 NW 向。本研究采集岩心来自于鸡公岭磷矿区主井 S01，岩性主要为白云

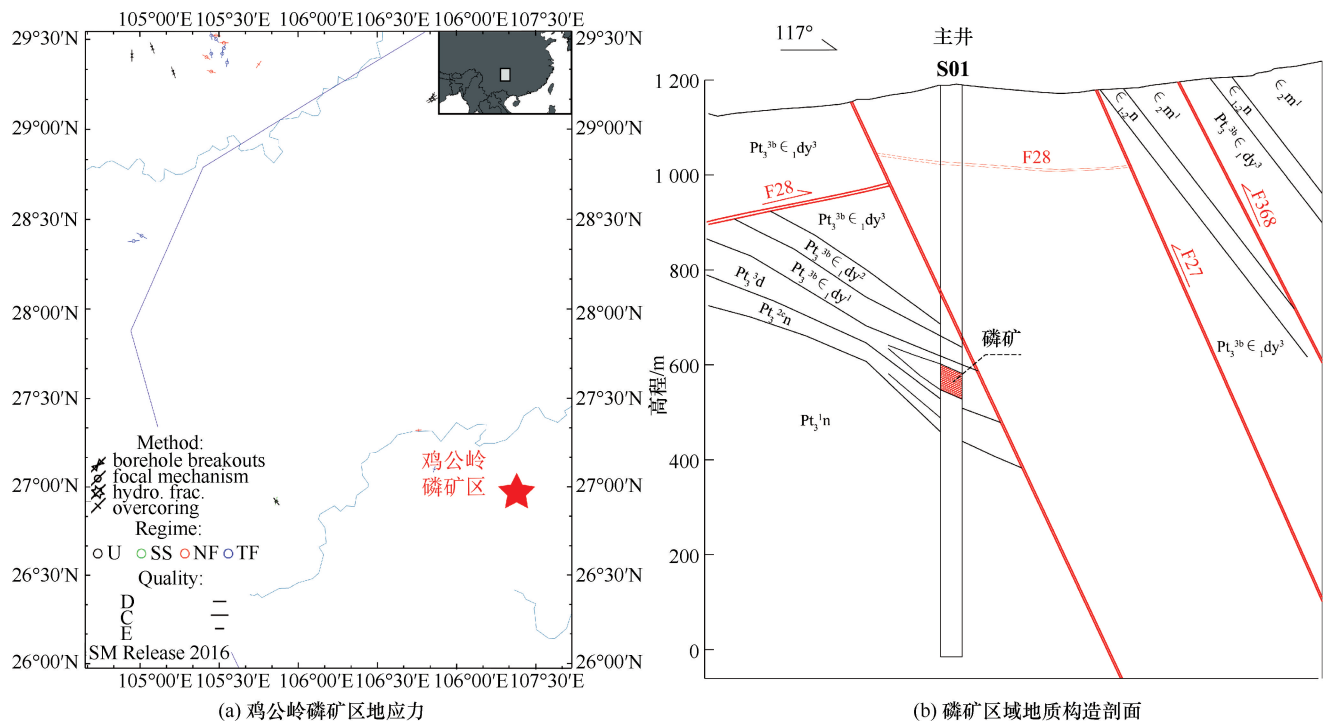


图 6 鸡公岭磷矿区地应力和磷矿区域地质构造剖面

Fig. 6 Stress map of Jigongling phosphate mine area and regional geological structure profile of phosphate rock

岩、磷矿岩和泥质粉砂岩，其中鸡公岭磷矿主要矿体赋存标高为 600 m 以下，最大埋深深度超过 1 000 m，且矿体为急倾斜。为了全面评估鸡公岭磷矿区矿体埋深附近的地应力状态，结合岩心完整情况，选取 586 m 磷矿顶板白云岩、625 m 磷矿岩、728 m 磷矿底板泥质粉砂岩和 1 076 m 磷矿底板泥质粉砂岩进行地应力测量。

## 2.2 地应力测量结果

### 2.2.1 宏观各向异性特征确定地应力方向结果

图 7 展示了各深度岩心不同方向的波速值。结果显示，白云岩和磷矿岩的波速值存在明显的差异，白云岩的波速值明显高于磷矿岩的波速值。各试样在相互正交的两个方向上波速存在较大差异，反映了深部岩心因卸荷导致的各向异性损伤。基于这些损伤特征，本文将波速最小的方向(红色椭圆短轴方向)确定为最大水平主应力方向，将波速最大的方向(红色椭圆长轴方向)确定为最小水平主应力方向。通过波速值的方向性分布，能够确定岩心所受主应力的方向。

### 2.2.2 微观各向异性特征确定地应力方向结果

选取了 1 076 m 泥质粉砂岩进行核磁共振成像，在测试过程中，根据声波测试所得到的最小波速方向(最大卸荷损伤、最大主应力方向)置于竖直方向，结果如图 8 所示。黄-红色部分为含水量高的区域，即试样中孔隙度较大。试样中孔隙度分布呈各向异

性，试样垂直方向孔隙度大，该方向卸荷损伤大，为最大主应力方向；而水平方向试样孔隙度相对较小，该方向卸荷损伤小，为最小主应力方向。此外，各试样高孔隙度均呈现与水平方向平行的条带状，显示试样在垂直于最大主应力方向形成卸荷损伤。

按前述量化 MRI 图像各向损伤的方法，获得试样 MRI 量化结果，如图 9 所示。可见，各试样的孔隙度在近垂直方向上最大，在近水平方向上最小，该结果与波速测试结果一致。证明钻取深部岩心过程，卸荷作用将在试样中产生损伤，且该各向异性特征可以通过波速及 MRI 进行识别。通过识别该特征可确定深部岩心先前所受的最大、最小水平主应力方向。结合测井资料及地质条件，最大水平主应力方向以 NW 向为主。

### 2.2.3 地应力大小 DRA 测试结果

(1)DRA 测试应力应变曲线。图 10 为各试样全过程应力应变曲线。在两次加载过程中，各试样的应变差存在不同程度的变化，根据两次加载过程中应变的变化特征可知，白云岩的应变差变化较为平缓，拐点不明显，变形记忆效应较弱；磷矿石的应变差变化较大，拐点较为明显，变形记忆效应较强；砂岩的应变差出现明显的波动，拐点较为突出，变形记忆效应最强。

(2)DRA 曲线分析。根据式(1)计算并获得 DRA

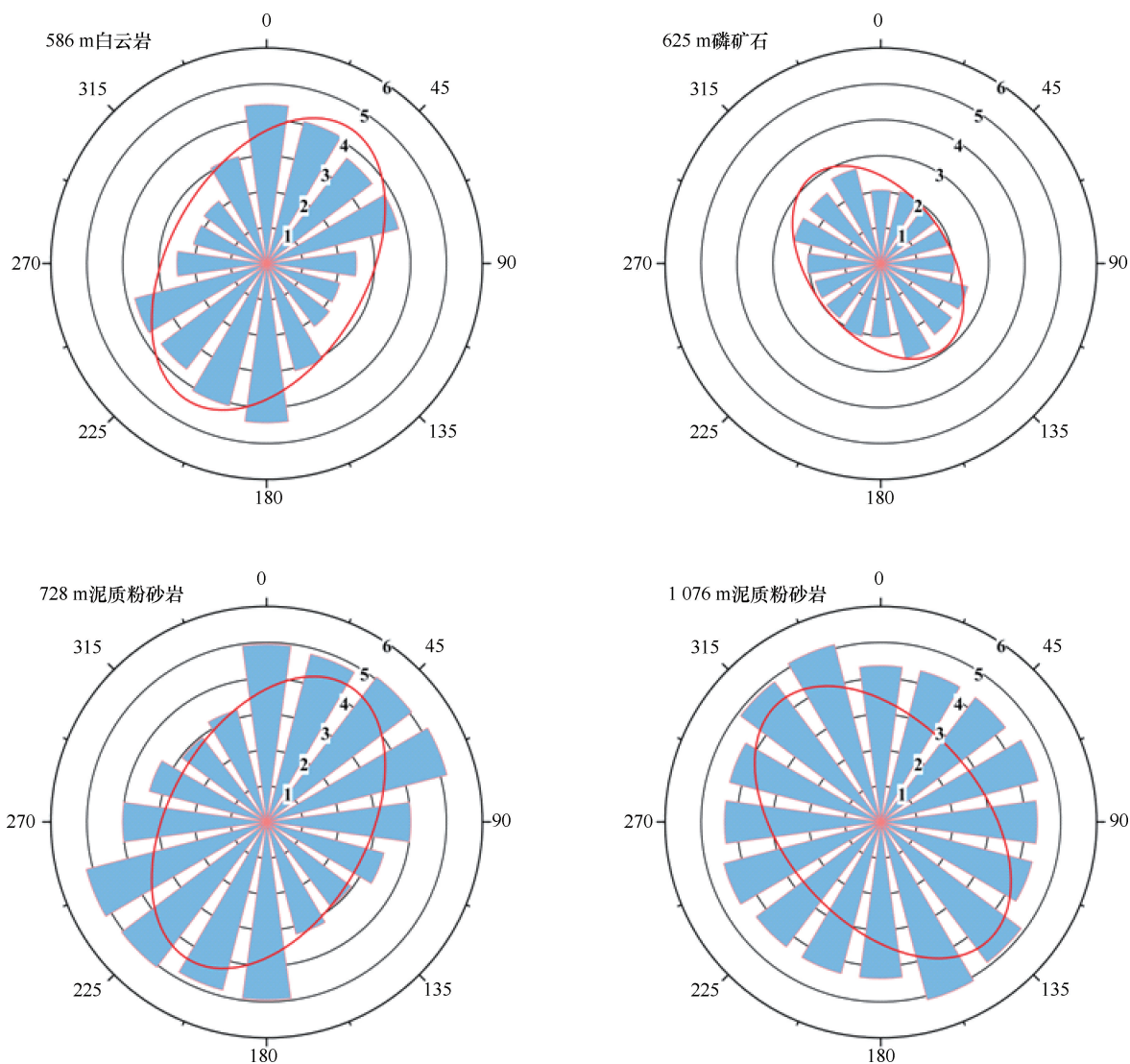


图7 岩心波速各向异性特征测试结果

Fig. 7 Results of anisotropic characteristics of wave velocity

曲线, 如图 11 所示。在所有试样的 DRA 曲线中均观察到明显的拐点, 这些拐点对应的应力  $\sigma_{DRA}$  即为先前加载应力的记忆信息  $\sigma_p$ , 指示了相应方向上的主应力大小。这表明, DRA 法能够通过应变差曲线的特征有效识别岩体先前所受的地应力, 表现出较高的灵敏度和可靠性。根据 SETO 等<sup>[28]</sup> 总结的四种 DRA 理想曲线类型, 可以将 CH-08、CL-01、CS-03、CS-17、CS-18 曲线归类为二型曲线, 将 CS-19 归类为三型曲线。由此确定的应力作为  $\sigma_{DRA}$  如图 11 所示。

根据 DRA 法测得的地应力数据, 得出鸡公岭磷矿区的地应力测量结果如表 2 所列。竖直应力根据围岩平均容重及埋藏深度计算得到, 总体上水平主应力大于垂直主应力, 即  $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ 。

表 2 鸡公岭磷矿区地应力测量结果

Table 2 In-situ stress measurement results of Jigongling phosphate mine area

编号	深度/m	最大主应力 $\sigma_H$ /MPa	最小主应力 $\sigma_h$ /MPa	竖直应力 $\sigma_V$ /MPa	峰值应力/MPa
CH-08	586	—	5.0	15.9	28
CL-01	625	—	7.0	17.0	47
CS-03	1 076	25.6	—	28.6	58
CS-17	728	—	19.5	19.4	75
CS-18	728	—	15.5	19.4	89
CS-19	728	21.1	—	19.4	84

## 2.3 岩爆倾向性判别指标

### 2.3.1 弹性应变能指数 $W_{et}$

KIDYBINSKI<sup>[8]</sup> 利用弹性应变能储存指数来判定岩石的岩爆倾向性。应变能储存指数是岩石的峰值强度前岩样中弹性应变能储存能量与塑性变形耗散的能

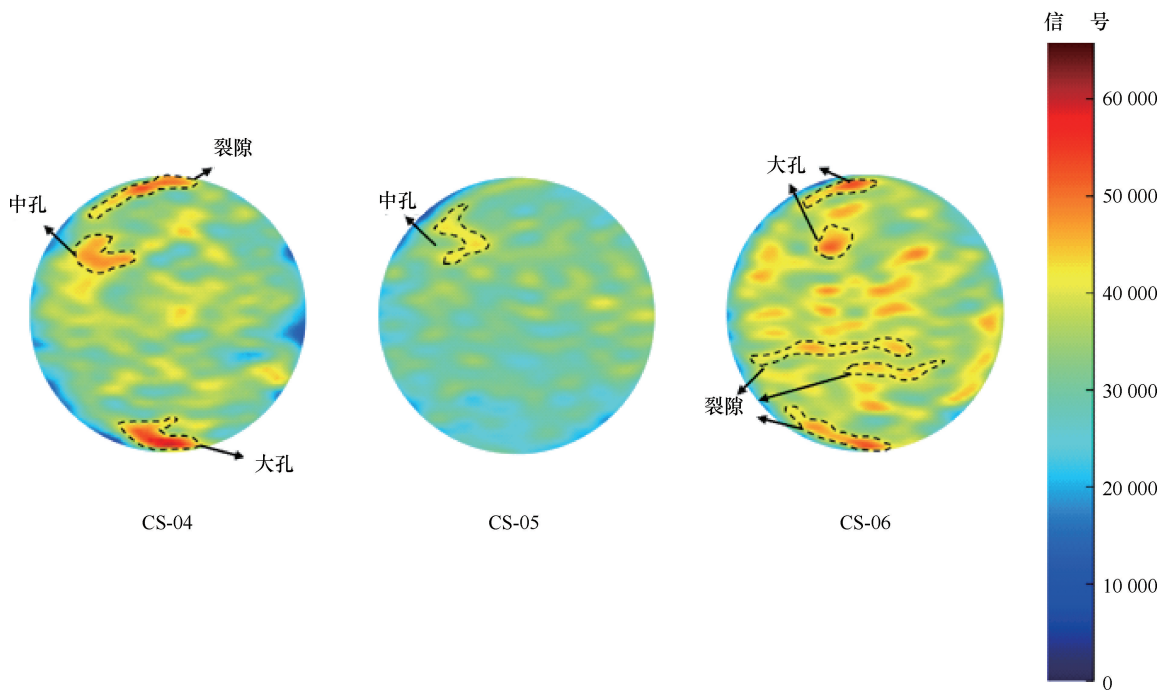


图8 岩心核磁共振成像各向异性特征测试结果  
Fig.8 Results of anisotropic characteristics of MRI

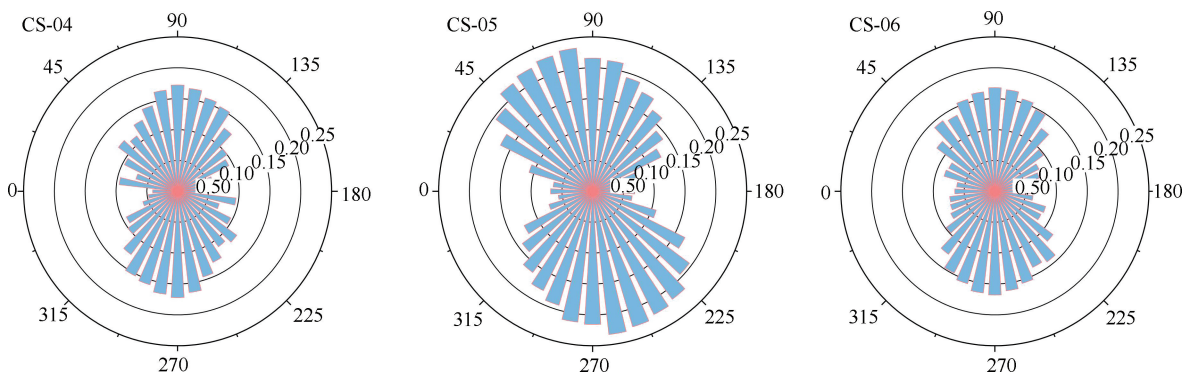


图9 岩心核磁共振成像各向异性特征量化结果  
Fig.9 Quantitative results of anisotropic characteristics of MRI

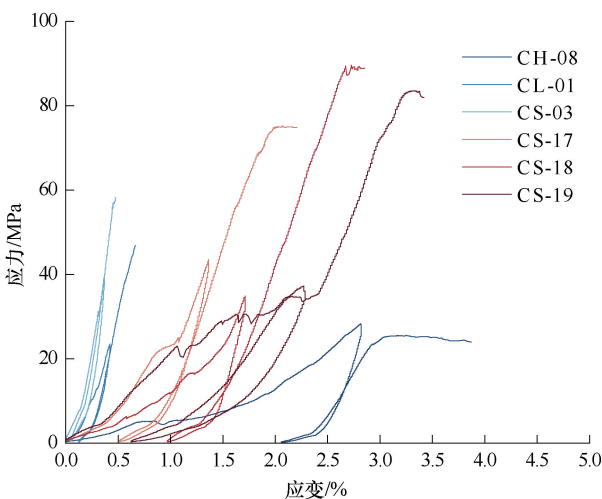


图10 各试样应力应变曲线

Fig.10 The stress-strain curve of rock samples

量之比, 是岩爆倾向性评价的重要参数, 用于衡量岩石在脆性破坏过程中所释放的能量

$$W_{et} = \varphi_{sp} / \varphi_{st} \quad (2)$$

$$\varphi_{sp} = \int f_1(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

$$\varphi_{st} = \varphi_t - \varphi_{sp} = \int f(\varepsilon) d\varepsilon - \int f_1(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

式中,  $W_{et}$  为应变能储存指数;  $\varphi_{sp}$  为弹性应变能 (kJ);  $\varphi_{st}$  为耗散的塑性应变能 (kJ);  $\varphi_t$  为总应变能 (kJ)。根据循环加卸载试验结果, 按式(2)计算各试样弹性应变能如图12所示。

根据弹性应变能指数的大小, 岩爆分级标准如下: 无岩爆 ( $W_{et} < 2.0$ ), 弱岩爆 ( $W_{et} = 2.0 \sim 3.5$ ), 中等岩爆 ( $W_{et} = 3.5 \sim 5.0$ ), 强烈岩爆 ( $W_{et} > 5.0$ )。鸡公岭磷矿各深度围岩  $W_{et}$  如表3所列。

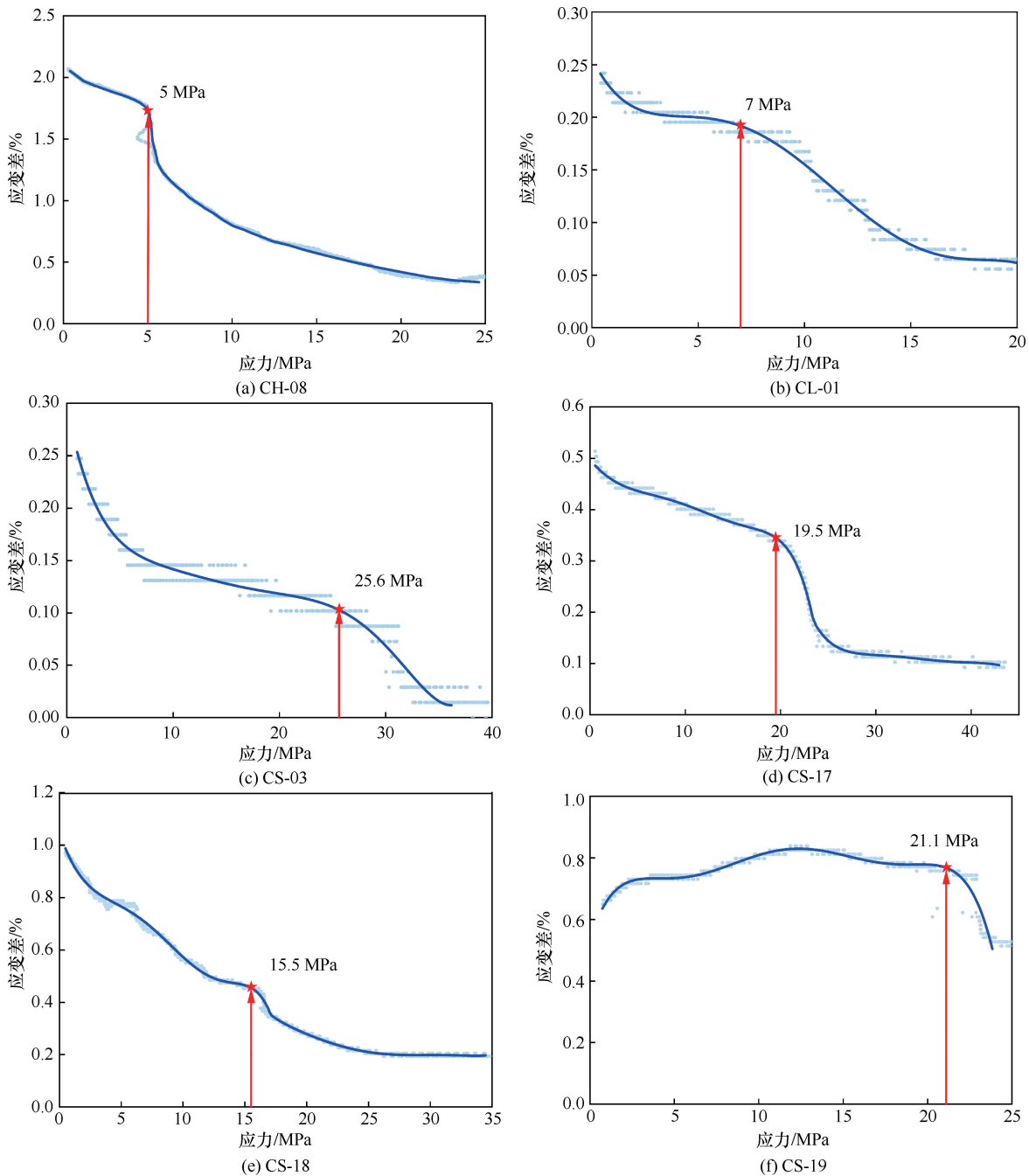


图 11 DRA 试验结果

Fig. 11 The results of DRA tests

表 3 鸡公岭磷矿各深度围岩  $W_{et}$

Table 3 Results of  $W_{et}$  of surrounding rock at different depths in Jigongling Phosphate Mine

各深度围岩	586 m 白云岩	625 m 磷矿石	728 m 白云岩	1 076 m 泥质粉砂岩
$W_{et}$	1.53	1.19	0.63	1.80

### 2.3.2 应力强度比 $R$

研究表明, 应力强度比( $R$ )是评价岩爆倾向性的关键参数之一。随着  $R$  值的增加, 岩石的岩爆倾向

性也随之增强。特别是在高地应力条件下,  $R$  值的变化对岩石的脆性破坏和岩爆的发生具有显著影响。本研究按照《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)中岩爆判别方法<sup>[41]</sup>, 采用强度应力比指标结合典型断面切向应力, 对鸡公岭磷矿岩爆烈度进行综合判别。 $R$  值越大, 岩爆倾向性越高, 岩爆分级标准: 无岩爆( $R < 0.3$ ), 弱岩爆( $R = 0.3 \sim 0.5$ ), 中等岩爆( $R = 0.5 \sim 0.7$ ), 强烈岩爆( $R > 0.7$ )。鸡公岭磷矿各深度围岩应力强度比如表 4 所列。

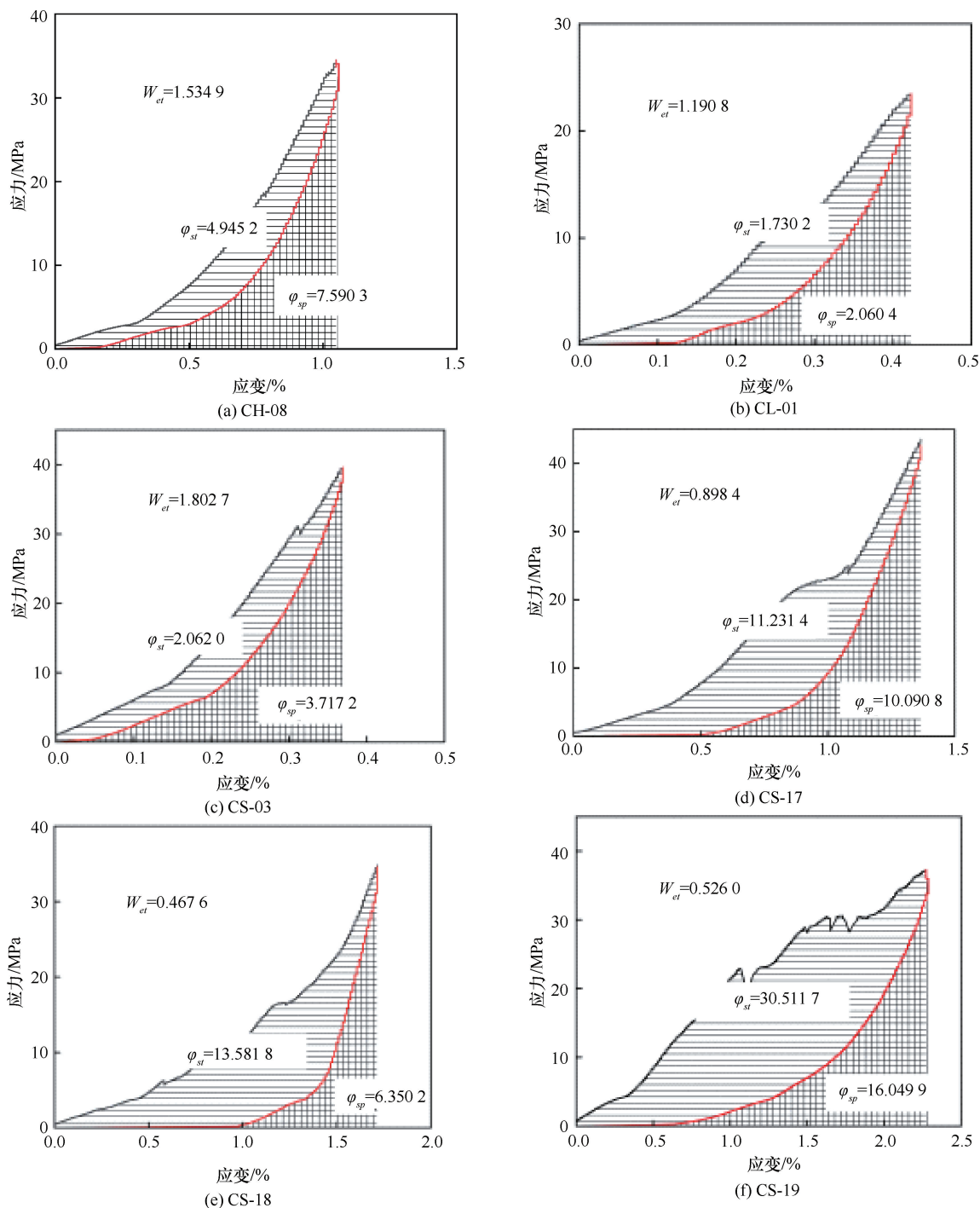


图 12 弹性应变能指数测定结果

Fig. 12 Test results of elastic strain energy index

表 4 鸡公岭磷矿各深度围岩应力强度比

Table 4 Results of  $R$  of surrounding rock at different depths in Jigongling Phosphate Mine

各深度围岩	586 m 白云岩	625 m 磷矿石	728 m 白云岩	1 076 m 泥质粉砂岩
$R$	1.50	0.82	0.67	1.40

### 2.3.3 脆性指数 $F$

岩石脆性指数法 ( $F$ ) 是评价岩爆倾向指标的重要参数。脆性指数 ( $F$ ) 是根据岩石的单轴饱和抗压强度

$R_c$  和抗拉强度  $R_t$  之比, 来评价岩石的岩爆倾向性, 其表达式为

$$F = R_c/R_t \quad (5)$$

一般来说,  $F$  越大说明岩石的脆性越大, 则岩爆发生的倾向性越大, 以脆性指数作为判据的岩爆分级评价准则: 无岩爆 ( $F < 5$ ), 弱岩爆 ( $F = 5 \sim 10$ ), 中等岩爆 ( $F = 10 \sim 18$ ), 强烈岩爆 ( $F > 18$ )。鸡公岭磷矿各深度围岩脆性指数如表 5 所列。

表5 鸡公岭磷矿各深度围岩脆性指数  $F$ Table 5 Results of  $F$  of surrounding rock at different depths in Jigongling Phosphate Mine

各深度围岩	586 m 白云岩	625 m 磷矿石	728 m 白云岩	1 076 m 泥质粉砂岩
$F$	14.01	19.15	14.01	14.95

### 2.3.4 岩体质量指标 $RQD$

以岩体质量指标作为判据的岩爆分级评价准则:无岩爆( $RQD < 25$ ),弱岩爆( $RQD = 25 \sim 50$ ),中等岩爆( $RQD = 50 \sim 70$ ),强烈岩爆( $RQD > 70$ )。根据测井资料,鸡公岭磷矿各深度围岩  $RQD$  如表6所列。

表6 鸡公岭磷矿各深度围岩  $RQD$ Table 6 Results of  $RQD$  of surrounding rock at different depths in Jigongling Phosphate Mine

各深度围岩	586 m 白云岩	625 m 磷矿石	728 m 白云岩	1 076 m 泥质粉砂岩
$RQD/\%$	78	73	81	82

综上,本次选取的岩爆倾向性评价准则共有4组,分别为弹性应变能指数  $W_{et}$ 、强度应力比  $R$ 、脆性指数  $F$ 、岩体质量指标  $RQD$ ,其单指标评价准则汇总如表7所列。

表7 单指标岩爆倾向性评价准则汇总

Table 7 Summary of single index rockburst prediction criteria

岩爆等级	弹性应变能 指数 $W_{et}$	强度应力比 $R$	脆性指数 $F$	$RQD/\%$
无岩爆	<2	<0.3	<5	<25
弱岩爆	2~3.5	0.3~0.5	5~10	25~50
中等岩爆	3.5~5.0	0.5~0.7	10~18	50~70
强烈岩爆	>5.0	>0.7	>18	>70

### 2.4 岩爆倾向性评价结果

研究表明,能量特征( $W_{et}$ )、强度应力比( $R$ )、脆性( $F$ )、岩体完整性( $RQD$ )参数是确定岩爆倾向性的关键参数<sup>[42]</sup>,根据表7可判定鸡公岭磷矿4种主要岩石的岩爆倾向性强弱,如表8所列。586 m白云岩可能发生中等-强烈岩爆,625 m磷矿石可能发生强烈岩爆,728 m白云岩可能发生中等岩爆,1 076 m泥质粉砂岩可能发生中等-强烈岩爆。

测量结果表明,研究区域内水平主应力大小和方向直接影响了岩石的能量储存与释放机制。这些应力条件是岩爆发生的关键诱因。地应力的测量结果显示,在不同深度(如728~1 076 m)的围岩中存在显著的应力差异,这种差异直接影响岩石的脆性和能量释放速率,进而影响岩爆倾向性。例如,在

表8 鸡公岭磷矿岩爆倾向性评价结果

Table 8 Evaluation results of rockburst prediction in Jigongling Phosphate Mine

各深度围岩	$W_{et}$	$R$	$F$	$RQD$
586 m 白云岩	无岩爆	强烈岩爆	中等岩爆	强烈岩爆
625 m 磷矿石	无岩爆	强烈岩爆	强烈岩爆	强烈岩爆
728 m 白云岩	无岩爆	中等岩爆	中等岩爆	强烈岩爆
1 076 m 泥质粉砂岩	无岩爆	强烈岩爆	中等岩爆	强烈岩爆

应力较高的区域(如625 m深度),磷矿石表现出更高的脆性指数( $F$ )和应力强度比( $R$ ),这些指标的高值通常意味着岩爆倾向性较强。虽然应力强度比  $R$  较高,但其弹性应变能指数  $W_{et}$  较低,这可能与其复杂的微观结构有关。这种不一致性在实际工程中需要进一步的研究和验证,以确保岩爆倾向性评价的准确性。

## 3 讨论

本研究提出的地应力测量方法在识别地应力方向和测量地应力大小方面表现出较高的可靠性。通过对卸荷诱导的各向异性损伤进行量化分析,并结合DRA加载方法,能够准确地再现岩心在地下原位状态下所受的应力。与传统的水压致裂法和应力解除法相比,本文提出的地应力测量方法具有操作简单、适用性广的优势,尤其适用于资源有限、地应力测量条件受限的深部矿山环境。BUNGER等<sup>[43]</sup>的研究结果也表明,类似的方法在不同地质条件下能够提供与传统方法一致的地应力测量结果,进一步验证了本方法的可靠性和实用性。利用核磁共振成像技术对岩心进行地应力方向识别相对波速测量具有分辨率高、精度高的特点。MRI图像可以量化地应力卸荷引起的各向异性损伤。

地应力大小和岩石的能量特征(如弹性应变能指数)是岩爆倾向性评价的关键参数<sup>[44]</sup>。本研究采用的DRA加载方法,通过循环加卸载试验,测量了岩石的地应力大小,还可获得量化岩石脆性和能量特征参数,这些参数在评价岩爆倾向性方面具有重要参考价值。尤其是对于深部矿山,地应力和能量特征参数的联合测量对岩爆倾向性评价具有重要价值。本研究的结果表明,在鸡公岭磷矿区,部分深部围岩具有中等至强烈的岩爆倾向性,这为矿山安全设计提供了重要的依据。

尽管本研究提出了一种新的地应力测量方法,并在岩爆倾向性评价中取得了初步成果,但仍存在一些不足之处。

(1) 样本量限制。本研究中使用的岩心样本数量有限, 可能不足以完全代表整个矿区的地质条件。因此, 研究结果的普遍性和适用性可能受到限制。未来研究中, 建议增加样本数量, 尤其是来自不同深度和不同岩性的样本, 以提高研究结果的可靠性和扩大适用范围。

(2) 地应力测量的单一性。本研究主要依赖 DRA 加载法和波速测试法来确定地应力大小和方向, 尽管这些方法在实验室环境下表现良好, 但在实际工程应用中, 可能需要结合其他地应力测量方法(如水压致裂法、应力解除法等)进行验证, 以提高测量结果的准确性。

(3) 模型的简化。由于模型的简化处理, 地应力测量过程中可能忽略了一些复杂的地质构造和力学效应。这些简化可能影响最终的岩爆倾向性评价结果。因此, 未来的研究需要考虑更加复杂和全面的多指标评价模型, 以更好地模拟实际情况。

(4) 参数的不确定性。在岩爆倾向性评价过程中, 部分参数(如脆性指数和剩余弹性性能指数)可能具有一定的不确定性, 这种不确定性可能会影响评价结果的准确性和可靠性。未来的研究应进一步优化这些参数的测量和计算方法, 特别是针对不同岩性和应力条件下的参数灵敏度进行深入分析, 以提高岩爆倾向性评价的精度和可靠性。

## 4 结 论

本文提出了一种新的地应力测量方法, 该方法基于深部岩心卸荷损伤测量, 确定地应力方向; 通过应变记忆分析试验(DRA)确定地应力值和岩石力学评价参数; 在此基础上, 对深部矿山岩爆倾向性进行了评价。主要结论如下。

(1) 对矿山深部钻孔岩心开展了波速测试和核磁共振测试, 通过岩心各方向的波速和孔隙度量化了深部岩心各向损伤, 发现深部岩心波速和孔隙度均呈现明显的正交各向异性特征, 最大损伤方向和最小损伤方向正交。深部岩心由于高地应力卸荷造成正交各向异性损伤, 据此可确定深部岩心所受水平主应力方向。

(2) 在岩心最大主应力和最小主应力方向上开展 DRA 试验, DRA 曲线上均出现明显应变差拐点, 据此确定矿山深部水平主应力值: 在 728 m ~ 1 076.2 m 范围内, 最小水平主应力为 15.5 ~ 19.5 MPa, 最大水平主应力为 21.1 ~ 25.6 MPa。

(3) 利用 DRA 法循环加卸载试验确定的弹性应

变能指数  $W_e$ 、脆性指数  $F$ 、应力强度比  $R$ , 以及岩体质量指标  $RQD$  等, 并对鸡公岭磷矿岩爆倾向性进行了强弱分级。结果表明, 研究区域岩爆倾向性可能发生中等岩爆。通过该方法可实现快速有效地评价岩爆倾向性, 可在矿山建设前期设计阶段为矿山安全管理提供重要的决策依据。

## 参考文献 (References):

- [1] 曹伟, 李均, 薛成, 等. 基于多元线性回归的深部复杂地应力场反演分析[J]. 铁道勘察, 2024, 50(6): 41-49.  
CAO W, LI J, XUE C, et al. Inversion analysis of deep complex in-situ stress field based on multiple linear regression [J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(6): 41-49.
- [2] 陶志刚, 赵军政, 胡杰, 等. 引汉济渭工程秦岭引水隧洞岩爆三维 NPR 支护技术[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1165-1173.  
TAO Z G, ZHAO J Z, HU J, et al. Three-dimensional NPR support technology for rockburst in the Qinling diversion tunnel of the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1165-1173.
- [3] RUSSENE B. Analysis of Rock Spalling for Tunnels in Steep Valley Sides [D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1974.
- [4] BROWN E, HOEK E. Underground Excavations in Rock [M]. Boca Raton: CRC Press, 1980.
- [5] 柳禄湧, 李凯舟, 王能伟, 等. 山东招远水旺庄金矿深部地应力特征及其岩爆倾向性分析 [J]. 地质力学学报, 2023, 29(3): 417-429.  
LIU L Y, LI K Z, WANG N W, et al. In-situ stress characteristics and rockburst tendency of surrounding rocks in the Shuiwangzhuang gold deposit, Zhaoyuan, Shandong Province [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(3): 417-429.
- [6] ZHANG W, FENG X T, XIAO Y X, et al. A rockburst intensity criterion based on the Geological Strength Index, experiences learned from a deep tunnel [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7): 3585-3603.
- [7] LIU X Q, WANG G, SONG L B, et al. A new rockburst criterion of stress: Strength ratio considering stress distribution of surrounding rock [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 82(1): 29.
- [8] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295-304.
- [9] GONG F Q, LUO S, JIANG Q, et al. Theoretical verification of the rationality of strain energy storage index as rockburst criterion based on linear energy storage law [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(6): 1737-1746.
- [10] DU K, LUO X Y, YANG S G, et al. An insight from energy index characterization to determine the proneness of rockburst for hard rock

- [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 35: 100478.
- [11] LEVEILLE P, SEPEHRI M, APEL D B. Rockbursting potential of kimberlite: A case study of diavik diamond mine [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(12): 3223-3231.
- [12] 唐礼忠, 王文星. 一种新的岩爆倾向性指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(6): 874-878.  
TANG L Z, WANG W X. New rock burst proneness index [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 874-878.
- [13] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1114-1122.  
ZHOU H, MENG F Z, ZHANG C Q, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1114-1122.
- [14] TARASOV B G, RANDOLPH M F. Superbrittleness of rocks and earthquake activity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(6): 888-898.
- [15] ZHANG G, CHEN J X, HU B. Prediction and control of rockburst during deep excavation of a gold mine in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1607-1612.
- [16] 李天斌, 肖学沛. 地下工程岩爆预测的综合集成方法 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(5): 533-540.  
LI Tianbin, XIAO Xuepei. Comprehensively integrated methods of rockburst prediction in underground engineering [J]. *Advances In Earth Science*, 2008, 23(5): 533-540.
- [17] 陈龙. 深地高应力环境岩体破裂演化机理及岩爆预测研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.  
CHEN Long. Study on Evolution Mechanism of Rock Fracture and Rockburst Prediction in Deep High Stress Environment [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [18] FAIRHURST C. Measurement of in-situ rock stresses. With particular reference to hydraulic fracturing [J]. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1964, 2: 129-147.
- [19] VON SCHONFELDT H, FAIRHURST C. Field experiments on hydraulic fracturing [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1972, 12(1): 69-77.
- [20] HAIMSON B C. The hydrofracturing stress measuring method and recent field results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(4): 167-178.
- [21] GAY N C. In-situ stress measurements in southern Africa [M]// PAVONI N, GREEN R. *Developments in Geotectonics*. Amsterdam: Elsevier, 1975: 447-459.
- [22] HAST N. The state of stresses in the upper part of the earth's crust: A reply[J]. *Engineering Geology*, 1969, 3(4): 339-344.
- [23] SJÖBERG J, CHRISTIANSSON R, HUDSON J A. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation: Part 2: overcoring methods[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(7/8): 999-1010.
- [24] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation: Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(7/8): 1011-1020.
- [25] SETO M, NAG D K, VUTUKURI V S. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 1999, 17(3): 241-266.
- [26] VILLAESCUSA E, SETO M, BAIRD G. Stress measurements from oriented core [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(5): 603-615.
- [27] ZHAO X D. Application of the Kaiser effect of acoustic emission to measure vertical stress in an underground mine [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2012, 54(12): 662-666.
- [28] SETO M, SOMA N, MAEDA N, et al. HLW disposal in Japan. Methodology and case studies of stress measurement by the AE and DRA methods using rock core[J]. *Shigen-to-Sozai*, 2001, 117(10): 829-835.
- [29] YABE Y, YAMAMOTO K, SATO N, et al. Comparison of stress state around the Atera fault, central Japan, estimated using boring core samples and by improved hydraulic fracture tests[J]. *Earth, Planets and Space*, 2010, 62(3): 257-268.
- [30] FRASER D, GHOLAMI R, SARMA DIVALEH M. Deformation rate analysis: How to determine in situ stresses in unconventional gas reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 146: 104892.
- [31] KANAGAWA T, HAYASHI M, NAKASA H. Estimation of spatial geo-stress components in rock samples using the Kaiser effect of acoustic emission [J]. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1977, 1977(258): 63-75.
- [32] YAMAMOTO K, KUWAHARA Y, KATO N, et al. Deformation rate analysis: A new method for in situ stress estimation from inelastic deformation of rock samples under uni-axial compression[J]. *Tohoku Geophysical Journal*, 1990, 33: 127-147.
- [33] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(2): 151-171.
- [34] BAI X, ZHANG D M, WANG H, et al. A novel in situ stress measurement method based on acoustic emission Kaiser effect: A theoretical and experimental study[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(10): 181263.
- [35] LI X B, CHEN J Z, MA C D, et al. A novel in-situ stress measurement method incorporating non-oriented core ground reorientation and acoustic emission: A case study of a deep borehole [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 152: 105079.
- [36] MEGLIS I L, CHOW T, MARTIN C D, et al. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography [J].

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 25-34.
- [37] MITCHELL J, CHANDRASEKERA T C, HOLLAND D J, et al. Magnetic resonance imaging in laboratory petrophysical core analysis [J]. Physics Reports, 2013, 526(3): 165-225.
- [38] UTAGAWA M, SETO M, KATSUYAMA K. Estimation of initial stress by deformation rate analysis (DRA)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1997, 34(3/4): 501.
- [39] HUNT S P, MEYERS A G, LOUCHNIKOV V. Modelling the Kaiser effect and deformation rate analysis in sandstone using the discrete element method [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7): 611-621.
- [40] SATO N, YABE Y, YAMAMOTO K, et al. In situ stresses near the nojima fault estimated by deformation rate analysis[J]. Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan 2nd Ser), 2003, 56(2): 157-169.
- [41] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范 第一册 土建工程: JTG3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Tunnels Section 1 Civil Engineering: JTG 3370.1—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [42] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 632-659.
- [43] BUNGER A, HIGGINS J, HUANG Y, et al. Integration of triaxial ultrasonic velocity and deformation rate analysis for core-based estimation of stresses at the Utah FORGE geothermal site [J]. Geothermics, 2024, 120: 103008.
- [44] JIANG B, WU K B, WANG Q, et al. Development of physical model test system for fault-slip induced rockburst in underground coal mining [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(4): 2227-2238.

(责任编辑 王海锋)