

基于饱水岩石静动力学试验的水防治屈曲型岩爆分析

王 斌^{1,2}, 赵伏军^{1,2}, 尹士兵³

(1. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
3. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 岩爆发生涉及岩石动力学与岩石静力学两方面的范畴, 水防治岩爆动力学机制研究极少。在对开阳磷矿饱水砂岩静力学与动力学试验的基础上, 基于饱水岩石的静态和动态破坏特征, 从围岩结构效应、应力波边界效应和能量原理等角度, 探讨了水防治层裂屈曲型岩爆的静力学与动力学机制。饱水砂岩的静态破坏表现为张拉与张剪等综合破坏形式, 在一定程度上能抑制岩体劈裂成板的形成, 从而破坏层裂屈曲型岩爆孕育的过程。水影响下的砂岩动态力学性能显著提高, 遇水软化巷道的应力波边界效应影响围岩非主要承载结构, 遇水围岩仍具有相当的承载能力, 从而抑制层裂屈曲型岩爆的发生。饱水砂岩动态破坏块度要明显大于自然风干的岩样, 同时饱水岩体积聚聚弹性能的能力下降, 故能抑制洞室层裂屈曲岩爆的岩块弹射。

关键词: 层裂屈曲型岩爆; 饱水岩石; 动力学机制; 岩爆防治

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1863-07

作者简介: 王 斌(1975-), 男, 广东梅县人, 博士, 讲师, 从事采矿与岩石力学研究。E-mail: wangbinhnust@sina.com。

Prevention of buckling rockburst with water based on statics and dynamics experiments on water-saturated rock

WANG Bin^{1,2}, ZHAO Fu-jun^{1,2}, YIN Tu-bing³

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Key

Laboratory of Safe Mining Technique of Coal Mines, Xiangtan 411201, China; 3. School of Resource and Engineering, Central South
University, Changsha 410083, China)

Abstract: Rockburst involves both rock statics and rock dynamics factors. Its prevention mechanism by means of water is rarely studied on the basis of rock dynamics. According to the static and impact compressive experiments on water-saturated sandstone from Kaiyang Phosphate Mine, the statics and dynamics mechanisms of prevention of rockburst under lamination spallation buckling with water are discussed based on static and dynamic failure characteristics of water-saturated sandstone from different aspects, such as structural effect of surrounding rock, boundary effect of stress wave and energy principle. Static destructions of water-saturated sandstone are shown as extension-shear failure and tensile failure, which can inhibit surrounding rock splitting into plates, so preparation process of rockburst under lamination spallation buckling is prevented. As the dynamic mechanical properties of sandstone influenced by water are significantly improved, the boundary effect of stress wave of water-softened roadway does not influence the main bearing structure of surrounding rock, and its bearing capacity can be maintained to prevent rockburst under lamination spallation buckling. The dynamic broken lumpiness of water-saturated sandstone is larger than that of air-dried sandstone, and its ability of accumulating elastic energy is weakened, therefore ejection of rock block in rockburst under lamination spallation buckling is also weakened.

Key words: rockburst under lamination spallation buckling; water-saturated rock; dynamics mechanism; rockburst prevention

0 引言

岩爆作为高应力条件下结构完整的硬脆性围岩发生动力破坏现象, 仍是世界范围内地下岩体工程中最严重的自然灾害之一。岩爆问题很复杂, 对岩爆的定义与分类尚未统一。Ortlepp 等^[1]较早提出了屈曲型岩爆的概念。冯涛等^[2]认为岩爆发生是由微观断裂到

突发宏观尺度断裂的物理过程, 在考虑洞室表面的受力状态和岩体的破裂特征后, 提出了层裂屈曲型岩爆。层裂屈曲型岩爆表现为板裂破坏并伴随有岩块的弹

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974059, 50934006); 国家重点基础研究计划(973计划)项目(2010CB732004)
收稿日期: 2010-09-28

射, 经历了“劈裂成板-剪断成块-块片弹射”的过程, 如图1, 其烈度属轻微或中等岩爆, 影响巷道施工安全。

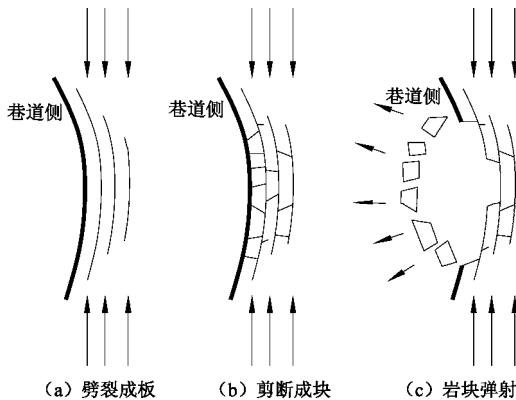


图1 层裂曲屈型岩爆演化模型

Fig. 1 Evolutionary models of rockburst under lamination
spallation buckling

防治岩爆的措施与手段很多, 对岩爆洞室围岩喷射高压水或钻孔注水是岩爆防治常用的方法。水防治岩爆的方法是根据众多岩爆实录提出的, 因为发生岩爆的洞室通常是岩石干燥无水的情况^[3]。目前水对岩爆防治的理论基础主要是基于水损伤、水软化等静力学理论研究, 往往存在局限性。因为对于处于高地应力的硬岩, 岩体内裂隙受到注水的润滑作用可能触发引起“地震”反而起不到软化围岩的作用, 同时发生岩爆的岩石通常表现为低渗透性, 水较难进入岩石结构体中, 因而不易达到软化围岩的效果。岩爆的发生涉及岩石本身的力学性质, 故开展岩爆岩石的力学试验, 从岩石本身的力学性质出发, 研究岩爆发生机制是重要途径。岩爆是开挖后洞室围岩的动力破坏, 在巷道壁及其附近, 围岩轴向应力变化不大, 切向应力加载, 径向应力卸载。因此对岩爆的试验研究按加载方式可分为加载试验和卸载试验两大类, 目前以卸围压法的卸载试验研究岩爆发生机理日益得到重视^[4], 同时加载试验仍广泛应用于岩爆研究中。岩爆发生涉及岩石动力学与岩石静力学两方面的范畴^[5], 水防治岩爆应该也存在动力学方面的因素。目前从饱水岩石静力学与动力学加载试验的角度进行岩爆研究的还不多, 同时水防治岩爆动力学机制研究也极少。本文以贵阳市开阳磷业集团马路坪矿岩爆巷道砂岩为研究对象, 砂岩试样直径为75 mm, 分别采用电液伺服控制材料试验系统和SHPB试验系统上进行饱水条件下压缩试验研究, 探讨水防治洞室层裂曲岩爆的静力学与动力学机制。

1 饱水砂岩静态和动态压缩试验

1.1 饱水试样

试验岩样取自贵阳市开阳磷业集团马路坪矿三维应力测量同一地段测点的75 mm直径钻孔岩芯, 如图2所示。试样分别按静态力学试验和冲击动态试验制备。静态试验试样加工为 $\phi 75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的圆柱体, 两端表面平行度在0.05 mm以内, 表面平整度在0.02 mm以内。冲击试验试样长径比控制在0.5左右, 加工成 $\phi 75 \text{ mm} \times 37.5 \text{ mm}$ 的圆柱体, 其表面平行度和平整度与静态试验试样一致。加工好的试样自然风干后, 为使两类试验岩石有较好的饱水效果^[6], 按照《水利水电工程岩石试验规程》自由吸水法的步骤, 首先浸水至试样1/3高度处, 12 h后, 再浸入试样的2/3长度, 再过12 h, 浸入试样的全部长度; 浸泡30 d后制成饱水试样。



图2 75 mm 直径砂岩岩芯

Fig. 2 Sandstone core samples with a diameter of 75 mm

1.2 饱水砂岩静态和动态力学特性

静态加载试验在200 t量程的INSTRON 1346型电液伺服控制材料试验机上进行, 单轴压缩试验的加载应变率为 10^{-5} s^{-1} ; 动态加载试验在经中南大学改进研制的75 mm杆径SHPB试验装置上进行, 获得的加载应变率为 52 s^{-1} 左右, 如图3。



(a) INSTRON 1346型试验系统



(b) $\phi 75 \text{ mm}$ 杆径SHPB试验系统

图3 静态和动态加载试验装置

Fig. 3 Static and dynamic load test apparatus

图 4 为两种实验得到的自然风干与饱水砂岩的典型静态及动态应力 – 应变曲线。由图 4 可以看出, 饱水砂岩的静态强度比自然风干状态的静态强度大幅度降低, 这与目前的研究结果是一致的^[7]; 饱水砂岩动态弹模与风干砂岩的动态弹模相近; 饱水砂岩动态屈服应力比风干砂岩的动态屈服应力略高, 比饱水砂岩静态屈服应力提高近 2 倍^[6]。

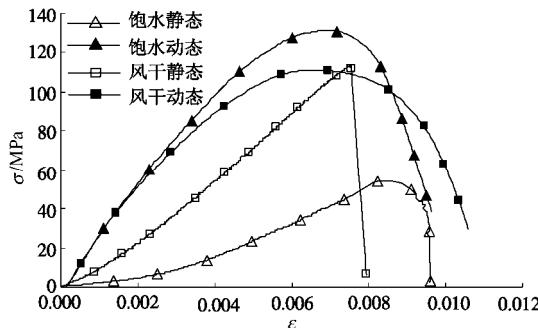


图 4 自然风干与饱水砂岩的静态及动态应力 – 应变曲线

Fig. 4 Static and dynamic stress and strain curves of air-dried and water-saturated sandstone

1.3 饱水砂岩静态和动态破坏特征

自然风干和饱水砂岩试样的单轴静载压缩典型破坏形态, 如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 自然风干砂岩试样静态破坏裂缝与试样轴线基本平行, 表现为劈裂张拉破坏, 但饱水砂岩试样的静态破坏情况比较复杂, 破坏裂缝与试样轴线成平行、斜交和垂直 3 种形态, 表现为张拉与张剪等综合破坏形式。

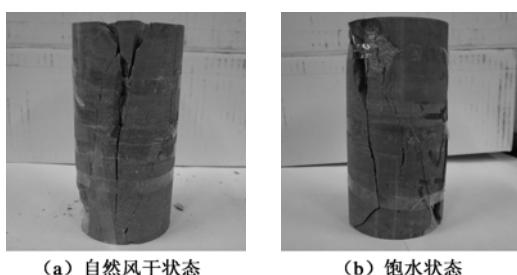


图 5 砂岩试样静态加载破坏模式

Fig. 5 Static load failure modes of sandstone samples

自然风干和饱水砂岩试样的动态冲击破坏形态, 如图 6 所示。试验结果表明, 自然风干砂岩受冲击破坏更为粉碎, 其块度明显小于饱水岩石的, 文献[6]认为其原因在于岩石孔隙自由水黏结力和 Stefan 效应的影响。

2 基于静力学的水防治屈曲岩爆分析

目前, 基于岩石静力学试验的水防治岩爆的主要观点为: 围岩遇水后软化, 导致静态强度下降, 变形特性明显“塑化”; 遇水岩体积聚弹性能的能力下降,

以塑性变形方式消耗弹性能的能力增加, 并可将围岩最大切向应力向深部转移, 从而遇水岩体的岩爆倾向性大为减弱^[8]。由图 4 的静态应力应变曲线能较好地验证这一观点。如前所述, 岩爆发生涉及岩石本身力学性质, 常用单轴静加载试验模拟岩爆, 直接利用岩石力学性质试验结果, 根据岩爆判据定量研究饱水岩体岩爆倾向性是常用的方法, 相关的岩爆判据也较多, 如弹性应变能指数、冲击能量指数等, 根据图 4 曲线, 可得到开阳磷矿砂岩饱水后, 冲击能量指数由 20.85 降为了 7.92。从试验获得的应力应变曲线进行水防治岩爆的研究较多^[9], 本文不再赘述, 拟从饱水岩石试验的破坏形态特征进行分析。

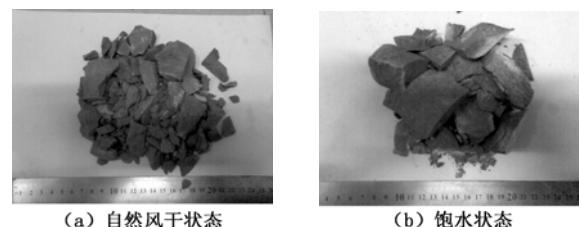


图 6 砂岩试样动态加载破坏模式

Fig. 6 Dynamic load failure modes of sandstone samples

岩爆破坏的断裂基本形式(劈裂破坏和剪切破坏两种主要形式)与一般的岩石力学破坏断裂机制相近^[10], 通过观察岩爆岩石破坏后宏观或微观的破坏分布特征, 可以理解岩爆过程的破坏机制。洞室层裂屈曲岩爆经历了图 1 所示“劈裂成板 – 剪断成块 – 块片弹射”渐进破坏的全过程, “劈裂成板”是层裂屈曲型岩爆的起始破坏特征, 也是岩爆的孕育阶段。因此了解岩石劈裂的原因, 对研究岩爆的发生是很有帮助的。Namat-Nasser 等^[11]的试验证明了洞室周边自由表面受切向应力作用, 扩展的裂纹扩展方向平行于切向应力方向。徐林生等^[12]对二郎山公路隧道岩爆岩石试验研究表明, 岩石在单轴加载压缩状态下, 均发生与轴向基本平行的张性破裂。张黎明等^[13]对粉砂岩进行峰后卸围压试验表明, 岩样沿轴向存在相当数量的平行于轴向应力方向的劈裂面。可见, 洞室层裂屈曲岩爆中的“劈裂成板”与围岩受压及卸荷有关。就单轴压缩条件下, 王明洋等^[14]认为在内部的缺陷附近将发生应力集中, 岩体中将产生垂直于加载方向的拉应力, 一旦局部拉应力达到材料的抗拉强度, 缺陷将快速扩展, 进而导致岩体的劈裂。

应该看到, 上述研究是在岩石无水情况下进行的, 本文自然风干砂岩试样单轴静载压缩宏观破坏形态也能验证上述研究结论, 风干试样破坏裂缝与试样轴线基本平行, 具有劈裂成板的特征。但砂岩试样饱水后, 其破坏形式迥然不同, 破坏裂缝与试样轴线成平行、

斜交和垂直 3 种形态, 不具备劈裂成板的特征。可见, 围岩遇水后, 水在一定程度上能抑制岩体劈裂成板的形成, 从而破坏岩爆孕育的过程, 起到防治层裂屈曲型岩爆的作用。

3 基于动力学的水防治屈曲岩爆分析

从岩爆发生的特点及表现形式上看, 它的学科属性应当归于岩石动力学的范畴^[5]。岩石静力学理论在岩爆研究中是重要的, 但还不能覆盖岩爆的全部机理, 以此为基础的岩爆防治研究也是不全面的^[15], 水防治岩爆应该存在动力学方面的原因。

3.1 围岩结构效应与应力波边界效应

巷道围岩自承载结构是客观存在的。钱鸣高等^[16]认为地下洞室上覆岩体的重量 95% 以上由洞室周围岩体承受, 这说明, 洞室围岩存在着某种形式的自稳结构。贺永年等^[17]认为地下工程或岩石工程的结构稳定性要从结构效应进行分析。康红普^[18]提出围岩“关键圈”的观点, 以此为基础, 王斌等^[19]提出“围岩自稳时变结构”的概念, 认为岩爆是满足某种条件下围岩自稳时变结构调整的过程。围岩结构的形成与岩性、施工方法等多种因素有关, 层裂屈曲型岩爆发生前, 围岩发生平行于洞壁自由面的板状破裂是一种典型的情况, 相应地形成由破裂区和弹性未破裂区岩体构成的控制围岩整体承载能力的承载结构。从承载能力的角度分析^[20], 弹性未破裂区是主要的承载结构, 破裂区虽已破坏, 但仍有一定强度仍可形成承载结构。围岩结构在研究深部岩体工程稳定性起重要作用, 这也为水防治岩爆的动力学研究提供了一种思路。

岩爆的动力学问题较多关注来源于外界施工过程中或之后所受爆破振动、机械振动、地震及相邻岩爆产生的应力波。Litwiniszyn^[21]将岩爆看成是由洞室上方岩层重力断裂的冲击波引发的。李夕兵等^[22]认为承受高应力的岩体, 较小的外界动力扰动也可能会使其诱发岩爆。高明仕等^[23]认为巷道围岩结构与应力波冲击诱发岩爆有密切关系。应力波在穿过两介质界面时, 由于两侧介质特性的差异, 将产生反射波。界面处的反射波应力 σ_r 、透射波应力 σ_t 与入射波应力 σ_i 之间的关系有^[24]

$$\sigma_t = \frac{2\sigma_i}{n+1}, \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_i(1-n)}{n+1}. \quad (2)$$

式中, $n = \sqrt{\frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2}}$, ρ_1, ρ_2 及 E_1, E_2 分别为界面两侧岩体的密度和弹性模量。

从式(1)、(2)可以看出, 当应力波从相对坚硬

的岩层传入相对软弱的岩层, 由于 $n > 1$, 压缩波则在坚硬介质侧界面处产生拉应力, 且两介质的弹模相差越大, 拉应力值越高。对于围岩体中的具有一定张开度裂隙面, 其本身即为介质特性突变部位, 更易于产生反射拉伸波, 促进其被拉裂, 这种效应可称为应力波的边界效应。文献[25]对冬瓜山铜矿发生的岩爆现象的研究表明应力波边界效应的影响, 在两种岩石接触部位, 特别是自弹性模量较小的岩体向弹性模量较大的岩体推进工作面时, 岩爆发生在弹性模量较大的岩体中; 应力波边界效应也是文献[23]中岩爆控制应用的主要依据。这为水防治岩爆的动力学研究提供了第二种思路。

3.2 自然风干与遇水巷道围岩动力扰动分析

洞室围岩存在自承载结构, 结合深部岩体分区破裂化的研究, 相应地建立了层裂屈曲型岩爆条件下自然风干状态与遇水状态巷道的结构力学模型, 如图 7 所示。图 7(a) 自然风干巷道的围岩结构由板状破裂区和弹性未破裂区组成; 对于图 7(b) 遇水巷道的围岩结构, 假设巷道开挖后及时喷洒水, 水能由壁面岩体的原生裂隙和次生裂隙渗入, 文献[26]揭示脆性岩石的渗透率在其受压扩容阶段会急剧增大, 在峰前或峰后达到极大值, 故可认为能形成水渗透软化区和弹性未破裂区组成的围岩结构。为便于研究, 还假设围岩为平面应变模型, 无蠕变或黏性行为。

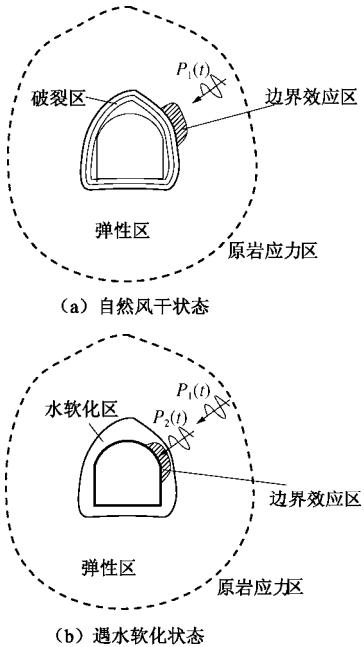


图 7 巷道围岩结构动力扰动模型

Fig. 7 Dynamic disturbance models of surrounding rock structures

对于图 7(a) 所示的自然风干巷道, 当某一动载 $P_1(t)$ 经相对完整的原岩应力区和弹性区岩体向开挖巷道传播, 传递到破裂区和弹性区边界时, 对于自然风干岩石, 无论是静态弹性模量还是动态弹性模量, 破

裂岩石比相对完好岩石都要小, 因此在两区边界发生应力波边界效应, 将首先引起弹性区岩石发生破坏, 产生扩容膨胀, 导致巷道围岩主要承载结构破坏, 进而引发岩爆灾害。

对于图 7(b)所示的遇水软化巷道, 其与自然风干巷道的区别在于, 遇水洞壁边缘的软化区是由于水损伤造成的, 水渗入岩石裂隙, 水损伤岩石具有相对较好的完整性, 这具有力学因素损伤岩石所不具备的特点(力学因素损伤的岩石存在相当多的张开裂隙)^[27]。由前述试验结果, 在动载的作用下, 饱水岩石与自然风干岩石的动态弹性模量和动态强度相近, 也就是说应力波扰动下水损伤软化区与弹性区的边界发生应力波边界效应不明显。应力波 $P_1(t)$ 经过水软化区和弹性区边界后衰减为应力波 $P_2(t)$, 主要在水软化区的洞室壁面产生边界效应。此时应力波边界效应影响的不是主要承载结构, 围岩仍具有相当的承载能力。

另外, 文献[28]对动态条件下干燥和饱水花岗岩拉伸破坏的研究表明, 饱水试样的弹性模量要略高于干燥试样的弹性模量, 同时饱水动态拉断强度比的干燥拉断强度高出许多。因此, 结合本文的动态压缩试验结果, 可认为, 当遇水巷道在水软化区洞室壁面产生应力波边界效应时, 虽然存在拉伸应力波与压缩应力波的叠加作用, 但水影响下的岩石动态性能均显著提高, 围岩不易发生破坏。同时, 与自然风干巷道围岩相比, 应力波 $P_1(t)$ 多经过一个界面的衰减, 因而应力波的能量幅值会有所降低, 破坏能力降低。从饱水岩石的动态力学性能及应力波边界效应作用位置可以看出, 水对防治洞室层裂屈曲岩爆是非常有效的措施手段。

3.3 基于能量原理的岩爆弹射分析

岩爆作为岩体结构的动力失稳现象, 具有岩块弹射、震动等动力学特征, 这是区别于其他形式脆性破坏的最显著特征之一^[5]。洞室层裂屈曲岩爆经历了劈裂成板到块片弹射的过程。岩爆岩块弹射速度是反映岩爆强度的重要指标, 该指标较岩爆震级等指标, 能更直接更具体地用于指导巷道支护设计^[29]。岩石的破碎实质上是能量耗散的过程, 所以能量耗散的分析成为阐明岩石破碎机制的基本途径。假定岩石为理想的弹脆性材料, 考虑岩体单元在外力作用下产生变形, 并假设该物理过程与外界没有热交换, 岩体单元的能量满足以下关系:

$$U=U_d+U_e \quad (3)$$

式中, U 为外力功输入能量; U_d 为单元耗散能, U_e 为单元可释放弹性应变能。

根据式(3), 谢和平等^[30]提出基于可释放能量的岩体整体破坏准则, 外力功转化为的耗散能 U_d , 使岩

体强度逐步丧失, 当逐步增加的可释放应变能 U_e 达到岩体单元某种表面能 U_0 时, U_e 释放使岩体单元发生整体破坏。根据文献[29]可释放应变能 U_e 的能量组成为

$$U_e=U_g+U_f+U_v \quad (4)$$

式中, U_g 为岩体损伤所消耗的能量; U_f 为岩体断裂与破碎所消耗的能量; U_v 为试样碎片崩落、飞溅的动能。

动态荷载作用下, 岩体中储存的可释放应变能往往大于岩体灾变(即岩体破碎)所需要的表面能: $U_e > U_0$, 因此, 剩余能量会构成碎裂岩块的动能。如不计岩块转动, 设 M 为碎裂岩体的质量, 根据式(4), 则 $U_v=\frac{1}{2}Mv^2$, 可求得碎裂岩块平均弹射速度 v ^[30]。

根据图 6 饱水和自然风干砂岩试样的动态破坏模式, 饱水条件下岩样的破坏后块度要明显大于自然风干的岩样, 同时水影响下饱水岩体积聚弹性能的能力下降, 这就使得碎裂岩块的平均弹射速度 v 下降, 甚至可能不发生弹射, 从而降低岩爆破坏的程度, 达到抑制洞室层裂屈曲岩爆目的。

4 结 论

在对饱水砂岩静力学与动力学试验的基础上, 基于饱水岩石的静态和动态破坏特征, 探讨了水防治洞室层裂屈曲岩爆的静力学与动力学机制, 得出了以下几点结论。

(1) 饱水砂岩的静态破坏不同于自然风干砂岩, 破坏裂缝与试样轴线成平行、斜交和垂直 3 种形态, 表现为张拉与张剪等综合破坏形式, 表明水在一定程度上能抑制岩体劈裂成板的形成, 从而破坏层裂屈曲型岩爆孕育的过程。

(2) 饱水砂岩的动力学试验表明, 水影响下的岩石动态性能显著提高, 自然风干巷道的应力波边界效应影响围岩主要承载结构, 而遇水软化巷道的应力波边界效应影响围岩非主要承载结构, 遇水围岩整体仍具有相当的承载能力, 从而抑制层裂屈曲型岩爆的发生。

(3) 动态加载条件下, 饱水砂岩破坏后块度要明显大于自然风干的岩样, 同时水影响下饱水岩体积聚弹性能的能力下降, 故能抑制洞室层裂屈曲岩爆的岩块弹射。

(4) 水防治岩爆不能从根本上克服在措施条件下突发岩爆对施工产生的危害, 要想真正有效的防治岩爆, 还必须在洞室开挖后, 及时采取岩爆支护技术等措施进行综合防治。

参考文献:

- [1] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in

- tunnels and shafts[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 1994, **9**(1): 59 – 65.
- [2] 冯 涛, 潘长良. 洞室岩爆机理的层裂屈曲模型[J]. 中国有色金属学报, 2000, **10**(2): 287 – 290. (FENG Tao, PAN Chang-liang. Lamination spallation buckling model for formation mechanism of rockburst[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, **10**(2): 287 – 290. (in Chinese))
- [3] 张志强, 关宝树, 翁汉民. 岩爆发生条件的基本分析[J]. 铁道学报, 1998, **20**(4): 82 – 85. (ZHANG Zhi-qiang, GUAN Bao-shu, WEN Han-ming. Basic analysis of rock bursting occurrence condition[J]. *Journal of China Railway Society*, 1998, **20**(4): 82 – 85. (in Chinese))
- [4] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 963 – 969. (CHEN Wei-zhong, LÜ Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, **32**(6): 963 – 969. (in Chinese))
- [5] 冯 涛. 岩爆机理与防治理论及应用研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 1999. (FENG Tao. Rockburst mechanism and its prevention and application[D]. Changsha: Central South University of Technology, 1999. (in Chinese))
- [6] 王 斌, 李夕兵, 尹士兵, 等. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 1003 – 1009. (WANG Bin, LI Xi-bing, YIN Tu-bing, et al. Split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment on dynamic strength of water-saturated sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(5): 1003 – 1009. (in Chinese))
- [7] 曹 平, 杨 慧, 江学良, 等. 水岩作用下岩石亚临界裂纹的扩展规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(2): 649 – 654. (CAO Ping, YANG Hui, JIANG Xue-liang, et al. Subcritical crack growth of rock during water-rock interaction[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, **41**(2): 649 – 654. (in Chinese))
- [8] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(10): 2034 – 2042. (ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(10): 2034 – 2042. (in Chinese))
- [9] 刘卫东, 于清军, 吕军恩, 等. 玲珑金矿深部岩爆发生机理分析[J]. 中国矿业, 2009, **18**(5): 112 – 115. (LIU Wei-dong, YU Qin-jun, LÜ Ju-nen, et al. An analysis on mechanism of rock burst during deep mining excavation in Linlong gold mine[J]. *China Mining Magazine*, 2009, **18**(5): 112 – 115. (in Chinese))
- [10] 苗金丽, 何满潮, 李德建, 等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(8): 1593 – 1603. (MIAO Jin-li, HE Man-chao, LI De-jian, et al. Acoustic emission characteristics of granite under strain rockburst test and its micro-fracture mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(8): 1593 – 1603. (in Chinese))
- [11] NAMAT-NASSER S, HORII H. Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**(B8): 6805 – 6821.
- [12] 徐林生, 王兰生, 李天斌. 卸荷状态下岩爆岩石变形破裂机制的实验岩石力学研究[J]. 山地学报, 2000, **18**(增刊): 102 – 107. (XU Lin-sheng, WANG Lan-shen, LI Tian-bin. Experimental rock mechanics study on the rockburst rock deformation-failure mechanism under unloading condition[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, **18**(S0): 102 – 107. (in Chinese))
- [13] 张黎明, 王在泉, 王建新, 等. 岩石卸荷破坏的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, **38**(3): 34 – 37. (ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, WANG Jian-xin, et al. Experimental study on the rock behavior under unloading condition[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, **38**(3): 34 – 37. (in Chinese))
- [14] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 234 – 241. (WANG Ming-yang, FAN Peng-xian, LI Wen-pei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(2): 234 – 241. (in Chinese))
- [15] 刘思好, 徐则民. 基于动 – 静应力耦合的深埋隧道岩爆灾害控制[J]. 自然灾害学报, 2010, **19**(1): 177 – 184. (LIU Si-ju, XU Ze-min. Rock burst control of deeply buried tunnels based on coupling of dynamic and static stresses[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, **19**(1): 177 – 184. (in Chinese))
- [16] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. (QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003. (in Chinese))
- [17] 贺永年, 张后全. 深部围岩分区破裂化理论和实践的讨论

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2369–2375. (HE Yong-nian, ZHANG Hou-quan. Discussion on theory and practice of zonal disintegration in surrounding rocks of deep roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2369–2375. (in Chinese))
- [18] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论[J]. 力学与实践, 1997, 19(1): 34–36. (KANG Hong-pu. Key circle theory of roadway surrounding rock[J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(1): 34–36. (in Chinese))
- [19] 王斌, 李夕兵, 马海鹏, 等. 基于自稳时变结构的岩爆动力源分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 12–17. (WANG Bin, LI Xi-bing, MA Hai-peng, et al. Analysis on energy source of rockburst based on self-sustaining time-varying structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 32(1): 12–17. (in Chinese))
- [20] 陈学华, 沈海鸿, 王善勇. 巷道围岩自稳结构原理及其影响因素研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2002, 21(3): 261–263. (CHEN Xue-hua, SHEN Hai-hong, WANG Shan-yong. The research on theory and influence factors of self-sustaining structure of roadway surrounding rock[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2002, 21(3): 261–263. (in Chinese))
- [21] LITWINISZYN J. The phenomenon of rock bursts and resulting shock waves[J]. Mining Science and Technology, 1984, 1(4): 243–251.
- [22] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922–928. (LI Xi-bing, LI Di-yuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 922–928. (in Chinese))
- [23] 高明仕, 邓林名, 张农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱强力学模型及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359–364. (GAO Ming-shi, DOU Lin-ming, ZHANG Nong, et al. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359–364. (in Chinese))
- [24] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. The analytical principle of engineering geology[M]. Beijing: Geological Press, 1994. (in Chinese))
- [25] 郭然, 潘长良, 于润洽. 有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003. (GUO Ran, PAN Chang-liang, YU Ran-chang. Mining theory and technology of hard rock deposit with Rock-burst Possibility[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [26] 胡大伟, 朱其志, 周辉, 等. 脆性岩石各向异性损伤和渗透性演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1822–1827. (HU Da-wei, ZHU Qi-zhi, ZHOU Hui, et al. Research on anisotropic damage and permeability evolutionary law for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1822–1827. (in Chinese))
- [27] 朱珍德, 郭海庆. 裂隙岩体水力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHU Zhen-de, GUO Hai-qing. Hydraulics basis of fractured rock[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [28] 楼涛. 干燥和水饱和花岗岩的动态断裂特性[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 249–254. (LOU Wei-tao. Dynamic fracture behavior of dry and waterlogged granite[J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(3): 249–254. (in Chinese))
- [29] 左宇军, 李夕兵, 张义平, 等. 动–静组合加载诱发岩爆时岩块弹射速度的计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(4): 815–819. (ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, ZHAN Yi-ping, et al. Calculation of ejection velocity of rock in rockburst caused by static-dynamic coupling loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(4): 815–819. (in Chinese))
- [30] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003–3010. (in Chinese))