

3-25-2024

A method for coal seam pressure relief based on steel cone impact

REN Zhimin

Department of Mining Engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030009, China, pridelion@163.com

LYU Mengjiao

Department of Mining Engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030009, China, 603346580@qq.com

WANG Fei

College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

REN Zhimin, LYU Mengjiao, WANG Fei, et al. (2024) "A method for coal seam pressure relief based on steel cone impact," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 52: Iss. 3, Article 5.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.23.07.0402

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss3/5>

This Coal Geology, Mine Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

A method for coal seam pressure relief based on steel cone impact

Authors

REN Zhimin, LYU Mengjiao, WANG Fei, WANG Yu, and ZHANG Guangtai



移动阅读

任智敏, 吕梦蛟, 王飞, 等. 基于钢锥冲击的煤层卸压方法研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 37-47. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.07.0402

REN Zhimin, LYU Mengjiao, WANG Fei, et al. A method for coal seam pressure relief based on steel cone impact[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 37-47. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.07.0402

基于钢锥冲击的煤层卸压方法研究

任智敏¹, 吕梦蛟^{1,*}, 王飞², 王禹¹, 张广太³

(1. 山西工程职业学院 矿业工程系, 山西 太原 030009; 2. 太原理工大学 应急管理学院, 山西 太原 030024;
3. 潞安集团左权五里埃煤业有限公司, 山西 晋中 032600)

摘要: 针对煤矿冲击地压引起的采掘安全问题, 以山西晋中左权五里埃煤矿 3 号煤层开采地质条件为工程背景, 提出一种基于钢锥冲击煤层的卸压方法。根据通电线圈间产生电磁互感斥力原理, 获得磁力驱动绕线钢锥撞击煤层的冲击力函数式, 并结合弹性力学理论, 分析冲击力作用下煤体应力场分布特征、裂隙类型、破裂范围及程度。结果表明: (1) 冲击力与交流电电压及线圈匝数呈正相关关系, 与交流电频率及每米线圈匝数呈负相关关系。其中, 电压是调控冲击力的最主要因素, 综合考虑认为电压取 660 V 为宜。(2) 计算显示钢锥长度与直径仅需 1 cm 和 1.28 cm, 与之匹配的 2 级加速线圈总长为 2 cm, 可实现冲击装置的微型化, 便于在钻孔内灵活布置。(3) 冲击力使钻孔横截面围岩出现集中系数为 4.0~16.7 的叶状极高应力区, 其延伸长度为 5 倍钻孔半径, 区内发育张拉裂隙; 叶状区之外为集中系数 1.7~3.3 的高应力区, 发育压剪裂隙, 其范围可达 50 倍钻孔半径, 据此得到卸压钻孔间距为 2.5 m。(4) 按卸压段长度, 每孔内设置 2 个间距 2 m 的冲击装置, 冲击力使钻孔纵截面围岩呈现针状极高应力区, 相邻针状区间分布椭圆形压剪裂隙区, 两者一起贯通 2 m 厚煤层, 实现有效破煤卸压。研究成果为探索基于磁力钢锥冲击的煤层卸压技术奠定初步理论基础。

关键词: 冲击地压; 互感斥力; 钢锥; 冲击力; 钻孔围岩; 应力场分布; 煤层卸压; 晋中左权; 五里埃煤矿

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)03-0037-11

A method for coal seam pressure relief based on steel cone impact

REN Zhimin¹, LYU Mengjiao^{1,*}, WANG Fei², WANG Yu¹, ZHANG Guangtai³

(1. Department of Mining Engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030009, China; 2. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Zuoquan Wulihou Coal Industry Co., Ltd., of Shanxi Lu'an Group, Jinzhong 032600, China)

Abstract: This study aims to solve the mining safety problems caused by rock bursts in coal mines. With the geological mining conditions of the No.3 coal seam in the Wulihou coal mine in Zuoquan County, Jinzhong City, Shanxi Province as the engineering background, this study proposed a method for coal seam pressure relief based on steel cone impact. Specifically, based on the electromagnetic repulsion generated between energized coils, this study derived the functions of impact force produced when a magnetically driven coil-wound steel cone impacted the coal seam. Combining the theory on elastic mechanics, this study analyzed the stress field distribution, fracture types, and rupture ranges and degrees of the coal seam under the impact force. The results show that: (1) The impact force was positively correlated with AC voltage and the coil stage number but was negatively correlated with AC frequency and coil turns per meter. Voltage, the most significant factor in regulating the impact force, should be 660 V according to comprehensive consideration. (2) Calculations indicate that steel cones with a length and diameter of merely 1 cm and 1.28 cm each, respectively,

收稿日期: 2023-07-09; 接收日期: 2023-12-11

基金项目: 山西省高校科技创新基金项目(2019L1013); 山西省教育厅优质校建设专项科研项目(JY2019-YZ05); 山西工程职业学院重点科研项目(KYF-201907)

第一作者: 任智敏, 1980 年生, 男, 山西太原人, 博士, 副教授, 从事矿山围岩稳定性分析与控制研究. E-mail: pridelion@163.com

*通信作者: 吕梦蛟, 1963 年生, 男, 山西太原人, 教授, 从事矿压控制研究. E-mail: 603346580@qq.com

along with matched two-stage accelerating coils with a total length of 2 cm, can achieve the miniaturization of the impact device for flexible arrangement in a borehole. (3) Under the action of the impact force, leaf-shaped zones subjected to extremely high stress occurred in the surrounding rocks along borehole cross sections. These zones exhibited stress concentration coefficients ranging from 4.0 to 16.7, an extension length 5 times the borehole radius, and extensional fissures. Outside these zones were high-stress zones, with stress concentration coefficients ranging from 1.7 to 3.3, an extension length up to 50 times the drilling radius, and the occurrence of compression-shear fissures. Therefore, the spacing between pressure relief boreholes should be 2.5 m. (4) Based on the lengths of pressure relief segments, two impact devices with a spacing of 2 m were installed in each borehole. Under the impact force, the surrounding rocks along the longitudinal sections of boreholes presented needle-shaped zones with extremely high stress. Elliptical zones with compression-shear fractures emerged among adjacent needle-shaped zones. Both types of zones jointly penetrated the 2-m-thick coal seam, achieving effective pressure relief on coal breaking. The results of this study lay a preliminary theoretical foundation for exploring technologies for coal seam pressure relief based on magnetically driven steel cone impact.

Keywords: rock burst; electromagnetic repulsion; steel cone; impact force; borehole surrounding rock; stress field distribution; coal seam pressure relief; Wulihou coal mine in Zuoquan County; Jinzhong City

由于坚硬顶板运动、地质构造等因素,煤层冲击地压广泛存在于煤矿生产中,会给井下工作人员带来安全隐患^[1]。有关冲击地压的防治技术主要有:一是工作面煤层预注水。通过回采巷道向工作面煤层内打注水钻孔,工作面回采前进行高压持续注水,以软化煤层,降低煤层强度、刚度和冲击倾向性指标,并改善煤层支撑压力的分布状况^[2]。但由于预注水被煤体吸收且不可回收,导致耗水量较大^[3-4]。有时水中可能含有放射性化学物质,对煤质造成影响,必须有效处理后才能使用^[5]。另外,注水设备与耗材成本相对较高。二是煤层钻孔卸压。将钻孔打至煤层高支撑应力区,通过钻孔周围新产生的集中应力扰动处于极限平衡状态的支撑压力带^[6],从而降低该区域煤层刚度和支撑能力,使得支撑压力峰值向煤壁深部转移,同时形成新的变形和弹性能的释放,以消除或减弱煤层的冲击危险性^[7-8]。此方法在德国等欧美国家得到良好应用,工程经验表明采面钻孔深度以 3 倍采高、巷帮钻孔深度以 4 倍巷高为宜^[9]。三是煤层松动爆破卸压。利用松动爆破在煤层内产生大量裂隙,以改变煤层力学性能,缓减煤壁变形或破坏时能量释放的速率和量级,弱化煤层冲击倾向性^[10]。但爆轰产物容易污染煤层。与该卸压机理类似的技术还包括预裂爆破卸压、高能气体压裂卸压、水力冲孔卸压、密集钻孔群卸压、高压电脉冲卸压、高压磨料射流卸压、复合射孔卸压、可控冲击波卸压、多层协同逐级卸压等^[11-13]。四是煤层诱发爆破。当煤层存在严重冲击危险,且其他方法无效或无法实施时,通过大药量爆破,人为诱发冲击地压,以控制冲击地压发生的时间和地点,从而避免更多损害的一种控制措施^[14]。该方法只能作为辅助手段,必须谨慎选用。五是软化或爆破煤层硬厚顶板。硬厚顶板暴露、断裂及回转下沉均会造成煤层支撑压力的增高,从而诱发冲击地压^[15]。目前常用的方法是对顶板进行注水和爆破。通过回采巷道向顶板

打孔注水,在确保顶板完整不漏水的前提下软化其强度^[16];或是由回采巷道向顶板预打爆破钻孔,在爆破钻孔位于工作面支架后方时,对顶板实施爆破,以减小其垮落步距^[17]。该方法主要通过定向造缝预裂顶板。综上,无论采用何种方法,煤层卸压离不开煤体破裂,即在应力作用下,煤体首先部分出现微裂隙并摩擦滑动,开始不稳定破裂;之后裂隙大量出现、扩展、转化联结,密集的新裂隙生成,煤体扩容,裂隙再扩展;最后出现宏观破裂^[18]。

冲击力以高能、聚焦、穿透性强等优势已成为增加煤层裂隙的首选施载方式^[19]。笔者将针对冲击倾向性煤层卸压现状,通过理论分析,研究钻孔内电磁斥力驱动钢锥撞击煤层时制造冲击荷载的过程及其影响参数,结合具体工程背景,分析受冲击煤层的应力场分布、裂隙发育范围及程度,进而确定冲击卸压参数,预测卸压效果,为系统研究钢锥冲击煤层卸压技术进行初步理论探索。

1 钢锥冲击力产生原理

在煤层钻孔内布设冲击装置。装置布设的横、纵断面如图 1a 和图 1b 所示,布设位置与数量可视增透需要而定。冲击装置的工作原理如图 1c 所示:当缠有线圈的钢锥穿过通有脉冲电流的线圈(即加速线圈,又名螺线管)时,在钢锥线圈中会产生感应电流,其与加速线圈的电流相位相反,故钢锥受到一个斥力被推向前运动。每当钢锥离开前一个加速线圈而进入下一个加速线圈时,被穿线圈通电,余下线圈不通电,于是钢锥再次受到互感斥力而被加速^[20]。在历经若干个加速线圈后,钢锥将以高速撞向煤体,从而对煤体产生冲击力。

通电瞬间施加于加速线圈的电动势 $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$, 则有:

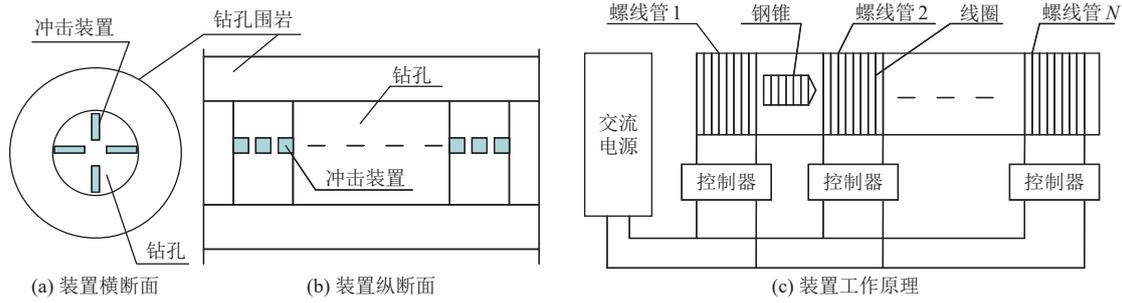


图 1 冲击装置布置及工作原理

Fig.1 Layout and principle diagrams of impact devices

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (2)$$

考虑到 $\omega L_1 \gg R_1$, $\omega L_2 \gg R_2$, 求式(1)、式(2)的特解时可略去 $R_1 i_1$ 和 $R_2 i_2$ 项, 再结合初始条件 $i_1(0) = i_2(0) = 0$, 联立式(1)、式(2)得:

$$i_1 = \frac{\varepsilon_0}{\omega L_1} \left[\exp\left(\frac{-R_1}{L_1} t\right) - \cos \omega t \right] \quad (3)$$

$$i_2 = \frac{M \varepsilon_0}{\omega L_1 L_2} \left[-\exp\left(\frac{-R_1}{L_1} t\right) + \cos \omega t \right] \quad (4)$$

在所通交变电流频率很高的前提下, 钢锥通过整个加速线圈的时间极短, 故 $\exp\left(\frac{-R_1}{L_1} t\right) \approx 1$, 这样式(3)、式(4)可简化为:

$$i_1 = \frac{\varepsilon_0}{\omega L_1} (1 - \cos \omega t) \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{M \varepsilon_0}{\omega L_1 L_2} (-1 + \cos \omega t) \quad (6)$$

因此, 钢锥线圈与加速线圈间的斥力 F 为:

$$F = i_1 i_2 \frac{dM}{dX} = -\frac{M \varepsilon_0^2}{\omega^2 L_1^2 L_2} (-1 + \cos \omega t)^2 \cdot \frac{dM}{dX} \quad (7)$$

在交流电的一个周期内, 斥力 F 的平均值 \bar{F} 为:

$$\bar{F} = -\frac{M \varepsilon_0^2}{\omega^2 L_1^2 L_2} \frac{3}{2} \cdot \frac{dM}{dX} \quad (8)$$

钢锥从进入加速线圈起至其离开过程中, 两线圈间互感从 M_0 逐渐减至零, 则斥力对钢锥所做的功 W 为:

$$W = \int \bar{F} dX = -\frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2 L_1^2 L_2} \cdot \frac{3}{2} \int_{M_0}^0 M dM = \frac{3M_0^2 \varepsilon_0^2}{4\omega^2 L_1^2 L_2} \quad (9)$$

式(9)表示钢锥通过一个加速线圈后的动能增量, 当有 N 级加速线圈, 钢锥质量为 m 时, 则其被加速后的速度 v 满足:

$$\frac{1}{2} m v^2 = N \frac{3M_0^2 \varepsilon_0^2}{4\omega^2 L_1^2 L_2} \quad (10)$$

假设钢锥冲击到煤体后的速度降为零, 冲击时间为 $\bar{t} = (10^{-3} \sim 10^{-4})$ s, 由式(10)结合冲量定理, 并将 $\varepsilon_0 = \sqrt{2}U$,

$M_0 = k \sqrt{L_1 L_2}$, $\omega = 2\pi f$, $L_1 = \mu n^2 l^* s$ 代入式(10), 得钢锥冲击力 F^* 为:

$$F^* = \frac{Uk}{2\bar{t}\pi f n} \sqrt{\frac{3Nm}{\mu l^* s}} \quad (11)$$

钢锥为一端锥形的圆柱体, 当其质量取 0.01 kg 时, 其长度只有 1 cm, 直径 1.28 cm。相应地, 可将单个加速线圈长度和直径设计成 1 cm 和 2 cm。因此冲击装置体积将非常小, 能实现中、小直径钻孔中安装。在上述参数确定后, 由式(11)知, 决定冲击力的主要参数还包括交流电电压与频率、加速线圈每米线圈匝数与级数。通过正交试验优选这些参数, 试验结果由式(11)计算获得, 其中取 $\bar{t} = 10^{-4}$ s, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。试验因素与水平见表 1, 试验方案及结果见表 2—表 3, 冲击力随主要参数的变化规律如图 2 所示。

表 1 试验因素与水平
Table 1 Test factors and levels

水平	电压 U/V	交流电频率 f/Hz	每米线圈匝数 n	线圈级数 N
1	100	100	500	1
2	1 000	500	1 000	2
3	10 000	1 000	1 500	3

表 2 试验方案及冲击力
Table 2 Test schemes and impact force

方案	电压 U/V	交流电频率 f/Hz	每米线圈匝数 n	线圈级数 N	试验结果
					冲击力 F^*/kN
1	100	100	500	1	280
2	100	500	1 000	2	40
3	100	1 000	1 500	3	20
4	1 000	100	1 000	3	2 400
5	1 000	500	1 500	1	180
6	1 000	1 000	500	2	390
7	10 000	100	1 500	2	13 080
8	10 000	500	500	3	9 610
9	10 000	1 000	1 000	1	1 390

表 3 各水平冲击力均值与极差

Table 3 Mean and range of impact forces at various levels

因素	各水平冲击力均值/kN			极差/kN
	水平1	水平2	水平3	
电压	110	990	8 030	7 920
交流电频率	5 250	3 280	600	4 650
每米线圈匝数	3 430	1 280	4 430	3 150
线圈级数	620	4 500	4 010	3 880

注：极差为各水平冲击力均值的最大值与最小值之差。

结果显示, 主要参数对冲击力的影响程度依次为: 电源电压>电源频率>线圈级数>每米线圈匝数, 电压的影响程度分别是后者的 1.70、2.51 和 2.04 倍, 说明调控冲击力大小的关键在于电源电压的选择。电压大于 1 000 V 后, 冲击力显著增大, 但冲击力并非越大越好, 过大冲击力会导致煤体演变为糜棱结构, 煤体被压得过于密实, 孔裂隙闭合, 煤体弹性变形能反倒得不到有效释放。因此考虑煤矿安全用电以及煤岩体强度, 在其他参数适合的前提下, 认为电压取 660 V 为宜。由图 2 可知, 冲击力与电频率、线圈匝数和级数的增加分别呈线性减小、先减后增、先快速增加后缓慢减小的关系, 结合钻孔直径及冲击装置微型化需要, 确定电源频率 100 Hz、每米线圈匝数 500、线圈级数 2。由上述参数计算得到冲击力为 2.59×10^3 kN。

2 工程背景

晋中左权五里墩煤矿 3 号煤层埋深 400 m, 目前首采区平均煤厚 2 m, 煤层厚度变化不大, 结构大部为单层结构, 仅局部存在 1 层 0.3~0.4 m 夹矸。煤层直接顶为泥岩、砂质泥岩, 厚度 2~5 m。基本顶为中细砂岩, 厚 3~8 m, 有时中细砂岩直覆于煤层之上。底板为泥岩、砂质泥岩或粉砂岩, 厚度 1~5 m。据钻孔采样试验, 顶底板岩石抗压强度为 43.20~47.35 MPa。采用机械化综采, 采煤机型号为 MG132/310-W 型, 工作面支护采用 ZY3200/9/19 型支架支护, 采用 SGZ630/150 刮板机运煤。回采巷道为矩形断面, 裸巷宽 4.5 m、高 2.2 m, 采用“锚网索钢带”联合支护。选用 $\phi 20$ mm \times 2 400 mm 的 500 号高强锚杆, 间排距 800 mm \times 800 mm, W 型钢带, 菱形金属网, 网间搭接长度 100 mm。每根锚杆使用 2 个 CK2340 树脂锚固剂。锚索选用 $\phi 17.8$ mm \times 5 000 mm, 布置于顶板中部, 排距 1 900 mm, 锚固剂选用 2 个 CK2340、1 个 Z2388。

3 号煤层属于冲击倾向性煤层。冲击地压大部分发生在上部巷道, 表现为煤体突出, 即重力型冲击。发生的位置恰位于超前支承压力集中的位置, 即距工作面 4~20 m 范围。经测定, 该范围煤层的大粒径(大于

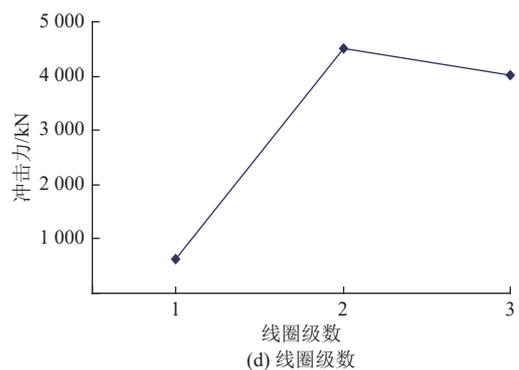
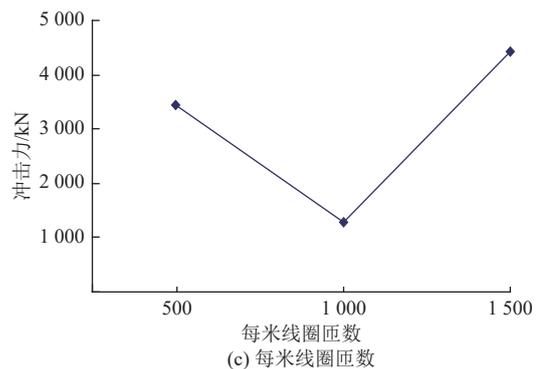
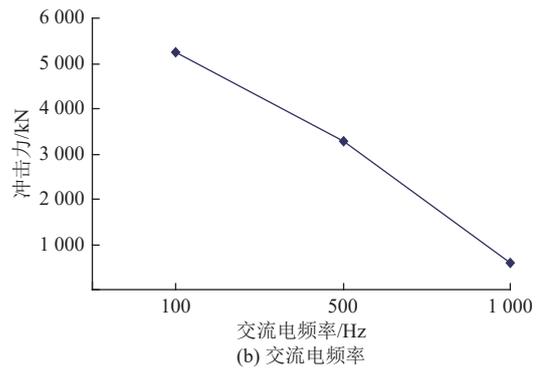
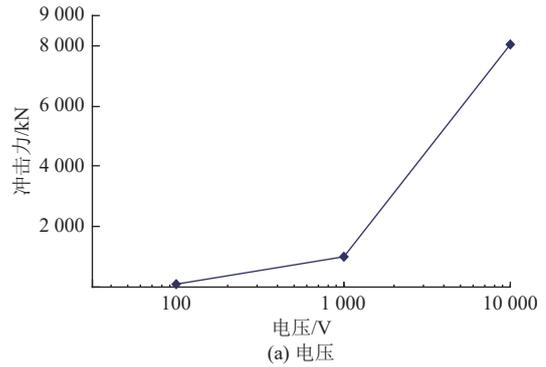


图 2 冲击力与主要参数的关系

Fig.2 Relationships between impact force and major parameters

3 mm) 钻屑质量分数高于 30%, 应力集中系数 1.4, 因此, 将其确定为煤层卸压带, 如图 3 所示。卸压方法为沿采煤工作面上部巷道煤体帮打一排 $\phi 50$ mm \times 5 000 mm 的钻孔, 之后在钻孔内距巷帮表面 2.5 m 和 4.5 m 处分别设置冲击装置, 通过冲击力破裂煤体, 使高应力向煤体深部转移, 达到巷帮降压防冲目的。钻孔间距将根据煤

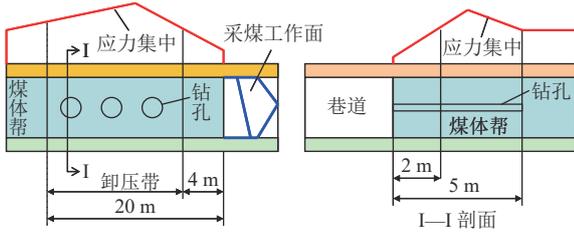


图 3 煤层卸压孔布置

Fig.3 Layout of boreholes for coal seam pressure relief

体应力分布及损伤特征予以确定。

3 冲击力下钻孔横截面围岩应力场

设钻孔横截面侧压力系数 $\lambda_1 = 1.5$, 垂直地应力 $\sigma_v = 10$ MPa, 水平地应力 $\sigma_{H1} = \lambda_1 \sigma_v$, 钻孔压力 $F_p = \begin{cases} F^*, \theta' \in \phi \\ 0, \theta' \notin \phi \end{cases}$, 冲击力 $F^* = 2.59 \times 10^3$ kN, 钻孔横截面围岩受力模型如图 4 所示。

钻孔围岩应力可视为情况 1 和情况 2 的应力叠加。对于情况 1, 围岩等效为受内压力 F_p 和外压力 $\frac{\sigma_v + \sigma_{H1}}{2}$ 的圆筒, 则其应力:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = \frac{A}{\rho^2} + B(1 + 2\ln\rho) + 2C \\ \sigma_\theta = -\frac{A}{\rho^2} + B(3 + 2\ln\rho) + 2C \\ \tau_{\rho\theta} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

由边界条件:

$$(\sigma_\rho)_{\rho=r} = -F_p, \quad (\sigma_\rho)_{\rho=r^*} = -\frac{\sigma_v + \sigma_{H1}}{2}$$

并结合位移单值条件知 $B=0$ 可求得待定系数 A, C , 并将其代入式(12), 再根据 $r^* \rightarrow \infty$, 得:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = -\frac{r^2}{\rho^2} F_p - \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right) \left(\frac{\sigma_v + \sigma_{H1}}{2}\right) \\ \sigma_\theta = \frac{r^2}{\rho^2} F_p - \left(1 + \frac{r^2}{\rho^2}\right) \left(\frac{\sigma_v + \sigma_{H1}}{2}\right) \end{cases} \quad (13)$$

对于情况 2, 设围岩边界在左右两边受均布压力 $\frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2}$, 上下两边受均布拉力 $\frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2}$ 。取应力函数 $\Phi = f_0(\rho)\cos 2\theta$, 并代入相容方程, 得:

$$\Phi = \cos 2\theta \left(A\rho^4 + B\rho^2 + C + \frac{D}{\rho^2} \right) \quad (14)$$

$A-D$ 为待定系数。从而得应力分量:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = -\cos 2\theta \left(2B + \frac{4C}{\rho^2} + \frac{6D}{\rho^4} \right) \\ \sigma_\theta = \cos 2\theta \left(12A\rho^2 + 2B + \frac{6D}{\rho^4} \right) \\ \tau_{\rho\theta} = \sin 2\theta \left(6A\rho^2 + 2B - \frac{2C}{\rho^2} - \frac{6D}{\rho^4} \right) \end{cases} \quad (15)$$

由边界条件: $(\sigma_\rho)_{\rho=r} = 0, (\tau_{\rho\theta})_{\rho=r} = 0, (\sigma_\rho)_{\rho=r^*} =$

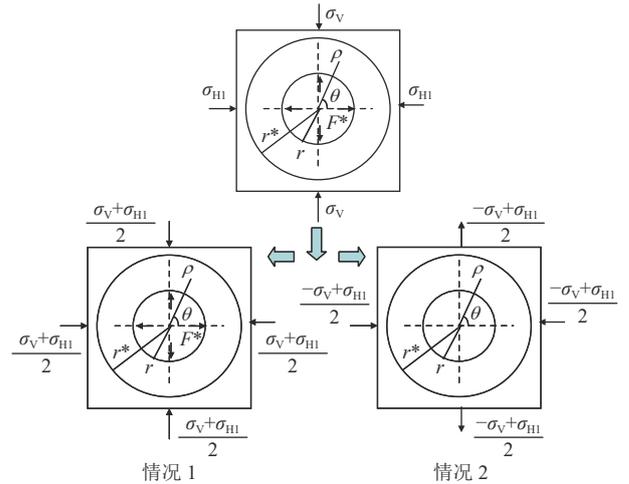


图 4 钻孔横截面围岩受力模型

Fig.4 Models of forces acting on the surrounding rocks along a borehole cross section

$$-\frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2} \cos 2\theta, \quad (\tau_{\rho\theta})_{\rho=r^*} = \frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2} \sin 2\theta, \text{ 求解待定系数, 并命 } \frac{r}{r^*} \rightarrow 0, \text{ 得 } A=0, B = \frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{4}, C = -\left(\frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2}\right)r^2, D = \frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{4}r^4.$$

将待定系数代入式(15), 得应力分量的最终表达式:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = -\frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2} \cos 2\theta \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right) \left(1 - 3\frac{r^2}{\rho^2}\right) \\ \sigma_\theta = \frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2} \cos 2\theta \left(1 + 3\frac{r^4}{\rho^4}\right) \\ \tau_{\rho\theta} = \frac{\sigma_{H1} - \sigma_v}{2} \sin 2\theta \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right) \left(1 + 3\frac{r^2}{\rho^2}\right) \end{cases} \quad (16)$$

通过 Matlab 软件绘制由式(13)、式(16)叠加的应力场, 如图 5 所示。其中, 正应力以压为负、拉为正; 剪应力以逆时针作用为正、顺时针作用为负。可以看出, (1) 冲击力作用点处的径向应力和切向应力呈显著放射性“叶状”分布, 剪应力则表现为钻孔壁无压力时的分布状态。说明径向冲击力在横截面上只对围岩正应力产生影响, 而对剪应力不构成影响。(2) 径向应力整体呈压应力。其中, 叶状区为极高应力区, 在围岩中的延展长度约为钻孔半径的 1.1 倍, 区内应力从孔边向围岩深部逐渐由 250 MPa 降至 100 MPa, 对应的应力集中系数从 16.7 减至 6.7。叶状区以外为高应力区, 区内应力整体升高至 50 MPa, 应力集中系数达到 3.3, 此应力值已超过我国所有煤种的抗压强度。研究发现, 径向应力即便在范围为 100 倍钻孔半径的区域内仍能保持 50 MPa, 充分说明冲击力可大范围大程度地提高径向应力值。(3) 切向应力的叶状区为拉应力增高区, 其应力自孔边向围岩深部逐渐降低, 区内距孔边 0.8 倍孔半径范围的应力为 60~200 MPa, 相应的应力集中系数为 4.0~13.3, 其余拉应力为 20 MPa, 应力集中系数 1.3。叶状区之外是分布均匀的切向压应力, 其值 25 MPa, 应力

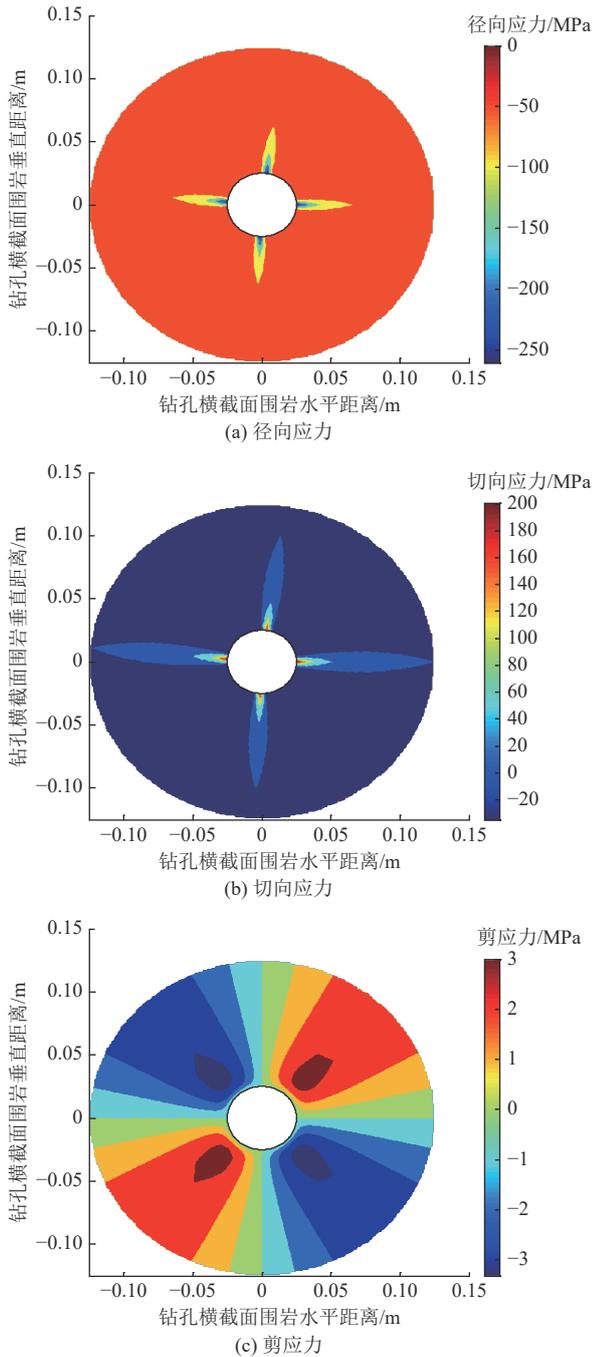


图 5 钻孔横截面围岩应力场

Fig.5 Stress field in the surrounding rocks along a borehole cross section

集中系数 1.7。由于目前国内煤体抗拉强度在 0.2~1.4 MPa, 故叶状区围岩必然会出现切向拉张破坏。对比可知, 切向应力叶状区长度是径向应力叶状区长度的 2 倍, 表明冲击力近场的切向拉应力将主导定向冲击裂隙的发育。另外, 图中显示冲击力与水平地应力平行时, 叶状区最长, 长度为 5 倍钻孔半径; 与垂直地应力平行时, 叶状区最短, 长度为 4 倍钻孔半径。据此可知, 冲击力方向介于水平和垂直之间时, 叶状区长度为 4~5 倍钻孔半径。(4) 剪应力以钻孔中心为原点呈中心对称

分布。以极角 0~90° 区间为例, 极角 45° 处的剪应力最大, 并向两侧逐渐减小。相较于径向、切向应力, 剪应力非常小, 最大只有 3 MPa, 显示其对应力场分布的影响有限, 可忽略不计。

4 冲击力下钻孔纵截面围岩应力场

取钻孔纵向上半部围岩为研究对象, 其力学分析模型如图 6 所示。研究段围岩边界上的垂直与水平地应力分别为 σ_v 和 $\sigma_{H2} = \lambda_2 \sigma_v$, 其中 $\lambda_2 = \lambda_1$ 。研究段下边界受力为:

$$F_p = \begin{cases} F^*, x = \frac{l-l_0}{2}, x = \frac{l+l_0}{2} \\ 0, x \neq \frac{l-l_0}{2}, x \neq \frac{l+l_0}{2} \end{cases}$$

根据静力平衡条件, 研究段侧边界的剪力 $F_s = \frac{(\sigma_v - F_p)l}{2}$, 弯矩 $M' = \frac{(\sigma_v - F_p)l^2}{12}$ 。

按主要边界 $y=0, y=h$ 的受力设 y 方向的应力分量 σ_y 为:

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -\sigma_v f_1(y) - F_p f_2(y) \quad (17)$$

相容方程:

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (18)$$

联立式(17)、式(18)得应力函数:

$$\begin{aligned} \phi = & -\frac{\sigma_v}{2} x^2 (A_1 y^3 + A_2 y^2 + A_3 y + A_4) - \\ & \frac{F_p}{2} x^2 (A_5 y^3 + A_6 y^2 + A_7 y + A_8) + \\ & x (A_9 y^3 + A_{10} y^2 + A_{11} y) + \\ & \left[\left(\frac{A_1 \sigma_v + A_5 F_p}{10} \right) y^5 + \left(\frac{A_2 \sigma_v + A_6 F_p}{6} \right) y^4 + A_{12} y^3 + A_{13} y^2 \right] \end{aligned} \quad (19)$$

$A_1 - A_{13}$ 为待定系数, 从而有应力分量:

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}, \quad \sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (20)$$

结合边界条件 $(\sigma_y)_{y=0} = -F_p, (\tau_{xy})_{y=0} = 0, (\sigma_y)_{y=h} =$

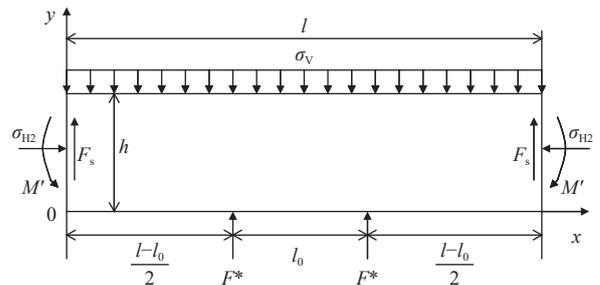


图 6 钻孔纵截面围岩受力模型

Fig.6 Model of forces acting on the surrounding rocks along a borehole longitudinal section

$-\sigma_v, (\tau_{xy})_{y=h} = 0, \int_0^h (\sigma_x)_{x=0} dy = -\sigma_{H2} h, \int_0^h (\sigma_x)_{x=l} dy =$
 $\frac{(\sigma_v - F_p) l^2}{12}, \int_0^h (\tau_{xy})_{x=0} dy = -\frac{(\sigma_v - F_p) l}{2}, \int_0^h (\sigma_x)_{x=l} dy =$
 $\frac{(\sigma_v - F_p) l^2}{12}$, 求式(20) 中的待定系数, 得:

$$\begin{cases} \sigma_y = -(a_1 y^3 + a_2 y^2) - F_p \\ \sigma_x = -x^2(3a_1 y + a_2) + 2x(3A_9 y + A_{10}) + \\ \quad 2a_1 y^3 + 2a_2 y^2 + 6A_{12} y + 2A_{13} \\ \tau_{xy} = x(3a_1 y^2 + 2a_2 y) - (3A_9 y^2 + 2A_{10} y) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $a_1 = \frac{m_2 - m_1}{h}, a_2 = 2m_1 - m_2, m_1 = \frac{\sigma_v - F_p}{h^2}, m_2 =$
 $2\left(\frac{2A_9 h - A_{10}}{l}\right), A_9 = \frac{-2m_3}{h}, A_{10} = 3m_3, m_3 = \frac{(\sigma_v - F_p) l}{2h^2},$
 $A_{12} = \frac{4p_2 - 2p_1}{h}, A_{13} = 4p_1 - 6p_2, p_1 = \frac{n_1}{2} - \frac{a_1}{4} h^3 - \frac{a_2}{3} h^2,$
 $p_2 = \frac{n_2}{2} - \frac{a_1}{5} h^3 - \frac{a_2}{4} h^2, n_1 = -\sigma_{H2}, n_2 = \frac{(\sigma_v - F_p) l^2}{12h^2}。$

由式(21) 得应力场, 如图 7 所示。(1) 从围岩纵断面看, 在冲击力作用方向上, 垂直、水平及剪切应力场均出现“针状” 极高应力区。该区形状及延伸范围均不同于横截面叶状区, 这显然是由地应力、研究段尺寸、冲击力大小及间距共同影响所致。本文重点考察纵向相邻两冲击力对围岩应力场的影响, 结合工程背景, 取钻孔纵向研究段长度 5 m、高度 2.5 m, 相邻冲击力间距 2 m。(2) 由于纵、横截面围岩的垂直地应力相同, 且冲击力远大于该地应力, 从而主导了垂直应力场的分布, 故纵截面围岩垂直应力性质、数值以及变化规律与横截面径向应力类似均为压应力, 在针状区由孔壁向围岩深部从 250 MPa 逐渐降至 100 MPa, 在非针状区均为 50 MPa。表明冲击力达到一定值后, 在相当范围内, 垂直应力场的分布将趋于均匀, 即仅出现极高应力区和均匀分布的高应力区; 而冲击力间距等参数对垂直应力场的影响显著降低。关于冲击力间距的优化选择, 涉及到冲击力大小与其影响范围间的变化关系, 这有待后续研究。(3) 水平应力沿研究段高度大致分为 3 个部分: 下部针状区压应力 60~200 MPa, 中部非针状区均布压应力 50 MPa, 上部针状区拉应力 60~200 MPa。可见, 由于侧边界水平地应力(压应力)作用, 围岩水平拉、压应力交界上移, 使得围岩中、下部分布压应力, 上部分布拉应力。同时, 冲击力将水平应力整体提高, 并导致围岩上边界出现与孔壁针状区呈“镜像” 的针状拉应力区, 表明钻孔纵截面围岩水平应力沿冲击力方向具有对称分布特征。(4) 通常在没有冲击力作用时, 围岩侧边界处剪应力最大, 并呈弧形状向围岩中部递减式扩展; 但施加冲击力后, 剪应力主要集中于针状区, 且区内中部最大、向上下两边递减。剪应力针状区贯穿整个围岩高度, 其周围应力均匀分布。剪应力最大、最小值为 150、30 MPa, 分别是无冲击力时最大、最小值的 10 倍

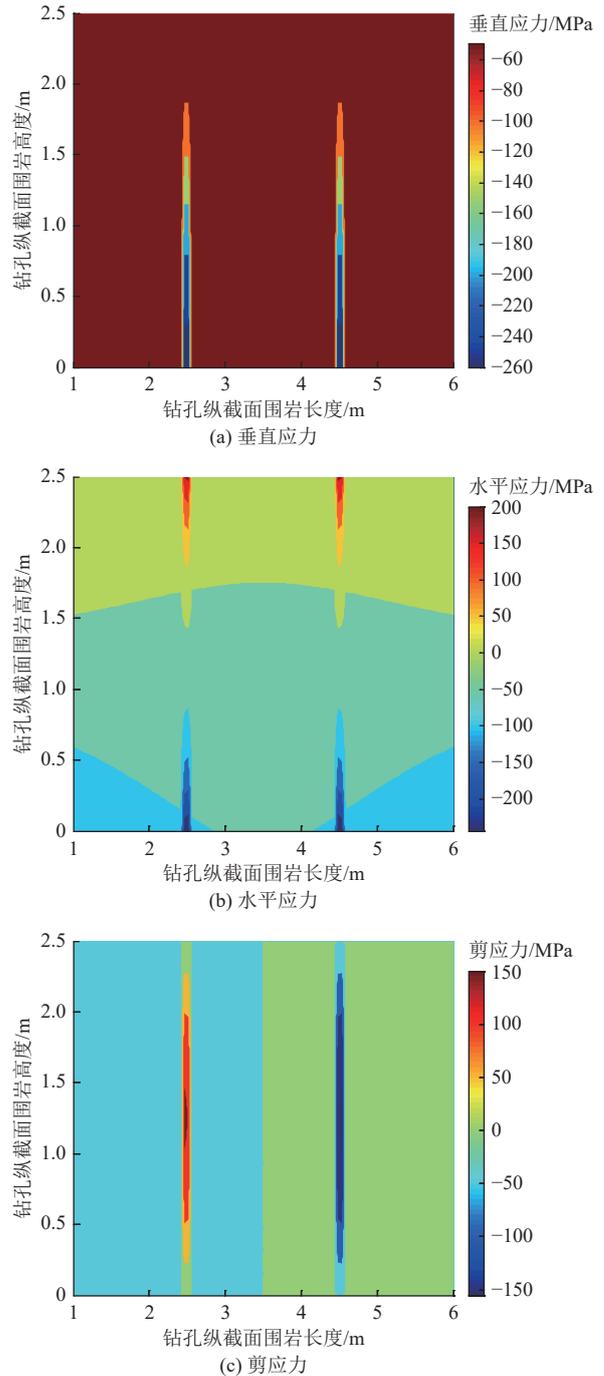


图 7 钻孔纵截面围岩应力场

Fig.7 Stress field in the surrounding rocks along a borehole longitudinal section

和 6 倍, 显示冲击力对钻孔纵截面围岩剪应力的分布影响极为明显。

5 冲击力下钻孔围岩破裂分析

分别求出钻孔横、纵围岩的最大、最小主应力 σ_1 和 σ_3 , 根据莫尔强度准则, 可得到使煤体发生破裂的临界最大主应力 σ_1^* :

$$\sigma_1^* = 2c \frac{\cos\phi'}{1 - \sin\phi'} + \frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} \sigma_3 \quad (22)$$

围岩破裂机理如图 8 所示, 假设 σ_3 恒定, 令 $\delta = \sigma_1 - \sigma_1^*$, 当 $\delta \geq 0$, 即实际最大主应力与临界最大主应力之差等于大于零时, 莫尔应力圆与莫尔强度曲线相切或相交, 表明围岩出现破裂, 且 δ 越大, 破裂程度越高。

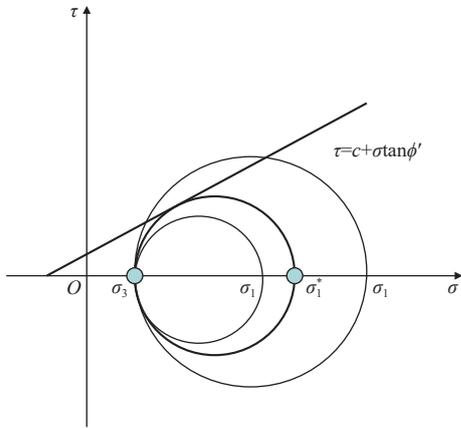
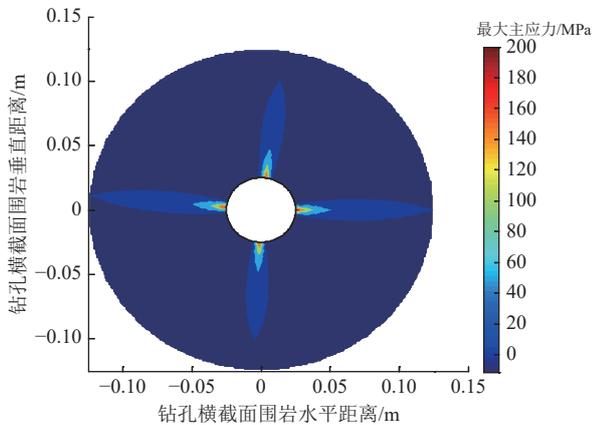


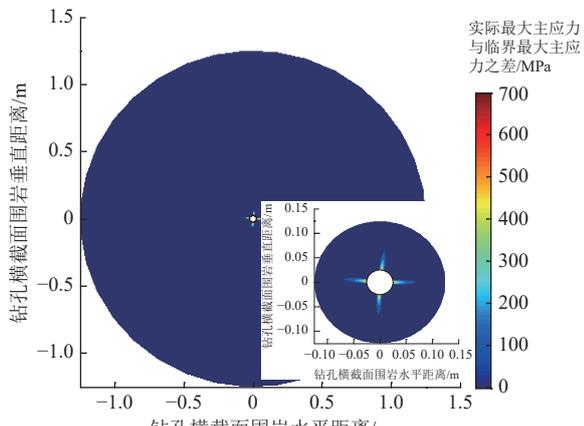
图 8 围岩破裂机理

Fig.8 Fracturing mechanism of surrounding rocks

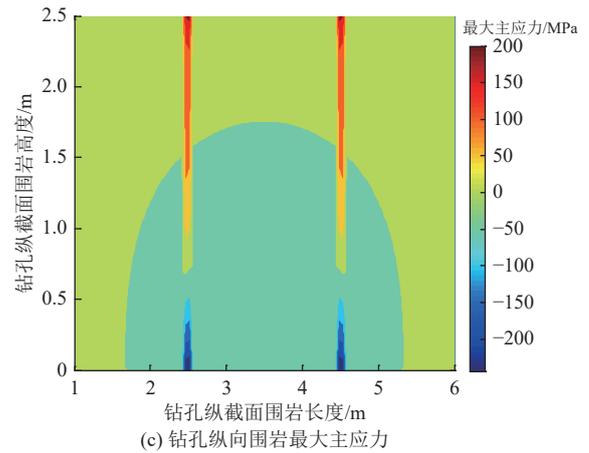
取煤层黏聚力 $c = 0.7 \text{ MPa}$, 内摩擦角 $\phi' = 20^\circ$, 其余参数同上。依据最大主应力和 δ 含义, 分析冲击力下钻孔围岩破裂类型和程度, 如图 9 所示。(1) 由图 9a 可知, 钻孔横向围岩叶状区最大主应力为拉应力, 分布拉张裂隙, 裂隙越接近孔边发育程度越高; 而非叶状区最大主



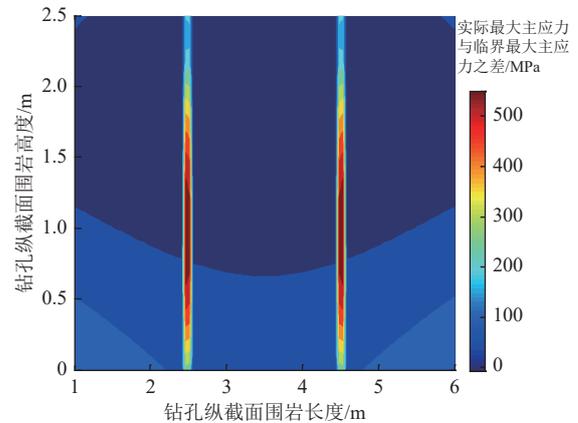
(a) 钻孔横向围岩最大主应力



(b) 钻孔横向围岩破裂情况



(c) 钻孔纵向围岩最大主应力



(d) 钻孔纵向围岩破裂情况

图 9 钻孔围岩破裂类型与程度

Fig.9 Fracturing types and degrees of borehole surrounding rocks

应力为压应力, 分布压剪裂隙, 裂隙均匀发育。叶状区裂隙发育程度明显高于非叶状区。冲击力与地层最大主应力平行时, 围岩叶状区裂隙延伸长度最大, 这与煤层水压致裂裂隙向煤层最大主应力方向扩展的特征相同。图 9b 显示 50 倍钻孔半径范围围岩的 $\delta > 0$, 说明冲击力使得该范围内的围岩处于破裂状态, 据此结合 25 mm 钻孔半径, 可确定冲击卸压钻孔间距为 2.5 m。(2) 根据钻孔纵向围岩最大主应力, 如图 9c 所示, 可知钻孔壁边缘的针状区分布压剪裂隙, 围岩上边界的针状区分布张拉裂隙, 两类裂隙向围岩中部延伸, 且发育程度渐降, 但基本贯穿整个围岩。对于非针状区, 沿单侧孔壁分布有发育均匀的拱形压剪裂隙区。图 9d 表明, 钻孔单侧 1 m 范围内煤体充分破裂, 1~2.5 m 范围煤体临界破裂, 因此, 煤厚 \times 卸压带 = 2 m \times 2 m 范围的煤体能够完全充分破裂, 达到破煤卸压的目的。

6 数值模拟验证

为了验证钢锥冲击煤层卸压理论的有效性, 构建工程背景煤巷围岩的 FLAC^{3D} 数值模型。卸压孔延伸方向为 x 轴(取 30 m), 巷道轴向为 y 轴(取 1 m), 垂直方向

为 z 轴(取 15 m)。顶边界应力约束,左右边界 x 方向和前后边界 y 方向的速度为 0,底边界 x 、 y 、 z 方向速度均为 0,侧压力系数为 1.5。采用 M-C 模型作为煤巷围岩变形破坏的本构模型,岩层力学参数见表 4。

表 4 岩层力学参数
Table 4 Mechanical parameters of rock layers

岩层	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦 角($^\circ$)	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa
基本顶	2 600	14.9	9.1	36	7.9	5.3
直接顶	2 580	10.1	3.0	31	5.5	2.2
煤层	1 300	1.7	0.8	20	0.7	0.2
直接底	2 200	12.0	3.2	33	3.1	1.0

图 10 为煤巷卸压前垂直应力云图,可以看出高应力集中在巷帮深部 2.0~5.0 m 范围,应力集中系数 1.2~2.0,与现场情况基本吻合,因此,确定该范围为煤层的卸压深度,并在距巷帮 2.5 m 和 4.5 m 的位置施加与前文相同的冲击荷载。煤巷冲击卸压前后围岩塑性区对比如图 11 所示,卸压前煤帮在围岩应力作用下 0.2 m 以浅范围呈拉剪破坏、0.2~2.0 m 范围为剪切破坏。冲击力作用后,煤帮浅部的拉剪破坏深度扩大至 0.4 m,剪切破坏深度扩大至 5.0 m。两个冲击荷载点之间围岩的损伤破坏连成一片且上下贯通整个煤层,这与理论分析的结果相一致,表明煤帮 5.0 m 以浅范围全部实现应力卸载,高应力已从距煤帮 2.0 m 处转移至距煤帮 5.0 m 之外。

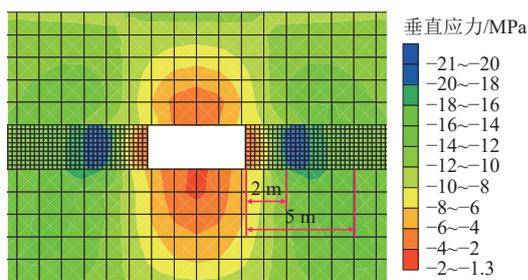
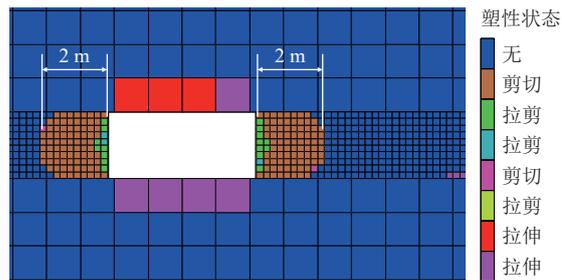
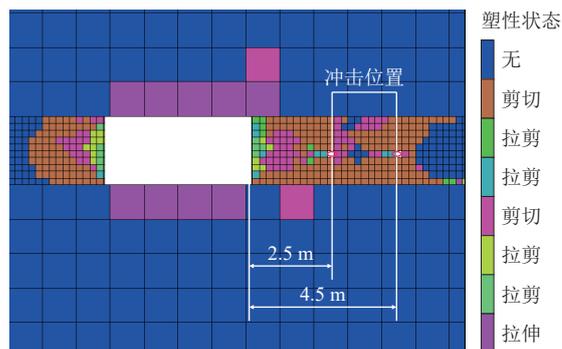


图 10 煤巷卸压前垂直应力分布
Fig.10 Vertical stress distribution in a coal roadway before pressure relief

综上分析表明,通过调控磁力钢锥冲击装置的电源电压、电源频率以及线圈级数等参数,使得钢锥仅在 2 cm 长的线圈内加速,即可获得威力可观的冲击力,在其作用下钻孔围岩产生显著力学效应,主要体现在:冲击力作用方向上呈现极高的应力集中,集中系数平均高达 10.2,促使煤体深度破裂,出现定向割裂裂缝,并大范围提高了围岩应力值,使得卸压带煤体裂隙充分发育。同时,冲击装置微型化,有利于在中、小直径钻孔中安装,可节约钻进成本。



(a) 煤巷卸压前塑性区分布



(b) 煤巷卸压后塑性区分布

图 11 煤巷卸压前后塑性区对比

Fig.11 Comparison of plastic zones in a coal roadway before and after pressure relief

考虑到高速撞击的钢锥与煤体之间,或冲击后留在煤层中的钢锥与采煤机滚筒之间可能出现摩擦火花,可以在钢锥表面涂一层苯乙稀醇酸以防止火花产生。钢锥冲击卸压方法相较于水力压裂无需占用大型设备,动力电源来源方便,施工速度快,成本低;较爆破卸压安全性高,对煤层不构成污染,属绿色卸压,故具有较高研究与应用价值。

7 结论

a. 提出一种基于钢锥冲击的煤层卸压方法。该方法利用通电线圈间产生的互感斥力对绕线钢锥进行加速,使其以高速撞击煤体,由此形成作用于煤体的高强度冲击力,以增强破煤效果。理论分析表明,冲击力主要受控于电源电压与频率、线圈级数以及每米线圈匝数。其中,电源电压是决定冲击力数值的第一因素。

b. 以左权五里墩煤矿 3 号冲击倾向性煤层开采地质条件为工程背景,建立冲击力下钻孔横、纵截面围岩力学模型,获得围岩应力场。结果显示,沿冲击力作用方向,钻孔横、纵围岩分别出现叶状和针状极高应力区。沿钻孔横向、径向压应力在 100 倍钻孔半径区域内保持 50 MPa;切向拉应力最长延伸距离达到 5 倍钻孔半径,其平均应力集中系数 6.2。沿钻孔纵向,距孔边缘 0~1.5 m 为压剪高应力区;1.5~2.5 m 为压拉剪高应力区。

c. 依据围岩最大主应力分布规律,发现钻孔横向围岩叶状区和非叶状区分别分布拉张裂隙和压剪裂隙;钻

孔纵向围岩主要出现压剪裂隙。按照实际最大主应力与临界最大主应力差值评估围岩破裂范围与程度,确定卸压钻孔间距为 2.5 m,显示 2 m 卸压带内整层煤体裂隙发育充分,并通过数值模拟验证了该结论,证明钢锥冲击破煤卸压理论的可行性。

d. 钢锥冲击破煤效果明显,可调可控,实施方便,成本低廉,在煤岩体卸压、煤层增透等领域有较好推广前景。未来需进一步完善冲击力与煤岩体物理力学参数的变化关系,为建立钢锥冲击卸压应用与评价体系提供理论基础。

符号注释:

c 为黏聚力, MPa; f 为交流电电源频率, Hz; F 为钢锥线圈与加速线圈间的斥力, N; F_p 为钻孔内压力, N; F_s 为钻孔纵截面围岩侧边界上的剪力, N; \bar{F} 为交流电一个周期内斥力的平均值, N; F^* 为钢锥对煤体的冲击力, N; h 为钻孔纵向研究段高度, m; i_1 、 i_2 分别为加速线圈和钢锥线圈电流, A; k 为感应线圈耦合系数, 取 1; l 为钻孔纵向研究段长度, m; l_0 为钻孔纵向相邻两冲击力的间距, m; l^* 为单个加速线圈长度, m; L_1 、 L_2 分别为加速线圈和钢锥线圈电感, H; m 为钢锥质量, kg; M 为加速线圈与钢锥线圈间的互感, H; M_0 为钢锥进入加速线圈时钢锥线圈与加速线圈间的互感, H; M' 为弯矩, N·m; n 、 N 分别为每米线圈匝数和加速线圈级数; r 为钻孔半径, m, 取 2.5 cm; r^* 为钻孔横截面围岩无穷远处的极半径, m; R_1 、 R_2 分别为加速线圈和钢锥线圈电阻, Ω ; s 为线圈面积, m^2 ; t 、 \bar{t} 分别为交流电时间和钢锥冲击煤体的时间, s; U 为交流电源电压, V; v 为钢锥被加速后的速度, m/s; X 为加速线圈与钢锥线圈中心之间的距离, m; δ 为实际最大主应力与临界最大主应力之差, MPa; ε_0 为交流电电动势振幅, V; θ 、 θ' 分别为钻孔横截面围岩任一点极角和冲击力作用点在钻孔横截面上的极角, rad; λ_1 、 λ_2 分别为钻孔横、纵向侧压力系数; μ 为介质磁导率, H/m; ρ 为钻孔横截面围岩任一点的极半径, m; σ_1 、 σ_3 、 σ_1^* 分别为最大、最小主应力和最大临界主应力, MPa; σ_{H1} 、 σ_{H2} 分别为钻孔横、纵截面围岩边界的水平地应力, MPa; σ_x 为钻孔纵截面围岩水平应力, MPa; σ_y 为钻孔纵截面围岩垂直应力, MPa; σ_v 为钻孔横、纵截面围岩边界的垂直地应力, MPa; σ_θ 、 σ_ρ 分别为钻孔横截面围岩的切向应力和径向应力, MPa; τ_{xy} 为钻孔纵截面围岩剪应力, MPa; $\tau_{\rho\theta}$ 为钻孔横截面围岩剪应力, MPa; φ' 为内摩擦角, ($^\circ$); Φ 、 ϕ 分别为钻孔横、纵截面围岩的应力函数; ϕ 为冲击力作用点在钻孔横截面上的极角集合, 取值 0、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 、 2π ; ω 为交流电角频率, rad/s。

参考文献(References)

- [1] 潘一山, 宋义敏, 朱晨利, 等. 冲击地压预测的煤岩变形局部化方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 185-198.
PAN Yishan, SONG Yimin, ZHU Chenli, et al. Localization method of coal rock deformation for rock burst prediction[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 185-198.
- [2] 翟成, 郑仰峰, 余旭, 等. 水力压裂模拟用煤岩体相似材料基础力学特性实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 16-28.
ZHAI Cheng, ZHENG Yangfeng, YU Xu, et al. Experimental study on the mechanical properties of coal-like materials for hydraulic fracturing simulation[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 16-28.
- [3] DING Hongbing, TIAN Yuhe, WEN Chuang, et al. Polydispersed droplet spectrum and exergy analysis in wet steam flows using method of moments[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116148.
- [4] 文光才, 杨硕, 曹偲. 水敏性损害对煤层水力压裂增透效果影响的实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 65-71.
WEN Guangcai, YANG Shuo, CAO Jie. Experimental study on the influence of water sensitivity damage on the antireflection effect of coal seam hydraulic fracturing[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 65-71.
- [5] HUANG Qiming, LIU Shimin, CHENG Weimin, et al. Fracture permeability damage and recovery behaviors with fracturing fluid treatment of coal: An experimental study[J]. Fuel, 2020, 282: 118809.
- [6] 朱斯陶, 董续凯, 姜福兴, 等. 硫磺沟煤矿巨厚强冲击煤层掘进工作面超前钻孔卸压失效机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 45-53.
ZHU Sitao, DONG Xukai, JIANG Fuxing, et al. Failure mechanism of pressure relief with advance drilling in driving face of strong burst ultra thick coal seam in Liuhuanguo coal mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(1): 45-53.
- [7] 丁鑫, 肖晓春, 潘一山. 瓦斯压力影响下煤岩力学性质与冲击能量指数演化规律及机制[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 98-106.
DING Xin, XIAO Xiaochun, PAN Yishan. Mechanical properties and impact energy index of coal affected by gas pressure and evolutionary mechanism[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 98-106.
- [8] 庞立宁, 付书俊, 苏波. 煤层大直径钻孔和顶板预裂孔防冲机理研究及应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 183-189.
PANG Lining, FU Shujun, SU Bo. Research and application of anti rock burst mechanism of large diameter boreholes in coal seam and roof pre-splitting holes[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 183-189.
- [9] 魏宏超, 王毅, 王博. 冲击地压煤层大直径卸压孔快速成孔关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 20-24.
WEI Hongchao, WANG Yi, WANG Bo. Key technology for rapidly drilling large diameter destressing-drillhole in rockburst coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 20-24.
- [10] 李仕为, 张宏伟, 荣海, 等. 近直立特厚煤层深孔爆破防治冲击地压效果检测[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 135-140.
LI Shiwei, ZHANG Hongwei, RONG Hai, et al. Effect of deep hole blasting for rock burst prevention and control in suberect and extremely thick coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 135-140.
- [11] 张学富, 李宇杰, 周杰, 等. 异形孔水包爆破围岩粉碎范围研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(11): 131-138.

- ZHANG Xuefu, LI Ningjie, ZHOU Jie, et al. Research on the crushing range of surrounding rock in special-shaped hole water bag blasting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(11): 131-138.
- [12] 翟新献, 翟严伟, 刘勤裕, 等. 冲击作用下含水煤样能量吸收和耗散规律及本构关系研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(6): 202-211.
- ZHAI Xinxian, ZHAI Yanwei, LIU Qinyu, et al. Energy absorption and dissipation and the constitutive relation of water-bearing coal specimens under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(6): 202-211.
- [13] ZHAO Dan, WANG Mingyu, GAO Xinhao. Study on the technology of enhancing permeability by deep hole presplitting blasting in Sanyuan coal mine[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 20353.
- [14] 张明, 姜福兴, 李克庆. 巨厚岩层采场关键工作面防冲-减震设计[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(2): 439-447.
- ZHANG Ming, JIANG Fuxing, LI Keqing. Design of rock burst prevention and mine-quake reduction in key longwall panel under super-thick strata[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(2): 439-447.
- [15] 任智敏, 吕梦蛟, 王永安, 等. 全支撑应力场下采场顶板损伤特征及释能估算[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 30-39.
- REN Zhimin, LYU Mengjiao, WANG Yong'an, et al. Damage characteristics and energy release estimation of stope roof under fully supported stress field[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 30-39.
- [16] 高富强. 工作面坚硬顶板水力压裂对采动应力影响的数值模拟研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(2): 023032.
- GAO Fuqiang. Influence of hydraulic fracturing of strong roof on mining-induced stress-insight from numerical simulation[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(2): 023032.
- [17] 魏格平, 路燕龙, 魏正, 等. 煤矿采空区强制放顶爆破技术[J]. *工程爆破*, 2017, 23(3): 10-14.
- WEI Geping, LU Yanlong, WEI Zheng, et al. Forced caving blasting technology in coal gob area[J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(3): 10-14.
- [18] 鲍先凯, 刘源, 郭军宇, 等. 煤岩体在水中高压放电下致裂效果的定量评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 715-725.
- BAO Xiankai, LIU Yuan, GUO Junyu, et al. Quantitative evaluation of fracturing effect of coal-rock masses under high-voltage discharge actions in water[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 715-725.
- [19] 安世岗, 陈殿赋, 张永民, 等. 可控电脉冲波增透技术在低透气性煤层中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 138-145.
- AN Shigang, CHEN Dianfu, ZHANG Yongmin, et al. Application of controllable electric pulse wave permeability-enhancing technology in the low-permeability coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 138-145.
- [20] 黄莹, 王云英. 电磁学原理在科学技术中的应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1998.

(责任编辑 范章群)