



## 煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理

张东晓 王翔宇 郭伟耀 张悦颖 赵同彬 吴震 方恒宇 张骞

### 引用本文:

张东晓, 王翔宇, 郭伟耀, 等. 煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 40–50.

ZHANG Dongxiao, WANG Xiangyu, GUO Weiyao. Influence of coal seam thickness on pressure relief and energy release mechanism of large-diameter drilling hole[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 40–50.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0654>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析

Analysis on mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ae8d1166-334a-4ae3-b831-a05d5c17e602>

#### 煤巷底板防冲钻孔释能解危原理及参数优化

Danger-relief principle and parameter optimization of borehole energy relief for rock burst in coal road floor

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 21–31 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0772>

#### 煤矿井下近水平钻孔大直径套管长距离下放技术

Long distance running technology of large-diameter casing with near horizontal drilling in underground coal mine

煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a6cb4b95-d0db-4aef-9bdc-5879985be67b>

#### 煤矿区地面大直径钻孔成孔关键技术与装备

Key technology and equipment of hole-forming for surface large diameter borehole in coal mine area

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 190–197 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b638df2f-cc8f-4720-b1a5-23cf6fde726f>

#### 矿用大直径钻孔连杆式回拉扩孔钻头研发及应用

Design of linkage type back reamer for large diameter drilling in coal mine

煤炭科学技术. 2021, 48(4): 213–219 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020.12.026>

#### 密集钻孔切顶卸压关键参数影响因素研究及应用

Research and application of influencing factors of key parameters of roof cutting and pressure relief by dense drilling

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 243–253 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0095>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张东晓, 王翔宇, 郭伟耀, 等. 煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 40–50.  
ZHANG Dongxiao, WANG Xiangyu, GUO Weiyao, *et al.* Influence of coal seam thickness on pressure relief and energy release mechanism of large-diameter drilling hole[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 40–50.

## 煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理

张东晓<sup>1</sup>, 王翔宇<sup>1</sup>, 郭伟耀<sup>1,2</sup>, 张悦颖<sup>1</sup>, 赵同彬<sup>1</sup>, 吴震<sup>3</sup>, 方恒宇<sup>1</sup>, 张 骞<sup>2,4</sup>

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎 852-8521; 3. 兖矿能源鄂尔多斯能化有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 石家庄铁道大学 大型结构健康诊断与控制研究所, 河北 石家庄 050043)

**摘 要:**煤层厚度变化是影响大直径钻孔卸压效果的重要因素之一。基于等效弹性模量原理建立了大直径钻孔卸压弹性力学模型, 以某矿不同工作面为工程背景, 研究了不同煤层厚度条件下大直径钻孔卸压煤体应力分布特征和能量释放规律, 探讨了煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理。研究表明: 当大直径钻孔卸压参数相同时, 薄煤层中原岩应力、钻孔切向应力及其塑性区范围均大于厚煤层; 大直径钻孔周边应力峰值随煤层厚度增加呈非线性减小趋势, 当煤层厚度由 1 m 增加到 9 m, 应力峰值由 23.2 MPa 降低到 20.2 MPa, 降低 12.9%; 大直径钻孔卸压释能率随着煤层厚度增加呈减小趋势, 当煤层厚度由 1 m 增加到 9 m, 大直径钻孔卸压释能率由 68.7% 降低到 45.8%, 即相同大直径钻孔卸压参数条件下薄煤层卸压效果更好; 当大直径钻孔卸压参数相同时, 钻孔切向应力随着煤层厚度增加而减小, 导致煤体破碎区和塑性区范围以及存储弹性能释放量减小, 即钻孔卸压释能率降低。某矿 1208 工作面和 1203 工作面煤层厚度分别为 9.08、4.95 m, 虽然两工作面采取了相同的大直径钻孔参数, 但 1208 工作面巷道围岩变形破坏更为严重, 对大直径卸压钻孔参数优化后, 煤体平均钻屑量由 2.48 kg/m 下降到 1.76 kg/m, 表明随着煤层厚度增加, 需采取减小钻孔间距、增大钻孔直径等措施来达到更好的卸压效果。

**关键词:**冲击地压; 大直径钻孔; 煤层厚度; 应力演化; 卸压释能

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)06-0040-11

### Influence of coal seam thickness on pressure relief and energy release mechanism of large-diameter drilling hole

ZHANG Dongxiao<sup>1</sup>, WANG Xiangyu<sup>1</sup>, GUO Weiyao<sup>1,2</sup>, ZHANG Yueying<sup>1</sup>, ZHAO Tongbin<sup>1</sup>, WU Zhen<sup>3</sup>,  
FANG Hengyu<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>2,4</sup>

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan; 3. Yankuang Energy Ordos Chemical Co., Ltd., Ordos 017000, China; 4. Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The variation of coal seam thickness is one of the important factors affecting the pressure relief of large-diameter drilling hole. We have established an elastic model of pressure relief of large-diameter drilling hole based on the principle of equivalent elastic modulus. Taking two working faces of a mine as engineering background, we have studied key issues of large-diameter drilling hole regarding coal seam thickness, including the stress distribution characteristics and energy release laws, and the pressure relief and energy release mechanism. Several phenomena of engineering significance have been revealed by our research. Firstly, when the parameters of large-diameter drilling hole are the same, the stress of primary rock, tangential stress and plastic zone range of thin coal seam are greater than those of thick coal seam. Secondly, the peak stress around the large-diameter drilling hole decreases nonlinearly with the increase of coal seam

收稿日期: 2023-06-10

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2023-0654

基金项目: 山东省自然科学基金重大基础研究资助项目(ZR2019ZD13); 国家自然科学基金面上资助项目(52274086); 山东省泰山学者工程项目经费资助项目(No.tstp20221126)

作者简介: 张东晓(1996—), 男, 河北张家口人, 博士研究生。E-mail: 1290763952@qq.com

通讯作者: 郭伟耀(1990—), 男, 山西朔州人, 教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: 363216782@qq.com

thickness. When the coal seam thickness increases from 1 m to 9 m, the peak stress drops by 12.9%, from 23.2 MPa to 20.2 MPa. Likewise, the pressure relief and energy release rate also decreases with the increase of coal seam thickness. When the coal seam thickness increases from 1 m to 9 m, the pressure relief and energy release rate of large-diameter drilling hole decreases from 68.7% to 45.8%, indicating that better pressure relief effect can be achieved in thin coal seam. Moreover, when the parameters of large-diameter drilling hole are the same, the increase of coal seam thickness causes decrease of the tangential stress and thereby results in the decrease of the range of coal fragmentation zone and plastic zone, and the amount of the released elastic energy, which reduces the pressure relief energy release rate. The coal seam thicknesses of working faces 1208 and 1203 of a certain mine are 9.08 m and 4.95 m, respectively. Although the same set of large-diameter drilling hole parameters is adopted for these two working faces, the one with thicker coal seam suffers from more serious surrounding rock deformation and failure. By optimizing the parameters of large-diameter drilling hole based on our research, the average amount of drilling cuttings decreased from 2.48 kg/m to 1.76 kg/m. Therefore, we suggest that as the coal seam thickness increases, measures such as reducing drilling spacing and increasing drilling diameter should be considered in order to guarantee the expected pressure relief effect.

**Key words:** rock burst; large-diameter drilling hole; coal seam thickness; stress evolution; pressure relief and energy release

## 0 引言

我国 90% 以上的煤炭产量来自井工开采,埋深 1 000 m 以下的煤炭资源占已探明煤炭资源 53%<sup>[1]</sup>。经过长期大规模开发,浅部煤炭资源日益枯竭,煤炭开采深度以每年 10~25 m 的速度增加,平均采深已达 700 m 左右<sup>[2]</sup>。深部煤岩体典型的高地应力、强开采扰动等条件,使得深部开采冲击地压等动力灾害频发,严重影响着矿井安全生产<sup>[3]</sup>。目前国内大直径钻孔卸压作为防治冲击地压的主要手段之一,具有施工难度低、卸压效果明显等优点,因此该技术被广泛应用于煤矿冲击地压防治<sup>[4-5]</sup>。

针对大直径钻孔卸压参数方面的问题,国内外学者开展了大量研究。早在 20 世纪 50 年代,西德科学团队首次利用大直径钻孔方法来防治冲击地压并取得明显效果,后来中国学者侯志鹰<sup>[6]</sup>在 1991 年提出钻孔卸压是一个释能过程,并通过理论计算以及现场实践等方法初步揭示了钻孔卸压机理。此后,学者们主要采用数值模拟及理论研究等方法,对钻孔直径、间排距、深度、布置方式等因素对大直径钻孔卸压效果的影响进行了一系列研究<sup>[7-10]</sup>。而实际工程中,钻孔布置还应该考虑采掘因素的影响,部分学者研究了不同采掘条件下煤层大直径钻孔卸压规律,通过建立力学模型,探讨了采掘工作面大直径钻孔卸压失效机理<sup>[11-12]</sup>。也有学者通过室内试验研究了钻孔数量、直径、深度等因素影响下煤岩体破坏特征,并从能量角度评价了钻孔卸压的效果<sup>[13-18]</sup>。

目前大部分学者注重钻孔参数对大直径钻孔卸压效果影响的研究<sup>[19-20]</sup>,但关于煤层厚度影响下大直径钻孔卸压机理涉及较少。针对该问题,基于等效弹性模量原理建立了大直径钻孔卸压弹性力学模型,以某矿不同工作面为工程背景,采用数值模拟方

法研究了不同煤层厚度条件下大直径钻孔卸压煤体应力分布特征和能量释放规律,探讨了煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能力学机理。

## 1 大直径钻孔卸压力学分析

图 1 给出了不同煤层厚度等效弹性模量示意。在采掘地质工程条件相同时,假设不同煤层厚度条件下煤岩体受力大小相同,但由于煤层厚度变化,必然造成“顶板-煤层”串联体的等效弹性模量不同,即  $E_C > E$ 。根据未受采掘活动影响时煤层及顶底板的应力状态,假设煤层处于线弹性阶段,此时可以将煤层及顶板视为弹簧结构,则其力学模型可以用 2 个

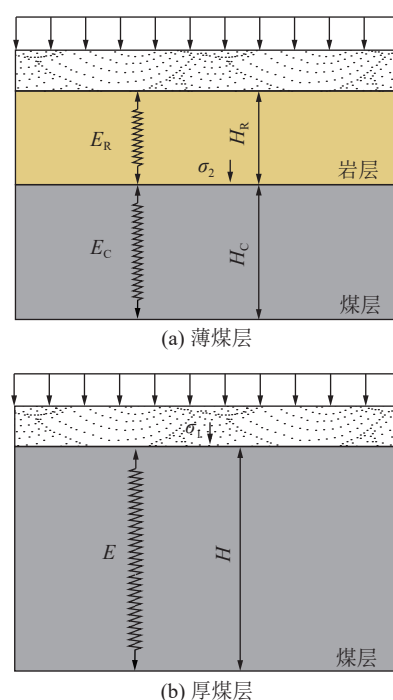


图 1 不同煤层厚度等效弹性模量示意  
Fig.1 Diagram of equivalent elastic modulus of different coal seam thicknesses

串联的弹性单元组合描述。

煤层与岩层的等效弹性模量  $E_C$ <sup>[21]</sup> 为

$$\frac{1}{E_C} = \frac{1}{E_R} + \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{E_R} \right) \frac{H_R}{H} \quad (1)$$

式中:  $E_R, E$  分别为岩石、煤的弹性模量, MPa;  $H = H_R + H_C$ ,  $H_R, H_C$  分别为岩石、煤的厚度, m。

根据弹性力学平衡原理可得:

$$\sigma_1 = E\varepsilon \quad (2)$$

$$\sigma_2 = E_C\varepsilon \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1, \sigma_2$  分别为厚、薄煤层应力, MPa。

当煤层进行大直径钻孔卸压后, 煤层周围煤体应力会进行重新分布, 如图2所示。

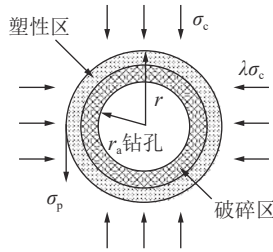


图2 钻孔周边应力分布

Fig.2 Stress distribution around the drilling

在双向等压的情况下, 大直径钻孔周围塑性区内切向应力公式<sup>[19]</sup>为

$$\sigma_p = \frac{\sigma_c}{\xi - 1} \left[ \xi \left( \frac{r}{r_a} \right)^{\xi-1} - 1 \right] \quad (4)$$

式中:  $\sigma_c$  为煤层应力, MPa。联立式(1)一式(4), 可得:

$$\begin{cases} \sigma_{p1} = \frac{E\varepsilon}{\xi - 1} \left[ \xi \left( \frac{r}{r_a} \right)^{\xi-1} - 1 \right] \\ \sigma_{p2} = \frac{EE_R H \varepsilon}{(EH + E_R H_C - EH_C)(\xi - 1)} \left[ \xi \left( \frac{r}{r_a} \right)^{\xi-1} - 1 \right] \end{cases} \quad (5)$$

引入修正系数  $N$  后, 式(5)为:

$$\begin{cases} \sigma_{p1} = \frac{E\varepsilon}{\xi - 1} \left[ \xi \left( \frac{r}{r_a} \right)^{\xi-1} - 1 \right] N \\ \sigma_{p2} = \frac{EE_R H \varepsilon}{(EH + E_R H_C - EH_C)(\xi - 1)} \left[ \xi \left( \frac{r}{r_a} \right)^{\xi-1} - 1 \right] N \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{p1}, \sigma_{p2}$  分别为厚、薄煤层大直径钻孔周围切向应力, MPa;  $r$  为塑性区半径, m;  $r_a$  为钻孔半径, m;  $\xi$  为只与煤体内摩擦角相关的固定系数, 可根据式(7)计算:

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

式中:  $\varphi$  为煤体内摩擦角, (°)。

将同等埋深不同煤层厚度原岩应力比值设为修正系数  $N$ <sup>[22-24]</sup>。考虑到实际生产中厚度 1 m 以下煤层为不可采煤层, 以厚度 1 m 煤层为基准, 使  $N$  的取值为厚度大于 1 m 的煤层原岩应力与厚度 1 m 煤层原岩应力的比值, 其取值介于 0 ~ 1,  $N$  随着煤层厚度增加呈非线性减小趋势直至趋于 0。

在各项等压条件下, 圆孔塑性区半径  $R$  的计算公式<sup>[25]</sup> 为:

$$R = r_a \left[ \frac{(p + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_i + C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (8)$$

式中:  $p$  为原岩应力, MPa;  $\varphi$  为煤体内摩擦角, (°);  $r_a$  为钻孔半径, m;  $C$  为围岩黏聚力, MPa。

一般情况下  $E < E_R, H_R < H$ , 即  $E_C > E$ , 所以  $\sigma_{p2} > \sigma_{p1}$ , 即厚煤层大直径钻孔切向应力比薄煤层小。为了进一步研究煤层厚度对钻孔切向应力的影响, 取塑性区半径  $r$  为 0.2 m, 钻孔半径  $r_a$  为 0.15 m, 煤体内摩擦角  $\varphi$  为 31°, 即  $\xi=3$ , 根据式(6)计算了不同煤层厚度下钻孔切向应力大小, 具体如图3所示。随着煤层厚度的增加, 钻孔切向应力呈非线性减小趋势, 当煤层厚度由 1 m 增大到 9 m, 钻孔切向应力由 21.4 MPa 减小到 17.5 MPa, 减小了 18.2%。

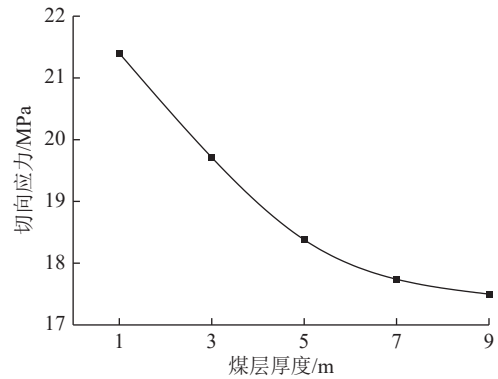


图3 不同煤层厚度钻孔周边切向应力大小

Fig.3 Tangential stress around drilling hole under different coal seam thicknesses

可见, 在薄煤层进行大直径钻孔卸压后, 钻孔周边切向应力比厚煤层大。即在煤层参数以及初始应力相等的条件下, 薄煤层中原岩应力、钻孔周边切向应力以及塑性区范围均大于厚煤层。

## 2 煤层厚度影响下钻孔卸压效果数值模拟分析

### 2.1 模型建立及模拟方案

为进一步分析不同煤层厚度条件下大直径钻孔卸压效果, 建立了 FLAC<sup>3D</sup> 数值模型, 模型长宽分别

为 40、70 m,高度根据煤层厚度变化(图 4)。模型取上中下三层,上层为厚 6 m 的中细砂岩顶板、中间为厚度 1~9 m 的煤层、下层为厚 4 m 的砂质泥岩底板。模型 Z 方向上部为自由边界,其余方向为固定边界,模拟埋深 690 m,顶部施加垂直压力 15 MPa;侧压系数取值 1,y 方向施加 15 MPa 的水平应力;力学模型采用 Mohr-coulomb 模型。鉴于本次数值模拟仅分析不同煤层厚度下单个大直径钻孔卸压效果,煤层厚度取 1、3、5、7、9 m 共 5 种情况。大直径钻孔位于煤层中部,钻孔孔深、直径分别为 20、0.15 m。应力监测线沿 x 方向布置于钻孔左侧。煤层及顶底板岩层物理力学参数见表 1。

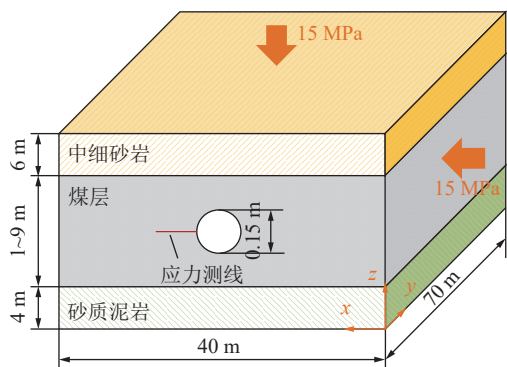


图 4 大直径钻孔模型

Fig.4 The model of large-diameter drilling hole

表 1 煤层及顶底板岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal, roof and floor Strata

岩性	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	内摩擦角/(°)
中细砂岩	7.20	0.20	20	36
2-2煤	2.40	0.20	23	31
砂质泥岩	13.80	0.15	30	36

2.2 模拟结果分析

图 5 给出了不同煤层厚度条件下大直径钻孔周围塑性区分布特征。大直径钻孔周边塑性区范围随着煤层厚度增加逐渐减小。根据式(1),等效弹性模量后的薄煤层大于厚煤层弹性模量,即  $E_c > E$ ,根据式(2)、(3)计算可得薄煤层应力大于厚煤层,在更高应力作用下的薄煤层施工大直径钻孔则会使得钻孔周围煤体应力向远处转移,在塑性区与弹性区边界处形成应力集中区,煤体应力越大,形成塑性区范围越广。由数值模拟结果可知,当煤层厚度由 1 m 增加到 9 m 时,塑性区最大范围由 0.25 m 减小到 0.19 m,减小约 20%,即相同大直径钻孔参数下,薄煤层煤体破碎范围更大,卸压效果更好。此外,当煤层厚度较小时,大直径钻孔周边多以剪切破坏为主,塑性区范围整体呈“X”形,且钻孔左右两侧的塑性区范围明

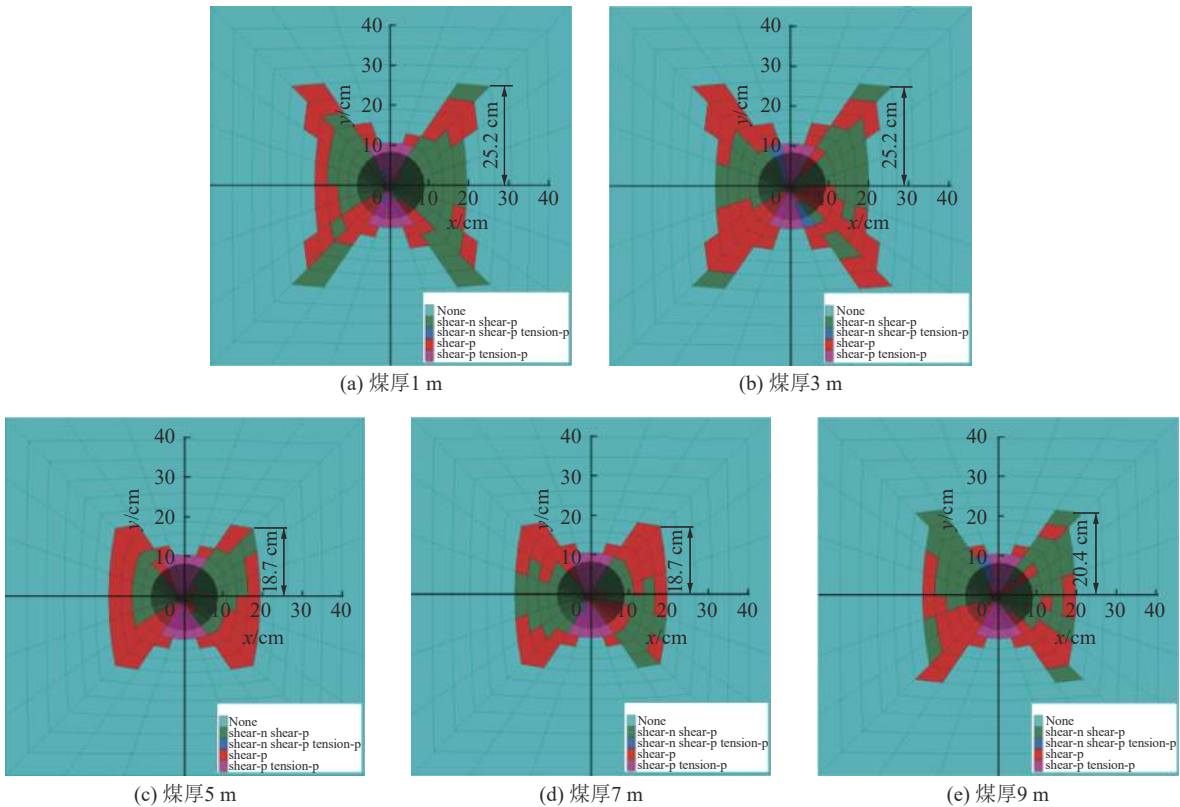


图 5 不同煤层厚度钻孔周围塑性区分布

Fig.5 Distribution of plastic zones around drilling hole under different coal seam thicknesses

显大于上下区域,而当煤层厚度较大时,大直径钻孔周边仍以剪切破坏为主,但“X”形塑性区范围不明显。

图6给出了不同煤层厚度下大直径钻孔周边垂直应力分布曲线。大直径钻孔周边垂直应力随着与钻孔距离的增加呈先迅速增加后逐渐减小并趋于稳定的趋势,峰值应力随着煤层厚度增加呈非线性减小趋势。当煤层厚度由1 m增加至9 m,垂直应力峰值由23.2 MPa减小到20.2 MPa,减小约15.1%。该现象表明当大直径钻孔参数相同时,薄煤层原岩应力大于厚煤层,分布在薄煤层钻孔周围破碎的煤体体积更大,煤体破碎时释放的能量越大,煤体中剩余的弹性应变能就越小。

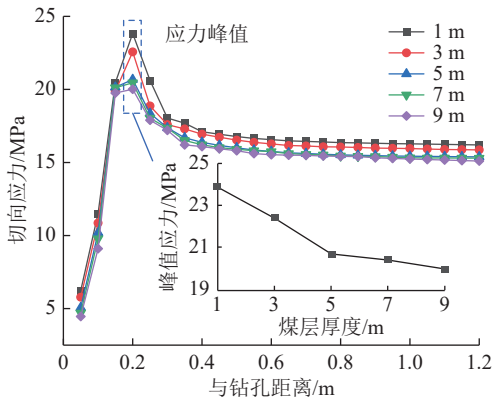


图6 不同煤层厚度下大直径钻孔周边垂直应力演化规律

Fig.6 Evolution law of surrounding stress of large-diameter drilling hole under different coal seam thicknesses

### 3 大直径钻孔卸压释能机理

#### 3.1 能量释放率计算方法

煤体破坏是能量耗散驱动下的一种状态失稳现象。同等煤体条件下,大直径钻孔对煤体弹性应变能耗散量越多,煤体储存能量就越少。因此,可以通过考察大直径钻孔卸压释能率来评价煤体卸压效果。大直径钻孔卸压释能率 $\eta$ 计算公式<sup>[13]</sup>:

$$\eta = \frac{U_0 + W - U_{dr}}{U_0} \quad (9)$$

式中: $U_0$ 为进行大直径钻孔卸压前各单元弹性应变能之和, MJ;  $U_{dr}$ 为进行大直径钻孔卸压后各单元弹性应变能之和, MJ;  $W$ 为进行大直径钻孔卸压模型计算过程中上部边界载荷 $\sigma_z$ 总做功量, MJ。假设大直径钻孔耗散的总能量为 $\Delta U_{dr}$ , 令 $\Delta U_{dr} = U_0 + W - U_{dr}$ 。

$U_0$ 计算公式为:

$$U_0 = U_e V \quad (10)$$

式中: $U_e$ 为进行大直径钻孔卸压前模型中的弹性能密度, MJ/m<sup>3</sup>, 各单元取值相同;  $V$ 为进行大直径钻孔

卸压前模型总体积, m<sup>3</sup>。

$U_{dr}$ 计算公式为

$$U_{dr} = \sum_{i=1}^m U_i V_i \quad (11)$$

式中: $U_i$ 为进行大直径钻孔卸压后模型中第 $i$ 个单元的弹性能密度, MJ/m<sup>3</sup>,  $V_i$ 为进行大直径钻孔卸压后模型中第 $i$ 个单元的体积, m<sup>3</sup>;  $m$ 为进行大直径钻孔卸压后模型中单元体的个数。

$W$ 的计算公式为

$$W = \sigma_z S \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (12)$$

式中: $S$ 为模型上部边界面积, m<sup>2</sup>;  $d_i$ 为上部边界第 $i$ 个节点在 $\sigma_z$ 作用下产生的位移, m;  $n$ 为上部边界节点个数。

#### 3.2 卸压释能规律

为研究不同煤层厚度条件下大直径钻孔释能规律,建立了单排大直径钻孔FLAC<sup>3D</sup>数值模型,大直径钻孔间距为1 m,其他参数与3.1节相同。图7给出了不同厚度煤层进行大直径钻孔卸压后高能区分布特征。根据煤层初始积累弹性能密度以及大直径钻孔卸压后煤体弹性能密度分布情况,将能量密度高于 $1 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup>定义为高能区,高能区网格数量随着煤层厚度增加明显增多,当煤层厚度为1 m时,钻孔两侧高能区网格呈扇形分布,将能量密度高于 $1 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup>定义为高能区,高能区网格数量随着煤层厚度增加明显增多,当煤层厚度为1 m时,钻孔两侧高能区网格呈扇形分布在钻孔两侧0.05 ~ 0.15 m,最大能量密度达到 $1.75 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup>;而当煤层厚度为5 m时,钻孔间的高能网格区域互相连接,钻孔单侧高能区网格范围为0.03 ~ 0.50 m,最大能量密度达到 $3.13 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup>;最后当煤层厚度为8 m时,钻孔单侧高能区网格范围为0.03 ~ 0.50 m,最大能量密度达到 $3.96 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup>,该现象表明在相同大直径钻孔参数条件下,厚煤层能量耗散远小于薄煤层。

图8给出了大直径钻孔卸压前后煤体弹性能密度分布曲线。卸压前煤体弹性能密度随着煤层厚度增加逐渐减小,当煤层厚度分别为1 m和9 m时,煤体的弹性能密度分别为4.97、2.79 MJ/m<sup>3</sup>。卸压后煤体弹性能密度随着与钻孔孔壁距离的增加呈先骤减后增加的趋势,距离钻孔孔壁0.2 m达到最小值,但不同厚度煤体的弹性能密度演化规律具有一定区别。卸压后煤体弹性能密度下降幅值随着煤层厚度增加而逐渐减小,当煤层厚度分别为1 m和9 m时,卸压后煤层弹性能密度最低分别为0.8、0.3 MJ/m<sup>3</sup>,相比

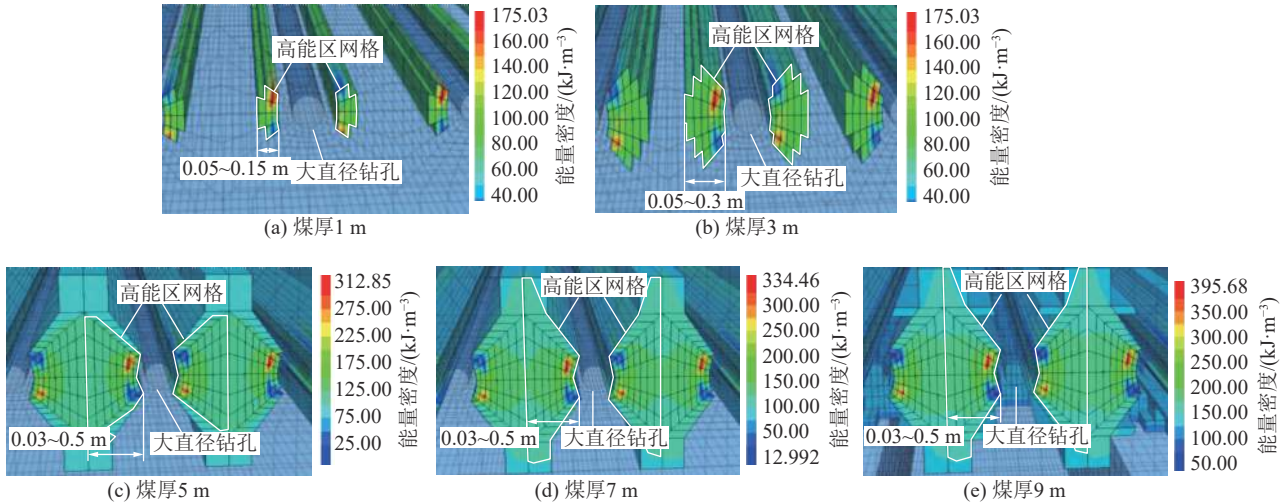


图7 不同厚度煤层进行大直径钻孔卸压后高能区分布

Fig.7 Distribution of high energy zone after pressure relief by large-diameter drilling hole under different coal seam thicknesses

卸压前减小了 4.17、2.49 MJ/m<sup>3</sup>, 该现象表明钻孔卸压前后的煤体弹性能密度比随着煤层厚度增加逐渐减小。

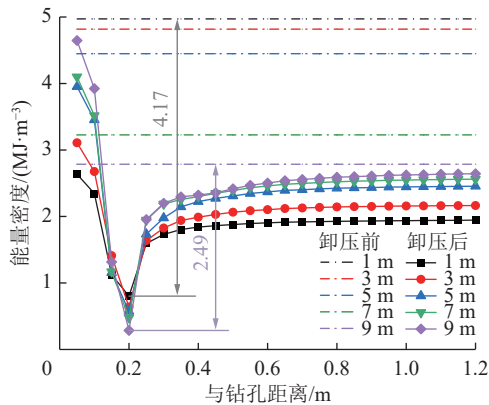


图8 大直径钻孔卸压前后煤体弹性能演化规律

Fig.8 Elastic energy evolution law of coal before and after pressure relief of large-diameter drilling hole

表2给出了不同煤厚大直径钻孔卸压释能率计算结果。在大直径钻孔参数相同条件下,大直径钻孔卸压释能率随着煤层厚度增加逐渐减小,卸压释能率由 68.7% 降低到 48.5%。图9给出了大直径钻孔卸压释能率与煤层厚度关系曲线。大直径钻孔卸压释能率随煤层厚度增加呈非线性减小趋势,可用指数函数进行拟合( $R^2=0.99$ ),表明当大直径钻孔参数相同时,煤层厚度越大其卸压释能效果越不明显。

### 3.3 卸压释能机理探讨

工程中常利用大直径钻孔方法来降低煤体应力集中程度或改变煤体力学特性,使煤体由突发式非稳定破坏转变为渐进式稳定破坏<sup>[22]</sup>。钻孔周围的煤体在高应力作用下产生破坏并形成破碎区,多个破

表2 大直径钻孔卸压释能率

Table 2 Pressure relief and energy release rate of large-diameter drilling hole

煤层厚度/m	能量密度/(MJ·m <sup>-3</sup> )		大直径钻孔卸压释能率/%
	大直径钻孔卸压后煤体	大直径钻孔卸压前煤体	
1	1.651 1	2.785 4	68.7
3	1.997 2	3.227 0	61.6
5	2.922 6	4.448 2	52.2
7	3.224 2	4.816 8	49.4
9	3.348 3	4.972 2	48.5

碎区连接形成一条卸压区,使得应力峰值减小并向煤体深处转移,由此改变煤体的力学性质,减小了煤体储存极限。

图10给出了不同煤层厚度大直径钻孔释能机制。煤体在外力作用下产生变形,假设在该过程中没有与外界发生热交换,外力功输入总能量为  $U$ ,则由热力学第一定律<sup>[19]</sup>得:

$$U = U^d + U^e \quad (13)$$

式中:  $U^d$  为大直径钻孔耗散能, MJ;  $U^e$  为煤体储存弹性能, MJ。

在煤层大直径钻孔施工过程中,  $U^d$  可表示<sup>[23]</sup> 为如下形式:

$$U^d = f(U^p, U^s, U^v, U^f, U^x) \quad (14)$$

式中:  $f$  为  $U^p, U^s, U^v, U^f, U^x$  的一般非线性函数;  $U^p$  为塑性变形对应的塑性变形能, 主要分布在钻孔周围的塑性区;  $U^s$  为钻孔周边新形成裂纹所耗费的表面能, 主要分布在破碎区;  $U^v$  为发生孔内冲击时, 由钻孔周边抛向钻孔空间的小煤块所携带的动能;  $U^f$  为

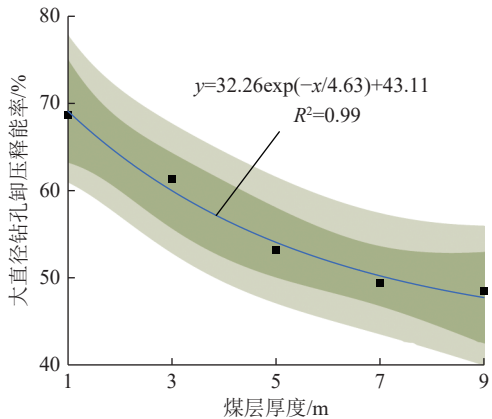


图9 大直径钻孔卸压释能率与煤层厚度关系

Fig.9 Relationship between pressure relief and energy release rate of large-diameter drilling hole and coal seam thickness

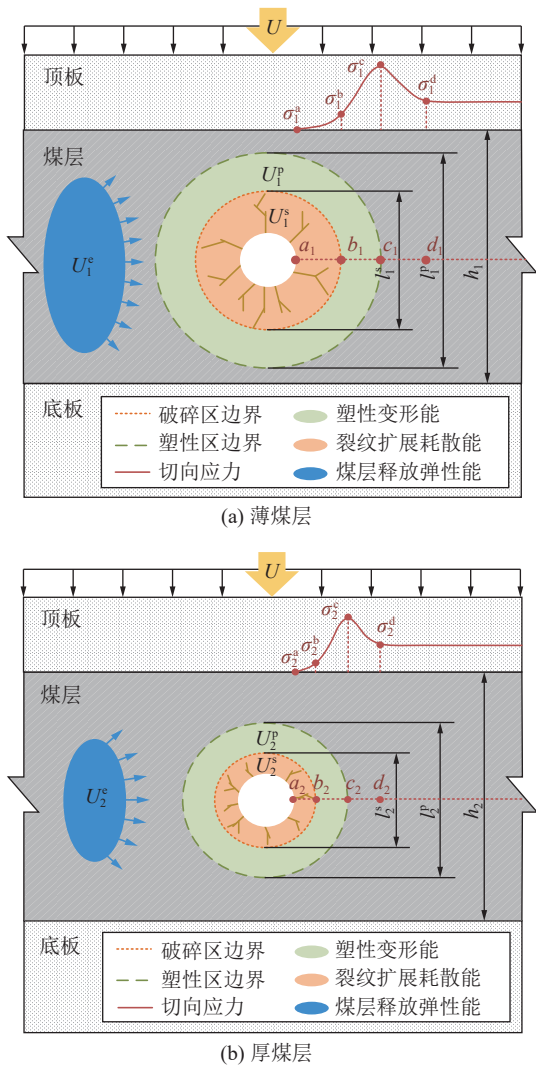


图10 不同煤层厚度大直径钻孔卸压释能机理

Fig.10 Pressure relief and energy release mechanism of large-diameter drilling hole under different coal seam thicknesses

各种辐射能,包括震动辐射、电磁辐射、红外辐射等;  
 $U^*$  为的其他形式的能量。

假设薄煤层与厚煤层的厚度分别为  $h_1$ 、 $h_2$ , 且外力输入的总能量  $U$  不变。当大直径钻孔参数相同时, 薄煤层中钻孔切向应力峰值点  $c_1$  与孔壁距离大于厚煤层  $c_2$ , 对应的峰值应力  $\sigma_1^c$  也大于厚煤层  $\sigma_2^c$ , 导致薄煤层中钻孔周围破碎区  $l_1^p$  与塑性区  $l_1^s$  大于厚煤层  $l_2^p$  和  $l_2^s$ , 进一步使得薄煤层的塑性变形能  $U_1^p$  和裂纹扩展耗散能  $U_1^s$  大于厚煤层  $U_2^p$  和  $U_2^s$ , 即薄煤层中大直径钻孔耗散的煤体弹性能要大于厚煤层。该现象表明不同厚度煤层卸压效果受能量释放主控, 煤体释放能量的主要途径为转移应力峰值以及增大塑性区, 当采掘情况、埋深、煤体力学性质等条件不变时, 薄煤层原岩应力相比厚煤层更大, 在钻孔卸压后, 较大的钻孔切向应力导致薄煤层更容易产生破坏, 导致破碎区和塑性区范围相比厚煤层更大, 更多的煤体弹性能释放转变为塑性变形能和裂纹扩展耗散能, 大直径钻孔卸压释能率增大。

#### 4 工程实践

##### 4.1 工程概况

某矿 1203 与 1208 工作面布置如图 11 所示。1203 工作面位于 12 盘区中北部, 东部为 12 上 05 综采工作面, 西侧为 1201 工作面采空区, 南侧为东翼四条大巷, 北侧为 12 北 1 工作面。1203 工作面长 289 m, 推进长度 2 337.2 m, 平均埋深 692.9 m, 倾角  $0^\circ \sim 5^\circ$ , 平均  $2^\circ$ , 属于近水平煤层, 煤层厚度 4.3 ~ 5.6 m, 平均

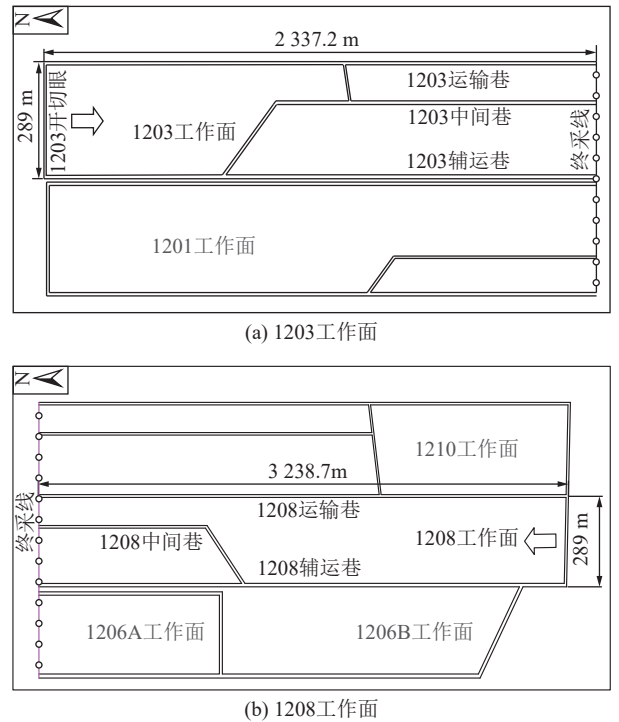


图11 1203 与 1208 工作面布置

Fig.11 Layout diagram of working face No.1203 and No.1208

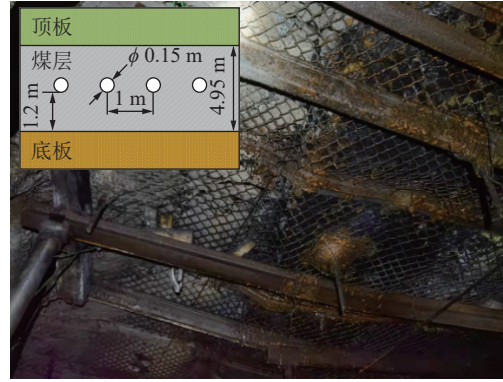
4.95 m, 煤层厚度稳定, 普氏系数  $f=1.79$ , 为中等硬度煤层。1203 工作面内小节理和小型褶曲较发育, 无大落差断层、无陷落柱、岩浆岩侵入, 地质条件简单。

1208 工作面位于 12 盘区中南部, 东侧为 1210 综放工作面, 南部为天然气井保护煤柱, 西侧为停采的 1206A 综放工作面, 北距+650 m 东翼大巷保护煤柱 20 m。1208 工作面长 289 m, 推进长度 3 238.7 m, 平均埋深 691.6 m, 倾角  $0^{\circ} \sim 3^{\circ}$ , 平均  $1^{\circ}$ , 属于近水平煤层, 煤层厚度 8.5 ~ 9.9 m, 平均 9.08 m, 煤层厚度稳定, 普氏系数  $f=1.79$ , 为中等硬度煤层。1208 工作面内小型节理较发育, 无大落差断层、无陷落柱、岩浆岩侵入, 地质条件简单。1203 与 1208 工作面开采条件大部分相似。

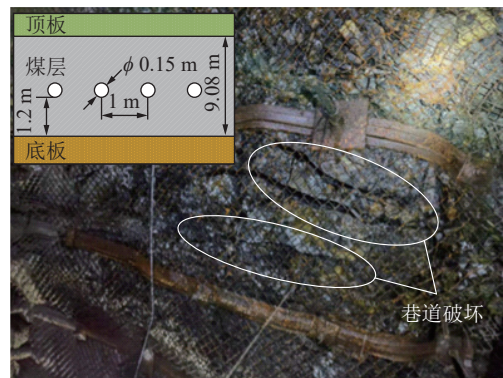
图 12 给出了 1203 与 1208 工作面巷道变形情况。1203 与 1208 工作面采用相同的大直径钻孔参数, 钻孔位置布设在距离底板 1.2 m 处, 钻孔直径为 0.15 m, 钻孔间距为 1 m, 钻孔深度为 20 m, 布设方式为单排布设。1203 工作面巷道围岩变形较小, 锚固支护结构较为完好; 但 1208 工作面部分巷道区域围岩变形破坏较严重, 甚至出现锚固支护结构失效现象。

#### 4.2 实践效果

针对 1208 工作面支护失效现象, 需要对其工作面大直径钻孔参数进行优化, 在文章第 3 小节的数值模型基础上, 以大直径钻孔间距为变量, 分别模拟钻孔间距为 0.7、0.8、0.9、1 m 时的煤体垂直应力分布情况, 如图 13 所示。大直径钻孔间距为 1 m 时, 钻孔卸压范围不能相互连接, 形成应力集中的双峰区域且应力集中区域分布范围较大, 卸压效果较差; 钻孔间距为 0.9 m 时, 钻孔卸压范围相互连接形成一



(a) 1203 工作面运输巷



(b) 1208 工作面运输巷

图 12 1203 与 1208 工作面巷道变形情况

Fig.12 Roadway deformation situation of working face No.1203 and No.1208

个应力集中区, “x” 方向范围为 0.6 m; 钻孔间隔为 0.8 m 时, 应力集中区范围进一步缩小, “x” 方向范围仅为 0.2 m; 钻孔间隔为 0.7 m 时, 应力集中区范围略微增大, 即过小的钻孔间距导致煤体卸压过度。

在第 3 节的数值模型基础上, 以大直径钻孔直径为变量, 分别模拟钻孔直径为 0.15、0.2、0.25、0.3 m 情况下相邻钻孔之间 “x” 方向煤体垂直应力分布情

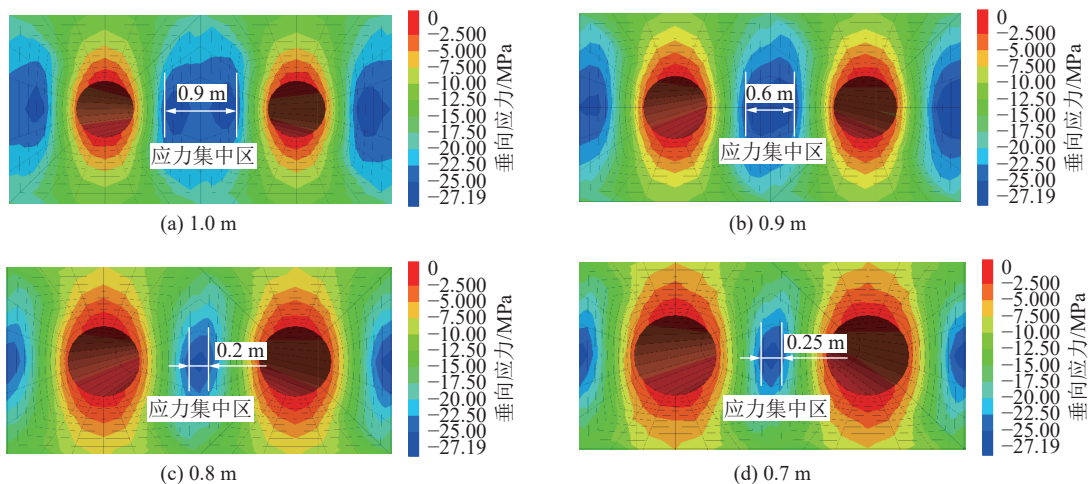


图 13 不同钻孔间距下煤体垂直应力分布情况

Fig.13 Vertical stress distribution of coal mass under different drilling hole spacings

况,如图14所示。当钻孔直径为0.15 m时,应力集中区呈双峰分布且应力集中区分布较大,“x”方向范围为0.6 m;当钻孔直径为0.2 m时,应力集中区范围大幅度缩小且“x”方向范围为0.2 m;钻孔直径进一步增大时,应力集中程度进一步加剧,且应力曲线有向内凹陷趋势,说明卸压程度由充分卸压向过度卸压过渡<sup>[24]</sup>。

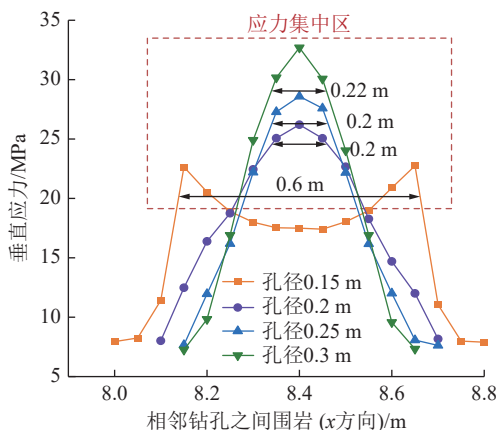


图14 不同钻孔直径下煤体垂直应力分布情况

Fig.14 Vertical stress distribution of coal mass under different drilling hole diameters

图15给出了1208工作面大直径钻孔参数优化前后钻屑量演化规律。基于文中研究,对1208工作面大直径钻孔卸压参数进行优化,钻孔直径由0.15 m增加至0.2 m,钻孔间距由1 m减小至0.8 m。在进行大直径钻孔参数优化前,煤体平均钻屑量为2.48 kg/m,表明煤体处于相对高应力状态,但在进行大直径钻孔参数优化后,煤体平均钻屑量减小至1.76 kg/m,减小28.88%,表明煤体相比之前处于较低应力状态。在优化大直径钻孔参数后,煤体卸压效果得到了明显提升,该现象表明随着煤层厚度的增加,常规的大直径卸压钻孔参数可能不再适用,需采取减小钻孔间距、增大钻孔直径、增加钻孔深度等措施来达到更好的卸压效果。

实际上,巷道围岩在开挖卸荷之前处于三向应力状态,巷道掘进后会产生临空面,靠近临空面岩体的水平应力在卸荷作用下降至0 MPa左右,垂直方向也会产生应力调整,两侧围岩切向应力集中以及临空面扩容效应导致该区域围岩产生层状裂纹,裂纹扩展贯通导致层状结构向临空面屈曲张开,由此形成塑性区(包括破坏区)、弹性区以及原岩应力区,而大直径钻孔将煤壁峰值应力由原本的塑性区和弹性区交界位置向更深处转移,如图16所示。此外,锚固支护主要发挥协同承载和围岩补强作用,锚

杆将层状围岩结构“串联”协同承载,对松散岩石起到挤压联结和加固作用,部分围岩被锚固后恢复了三向受力状态,增加了其本身的强度,同时还可增加岩层弱面的剪断阻力,使围岩不易产生变形破坏。在工作面回采期间,工作面超前采动应力使得采场前方煤壁应力集中程度升高,不同煤层厚度导致煤层开采方法不同,由此产生的超前采动应力峰值以及超前影响范围均不同,后续将结合现场工作面开采的矿压监测数据进行深入分析,进一步揭示巷道围岩支承压力、锚固支护以及工作面采动应力等因素对大直径钻孔卸压的影响规律。

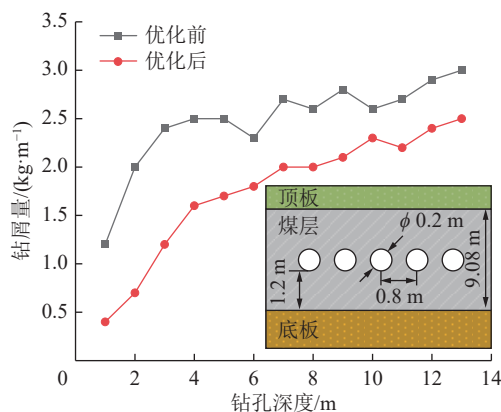


图15 大直径钻孔参数优化前后煤体钻屑量演化规律

Fig.15 Evolution law of coal cuttings before and after parameter optimization of large-diameter drilling hole

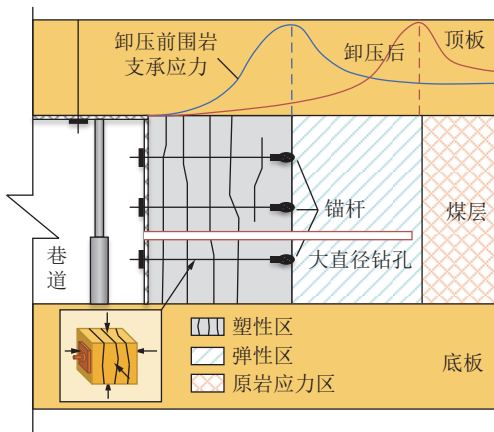


图16 巷道围岩破坏分区及锚固支护示意

Fig.16 Diagram of roadway surrounding rock failure zone and anchoring support

## 5 结 论

1)大直径钻孔周边切向应力随着煤层厚度的增加呈非线性减小趋势,煤层厚度由1 m增加到9 m,钻孔切向应力由21.4 MPa减小至17.5 MPa,减小18.2%。大直径钻孔周边应力峰值随着煤层厚度增加呈非线性

性减小趋势,钻孔周边应力峰值由 23.2 MPa 减小至 20.2 MPa,减小 12.9%。

2)大直径钻孔卸压释能率随着煤层厚度增加呈减小趋势,当煤层厚度由 1 m 增加到 9 m,大直径钻孔卸压释能率由 68.7% 降低到 45.8%,即相同大直径钻孔卸压参数条件下薄煤层卸压效果更好。

3)当大直径钻孔卸压参数相同时,钻孔切向应力随着煤层厚度增加而减小,导致煤体破碎区和塑性区范围以及存储弹性能释放量减小,即钻孔卸压释能率降低。随着煤层厚度增加,需采取减小钻孔间距、增大钻孔直径等措施来达到更好的卸压效果。

# 参考文献(References):

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [2] 谭云亮,王子辉,刘学生,等.采动诱冲动能估算及冲击危险性评价[J].煤炭学报,2021,46(1):123-131.  
TAN Yunliang, WANG Zihui, LIU Xuesheng, et al. Estimation of dynamic energy induced by coal mining and evaluation of burst risk[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 123-131.
- [3] 蓝航,齐庆新,潘俊锋,等.我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J].煤炭科学技术,2011,39(1):11-15,36.  
LAN Hang, QI Qingxin, PAN Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 11-15, 36.
- [4] 谭云亮,郭伟耀,辛恒奇,等.煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J].煤炭学报,2019,44(1):160-172.  
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160-172.
- [5] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [6] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.  
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [7] 李金奎,熊振华,刘东生,等.钻孔卸压防治巷道冲击地压的数值模拟[J].西安科技大学学报,2009,29(4):424-426,432.  
LI Jinkui, XIONG Zhenhua, LIU Dongsheng, et al. Numeric simulation of borehole pressure relief preventing roadway rockburst of a mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(4): 424-426, 432.
- [8] 谭云亮,郭伟耀,赵同彬,等.深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J].煤炭学报,2020,45(1):66-81.  
TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Coal rib burst mechanism in deep roadway and “stress relief-support reinforcement” synergetic control and prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 66-81.
- [9] 刘红岗,贺永年,徐金海,等.深井煤巷钻孔卸压技术的数值模拟与工业试验[J].煤炭学报,2007,32(1):33-37.  
LIU Honggang, HE Yongnian, XU Jinhai, et al. Numerical simulation and industrial test of boreholes destressing technology in deep coal tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 33-37.
- [10] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.  
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [11] 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 Liuhuanggou coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 45-53.
- [12] 刘冬桥,刘赫赫,王 炆,等.钻孔卸压防治岩爆实验及破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):100-114.  
LIU Dongqiao, LIU Hehe, WANG Yang, et al. Experiment study on drilling pressure relief for rockburst prevention and its failure characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 100-114.
- [13] 王书文,潘俊锋,刘少虹,等.基于能量耗散率的钻孔防冲效果评价方法[J].煤炭学报,2016,41(S2):297-304.  
WANG Shuwen, PAN Junfeng, LIU Shaohong, et al. Evaluation method for rockburst-preventing effects by drilling based on energy-dissipating rate[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 297-304.
- [14] 张宏伟,李云鹏,陈 莹,等.三硬条件下孤岛区域大直径钻孔防冲方案优化[J].安全与环境学报,2017,17(5):1823-1827.  
ZHANG Hongwei, LI Yunpeng, CHEN Ying, et al. Research on optimizing large diameter drilling scheme of rockburst prevention in isolated area under three hard conditions[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1823-1827.
- [15] 吴建亭.大直径长距离高位钻孔参数优化与实施[J].煤炭科学技术,2010,38(8):63-65,69.  
WU Jianting. Optimization and implementation on large diameter and long distance high level borehole parameters[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(8): 63-65, 69.
- [16] 郑文贤,王 凯,李全中,等.大直径钻孔“以孔代巷”上隅角瓦斯治理参数优化及应用[J].中国矿业,2021,30(9):145-149.  
ZHENG Wenxian, WANG Kai, LI Quanzhong, et al. Optimization

- tion and application of gas control parameters in the upper corner of large diameter borehole[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(9): 145-149.
- [17] 赵阳升, 冯增朝, 万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1781-1783.
- ZHAO Yangsheng, FENG Zengchao, WAN Zhijun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1781-1783.
- [18] LI Y K, ZHAO T B, LI Y F, *et al.* A five-parameter constitutive model for hysteresis shearing and energy dissipation of rock joints[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(4): 737-746.
- [19] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006: 153-159.
- [20] 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 Heping, JU Yang, LI Liyun. 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.
- [21] 赵同彬, 郭伟耀, 谭云亮, 等. 煤厚变异区开采冲击地压发生的力学机制[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1659-1666.
- ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, TAN Yunliang, *et al.* Mechanics mechanism of rock burst caused by mining in the variable region of coal thickness[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1659-1666.
- [22] 贾传洋, 蒋宇静, 张学朋, 等. 大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(6): 1115-1122.
- JIA Chuanyang, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, *et al.* Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(6): 1115-1122.
- [23] 宋大钊. 冲击地压演化过程及能量耗散特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012: 64-71.
- SONG Dazhao. Research on rockburst evolutionary process and energy dissipation characteristics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012: 64-71.
- [24] 王 猛, 王襄禹, 肖同强. 深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1138-1145.
- WANG Meng, WANG Xiangyu, XIAO Tongqiang. Borehole destressing mechanism and determination method of its key parameters in deep roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1138-1145.
- [25] 李永恩, 郭晓菲, 马念杰, 等. 孔洞围岩塑性区边界计算的理论研究现状与分析评价[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 141-150.
- LI Yongen, GUO Xiaofei, MA Nianjie, *et al.* Research status and evaluation of theoretical calculation of plastic zone boundary for hole surrounding rock[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 141-150.