

中文引用格式:吕鹏飞,王永亮,梁野,等. 倾斜厚煤层冲击危险与双巷内错布置防冲优化研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(4): 132-141.

英文引用格式:Lyu Pengfei, Wang Yongliang, Liang Ye, et al. Study on rock burst danger and double entry inward layout optimization for rock burst prevention under condition of inclined thick coal seam [J]. China Safety Science Journal,2026,36(4):132-141.

倾斜厚煤层冲击危险与双巷内错布置 防冲优化研究^{*}

吕鹏飞^{1,2,3}副教授,王永亮¹,梁野¹,祁云^{1,2,3}副教授,耿伊健⁴,孙宇霆⁵

(1 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010;2 内蒙古自治区矿业工程重点实验室,内蒙古 包头 014010;3 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心,内蒙古 包头 014010;
4 内蒙古煤炭设计研究院有限责任公司,内蒙古 呼和浩特 010020;5 国家电投集团内蒙古能源有限公司,内蒙古 呼和浩特 010020)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0878

基金项目:国家自然科学基金地区项目资助(52464019);内蒙古自治区自然科学基金面上项目资助(2023MS05028);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023QNJS092)。

【摘要】 针对倾斜厚煤层工作面冲击地压防治难题,以西部某煤矿工程地质条件为背景,采用理论分析、力学模型、数值模拟和现场监测等手段开展细化研究;分析倾斜厚煤层工作面冲击影响因素和危险区域,提出双巷内错布置的防冲优化方案并进行工程验证。结果表明:埋深、硬厚顶板、倾角、煤柱及底煤对冲击地压的发生有影响,确定工作面胶带巷和轨道巷为强冲击危险区,开切眼为中等冲击危险区;结合顶板结构演化与底板应力计算将巷道底板划为关键岩块半保护区(Ⅰ)、关键岩块保护区(Ⅱ)和矸石让压区(Ⅲ)共计3个低应力区;通过数值计算得出内错胶带巷的最佳布巷位置位于关键岩块保护区(Ⅱ),即与轨道巷右帮水平距离5.15 m,与采空区垂直距离3 m。通过微震及来压监测得出,采用双巷内错布置方案后,工作面围岩能量释放由“低频高能”向“高频低能”转变,且持续来压时间明显减短,降低了工作面发生冲击的危险性。

【关键词】 倾斜厚煤层; 冲击危险; 双巷内错; 底板应力; 防冲效果

Study on rock burst danger and double entry inward layout optimization for rock burst prevention under condition of inclined thick coal seam

Lyu Pengfei^{1,2,3}, Wang Yongliang¹, Liang Ye¹, Qi Yun^{1,2,3}, Geng Yijian⁴, Sun Yuting⁵

(1 School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China;2 Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou Inner Mongolia 014010, China;3 Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China;4 Inner Mongolia Coal Mine Design & Research Institute Limited Liability Company, Hohhot Inner Mongolia 010020, China;
5 SPIC Inner Mongolia Energy Company, Limited, Hohhot Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: Based on the engineering geological conditions of a coal mine in western China, this research

focuses on addressing the challenges associated with rock burst prevention in working face of inclined thick coal seams. Theoretical analysis, mechanical modeling, numerical simulation, and field monitoring were employed to analyze the influencing factors and hazardous areas of rock burst in working face of an inclined thick coal seam. Optimization strategies for double entry inward layout were proposed and subsequently validated through engineering application. It is found that the occurrence of rock burst is influenced by several factors including buried depth, thick-hard roof, coal seam dip angle, coal pillars, bottom coal. The belt and track roadways were identified as zones with strong rock burst danger, while the setup entry was categorized as a zone with moderate rock burst danger. Based on an analysis of roof structure evolution and floor stress calculations, the floor was divided into three low-stress zones: the semi-protected zone beneath key blocks (I), the protected zone beneath key blocks (II), and the stress release zone of gangue (III). Numerical simulations determined that the optimal positioning was within the protected zone beneath key blocks (II), specifically at a horizontal distance of 5.15 m from the right of the track roadway and a vertical distance of 3 m from the goaf. Microseismic and pressure monitoring demonstrated that implementing the double entry inward layout transformed the energy release pattern of the surrounding rock from "low-frequency and high-energy" to "high-frequency and low-energy". Furthermore, the duration of continuous pressure was significantly reduced, thereby mitigating the rock burst danger in the working face.

Keywords: inclined thick coal seam; rock burst danger; double entry inward layout; floor stress; prevention effect of rock burst

0 引言

我国西部矿区倾斜厚煤层分布广泛,以冲击地压为代表的煤岩动力灾害日趋严重^[1]。如新疆硫磺沟煤矿(4-5)06W 胶带巷里段(煤厚平均 6.3 m, 倾角 30°)发生一起冲击地压事故,工作面后方 53.1 m 巷道严重破坏^[2]。鉴于上述倾斜厚煤层工作面冲击事故,亟须开展倾斜厚煤层冲击地压机制与防治优化相关研究。

近年来,关于倾斜或急倾斜厚煤层冲击危险与发生机理的成果丰硕,如曹晋荣等^[3]认为急倾斜特厚煤层工作面动、静载应力叠加大于“煤体+液压支架”系统的最大应力时,易发生工作面非对称冲击地压。窦林名等^[4]指出倾斜厚煤层在顶底板的夹持作用下,煤体处于静载状态,若受到顶底板破断形成的动载扰动,易发生动静叠加型冲击。欧阳振华等^[5]认为急倾斜厚煤层回采巷道常位于支承应力与水平应力叠加产生的高应力区,冲击危险较高。Li Fan 等^[6]指出急倾斜厚煤层随煤层倾角增大易引起应力集中,导致围岩发生剪切破坏。Zhang Xiufeng 等^[7]指出倾斜厚煤层工作面煤厚越大,对巷道围岩结构影响越大,积聚的能量越大,易增加冲击地压发生的风险。同时,一些学者在巷道内错布置防治冲击地压方面也开展一定研究,如王志强等^[8]

指出倾斜厚煤层工作面内错布巷时下巷底板煤体位于砌体梁结构掩护下,有利于巷道布置。张俊文等^[9]认为厚煤层内错布巷可使巷道远离侧向集中应力实现自动卸压。王朋飞等^[10]认为倾斜厚煤层工作面采空区下部矸石充填区减缓了支撑压力的影响,为内错布巷提供了有利条件。Wei Mingxing 等^[11]指出倾斜厚煤层工作面上区段采空区下方的巷道可保持良好的稳定性。Cheng Yunhai 等^[12]提出在倾斜厚煤层工作面采空区布置巷道,减小强动压侵扰,降低冲击危险。

以上文献缺少上区段巷道底板(即内错巷道位置)应力的分区特性研究,鉴于此,笔者拟以西部某煤矿 1506 工作面为背景,分析该工作面的冲击影响因素及冲击危险性,提出采用双巷内错布置方式开展防冲实践,通过力学计算得出上区段轨道巷底板应力分布特征,提出分区布巷方案,结合数值模拟获得内错巷道的最佳位置,以期对相似条件冲击地压防治提供借鉴。

1 工作面地质及设计概况

西部某煤矿 1506 工作面位于矿井西翼二水平南部,工作面北部为 1504 和 1505 采空区,南部为实体煤,西部为井田边界,东部为上山煤柱,工作面位置如图 1 所示。煤层倾角 26~33°,平均 30°;煤厚

6.9~10.6 m,平均 8.6 m,属于倾斜厚煤层工作面。煤层平均埋深 550 m,工作面长 188.2 m,推进长度 1 336 m。煤层顶板为泥岩和粗砂岩,底板为细砂岩,综合柱状图如图 2 所示。煤样动态破坏时间 260 ms,弹性能量指数为 32.13,冲击能量指数 1.10,单轴抗压强度 13 MPa;顶板弯曲能量指数 105.50 kJ,底板弯曲能量指数 116.85 kJ。综合评价可知,煤层及顶底板冲击倾向性均属于Ⅱ类,均具有弱冲击倾向性。

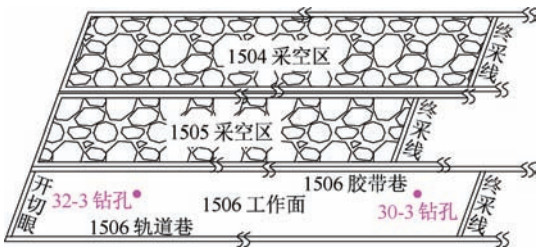


图 1 工作面位置
Fig. 1 Working face location

层次	岩层	柱状图 (1:500)	厚度 (m)
1	中粒砂岩		11.45
2	细粒砂岩		2.91
3	粉砂岩		3.25
4	中粒砂岩		6.94
5	粉砂岩		13.17
6	细砂岩		8.28
7	粗砂岩		6.55
8	泥岩		0.75
9	5煤		8.60
10	细砂岩		6.98

图 2 综合柱状图
Fig. 2 Generalized stratigraphic column

工作面巷道原设计沿底板掘进,留 4 m 煤柱沿空掘巷布置。巷道左帮 1.5 m 在岩层中掘进,底板留有 0~1.7 m 厚的三角煤。巷道采用锚杆/索联合支护,顶板每排布置 7 根左旋无纵肋高强锚杆,间距 0.8 m。顶部第 1 根锚索布置在距巷道左帮 0.175 m 处,与顶板夹角 60°;第 2 根锚索布置在距左帮 0.975 m 处;第 3 根锚索垂直布置在巷道顶板中心位置,均垂直于顶板布置;第 4 根锚索布置在距巷道右帮 0.975 m 处,与顶板夹角 120°。巷道两帮均布置 5 根全螺纹钢锚杆,其中,顶部 2 根锚杆与两帮夹角为 75°斜向上打入煤层,底部 2 根锚杆与两帮夹角为 75°斜向下打入煤层,巷道支护如图 3 所示。

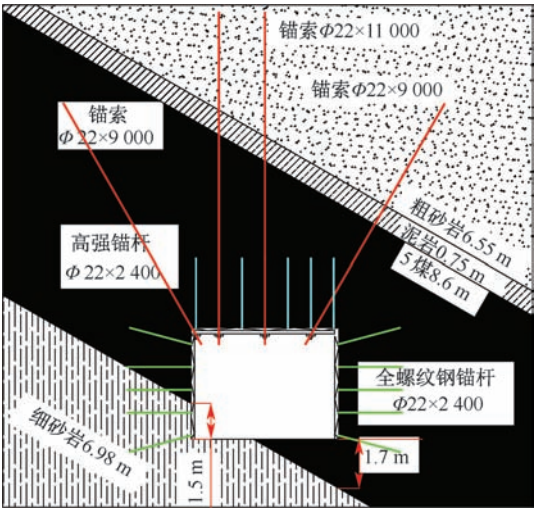


图 3 巷道支护
Fig. 3 Crossheading support diagram

2 冲击影响因素及危险区

2.1 影响因素

1) 煤层倾角。根据前期建立的倾斜厚煤层受煤层倾角影响的正、切应力响应力学模型^[13],巷道顶板承受到正、切应力见下式:

$$\begin{cases} \sigma_s = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_H \sin \alpha \cos \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + \sigma_v \sin \alpha \cos \alpha \\ \tau_t = \sigma_v \sin^2 \alpha + \sigma_y \sin \alpha \cos \alpha - \sigma_H \cos^2 \alpha - \sigma_x \sin \alpha \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 和 τ 分别为作用于巷道顶板的正应力和切应力,MPa; α 为煤层平均倾角,(°); σ_v 为煤层承受垂直应力,MPa; σ_H 为煤层所受水平应力,MPa;其中, $\sigma_x = \sigma \cos \alpha$; $\sigma_y = \sigma \sin \alpha$ 。

在 1506 工作面计算中,垂直应力取 13.75 MPa,水平应力取 12.6 MPa,代入式(1)可得,在 1506 工况下不同煤层倾角时的正应力 σ 和切应力 τ 变化曲线,如图 4 所示。本工作面煤层倾角 26~33°,平均倾角 30°。结合图 4 可知:在此倾角范围内,煤层正应力 σ 持续缓慢增加,变化幅度小;切应力 τ 急速增加且变化幅度较大。故认为倾角对于 1506 工作面冲击有影响。

2) 底煤厚度。研究表明:较厚的底煤对冲击地压的发生起促进作用,且底煤能量增加梯度与厚度 4 次方的倒数负相关^[14],见下式:

$$\frac{dE_p}{dH_b} \propto -\frac{1}{H_b^4} \quad (2)$$

式中: E_p 为底板积聚的弹性能,J; H_b 为底煤厚度,m。

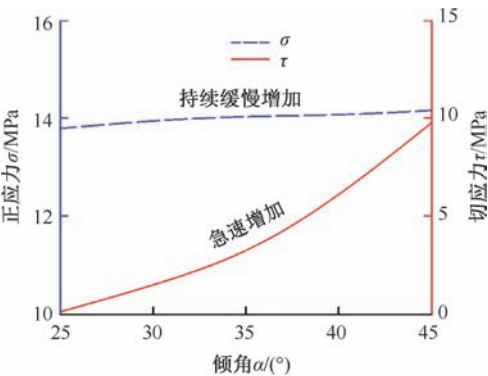


图 4 正应力和切应力变化曲线
Fig. 4 Normal stress and shear stress variation curves

1506 轨道巷原设计底煤厚度 0~1.7 m,代入式(2)可得,随底煤厚度增加,能量积聚梯度增大;底煤厚度小于 1.5 m 时弹性能积聚迅速,大于 1.5 m 时,能量积聚平缓。1506 轨道巷底煤厚度最大 1.7 m,对冲击发生影响较大。

3)埋深。当煤体中单位体积积聚弹性能大于破碎耗散的能量时^[8],可能发生冲击地压。经计算 1506 工作面积聚弹性能为 0.116 J,破碎耗散能为 0.021 J,认为埋深对该工作面冲击有影响。

4)硬厚顶板。顶板岩层厚度特征参数是反映顶板硬厚程度对冲击地压影响的有效指标^[13],当其大于 50 时,发生冲击的危险较大,根据综合柱状图计算得顶板岩层厚度特征参数为 82.35,认为 1506 工作面的硬厚顶板对冲击有影响。

5)区段煤柱。1506 胶带巷原计划采用留 4 m 区段煤柱开采,极限平衡区计算见下式,将 1506 胶带巷相关参数代入可得 $x_0 = 5.3$ m,处于应力增高区,认为区段煤柱对冲击有影响。

$$x_0 = \frac{M}{2ef} \ln \frac{K\gamma H + C \cot \varphi}{\varepsilon(p_1 + C \cot \varphi)} \quad (3)$$

式中: K 为应力集中系数,取 3; p_1 为巷道煤帮的支护阻力,取 45 MPa; M 为开采厚度,m; C 为煤体黏聚力,取 1 MPa; φ 为煤体的内摩擦角,取 25°; f 为煤层与顶底板接触面的摩擦因数,取 0.47; ε 为三轴应力系数,取 2.46。

2.2 冲击危险

1506 工作面冲击地压影响因素包括埋深、硬厚顶板、倾角、区段煤柱和煤岩体冲击倾向性等。依照多因素耦合法^[15]确定 1506 工作面各项因素的影响程度见表 1。多因素耦合合法叠加原则^[16]如下:①多个“强”等级叠加或“强”等级与其他等级叠加时,定为“强”等级;②2 个及以上“中等”等级叠加时,定

为“强”等级;③1 个“中等”等级与 1 个或多个“弱”等级叠加时,定为“中等”等级;④2 个及以上“弱”等级叠加时,定为“弱”或“中等”等级。可得 1506 工作面冲击危险性划分结果如图 5 所示,即胶带巷和轨道巷具有强冲击危险,开切眼具有中等冲击危险。

表 1 多因素耦合合法分区分级对照表
Table 1 Multi-factor coupling method partition classification comparison table

影响因素	原则	影响等级
埋深 h :550 m	$400 < h \leq 600$	弱
倾角:30°	大于 15°	弱
顶板特征:82.35	大于 50	强
冲击倾向性	煤层,顶底板	弱
煤柱	胶带巷	强
底煤厚度	底煤厚度 1~2 m	中等
胶带巷 1.7 m	底煤厚度 2 m	强
轨道巷 1.7 m		

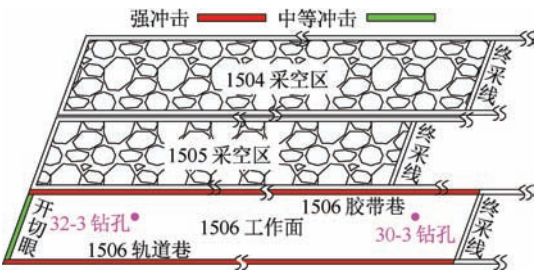


图 5 冲击危险区划分结果
Fig. 5 Rock burst risk zone classification results

3 双巷内错布置防冲优化

3.1 上区段轨道巷冲击危险

由于 1506 工作面属于强冲击危险工作面,提出 1506 胶带巷采用双巷内错^[10]的防冲布巷方案,双巷内错是将 1505 轨道巷抬升,1506 胶带巷布置在其下方内侧,2 个相邻工作面在一端交错搭接。

预实现 1506 胶带巷内错布置,1505 轨道巷需抬升,抬升后左帮 3 m 处于煤层中,右帮为岩层,底板为煤层。巷道支护参数如下:顶板布置 3 根 6 m 的锚索,间距 2 m,第 1 根锚索距左帮 0.6 m,第 2 根锚索布置于顶板中间,第 3 根锚索距右帮 0.55 m,垂直于顶板布置 5 根 2.4 m 的全螺纹钢锚杆,间距 1 m;左右两帮各布置 5 根 2.4 m 的玻璃钢锚杆,间距 0.6 m;右帮中部布置 3 根 6 m 的锚索,间距 0.6 m;底板左侧布置 2 根斜拉锚索,第 1 根长 6 m,距左帮 0.6 m,与底板夹角 150°,第 2 根锚索长 5 m,距左帮 1.4 m,与底

板夹角 135°,底板布置 6 根 2.4 m 玻璃钢锚杆,间距 0.8 m,1505 轨道巷层位及支护如图 6 所示。

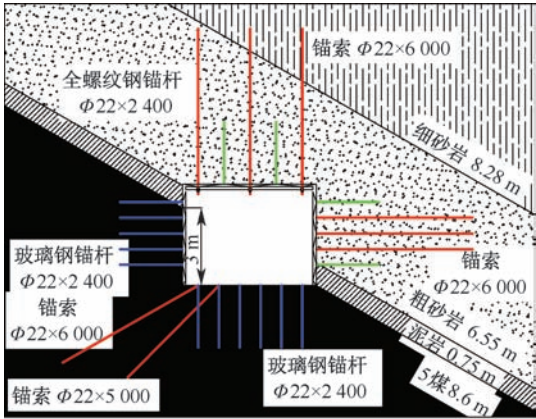


图 6 1505 轨道巷层位及支护

Fig. 6 1505 track roadway layer and support

图 7 为 1505 轨道巷掘进 50~250 m 期间的微震分布,可以看出,共计发生 10^2 J 级微震事件 66 次, 10^3 J 级微震事件 13 次,无 10^4 J 以上微震发生。微震总发生次数较少,且无较大微震事件发生。

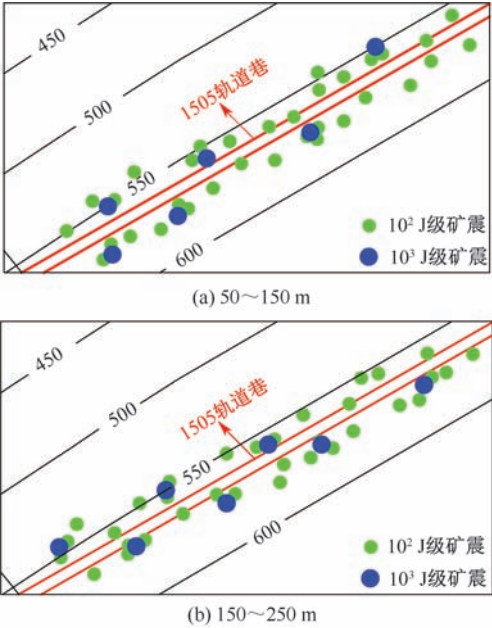


图 7 微震监测

Fig. 7 Micro seismic monitoring

图 8 为 1504 与 1505 工作面轨道巷掘进期间两帮及顶底板的位移量监测结果,共监测 8 个周期,每个周期 10~15 d。通过监测发现,1504 轨道巷两帮平均位移量为 12.5 mm/d,顶底板平均位移量为 13.2 mm/d; 1505 轨道巷两帮平均位移量为 6.9 mm/d,顶底板平均位移量为 8.3 mm/d,1505 轨道巷两帮及顶底板位移均小于 1504 轨道巷。

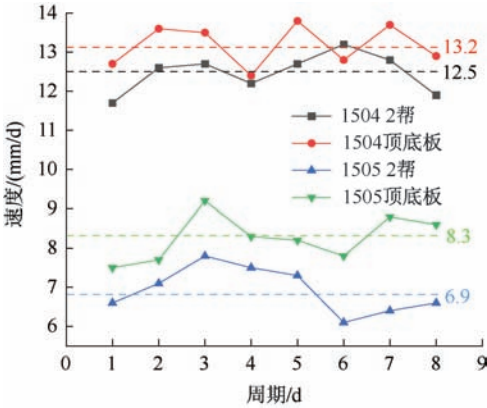


图 8 巷道位移量监测结果

Fig. 8 Monitoring results of roadway displacement

综合微震和巷道位移量监测结果可知:1505 轨道巷在抬升层位及特定的支护下防冲效果较好,为 1506 工作面胶带巷内错布置奠定基础条件。

3.2 上区段轨道巷底板应力分区特征

建立 1505 轨道巷底板力学模型,如图 9 所示。由图 9 可知; x 轴垂直煤层底板向下, y 轴沿煤层倾斜方向向上, O 为坐标原点,按应力变化将底板划分为 5 个区域,即区域 A 为塑性区,区域 B 为卸压区,区域 C 为采空区压实区,区域 D 为弹性区,区域 E 为原岩应力区。由于内错布巷位置位于采空区侧,因此重点分析区域 B 和区域 C 的底板应力分布状态。在 y 轴距原点 η 处取微元 $d\eta$,则底板下方任意点承受的正应力见下式:

$$\sigma_x = - \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{qx^3 d\eta}{[x^2 + (y - \eta)^2]^2} \quad (4)$$

式中: σ_x 为底板任意点的正应力,MPa; a 、 b 为所计算积分区域的上、下限,取值与坐标对应; q 为底板最大正应力,MPa; η 为距原点的距离,m。

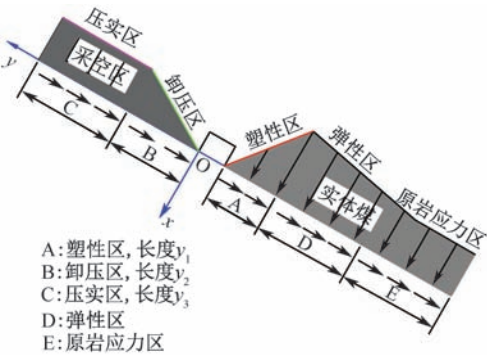


图 9 底板受力模型

Fig. 9 Mechanical model of floor

首先,受力分析区域 A 底板,区域 A 底板正应

力由上覆岩层自重分解的垂直于煤层的正应力、受应力集中影响该正应力引发的附加力和切应力分量共3部分组成。区域A底板由上覆岩层自重引起的正应力 σ_A 见下式:

$$\sigma_A = \gamma H \cos \alpha \quad (5)$$

式中: σ_A 为区域A底板承受由上覆岩层自重引起的正应力,MPa; γ 为上覆岩层容重, kN/m^3 ;H为埋深,m; α 为煤层倾角, $(^\circ)$ 。

区域A底板受应力集中影响产生附加力,该附加力呈非均匀状态分布于底板,则在区域A范围内距离原点 η 范围内附加力 σ'_A 见下式:

$$\sigma'_A = \frac{(K-1)\gamma H \cos \alpha}{y_1} \eta \quad (-y_1 \leq \eta \leq 0) \quad (6)$$

式中: σ'_A 为区域A正应力受应力集中影响产生的附加力,MPa; K 为应力集中系数; y_1 为区域A长度,m;其余参量同式(5)。

此外,区域A切应力受应力集中影响对底板产生竖直向下的分量,将其分解为垂直底板的正应力,且该正应力呈不均匀状态分布于底板,由于计算上覆岩层自重引起的正应力时已体现了埋深对底板的影响,这里只考虑应力集中、倾角以及塑性区长度的影响,故距离原点 η 范围内区域A切应力的分量 σ''_A 见下式:

$$\sigma''_A = K\gamma(\sin \alpha \cos \alpha) \eta \quad (-y_1 \leq \eta \leq 0) \quad (7)$$

式中 σ''_A 为区域A切应力分量对底板产生的应力,MPa。

综上,区域A底板所受正应力 q_1 见下式:

$$\begin{aligned} q_1 &= \sigma_A + \sigma'_A + \sigma''_A \\ &= \gamma H \cos \alpha + \frac{(K-1)\gamma H \cos \alpha}{y_1} \eta - \\ &\quad K\gamma(\sin \alpha \cos \alpha) \eta \quad (-y_1 \leq \eta \leq 0) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 q_1 为区域A底板正应力,MPa。

其次,区域B为卸压区,底板不受上覆岩层自重影响,只与临近区域传递到区域B的切向应力有关,因此,区域B底板所受的正应力见下式:

$$q_2 = \gamma(\sin \alpha \cos \alpha) \eta \quad (0 \leq \eta \leq y_2) \quad (9)$$

式中 q_2 为区域B底板所承受的正应力,MPa。

再次,受力分析区域C底板,区域C底板正应力由上覆岩层自重应力分解的煤层正应力和切应力分量共2部分组成。区域C底板由上覆岩层自重引起的正应力 σ_C 见下式:

$$\sigma_C = \gamma H \cos \alpha \quad (10)$$

式中 σ_C 为区域C底板承受由上覆岩层自重引起的正应力,MPa。

区域C切应力的分量 σ'_C 见下式:

$$\sigma'_C = \gamma(\sin \alpha \cos \alpha) \eta \quad (y_2 \leq \eta \leq y_3) \quad (11)$$

式中 σ'_C 为区域C切应力分量对底板产生的应力,MPa。

综上,区域C底板所受正应力 q_3 见下式:

$$\begin{aligned} q_3 &= \sigma_C + \sigma'_C = \\ &\quad \gamma H \cos \alpha + \gamma(\sin \alpha \cos \alpha) \eta \quad (y_2 \leq \eta \leq y_3) \end{aligned} \quad (12)$$

式中 q_3 为区域C底板所承受的正应力,MPa。

由1505工作面参数可知:上覆岩层容重取 25 kN/m^3 ,埋深取 550 m ,煤层倾角取 30° ,应力集中系数取3,根据现场测量, $x=1 \text{ m}$, $y_1=5 \text{ m}$, $y_2=13 \text{ m}$, $y_3=10 \text{ m}$ 。可根据式(8)、式(9)和式(12)计算得出各区域的底板正应力函数表达,再代入式(4)得到煤层底板的正应力分布情况(图10)。可以看出,1505工作面开采后其底板正应力整体呈单峰分布状态,在轨道巷左帮正下方附近的应力集中程度最低。下面结合顶板结构演化分析1505轨道巷底板应力分区特征。1505轨道巷顶板结构形成与底板应力分区如图11所示。随煤层开采,顶板关键岩块A先垮落并压实采空区矸石,随后关键岩块B一端搭接在直接顶上,另一端与关键岩块A形成半拱结构,其下方受岩块A、B自撑结构影响与垮落矸石之间形成自由空间,保护下方煤岩体。

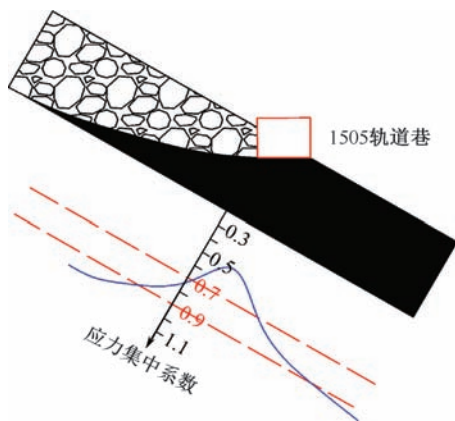


图10 应力集中系数分布曲线

Fig. 10 Stress concentration factor curve

研究表明:应力集中系数小于0.7时卸压效果好^[13],据此将1505轨道巷底板划分为3个低应力区,底板I区和III区应力集中系数为0.7~0.9,底板II区应力集中系数小于0.7,分别命名为关键岩块半保护区(I),宽度5.15 m;关键岩块保护区(II),宽度6.40 m;矸石让压区(III),宽度5.20 m,顶板结构形成与底板应力分区如图11所示。

1) 关键岩块半保护区(I)。I区煤岩体受力状

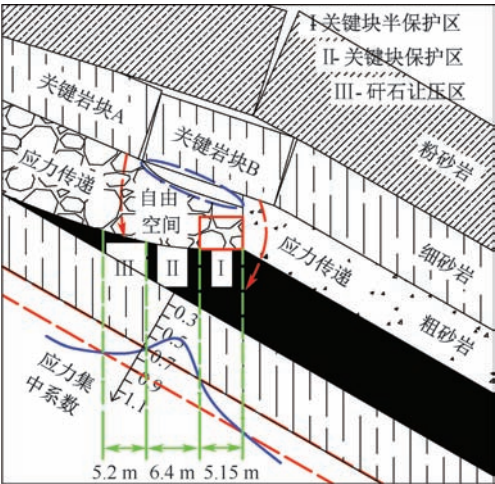


图 11 顶板结构形成与底板应力分区

Fig. 11 Roof structure formation and plate partition structure of floor

态与关键岩块 B 直接相关。关键岩块 B 左端接触矸石,右端搭接在直接顶上,整体悬于矸石上方并形成自由空间。此时,I 区煤岩体一方面由于关键岩块 B 的保护仅承受上方较轻的矸石压力,另一方面由于关键岩块 B 右侧与直接顶搭接作用形成应力传递通道,将上覆岩层载荷传递至 I 区,故将其命名为关键岩块半保护区。

2) 关键岩块保护区(Ⅱ)。Ⅱ区煤岩体位于关键岩块 B 正下方,矸石堆上方为自由空间。关键岩块 B 稳定后,上覆岩层载荷通过岩块 B 两端向下传递,不影响区域Ⅱ,故将其命名为关键岩块保护区。

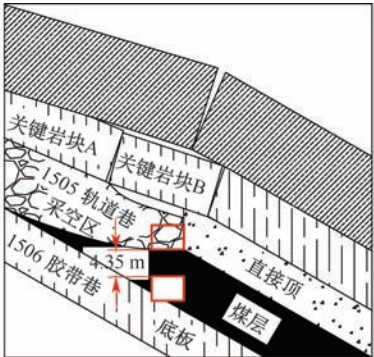
3) 矸石让压区(Ⅲ)。Ⅲ区煤岩体位于关键岩块 A 下方,此区域关键岩块 A 完全落在矸石上,通过矸石向Ⅲ区传递应力,矸石堆起缓冲和让压作用,故将其命名为矸石让压区。

以上表明:底板 I 区、Ⅱ区和Ⅲ区均属低应力区,采用数值计算对比分析以上 3 区分别布置 1506 胶带巷的防冲效果。

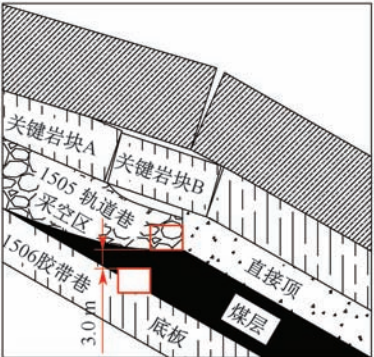
3.3 下区段胶带巷合理位置

1505 轨道巷底板 3 区布巷方案如下,方案 1 为将 1506 胶带巷布置在 I 区,即位于 1505 轨道巷正下方,2 巷竖直距离 4.35 m;方案 2 为将 1506 胶带巷布置在Ⅱ区,即与 1505 轨道巷右帮水平距离 5.15 m,与 1505 采空区竖直距离 3 m;方案 3 为将 1506 胶带巷布置在Ⅲ区,即与 1505 轨道巷右帮水平距离为 11.55 m,与采空区竖直距离 0.8~2.2 m,如图 12 所示。基于 1506 工作面顶底板岩层分布结构,采用 FLAC^{3D} 数值计算 3 种方案,分析开挖后围

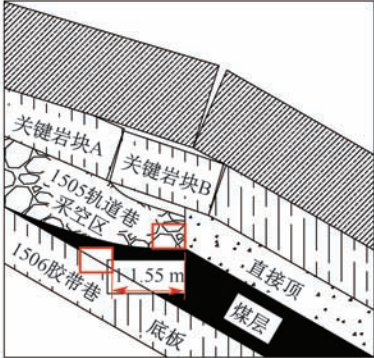
岩应力分布及破坏特征。模型尺寸为 142 m×60 m×106 m,倾角为 30°,模型四边和底部为固定约束,顶部施加 13.75 MPa 垂直应力,采用 Mohr-Coulomb 屈服准则计算,岩层物理力学参数见表 2。



(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3

图 12 布巷方案

Fig. 12 Layout scheme of roadway

表 2 煤岩物理力学参数

Table 2 Physical mechanical parameters of coal rock

岩石类型	细砂岩	粗砂岩	泥岩	5 煤	细砂岩
密度/(kg/m ³)	2 645	2 650	2 496	1 550	2 645
体积模量/GPa	12.6	5.6	1.6	4.2	13
剪切模量/GPa	9.5	4.6	2.2	6.4	9.5
黏聚力/MPa	7.8	6.6	3.2	1.2	7.8
抗拉强度/MPa	6.75	1.8	0.9	1.1	6.75
内摩擦角/(°)	32	44	41	38	32

图 13 为数值计算结果图。其中, None 代表未破坏, s-n 表示正在剪切破坏, s-p 表示已经剪切破坏, t-n 表示正在拉伸破坏, t-p 表示已经拉伸破坏。首先, 对比分析 3 个方案的垂直应力分布特征, 可以看出, 方案 1 胶带巷右帮及顶底板右侧出现高应力, 其他位置均处于低应力区, 方案 2 仅巷道右下角出现高应力侵扰, 方案 3 巷道两帮处于高应力区。其次, 对比分析 3 个方案的塑性区分布特征, 可以看出, 方案 1 顶底板及右帮均发生破坏; 方案 2 仅巷道右上角出现部分破坏; 方案 3 顶板完全破坏。综上认为 1506 工作面双巷内错的最佳布巷位置位于区域 II, 即将 1506 胶带巷布置在与 1505 轨道巷右边界水平距离 5.15 m, 与采空区竖直距离 3 m 处。

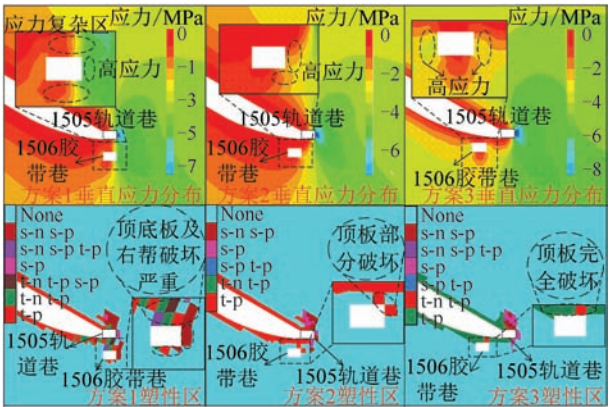


图 13 数值计算结果

Fig. 13 Numerical calculation results

4 双巷内错布置防冲效果分析

4.1 微震监测

采用微震监测法对比分析相邻的 1505 和 1506 工作面回采期间围岩活动性, 进而验证内错布巷的防冲效果。图 14 为 2 个工作面在回采 50~500 m 时的微震分布情况, 可以看出, 1505 工作面回采时, 其轨道巷侧最大影响范围为 136 m; 1506 工作面回采时, 其胶带巷侧最大影响范围为 92 m, 小于 1505 工作面回采时的影响范围。此外, 在 2 个工作面回采 50~500 m 期间, 1505 工作面发生 10^4 J 级微震 5 次, 1506 工作面发生 10^4 J 级微震 1 次; 1505 工作面发生 10^3 J 级微震 16 次, 1506 工作面发生 10^3 J 级微震 9 次; 1505 工作面发生 10^2 J 级微震 95 次, 1506 工作面发生 10^2 J 级微震 129 次。故认为相对 1505 工作面微震特征, 1506 工作面微震释放特征由高能低频转为低能高频, 有效降低了工作面围岩活动强度, 冲击危险降低。同时可以看出, 1505 工作面发生的 10^4 J 级微震有 2 次靠近其胶带巷, 推测可能是由于传统小煤柱沿空掘巷引起的, 而 1506 工作面发生的 1 次 10^4 J 级微震距离其胶带巷较远, 也进一步说明内错布置防冲效果好。

4.2 来压监测

1505 和 1506 工作面均采用 ZFS8000/22/36 型液压支架, 且配备安装了 KJ615 矿用多功能顶板压

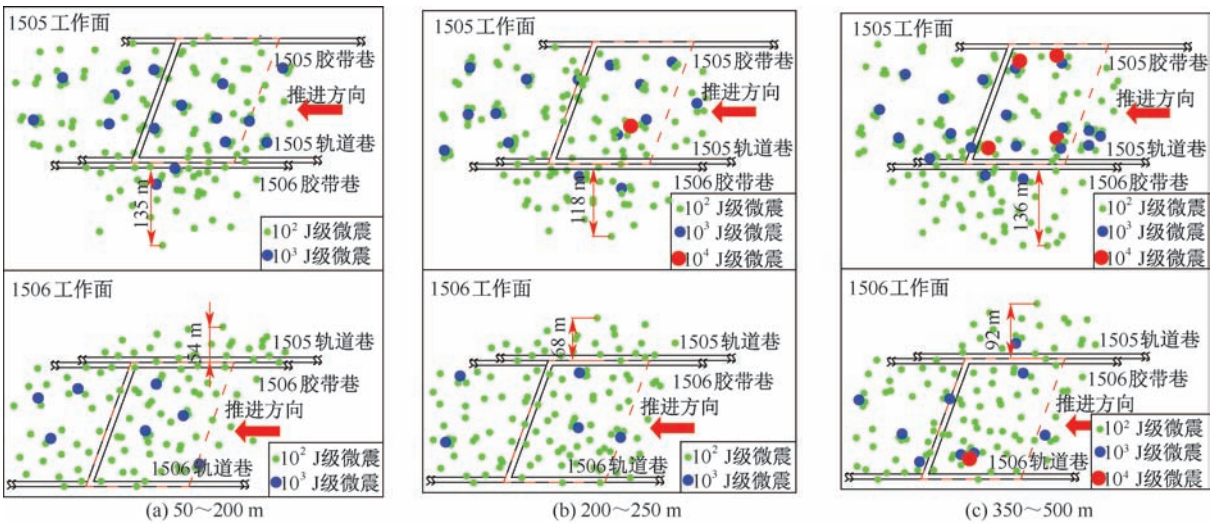


图 14 微震分布对比

Fig. 14 Micro seismic distribution comparison diagram

力监测系统。图 15 为 20 天内 1505 轨道巷侧和 1506 胶带巷侧 12 架液压支架共 18 m 范围的顶板压

力显现情况, 可以看出, 1505 轨道巷侧来压强度为 21~32 MPa, 且出现多次连续 3、4 天持续来压的情

况,顶板压力释放较集中;1506 胶带巷侧来压强度为 6~24 MPa,连续 3 天以上来压情况明显减少,多表现为 2 天持续来压,说明内错布巷的顶板压力释

放较缓和。此外,1505 轨道巷侧的来压范围也明显大于 1506 胶带巷侧,在 20 天内,1505 轨道巷侧连续 4 架以上范围来压发生 3 次,1506 胶带巷侧无连续 4 架以上来压,以连续 2 架或者 3 架来压为主。综上表明:1506 工作面采用双巷内错布置可降低顶板来压的强度,防冲效果较好。

5 结 论

1) 得出倾角、埋深、底煤、硬厚顶板和区段煤柱对 1506 工作面冲击地压发生有影响,确定 1506 胶带巷和轨道巷为强冲击危险区域,开切眼为中等冲击危险区域。

2) 基于 1505 轨道巷底板力学模型,将底板分为关键岩块半保护区、关键岩块保护区和矸石让压区共 3 个低应力区,通过数值计算得出 1506 胶带巷最佳位置位于关键岩块保护区内,即与 1505 轨道巷右帮水平距离 5.15 m,与采空区垂直距离 3 m。

3) 采用现场监测验证了内错布巷的防冲有效性,微震监测表明内错布巷可降低高能矿震发生的频率;来压强度监测表明内错布巷的强度低,持续时间短,防冲效果较好。

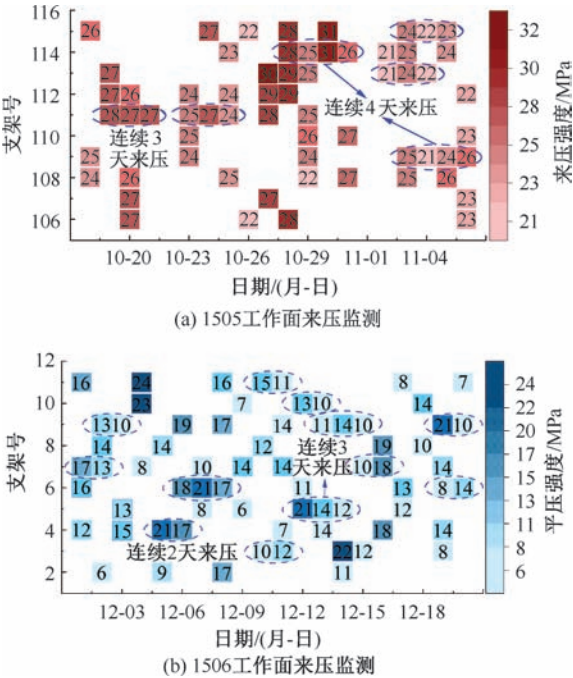


图 15 来压情况监测结果

Fig. 15 Pressure monitoring result

参 考 文 献

[1] 李俊平,管婷婷,冯嘉禹,等. 矿震与冲击地压防治研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1):85-93.
Li Junping, Guan Tingting, Feng Jiayu, et al. Research progress on prevention and control of mine earthquake and rock burst[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1):85-93.

[2] 兖矿新疆矿业有限公司硫磺沟煤矿“1·1”冲击地压事故调查报告[R/OL]. (2026-01-21). <https://www.safahoo.com/Case/Case/Mine/202510/5781679.shtml>.

[3] 曹晋荣,窦林名,何江,等. 急倾斜特厚煤层工作面非对称冲击矿压机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2):334-345.
Cao Jinrong, Dou Linming, He Jiang, et al. Mechanism of asymmetric coal bursts on the working face in steeply inclined and extra-thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2):334-345.

[4] 窦林名,白金正,李许伟,等. 基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10):1-8.
Dou Linming, Bai Jinzheng, Li Xuwei, et al. Study on prevention and control technology of rockburst disaster based on theory of dynamic and static combined load[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10):1-8.

[5] 欧阳振华,周鑫鑫,孙秉成,等. 近直立煤层冲击地压自保护卸压机理与防控[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4):64-71.
Ouyang Zhenhua, Zhou Xinxin, Sun Bingcheng, et al. Self-protection pressure relief mechanism and prevention and control of rock burst in near-vertical coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4):64-71.

[6] Li Fan, Zhang Baisheng, Guo Junqing, et al. Cross-section shape and asymmetric support technology of steeply inclined thick coal seam roadway[J]. Applied Sciences-Basel, 2025, 15(11): DOI: 10.3390/app15115976.

[7] Zhang Xiufeng, Zhu Sitao, Zhang Xinrong, et al. Mechanism of coal thickness effect on rockburst of excavation tunnel within ultra-thick coal seam[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2025, 22(2):640-651.

- [8] 王志强, 乔建永, 武超, 等. 基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1):69-78.
- Wang Zhiqiang, Qiao Jianyong, Wu Chao, et al. Study on mine rock burst prevention and control technology based on gateway layout with negative coal pillars[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1):69-78.
- [9] 张俊文, 刘畅, 李玉琳, 等. 错层位沿空巷道围岩结构及其卸让压原理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2 133-2 143.
- Zhang Junwen, Liu Chang, Li Yulin, et al. Study on the surrounding rock structure of stagger layout roadway and its pressure release as well as deformation yielding mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2 133-2 143.
- [10] 王鹏飞, 常通, 卢俊宇, 等. 再论负煤柱巷顶沿空掘巷合理位置及其围岩主动控制原理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2):593-608.
- Wang Pengfei, Chang Tong, Lu Junyu, et al. Re-discussion on reasonable position and support technology of entry driven under the gob edge of previous split-level longwall panel[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2):593-608.
- [11] Wei Mingxing, Zhu Yongjian, Wang Ping, et al. Failure characteristics and stress field distribution law of roadway in downward mining of deep close distance coal seam[J]. Scientific Reports, 2025, 14(1): DOI: 10. 1038/s41589-79902-1.
- [12] Cheng Yunhai, Bai Jinchao, Ma Yankun, et al. Control mechanism of rock burst in the floor of roadway driven along next goaf in thick coal seam with large obliquity angle in deep well[J]. Shock and Vibration, 2015; DOI:10. 1155/2015/750807.
- [13] 吕鹏飞, 耿伊健, 孙宇霆, 等. 倾斜厚煤层托顶煤掘进巷冲击地压机制与防冲布巷优化研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2):110-124.
- Lyu Pengfei, Geng Yijian, Sun Yuting, et al. Study on rockburst mechanism and layout optimization of top-coal roadway in the inclined thick coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2):110-124.
- [14] 张晨阳, 潘俊锋, 夏永学, 等. 底煤厚度对巷道底板冲击地压的影响机制及其应用分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12):3 984-3 994.
- Zhang Chenyang, Pan Junfeng, Xia Yongxue, et al. Influence mechanism and application analysis of bottom coal layer thickness on floor rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 3 984-3 994.
- [15] 李震, 吴冠洋, 司尚金, 等. 基于开采深度与构造应力的冲击地压危险性评价子指标取值方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12):38-47.
- Li Zhen, Wu Guanyang, Si Shangjin, et al. Valuation method for sub-indicators of rock burst risk based on mining depth and tectonic stress[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12):38-47.
- [16] 杨光宇, 姜福兴, 李琳, 等. 煤矿冲击地压危险性的工程判据研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1 200-1 207, 1216.
- Yang Guangyu, Jiang Fuxing, Li Lin, et al. Engineering criterion study on coal mining rock burst hazard[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6):1 200-1 207, 1 216.



作者简介: 吕鹏飞 (1989—),男,辽宁阜新人,博士,副教授,主要从事煤矿冲击地压机制及防治技术等方面的相关研究。E-mail:2018930@imust.edu.cn。