

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):3984-3994.

移动阅读

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):3984-3994.

底煤厚度对巷道底板冲击地压的影响机制及其 应用分析

张晨阳^{1,2,3},潘俊锋^{1,2,3},夏永学^{1,2,3},杨光宇^{1,2,3},刘少虹^{1,2,3},陆 闯^{1,2,3}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院 开采研究分 院,北京 100013)

摘 要:为研究底煤厚度对巷道底板冲击地压的影响机制,以厚度为3m以下的薄及中厚底煤为分析对象,基于掘进巷道底板冲击特征并采用理论分析,建立底板煤岩层叠体梁挠曲破坏力学模型, 底板煤岩层挠曲变形曲线具有同步异幅的发展特性。公式计算表明,随着底煤厚度的增加,底煤积 聚弹性能逐渐增加,增加梯度逐渐平缓,其与底煤厚度的4次方倒数具有负相关关系。通过 FLAC^{3D}数值模拟开展底板煤岩主应力、塑性区及弹性能分析,结果表明,巷道底板岩层是主要的冲 击动力能贮存体,而底煤是主要的动力释放显现体;底煤通过影响底板潜在冲击启动区、潜在冲击 能量传递区、潜在冲击地压显现区的范围、贮存能量以及3者之间的依存位置,进而影响底板煤岩 层之间的能量储存与传递机制,从而影响底板冲击地压的形成过程。底煤相对于底板岩层具有较 弱的弹性能储存能力,底煤厚度是影响底煤储存弹性能量的关键因素,底煤厚度通过影响底煤与底 板岩层之间的弹性能量传递能力从而影响底板冲击危险性。随着底煤厚度的增加,底板冲击危险 性逐渐增加,增加梯度逐渐降低;当底煤厚度增加到2m时,底煤厚度的再增加对底板冲击危险性 无明显叠加影响,呈现出底煤厚度对底板冲击危险性影响的阈值效应。留底煤底板卸压时,应针对 底板岩层采取解危措施,阻断应力传递路径,减小底板能量积聚,从而降低底板冲击危险性。研究 成果在现场进行了应用分析,通过钻屑法监测显示解危效果良好。

关键词:底板冲击地压;掘进巷道;底煤厚度;底板煤岩;底板卸压

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2020)12-3984-11

Influence mechanism and application analysis of bottom coal layer thickness on floor rock burst

ZHANG Chenyang^{1,2,3}, PAN Junfeng^{1,2,3}, XIA Yongxue^{1,2,3}, YANG Guangyu^{1,2,3}, LIU Shaohong^{1,2,3}, LU Chuang^{1,2,3}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Design Development, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Coal Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: For thin and medium-thick bottom coal layer with thickness of less than 3 m, in order to study the influence mechanism of bottom coal layer thickness on floor rock burst, based on the impact characteristics of floor in excavation roadway and theoretical analysis, the mechanical model of deflection failure of coal-rock laminated beam of floor was established. The deflection deformation curve of floor coal and rock has the development characteristics of synchroniza-

tion and different amplitudes. The formula calculation shows that with the increase of bottom coal layer thickness, the accumulation elastic energy of bottom coal layer gradually increases, and the increase gradient gradually becomes gentle, which has a negative correlation with the reciprocal of the fourth power of coal thickness. The FLAC^{3D} numerical simulation was used to analyze the main stress, elastic-plastic zone and elastic energy. The results show that the floor rock layer of roadway is the main impact dynamic energy storage body, and the bottom coal layer is the main power release manifestation. The bottom coal layer affects the energy storage and transfer mechanism between the bottom coal and rock by affecting the scope of the potential rock burst start-up zone, the potential energy transfer zone, the potential rock burst occurrence zone, the stored energy, and the dependence between the three zones. This will affect the formation process of the floor rock burst. Bottom coal layer has a weak elastic energy storage capacity relative to the floor rock layer. The thickness of bottom coal layer is a key factor affecting the storage of elastic energy of bottom coal. The thickness of bottom coal layer affects the floor rock burst hazard by affecting the elastic energy transfer ability between coal and rock. With the increase of bottom coal layer thickness, the floor rock burst hazard gradually increases and the gradient gradually decreases. When the thickness of bottom coal layer increases to 2 m, the increase of bottom coal layer thickness has no obvious superimposed effect on the floor rock burst hazard, showing the threshold effect of bottom coal layer thickness on the floor rock burst. When the pressure of floor with bottom coal layer is relieved, it is necessary to take measures to eliminate the danger of the floor rock, block the stress transmission path, reduce the energy accumulation of the floor, and thus reduce the risk of floor rock burst. The application of the research results was analyzed and validated on site. Monitoring by the method of drill bits showed that the effect of eliminating the danger was good. Key words: floor rock burst; excavation roadway; bottom coal layer thickness; floor coal and rock; floor pressure relief

冲击地压是威胁煤矿安全高效生产的典型煤岩 动力灾害之一。近年来,掘进巷道底板冲击地压事故 日渐严重,造成巷道损坏、设备受损、人员伤亡,严重 威胁经济发展,影响社会稳定^[1]。防治底板冲击的 关键源于对底板冲击地压机理的研究,底板冲击地压 机理研究的关键源于对其影响因素的分析。

底板冲击地压机理的研究方面,姜福兴等^[4]将 底板冲击分为2种类型并提出相应的防治措施。徐 学锋等^[5]提出底板冲击矿压危险性系数的概念。潘 俊锋等[6]开展了半孤岛工作面全煤巷道底板冲击启 动原理分析。谢龙等^[7]研究了侧压系数对动载诱发 特厚煤层巷道底板冲击的影响。肖治民等[8]认为巷 道底板水平应力是诱发底板冲击的主要因素。李鹏 波等^[9]结合尖点突变模型推导出底板失稳的必要条 件。史庆稳^[10]研究了底板冲击诱发因素的影响规 律。张晨阳^[11]研究了底煤厚度对巷道底板冲击启动 的影响规律。对于影响冲击地压主控因素的研究方 面,国内学者针对断层等构造^[12]、覆岩结构^[14]、地应 力^[15]、煤柱^[16]、动载^[17]等对冲击地压的影响开展了 大量研究。国内华亭煤矿、峻德煤矿、砚北煤矿、崔木 煤矿、孟村煤矿、高家堡煤矿等均面临严峻的底板冲 击地压。这些矿井由于采用分层综采、大采高开采、 综放开采等而留设底煤;或是为防止含有蒙脱石等黏 土矿物的底板岩层遇水膨胀而留设底煤。上述文献 针对底板冲击的研究大多采用理论分析,也考虑了不 同因素的影响,对底板冲击地压影响规律研究具有促进作用。但鲜有针对底煤厚度对底板冲击的影响进行深入研究,难以对现场留设底煤的厚度选取提供理论参考。

据此,笔者针对厚度为3m以下的薄及中厚底煤 对底板冲击的影响机制,以某矿中央大巷留底煤底板 冲击地压为工程背景,以掘进巷道顶板、煤体、底板组 成的力学平衡系统为研究对象,构建针对底煤作用的 挠曲力学模型,揭示底煤厚度对底板冲击的影响机理 并应用于工程实践,以期为底板冲击地压矿井巷道底 煤厚度选取及底板卸压措施制定提供理论依据。

1 工程背景

陕西某冲击地压矿井主采 4 号煤层,煤层厚度 3.70~26.30 m,平均 16.25 m,埋深 430~890 m。煤 层单轴抗压强度为 23.13 MPa,具有强冲击倾向性。 顶板为粉砂岩,具有弱冲击倾向性。底板为铝质泥岩 等,无冲击倾向性。矿井采用盘区式布置,一盘区 5 条中央大巷均布置在煤层中,煤柱宽度为 35 m。中 央大巷采用直墙半圆拱断面,各回采巷道采用矩形断 面,所有巷道均采用锚网索支护,局部架设 U 型棚。 矿井采用综采放顶煤开采方法。由于褶曲的存在,并 为防止底板铝质泥岩遇水膨胀,掘进巷道留有厚度不 等的底煤。

矿井自掘进以来,巷道动力显现日益明显。

炭

煤

2015-08-31,中央一号辅运大巷掘进工作面挂网期 间,掘进工作面向后0~30m发生冲击显现,煤柱 帮(右帮)最大帮臌量0.5 m,肩部变形量相对较大, 十余处大块浆皮被崩落,2处锚网被撕裂,4处木托盘 被压裂,图1为冲击地压显现位置。



图 1 掘进大巷冲击地压显现位置 Fig. 1 Location of rock burst in excavation roadway

留底煤底板力学的分析 2

2.1 底板煤岩受力环境

巷道开挖之后围岩应力重新分布,上覆岩体自重 通过巷道两帮煤壁传至底板,形成高于原岩应力的侧 向支承压力。在侧向支承压力的影响作用下,底板岩 层承受轴向力的作用,底板轴向应力超过其破坏强度 以后便会发生挠曲破坏进而诱发底板冲击。

为便于计算,选取巷道断面为矩形,巷道倾角为 0,不考虑巷道支护、结构面等因素,底煤与底板岩层 具有良好的连续性与均质度。将巷道底板煤岩组合 体受力结构简化为杆件,两端约束形式为固支梁。底 板煤岩层叠体梁力学模型如图 2 所示。图 2 中, T_n 为底煤厚度, $T_{\rm B}$ 为底板岩层厚度, q_0 为原岩应力, $q_{\rm u}$ 为支承应力,q为底板围岩反向作用力,B为巷道宽 度, ηB 为支承压力的影响范围, η 为影响范围系数。

2.2 底板煤岩挠曲破坏模型

底煤厚度为3m以下的留底煤巷道底板冲击失 稳的力学机理是底板煤岩在侧帮集中应力作用下发 生整体塑性剪切破坏,在水平应力条件下发生挠曲失 稳最终向巷道内滑移,从而造成底板冲击失稳现象。 底煤与底板岩层在挠曲作用下形成挠曲滑动界面,呈 现出明显的挠曲形变响应特征。因此,力学模型中底 煤与底板岩层具有共同的挠曲中心,两者的挠曲变形 曲线具有同步异幅的发展特性。据此,建立底板煤层 叠体梁受力模型如图3所示。

由图3可知,底板煤岩叠体梁截面弯矩 M(x)由 外载荷作用而产生,故应有

$$M(x) = M_{\rm D}(x) + M_{\rm R}(x)$$
 (1)

式中,M(x)为作用于煤岩层叠体梁上的整体梁截面 弯矩; $M_{\rm p}(x)$ 为作用于底煤上的梁截面弯矩; $M_{\rm p}(x)$





为作用于底板岩层上的梁截面弯矩。

根据煤岩层叠体梁在外载荷作用下发生挠曲变 形时,两者具有相同的挠曲中心与不同的挠曲变形幅 度,可得

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_{\rm D}(x)}{W_{\rm D}} \tag{2}$$

$$\frac{1}{\rho + T_{\rm D}} = \frac{M_{\rm R}(x)}{W_{\rm R}} \tag{3}$$

式中, p 为挠曲线挠曲半径; W_D 为底煤弯曲截面系 数;W_B为底板岩层弯曲截面系数。

由式(2),(3)可得

$$M_{\rm D}M_{\rm R}T_{\rm D} = W_{\rm R}M_{\rm D} - W_{\rm D}M_{\rm R}$$
(4)
由式(1),(4)可得

$$M_{\rm D} = \frac{1}{2T_{\rm D}} \times \sqrt{(W_{\rm D} + W_{\rm R})^2 + T_{\rm D}M(x)[T_{\rm D}M(x) + 2(W_{\rm D} - W_{\rm R})]} + \frac{T_{\rm D}M(x) - (W_{\rm D} + W_{\rm R})}{2T_{\rm D}}$$
(5)

$$M_{\rm R} = -\frac{1}{2T_{\rm D}} \times$$

$$\sqrt{(W_{\rm D} + W_{\rm R})^2 + T_{\rm D}M(x)[T_{\rm D}M(x) + 2(W_{\rm D} - W_{\rm R})]} + \frac{T_{\rm D}M(x) + (W_{\rm D} + W_{\rm R})}{2T_{\rm D}}$$
(6)

根据上述分析,进一步优化底板煤岩层叠体梁挠 曲破坏模型如图4所示。

上述底板煤岩层叠体梁为超静定梁,考虑到梁的 几何外形及载荷的对称性,根据两端固支的初始外界 中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.ne



图 4 底板煤岩层叠体梁挠曲破坏模型 Fig. 4 Floor coal and rock laminated beam damaged model 求解,可知梁上任意截面的弯矩 *M*(*x*)为

$$M(x) = -\frac{1}{2}q_0x^2 - B(q_0 + \eta q_u)x + \frac{q_0B^2(1+\eta)^2}{3} + \frac{\eta^2B^2(q_u - q_0)[8(1+\eta)^2 - \eta^2]}{4(1+\eta)^2},$$

$$0 \le x \le \eta B$$
(7)

$$\begin{split} M(x) &= \frac{1}{2} (q_{u} - q_{0}) (x - \eta B)^{2} - \frac{(1 + \eta)^{2} B^{2}}{2} q_{u} + \\ \frac{q_{0} B^{2} (1 + \eta)^{2}}{3} + \frac{\eta^{2} B^{2} (q_{u} - q_{0}) [8(1 + \eta)^{2} - \eta^{2}]}{4(1 + \eta)^{2}}, \end{split}$$

$$\eta B \le x \le (1+\eta)B \tag{8}$$

由杆件梁挠曲线近似微分方程可知

$$W_{\rm D} \frac{\mathrm{d}^4 \omega_{\rm D}}{\mathrm{d}^4 x} = q_{\rm J} - q \tag{9}$$

$$W_{\rm R} \frac{\mathrm{d}^4 \omega_{\rm R}}{\mathrm{d}^4 x} = -q_{\rm J} \tag{10}$$

式中, $q_{\rm J}$ 为底煤与底板岩层之间的接触压力; $\omega_{\rm D}, \omega_{\rm R}$ 分别为底煤与底板岩层的弯曲挠度。

同时,

1. - 12 (0)

$$\frac{d^2 \omega_{\rm R}}{dx^2} = \frac{T_{\rm D} M(x) + (W_{\rm D} + W_{\rm R})}{2T_{\rm D}} - \frac{1}{2T_{\rm D}} \times \sqrt{(W_{\rm D} + W_{\rm R})^2 + T_{\rm D} M(x) [T_{\rm D} M(x) + 2(W_{\rm D} - W_{\rm R})]}$$
(11)

(. .) - 7/1

$$\begin{aligned} & \exists \mathcal{L}(\mathbf{G}) \sim (\mathbf{\Pi}) \, \exists \mathbf{A} \\ & q_{\mathrm{J}} = \frac{1}{2} M''(x) - \frac{1}{2} \left[M'(x) \right]^{2} \left\{ \left[M(x) + \frac{W_{\mathrm{D}} - W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}} \right]^{2} + \frac{4W_{\mathrm{D}}W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}^{2}} \right\}^{-\frac{1}{2}} - \frac{1}{4} M''(x) \left[2M(x) + \frac{W_{\mathrm{D}} - W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}} \right] \left\{ \left[M(x) + \frac{W_{\mathrm{D}} - W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}} \right]^{2} + \frac{4W_{\mathrm{D}}W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}^{2}} \right\}^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{8} \left[M'(x) \right]^{2} \left[2M(x) + \frac{W_{\mathrm{D}} - W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}} \right]^{2} \left\{ \left[M(x) + \frac{W_{\mathrm{D}} - W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}} \right]^{2} + \frac{4W_{\mathrm{D}}W_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{D}}^{2}} \right\}^{-\frac{3}{2}} \end{aligned}$$

$$(12)$$

式中,M'(x),M''(x)分别为M(x)的一次导数、二次导数。

综上可知煤岩层叠体梁中煤层的挠曲线表达式 为

$$W_{\rm D} = \frac{1}{4} \left[\frac{q_0 B^2 (1 + \eta)^2}{3} + \frac{\eta^2 B^2 (q_{\rm u} - q_0) \left[8(1 + \eta)^2 - \eta^2 \right]}{4(1 + \eta)^2} \right] x^2 + \frac{1}{12} \left[q_{\rm u} B^4 (1 + \eta)^4 - (q_{\rm u} - q_0) (x - \eta B)^4 \right] + \frac{1}{6} B \left[B(q_0 + \eta q_{\rm u}) \right] x^3$$
(13)

据此可以计算底煤的极限变形能力,当底煤变形 超过极限挠度值时,其贮存弹性能达到极限,易诱发 冲击破坏。

2.3 底煤积聚弹性能变化规律分析

根据上述分析,叠体梁中底煤的全梁弯曲应变能 E_0 为

$$E_0 = \int_0^{2(1+\eta)B} \frac{M^2(x)}{2EI} dx$$
 (14)

式中,E为底煤弹性模量;I为底煤梁截面惯性矩。

根据冲击地压启动理论^[2]可得底板煤岩层叠体 梁冲击启动力学判定准则为

$$E_0 + E_d - E_c > 0$$
 (15)

式中,*E*_d为顶、底板断裂弹性能传至底板的能量;*E*_e 为底板煤岩层叠体梁极限破坏能量。

由式(14) 可得

$$\frac{\mathrm{d}E_{0}}{\mathrm{d}T_{\mathrm{D}}} = \int_{0}^{2(1+\eta)B} \left[\frac{M(x)}{EI} \frac{\mathrm{d}M(x)}{\mathrm{d}T_{\mathrm{D}}} - \frac{M^{2}(x)}{2EI^{2}(T_{\mathrm{D}})} \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}T_{\mathrm{D}}} \right] \mathrm{d}x$$
(16)

$$\frac{\mathrm{d}E_{0}}{\mathrm{d}T_{\mathrm{D}}} = \int_{0}^{2(1+\eta)B} \left[\frac{M(x)}{EI} \frac{\mathrm{d}M(x)}{\mathrm{d}T_{\mathrm{D}}} - \frac{1}{T_{\mathrm{D}}^{4}} \frac{18M^{2}(x)}{E} \right] \mathrm{d}x$$
(17)

对式(17)进一步简化可得

$$\frac{\mathrm{d}E_0}{\mathrm{d}T_\mathrm{p}} \propto h(T_\mathrm{p}) \tag{18}$$

$$h(T_{\rm D}) = -\frac{1}{T_{\rm D}^4}$$
(19)

由式(18),(19)可得

$$\frac{\mathrm{d}E_0}{\mathrm{d}T_\mathrm{D}} \propto -\frac{1}{T_\mathrm{D}^4} \tag{20}$$

由式(20)可知,底煤积聚弹性能对底煤厚度的 一阶导数与底煤厚度4次方的倒数具有负相关关系, 代入数值计算结果见表1,并绘制函数曲线如图5所 示。由图 5 可知,随着底煤厚度的增加,底煤积聚弹性能逐渐增加,增加梯度逐渐平缓,其与底煤厚度 4 次方的倒数具有负相关关系。

表1 底煤积聚弹性能对底煤厚度的一阶导数值

 Table 1
 First derivative value of bottom coal accumulated

 elastic energy to bottom coal thickness



图 5 底煤厚度对底煤积聚弹性能影响梯度



3 留底煤底板的数值模拟

3.1 数值模型的建立

采用 FLAC^{3D} 数值软件,根据中央大巷地质工程 条件开展巷道掘进建模。掘煤厚度为3m,留底煤厚 度分别为0,0.5,1.0,1.5,2.0,3.0m,即模型煤层厚 度分别为3.0,3.5,4.0,4.5,5.0,6.0m。底煤厚度 取值与前述理论分析取值保持一致。底板岩层高度 为45m,顶板岩层高度为31m,模型长宽分别为 120,60m。考虑到巷道开挖影响范围以及边界效应, 将开挖巷道布置于数值模型轴向中间位置,巷道断面 设置为矩形,巷道净宽、净高尺寸分别为4,3m,开挖 巷道长度为40m。

模型物理力学参数参考该矿 4 号煤及其顶底板 实验室测定数据,具体见表 2。根据地应力测试结 果,模型中水平应力设定为垂直应力的 1.5 倍,模拟 巷道埋深为 670 m。模型采用摩尔-库伦本构模型, 四周及下部边界采用位移固定的加载方式,侧面边界 限制水平移动,底部边界限制垂直移动,上部边界为 自由面。

如图 6 所示,*X*,*Y*,*Z* 分别表示掘进巷道的轴向、 横向、垂向。红色及绿色虚线框分别表示位于掘进工 作面后方及前方的巷道断面,相对于基准面(掘进工 作面)距离分别为±1,±3,±5 m 等,表示随巷道掘进 时距掘进工作面的不同距离。在上述监测断面所相 邻的底板中设置应力监测点,底板监测点 Z1,Z3, Z5,Z7分别表示距底板自由面 1,3,5,7 m,帮部监测 点 Y1,Y3,Y5,Y7分别表示横向方向上距离巷道中轴 线 1,3,5,7 m。模拟掘进时,对模型预先开掘 30 m, 运行至稳定之后再次开掘 10 m。考虑巷道掘进速 度,计算时步设定为 30 时步。

表 2 煤岩物理力学参数 Table 2 Physical and mechanical parameters of coal rock

煤岩	弹性模 量/GPa	泊松比	抗拉强 度/MPa	黏结力/ MPa	内摩擦 角/(°)	
中粒砂岩	8.51	0.26	1.68	5.4	38	
粗粒砂岩	6.31	0.25	1.31	5.4	38	
粉砂岩	1.20	0.20	4.00	5.0	36	
4 号煤	2.65	0.33	1.33	5.0	36	
泥岩	1.20	0.20	4.00	5.0	36	
中粒砂岩	8.51	0.26	1.68	5.4	38	





Fig. 6 Roadway excavation simulation scheme

3.2 底板煤岩主应力的分析

图 7 为巷道掘进之后的轴向、横向应力场云图。 可见, 掘进巷道开挖之后距离底板一定范围的围岩应 力得到释放, 底板应力向深处转移直至达到原岩应力 状态。底板煤岩中 X 方向应力场相对于 Y 方向、Z 方 向应力场更为集中。因此, 为突出研究随掘进巷道掘 进工作面推进时, 底煤厚度变化对底板煤岩主应力分 布演化影响规律, 提取底煤厚度分别为 0,0.5,1.0, 1.5,2.0,3.0 m 的模型中底板应力数据, 绘制不同模 型中距底板不同距离处的 X 方向应力随掘进工作面 推进演化曲线如图 8 所示。图 8 中至掘进工作面距 离为正值表示在掘进工作面前方, 尚未开掘; 至掘进 工作面距离为负值表示在掘进工作面后方, 已经开 掘。

由图 7,8 可知,掘进巷道掘进工作面推进时,底 煤厚度变化对底板煤岩应力的影响区域主要位于掘 进工作面后方。随着距自由面距离的增加,底煤厚度 对底板煤岩应力的影响逐渐减弱,并趋于 0,提取底 板煤岩三向主应力集中系数值如图 9 所示。







图 8 掘进工作面前后 X 方向主应力演化曲线

Fig. 8 X-direction principal stress evolution curve before and after driving working face





图 10 弹塑性区分布





巷道开挖后,以断面为中心塑性区不断向外扩 散,围岩塑性区体积呈现出不断增加的特征。顶底板 塑性区范围大于两帮,围岩剪切破坏区体积大于拉伸 破坏区。塑性区的急剧扩展往往伴随着冲击地压的 发生,依据塑性区的体积变化,可以从侧面反映并评 判冲击地压危险^[21]。结合图 11,随底煤厚度的增 加,塑性区不断增加,底板冲击危险性不断增加,增加 梯度逐渐减小;当底煤厚度增加到 2 m 时,塑性区体 积增加梯度趋于平缓,底板冲击危险性的增加梯度同 时趋于平缓。

3.4 底板煤岩弹性能的分析

依据广义胡克定理三向受力状态下的弹性能计 算理论^[18],提取并绘制底板围岩弹性能云图如图 12 所示,图 12 中红色、黄色、绿色、蓝色依次表示弹性能 积聚程度逐渐由高到低。



图 12 底板围岩弹性能云图

Fig. 12 Elastic energy cloud diagram of floor rock

冲击地压作为一个动力学结果,在其孕育、发展、 触发的形成过程中必然存在潜在冲击启动区、潜在冲 击能量传递区、潜在冲击显现区。潜在冲击启动区范 围越大,储存弹性能越多;而潜在冲击能量传递区范 围越小,传递弹性能能力越强;潜在冲击地压显现区 范围越小,其突破失稳极限发生冲击显现的趋势越 强。

图 12 中红色、橙色及黑色实线区域分别表示潜 在冲击显现区、潜在冲击能量传递区、潜在冲击启动 区。由图 12 可知,掘进巷道开挖之后导致弹性能主 要集中于巷道两帮底角及底板岩层位置。底煤厚度 通过影响底板潜在冲击启动区、潜在冲击能量传递 区、潜在冲击地压显现区的范围、贮存能量以及 3 者 之间的依存位置,进而影响底板冲击地压。随着底煤 厚度的增加,底板煤岩内积聚的弹性能区域范围不断 扩大,潜在冲击启动区、潜在冲击能量传递区、潜在冲 击显现区之间的弹性能差值及空间距离差值呈现出 逐渐递增的特征。当底煤厚度增加到 2 m时,潜在冲 击启动区范围相对较大,潜在冲击能量传递区与潜在 冲击地压显现区范围相对较小,3 者之间的能量差值 相对较大,从而导致诱发底板发生冲击地压的趋势更 为明显。

4 底煤对底板冲击地压的影响机制

综上,研究认为巷道底煤对底板冲击地压的影响 机制:巷道底板岩层是主要的冲击动力能贮存体,而 底煤是主要的动力释放显现体。底煤通过影响底板 潜在冲击启动区、潜在冲击能量传递区、潜在冲击地 压显现区的范围、贮存能量以及3者之间的依存位 置,进而影响底板煤岩之间的能量储存与传递机制, 从而影底板冲击地压的形成过程。

底煤相对于底板岩层具有较弱的弹性能储存能 力,底煤厚度是影响底煤储存弹性能量的关键因素。 底煤厚度通过影响底煤与底板岩层之间的弹性能量 传递能力从而影响底板冲击危险性。上述理论分析 计算结果及数值模拟结果可以相互印证,以此可以定 性地分析得到底煤对底板冲击危险性的影响规 律(图13):针对厚度为3m以下的薄及中厚底煤,在 不考虑其他因素的情况下,随着底煤厚度的增加,底 板冲击危险性逐渐增加,而增加梯度逐渐降低;当底



图 13 底板厚度对底板冲击危险性的影响 Fig. 13 Influence of the thickness of bottom coal on the danger of floor impact

煤炭学报

煤厚度增加到2m时,底煤厚度的再增加对底板冲击 危险性无明显叠加影响,呈现出底煤厚度对底板冲击 危险性影响的阈值效应。

5 工程应用

陕西某冲击地压矿井大巷在采掘初期均布置 在煤层中部,一盘区回风大巷和胶带大巷均托顶煤 1.5 m 掘进,辅运大巷和首采工作面回风巷主要沿 底煤2m以上掘进。巷道底煤厚度均在2m以上, 局部区域能达到5m以上。大巷中发生的多次动 力显现事件中有均不同程度的底煤瞬间突起现象。 根据上述分析,底煤为主要的底板冲击显现体,是 影响底板冲击的关键因素,故对留有底煤的巷道进 行底板卸压。 图 14 为留底煤底板卸压机理示意图,针对掘进 巷道底煤厚度超过 2 m 的底板采取深孔区间爆破卸 压措施,以弱化潜在冲击启动区的贮存能量并扩大其 与潜在冲击能量传递区的距离;扩大潜在冲击能量传 递区,弱化冲击能量传递能力;减小底板潜在冲击启 动区范围。最终弱化底板冲击启动趋势,从而达到底 板卸压解危的目的。

底板卸压效果如图 15 所示,钻屑量的临界值为 4 kg,卸压前钻屑量大于 4 kg,具有冲击危险性,通过 卸压措施,钻屑量的平均值下降了近 1.5 kg,降幅达 到 37%,应力分布更为平均,说明局部解危措施有效 的降低了底板煤岩潜在冲击启动区、潜在冲击能量传 递区、潜在冲击显现区的能量积聚与传递,底板解危 效果良好。



图 14 留底煤底板卸压机理







Fig. 15 Schematic diagram of floor pressure-relief effect

6 结 论

(1)针对厚度为3m以下的薄及中厚底煤,基于 掘进巷道底板冲击特征,建立底板煤岩层叠体梁挠曲 破坏力学模型,随着底煤厚度的增加,底煤积聚弹性 能逐渐增加,增加梯度与底煤厚度4次方的倒数具有 负相关关系。

(2)巷道底板岩层是主要的冲击动力能贮存体,

底煤是主要的动力释放显现体。底煤通过影响底板 潜在冲击启动区、潜在冲击能量传递区、潜在冲击地 压显现区的范围、贮存能量以及3者之间的依存位 置,进而影响底板煤岩之间的能量储存与传递能力, 从而影底板冲击地压。

(3)针对厚度为3m以下的薄及中厚底煤,底煤 厚度通过影响底煤与底板岩层之间的弹性能量传递 能力从而影响留底煤底板冲击危险性。随着底煤厚 度的增加,底板冲击危险性逐渐增加,而增加梯度逐 渐降低;当底煤厚度增加到2m时,底煤厚度的再增 加对底板冲击危险性无明显叠加影响。

(4)底板岩层是底板冲击的动力源,防治底板冲 击的有效手段是通过弱化坚硬底板来切断应力传递 路径,减小底板能量积聚,从而降低底板冲击危险性。 研究结果在现场进行了应用分析,底板解危效果良 好。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 潘俊锋.煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究[J].煤 炭学报,2019,44(1):173-182.

PAN Junfeng. Theory of rock burst start-up and its complete technology system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 173– 182.

- [3] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大学 出版社,2008;32-38.
- [4] 姜福兴,魏全德,姚顺利,等.冲击地压防治关键理论与技术分析[J].煤炭科学技术,2013,41(6):6-9.
 JIANG Fuxing, WEI Quande, YAO Shunli, et al. Key Theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control[J]. Coal Science and Technology,2013,41(6):6-9.
- [5] 徐学锋,窦林名,刘军,等.煤矿巷道底板冲击矿压发生的原因 及控制研究[J].岩土力学,2010,31(6):1977-1982.
 XU Xuefeng, DOU Linming, LIU Jun, et al. Research of reasons and controlling for floor burst in coal mine roadway [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(6):1977-1982.
- [6] 潘俊锋. 半孤岛面全煤巷道底板冲击启动原理分析[J]. 煤炭学报,2011,36(S2):332-338.

PAN Junfeng. Start-up principium of rock burst in whole coal roadway floor in half-island face [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(S2):332-338.

- [7] 谢龙,窦林名,吕长国,等.不同侧压系数对动载诱发巷道底板冲击的影响[J].采矿与安全工程学报,2013,30(2):251-255.
 XIE Long,DOU Linming,LÜ Changguo, et al. Study on the effect of floor burst induced by dynamic disturbance at different lateral pressure coefficients[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2013, 30(2):251-255.
- [8] 肖志明,刘军,王贺,等. 动载诱发巷道底板冲击失稳机制及防 控技术[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(5):1573-1581. XIAO Zhiming, LIU Jun, WANG He, et al. Study on mechanism and control of rock burst instability of roadway floor induced by dynamic load disturbance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(5):1573-1581.

- [9] 李鹏波,宋扬,韩现刚.冲击地压条件下华亭煤田底板稳定性分析[J].煤矿开采,2019,24(1):93-97.
 LI Pengbo, SONG Yang, HAN Xiangang. Floor stability of huating coal mine field with rock burst[J]. Coal Mining Technology, 2019,24(1):93-97.
- [10] 史庆稳.煤矿巷道底板冲击地压发生机理与控制研究[D].北 京:煤炭科学研究总院,2016.
 SHI Qingwen. The type of floor rockburst of coal mine roadway and coordinating release-support measurement[D]. Beijing: China Coal Research Institute,2016.
- [11] 张晨阳. 底煤厚度对巷道底板冲击启动的影响规律研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2018.
 ZHANG Chenyang. Research of the influence laws of bottom coal thickness on roadway floor burst start-up[D]. Beijing: China Coal Research Institute,2018.
- [12] 姜福兴,魏全德,王存文,等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚 煤层冲击地压机理分析[J]. 煤炭学报,2014,39(7):1191-1196.

JIANG Fuxing, WEI Quande, WANG Cunwen, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7):1191–1196.

- [13] 姜福兴,苗小虎,王存文,等.构造控制型冲击地压的微地震监测预警研究与实践[J].煤炭学报,2010,35(6):900-904.
 JIANG Fuxing, MIAO Xiaohu, WANG Cunwen, et al. Predicting research and practice of tectonic-controlled coal burst by microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 900-904.
- [14] 王存文,姜福兴,孙庆国,等. 基于覆岩空间结构理论的冲击地 压预测技术及应用[J].煤炭学报,2009,34(2):150-155.
 WANG Cunwen, JIANG Fuxing, SUN Qingguo, et al. The forecasting method of rock-burst and the application based on overlying multi-strata spatial structure theory[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(2):150-155.
- [15] 苏承东,李化敏. 深埋高应力区巷道冲击地压预测与防治方法 研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3840-3846. SU Chengdong,LI Huamin. Study on forecast and prevention methods for rockburst of deep roadway with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(S2):3840-3846.
- [16] 刘金海,姜福兴,王乃国,等. 深井特厚煤层综放工作面区段煤 柱合理宽度研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(5):921-927.

LIU Jinhai, JIANG Fuxing, WANG Naiguo, et al. Reasearch on reasonable width of segment pillar of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5):921–927.

[17] 姜耀东,赵毅鑫,宋彦琦,等. 放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3131-3135.

JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, SONG Yanqi, et al. Analysis of blasting tremor impact on roadway stabilty in coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17):3131-3135.

[18] 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-

3994	煤	炭	学	报	2020 年第 45 卷

3010.

XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strengthand structural failure of rocks based on energy dissipationand energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(17):3003-3010.

[19] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业大学学报, 1985,14(3):37-43.

LI Yusheng. Rock burst mechanism and preliminary application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985, 14(3):37-43.

[20] 姜福兴,舒凑先,王存文.基于应力叠加回采工作面冲击危险性 评价[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2428-2435.

> JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition [J]. Chi

nese Journal of Rock Mechanics Engineering, 2015, 34 (12): 2428-2435.

- [21] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等. 均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(11):2679-2688.
 MA Nianjie, GUO Xiaofei, ZHAO Zhiqiang, et al. Occurrence mechanisms and judging criterion on circular tunnel butterfly rock burst in homogeneous medium[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(11):2679-2688.
- [22] 姜福兴,史先锋,王存文,等. 高应力区分层开采冲击地压事故 发生机理研究[J]. 岩土工程学报,2016,37(6):1123-1131. JIANG Fuxing, SHI Xianfeng, WANG Cunwen, et al. Mechanical mechanism of rock burst accidents in slice mining face under high pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,37(6):1123-1131.