

DOI: 10.11779/CJGE201911012

特厚煤层掘进面围岩能量积聚特征及诱冲机制研究

朱斯陶¹, 姜福兴¹, 王绪友², 姜亦武², 宁廷洲², 孙邵华²

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 兖矿新疆矿业有限公司硫磺沟煤矿, 新疆 昌吉 831100)

摘 要: 以新疆硫磺沟煤矿特厚煤层掘进工作面为工程背景, 采用现场调研、岩石力学试验和理论分析等方法, 对特厚煤层掘进面围岩能量积聚特征及其诱冲机制进行了研究。研究认为: ①根据硫磺沟煤矿 9-15 煤层与岩层的岩石力学试验结果, 埋深在 100~1000 m 时, 煤、岩层的能量密度与埋深成正比, 煤层与岩层的能量密度比值为 1.8~2.3, 平均为 2.1; ②相同深度条件下特厚煤层掘进工作面围岩积聚弹性能远大于薄及中厚煤层, 其积聚高弹性能的围岩结构是特厚煤层掘进面更容易发生冲击地压和冲击地压灾害更严重的原因之一; ③掘进巷道影响范围内围岩积聚弹性能与煤层厚度和巷道半径成正比, 且在同等巷道半径条件下, 煤层厚度越大, 巷道围岩积聚弹性能越大, 当巷道半径为 3.0 m 时, 围岩积聚的弹性能分别为巷道半径为 2.5 m 和 2.0 m 时围岩积聚弹性能的 1.4 倍和 2.0 倍; ④提出的考虑煤层厚度和煤层冲击倾向性的冲击危险性评价方法比当前冲击危险性评价方法更加科学合理, 评价结果也更符合现场实际情况。研究结果对特厚煤层掘进工作面冲击地压防治具有一定的借鉴意义。

关键词: 特厚煤层; 掘进工作面; 能量积聚; 冲击地压; 危险性评价

中图分类号: TU45; TD32

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)11-2071-08

作者简介: 朱斯陶(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事冲击地压防治方面的研究工作。E-mail: zhusitao123@163.com。

Energy accumulation characteristics and rockburst mechanism of surrounding rock at heading face of extra-thick coal seam

ZHU Si-tao¹, JIANG Fu-xing¹, WANG Xu-you², JIANG Yi-wu², NING Ting-zhou², SUN Shao-hua²

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Liuhuanggou

Coal Mine, Yankuang Xinjiang Mining Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: Taking the extra-thick coal seam heading face in Liuhuanggou Coal Mine as the engineering background, the energy accumulation characteristics and rockburst mechanism of the surrounding rock at heading face of extra-thick coal seam are studied using field investigation, experiment of rock mechanics and theoretical analysis. The following results are obtained: (1) According to the experimental results of rock mechanics of 9-15 coal seam and rock in Liuhuanggou Coal Mine, when the burial depth is between 100 and 1000 m, the energy density of coal and rock is proportional to the burial depth, and the energy density ratio of coal to rock is between 1.8 and 2.3. (2) Under the same depth conditions, the elastic energy accumulation of the surrounding rock at heading face of extra-thick coal seam is much larger than that of thin and medium-thick coal seam, and the structure of the surrounding rock with high elastic energy accumulation is one of the reasons that the heading face of the extra-thick coal seam is more prone to rockburst. (3) The accumulated elastic energy of the surrounding rock is proportional to the thickness of coal seam and the radius of roadway within the influence range of tunneling. Under the same radius of roadway, the greater the thickness of coal seam, the greater the accumulated elastic energy of the surrounding rock. When the radius of roadway is 3.0 m, the accumulated elastic energy of the surrounding rock is 1.4 times and 2.0 times that of the roadway radius when it is 2.5 and 2.0 m. (4) An evaluation method for impact hazard considering thickness and impact tendency of coal seam is proposed. This method is more scientific and reasonable than the current evaluation method for impact hazard, and the evaluated results are more in line with the actual situations. The research results can be used for reference in the prevention and control of rockburst at the heading face of the extra-thick coal seam.

Key words: extra-thick coal; heading face; energy accumulation; rockburst; risk assessment

0 引 言

煤炭是中国的主导能源, 随着中国中东部地区煤

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674014, 51904017); 中国博士后科学基金项目(2017M620624); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-TP-17-076A1)

收稿日期: 2019-01-28

炭资源开采深度和难度的不断增加,冲击地压、煤与瓦斯突出、矿震等动力灾害越来越严重,煤炭产能正快速向西部转移。近年来,在新疆乌鲁木齐、硫磺沟、伊犁、甘肃华亭、陕西彬长和河南义马等矿区,已有十余个特厚煤层(煤层厚度 8~50 m)采掘工作面在 160~400 m 的深度发生了多起严重冲击地压事故^[1-3]。根据调研,目前已经发生过严重冲击地压的特厚煤层矿井有新疆硫磺沟煤矿(煤层厚 36 m)、神新公司乌东煤矿(煤层厚 42 m)、碱沟煤矿(煤层厚 44 m)、甘肃华亭矿区(煤层厚 39 m)、陕西彬长矿区(煤层厚 24 m)和内蒙鄂尔多斯矿区(煤层厚 10 m)多个煤矿,其中硫磺沟矿区和鄂尔多斯矿区部分矿井在掘进巷道时就发生强烈的“煤爆”,煤体破碎后向外弹射距离可达 0.5~2.0 m(见图 1),而这些矿区是未来中国煤炭生产的主要基地。



图 1 硫磺沟煤矿掘进迎头“煤爆”和冲击地压现场照片
Fig. 1 Photos of “coal explosion” and rockburst at heading face of Liuhuanguo Coal Mine

新疆、甘肃、陕西、河南、黑龙江等矿区开采煤层厚度超过 8 m 的冲击地压事故调研表明^[4-6],特厚煤层矿井冲击地压具有临界冲击深度减小、围岩震动更加频繁和冲击破坏范围增大的特点。例如,河南义马矿区 21 m 厚煤层掘进工作面一次冲击影响巷道约 500 m;甘肃华亭矿区 25 m 厚煤层一次冲击影响巷道近千米。表 1 为义马煤田矿井主采 2-3 煤层冲击地压频发区域煤层厚度统计^[7],由此可知,当煤层厚度超过 8 m 时更容易发生冲击地压灾害。

表 1 义马煤田矿井冲击地压频发区域煤层厚度统计^[7]

Table 1 Thicknesses of coal rockburst frequent areas		
义马煤田矿井名称	2-3 煤层厚度/m	冲击地压频发区域 2-3 煤层厚度/m
杨村煤矿	4~16	13~16
耿村煤矿	4~22	>18
千秋煤矿	4~32	10~30 (>30 m 区域尚未开采)
跃进煤矿	2~12	8~12
常村煤矿	2~20	11~16

许多学者对特厚煤层冲击地压发生机理进行了研究:蓝航等^[8-9]针对急倾斜特厚煤层特殊的赋存条件和

开采技术条件,得到了近直立特厚水平分段两煤层同采条件下两侧采空岩柱对煤体的“撬杆效应”构成了冲击地压的力源并获得其表达式,提出了由于该力源作用在煤体上诱发冲击地压的致灾机理;姜福兴等^[10]提出了复合厚煤层发生冲击地压的“震—冲”机理,认为厚硬岩层中水平应力突变是诱发矿震的主要原因,煤层附近垂直应力突变是诱发冲击地压的主要原因,水平应力突变引起垂直应力突变是矿震诱发冲击地压的主要原因;刘少虹等^[11]运用理论分析、数值模拟以及工程实例监测等研究方法,建立了岩浆岩侵入区巨厚煤层掘进巷道冲击地压的力学模型,研究了岩浆岩侵入区巨厚煤层掘进巷道冲击地压机制;杨伟利等^[12]通过理论分析、现场监测、数值模拟等方法研究得到特厚煤层冲击地压重复发生机理,认为特厚煤层的扩容是导致应力恢复并诱发冲击的主要原因,通过消除力源、阻止应力恢复可防止冲击地压重复发生;窦林名等^[13]研究了厚煤层综放开采的降载减冲原理,随采厚增加,综放开采的静载集中程度先快速降低再趋于稳定,动载扰动先缓慢增大再陡然台阶升高,综放开采在一定采厚范围内具有降载减冲效应;潘俊锋等^[14]通过 FLAC^{3D} 研究了综放开采的合理采放比及综放工作面冲击地压发生的机理,支承压力集中程度仍然超过塑性区煤体强度极限和采空区以暂时稳定梁或者其它形式积聚了大量的弹性能量的瞬间释放是综放工作面冲击地压时有发生的原因。

上述对特厚煤层冲击地压发生机理的研究主要是外部因素(地层结构、覆岩运动、构造和采煤方法等)诱发的特厚煤层冲击地压,而针对特厚煤层自身厚度大这一特征诱发冲击地压的机理研究较少。本文以新疆硫磺沟煤矿 36 m 特厚煤层掘进冲击地压频发为工程背景,采用现场调研、岩石力学试验和理论分析方法对特厚煤层掘进面高弹性围岩结构特征及其诱冲机制进行研究,以期对特厚煤层掘进面冲击地压防治提供参考。

1 硫磺沟煤矿掘进面冲击地压概况

1.1 硫磺沟煤矿掘进工作面概况

硫磺沟煤矿副暗斜井(上平段)巷道主要用于形成二水平行人及辅助运输系统,满足二水平工作面生产时的运输、行人、通风、管线敷设的需要,如图 2 所示。巷道布置在 9-15 煤层中,从 9-15 煤层顶板向煤层底板穿层掘进,掘进区域煤层平均厚 36 m,平均埋深 382 m,平均倾角 25°。掘进巷道附近地层柱状如表 2 所示。经煤层冲击倾向性鉴定试验,9-15 煤层平均单轴抗压强度为 35.4 MPa,动态破坏时间为 31.5

ms, 冲击能量指数为 12.0, 弹性能量指数为 5.6, 综合判定 9-15 煤层为强冲击倾向性煤层。

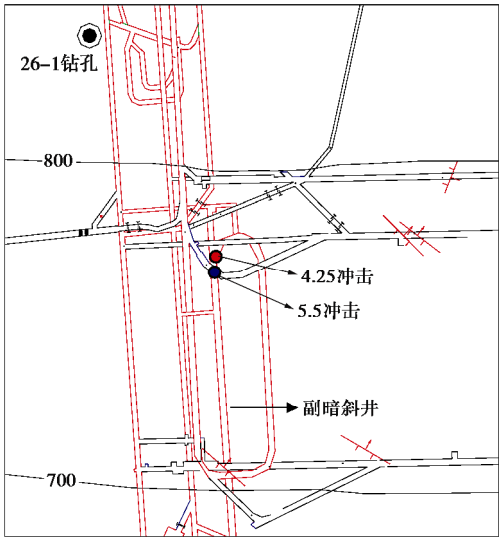


图 2 硫磺沟煤矿掘进工作面冲击平面图

Fig. 2 Plan of rockburst at heading face of Liuhuanguogou Coal Mine

表 2 26-1 钻孔岩层柱状

Table 2 Rock formation columnar section of 26-1

岩层编号	岩层名称	厚度/m	岩层性质
R ₉	细砂岩	10.21	灰白色, 钙质细砂岩
R ₈	泥岩	1.76	黑色, 铝土质泥岩
Coal ₃	4-5 号煤	5.56	黑色, 全亮型煤
R ₇	泥岩	0.96	灰黑色, 铝土质泥岩
Coal ₂	7 号煤层	2.09	黑色, 以亮煤为主
R ₆	粉砂岩	0.96	灰色, 泥质粉砂岩
R ₅	细砂岩	1.41	灰色, 钙质细砂岩
R ₄	泥岩	4.15	灰色, 粉砂质泥岩
R ₃	粉砂岩	2.01	灰色, 泥质粉砂岩
R ₂	细砂岩	1.17	灰白色, 钙质细砂岩
R ₁	炭质泥岩	0.62	黑色, 炭质泥岩夹煤线
Coal ₁	9-15 号煤层	33.16	黑色, 暗煤为主
F ₁	泥岩	2.15	灰黑色, 铝土质泥岩

1.2 特厚煤层冲击地压事故案例

2014 年 4 月 25 日及 5 月 5 日, 在新疆硫磺沟煤矿副暗斜井上平段掘进施工过程中, 迎头震顶频繁且矿压显现强烈, 并发生多次冲击型冒顶和锚杆索破断。掘进巷道设计水平施工, 从 9-15 煤层顶板向煤层底板穿层掘进, 掘进区域煤层平均厚 36 m, 平均埋深 382 m, 平均倾角 25°。4 月 25 日巷道在煤层中掘进 27 m, 掘进迎头放炮后, 发生 3 次强烈煤炮, 造成掘进迎头前方、左帮顶板上部发生冲击型冒顶, 体积约 9 m³。5 月 5 日巷道在煤层中掘进 38 m, 迎头放完炮后, 煤炮声频繁, 震感强烈, 造成巷道迎头前方、左帮顶板

上部发生冲击, 体积约 12.7 m³, 如图 3 所示。

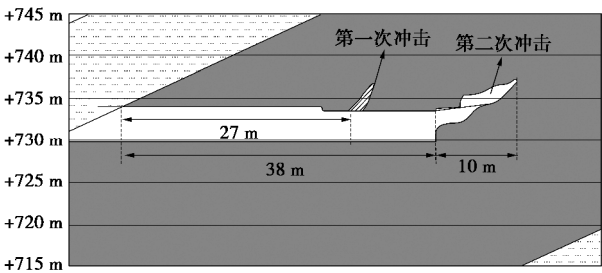


图 3 硫磺沟煤矿掘进工作面冲击剖面图

Fig. 3 Cross-section of rockburst at heading face of Liuhuanguogou Coal Mine

2 特厚煤层掘进面高弹性围岩结构特征及诱冲机制

大量现场实践表明, 特厚煤层冲击地压具有释放能量多、破坏性强、影响范围大等特点。据统计, 薄及中厚煤层冲击地压的影响范围一般不超过百米, 但厚及特厚煤层冲击地压影响范围最大近达千米, 表明与薄及中厚煤层相比, 特厚煤层冲击破坏性更强、影响范围更大、释放能量更多。

2.1 薄及中厚煤层掘进面与特厚煤层掘进面围岩结构对比

图 4 所示为薄煤层与厚煤层掘进工作面围岩结构示意图。薄煤层巷道掘进过程中, 其影响范围 r 较小, 且影响范围内巷道围岩以岩层为主; 特厚煤层巷道掘进过程中, 其影响范围 R 较大, 影响范围内围岩以煤层为主。假设薄煤层与厚煤层的埋深均为 H , 则自重应力为 gH , g 为岩层重度。

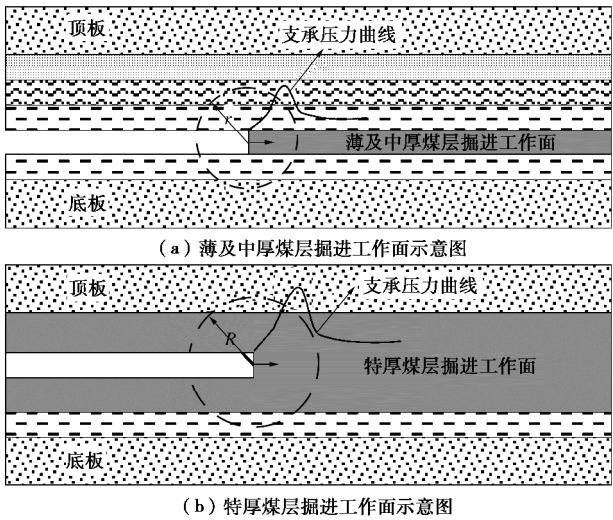


图 4 不同厚度煤层掘进工作面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of heading face of coal seam with different thicknesses

煤岩体的全应力应变曲线如图 5 所示。在同等埋

深条件下,煤层和岩层在自重应力 gH 作用下积聚的弹性能分别为 $S_{\triangle OCD}$ 和 $S_{\triangle OAB}$,由于岩石强度远大于煤,一般情况下 $S_{\triangle OCD} > S_{\triangle OAB}$ 。

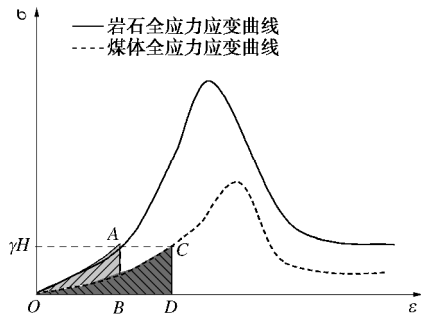


图5 煤岩体全应力应变曲线示意图

Fig. 5 Total stress-strain curves of coal and rock mass

根据硫磺沟煤矿煤层及顶板岩层岩石力学试验结果,9-15煤层的平均单轴抗压强度约为35.4 MPa,顶底板岩层的平均抗压强度约为80.9 MPa。故选择抗压强度分别为32.8 MPa和86.4 MPa的煤、岩样的全应力应变曲线来计算能量密度,如图6所示。由于硫磺沟煤矿9-15煤层掘进工作面平均埋深约为400 m,自重应力为10 MPa,由此可计算出煤层的能量密度约为21.8 kJ/m³(S_{OAB} 部分面积),岩层的能量密度约为10.4 kJ/m³(S_{OCD} 部分面积),煤层的弹性能密度约为岩层的2.1倍。

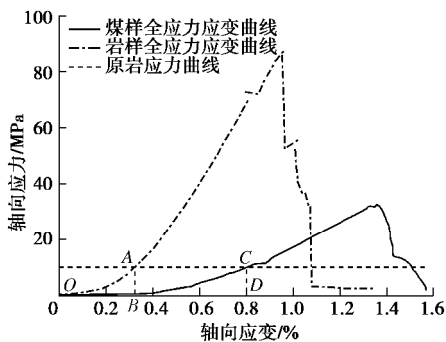


图6 9-15煤层及岩层全应力应变曲线图

Fig. 6 Full stress-strain curves of 9-15 coal seam and rock seam

图7所示为不同埋深条件下9-15煤层与岩层的能量密度曲线。由图7可知,埋深在100~1000 m时,煤、岩层的能量密度与埋深成正比,由于煤层抗压强度小于岩层,在埋深增幅相等时,煤层的能量密度增长速率大于岩层。在不同埋深条件下煤层与岩层的能量密度比值为1.8~2.3,平均为2.1。

2.2 掘进工作面围岩能量计算模型

冲击地压的本质是采掘工作面围岩积聚弹性能突然释放。掘进巷道单位长度围岩积聚弹性能可用下式表示:

$$E = S_{\text{岩}} \cdot w_{\text{岩}} + S_{\text{煤}} \cdot w_{\text{煤}} \quad (1)$$

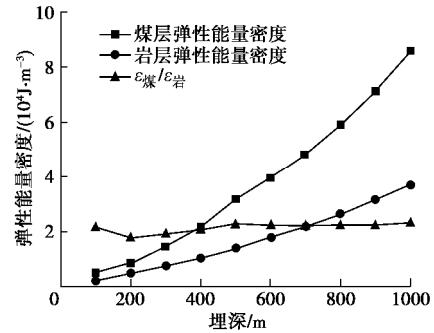


图7 不同埋深条件下9-15煤层与岩层的能量密度曲线

Fig. 7 Energy density curves of 9-15 coal seam and rock seam under different burial depths

式中 E 为掘进巷道影响范围内围岩积聚的弹性能(J/m); $S_{\text{岩}}$ 为掘进巷道影响范围内岩层面积(m²); $w_{\text{岩}}$ 为岩层的能量密度(J/m³); $S_{\text{煤}}$ 为掘进巷道影响范围内煤层面积(m²); $w_{\text{煤}}$ 为煤层的能量密度(J/m³)。

为了简化计算过程,将掘进巷道简化为圆形。实际巷道掘进过程中,可以出现巷道高度大于煤层厚度、巷道高度等于煤层厚度、影响范围大于煤层厚度和影响范围小于煤层厚度4种情况,如图8所示。

(1) 巷道高度 $2r$ 大于煤层厚度 m

当煤层厚度较小时,巷道高度 $2r$ 大于煤层厚度 m ,此时巷道掘进影响范围内的岩层面积表示为

$$S_{\text{岩}1} = 2(S_{OACB} - S_{\triangle OAB} - S_{DEF}) \quad (2)$$

式中, S_{OACB} 为扇形 $OACB$ 的面积, $S_{\triangle OAB}$ 为三角形 OAB 的面积, S_{DEF} 为圆缺 DEF 的面积。

由图8中几何关系可得

$$S_{OACB} = \arccos \frac{m}{2R} \cdot \frac{\pi R^2}{180} \quad (3)$$

式中, r 为掘进巷道半径, R 为巷道影响范围半径。

$$S_{\triangle OAB} = \frac{m \cdot \sqrt{4R^2 - m^2}}{4} \quad (4)$$

$$S_{DEF} = \arccos \frac{m}{2r} \cdot \frac{\pi r^2}{180} - \frac{m \cdot \sqrt{4r^2 - m^2}}{4} \quad (5)$$

式中, m 为煤层厚度。

巷道掘进影响范围内煤层面积表达式为

$$S_{\text{煤}1} = \pi(R^2 - r^2) - S_{\text{岩}1} \quad (6)$$

(2) 巷道高度 $2r$ 等于煤层厚度 m

当巷道高度 $2r$ 等于煤层厚度 m 时,此时巷道掘进影响范围内的岩层面积如下:

$$S_{\text{岩}2} = 2(S_{OACB} - S_{\triangle OAB}) \quad (7)$$

巷道掘进影响范围内煤层面积:

$$S_{\text{煤}2} = \pi(R^2 - r^2) - S_{\text{岩}2} \quad (8)$$

(3) 巷道高度 $2r$ 小于煤层厚度 m ,但影响范围 $2R$ 大于煤层厚度 m

当巷道掘进影响范围 $2R$ 大于煤层厚度 m 时,掘

进巷道影响范围内的岩层面积如下:

$$S_{\text{岩}3} = 2(S_{\text{OACB}} - S_{\triangle OAB}) \quad (9)$$

巷道掘进影响范围内煤层面积:

$$S_{\text{煤}3} = \pi(R^2 - r^2) - S_{\text{岩}3} \quad (10)$$

(4) 巷道高度 $2r$ 小于煤层厚度 m , 但影响范围 $2R$ 小于煤层厚度 m

当巷道掘进影响范围 $2R$ 小于煤层厚度 m 时, 掘进巷道影响范围内全为煤层, 煤层面积如下:

$$S_{\text{煤}4} = \pi(R^2 - r^2) \quad (11)$$

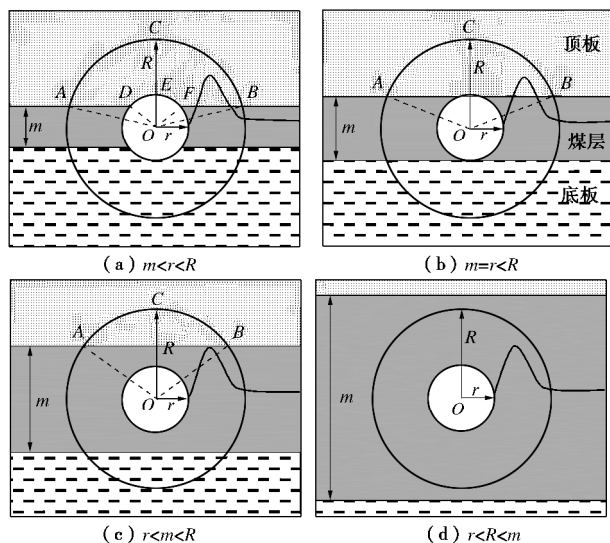


图 8 掘进巷道围岩结构示意图

Fig. 8 Structural sketch of surrounding rock of tunneling roadway

2.3 算例分析

为验证计算模型的准确性和探讨围岩结构对冲击地压的影响, 下面以硫磺沟煤矿掘进工作面为基础, 分别计算掘进工作面位于不同煤层厚度时, 围岩积聚弹性能的变化特征。

取掘进工作面煤层厚度 m 分别为 1~18 m, 掘进工作面半径 r 分别为 2.0, 2.5, 3.0 m, 其相对的影响半径 R 分别为 6.0, 7.5, 9.0 m。根据硫磺沟煤矿掘进工作面实际情况, 取埋深 $H=400$ m, 岩石重度 $g=25$ kN/m³, $w_{\text{煤}}=21.8$ kJ/m³, $w_{\text{岩}}=10.4$ kJ/m³。

将以上参数代入式 (1)~(11), 可得到不同巷道半径和不同煤层厚度条件下的围岩弹性能曲线, 如图 9 所示, 图中 $E_1 \sim E_3$ 分别为半径 2.0, 2.5, 3.0 m 条件下单位长度围岩积聚弹性能。由图 9 可知, 巷道影响范围内围岩积聚弹性能与煤层厚度和巷道半径成正比, 且在同等巷道半径条件下, 煤层厚度越大, 巷道围岩积聚弹性能越大。巷道半径为 3.0 m 时, 围岩积聚的弹性能分别为巷道半径为 2.5 m 和 2.0 m 时围岩积聚弹性能的 1.4 倍和 2.0 倍。

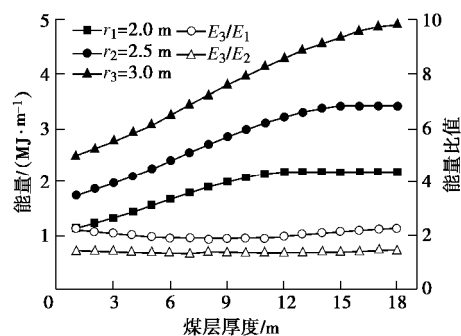


图 9 不同巷道半径和煤层厚度围岩积聚能量曲线

Fig. 9 Curves of energy accumulation with surrounding rock with different roadway radii and thicknesses of coal seam

图 10 为巷道半径 2.5 m, 不同煤层厚度条件下影响范围内煤、岩层面积及其积聚能量曲线图。由图 10 可知: 当煤层厚度小于 7 m 时, 掘进影响范围内岩层面积大于煤层面积; 当煤层厚度大于 7 m 时, 掘进影响范围内岩层面积小于煤层面积。当煤层厚度小于 5 m 时, 掘进影响范围内岩层积聚弹性能大于煤层积聚弹性能; 当煤层厚度大于 5 m 时, 掘进影响范围内岩层积聚弹性能小于煤层积聚弹性能。巷道掘进影响范围内煤、岩层面积曲线交点和能量曲线交点位置不同, 其主要原因是煤层的弹性能量密度大于岩层, 导致能量曲线交点对应的煤层厚度小于面积曲线交点。

根据上述分析可知, 相同深度条件下特厚煤层掘进工作面围岩积聚弹性能远大于薄及中厚煤层, 其积聚高弹性能的围岩结构是特厚煤层掘进面更容易发生冲击地压和冲击地压灾害更严重的原因之一。

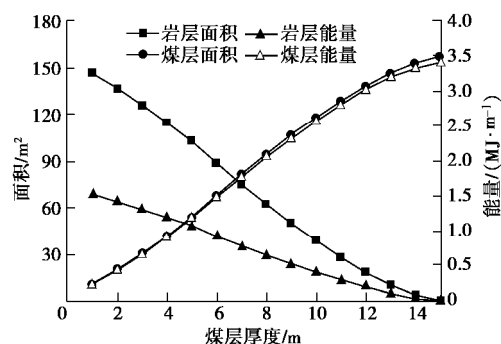


图 10 掘进巷道围岩特征曲线($r=2.5$ m)

Fig. 10 Characteristic curves of surrounding rock of driving roadway ($r=2.5$ m)

3 特厚煤层掘进工作面冲击地压危险性评价方法

同样埋深条件下, 不同煤层厚度巷道围岩积聚弹性能差异较大, 导致冲击危险性也存在较大差异。目前薄及中厚煤层冲击危险性评价主要采用两大指标进行评价, 一是煤岩体自身物理力学性质决定的冲击倾

向性，二是基于动静应力比值的煤体冲击地压危险性指数。煤体冲击性危险性指数表示为

$$I_c = \frac{s}{[s_s]} = \frac{kgH}{[s_s]} \quad (12)$$

式中， s 为煤体承受最大应力， $[s_s]$ 为煤体单轴抗压强度， k 为煤体应力集中系数， γ 为上覆岩层的平均重度。当 $I_c \geq 1.5$ 时可认为具有冲击危险。

3.1 考虑煤层厚度的冲击地压危险性指数法

为了有效评价特厚煤层冲击危险性，引入“当量采深 \bar{H} ”的概念来表征特厚煤层的实际冲击危险。首先以巷道半径为 r ，煤层厚度为 $2r$ 、埋深为 H 的掘进工作面作为评价标准，其围岩积聚弹性能为

$$E_r = S_{\text{岩}r} \cdot w_{\text{岩}r} + S_{\text{煤}r} \cdot w_{\text{煤}r} \quad (13)$$

同等条件下煤层厚度为 m 的巷道掘进围岩积聚弹性能为

$$E_m = S_{\text{岩}m} \cdot w_{\text{岩}m} + S_{\text{煤}m} \cdot w_{\text{煤}m} \quad (14)$$

煤层厚度为 m 的巷道当量采深 \bar{H} 为

$$\bar{H} = \frac{E_m}{E_r} H \quad (15)$$

则发生冲击地压的可能性系数为

$$I_m = \frac{s}{[s_s]} = \frac{kgH + g\bar{H}}{[s_s]} \quad (16)$$

式中， I_m 为特厚煤层发生冲击的可能性系数。

I_m 越大，则发生冲击的危险性越大，根据笔者课题组在大量矿井的现场实践经验， I_m 与冲击危险性的关系如表 3 所示。

表 3 I_m 与冲击地压危险性的关系

Table 3 Relationship between I_m and rockburst risk				
I_m	<1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	>2.5
冲击危险性	无	弱冲击	中等冲击	强冲击

采用模糊数学的方法对各指标进行归一化处理，当 I_m 为 0 时其冲击危险性最小，当 I_m 为 1 时其冲击危险性最高。采用各区间平均权重的原则，可得到 I_m 对“冲击地压可能性”的隶属度为

$$U_m = \begin{cases} 0.222I_m & I_m < 1.5 \\ 0.667I_m - 0.667 & 1.5 \leq I_m < 2.5 \\ 1 & I_m \geq 2.5 \end{cases} \quad (17)$$

3.2 煤层冲击倾向性对发生冲击地压危险性评价

中国国家标准规定了煤的冲击倾向性鉴定标准，如表 4 所示。以煤层冲击倾向性的 4 个指标 U_{D_T} 、 $U_{W_{ET}}$ 、 U_{K_E} 、 U_{R_C} 为基础，各指标所占冲击倾向性的权重分别为 a_1 ， a_2 ， a_3 ， a_4 ，满足 $a_1+a_2+a_3+a_4=1$ ，一般可取 $a_1=a_2=a_3=a_4=0.25$ 。可得到冲击倾向性对“冲击地压可能性”的隶属度为

$$U_c = a_1U_{D_T} + a_2U_{W_{ET}} + a_3U_{K_E} + a_4U_{R_C} \quad (18)$$

表 4 煤层冲击倾向性鉴定标准

Table 4 Criteria for identification of coal seam impact tendency			
类别	I 类	II 类	III 类
冲击倾向	无	弱	强
单轴抗压强度/MPa	$R_C < 7$	$7 \leq R_C < 14$	$R_C \geq 14$
弹性能量指数	$W_{ET} < 2$	$2 \leq W_{ET} < 5$	$W_{ET} \geq 5$
冲击能量指数	$K_E < 1.5$	$1.5 \leq K_E < 5$	$K_E \geq 5$
动态破坏时间/ms	$D_T > 500$	$50 < D_T \leq 500$	$D_T \leq 50$

对表 4 中各项指标进行归一化处理可得

$$U_{D_T} = \begin{cases} 1 & (D_T \leq 50) \\ 1 - 0.002D_T & (50 < D_T < 500) \\ 0 & (D_T > 500) \end{cases} \quad (19)$$

$$U_{W_{ET}} = \begin{cases} 0.25W_{ET} & (W_{ET} < 2) \\ 0.167W_{ET} + 0.166 & (2 \leq W_{ET} < 5) \\ 1 & (W_{ET} \geq 5) \end{cases} \quad (20)$$

$$U_{K_E} = \begin{cases} 0.333K_E & (K_E < 1.5) \\ 0.143K_E + 0.285 & (1.5 \leq K_E < 5) \\ 1 & (K_E \geq 5) \end{cases} \quad (21)$$

$$U_{R_C} = \begin{cases} 0.071R_C & (R_C < 14) \\ 1 & (R_C \geq 14) \end{cases} \quad (22)$$

综上可得，特厚煤层发生冲击地压的可能性指数 U 表示为

$$U = \frac{U_m + U_c}{2} \quad (23)$$

根据可能性指数 U 评价冲击地压发生的可能性，评价标准如表 5 所示。

表 5 冲击地压危险等级划分

Table 5 Classification of hazard grade of rockburst				
U	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	>0.75
冲击危险性	无	弱冲击	中等冲击	强冲击

3.3 硫磺沟煤矿特厚煤层冲击地压危险性评价

(1) 采用原有冲击危险性评价方法进行评价

由于硫磺沟煤矿发生冲击地压的 9-15 煤层掘进迎头埋深仅为 382 m，取掘进工作面迎头煤体应力集中系数为 2.0，将以上参数代入式 (12) 可得冲击危险指数 $I_c=0.54$ ，对照表 3 可知评价为无冲击危险，与掘进现场频繁发生冲击地压和强矿压现象明显不符。

(2) 采用现有冲击危险性评价方法进行评价

a) 考虑煤层厚度因素：9-15 煤层厚度 $m=36$ m，埋深 $H=382$ m，掘进巷道半径 $r=2.0$ m， $w_{\text{煤}}=21.8$ kJ/m³， $w_{\text{岩}}=10.4$ kJ/m³，取掘进工作面迎头煤体应力集中系数为 2.0，将以上参数代入式 (13) ~ (16)，可得 $I_m=0.72$ ，将其代入式 (17) 可计算 $U_m=0.16$ 。

b) 考虑煤层冲击倾向性因素：将 9-15 煤层冲击倾向性参数 $R_C=35.4$ MPa， $W_{ET}=5.6$ ， $K_E=12$ ， $D_T=31.5$ ms 代入式 (19) ~ (22) 中可得冲击危险指数 $U_c=1$ 。

最后将 U_m 和 U_c 代入式 (23) 中可得 9-15 煤层掘

进工作面冲击危险指数 $U=0.58$, 对照表 5 可知评价结果为具有中等冲击危险, 与掘进现场频繁发生冲击地压和强矿压现象是一致的。

通过对比可知, 考虑煤层厚度和煤层冲击倾向性的评价方法较当前冲击危险性评价方法更加科学合理, 评价结果也更符合现场实际情况。

4 特厚煤层掘进工作面冲击地压控制对策

特厚煤层掘进工作面冲击地压控制可通过减小巷道围岩释放弹性能来降低冲击危险性, 主要措施有以下 3 种:

(1) 减小巷道掘进断面

由图 9 可知, 巷道半径为 3.0 m 时, 围岩积聚的弹性能约分别为巷道半径为 2.5 m 和 2.0 m 时围岩积聚弹性能的 1.4 倍和 2.0 倍。因此在满足现场使用和安全的条件下, 适当降低巷道掘进断面, 可减小围岩释放弹性能和冲击地压发生可能性。

(2) 控制巷道掘进层位

由图 7 可知, 不同埋深条件下煤层与岩层的能量密度比值平均为 2.1。以硫磺沟煤矿掘进工作面为例, 巷道等效半径为 2.5 m, 煤层厚度为 36 m, 若将巷道由煤层中间布置改为沿煤层底板布置时, 经计算, 围岩释放弹性能降低约 17.2%。因此巷道沿底板掘进时, 能降低巷道掘进围岩释放的总弹性能和冲击地压发生可能性。

(3) 增加巷道支护强度

大量研究表明, 掘进巷道围岩支护强度与围岩松动圈范围密切相关。当巷道支护强度较小时, 巷道围岩松动圈范围较大, 使巷道断面等效半径增加, 增加了掘进巷道围岩释放弹性能和冲击地压发生可能性。以硫磺沟煤矿掘进工作面为例, 巷道等效半径为 2.5 m, 煤层厚度为 36 m, 假设不同支护强度下巷道围岩松动圈范围分别为 0.5 m 和 1.0 m, 经计算, 松动圈范围由 0.5 m 扩展至 1.0 m 时, 巷道围岩释放弹性能增加约 39%。因此通过增加巷道支护强度, 能减小掘进巷道围岩释放弹性能和冲击地压发生可能性。

5 结 论

以新疆硫磺沟煤矿特厚煤层掘进工作面为工程背景, 采用现场调研、岩石力学试验和理论分析等方法, 对特厚煤层掘进面高弹性能围岩结构特征及其诱冲机制进行了研究, 得到以下主要结论:

(1) 根据硫磺沟煤矿 9-15 煤层与岩层的岩石力学试验结果, 埋深在 100~1000 m 时, 煤、岩层的能

量密度与埋深成正比, 由于煤层抗压强度小于岩层, 在埋深增幅相等时, 煤层的能量密度增长速率大于岩层。在不同埋深条件下煤层与岩层的能量密度比值为 1.8~2.3, 平均为 2.1。

(2) 相同深度条件下特厚煤层掘进工作面围岩积聚弹性能远大于薄及中厚煤层, 高弹性能积聚的围岩结构是特厚煤层掘进面更容易发生冲击地压和冲击地压灾害更严重的原因之一。

(3) 理论计算结果表明, 巷道影响范围内围岩积聚弹性能与煤层厚度和巷道半径成正比, 且在同等巷道半径条件下, 煤层厚度越大, 巷道围岩积聚弹性能越大, 当巷道半径为 3.0 m 时, 围岩积聚的弹性能分别为巷道半径为 2.5 m 和 2.0 m 时围岩积聚弹性能的 1.4 倍和 2.0 倍。

(4) 提出的考虑煤层厚度和煤层冲击倾向性的冲击危险性评价方法比当前冲击危险性评价方法更加科学合理, 评价结果也更符合现场实际情况。研究结果对特厚煤层掘进工作面冲击地压防治具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 杜涛涛, 李国营, 陈建强, 等. 新疆地区冲击地压发生及防治现状[J]. 煤矿开采, 2018, 23(2): 5 - 10. (DU Tao-tao, LI Guo-ying, CHEN Jian-qiang, et al. Rock burst occurrence and prevention status in Xinjiang region[J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(2): 5 - 10. (in Chinese))
- [2] 杜涛涛, 李 康, 蓝 航, 等. 近直立特厚煤层冲击地压致灾过程分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 140 - 145. (DU Tao-tao, LI Kang, LAN Hang, et al. Rockburst process analysis in steeply-inclined extremely-thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 140 - 145. (in Chinese))
- [3] 蓝 航. 浅埋煤层冲击地压发生类型及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 9 - 13. (LAN Hang. Prevention measures and types of mine strata pressure bump occurred in shallow depth seam[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 9 - 13. (in Chinese))
- [4] 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 Fu-xing, WEI Quan-de, WANG Cun-wen, 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. (in Chinese))
- [5] 史先锋, 姜福兴, 朱海洲, 等. 特厚煤层分层工作面冲击地

- 压事故后复产方案研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(增刊 1): 19 - 26. (SHI Xian-feng, JIANG Fu-xing, ZHU Hai-zhou, et al. Research and practice on restoring production of rock burst accident working face in top slice during slice mining of extra-thick coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **40**(S1): 19 - 26. (in Chinese))
- [6] 朱斯陶. 特厚煤层开采冲击地压机理与防治研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017. (ZHU Si-tao. Mechanism and prevention of rockburst in extra-thick coal seams mining[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017. (in Chinese))
- [7] 许胜铭, 李松营, 李德翔, 等. 义马煤田冲击地压发生的地质规律[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(9): 2015 - 2020. (XU Sheng-ming, LI Song-ying, LI De-xiang, et al. Geological laws of rock burst occurrence in Yima coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **40**(9): 2015 - 2020. (in Chinese))
- [8] 蓝航. 近直立特厚两煤层同采冲击地压机理及防治[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(增刊 2): 308 - 315. (LAN Hang. Rock-burst mechanism and prevention in mining sub-erect and extremely-thick coal seam with horizontal slicing method[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(S2): 308 - 315. (in Chinese))
- [9] 蓝航, 杜涛涛. 急倾斜特厚煤层开采冲击地压发生过程监测与分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, **44**(6): 78 - 82. (LAN Hang, DU Tao-tao. Monitoring and analysis of rock burst process during steeply inclined and ultra thick seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2016, **44**(6): 78 - 82. (in Chinese))
- [10] 姜福兴, 王平, 冯增强, 等. 复合型厚煤层“震—冲”型动力灾害机理、预测与控制[J]. 煤炭学报, 2009, **34**(2): 1605 - 1609. (JIANG Fu-xing, WANG Ping, FENG Zeng-qiang, et al. Mechanism, prediction and control of “rock burst induced by shock bump” kind dynamic accident in composite thickness coal[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **34**(2): 1605 - 1609. (in Chinese))
- [11] 刘少虹, 潘俊锋, 王书文, 等. 岩浆岩侵入区巨厚煤层掘进巷道冲击地压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(11): 2699 - 2711. (LIU Shao-hong, PAN Jun-feng, WANG Shu-wen, et al. Rock burst mechanism of heading roadway in thick coal seam in magmatic intrusion areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(11): 2699 - 2711. (in Chinese))
- [12] 杨伟利, 姜福兴, 杨鹏, 等. 特厚煤层冲击地压重复发生的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 2045 - 2050. (YANG Wei-li, JIANG Fu-xing, YANG Peng, et al. Mechanism of repeated rock bursts in extra-thick coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(11): 2045 - 2050. (in Chinese))
- [13] 窦林名, 李振雷, 何学秋. 厚煤层综放开采的降载减冲原理及其应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, **47**(2): 221 - 230. (DOU Lin-ming, LI Zhen-lei, HE Xue-qiu. Principle of rockburst control by weakening static and dynamic loading using top-coal in the mining of thick coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, **47**(2): 221 - 230. (in Chinese))
- [14] 潘俊锋, 连国明, 齐庆新, 等. 冲击危险性厚煤层综放开采冲击地压发生机理[J]. 煤炭科学技术, 2007, **35**(6): 87 - 90, 94. (PAN Jun-feng, LIAN Guo-ming, QI Qing-xin, et al. Mechanism of rock outburst occurred from fully mechanized longwall top-coal caving and mining in thick seam with rock outburst danger in potential[J]. Coal Science and Technology, 2007, **35**(6): 87 - 90, 94. (in Chinese))