

庞义辉,王国法. 坚硬特厚煤层顶煤冒放结构及提高采出率技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 817-824. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0763

Pang Yihui, Wang Guofa. Top-coal caving structure and technology for increasing recovery rate at extra-thick hard coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 817-824. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0763

坚硬特厚煤层顶煤冒放结构及提高采出率技术

庞义辉^{1,2}, 王国法¹

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

摘要: 针对西部埋深较浅、坚硬、特厚煤层顶煤冒放性差的问题, 以金鸡滩煤矿 2⁻² 坚硬特厚煤层赋存条件为基础, 通过理论模型计算、数值模拟分析及设备结构优化设计等方法, 分析了坚硬特厚煤层顶煤冒放结构及提高采出率技术。通过建立坚硬特厚顶煤的“悬臂梁”力学模型, 计算分析了顶煤厚度与悬臂极限断裂长度的关系; 首次定量分析了液压支架反复支撑对顶煤的损伤破坏效果, 研究了液压支架主动支护作用力、反复支撑次数对顶煤破坏深度、破坏块度的影响; 分析了大采高综放工作面煤壁片帮防治与提高顶煤冒放性的矛盾, 通过优化液压支架架型结构参数解决了二者之间的矛盾; 创新设计了强扰动三级高效放煤机构与综放工作面后部刮板输送机交叉侧卸布置方式, 有效提高了大块顶煤的放出率与放出效率。

关键词: 坚硬特厚煤层; 大采高综放; 悬臂梁力学模型; 顶煤冒放性; 煤壁片帮

中图分类号: TD823

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2017)04-0817-08

Top-coal caving structure and technology for increasing recovery rate at extra-thick hard coal seam

PANG Yi-hui^{1,2}, WANG Guo-fa¹

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co. Ltd, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining & Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to overcome the poor caving property problem of extra-thick hard coal seam with shallow depth in mining area of west China, the top-coal caving structure and recovery rate improvement technologies were analyzed through theoretical model calculation, numerical modeling analysis and equipment structure optimization design based on the coal seam occurrence conditions at Jinjitan Coal Mine. Through building the cantilever beam model for extra-thick hard coal seam, the relationship between the top-coal thickness and the cantilever ultimate fracture length was analyzed and calculated. The damage effect from the repeating support of hydraulic support on the top-coal was quantitatively analyzed for the first time, and the top-coal damage depth and lumpiness from the active support reaction and support frequency of hydraulic support was studied. The contradiction between the rib spalling prevention and top-coal recovery rate improvement was analyzed, which could be settled by optimizing the network structure of hydraulic support. Three level efficient top-coal caving institution and the rear scraper conveyor cross side discharge arrangement were innovatively designed, which enhanced the top-coal recovery rate and efficiency.

Key words: extra-thick hard coal seam; full-mechanized caving mining with large mining height; cantilever beam mechanical model; top-coal caving and drawing characteristics; rib spalling

收稿日期: 2016-07-02 修回日期: 2016-12-20 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046302); 青年创新基金资助项目(2016QN007)

作者简介: 庞义辉(1985—), 男, 河北保定人, 博士研究生。Tel: 010-84262167, E-mail: pangyihui@tdkcsj.com

我国西部陕西、内蒙等大型矿区赋存有大量埋藏深度较浅、煤质坚硬、煤层厚度为 9 ~ 15 m 的特厚煤层,受制于大采高综采一次开采高度限制(世界大采高一次最大开采高度为 8.0 m)^[1-4],分层开采又存在工艺复杂、效率低、效益差、下分层开采难度大等问题^[5-7],这类煤层非常适宜采用大采高综放开采,但存在顶煤冒放性差、煤壁易片帮冒顶等问题。

大采高综放液压支架作为综放工作面的核心放顶煤设备,其架型、结构、参数的合理性及对顶煤的适应性直接影响综放工作面的煤炭资源采出率。文献[8-12]分析了特厚煤层综放工作面矿山压力显现规律,通过建立特厚煤层直接顶板的“组合悬臂梁”力学模型,研究了综放工作面液压支架合理工作阻力计算方法及围岩致灾机理;文献[13-16]分析了综放工作面顶煤冒落、放出规律,建立了散体顶煤运移的 BBR 力学模型,研究了煤矸分界线、工作面开采技术参数、放煤工艺参数等对顶煤采出率的影响;文献[17-19]分析了工作面煤壁片帮机理,研究了液压支架护帮结构、参数对煤壁片帮的影响及防治措施。

上述研究成果较系统的分析了特厚煤层综放开采顶板运移规律、顶煤冒放特征及煤壁稳定性控制技术,推动了特厚煤层综放开采技术与装备的发展。由于西部埋深较浅、坚硬、特厚煤层工作面顶煤难以冒落,顶煤的冒放结构、运移特征与普通综放工作面存在较大差异,上述研究成果不能完全适用。本文以西部埋深较浅、坚硬、特厚煤层大采高综放开采实践为基础,建立了顶煤冒放结构力学模型,分析液压支架反复支撑对顶煤的破坏效果,发现了大采高综放工作面煤壁片帮防治与提高顶煤冒放性的矛盾及解决途径,研究了提高大块顶煤采出率的相关技术与装备。

1 坚硬特厚煤层顶煤冒放结构力学分析

金鸡滩煤矿主采 2⁻²⁺ 煤层,东翼盘区煤层厚度 7.99 ~ 11.16 m,平均普氏硬度 $f = 2.8$,埋深约为 240 m,属于埋深较浅、硬度较大的特厚煤层,目前采用的分层开采方法对煤层赋存条件的适应性差,该煤层非常适宜采用大采高综放开采。

金鸡滩煤矿周边的榆阳矿区普遍分布 3 号煤层,该煤层与金鸡滩煤矿 2⁻²⁺ 煤层赋存条件十分相似,见表 1,目前均采用大采高综放开采,但由于煤层埋深较浅,并且硬度、厚度均较大,导致顶煤的整体性强、冒放性差,现场观测发现,工作面中部液压支架顶梁上方的顶煤体呈现悬臂状态,如图 1(a)所示,冒落后的顶煤块度大,难以顺利放出,如图 1(b)所示。

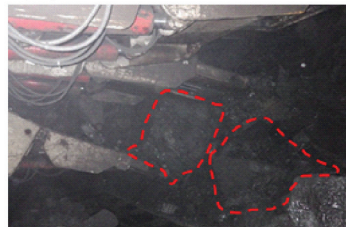
表 1 埋深较浅、坚硬、特厚煤层条件

Table 1 Shallow depth, extra-thick hard coal seam occurrence conditions

矿井	煤层	平均厚度/m	普氏硬度	平均埋深/m
神树畔	3 号	11.16	$f = 2.8$	221
千树塔	3 号	10.61	$f = 2.6$	236
柳巷	3 号	11.05	$f = 3.6$	286
麻黄梁	3 号	9.06	$f = 3.9$	182



(a) 液压支架上部顶煤呈悬臂状态

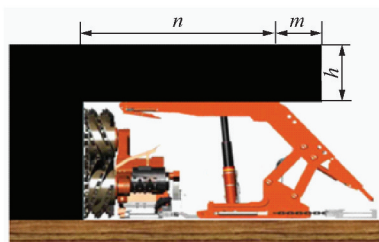


(b) 液压支架后部冒落的大块煤

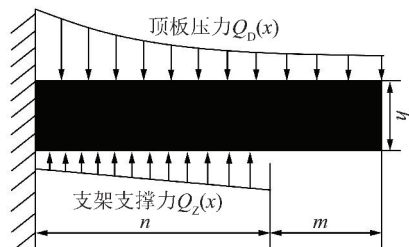
图 1 液压支架上部及后部顶煤状态

Fig. 1 Upside and rear top-coal state of hydraulic support

基于金鸡滩煤矿周边类似条件煤层现场观测结果,中部液压支架上方的顶煤呈悬臂状态,如图 2(a)所示,通过对支架上方顶煤进行力学分析,建立了顶煤体的悬臂梁力学模型,如图 2(b)所示。



(a) 液压支架上部顶煤悬臂结构示意图



(b) 液压支架上部顶煤悬臂结构力学分析

图 2 顶煤体悬臂梁力学模型

Fig. 2 Top-coal cantilever beam mechanical model

根据坚硬脆性顶煤的力学特性,其破坏形式主要以拉裂破坏为主。基于最大拉应力强度理论,若顶煤体内的弯曲正应力大于煤体的单轴抗拉强度,则顶煤体发生断裂,可得

$$\frac{6M}{bh^2} = \sigma_t \quad (1)$$

$$M = n \left(\int_0^{m+n} Q_D(x) dx - \int_0^n Q_Z(x) dx \right) + \int_0^n \int_0^n Q_Z(x) dx^2 - \int_0^n \int_0^n Q_D(x) dx^2 \quad (2)$$

式中, $Q_D(x)$ 为顶板压力函数; $Q_Z(x)$ 为液压支架对顶板的支撑力函数; M 为顶煤悬臂梁的弯矩, $N \cdot m$; h 为顶煤体厚度, m ; b 为顶煤体宽度, 取单位宽度, m ; n 为液压支架顶梁长度, m ; m 为液压支架后部顶煤的极限悬臂长度, m ; σ_t 为顶煤体的单轴抗拉强度, MPa 。

由于很难通过数学方法获得顶板压力与液压支架支撑力函数的解析解,因此,以金鸡滩煤矿 2⁻² 坚硬特厚煤层赋存条件为基础,进行了不同开采高度的数值模拟分析,并将模拟结果代入上式,得到了不同机采高度与顶煤的极限悬臂长度曲线,如图 3 所示。

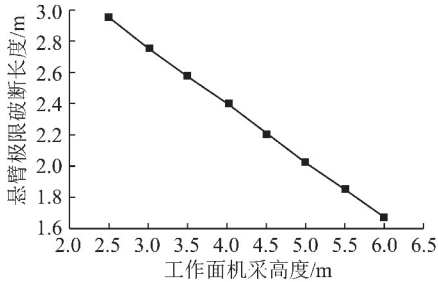


图3 不同机采高度顶煤体极限悬臂长度曲线

Fig. 3 Top-coal ultimate fracture length curve of different mining height

通过对计算结果进行分析,工作面机采高度与顶煤体悬臂的极限破断长度为一近似直线,随着工作面机采高度增加,顶煤体厚度变薄,工作面矿山压力增大,导致顶煤体悬臂的极限破断长度缩短,即增加工作面机采高度可以有效提高顶煤的冒放性。

2 液压支架对顶煤体反复支撑破坏效果分析

液压支架作为综放工作面的核心设备,不仅担负着维护工作面安全作业空间、提供顶煤放出通道的重任,而且还可以通过对顶煤的反复支撑来破碎顶煤,提高顶煤的冒放性。目前尚未检索到有关液压支架反复支撑对顶煤体损伤破坏进行定量分析的文献。

通过大量综放工作面生产实践发现,液压支架对顶煤体主动支护作用力的大小、反复支撑作用次数均

对顶煤体的损伤破坏产生重要影响。基于金鸡滩煤矿 2⁻² 煤层赋存条件,采用 UDEC 数值模拟软件分析了液压支架对顶煤体不同支护作用力、不同支撑作用次数的破坏效果。

引起顶煤发生破坏的外部载荷主要有矿山压力与液压支架反复支撑作用力 2 部分,为了避免矿山压力对模拟结果的影响,顶板岩层上部并未施加矿山压力边界条件,而是在模型四周施加固定位移边界条件,测点位于支架顶梁上部,测点之间的垂直间隔为 0.2 m,采用 fish 语言编写程序实现对顶煤的循环加载,模拟液压支架对顶煤升架(施加载荷)—降架(去除载荷)—移架—升架(施加载荷)的反复支撑作用过程。

分别进行了液压支架主动支护作用力为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 MPa 的模拟分析,得到了液压支架不同支护作用力、不同支撑作用次数(根据液压支架的顶梁长度与移架步距关系,反复支撑次数确定为 7 次)的顶煤位移量关系曲线,如图 4 所示。

通过分析模拟结果可以发现,随着液压支架对顶煤体主动支护作用力增大,顶煤监测点的位移量增加,但首次反复支撑后顶煤监测点的位移量相差不大;随着液压支架对顶煤反复支撑次数增加,顶煤监测点的位移量迅速增大,但是当液压支架对顶煤的支护作用力不变时,增加液压支架的反复支撑作用次数并不能显著改变顶煤发生剧烈位移的深度,只是增加了已发生剧烈位移监测点的位移量,即当液压支架的支撑力不变时,增加反复支撑作用次数只是提高了液压支架对一定破坏深度顶煤体破碎块度的影响,而并不能显著提高顶煤体的破坏深度。当液压支架对顶煤的支护作用力较小时,虽然顶煤体发生剧烈位移的深度也较大,但是顶煤连续监测点的位移量出现了水平线或近似水平线,如图 4(a), (b), (c) 所示,说明由于上部顶煤体的节理裂隙发生贯通,导致大块顶煤发生整体冒落,顶煤破碎块度较大,当液压支架的支撑力增加至 1.2 MPa 时,顶煤监测点的位移量比较分散,并未出现水平或近似水平线,说明顶煤体破碎块度较小。

通过对顶煤监测点位移量进行分析,得到了液压支架对顶煤体不同支撑作用力下的反复支撑次数与顶煤体破坏深度曲线,当液压支架对顶煤体的反复支撑次数小于 4 次时,顶煤体发生剧烈位移的深度较小,即顶煤体的破坏深度较小,而当反复支撑作用次数大于 4 次时,顶煤体发生剧烈位移的深度明显增加,即液压支架对顶煤体反复支撑 4 次时,顶煤体破坏深度发生突变,破坏深度明显增大,如图 5 所示。

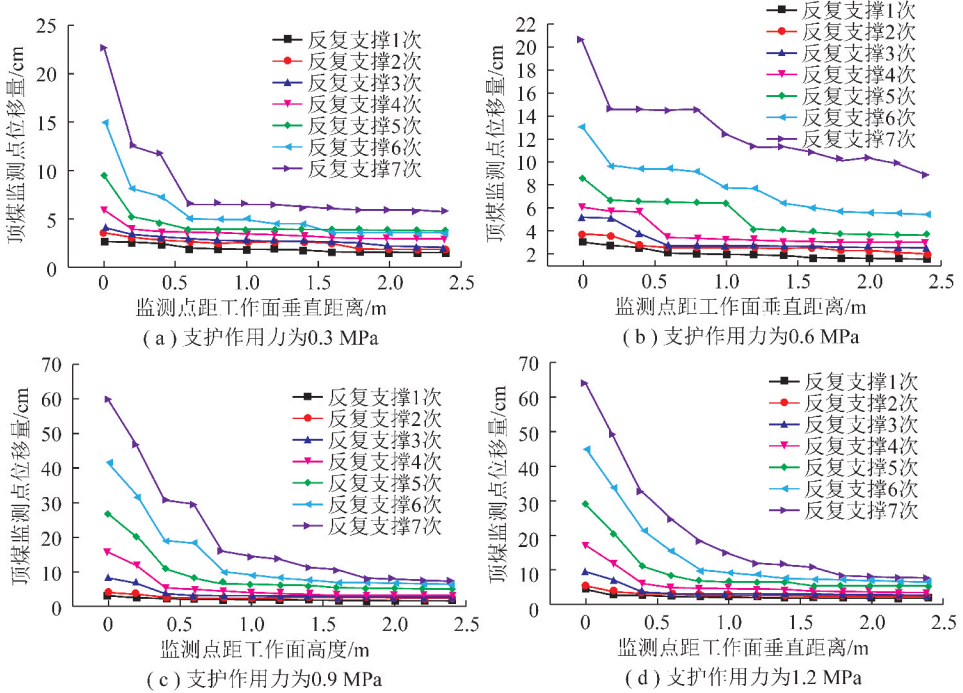


图4 液压支架对顶煤反复支撑位移量曲线

Fig. 4 Top-coal time-displacement curves due to hydraulic support supporting again and again to top-coal

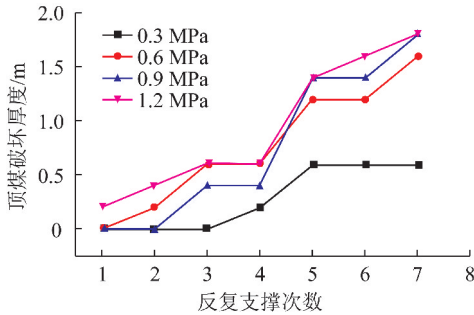


图5 反复支撑次数与顶煤破坏深度关系曲线
Fig. 5 Relation curves between supporting times and top-coal damage depth

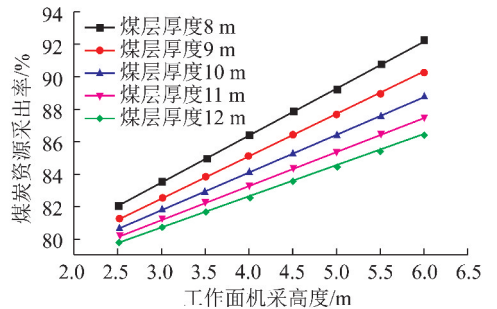


图6 机采高度与煤炭采出率曲线

Fig. 6 Mining height and recovery rate relationship curves

3 煤壁片帮防治与提高顶煤冒放性矛盾分析

综放工作面煤炭资源采出率主要包括 2 部分:① 采煤机截割部分的煤炭资源采出率,一般可达 98%;② 顶煤的放出率,一般仅为 70% ~ 85%。因此,提高综放工作面的机采高度可以提高煤炭资源的采出率。基于金鸡滩煤矿煤层赋存条件,分别计算了煤层厚度为 8 ~ 12 m 时,不同机采高度的煤炭资源采出率(采煤机割煤的回收率按 98%,顶煤回收率按 75% 计算,假设采高增加后顶煤回收率保持不变),如图 6 所示。工作面机采高度由 2.5 m 增加至 6.0 m 可提高工作面煤炭资源采出率 2.3% ~ 5.9%,但机采高度增加,导致煤壁的自由度增大,煤壁自稳定性变差,极易发生煤壁片帮冒顶事故。

压力将顶煤体压碎,其破坏机理与煤壁片帮机理相同。为了提高顶煤的放出率,顶煤体的破坏程度越高越好,破坏后的块度越小越好,从而有利于顶煤顺利放出,但同时又希望工作面煤壁片帮越小越好。由于工作面煤壁片帮与顶煤的冒落放出均由工作面前方的超前支承压力作用引起,且力学机理相同,大采高综放工作面煤壁片帮防治与提高顶煤冒放性是一个矛盾综合体,如图 7 所示。

基于坚硬顶煤的“悬臂梁”力学模型及液压支架反复支撑对顶煤破坏效果分析结果,通过适当提高液压支架的初撑力、优化液压支架结构参数可以有效缓解煤壁片帮防治与提高顶煤冒放性之间的矛盾。

大采高综放液压支架作为工作面煤壁片帮防护与顶煤冒落放出的关键设备,其架型结构参数直接影响工作面煤壁片帮控制效果与顶煤的放出率。基于金鸡滩煤矿坚硬、特厚煤层赋存条件,采用数值模拟

综放开采主要利用工作面前方形成的超前支承

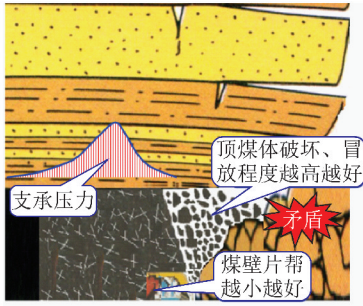


图7 煤壁片帮防治与提高顶煤冒放性矛盾

Fig. 7 Rib spalling prevention and increasing top-coal recovery rate contradiction

方法研究了工作面机采高度 6.0 m,不同液压支架主动支护作用力时煤壁的水平位移量与顶煤破坏深度,如图 8 所示。模拟结果表明,随着液压支架对顶煤主动支护作用力的增大,工作面煤壁水平位移量逐渐减少,而顶煤体破坏深度则逐渐增加并趋于稳定,即适当提高液压支架对顶煤(板)的主动支护作用力,可以降低煤壁片帮,同时提高顶煤的冒放性。

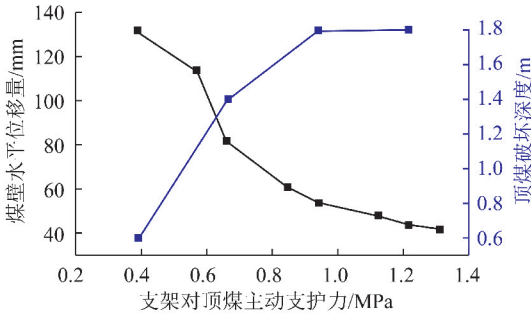


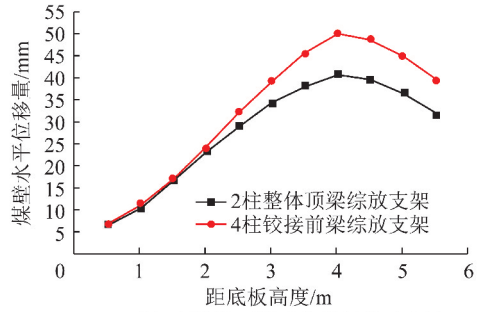
图8 液压支架初撑力对煤壁及顶煤体破坏影响

Fig. 8 Damage influence from hydraulic support setting load to rib and top-coal

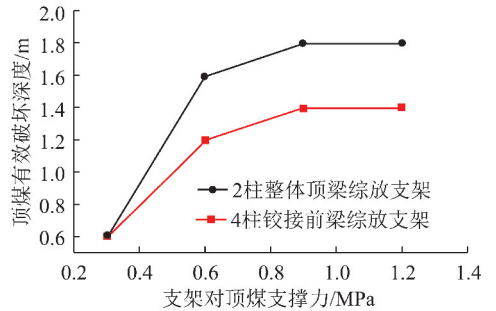
目前,综放液压支架主要有 4 柱支撑掩护式带铰接前梁液压支架和 2 柱掩护式整体顶梁液压支架 2 种型式^[20],4 柱支撑掩护式带铰接前梁综放液压支架不仅容易前后立柱受力不均,并且液压支架铰接前梁部分对顶煤(板)的主动支护作用力明显小于后部顶梁,不利于煤壁片帮防治与提高顶煤的冒放性。

为了确定液压支架的合理架型结构,采用数值模拟软件进行了 2 种架型的模拟分析,将 2 种架型的不同力学特性简化为对顶煤的不同支护作用力分布形态,得到了 2 种不同架型的煤壁水平位移量与顶煤有效破坏深度曲线,如图 9 所示。

通过对模拟结果进行分析发现,2 种液压支架的初撑力与工作阻力均相同时,2 柱掩护式整体顶梁大采高综放液压支架的煤壁水平位移量明显小于 4 柱支撑掩护式带铰接前梁综放液压支架,而其对顶煤的破坏深度则又明显大于后者,由于煤壁的水平位移量



(a) 2种架型结构对煤壁位移量影响曲线



(b) 2种架型结构对顶煤体破坏深度影响曲线

图9 液压支架架型结构对煤壁及顶煤体破坏影响
Fig. 9 Damage influence from hydraulic support network structure to rib and top-coal

越大,则表示煤壁越容易发生片帮,顶煤的有效破坏深度越大,则表示顶煤的冒放性越好,即采用 2 柱掩护式整体顶梁大采高综放液压支架可以降低煤壁片帮,同时提高顶煤的冒放性。

4 提高煤炭资源采出率关键技术

基于上述理论分析与数值模拟分析结果,提高埋深较浅、坚硬、特厚煤层煤炭资源采出率可以采取以下技术措施。

(1)适当提高工作面机采高度。综放工作面煤炭资源采出率主要由采煤机割煤与放顶煤两部分组成,适当提高工作面机采高度不仅可以有效提高下部煤层的采出率(图 6),而且可以增大工作面超前支承压力影响范围,导致工作面矿山压力显现加剧,提高矿山压力对顶煤的破碎效果。当煤层厚度不变时,机采高度增加导致顶煤厚度变薄,矿山压力加剧、顶煤厚度变薄则导致顶煤体极限悬臂长度变短,从而有利于顶煤的冒落放出。随着机采高度增加,煤壁发生片帮的概率增大,因此大采高综放工作面合理机采高度的确定,还应考虑煤壁片帮控制、综采设备与工程投资等因素。

(2)优化液压支架架型结构及参数。适当提高液压支架对顶煤(板)的主动支护作用力,不仅可以降低煤壁片帮机率,同时还可以提高顶煤的冒放性;2 柱掩护式整体顶梁大采高综放液压支架较 4 柱支撑

掩护式带铰接前梁液压支架更有利于提高顶煤冒放性及降低煤壁片帮机率。

(3)合理控制顶煤冒放块度。顶煤冒落块度的大小直接影响顶煤的放出率与含矸率,冒落块度较大的顶煤(板)则极易形成煤—煤成拱和煤—矸成拱,如图 10 所示。

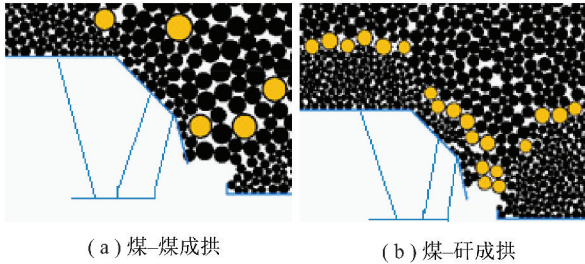


图 10 顶煤成拱

Fig. 10 Top-coal arch

为了分析顶煤冒落块度对采出率的影响,基于金鸡滩煤矿坚硬特厚煤层赋存条件,采用颗粒流数值模拟软件 PFC 分别进行了顶煤破碎块度为 0.15 ~ 0.25, 0.25 ~ 0.3, 0.3 ~ 0.35, 0.35 ~ 0.4, 0.4 ~ 0.45, 0.45 ~ 0.5, 0.5 ~ 0.55 m 时顶煤的放出率与成拱次数,如图 11 所示。

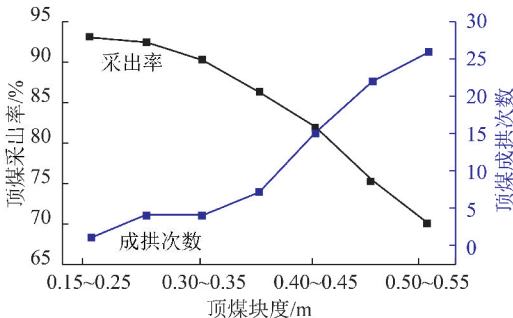


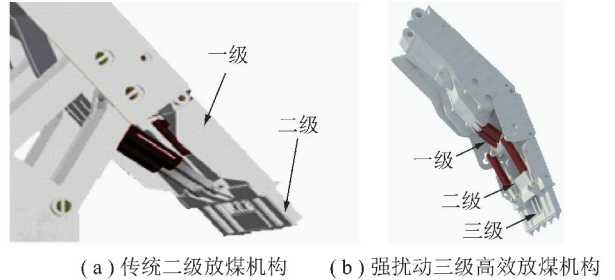
图 11 顶煤块度对采出率及成拱次数影响

Fig. 11 Influence from top-coal lumpiness to recovery rate and arching times

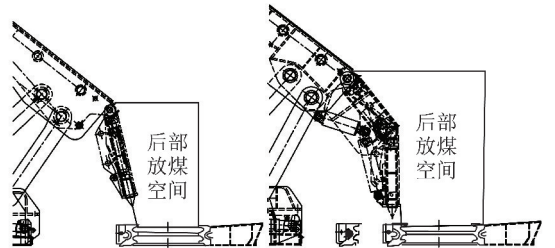
模拟结果表明,随着顶煤块度增大,顶煤放出率降低约 23%,顶煤颗粒自成拱及煤矸成拱次数由 1 次增加至 26 次,当顶煤块度增大至 0.50 ~ 0.55 m 时,顶煤采出率降低至 70% 以下,顶煤块度增大导致成拱次数增多及大块煤体流入采空区是顶煤采出率降低的主要原因。因此,针对埋深较浅、坚硬、特厚煤层赋存条件,在必要时应采取预松动爆破、水压致裂等技术措施,降低顶煤冒落块度。金鸡滩煤矿周边类似条件矿井在采区相应技术措施后,顶煤的冒落块度一般小于 0.5 m,实测煤炭资源采出率可达到 78% ~ 84%。

(4)增大液压支架后部放煤空间。为了解决大块顶煤易成拱及混入采空区导致顶煤放出率低的问题,

发明了大采高综放液压支架强扰动三级高效放煤机构,如图 12 所示,液压支架掩护梁长度由 3.98 m 减少至 3.3 m,一级尾梁与掩护梁夹角可达到 13°,液压支架后部放煤空间增大 23%,降低了大块煤的成拱机率,提高了顶煤的放出效率。由于增大了摆动尾梁的活动半径,提高了摆动尾梁对后部顶煤成拱的破坏范围,有助于顶煤的冒落放出。



(a) 传统二级放煤机构 (b) 强扰动三级高效放煤机构



(c) 2种放煤机构后部放煤空间对比

图 12 新型高效放顶煤机构

Fig. 12 New efficient top-coal caving institutions

(5)提高工作面两端头顶煤采出率。为了解决工作面两端部过渡液压支架不能放煤导致顶煤损失的问题,采用后部刮板输送机与转载机交叉侧卸的布置方式,如图 13 所示,解决了传统综放工作面后部刮板输送机采用端卸布置方式驱动部占用过渡段空间导致无法放煤的问题,可提高煤炭资源采出率 1.5% 以上。

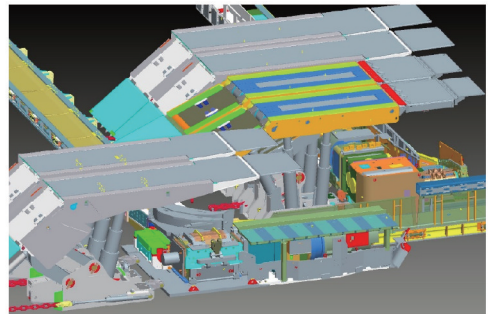


图 13 大采高综放工作面后部交叉侧卸布置方式

Fig. 13 Rear scraper conveyor cross side discharge arrangement in fully mechanized caving face with large mining height

(6)合理的放煤工艺参数。选择合理的放煤步距、放煤方式等放煤工艺参数也是保证综放工作面具有较高煤炭资源采出率的重要影响因素。

综合上述理论计算与数值模拟计算结果,针对金鸡滩煤矿埋深较浅、坚硬、特厚煤层赋存条件,研究设计了 ZFY18800/34/60D 型 2 柱掩护式整体顶梁大采高综放液压支架及成套装备,见表 2,为实现埋深较浅、坚硬、特厚煤层安全、高效、高采出率开采提供技术与装备保障。

表 2 ZFY18800/34/60D 型支架主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of hydraulic support ZFY18800/34/60D

项目	参数
型式	2 柱掩护式整体顶梁带强扰动 3 级高效放煤机构的放顶煤液压支架
结构高度/m	3.4~6.0
中心距/mm	2 050
初撑力/kN	12 365
工作阻力/kN	18 800
支护强度/MPa	1.52~1.55
泵站压力/MPa	31.5
支架质量/t	约 70

5 结 论

(1) 针对西部埋深较浅、坚硬、特厚煤层顶煤冒放性差的问题,建立了顶煤体的“悬臂梁”结构力学模型,分析了坚硬脆性顶煤破坏机理,得出了顶煤体强度、厚度与液压支架后部顶煤体极限悬臂长度的定量关系。

(2) 首次定量分析了液压支架支护作用力的大小、反复支撑作用次数对顶煤体破坏效果的影响,主动支护作用力的大小直接影响顶煤体的最终破坏深度与块度,而支护作用力不变时,提高反复支撑次数则主要影响顶煤体的破碎块度,且反复支撑 4 次后顶煤体破坏效果将发生突变。

(3) 分析了坚硬、特厚煤层大采高综放工作面煤壁片帮防治与提高顶煤冒放性的矛盾,通过适当提高液压支架的初撑力、优化综放液压支架架型结构可以同时实现降低煤壁片帮机率与提高顶煤的冒放性。

(4) 针对埋深较浅、坚硬、特厚煤层顶煤破碎块度大导致顶煤冒放性差的问题,设计了新型三级强扰动高效放顶煤机构、大采高综放工作面后部交叉侧卸布置方式,有效提高了大块顶煤的放出率与放出效率。

参考文献 (References):

[1] 弓培林,靳钟铭. 大采高综采采场顶板控制力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1):193-198.

Gong Peilin, Jin Zhongming. Mechanical model study on roof control for fully-mechanized coal face with large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 193-198.

[2] 王国法. 煤炭综合机械化开采技术与装备发展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 44-48.

Wang Guofa. Development of fully-mechanized coal mining technology and equipment[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 44-48.

[3] 王国法. 高端液压支架关键技术研究产业化进展[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 78-83.

Wang Guofa. Research and commercialization progress of key technology for high rank hydraulic powered support[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4): 78-83.

[4] 袁勇, 屠世浩, 王瑛, 等. 大采高综采技术的关键问题与对策探讨[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 4-8.

Yuan Yong, Tu Shihao, Wang Ying, et al. Discussion on key problem and counter measures of fully mechanized mining technology with high mining height[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 4-8.

[5] 邓雪杰, 张吉雄, 黄鹏, 等. 特厚煤层上向分层充填开采顶板移动特征分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 994-1000.

Deng Xuejie, Zhang Jixiong, Huang Peng, et al. Roof movement characteristics in extra thick coal seam mining with the upward slicing filling technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 994-1000.

[6] 张西斌, 周刚, 刘志文, 等. 特厚煤层分层综放开采工艺技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(7): 38-42.

Zhang Xibin, Zhou Gang, Liu Zhiwen, et al. Study on slicing top coal caving mining technology in ultra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 38-42.

[7] 赵启峰, 李勇军, 王新琨, 等. 厚煤层预采顶分层综采面矿压显现规律研究[J]. 华北科技学院学报, 2010, 7(3): 23-26.

Zhao Qifeng, Li Yongjun, Wang Xinkun, et al. Research on regularity of strata behavior in fully mechanized coal face with pre mining top slicing in thick seam[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2010, 7(3): 23-26.

[8] 王国法, 庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 30-34.

Wang Guofa, Pang Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 30-34.

[9] 解兴智, 赵铁林. 浅埋坚硬特厚煤层综放开采顶煤冒放结构分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 359-366.

Xie Xingzhi, Zhao Tielin. Analysis on the top-coal caving structure of extra-thick hard coal seam with shallow depth in fully mechanized sublevel caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 359-366.

[10] 王国法, 庞义辉, 刘俊峰. 特厚煤层大采高综放开采机采高度的确定与影响[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1777-1782.

Wang Guofa, Pang Yihui, Liu Junfeng. The determination and influence of cutting height on top coal caving with great mining height in extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012,

- 37(11):1777-1782.
- [11] Wang Jiachen, Zhang Jinwang, Song Zhengyang, et al. Three-dimensional experimental study of loose top-coal drawing law for longwall top-coal caving mining technology [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015(7):318-326.
- [12] 王国法. 综采成套技术与装备系统集成[M]. 北京:煤炭工业出版社,2016.
- [13] 王家臣,张锦旺. 综放开采顶煤放出规律的BBR研究[J]. 煤炭学报,2015,40(3):487-493.
Wang Jiachen, Zhang Jinwang. BBR study of top-coal drawing law in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(3):487-493.
- [14] 王国法. 液压支架技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,1999.
- [15] 蒋金泉,曲华,谭云亮. 综放顶煤放出规律与放煤步距的离散元仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(18):3070-3075.
Jiang Jinquan, Qu Hua, Tan Yunliang. Numerical simulation by distinct element code on drawing law and interval of fully-mechanized coal mining with caving method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(18):3070-3075.
- [16] 谢广祥,黄金桥. 顶煤放出规律计算机可视化仿真[J]. 煤炭学报,2002,27(3):264-267.
Xie Guangxiang, Huang Jinqiao. Computer visualized simulation on coal drawing law [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3):264-267.
- [17] 方新秋,何杰,李海潮. 软煤综放面煤壁片帮机理及防治研究[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(5):640-644.
Fang Xinqiu, He Jie, Li Haichao. A study of the rib fall mechanism in soft coal and its control at a fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5):640-644.
- [18] 殷帅峰,何富连,程根银. 大采高综放面煤壁片帮判定准则及安全评价系统研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(5):800-807.
Yin Shuai Feng, He Fulian, Cheng Genyin. Study of criterions and safety evaluation of rib spalling in fully mechanized top-coal caving face with large mining height [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015,44(5):800-807.
- [19] 黄庆享,刘建浩. 浅埋大采高工作面煤壁片帮的柱条模型分析[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(2):187-191.
Huang Qingxiang, Liu Jianhao. Vertical slice model for coal wall spalling of large mining height longwall face in shallow seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015,32(2):187-191.
- [20] 庞义辉,刘新华,马英. 千万吨矿井群综放智能化开采设备关键技术[J]. 煤炭科学技术,2015,43(8):97-101.
Pang Yihui, Liu Xinhua, Ma Ying. Key technologies of fully-mechanized caving intelligent mining equipment in ten million tons of mines group [J]. Coal Science and Technology, 2015,43(8):97-101.