

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.019

薄基岩煤层大采高综采工作面漏顶机制及控制技术研究

张华磊¹, 涂敏¹, 程桦², 文志杰^{1,3}, 唐永志⁴

(1. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230039; 3. 山东科技大学 矿山灾害预防省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 4. 淮南矿业集团, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 针对淮南矿区薄基岩煤层大采高综采工作面漏顶事故频发现象, 采用实验室试验、理论分析及现场实测的方法对薄基岩工作面漏顶机制及控制技术进行深入研究。研究表明: 薄基岩煤层大采高综采工作面顶板存在大小周期来压现象; 直接顶的变形能与其所承接的上覆岩层自重成正比、与其岩体的弹性模量成反比关系; 工作面漏顶与顶板来压密切相关, 工作面顶板周期来压(关键层断裂回转)时, 直接顶的变形能增加, 导致直接顶岩体原生裂隙扩展、次生裂隙发育, 从而增加漏顶的几率; 采用废旧钢丝绳与注浆联合加固的方法对直接顶薄弱区域进行预加固, 形成一个独特的空间网格加固结构, 加固效果明显, 能够有效防止工作面漏顶现象地发生。

关 键 词: 薄基岩; 直接顶; 漏顶; 长锚索

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)06-1697-08

Roof leakage mechanism and control technology study of fully mechanized large mining height mining face of thin bedrock seams

ZHANG Hua-lei¹, TU Min¹, CHENG Hua², WEN Zhi-jie^{1,3}, TANG Yong-zhi⁴

(1. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China; 3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 4. Huainan Mining Group, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: It is known that the phenomenon of leakage frequently occurs in the roof of the fully mechanized working face with large mining height in thin bedrock coal seam of Huainan mining area. In this study, laboratory tests, theoretical analysis, and field measurements were conducted to investigate the mechanism and control technology for the leakage in the thin bedrock mining face. The results show that coal seam with large mining height in the thin bedrock had a periodic weighting phenomenon in the roof of the fully mechanized working face. The deformation potential energy of the immediate roof was proportional to the dead weight of the overlying strata next to the immediate roof, while was inversely proportional to the elastic modulus of rock mass. When the periodic weighting of working face roof took place, the deformation potential energy of the immediate roof increased. As a result, the primary cracks propagated and the secondary cracks developed, which caused the growth of the probability of the roof leakage. Therefore, a combined procedure of waste steel wire rope and grouting was applied to reinforce weak areas in the immediate roof, forming a unique spatial grid reinforcement structure. It turns out that this technique presents an obvious reinforcement effect and can prevent the occurrence of the phenomenon of roof leakage effectively.

Keywords: thin bedrock; immediate roof; roof leakage; long anchor cable

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51574007); 国家自然科学基金青年基金 (No.51604007); 安徽省博士后科研经费资助项目 (No.DG155); 霍英东青年教师基金 (No.141046)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51574007 and 51604007), Anhui Postdoctoral Science Foundation (DG155), Fok Ying Tung Education Foundation (141046).

第一作者简介: 张华磊, 男, 1983年生, 博士, 副教授, 主要从事采动岩体力学方面的研究工作。E-mail: hlzhang1122@126.com

通讯作者: 文志杰, 男, 1982年生, 博士, 副教授, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: sdust0532@gmail.com

1 引 言

大采高综采工作面的端面漏顶是煤矿生产中较为常见的事故,它不仅直接影响到工作面的产量和安全生产,还会增加煤炭的含矸率,对生产危害较大,尤其是松散含水层薄基岩条件下的大采高综采工作面,这一问题更为突出。淮南矿业集团张集煤矿松散含水层下薄基岩煤层 1611(3)大采高综采工作面开采过程中发生了多次漏顶事故,严重影响着工作面的安全高效生产。因此,揭示此类工作面漏顶机制并确保端面顶板的稳定性,是亟待解决的技术难题。

近年来,许多学者对综采工作面漏顶机制及其控制对策等方面进行了研究,例如钱鸣高等^[1-3]基于直接顶稳定性对工作面漏顶机制的影响开展了大量研究,得出工作面漏顶除了与直接顶力学特征、回采速度和支架选型有关外,还与基本顶的破断运动密切相关,但研究成果仅适用于 3 m 以下的小采高综采工作面。文献[4-6]讨论了浅埋特大采高综采工作面关键层结构形态对端面漏顶的影响,并确定出合理的液压支架工作阻力,但未提及关键层结构运动对直接顶稳定性的影响。文献[7-11]针对薄基岩工作面的矿压显现特征以及松散层载荷传递规律及压架致灾机制进行了研究,但并没有涉及采场顶板破碎机制及其控制方面。因此,本文将通过淮南矿区张集煤矿 1611(3)工作面回采过程中端面漏顶的现场实测,基于现有的研究成果,开展薄基岩煤层综采工作面漏顶机制及其控制对策的研究。

2 工程概况

淮南矿业集团张集煤矿北区 1611(3)工作面为西三采区 13-1 煤首采工作面,工作面标高为-400~-460 m,属于提高开采上限工作面,如图 1 所示。里切眼工作面倾斜长度为 117 m,走向长度为 170 m。里切眼附近的地层岩性如表 1 所示;煤层平均厚度

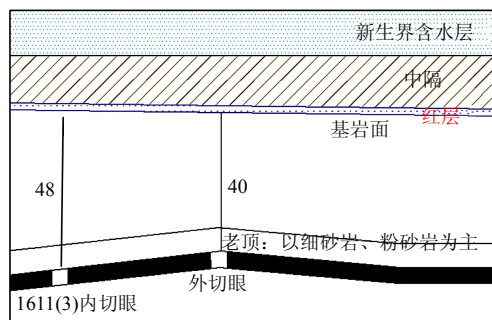


图 1 1611(3)工作面示意图(单位: m)

Fig.1 Schematic of working face 1611(3) (unit: m)

表 1 地层岩性
Table 1 Strata lithology

组号	厚度/ m	埋深/ m	岩石名称
15			松散层
14	2.1	392.3	风化中砂岩
13	1.9	394.4	风化砂岩
12	3.7	396.3	风化泥岩
11	2.3	400.0	泥岩
10	1.8	402.3	细砂岩
9	2.7	404.1	中细砂岩
8	5.4	406.8	中细砂岩
7	1.6	412.2	粉细砂岩
6	4.8	413.8	砂质泥岩
5	2.9	418.6	泥岩
4	3.2	421.5	泥质砂岩
3	6.7	424.7	细砂岩
2	4.6	431.4	泥岩
1	6.4	436.0	13-1 煤

为 6.1 m, 结构复杂, 煤层倾角平均为 11.5° , 工作面初始采高定为 5 m。工作面回采范围内共揭露 18 条断层, 地质构造复杂, 大部分集中在轨顺附近。工作面选用 ZY10800/30/65 型两柱式液压支架, 共 73 架, 并安设液压支架工作阻力监测系统。

1611(3)工作面回采至 75 m (48[#]~53[#]支架之间)、89 m (53[#]~69[#]支架之间) 及 103 m (40[#]~56[#]支架之间) 时均发生端面漏顶事故, 漏顶位置靠近工作面上部。以工作面推进至 103 m 时的漏顶事故为例, 漏顶区域内的液压支架最大工作阻力均值为 24 MPa 左右, 而未漏顶区域的液压支架安全阀开启卸压, 最大工作阻力均值为 37 MPa, 高于漏顶位置处的液压支架。漏顶时, 大量矸石落在刮板输送机上, 致使工作面停滞不前, 严重阻碍了工作面的安全生产。

3 工作面顶板破碎机制分析

3.1 大采高工作面采场覆岩运移规律

为了研究薄基岩煤层大采高工作面漏顶机制, 须弄清薄基岩煤层采场覆岩的运移规律。采用文献[9]的方法, 以 1611(3)工作面地质条件为工程背景进行相似材料物理模拟试验, 采用自动水压补给系统(见图 2(a))模拟松散含水层的补给能力, 工作面开采过程如图 2(b)~图 2(f)所示。

由图 2 可知, 工作面初始回采一段距离后, 低位关键层(老顶)达到极限破断距时初始破断, 工作面初次来压(见图 2(b)); 随着工作面的继续回采, 工作面上方顶板经历低位关键层几个周期的破断(例工作面分别回采至 52、65、75、87 m 时), 将此时低位关键层的周期性破断称之为小周期性来压(见图 2(c)), 此后工作面上方的高位关键层发生

较大范围的破断、整体移动(工作面推进至 100 m 时),工作面矿压显现剧烈,将工作面上方高位关键层大范围地破断整体移动称之为大周期性来压(见图 2(e));此后随着工作面地开采,采场顶板经历几个小周期来压后,再次发生大周期来压,如图 2(f)所示。

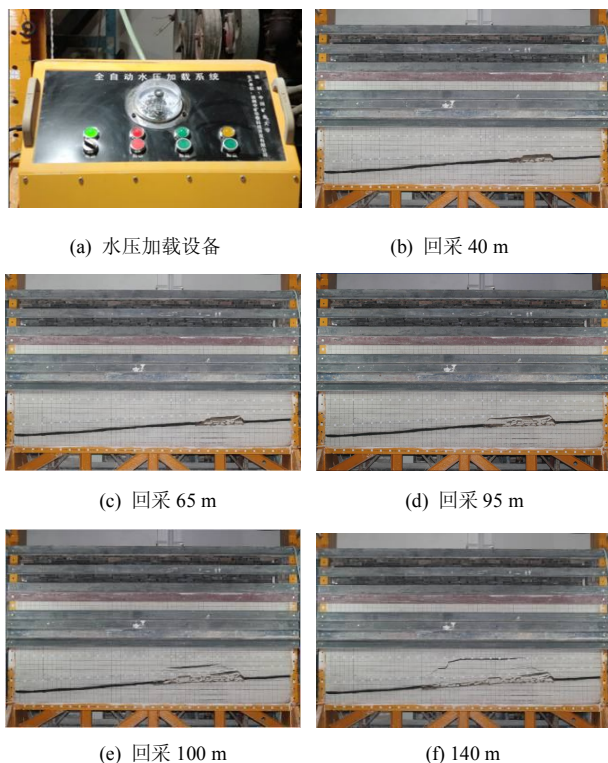


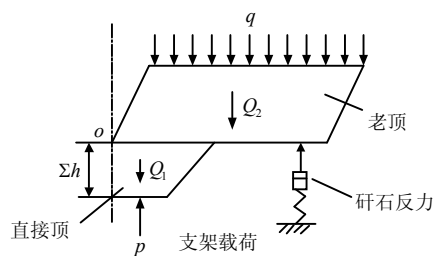
图 2 薄基岩煤层开采物理模拟试验

Fig.2 Mechanical model of immediate roof for main roof weighting

3.2 直接顶稳定性分析模型

3.2.1 直接顶受力学模型的建立

根据矿山压力与岩层控制理论,工作面直接顶作为可变形体,既可作为载荷层作用于支架,又作为承载层,承受老顶的给定变形压力,同时作为传递层,传递老顶的给定变形压力^[12-13]。老顶来压时的力学模型如图 3 所示。



q 为上覆岩层传递至老顶的荷载; Q_2 为老顶自重; Q_1 为直接顶岩块自重; Σh 为直接顶厚度; p 为支架给直接顶的法向作用力

图 3 老顶来压时力学模型

Fig.3 Mechanical model of immediate roof for main roof weighting

直接顶岩体存在原生裂隙、构造裂隙,将直接顶视为非线性弹性体。老顶回转时所做的功,一部分由直接顶吸收,另一部分为矸石所吸收,冒落矸石的厚度是影响老顶回转角度大小的主要因素之一;由矿山压力理论可知,老顶“给定变形”回转的角度是一定的(矸石反力仅仅影响老顶回转角度的大小而不能阻止老顶回转),即老顶对直接顶所做的功也是绝对的,又因为重点研究老顶、直接顶及液压支架三者之间的关系,所以忽略矸石反力所做的功,建立支架与围岩耦合作用的整体力学模型如图 4 所示,以分析支架承受的给定变形压力与直接顶的整体力学性能的内在联系。

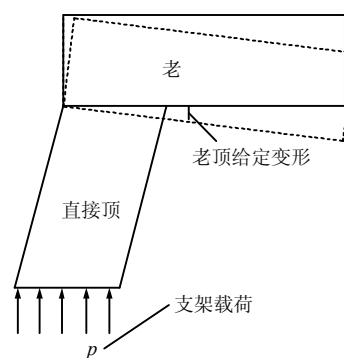


图 4 老顶来压时支架-围岩系统力学模型

Fig.4 Mechanism model of support-surrounding rock system for main roof weighting

(1) 老顶回转下沉对直接顶做功

设老顶施加给直接顶的给定压力分布集度为 $q(x)$, 如图 5 所示,回转角度为 θ_1 , 宽度取为单位宽度(沿工作面倾向)。

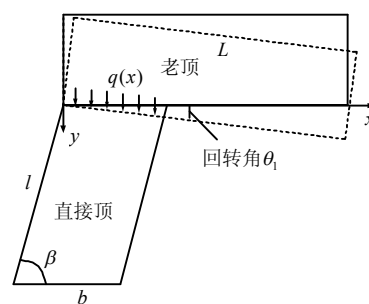


图 5 老顶回转下沉运动

Fig.5 Rotary subsidence of main roof

假设给定压力 $q(x)$ 为均布载荷, 即 $q(x) = q$, 直接顶岩块边长分别为 l 、 b , 夹角为 β , 则老顶施加到直接顶的给定压力在回转变形过程中做的功为

$$W_1 = \int_0^b q(x)x \sin \theta_1 dx + qb \frac{ql}{E \sin^2 \beta} = \frac{[m - (k-1)\Sigma h(m)]qb^2}{2L} + \frac{bq^2 l}{E \sin^2 \beta} \quad (1)$$

式中: m 为采高; L 为老顶岩块长度; β 为直接顶岩块两边夹角; $\Sigma h(m)$ 为直接顶厚度, 为采高的函数; k 为碎胀系数; E 为弹性模量。

(2) 直接顶储存的能量

假设直接顶的弹性模量为 E , 因老顶给定变形, 当计算直接顶的变形时, 直接顶受力简化为图 6, 直接顶的断裂面为自由面, 支架施加于直接顶的切向摩擦力相对于法向力为小量, 设为 f 。

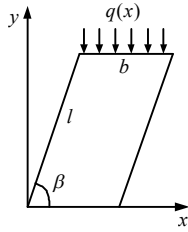


图 6 直接顶受力简图

Fig.6 Forced diagram of immediate roof

对于大采高采场, 由于直接顶层位较高, 即 l 相对于 b 较大, 可采用组合变形 (压缩变形和弯曲变形) 分析直接顶的变形能, 其表达式为

$$V_{\varepsilon 1} = \frac{\left(\frac{qb}{\sin \beta}\right)^2 l}{2Eb \sin \beta} + \frac{(qbl \cos \beta)^2 l \cos \beta}{2E \frac{\Sigma h(m)^3}{12}} + fqb b \left(\sin \left[\frac{\theta_1}{2}\right]\right)^2 = \frac{q^2 bl}{2E \sin^3 \beta} + \frac{6(qb)^2 (l \cos \beta)^3}{E \Sigma h(m)^3} + fq \left(b \sin \left[\frac{\theta_1}{2}\right]\right)^2 \quad (2)$$

直接顶存在着原生裂隙及构造裂隙, 考虑直接顶的损伤效应, 设直接顶的损伤变量为 D , 则其弹性模量为

$$E' = (1-D)E \quad (3)$$

损伤材料的变形能可由无损材料变形能表达式中将弹性模量转换为有效弹性模量得到。将直接顶视为均匀各向同性损伤体, 则其由式 (2) 表示的变形能转换为

$$V_{\varepsilon 1} = \frac{q^2 bl}{2(1-D)E \sin^3 \beta} + \frac{6(qb)^2 (l \cos \beta)^3}{(1-D)E \Sigma h(m)^3} + fq \left(b \sin \left[\frac{\theta_1}{2}\right]\right)^2 \quad (4)$$

(3) 支架储存的能量

当无支架约束时, 随着老顶回转, 直接顶底部与老顶回转量相同, 均为 θ_1 , 由于直接顶为变形体, 因支架阻力作用使直接顶在老顶给定压力和支架阻力下产生回缩变形 (相对于无支架支护时), 设在支架作用下直接顶回转角为 θ_2 , 即支架顶梁的回转角为 θ_2 , 如图 7 所示。

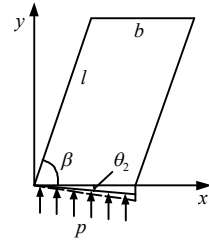


图 7 直接顶与支架耦合变形分析

Fig.7 Couple deformation of immediate roof and support

支架对直接顶的作用力简化为均布载荷 p , 取支架的位移量为直接顶下沉量, 亦即支架压缩量记为 Δ , 则支架储存能量为

$$V_{\varepsilon 2} = \int_0^b p \sin \theta_2 x dx = \int_0^b px \frac{\Delta}{b} dx = \frac{p\Delta b}{2} \quad (5)$$

(4) 直接顶回转做功

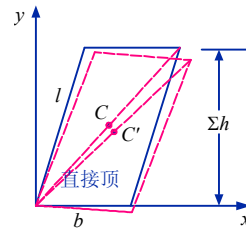


图 8 直接顶回转运动

Fig.8 Rotary subsidence of immediate roof

直接顶厚度 $\Sigma h(m) = l \sin \beta$, 设重度为 γ , 老顶给定压力导致直接顶回转变形, 直接顶重心下移, 则垂直位移为

$$y_c = \frac{\bar{L}}{2} \left(\sin \frac{\beta}{2} - \sin \left(\frac{\beta}{2} - (\theta_1 - \theta_2) \right) \right) \quad (6)$$

式中: $\bar{L}$ 为直接顶岩块对角线长度, $\bar{L} = \sqrt{l^2 + b^2 + 2lb \cos \beta}$ 。

则有,老顶回转迫使直接顶重心下移导致的直接顶重力势能减少量(相当于重力做功)为

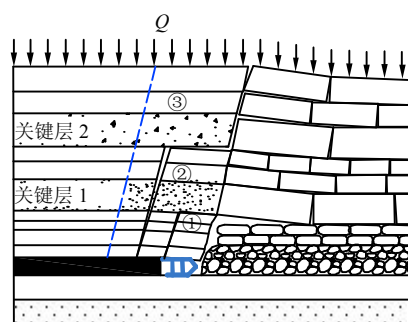
$$W_2 = \frac{\sqrt{l^2 + b^2 + 2lb \cos \beta}}{2} b \cdot \sum h \gamma \left(\sin \frac{\beta}{2} - \sin \left(\frac{\beta}{2} - (\theta_1 - \theta_2) \right) \right) \quad (7)$$

将老顶、直接顶和支架视为一个力学系统,根据能量守恒定律,外力做功等于储存在支架和直接顶中的变形能,于是有

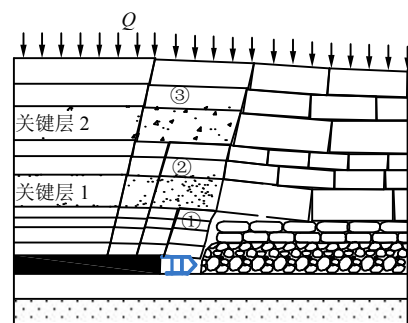
$$W_1 + W_2 = V_{e1} + V_{e2} \quad (8)$$

3.2.2 大采高采场直接顶岩层稳定性评价

由于松散含水层的载荷传递特征,会导致薄基岩采场覆岩发生复合破断^[9],与常规采场矿压显现特征有所差异。根据薄基岩煤层回采时覆岩的运移特征,当低(高)位关键层断裂时,由低(高)位关键层控制的岩层将会回转作用在下部直接顶,由矿山压力理论可知^[12],此时上覆岩层断裂回转作用在直接顶上的力较大,因此,选取覆岩垮落的两种状态:低位关键层1破断回转及高位关键层2破断回转时进行分析,垮落形态如图9所示。其中, Q 为松散层传递给基岩的压力。



(a) 低位关键层垮落



(b) 高位关键层垮落

图9 覆岩垮落的两种形态

Fig.9 Two forms of overlying strata collapse

当楔形体③破断回转下沉时,上覆岩层的压力 Q 由于松散承压含水层的载荷传递^[11]仍然作用在楔形体③上,并没有随着楔形体与上覆岩层的离层而消失。由图9可知,低位关键层1断裂时,设上覆岩层作用在直接顶上的载荷为 q_1 ,可知 q_1 为楔形体①与②的自重;当高位关键层2断裂回转时,设上覆岩层作用在直接顶上的载荷为 q_2 ,则 q_2 的值不止是楔形体①、②与③的自重,还应加上松散层作用在基岩面上的载荷 Q ,由此可知,当高位承载岩层断裂时,作用在直接顶上的载荷 q_2 远大于低位承载岩层断裂时的载荷 q_1 。而由式(4)、(8)可知,作用在直接顶上的载荷 q 越大,直接顶的变形能越大。

由式(1)~(8)可知,随着 q 的增加, W_2 的值不变,如果设 D 为定值,通过计算得知, W_1 的增长速度大于 V_{e1} 的增长速度;如果将支架储能 V_{e2} 设为不变值,为了维持式(8)的平衡, D 的值将会增长;而 D 值的增长,表明直接顶岩体内部原生裂隙扩展和次生裂隙发育,此时直接顶岩体极易进入散体状态^[14]。当工作面周期来压(关键层断裂回转)时,直接顶所承接的变形能较大,直接顶岩体破碎漏顶的几率较大,且高位关键层断裂时漏顶几率大于低位关键层断裂时漏顶的几率。

4 薄基岩工作面顶板控制技术

4.1 顶板加固措施

根据式(4)、(8)可知,直接顶的变形能与其自身的弹性模量呈反比关系,即直接顶岩体的弹性模量越大,其直接顶所能承载的变形能越小,直接顶越不容易进入散体状态。根据以往的研究^[15-17]可知,锚注支护为提高直接顶岩体强度的一个有效方法之一,本文采用长锚索(钢丝绳)与注浆联合的方法对工作面前方未开采的煤层直接顶进行预加强支护。

因为漏顶区域主要位于工作面轨道顺槽的上部,所以加固区域选在工作面上部,加固范围为 $60\text{ m} \times 62\text{ m}$ (距离切眼 $110 \sim 170\text{ m}$),如图10(a)中粉红色边框矩形区域所示。将外切眼作为措施巷,为注浆提供作业空间。

在采煤工作面轨道顺槽中,在高于煤层顶板法向距离为 $200 \sim 500\text{ mm}$ 范围内,沿平行于采煤工作面推进方向施工钻孔,钻孔直径为 150 mm ,孔深为 60 m ,孔间距为 500 mm ;同时在外切眼中高于平行工作面推进方向的钻孔法向距离 500 mm 处煤层顶板沿垂直于采煤工作面推进方向施工钻孔,

钻孔直径为 150 mm, 孔深为 62 m, 钻孔间距为 500 mm; 所述钻孔期间每个钻孔施工完以后要及时装入注浆管, 并将与孔深一致的钢丝绳装入钻孔内, 封孔并装上注浆连接件。钢丝绳选由矿用 $\phi 15.5$ mm 废旧钢丝绳构成, 其长度和直径要与钻孔深度和孔径配套。

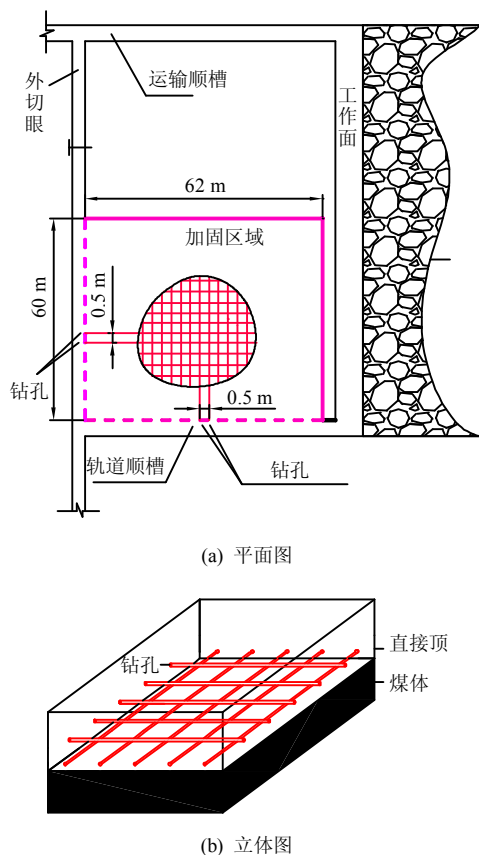


图 10 顶板加固示意图

Fig.10 Schematic of strengthening roof

连接好注浆管路, 将水泥浆液搅匀, 启动注浆泵, 向钻孔中注水泥浆液, 直到注浆压力稳定一段时间或有跑浆现象发生时停止注浆; 如果顶板比较破碎, 则须在上述钻孔间补打钻孔, 向顶板破碎区域注化学浆液达到辅助加固围岩的目的。

综上所述, 在直接顶岩体施工平行于薄基岩煤层工作面方向和垂直于工作面的钻孔, 然后在钻孔内装钢丝绳、注浆, 最终形成了一个空间网络结构的加固层, 如图 10(b)所示。

4.2 支护效果评析

采用上述方法对工作面前方的煤层顶板进行加固后, 工作面进行回采, 对工作面回采过程中液压支架的工作阻力进行监测, 并将监测数据生成工作面液压支架工作阻力分布三维图, 如图 11 所示。

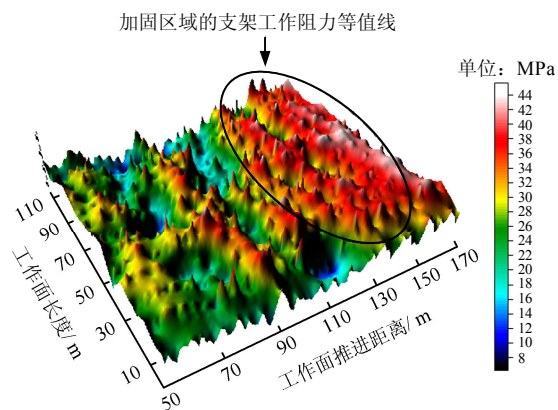


图 11 工作面液压支架工作阻力三维分布图

Fig.11 Three-dimensional distribution of hydraulic support working resistance

由图 11 所示的支架工作阻力及监测的其他矿压显现特征综合得知, 工作面回采至 62、75、86 m 时发生小周期来压, 而回采至 101 m 时发生大周期来压, 由此可见, 工作面端面漏顶与工作面顶板大、小周期来压有着密切的关系, 验证了前述漏顶机制的正确性。由式 (8) 可知, 当 W_1 、 W_2 为定值时, V_{e1} 越大, V_{e2} 越小, 这也解释了图 10 中漏顶区域支架工作阻力普遍偏低的现象。

当工作面回采至 110~170 m 范围内, 工作面无漏顶现象, 安全回采 60 m, 工作面液压支架工作阻力均值 35 MPa, 较漏顶区域的液压支架工作阻力均值高 20 MPa 左右。由此可见, 当使用锚固方法加固直接顶后, 直接顶的形变势能减小, 直接顶裂隙发育, 扩展的几率大大减小, 但工作面液压支架工作阻力普遍升高, 支架储存的能量增长, 也验证了式 (6) 的准确性, 因此, 为了保证薄基岩工作面的安全生产, 需要选取有较大工作阻力的液压支架。

5 结 论

(1) 基于薄基岩煤层大采高工作面 1611(3) 的地质条件, 进行了薄基岩煤层开采的相似材料物理模拟试验, 得出薄基岩煤层开采时采场顶板呈现大、小周期来压特征。

(2) 建立了直接顶受力学模型, 并在此基础上求得直接顶的变形能计算公式, 得出直接顶的变形能与上覆岩层压力成正比, 与直接顶岩体的弹性模型成反比。

(3) 工作面漏顶与其顶板周期来压密切相关; 周期来压时, 直接顶岩体损伤变量 D 随其变形能的增大而增长, 表明直接顶岩体原生裂隙扩展、次生裂隙发育, 此时工作面极易发生漏顶现象。

(4) 采用长锚索与注浆联合支护的方法对薄基岩煤层 1611(3)工作面直接顶软弱区域进行预加固, 此后回采预加固顶板下方的煤层时再无漏顶现象, 但液压支架的工作阻力明显高于未加固回采时的工作阻力, 说明随着直接顶形变势能的减小, 支架所储存的能量增加, 与理论分析结果是吻合的。

参考文献

- [1] 钱鸣高. 岩层控制与煤炭科学开采文集[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
QIAN Ming-gao. Strata control and sustainable coal mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2011.
- [2] 钱鸣高, 何富连, 李全生, 等. 综采工作面端面顶板控制[J]. 煤炭科学技术, 1992, 21(1): 41—46.
QIAN Ming-gao, HE Fu-lian, LI Quan-sheng, et al. Roof control in “tip to face” area of a fully mechanized longwall face[J]. **Coal Science and Technology**, 1992, 21(1): 41—46.
- [3] LIU Shuang-yue, QIAN Ming-gao. Stability and control of immediate roof of fully mechanized coal face[C]// The 9th International Conference on Ground Control in Mining. West Virginia: West Virginia University department of mining Engineering Morgantown, 1990: 150—158.
- [4] 许家林, 鞠金峰. 特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1547—1556.
XU Jia-lin, JU Jin-feng. Structural morphology of key strata and its influence on strata behavior in fully-mechanized face with super great mining height[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(8): 1547—1556.
- [5] 鞠金峰, 许家林, 王庆雄. 大采高采场关键悬臂梁结构运动型式对矿压的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2115—2120.
JU Jin-feng, XU Jia-lin, WANG Qing-xiong. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height workface[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(12): 2115—2120.
- [6] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵. 浅埋特大采高综采工作面关键层悬臂梁结构运动对端面漏冒的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1197—1204.
JU Jin-feng, XU Jia-lin, ZHU Wei-bing. Influence of key strata cantilever structure motion on end-face fall in fully-mechanized face with super great mining height[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1197—1204.
- [7] 方新秋, 黄汉富, 金桃, 等. 厚表土薄基岩煤层综放开采矿压显现规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 326—330.
FANG Xin-qiu, HUANG Han-fu, JIN Tao, et al. Strata behavior of fully-mechanized top coal caving in thin bedrock and thick topsoil[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(3): 326—330.
- [8] 方新秋, 黄汉富, 金桃, 等. 厚表土薄基岩煤层开采覆岩运动规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2700—2706.
FANG Xin-qiu, HUANG Han-fu, JIN Tao, et al. Movement rules of overlying strata around longwall mining in thin bedrock with thick surface soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2700—2706.
- [9] 许家林, 陈稼轩, 蒋坤. 松散承压含水层的载荷传递作用对关键层复合破断的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 699—704.
XU Jia-lin, CHEN Jia-xuan, JIANG Kun. Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(4): 699—704.
- [10] 许家林, 蔡东, 傅昆岚. 邻近松散承压含水层开采工作面压架机制与防治[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1239—1243.
XU Jia-lin, CAI Dong, FU Kun-lan. Mechanism of supports crushing accident and its preventive measures during coal mining near unconsolidated confined aquifer[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(12): 1239—1243.
- [11] 王晓振, 许家林, 朱卫兵, 等. 松散承压含水层特征对其载荷传递特性的影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 499—505.
WANG Xiao-zhen, XU Jia-lin, ZHU Wei-bing, et al. Study on the influence of the characteristic of unconsolidated confined aquifer on its property of load transfer[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2014, 31(4): 499—505.
- [12] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu, XU Jia-lin. Underground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [13] 钱鸣高, 何富连, 王作棠, 等. 再论采场矿山压力理论[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(3): 1—9.

- QIAN Ming-gao, HE Fu-lian, WANG Zuo-tang, et al. A further discussion on the theory of the strata behaviors in longwall mining[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1994, 23(3): 1—9.
- [14] 杨永明, 鞠杨, 陈佳亮, 等. 三轴应力下致密砂岩的裂纹发育特征与能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 691—698.
- YANG Yong-ming, JU Yang, CHEN Jia-liang, et al. Cracks development features and energy mechanism of dense sandstone subjected to triaxial stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4): 691—698.
- [15] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 地表预注浆加固公路隧道浅埋偏压破碎围岩效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2309—2315.
- LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Treatment effect analysis of shallow-buried crushed surrounding rocks under unsymmetrical pressure reinforced with surface pregrouting technology in highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2309—2315.
- [16] 刘泉声, 康永水, 白运强. 顾桥煤矿深井岩巷破碎软弱围岩支护方法探索[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3097—3104.
- LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, BAI Yun-qiang. Research on supporting method for deep rock roadway with broken and soft surrounding rock in Guqiao Coal Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3097—3104.
- [17] 张庆松, 李鹏, 张霄, 等. 隧道断层泥注浆加固机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 924—934.
- ZHANG Qing-song, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Model test of grouting strengthening mechanism for fault gouge of tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(5): 924—934.

上接第 1687 页

- [4] 赵明华, 刘峻龙, 刘建华. 双层地基横向受荷桩简化计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(12): 58—61.
- ZHAO Ming-hua, LIU Jun-long, LIU Jian-hua. Research about simplified calculation method of laterally-loaded piles in double-layered foundation[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2006, 23(12): 58—61.
- [5] 刘腊腊, 胡建平. 单桩水平静载试验及成果参数取值探讨[J]. 天津城市建设学院学报, 2009, 15(4): 268—270.
- LIU La-la, HU Jian-ping. Horizontal static load test of single-pile and its parameter values discussion[J]. **Journal of Tianjin Institute of Urban Construction**, 2009, 15(4): 268—270.
- [6] 屈希峰. 湿陷性黄土地基土 m 值分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- QU Xi-feng. Analysis of foundation Soil's m -value in collapsible loess area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [7] 李俊, 强士中, 李小珍. 地基系数的比例系数 m 的确定[J]. 铁道标准设计, 2004, (11): 83—85.
- LI Jun, QIANG Shi-zhong, LI Xiao-zhen. Determination of proportional coefficient m of foundation coefficient[J]. **Journal of Railway Standard Design**, 2004, (11): 83—85.
- [8] 李俊青. 强夯填土中桩的水平受荷特性的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- LI Jun-qing. Study on the mechanical characteristics of single pile in dynamic compaction fill-up ground under horizontal load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [9] 费香泽, 何长华, 程永峰. 单桩侧向承载力的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 545—549.
- FEI Xiang-ze, HE Chang-hua, CHENG Yong-feng. A study of horizontal bearing capacity of single pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 545—549.
- [10] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范 (JGJ94-2008)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Construction, PRC. Technical code for building pile foundations (JGJ94-2008)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [11] 刘兹胜, 卓杨, 时蓓玲, 等. 高桩码头桩基在倾斜泥面中的水平承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1—11.
- LIU Zi-sheng, ZHUO Yang, SHI Bei-ling, et al. Horizontal bearing capacity of pile foundation in high-piled wharf with inclined ground surface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(12): 1—11.