

文章编号: 1673-3363-(2013)02-0194-05

空巷顶板稳定性力学分析及充填技术研究

张自政, 柏建彪, 韩志婷, 王襄禹, 徐营, 王猛

(中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 以柳林郭家山煤矿4217综放工作面(回收上山煤柱)过空巷为工程背景,建立了基于工作面超前采动影响的空巷顶板力学模型,分析了空巷顶板稳定性与空巷充填体相互作用关系,得到了空巷顶板稳定的充填体支护阻力计算式,确定空巷充填体的支护阻力不低于3.58 MPa,提出采用高水材料充填过空巷技术:1)高水材料浆液可对空巷周围破碎煤岩体与空间胶结形成整体结构,提高对顶板的支撑作用;2)采用高水材料灰水比2.5:1能满足支护空巷顶板强度要求,保证顶板不发生滑落失稳和回转变形失稳。工程应用表明,高水材料充填空巷保持了煤壁和顶板的稳定性,是安全快速过空巷的有效途径之一。

关键词 空巷;超前采动影响;高水材料;充填;充填体支护阻力

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

Roof mechanics analysis and backfill technology for abandoned roadway

ZHANG Zi-zheng, BAI Jian-biao, HAN Zhi-ting, WANG Xiang-yu, XU Ying, WANG Meng

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Taking No. 4217 fully mechanized caving face crossing abandoned roadway of Guojiashan Coal Mine (uphill pillar recovery) in Liulin as a case study, a mechanical model of abandoned roadway roof subjected to advance mining influence was established, and support resistance was derived based on interaction relations between roof stability and backfill body in abandoned roadway. The support resistance of backfill body in the abandoned roadway is more than 3.58 MPa. The technology of backfilling abandoned roadways with high moisture quick-setting material is put forward: 1) High moisture quick-setting backfill material grout can cement both the broken coal/rock and cracks around the abandoned roadway together into an integral structure, improving the load-bearing capacity of surrounding rock; 2) The strength of backfill material (Water cement ratio is 2.5:1) not only meets strength requirement of supporting the abandoned roadway roof, but also avoids main roof slide and rotation deformation. Field test shows that the application of high moisture quick-setting backfill material in abandoned roadway can keep the roof and ribs stability. It provides an effective approach to make the working face pass through an abandoned roadway quickly and safely.

Key words abandoned roadway; advance mining influence; high moisture quick-setting material; backfill; support resistance of backfill body

收稿日期: 2012-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174195, 51204166, 51204167); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 张自政(1988-), 男, 河南省信阳市人, 研究生, 从事巷道围岩控制理论与支护技术方面的研究。

E-mail: zhang-zi-zheng@163.com

Tel: 15896420061

当矿井或采区煤炭资源枯竭时,很多矿井回收上、下山或边角等较大煤柱,一般上、下山之间存在较多的联络巷,由于受采动支承压力作用、维护时间较长、巷道围岩弱化等原因,联络巷易发生片帮、冒顶,回收煤柱时,将面临较大的困难。目前,工作面过空巷的传统方法主要有以下几种:①用密集支柱或木垛支护空巷顶板;②用锚杆、锚索加固空巷顶板及其两帮;③锚杆、锚索与木垛联合支护空巷;④甩掉空巷、重新掘进开切眼布置工作面;⑤注浆加固联合锚网索加固。为保证工作面安全过空巷以及探索工作面过空巷的关键技术,国内学者进行了大量的研究工作:王卫军^[1]等分析了综放面过空巷时主要顶板的活动规律,论证了综放面过空巷时采用高水速凝材料充填空巷的可行性;任东元^[2]认为提高采面与空巷间煤柱的支撑力,是过空巷实现连续采煤的关键技术,解决采面与空巷间煤柱失去自撑力后的支护问题,是过空巷实现连续采煤的技术难点;任建峰^[3]采用 ANSYS 软件研究大采高工作面过空巷时的矿山压力分布规律;柏建彪^[4]通过对工作面前方空巷围岩活动规律分析,建立了空巷顶板稳定性的力学模型,提出采用高水速凝材料充填空巷新技术;冯来荣^[5]等提出运用马丽散注浆技术对综采工作面内空巷冒落区破碎顶板进行超前加固;白晓生^[6]通过分析主采煤层受小窑空巷严重且分布不清的状况,提出了锚杆、锚网及 W 钢带联合支护和采用马丽散加固充填空巷的方法;郭金刚^[7]基于对综采放顶煤工作面高冒空巷围岩活动规律的分析,采用高水速凝材料充填高冒空巷。

本文以郭家山煤矿回收上山煤柱过空巷为工程背景,建立了基于工作面超前采动影响的基本顶力学模型,分析空巷顶板稳定性与空巷充填体相互作用关系,得到保证空巷稳定的充填体最低支护阻力计算式,提出采用高水材料充填空巷技术。

1 工程概况

柳林郭家山煤矿上山煤柱内主要有3条巷道,分别为轨道上山、运输上山、回风上山及众多联络空巷(1#至6#),如图1所示。联络空巷断面规格为3.2 m×2.5 m,采用锚网索支护。由于支护时间较长和上山两侧回采工作面超前支承压力作用,原有的3条上山和联络巷有较多地段出现冒顶,最大冒高达5 m。3条上山之间的联络巷基本与工作面平行,回采上山煤柱再次形成超前支承压力的作用下,预

计联络空巷维护困难、工作面难以通过。工作面采用低位放顶煤、全部垮落综合机械化采煤法,机采高度2.5 m,放煤高度1.5 m,支架工作支护阻力为3.2 MN,工作面埋深平均为160 m。

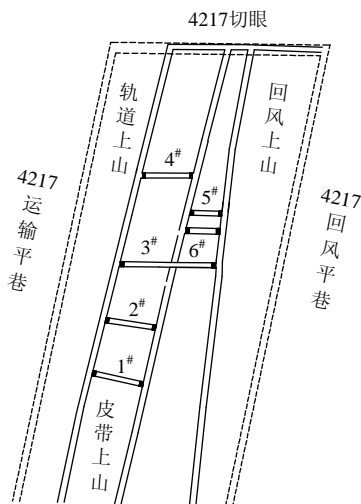


图1 4217 工作面与联络空巷位置示意图

Fig.1 4217 working face and abandoned crossheadings position schematic diagram

2 空巷顶板稳定性力学分析

2.1 基于超前采动影响的空巷顶板力学模型

对空巷力学模型作如下简化:①块体B之上的软弱岩层视为作用于其上的均布载荷 q ;②块体A对块体B的水平推力和垂直剪力分别为 T_E , Q_E ,作用点均为块体B的旋转轴 EF 的中点^[8-9];③块体C对块体B的水平推力和垂直剪力分别为 T_H , Q_H ,作用点均为 GH 的中点;④工作面推至空巷,计算上覆载荷作用时考虑超前支承压力的集中效应。建立的空巷顶板力学模型如图2所示。当工作面推至空巷时,空巷处于应力增高区,空巷上方受超前采动支承压力的应力集中影响,此时空巷处于最危险状态,空巷顶板关键块B的受力状态如图3。

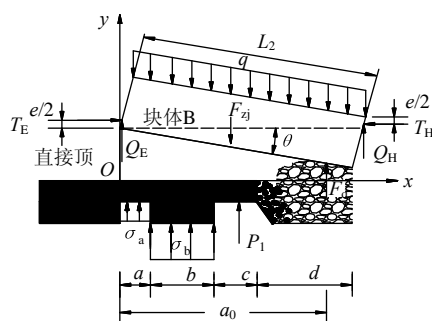


图2 空巷顶板力学模型

Fig.2 Mechanical model of abandoned roadway roof

$$\sigma_a \geq \frac{a+c}{a^2 L_1 [2R_0 - (a+c)]} \times \left[\frac{L_1 L_2^2 (q + \gamma h)(2k-1)}{2} + 2R_0 k L_1 L_2 (q + \gamma h) - 2R_0 k L_1 L_2 T_E \tan \varphi - 2R_0 k L_1 L_2 F_d - 2M_{F_d} \right] - \frac{a+c}{a^2 L_1} \left[\frac{P_1 (2a+c)}{a+c} + \frac{\sigma_t h_z^2}{3} - \gamma L_1 h_z (a+c) \right] \quad (11)$$

其中： $R_0 = L_2 \cos \theta - \frac{(h - L_2 \sin \theta)}{2} \sin \theta$ ， $F_d = \frac{K_G L_1 \tan \theta}{2} (L_2^2 \cos^2 \theta - \Delta^2 \cot^2 \theta) - \Delta L_1 (L_2 \cos \theta - \Delta \cot \theta)$ ，
 $M_{F_d} = \frac{K_G L_1 \tan \theta}{3} (L_2^3 \cos^3 \theta - \Delta^3 \cot^3 \theta) - \frac{\Delta L_1}{2} (L_2^2 \cos^2 \theta - \Delta^2 \cot^2 \theta)$ ， $\Delta = M - [M(1-\eta)K_d + h_z(K_z - 1)] - \frac{\gamma H_0}{K_C}$ 。

为防止块体 B 发生回转变形失稳，必须满足条件^[9]

$$\frac{T_E}{L_1 e} \leq \Delta \sigma_c \quad (12)$$

式中： T_E/e 为块体接触面上的平均挤压应力，MPa； Δ 为因块体在转角处的特殊受力条件而取的系数，取 0.45； σ_c 为块体的抗压强度，MPa。

将式(9)代入上式，可以得到块体 B 不发生回转变形失稳时式(12)为

$$\frac{L_2 (q L_1 L_2 + \gamma h L_1 L_2)}{L_1 (h - L_2 \sin \theta)^2} \leq \Delta \sigma_c \quad (13)$$

3 高水材料充填空巷技术与应用

3.1 高水材料充填空巷技术

高水材料充填空巷作用机理主要为：

1) 充填空巷及其冒顶片帮部分后，冒顶部分形成人工假顶，片帮部分形成人工墙壁，充填体与空巷破碎围岩形成胶结整体结构。当顶板下沉使充填体压缩产生支撑力阻止顶板下沉，充填体产生支护阻力同煤体共同控制顶板。工作面过空巷时与正常采煤一样切割充填体，煤层上方充填体成为直接顶一部分。

2) 充填过程中，高水材料浆液渗入空巷与工作面之间煤柱破碎煤体内，胶结硬化提高了破碎煤体的黏聚力和内摩擦角，提高煤柱的自承能力。同时，高水材料浆液能够加固空巷两帮以及空巷上部破碎煤岩体。

3.2 空巷充填体力学参数

根据该矿地质条件，取 $s=60$ m， $R_t=6$ MPa， $a=3.2$ m， $M=4$ m， $K_d=1.5$ ， $K_z=1.5$ ， $\eta=0.8$ ， $\theta=10^\circ$ ， $K_C=1000$ MPa/m， $K_G=5$ MPa/m， $\gamma=0.025$ MN/m³， $h=3.6$ m， $h_z=1.3$ m， $H_0=160$ m， $\sigma_t=2$ MPa， $P_1=3.2$ MN， $\sigma_c=80$ MPa， $q=0.125$ MPa， $c=4.17$ m， $k=2.6$ 。当关键块体 B 不发生滑落失稳时，将上述数据代入式(11)，可以得到空巷充填体的支护阻力为 $\sigma_a \geq 3.58$ MPa。

将上述计算结果代入式(13)能够满足，即块体 A 和关键块体 B 之间的水平推力所引起的压应力能够防止块体 B 发生回转变形失稳。

高水材料抗压强度与水泥灰比的关系见表 1。根据表 1 及前述得到的空巷充填体支护阻力，考虑一定的安全系数(动载不均匀系数)，确定 4217 综放工作面过空巷高水材料充填水灰比为 2.5：1。

表 1 高水材料单轴抗压强度
Table 1 Uniaxial compressive strength of high moisture quick-setting material

水灰比	高水材料用量/ (kg · m ⁻³)	水用量 (kg · m ⁻³)	单轴抗压强度/MPa		
			1 d	7 d	28 d
1.5	542	813	9.14	10.36	11.51
2	426	850	6.26	7.92	8.7
2.25	385	866	4.74	6.19	7.08
2.5	352	880	3.97	5.08	5.44

3.3 高水材料充填工艺

4217 煤柱工作面内联络空巷的冒顶情况：部分联络空巷发生了大范围的片帮、冒顶，冒顶最大高度 5 m。空巷采用高水材料充填，形成人工假顶和人工墙壁，工艺如下：

1) 采用 1 台流量为 120~150 L/min 的双液注浆泵充填。甲料、乙料各配 2 台搅拌桶，可连续泵送浆液，搅拌桶附近布置料场。

2) 从充填泵站到联络空巷铺设 2 趟直径 25 mm 的高压胶管分别输送甲、乙料浆液，在离联络巷 10 m 左右再与混合器及充填管连接。预先铺设充填管时，应将充填管出浆口架设在空巷冒顶区的最高处，以确保充满空巷冒落空间。

3) 空巷两端均需构筑止浆墙防止浆液外流，采用水泥砂浆与砖块构筑止浆墙，墙体深入煤壁 300 mm。

4) 将混合后的浆液充入冒顶空间，凝固后形成人工假顶和人工墙壁。

3.4 充填效果分析

1) 在工作面推过空巷的过程中, 充填体强度不大, 采煤机能够顺利切割充填体, 充填体没有出现片帮现象, 充填体形成的人工假顶也未出现冒顶现象, 表现出充填体的良好承载能力。

2) 液压支架从充填体中穿过, 支架上方充填体与顶煤、直接顶岩石黏结良好, 液压支架立柱的平均工作阻力为 12.5 MPa, 有效传递工作面支护阻力。工作面通过空巷前后未出现支架压死现象, 表现出充填体在工作面快速推进中的适应性。

3) 工作面推至空巷时, 空巷充填体压缩量为 100~300 mm, 表现出充填体良好的塑性特性和支撑顶板的能力。

4) 由于高水材料将破碎的煤体胶结形成整体, 具有一定的变形性能, 工作面推过空巷与工作面之间煤柱过程中, 煤柱没有出现大面积的片帮。

4 结 论

1) 高水材料充填空巷的主要作用为: 加固了空巷与工作面间的破碎煤柱, 充填体与煤柱形成整体承载结构; 充填体凝固后可对顶板形成的支撑作用, 防止顶板发生失稳。高水材料充填体的塑性特性适应空巷顶板的变形, 保证了空巷顶板的稳定。

2) 分析了空巷基本顶关键块体的稳定与空巷充填体的相互作用关系, 确定空巷充填体支护阻力为 3.58 MPa, 保证了空巷顶板稳定。

3) 现场工程应用表明: 采用高水材料将空巷周围岩破碎煤固结、材料凝固后对顶板的支撑作用及形成人工假顶, 使工作面顺利经受住了工作面超前采动作用, 回采过程中未发生冒顶、片帮事故。采用高水材料充填空巷解决了综放工作面过空巷的技术难题。为类似条件下尤其是产生大范围片帮、冒顶、与工作面平行的空巷提供了参考。

参考文献:

[1] 王卫军, 侯朝炯, 柏建彪, 等. 综放工作面过空巷高水速凝材料充填试验[J]. 中国矿业, 2001, 10(5): 59-63.
WANG Wei-jun, HOU Chao-jiong, BAI Jian-biao, et al. Practical application of high moisture quick-setting back-fill material to abandoned roadway[J]. China Mining Magazine, 2001, 10(5): 59-63.

[2] 任东元. 综采工作面过空巷连续采煤的可行性探讨[J]. 山西煤炭, 2000, 20(2): 24-26.
REN Dong-yuan. Feasibility of continuous winning in fully-mechanized face across a empty drift[J]. Shanxi

Coal, 2000, 20(2): 24-26.

[3] 任建峰. 大采高工作面过空巷时的支承压力分布规律数值模拟[J]. 山西煤炭, 2009, 29(3): 17-19.
REN Jian-feng. Rock pressure distribution of faces with large mining height when crossing gob[J]. Shanxi Coal, 2009, 29(3): 17-19.

[4] 柏建彪, 侯朝炯. 空巷顶板稳定性原理及支护技术研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 8-11.
BAI Jian-biao, HOU Chao-jiong. Research on principle of roof stability of abandoned workings and supporting technology[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(1): 8-11.

[5] 冯来荣, 梁志俊. 注浆加固技术在综采面过空巷中的应用[J]. 煤矿开采, 2009, 14(1): 67-68.
FENG Lai-rong, LIANG Zhi-jun. Application of reinforcement technology with grouting full-mechanized mining through abandoned roadway[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(1): 67-68.

[6] 白晓生. 新柳煤矿大断面切巷过空巷技术研究[J]. 煤炭工程, 2010(5): 35-37.
BAI Xiao-sheng. Research on the technology great cutting-height roadway crossing abandoned roadway in Xinliu coal mine[J]. Coal Mine Engineering, 2010(5): 35-37.

[7] 郭金刚. 综采放顶煤工作面高冒空巷充填技术[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6): 626-629.
GUO Jin-gang. Technique of filling roof collapsed roadway with material with high water content in fully mechanized top coal caving faces[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(6): 626-629.

[8] 柏建彪. 沿空掘巷围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.

[9] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.

[10] 华心祝, 刘淑, 刘增辉, 等. 孤岛工作面沿空掘巷矿压特征研究及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1646-1651.
HUA Xin-zhu, LIU Shu, LIU Zeng-hui, et al. Research on strata pressure characteristic of gob-side entry driving island mining face and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1646-1651.

[11] 李迎富, 华心祝, 蔡瑞春. 沿空留巷关键块的稳定性力学分析及工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 357-364.
LI Ying-fu, HUA Xin-zhu, CAI Rui-chun. Mechanics analysis on the stability of key block in the gob-Side entry retaining and engineering application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 357-364.