

文章编号: 0253-9993(2005)01-0008-04

空巷顶板稳定性原理及支护技术研究

柏建彪, 侯朝炯

(中国矿业大学 能源科学与工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 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, 应用该力学模型, 研究空巷基本顶的稳定性。采用高水速凝材料充填空巷新技术, 同时加固空巷两帮破裂煤体, 保持空巷围岩稳定。通过理论分析、数值模拟研究空巷顶板稳定性与高水速凝材料固结体力学特性的关系, 合理确定了高水速凝材料充填参数。该研究结果已成功应用于工程实践。

关键词: 空巷; 顶板稳定性; 支护技术; 高水速凝材料

中图分类号: TD353

文献标识码: A

Research on principle of roof stability of a abandoned workings and supporting technology

BAI Jian-biao, HOU Chao-jiong

(School of Energy Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Through analysis for the active law of surrounding rock of the abandoned workings in the front of the working face, a mechanical model for studying the principle of roof stability in abandoned workings was established. The new filling technology of abandoned workings by using the high-water rapid hardening materials was applied to consolidate the crushed coals in both sides of the abandoned workings and to maintain the rock stability of the abandoned workings. By the theoretical analysis of the mechanical model for principle of the roof stability in the abandoned workings, the relationship between the mechanical properties of filling body and the roof stability of the abandoned workings was numerically analyzed and calculated, the filling parameters of high-water rapid hardening materials were rationally determined. The researching results were successfully used in the engineering practice.

Key words: abandoned workings; roof stability; supporting technology; high-water rapid hardening materials

回采工作面过空巷一直是煤矿开采未能很好解决的技术难题, 传统方法采用木垛支护空巷, 调整工作面与空巷夹角, 减少每次割煤揭露空巷的长度^[1~4]。由于木垛的支护阻力小、增阻速度慢、可缩量小, 在工作面超前支承压力作用下, 木垛被过渡压缩、顶板易出现破碎、台阶下沉、甚至垮落; 木垛的稳定性差, 在侧向力作用下极易倾倒而失效, 不能有效支护顶板; 另外, 木垛被切割、破坏后基本失去支撑作用, 而支架不能及时前移至煤壁, 增加了控顶距, 易发生片帮、冒顶; 木垛也不能对两帮破裂煤体提供支护, 极易引起大范围片帮而增加空巷宽度, 加剧冒顶, 片帮、冒顶相互影响, 形成恶性循环。因而, 木垛支护空巷常发生大范围冒顶、片帮和压死支架等事故, 存在严重的安全隐患, 而且, 过空巷速度慢、时间长, 工作面产量低。技术经济效益好、在我国得到广泛应用的综采放顶煤工作面顶板是强度较小的煤层, 在下沉过程中极易松散垮落, 因而, 综采放顶煤工作面的空巷采用木垛支护将更加困难。

收稿日期: 2004-07-19

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (50490273)

作者简介: 柏建彪 (1966-), 男, 江苏仪征人, 工学博士, 副教授。Tel: 0516-3884069, E-mail: bjianb@163.com

本文针对空巷围岩活动规律，研究空巷顶板稳定性原理及高水速凝材料充填空巷新技术。

1 生产概况

某矿综放工作面开采煤层平均厚 7.0 m，普氏系数 $f = 1.5$ ，倾角平均 5° ，埋深 240 m。直接顶为砂质泥岩，平均厚 2.5 m， $f = 2$ ；基本顶为砂岩，平均厚 4.5 m；直接底为砂岩，平均厚 1.8 m， $f = 3.5$ 。工作面采用低位放顶煤一次采全高、全部垮落综合机械化采煤法，支架实际工作阻力 3.0 MN，宽度 1.5 m，长度 4.68 m。空巷位于工作面开采范围内，与工作面的推进方向垂直，沿煤层底板掘进，断面宽 \times 高 = 3.5 m \times 3.3 m，采用 A₃圆钢锚杆与工字钢支架联合支护。在工作面超前支承压力作用下，空巷大范围片帮、冒顶，冒顶巷道长度 110 m，冒顶后空巷高度 7~9 m，两帮片帮深度 1~2 m，空巷两帮相对移近量大于 500 mm。

2 空巷基本顶力学模型及稳定性分析

2.1 空巷基本顶破断特征

在工作面过空巷过程中，基本顶破断过程如图 1 所示。随着工作面的推进，工作面与空巷之间的煤柱宽度逐渐减小，在超前支承压力作用下较窄的煤柱破碎、失稳，基本顶的空顶长度突然增加，极易在空巷上方提前断裂，形成岩块。如果基本顶自身不能保持稳定，在工作面过空巷过程中，岩块极易失稳，引起空巷及工作面顶板急剧下沉，矿山压力显现剧烈。岩块失稳的主要形式有滑落失稳和转动失稳^[5]。实现工作面安全过空巷的基本条件是空巷支护体及工作面支架能够防止岩块发生滑落失稳或转动失稳，同时，对空巷两帮提供有效支护，防止两帮煤体片帮。

2.2 空巷基本顶力学模型

根据对空巷基本顶破断特征分析，岩块是工作面能否安全通过空巷的关键块体，针对空巷围岩力学特征作以下简化：岩块形成铰接结构，岩块长度为工作面周期来压步距；岩块之上的软弱岩层与其上部硬岩层离层，失去力的传递，软弱岩层可视为作用于其上的载荷；空巷支护阻力及工作面支护阻力通过顶煤及直接顶对岩块作用。根据空巷基本顶破断特征及上述简化建立空巷上方基本顶结构力学模型，如图 2 所示。 l 为岩块长度即周期来压步距， m ； q 为岩块及其上部软弱岩层单位长度的自重，MN/m； T_A 、 Q_A 、 T_B 、 Q_B 为岩块在 A、B 两端的水平推力及剪力，MN，计算式^[5] $T_B = ql \left(\frac{h}{l} - \frac{1}{2} \sin \theta \right)$ ， h 为基本顶厚度， m ； θ 为岩块的旋转角， $(^\circ)$ ； a 为岩块与岩块的接触高度， m ，计算式^[6] $a = (h - l \sin \theta) / 2$ ； q_0 为直接顶单位长度自重，MN/m； P_1 、 P_2 为空巷和工作面支护阻力，MN/m； b 、 d 为空巷和工作面支护控顶宽度， m ； P_1 作用于 $0.5b$ ， P_2 的合力作用于 $d/3$ 。

2.3 空巷基本顶稳定性分析

为防止岩块与岩块发生滑落失稳，必须满足条件^[7] $T_A \tan \phi > Q_A$ ，其中 $\tan \phi$ 为岩块间的摩擦因数，一般取 0.2^[7]。

为防止岩块发生转动失稳，必须满足条件^[7]

$$\frac{T_A}{a} > c, \quad (1)$$

式中， T_A/a 为接触面上的平均挤压应力，MPa； c 为因岩块在转角处的特殊受力条件而取的系数， $c =$

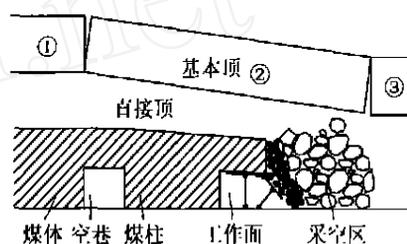


图 1 空巷上方基本顶破断特征

Fig. 1 Fractured characteristics of basic roof over abandoned workings

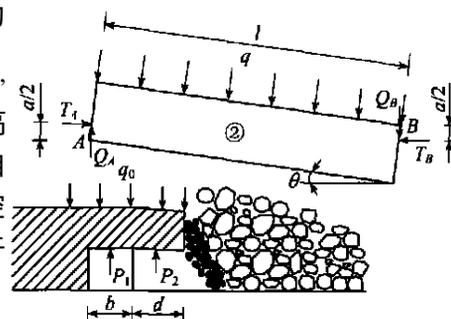


图 2 空巷围岩结构力学模型

Fig. 2 Mechanical model for rock structure of abandoned workings

$0.3^{[7]}$; c 为岩块的抗压强度, MPa.

根据力学平衡原理, 对岩块进行受力分析, 求解得防止岩块发生滑落失稳的空巷支护阻力为

$$P_1 \left[T_A \left(\frac{h-a}{l} - \tan \right) + p_2 \left(\frac{3b+d}{3l \cos} - 1 \right) - q_0(b+d) \left(\frac{b+d}{2l \cos} - 1 \right) + \frac{1}{2} ql \cos \right] / \left[1 - \frac{b}{2l \cos} \right].$$

根据该矿地质条件, 取 $l = 12 \text{ m}$, $q = 0.4 \text{ MN/m}$, $h = 4.5 \text{ m}$, $c = 65 \text{ MPa}$, $q_0 = 0.12 \text{ MN/m}$, $b = 3.5 \text{ m}$, $P_2 = 3.0 \text{ MN}$, $d = 4.68 \text{ m}$, 求得 $P_1 = 4.5 \text{ MN}$, 岩块, 之间的水平推力所引起的压应力满足式 (1), 即能够阻止岩块发生转动失稳.

3 空巷充填技术及支护参数

3.1 空巷充填技术

由于空巷冒顶高度达到 $8 \sim 9 \text{ m}$, 如果采用传统的木垛支护空巷, 木垛支护阻力不能满足支护要求, 架设木垛及工作面过空巷时安全均没有保障, 因而, 采用高水速凝材料充填^[6,8]空巷新技术, 使垮落空间的顶板及两帮得到有效支护. 工作面过空巷与采煤一样切割下部充填体, 上部充填体成为直接顶. 因此, 充填体应具有较大的承载能力, 支撑基本顶, 同时能够传递液压支架支护阻力, 保持充填体墙壁及顶板完整. 另外, 充填体应具有较好的变形特性, 受超前支承压力作用时能适量变形、让压, 防止充填体发生片帮、冒顶. 因此, 高水速凝材料充填体应具备一定的强度和良好的塑性变形特性, 才能较好地控制顶板, 在工作面推进过程中不发生片帮、冒顶事故.

3.2 空巷充填体力学参数

为了进一步分析充填体支护阻力对空巷顶板及两帮维护的作用, 科学合理地确定高水速凝材料充填体的力学参数, 对高水速凝材料充填段空巷顶板与两帮的稳定性进行数值模拟计算. 数值模拟软件为 FLAC3.3; 模型网格划分: 充填体为研究重点, 网格划分较细 ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$), 模型上边界载荷按 200 m 岩层自重模拟, 底边界固定, 左右边界水平方向固定; 材料本构关系为摩尔-库仑模型, 变形模式为大变形; 数值模拟计算过程: 原岩应力计算、巷道开挖、冒顶、空巷充填、工作面回采.

数值模拟计算结果如图 3 所示.

由图 3 可知, 随充填体支护阻力的增大, 顶板下沉量及墙壁鼓出量减小, 支护阻力大于 5 MN , 增加充填体支护阻力对减小顶板下沉量及墙壁鼓出量作用不显著.

为了增大充填体的支护阻力以减小基本顶下沉量及墙壁鼓出量, 应增加高水速凝材料用量; 而为了降低充填费用, 应减少高水速凝材料用量, 充填体支护阻力降低. 综合考虑空巷维护效果、安全可靠性和充填成本, 确定充填体的支护阻力为 6 MN , 相应的高水速凝材料强度为 1.8 MPa . 考虑充填体的现场强度一般是实验室强度的 70% 左右, 同时考虑 1.5 倍的安全系数, 确定空巷高水速凝材料充填水灰比 2.251 , 其力学性能: 水灰比为 2.251 , 水用量为 870 kg/m^3 , 高水材料用量 387 kg/m^3 , 当时间为 2 h , $1, 7, 28 \text{ d}$ 时, 单轴抗压强度为 $2.42, 4.74, 6.19, 7.08 \text{ MPa}$.

由图 4 可知, 高水速凝材料具有突出的塑性特征, 在载荷达到峰值强度后, 高水速凝材料并不立即完全破坏丧失承载能力, 而是随着应变的进一步加大, 承载能力缓慢下降, 承载能力随应变增加, 缓慢下降的速度远小于一般混凝土和

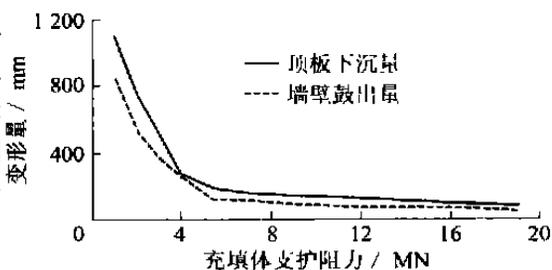


图 3 顶板下沉、墙壁变形与充填体支护阻力的关系
Fig. 3 Relation of roof subsidence and wall deformation as a function of filling body's resistance

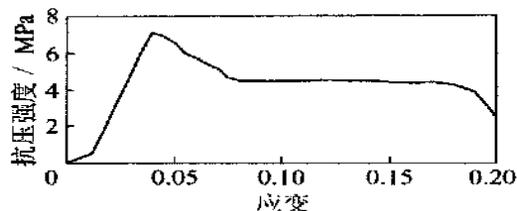


图 4 高水速凝材料全应力-应变曲线
Fig. 4 Full stress-strain curve of the material with high water content

岩石材料，此水灰比条件下高水速凝材料峰值抗压强度为 7.1 MPa，当应变达到 10 % 时，其抗压强度维持在峰值强度的 65 % 以上，应变增加达 18 %，残余抗压强度为峰值的 50 % 以上。

4 工作面过空巷矿压显现

综放工作面通过高水速凝材料充填段，立柱平均工作阻力为 25 MPa；顶、底板移近 200 ~ 300 mm/d；安全阀开启率 < 20 %；顶板状况完整；无墙壁片帮情况；支架完好状况为正常；顶板管理方式为及时移架。工作面通过高水速凝材料充填段矿压显现特征主要有：工作面过空巷过程中，构筑的人造顶板即充填体未发生冒顶及台阶下沉现象，见图 5 (c)，表明充填体有效支护顶板，保持基本顶稳定。高水速凝材料对空巷两帮破碎煤岩体有效加固，揭露充填体前后，未发生片帮，充填体切割面平整，如图 5 (a)，(b) 所示。充填体被压缩 200 ~ 300 mm 仍然能有效维护顶板和墙壁，表明了充填体塑性变形特点和具有良好的让压性能。

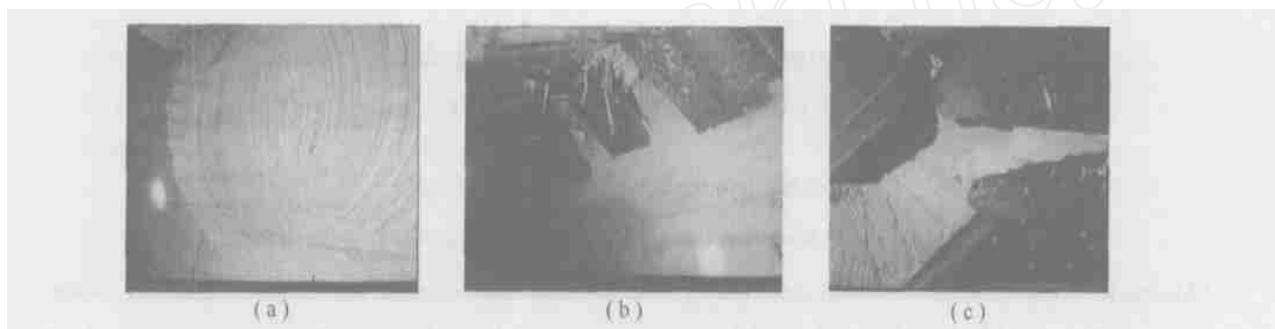


图 5 充填体维护状况

Fig.5 Maintenance condition of the filling body

(a) 充填体墙壁维护状况之一；(b) 充填体墙壁维护状况之二；(c) 充填体顶板维护状况

5 结 语

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分析的力学模型，探讨了空巷基本顶稳定性与空巷支护阻力的关系，在理论上为空巷支护参数的确定提供了依据。应用高水速凝材料充填空巷新技术，同时充填浆液加固空巷两帮破裂煤体，保持空巷围岩稳定，解决了工作面过空巷的技术难题，为工作面快速、安全过空巷提供了新的技术途径。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 袁素正, 陈守义, 孙重兴. 综采工作面过老巷技术应用分析 [J]. 中州煤炭, 2001 (1): 32 ~ 33.
- [3] 王应国. 浅谈 12407 综采工作面过 3 号空巷的方法 [J]. 西山科技, 1999 (2): 4 ~ 5.
- [4] 朱衍利, 牛 伟. 工作面过顶底老巷围岩控制研究 [J]. 山东煤炭科技, 2000 (增刊): 130 ~ 132.
- [5] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [6] 侯朝炯, 易宏伟, 柏建彪. 高水灰渣速凝材料巷旁充填沿空留巷的试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 1995, 23 (2): 15 ~ 18.
- [7] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析 [J]. 煤炭学报, 1994, 19 (6): 557 ~ 563.
- [8] 柏建彪, 侯朝炯, 张长根, 等. 高水材料充填空巷的工业性实验 [J]. 煤炭科学技术, 2000, 28 (10): 30 ~ 31.