

文章编号: 1000-7598 (2012) 05-1462-05

回采巷道片帮机制及控制技术研究

张华磊^{1,2}, 王连国², 秦 昊³

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3. 三一重工股份有限公司, 上海 201400)

摘 要: 根据大采高工作面回采巷道帮部围岩的特点, 采用断裂损伤理论、弹塑性理论建立了巷帮围岩层裂板结构力学模型, 分析了霍州煤电辛置煤矿回采巷道帮部围岩失稳机制, 并将注浆锚索支护方式首次应用于巷道帮部围岩的片帮治理。研究表明: 回采巷道帮部围岩内部存在大量的裂纹, 在高应力的作用下裂纹扩展发育, 巷帮围岩演化为层裂板结构, 当作用在巷帮围岩上的多重支承压力大于最小临界失稳载荷时即发生片帮; 随煤岩体弹性模量、层裂板厚度的增大, 层裂板发生失稳时破坏范围扩大; 采用注浆锚索支护巷帮时浆液能够填满巷帮围岩深部裂隙, 使巷帮围岩成为一个整体, 提高了巷帮围岩支护结构的承载能力, 控制了巷帮围岩片帮的发生。

关 键 词: 片帮; 裂纹; 层裂结构; 注浆锚索

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Study of spalling mechanism and control techniques of mining roadway

ZHANG Hua-lei^{1,2}, WANG Lian-guo², QIN Hao³

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui, 232001, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

3. SANY Heavy Industries Company Limited, Shanghai 201400, China)

Abstract: According to the sides' surrounding rocks characteristics of the mining roadway on the work-face with large mining height, a mechanics model about crack board structure of the sides surrounding rocks is established based on the fracture damage theory and plasticity theory, and the instability mechanism of the surrounding rocks of the mining roadway in the Xinzhong Mine, Houzhou Coal is analyzed, and the grouting-cable method is first used in supporting the surrounding rocks of the sides to limit it to be cut down. The results show that there are a lot of rock fissures in the sides of the back-extraction roadway, and the rock fissures develop under high stress, it makes the surrounding rocks of the sides evolve into the spallation board structure. When the multiple bearing pressure on the sides is greater than the smallest bucking critical load, the parts of sides will be cut down. With the increasing of the elastic modulus and spallation board thickness of coal rockmass, the failure scale of the spallation plate expands when instability occurs. Grouting-cable can be used to fill the deep fractures of the surrounding rocks, makes surrounding rocks as a whole, and improves the bearing capacity of supporting structure around the surrounding rocks of the roadway.

Key words: spalling off; fissures; spallation structure; grouting cable

1 引 言

我国煤层赋存条件复杂多样, 对于中厚煤层而言, 一次采全高综合机械化采煤是开采此类煤层的高效方法之一, 但由于煤层较厚, 回采巷道断面相应比较大, 回采时的矿压显现一般也会比较剧烈, 当回采巷道受到侧向矿山压力与超前支承压力的双

重影响时, 回采巷道的煤帮由于存在节理裂隙和弱面分布以及断层破碎带, 再加上支护强度较弱就容易发生破裂乃至片帮^[1-2]。本文在断裂损伤力学理论的基础上, 对霍州煤电辛置煤矿的 102 大采高综采工作面的回采巷道片帮机制进行了研究, 并提出了新型支护方式——注浆锚索, 成功地抑制了巷道片帮, 保证了工作面的安全高效回采。

收稿日期: 2011-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50874103, No. 50974115); 江苏省自然科学基金项目 (No. BK2008135); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (No. 2010CB226805); 国家重点实验室开放基金项目 (No. SKLGDUEK0905)。

第一作者简介: 张华磊, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事深部岩土力学与巷道支护方面的研究工作。E-mail: hlzhang1122@126.com

2 工程概况

霍州煤电辛置煤矿2采区102工作面主采煤层为2[#]煤,埋深平均为400 m;煤厚为3.60~3.95 m,平均为3.80 m,煤层倾角为3°~8°,平均6°,为大采高工作面。老顶为K8中细砂岩,平均厚度为7 m,坚硬;直接顶为泥岩、砂泥岩,平均厚度为3 m,半坚硬,工作面剖面图如图1所示。运输顺槽断面为矩形布置,宽为4 m,高度为3.5 m,采用锚、梁、网、索联合支护方式,顶板选用的锚杆规格为 $\phi 20 \text{ mm} \times 2\,000 \text{ mm}$,间排距为800 mm $\times$ 800 mm,帮部锚杆规格为 $\phi 18 \text{ mm} \times 1\,800 \text{ mm}$,运输顺槽左边为104工作面采空区,留设有30 m的区段保护煤柱。102工作面回采至停采线600 m时,运输顺槽靠近102工作面一侧帮部变形急剧增加,片帮现象严重,已严重威胁工作面的安全生产。

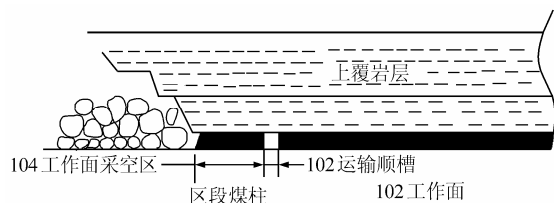


图1 102工作面剖面图

Fig.1 Profile of minning face 102

3 煤壁片帮机制分析

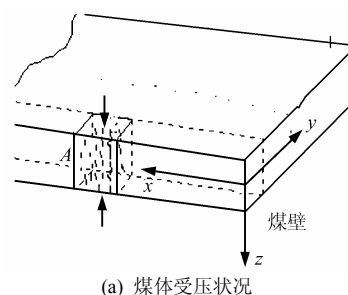
随着煤层巷道的开挖,巷帮围岩由原来的三向应力状态变为二向应力状态,甚至会出现单向应力状态,巷道煤壁附近的煤岩体在顶、底板夹持作用下压应力集中,产生大量的次生裂隙,次生裂隙沿煤壁压应力方向扩展,并与自由表面相互作用,从而加速裂隙的增长与贯通,导致裂纹面发生分离,最终形成围岩体层裂板结构^[3-4]。当煤壁附近煤岩体裂纹贯通形成层裂板结构后,煤岩体的稳定性则主要取决于层裂板结构的稳定性^[5]。

3.1 煤岩体在高应力作用下的破坏

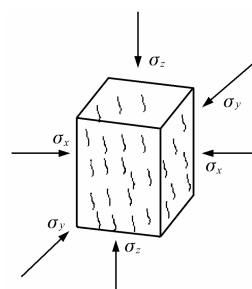
考虑巷道附近煤体受压状况如图2(a)所示,在煤壁附近存在高应力集中区。由于煤岩体内部存在大量次生裂纹,侧向围压为0或很小时,在轴向压力作用下裂纹将沿轴压方向扩展、联合,岩石以轴向劈裂形式破坏;侧向围压适中并低于脆-塑性过渡值时,位错或剪切失效成为岩石破坏的主要形式。在煤矿实际生产中,围岩破坏大多呈现这种破坏方式,这主要是与裂纹扩展和贯通密切相关的。

为便于分析,从煤壁附近取一单元体,如图2(b)所示,其铅垂压应力为 σ_z ,围压为 σ_x 和 σ_y ,其中 σ_y

为支护力。在回采巷道附近,巷帮围岩所受到的为多重采动支承压力的影响,因此,在一般情况下 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 。无支护时,取 $\sigma_y = 0$ 。当煤体单元受到轴向压缩荷载时,随着外载荷的逐渐增大,初始裂纹会开裂并扩展至整个界面;当外载荷继续增大时,裂纹会发生弯折扩展,最后会扩展至外加压应力平行的方向^[6-7]。为了考虑裂纹之间的相互作用^[8-10],本文采用周期性共线裂纹模型(如图3所示),将煤体次生裂纹看作为等长度 a_k 周期 t 的共线滑移裂纹群。虽然该模型对煤体单元实际结构做了较大的简化,但还是能反映煤体的微观性能。



(a) 煤体受压状况



(b) 单元体受力损伤状况

图2 巷道附近煤壁受力及损伤示意图

Fig.2 Stress state and damage of coal wall near roadway

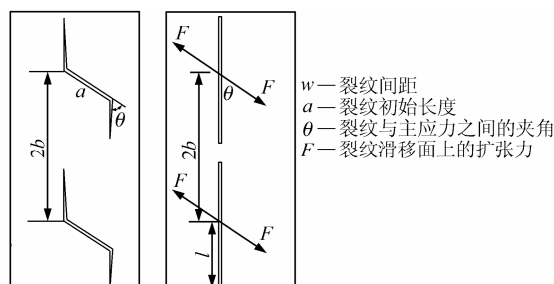


图3 滑移裂纹模型图

Fig.3 Slipping crack model

在远场应力作用下,裂纹尖端的应力强度因子可表示为^[9-10]

$$K_I = \frac{\sigma a_k G(\theta)}{\sqrt{t \sin \left[\frac{\pi(l+l^*)}{w} \right]}} \quad (1)$$

式中: l 为弯折裂纹扩展长度; $l^* = 0.27a_k$ 是为了保证 l 较小时的计算精度; σ 为外荷载; $G(\theta) = \sin^2 \theta \cdot (\cos \theta - \mu \sin \theta)$ 。

可见, 当 $\partial K_I / \partial l > 0$ 时, 裂纹才能发生失稳扩展。在短期外载荷 σ 的作用下, 根据断裂破坏准则 $K_I = K_{Ic}$ (K_{Ic} 为断裂韧度), 可以求得弯折裂纹扩展长度 l 和外载荷的关系, 直到 $l + l^* = w/2$ 。因为在此之后 $\partial K_I / \partial l > 0$, 裂纹发生失稳扩展, 煤体单元发生破坏, 如图 4 所示。

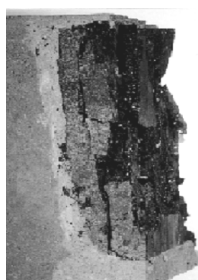


图 4 煤壁层裂结构示意图

Fig4 Coal wall layer-crack plate structure

从整体来看, 沿巷道走向各煤壁片帮过程中的分离层将联合形成层裂板结构, 因此, 可以建立层裂板结构模型进行分析。

3.2 巷道帮部围岩层裂板结构稳定性分析

在煤岩体层裂板结构形成后, 围岩体的稳定性由层裂板稳定性决定。依据霍州矿区辛置煤矿现场资料分析, 片帮位置大多在工作面前方支承压力集中区内, 破坏范围沿巷道长度达 1~2 m, 甚至 5~6 m。根据上述片帮煤岩体层裂结构特征, 建立如图 5 所示的层裂板力学模型, 将层裂板视为高度为 a 、宽度为 b 、厚度为 h 的矩形薄板, 板纵向均布载荷对应应力 σ , 煤壁层裂结构与内侧岩体相互作用力很小, 不计入考虑, 矩形板在 $x=0$ 、 $x=a$ 的边界条件依据顶、底板夹持作用下煤岩体破坏程度而定, $y=0$ 、 $y=b$ 边界为自由边。

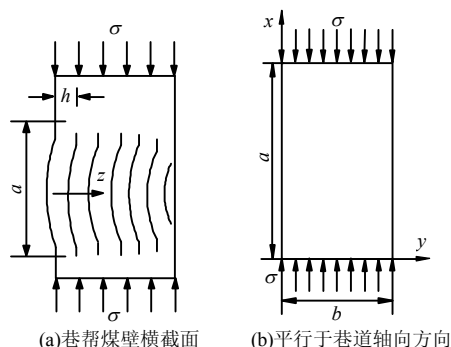


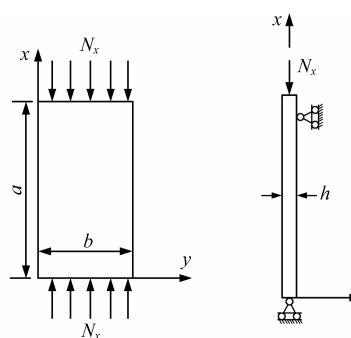
图 5 煤壁层裂板结构的力学模型

Fig.5 Mechanical model of coal wall layer-crack plate

煤岩体在顶、底板夹持力作用下, 巷道顶角、底脚位置煤岩体完整性较差、破损程度高, 当层裂板屈曲变形时, 层裂板边没有侧向变形, 层裂板边挠度为 0, 但可发生转动, 可考虑简化为简支约束; 如煤岩体完整性较好、破损程度较弱, 当层裂板屈曲变形时, 层裂板边挠度变化为 0、转角也为 0, 则可简化为固支。后续层裂板的相关稳定性分析将分别基于层裂板边两端简支、固支约束两种情形。对于具体的回采巷道, 煤帮的完整性、破损程度并不十分明确, 层裂板结构边界的约束条件难以准确判断, 出于安全考虑, 以简支约束模型失稳载荷为临界值, 控制煤岩体层裂结构的承压载荷, 最大程度维护煤岩体静力稳定性。

事实上, 岩板层间存在着一定的剪切力或摩擦力, 并对岩板弯曲产生影响, 但当岩板很薄且处在微弯时, 尤其对于外层煤岩体板, 层间的影响将变得很微弱。为此, 这里忽略煤岩体板层间的剪切力或摩擦力, 并将各薄层考虑为相同的理想板状, 这样多层煤岩体板结构模型可简化为两端简支约束的单板模型。

当层裂板煤岩体完整性较差、破损程度高, 层裂板可简化为两端简支约束, 两端承受均布载荷 $\sigma = N_x$, 如图 6 所示的矩形薄板模型。



(a) 平行于巷道轴向方向 (b) 煤帮横截面(取厚度为 h)

图 6 两端简支约束层裂板力学模型

Fig.6 Layer-crack plate mechanical model with simple support at two ends

依据煤岩体层裂板边界位移及载荷条件, 在载荷作用下, 层裂板屈曲成 m 个正弦半波形状, 设层裂板挠度的表达式形式为

$$\psi = A \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \quad (2)$$

式中: A 为常量; m 为大于 1 的正整数。

能量法及挠曲板的微分方程的积分法均可求解该问题, 现采用积分法求解, 层裂板压曲平衡方程为

$$\frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial y^4} = -\frac{N_x}{D} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中: D 为板的刚度, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$; E 为弹性模量; μ 为泊松比; h 为板的厚度。

挠度表达式(2)满足层裂板简支边 $x=0$ 及 $x=a$ 的边界条件, 将挠度表达式(2)代入式(3), 得到如下常微分方程:

$$A \left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 \sin \frac{m\pi x}{a} - \frac{N_x}{D} A \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} = 0 \quad (4)$$

由于层裂板沿 $y=0$ 及 $y=b$ 两自由边的约束条件恒定满足, 可由式(4)求出 N_x 的表达式, 相应的临界压力就是层裂板的最小失稳临界载荷 $(N_x)_s$, 其表达式为

$$(N_x)_s = \frac{m^2 \pi^2}{a^2} D \quad (5)$$

如已知板的大小及材料的弹性常数, 针对不同的整数 m , 解出 $(N_x)_s$ 对应值, 取 $m=1$ 时层裂板屈曲形状为一个半正弦波, 求得最小失稳临界载荷值 $(N_x)_{\min}$ 。

相应临界最小压应力表达式为

$$(\sigma_x)_{\min} = \frac{\pi^2 h^2 E}{3a^2(1-\mu^2)} \quad (6)$$

式(6)表明, 层裂板失稳临界载荷与煤岩体刚度 D 及层裂板沿煤壁方向高度 a 相关。随着煤岩体弹性刚度增大, 层裂板失稳临界载荷值增大, 不容易发生失稳, 而随着层裂板的高度增大, 失稳临界载荷值减小, 层裂板结构越容易发生屈曲失稳。

当煤岩体层裂板承压载荷 N_x 确定时, 可预计层裂板最小失稳破坏范围:

$$a_{\min} = \pi \sqrt{\frac{D}{N_x}} = \pi \sqrt{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)N_x}} \quad (7)$$

式(7)表明, 层裂板失稳破坏范围受煤岩体弹性材料常数 E 、 μ 及层裂板厚度 h 影响。随煤岩体弹性模量、层裂板厚度的增大, 层裂板发生失稳时破坏范围扩大。

4 片帮支护方案及效果

4.1 片帮支护设计

4.1.1 支护方案

根据巷帮煤体板裂片帮机制, 决定采用注浆锚索治理 102 工作面回采巷道片帮^[11]。大直径树脂端

锚中空注浆强力锚索(见图7)是专门为裂隙体煤巷开发的一种新型的锚索产品, 为巷道支护提供了一种新的有效技术手段。注浆锚索补强支护方案如图8所示。



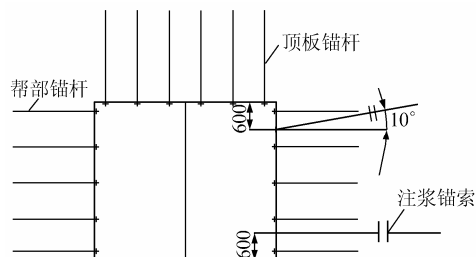
(a) 中空注浆锚索



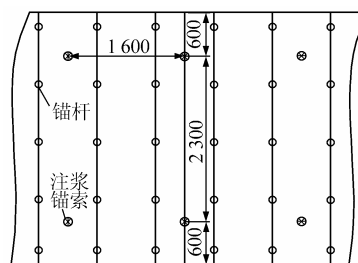
(b) 钢管注浆断面图

图7 注浆锚索图

Fig.7 Grouting cables



(a) 支护断面图



(b) 帮部锚网展开图

图8 支护方案设计图 (单位: mm)

Fig.8 Design of support scheme (unit: mm)

4.1.2 支护参数

注浆锚索 钢绞线规格为 $\phi 22 \text{ mm} \times 7\,500 \text{ mm}$, 在巷道靠近工作面侧的帮部位置施工两排注浆锚索, 其中一排距离顶板为 600 mm, 与水平方向呈 10°

夹角施工;另一排锚索在距离巷道底板 600 mm 位置处呈水平方向施工,间排距为 2 300 mm×1 600 mm。

4.2 支护效果

利用全长锚固内注浆锚索,锚索中上部的浆液能够深入煤岩中较破碎的地带,解决了深部破碎煤岩体无法有效注浆的问题;浆液能够填满煤岩体中比较大的裂隙,使巷道围岩成为一个稳定的整体。注浆使得支护结构面尺寸加大,围岩作用在支护结构上的荷载所产生的弯矩减小,从而降低了支护结构中产生的拉应力和压应力;注浆锚索能使巷道载荷体部分转化为承载体结构,提高了支护结构的承载能力和最小临界失稳载荷,增强了巷帮的抗片帮能力。

通过现场支护实践与监测,此支护技术能够有效地控制巷道帮部围岩的变形破坏,特别是在巷道经受临近工作面侧向支承压力与本工作面超前支承压力的双重作用时。注浆锚索能够有效地控制巷道片帮,降低两帮位移量,如图 9 所示。支护效果非常显著,保证了工作面的顺利回采。

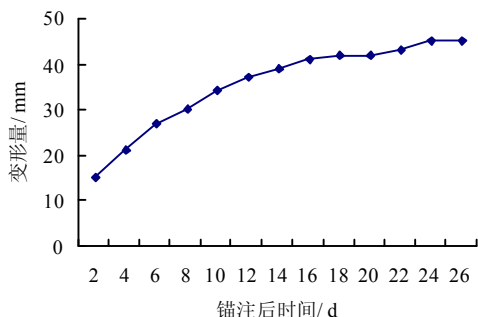


图 9 支护后巷帮位移变化图

Fig.9 Displacement change of roadway slope after supporting

5 结 论

(1) 回采巷道的围岩尤其是帮部煤岩体,含有大量的原生裂隙,当受到多重采动支承压力影响时,在高应力的作用下煤岩体裂纹贯通,形成层裂板结构。

(2) 通过构建巷道帮部围岩层裂板结构力学模型,得到了巷道失稳片帮时的临界载荷;随煤岩体弹性模量、层裂板厚度的增大,层裂板发生失稳时破坏范围扩大。

(3) 根据山西霍州煤电辛置煤矿 2 采区 102 回采巷道片帮特点,选用注浆锚索对巷道帮部围岩进行加固,浆液填充了煤岩体裂隙,提高了巷帮围岩的刚度,巷帮围岩抗失稳能力得到了提升,巷道片

帮情况明显得到了好转,保证了工作面的安全高效回采。

参 考 文 献

- [1] 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, 2004: 173—176.
- [2] 刘常友,黄炳香,常兴民,等. 极软厚煤层大采高台阶式综采端面围岩稳定性控制技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 734—739.
LIU Chang-you, HUANG Bing-xiang, CHANG Xing-min, et al. Study on tip-to-face coal and rock stability control of fully mechanized stepped large cutting height mining in extremely soft thick seam[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(6): 734—739.
- [3] 秦昊. 巷道围岩失稳机制及冲击矿压机理研究[博士学位论文 D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [4] 李强,杨庆,栾茂田,等. 曲线翼型裂纹扩展路径理论分析及试验验证[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 345—349.
LI Qiang, YANG Qing, LUAN Mao-tian, et al. Study of curved wing crack path by theory and testing methods[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 345—349.
- [5] 张晓春, 缪协兴, 杨挺青. 冲击矿压的层裂板模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程报, 1999, 18(5): 507—511.
ZHANG Xiao-chun, MIAO Xie-xing, YANG Ting-qing. The layer-crack-plate model and testing study of the rockburst in mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(5): 507—511.
- [6] 邓华锋, 李建林, 刘杰, 等. 考虑裂隙水压力下的岩体压剪裂纹扩展规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 297—302.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, LIU Jie, et al. Research on propagation of compression shear fracture in rocks considering fissure water pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Sup.1): 297—302.
- [7] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 184—188.
- [8] 李文伟, 郑丹. 混凝土在长期持续载荷下的损伤分析[J]. 科技导航, 2009, (5): 60—64.
LI Wen-wei, ZHENG Dan. Damage of concrete under long-term sustained loading[J]. *Science & Technology*, 2009, (5): 60—64.
- [9] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. *Acta Metall*, 1986, 34(3): 497—510.
- [10] HORII H, NEMAT-NASSER S. 1986. Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 1986, 319(1549): 337—374.
- [11] 王连国, 张健, 李海亮. 软岩巷道锚注支护结构蠕变分析[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 607—612.
WANG Lian-guo, ZHANG Jian, LI Hai-liang. A creep analysis of bolt-grouting support structure within a soft rock roadway[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(5): 607—612.