

# 煤层巷道底板动态破坏机理及控制技术

李宝富<sup>1</sup> 魏向志<sup>2</sup> 任永康<sup>2</sup> 李小军<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院 河南 焦作 454000; 2. 义马煤业集团股份有限公司 千秋煤矿 河南 义马 472300)

**摘要:** 基于对煤层巷道底板岩层动态破坏发生机理的分析,建立巷道底板岩层屈曲破断力学模型。研究表明水平应力的大小是影响巷道底板岩层稳定性的最主要因素,并提出巷道底板水平应力的计算方法。通过理论计算得出最大水平应力作用下,巷道底板岩层能发生屈曲破坏的最大分层厚度和破坏范围。研究结果表明增强巷道底板支护强度是控制底板岩层产生动态破裂和强烈底鼓的有效措施,采用锚喷+36U钢+防冲支架支护方式,巷道变形量减小50%左右,巷道底鼓现象得到有效控制。

**关键词:** 底鼓; 岩层屈曲破断; 防冲支架; 底板支护强度

中图分类号: TD355 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2013)10-0034-04

## Dynamic Failure Mechanism and Control Technology of Roadway Floor

LI Bao-fu<sup>1</sup>, WEI Xiang-zhi<sup>2</sup>, REN Yong-kang<sup>2</sup>, LI Xiao-jun<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering Henan Polytechnic University Jiaozuo 454000, China;

2. Qianqiu Mine, Yima Coal Industry Group Co., Ltd. Yima 472300, China)

**Abstract:** Based on analysing coal seam floor dynamic failure mechanism, this paper established strata buckling fracture mechanics model. Research showed that main influence factors on the stability of roadway floor strata were horizontal stress and has proposed the calculating method for floor horizontal stress. According to theoretical calculation obtained the maximum delayering thickness and damage range for the floor buckling under the action of the maximum horizontal stress. Research results showed that strengthened the floor support strength could effectively control floor heave and dynamic failure shotcrete and 36U profile steel and fender support way could reduce roadway deformation about 50% and effectively controlled floor heave.

**Key words:** floor heave; strata buckling fracture; fender support; floor support strength

## 0 引言

随着我国煤炭开采向深部发展,巷道底鼓现象已经成为煤矿中比较常见的矿压显现现象,统计资料表明,在巷道顶底板移近量中有2/3~3/4是由底鼓造成的,底鼓直接影响煤矿的运输、通风、行人,制约着矿井的安全高效开采<sup>[1-2]</sup>。目前对于巷道底鼓的成因、机理和防治技术等方面的研究相对较多。文献[1]在分析采动巷道底板变形破坏特征的基础上,揭示了巷道底板浅部鼓起、深部下沉的底鼓机理,并提出采动巷道底鼓控制技术。文献[3]采用数值模拟方法研究了泥化巷道开挖过程中底板应力分布和破坏情况,确定泥化巷道底板合理加固深度,并

提出了底板锚注一体化加固技术。文献[4]将深井软岩巷道底鼓归结为挤压流动性底鼓、挠曲褶皱性底鼓、剪切错动性底鼓、遇水膨胀性底鼓4种类型,并提出相应的防治方法。文献[5]在对深部巷道底鼓影响因素理论分析的基础上,提出超挖锚注回填技术来控制深部巷道底鼓。文献[6]通过对采空侧巷道底鼓机理的研究,采用中空锚杆注浆与高强锚杆锚注联合支护技术治理采空侧巷道底鼓。文献[7]研究表明采用“刚让抗”强软相间的多级支护结构,可有效控制巷道的严重底鼓变形。文献[8]通过对巷道底鼓的治理实践表明,分层注浆结合锚杆支护能有效治理底鼓。关于煤层底板破坏深度的研究中,对于巷道底板破坏深度的研究相对于工作面较

收稿日期: 2013-05-25; 责任编辑: 杨正凯

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41204035)

作者简介: 李宝富(1977—),男,河北秦皇岛人,讲师,博士研究生。Tel: 13603445349, E-mail: libf@hpu.edu.cn

引用格式: 李宝富,魏向志,任永康等.煤层巷道底板动态破坏机理及控制技术[J].煤炭科学技术,2013,41(10):34-37.

少。因此有必要结合具体的工程地质条件,对巷道底板岩层破坏的成因、机理及深度进行研究。文献[9]采用解析法对承压水上开采时工作面底板破坏深度进行研究,理论计算与实测结果较相近。文献[10]通过分析电阻率变化与岩体应力变化的关系,得到工作面底板受开采扰动的动态变化规律。文献[11]采用四极对称电剖面法观测工作面底板破坏深度,该方法能够获得有效的底板破坏深度数值。千秋煤矿目前正在回采的21141综放工作面下平巷在掘进和工作面回采过程中,发生数起巷道底板瞬间动态开裂鼓起现象,最大底鼓量达2 m以上,并诱发巷道底板冲击地压。基于此,笔者通过对千秋煤矿特厚煤层巷道底板岩层动态破坏机理的研究,提出高应力状态下弱强度层状底板岩层底鼓的控制技术。

## 1 巷道底板岩层动态破坏机理

### 1.1 底板岩层屈曲破断力学模型

巷道开挖后,巷道底板表面岩层由三向应力向单向应力状态转变,因此水平应力的大小成为影响巷道底板岩层稳定性的最主要因素。当底板的水平应力较大但尚未到底板岩层破断极限时,底板岩层会产生局部变形破裂并缓慢产生底鼓现象;当底板的水平应力到底板岩层的单轴抗压强度时,在一定外界扰动影响下,巷道底板表面岩层甚至下部岩层会突然产生层裂屈曲破断现象,导致巷道底板瞬间动态开裂并大量鼓起,严重时会诱发底板冲击地压。当底板岩层承受的轴向力(即水平应力)超过其允许限度后,会因底板岩层失稳而引起强烈底鼓、底板岩层破裂等严重后果,产生底板岩层层裂屈曲破坏现象。底板岩层层裂屈曲破坏的力学模型如图1所示。模型中平面直角坐标系,原点位于梁的左端中部。由图1可知,底板岩层梁为两端固支梁,梁承受自重均匀布载荷 $q$ 及水平轴向力 $N$ 作用,其中: $N_A, N_B$ 为梁两端支反力; $M_A, M_B$ 为梁两端的弯矩; $\gamma$ 为梁的平均容重; $m_1$ 为梁的高度; $\theta$ 为梁的截面转角,以逆时针为正; $l$ 为巷道宽度(梁的长度)。

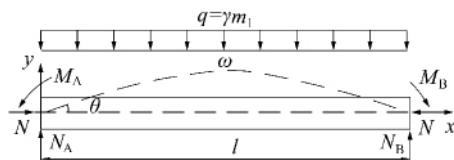


图1 底板岩层层裂力学模型

根据材料力学梁弯曲的挠曲线方程,建立底板岩层的挠曲变形方程<sup>[12~14]</sup>:

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = -M(x)/(EI) \quad (1)$$

其中: $\omega$ 为梁的挠度; $E$ 为梁的弹性模量; $I$ 为梁的惯性矩, $I = bm_1^3/12$ , $b$ 为梁的宽度; $M(x)$ 为距离原点 $x$ 处截面的弯矩,顺时针方向为正。底板岩梁达到屈曲时的最小轴向应力 $N_{cr}$ 为

$$N_{cr} = \pi^2 Em_1^3/(12l^2) \quad (2)$$

由式(2)可知,使巷道底板岩层梁结构发生屈曲破断的最小轴向力影响因素主要有巷道宽度、底板岩层的厚度和弹性模量。

### 1.2 巷道底板岩层破坏分析

1) 工程概况。千秋煤矿正在开采的21141综放工作面,位于21采区下山西翼,工作面开切眼西为矿井边界煤柱,东为21采区下山煤柱,北邻21121工作面(已采),南邻21161工作面(未采)。21141综放工作面与南邻的21161综放工作面,处于两侧为采空区的270 m大孤岛煤柱中,21141工作面下平巷正好处于孤岛的中央位置。21141综放工作面走向长度1484.7 m,倾斜长度130.0 m,平均开采深度为684 m,开采2号煤层平均厚度25 m,工作面采用走向长壁后退式综采放顶煤采煤方法,全部垮落法管理顶板。21141工作面上、下平巷沿煤层走向布置,工作面开切眼沿煤层倾向布置。工作面上平巷为沿空掘巷,下平巷净断面17.8 m<sup>2</sup>,净宽5.2 m,净高3.7 m,沿底掘进,留底煤1~2 m。2号煤层直接顶为泥岩(23.02~27.63 m);直接底自上而下为煤矸互层(0~4.61 m)、炭质泥岩(0.10~0.42 m)、泥岩(0.30~0.77 m)、含砾泥岩(0~3.39 m)、粉砂岩(0~1.10 m),各岩层分布不稳定。在距离煤层底板4~6 m有1层厚度为2.5~3.7 m的细砂岩,厚度变化是从西向东变薄。

2) 数值模拟分析。按21141综放工作面实际开采条件建立模型,模拟21141工作面平均采深684 m,2号煤层底板垂直应力为17.1 MPa。模型总共划分为53 040个单元格,58 996个网格节点。模型长×宽×高为1 700 m×960 m×230 m,模型上部施加补偿垂直应力。模型的力学参数按实验室测定值或经验数据赋值。通过对21141工作面下平巷围岩掘进和回采过程中的受力状态进行数值模拟(图2),确定巷道围岩垂直应力 $\sigma_y$ 为30~45 MPa。

3) 理论分析。巷道底板水平应力 $\sigma_x$ 为

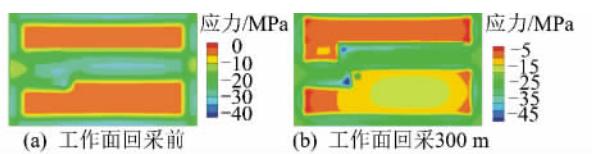


图2 21141工作面垂直应力分布

$$\sigma_x = \sigma_s + \sigma_{yx} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_s$  为水平构造应力;  $\sigma_{yx}$  为由垂直应力集中引起的水平应力。

根据千秋煤矿 21 采区地应力测试结果可知,该区最大水平应力(22.87 MPa)是最大垂直应力(19.54 MPa)的 1.17 倍,因此水平构造应力侧压系数  $\lambda_1 = 1.17$ ,由此得出水平构造应力  $\sigma_s$  的计算式为<sup>[15]</sup>

$$\sigma_s = \lambda_1 \sigma_y \quad (4)$$

$$\sigma_y = \gamma H$$

其中:  $H$  为巷道埋深,取 684 m;  $\gamma$  取 25 kN/m<sup>3</sup>。计算可知  $\sigma_y = 17.10$  MPa, 则  $\sigma_s = 20.01$  MPa。由垂直应力集中引起的水平应力  $\sigma_{yx}$  为

$$\sigma_{yx} = \lambda_2 \sigma_y \quad (5)$$

其中:  $\lambda_2$  为水平应力侧压系数  $\lambda_2 = \mu / (1 - \mu)$ ;  $\mu$  为岩层泊松比,取 0.3。计算可得由垂直应力集中引起的水平应力最大值为 19.35 MPa。则巷道底板岩层最大水平应力为 39.36 MPa。由此可计算底板岩层能屈曲破断的最大分层厚度,计算结果见表 1。

表1 底板岩层屈曲最大破断厚度

岩层	弹性模量/GPa	岩层厚度/m	最大破断厚度/m
2号煤层	2.86	1.00~2.00	0.76
煤矸互层	13.00	0~4.61	0.46
炭质泥岩	15.00	0.10~0.42	0.44
泥岩	25.00	0.30~0.77	0.37
含砾泥岩	20.00	0~3.39	0.40
粉砂岩	35.00	0~1.10	0.33
细砂岩	40.00	2.50~3.70	0.32

2号煤层为黑色块状及粉末状,结构复杂,含夹矸 4~7 层,煤体干燥,疏松破碎,下平巷底板留有的 1~2 m 底煤实际分层厚度通常会小于 0.5 m,因此巷道底板所留的底煤破坏所需的水平挤压力也就相对较小。在巷道底板水平挤压应力的作用下,2号煤层底煤将不断发生破坏,并克服底板支护结构体的约束作用,从而产生底鼓、巷道变形量增加现象。如在外界扰动作用下,巷道底板水平挤压应力瞬间

增大达到底煤层的破坏强度,巷道底板支护结构体的约束力抵挡不住该水平挤压应力时,巷道底板的 2 号煤层会突然大范围破坏并产生较大底鼓量,甚至诱发底板冲击地压。设巷道底板所留底煤已处于极限屈曲平衡或破坏状态,已和下部岩层产生离层现象。当煤矸互层分层厚度均小于 0.46 m 时,该岩层易受水平挤压力而逐层发生破断;当煤矸互层分层中的某个分层厚度较大,水平挤压力不能使该分层产生屈曲破断时,该分层会对下部岩层产生约束作用,该分层及下部岩层能保持稳定,该分层上部岩层能产生突然层裂破坏造成底板大量鼓起。

## 2 巷道底板岩层控制技术

### 2.1 提高巷道底板约束强度的必要性

煤岩体除巷道的表面处于单向或双向受力外,巷道内部岩体多处于三向受力状态之下,因此研究煤样三轴应力状态的强度和变形特征,对巷道的支护设计和破坏机理的探讨都有重要意义。2号煤层底煤(2—3号煤层)单轴抗压强度平均值为 18.61 MPa。煤样承载能力随着围压提高而增大,而且围压从 0 增至 5 MPa 时,煤样抗压强度增加约 3.2 倍,故此巷道底板支护强度增加较小的值,底板所留底煤破坏所需水平应力就要相应增加较大的值。因此增加巷道底板支护强度是控制强度较弱层状底板产生动态破裂底鼓的有效措施。

### 2.2 巷道底板支护技术

21141 综放工作面下平巷采用锚喷+36U 钢支护时,巷道底板支护强度处于无支护或弱支护状态,巷道底板易突发断裂底鼓现象。巷道底板动态开裂底鼓现象已给安全生产造成严重影响。千秋煤矿采用巷道防冲支架配合原有支护方式增强巷道支护强度,锚喷+36U 钢+防冲支架支护方式如图 3 所示。采用 φ22 mm × 2 500 mm 全螺纹锚杆,锚固段长度 500 mm,间排距 600 mm × 600 mm; 采用 φ17.8 mm ×

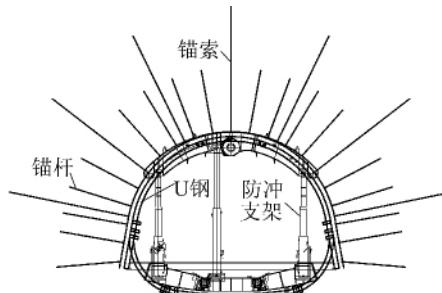


图3 锚喷+36U钢+防冲支架支护示意

8 000 mm 锚索, 锚固段长度 750 mm, 间排距 1 500 mm × 1 200 mm; 防冲支架包括顶梁、底座和千斤顶立柱, 该防冲支架可调整安装高度, 对巷道变形适应性强, 支护强度大, 在冲击地压发生时能够有效抵御和缓冲大部分冲击能量, 支架安装时顺巷道走向正中安装, 将防冲支架顶梁搁到 U型棚顶梁上, 支架间距为 2 400 mm。该联合支护方式使得巷道底板支护强度得到较大提高, 巷道高度的平均变形量仅为原来的 50% 左右, 巷道底鼓现象得以有效控制。

### 3 结语

在对煤层巷道底板岩层屈曲破断力学模型分析的基础上, 得出巷道底板岩层动态破坏机理。研究结果表明水平应力的大小是影响千秋煤矿 21141 综放工作面下平巷底板岩层稳定性的主要因素。当巷道底板最大水平应力能使底板岩层的最大分层厚度发生屈曲破断时, 巷道底板岩层能产生突然层裂破坏造成底板强烈底鼓。控制弱强度层状底板岩层产生动态破裂底鼓现象的有效措施是增加巷道底板支护强度。

#### 参考文献:

- [1] 柏建彪, 李文峰, 王襄禹, 等. 采动巷道底鼓机理与控制技术 [J]. 采矿与安全工程学报 2011, 28(1): 1–5.
- [2] 张科学, 刘向增, 郭 坤, 等. 采动影响下回采巷道底鼓控制技术 [J]. 煤矿安全 2011, 42(7): 65–68.
- [3] 阎甲广, 张 农, 李桂臣, 等. 泥化巷道底板控制技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报 2011, 28(3): 356–360.
- [4] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2004, 23(14): 2396–2401.
- [5] 常聚才, 谢广祥. 深部岩巷底鼓机理及底板超挖锚注回填技术 [J]. 采矿与安全工程学报 2011, 28(3): 361–364.
- [6] 初明祥, 王清标, 夏均民. 采空侧巷道底鼓形成机制与防治技术研究 [J]. 岩土力学 2011, 32(S1): 413–417.
- [7] 张后全, 韩立军, 贺永年, 等. 构造复杂区域膨胀软岩巷道底鼓控制研究 [J]. 采矿与安全工程学报 2011, 28(1): 16–21.
- [8] 孟祥阁, 谢文兵, 荆升国, 等. 深井软岩巷道底鼓分层锚注支护技术 [J]. 煤炭科学技术 2011, 39(9): 22–25.
- [9] 冯 磊, 赵光明, 孟祥瑞. 承压水上采煤底板破坏规律的解析法计算及应用 [J]. 煤炭科学技术 2011, 39(9): 13–16.
- [10] 孙希奎, 许进鹏, 杨圣伦, 等. 电阻率法动态监测煤层底板破坏变形规律研究 [J]. 煤炭科学技术 2013, 41(1): 113–115.
- [11] 王家臣, 许延春, 徐高明, 等. 矿井电剖面法探测工作面底板破坏深度的应用 [J]. 煤炭科学技术 2010, 38(1): 97–100.
- [12] 王本强. 构造应力下坚硬底板冲击地压机理分析 [J]. 煤炭科技 2009(1): 79–83.
- [13] 徐学峰. 煤层巷道底板冲击机理及其控制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学 2011.
- [14] 潘立友. 深井冲击地压及其防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997: 20–22.
- [15] 张 寅. 强冲击危险矿井冲击地压灾害防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社 2010.

#### (上接第 33 页)

- [3] 袁 亮. 深井巷道围岩控制理论及淮南矿区工程实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社 2006.
- [4] 李书民, 孙小岩, 白杨杨. 深部回采巷道锚网索联合支护技术实践 [J]. 煤炭科学技术 2012, 40(8): 38–41.
- [5] 王 振, 刘 超, 张建新, 等. 深部软岩底鼓巷道锚注联合支护技术 [J]. 煤炭科学技术 2012, 40(8): 24–25.
- [6] 牛双建, 靖洪文, 张忠宇, 等. 深部软岩巷道围岩稳定控制技术研究及应用 [J]. 煤炭学报 2011, 36(6): 914–916.
- [7] 曾明胜. 深部综放工作面巷道强力超前支护系统设计 [J]. 煤炭科学技术 2011, 39(6): 26–27.
- [8] 孟祥阁, 谢文兵, 荆升国, 等. 深井软岩巷道底鼓分层锚注支护技术 [J]. 煤炭科学技术 2011, 39(9): 22–25.
- [9] 赵明洲, 张继华, 汪华君. 深井准备巷道底鼓成因及其防治对策 [J]. 煤炭科学技术 2011, 39(10): 26–28.
- [10] 李 敏, 李光锦, 陈 斌, 等. 桃园煤矿深部巷道二次加强支护技术 [J]. 煤炭科学技术 2008, 36(7): 16–18.
- [11] 何满潮, 李 乾, 蔡 健, 等. 兴安煤矿深部返修巷道锚网索耦合支护技术 [J]. 煤炭科学技术 2006, 34(12): 1–4.
- [12] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力在锚杆支护中的作用 [J]. 煤

- 炭学报 2007, 32(7): 673–678.
- [13] 康红普, 王金华, 林 健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用 [J]. 煤炭学报 2007, 32(12): 1233–1238.
- [14] 于 斌. 高强度锚杆支护技术及在大断面煤巷中的应用 [J]. 煤炭科学技术 2011, 39(8): 5–8.
- [15] 盛天宝, 王俊臣, 郭建周, 等. 软岩复合顶板突出煤层巷道耦合支护技术研究与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(3): 47–49.
- [16] 孙利辉, 赵明洲, 梁 苗, 等. 郭二庄矿极软煤层中空注浆锚索联合支护技术 [J]. 煤炭科学技术 2009, 37(5): 18–20.
- [17] 盛天宝, 王俊臣, 郭建周, 等. 软岩复合顶板突出煤层巷道耦合支护技术研究与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(3): 47–49.
- [18] 靖洪文, 李元海, 赵保太, 等. 软岩工程支护理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2008: 236–237.
- [19] 李国峰, 蔡 健, 郭志滩, 等. 深部软岩巷道锚注支护技术研究与应用 [J]. 煤炭科学技术 2007, 35(4): 44–45.
- [20] 杨本生, 刘 超, 赵明洲, 等. 锚梁网索 + 中空注浆锚索联合支护技术 [J]. 煤炭工程 2009(12): 38–40.