

# 深井巷道挠曲褶皱性底鼓机理与控制技术

郑西贵 刘 娜 岳 炜

(山西兰花科技创业股份有限公司大阳煤矿分公司)

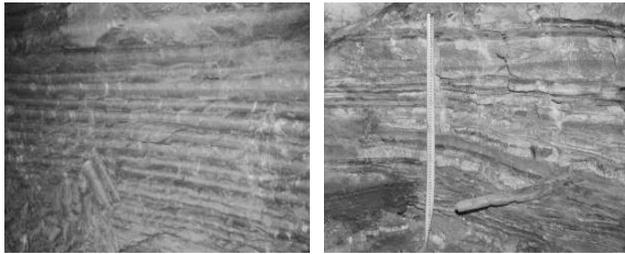
**摘 要:**针对煤矿深部层状岩体挠曲褶皱性巷道底鼓的类型,建立了此类巷道底鼓的底板滑移线与速度场模型,分析了底板应力区影响范围与巷道宽度和岩石的内摩擦角的关系,并解出了巷道底角锚杆和反底拱控制底板的支护参数,形成了反底拱锚固梁控制技术。通过分析反拱梁的受力,给出了布置锚杆、锚索间排距等支护参数的计算方法。工程实验表明,当深部关键巷道的底板支护强度控制在 $0.4\text{MPa}$ 时,反拱梁能够实现底板的长时稳定,治理完成 $2a$ 后巷道的底鼓量小于 $10\text{mm}$ 。

**关键词:**深井;挠曲褶皱性;层状岩体;底鼓机理;反底拱;锚固梁

## 1 引言

巷道底鼓是制约煤矿正常生产和运输安全的重要因素之一,底板鼓起数 $10\text{cm}$ 或超过 $1\text{m}$ 的现象在煤矿领域十分普遍,进入深部开采后,底鼓造成返修

巷道的工程量甚至超过新掘巷道。受高地压、强动压、围岩性质、岩石力学行为、敞底或底板支护强度不足、膨胀岩和岩石蠕变等因素影响,底鼓的机理也复杂多样,但在薄层状煤系地层中开掘的静压巷道底鼓多表现为沿巷道中部渐次挠曲,并发展成为褶皱状结构,造成巷道生产系统失效,如图1所示。



(a)迎头揭露的层状岩体



(b)底鼓造成的运输系统失效

图1 深部巷道底鼓实照

目前针对底鼓的机理和控制手段问题,已经进行了大量的有益试验研究,如流动性、褶皱和剪切错动等底鼓机理,控制手段有反拱封闭棚、锚注和底板施工锚杆等方式。也有学者针对加固两帮或顶板来提高底板稳定性进行研究,但在深部开采中,针对层状煤系地层的底鼓机理,对底板支护强度、锚杆与锚索的协同承载支护参数以及反拱高度的确定仍是底板控制的主要因素。

## 2 挠曲褶皱性巷道底鼓机理

### 2.1 巷道底板滑移线场

研究表明:煤矿水平薄层状的静压巷道底鼓机理多表现为挠曲褶皱性,永久性的巷道受原岩应力影响会产生弹塑性变形,如图2,底板滑移线场和速度场在层状岩体发生挠曲变形后也随之发生变化,其演化规律十分复杂。

目前煤矿巷道断面形状多为直墙半圆拱型,巷道开挖以后,底板受到来自帮部松动围岩的影响,首

先从巷道底角A、B两点进入到塑性极限状态,然后波及至整个底板围岩。如图2所示,图中上覆岩压力 $P_s=\gamma H$ ,其中 $\gamma$ 为岩石容重, $N/m^3$ ;H为巷道的埋藏深度,m; $b$ 为围岩的松动宽度,m。

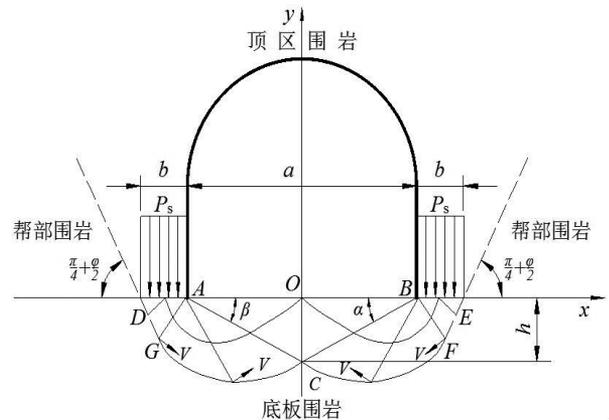


图2 巷道底板滑移线与速度场模型

### 2.2 巷道底板极限载荷和速度场

由图2及各区的应力状态,得出底板在不施加反底拱时,保持底板围岩不发生明显底鼓的极限承载力 $q$ 为:

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot c \cdot \cot \varphi [\exp(\pi \cdot \cot 2\mu) - 1] \quad (1)$$

在极限载荷作用下,一般地基条形基础下速度场的移动规律为:在ADG、BEF区与水平线X轴分别成 $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ 和 $(-\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$ 方向以速度V做整体移动,AGC、BFC区分别绕A、B两点与径向正交做整体移动,ABC区域则是垂直向上运动,底板岩层的速度场如图1所示。

### 2.3 底角锚杆的排距、锚杆长度

根据朱百里等所著《计算土力学》得到的确定原则是锚杆对围岩产生的绕流阻力必须大于或等于保持BEF、ADG区极限平衡所需的绕流阻力,底板方可维持平衡,根据钟新谷等相关学者推导的保持底板

稳定沿巷道轴向所需的锚杆排距为:

$$N = \frac{(\cot \varphi) P_s \cdot c_1 \cdot D}{2(P_s - q) \sin^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})} \quad (2)$$

式中  $c_1$  为岩石的阻力系数;  $D$  为锚杆直径。

要使布置在底角  $BF$ 、 $AG$  位置的锚杆发挥作用, 设计锚杆长度至少应大于  $BF$ 、 $AG$  的长度, 根据抗滑桩设计原理, 并考虑安全因素, 给予一定的富裕系数, 按 2 倍  $BF$ 、 $AG$  的长度设计, 得到锚杆的长度为:

$$L = \frac{a \cdot e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi}}{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})} \quad (3)$$

从图 2 可得出  $CF$  线为对数螺线, 利用对数螺线的性质可推导出巷道帮部松动宽度  $b$  与巷道宽度  $a$  有如下关系:

$$b = a \cdot \tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}) \cdot e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi} \quad (4)$$

巷道底板岩层鼓起累计高度与岩石的内摩擦角和巷道宽度之间的关系如下:

$$h = \frac{a}{2} \cdot \tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}) \quad (5)$$

由以上的分析容易得出巷道底板应力区域的划分和岩层的移动方向, 进而得到巷道底鼓底角锚杆设计的参数, 以及巷道两帮松动范围的宽度  $b$  和巷道宽度  $a$  之间的关系, 确定了参与底鼓的巷道底板岩层的破碎深度  $h$ , 因此只有根据底板的受力规律, 制定出比较合理的底鼓治理方案或措施, 方能有效地控制巷道底板的破坏范围。

### 3 反底拱锚固梁的力学模型及参数设计

#### 3.1 反底拱锚固梁力学模型

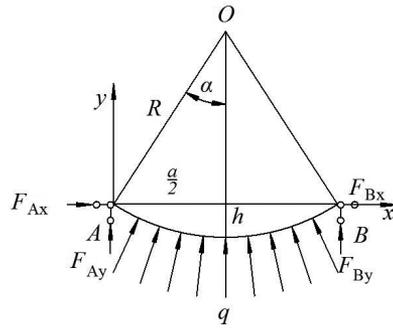


图 3 反底拱力学模型

由前文的巷道底板滑移线理论分析可得, 参与巷道底鼓的拱高为  $h = \frac{a}{2} \cdot \tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$ , 假设图 3 中的反拱半径为  $R$ ,  $AB$  长度为巷道的宽度  $a$ ; 由几何关系可得:

$$\begin{cases} R - y = h \\ \frac{a^2}{4} + y^2 = R^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y = \frac{a^2 - 4h^2}{8h} \\ R = \frac{a^2 + 4h^2}{8h} \end{cases} \quad (6)$$

#### 3.2 反底拱锚固梁锚杆索间距分析

底角布置锚杆索的反拱可提供的支护强度分析如下:

假设锚杆索间距为  $s$ , 反底拱弦长为巷道宽度  $a$ , 则布置锚杆索个数为  $m = a/s$ ;

反拱两端垂直支反力为:

$$F_{Ay} = F_{By} = \frac{1}{2} [uF_b + zF_c - qa] \quad (7)$$

式中  $u$  为锚杆的数量, 个,  $u = 1/2(m-1)$ ;  $z$  为锚索的数量, 个,  $z = 1/2(m+1)$ ;  $F_b$  和  $F_c$  分别为锚杆和锚索施加给底板岩层的约束力,  $kN$ ;  $a$ —巷道宽度,  $m$ ;  $q$  为反拱梁上承受的均布力, 一般由地应力测试所得,  $kN/m$ ; 换算公式为  $q = \sigma_{zz} \cdot S_b/a$ ,  $\sigma_{zz}$  为底板深部垂直应力,  $MPa$ ;  $S_b$  为反拱所支护的面积,  $m^2$ 。

首先在均布载荷和锚杆索的协同作用下, 运用叠加原理得, 在  $\alpha$  角处, 弯矩方程为:

均布载荷作用弯矩:

$$M_1 = \int_0^\alpha qR \sin\theta (Rd\theta) = qR^2(1 - \cos\alpha) \quad (8)$$

支反力作用弯矩:

$$M_2 = F_{Ay}R \sin\alpha - F_{Ax}R(1 - \cos\alpha) \quad (9)$$

锚杆索提供的拉力作用弯矩:

$$M_3 = \left[ F_{bc} \left( R \sin \frac{\alpha}{4} + s \right) + F_{bc} R \sin \frac{\alpha}{4} \right] \quad (10)$$

把上述三式相加得到总的弯矩:  $M_t = M_1 + M_2 + M_3$ , 要使反拱梁抵抗局部非均匀载荷不致迅速破坏, 必须考虑一定的富裕系数, 使  $\xi M_t \leq [M]$ , 式中的  $\xi$  为富裕系数, 一般取 0.1~0.3;  $[M]$  为反拱梁材料的许可弯矩, 单位  $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

上述三式所有变量均已知, 只有锚杆索间距  $s$  未知, 由  $\xi M_t \leq [M]$  式解出:

$$s \geq \frac{M_1 + M_2 - [M] - R \sin \frac{\alpha}{4} (F_b + F_c)}{F_b} \quad (11)$$

要想能够控制底板给反拱施加的反力  $q$ , 锚杆的间距  $s$  必须满足上式的要求。并由材料力学的知识可得, 两排反拱梁间加强筋的强度必须能够满足把反拱之间的底板岩层压力传递给相邻的反底拱, 一般用直径在 15~40 mm 范围内的钢筋, 以达到能够均衡反底拱的受力。

### 3.3 支护强度设计

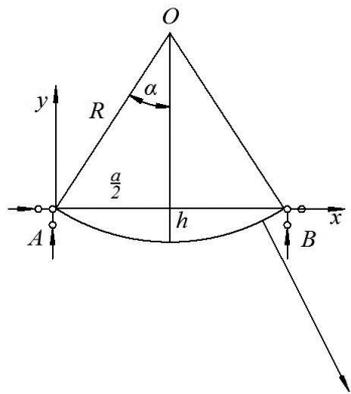


图4 锚杆索拉力投影

由图可得  $\eta = 150/360 \times 2\pi R$ ,  $\gamma = \alpha = \arcsin \frac{4ha}{a^2 + 4h^2}$ ,

$\beta = \gamma - \eta$ , 底角锚杆拉力  $F_b$  在铅垂方向力的投影为:

$$F_{bv} = F_b \cos[\gamma - \eta] = F_b \cos \left[ \arcsin \frac{4ha}{a^2 + 4h^2} - \frac{0.15}{2\pi R} \cdot 360^\circ \right] \quad (12)$$

锚索提供拉力投影为:

$$F_{cv} = F_c \cos[\gamma - \eta] = F_c \cos \left[ \arcsin \frac{4ha}{a^2 + 4h^2} - \frac{0.15 + s}{2\pi R} \cdot 360^\circ \right] \quad (13)$$

由于巷道两侧的垂直应力是  $P_s = \gamma H$ , 因此反拱所能提供的支护力是锚杆索和上覆岩层重力的协同作用。所以锚杆索和上覆岩层共同给反拱提供的支护力最终为:  $F_t = 2F_{bv} + F_c + 2F_{cv} + \omega P_s = 2(F_{bv} + F_{cv}) + F_c + \omega P_s$ ,  $\text{kN}$ ,  $\omega$  为富裕系数, 一般取 0.1~0.5。因此每个反底拱锚固梁给底板岩层提供的支护强度为:  $P_z = F_t / S_z$ ,  $\text{MPa}$ 。

由式 (12) (13) 得到支护强度一般表达式

$$P_z = \left\{ 600 \cos \left[ \arcsin \frac{2a}{a^2 + 1} - \frac{34.4}{a^2 + 1} \right] + 50 + 0.075H \right\} \times 0.0005682 \quad (14)$$

通过 Excel 软件进行计算上式并解析出在不同巷道埋深条件下, 巷道宽度  $a$  和支护强度  $P$  之间的曲线簇关系如下图所示。

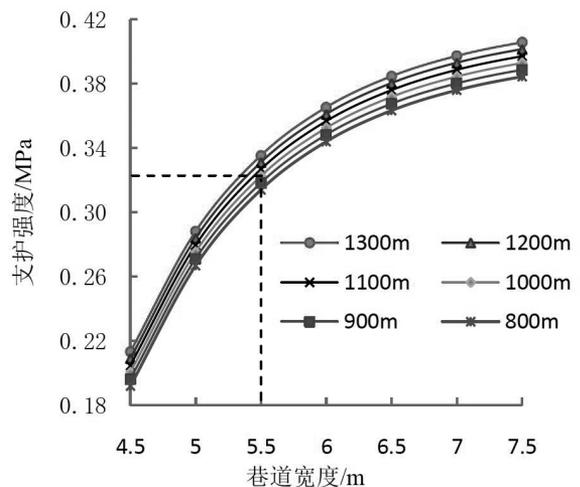


图5 不同埋深条件下支护强度和巷道宽度之间关系

由上图显示的不同埋深条件下支护强度和巷道宽度之间关系可以看出, 当巷道宽度位于 4.5m~

5.5m时,随着巷道理深的增加,支护强度则在0.2~0.33MPa之间呈线性增长;当巷道宽度大于5.5m时,支护强度则在0.33~0.4MPa之间,此阶段的变化趋于平缓,且反底拱锚固梁的支护强度逐渐趋于0.4MPa,而最终达到稳定。

#### 4 工程应用

某煤矿IV水平井底车场埋藏深度达到1055.5m,井底车场等重点工程施工两年多来,巷道变形和底鼓并未停止,局部地段底鼓突出,如马头门附近底鼓量近1m,浇筑的厚砦多处出现帮顶贯穿性裂缝,局部已表现碎裂弱载性松散块体,围岩变形整体呈现出结构失衡,严重威胁到IV水平的开拓延深和安全生产。

##### 4.1 反拱支护强度计算

鉴于3.3节通过力学分析得到的巷道底板支护强度计算公式,现用于计算某矿IV水平巷道底板的支护强度。某煤矿IV水平井底车场埋深为1055m,巷道宽度为5.5m,每套反拱体系的控底面积为: $S_{\text{控}}=0.57 \times \text{反拱间距} 800 \times \text{巷道宽度} 5500=2.5\text{m}^2$ ,安全系数为0.5~0.6,本例中取0.57。在本工程应用中,锚杆拉力 $F_b=50\text{kN}$ ,锚索拉力 $F_c=250\text{kN}$ ,拱高 $h=0.5\text{m}$ , $R=8.3\text{m}$ , $a=5.5\text{m}$ , $s=1.3\text{m}$ ,得到锚杆索的铅垂方向投影力: $F_{b_v}=50\cos(20.6-1.04)=47.1\text{kN}$ , $F_{c_v}=250\cos(20.6-10.01)=246\text{kN}$ ,而反拱上锚杆索提供的总拉力为 $F_t=2F_{b_v}+F_c+2F_{c_v}=2 \times 47.1+250+2 \times 246=836.2\text{kN}$ 。支护强度为: $P_s=F_t/2.5=836.2 \times 10^3/2.5=0.33\text{MPa}$ ,与3.3节由巷道理深和宽度分析的底板支护强度基本吻合。根据规程,为保障煤矿永久性巷道的安全稳定,应取富裕系数为1~1.3,本例中取1.2,得到最终的支护强度约为0.4MPa,

##### 4.2 支护技术参数

井底车场区域,已知岩石内摩擦角为 $\varphi=30^\circ$ ,巷道宽度为5500mm,阻力系数为 $C_i=6$ ,巷道两帮的松动宽度确定为1.4m,略去围岩粘聚力 $c$ 等参数。

根据实施反底拱梁半径公式,并考虑一定安全系数0.1~0.5,确定把底板按照半径为8300mm刷扩为反弧形状,加固后的围岩要用11#矿用工字钢实施反底拱,计算出拱的高度为250mm,考虑富裕系数为2,确定拱的高度为500mm;梁上自正中按等间距开五处锚杆索安装孔,计算得到锚杆索间距为1.5m,孔直径32mm,锚杆直径取20mm,得出反底拱梁底角锚杆的间距为1600mm,考虑底板岩层为软岩,缩小间距得到800mm。另外在反底拱梁孔位中施工的锚杆规格为 $\Phi \times L=20\text{mm} \times 2200\text{mm}$ 等强锚杆,锚杆长度能够满足。锚杆间排距 $1300\text{mm} \times 1600\text{mm}$ ,预紧力矩不小于 $200\text{N} \cdot \text{m}$ ,预紧力不小于40~50kN。锚索规格 $\Phi \times L=21.8\text{mm} \times 6200\text{mm}$ ,锚索间排距 $1300\text{mm} \times 1600\text{mm}$ ,预紧力不小于200~300kN,锚杆与锚索按五花眼形式布置。对加工完的两排反底拱梁间要用直径为25mm的钢筋,按200mm间距焊接连接焊接钢筋和砦浇筑地坪处理。而且浇筑的砦等级为C20,厚度为200mm。

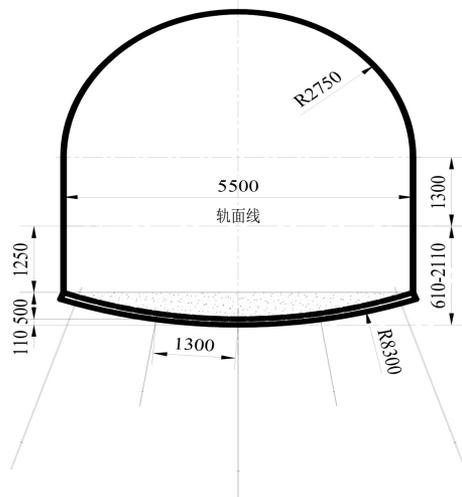


图6 某煤矿井底车场区域反底拱锚固梁支护设计参数

### 4.3 控制效果

在反底拱锚固梁实施之前,井底车场区域的底鼓严重,经多次刷卧,虽然从一定程度上解决了暂时性的底鼓,但没有从根上解决实际问题,而且过多的扩刷量甚至危及井底车场和井壁的稳定。实施反底拱锚固梁加锚注结合治理后,井底车场的维护周期已达2a,底鼓量控制在10mm之内。表明反底拱锚固梁可有效解决此工程的底鼓问题。



图7 实施反底拱锚固梁2a后的底板支护效果图

## 5 结论

(1)根据对巷道底板的滑移线场与速度场的分

析,揭示了反拱高度与岩石的内摩擦角和巷道宽度之间的关系,同时解出了底角锚杆的长度、排距以及底板在没有施加反底拱时所能承受的极限载荷。

(2)把反底拱梁简化为力学模型,推导出了反底拱锚固梁的支护强度;并通过Ecel软件分析了当巷道宽度位于4.5m~5.5m时,随着巷道埋深的增加,支护强度则在0.2~0.35MPa之间呈线性增长;当巷道宽度大于5.5m时,支护强度则在0.33~0.4MPa之间,此阶段的变化趋于平缓,且反底拱锚固梁的支护强度则是逐渐趋于0.4MPa,而最终达到稳定。

(3)在大屯某煤矿井底车场区域实施反底拱锚固梁加锚注结合治理后,井底车场的维护周期已达2a,底鼓量控制在10mm之内,反底拱锚固梁技术是控制深井静压巷道挠曲褶皱性底鼓的一条有效技术途径。

(上接第29页)

## 5 结论

1)随着开采深度的加大,巷道矿压显现尤为明显,普通锚网支护已不能满足要求。采用综合性联合补强支护治理围岩变形,已成为巷道支护研究方向。

2)松散煤层巷道顶板控制宜采用及时、主动和“三高一低一小”原则,使支护结构体系具有足够强度、刚度和适合的密度,同时应具有可缩性,允许围岩在可控制范围内适当变形。

3)巷道顶板“网格型”联合补强支护在1301

工作面辅运顺槽得到推广使用,支护效果良好。

### 参考文献:

- [1]陈炎光,钱鸣高. 中国煤矿采场围岩控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994.
- [2]李兵,张东峰. 松软煤层动压巷道围岩控制机理研究及合理支护设计[J]. 煤炭工程,2013,(9):41~46.
- [3]董艳军. 软岩巷道联合支护结构研究及工程应用[J]. 煤炭工程,2011,(8):78~80.
- [4]张荣立,何国纬,李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.
- [5]文建东. 松软煤层巷道锚网梁喷支护技术实践[J]. 煤炭工程,2009,(11):31~33.