

深部软岩巷道底鼓控制的机理与技术

李少波^{1 2 3}, 范浩^{1 2 3}, 刘万荣^{1 2 3}

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001;
3. 深部煤矿采动响应与灾害防控安徽省重点实验室, 安徽 淮南 232001)

[摘要] 深部软岩巷道底鼓问题是巷道支护的难题之一。通过对淮南谢桥矿软岩巷道底鼓问题机理的研究, 得出减少底鼓的途径: 提高围岩弹性模量 E , 减少断裂宽度 a , 减少侧压系数 ξ 。创新地提出了锚喷网+底板注浆锚索+底板切槽联合支护方法, 并对切槽的原理进行了分析, 得出切槽的最优尺寸。理论和现场观测均证明, 该联合支护方法对软岩巷道底鼓控制具有非常好的效果, 保证了巷道长期安全使用。

[关键词] 深部巷道; 软岩底鼓; 底鼓机理; 联合支护; 底板切槽

[中图分类号] TD353 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1006-6225 (2016) 03-0078-03

Techniques and Principle of Floor Heave Controlling of Soft Rock Roadway in Deep

我国已进入深部开采^[1]。深部巷道所处的复杂工程地质条件, 具有大变形、大地压的显著塑性变形破坏特征。对于深部软岩巷道, 由于软岩本身特殊的地质条件加之深部高地应力的环境^[2], 极易产生底鼓事故。巷道底鼓不仅会带来大量的维修工作, 增加巷道的维护费用, 而且还会影响矿井的安全生产^[3]。在深部开采理论与实践, 众多学者针对底鼓机理提出了很多理论, 姜耀东^[4]等认为底鼓包括挤压流动性、遇水膨胀性、挠曲褶皱性、剪切错动性等机理; 康红普^[5]等认为巷道底鼓的原因是失稳的底板岩层向巷道内压曲, 偏应力作用下的扩容, 岩石遇水膨胀, 以及岩石流变。针对巷道底鼓治理, 国内外专家学者也提出不同的控制技术: 何满潮提出了深部软岩煤巷底鼓三控技术; 谢广祥^[6]等提出了超挖锚注回填技术; 杨本生^[7]等提出了连续“双壳”治理底鼓的技术。

本文通过对深部软岩巷道底鼓的机理进行分析和研究, 在总结有关专家学者提出的底鼓治理的方法并结合有关矿上治理底鼓的经验, 创新地提出了锚喷网+底板注浆锚索+底板切槽联合支护方法, 并对切槽的尺寸进行了优化设计。理论和现场观测均证明, 该联合支护方法可以很好地解决深部软岩巷道底鼓问题。

1 工程地质概况

淮南谢桥矿-840m 水平轨道上山围岩主要以砂质泥岩、粉砂岩、泥质砂岩为主, 节理裂隙发

育, 地应力较大, 通过对该条巷道附近的地应力进行测试, 最大主应力为 25.32 MPa, 侧压系数为 1.5, 所以该巷道水平应力比较突出, 属于深部高应力软岩巷道。

巷道原支护: 采用锚网喷支护方式(图1), 顶板和两帮锚杆采用 $\phi 20\text{mm} \times 2300\text{mm}$ 树脂锚固锚杆, 间排距 $700\text{mm} \times 700\text{mm}$, 拱顶每排布置 3 根 $\phi 20\text{mm} \times 7100\text{mm}$ 锚索, 间排距 $1700\text{mm} \times 1600\text{mm}$, 锚网片 $1700\text{mm} \times 900\text{mm}$, 表面喷射 100mm 厚的混凝土。

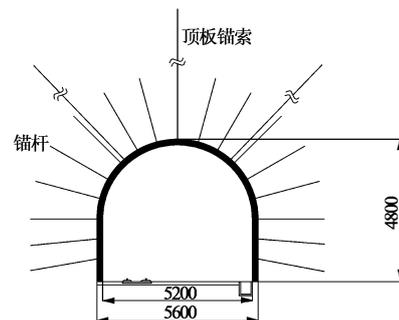


图1 巷道原支护方式

根据现场勘测, 由于底板未进行支护, 巷道底鼓量超过 400mm, 底板鼓起较为严重, 底鼓变形速度最大为 20mm/d。自巷道完成施工至今, 由于承担辅助运输的作用, 已经卧底很多次, 但是效果甚微, 多次卧底还会导致巷道的持续破坏和变形。因此必须对该巷道底鼓进行有效彻底地控制, 从而达到长期使用的目的。

[收稿日期] 2015-09-24

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2016.03.021

[作者简介] 李少波(1990-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为矿山压力与岩层控制及巷道支护。

[引用格式] 李少波, 范浩, 刘万荣. 深部软岩巷道底鼓控制的机理与技术 [J]. 煤矿开采, 2016, 21(3): 78-80, 42.

2 深井软岩巷道底鼓机理

深井软岩巷道底鼓主要来自底板岩层的压曲变形，随着采深的增加，上覆岩层应力也随之增大，从而导致巷道周边围岩承受的应力增大，造成巷道顶板下沉和两帮变形。由于只重视巷道顶板和两帮的支护，巷道底板没有进行支护，在高水平应力作用下底板岩层被压曲向巷道内部变形，进而产生底鼓^[8]。底板岩层赋存情况见图2。

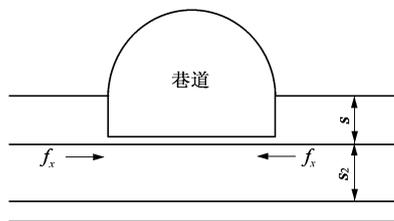


图2 底板岩层赋存情况

根据弹性力学薄板理论^[9]，底板岩层可视为四边简支的矩形薄板，设板厚为 s_1, s_2, \dots, s_n ；板沿着巷道横断面方向的断裂宽度为 a ，受力为 f_x ；板沿着巷道轴向断面折断长度为 b ，受力为 ξf_x ， ξ 为侧压系数。薄板的受力情况见图3。

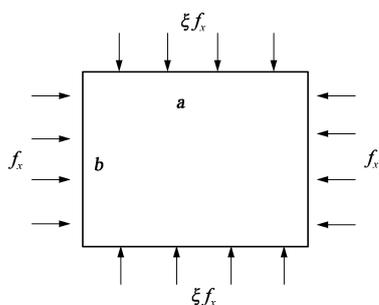


图3 薄板的受力情况

设 s_1 层板中面内力为 T_x, T_y, T_{xy} ，由图可知： $T_x = -f_x, T_{xy} = 0, T_y = \xi f_x$

根据弹性力学中的薄板理论，层板压曲方程为：

$$D \nabla^4 \omega = -f_x \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \xi \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)$$

$$\text{其中 } D = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1)$$

式中， E 为弹性模量； ν 为泊松系数； D 为薄板的抗弯强度； ω 为挠度； δ 为板厚。

得出临界载荷：

$$F_x = \frac{\pi^2 E s_1^2 (1+k^2)^2}{12 a^2 (1-\nu^2) + \xi k^2} \quad (2)$$

式中， F_x 为临界载荷； $k = a/b$ 。

由式(2)可计算出在临界载荷作用下的 s_1 岩

层的临界应力为：

$$\sigma_x = \frac{F_x}{s_1} = \frac{\pi^2 E s_1^2 (1+k^2)^2}{12 a^2 (1-\nu^2) (1+\xi k^2)} \quad (3)$$

临界应力大小与底板岩层厚度 s 、底板断裂宽度 a 、弹性模量 E 、侧压系数 ξ 、泊松系数 ν 有关，底鼓的大小和临界应力有关，临界应力 σ_x 越大，底鼓量越小，所以可根据临界应力公式得出减少底鼓的途径：提高围岩弹性模量 E 、增加巷道底板岩层厚度 s 、减少断裂宽度 a 、减少侧压系数 ξ 。

具体采取的措施：

(1) 提高围岩弹性模量 E ：增加围岩强度，采用底板注浆锚索支护。

(2) 减少断裂宽度 a ：开底板卸压槽。

(3) 减少侧压系数 ξ ：开底板卸压槽，释放水平应力。

在此理论的基础上，在巷道原有的锚喷网支护基础上，打底板注浆锚索以及进行底板切槽。

3 深井软岩巷道底鼓的控制

3.1 底板切槽的优化分析

3.1.1 底板切槽深度的分析

(1) 切槽深度 h 小于巷帮距切槽的距离 s ，即 $s/h > 1$ ，如图4所示。边长比 $s/h > 1$ 的岩梁受到弯曲应力作用，在力的作用下，岩梁向上弯曲，底板发生变形破坏。

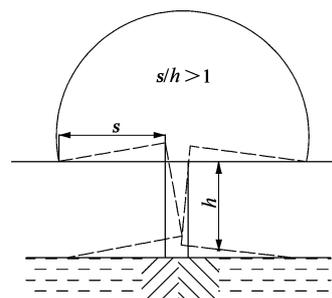


图4 底板切槽的尺寸分析 ($s/h > 1$)

(2) 当边长比 $s/h < 1$ 时，就是短悬臂的特殊情况，如图5所示。在这种情况下，开有切槽的岩块不是受弯曲应力的作用，而是受剪切作用。研究表明，当开有切槽的岩块宽为 $s = 2.3\text{m}$ 时，将该岩块推顶起来所需的力，经计算大小为 400kN/m^2 ，在这样大的支护阻抗力的情况下，即使在深部高水平应力作用下，也很难使切槽下面的岩层向上断裂，所以该边长比可以很好地控制底鼓。

综合以上对比结果，得出当边长比 $s/h < 1$ ，即切槽深度 h 大于巷帮距切槽的距离 s ，可以保证底板不会变形破坏。由于切槽深度为巷道宽度 $1/2$

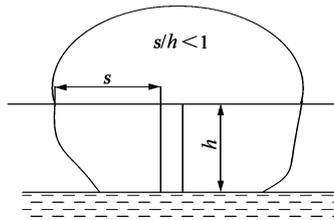


图 5 底板切槽的尺寸分析 ($s/h < 1$)

左右切槽效果最好^[10]，综合考虑，切槽的深度选 2500mm 较合适。

3.1.2 底板切槽充填的分析

考虑到底板常常积水的缘故，对底板切槽进行充填是十分必要的，设充填材料的初始强度为 $\sigma_0 = 10^4 \text{ kN/m}^2$ ，在切槽不闭合的情况下，即填充材料强度与两帮侧压力平衡时，开有切槽底板的抗剪强度为：

$$\tau_{\text{剪}} = \tau_0 + \sigma_0 \cdot \tan\varphi$$

式中， τ_0 为岩石黏聚力，取 5000 kN/m^2 ； φ 为岩石内摩擦角，取 37° 。

计算得出的抗剪强度 $\tau_{\text{剪}} = 12500 \text{ kN/m}^2$ ，相当于不填充切槽底板的支护阻力的 3 倍左右。而且切槽进行充填，由于填充材料的强度可以产生抵抗两帮侧压力的支护阻力，切槽的宽度可以选的小一点，可以选 400mm。充填切槽的材料选择泡沫聚氨酯。现场试验证明，该材料不仅具有一定的支撑力，而且可以有效地抵抗变形，是一种较好的充填切槽的材料。

3.2 具体控制措施

结合上述分析结果，提出采用锚喷网 + 底板注浆锚索 + 底板切槽联合支护方法。施工过程为：

(1) 对于已经产生底鼓的巷道，首先进行卧底，使其达到巷道设计断面要求，即 $5600 \text{ mm} \times 4800 \text{ mm}$ 。

(2) 进行底板中部切槽。底板卸压槽沿巷道走向布置在巷道中间，为防止轨道受影响，槽左侧偏离轨道 0.8m，底板卸压槽尺寸为宽 \times 高 = $400 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$ 。考虑到巷道底板岩性和卸压槽的深度较大情况，为省时省力，卸压槽施工时采用松动爆破配合人工开挖进行。在施工过程中如果发现卸压槽内有积水，必须使用气动隔膜泵将卸压槽内的积水排净，以利于打眼放炮。开挖好的卸压槽内填充泡沫聚氨酯材料，并且采用 10mm 厚的钢板对槽进行盖板防护，防止底板积水流入。

(3) 施工底板锚索孔。锚索孔间排距 1600mm，钻孔深度小于锚索长度 300mm。

(4) 安装锚索。底板锚索为新型中空注浆锚索， $\phi 20 \text{ mm} \times 8000 \text{ mm}$ ，间距为 1600mm，强度 1760MPa，破断力 $\geq 420 \text{ kN}$ 。

(5) 封孔并进行高压注浆。选用 P. O32.5 普通硅酸盐水泥浆，水泥浆按 1: 1 的水灰比配制，添加 ACZ-I 型水泥注浆添加剂 8% ~ 10%。

巷道联合支护方案见图 6。

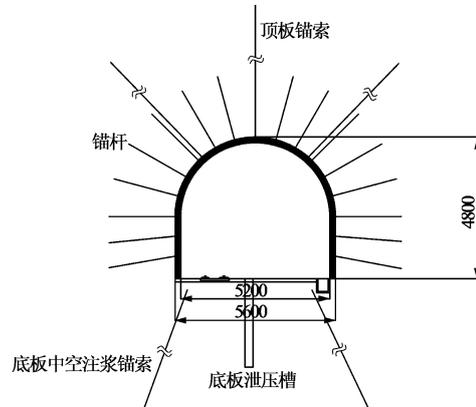


图 6 巷道联合支护

3.3 现场观测结果

为验证该联合支护方式对淮南谢桥矿 - 840m 水平轨道上山巷道底鼓的控制效果，在该巷道安设矿压观测测站，测站测得控制措施后巷道的底鼓量、底鼓速度。图 7，图 8 为底板底鼓量和底鼓变形速度曲线。

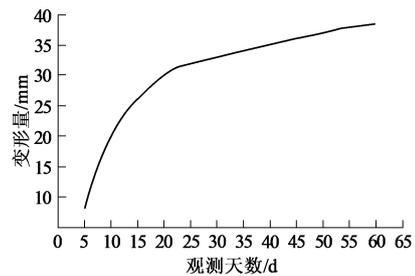


图 7 底板底鼓量曲线

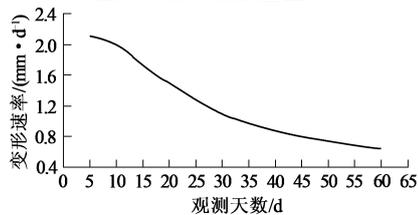


图 8 底鼓变形速度曲线

从图 7，图 8 可以看出，在观测前 10d 内，底鼓变形速度呈线性增加趋势，是由于注浆锚索浆液未完全与围岩凝结，但是底板切槽和底板锚索发挥着作用，底鼓量最大不到 20mm；观测 20d 后底鼓

(下转 42 页)

圆条带状，从而无法准确反映出陷落柱位置、大小；槽波探测结果经后续验证效果良好。可见：槽波因其探测距离远、探测精度高、不受铁磁干扰影响、探测结果直观可靠等优点，更有利于开展工作面内部陷落柱等隐伏构造的探测工作。

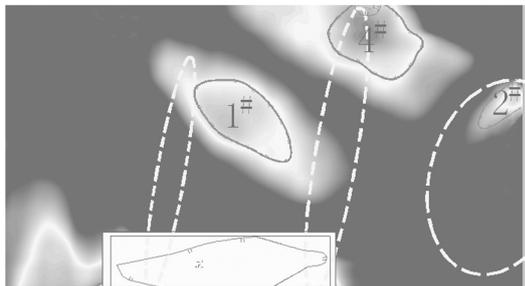


图 12 槽波、坑透探测结果对比

4 结 论

(1) 陷落柱正演模拟及实例探采对比研究表明：透射槽波探测的方法成熟、可靠，是探测隐伏陷落柱的有效手段。

(2) 槽波勘探法是煤矿井下构造探测的有效手段，利用其探测精度高、抗干扰能力强的特点，能够有效探测工作面回采中遇到的陷落柱等地质异常体；利用槽波透射法探测距离大的特点可以开展盘区探测，为矿井工作面合理布设提供可靠依据。

[参考文献]

- [1] 伦向前. 浅谈煤矿井下陷落柱成因及预防措施 [J]. 中国高新技术企业, 2012 (22): 123-124.
- [2] 贾贵廷, 胡宽塔. 华北型煤田陷落柱的形成及分布规律 [J]. 中国岩溶, 1989, 8 (4): 21-23.
- [3] 程建远, 姬广忠, 朱培民. 典型含煤模型 Love 型槽波的频散特征分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (1): 68-72.
- [4] Evison F F. A coal seam as a guide for seismic energy [J]. Nature, 1955 (176): 1224-1225.
- [5] Krey T C. Channel waves as a tool of applied Geophysics in coalmining [J]. Geophysics, 1963 (28): 701-71.
- [6] 刘天放, 潘冬明, 李德春, 等. 槽波地震勘探 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [7] 李建政, 王 季. 晋城天地王坡煤矿 3204 工作面透射槽波探测 [J]. 中国煤炭地质, 2014, 26 (6): 56-58.
- [8] 熊晓军, 贺振华, 黄德济. 三维波动方程正演及模型应用研究 [J]. 石油物探, 2005, 44 (6): 554-556.
- [9] 程建远, 王玺瑞, 郭晓山, 等. 东庞矿突水陷落柱三维地震处理效果与对比 [J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36 (1): 62-65.
- [10] 李艳芳, 程建远, 熊晓军, 等. 陷落柱三维地震正演模拟及对比分析 [J]. 煤炭学报, 2011, 36 (1): 456-459.
- [11] 姬广忠, 程建远, 朱培民. 煤层 Love 型槽波数值模拟及其频散特征分析 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (6): 106-109.

[责任编辑: 施红霞]

(上接 80 页)

变形速度开始降低, 注浆锚索的锚固力由 20MPa 增加到 40MPa; 45d 后, 底鼓变形量维持在 35mm 左右, 底鼓变形速度趋于稳定且小于 1mm/d, 说明该联合支护方式可以有效地控制底鼓的变形。

4 结 论

(1) 针对深井软岩巷道底鼓的问题, 以谢桥矿软岩巷道为例, 认为底鼓的大小和底板岩层厚度、底板断裂宽度、底板岩性、侧压系数等有关。

(2) 为控制该软岩巷道底鼓, 创新地提出了锚喷网+底板注浆锚索+底板切槽联合支护方法。根据对底板切槽原理的分析, 确定切槽深度 h 大于巷帮距切槽的距离 s 最优, 分析了进行切槽充填的必要性。

(3) 矿压观测结果表明, 在该联合支护完成 15d 后, 底鼓变形速度小于 2mm/d, 50d 后趋于稳定; 且最大底鼓量不到 40mm, 该联合支护方法有效地控制了该矿的底鼓变形, 为类似的软岩巷道底鼓治理积累了经验。

[参考文献]

- [1] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (8): 1413-1414.
- [2] 兰永伟, 张永吉, 高红梅. 深部开采条件下巷道底鼓机理的研究 [J]. 矿业研究与开发, 2005, 25 (1): 35-36.
- [3] 郭保华, 陆庭侃. 深井巷道底鼓机理及切槽控制技术分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25 (1): 92-94.
- [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): 2396-2398.
- [5] 康红普, 陆士良. 巷道底鼓机理的分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1991 (4): 362-373.
- [6] 谢广祥, 常聚才. 超挖锚注回灌控制深部巷道底鼓研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (8): 1243-1244.
- [7] 杨本生, 高 斌, 孙利辉, 等. 深井软岩巷道连续“双壳”治理底鼓机理与技术 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31 (4): 588-590.
- [8] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [9] 高明中. 巷道压曲性底鼓的机理与控制 [J]. 安徽理工大学学报, 2008, 28 (1): 21-22.
- [10] 赵 雷. 软岩巷道底鼓的防治试验与研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2013.

[责任编辑: 王兴库]