

文章编号: 1673-3363-(2015)04-0565-06

浅拱底梁支架底鼓控制技术研究

刘建庄¹, 杨忠东², 刘树第², 郭立稳¹

(1. 华北理工大学河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063009;

2. 开滦集团有限责任公司, 河北 唐山 063000)

摘要 克服现有深拱底梁闭式支架的不足, 设计试制了具有较高水平抗力的浅拱底梁, 探索了其棚腿搭接方法。利用 ANSYS12.1 模拟对比了浅拱底梁与深拱底梁的受力特征, 结果表明均布载荷下浅拱底梁极值应力受矢高影响更为敏感, 弯曲应力所占比重较小, 空间稳定性更强; 在水平挤压作用下, 底梁弯曲受力为主要承载模式, 弯矩与应力随着矢高的加大线性增加, 前者抵抗水平变形能力远优于后者, 更适合对于剪切滑移型底鼓的控制。开滦林南仓矿软岩巷道的工程应用, 证实了受力分析的正确性, 体现了浅拱底梁在治理剪切滑移型底鼓中的优越性。

关键词 浅拱底梁; 软岩巷道; 剪切滑移型底鼓; 数值模拟

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.04.007

Study on control technology of shallow arch floor beam support in preventing floor heave

LIU Jianzhuang¹, YANG Zhongdong², LIU Shudi², GUO Liwen¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Mining Development and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China; 2. Kailuan Group Co Ltd, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract The existing available closed support has some defects in application because of its deep arch floor beam. Therefore, a new support with higher horizontal resistance, characterized by shallow arch floor beam has been designed in this research, and also its leg-shed-lapping method has been analyzed. By using ANSYS12.1, the mechanical characteristics of shallow arch floor beam and deep arch floor beam have been simulated and analyzed. The results have indicated that the former one has more capacity to bear horizontal extruding force under uniform load intensity of 1 kN/m, and the bending stress takes up less parts, and it has better spatial stability and is more sensitive to sagitta. Moreover, the shallow arch floor beam had another advantage in bearing horizontal concentrated load, which is important to prevent shear-slip floor heave. The shallow beam has been proved to be effective in controlling floor heave in Linnancang Coal Mine in Kailuan, which has verified the accuracy of the simulating results.

Key words shallow arch floor beam; soft rock roadway; shear-slip floor heave; numerical simulation

软岩巷道的底鼓变形一直是困扰煤矿生产与支护设计与工程实践, 相关科研院所与生产单位开展建设的重大技术难题^[1-3]。针对底鼓的变形机理、支了许多有益研究与实践^[4-10], 形成了锚注、反拱底

收稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374088); 河北省高校科学研究项目(Z2003144); 唐山市科技计划项目(13130204z)

作者简介: 刘建庄(1976—), 男, 河北省唐山市人, 博士, 讲师, 从事山压力及其控制方面的研究。

E-mail: cumtljz@163.com

Tel: 13832871525

梁、混凝土浇筑等多种控制方法,在特定工程条件下取得了一定的效果。然而,在遇水泥化不可注的软岩、碎裂难锚的修复巷道中,底板锚注往往效果不佳;混凝土浇筑因造价昂贵、工艺复杂限制了其大范围应用。架设底梁形成闭式支架,辅以壁后充填、锚注而形成联合支护,在开挖空间周边可形成一个桶形闭环承载结构,控制底鼓的同时利于帮顶的稳定,是控制底鼓的较佳途径。闭式支架以多节马蹄形和圆形居多(图 1),结构上为深拱异型支架,因用量少常需定制加工,在条件多变的复杂地段其应用的灵活性不足。本文基于现有开式支架提出了一种浅拱底梁,与棚腿以焊接卡缆进行连接,可灵活选择底梁的架设与否,特别适合仅需少量清挖底鼓的软碎围岩修复巷道。数值模拟与工程应用表明,较之深拱结构,该类支架更适合对剪切滑移型底鼓的控制。

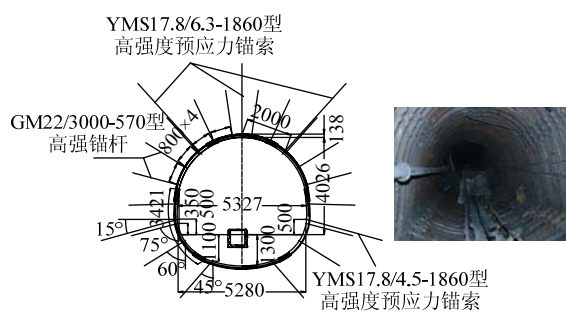


图 1 多节马蹄形支架的联合支护参数与应用 (mm)

Fig.1 Supporting parameter and application of multi-section horseshoe shape frame

1 浅拱底梁支架的设计与特点

在底板开挖反拱来优化断面,实现了围岩结构的整体承载,架设底梁形成封闭支架,既限制了帮角和底板的位移,又利于帮顶承载点的稳定,这种全断面支护的技术原理,是底鼓控制的重要技术方向。考虑棚式支架的结构特点,底拱的矢跨比在很大程度上决定了其控底能力,该值越大对垂直力限制越大,而水平挤压力限制越小,反之垂直控制力得到强化,水平控制力得到削弱。

常规底拱梁的矢高一般大于 800 mm,主要存在如下问题: 1) 底梁以冲压的小曲率弧形曲线($R=400\sim 600$ mm)与棚腿搭接,或在棚脚加焊一搭接段,加工安装较为困难; 2) 卧底工作量大,以 14 m^2 的断面为例,矢高为 800, 1 000 和 1 200 mm 时,卧底断面开挖率将达 20.6%, 24.3%和 28.6%(图 2a~c); 3) 搭接使得棚腿无法穿柱鞋,棚脚约束被

弱化,不利于支架的整体稳定和能力提升,需初掘安装而不适合修复巷道安装; 4) 对于剪切滑移型底鼓,支护的薄弱部位在 2 个棚脚,其耦合支护策略应为强化横向内收位移控制并对垂向力有一定限制,大矢高不利于对水平位移的控制。

为此,开发设计了矢高低于 800 mm 的两节搭接式反拱底梁,称为浅拱底梁。该类支架以常用 $14\sim 16\text{ m}^2$ 的三弧拱形棚式支架为原型,不进行几何调整,可灵活选配底梁的实施与否。结构上取消了搭接处的过渡曲线段,变棚脚搭接为棚腿搭接,搭接长度 800 mm,圆弧半径 6 225 mm,矢高可分别取为 400, 500, 600 mm。通过试制摸索和改进,在梁端焊接卡缆下槽型板,以上槽型板为抱箍与棚腿紧密搭接。为实现底梁的标准化生产,开发了简易焊接台(图 3),底梁安装质量得到了保障。

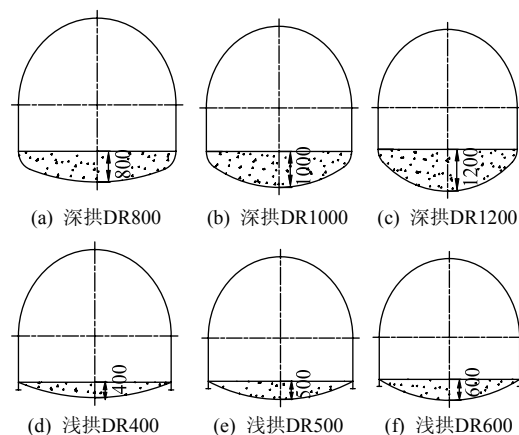


图 2 浅拱支架与深拱支架卧底及回填工程量对比 (mm)

Fig.2 Project amount comparison on the floor of shallow arch with deep arch

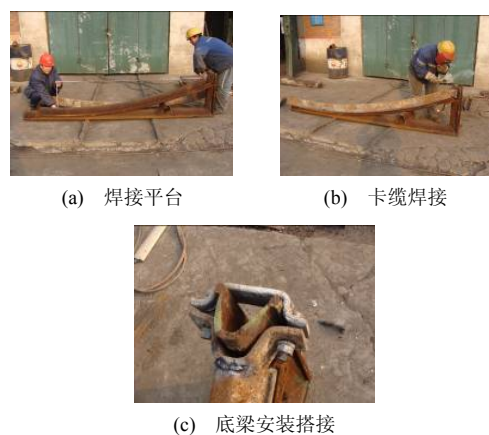


图 3 浅拱底梁焊接工艺

Fig.3 Welding process and installation of shallow arch floor frame on special bench

浅拱底梁的主要特点为: 1) 采用单一圆弧结

构，开一个胎膜单次压制即可成型，设备简单，加工与修复容易；2) 与棚腿的搭接采用焊接卡缆来实现，当底鼓量较大时可上向滑动，具备底板让压功能；3) 基本支架结构不经变动，可穿柱鞋，其整体受力得到全面强化，修复安装时可不拆卸基本支架；4) 力学设计以控制水平挤压力为主，限制上向底鼓力为辅，具有双向控压功能；5) 卧底开挖及回填量小，仅占巷道净断面的 8.6%，10.8%和 13.0%(图 2d~f)。

2 底拱梁的承载计算

金属支架承载能力的理论计算，主要有强度校核法和稳定性分析法 2 类。侯朝炯、尤春安、荆升国等^[11-14]依据强度校核法分别给出了各类支架的承载能力，其基本过程为：1) 对结构进行抽象和简化，将支架视为平面内的线梁，绘制受力简图；2) 通过现场实测或理论分析，按照集中型、均布型、顶压型、肩压型、侧压型几类加载模式，确定其载荷分布；3) 进行棚脚约束状态选择与自由度分析，求取支反力和各段内力；4) 叠加梁的弯曲应力和轴向正应力，进行屈服强度校核。该法的关键是由数学极值法找出结构的最大弯矩点和极值，按照式(1)进行强度校核，进而评判支架的承载能力。因浅拱底梁曲率半径与型钢截面高度之比大于 5，属于小曲率梁杆，式(1)中第一项弯曲应力的计算按直梁计算误差在 7%之内，能够达到工程精度要求；而深拱底梁在过渡曲线处曲率半径较小，为局部大曲率梁，需按曲梁公式进行计算。

$$\sigma_{\max} = \begin{cases} \frac{M_{\max}}{W_x} + \frac{N_a}{A} \leq [\sigma] & \text{直梁、小曲率梁} \\ \frac{M_{\max} y_{\max}}{s\rho} + \frac{N_a}{A} \leq [\sigma] & \text{大曲率梁} \end{cases} \quad (1)$$

式中： M_{\max} 为极值弯矩； W_x 为型钢抗弯截面系数； N_a 为钢梁轴力； A 为型钢截面积； y_{\max} 为与中性轴的最远距离； s 为截面对中性轴的静矩； ρ 为距中性轴最远点与曲率中心距离； $[\sigma]$ 为屈服强度。

支架结构性失稳是随地压加大、断面加大、非均匀受力而出现的工程破坏现象，稳定性研究虽晚于强度校核法，但对于支架承载能力的评估尤为重要，往往是支架综合能力的决定因素。圆弧拱在均布载荷下，发生面内分支点失稳的临界载荷集度可按式(2)进行计算。该条件下，各点弯矩值为零，轴力为 $q_{cr} \cdot R$ 。应该指出，承载能力与约束条件、加载方式密切相关，任一条件的变动将会带来弯矩、轴力、剪力沿梁长分布的不同，进而导致变形机理、破坏模式的巨大差异。复杂条件下多弧结构内力分布、稳定性计算，类似式(2)的理论算法存在很大障碍，有限元法恰能弥补这方面的不足。

$$q_{cr} = \frac{EI}{R^3} \left(\frac{\pi^2}{\varphi^2} - 1 \right) = k \frac{EI}{R^3} \quad (2)$$

式中： q_{cr} 为极限均布载荷集度； E 为梁的弹性模量； I 为梁的惯性矩； R 为拱半径； φ 为圆心角的一半； k 为临界载荷系数。

采用 ANSYS12.1 对图 2 中支架以梁单元 BEAM189 建模，自定义截面为 29U 型钢，表 1 和表 2 列出了固定约束、绞约束、梁端滑动约束中，单位均布载荷和集中载荷下，底梁轴力、弯矩和 Von Mises 应力的极值与位置，给出了面内失稳和空间失稳的一阶屈曲特征值。其中极值体现了单位力作用下的内力大小，部位表征了结构薄弱点位置，Von Mises 应力则反映了弯曲应力及轴压应力的综合构成。

表 1 均布载荷下底梁内力极值及特征值
Table 1 Max internal forces value and eigenvalue of floor beam under uniform load

规格	向心均布载荷 1 kN/m							
	梁端固定约束(F _{XYZ} RF _{XYZ})				梁端绞约束(F _{XYZ} RF _{XY})			
	N_{\max}/N	$M_{\max}/(N \cdot m)$	正应力 σ_{\max}/MPa	一阶特征值 (面内/面外)	N_{\max}/N	$M_{\max}/(N \cdot m)$	正应力 σ_{\max}/MPa	一阶特征值 (面内/面外)
SR400	5 933(梁端)	155(梁端)	3.26(梁端)	770.0/123.3	6 418(梁端)	47(跨中)	2.27(跨中)	349.6/114.9
SR500	5 006(梁端)	105(梁端)	2.46(梁端)	891.6/129.0	5 257(梁端)	30(跨中)	1.77(跨中)	414.5/123.9
SR600	4 344(梁端)	76(梁端)	1.96(梁端)	999.3/130.4	4 488(梁端)	21(跨中)	1.46(跨中)	468.7/126.3
DR800	4 225(过渡点)	523(梁端)	7.62(梁端)	901.6/39.4	3 435(过渡点)	592(过渡点)	6.90(过渡点)	544.2/46.4
DR1000	3 461(过渡点)	335(梁端)	5.24(梁端)	1 038.4/39.5	3 055(过渡点)	402(过渡点)	4.82(过渡点)	561.4/44.7
DR1200	2 930(过渡点)	203(梁端)	3.37(梁端)	1 130.1/45.2	2 752(过渡点)	251(过渡点)	3.22(过渡点)	555.8/48.7

注：规格代码中 SR 为浅拱，DR 为深拱，后面数字代表矢高，mm。

表 2 集中水平载荷下底梁内力极值及特征值
Table 2 Max internal forces value and eigenvalue of floor beam under horizontal concentrated load

规格	水平集中载荷 1 kN			
	(跨中)限位(F_x)、(梁端)滑动约束($F_{yz}R_{Fxy}$)			
	N_{max}/N	$M_{max}/(N\cdot m)$	正应力 σ_{max}/MPa	一阶屈曲特征值 (面内/面外)
SR400	999.9(跨中)	399.7(跨中)	4.26(跨中)	594.0/594.0
SR500	999.9(跨中)	499.8(跨中)	5.38(跨中)	591.5/591.5
SR600	999.9(跨中)	599.8(跨中)	6.51(跨中)	588.6/588.6
DR800	999.9(跨中)	798.7(跨中)	8.76(跨中)	463.4/461.8
DR1000	999.9(跨中)	991.3(跨中)	10.9(跨中)	516.1/513.7
DR1200	999.8(跨中)	1 198.4(跨中)	13.3(跨中)	523.0/519.7

均布载荷 1 kN/m、固定约束下，正应力极值点位于梁端，浅拱极值应力有 41%~51%来源于弯曲，深拱有 74%~83%来源于弯曲，随着矢高加大该比重有所下降。浅拱矢高 200 mm 加大会引起应力 39%的降低，深拱矢高引起应力 28%的降低。均布载荷绞约束下，浅拱正应力极值点位于跨中，极值应力中 16%~23%来源于弯曲，深拱正应力极值点位于过渡点，有 79%~87%来源于弯曲，随着矢高加大该比重有所下降。浅拱矢高 200 mm 加大引起应力 36%的下降，深拱引起应力 27%的下降。可见，均布载荷下，浅拱结构最大承载部位因约束方式不同而分别位于梁端或跨中，深拱则为梁端或过渡点；较之深拱，浅拱底梁应力受矢高变化影响更为

敏感，弯曲应力所占比重较小。该类加载条件下，空间失稳特征值均低于面内失稳，固定约束下屈曲时浅拱载荷集度平均为 127.6 kN/m，深拱为 41.4 kN/m，绞约束下二者分别为 121.7 kN/m 和 46.6 kN/m，可见空间失稳是最危险的底梁变形折损型式，浅拱较深拱更趋稳定。此外，对底梁采取纵向限位以加强空间稳定，可提高其屈曲特征值和抗压能力。

梁端加载水平集中载荷 1 kN、跨中限位且梁端滑动约束下，2 种底梁的正应力极值点均位于跨中，浅拱极值应力 4.26~6.51 MPa(94%~96%源于弯曲)，深拱极值应力 8.76~13.3 MPa(97%~98%源于弯曲)。在水平挤压作用下，底梁弯曲受力为主要承载模式，弯矩与应力随着矢高的加大线性增加，浅拱底梁优越的抗水平变形能力显而易见，较深拱更能控制剪切滑移底角的内移。该类条件下面内失稳与空间失稳的特征值相差不大，影响支架承载能力的主导因素为屈服强度。

图 4 显示了 SR400 和 DR800 这 2 种底梁在不同加载条件下的应力分布状况。图中显示，浅拱底梁危险截面的分布点位于跨中，深拱则位于过渡点或跨中，这些部位是耦合支护中予以强化的重点。后者的极值应力分布范围较前者集中，这说明深拱底梁承载中，更大范围的钢材强度没有发挥，特别是均布载荷下搭接部位的集中受力非常突出。

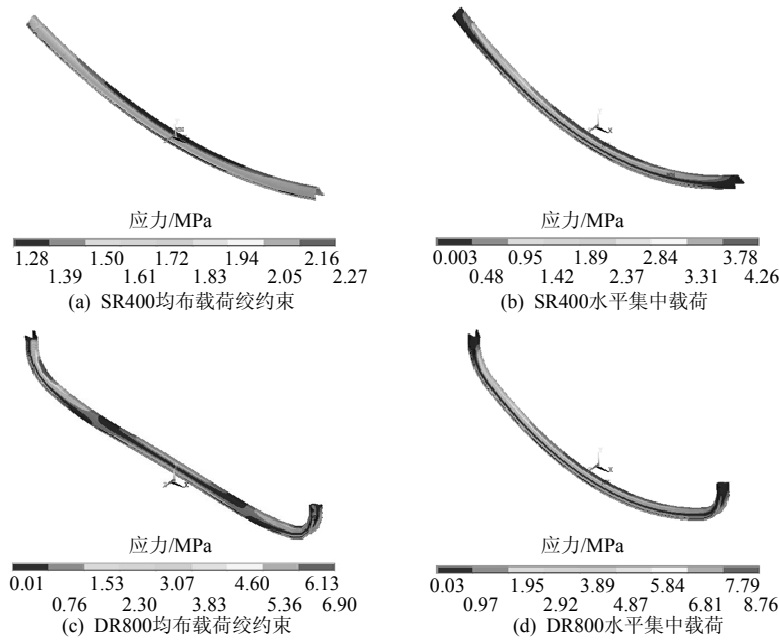


图 4 不同加载和约束方式下底梁的 Von Mises 应力云图
Fig.4 Von Mises stress nephogram of beams under different loading and constraint conditions

3 工程应用

开滦林南仓矿设计能力 1.2 Mt/a, -650 m 轨道石门、-650 m 回风石门是贯通南部区域的重要工程, 因地应力较高(第一主应力 21.1 MPa)且方向与石门正交, 围岩岩性软弱, 巷道掘进后, 煤 8 以上及穿煤段以水沟内翻为特征发生剪切滑移型底鼓, 煤 8 至煤 12 间部分泥质软岩段因蒙脱石含量高, 有小构造导通煤 5 顶板砂岩水, 发生遇水膨胀型底鼓。巷道施工以来, 大量人力消耗在底鼓清挖及帮顶刷扩上, 先后尝试锚(索)喷-注、密集支架、全断面浇筑等支护技术, 但综合成本、施工效率或支护效果不够理想, 这为浅拱底梁的现场应用提供了对比条件。

试验点位于-650 m 轨道石门的煤 12 至煤 6 段, 其中可判定为剪切滑移型底鼓段累计 265 m(穿煤段 40 m、煤 8 顶 120 m、煤 8 底 105 m), 煤 8 底遇水膨胀型底鼓段 86 m。采用锚-架-充-注联合支护(图 5), 施工过程为: 迎头破岩后 $\Phi 20 \text{ mm} \times L2000 \text{ mm}$ 的 HR350 右旋螺纹钢锚杆临时护顶并初喷, 间排距 $800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$; 紧跟迎头扶 13.36 m^2 的 29U 棚, 棚距 600 mm; 随复喷进行支架壁后喷浆充填, 充填层厚度 300~400 mm; 而后预埋规格 $\Phi 20 \text{ mm} \times L1800 \text{ mm}$ 注浆锚杆, 铺底梁、浇筑地坪; 滞后迎头 30~50 m 进行全断面注浆, 帮顶注浆压力 1.5~2.5 MPa, 底板注浆压力 2.0~3.0 MPa。此外, 煤 12 至煤 8 间还试验了锁腿锚杆和帮部锚索补强, 锁腿利用大卡缆一腿两杆, 棚档间补打 $\Phi 15.24 \text{ mm} \times L5300 \text{ mm}$ 锚索。

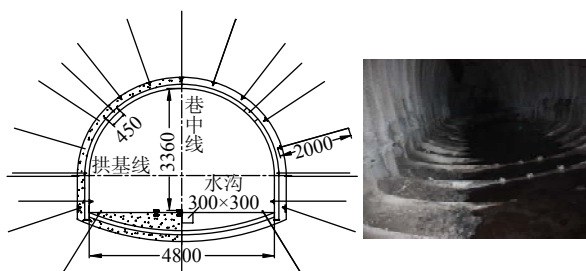


图 5 巷道支护参数及现场 (mm)

Fig.5 Support parameter of the experiment roadway and site operation scene

为期 200 余天十字断面法表面位移观测表明: 剪切滑移型底鼓段两帮和顶底收敛不超过 265 mm, 帮部变形稍大于顶底变形, 底鼓量不超过 150 mm, 长期收敛速度在 5 mm/d 以下。截至 2012 年 12 月, 该矿采用封闭的浅拱底梁支架, 结合锚-喷-充-注,

顺利穿越了煤 12 至煤 6 间的高水平应力泥质软岩和煤体, 后期在-650 m 西大巷、-850 m 回风斜井的二次修复中推广了浅拱底梁, 均取得了较好的工程效果。

但是, 在局部淋水量较大的构造切割段, 特别是煤 9 顶(25 架棚)和煤 8 顶(31 架棚)处, 巷道底鼓为典型的遇水膨胀型, 全断面底鼓量达 400~600 mm, 造成上方轨道扭曲偏转, 被迫撤除底梁, 因涉及上方铁轨移除而一度造成了迎头运料的中断, 后期修复极为困难。可见: 浅拱底梁支架结合壁后充填、锚杆(索)和注浆等形成联合支护, 对于剪切滑移型底鼓造成的巷道失稳有较好的工程效果; 但在遇水较为充分的膨胀性软岩中, 因底梁抵抗垂直变形能力有限, 工程效果不佳, 盲目应用会给后续工作带来极大困难。在-650 m 轨道石门的同层位巷道中, 采取底板锚注、预留变形量或整体浇筑, 很好控制了遇水膨胀型底鼓的发展。

4 结 论

1) 针对深拱支架在加工、施工和安装等方面的缺陷, 开发设计了两节式浅拱底梁, 摸索了焊接卡缆实现梁腿搭接的方式, 为保障底梁规格质量设计应用了简易焊接台, 浅拱底梁具有对底板、棚脚变形的双向控制力, 其水平限制力更为明显。

2) 分析了支架承载力计算方法, 采用 ANSYS12.1 模拟了单位载荷下浅拱底梁、深拱底梁的内力变化特征和极值点分布状况, 开展屈曲特征值计算。均布载荷下, 浅拱结构最大承载部位因约束方式不同而分别位于梁端或跨中, 深拱则为梁端或过渡点; 较之深拱, 浅拱底梁应力受矢高变化影响更为敏感, 弯曲应力所占比重较小, 空间稳定性更强。在水平挤压作用下, 底梁弯曲受力为主要承载模式, 弯矩与应力随着矢高的加大线性增加, 浅拱底梁抵抗水平变形能力远远优于深拱底梁, 因而更适合对于剪切滑移底角的控制。

3) 以开滦林南仓矿的软岩巷道为背景, 实践了浅拱底梁支架为主的锚-架-喷-充-注联合支护。在剪切滑移型底鼓治理中, 浅拱底梁的结构优势更能发挥, 取得了较好的工程效果; 而蒙脱石含量较高的膨胀型围岩中, 因底鼓膨胀力超过了底梁竖向承载极限, 控制效果不佳, 盲目应用可能给后续维修带来极大难度, 需要采取底板锚注、预留变形量甚至整体浇筑才能实现稳定支护。

参考文献:

- [1] 齐干, 李占金, 唐强达, 等. 深部大断面软岩巷道变形力学机制及耦合支护设计[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 455-459.
QI Gan, LI Zhanjin, TANG Qiangda, et al. Deformation mechanical mechanism and coupling support design for deep large-section-soft-rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 455-459.
- [2] 王进学, 杨胜利, 陈忠辉. 膨胀软岩巷道底鼓机理与耦合支护技术研究[J]. 金属矿山, 2008(12): 16-20.
WANG Jinxue, YANG Shengli, CHEN Zhonghui. Study on the floor heave mechanism of roadway in swelling soft rock and its coupling support technology[J]. Metal Mine, 2008(12): 16-20.
- [3] 张臻, 张农, 许兴亮, 等. 高地应力破碎软岩巷道强化控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 13-18.
ZHANG Can, ZHANG Nong, XU Xingliang, et al. Support technique intensifying soft broken roadway with high ground stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 13-18.
- [4] 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.
BAI Jianbiao, LI Wenfeng, WANG Xiangyu, et al. Mechanism of floor heave and control technology of roadway induced by mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 1-5.
- [5] 刘黎明, 杨磊. 松散破碎软岩巷道底鼓控制的试验研究[J]. 湖南科技大学学报, 2007, 22(2): 13-16.
LIU Liming, YANG Lei. Experimental study on the technology of floor heave control in incompact and fractured soft-rock roadway[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2007, 22(2): 13-16.
- [6] 郭志飏, 胡永光, 任爱武, 等. 深部膨胀性软岩巷道修复技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 316-319.
GUO Zhibiao, HU Yongguang, REN Aiwu, et al. Roadway repair technology in swell soft rock with high depth and high stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(3): 316-319.
- [7] 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.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2396-2401.
- [8] 李建民, 章之燕. 深井开采软岩破碎巷道均质支护技术与应用[J]. 煤矿开采, 2011, 16(1): 60-63.
LI Jianmin, ZHANG Zhiyan. Homogeneous supporting technology of cracked roadway surrounded by soft rock and its application in deep mine[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(1): 60-63.
- [9] 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): 361-365.
CHANG Jucai, XIE Guangxiang. Floor heave mechanism and over-excavation & grouting-backfilling technology in rock roadway of deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 361-365.
- [10] 刘少伟, 张伟光, 冯友良. 深井煤巷滑移型底鼓岩体运移机理及控制对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 706-711.
LIU Shaowei, ZHANG Weiguang, FENG Youliang. Study on migration mechanism of slipping floor heave rock mass in deep roadway and its control countermeasure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 706-711.
- [11] 侯朝炯. 巷道金属支架[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989: 116-123.
- [12] 侯朝炯, 张树东, 邹喜正. 巷道可缩性金属支架主要架型的研究[J]. 中国矿业学院学报, 1987(2): 11-18.
HOU Chaojiong, ZHANG Shudong, ZOU Xizheng. Discussion on the steel main types of yieldable entry support[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1987(2): 11-18.
- [13] 尤春安. 巷道金属支架的计算理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 47-54.
- [14] 荆升国. 高应力破碎软岩巷道棚-索协同支护围岩控制机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.