

松散煤体预应力锚索全长锚固技术研究及应用

Research and Application of Full Length Anchorage Technology of Prestressed Anchor Cable in Loose

周学斌(淮北矿业股份有限公司涡北煤矿,安徽 亳州 233600)

摘要:为解决极松软易破碎厚煤层煤顶下巷道存在的漏顶、片帮严重,支护效果差,掘进单进效率低,回采进度受制约等一系列问题,以涡北煤矿842风巷外段为研究对象,采用现场应用、数值模拟等方法,在调研其工程地质条件及原支护方式下巷道变形概况的基础上,提出了松散煤体预应力锚索全长锚固技术,期望进一步提高我国极松软易破碎厚煤层综放面巷道掘进水平。

关键词:极松软易破碎煤巷;巷道支护;全长锚固;数值模拟

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)06-0034-06

Abstract: In order to solve a series of problems such as serious roof leakage and rib spalling, poor support effect, low tunneling efficiency and restricted mining progress in the roadway under the coal roof of extremely soft and fragile thick coal seam, the outer section of 842 air roadway in Wobei Coal Mine is taken as the research object. Based on the investigation of its engineering geological conditions and the deformation of roadway under the original support mode, the full-length anchorage technology of prestressed anchor cable in loose coal body is put forward, which is expected to further improve the tunneling level of fully mechanized caving face in extremely soft and fragile thick coal seam in China.

Key words: extremely soft fragile coal roadway; roadway support; full-length anchorage cable; numerical simulation

1 前言

极松软易破碎厚煤层强度低、承压能力弱,巷道围岩的稳定性较差,掘进过程中煤顶冒落和迎工作面片帮十分严重,且随着生产的进行,工作面回采巷道围岩的承载系统组成、结构特征、力学性能及承受的载荷大小等均发生变化,对工作面回采巷道的稳定性有着极大的威胁^[1-9]。因此,对极松软易破碎厚煤层综放工作面回采巷道稳定性的有效控制是一个亟待解决的问题。预应力锚索全长锚固技术由于其高强度、高刚度的特点,可以实现对松散煤体的及时支护,降低锚固结构整体支护过程中的预应力损失。面对日益复杂的采矿地质环境,研究、发展和应用松散煤体预应力锚索全长锚固技术对保障巷道安全具有重要的意义^[10]。但常规预应力锚索全长锚

固技术所采用传统注浆料粘性低、流动性大,在极松软易破碎厚煤层中已出现漏浆、锚固性低的问题,无法有效改变掘进过程中煤顶冒落和迎头片帮。因此,本文针对涡北煤矿842风巷外段巷掘进期间发生的片帮冒顶现象,根据全长锚固锚索与巷道围岩相互作用的特点,采用新型MZM-70无机注浆锚固料,对松散煤体预应力锚索全长锚固技术进行系统分析,并结合数值模拟方法对巷道围岩变形破坏特征进行研究,最终形成842风巷外段的最优预应力锚索全长锚固支护方案。

2 工程概况

涡北煤矿84采区842工作面位于84采区中部,为84采区首采工作面,84采区842风巷外段巷道南起于842岩巷风巷,北至842风巷里段,西为843工作面,东为842机巷,是一段正在掘进施工的极松软易破碎厚煤层巷道。巷道底板标高-818.4~-853.7 m,平均埋深836.05 m。842风巷外段布置82煤层中,巷道断面为斜腿三心拱巷道,巷道净宽4.8 m、净高3.4 m。巷道采用平顶U型钢棚+锚索

[作者简介] 周学斌(1968—),男,硕士,高级工程师,主要从事矿山压力与岩层控制研究工作。

[引用格式] 周学斌. 松散煤体预应力锚索全长锚固技术研究及应用[J]. 中国矿山工程,2023,52(6):34-39.

支护,顶板锚索按“333”方式布置,规格:YMS ϕ 21.8/6200 mm,间排距 1 200 \times 700 mm;帮部采用 YMS ϕ 21.8/4100 mm 锚索进行支护;间排距

1 200 mm \times 700 mm,布置在距底板 300 mm、1 500 mm 各 1 道,锚索按“323”方式布置,U 型钢棚选用 36U 型钢支架,棚距 700 mm,巷道支护参数如图 1 所示。

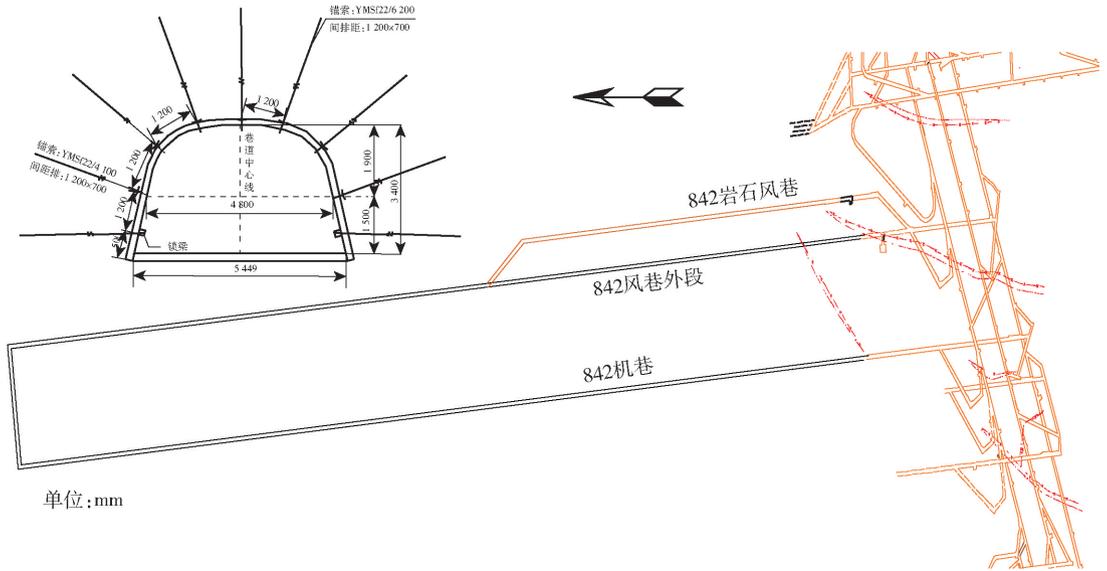


图 1 原巷道支护设计断面图

842 风巷外段采用平顶 U 型钢棚 + 锚索支护,锚索是工程岩体加固的主要支护材料,具有锚固深度大、承载能力高、可施加较大预紧力的特点。而 842 风巷外段所在煤层埋深较大,煤体极松软易破碎,掘进施工时频繁片帮冒顶,巷道难以成形,端锚锚索支护极易产生锚固端频繁失效、可锚性差,端部剪切破断甚至弹出伤人等问题,使锚索材料性能难以充分发挥,增加潜在不安全因素。目前 842 风巷外段支护设计方案中对于端锚锚索支护出现了两种结果:一是支护强度不足,巷道存在严重安全隐患;二是采取盲目增加锚固长度、提高支护密度、加大预紧力等措施,但依然没有解决巷道频繁片帮冒顶、变形大的支护难题。因此,提出了松散煤体预应力锚索全长锚固技术。

元设置为青色,基本顶粉砂岩单元设置为紫色,巷道单元设置为红色。岩体的力学参数根据室内试验确定,具体见表 1。

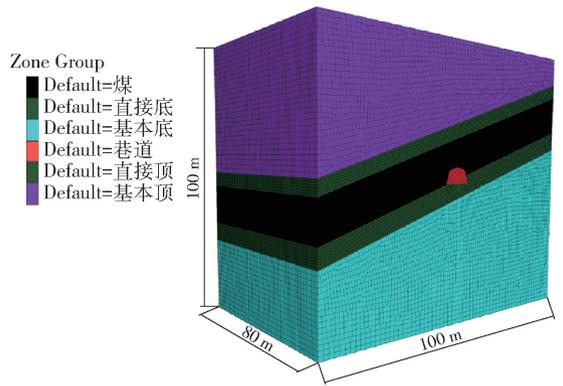


图 2 三维数值计算模型图

表 1 煤岩体物理力学参数表

岩性	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ kg \cdot m ⁻³	内聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
细砂岩	24.66	0.22	2 650	12.76	36.6
泥岩	22.14	0.27	2 600	2.00	29.0
煤	2.02	0.32	1 400	0.21	22
粉砂岩	28.93	0.25	2 750	10.82	38.2

3 松散煤体预应力锚索全长锚固技术数值模拟研究

3.1 数值模型及参数确定

为分析在预应力锚索全长锚固条件下巷道的变形破坏特征,对 842 风巷外段工程地质条件做适当简化,运用 FLAC^{3D} 构建三维计算模型,进行数值分析,模型尺寸长 \times 宽 \times 高 = 100 m \times 80 m \times 100 m,模型上部边界施加 19.65 MPa 的垂直荷载。数值模型如图 2 所示,其中,8 煤层单元设置为黑色,直接顶及直接底泥岩单元设置为深绿色,基本底细砂岩单

考虑到 FLAC^{3D} 中的 Pile 结构单元更能较真实地反映锚固界面的力学行为和预应力全长锚固锚索的受力特征,本次研究仍采用 Pile 结构单元来模拟锚索。本文采用树脂锚固剂-新型无机材料组合的

方式来实现松散煤体预应力锚索全长锚固技术,其实现方法如图3所示,图中蓝色锚索端头部分设置树脂锚固剂段,预应力全长锚固锚索杆体部分设置新型无机材料锚固段,新型无机材料选用MZM-70无机注浆锚固料,具体步骤如下。

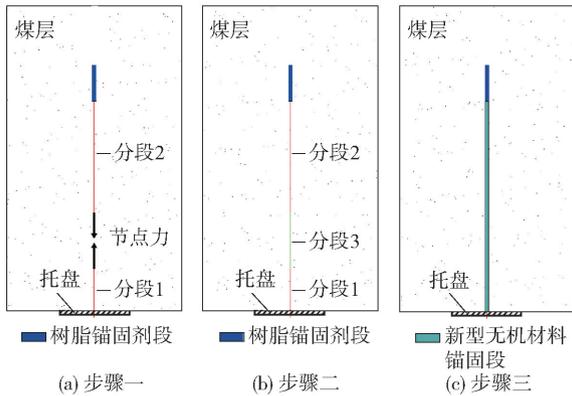


图3 预应力全长锚固锚索支护实现方法

步骤1:在FLAC^{3D}数值模型的指定位置采用Liner结构单元生成托盘构件,同时采用Pile结构单元生成锚索构件的分段1和分段2,托盘构件和锚索构件的连接部位采用刚性连接,分段1和分段2分别根据其黏结属性赋予锚固界面参数,并在分段1和分段2上施加一对与预紧力大小相等、方向相反的节点力,具体方法如图3(a)所示。

步骤2:运算平衡后,采用Pile结构单元生成锚索构件的分段3,移除锚索的节点力,并根据锚索分段3的黏结属性赋予其锚固界面参数,具体方法如图3(b)所示。

步骤3:运算平衡后,重新赋予新型无机材料锚固段锚索的锚固界面参数,具体方法如图3(c)所示。

通过以上方法即可实现FLAC^{3D}中的松散煤体预应力锚索全长锚固支护,此方法更符合现场实际工程中松散煤体预应力锚索全长锚固技术的支护流程。在数值模拟计算中,Pile结构单元用来模拟 $\phi 22/6\ 200\ \text{mm}$ 和 $\phi 22/4\ 100\ \text{mm}$ 型号的预应力全长锚固锚索,锚索的预紧力为60 kN,Liner结构单元用来模拟托盘,托盘的尺寸为 $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$,具体锚索的输入参数见表2、表3。

表2 锚索参数

类型	弹性模量/ GPa	泊松比	黏结力/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	黏结刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	预紧力/ kN
锚索	200	0.25	8×108	8×108	60

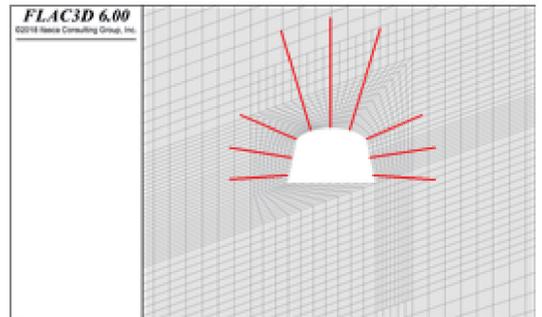
3.2 预应力锚索全长锚固支护方案

为确定842风巷外段预应力锚索支护参数,模

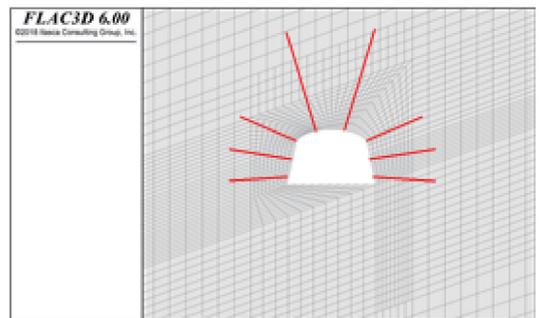
表3 锚索托盘参数

类型	弹性模量/ GPa	泊松比	接触面法向刚 度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$	接触面切向刚 度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$
托盘	200	0.25	8×108	8×108

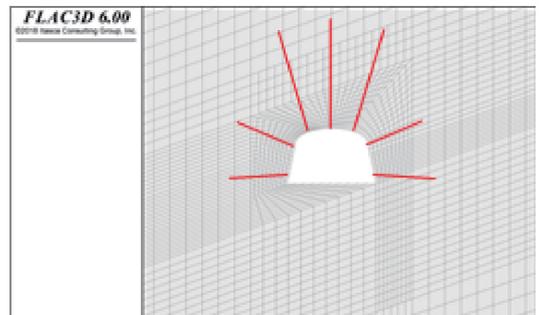
拟设置三种预应力锚索全长锚固支护方案,对比不同方案对842风巷外段围岩稳定性的影响,最终确定预应力锚索全长锚固方案。方案一中每个断面布置9根预应力锚索全长锚固,模拟方案如图4(a)所示,方案二中每个断面布置8根预应力锚索全长锚固,模拟方案如图4(b)所示,方案二中每个断面布置7根预应力锚索全长锚固,模拟方案如图4(c)所示。图中红色部分为Pile结构单元模拟的 $\phi 22/6\ 200\ \text{mm}$ 和 $\phi 22/4\ 100\ \text{mm}$ 型号的预应力全长锚固锚索。



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

图4 风巷外段预应力锚索全长锚固数值模拟方案示意图

3.3 842风巷外段支护效果分析

图5和图6所示分别为不同方案下842风巷外

段围岩垂直位移和水平位移分布云图。从图5不同支护方案下巷道围岩垂直位移云图中可以看出,842风巷外段巷道围岩蓝色到绿色渐近区域为负值区域,代表围岩下降程度,主要分布于巷道顶板,云图图例蓝色到绿色渐近变化幅度由 -85 mm 到 0 mm ,其中方案一中巷道顶板围岩云图蓝色到绿色渐近变化幅度为 -40 mm 到 0 mm ,方案二中巷道顶板围岩云图蓝色到绿色渐近变化幅度为 -45 mm 到 0 mm ,方案三中巷道顶板围岩云图蓝色到绿色渐近变化幅度为 -85 mm 到 0 mm 。方案一中巷道顶板围岩云图蓝色到绿色渐近变化区域大致分布于巷道顶板 0 m 至 3 m 范围内,方案二中巷道顶板围岩云图蓝色到绿色渐近变化区域与方案一相近,而方案三中巷道顶板围岩云图蓝色到绿色渐近变化区域则大致分布于巷道顶板 0 m 至 10 m 范围内。相较于方案一、方案二中的巷道顶板围岩位移云图变化,方案三中的巷道顶板围岩位移的幅度及范围均远大于前两者。同样的,在图5中,842风巷外段巷道围岩绿色到红色渐近区域为正值区域,代表围岩上升程度,主要分布于巷道底板中,表示了巷道的底臃程度,云图图例绿色到红色渐近变化幅度由 0 mm 增加到 57 mm ,其中方案一中巷道底板围岩云图绿色到红色渐近变化幅度为 0 mm 到 47 mm ,方案二中巷道底板围岩云图绿色到红色渐近变化幅度由 0 mm 增大到 51 mm ,方案三中巷道底板围岩云图绿色到红色渐近变化幅度由 0 mm 增大到 57 mm 。方案一中巷道底板围岩云图绿色到红色渐近变化区域大致分布于巷道底板 0 m 到 7 m 范围内,方案二、方案三中巷道底板围岩云图绿色到红色渐近变化区域与方案一相近。相较于方案一、方案二和方案三中的巷道底板围岩位移的幅度及范围相差不大,巷道帮部及顶部支护参数的改变对巷道底板影响较小。

从图6不同支护方案下巷道围岩水平位移云图中可以看出,842风巷外段巷道围岩水平位移以向右为正,绿色到红色渐近区域为正值区域,代表巷道围岩左帮变形程度,云图图例绿色到红色渐近变化幅度由 0 mm 增加到 67 mm ,其中方案一中巷道左帮围岩云图绿色到红色渐近变化幅度为 0 mm 到 38 mm ,方案二中巷道左帮围岩云图绿色到红色渐近变化幅度由 0 mm 增大到 42 mm ,方案三中巷道左帮围岩云图绿色到红色渐近变化幅度由 0 mm 增大到 67 mm 。方案一中巷道左帮围岩云图绿色到红色渐近变化区域大致分布于巷道左帮 0 m 到 4.5 m 范围

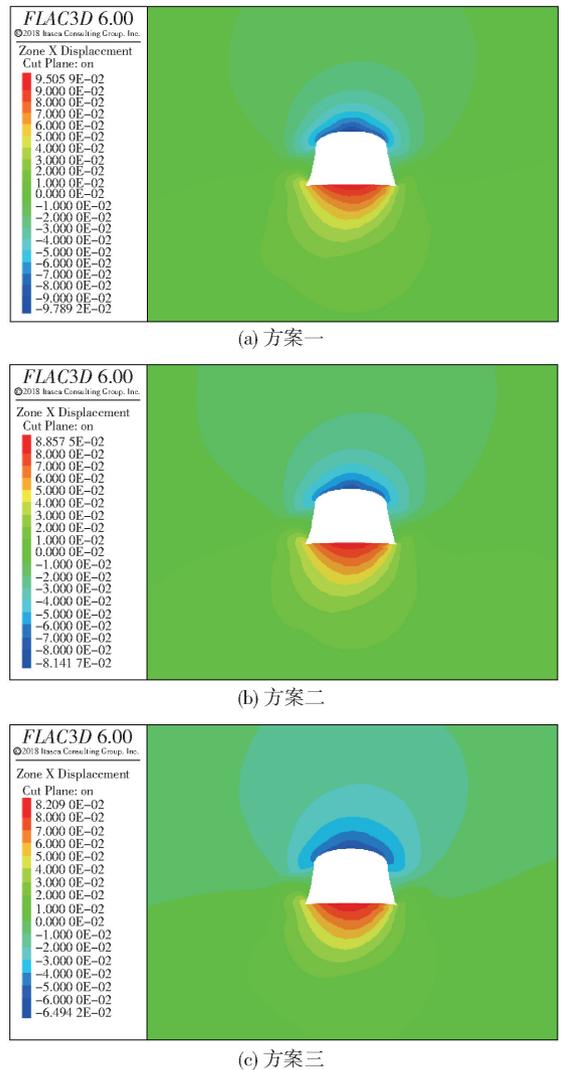
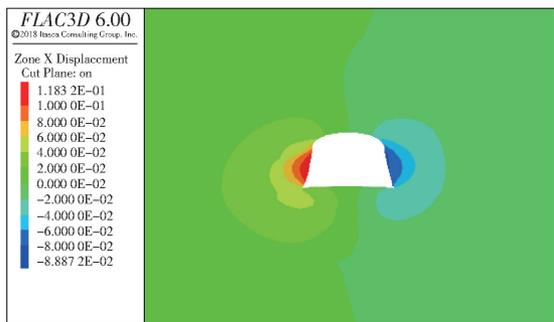


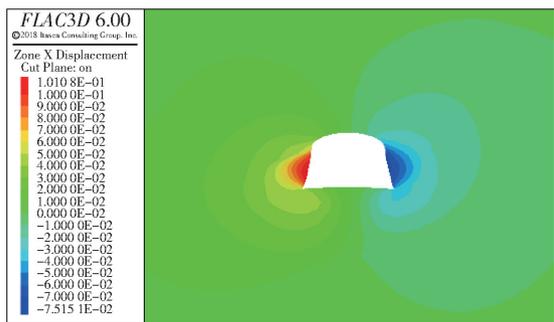
图5 不同支护方案下巷道围岩垂直位移云图

内,方案二、方案三中巷道左帮围岩云图绿色到红色渐近变化区域与方案一相比逐渐增大,方案二、方案三中巷道左帮围岩云图绿色到红色渐近变化区域分别分布于巷道左帮 $0\sim 5\text{ m}$ 、 $0\sim 6\text{ m}$ 。同样的,在图6中,842风巷外段巷道两帮围岩蓝色到绿色渐近区域为负值区域,代表右帮围岩变形程度,云图图例蓝色到绿色渐近变化幅度由 -63 mm 到 0 mm ,其中方案一中巷道右帮围岩云图蓝色到绿色渐近变化幅度为 -32 mm 到 0 mm ,方案二中巷道右帮围岩云图蓝色到绿色渐近变化幅度为 -33 mm 到 0 mm ,方案三中巷道右帮围岩云图蓝色到绿色渐近变化幅度为 -63 mm 到 0 mm 。方案一中巷道右帮围岩云图蓝色到绿色渐近变化区域大致分布于巷道右帮 0 m 至 4 m 范围内,方案二中巷道右帮围岩云图蓝色到绿色渐近变化区域与方案一相近,而方案三中巷道右帮围岩云图蓝色到绿色渐近变化区域则大致分布于

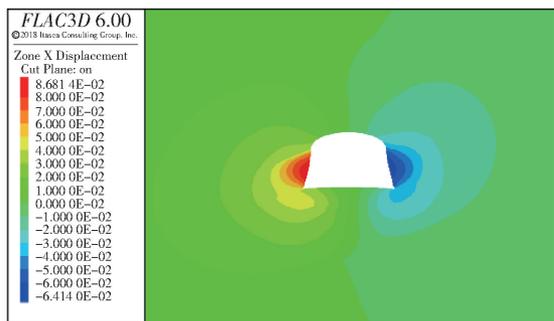
巷道右帮0 m至5 m范围内。相较于方案一、方案二中的巷道右帮围岩位移云图变化,方案三中的巷道右帮围岩位移的幅度及范围均远大于前两者。巷道两帮围岩位移变化幅度及范围对比,巷道左帮围岩位移变化幅度及范围略大于巷道右帮围岩。



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

图6 不同支护方案下巷道围岩水平位移云图

结合图5、图6,形成不同方案下842风巷外段围岩变形量变化曲线,具体如图7所示。从图7中可以看出,方案一中在巷道断面布置9根预应力锚索时,巷道围岩变形量较小,顶底板移近量为87 mm,两帮移近量为70 mm;方案二中在巷道断面布置8根预应力锚索时,经计算得出顶底板移近量增加至96 mm,两帮移近量增加至75 mm,顶底板及两帮变形量相比方案一分别增加了10.3%和7.1%,虽然顶底板及两帮变形量有所增加,但增加幅度较小,其变形符合支护设计要求,能够保证巷道围岩稳定;而方案三中进一步减少锚索数量,在巷道断面布

置7根预应力锚索全长锚固时,顶底板及两帮变形量明显增加,顶底板移近量增加至142 mm,两帮移近量增加至130 mm,顶底板及两帮变形量相比于方案一分别增加了63.2%和85.7%,顶底板及两帮围岩变形相对较大,由此可以得出,选择方案二的预应力锚索全长锚固布置方式时,842风巷外段围岩的变形量符合支护设计的要求,相比于原支护方案提高巷道支护强度,控制围岩变形,并且可有效减少锚索施工时间,从而提高掘进速度。

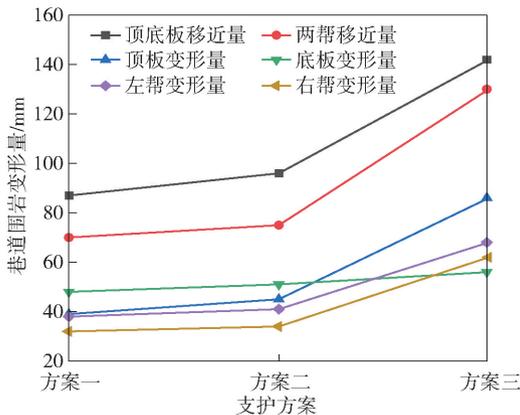


图7 不同支护方案下巷道围岩变形量

4 842风巷外段现场应用

通过数值模拟计算结果所得出的支护方案为选用新型大孔径中空注浆全锚锚索对巷道断面进行全长锚固,顶板锚索按“222”方式布置,新型大孔径中空注浆全锚锚索规格为 $\phi 22/6200$ mm(备用8.2 m、10 m),破断力400 kN,索体中空结构,自带注浆芯管,反向出浆,无需排气即可全锚;锚索上部采用树脂端锚,施加预应力,安装后可以及时承载;中空锚索芯管孔径增大,孔径截面积提高70%,可显著降低稠浆流动阻力。锚索间排距为1 800 mm \times 700 mm,中顶及右侧锚索配合锚盘使用;左侧锚索配合锁梁使用(1梁1索锁2棚),间隔布置。现场备有8 200 mm、10 000 mm长锚索,根据煤厚变化情况及时调整,确保锚索生根于坚硬顶板深度 < 1.5 m。

帮部采用 $\phi 22/4100$ mm的新型大孔径中空注浆全锚锚索进行支护;间排距1 200 mm \times 700 mm;布置在距底板500 mm、1 500 mm各1道,锚索按“323”方式布置;距底板1 500 mm及肩窝锚索配合托盘使用;距底板500 mm锚索配合锁梁使用,(1梁2索锁4棚);锁梁紧跟前探梁;每根锚索使用3卷树脂锚固剂,岩体使用MSZ-2950型树脂锚固剂、煤体使用MSZ-2550型树脂锚固剂;预紧力岩体 < 100

kN(29 MPa)、煤体 < 60 kN(17.4 MPa)。注浆时选用 ZBQ-8/7 型矿用气动注浆泵,注浆锚固材料选用 MZM-70 无机注浆锚固料,MZM-70 无机注浆锚固料为高强注浆锚固料,克服了传统注浆料黏性低、流动性大的缺点。842 风巷外段平顶 U 型钢棚支护及锚索加固支护布置如图 8 所示。

采用松散煤体预应力锚索全长锚固后,在巷道围岩变形趋于稳定时,顶底板移近量约为 86 mm,两帮移近量约为 68 mm,支护效果显著,巷道变形较小,变形速度得到了有效控制。同时,通过对巷道围岩支护方式的调整,使得每 2 个断面从原来的 18 根锚索减少至 14 根锚索,锚索用量减少 22.2%,节省大量锚索施工时间,推进了煤顶下极松软易破碎巷道快速掘进水平,为矿井安全高效生产提供了有力的保障。

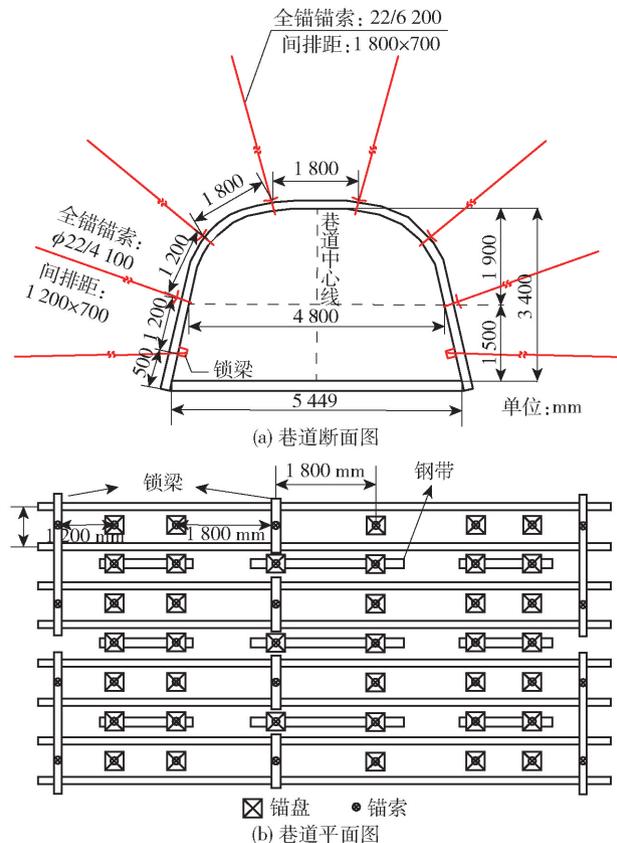


图 8 842 风巷外段平顶 U 型钢棚 + 锚索加固支护示意图

5 结论

(1) 针对松散煤体普通端锚锚索支护极易产生锚固端频繁失效、端部剪切破断等问题,使锚索材料性能难以充分发挥,支护强度不足,巷道存在严重安全隐患,巷道存在频繁片帮冒顶、变形大的难题,提出了松散煤体预应力锚索全长锚固技术。

(2) 为了更好地实现理论研究与实际工程的有效对接,提出了一种较真实反映现场松散煤体预应力锚索全长锚固技术的数值实现方法,并通过模拟优化得出了 842 风巷外段最佳支护方案。

(3) 通过现场实践,842 风巷外段最佳松散煤体预应力锚索全长锚固支护方案能够使巷道围岩变形控制在合理范围内,支护区域内围岩整体稳定,巷道支护效果显著提高,同时大幅度提高了巷道掘进效率,进一步提高了我国极松软易破碎厚煤层综放面巷道掘进水平。

[参考文献]

- [1] DEB D, DAS K C. A new doubly enriched finite element for modelling grouted bolt crossed by rock joint [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 47-58.
- [2] MA S, NEMCIK J, AZIZ N. Simulation of fully grouted rockbolts in underground roadways using FLAC2D [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51 (8): 911-920.
- [3] NEMCIK J, MA S, AZIZ N, et al. Numerical modelling of failure propagation in fully grouted rock bolts subjected to tensile load [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 293-300.
- [4] MA S, NEMCIK J, AZIZ N, et al. Numerical modeling of fully grouted rockbolts reaching free-end slip [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16 (1): 04015020.
- [5] 武冲锋. 组合锚注支护在深部大断面巷道围岩控制的应用[J]. 中国矿山工程, 2022, 51 (4): 56-61.
- [6] CUI L, DONG Y K, SHENG Q, et al. New numerical procedures for fully-grouted bolt in the rock mass with slip and non-slip cases at the rock-bolt interface [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 849-863.
- [7] 宋洋, 王贺平, 许怀玉, 等. 全长粘结锚杆锚-浆界面应力的分布规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41 (4): 44-50.
- [8] 王文杰, 万浩. 高应力软岩巷道全长锚固玻璃钢锚杆受力特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36 (3): 482-490.
- [9] 白晓宇, 张明义, 匡政, 等. 全长黏结 GFRP 抗浮锚杆拉拔特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50 (8): 1991-2000.
- [10] 黄生根, 庞德聪, 吴明磊. 锚固结构荷载传递机理离散元模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37 (1): 12-17.