

采矿与井巷工程

网络出版时间与地址: 2011-11-15 15: 02; www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20111115.1502.005.html

全长预应力锚固强力支护系统的应用研究

吴拥政^{1,2}

(1. 煤炭科学研究院 开采设计研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013)

摘要: 为解决复杂困难巷道条件下传统锚杆支护体系存在的问题, 从理论上分析了不同锚固方式对巷道支护的影响, 得出了全长预应力锚固具有端部锚固和全长锚固的优点, 能够在较长的锚杆杆体上施加预应力, 增加了对围岩离层及错动的敏感度。采用数值模拟计算方法分析了不同锚固方式对锚杆支护附加应力场的影响, 得出提高全长预应力锚固锚杆扩散效果的有效途径是先施加预应力而锚固剂后固化。在潞安矿区进行井下工业性试验, 对全长预应力锚固状态下锚杆受力分布及变化进行了监测, 锚杆锚索受力基本稳定, 锚杆最大受力 122 kN, 锚索最大受力 387 kN。矿压监测数据表明: 全长预应力锚固强力支护系统优于传统支护, 能有效控制围岩变形, 支护效果良好。

关键词: 锚杆支护; 全长锚固; 强力支护; 全长预应力

中图分类号: TD353.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2011)11-0027-04

Application Study on Pre-stressed Full Length Bolting Powerful Support System

WU Yong-zheng^{1,2}

(1. Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Company Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to solve the problems existed in the conventional bolt support system under the complicated and difficult mine roadway, the different bolting methods affected to the mine roadway support were analyzed theoretically. The advantages of the full length pre-stressed bolting with the end bolting and full bolting were obtained. The pre-stressed full length bolt could have a pre-tightened torque on the long length bolt bar and the sensitivity to the surrounding rock separation and displacement would be increased. The numerical simulation calculation method was applied to analyze the different bolting mode affected to the additional stress filed of the bolt support. The effective access to improve the expansion results of the pre-stressed full length anchored bolt was first to have a pre-stress and then to have the anchoring agent for consolidation. An industrial trial was conducted in the underground mine of Lu'an Mining Area. The bolt stressed distribution and variation monitored and measured under the pre-stressed full length anchoring status. The bolt and anchor was stressed in stable basically. The max stressed force of the bolt was 122 kN and the max stressed force of the anchor was 387 kN. The mine pressure monitoring and measuring data showed that the pre-stressed bolting powerful support system would be better than the conventional support and could effectively control the deformation of the surrounding rock with a good support effect.

Key words: bolt support; full length bolting; powerful support; full length pre-stressed

锚杆支护技术是煤矿实现高产高效的关键技术之一。近几年来, 锚杆支护技术发展迅速并在国内外得到普遍应用^[1]。特别是 1996—1997 年我国引进澳大利亚锚杆支护技术后, 锚杆支护技术在国内得到了很大发展。高强度螺纹钢锚杆支护已经成为

煤矿主要的支护方式。但是, 对于一些复杂困难条件巷道, 高强度锚杆支护效果差, 且不能满足巷道支护要求。潞安矿区的锚杆支护技术一直走在行业的前列, 经过 10 年多时间的技术攻关, 解决了大量巷道支护难题, 显著扩大了锚杆支护的使用范

收稿日期: 2011-04-01; 责任编辑: 曾康生

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAB36B07); 国家国际科技合作与交流专项资助项目(S2011ZR0423)

作者简介: 吴拥政(1978—), 男, 河南修武人, 博士研究生, 工程师, 从事巷道支护及矿压的研究与推广工作。Tel: 010-84262911, E-mail: tiandiwy@163.com

围^[7]。近几年来潞安矿区的采深越来越大，地质条件也越来越复杂，巷道支护日益困难，如五阳矿78采区、常村矿、余吾煤业公司、高河矿井以及正在建设的李村矿，均存在巷道支护困难的情况，原有的支护体系难以保证巷道围岩稳定。

1 锚固方式对巷道支护的影响

根据锚固长度，可将锚固方式分为端锚、加长锚和全长锚3种^[2]。对于端锚，锚固剂提供锚固力，锚杆轴向受力除锚固端外，沿锚杆长度方向均匀分布，锚杆杆体的抗剪能力只有当岩层发生较大错动时才能发挥出来。对于全长锚，锚固剂的作用除了给锚杆提供锚固力外，在岩层发生错动时，能够与杆体共同起抗剪作用，阻止岩层发生滑动。

对于端锚和全长锚，很多学者都曾进行过研究^[3-6]，得到以下共识：对于端锚，应力及应变沿锚杆长度方向上相等。在锚固范围内，任何部位岩层的离层都均匀地分散到整个杆体的长度上，杆体受力对围岩变形和离层不敏感，支护刚度低。对于全长锚，应力及应变沿锚杆长度方向分布不均匀，离层和滑动大的部位锚杆受力很大，杆体受力对围岩变形和离层很敏感，能及时抑制围岩离层与滑动，支护刚度高，如图1所示。这是全长锚与端锚的根本区别。

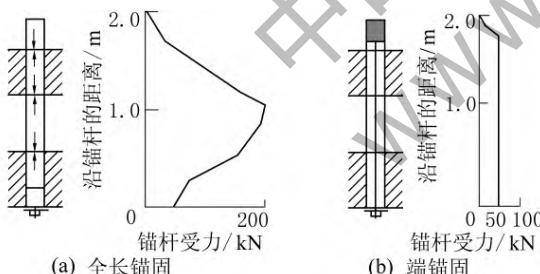


图1 端锚与全长锚支护作用的区别

预应力在锚杆支护中所起的关键作用近年来被人们逐渐认识并得到重视，锚杆预应力对巷道支护效果的影响很多学者都曾进行过详细的分析^[1-9-10]。全长预应力锚固不同于传统的全长锚固，其主要通过锚固剂的凝胶时间差来实现的，具有端部锚固和全长锚固的优点，能够在较长的锚杆杆体上施加预应力，锚杆预应力扩散效果比较好，同时增加了对围岩离层及错动的敏感度。煤巷锚杆支护技术规范规定，全长锚固是指锚杆的锚固长度不小于钻孔长度的90%。但有研究表明^[6]，

锚杆常在锚固段与自由段的交界面发生破坏，钻孔内没有锚固的位置是最容易发生破坏的位置。因此，本文提到的全长预应力锚固是锚固长度等于钻孔长度，即全钻孔充满锚固剂。

2 锚固方式对锚杆附加应力场的数值模拟

采用三维有限差分数值计算软件FLAC^{3D}，模拟锚杆锚固方式对锚杆支护附加应力场的影响。以潞安矿区典型的大断面巷道为模型进行模拟计算。巷道宽度5.0 m、高度3.5 m，掘进面积17.5 m²。巷道两帮为煤层，单轴抗压强度15 MPa；顶板为泥岩，单轴抗压强度35~40 MPa。

巷道采用锚杆与锚索联合支护，锚杆预紧力为60 kN时，端部锚固、加长锚固和全长锚固锚杆的应力分布如图2所示。从图2可看出以下3点。

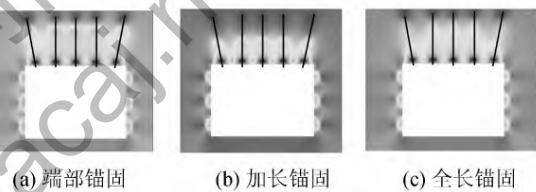


图2 不同锚固方式锚杆的支护附加应力场

1) 端部锚固时，由于锚杆自由段长，锚杆预紧力作用范围较大，形成的有效应力区厚度较大。锚杆自由段中部压应力较小，形成类似“葫芦”形的压应力分布区。

2) 加长锚固时，由于锚杆自由段较短，锚杆预紧力作用范围小，形成的有效应力区厚度较小，形成类似锥形的压应力分布区。

3) 全长锚固时，由于锚杆没有自由段，锚杆预紧力作用范围更小，较高的压应力主要集中在锚杆尾部，有效应力区厚度小，形成类似“高脚杯”形的压应力分布区。

数值模拟结果表明，在只考虑锚杆预应力的条件下，全长锚固与加长锚固的效果均比端部锚固差。提高全长锚固与加长锚固锚杆预应力扩散效果的有效途径是先施加预应力，锚固剂后固化，类似于预应力钢筋混凝土的结构。通过采用全长预应力结构，可适当减少锚杆长度。

3 全长预应力锚固强力支护试验

3.1 余吾煤业公司大断面巷道

1) 地质及生产条件。余吾煤业公司为潞安新

建矿井, 从地质条件看, S2205 开采过程同时受到陷落柱、断层及褶曲等各种构造应力的影响, 为深井高应力条件下的软弱煤层开采。S2205 回风巷全长 1 473 m, 沿 3 号煤层底板掘进, 3 号煤层的埋藏 550 m 左右, 平均厚度 5.99 m, 煤质松软。3 号煤直接顶为砂质泥岩, 平均厚度为 2.33 m, 基本顶为细粒砂岩, 平均厚度 2.25 m。

2) 支护方案。S2205 回风巷的断面为 5.2 m × 3.6 m, 经数值模拟计算分析并综合设计经验, 确定采用全长预应力锚固强力支护系统。顶板锚杆杆体钢材为 500 号 $\phi 22$ mm 螺纹钢, 长度 2.4 m。采用 4 支低黏度树脂药卷全长锚固, 1 支规格为 K2630, 另 3 支规格为 M2660。采用 W 钢带护顶, 钢带厚度 4 mm, 宽 280 mm, 长度 4 800 mm。采用金属网护顶, 锚杆排距 900 mm, 每排 6 根锚杆, 间距 900 mm。锚索材料为 $\phi 22$ mm, 1 × 19 股高强度钢绞线, 长度 6 300 mm。每排锚杆间打 2 根锚索, 锚索排距 900 mm, 间距 1 800 mm。巷帮锚杆形式和规格同顶锚杆, 采用 4 支低黏度树脂药卷全长锚固, 1 支规格为 K2630, 另 3 支规格为 M2660, 采用 W 钢护板护帮, 钢带厚度 4 mm, 宽 280 mm, 长度 450 mm。锚杆排距 900 mm, 每帮 4 根锚杆, 间距 900 mm。巷道支护布置如图 3 所示。

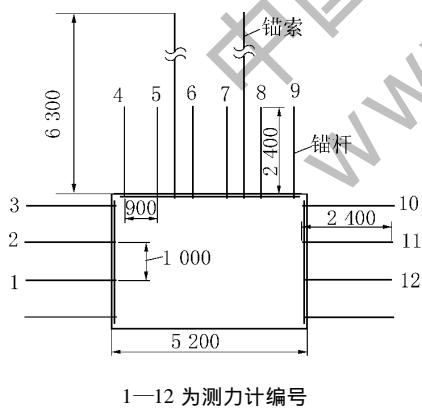


图 3 S2205 回风巷支护

3) 矿压监测。采用测力锚杆和锚杆测力计, 对全长预应力锚固的锚杆实际受力状况进行了现场监测。矿压监测结果: 巷道顶板在掘进期间两帮移近量为 61 mm, 顶底板移近量为 102 mm, 巷道变形量不大; 从图 4 锚杆测力计的监测曲线可以看出, 巷道掘进 5~13 m, 锚杆受力变化较大, 之后锚杆受力趋于稳定; 从图 5 测力锚杆受力情况来看, 锚杆受力沿长度方向分布不均匀, 孔口处锚杆

受力最小, 在距孔口 600~900 mm 锚杆受力最大; 900 mm 至锚杆锚端锚杆各部位受力基本不变。从矿压数据可以看出, 全长预应力锚固强力锚杆锚索组合支护系统支护效果良好, 能够有效地控制围岩的变形。

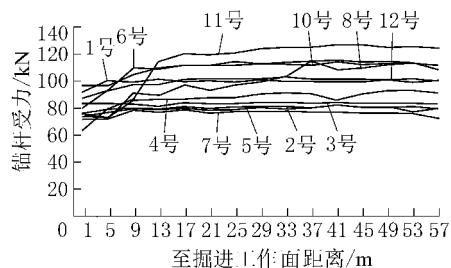


图 4 锚杆测力计监测曲线

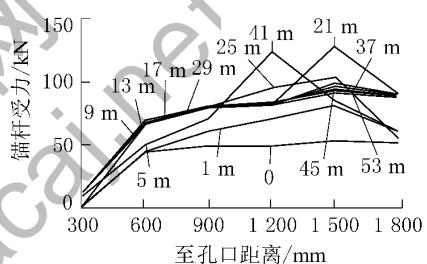


图 5 测力锚杆不同位置受力与掘进工作面距离的关系

3.2 常村煤矿上山巷道

1) 地质及生产条件。常村煤矿 S6 采区共有五条采区上山巷道, S6 采区 1 号回风上山是第 1 条掘进实体煤巷道, 掘进 500 多 m 后, 发现巷道多处出现大的变形, 最大位移量 900 mm 以上, 巷道底鼓量超过 600 mm, 巷道一帮多处出现“坠包”等情况, 原有的让压支护锚杆锚索多处破断。且巷道不断处于蠕变状态, 多处顶板离层仪监测结果显示浅部进入红色区域、深部进入黄色区域, 因此不得不在已掘巷道内增设架棚, 巷道支护困难。

S6 采区 3 号煤层平均厚度 6.08 m, 直接顶为 1.81 m 的砂质泥岩, 基本顶为 7.09 m 的中粒砂岩, 直接底为 1.88 m 的中粒砂岩, 基本底为 0.97 m 的泥岩。

2) 支护方案。考虑到掘进过程中设备尺寸, 通风要求和巷道围岩变形预留量, 设计 S6 采区上山群轨道上山宽 5.1 m, 高 3.5 m, 掘进断面为 17.85 m²。根据数值模拟计算结果, 结合原有的支护方案、窥视及矿压监测结果, 加之设计经验, 确定轨道上山采用全长预应力锚固强力锚杆锚索组合支护系统。

顶板锚杆杆体为22号左旋无纵筋螺纹钢筋，长度2.4 m，采用4支低黏度树脂药卷全长锚固，1支规格为K2630，另3支规格为M2660。采用W钢带护顶，钢带厚度4 mm，宽280 mm，长度4 800 mm。采用金属网护顶，锚杆排距900 mm，每排6根锚杆，间距900 mm。顶板锚索材料为φ22 mm，1×19股高强度低松弛预应力钢绞线，延伸率7%，长度6 300 mm，锚索采用三花布置，每2排锚杆打3根锚索，排距900 mm，锚索间距1 800 mm。巷帮锚杆要求同顶板锚杆，采用4支低黏度树脂药卷全长锚固，1支规格为K2630，另3支规格为M2660，采用W钢护板护帮，厚度4 mm，宽280 mm，长度450 mm；锚杆排距900 mm，每排每帮4根锚杆，间距900 mm。支护参数如图6所示。

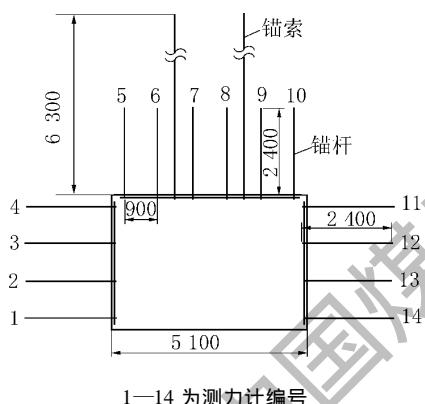


图6 轨道上山支护参数

3) 矿压监测。S6上山巷道施工过程中，对多条上山巷道进行了矿压监测，以S6轨道上山为例，进行了巷道表面位移、锚杆锚索受力等监测。

矿压监测数据显示，巷道两帮移近量最大为92 mm，顶板最大下沉量为31 mm。巷道掘进至40 m位置后，巷道两帮移近量和顶板下沉量基本趋于稳定。从图7和图8可知，锚杆初始受力基本为40~65 kN，此后，由于掘进扰动的影响，锚杆受力逐渐增加，当距掘进工作面20 m左右时，锚杆受力基本稳定，最大受力为120 kN。左侧帮的锚杆受力明显大于右侧帮，左侧帮底角锚杆的受力甚至达到了122 kN，锚索受力达到了387 kN，锚杆锚索受力有一个较为明显的增加过程，这说明锚杆初期较好地控制了围岩变形。

4 结 论

1) 全长预应力锚固不同于传统的全长锚固，

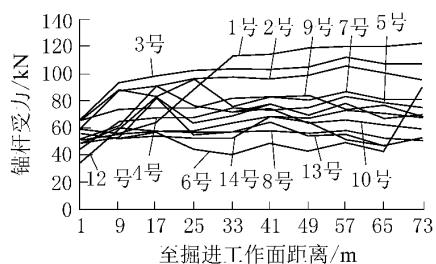


图7 锚杆测力计监测曲线

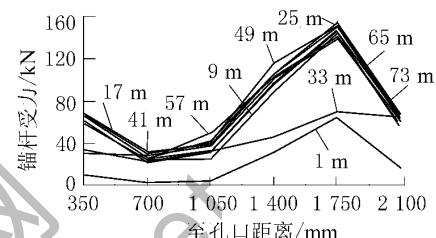


图8 测力锚杆受力与掘进工作面距离的关系

其主要通过锚固剂的凝胶时间差来实现，具有端部锚固和全长锚固的优点，能够在较长的锚杆杆体上施加预紧扭矩，锚杆预应力扩散效果比较好，同时增加了对围岩离层及错动的敏感度。

2) 数值模拟结果表明，在只考虑锚杆预应力的条件下，全长锚固与加长锚固的效果均比端部锚固差。提高全长锚固锚杆预应力扩散效果的有效途径是在锚固剂固化前先施加预应力，形成类似于预应力钢筋混凝土的结构的全长预应力锚固系统。

3) 在潞安余吾煤业公司S2205回风巷大断面巷道及常村矿S6采区上山有5条上山巷道在该巷道中进行了工业性试验，S2205回风巷顶板在掘进期间两帮移近量为61 mm，顶底板移近量为102 mm，巷道变形量不大；巷道掘进7~13 m，锚杆受力变化较大，之后锚杆受力趋于稳定；从常村矿S6采区矿压监测数据来看，巷道两帮移近量最大为92 mm，顶板最大下沉量为31 mm；锚杆受力基本稳定，最大受力为122 kN。从矿压监测数据来看，巷道变形量不大。

4) 采用测力锚杆对全长预应力锚固状态下锚杆受力分布及变化进行了监测。锚杆受力沿长度方向分布不均匀，孔口处锚杆受力最小，在距孔口600~900 mm锚杆受力最大；900 mm外至锚杆锚固端锚杆各部位受力基本不变。

5) 与其他传统高强度端锚及加长锚相比，全
(下转第35页)

加，端部冒顶情况增加，由于支架采用整体顶梁设计，对端部冒落区不能上挑及时支护，会导致支架端面维护变差，支架对断层的适应性一般。回采过程遇到风化氧化区域时，煤体强度明显降低，整体性变差，工作面割煤过后，易发生煤壁片帮和架前冒顶，支架的适应性较差。在压死支架等复杂条件下，两柱式支架采用双伸缩，压死后空间较小，且电液控制器被压坏，再操作困难。此类复杂的地质条件下，支架的适应性较差。

3 结 论

1) ZFY12000/23/40D 两柱式放顶煤支架结构合理，能够适应平朔矿区综放开采实践。

2) 实际使用过程中，两柱支架初撑力与运行工作阻力偏小，导致基本顶来压时动载系数较大，但支架支护强度能够满足综放采场对矿压的要求。

3) 实测分析表明两柱综放支架放煤前后受力变化不大，左右柱受力偏差不大，说明两柱支架能适应放煤引起的支架载荷变化。

4) 平衡千斤顶受力较小，放煤导致的平衡千斤顶动载变化不大，说明平衡千斤顶能够适应支架受力的变化。

5) 从支架移架时间和检修情况看，电液控制系统适应性一般，有待进一步提高应用水平。

6) 实践过程中，两柱综放支架在遇到断层和风化氧化区以及恶劣地质条件下的适应性较差。

综上所述，从两柱综放支架在平朔矿区应用情

况来看，虽暴露出一些应用不够成熟的一面，但对平朔矿区地质条件下的总体适应性还是比较好的，可以在类似条件下推广应用。

参考文献：

- [1] 黄尚智, 樊运策. 推进我国放顶煤液压支架改革的建议 [J]. 煤矿开采, 2007, 12 (6): 8-13.
- [2] 王金华. 综放开采是解决厚煤层开采难题的有效途径 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33 (2): 1-6.
- [3] 王家臣. 我国综放开采技术及其深层次发展问题的探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33 (1): 14-17.
- [4] 来存良. 年产 600 万吨综放工作面开采技术与设备配套 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20 (S1): 8-11.
- [5] 王国法. 两柱掩护式放顶煤液压支架设计研究 [J]. 煤炭科学技术, 2003, 31 (4): 36-37.
- [6] 王国法. 高端液压支架关键技术研究与产业化进展 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (4): 78-83.
- [7] 王国法. “十二五”煤矿开采装备技术的发展展望 [J]. 煤矿开采, 2011, 16 (3): 19-24.
- [8] 任永强, 于海涌, 范志忠. 两柱式放顶煤支架支撑效率分析 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (4): 94-96.
- [9] 范志忠, 于雷, 于海涌, 等. 大采高综放开采降低含矸率途径分析 [J]. 中国煤炭, 2011, 37 (2): 59-62.
- [10] 杨培举. 两柱掩护式放顶煤支架与围岩关系及适应性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009: 93-107.
- [11] 杨培举, 刘长友, 韩纪志, 等. 平衡千斤顶对放顶煤两柱掩护支架适应性的作用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24 (3): 278-282.
- [12] 天地科技股份有限公司开采设计事业部. 平朔矿区两柱掩护式支架综放工作面矿压规律及设备适应性研究 [R]. 北京: 天地科技股份有限公司, 2011.

(上接第 30 页)

长预应力锚固支护系统控制围岩变形及锚固能力更强，具有更大的优越性。全长预应力锚固是针对复杂困难条件巷道使用的支护系统，该系统可以先施加预应力，锚固剂后固化，真正实现了对锚杆全长施加预应力，工业性试验效果显著。

参考文献：

- [1] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [2] 王金华. 我国煤巷锚杆支护技术的新发展 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (2): 113-118.
- [3] 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.

- [4] 康红普. 煤巷锚杆支护成套技术研究与实践 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (21): 3959-3964.
- [5] 姜铁明. 煤巷锚杆支护构件的作用机理及其在晋城矿区的应用研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2008.
- [6] 吴拥政. 锚杆杆体的受力状态及支护作用研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2009.
- [7] 曹晨明, 吴拥政. 高预紧力强力支护系统及其在潞安矿区的应用研究 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36 (11): 26-29.
- [8] 吴拥政. 强动压下回采巷道高预紧力强力锚杆支护技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (3): 12-15.
- [9] 王强, 吴拥政. 煤矿井下锚杆预紧力控制研究 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (1): 29-32.
- [10] 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): 680-685.