

巷道支护理论与技术

# 预应力全长锚固锚杆抗剪作用分析

刘爱卿<sup>1,2</sup>, 鞠文君<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 开采设计研究院, 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]** 通过有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 模拟计算了预应力全长锚固锚杆抗剪作用, 着重探讨了围岩强度、锚杆以及预紧力对节理面抗剪性能的影响。模拟结果得出: 节理的抗剪性能受到围岩强度的显著影响; 加锚节理的抗剪性能由于锚杆与围岩组成的系统抗剪刚度提高, 使得节理的抗剪强度提高; 预紧力的施加一方面提高了支护系统的刚度, 另一方面使得锚杆轴向力相对于节理面法向分量增加, 提高了节理的抗剪性能。

**[关键词]** 预应力; 全长锚固; 抗剪; 节理

**[中图分类号]** TD353.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2012) 01-0045-04

## Analysis of Shear Resisting Action of Full-length Anchored Bolt with Pre-stress

LIU Ai-qing<sup>1,2</sup>, JU Wen-jun<sup>2</sup>

(1. Coal Mining & Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Applying FLAC<sup>3D</sup> to simulating shear resisting action of full-length anchored bolt with pre-stress, influence of surrounding rock strength, anchored bolt and pre-stress on shear resisting performance of joint was discussed. Simulation results were showed as follows. Shear resisting performance was influenced by surrounding rock strength largely. Increase of shear resisting stiffness of system composed by anchored bolt and surrounding rock would improve shear resisting strength of joint. Pre-stress not only improved stiffness of supporting system, but also made axial force of anchored bolt increase, so it improved shear resisting performance.

**Key words:** pre-stress; full-length anchored; shear resisting; joint

全长锚固锚杆的杆体全长与围岩粘结在一起, 使锚杆随着围岩移动而承受拉力, 对围岩的变形敏感。通过理论分析、数值模拟和井下试验得出, 提高锚杆支护系统的刚度非常重要, 提高支护刚度的途径包括: 一是给锚杆施加较大的预紧力, 并通过托板、钢带等构件实现预紧力的有效扩散; 二是采用加长或全长锚固<sup>[1]</sup>。高预应力全长锚固锚杆同时满足了上述两个方面, 即在围岩中形成了有效的压应力区, 提高了支护系统的刚度, 同时当岩层发生错动时, 锚杆与围岩形成的支护系统对变形非常敏感, 及时抑制围岩的离层和错动, 保证巷道的完整性和稳定性。

Bjurstrom 通过对锚固在花岗岩块体中锚杆进行剪切试验, 研究各种因素对岩石节理剪切强度的影响, 得出锚杆安装角度与节理小于 40° 时呈拉伸破坏, 大于 40° 时表现为拉伸和剪切耦合破坏, 但未考虑锚杆预紧力对岩石节理剪切强度的影响<sup>[2]</sup>。

Hibino 和 Motojima (1981) 在混凝土块体中对未锚固的锚杆做了剪切试验, 其一是研究发现锚杆的抗剪强度与安装角度无关, 这与他人的研究结果

截然相反。其二是锚杆的预紧力提高, 剪切位移降低, 但对抗剪强度无影响, 这与其后来的研究结果不一致<sup>[3]</sup>。

Hass (1981) 通过实验室试验研究了锚杆与节理呈不同安装角度 0°, +45° 和 -45° 时锚杆的抗剪强度, 随着剪切位移的增加, 锚杆收缩到岩体当中, 当锚杆安装有托盘时, 其抗剪强度提高了 23%。但是本实验由于设计原因, 其锚杆不能施加预紧力, 并未考虑预紧力的影响<sup>[4]</sup>。

葛修润等通过实验室模拟试验和理论分析, 发现加锚节理的抗剪强度随剪切位移的增加而增大, 并且提出锚杆倾角对加锚节理的抗剪强度有重大影响, 提出了锚杆最佳安装角度的公式<sup>[5]</sup>。

温进涛等对含结构面岩体的锚索锚固机理进行了实验室内模拟试验, 分别模拟了不同锚索安装角度及不同结构面粗糙程度下锚索的抗剪强度, 得出了锚固角的大小在光滑结构面情况下对峰值抗剪强度影响不超过 15%, 在粗糙结构面情况下对峰值影响为 30%<sup>[6]</sup>。

上述研究综合考虑了锚杆的安装角度、结构面

[收稿日期] 2011-10-20

[基金项目] 国家科技支撑计划课题 (2008BAB36B07); 天地科技股份有限公司工艺技术创新项目 (KJ-JJ-2011-KCSJ-05)

[作者简介] 刘爱卿 (1986-), 男, 河北临城人, 在读硕士研究生, 主要从事巷道矿压理论与支护技术研究。

粗糙度、托盘等因素对锚杆抗剪强度的影响，然而锚杆预应力对节理面的抗剪强度影响缺少系统研究。本文着重探讨了围岩强度和锚杆预紧力 2 种情况对节理抗剪强度的影响，进行了数值分析计算。

### 1 锚杆受剪切作用数值模型

通过数值分析软件 FLAC<sup>3D</sup> 计算了锚杆在受剪切作用下应力分布，分析了围岩强度及锚杆预紧力对围岩节理剪切作用的影响。

#### 1.1 建立模型

对单根锚杆支护的小范围内的锚固系统进行了等效处理，将围岩、树脂药卷和锚杆按实际尺寸进行建模，网格划分如图 1、图 2、图 3；锚杆采用各向同性弹性体本构模型，锚固剂、钻孔围岩采用摩尔库仑本构模型；围岩尺寸为：200mm×400mm×200mm，锚杆直径为 22mm，锚固剂环厚为 3mm，锚杆全长锚固在围岩中，共划分 21760 个单元，25053 个节点。

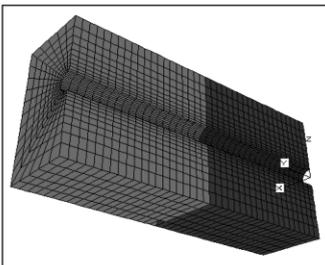


图 1 围岩模型

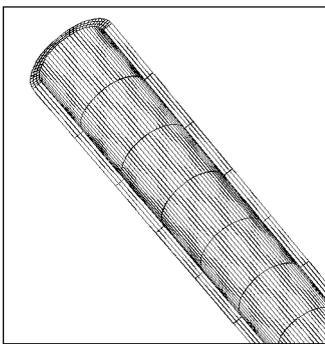


图 2 锚固剂模型

#### 1.2 边界条件及外力施加

模拟锚杆受剪切作用分析边界条件如图 4 所示，围岩块体一底部沿 z 轴方向固定，右边界沿 y 轴方向固定，在块体 2 的顶部采用速率加载方式，剪力通过监测固定 z 方向的节点不平衡力获得。预紧力通过在锚杆两端施加外载荷实现。

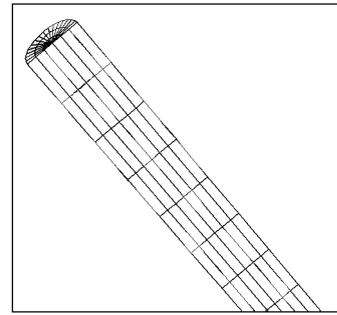


图 3 锚杆模型

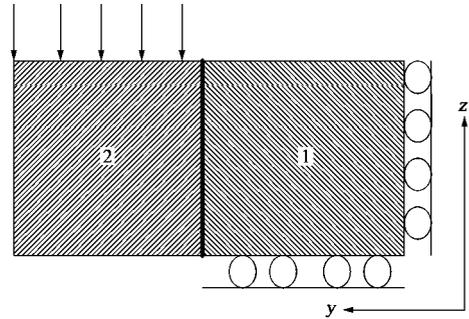


图 4 模型边界条件及外力施加

#### 1.3 材料参数

为了研究围岩强度对节理抗剪切作用的影响，本文选取了 3 种不同强度围岩及锚固剂、锚杆的力学性质如表 1。

表 1 围岩、锚固剂及锚杆的力学参数

力学参数	体积模量/GPa	切变模量/GPa	黏聚力/MPa	摩擦角 / (°)	抗拉强度/MPa
软岩	0.3600	0.1900	0.10	26	0.85
中等坚硬	0.0076	0.0046	4.78	32	0.99
硬岩	13.5700	9.1400	8.35	45	2.18
锚固剂	13.3000	6.1000	20.00	38	14.00
锚杆	143.0000	81.7000	-	-	-

### 2 模拟结果分析

#### 2.1 围岩强度对节理面抗剪性能分析

节理面的剪切变形与岩石强度、结构面粗糙度和法向力有关，通过对不同性质的围岩（不安装锚杆）进行剪切试验模拟，得出如图 5 剪力-位移曲线。通过曲线可知，在节理面性质相同的情况下，节理的剪切性能主要受围岩的强度影响。在剪切过程中，剪力和法向力的复合作用，使结构面凸台剪断或拉破坏。岩石强度越低，其在剪切过程中就越容易在结构面处发生破坏，所需剪力就越小。在剪切位移同为 5mm 时，硬岩的剪力比软岩的剪力提高了 70kN。

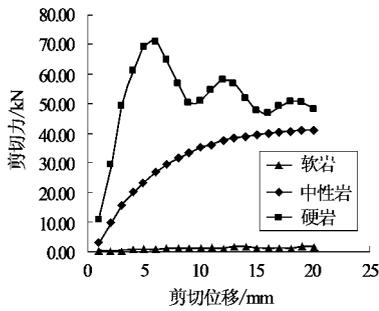


图5 围岩剪力-位移曲线(无锚杆)

### 2.2 锚杆对节理剪切作用的影响

由图6可知,围岩在安装锚杆后,锚杆与围岩组成的系统抗剪性能明显提高,尤其是软岩的抗剪性能,其剪切位移为10mm时,安装锚杆比无锚杆时抗剪力提高了130kN,主要是两方面原因:

一是围岩在安装锚杆后,弱面的抗张能力提高,且改善了弱面的抗剪性能,使得节理面的摩擦力提高,抗剪刚度提高。

二是锚杆受剪变形时,轴向拉力相对于节理面的法向分量表现为摩擦力,为节理面提供附加的抗剪能力,同时锚杆吸收了部分的抗剪能量,充分发挥了锚杆的支护性能,由图7、图8可知,在锚杆的上部左侧出现了压应力区,压应力值达600MPa,在右侧出现了拉应力区,达700MPa。

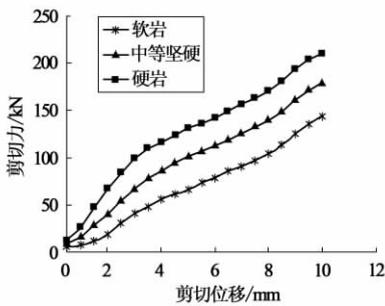


图6 围岩剪力-位移曲线(加锚杆)

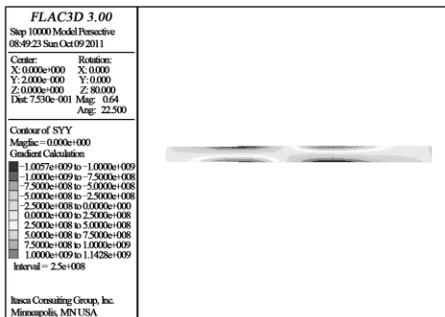


图7 沿锚杆轴向应力分布

### 2.3 预应力对节理剪切作用影响分析

支护系统刚度小于临界支护刚度,围岩将长期

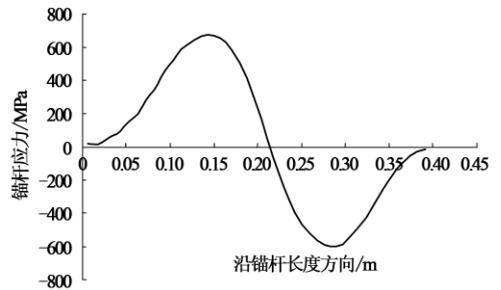


图8 沿锚杆轴向应力曲线(无预紧力)

处于变形与不稳定的状态,相反,支护系统刚度超过临界支护刚度,围岩变形得到有效地控制,其中预应力起决定性作用,只有提高了预紧力,才能有效地控制围岩的离层、错动<sup>[7]</sup>。

节理面的抗剪强度一般可用库仑准则表述:

$$\tau = \sigma_n \tan \phi + c$$

式中,  $c$ ,  $\phi$  分别是节理面上的黏聚力和内摩擦角;  $\sigma_n$  是作用在节理面上的法向应力。

图9为锚杆预紧力为80kN和无预紧力状态下的剪力-位移曲线,预应力锚杆在围岩中形成了支护应力场,一方面在围岩中形成了压应力区以及轴向力相对于节理的法向分量增加,提高了节理剪切变形的法向力,节理面抗剪强度提高;另一方面预紧力提高,支护系统的刚度提高,抵抗变形的能力提高。由图可知剪切位移为6mm时,预应力锚杆加固的围岩抗剪强度较无预紧力锚杆加固的围岩提高了26.7%(预紧力为80kN)。

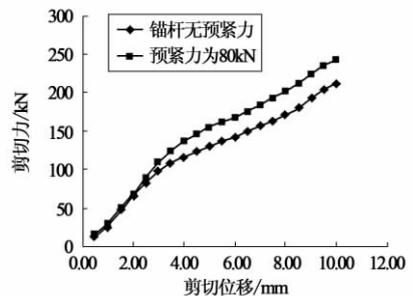


图9 不同预紧力下围岩剪力-位移曲线

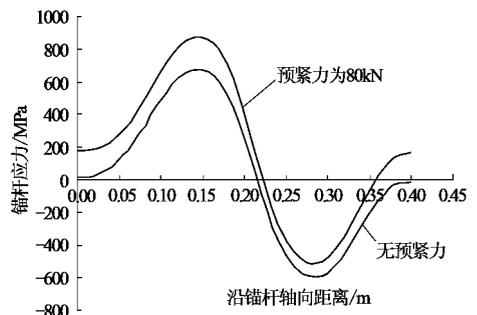


图10 不同预紧力下锚杆轴向应力

由图10可知锚杆的预紧力提高,锚杆拉应力

区应力值提高, 压应力区值降低, 考虑到锚杆的屈服强度, 锚杆的预应力不应过高, 否则会因为锚杆的拉应力超过其屈服强度发生破坏, 一般锚杆预应力不应超过锚杆屈服强度的 50%。

### 3 结论

通过对不同围岩强度和锚杆预紧力状况下的节理抗剪作用分析, 得出以下结论:

(1) 节理的抗剪性能受到围岩强度影响控制, 在无锚杆情况下, 硬岩的抗剪强度比软岩的抗剪强度有明显提高, 剪切位移为 5mm 时, 剪力提高了 70kN。

(2) 围岩在安装锚杆后, 不同力学性质的围岩抗剪强度都有所提高, 由于围岩与锚杆、锚固剂组成的系统刚度提高, 同时锚杆吸收部分剪切变形能量, 使得节理的抗剪切性能提高。

(3) 随着预紧力提高, 锚杆在围岩中形成的预应力场范围扩大, 系统的刚度提高, 锚杆轴向力相对于节理面的法向分量增加, 使得节理面的法向力提高, 节理抗剪强度提高。但是随着预紧力提高, 锚杆拉应力区值提高, 压应力区值降低, 锚杆容易发生拉伸破坏。因此, 锚杆的预紧力不应过

(上接 54 页)

支护困难; 巷道采用锚杆、锚索支护方式, 锚杆选用  $\phi 20\text{mm} \times 3100\text{mm}$  左旋无纵筋螺纹钢锚杆, 锚索选用  $\phi 17.8\text{mm} \times 8300\text{mm}$ , 支护强度不能适应这种大变形巷道的需要。

### 4 控制维护措施

(1) 优化巷道布置, 合理护巷煤柱留设。巷道布置应尽量减轻或避免采动引起的支承压力对巷道的影 响, 把巷道布置在低应力区内。依据微地震的监测结果和巷道变形破坏情况, 目前的巷道位置正处在应力增高区, 建议采用窄煤柱护巷方式, 煤柱尺寸为 12 ~ 15m, 既把巷道布置在低应力区, 又提高了资源采出率。

(2) 协调工作面接替关系, 延长相邻工作面的接替时间, 待采空区相对稳定后再接替开采, 减轻采空区侧向支承压力对巷道的影 响, 避免出现应力叠加; 相邻采掘工作面应尽量避免相向采掘, 缩短支承压力对巷道的影 响时间, 使巷道二次受到支承压力破坏。

(3) 在巷道支护上选用高强度、高刚度、高可靠性的锚杆、锚索主动支护技术<sup>[2]</sup>, 并对巷道

高, 应根据围岩和锚杆的性质确定预紧力的大小, 一般不应超过锚杆屈服强度的 50%。

(4) 本文存在的不足是节理面法向和锚杆平行, 并没有考虑锚杆安装角度对节理面抗剪性能的影响, 有待进一步的研究。

### 【参考文献】

- [1] 康红普, 王金华, 等. 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] Burstrom, S. Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts [J]. International congress of rock mechanics, 1974: 1194-1199.
- [3] Hibino, S and Motijima, M. Effects of rock bolting in jointy rocks [J]. Proceeding of the Int. Sym. on weak rock, 1981: 1057 - 1062.
- [4] Hass, C. J. Analysis of rock bolting to prevent shear movement in fractured ground [J]. Mining engineering, 1981: 698-704.
- [5] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究 [J]. 岩土工程学报, 1988, 10 (1): 8-19.
- [6] 温进涛, 朱维申, 李术才. 锚索对结构面的锚固抗剪效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (10).
- [7] 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, 30 (7): 680-685.

【责任编辑: 王兴库】

支护给予足够的预紧力, 起到主动支护作用。

(4) 延长采面超前支护距离, 对超前支承压 力影响大的区域加强支护, 采用超前液压支架、单体液压支柱增强支护强度, 控制顶、帮变形。

(5) 采取卸压措施, 在巷道底板施工卸压槽, 巷道两帮施工大孔径卸压孔 ( $\phi \leq 150\text{mm}$ ), 并配合松动爆破技术, 减少应力集中程度, 使支承压力峰值向深部转移, 同时为巷道围岩变形提供一定的补偿空间。

### 【参考文献】

- [1] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [2] 康红普, 王金华, 等. 煤巷锚杆支护理论与成套技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [3] 陈登红, 华心祝, 李英明. 复杂条件下回采巷道围岩控制综合技术 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (12): 14-16.
- [4] 刘全明. 大采高综放工作面长度的空间效应初探 [J]. 煤矿开采, 2010, 15 (3): 27-29.
- [5] 吴拥政. 强动压回采巷道高预紧力强力锚杆支护技术 [J]. 煤炭科学技术, 2010 (3): 12-14.
- [6] 宋金旺. 火成岩侵入的厚层破碎煤层全煤动压巷道支护 [J]. 煤炭科学技术, 2009 (12): 15-17.

【责任编辑: 姜鹏飞】