中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

第32卷第7期 煤 炭 学 报 Vol. 32 No. 7
2007年 7月 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY July 2007

文章编号:0253-9993(2007)07-0680-06

预应力在锚杆支护中的作用

康红普[1], 姜铁明[2], 高富强[1]

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 晋城无烟煤矿业集团公司 技术中心, 山西 晋城 048006)

摘 要: 在分析目前复杂困难条件下锚杆支护存在问题的基础上, 论述锚杆支护系统刚度, 特别是预应力对支护效果的重要性. 采用有限差分数值计算软件分析了不同预应力下锚杆、锚索产生的应力场分布特征, 以及钢带对锚杆预应力扩散的作用. 提出锚杆主动支护系数、强度利用系数、预应力长度系数、有效压应力区、预应力扩散系数、有效压应力区骨架网状结构及临界支护刚度等概念. 井下试验表明, 大幅度提高锚杆预应力可显著减小巷道围岩变形, 有效控制顶板离层; 钢带在预应力支护系统中起非常重要的作用; 锚杆预应力存在临界值, 达到或超过临界值后锚杆支护可有效控制围岩变形与破坏.

关键词: 预应力; 锚杆支护; 支护刚度; 应力场

中图分类号: TD353.6 **文献标识码**: A

Effect of pretensioned stress to rock bolting

KANG Hong-pu[1], JIANG Tie-ming[2], GAO Fu-qiang[1]

(1. *Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing* 100013, *China*; 2. *Jincheng Anthracite Coal Mining Grop. Ltd.*, *Jincheng* 048006, *China*)

Abstract: Based on the analysis on existing problems of rock bolting for complicated and difficulty roadways, the importance of rock bolting stiffness, especialy the pretensioned stress to bolting effects was expounded. The distribution features of the stress fields caused by the pretensioned stresses of bolts and cables, and the effects of steel strip to the bolt pretensioned stress diffusion were analyzed through finite difference numerical modelling. The new concepts, such as the active supporting coefficient, the coefficient of strength utilization, the coefficient of pretensioned bolt length, the effective compressive zone, the coefficient of pretensioned stress diffusion, the framework and mesh structure of the effective compressive zone, and the critical supporting stiffness were put forward. The underground tests show that the deformation and roof delamination of roadway surrounding rock can be effectively reduced by means of great increase of the bolt pretensioned stress, the steel strip plays an important role in the rock bolting system, and there exsits a critical value for pretensioned stress, up to or beyond which the rock bolting can effectively control the deformation and damage of the surrounding rock.

Key words: pretensioned stress; rock bolting; supporting stiffness; stress fields

锚杆支护技术已经得到大面积推广应用, 成为煤矿巷道首选的、安全高效的主要支护方式. 但是, 随着煤矿开采强度的大幅度增加, 及矿井向深度及广度发展, 出现了千米深井高地应力巷道、极破碎围岩巷道、特大断面巷道、受强烈采动影响的巷道及沿空留巷等复杂困难巷道, 对巷道支护技术提出了更高、更苛刻的要求. 部分矿区的锚杆支护巷道围岩变形强烈, 支护效果较差, 巷道安全得不到保证. 具体表现为: ① 锚杆预应力小, 预应力扩散效果差, 支护刚度低, 致使锚杆主动支护作用不能充分发挥, 不能有

收稿日期: 2007-05-24 **责任编辑**: 柴海涛
作者简介: 康红普 (1965-), 男, 山西五台人, 研究员, 博士生导师. Tel: 010-84263125, E-mail: kanghp@163.com

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

效控制围岩离层与破坏；② 不同程度地出现锚杆被拉断、剪断和弯曲断裂的现象，表明锚杆强度偏低，锚杆螺纹加工精度低，锚杆受力状态不佳；③ 锚杆虽然实现了加长与全长锚固，但只有锚杆自由段施加预应力，不能实现全长预应力锚固，影响锚杆支护效果；④ 组合构件强度、刚度、护表面积不够，出现被拉断、剪断、压穿等现象.

为了解决上述支护问题，开发出高预应力、强力锚杆支护系统，并在井下得到成功应用，大幅度减少了巷道围岩变形与破坏，巷道支护状况发生了本质改变. 同时，实现了高强度、高刚度、高可靠性与低支护密度的“三高一低”的现代锚杆支护设计理念. 本文主要探讨预应力在锚杆支护中的重要作用.

1　锚杆支护系统刚度与预应力的重要性

理论分析、数值模拟与井下试验研究成果表明，提高锚杆支护系统的刚度非常重要. 主要技术途径有 2 个方面：① 给锚杆施加较大的预应力，并通过托板、钢带等构件实现预应力扩散；② 采用加长锚固或全长锚固，能及时抑制离层与错动的产生. 特别是锚杆预应力在支护系统中起决定性作用.

锚杆预应力涉及以下几个定义：① 锚杆预紧力. 在锚杆安装过程中，对锚杆杆体施加的轴向拉力（kN）；② 锚杆预紧力矩. 在锚杆安装过程中，对锚杆螺母施加的力矩（N·m）；③ 锚杆预应力. 在锚杆安装过程中，对锚杆杆体施加的轴向拉应力（MPa）. 锚杆预应力等于锚杆预紧力与杆体横截面积的比值.

锚杆（索）预应力的重要性，在岩土加固工程中已经得到广泛认可与重视. 在交通、水利、水电、基坑及岩土边坡工程中，预应力锚杆（索）和全长锚固锚杆相结合的加固方式最为普遍[1,2]. 如三峡永久船闸边坡锚索的拉力值达 3 MN；混凝土重力坝采用拉力值为 2.4 ~ 8.0 MN 的预应力锚索加固；基坑的数值模拟表明，提高锚索预应力，可有效减小塑性区[3].

在 20 世纪 70 年代末，美国首次将涨壳式锚头与树脂锚固剂联合使用，并采用减摩塑料垫圈实现了锚杆的高预应力. 目前，美国矿山巷道的锚杆预紧力一般为 100 kN，可达到锚杆杆体屈服载荷的 50% ~ 75%. 高预应力锚杆显著提高了顶板的稳定性，大大降低了冒顶事故. 美国矿山之所以取得如此支护效果，源于 3 个方面的原因：① 从机理上认识到锚杆预应力的重要作用[4]；② 锚杆加工精度高，螺纹预紧力矩与预紧力的转换系数高；③ 采用性能优越的锚杆施工机具，在锚杆安装过程中能够实现高预应力.

受美国巷道锚杆支护设计理念的影响，我国学者对锚杆预应力的作用也有一定的研究. 郑雨天、朱浮声的研究结果表明[5]，当锚杆预应力达 60 ~ 70 kN 时，就可有效控制巷道顶板下沉. 陈庆敏等提出基于水平地应力的“刚性”梁结构[6]，认为当锚杆预应力达到一定程度时，可使锚杆长度范围内和长度以上的顶板离层消除. 张农等也对锚杆预应力的作用进行了研究[7]. 自 1996 年我国煤矿推广应用小孔径预应力树脂锚固锚索以来，取得良好支护效果[8,9]. 不仅因为锚索锚固深度大，更主要的是锚索可以施加较大的预应力，抑制了围岩的离层、滑动等有害变形.

我国煤矿对锚杆预应力的认识还很不够. 往往通过增加锚杆密度提高支护效果，导致锚杆支护密度过大，支护系统的作用不能充分发挥，而且影响巷道施工速度. 此外，国内现有锚杆螺纹加工精度低、施工机具扭矩小，不能实现高预应力也是一个重要原因. 因此，有必要从理论上进一步深入研究高预应力支护体系的作用机理，为支护设计提供可靠依据. 同时应开发研制高预应力施工机具与高加工精度的锚杆材料，使锚杆支护真正实现主动、及时支护，实现从低强度、高强度到高刚度、高预应力支护的跨越.

2　锚杆预应力产生的应力场分布

为了清晰地反映出锚杆预应力产生的应力场，在不考虑原岩应力场的条件下，采用有限差分数值模拟软件 FLAC^{3D}分析了锚杆与锚索预应力引起的应力场分布特征与影响因素.

2.1　锚杆预应力的作用

当锚杆预紧力为 20 kN 时锚杆支护的应力场分布如图 1（a）所示. 锚杆尾部附近出现了明显的应力集中现象，最大压应力达 0.07 MPa. 随着深入顶板远离锚杆尾部，压应力逐渐减小. 至锚杆长度的 1/5

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

处，压应力减小到 0.02 MPa. 在锚杆长度一半左右的范围内形成了应力值大于 0.01 MPa 的压应力区，之上为应力很小的近零应力区. 在锚杆端部出现了拉应力区，但应力值很小. 2 根锚杆之间有效压应力区小，而且相互独立，没有连成整体. 由于锚杆预紧力低，导致锚杆支护产生的应力场应力值小，形成的有效压应力区范围小，孤立分布，没有连成整体. 近零应力区范围大，锚杆支护在近零应力区几乎没有加固围岩的作用.

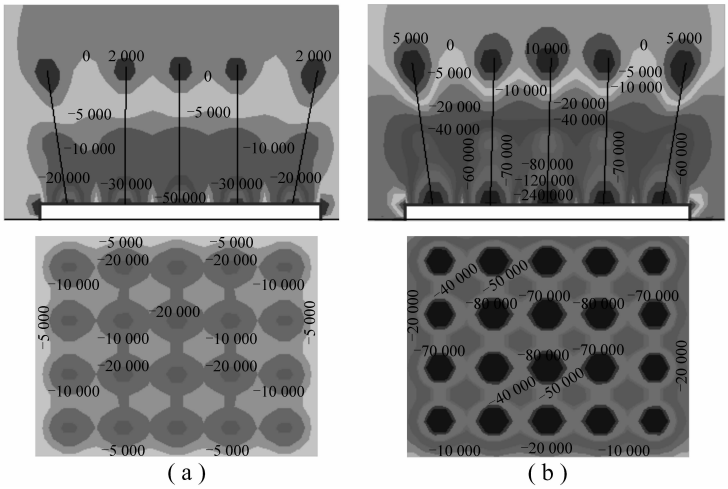


图 1 不同锚杆预应力产生的应力场分布

Fig. 1 Stress field distribution caused by different pretensioned forces on rock bolts

当预紧力为 100 kN 时锚杆支护的应力场分布如图 1（b）所示. 锚杆尾部附近出现了较大的应力集中现象，最大压应力达 0.36 MPa. 随着深入顶板远离锚杆尾部，压应力逐渐减小. 至锚杆长度的 1/5 处，压应力减小到 0.12 MPa. 在锚杆长度一半左右的范围内形成了应力值大于 0.04 MPa 的压应力区，有效压应力区范围明显扩大，近零应力区大幅度缩小. 在锚杆端部出现了拉应力区，应力值很小. 锚杆附近应力集中明显，随着远离锚杆位置，压应力逐渐减小. 但是，即使到 2 根锚杆中部，应力值仍达到 0.04 MPa. 锚杆之间形成了连成一片的、整体的有效压应力区，近零应力区基本消失，锚杆对锚杆之间的围岩起到有效的支护作用. 可见，在高预紧力条件下，锚杆支护产生的应力值大，形成的有效压应力区范围广，几乎覆盖了整个顶板，锚杆的主动支护作用得到充分发挥.

2.2 钢带的作用

有无钢带的锚杆支护产生的应力分布如图 2 所示. 从图中可得出：① 无钢带时，锚杆形成的有效压应力区无论在锚杆尾部还是中部，都是彼此独立的. 特别是在顶板表面附近，有效压应力区呈圆形分布，相互不连接，锚杆之间的压应力很小，预应力扩散范围小，锚杆不能有效支护锚杆之间的围岩. ② 有钢带时，锚杆形成的有效压应力区在沿钢带长度方向上显著扩大. 在顶板表面附近，有效压应力区呈椭圆形分布，彼此相互连接，形成连续的有效压应力带，预应力扩散范围大，锚杆能有效支护锚杆之间的围岩. ③ 钢带实现了锚杆预应力的有效扩散，显著提高了对锚杆之间围岩的支护作用，支护系统的整体支护效果明显改善.

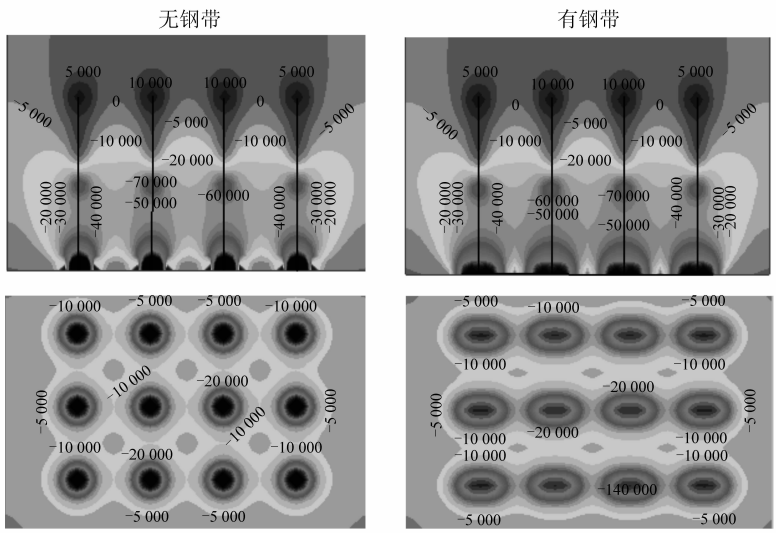


图 2 有无钢带锚杆预应力产生的应力场分布

Fig. 2 Stress field distribution caused by pretensioned forces on rock bolts with and without steel strip

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

2.3　锚索预应力产生的应力场

分析了不同锚索预紧力产生的应力场. 图 3（a）是锚索预紧力为 200 kN 时的应力场分布. 分析结果表明：① 施加一定预紧力后，在锚索尾部附近出现了明显的压应力集中；在锚固起始端下部，也出现较大的压应力，其上部出现了明显的拉应力区. 锚索自由段中部分布有一定数值的压应力. ② 当锚索预紧力较小时，锚索尾部附近出现的压应力值较小，锚索中部压应力更小. 有效压应力区小，分布孤立. 近零应力区面积大，在这些区域锚索预应力的作用很小. 在 2 根锚索之间，有效压应力区没有连接，彼此孤立. 锚索对锚索之间的围岩没有支护作用. ③ 当锚索预紧力较大时（200 kN），锚索尾部附近出现的压应力值较大（0.5 MPa），虽然随着远离锚索尾部，压应力不断减小，但在锚索中部也达到0.04 MPa，在锚索自由段长度范围内，形成了相互连接成一片的、叠加的有效压应力区，在这些区域锚索预应力的作用很明显. 在 2 根锚索之间，有效压应力区有所重叠，对锚索之间的围岩有较明显的主动支护作用.

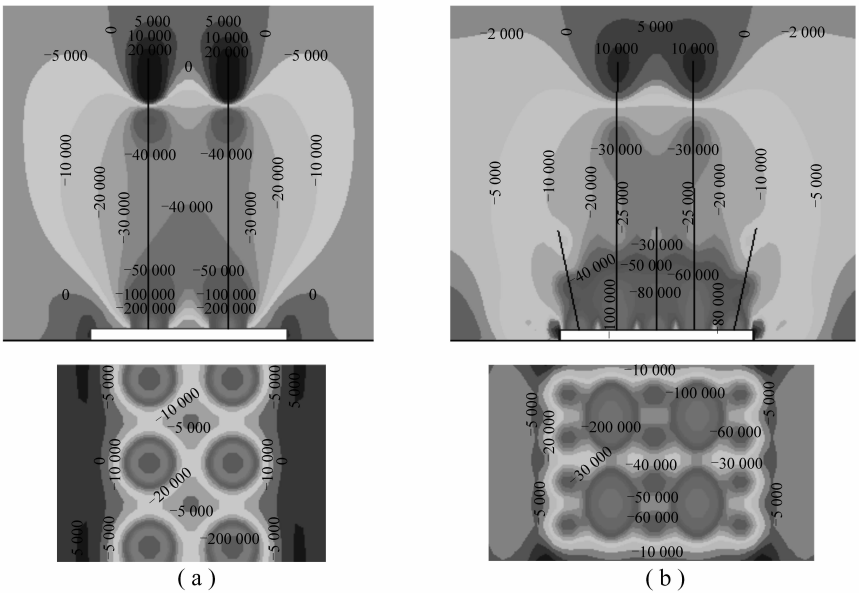


图 3　锚索、锚杆与锚索预应力产生的应力场分布

Fig. 3　Stress field distribution caused by pretensioned forces on cables and bolts combined with cables

2.4　锚杆与锚索联合支护的应力场

图 3（b）是锚杆与锚索联合支护时的应力场分布. 从图中可得出：① 由于锚杆与锚索的联合支护作用，显著提高了锚杆锚固区内的压应力值，即使在锚杆端部，也出现了 0.03 MPa 的压应力. 有效压应力区覆盖了锚杆锚固区内和锚索自由段长度范围内的大部分区域，连接、叠加成一个范围很大的主动支护区. ② 由于锚索具有较大的预紧力（200 kN），使得锚杆端部的拉应力区消失，转换成有一定压应力值的压缩区. ③ 在锚杆与锚索之间，有效压应力区相互连接、重叠，形成以锚索为骨架、锚杆为连续带的骨架网状结构，对锚杆、锚索之间围岩的主动支护作用非常明显.

3　预应力锚杆支护新概念的提出

（1）*锚杆主动支护系数*　锚杆主动支护系数 k_a 为锚杆预应力 σ_0 与杆体屈服强度 σ_s 的比值，即 $k_a = \sigma_0/\sigma_s$，根据主动支护系数 k_a，对预应力锚杆支护系统进行初步划分见，结果表 1.

（2）*锚杆强度利用系数*　锚杆最大强度利用系数 k_p 为锚杆工作状态

表 1　锚杆主动支护性与预应力分类

Table 1　The active supporting characters and pretensioned stress classification for rock bolts

项　目	k_a				
	0 ~ 0.15	0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.75	> 0.75
支护主动性	被动支护	低主动支护	中主动支护	高主动支护	极高主动支护
预应力状态	极低预应力	低预应力	中等预应力	高预应力	超高预应力

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

的最大轴向拉力 P 与杆体拉断载荷 P_b 的比值，即 $k_p = P/P_b$. 对于轴向拉力沿长度方向分布不均匀的锚杆，可用下式计算锚杆强度平均利用系数，即

$$k_p = \int_0^l \frac{P(x)}{P_b l}\mathrm{d}x,$$

式中，$P(x)$为锚杆工作状态下沿长度方向轴力分布，kN；l 为锚杆有效长度，m.

根据强度利用系数 k_p，对锚杆强度的利用率进行初步划分，当 $k_p = 0 \sim 0.2$ 时，强度利用率为极低；当 $k_p = 0.20 \sim 0.40$ 时强度利用率为低；当 $k_p = 0.40 \sim 0.60$ 时，强度利用率为中等；当 $k_p = 0.60 \sim 0.80$ 时，强度利用率为高；当 $k_p > 0.8$ 时，强度利用率为极高.

(3) *锚杆预应力长度系数* 锚杆预应力长度系数 k_1 为：锚杆施加预应力长度 l_p 与锚杆杆体全长 l 的比值，即 $k_l = l_p/l$.

对于端部锚固预应力锚杆，k_l 较大；对于加长锚固锚杆，k_l 中等；对于全长锚固锚杆（先锚固后施加预应力），k_l 很小. 因此，对于加长锚固与全长锚固，应先施加预应力后锚固，实现全长预应力锚固.

(4) *有效压应力区及其重叠* 锚杆预应力扩散到围岩中，形成一定数值的压应力，能够有效抑制拉应力出现的区域. 有效压应力区中压力越大，范围越广，支护效果越好.

在锚杆群支护中，相邻锚杆预应力形成有效压应力区相互重叠. 只有有效压应力区重叠，才能将单根锚杆的作用联成整体，有效控制锚杆之间围岩的变形与破坏，提高支护系统的整体支护作用.

(5) *预应力扩散系数* 预应力扩散系数为锚杆预应力在围岩中形成的有效压应力区宽度 l_d 与锚杆长度的比值，即 $k_d = l_d/l$. 预应力扩散系数与锚杆预应力、长度、组合构件、围岩性质、结构面分布等因素有关. 预应力扩散系数越大，支护效果越好. 在预应力支护系统中，钢带的作用有时比锚杆本身更重要.

(6) *有效压应力区骨架网状结构* 在预应力锚杆与锚索联合支护系统中，锚杆与锚索之间有效压应力区相互连接、重叠，形成的锚索为骨架、锚杆为连续带的网状结构. 该结构的形成充分发挥了锚杆与锚索的支护作用，显著提高了预应力锚杆与锚索联合支护系统的整体支护效果.

(7) *临界支护刚度* 临界支护刚度是使锚固区不产生明显离层和拉应力区所需要支护系统提供的刚度. 支护系统的刚度小于临界支护刚度，围岩将长期处于变形与不稳定状态；相反，支护系统的刚度达到或超过临界支护刚度，围岩变形得到有效抑制，巷道处于长期稳定状态.

支护刚度的关键影响因素是锚杆预应力，因此提出锚杆临界预应力的概念. 临界预应力是使锚固区不产生明显离层和拉应力区所需要的预应力值. 井下实测数据表明，当锚杆预应力达到一定数值后，完全可以有效控制离层，而且锚杆受力变化不大. 因此，可将锚杆受力变化不大时的预应力值作为临界值.

4 预应力锚杆支护系统的井下应用

高预应力、强力锚杆支护系统开发出后，在新汶、潞安、晋城等矿区井下得到成功应用[10]，巷道支护状况发生本质变化，并发现以下现象.

(1) *预应力对锚杆支护控制围岩变形的能力起决定性作用* 大幅度提高锚杆预应力可显著减小巷道围岩变形，有效控制顶板离层. 新汶协庄矿 1202E 运输巷，埋深 1 150 ~ 1 200 m，最大水平主应力达 35 ~ 40 MPa. 巷道采用低强度、低预紧力（15 ~ 30 kN）的锚杆支护，两帮位移量达 779 mm，顶底板移近量达 930 mm，顶板离层 80 mm，部分锚索及锚杆被拉断，钢带被撕裂，顶板下沉和破坏严重；采用高预紧力（80 ~ 100 kN）强力锚杆支护，巷道两帮位移量为 173 mm，顶底板移近量为 281 mm，顶板离层仅为 4 mm，分别为前者的 22.2%，30.2%，5.0%. 巷道围岩稳定，顶板非常完整，围岩变形量大幅度降低.

(2) *钢带在预应力支护系统中的作用非常重要* 在井下试验过程中，对不同类型、规格的组合构件的支护效果进行了比较. 钢筋托梁由于强度低、刚度低、护表面积小，与围岩表面为线接触，预应力扩散效果差，与高预应力锚杆支护性能不匹配，因而支护效果差.

W 钢带具有良好的支护性能，但不同尺寸的钢带支护效果也有明显差别. 新汶矿区的应用结果表明，

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

对于超千米深井巷道，在同样锚杆支护参数的条件下，采用厚 3 mm 的 W 钢带围岩变形较大，顶板比较破碎，钢带易出现撕裂与压穿等破坏现象；采用厚 5 mm 的 W 钢带后顶板变得非常完整，围岩变形明显减小，钢带撕裂与压穿现象消失. 晋城矿区特大断面开切眼（40 m^2）采用厚 5 mm 的 W 钢带配强力锚杆与锚索支护，有效控制了围岩变形，顶板没有出现明显的离层现象.

（3）*预应力锚杆支护存在临界支护刚度*　对不同预紧力的锚杆受力监测数据分析比较得出：低预紧力（15 ~ 30 kN）锚杆安装后，受力增加很快；将预紧力增加到 40 ~ 50 kN，锚杆受力增加也比较快，但比低预紧力锚杆小，围岩变形与顶板离层仍比较大；而高预紧力（80 ~ 100 kN）强力锚杆安装后受力变化不大，有效控制了围岩的扩容与离层. 因此，锚杆支护的预应力存在临界值.

5　结　　论

（1）提高锚杆支护系统的刚度对支护效果非常重要，锚杆预应力起决定性作用. 给锚杆施加较大的预应力，并通过托板、钢带等构件实现预应力扩散是提高锚杆支护效果的有效途径.

（2）锚杆预应力低，导致锚杆支护产生的应力场应力值小，形成的有效压应力区范围小，而且孤立分布，没有连成整体；在高预应力条件下，锚杆产生的应力值大，形成的有效压应力区范围广，几乎覆盖了整个顶板，锚杆的主动支护作用得到充分发挥.

（3）钢带使锚杆形成的有效压应力区在沿钢带长度方向上显著扩大. 在顶板表面附近形成呈椭圆形分布、彼此相互连接的有效压应力带. 钢带实现了锚杆预应力的有效扩散，显著提高了对锚杆之间围岩的支护作用，支护系统的整体支护效果明显改善.

（4）锚杆与锚索联合支护形成的有效压应力区覆盖了锚杆锚固区内和锚索自由段长度范围内的大部分区域，连接、叠加成一个范围很大的主动支护区，形成以锚索为骨架、锚杆为连续带的骨架网状结构，对锚杆、锚索之间围岩的主动支护作用非常明显.

（5）锚杆主动支护系数、锚杆强度利用系数、锚杆预应力长度系数、有效压应力区、预应力扩散系数、有效压应力区骨架网状结构及临界支护刚度等概念的提出，深化了对预应力锚杆支护机理的认识.

（6）提高锚杆预应力可显著减小巷道围岩变形，有效控制顶板离层；钢带在预应力支护系统中的作用非常重要；锚杆预应力存在临界值，达到或超过临界值后锚杆支护可有效控制围岩变形与破坏.

参考文献：

[1]　赵长海. 预应力锚固技术［M］. 北京：中国水利水电出版社，2002.

[2]　程良奎，范景伦，韩　军，等. 岩土锚固［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2003.

[3]　贾金青，郑卫锋，陈国周. 预应力锚杆柔性支护技术的数值分析［J］. 岩石力学与工程学报，2005，24（21）：3 978 ~ 3 982.

[4]　Song Guo，Stankus J. Control mechanism of a tensioned bolt system in the laminated roof with a large horizontal stress［A］. 16th Int. Conf. on Ground Control in Mining［C］. Morgantown，West Virginia，1997.

[5]　郑雨天，朱浮声. 预应力锚杆体系－锚杆支护技术发展的新阶段［J］. 矿山压力与顶板管理，1995（1）：2 ~ 7.

[6]　陈庆敏，郭　颂. 基于高水平地应力的锚杆“刚性”梁支护理论及其设计方法［J］. 煤炭学报，2001，26（S0）：111 ~ 115.

[7]　张　农，高明仕. 煤巷高强预应力锚杆支护技术与应用［J］. 中国矿业大学学报，2004，33（5）：524 ~ 527.

[8]　康红普. 高强度锚杆支护技术的发展与应用［J］. 煤炭科学技术，2000，28（2）：1 ~ 4.

[9]　康红普，林　健，张冰川. 小孔径预应力锚索加固困难巷道的研究与实践［J］. 岩石力学与工程学报，2003，22（3）：387 ~ 390.

[10]　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.