

文章编号:0253-9993(2012)12-1987-07

锚杆预紧力对锚固体强度强化的模拟实验研究

韦四江,勾攀峰

(河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454003)

摘要:锚杆预紧力在巷道支护中发挥着重要作用,但其对锚固体强度强化特征的研究仍存在不少问题;以砂蜡材料、预紧力锚杆和平面应变约束装置制作锚固分离体,在RMT-150C实验机上对其力学特性进行了研究。实验结果表明:锚固体的峰值强度、残余强度的强化系数和岩体强度、锚杆预紧力呈正相关,岩体强度一定时,随着锚杆预紧力的增大,强化系数逐渐增加,锚杆预紧力对锚固体峰后残余强度的强化大于对锚固体峰值强度的强化。锚固体的应变-应力全程曲线与锚杆受力存在着对应关系,锚固体屈服之前,锚杆受力增加缓慢;屈服点之后,受力急剧增加;峰后软化阶段锚杆受力逐渐增加,摩擦阶段锚杆受力处在不断的调整下降中。预紧力一定时,岩体强度越高,锚杆受力增加幅度越小;岩体强度一定时,高预紧力锚杆受力增幅较小;软弱岩层破坏后,锚杆载荷的损失比坚硬岩层大,预紧力锚杆对软弱岩层的作用比坚硬岩层明显。现场实践表明,提高锚杆预紧力能够有效控制围岩的变形。

关键词:锚杆;预紧力;锚固体;强度强化

中图分类号:TD353.6 **文献标志码:**A

Analogy simulation test on strengthening effect for pretension of bolts on anchorage body

WEI Si-jiang, GOU Pan-feng

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Bolt pretension has an important part in roadway support, but the study on strengthening characteristics of anchorage body with pre-stressed bolts still has many problems. Mechanics characteristics of detached anchorage body was researched by using RMT-150C testing machine, which was fabricated by wax-sand, pretension bolts and plain-strain restrain device. The results indicate that strength enhancement factor of peak strength, residual strength are positive correlation with rock strength and pretension of bolts. Strength enhancement factor is gradually increasing with pretension when rock strength is constant, and the residual strength enhancement factor of pretension of is greater than that of peak. There are corresponding relationship with stress-strain curve and bolts loads. Congruent relationship exists between stress-strain curve and bolt load. Before surrender point, bolt load increases slowly; however which increases rapidly after surrender point. Bolt load increases gradually on post-peak points, and constantly descends on flow phase. The higher strength of rock is, the lower increase rate of bolts loads are with the same pretension. The increase rate smaller is, the higher pretension is with the same rock. The loss of pretension in failure stage is much more of soft rock than that of hard rock. The strengthening effect in soft rock is obvious than that of in hard rock. Site practice shows that surrounding rock deformation can be decreased effectively with high bolt pretension.

Key words: bolt; pretension; anchorage body; strength enhancement

侯朝炯、勾攀峰通过相似模拟实验建立了围岩锚固-固体强化理论,认为锚杆能够增强巷道围岩的峰值强

收稿日期:2011-11-11 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50874037,51174078);河南理工大学博士基金资助项目(82012-077)

作者简介:韦四江(1977—),男,河南扶沟人,副教授,博士。E-mail: jzitswj@126.com

度、残余强度,增强围岩的黏结力和内摩擦角^[1-2]。锚杆作用机理多考虑锚杆密度与布置角度对锚固机理的作用^[3],而对锚杆预紧力的作用考虑较少。经过十几年的发展,高强度、高刚度、高预紧力的锚杆支护系统已成为深井巷道围岩控制的主要手段,预紧力是锚杆支护的关键参数,对支护起着决定性作用^[4]。高预紧力、强力支护锚杆支护系统在新汶矿区千米深井巷道^[5]、潞安漳村煤矿二次采动、破碎围岩巷道^[6]、淮南新区谢桥矿沿空掘进的顶板煤巷^[7]等困难复杂条件下获得了成功应用。

在预紧力对巷道围岩稳定机理方面,国内外学者大多研究锚杆预紧力的分布状态^[8]、扩散状态与实施效果^[9]及横向挤压作用所形成的整体锚固结构^[10];在工程实践方面,形成了基于锚杆高预紧力的高强锚固支理论^[11-12]、锚杆(索)预紧力的取值范围及其协同机制^[13]。

上述研究成果对预紧力对锚固体强度的作用、加载过程中预紧力的变化与锚固体强度的关系、锚固体的变形破坏失稳特征等没有深入的研究。

本文通过相似模拟实验研究不同预紧力作用下

锚固体的强度特征、变形特征及加载过程中锚固体强度与预紧力的关系,建立预紧力与锚固体强度的关系式,结合工程实例进行验证。

1 实 验

1.1 实验装置

模拟实验的原型相当于从巷道一侧或顶板“取出”的,其尺寸的大小应能代表锚固体的一般状态,巷道一侧在锚杆的作用下受力状态由双向转为三向^[5]。锚固体原型的尺寸基于以下因素考虑:当试件横截面积的平方根大于0.5~1.0 m时,其形状即稳定^[5];便于按照常用的锚杆间排距布置锚杆;符合常用锚杆长度1.6~2.4 m的要求。模型长×宽×高=195 mm×184 mm×240 mm,相当于原型为2 925 mm×2 760 mm×3 600 mm锚固分离体,如图1(a)所示,锚杆布置及模型边界条件如图1(b)~(d)所示。锚固体约束装置由4块厚度20 mm的钢板通过 $\phi 20$ mm的螺杆连接组成;直接在装置中填料捣固模型,待模型冷却后提出前侧挡板以便形成锚杆安装的自由面,约束装置如图1(e)所示。

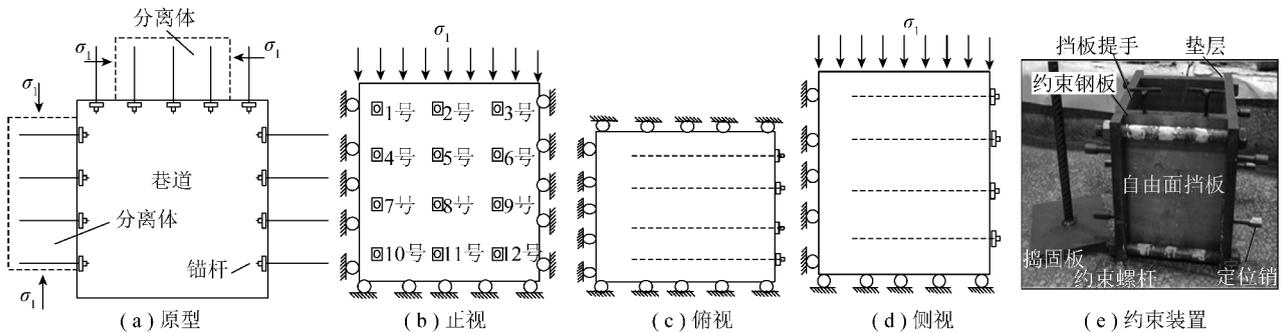


图1 锚固分离体及实验装置

Fig. 1 Anchored rock mass and experiment model

1.2 模拟实验相似关系

根据实际情况及实验目的,确定模型几何比 α_l ,容重比 $\alpha_\gamma = 27/17 = 1.58$;故应力比 $\alpha_\sigma = \alpha_l \alpha_\gamma = 23.7$,弹性模量、黏结力、强度的相似比均为23.7,预紧力比 $\alpha_F = \alpha_l^3 \alpha_\gamma = 5\ 532.5$;泊松比、应变、内摩擦角的相似比均为1。

1.3 模拟锚杆

该实验中,若严格按照几何比制作相似锚杆,则难以在锚杆端部加工施加预紧力的细螺纹。经过多次实验,选用 $\phi 3.0$ mm×170 mm(螺纹段长30 mm,外露10 mm)的塑料焊条模拟锚杆,调节锚杆前端螺帽松紧施加不同的预紧力。塑料焊条延伸率20%,弹性模量4.8 GPa,抗拉强度30 MPa,延伸率偏大,弹性模量略小,强度略大,基本符合要求。托板用边长

7 mm、厚2 mm的正方形铝板模拟;用手电钻打规格 $\phi 4.0$ mm×160 mm的钻孔,用注射器配长针头将石膏浆(水膏比1:1)注入钻孔实现全长锚固,模拟锚杆及其安装工具如图2所示。采用测力环(最大量程250 N,超载能力20%)记录锚杆的预紧力及工作载荷,安装位置如图1所示。施加的预紧力分别为:原型-KN(模型-N)分别为A-20(3.75);B-60(11.25);C-100(18.75)。采用DH3818静态应变测试仪记录加载过程中测力环所受载荷,过程与RMT-150C实验机同步。

1.4 模型材料

砂蜡胶结材料塑性变形较强,能够较好模拟深部岩体大变形的物理力学性质,且冷却后即可进行实验,能够重复利用^[14-15]。选取砂蜡比为100:10,100:6和100:4配比材料,相当于II、III和IV级岩体(无软

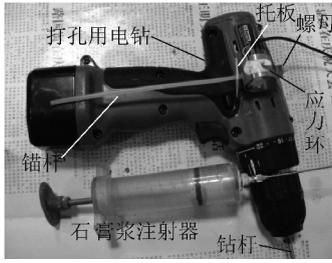


图 2 锚杆、安装工具及测力环

Fig. 2 Bolt, installation tools and weighting ring

弱层面)。锚固体原型及模型物理力学参数见表 1。

1.5 实验方案和过程

根据锚杆所施加预紧力及围岩级别的差异,共进行 9 组实验,用数字和字母对实验方案进行编号,如 II-1-A 表示第 1 组实验,II 级岩体,施加的预紧力为 3.75 N,其余类推,实验编号见表 2。采用 RMT-150C 电液伺服实验机进行加载,控制模式为单轴力(最大为 100 或 1 000 kN)+位移(最大为 50 mm),加载速率 0.005 mm/s。

表 1 原型与模型物理力学参数

Table 1 Mechanics parameters of prototype and model

围岩等级	类型	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏结力/MPa	内摩擦角/(°)
II	原型	2.50~2.70	9.15	0.20~0.25	8.06	30~50
	模型	1.76	0.39	0.25	0.34	26.5
III	原型	2.50~2.70	8.12	0.20~0.27	4.27	20~40
	模型	1.75	0.34	0.26	0.18	27.4
IV	原型	2.50~2.70	5.31	0.20~0.30	3.32	15~30
	模型	1.66	0.22	0.28	0.14	28.5

表 2 锚固分离体轴向锚固强度、锚固体强度及强化系数

Table 2 Axial anchored strength, strength and augmentation factor of detached anchored rock mass

方案	预紧力 p/N	附加应力 σ_3^m /kPa			峰值强度 σ_1 /MPa	残余强度 σ_1^* /MPa	峰值强化系数 K_p	残余强化系数 K_r
		初始	峰值	残余				
II-无锚杆					2.62	0.75	1.00	1.00
II-1-A	3.75	1.25	6.08	15.6	2.84	0.78	1.08	1.04
II-8-B	11.25	3.76	6.43	22.9	3.11	0.86	1.19	1.14
II-6-C	18.75	6.27	10.60	32.5	3.36	1.32	1.28	1.76
III-无锚杆					1.77	0.74	1.00	1.00
III-4-A	3.75	1.25	6.94	18.3	2.08	0.82	1.18	1.11
III-2-B	11.25	3.76	7.15	35.2	2.33	0.95	1.32	1.28
III-9-C	18.75	6.27	12.00	45.6	2.50	1.28	1.41	1.73
IV-无锚杆					1.24	0.34	1.00	1.00
IV-7-A	3.75	1.25	7.42	25.5	1.59	0.64	1.28	1.87
IV-5-B	11.25	3.76	8.45	37.8	1.68	0.66	1.35	1.94
IV-3-C	18.75	6.27	15.20	47.8	1.80	0.78	1.45	2.3

注:无锚杆时的峰值强度为 σ_c ,残余强度为 σ_c^* 。

2 结果分析

2.1 预紧力锚杆锚固体强度分析

锚杆预紧力或工作载荷对围岩表面施加一定的压力,改善岩体的受力状态,使巷道浅部围岩处于三向应力状态,增加岩体抵抗变形的能力,对岩体扩容起到一定的限制作用,增强其承载能力。

2.1.1 锚杆轴向锚固强度分析

附加应力由锚杆在安装过程中的预紧力或锚固

体在加载过程中因锚杆变形所产生的反力提供,包括初始附加应力、峰值附加应力和残余附加应力^[16]。

锚杆所施加的预紧力通过护表构件作用在岩体表面一定范围内,此时锚杆所受轴力即为初始附加应力;锚固体峰值强度之前,锚杆受力增加缓慢,峰值所对应的附加应力称为峰值附加应力;锚固体强度峰后阶段,开始产生宏观裂隙,第 2 界面上(钻孔孔壁和树脂的界面)的剪应力陡然增加至最大值,对应的为残余附加应力,也称为最大附加应力;时间-锚固体

强度-测力环受力的曲线如图3所示。根据预紧力、峰值点和残余强度点所对应的时间点,可得到测力环所受的载荷 p_i ,锚杆受力值累计后除以自由面面积即可得到附加应力 σ_3^m ,见表2。

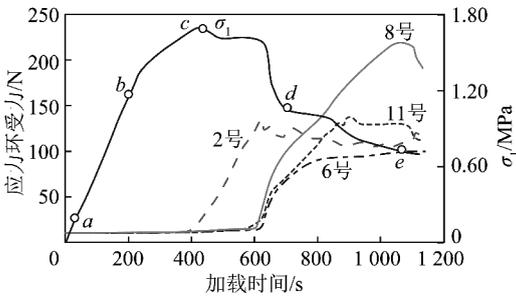


图3 锚杆受力与锚固体 $t-\sigma_1$ 全程曲线

Fig. 3 Curves of bolts force and $t-\sigma_1$ of anchorage body

由表2及图3可知,轴向锚固强度与锚固体承载能力存在着一定的对应关系:岩体强度一定时,峰值附加应力和残余附加应力随锚杆预紧力的增大而增加;预紧力一定时,岩体强度越小,附加应力就越大。因模拟锚杆强度高,未出现断裂,故其破坏形式表现为黏结剂的脱黏滑移。锚固体强度摩擦阶段,由于锚固体破裂面的错动和锚固剂的脱黏滑移,轴向锚固强度不断调整,总体呈下降趋势。

2.1.2 锚杆横向锚固强度分析

假定锚固体破坏服从,而实验中锚固体的最大主应力方向与锚杆垂直,则最大主应力方向与锚固体主破裂面方向的夹角为 $\alpha = \pi/4 - \varphi/2$,其中 φ 为锚固体等效内摩擦角。

根据文献[5]的研究成果,认为锚固体破坏服从摩尔-库伦准则,锚杆的横向作用提高了破裂面上的抗剪强度,增加了破坏面上的等效黏结力。预紧力锚固体的黏结力为

$$c = c_0 + nc_m + \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{S} \cos \alpha \tan \varphi \quad (1)$$

式中, c_0 为无锚杆岩体的黏结力,MPa; n 为锚杆的根数,此处 $n=12$; c_m 为单根锚杆的黏结力,MPa;第3项为由附加应力作用在破断面产生的摩擦力; S 为试件自由面面积, m^2 ; α 为锚杆轴向与破断面法线的夹角; $\tan \varphi$ 为摩擦因数。

$$c_m = F_{bmax} / (S \cos \alpha) \quad (2)$$

式中, F_{bmax} 为纯剪切时,锚杆能够承受的最大剪力,由 Von-Mises 准则得

$$F_{bmax} = \sigma_s \pi d^2 / 4\sqrt{3}$$

式中, σ_s 为锚杆屈服强度,MPa; d 为锚杆直径,m。

因此,

$$c_m = (F_{bmax} \pi d^2) / (4\sqrt{3} \cos \alpha)$$

$$c = c_0 + n\sigma_s \pi d^2 / (4\sqrt{3} \cos \alpha) + \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i}{S} \cos \alpha \tan \varphi \quad (3)$$

从式(3)可知,等效黏结力与锚杆密度、锚杆屈服强度、锚杆直径、等效内摩擦角及锚杆预紧力呈正相关关系。

2.2 预紧力锚杆对锚固体强度的作用

2.2.1 预紧力锚杆对岩体强度的强化

平面应变加载情况下锚固体的峰值强度和残余强度见表2,安装锚杆后,锚固体的强度有所提高,预紧力锚杆强化了锚固体的强度,且锚固体的黏结力和内摩擦角与锚杆预紧力呈正相关。

为分析锚杆预紧力对锚固体强度的强化效果,提出预紧力强化系数的概念,即锚固体与对应的无锚岩体强度的比值,包括峰值强度强化系数($K_p = \sigma_1 / \sigma_c$)和残余强度强化系数($K_r = \sigma_1^* / \sigma_c^*$)。

对表2中的数据进行回归分析,可得到预紧力、锚固体强度与强化系数的关系式

$$\begin{cases} K_p = 1.19 + 4.69 \times 10^{-3} p + 8.93 \times 10^{-2} \sigma_1 + 8.99 \times 10^{-5} \sigma_1^2 (r = 0.999) \\ K_r = 1.55 - 10.52 \times 10^{-2} \sigma_1^* + 3.20 \times 10^{-3} p^2 + 4.59 \sigma_1^{*2} (r = 0.967) \end{cases} \quad (4)$$

当 $\sigma_1 = 1.5$ MPa, $\sigma_1^* = 0.28$ MPa 时,随着预紧力的改变,锚固体强化系数的变化规律如图4所示。

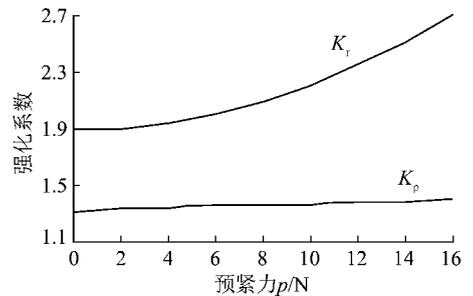


图4 锚固体 p 与 K_p, K_r 关系曲线

Fig. 4 Curves of K_p and K_r of anchorage body changed with p

由图4可知, K_p 和 K_r 均大于1,说明锚固体均比对应的无锚时的岩体强度高;随着预紧力的增大,强化系数逐渐增加;对单个实验,预紧力锚杆对锚固体残余强度的强化比峰值强度明显;巷道围岩的锚固体可看作平面应变问题考虑,根据前述内容,锚固体强度的强化程度不仅与锚杆及其预紧力 p 提供的围压有关,而且与锚固试件自身的强度有关,即

$$\sigma_1 = F(\sigma_3^m) + F(c, \varphi) \quad (5)$$

2.2.2 锚固试件的强度

由于锚固体破坏服从摩尔-库伦准则,故其黏结力 c 和内摩擦角 φ 不随巷道围岩内应力的变化而改变,与岩体强度和锚杆预紧力呈正相关,即 $F(c, \varphi) = \sigma_c = 2c \tan(\pi/4 + \varphi/2)$ 。

因此,式(5)可转换为

$$F(\sigma_3^m) = \sigma_1 - 2c \tan(\pi/4 + \varphi/2) \quad (6)$$

根据平面应变加载时不同级别岩体和预紧力作用下的 σ_1, σ_3^m 和 σ_c 值,对表 3 中的实验结果进行多元线性回归分析,可得式(6)的表达式。

岩体 II - 峰值: $\sigma_3^m = 3.0 \times 10^{-4} p + 4.3 \times 10^{-2} (r = 0.81)$ 。

岩体 II - 残余: $\sigma_3^m = 1.1 \times 10^{-3} p + 1.1 \times 10^{-2} (r = 0.99)$ 。

岩体 III - 峰值: $\sigma_3^m = 3.0 \times 10^{-4} p + 5.2 \times 10^{-2} (r = 0.92)$ 。

岩体 III - 残余: $\sigma_3^m = 1.8 \times 10^{-3} p + 1.26 \times 10^{-2} (r = 0.94)$ 。

岩体 IV - 峰值: $\sigma_3^m = 5.0 \times 10^{-4} p + 4.5 \times 10^{-3} (r = 0.85)$ 。

岩体 IV - 残余: $\sigma_3^m = 1.5 \times 10^{-3} p + 2.03 \times 10^{-2} (r = 0.99)$ 。

则锚固体强度的表达式为

$$\begin{cases} \text{峰值强度 } \sigma_1 = \sigma_3^m + 2c \tan(\pi/4 + \varphi/2) \\ \text{残余强度 } \sigma_1^* = \sigma_3^m + 2c^* \tan(\pi/4 + \varphi^*/2) \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可知:①当无锚杆支护时, $2c \tan(\pi/4 + \varphi/2)$ 表示岩体的单轴抗压强度;当安装非预紧力锚杆时,常数项表示岩体约束及非预紧力锚杆作用所引起的增加量;第 1 项反映了锚杆预紧力对锚固体强度的作用。②锚固体表面的压应力及对其内部应力状态作用由 σ_3^m 决定,反映了围压对围岩强度提高的倍数。所以,高预紧力锚杆能够有效增加锚固体的承载能力。③预紧力对软弱岩体强度的强化作用比坚硬岩层明显,故高预紧力在控制软弱破坏锚固体变形方面效果更为显著。

2.3 预紧力锚杆作用下锚固体的变形破坏特征

锚杆受力由初始预紧力逐渐增加,与锚固体全程曲线存在着对应关系,如图 3 所示,限于篇幅,仅列出部分成果。

从图 3 可知,锚杆受力与锚固体全程曲线与岩石全程曲线类似,呈现如下趋势:

(1)锚固体初始压密阶段(0a 段),表现为内部微孔隙的闭合,锚杆受力增加极为缓慢;直线段(ab

段),以弹性变形为主,但也产生部分塑性变形,锚杆受力逐渐增加,增幅不明显;塑性阶段(bc 段),应力应变曲线下凹偏离直线,塑性变形明显增大,锚杆受力急剧增加,以上部测力环最为明显(2 号);锚固体在软化阶段(cd 段)仍具有一定的承载能力,随着加载的持续,承载能力迅速下降,直至宏观破坏面出现,测力环受力也有不同程度的增加;摩擦阶段(de 段),宏观破裂面在锚杆作用下仍能承受一定的外载荷,测力环受力都急剧增加,总体趋势为下部锚杆受力较小,上部较大;当破裂面宽度增加到一定程度时(e 点后段),断面两侧锚杆脱黏,由静摩擦力转化为滑动摩擦力,锚杆积极降低。

(2)预紧力一定时,岩体强度越高,测力环载荷增加幅度越小;岩体强度一定时,较高预紧力锚杆载荷增幅较小;软弱锚固体破坏后,锚杆载荷的损失比坚硬岩层大;预紧力锚杆对软弱岩层的作用比坚硬岩层明显。

一次加载时,锚固体对角线方向出现 55° 左右的主破裂面,下部块体中部出现次破裂面,破裂面粗糙不平,如图 5 所示;其承载能力由摩擦力和锚杆轴向和横向力提供,此时塑性变形大量产生,锚杆受力急剧增加;卸载后,锚杆载荷略降。二次加载时,锚杆受力再次增加,锚固体变形呈现塑性屈服平台或塑性应变硬化,锚固面应变不断增加,上部的测力环(2 号)受力增加较快,自由面中部的锚杆受力平稳增加,但幅度不大;随着破裂面错距的增加,锚固段发生脱黏和滑移,锚杆受力呈现波状起伏状态,整体呈现下降的态势,如 11 号测力环。

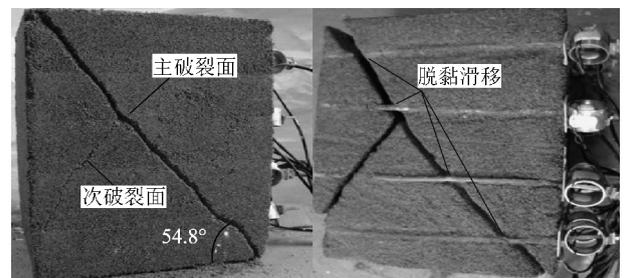


图 5 锚固体破裂面(实验 IV-5-B)

Fig. 5 Plane of fracture of anchorage body (test IV-5-B)

3 工程应用

平煤股份十一矿丁_{5,6}-26071 工作面位于二水平丁六采区,埋深 800 ~ 900 m。工作面走向长 3 340 m,倾斜长 181 m,煤层结构简单,煤层较松软,煤层倾角 $5^\circ \sim 11^\circ$ 。直接顶为泥岩和砂质泥岩,灰色,节理发育,稳定性较差,厚 3.71 m 左右;基本顶

为中粒砂岩,稳定性较好,平均厚 6.20 m;直接底为砂质泥岩,平均厚度 3.82 m,强度较低。

26071 工作面机风巷初始支护虽采用高强让压锚杆配合锚索支护,但锚杆预紧力仅 40~60 kN,锚索预紧力 80 kN,巷道变形严重,不得不进行架棚返修。后采用高强、高预紧力锚杆锚索协调支护^[17],即:顶板锚杆直径从 20 mm 增加到 22 mm,锚索直径从 17.8 mm 增加到 21.6 mm,两帮采用左旋无纵筋锚杆,锚杆施加 80 kN 的预紧力,锚索预紧力增加到 120 kN,巷道顶板附加应力由 0.125 MPa 增加到 0.218 MPa,顶板锚杆最大工作载荷由 170 kN(已屈服)降低到 160 kN(未屈服)。支护设计如图 6 所示。

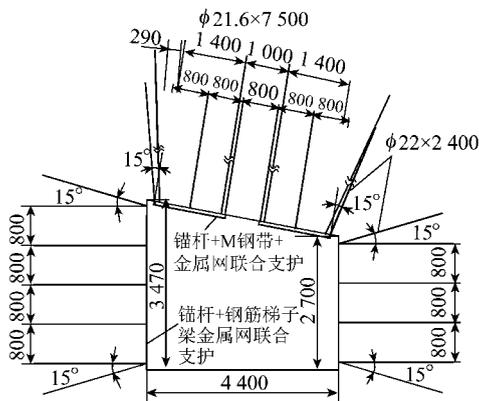


图 6 高预紧力支护设计

Fig. 6 Support design of high pretension

工业性试验表明:巷道围岩变形很小,支护受力合理,断面收缩率 12.4%,满足生产要求。

4 结 论

(1) 锚固体强度的峰前阶段,锚杆载荷以非常小的速率增加;在峰后阶段,宏观裂隙开始产生,锚杆所受轴向载荷达到最大值。

(2) 锚固体的峰值强度、残余强度强化系数与岩体强度及锚杆预紧力正相关:岩体强度一定时,随着锚杆预紧力的增大,强化系数逐渐增加,锚杆预紧力对锚固体峰后残余强度的强化大于对锚固体峰值强度的强化。根据实验结果拟合了锚固体强度(峰值、残余)与锚杆预紧力的关系式。

(3) 预紧力一定时,岩体强度越高,测力环载荷增加幅度越小;岩体强度一定时,高预紧力锚杆载荷增幅较小;软弱锚固体破坏后,锚杆载荷损失比坚硬岩层大,预紧力锚杆对软弱岩层的作用比坚硬岩层明显。现场实践表明,提高锚杆预紧力能够有效控制围岩的变形。

(4) 所进行模拟实验仅模拟了 3 种岩体级别和预紧力情况,采用的锚杆强度偏高且与加载方向垂

直,因此对不同密度、不同安装角度预紧力锚杆的强化机理及锚固体的破坏模式仍需要作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 侯朝炯,勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(3):342-345.
Hou Chaojiong, Gou Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 342-345.
- [2] 侯朝炯,郭励生,勾攀峰. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999.
Hou Chaojiong, Guo Lisheng, Gou Panfeng. Coal road supported by bolt[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.
- [3] 勾攀峰. 巷道锚杆支护提高围岩强度和稳定性的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,1998.
Gou Panfeng. Research on strengthening of roadway surrounding rock and stability with bolts[D]. Xuzhou: China University of Mining Technology, 1998.
- [4] 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.
Kang Hongpu, Wang Jinhua. Theory and complete technology of coal road supported with bolt[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007.
- [5] 康红普,王金华,林健. 高预紧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.
Kang Hongpu, Wang Jinhua, Lin Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [6] 康红普,林健,吴拥政. 全断面高预紧力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1153-1159.
Kang Hongpu, Lin Jian, Wu Yongzheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1153-1159.
- [7] 张农,高明仕. 煤巷高强预紧力锚杆支护技术与应用[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(5):524-527.
Zhang Nong, Gao Mingshi. High-strength and pretension bolting support of coal roadway and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 524-527.
- [8] 康红普,姜铁明,高富强. 预紧力在锚杆支护中的作用[J]. 煤炭学报,2008,33(8):680-685.
Kang Hongpu, Jiang Tieming, Gao Fuqiang. Effect of pretensioned stress to rock bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 680-685.
- [9] 范明建,康红普. 锚杆预紧力与巷道支护效果的关系研究[J]. 煤矿开采,2007,12(4):1-3,17.
Fan Mingjian, Kang Hongpu. Relationship research of bolt pre-stress and supporting effect of roadway[J]. Coal Mining Technology, 2007, 12(4): 1-3, 17.
- [10] 翟英达. 锚杆预紧力在巷道围岩中的力学效应[J]. 煤炭学报,

2008,33(8):856-859.

Zhai Yingda. The mechanics effect of bolt pretension in roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(8):856-859.

- [11] 康红普,王金华,林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):649-664.

Kang Hongpu, Wang Jinhua, Lin Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(4):649-664.

- [12] 康红普. 煤矿预应力锚杆支护技术的发展与应用[J]. 煤矿开采,2011,16(3):25-30,131.

Kang Hongpu. Development and application of pre-stress anchored bolt supporting technology in coal mine[J]. Coal Mining Technology,2011,16(3):25-30,131.

- [13] 李元,刘刚,龙景奎. 深部巷道预应力协同支护数值分析[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):204-208,213.

Li Yuan, Liu Gang, Long Jinghui. Numerical analysis of theory of pre-stress synergetic support in deep mine roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2011,28(2):204-208,213.

- [14] 姜耀东,刘文岗,赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型试验台的研

制[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3727-3731.

Jiang Yaodong, Liu Wengang, Zhao Yixin. Design and development of a new type of triaxial system for roadway model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(21):3727-3731.

- [15] 韦四江,马建宏,孙光中. 软岩巷道锚固体蠕变特性研究[J]. 河南理工大学学报,2008,27(5):524-528.

Wei Sijiang, Ma Jianhong, Sun Guangzhong. Study on creep characters of anchorage body in soft rock tunnel[J]. Journal of Henan Polytechnic University,2008,27(5):524-528.

- [16] 韦四江. 预紧力对巷道围岩锚固体稳定的作用机理及工程应用[D]. 焦作:河南理工大学,2011.

Wei Sijiang. Mechanism and engineering application of pretension on the stability of roadway surrounding rock anchored with bolts[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2011.

- [17] 申艳梅,韦四江. 回采巷道锚杆支护效果模糊综合评判[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(4):576-580.

Shen Yanmei, Wei Sijiang. Fuzzy comprehensive evaluation of bolting effects in deep-mining gateway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2011,28(4):576-580.

欢迎订阅 2013 年《煤炭学报》杂志

《煤炭学报》是由中国煤炭学会主办、面向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科研成果和学术论文。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-Room、中国科学引文数据库、PJK、科学技术文摘速报、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获由中华人民共和国新闻出版总署颁发的“首届国家期刊奖”。2001 年入选“中国期刊方阵”,并被评为“双奖期刊”。2008 年获“中国精品科技期刊”称号。2009 年获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。2004,2007,2010,2011,2012 年 5 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。2006 年至 2012 年获中国科协精品科技期刊工程项目资助。

《煤炭学报》受到广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的文章作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,176 页,每册订价 58 元,全年总订价 696 元。欲订阅者可直接向本编辑部索取订单,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930-806 联系人:王婉洁

E-mail:mtxbwwj@tom.com,mtxb@vip.163.com