

巷道锚索支护体系的建立与可靠性分析

刘玉元, 赵海之, 吴春汶, 张京泉

(山东省新汶矿业集团协庄煤矿, 山东 新汶 271221)

摘要:结合山东省新汶矿业集团协庄煤矿巷道锚索支护的实际应用情况, 分析了锚索支护的设计、施工工序及配套机具、支护作用力计算、现场施工中存在的问题、预应力的损失补偿、施工质量监督等, 以提高巷道锚索支护的可靠性。

关键词:协庄煤矿; 巷道支护; 锚索支护; 可靠性分析

中图分类号:TD353 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2005)04-0059-05

Establishment of Cable Supporting System in Tunnel and Analysis on the Reliability/LIU Yu-yuan, ZHAO Hai-zhi, WU Chun-wen, ZHANG Jing-quan (Xiezhuang Coal Mine of Xinwen Mining Industrial Group in Shandong Province, Xinwen Shandong 271221, China)

Abstract: Based on the practice of cable support in Xiezhuang Coal Mine, analysis is made on the design of cable support, construction procedure and assemblage of tools, calculation on supporting effect, problems in construction field, loss and compensation to pre-stress and monitor on working quality to increase the reliability.

Key words: Xiezhuang Coal Mine; tunnel supporting; cable supporting; analysis on reliability

预应力锚固技术是近代岩土工程领域的一个重要分支, 在矿井开采工程中得到了广泛的应用, 并取得了巨大的成功。由于在岩土中使用锚固技术可以充分发挥岩土体自身的能量, 积极调用岩土自身的强度和自稳能力, 提高施工过程中的安全性和时效性, 有效地控制岩土体工程结构的变形以及显著降低工程造价等诸多优点, 在煤炭等领域深受设计与施工人员的青睐。

目前, 在我矿普遍采用了高强预应力锚索加固技术, 因此, 作为岩土体改良重要手段的锚固理论有待于深入研究。笔者通过现场的操作使用以及对影响岩锚因素的分析, 应用优化与决策理论, 建立了岩锚支护设计与应用决策体系, 保证了锚索安装使用的安全可靠。

1 锚索支护特点及国内外发展状况

锚索支护的实质就是通过锚索对被加固的岩体施加预应力, 限制岩体有害变形的发展, 从而保持岩体的稳定。它有两个特点: 一是锚索的长度较大, 能够锚入到深部比较坚固稳定的岩层中, 并且能够施加相当数量级的预应力, 是一种有效的主动支护方式; 二是锚索的施工比较灵活, 可以和其它加固措施相结合, 具有不缩小巷道断面、施工速度快、安全可

靠、费用低等特点。

近年来, 国内外在锚索支护技术方面发展迅速, 应用范围也越来越广。在岩土边坡、隧道、矿山巷道、深基坑、坝基及结构加固方面广泛采用了锚索技术。在英国、澳大利亚, 锚索支护技术的应用十分普遍, 尤其在煤巷的应用十分突出, 在围岩条件较差的巷道、大断面硐室、交岔点、断层附近及受动压影响的巷道, 采用锚索支护是一条有效途径, 只需较小支护密度就可达到良好的支护效果。

2 锚索支护设计

2.1 锚索支护设计的主要方法

2.1.1 工程类比法

该法发展较早, 当前应用最广泛, 目前国内外有关的支护规范仍以此法为主。这是一种在围岩分类的基础上, 根据围岩等级和工程尺寸等, 参照以往的施工经验, 直接确定支护参数的方法。

2.1.2 理论计算法

理论计算方法是在测得岩体和支护力学参数的前提下, 根据围岩力学特征建立数学模型, 通过计算来确定支护参数的方法。

2.1.3 现场监控法

这是新近发展起来的一种以现场量测为手段的

收稿日期: 2004-10-19

作者简介: 刘玉元(1971-), 男(汉族), 山东新泰人, 山东省新汶矿业集团协庄煤矿, 采矿专业, 从事煤矿巷道掘进技术管理工作, 山东省新汶矿业集团协庄煤矿生产技术部, (0538)7834262, lyy7099@163.com。

设计方法。这一方法以现场监测的信息为依据,边施工,边量测,不断把量测结果反馈到设计和施工中去,从而不断修改设计,指导施工。

在具体设计中,往往根据矿山井巷的工程地质条件,3 种方法结合应用。

2.2 单束锚索结构

单束锚索结构比较简单,通常由单根钢绞线和与之相匹配的单孔锚具和各种附件组成,长度 5~10 m,可以分为锚固段、自由段和张拉段。根据锚固方式的不同,其结构形式略有区别,目前煤矿多采用树脂锚固。

2.3 最优锚固角的选择

众所周知,锚固角主要影响锚索长度的确定。所能提供最大抗滑力与最少投资时的锚固角为最优锚固角,可以由下式确定:

$$T_{\text{抗}} = T' \cos[90^\circ - (\theta + \alpha)] \operatorname{tg} \psi + T' \sin[90^\circ - (\theta + \alpha)] \quad (1)$$

式中: T' ——锚固荷载, kN; α ——滑裂面倾角; θ ——锚索与水平面之间的夹角,即锚固角; ψ ——滑动面内摩擦角。

$$\max[T'(\theta + \alpha)] = T' \sin(\theta + \alpha) \operatorname{tg} \psi + T' \cos(\theta + \alpha) \quad (2)$$

$$\min[L'] = L / \sin(\theta + \alpha) \quad (3)$$

由(2)、(3)式可求得最大抗滑力锚固角 $\theta = \psi - \alpha$ 。但是,此时锚索长度最大,联合求解上式:

令 $F(\theta + \alpha) = T/L'$,取 $F(\theta + \alpha)$ 为极大值,可获得最经济锚固角。即:

$$\theta_{\text{优}} = (\pi/4) + (\psi/2) - \alpha \quad (4)$$

2.4 最优内锚固段长度的确定

内锚固段长度是预应力锚索设计的一个重要指标,直接影响工程造价。锚索轴力、剪力的分布集中在内锚固段外端 2.0 m 范围内。

(1)树脂锚固剂与钢绞线的粘结长度 L_a :

$$L_a = KN_t / (\pi d \tau_a) \quad (5)$$

(2)树脂锚固剂与钻孔岩壁的粘结长度 L_b :

$$L_b = KN_t / (\pi D \tau_b) \quad (6)$$

式中: K ——锚索安全系数; N_t ——锚索设计荷载, N; d ——单根钢绞线直径, mm; D ——钻孔直径, mm; τ_a ——树脂锚固剂与钢绞线的粘结强度; τ_b ——树脂锚固剂与钻孔岩壁的粘结强度。

根据计算,锚固段长度取 L_a 与 L_b 中最大者。

2.5 锚索锚固间距的确定

预应力锚索的荷载作用于岩体表面,使岩体产生一定的表面压缩效应,锚索间距过小,表面压缩效

应显著,从而引起预应力损失值增加。现有确定锚索间距的方法不能反映岩体质量、预应力损失的影响。

我们采用以控制预应力损失为主的优化方法,设锚索自由扰动半径为 D_1 、相邻锚索的半径为 D_2 、群锚加固内锚固段应力叠加合理间距为 D_3 ,则取最优锚索间距为:

$$D = \max\{D_1, D_2, D_3\}$$

2.6 单根锚索的主要技术参数

(1)单根锚索设计载荷 N_t :

$$N_t \leq 0.65 A_{\text{pk}} F_{\text{ptk}}$$

式中: 0.65——张拉应力控制系数; A_{pk} ——单根钢绞线公称截面面积, mm^2 ; F_{ptk} ——钢绞线抗拉强度标准值, MPa。

(2)单根锚索极限载荷 R_u :

$$R_u \leq \eta_a A_{\text{pk}} F_{\text{ptk}}$$

式中: η_a ——锚具效率系数。

(3)单根锚索安全系数 K :

$$K = R_u / N_t$$

3 树脂锚固剂

在我国煤矿广泛使用的树脂锚固剂属于不饱和聚脂树脂类。产品形式为包装成卷筒的胶囊,其中由树脂胶泥和固化剂两部分组成,分别灌装于双孔塑料袋中,使用时经过搅拌,将两种成分混合,从而发生化学反应,达到快速凝固的目的。

这种树脂锚固剂的特点是固化时间快、强度增长快、锚固力大,因此,锚索安装后即可及时承载,发挥作用。调整树脂胶泥和固化剂两种成分的比例,还可以获得任意的固化速度。

树脂锚固剂产品分类见表 1,产品规格见表 2。

表 1 树脂锚固剂的产品分类

型号	特性	凝胶时间/s	等待时间/s	颜色标识
CKa	超快速	8~25	10~30	黄
CK	超快速	8~40	10~60	红
K	快速	41~90	90~180	蓝
Z	中速	91~180	480	白
m	慢速	≥180		

表 2 树脂锚固剂的产品规格

树脂药卷直径/mm	23	28	35	40
适用钻孔直径/mm	28	32	42	50
树脂药卷长度/mm	300、350、400、500、600、700、800			

树脂锚固剂种类繁多,优缺点各异。就目前的不饱和聚脂树脂类锚固剂来说,一般为油基树脂,特

点是本身强度高,缺点是略有收缩性,因此要求钻孔与锚索之间的间隙不能过大,如果间隙过大,势必引起树脂与孔壁界面抗剪强度的降低,实际上遵循的原则是不宜超过 6 mm。

采用树脂锚固剂的锚固方式有多种多样,目前我矿使用的是端头式锚固。如果采用全长锚固,可以在端头放置快凝树脂,在自由段放置缓凝树脂;也可在端头放置快凝树脂,在自由段灌注水泥砂浆。

4 锚索施工工序及配套机具

单根锚索施工工序为:钻孔→往钻孔中安放树脂药卷并插入锚索→连接钻机边推进、边旋转锚索搅拌树脂→装垫板、锚具进行预应力张拉。

4.1 钻孔

单根锚索适用于小孔径。煤层巷道适用钻孔直径 28~32 mm、长度 6~10 m,利用轻型专用钻机和接长钎杆即可完成钻孔。我们使用 $\varnothing 27$ mm 的金刚石 Y 型钻头、B19 六棱钎杆钻孔,钎杆每节长度 1 m,中空,螺纹连接,使用方便。

4.2 树脂锚固

将规格型号为 Z2335 的树脂药卷用锚索或钎杆依次装入索孔底部,然后插入锚索,用特制的 QL 型联结套筒,一端连锚索,一端连钻机,开动钻机带动锚索旋转,搅拌树脂锚固剂使其充分混合,搅拌时间 ≤ 30 s。

4.3 预应力张拉

当树脂锚固剂完全凝固后即可进行预应力张拉。张拉前要找平孔口岩面,放置垫板、模具等,然后连接张拉千斤顶进行张拉。

张拉机具采用专用电动油泵或风泵和配套的轻型前卡式千斤顶。用液压涨紧器涨紧安装锚索,锚索预应力 ≤ 80 kN。

5 锚索支护作用力计算

在锚索与围岩形成的锚岩支护体中,每一根锚索的粘着段和托盘之间都形成一个双锥形的应力区。这个锥体的开角与岩层的摩擦角有关,也与穿过的裂隙层理有关。在现场应用近似计算中,我们选择锥体的开角为 90° ,则根据锚索形成的双锥形应力区理论,每根锚索去掉锚固段长度(采用 5 块规格 Z2335 的树脂药卷锚固,经计算得长度 ≥ 1750 mm)和外露长度(一般为 250 mm),则预紧力支护段的长度为 3000 mm。该段形成的双锥形体如图 1 所示(我们取最大值,图中 max 部分)。

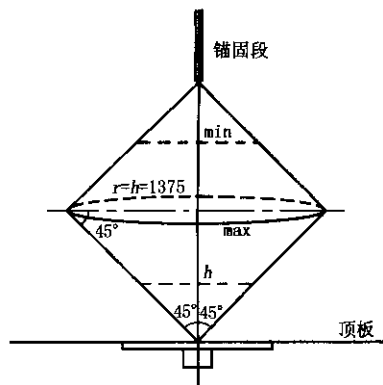


图 1 锚索支护作用力计算示意图

根据锚杆支护的悬吊理论,计算单锥形体内岩石的重力为:

$$\begin{aligned} G_{\text{锥}} &= \gamma V_{\text{锥}} \\ &= \gamma(1/3)\pi r^2 h \\ &= 24 \times (1/3) \times 3.14 \times 1.5^2 \times 1.5 \\ &= 84.78 \text{ kN} \end{aligned}$$

所以双锥形体内岩石的重力为 $2G_{\text{锥}} = 169.56$ kN,我们使用的锚索线材质的破断力 < 260 kN,所以我们采用的锚索支护是符合我矿的地质条件的,是科学合理的。

6 锚索支护的现场施工

6.1 钢绞线的安装

我们使用左旋钢绞线,在大扭矩搅拌器具旋向为右旋的情况下,安装钢绞线时,不能破股旋进,从而导致树脂药卷搅拌不均匀。所以我们在安装钢绞线时,为保证能充分搅拌树脂药卷,达到最佳胶结状态,以便满足设计锚固力,在钢绞线端头进行 20~30 cm 的破股操作,否则造成钢绞线在搅拌安装时发生穿透树脂药卷现象,在整个搅拌过程中不能混合药卷中的白色凝固剂,致使锚固力低下。

我们之所以要选用左旋锚索钢绞线,是因为右旋锚索钢绞线在旋进过程中,与钻机旋向相同,药卷是充分搅拌了,但其破股现象比较严重,造成整体强度下降,降低了右旋锚索钢绞线的整体承载能力,致使出现已经安装的右旋锚索钢绞线断裂。通过分析发现,即使没有断裂的右旋锚索钢绞线,也已经出现了强度损失,处于断裂的边缘,对于巷道的支护是一个潜在的隐患,我们施工的 3416W 面的右旋锚索钢绞线就证实了这个问题。

而左旋锚索钢绞线就不存在这种情况。在安装时将内端头进行人为破股,以增加搅拌的充分性,在现场施工中收到了较好的效果。在使用过程中,注

意锚索配件(锁头、锁片)的配套使用,诸如锁片的切口旋向、涨紧装置的锁片的丝扣强度等问题,都会影响锚索的张拉强度。

6.2 “三径匹配”问题

我们使用的药卷为 Z2335,钢绞线直径为 15.24 mm,所以钻头优先选用 $\varnothing 27$ mm,这样才能尽可能地发挥各部分的效能。现在大部分选用 $\varnothing 28$ mm 的钻头,造成孔径过大,致使药卷与孔壁之间粘接附着力降低。 $\varnothing 28$ mm 的钻头应禁止使用在锚索钻孔上。

6.3 托梁的加工问题

现在使用的锚索托梁多使用工字钢,长度为 1 m,而锚索孔多为中间纵筋气焊切割,上下两面为钻孔,所以在实际使用过程中造成钻孔部位的弱面,强度降低,在施工过程中出现从该位置断裂的现象。所以应在上述加工完成后,在气焊切割或钻孔部位进行加强筋的焊接,以增强该部位的强度,保证在施工过程中不致于出现托梁的断裂。现场实践证明:增加加强筋的做法是可行的,增加筋板后,现场的托梁断裂现象明显低于采取措施前。

6.4 托梁的安装

在顶板锚索施工过程中,顶板多为倾斜方向,不平整,水平度较差,而锚索的安装方向多为铅直方向,造成锚索托梁安装方向与锚索的安装方向不一致,分解锚索的承载力。如果在现有的地质条件下,人为地将托梁衬垫为水平状态,衬垫物可以采用硬质木块或钢铁制品,这样可以减少客观上的承载力分解损失。在托梁两端压接顶板钢带,造成托梁的端头接触,托梁的里部悬空,这就是所谓的点接触。在施工过程中将里部悬空部分用木坯等进行铺垫接实,不仅可以增强托梁的面接触,同时又可以增加其吸收变形量,缓解锚索延伸率低的缺陷,从而提高其承载强度。

6.5 锚索托梁的孔径及孔向

托梁的孔径应根据锚索的直径来确定,以锚索穿过为宜,不能过大,以免降低强度;孔向应根据现场实际而定,不能随意钻割,以免造成现场使用中的合力分解,降低承载能力。

6.6 锚索支护紧跟工作面迎头施工的合理性

由于高强预应力锚索和全螺纹锚杆的延伸率不同,致使迎头在施工完锚杆后,补强锚索支护,造成出现的感观现象是局部锚杆被压出,托盘松动,预紧力丧失,作为锚杆支护的效果较差。原因是在锚索锚固的范围^{万方数据}内,岩体处于相对整体平衡状态,但是在

此段岩体内部却发生着岩体的离层和重新组合状态,锚索内端段岩体离层下移,造成锚杆段整体相对下移,锚索段压力越大,出现离层就越大,内部岩石也会越压越实,致使锚杆段下移也会较多,出现锚杆托盘松动,预紧力丧失,看来好像是锚杆已经被压断了,其实是由于上述原因造成的锚杆看似“断裂”的现象,造成锚杆的支护强度降低。

我们针对两种支护材料延伸率的不同,采取在锚索托梁的上方铺垫木坯或木鞋等,以增加锚索的延伸吸收变形量,使其缩小与锚杆之间的延伸率的差距,尽量保持同步性;增强锚杆的预紧力,使其承载力加强;另外,如果出现上述锚杆“压出”现象后,应及时将此类锚杆进行预紧,增强锚杆的承载能力,不致于出现锚杆不承载、而只有锚索承载的现象。所以,出现这种情况,重新将锚杆加强预紧是解决锚杆“压出”现象的比较有效的方式;将锚索支护滞后锚杆支护的一段距离,如果作为迎头临时支护的补强措施,在工作面迎头施工过后,要进行锚索的加强支护,以提高锚索和锚杆对顶板的承载,加强对顶板的支护,从而起到对巷道的支护。

7 锚索预应力的损失补偿

锚索加固围岩的技术关键在于其预应力的大小及损失的程度,只有保持足够的恒久预应力,才能达到最佳的锚固效果。我矿所施工的锚索经常出现外锚端松动,造成预应力下降,影响支护效果。对预应力锚索来说,它的应力降低损失的原因是多方面的。

7.1 锚索材料对预应力的影响

由于锚索在巨大的初始预应力作用下会发生变形,从而产生松弛,也就是说在其长度不变的情况下,随着时间的推移引起内部应力的损失,它是产生预应力降低损失的主要影响因素。

(1)松弛损失的大小,与钢绞线张拉应力的大小有关。拉应力越大,松弛损失也就越大。

(2)松弛损失在张拉后初期几分钟内发展最快,在 24 h 后可完成 80%,大约 20 天后,基本上不再发展,若短时间内把钢绞线超拉一下,并相应地持荷一段时间,然后回到原来的状态,则可以大大减少松弛损失。

7.2 围岩徐变引起的应力损失

由于岩体本身的不连续性和各向异性的存在,受荷区域的岩体内部结构各个组成单元在应力作用下将产生塑性压缩或相对变位,对预应力锚索而言,徐变主要发生在应力集中区,岩体在受压情况下变

形而更加密实,结构面上会产生额外的压缩,因此锚索产生松弛,使其应力降低,但是它的降低速度随时间推移而减慢,最终达到平衡状态。

对于坚硬的岩石,徐变较小,其应力损失也小,即使在大吨位荷载作用下也是如此;在软弱岩层中,由于预应力压缩围岩产生变形较大,而且变形速度也较慢,相应围岩体徐变而引起的应力损失比较大。

7.3 锚固围岩中发生的冲击力引起的应力损失

煤矿井下爆破的冲击力也会引起应力损失,且该损失较之长期静荷载引起的预应力损失量也较大。有关资料表明:当距离锚索 3 m 以内进行爆破时,其预应力有明显的降低,其损失量比静荷载时大 36 倍左右;距离锚索 5 m 以外,其爆破影响就不显著了。冲击作用会使固定在软弱岩石中锚索的预应力和承载力发生变化,尤其是对稳定性较差的松散围岩会产生较大的影响。我们现在的锚索跟迎头支护只是暂时性的对临时支护起加固作用,以最大限度地保护支护,诸如此类现象在迎头施工过后,要视现场的具体情况进行锚索的二次张拉或预紧,或者进行锚索的补强支护。

7.4 应力补偿措施

随着预应力锚固技术的应用和发展,我国相继研制和生产了多种不同形式的锚固体系,由于其材质、加工质量及安装质量的不同,会在不同程度上影响预应力,材料质量及安装质量越好,综合加固效果就越好,就越能减少预应力的损失。

经过对锚索预应力的损失因素的分析,针对不同因素的特性规律,提出以下补偿措施进行探讨。

(1)选用低松弛材料和与之相配套的锚固体系(锚具等),以减少预应力的损失。

(2)注重围岩条件的选择。将锚头锚在坚硬的

岩体中,使锚索有稳定的根基。外锚端也必须坚实,以避免应力集中区岩体徐变过大,增加应力损失。

(3)选择适宜的时间对锚索张拉或补偿张拉。首先在安装时进行超张拉,并保持一段时间,如果反复张拉二次,效果更为显著;更重要的是在施工后,应在部分初期应力损失完成后,进行补偿张拉,且张拉时间不宜拖得太久。

8 锚索的监测

(1)锚索施工质量监测。集团公司要求锚索安装后要有 80~100 kN 的预紧力,锚索的锚固力为 200 kN 以上。目前我矿的锚索锚固力监测设备是张拉油缸,操作比较繁琐。针对这种情况,我们专门研制了配合 ML-30 型锚杆拉力计使用的检测锚索锚固力的检测机具——承载器,使用效果非常好,节约了人力、物力,使得检测程序大为简化。

(2)锚索的预应力监测。只有当施工的锚索质量极其低劣,即用人的感官能直接检查出来的问题才能发现,如人工晃动锚索时锚盘活动、锚索外露超长等。这方面问题还有待于进一步加强研究。

(3)建立锚索材料及施工档案,严格控制材料质量,杜绝不合格材料入矿和下井,严把施工质量关,保证锚索的安装质量。

9 结语

通过对使用巷道的试验应用,表明我们的锚索体系结构合理,施工便捷,尤其是推广使用与之匹配的 $\varnothing 27$ mm 的钻头,凝结效果更为明显。因此锚索支护在我矿巷道支护的推广应用是成功的,对深部支护,尤其是应力复杂区的支护效果更为突出。

2005 年英国国际地质设备及技术展览会(GeoDrillingshow 2005)

本刊讯 由英国钻探协会(BDA)赞助、英国采矿与交通有限公司(Mining Communication Limited)及国际地质钻探(Geodrilling International)杂志出版社联合社举办的 2005 年国际地质钻探展览会(GeoDrilling 2005)将于 2005 年 5 月 18~19 日在位于英国的诺丁翰姆(Nottingham)、德比(Derby)和雷西特(Leicestre)三市之间的都宁顿(Donington)展览中心举行。GeoDrilling 2005 展览会是世界上唯一完全致力于地质钻探及地下工程设备与施工技术的展览和学术交流,展览会涉及岩土钻掘及地下工程领域的各个方面。据展览会组委会发布的信息,到 2004 年 11 月已经注册参展的岩土钻掘及地下施工设备及服务的专业公司已超过 50 家。展览会期间,除了举行专门的岩土钻掘及地下工程设备展览之外,还将举办系列地质钻探及地下工程技术发展研讨会。展览会将为地质钻探设备制造商、钻探施工承包商、建筑承包商、钻探设备用户、有关技术人员等相聚、对全球日益增长的地质钻探市场、钻探设备和施工技术的发展现状、未来钻探设备的需求、新的钻探服务领域的开拓等进行深入研讨和交

流提供了一次绝好的机会。展览主要包括以下内容:(1)基础钻探(Foundation Drilling);(2)桩基施工技术(Piling);(3)大坝及道路修建工程设备及技术(Dam and Road Construction);(4)基础设施施工钻进(Infrastructural Drilling);(5)水井钻探(Water Drilling);(6)地质找矿钻探(Exploration Drilling);(7)地热资源的勘探开发(Geothermal Energy);(8)环境调查钻探(Environmental Drilling);(9)地下工程修复技术(Ground Remediation);(9)定向钻进及非开挖铺管技术(Directional Drilling);(10)爆破孔钻进(blasthole Drilling);(11)采石工程钻进技术(Quarry Drilling);(12)近海及水下作业工程设备及技术(Offshore/Sub sea work);(13)隧道工程施工技术(Tunneling)等。本次展览筹、拨了大批专项费用,鼓励一些行业名人及当局要员参加和光顾本次展览。本次展览会将大大促进岩土钻掘及地下工程技术和学术交流。

(张永勤 供稿)