

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.024

基于上限法的深部大断面回采 巷道顶板锚索设计方法研究

江 贝^{1,2,3}, 李术才², 王 琦^{2,3}, 王富奇⁴, 张若祥⁵,
郭念波⁴, 任尧喜⁵, 王洪涛², 张 建⁴

(1. 济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;
3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
4. 兖矿集团有限公司, 山东 邹城 273500; 5. 龙口煤电有限公司, 山东 龙口 265700)

摘 要: 针对目前深部大断面回采巷道控制难题和相应的高强锚索控制技术, 考虑顶板围岩应力与支护荷载影响, 利用 Hoek-Brown 强度准则及塑性力学中的极限分析上限法, 得到了大断面巷道顶板的冒落破坏机制, 提出了顶板锚索长度及匹配预紧力的设计方法。基于建立的锚索设计参数影响因素敏感性指标对巷道宽度、岩体重度、围岩应力、岩体抗压强度、抗拉强度、锚索布设间距、顶角锚索布设倾角等因素的影响进行了分析。结合现场实际情况, 提出了深部大断面回采巷道围岩控制的工程建议。将此设计方法应用到千米深井赵楼煤矿 1305 孤岛工作面的运输顺槽顶板锚索参数确定中, 有效地控制了围岩变形。研究表明: 在高应力大断面回采巷道中, 顶板锚索需锚固在稳定岩层中, 并施加足够的预紧力, 才可有效控制顶板围岩冒落或破坏; 顶板锚索所需预紧力随岩体抗拉强度、抗压强度及岩体经验参数 A 的增大而减小, 随巷道宽度、岩体重度、围岩应力、锚索布设间距、顶角锚索布设角度以及岩体经验参数 B 的增大而增大, 其敏感性最高的影响因素为围岩应力。因此, 在深部高地应力巷道设计中, 需特别重视地应力的影响, 采用高强、高延伸率锚索, 增设锚索定量让压装置, 高阻让压有效释放围岩应力, 并通过施加高预紧力或注浆加固等方式来提高围岩完整性, 获得较好的围岩控制效果。

关 键 词: 深部大断面; 回采巷道; Hoek-Brown 强度准则; 上限法; 顶板; 锚索设计

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2351-08

Design method of roof anchor cable for deep large section mining roadways based on the upper bound method

JIANG Bei^{1,2,3}, LI Shu-cai², WANG Qi^{2,3}, WANG Fu-qi⁴, ZHANG Ruo-xiang⁵,
GUO Nian-bo⁴, REN Yao-xi⁵, WANG Hong-tao², ZHANG Jian⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China; 2. Research Center of Geotechnical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116 China; 4. Yankuang Group Company Limited, Zoucheng, Shandong 273500, China; 5. Longkou Coal-Electric Company Limited, Longkou, Shandong 265700 China)

Abstract: The aim of this study is to resolve the present control problems and the corresponding high-strength anchor cable control technology in deep large section roadways. This study was based on the Hoek-Brown criterion and the upper bound theorem of the limit analysis and also considered the stress of surrounding rock in the roof and the effect of supporting the load. On the above basis, the roof caving mechanism of large-section roadways was acquired. Furthermore, a design method for roofs was put forward for the minimum length and the pre-tightening force of an anchor cable. Since the design parameters of anchor cables was affected by established sensitivity indexes, it is important to investigate the effects of established sensitivity indexes on factors, such as the roadway's width, the specific weight of the rock mass, the stress in the surrounding rock, the compressive strength and the tensile strength of the rock mass, anchor cable layout spacing and vertex anchor cable laying angle. According to the actual field conditions,

收稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51674154, No. 51474095); 中国博士后科学基金面上资助 (No. 2016M602144, No. 2016M590150); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金 (No. SKLGDUEK1717, No. SKLGDUEK1519); 国家重点研发计划专项资助 (No. 2016YFC060090X)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51674154, 51474095), the China Postdoctoral Science Foundation (2016M602144, 2016M590150), the Open Fund for State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, CUMT(SKLGDUK1717, SKLGDUEK1519) and the National Key Research and Development Program (2016YFC060090X).

第一作者简介: 江贝, 女, 1985 年生, 讲师, 博士, 主要从事地下工程围岩控制机理与技术方面的研究工作。E-mail: jiangbei519@163.com

engineering suggestions are proposed for controlling surrounding rocks in the deep large-section roadway. Finally, this design method was applied to determine the roof anchor parameters of transport gateway of 1305 Island Coal Face in the Kilometer Deep Well Zhaolou coal mine, which effectively controlled the deformation of surrounding rock. From research results, only when the roof anchor cable was anchored in stable rock and enough pre-tightening force was exerted, the roof rock caving and damage can be effectively controlled in high-stress large-section mining roadways. It is found that roof pre-tightening force for anchor cable decreased with the increase of tensile strength, compressive strength and empirical parameter A of rock mass. Besides, this roof pre-tightening force increased with increasing the width of the roadway, the specific weight of rock mass, the stress in the surrounding rock, the compressive strength and the tensile strength of rock mass, anchor cable layout spacing, vertex anchor cable laying angle and empirical parameter B of rock mass. Moreover, the highest sensitivity of all the influencing factors turned out to be the surrounding rock stress. This indicates that special attention should be paid to the influence of *in-situ* stress of the surrounding rock when designing the deep high-stress roadways. Therefore, the effective release of the surrounding rock stress can be achieved by using the high strength, high elongation anchor cable and adding the yieldable device. Meanwhile, the integrity of the surrounding rock can be improved by applying high pre-tightening force and grouting reinforcement, resulting in better control performance of surrounding rock.

Keywords: deep large section; mining roadways; Hoek-Brown criterion; the upper bound theorem; roof; anchor cable design

1 引言

随着我国浅部煤炭资源的枯竭,煤矿开采深度逐年增加,巷道布置从小断面向大断面发展,巷道围岩环境发生显著改变,使巷道顶板管理问题更加突出。深部大断面回采巷道开挖后即出现较大范围的破裂区,顶板下沉量大,持续变形,给巷道围岩控制带来极大的困难。如果顶板管理不当,支护质量不高,压力继续增大,就会出现断裂、垮落或冒顶等现象。同时,由于回采巷道服务年限短,对此类巷道的支护成本控制要求较高。

在大断面回采巷道顶板控制方面,高强锚索作为一种经济有效的支护形式,近年来使用越来越广泛。康红普等^[1]分析了目前煤矿锚索支护存在的问题,在高预应力强力支护理论的基础上,进行了全断面锚索支护技术试验。赵岩峰等^[2]利用锚索高强高预应力的特点,进行巷道顶板全锚索支护,成功解决了阳煤集团五矿全煤巷道顶板支护难题。李如波^[3]通过分析围岩可锚性和现场锚网支护、全锚索支护,并进行方案对比,凸现了全锚索支护在高地压复合顶煤巷支护的优越性。上述研究表明,顶板采用高强高预紧力锚索支护可有效控制围岩变形,减少顶板事故的发生。但这些研究成果主要集中在高强锚索的应用方面。

在顶板锚索的设计方面:王金华等^[4]采用FLAC^{3D}对锚索预应力在巷道围岩中形成的应力场-锚索预应力场分布特征进行了研究,分析了锚索预应力场分布形态与锚索长度、间距、排距、安装角度、预应力的大小之间的关系。孙玉福^[5]针对潞安矿区锚索支护存在的问题,论述了高强度锚索支护参数的选取原则,通过数值分析,确定了锚索预应力、直径、强度与长度的取值范围。

传统锚索支护理论认为,锚索主要起悬吊作用,基于此原理,对锚索支护参数提出2个主要要求:

①锚索长度深入到稳定岩层;②锚索能够保证承受下部不稳定岩层的重量。但在锚索实际设计中,对于不稳定岩层重量的计算,尤其是在深部高应力条件下,如何考虑原岩应力、围岩力学参数等综合因素对不稳定围岩范围的影响以及锚索预应力设计的理论依据研究尚不深入。

本文以深部大断面回采巷道为例,考虑岩体非线性强度破坏特征与锚索支护作用影响,构造出巷道顶板围岩冒落破裂机制,利用上限分析理论,提出了该类巷道锚索长度及匹配预紧力这2个主要指标的设计方法,讨论分析了不同因素对2个指标的影响规律,给出了相应工程建议措施,并对现场工程实例进行了设计分析。

2 岩体非线性强度破坏理论

Mohr-Coulomb(简称M-C)强度准则是岩土工程领域应用最为广泛的强度准则之一,它是以Mohr强度理论基本思想为指导,在Coulomb公式的基础上导出的,该理论不但能够反映岩体的脆性破坏,还能反映其塑性破坏特征^[6]。其局限性在于不能描述岩体破坏时最大、最小主应力之间的非线性关系,对拉应力区、低应力区和高应力区的岩体强度特性不能很好解释。对于岩石材料而言,由于其内部存在众多的节理面和破碎带,且大量的试验和理论研究早已证明,几乎所有岩土材料的破坏包络线都是非线性的,线性情况只是其中的一个特例。

针对岩体该种非线性破坏性质,Hoek等提出了国际上著名的Hoek-Brown(简称H-B)准则^[7-9],并在随后经过修正,建立了广义H-B准则^[10],其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

式中： m_b 为经验参数 m 的值； s 、 α 为与岩体特征有关的常数。

在摩尔平面 $\sigma-\tau$ 上，式 (1) 可表示为^[10]

$$\tau = A\sigma_c \left[(\sigma_n + \sigma_t)\sigma_c^{-1} \right]^B \quad (2)$$

式中： A 、 B 为与岩体性质有关的无量纲参数； σ_c 、 σ_t 分别为岩体的抗压强度与抗拉强度； σ_n 为正应力。

与传统的 M-C 强度准则相比，H-B 准则属于典型的非线性强度准则，它综合考虑了岩块强度、结构面强度、岩体结构等多种因素的影响，能更好地反映岩体的非线性破坏特征，弥补了传统 M-C 强度准则在拉应力区、低应力区和高应力区不能准确有效描述的不足，因而更符合岩体的破坏特点。对于深部高地应力巷道顶板而言，围岩冒落破坏属于典型的拉剪破坏，不适合采用传统的 M-C 强度准则来描述围岩破坏性质，因此本文采用非线性 H-B 强度准则来进行分析。

3 基于 H-B 强度准则的深部巷道锚索支护顶板破坏上限分析

众多学者通过试验、现场调研及数值模拟等手段研究表明，在大断面巷道开挖后，顶板呈半椭球状垮落下沉，若采用锚索进行及时有效支护，并施加足够强度的预紧力，则可有效避免顶板围岩下沉破坏。本文主要研究深部大断面回采巷道，因此，将巷道顶板围岩视为均质岩体，其变形破坏符合 H-B 准则。根据顶板失稳的破坏特征，建立锚索支护作用下深部大断面回采巷道顶板冒落破坏机制，如图 1 所示，将冒落破坏范围内岩体视为刚性体，并关于 y 轴对称，尺寸为 $2l \times h$ ，下沉速度为 \dot{u} ，对应围岩破裂曲线方程为 $f(x)$ ，巷道断面宽度为

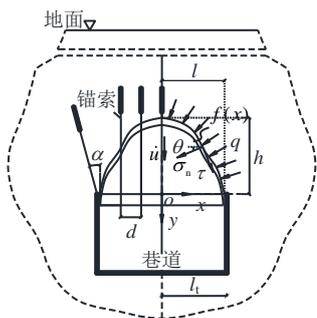


图 1 深部大断面巷道围岩破坏机制

Fig.1 Failure mechanism of roof surrounding rock In a deep large-section roadway

$2l_r$ 。将顶板围岩视为理想刚塑性体，将顶板围岩应力视为作用在冒落体周边的分布荷载 q ，其方向垂直于冒落体，并沿曲线 $f(x)$ 均匀分布；对应的围岩破裂面处剪应力为 τ_n ，正应力为 σ_n 。为保证该部分冒落岩体稳定，沿巷道顶板断面均匀对称布置锚索支护，锚索安装后所需施加预紧力大小为 F ，间排距为 $d \times s_c$ 。基于巷道顶板锚索设计原则，顶角处锚索倾斜施打，其与竖直方向的夹角为 α 。

3.1 围岩内部能量耗散率求解

若将破裂面视为具有一定厚度 w 的薄变形层，则内部能量耗散仅仅产生于围岩破裂面处。根据传统的塑性位势理论^[11]，假设在主应力空间中，煤岩体屈服函数面与塑性势函数面相重合，顶板围岩变形破坏符合非线性 H-B 强度准则，则根据与该准则相关联流动法则，可求出薄变形层内部塑性应变率增量，进而可将围岩破裂面处所产生的单位体积内部能量耗散率^[12]表示为

$$\dot{D} = \sigma_n \dot{\epsilon}_n + \tau \dot{\gamma}_n = \left\{ \left[-\sigma_t + \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} (1-B^{-1}) \cdot f'(x)^{1/(1-B)} \right] / \left[w \sqrt{1 + f'(x)^2} \right] \right\} \cdot \dot{u} \quad (3)$$

式中： $\dot{\epsilon}_n$ 、 $\dot{\gamma}_n$ 分别为破裂面薄变形层内对应的塑性正应变率与剪应变率。结合图 1 顶板围岩破坏机制的几何物理意义，以 $[0, l]$ 范围内冒落破坏岩体为研究对象，破裂面弧长对应长度为 S ，将式 (3) 进行积分，可得围岩破裂面薄变形层处产生的内部能量耗散率大小为

$$\dot{W}_D = \int_0^S \left\{ \left[\sigma_t + \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} (B^{-1} - 1) f'(x)^{1/(1-B)} \right] / \left[w \sqrt{1 + f'(x)^2} \right] \right\} w ds \cdot \dot{u} = \int_0^l \left[\sigma_t + \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} \cdot (B^{-1} - 1) f'(x)^{1/(1-B)} \right] dx \cdot \dot{u} \quad (4)$$

3.2 外力做功功率求解

对于外力功率部分，应由顶板围岩自重做功、围岩应力 q 做功与锚索预紧力 F 做功 3 部分组成。

(1) 围岩自重做功功率

设岩体重度为 γ ，则可求得冒落体自重做功功率为

$$\dot{W}_\gamma = -\int_0^l \gamma f(x) dx \cdot \dot{u} \quad (5)$$

(2) 围岩应力做功功率

将顶板围岩应力沿破裂曲面进行积分，可求得围岩应力做功功率为

$$\dot{W}_q = \int_0^S q \sin \theta ds \cdot \dot{u} = \int_0^l q dx \cdot \dot{u} = ql \dot{u} \quad (6)$$

(3) 锚索预紧力做功功率

设相邻锚索之间间距为 d , 在顶板围岩冒落破坏范围内, 所需布置锚索根数为

$$n = 2l / d + 1 \quad (7)$$

利用式 (7) 计算所得为小数时, n 取整数部分。因此, 可将锚索预紧力做功功率表示为

$$\dot{W}_F = -(n/2 + \cos \alpha - 1)F\dot{u} \quad (8)$$

3.3 单根锚索所需预紧力确定

考虑顶板围岩应力与支护荷载作用, 根据虚功原理, 在巷道顶板冒落破坏机动许可场中, 外力做功功率等于内部能量耗散率, 可得

$$\dot{W}_D = \dot{W}_\gamma + \dot{W}_q + \dot{W}_F \quad (9)$$

将式 (4) ~ (6)、(8) 分别代入式 (9), 可得

$$\int_0^l [-\sigma_t + \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} (1-B^{-1}) f'(x)^{1/(1-B)}] dx \cdot \dot{u} = -\int_0^l \gamma f(x) dx \cdot \dot{u} + ql\dot{u} - (n/2 + \cos \alpha - 1)F\dot{u} \quad (10)$$

整理后可得

$$F = \frac{2}{n + 2(\cos \alpha - 1)} \int_0^l [\sigma_c (AB)^{1/(1-B)} (1-B^{-1}) \cdot f'(x)^{1/(1-B)} - \sigma_t - \gamma f(x)] dx + \frac{2ql}{n + 2(\cos \alpha - 1)} = \frac{2}{n + 2(\cos \alpha - 1)} \left\{ \int_0^l \phi[x, f(x), f'(x)] dx + ql \right\} \quad (11)$$

其中:

$$\phi[x, f(x), f'(x)] = -\gamma f(x) + \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} \cdot (1-B^{-1}) f'(x)^{1/(1-B)} - \sigma_t \quad (12)$$

式 (11) 是单根锚索所需的预紧力值, 为关于 $f(x)$ 的泛函数, 在众多的顶板冒落破坏机制中, 为获得最优上限解, 应寻求式 (11) 的一个最大值, 才更接近真实解。这是一个典型的变分问题, 利用欧拉方程求解如下:

$$\frac{\partial \phi}{\partial f(x)} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial f'(x)} \right) = 0 \quad (13)$$

式 (13) 各部分应满足:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial f(x)} &= -\gamma \frac{\partial \phi}{\partial f'(x)} = -\sigma_c A^{1/(1-B)} B^{B/(1-B)} f'(x)^{B/(1-B)} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial f'(x)} \right) &= \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} (1-B)^{-1} \cdot f'(x)^{(2B-1)/(1-B)} f''(x) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将其代入式 (13) 中, 整理可得微分方程为

$$-\gamma + \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} (1-B)^{-1} f'(x)^{(2B-1)/(1-B)} f''(x) = 0 \quad (15)$$

对上式两边进行两次积分, 可求得顶板围岩冒落破坏曲线方程为

$$f(x) = \sigma_c^{(B-1)/B} A^{-1/B} \gamma^{-1} (\gamma x + c_0)^{1/B} + c_1 \quad (16)$$

式中: c_0 、 c_1 为待定常数。考虑到冒落体的对称性, 破坏分离曲线 $f(x)$ 关于 y 轴对称, 因此, 应满足 $c_0 = 0$ 。此外, h 为冒落体高度, 根据图 1 中几何关系, 在区间 $[0, l]$ 上应满足:

$$\left. \begin{aligned} f(x=0) &= -h \\ f(x=l) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

代入可得 $c_1 = -h$, 则冒落体高度 h 应为

$$h = \sigma_c^{(B-1)/B} A^{-1/B} \gamma^{(1-B)/B} l^{1/B} \quad (18)$$

据此, 整理可得 $[0, l]$ 区间内, 曲线方程 $f(x)$ 的表达式为

$$f(x) = \sigma_c^{(B-1)/B} A^{-1/B} \gamma^{(1-B)/B} (x^{1/B} - l^{1/B}) \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (11) 中即可得到单根锚索所需的预紧力值为

$$F = \frac{2}{n + 2(\cos \alpha - 1)} \left\{ \int_0^l [\sigma_c (AB)^{1/(1-B)} (1-B^{-1}) \cdot f'(x)^{1/(1-B)} - \sigma_t - \gamma f(x)] dx + ql \right\} \quad (20)$$

由式 (20) 可知, 锚索预紧力是冒落体宽度 l 的函数, 随冒落体尺寸的增大, 巷道围岩稳定顶板锚索所需的初始预紧力不断增大。

巷道顶板事故发生的根本原因是在巷道掘进过程中顶板产生不同程度的破坏, 如果顶板控制不好, 破坏范围持续增大, 则会出现顶板垮落或局部冒顶等现象。顶板的冒落破坏不是开挖瞬间一次性完成

的, 而是不断发展的一种渐进破坏过程, 也就是说, 在顶板围岩渐进破坏过程中, 围岩冒落体的尺寸是不断变大的。从工程设计安全角度, 本文考虑顶板破坏的最不利情形, 取冒落体宽度 l 等于巷道宽度 l_r , 则可得到巷道开挖初期, 为了防止顶板产生冒落破坏, 单根锚索所需提供的预紧力值大小为

$$F = \frac{2}{n+2(\cos\alpha-1)} [\sigma_c^{(B-1)/B} A^{-1/B} B \cdot (B+1)^{-1} \gamma^{1/B} l_r^{(B+1)/B} - \sigma_t l_r + q l_r] \quad (21)$$

同时, 为保证巷道顶板围岩锚固支护系统的安全, 使顶板锚索锚固在稳定岩层中, 顶板锚索的长度应当大于顶板围岩的冒落范围。因此, 利用式 (18) 可得到所需顶板锚索长度 l_c 应满足以下关系:

$$l_c > \sigma_c^{(B-1)/B} A^{-1/B} \gamma^{(1-B)/B} l_r^{1/B} \quad (22)$$

4 巷道顶板锚索设计参数影响因素分析

4.1 锚索设计参数影响因素敏感性指标的建立

在巷道锚索支护设计中, 为得到合理的锚索长度和预紧力参数, 分别对巷道宽度、锚索布设间距、顶角锚索布设倾角、岩体重度、围岩应力、岩体抗压强度、抗拉强度、岩体经验参数等因素进行分析, 建立敏感性指标为

$$\eta_{ij} = \left| \frac{(I_{ij\max} - I_{ij\min})/I_{ij\min}}{(V_{ij\max} - V_{ij\min})/V_{ij\min}} \right| \times 100\% \quad (22)$$

式中: $I_{ij\max}$ 和 $I_{ij\min}$ 分别为影响因素 i 取值变化范围内所对应锚索设计参数 j 的最大值与最小值; $V_{ij\max}$ 和 $V_{ij\min}$ 分别为影响因素 i (对应同一锚索设计参数 j) 的最大值与最小值; 锚索设计参数 j 代表锚索预紧力 F 与锚索设计长度 l_b 两个设计参数。

η_{ij} 为影响因素 i 对锚索设计参数 j 的敏感性指标, 用于评价各因素对锚索设计参数产生影响的敏感程度, 其值越大, 说明对应因素对锚索设计参数的影响程度越大, 在设计中更应着重考虑。

4.2 顶板锚索所需预紧力影响因素分析

以某巷道为例, 为分析不同影响因素及布锚方式对巷道所需锚索预紧力值的影响, 分别绘制出巷道宽度为 3~7 m, 锚索布设间距 0.5~1.5 m, 顶角锚索布设角度为 $10^\circ \sim 50^\circ$ 。其他计算参数以及单根锚索所需预紧力大小的变化关系曲线, 如图 2 所示。

从图可以看出: 当 σ_t 、 σ_c 以及经验参数 A 增加时, 锚索所需预紧力值呈现不断减小的趋势。其中, 由于深部高应力巷道顶板围岩冒落破坏属于典型的拉剪破坏, 岩体抗拉强度对锚索预紧力值相对影响较大。

当 l 、 d 、 α 、 γ 、 q 以及 B 增加时, 锚索所需预紧力值呈现出不断增大的趋势。其中 q 对 F 的影响最为显著, 说明在深部巷道支护过程中, 应重点考虑围岩应力对巷道稳定性的影响。其次, d 、 l 以及 B 对锚索预紧力的确定也有较大影响, 因此, 在深部巷道锚索预紧力设计过程中应重点考虑这几种因素。

根据敏感性评价指标计算公式 (22) 与图 2 数据可以得出: 锚索所需预紧力的影响因素中, 影响最为显著的是 q , 其敏感性指标为 11.06; 其次为 σ_t 和 B , 其敏感性指标分别为 1.97 和 1.45。

针对锚索支护的另一设计因素——锚索长度, 其最小长度应大于顶板围岩冒落破坏范围, 因此, 根据式 (17) 求得的冒落破坏范围即为锚索最小设计长度。同样运用以上方法可以分析出各因素对锚索设计长度的影响及敏感性指标, 由于篇幅所限, 在此不再赘述。

5 工程建议及应用

5.1 工程建议

从工程建设安全与经济的角度出发, 针对深部大断面回采巷道顶板锚索设计及施工有以下建议:

(1) 在巷道中, 顶板高强、高预紧力锚索需要锚固在稳定岩层中, 并施加足够的预紧力, 才可有效控制顶板围岩的冒落或下沉。

(2) 锚索长度及匹配预紧力的设计应综合考虑巷道断面尺寸、围岩所处应力状态及力学性能、锚索布设方式等参数影响, 以实现锚索与围岩之间耦合。

(3) 由于顶板锚索预紧力的影响因素中, 围岩应力为最为敏感的指标, 因此, 在巷道布置时, 应当特别注意其所处的地质环境, 同时在锚索设计时, 采用高延伸率锚索或锚索定量让压装置, 高阻让压可有效释放围岩应力, 保证巷道的稳定与支护体系的有效性。

(4) 提高围岩强度可有效降低锚索所需的长度和预紧力, 通过锚固注浆等方式来增加围岩的强度, 提高围岩完整性, 发挥围岩自承能力, 可以获得更好的围岩控制效果。

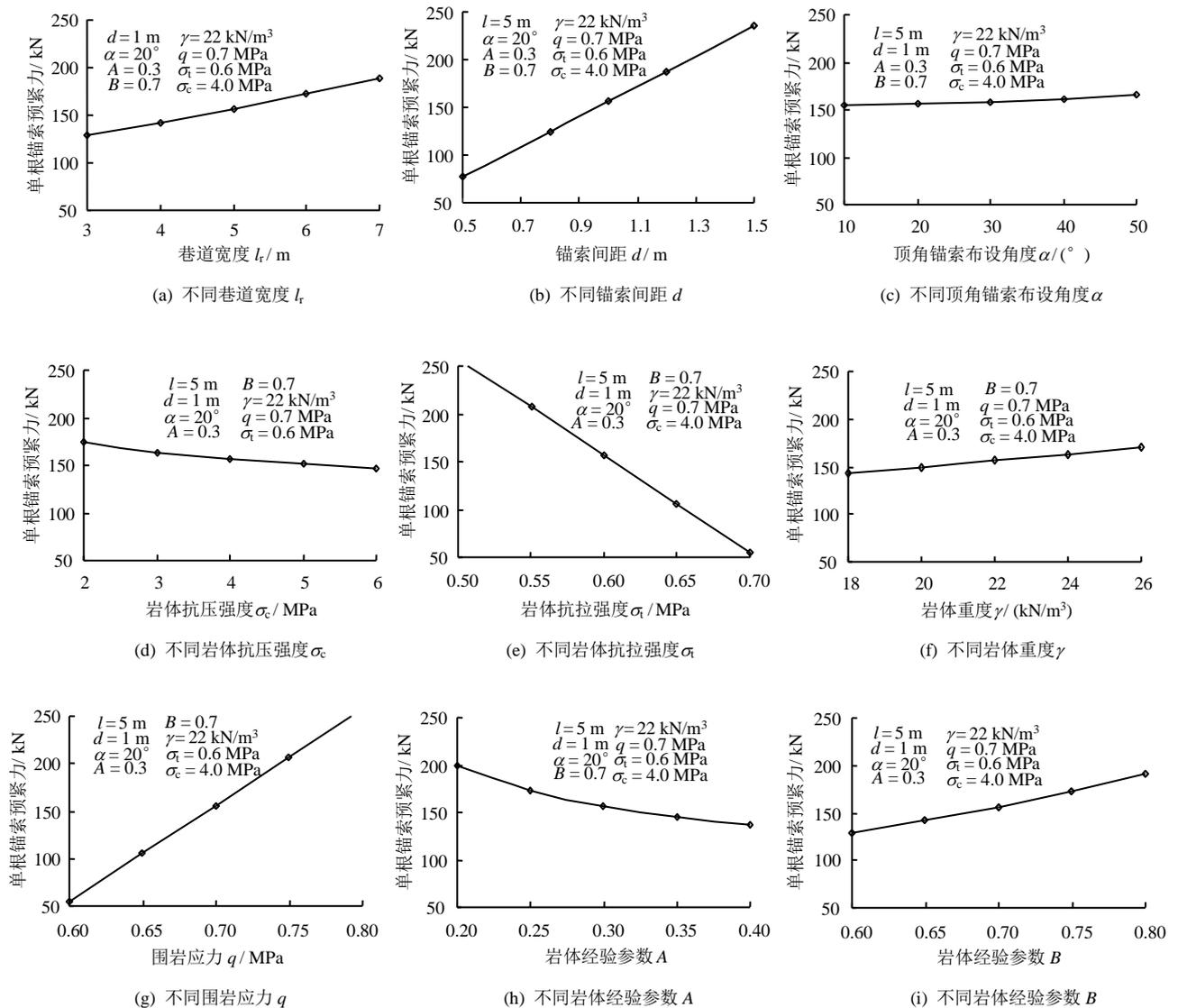


图2 不同影响因素下单根锚索所需预紧力

Fig.2 Required pre-tightening forces of a single bolt under different parameters

5.2 工程应用

巨野煤田是华东地区新探明的特大型煤田，赵楼煤矿位于巨野煤田的中部，为典型千米深井，设计生产能力 3.0 Mt/a。

1305 工作面属于孤岛工作面，运输顺槽围岩整体性差，结构松散，极其软弱，顶板极易垮落。巷道设计断面宽度 4 800 mm，高度 3 500 mm。采用常规锚杆支护无法对顶板进行有效控制。

基于强力让压支护理念，课题组在 163~227 排钢带进行了全断面锚索现场支护试验。顶板采用高强、高预紧力全锚索配合锚索让压环进行加密支护。两帮采用锚杆+锚索加强支护。

根据现场地质条件，取岩体经验参数 $A=0.4$ ， $B=0.8$ ， $\gamma=24 \text{ kN/m}^3$ ， $\sigma_c=4 \text{ MPa}$ ， $\sigma_t=0.6 \text{ MPa}$ ， $q=0.6 \text{ MPa}$ 。

基于式 (20)、(21) 计算可知，锚索长度计算值 $l_0=6.21 \text{ m}$ ，预紧力计算值 $F=142.9 \text{ kN}$ 。对理论计算值取整，进行工程方案设计，最终预紧力选择 150 kN，锚索使用 $\phi 22 \text{ mm} \times 6 200 \text{ mm}$ 钢绞线，锚索让压环让压点为 20 t，让压力为 200 mm，底角选用 $\phi 22 \text{ mm} \times 2 400 \text{ mm KMG500}$ 左旋无纵筋全螺纹锚杆，支护断面如图 3 所示。

图 4 为掘进期间巷道典型断面的收敛监测结果。由图可以看出，在试验方案实施后，巷道变形呈现底板>沿空帮>顶板>实体煤帮的变化趋势，在巷道掘进过程中，初期表面位移变化较大，后期相对稳定，在观测 120 d 后，底脚量最大为 251 mm，两帮合计收敛量达到 289 mm，顶板变形量稍小，最大沉降值为 157 mm，表面位移收敛量整体相对较小，掘进期间巷道稳定性得到有效控制。

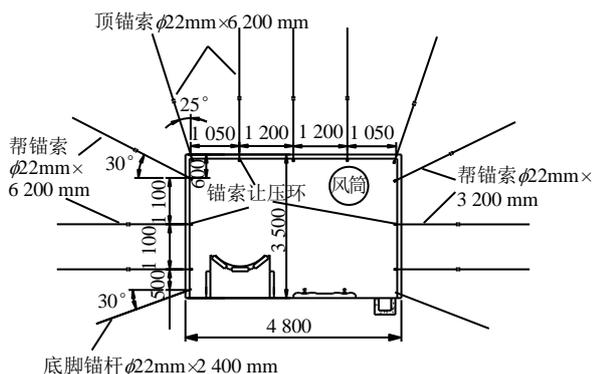


图 3 巷道支护断面图 (单位: mm)

Fig.3 Cross section of support for roadway (unit: mm)

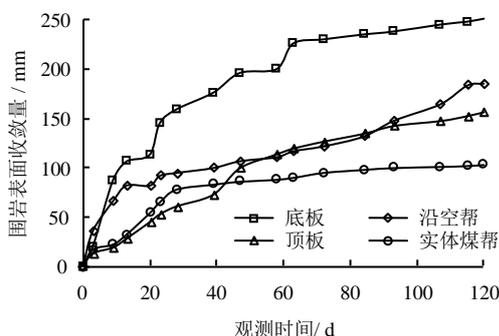


图 4 典型断面的收敛监测结果

Fig.4 Convergence monitoring results for a typical cross section of the roadway

6 结 论

(1) 针对深部大断面回采巷道, 基于 Hoek-Brown 非线性岩体强度破坏准则, 考虑围岩应力与锚索支护作用影响, 构造出顶板围岩冒落破裂机制, 利用上限分析理论, 提出了巷道顶板锚索长度及匹配预紧力的设计方法, 可为该类条件下巷道锚索支护设计提供一定参考。

(2) 建立巷道顶板锚索设计参数影响因素敏感性指标 η_{ij} , 基于该指标对巷道宽度、锚索布设间距、顶角锚索布设倾角、岩体重度、围岩应力、岩体抗压强度、抗拉强度、岩体经验参数等因素对顶板锚索设计参数的影响进行了分析。

(3) 当巷道宽度 l 、锚索布设间距 d 、顶角锚索布设角度 α 、岩体重度 γ 、围岩应力 q 以及岩体经验参数 B 增大时, 顶板冒落破坏范围不断增大, 单根锚索所需预紧力值不断增加, 锚索设计长度随之增加; 当岩体抗拉强度、抗压强度以及岩体经验参数 A 增大时, 顶板冒落破坏范围不断减小, 锚索所需预紧力则不断减小, 锚索设计长度随之减小; 影响锚索设计预紧力及长度的各因素当中围岩应力敏感性最高, 其次为岩体抗拉强度。

(4) 对深部大断面回采巷道顶板而言, 锚索必须达到设计长度并施加足够预紧力, 才可有效地限制顶板围岩的下沉破坏; 在该类巷道设计和施工过程中, 需特别重视围岩应力对围岩稳定性的影响, 并通过采用高强、高延伸率锚索或锚索定量让压装置、锚固注浆等方式保证巷道围岩得到有效控制。

参 考 文 献

[1] 康红普, 林健, 吴拥政. 全断面高预应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 Hong-pu, LIN Jian, WU Yong-zheng. 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.

[2] 赵岩峰, 刘福军. 极松散煤层全煤巷道顶板全锚索支护技术的应用[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(11): 33—36.
ZHAO Yan-feng, LIU Fu-jun. Application of full length anchor support technology for very soft seam roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2002, 30(11): 33—36.

[3] 李如波. 高地压复合顶煤巷全锚索支护技术应用研究[J]. 煤炭工程, 2005, (8): 42—44.
LI Ru-bo. High pressure composite top-coal lane anchor rope support technology application research[J]. *Coal Mine Engineering*, 2005, (8): 42—44.

[4] 王金华, 康红普, 高富强. 锚索支护传力机制与应力分布的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 1—6.
WANG Jin-hua, KANG Hong-pu, GAO Fu-qiang. Numerical simulation on load-transfer mechanisms and stress distribution characteristics of cable bolts[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(1): 1—6.

[5] 孙玉福. 高强度锚索支护技术及在潞安矿区的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 595—599.
SUN Yu-fu. Application of high strength cable bolting technology in lu'an coal mining area[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4): 595—599.

[6] LIUA B, YUEB Z Q, THAM L G. Analytical design method for a truss-bolt system for reinforcement of fractured coal mine roofs[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 42: 195—218.

[7] 李斌, 刘艳章, 林坤峰. 非线性Mohr-Coulomb准则适用范围及其改进研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 637—646.
LI Bin, LIU Yan-zhang, LIN Kun-feng. Application scope of nonlinear Mohr-Coulomb criterion and its modification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 637—646.

- [8] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [9] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1980, 106(GT9): 1013—1035.
- [10] HOEK E, MARINOS P. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion[J]. **Soils and Rocks**, 2007, (2): 1—8.
- [11] 温勇, 杨光华, 汤连生, 等. 基于广义位势理论的土的数值弹塑性模型及其初步应用研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(5): 1324—1332.
- WEN Yong, YANG Guang-hua, TANG Lian-sheng, et al. A numerical elastoplastic model based on generalized potential theory and its preliminary application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5):1324—1332.
- [12] FRALDI M, GUARRACINO F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek-Brown failure criterion[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46: 665—673.