

巷道锚杆支护特性分析与应用

李大伟¹, 侯朝炯²

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中国矿业大学 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 对采用锚杆工作阻力为夹紧力、锚固区围岩力学性质不改变的计算方法得出的结果进行了分析, 研究了巷道锚杆支护作用的特性及其相关因素间的影响关系。结果表明: 锚杆巷道围岩径向、切向应力在锚杆锚固端位置有一个跳跃; 锚杆长度一定时, 支护强度对围岩塑性区半径、巷道位移的影响随锚杆工作阻力值的提高逐渐减弱; 锚杆工作阻力强度一定时, 锚杆支护巷道周边位移、围岩应变软化区半径及破碎区半径, 随锚固区半径增加开始阶段显著减小, 基本呈双曲线函数关系, 一定阶段后, 变化趋缓, 呈近水平直线变化。并在程村矿井下巷道进行了一次锚杆支护的设计应用。

关键词: 巷道; 锚杆支护; 特性

中图分类号: TD353.6 **文献标识码:** A

Analysis and application on bolt support characteristic of roadway

LI Da-wei¹, HOU Chao-jiong²

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. School of Energy and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Analysed the calculation result obtained in a manner that bolt work resistance is clamping force, and surrounding rock mechanics character of anchor district does not change. Support characteristic of the bolt roadway, and influence relationships of correlative factors were researched. The results indicate that surrounding rock radial stress and circumferential stress have a jump on anchor place of bolt inner end; the change values of surrounding rock plastic district radius, and roadway perimeter displacement are gradually decrescent with support strength increasing when bolt length is fixed; the plastic district radius of surrounding rock, brocken district radius, and roadway perimeter displacement remarkably decrease in initial stage with anchor district radius increasing when bolt support strength is fixed, the relationship of which are basically function of hyperbolic curve, after a certain stage, their changes gradually moderate that the relationship curves are approximately horizontal line in the main. And finally, the trial for bolt design of the first support was performed in Chengcun Mine's roadway.

Key words: roadway; bolt support; characteristic

近年来, 锚杆支护理论研究有了进一步发展, 国内外学者对锚杆锚固后围岩体力学性能的改善进行了研究^[1,2], 探讨了: ① 巷道锚杆支护可以提高锚固体的力学参数 (包括锚固体破坏前和破坏后的弹性模量 E 、黏结力 C 、内摩擦角 φ 等), 改善被锚固体的力学性能; ② 巷道围岩存在破碎区、塑性区、弹性区,

锚杆锚固区域内岩体的峰值强度 (C, φ) 或峰后强度、残余强度 (残余强度黏结力 C^* 、残余强度内摩擦角 φ^*) 均得到强化, 锚固体 $C, \varphi, C^*, \varphi^*$ 随锚杆支护强度的增加而提高; ③ 巷道锚杆支护可以改变围岩的应力状态, 增加围压, 从而提高围岩的承载能力, 改善巷道的支护状况; ④ 巷道围岩锚固体强度提高后, 可减小巷道周围破碎区、塑性区的范围和巷道的表面位移, 控制围岩破碎区、塑性区的发展, 从而有利于保持巷道围岩的稳定。基于上述内容, 目前锚杆支护对巷道围岩控制效果的计算, 采用了锚杆的工作阻力在力学上等价于对巷、硐岩壁表面类似支架施加一定量的径向支护阻力; 锚固区外岩体的力学性质参数不变; 锚固区岩体力学参数为黏结力 C, C^* , 内摩擦角 φ, φ^* 的强化值。

在研究了锚杆锚固前后围岩体应力状态改变的实际情况和对锚固体力学参数的影响后, 认为: ① 锚杆支护前后围岩体的应力状态发生了改变, 岩体的基本力学性质参数 ($E, C, \varphi, C^*, \varphi^*$) 并未变化, 锚固区内外采用统一的岩石力学参数; ② 锚杆支护对巷道围岩的控制效果, 在力学上锚杆工作阻力等价于锚杆两端对围岩体内锚固区施加两组夹紧力, 即锚杆工作阻力施加在巷道表面与锚杆锚固端两个位置的环向围岩圈上。目前实验室得到的锚固区岩体力学参数的强化结果是把锚固岩体和锚杆作为一个试件整体进行试验从宏观上获得的, 其实质是锚杆夹紧力在力学上相当于侧向力对试件作用效果的体现。

本文着重对采用锚固区围岩力学性质不改变、锚杆工作阻力为夹紧力的计算方法得出的支护结果进行分析, 研究巷道锚杆支护作用的特性及其相关因素间的影响关系; 对锚杆支护有了更深入的认识, 并应用于井下的巷道支护参数设计中。

1 夹紧力作用下的锚杆支护计算方法

夹紧力作用下的锚杆支护计算方法和诸多学者已进行的锚杆锚固后锚固区内围岩体力学性质参数提高的计算基本类似。不同之处: ① 锚固区内、外岩体应用了相同的岩体基本力学参数; ② 在巷道岩壁表面施加一定量的锚杆支护工作阻力强度 q (巷道半径 R_0 位置处) 外, 在锚杆锚固端位置的锚固区内、外交界面上还施加一组面力 $F = q R_0 / R_m$ (锚杆锚固端半径 R_m 位置处), 力的方向指向巷空^[3,4], 即在锚固端位置, 岩体径向应力 σ_r 存在一个锚固区内高于锚固区外 F 值的应力边界条件。

锚杆支护作用看作一对夹紧力, 是在锚杆端部锚固, 而且不考虑锚杆杆体的抗剪作用条件下成立的。图 1 为巷道锚杆的力学计算简图, 巷道断面为圆形, 原岩应力为 p_0 , 简化为平面应变问题。考虑岩体黏结力的应变软化 (M_c 为软化模量) 与剪胀扩容性, 应变软化区、破碎区采用非关联流动法则 $\varepsilon_r^p + \alpha \varepsilon_\theta^p = 0$, $\varepsilon_r^p, \varepsilon_\theta^p$ 分别为切向、径向上的塑性主应变分量, α 为岩体的剪胀扩容系数。

根据锚杆锚固端在巷道围岩中的位置, 锚杆支护分为锚固端在破碎区、锚固端在应变软化区、锚固端在弹性区 3 种情况进行分析。

2 锚杆支护巷道围岩应力分布

2.1 巷道围岩体径向应力分布

锚杆支护巷道的围岩径向应力值 σ_r 在锚固端 R_m 位置有一个跳跃, 锚固区内、外差值为 $F = q R_0 / R_m$ 。这是在 $r = R_m$ 位置处, 锚杆工作阻力对锚固端岩体作用的应力边界条件决定的, 即在锚固端环向围岩圈上, 锚杆施加的工作阻力支护强度为 $F = q R_0 / R_m$, 力的方向指向巷空。

2.2 巷道围岩体切向应力分布

当锚固端在破碎区内、应变软化区时, $r = R_m$ 位置处, 锚固区内、外岩体的切向应力差值表达式相

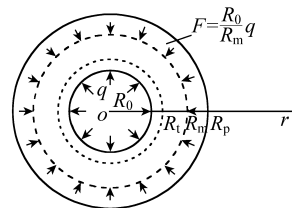


图 1 力学计算模型

Fig. 1 Mechanics calculation model

同, 为 $\frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} \frac{R_0}{R_m} q$. 当锚杆锚固端在弹性区时, $r = R_m$ 位置处, 锚固区内、外的岩体切向应力差值为 $\frac{\nu}{1-\nu} \frac{R_0}{R_m}$, 其中, p , ν , R_p 分别为岩体的波松比、巷道围岩塑性区半径.

岩体 $r = R_m$ 位置处切向应力 σ_θ 跳跃值, 当锚杆锚固端在围岩塑性区时显著, 为 σ_r 跳跃值的 2~3 倍, 这主要由围岩体极限平衡条件中的 φ 值决定; 当锚杆锚固端在围岩弹性区时减小, 它主要由岩体的泊松比 ν 确定. 锚杆巷道围岩径向、切向应力分布如图 2 所示, 对于支架支护的巷道, 其围岩应力分布曲线是平滑、连续变化的.

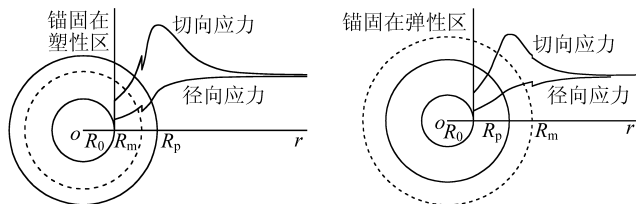


图 2 巷道围岩应力与围岩位置的关系

Fig. 2 Relationship between stress and place of roadway surrounding rock

3 巷道锚杆支护与支架支护的对比

3.1 巷道围岩塑性区半径对比

支架支护巷道塑性区半径为

$$R_p = R_0 [q + C^* \cot \varphi]^{-\frac{1-\sin \varphi}{2 \sin \varphi}} Y, \quad (1)$$

$$\text{式中, } Y = \left\{ -\frac{E(C - C^*)(\alpha + 1) + 2M_c(1 + \nu)(p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi)}{E[1 + \alpha + \sin \varphi(1 - \alpha)]} (\cot \varphi - \cos \varphi) \times \right. \\ \left[\frac{E(C - C^*)(\alpha + 1) + 2M_c(1 + \nu)(p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi)}{2M_c(1 + \nu)(p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi)} \right]^{\frac{1}{\alpha+1} \frac{2 \sin \varphi}{1-\sin \varphi}} + p_0(1 - \sin \varphi) + \\ \left. C(\cot \varphi - \cos \varphi) + \frac{2M_c(1 + \nu)(p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi)}{E[1 + \alpha + \sin \varphi(1 - \alpha)]} (\cot \varphi - \cos \varphi) \right\}^{\frac{1-\sin \varphi}{2 \sin \varphi}}.$$

锚杆锚固端在破碎区、应变软化区时的巷道围岩塑性区半径 R_p 表达式相同, 即

$$R_p = R_0 \left[q + C^* \cot \varphi - \frac{R_0}{R_m} q \left(\frac{R_0}{R_m} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1-\sin \varphi}} \right]^{-\frac{1-\sin \varphi}{2 \sin \varphi}} Y.$$

通过计算锚杆支护与支架支护的巷道围岩塑性区半径之比可知, 锚杆支护巷道围岩塑性区大于相同支护工作阻力强度条件下的支架巷道围岩塑性区. 锚杆锚固端在弹性区时, 巷道围岩塑性区半径的表达式为

$$R_p = R_0 (q + C^* \cot \varphi)^{-\frac{1-\sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \left\{ - \left[E(C - C^*)(\alpha + 1) + M_c(1 + \nu) \left(\frac{\sin \varphi}{1 - \nu} \frac{R_0}{R_m} q + 2p_0 \sin \varphi + 2C \cos \varphi \right) \right] (\cot \varphi - \cos \varphi) / \{ E[1 + \alpha + \sin \varphi(1 - \alpha)] \} \right\} \left\{ \left[E(C - C^*)(\alpha + 1) + \right. \right. \\ \left. \left. M_c(1 + \nu) \left(\frac{\sin \varphi}{1 - \nu} \frac{R_0}{R_m} q + 2p_0 \sin \varphi + 2C \cos \varphi \right) \right] / \left[M_c(1 + \nu) \left(\frac{\sin \varphi}{1 - \nu} \frac{R_0}{R_m} q + 2p_0 \sin \varphi + 2C \cos \varphi \right) \right]^{\frac{1}{\alpha+1} \frac{2 \sin \varphi}{1-\sin \varphi}} + p_0(1 - \sin \varphi) + C(\cot \varphi - \cos \varphi) + \frac{1 - \sin \varphi}{2(1 - \nu)} \frac{R_0}{R_m} q + \right. \\ \left. \left. \frac{M_c(\cot \varphi - \cos \varphi)(1 + \nu)}{E[1 + \alpha + \sin \varphi(1 - \alpha)]} \left(\frac{\sin \varphi}{1 - \nu} \frac{R_0}{R_m} q + 2p_0 \sin \varphi + 2C \cos \varphi \right) \right\}^{\frac{1-\sin \varphi}{2 \sin \varphi}}. \quad (2)$$

由锚杆支护锚固端在弹性区时的巷道围岩塑性区半径表达式, 可得塑性区半径 R_p 随锚杆锚固端位置

半径 R_m 的变化关系曲线如图 3 所示. 和支架支护巷道的塑性区半径表达式 (1) 进行对比, 由式 (2) 可知, 当锚固区半径 $R_m \rightarrow \infty$ 时, 锚杆巷道塑性区半径等于同等支护阻力条件下支架支护巷道的塑性区半径. 在锚杆锚固端位于弹性区的巷道塑性区变化曲线上, 随锚杆长度增加围岩塑性区半径减小; 但幅度变缓并趋于一恒定值, 该恒定值即为支架支护巷道的塑性区半径. 因此, 锚固端在弹性区时的锚杆支护巷道仍大于支架巷道的围岩塑性区半径.

3.2 巷道周边围岩位移对比

支架支护巷道时, 周边位移

$$u_0 = \frac{2(1+\nu)}{E(\alpha+1)}(p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi) \frac{R_p^{\alpha+1}}{R_0^\alpha} + \frac{(1+\nu)(\alpha-1)}{E(\alpha+1)}(p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi) R_0.$$

锚杆锚固端在破碎区、应变软化区的巷道周边位移表达式和支架支护巷道相同. 由于锚杆巷道塑性区半径大于支架支护巷道, 其巷道周边位移量大于支架支护巷道. 锚杆锚固端在弹性区时, 巷道周边位移量为

$$u_0 = \frac{1+\nu}{E(\alpha+1)} \left(\frac{\sin \varphi}{1-\nu} \frac{R_0}{R_m} q + 2p_0 \sin \varphi + 2C \cos \varphi \right) \frac{R_p^{\alpha+1}}{R_0^\alpha} + \frac{1+\nu}{E(\alpha+1)} \times \left[\frac{(1-2\nu)(\alpha+1) + \sin \varphi(\alpha-1)}{2(1-\nu)} \frac{R_0}{R_m} q + (p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi)(\alpha-1) \right] R_0.$$

对比支架支护巷道周边位移表达式, 锚杆锚固端在弹性区的巷道周边位移表达式中增加了 $\frac{\sin \varphi}{1-\nu} \frac{R_0}{R_m} q$, $\frac{(1-2\nu)(\alpha+1) + \sin \varphi(\alpha-1)}{2(1-\nu)} \frac{R_0}{R_m} q$ 两项, 且锚杆巷道塑性区半径大于支架巷道, 因此其巷道周边位移也大于支架支护巷道.

比较支架支护巷道与锚杆巷道锚固区半径足够大时的塑性区半径、巷道周边位移 (包括围岩应力分布) 可知, 理论上, 支架支护是同等支护阻力强度的巷道锚杆支护、锚杆长度足够大时的一个特例.

同等支护工作阻力强度条件下, 支架支护巷道的围岩塑性区半径、位移小于锚杆支护巷道的围岩塑性区半径及位移. 这是由于锚杆支护对围岩提供的是一组夹紧力, 不直接作用于围岩体在径向上的平衡, 而是间接地提高围岩体切向应力来实现开巷后围岩体的应力平衡状态. 支架支护工作阻力为一直接阻止围岩位移的平衡力; 同时径向应力增加, 切向应力也升高, 径向支护工作阻力和升高的切向应力共同阻止围岩体破坏与巷道位移的发展^[5]. 这里理论计算中的支架与锚杆工作阻力强度为支护对围岩已产生的实际最大阻力强度.

理论上, 在同等实际支护工作阻力强度下, 支架支护优于锚杆支护. 以前, 在支架工作状态中, 忽视了背帮接顶, 和围岩接贴不紧密, 支架工作阻力没有得到充分发挥, 控制围岩位移及塑性区的效果稍差. 近几年已认识到这个问题, 通过架后充填给予了很好的解决, 但锚杆支护成本低, 施工方便, 工人的劳动强度小, 且具有预紧力、随围岩变形能力强的优点, 因此锚杆支护在一定条件下, 得到了较广泛的应用.

4 围岩塑性区半径、位移与锚杆长度的关系

由锚杆夹紧力支护作用的弹塑性力学计算结果得出巷道周边位移、围岩应变软化区半径 R_p 及破碎区半径 R_l 与锚固区半径 R_m 的关系, 即 u_0 , R_p , R_l 随 R_m 增加开始阶段显著减小, 基本呈双曲线函数关系; 一定阶段后, 基本无变化, 呈近水平直线变化 (图 4).

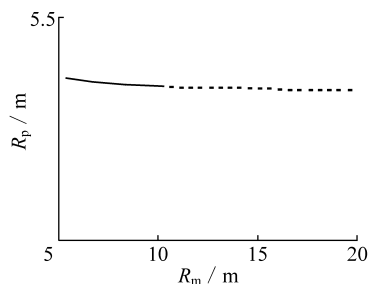
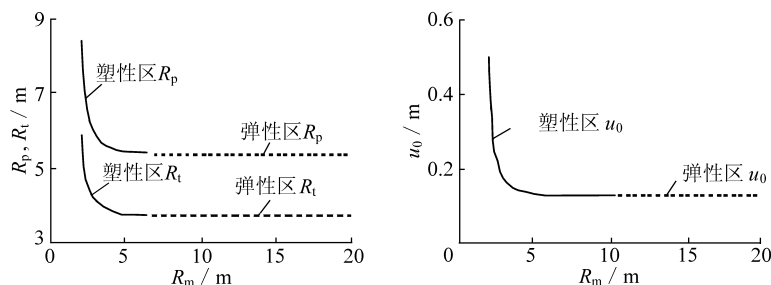


图 3 锚杆锚固端在弹性区时 R_p 与锚固区半径 R_m 的关系

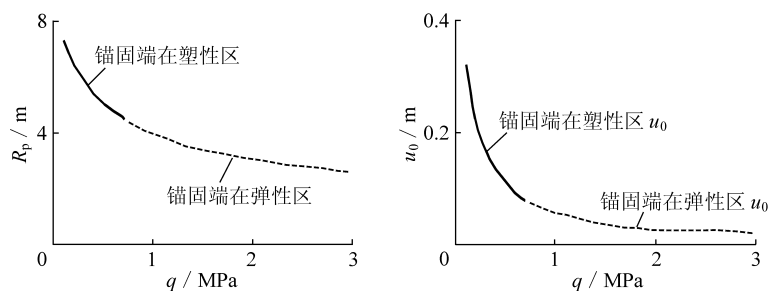
Fig. 3 Relationship between R_p and R_m for bolt support anchored in elastic district

图4 锚固端在塑性区与弹性区时 R_p , R_t , u_0 与 R_m 的关系Fig. 4 Relationship between R_p , R_t , u_0 and R_m for bolt support anchored in plastic and elastic district

在给定的支护强度下, 锚杆长度是影响巷道位移及围岩应变软化区、破碎区范围的重要因素, 围岩塑性区大小可变. 锚杆长度、支护强度在一定程度上可改变影响围岩的松动范围, 采取及时有效的主动支护, 巷道塑性区宽度可以调节和控制. 根据锚杆锚固区半径 R_m 与 u_0 , R_p , R_t 在一定范围内变化显著的关系, 合理、经济地选择锚杆长度, 可以有效地控制围岩应变软化区和破碎区范围, 减小巷道的位移量.

5 围岩塑性区半径、位移与锚杆支护强度的关系

围岩塑性区半径 R_p 、巷道周边位移 u_0 与锚杆支护强度关系如图5所示. 锚杆长度一定时, 支护强度增加对围岩塑性区半径、巷道位移的影响随工作阻力值的提高逐渐减弱. 锚杆工作阻力强度较低时, 巷道塑性区较大, 固定长度的锚杆锚固端位于塑性区; 围岩塑性区半径、巷道周边位移与支护工作阻力强度关系受锚固端位于应变软化区、破碎区的关系方程控制, 随 q 值增加变化明显, 曲线段斜率绝对值较大.

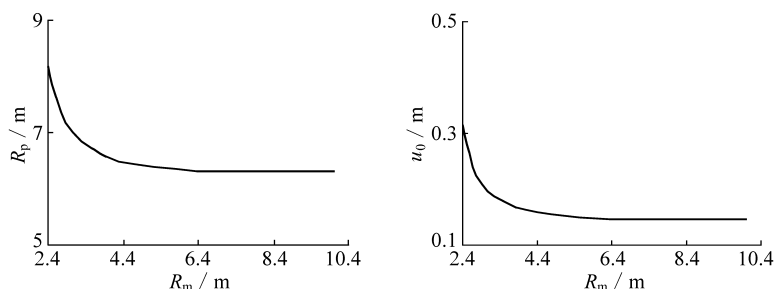
图5 R_p , u_0 与 q 的关系Fig. 5 Relationship between R_p , u_0 and q

锚杆工作阻力强度较高时, 巷道塑性区较小, 固定长度的锚杆锚固端位于弹性区; 围岩塑性区半径、巷道周边位移与支护工作阻力强度关系由锚固端位于弹性区的关系方程决定, 随 q 值增加巷道围岩支护效果变化幅度减小, 曲线段斜率绝对值较小.

6 程村矿井下锚杆一次支护设计

根据锚杆夹紧力支护作用弹塑性力学计算的解析解, 在程村矿井下进行了二次支护巷道一次锚杆支护的设计应用. 巷道围岩岩性泥岩, 原岩应力及岩体的有关参数: $p_0 = 13$ MPa, $C = 1.2$ MPa, $C^* = 0.25$ MPa, $M_c = 160$ MPa, $\varphi = 30^\circ$, $\nu = 0.3$, $E = 2\,000$ MPa, $\alpha = 2.0$. 拱形巷道, 按圆形计算, 巷道半径 $R_0 = 2.4$ m. 锚杆采用 $\phi 22$ mm左旋螺纹钢, 最大工作阻力 216 kN, 实际工作阻力 170 kN; 锚杆间排距 $700\text{ mm} \times 800\text{ mm}$, 支护强度 $q = 0.304$ MPa.

由该条件下计算得到的 $R_p - R_m$, $U_0 - R_m$ 关系曲线(图6)可知, 锚固区半径 $R_m = 4.9$ m; 一次支护设计参数选定锚杆长度为 2.6 m 时, 锚杆支护对围岩塑性区半径的控制较好, 同时巷道位移较小. 配合第2次圆形工字钢封闭支架支护, 试验巷道已施工 1 a, 围岩位移量控制在 150 mm 内, 巷道使用效果良好.

图 6 程村矿试验巷道 R_p , u_0 与 R_m 的关系Fig. 6 Relationship between R_p , u_0 and R_m for the testing roadway in Chengcun Mine

7 结 论

(1) 在锚杆两端对锚固区围岩体施加两组夹紧力, 考虑锚杆支护对巷道围岩应力状态改变的影响, 用描述锚固围岩体力学性质的黏结力和内摩擦角不改变的力学模型, 分析巷道锚杆支护的特性是可行的。

(2) 锚杆巷道围岩径向、切向应力在 $r = R_m$ 位置有一个跳跃, 其中 σ_r 的跳跃值为 $F = qR_m/R_0$ 。当锚杆锚固端在围岩塑性区时显著, σ_θ 跳跃值为 σ_r 跳跃值的 2~3 倍, 这主要由围岩体极限平衡条件中的 φ 值决定; 当锚杆锚固端在围岩弹性区时减小, 它由岩体的泊松比确定。

(3) 锚杆支护巷道周边位移 u_0 、围岩应变软化区半径 R_p 及破碎区半径 R_l 随 R_m 增加开始阶段显著减小, 基本呈双曲线函数关系; 一定阶段后, 变化趋缓, 呈近水平直线变化。

(4) 锚杆长度一定时, 支护强度 q 对围岩塑性区半径、巷道位移的影响随 q 值的提高逐渐减弱。锚杆工作阻力强度较低时, 围岩塑性区半径、巷道周边位移随支护工作阻力强度 q 值增加变化明显。锚杆工作阻力强度较高时, 随 q 值增加巷道围岩支护效果变化幅度减小。

参考文献:

- [1] 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. Bolt support of coal roadway [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1999.
- [2] 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. Study of strengthening mechanism in surrounding rock strength for roadway bolt support [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (3): 342~345.
- [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. Study of improvement on surrounding rock strength and stability for roadway bolt support [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1998.
- [4] 李大伟. 深井、软岩巷道二次支护围岩稳定原理与控制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
Li Dawei. Study on principle and control of surrounding rock stability of the two times supports for deep mine and soft rock roadway [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.
- [5] 李大伟, 侯朝炯. 锚杆支护对围岩稳定作用的弹塑性力学计算与应用 [J]. 西安科技大学学报, 2006, 26 (1): 20~23.
Li Dawei, Hou Chaojiong. Calculating and analysing the action of bolt support on surrounding rock stability in elastic and plastic mechanics [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26 (1): 20~23.
- [6] 李大伟, 侯朝炯. 低强度软岩巷道大变形围岩稳定控制试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2006, 34 (3): 36~39.
Li Dawei, Hou Chaojiong. Experiment and study on controlling surrounding rock stability of weak rock roadway with large deformation and low strength [J]. Coal Science and Technology, 2006, 34 (3): 36~39.