

锚杆尾部断裂机制和防破断方法应用

李夕兵, 马少维, 马春德, 李金跃, 郭 阳

中南大学资源与安全工程学院; 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 长沙 410083

摘要 基于岩体弹性能释放对锚杆的冲击作用, 采用冲击动力学中刚性块对杆轴向碰撞的应力解, 推导出了锚杆断裂的 4 种围岩应力条件。在此基础上分析了岩石弹性模量、锚杆弹性模量、锚杆直径与岩石泊松比等因素对锚杆断裂的影响。分析结果显示: 在这 4 种围岩应力条件中, 杆头被一次冲断基本上是不可能的, 由于其他几种锚杆断裂时的围岩应力条件很接近, 所以在实际中锚杆尾部被一次冲断的可能性最高, 这也印证了锚杆尾部容易断裂的观点; 另外, 锚杆断裂的围岩应力条件受岩石弹性模量、岩石泊松比、岩石密度、锚杆弹性模量、锚杆密度、锚杆直径等因素的影响, 其中影响较大的是岩石弹性模量与锚杆弹性模量的比值、锚杆直径和岩石泊松比; 锚杆尾部断裂的围岩应力条件对于改进锚杆形式、优化锚杆力学性质有理论指导意义。最后, 以马路坪矿的巷道工程为例, 说明了锚杆防破断方法的具体应用, 收到了良好的效果, 可以在实际工程中推广应用。

关键词 冲击动力学; 应力条件; 锚杆尾部; 断裂; 影响因素; 防破断方法

中图分类号 TD353

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.08.002

Fracture Mechanism of the Bolt Tail and Applications of Anti-breaking Methods

LI Xibing, MA Shaowei, MA Chunde, LI Jinyue, GUO Yang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University; Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha 410083, China

Abstract Based on the bolt impacted by the elastic energy of rock mass and the stress solution that a rigid block collides with rod along axially in impact dynamics is adopted; four stress conditions of rock mass are derived before the bolt is fractured. And on the basis, several factors, including elastic modulus of rock, elastic modulus of bolt, diameter of bolt, and Poisson's ratio of rock, are discussed. The analytical results show as follows: In four stress conditions of rock mass, it is impossible that bolt head is directly fractured, but the rest parts have high possibility. In addition, the rest bolts have the similar stress conditions of rock mass, therefore it has a high possibility that the bolt tail is directly fractured, it also confirms with the view that bolt tail is easily broken; Besides, before the bolt is fractured, the stress condition of rock mass is affected by several factors, including elastic modulus of rock, Poisson's ratio of rock, density of rock, elastic modulus of bolt, density of bolt, and diameter of bolt, among them elastic modulus of rock, elastic modulus of bolt, diameter of bolt, and Poisson's ratio of rock exert the greatest impact; the stress condition of rock mass before the bolt is fractured has the theoretical significance for improving the anchor form and optimizing mechanical properties of bolt. Finally, a tunnel engineering in the mine of Ma Luping is given to explain how to use the anti-breaking methods for bolt in practice and the ideal results are obtained; therefore these methods are able to be applied to the actual engineering.

Keywords impact dynamics; stress condition; bolt tail; fracture; influential factor; anti-breaking method

0 引言

锚杆支护以其经济、简便和可靠等优点在岩体工程中被广泛应用, 锚杆对岩体的良好加固效果也为广大岩土工作者所熟知^[1]。但是锚杆尾部断裂问题已成为影响锚杆支护推广与发展的关键问题, 为此国内外许多专家学者对锚杆尾部断裂问题进行了试验与理论分析。Ernesto Villalba 和 Andrej

Atrens^[2,3]以及 Erwin Gamboa^[4,5]认为冶金中氢脆造成锚杆内部应力集中, 超过钢的强度极限, 在钢内部形成细小的裂纹, 造成应力腐蚀裂痕, 最终导致锚杆的断裂; Suresh Divi^[6]认为潜在于岩石中的裂隙渗漏水以及高温对锚杆的破裂作用很大, 提出了对锚杆进行热处理来减缓其腐蚀速率的防破裂方法; 孔恒、王梦恕等^[7]通过对偏心荷载作用下锚杆的受力分析, 给

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-01-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732004); 国家自然科学基金项目(50934006)

作者简介: 李夕兵(中国科协所属全国学会个人会员登记号: S032200319M), 教授, 研究方向为岩石破裂与岩石动力学, 电子邮箱: xbli@mail.csu.edu.cn

出了锚尾的破断机制条件,在此基础上马念杰等^[8-10]对锚杆防破断方法进行了大量研究;程蓬和鞠文君^[11]根据断裂力学理论,建立了锚杆尾部螺纹受力模型,分析了锚杆尾部螺纹断裂的形式和原因;李伟等^[12]综合多因素分析了锚杆尾部断裂机制,并提出针对性防破断方案。

本文基于岩体弹性能释放对锚杆的冲击作用,采用动力学中刚性块对杆轴向碰撞应力解,推导出锚杆断裂的4种围岩应力条件,得出锚杆尾部容易断裂的结论。在此基础上分析了岩石弹性模量、锚杆弹性模量、锚杆直径与岩石泊松比等因素对锚杆尾部断裂的围岩应力条件的影响,为改进锚杆形式、优化锚杆力学性质、防止锚杆尾部断裂提供理论依据。

1 锚杆断裂的围岩应力条件推导

1.1 岩块飞出时围岩的应力状态

岩爆发生的动力学机制^[13,14]为处于弹性阶段的岩石内部储存了大量的弹性能,足以使其本身发生破坏,在此状态下,经受一定的动态冲击载荷作用,试样内部的裂纹被激活并迅速扩展,弹性能突然释放出来形成岩爆。在矿山中,静荷载一般指岩体稳定平衡时的受力情况,动荷载主要指爆破对岩体的动态扰动。

根据广义胡克定律^[15],复杂应力状态下弹性变形比能为

$$u = \frac{1}{2E_1} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)] \quad (1)$$

其中, σ_1 为 x 方向主应力, Pa; σ_2 为 y 方向主应力, Pa; σ_3 为 z 方向主应力, 垂直于岩壁, Pa; E_1 为岩体的弹性模量, Pa; μ 为岩体泊松比。

由于巷道开挖后 σ_3 应力释放, 所以 $\sigma_3=0$, 即围岩双轴受压状态如图 1 所示。由此可得岩体弹性变形比能为

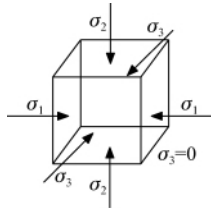


图 1 巷道围岩受力状况

Fig. 1 Force status of tunnel surrounding rock

$$u = \frac{1}{2E_1} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2) \quad (2)$$

弹性变形比能是指物体在外力作用下处于弹性状态下, 在单位体积内储存的变形能, 所以质量为 m 体积为 ΔV 的岩块储存的能量为

$$E_s = \frac{\Delta V}{2E_1} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2) \quad (3)$$

假设岩块以 v 的速度飞出, 并且岩体的弹性能完全转化为岩块的动能, 那么

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{\Delta V}{2E_1} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2) \quad (4)$$

经整理, 可得

$$v = \sqrt{\frac{1}{\rho_1 E_1} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2)} \quad (5)$$

其中 ρ_1 为岩石密度, kg/m^3 。

1.2 岩块冲断锚杆的分析

锚杆受到岩块的冲击荷载问题^[16]类似于动力学中刚性块对杆轴向碰撞问题。

假设有质量为 M_1 、密度为 ρ_1 以及弹性模量为 E_1 的岩体以速度 v 共轴碰撞在另一端锚固的质量为 M_2 、截面积是 A_2 、长度是 l 、密度是 ρ_2 以及弹性模量是 E_2 的均质锚杆的锚固托盘上, 锚杆的声速是 C_0 。共轴撞后锚杆中的弹性拉伸波从撞击面向右按指数规律衰减传播。在撞击界面处, 岩体与锚杆的质点速度相同, 作用力相等 (作用力与反作用力互等条件)。岩块冲击锚杆的示意图见图 2。

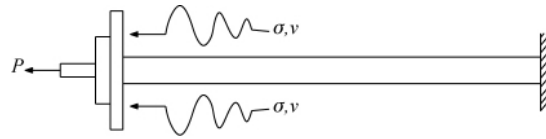


图 2 岩块冲击锚杆示意图

Fig. 2 Schema of rock shocking bolt

碰撞后由于岩体非刚性体, 岩体短时间的塑形变形吸收一定能量。将速度 v 减小到 v_0 , 其关系为

$$v_0 = \eta v \quad (6)$$

其中 η 为速度衰减系数。

由冲击动力学中刚性块对杆轴向碰撞的应力解可得

$$\sigma = v_0 \exp\left(-\frac{A_2}{M_1} \sqrt{E_2 \rho_2} t\right) \sqrt{E_2 \rho_2} \quad (7)$$

当 $t=0$ 时, 托盘处锚杆所受的拉力为

$$\sigma_t = v_0 \sqrt{E_2 \rho_2} \quad (8)$$

当 $t=l/C$ 时, 锚杆尾部指数拉伸波波震面发生反射叠加, 所受的拉力为

$$\sigma_w = 2v_0 \sqrt{E_2 \rho_2} \quad (9)$$

当 $t=2l/C$ 时, 原有指数拉伸波为

$$\sigma' = \sigma_0 \exp(-2M_2/M_1) \quad (10)$$

叠加锚杆尾部传来的拉伸波, 托盘处锚杆所受的拉力为

$$\sigma'_t = v_0 \sqrt{E_2 \rho_2} [2 + \exp(-2M_2/M_1)] \quad (11)$$

进一步反射叠加可得, 当 $t=3l/C$ 时, 锚杆尾部的应力为

$$\sigma'_w = 2v_0 \sqrt{E_2 \rho_2} [1 + \exp(-2M_2/M_1)] \quad (12)$$

当 $t>3l/C$ 时, 由于来自锚杆尾部的反射波连续到达, 使得杆头的阻力增加, 杆头和尾部的应力趋于一定并最后消失, 所以当 $t=3l/C$ 以后, 锚杆的应力状态暂不考虑。锚杆杆头与尾部的应力随时间的关系见图 3。

假设锚杆的抗拉强度为 F , 锚杆的锚固力为 P , 则锚杆杆头被第一次应力波冲断的最小冲击速度为

$$v_0 = (FA_2 - P) / (A_2 \sqrt{E_2 \rho_2}) \quad (13)$$

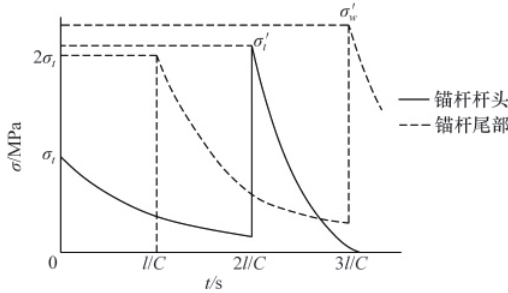


图3 锚杆杆头与尾部的应力与时间的关系
Fig. 3 Relationship between stress of both bolt head with tail and time

锚杆尾部被第一次拉伸应力波冲断的最小冲击速度为

$$v_0 = (FA_2 - P) / (2A_2 \sqrt{E_2 \rho_2}) \quad (14)$$

锚杆杆头被第二次拉伸应力波冲断的最小冲击速度为

$$v_0 = \frac{FA_2 - P}{A_2 \sqrt{E_2 \rho_2} [2 + \exp(-2M_2/M_1)]} \quad (15)$$

锚杆尾部被第二次拉伸应力波冲断的最小冲击速度为

$$v_0 = \frac{FA_2 - P}{2A_2 \sqrt{E_2 \rho_2} [1 + \exp(-2M_2/M_1)]} \quad (16)$$

1.3 锚杆断裂的围岩应力条件

将式(5),式(6),式(13)联立可得锚杆杆头被第一次拉伸应力波冲断的围岩应力条件为

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2 = \frac{(FA_2 - P)^2}{\eta^2 A_2^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2} \quad (17)$$

将式(5),式(6),式(14)联立可得锚杆尾部被第一次拉伸应力波冲断的围岩应力条件为

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2 = \frac{(FA_2 - P)^2}{4\eta^2 A_2^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2} \quad (18)$$

将式(5),式(6),式(15)联立可得锚杆杆头被第二次拉伸应力波冲断的围岩应力条件为

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2 = \frac{(FA_2 - P)^2}{\eta^2 A_2^2 [2 + \exp(-2M_2/M_1)]^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2} \quad (19)$$

将式(5),式(6),式(16)联立可得锚杆尾部被第二次拉伸应力波冲断的围岩应力条件为

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_2 = \frac{(FA_2 - P)^2}{4\eta^2 A_2^2 [1 + \exp(-2M_2/M_1)]^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2} \quad (20)$$

2 算例分析

在开挖洞室安装端锚式锚杆,岩石弹性模量 $E_1=5 \times 10^4$ MPa,岩石泊松比 $\mu=0.25$,岩石密度 $\rho_1=2800$ kg/m³;锚杆抗拉强度 $F=660$ MPa,锚杆锚固力 $P=117.8$ kN,锚杆弹性模量 $E_2=2.1 \times 10^5$ MPa,锚杆密度 $\rho_2=7850$ kg/m³,锚杆直径 $\phi=25$ mm;速度衰减系数 $\eta=0.7$,冲出岩体质量 $M_1=12$ kg,锚杆质量 $M_2=12$ kg。由此可得出围岩应力条件 $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 0.5\sigma_1\sigma_2$,计算结果详见表1。

根据所求锚杆冲断的围岩应力条件,绘制出围岩应力 σ_1

表1 锚杆断裂情况与围岩应力的关系

Table 1 Relationship between bolt breakage and the stress status of rock mass

计算项目	锚杆杆头被第一次拉伸应力波冲断	锚杆尾部被第一次拉伸应力波冲断	锚杆杆头被第二次拉伸应力波冲断	锚杆尾部被第二次拉伸应力波冲断
岩块最小冲击速度	$\frac{FA_2 - P}{A_2 \sqrt{E_2 \rho_2}}$	$\frac{FA_2 - P}{2A_2 \sqrt{E_2 \rho_2}}$	$\frac{FA_2 - P}{A_2 \sqrt{E_2 \rho_2} [2 + \exp(-2M_2/M_1)]}$	$\frac{FA_2 - P}{2A_2 \sqrt{E_2 \rho_2} [1 + \exp(-2M_2/M_1)]}$
围岩的应力条件	$\frac{(FA_2 - P)^2}{\eta^2 A_2^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2}$	$\frac{(FA_2 - P)^2}{4\eta^2 A_2^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2}$	$\frac{(FA_2 - P)^2}{\eta^2 A_2^2 [2 + \exp(-2M_2/M_1)]^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2}$	$\frac{(FA_2 - P)^2}{4\eta^2 A_2^2 [1 + \exp(-2M_2/M_1)]^2} \frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2}$
围岩的应力条件值/ 10^3 Pa ²	30585.2	7646.3	6709.9	5445.2

与 σ_2 的关系,如图4所示。当开挖扰动或爆破影响下发生应力集中,由图4可得以下结论。

(1) 当围岩应力 σ_1 与 σ_2 对应的应力条件在杆头一次冲断

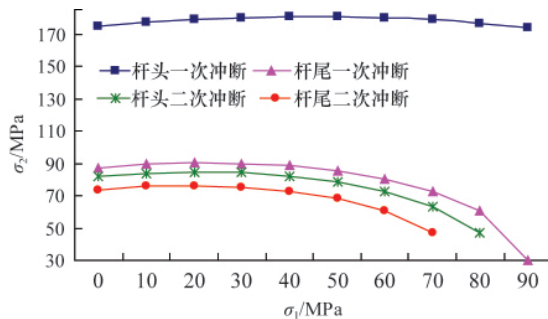


图4 锚杆断裂前围岩应力 σ_1 与 σ_2 的关系
Fig. 4 Relationship between σ_1 and σ_2 before a bolt is fractured

曲线之上(含曲线上)时,锚杆杆头被第一次拉伸应力波冲断。

(2) 当围岩应力 σ_1 与 σ_2 所对应的应力条件在杆头一次冲断曲线之下,锚杆尾部一次冲断曲线之上(含曲线上)时,锚杆尾部被第一次反射拉伸应力波冲断。

(3) 当围岩应力 σ_1 与 σ_2 所对应的应力条件在锚杆尾部一次冲断曲线之下,杆头二次冲断曲线之上(含曲线上)时,托盘处锚杆被第二次拉伸应力波冲断。

(4) 当围岩应力 σ_1 与 σ_2 所对应的应力条件在杆头二次冲断曲线之下,锚杆尾部二次冲断曲线之上(含曲线上)时,托盘处锚杆被第二次反射拉伸应力波冲断。

(5) 当围岩应力 σ_1 与 σ_2 所对应的应力条件在锚杆尾部二次冲断曲线之下时,锚杆不发生断裂。

(6) 由图4很容易看出,杆头被一次冲断基本上是不可能的,而其他几种被冲断的可能性很高,又因为其他几种被冲断的围岩应力条件很接近,所以锚杆尾部被一次冲断的可

性能最高,这也印证了锚杆尾部容易断裂的观点。

对于发生强烈岩爆的区域,各数据可以取如下数值: $\sigma_1=85\text{MPa}$, $\sigma_2=60\text{MPa}$, $E_1=50\text{GPa}$, $\rho_1=2800\text{kg/m}^3$, $\mu=0.25$,经动荷载扰动很容易发生岩爆。由此求得, $\sigma_1^2+\sigma_2^2-0.5\sigma_1\sigma_2=8275\times 10^{12}\text{Pa}^2$ 。由于其应力条件在杆头一次冲断曲线之下,锚杆尾部一次冲断曲线之上(含曲线上)时,锚杆尾部被第一次反射拉伸应力波冲断。

3 影响因素分析

因为锚杆尾部被第一次反射拉伸应力波冲断的可能性最高,并且4种断裂状态的应力条件趋向相近,所以影响因素的分析以锚杆尾部一次断裂为例。

3.1 锚杆断裂的围岩应力条件与 E_1/E_2 的关系

图5是在前面假设条件下,采用不同 E_1/E_2 时对锚杆断裂的围岩应力条件的影响情况。从图5可以看出: E_1/E_2 值越小,即岩体越松软,岩体的弹性模量就越小,锚杆断裂的围岩应力条件也就越小,低应力通过大变形来弥补能量不足(这里指可达到岩爆的岩体弹性模量,即达到一定硬度的岩体);反之, E_1/E_2 越大,即岩体越坚硬,弹性模量越大,锚杆断裂的围岩应力条件就越大,小应变通过高应力来弥补能量不足。

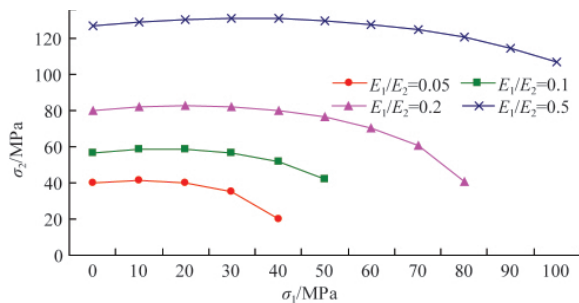


图5 锚杆断裂前围岩应力状态与 E_1/E_2 值的关系
Fig. 5 Relationship between the stress status of rock mass and E_1/E_2 value before a bolt is fractured

3.2 锚杆断裂的围岩应力条件与岩石泊松比 μ 的关系

图6是在前面假设条件下,采用不同岩石泊松比 μ 对锚杆断裂的围岩应力条件的影响情况。从图6可看出:当围岩是单轴压缩状态时($\sigma_1=0$ 或 $\sigma_2=0$),岩石泊松比 μ 对围岩应力条件不影响;当围岩是双轴压缩状态时($\sigma_1 \neq 0$ 且 $\sigma_2 \neq 0$),随岩

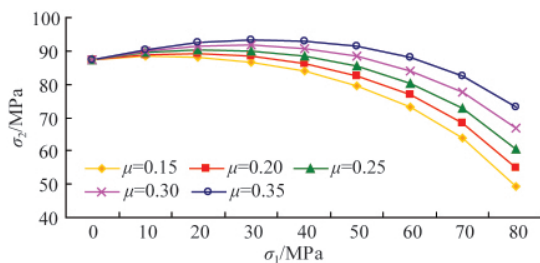


图6 锚杆断裂前围岩应力状态与岩石泊松比 μ 的关系
Fig. 6 Relationship between the stress of rock mass and Poisson's ratio of rock μ before a bolt is fractured

石泊松比 μ 的减小,锚杆断裂的围岩应力条件也随之减小。

3.3 锚杆断裂的围岩应力条件与锚杆直径 ϕ 的关系

图7是在前面假设条件下,不同锚杆直径 ϕ 对锚杆断裂的围岩应力条件的影响情况。常用锚杆的直径为18mm,20mm,22mm,25mm。从图7可以看出:锚杆直径越小,锚杆断裂的围岩应力条件越小,锚杆越容易被冲断。

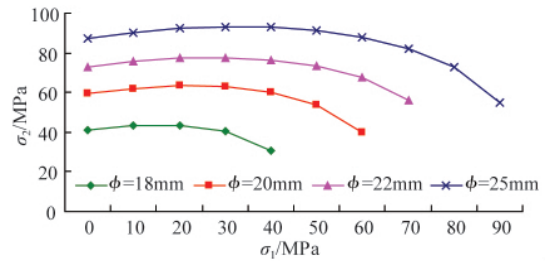


图7 锚杆断裂前围岩应力状态与锚杆直径 ϕ 的关系
Fig. 7 Relationship between the stress status of rock mass and diameter of bolt ϕ before the bolt is fractured

3.4 锚杆断裂的围岩应力条件与 M_1/M_2 的关系

图8是在前面假设条件下,不同 M_1/M_2 对锚杆尾部被第二次冲击波冲断的围岩应力条件的影响情况。此处取 M_1/M_2 为1,3,5,10这4种情况。从图8可以看出:当 $M_1/M_2 > 3$ 时, M_1/M_2 对锚杆断裂的围岩应力条件基本保持不变,由此可知, M_1/M_2 对锚杆断裂的围岩应力条件影响很小。

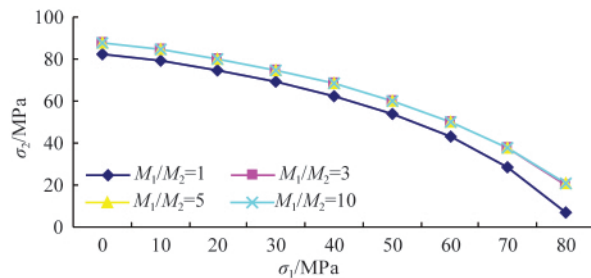


图8 锚杆断裂前围岩应力状态与 M_1/M_2 的关系
Fig. 8 Relationship between the stress status of rock mass and M_1/M_2 before a bolt is fractured

4 结论及工程指导意义

4.1 结论

(1) 本文基于岩体弹性能释放对锚杆的冲击作用,推导出了锚杆断裂的围岩4种应力条件:锚杆杆头被第一次拉伸应力波冲断的围岩应力条件、锚杆尾部被第一次拉伸应力波冲断的围岩应力条件、锚杆杆头被第二次拉伸应力波冲断的围岩应力条件、锚杆尾部被第二次拉伸应力波冲断的围岩应力条件。

(2) 锚杆断裂的4种围岩应力条件中,杆头被一次冲断基本上是不可能的,而其他几种被冲断的可能性很高,因为其他几种被冲断的围岩应力条件很接近,所以实际中锚杆尾部被一次冲断的可能性最高,这也印证了锚杆尾部容易断裂的观点。

(3) 锚杆断裂的围岩应力条件受岩石弹性模量、岩石泊松比、岩石密度、岩石冲击耗能系数、锚杆弹性模量、锚杆密

度、锚杆直径、锚杆锚固力和锚杆抗拉强度等因素的影响,其中影响较大的是岩石弹性模量与锚杆弹性模量的比值、锚杆直径、岩石泊松比。

4.2 工程指导意义

从所推导的锚杆尾部断裂的围岩应力条件可以看出,防止锚杆尾部断裂可以从3个角度考虑:(1)提高锚杆尾部的强度,包括锚杆尾部螺纹采用固态淬火亚稳相强化方法^[17]、加粗锚杆尾部^[10,18]等;(2)防止围岩应力集中,包括合理布置井巷工程、减少动载荷的扰动、应力集中时及时卸压等;(3)对锚杆进行改进来缓冲岩体的冲击荷载,包括锚杆杆体设计成波浪形^[19]、锚杆托盘采用缓冲装置、采用压力分散型锚杆^[20]、采用预应力锚杆等。

4.3 工程应用

贵州开磷集团的马路坪矿,目前相对采深在450~600m,部分地区由于地应力的重分布,造成预应力集中,如图9,巷道围岩应力集中造成片帮以至锚杆断裂失效。

在此情况下,对防治应力集中与防止锚杆破断做了一些工作,主要包括喷洒水、钻应力释放孔,部分地区采用波浪式协调变形吸能锚杆(如图10)。到目前为止没有发现锚杆断裂情况,对防止锚杆破断,延长支护寿命具有重大意义。

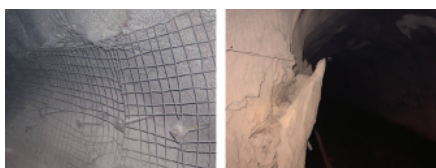


图9 马路坪矿700m中段北大巷锚杆尾部断裂失效
Fig. 9 Failure of bolt tail in the 700m roadway at the north side of Maluping



图10 波浪式吸能锚杆的吸能段
Fig. 10 Energy-absorbing segment of a waving energy-absorbing bolt

参考文献 (References)

- [1] 程良奎, 张作喟, 杨志银. 岩土加固技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994. Cheng Liangkui, Zhang Zuomei, Yang Zhiyin. Geotechnical reinforcement technique[M]. Beijing: Seismological Press, 1994.
- [2] Ernesto Villalba, Andrej Atrens. Metallurgical aspects of rock bolt stress corrosion cracking[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 491(1-2): 8-18.
- [3] Ernesto Villalba, Andrej Atrens. Hydrogen embrittlement and rock bolt stress corrosion cracking [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 164-175.
- [4] Erwin Gamboa, Andrej Atrens. Material influence on the stress corrosion cracking of rock bolts [J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(2): 201-235.

- [5] Erwin Gamboa, Andrej Atrens. Environmental influence on the stress corrosion cracking of rock bolts [J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(5): 521-558.
- [6] Suresh Divi, Dhanesh Chandra, Jaak Daemen. Corrosion susceptibility of potential rock bolts in aerated multi-ionic simulated concentrated water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 124-129.
- [7] 孔恒, 王梦恕, 马念杰, 等. 锚杆尾部的破断机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003(3): 383-386. Kong Heng, Wang Mengshu, Ma Nianjie, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(3): 383-386.
- [8] Li Yingming, Ma Nianjie, Yang Ke, et al. Research on FRP bolt-end failure mechanism[J]. Mining Science and Technology (China), 2009, 19(4): 522-525.
- [9] 马念杰, 刘少伟, 邓广涛, 等. 巷道锚杆尾部破断机理及合理结构的设计[J]. 煤炭学报, 2005(3): 327-331. Ma Nianjie, Liu Shaowei, Deng Guangtao, et al. Journal of China Coal Society, 2005(03): 327-331.
- [10] 石建军, 马念杰, 孔恒, 等. 金属粗尾锚杆的防破断机理研究[J]. 西部探矿工程, 2005(1): 131-132. Shi Jianjun, Ma Nianjie, Kong Heng, et al. West-China Exploration Engineering, 2005(1): 131-132.
- [11] 程蓬, 鞠文君. 高强度锚杆尾部螺纹断裂受力分析 [J]. 煤矿开采, 2011(2): 20-22. Cheng Peng, Ju Wenjun. Coal Mining Technology, 2011(2): 20-22.
- [12] 李伟, 张治高, 赵荣学. 巷道锚杆破断机理分析及其对策 [J]. 山东煤炭科技, 2010(4): 1-2. Li Wei, Zhang Zhigao, Zhao Rongxue. Shandong Coal Science and Technology, 2010(4): 1-2.
- [13] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春, 等. 静荷载理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机理的初步分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003(8): 1255-1262. Xu Zemin, Huang Runqiu, Luo Xingchun, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(8): 1255-1262.
- [14] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(6): 1179-1190. Gong Fengqiang, Li Xibing, Liu Xiling. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(6): 1179-1190.
- [15] 单辉祖. 材料力学教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. Shan Huiyu. Material mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997.
- [16] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992. Ma Xiaoqing. Impact dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992.
- [17] 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: 1-50. Hou Chaojiong, Guo Lisheng, Gou Panfeng. Coal entry bolt supporting [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999: 1-50.
- [18] 孔恒, 马念杰, 王梦恕, 等. 新型金属粗尾锚杆的防破断机理 [J]. 煤, 2002(2): 4-7. Kong Heng, Ma Nianjie, Wang Mengshu, et al. Coal, 2002(2): 4-7.
- [19] Charlie Chunlin Li. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 396-404.
- [20] 杨庆, 朱训国, 栾茂田, 等. 压力型锚索锚固段应力分布及影响参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(Z2): 4065-4070. Yang Qing, Zhu Xunguo, Luan Maotian, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Z2): 4065-4070.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)