

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.03.012

切缝药包控制爆破初始裂缝形成分析*

戴俊 吴丙权 孟振

西安科技大学建筑与土木工程学院(陕西西安,710054)

[摘要] 选用合适的应力强度因子,使之符合切缝药包控制爆破初始裂缝形成和裂缝扩展的过程。从分析切缝药包控制爆破裂缝形成机理入手,运用弹性及弹塑性理论对切缝药包爆破形成的裂缝及扩展进行力学分析,提出了适合于弹塑性条件下初始裂缝形成的应力强度因子。根据弹塑性理论得出的使岩石产生裂缝的应力强度因子经现场应用较为符合实际情况。

[关键词] 控制爆破 切缝药包 弹性 弹塑性 应力强度因子

[分类号] TD 235.37 TD 235.1+1

引言

目前,对于切缝药包控制爆破技术的研究,已取得不少成果,也为工程实践提供了理论依据。但在实际工程应用时,还会出现不少问题,使得爆破效果并不十分令人满意。岩石的破坏要经过线弹性和塑性变形两个阶段,但由于实际条件的复杂性,往往假设岩石处于线弹性状态下直接被破坏,这样建立的模型简单,有利于快速的计算和指导实践。但在施工现场发现,往往不能完全达到预期的效果。为此,依据弹塑性理论分析和探讨裂缝开裂的应力强度因子具有重要意义。

1 切缝药包控制爆破裂缝形成机理

切缝药包控制爆破是利用轴向切槽的硬质管^[1],先将炸药装在管中,再装进炮孔中爆炸,切槽处岩石较早地受到较大的爆炸荷载,导致在预定区域径向裂缝的扩展优先于其他区域^[2]。为使岩石达到一定的破碎程度和到达固定方位,切缝药包控制爆破利用其切口缝来控制炸药爆炸应力场的分布以及爆生气体对岩石的准静态作用^[3-4]。

切缝套管大多选用 ABS 工程塑料管^[5],根据炮孔直径和长度、装药量以及药卷直径来选定切缝套管的直径和长度。切缝药包爆炸时使得切缝垂直方向主要受压缩应力作用,而岩石本身的抗压强度较大,不会产生破坏。爆炸同时也在切缝方向产生切向拉伸应力,岩石的动抗拉强度远小于其抗压强度,所以在切缝方向的岩石主要受拉伸脉冲作用而被破坏^[6]。

切缝套管由塑料制成,具有一定的强度和重量,药包爆炸后产物作用在套管上,产生透射波和部分压缩波,透射波向四周空间衰减,最后作用在炮孔壁上。在爆炸过程中,一方面由于切缝套管的存在,限制了爆生气体的径向膨胀,使爆生气体在装药空间的停留时间延长;另一方面,由于在切缝方向无阻挡,爆生气体即向此集合,使这个区域内的岩石先受到爆生气体作用而产生定向断裂^[7]。切缝药包控制爆破装药结构如图 1 所示。图中的切缝宽度 B 是切缝药包定向断裂控制爆破最主要的影响因素之一。如果 B 太小,切缝管很容易被劈开成两半,定向方向的能量利用率不高;如果 B 过大,会形成反定向裂缝。

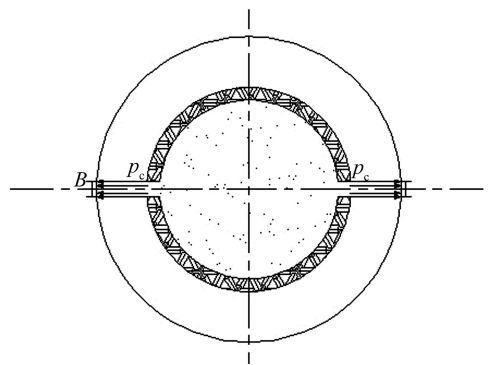


图 1 切缝药包控制爆破的装药结构

Fig. 1 Charge structure of cutting seam cartridge undergoing control blasting

根据岩石爆炸成缝机理,炸药在炮孔中爆炸后,强大的冲击波猛烈地压缩炮孔壁介质,使岩石向外

* 收稿日期: 2013-03-03

基金项目: 陕西省归国留学人员择优资助项目(2011-32)

作者简介: 戴俊(1964~),男,教授,博士,主要从事爆破理论与技术及岩土工程等研究工作。E-mail:65457868@qq.com

扩张产生环向拉应力和径向裂缝,此时纵波、横波已远离裂缝尖端,裂缝在爆生气体准静态应力场和裂缝内的气刃效应以及邻孔边界影响下,使炮孔连线方向裂缝尖端的环向拉应力大于其他方向的裂缝尖端应力,使连线方向裂缝得到优先发展,并导致其他方向的裂缝卸载。

当爆生气体提供的能量足以使裂缝尖端应力强度因子大于岩石的断裂韧度时,裂缝便在连线方向得到稳定的扩展,直到形成贯通的断裂面。如果裂缝扩展遇到岩石的原始结构面,视结构面的情况可能发生止裂、分叉或偏离炮孔连线方向的情况。这说明断裂韧度是衡量岩石阻止裂缝扩展的基本指标,构造裂缝是影响裂缝扩展的外部条件。

因此,选择断裂韧度作为衡量岩石断裂性是最合适的指标。

2 切缝药包爆破形成裂缝的扩展方向

岩石开裂后,在裂缝尖端附近的应力集中程度增强,断裂面的形成不再受制于由相邻炮孔引起的应力集中作用,并且在这个区域内的各种应力分量也只得到奇异解。

2.1 对裂缝扩展进行力学分析

当岩石产生断裂后,其内部应力分布发生变化,由简单的拉伸破坏转化为应力状态较为复杂的张开型脆性断裂破坏,应力强度因子 $K_I = 0$,以极坐标形式对裂缝尖端附近的应力场进行分析:

$$\sigma_r = \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}}(3 - \cos\theta) \cos \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}}(1 + \cos\theta) \cos \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

$$\tau_{r,\theta} = \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} \sin\theta \cos \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

式中: σ_r 为炮孔壁环向拉伸应力; σ_θ 为径向应力; $\tau_{r,\theta}$ 为剪切应力; K_I 为裂缝尖端处的应力强度因子,与 θ 无关; θ 为极角; r 为极半径。

裂缝尖端附近的应力状态如图 2 所示,用最大拉应力准则对裂缝扩展进行讨论,设开裂方向 $\theta = 0$ 。

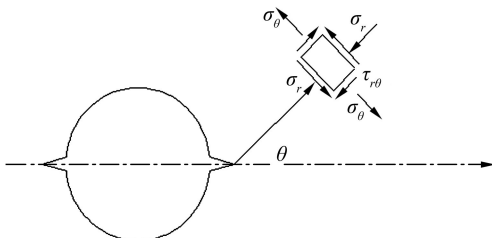


图 2 裂缝尖端附近应力状态

Fig. 2 Stress distribution at the vicinity of the crack's tip

最大拉应力准则的基本条件是:

- 1) 当环向拉应力取得极大值时裂缝发生并扩展;
- 2) 裂缝方向出现的拉应力达到岩石的拉伸强度时,裂缝便失稳扩展^[8]。

假设 θ 为裂缝开裂方向与扩展方向夹角 ($0 \leq \theta \leq \pi$), 则根据下式:

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

解得:

$$\theta = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)计算可知,裂缝的扩展方向与开裂方向一致。

2.2 裂缝的扩展条件

刚形成裂缝时,裂缝自身的扩展速度比气体楔入到裂缝内的速度快得多。因此,当气体还未楔入到裂缝时,炮孔壁上的压力已由裂缝产生之前的 p 衰减到 p_1 ,对裂缝扩展方向进行分析,裂缝会沿着裂缝尖端发生张开型断裂破坏,受力状态如图 3 所示。

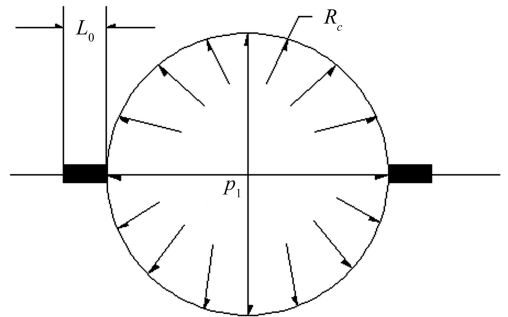


图 3 开裂后炮孔壁受力图

Fig. 3 Stress graph of borehole wall after cracking

设开裂长度为 L_0 ,此时裂缝尖端应力强度因子 K_I 表达式为:

$$K_I = F_1 \cdot p_1 \cdot \sqrt{\pi(R_c + L_0)} \quad (6)$$

式中: p_1 为产生裂缝以后炮孔内压力值; L_0 为爆炸后岩石裂缝长度; R_c 为炮孔半径; F_1 为与 R_c 和 L_0 相关的参数。

炮孔压力随时间的变化关系式:

$$p_1(t) = p \left(\frac{h_0}{c_0 t} \right)^3 \quad (7)$$

式中: $p_1(t)$ 为在 t 时刻炮孔压力, $t > \frac{h_0}{c_0}$; h_0 为炮孔深度; c_0 为爆炸声速。

由弹性理论可大致确定裂缝长度 L_0 ,根据拉梅解答得到岩石内的径向应力分量:

$$\sigma_r = \left(\frac{R_c}{R_c + L_0}\right)^2 \cdot p_1 \quad (8)$$

由式(6)和式(8)的下限值得到裂缝长度 L_0 时应满足的条件:

$$\frac{1-\mu}{\mu} \sigma_{t_d} < \left(\frac{R_c}{R_c + L_0}\right)^2 p_1 \quad (9)$$

式中: μ 为岩体的动态泊松比; σ_{t_d} 岩体的动态单轴抗拉强度。

将式(8)整理后,求得炮孔壁的裂缝长度为:

$$L_0 = R_c \left[\sqrt{\frac{\mu p_1}{(1-\mu) \sigma_{t_d}}} - 1 \right] \quad (10)$$

将式(10)和式(7)代入式(6)并经整理后得:

$$K_I = F_1 p \left(\frac{h_0}{c_0 t}\right)^3 \cdot (\pi R_c)^{1/2} \left[\sqrt{\frac{\mu p_1}{(1-\mu) \sigma_{t_d}}} - 1 \right]^{1/4} \quad (11)$$

式中符号意义同前。

根据脆性断裂理论,当岩石的动态平面应变断裂韧性小于裂缝尖端的应力强度因子时,裂缝便开始失稳扩展,岩石呈弹塑性破坏。由于塑性区域范围非常小,又可以简化称之为脆性断裂。并结合式(11)给出了裂缝的扩展条件:

$$F_1 p \left(\frac{h_0}{c_0 t}\right)^3 \cdot (\pi R_c)^{1/2} \left[\frac{\mu p_1}{(1-\mu) \sigma_{t_d}} \right]^{1/4} > K_c \quad (12)$$

式中: K_c 为岩体的动态平面应变断裂韧性; h_0 为炮孔深度; t 为应力波的传播时间; c_0 为炸药爆轰状态下的声速。

其它符号意义同前。

3 根据弹塑性理论,确定合适的应力强度因子

在 D-B 模型^[9]中,塑性区尺寸 r_p 是通过裂缝长为 $2c = 2(a + r_p)$ ($2c$ 为裂缝总长; $2a$ 为弹性区裂缝总长; $2r_p$ 为塑性区裂缝总长) 的新的裂缝尖端应力无奇异性的条件确定的。通常只考虑平面应力情况,所以在塑性区内, $\sigma_y = \sigma_0$, 将塑性区切开,代以屈服应力 σ_0 , 于是,整个裂缝问题可以看作裂缝长为 $2c = 2(a + r_p)$, 在无穷远处作用均匀外力 σ^∞ 。

由 σ^∞ 产生的 $K_\sigma = \sigma^\infty \sqrt{\pi c}$, 由 σ_0 产生的应力强度因子 $K_{\sigma_0} = -2\sigma_0 \sqrt{\frac{c}{\pi}} \arccos \frac{a}{c}$, 总的应力强度因子为 0, 即

$$\sigma^\infty \sqrt{\pi c} - 2\sigma_0 \sqrt{\frac{c}{\pi}} \arccos \frac{a}{c} = 0 \quad (13)$$

$$\text{解出 } r_p = a \left(\sec \frac{\pi \sigma^\infty}{2\sigma_0} - 1 \right) \quad (14)$$

由 Irwin 对塑性区进行修正得出,在 $\theta = 0$ 的塑性区边界到裂缝尖端的距离为

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_0}\right)^2 \quad (15)$$

可以得出

$$a \left(\sec \frac{\pi \sigma^\infty}{2\sigma_0} - 1 \right) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_0}\right)^2 \quad (16)$$

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{2\pi a \left(\sec \frac{\pi \sigma^\infty}{2\sigma_0} - 1 \right)} \quad (17)$$

对于切缝药包控制爆破形成的弹塑性裂缝体^[10-12],也可以用 J 积分准则和 COD 准则^[9],在 J 主导和 J 控制裂缝扩展条件下,COD 准则与 J 积分准则是等价的。

近年来在张开型裂缝中还采用了在撕开型裂缝的分析中早已建立起来的近尖端断裂准则,它是靠近裂缝尖端处的某个形变分量或位移参量作为断裂准则的。相比较而言,COD 准则比 J 积分准则的有效范围大一些;J 积分准则有一定的理论基础,便于计算,但 J 控制裂缝扩展的有效性受小量裂缝扩展的限制;近尖端断裂准则更接近于岩石断裂的实际情况。

因此需要针对现场不同的复杂情况,选取不同的断裂准则,以求更好地服务现场实际。

4 现场应用

从力学分析结果可知,采用切缝药包控制爆破,装药能量发生转化,沿切缝方向产生能量集中,达到了定向断裂的目的。根据不同岩石特性和现场试验,确定出应力强度因子。利用应力强度因子这一力学参数来计算和分析岩石产生裂缝并使裂缝稳定扩展的条件,应用在切缝药包控制爆破中,使孔痕率和炮孔利用率得以提高,随着炮孔间距增大,装药量也可减少。

笔者参加了切缝药包在彬长集团胡家河煤矿的推广应用工作,地点选在第二回风大巷,掘进段为砂岩,节理裂隙比较发育。巷道为半圆拱形,掘进断面为 25.5 m^2 ,炮孔深度为 2 m ,采用 YT19—A 型气腿式凿岩机钻孔,P—60B(A)型靶斗装岩机装岩,1t F 型矿车运输。经过现场推广应用,巷道周边孔距从原来的 $350 \sim 450 \text{ mm}$ 增大到 $600 \sim 700 \text{ mm}$,孔痕率平均达到 90% ,减少了钻孔工作量,提高了爆破效率,有效地增加了围岩稳定性。

5 结论

1) 切缝药包控制爆破炮孔壁初始裂缝的形成要经历线弹性和塑性两个阶段,采用合适的应力强度因子来分析裂缝的形成过程,能够更符合工程实际。

2) 依据弹塑性理论得出的使岩石产生裂缝的

应力强度因子,经过现场应用较为符合现场实际情况。

参 考 文 献

- [1] 戴俊. 爆破工程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 岳中文,陈岗,潘长春,等. 切缝药包爆炸作用下裂纹扩展行为的试验研究[J]. 矿业研究与开发,2010,30(5):1-4.
Yue Zhongwen, Chen Gang, Pan Changchun, et al. Experimental study on crack propagating behavior under explosion load of slit-charge[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(5):1-4.
- [3] 张志呈,肖正学,胡健. 岩石断裂控制爆破切缝药管的参数研究[J]. 化工矿物与加工,2006(11):15-23.
Zhang Zhicheng, Xiao Zhengxue, Hu Jian. Studies on parameters testing of breaking controlled blasting of slotted cartridge[J]. Industrial Minerals & Processing, 2006(11):15-23.
- [4] 杨仁树,陈岗,岳中文,等. 切缝药包爆破中爆生气体作用的试验研究[J]. 煤矿爆破,2009,87(4):1-3.
Yang Renshu, Chen Gang, Yue Zhongwen, et al. Experimental study on the action of detonation gas under cutting seam cartridge blasting[J]. Coal Mine Blasting, 2009, 87(4):1-3.
- [5] 罗勇,沈兆武. 切缝药包岩石定向断裂爆破的研究[J]. 振动与冲击,2006,25(4):155-158.
Luo Yong, Shen Zhaowu. Study on the directional fracture controlled blasting with slit-charge in rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4):155-158.
- [6] 谢华刚,吴玲丽. 切缝药包定向断裂控制爆破研究综述[J]. 工程爆破,2011,17(2):1-5.
Xie Hua'gang, Wu Lingli. Review on research of cutting seam charge directional fracture controlled blasting[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(2):1-5.
- [7] 谢华刚,阮怀宁,吴玲丽. 复合型切缝药包成缝机理及数值模拟实验[J]. 高压物理学报,2012,26(2):1-6.
Xie Hua'gang, Ruan Huaining, Wu Lingli. Slitting mechanism and numerical simulation experiments of complex ligamented charge holders[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(2):1-6.
- [8] 王汉军,黄风雷,张庆明. 岩石定向断裂爆破的力学分析及参数研究[J]. 煤炭学报,2003,28(4):399-402.
Wang Hanjun, Huang Fenglei, Zhang Qingming. Mechanics effect analysis and parameters study on borehole directional fracture blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4):399-402.
- [9] 徐振兴. 断裂力学[M]. 长沙:湖南大学出版社,1987.
- [10] 张玉明,员永峰,张奇. 切缝药包破岩机理及现场应用[J]. 爆破器材,2001,30(5):5-8.
Zhang Yuming, Yun Yongfeng, Zhang Qi. The slit-charge breaking rock mechanism and application[J]. Explosive Materials, 2001, 30(5):5-8.
- [11] 蒲传金,张志呈,郭学彬,等. 切缝药包爆破的研究现状和存在的问题[J]. 四川冶金,2006,28(4):1-5.
Pu Chuanjin, Zhang Zhicheng, Guo Xuebin, et al. Current situation of cutting seam cartridge blasting and existent problems[J]. Sichuan Metallurgy, 2006, 28(4):1-5.
- [12] 张志雄,郭银领,李林峰. 切缝药包爆破裂纹扩展机理研究[J]. 工程爆破,2007,13(2):11-14.
Zhang Zhixiong, Guo Yinling, Li Linfeng. Study on mechanism of crack growth of cutting seam cartridge blasting[J]. Engineering Blasting, 2007, 13(2):11-14.

Analysis on Formation of Initial Cracks in Cutting Seam Cartridge due to Controlled Blasting

DAI Jun, WU Bingquan, MENG Zhen

School of Architectural and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology (Shaanxi Xi'an, 710054)

[ABSTRACT] The suitable stress intensity factor was selected to fit in with the initiation of cracks and subsequent propagation in rocks during controlled blasting in cutting seam cartridge. Starting from the mechanism of the cracking process, elastic and elastic-plastic theories were applied for the mechanical analysis on the initiation and propagation of cracks due to cutting seam cartridge blasting to determine the stress intensity factor under the condition of elastic-plastic. Stress intensity factor, which is based on the theory of elastic-plastic and cracking in rocks, is proven to be consistent with the practical situations.

[KEY WORDS] control blasting, cutting seam cartridge, elastic, elastic-plastic, stress intensity factor