

爆炸动水压力破岩系统的研究

冉恒谦¹, 陈庆寿², 李功伯², 葛克水²

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘 要:提出了一种新的破岩方法——爆炸动水压力破岩系统, 通过理论分析和实验室测试研究了动水压力在炮孔中的传播规律及其破岩效果。

关键词:爆炸; 动水压; 破岩

中图分类号:TD235.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3746(2001)S1-0258-03

1 概述

水压爆破技术作为一种利用水介质传递炸药爆炸动能进行破岩的方法在工程爆破中得到了广泛的应用。而首先在石油天然气领域应用和发展起来的利用水介质传递静压力的水压制裂技术也在许多领域如干热岩体中的地热开发、核废料处理、地应力测量、煤层气开采以及地下巷道的掘进和石材开采等得到了广泛的应用。另外, 在 20 世纪 80 年代初一些学者提出了裁剪脉冲致裂法(Tailored pulse fracturing), 其基本原理是在某一孔段施加一个压力脉冲荷载, 对脉冲荷载形状实行控制, 即调整脉冲荷载参量以产生最佳的致裂效果。针对以上 3 种方法, R. P. Swift 和 A. S. Kusubov 以及 P. A. Persson 和

R. Holmberg 曾进行过对比讨论, 并给出了如图 1 所示的不同加载条件下的破裂图式。

图 1(a)为水压致裂法, 只产生一种破裂面, 裂缝在岩体中的扩展始终沿着最小阻抗的路径传播, 即裂缝在延伸过程中, 裂缝面始终垂直于最小主应力。

图 1(b)是利用爆破得到的随机分布的辐射状裂纹, 但由于在孔内高的爆炸速度和高的压力危及孔周近区岩石, 使孔周产生破坏带。

图 1(c)是利用流体介质和一个活塞形成的一种重复脉动加载条件下得到的破坏图式。

从图中可以看到, 采用一定的脉冲荷载能使孔周产生辐射状破裂但并不危及孔周介质, 即不产生破坏带。

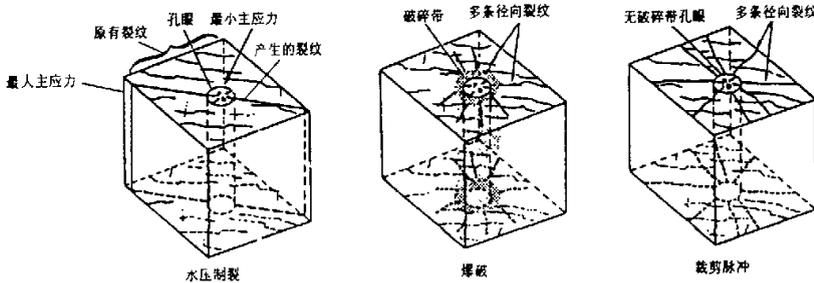


图 1 不同加载条件下的破裂图式(根据 Swift 和 Kusubov, 1981)

2 问题的提出

水压致裂技术尽管得到了应用和发展, 但因受地应力场的影响, 很难达到“可控”的要求, 同时, 由于水压致裂是静压致裂, 所需设备庞大, 而且在破岩效率上相对较低, 因此这种方法的广泛应用有一定的局限性。炮孔爆破法在破岩方面具有很高的效

率, 在土石方开挖、矿山开采和巷道掘进等方面得到广泛的应用。由于孔内爆炸速度和压力很高, 在孔周将产生破坏带, 即使采用孔内水压爆破, 其冲击力产生的应力仍远大于炮孔周围岩石的抗拉强度, 使孔周过度破坏。因此, 对于某些贵重石材的开采和高边坡、深坝基的开挖等, 在应用上仍然受到限制。为此, 探索一种新的破岩方法成为必需。

收稿日期: 2001-05-30

作者简介: 冉恒谦(1963-), 男(汉族), 重庆人, 中国地质科学院勘探技术研究所科技开发处副处长, 高级工程师, 探矿工程专业, 博士, 从事岩土工程、机械设计专家系统的研究及管理工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, (0316)2096501。

如果把水压致裂和炸药爆炸破岩看成是破坏岩石的 2 种极限方法的话,前者属静态压力破岩,其加载速率很低,后者为爆炸冲击破岩,其加载速率很高,那么在这 2 种方法之间,一定存在多种方法可以获得介于这 2 种极限方法之间的破岩效果,图 1(c) 给出的裁剪脉冲法即为一种。要获得不同的破岩效果,改变加载方式,亦即改变加载速率是最主要的途径之一。就目前控制爆破技术的研究和应用而言,无论是从炸药的性能,或是从装药结构出发,都是为了减小或抑制冲击波的作用。为此,为了利用炸药爆炸瞬间释放的能量可以高效破岩的优点,而且也能达到有效地抑制冲击波对孔周岩石的过度破坏,我们仍利用水介质传递能量,从改变加载方式出发,把炸药与炮孔内的水介质分离,置于炮孔口的一爆腔内,使炸药在爆腔内爆炸后产生的高压气体经爆腔下部的孔口喷出,形成高压气体喷流作用于炮孔口的水面上,产生脉动冲击荷载。为了与水压爆破破岩和水压致裂破岩有所区别,本文把这种方法称为“爆炸动水压力破岩”。

3 破岩系统的模型

由爆炸引起的动水压力破岩系统的主要特点是把炸药置于充满水介质的炮孔外,在炮孔外的一个药室里起爆炸药,爆炸后产生的高压气体通过药室下部的孔喷出,冲击作用到炮孔里的水介质上,使水介质产生动水压力进行破岩,这样可以更有效地抑制冲击波对孔壁的作用。动水压力破岩系统的组成如图 2 所示。

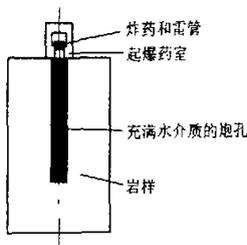


图 2 动水压力破岩系统示意图

4 炮孔动水压力的传播

如图 3 所示,取沿炮孔轴线为 x 轴,以孔口水面为坐标原点 O , x 坐标以指向孔底为正。由于孔口水面受到来自上部药室产生的高压气体的冲击作用,炮孔内的水有向孔底流动的趋势,而孔底则要阻碍其向下流动。若不考虑喷出的气体进入水面以下的情况,只把喷流的作用简化成作用于炮孔水面的外力

条件,则根据 Allievi 水击理论作如下推导。

4.1 动力方程

取距离炮孔口水平(即坐标原点)为 x 的微元 dx 进行研究,如图 4 所示。处于相距 dx 的两点 p 和 p' (之间的压力差即为作用于微元 dx 的合力(若不计孔内水的质量)为:

$$\pi r^2 p - \pi r^2 (p + \partial p / \partial x) dx = -\pi r^2 (\partial p / \partial x) dx$$

根据牛顿第二定律:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \tag{1}$$

4.2 连续方程

4.2.1 速度增量

沿 dx 距离,速度增量等于 $(\partial v / \partial x) dx$,图 5 示出了在 p 和 p' 断面间发生的这种速度变化。因此,在时间间隔 dt 内水的体积变化为:

$$dV_1 = \pi r^2 (\partial v / \partial x) dx dt \tag{2}$$

入流和出流之间的差值只可能是由于在增加压力下使水体受到压缩或使孔壁膨胀。

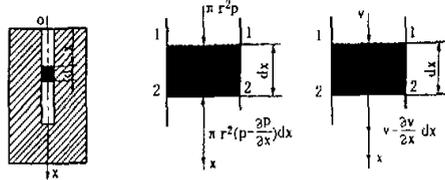


图 3 孔内水体微元 图 4 孔内水体微元受力变化 图 5 孔内水体微元速度变化

4.2.2 孔内压力增加使水的体积减小

孔内压力增加使水体积变化为:

$$dV_2 = \frac{\pi r^2 \partial p}{E_w \partial t} dt dx \tag{3}$$

4.2.3 孔内压力升高引起孔壁膨胀

孔壁膨胀引起水体积的相应变化为:

$$dV_3 = \frac{2\pi r^2 \partial p}{E \partial t} dt dx \tag{4}$$

4.2.4 孔内水流的连续性要求

$$dV_1 = dV_2 + dV_3 \tag{5}$$

把方程(2)、(3)和(4)代入(5)可得:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho a^2} \frac{\partial p}{\partial t} \tag{6}$$

式中: $a = \sqrt{1/[\rho(1/E_w + 2/E)]}$

把方程(1)代入方程(6)可得:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

上式即为脉动压力在水中传播的一维波动方程,其一般解为:

$$p = F(x - at) + f(x + at)$$

式中 F 和 f 是由初始条件决定的任意函数。 F 代表炮孔内沿 x 轴正方向传播的压力波,而 f 则是沿 x 反方向传播的压力波。 a 是压力波在炮孔内水中传播的速度,取决于水的弹性模量和密度以及炮孔周围介质的弹性模量,属介质特性。

对于厚壁管,计算 a 的公式为:

$$a = \sqrt{\frac{1/\rho}{1/E_w + (2/E)(b^2 + c^2)/(c^2 - b^2)}}$$

式中: b 、 c ——厚壁管的内、外半径; E ——管的弹性模量。

5 实验室试验

5.1 实验系统

实验的目的是研究爆炸动水压力破岩系统破岩的可行性及初步测试孔内水介质在爆炸产生的高压气体作用下沿炮孔的压力变化。通过用钢管来模拟炮孔,在管壁上贴应变片,通过外管壁的应变测量了解管内水压力的变化规律。实验系统如图6所示。

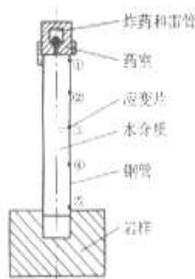


图6 实验系统示意图

5.2 测试系统

本实验采用的测试系统是传感器(应变片)→超动态应变仪→CS2092 动态测试分析仪。

5.3 炸药

在实验中分别采用 5、8、10、12 g 炸药(75% 2 号岩石硝铵炸药 + 25% TNT)和 1 个 8 号电雷管。

5.4 试验结果

5.4.1 管内压力变化

经多次反复试验发现,通过在管外粘贴应变片测得的管内水压力的变化规律如图7所示,脉动冲击波峰值随波沿炮孔口向孔底传播,其峰值压力逐渐减小(图7a);脉动冲击波沿炮孔口向下传播到达孔底时,将产生一反射波从孔底向孔口传播,其波峰值逐渐减小(图7b)。

5.4.2 破岩效果

在试验中分别采用药量为 5、8、10、12 g 进行加载,得到的破岩效果有一个共同的特点,即试件几乎都成十字型和 Y 字型破裂,并且试件底部由于孔底应力集中和反射波的作用都形成锥台(即倒漏斗型,如图8所示),锥台的斜角在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 之间变化。

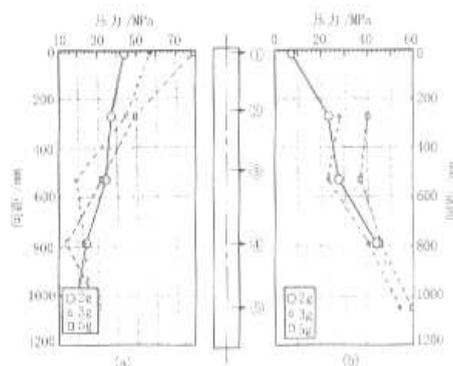


图7 管内压力变化

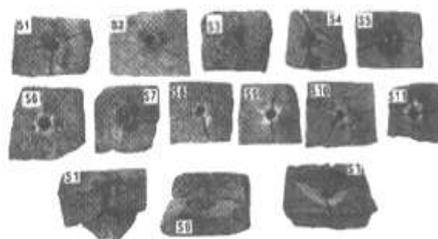


图8 爆炸动水压力下岩石试件的破坏效果

6 结论

(1)把炸药与水介质隔离置于炮孔外的药室内,可以有效地控制炸药爆炸对炮孔的冲击作用,从而可减少对孔周介质的过度破坏。

(2)根据 Allievi 水击理论推导出的压力波在水中的传播速度,考虑了孔周介质的影响,而且得到的速度要比通常认为的无限水介质中的冲击波速度(近于声速)要低。

(3)通过试验测得,脉动冲击波峰值随波沿炮孔口向孔底传播,其峰值压力逐渐减小;反射波从孔底向孔口传播,其波峰值逐渐减小。

(4)从破岩效果可以看到,试样成十字型和 Y 字型破坏,说明爆炸动水压力破岩系统能够抑制冲击波对孔壁的过度破坏作用,达到了保护孔壁的目的;试样底部呈倒漏斗型,说明炮孔底部应力集中以及水中冲击波入射到孔底后经试样底部反射形成拉伸波作用显著。

总之,从理论分析和试验结果都可认为,本破岩系统有研究和应用前景,需进一步深入研究。