

# 隧道爆破振动速度研究

楼晓明<sup>①</sup> 郑俊杰<sup>①</sup> 马建军<sup>②</sup> 蔡路军<sup>②</sup>  
(<sup>①</sup>华中科技大学土木工程与力学学院,<sup>②</sup>武汉大学)

**摘要:**在隧道爆破开挖中,频繁反复的爆破冲击动压力对隧道设计轮廓线、施工误差和围岩的稳定性等有很大影响。依据爆炸动力学理论和弹性波动理论,分析了同时起爆和微差起爆所产生的爆炸应力场。根据爆炸波在传播过程中的叠加机理,提出了爆破后隧道围岩质点振动速度解析解。爆破振动速度解析解的提出,为隧道开挖采用合适的爆破掘进方法、减少施工误差及提高围岩的稳定性提供了理论依据。

**关键词:**微差爆破 振动速度 应力波叠加

**中图分类号:**TD235 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-4172(2007)03-0031-04

## Study on Blasting Vibration Velocity in Tunnel

Lou Xiaoming<sup>①</sup> Zheng Junjie<sup>①</sup> Ma Jianjun<sup>②</sup> Cai Lujun<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Huazhong University of Science and Technology; <sup>②</sup>Wuhan University of Science and Technology)

**Abstract:** The impulsive dynamical pressure from frequent blasting has a strong influence on designed tunnel contour, construction error and stability of surrounding rock in the course of excavating tunnel. According to explosion dynamics and elastic wave theory, the stress wave fields resulted from simultaneous and millisecond initiation are analyzed. According to the superimposed mechanism of stress wave, the analytic solutions of particle vibration velocity on surrounding rock are put forward, and the analytic solution of particle vibration velocity is testified by monitoring. The study can provide the references for use of appropriate blasting methods, reduction of construction error and improve of the stability of surrounding rock in tunnel excavation.

**Key words:** millisecond blasting; vibration velocity; stress wave superimposition

## 1 引言

隧道开挖时,爆破损伤控制是其研究领域中的重要课题。为了达到减少围岩损伤和增加其稳定性的目的,在爆破开挖中采用了一系列的措施,如选择合理的爆破时差、不耦合装药和预裂爆破、控制掘进进尺、选择适当的隧道爆破开挖施工方法,等等。但由于地质条件的复杂多变和爆破参数较多等原因,对于爆破施工时如何控制隧道开挖轮廓线和降低爆破时的围岩扰动,在爆破理论方面一直都没有取得较好的理论解来支持工程实践。

目前国际上隧道爆破围岩损伤控制的基本做法是:首先预测隧道开挖过程中开挖轮廓面处的质点峰值振动速度分布,然后根据围岩的质点峰值振动速度经验判据估算爆破损伤影响范围及隧道开挖轮廓面的爆破方式,并校核设计爆破孔网参数及最大单响药量。在此过程中,关键是确定隧道开挖过程

中轮廓面处的质点峰值振动速度。

在中国和俄罗斯,爆破震动引起的质点峰值振动速度的衰减规律一般用下式表示<sup>[1]</sup>

$$V = k(Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (1)$$

式中,  $V$ —质点峰值振动速度,  $\text{cm/s}$ ;

$Q$ —最大单响药量,  $\text{kg}$ ;

$R$ —爆心距,  $\text{m}$ ;

$k$  和  $\alpha$ —与场地、装药等有关的参数。

而在以美国为代表的西方国家,质点峰值振动速度的衰减规律则习惯用下式表示

$$V = k(Q^{1/2}/R)^\alpha \quad (2)$$

另外,以上公式虽然已被广泛应用,但由于爆破振动参数衰减方程的基本形式直接关系到爆破作业的效率,而各处地质条件不同,为了寻求与工程实际更加接近的方程形式,不少学者提出了爆破振动参数衰减方程的回归模型<sup>[2]</sup>

$$V = b_0 Q^{b_1} R^{b_2} \quad (3)$$

式中,  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为回归系数。

(1)、(2)和(3)式不能直接反应炸药种类、装药结构、钻孔孔径及岩性参数等因素对质点峰值振动速度的影响,在隧道爆破施工时难以对爆破参数进行优化以控制隧道开挖轮廓线和降低爆破时的围岩扰动。为了控制隧道开挖轮廓线和降低爆破时的围岩扰动,寻找一种能够综合反应爆破波传播过程中的衰减物理机制的公式从而减少岩石隧道施工对洞室的损伤破坏就显得非常必要。

## 2 隧道爆破振动速度的计算

爆破波在岩体中的传播是一个复杂的动力学过程。炸药的性能、药量、装药结构、微差时间、炮孔直径等都会影响爆破波的振动强度。为了得到一种能够综合反应爆破波传播过程中的衰减物理机制公式,该文从同段爆破荷载开始分析,进而上升到隧道实际施工爆破的微差爆破。

### 2.1 同段爆破荷载、振速值计算

2.1.1 爆破荷载的计算。对于单孔爆破,考虑岩体的初始损伤,爆破应力波在浅埋岩体中传播时不断衰减,其峰值衰减规律可取为<sup>[3]</sup>

$$P'_s = \frac{r_0}{R} \frac{r_0^{-\alpha}}{r_0^{-\alpha}} P_s \quad (4)$$

式中,  $D$ —初始损伤变量,表征岩石劣化程度;

$r_0$ —炮孔半径,  $m$ ;

$R$ —计算点到炮孔中心的距离,  $m$ ;

$\alpha$ —荷载衰减指数,  $\alpha = 2 - \frac{\mu_d}{1 - \mu_d}$ ;

$\mu_d$ —岩石的动态泊松比,一般取  $\mu_d = 0.8\mu$ ,  $\mu$  为岩石的静态泊松比;

$P_s$ —不耦合装药爆破时单孔柱状孔壁所受初始冲击压力(或称为初始径向应力峰值),其值为<sup>[4]</sup>

$$P_s = \frac{\rho_0 D_c^2}{8} \left( \frac{r_1}{r_0} \right)^6 \cdot k \quad (5)$$

式中,  $r_1$ —药卷直径,  $m$ ;

$\rho_0$ —炸药密度,  $kg/m^3$ ;

$k$ —气体与孔壁碰撞压力增大的系数,可取  $k = 8 \sim 11$ ;

$D_c$ —采用药卷直径下炸药的爆速,  $m/s$ 。

隧道开挖一般为微差爆破,对于微差爆破中的同段爆破,由于包括多个炮孔,因此在计算同段多孔

爆破产生的压力时应考虑多炮孔同时作用的综合效应。将多炮孔综合效应简化为单一炮孔作用时,孔壁初始冲击压力为  $P_{s0}$ <sup>[5]</sup>:

$$P_{s0} = (n)^c P_s \quad (6)$$

式中,  $P_{s0}$ —多炮孔爆破时的假想孔壁初始冲击压力,  $MPa$ ;

$c$ —影响系数,取  $c = 0.621$ ;

$n$ —炮孔数,与装药量有直接关系。

2.1.2 爆破振动速度计算。文献[1]指出,在实际岩体为黏弹性的介质中,考虑岩体的初始损伤,当炸药的爆轰波速度远大于岩体的声波速度时,钻孔中的装药引爆后会在岩体中激发沿径向外传的柱面波。基于柱面波理论,在柱面波波阵面上质点峰值振动速度衰减公式满足

$$V = (r_0/R)^{-1} (P_s/\rho c_p) \quad (7)$$

式中,  $\rho$ —岩石密度,  $kg/m^3$ ;

$c_p$ —岩石纵波速度,  $m/s$ 。

则  $n$  个炮孔同时起爆,爆破后任意质点峰值最大振动速度衰减公式可以表示为

$$V_{max} = (n)^c (r_0/R)^{-1} (P_s/\rho c_p) \quad (8)$$

在瞬时外激励作用下,处于爆炸源附近的岩石和土壤将产生振动响应。该响应为一阻尼振动过程,一般认为振动的振幅服从如下衰减规律<sup>[6]</sup>

$$V(t) = V_{max} \left( \frac{t}{t_1} \right)^{-x} e^{-\gamma(t-t_1)} \quad t \geq t_1 \quad (9)$$

式中,  $x$ —取决于爆源性质且大于零的常数;

$t_1$ —第  $i$  段延迟时间,选择此时刻的幅值对应于振动速度的最大值,  $s$ ;

$\gamma$ —阻尼系数。

另外,为使问题简化,假定其在岩石介质中作简谐运动,其运动速度可用下式表示<sup>[7]</sup>

$$V(t) = V \sin(\omega t - T_i) \quad (10)$$

式中,  $T_i$ —第  $i$  个爆源的起爆时刻至振动波传播至观测点所花费的时间,  $s$ ;

$\omega$ —圆频率,  $rad/s$ ,其值可由爆破源产生的位移值求出,过程如下:

对于隧道围岩,由一般波动方程并根据文献<sup>[8]</sup>,忽略爆破波传到岩石任意质点处的时间差,可推出在微差爆破中的同段多孔爆破中,隧道围岩任意一点产生的位移解为

$$A_{(\text{MAX})} = n \cdot \frac{r_0^3 P_s}{\mu} \cdot \left\{ \frac{1}{4} + \frac{1}{4r_0} e^{-\frac{2c_p t - R + r_0}{r_0}} \cdot \left[ \left( R - \frac{r_0}{2} \right) \sqrt{2} \sin \left( \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{c_p t - R + r_0}{r_0} \right) - r_0 \cos \left( \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{c_p t - R + r_0}{r_0} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

式中,  $\mu$ —拉梅常数;

R—距离爆破源的距离, m。

由(11)式可知,其正弦项和余弦项的值都可表示为

$$\beta = \frac{2\sqrt{2}c_p}{3r_0} \left( t - \frac{R - r_0}{c_p} \right) \quad (12)$$

因此,无论处于远场还是近场,其同段爆破产生的圆频率都可用以下式来表示

$$\omega = 2\sqrt{2}c_p/3r_0 \quad (13)$$

由此可得同段爆破在岩体内任意质点任意时间产生的振动速度为

$$V(t) = (n)^c \left( \frac{r_0}{R} \right)^{\frac{1}{1-D}} \cdot \left( \frac{P_s}{\rho c_p} \right) \left( \frac{t}{t_i} \right)^{-x} e^{-\gamma(t-t_i)} \sin(\omega t - T_i) \quad (14)$$

从式(14)可以看出,同段爆破应力波在岩体中的振动速度值大小,与装药结构、炸药性质及密度、地质条件等众多参数有关。

### 2.2 隧道微差爆破振速计算

炮孔布置为掏槽眼、辅助眼、周边眼的隧道微差爆破开挖,其引起的应力场是复杂的非周期运动过

$$V(t) = \left( \frac{r_0}{R} \right)^{\frac{1}{1-D}} \cdot \left( \frac{P_s}{\rho c_p} \right) \left( \sum_{i=1}^m A_i n_i^c \cdot \left( \frac{t}{t_i} \right)^{-x} e^{-\gamma(t-t_i)} \sin(\omega t - T_i) \right) \quad (17)$$

式中,  $t_i$ —第  $i$  段延迟时间, t;

$n_i$ —第  $i$  段不耦合装药炮孔数。

几个地震波的振动速度得到叠加,可在岩性基本不变的区域内,对任一点进行振动波形的叠加运算。

从式(17)可以看出,隧道工作面掘进时微差爆破引起的振动速度,不仅与炮孔半径、装药结构、炸药种类、岩体本身的性质、阻尼、传播距离、初始损伤程度等有关,而且还与微差时间有很大关系。微差时间的选择,直接决定了振动强度或地震效应值的大小。因此,正确选择微差时间,对减少岩体隧道爆破施工对洞室的损伤破坏有着非常重要的意义。

## 3 爆破引起的振动速度分析

### 3.1 同段爆破质点振动速度分析

由式(14)可知,同段爆破产生的振动速度特性为:不同质点,随着爆破距离的增加,爆破振动幅值逐渐衰减;相同质点,爆破振动幅值由于阻尼作用随时间同样逐渐降低,其爆破振动时域表现为短间隔

程。对于一定的地质条件,决定微差爆破质点振动强度的主要参数除上述因素外,还有延迟间隔时间。从应用角度出发,其振动速度可表示为<sup>[9]</sup>

$$V(t) = \sum_{i=1}^m A_i \cdot V_i(t - T_i) \quad (15)$$

式中,  $A_i$  为第  $i$  个震源的药量振动系数,与炸药品种、装药结构、药量和距离等有关,考虑到爆破震动参数与爆破药量、距离等的非线性关系,由下式确定

$$A_i = (Q_i/Q_0)^{0.533} \quad (16)$$

$Q_i$  为爆破的第  $i$  段药量, kg,  $Q_0$  为用于计算该次爆破震动的单段爆破药量, kg, 系数 0.533 由在 2 个不同药量的、爆源位置相邻的 2 次单段爆破的震动波形经相关分析后统计分析得到,当爆源至观测点周围地质条件基本相同,各炮孔的炸药品种和药量相差不大,可近似认为  $A_i = 1$ ;  $V_i(t - T_i)$  为第  $i$  个爆源产生的质点振动速度, m/s。

因此,考虑  $m$  段药量不等,炸药性质(种类,密度,爆速等)相同的药柱在岩体中延期爆炸,由爆炸相似性,在距各自爆点相同的距离上将产生相同波形的爆炸波。由此,隧道微差爆破后任意点波振动速度的叠加可以写为

型特征。下图为一次爆破振动速度监测图(图1)。

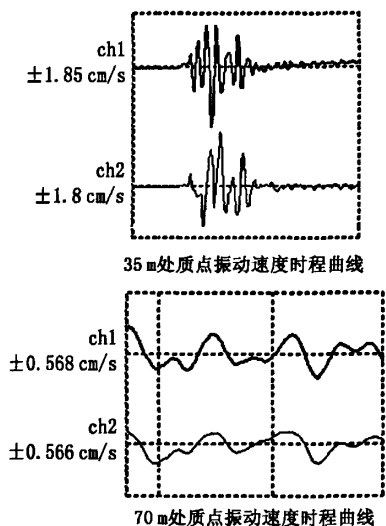


图1 不同爆心距质点振动速度时程曲线  
Fig. 1 Curve of vibration velocity vs time history for different explosion distances

从图1可以得出,隧道围岩质点振动速度在不同距离处幅值是不同的,距离爆源近处幅值大,远处则小;随着时间的增加,相同质点处振动幅值逐渐降低。其监测结果与公式计算得出的关系是一致的。

### 3.2 微差爆破质点振动速度分析

在岩体隧道爆破中,微差爆破引起的爆破波有可能产生相互干扰和叠加,其波形比齐发爆破复杂。图2为两段爆破振动速度叠加图。

由图2得出,微差爆破产生叠加,即微差时间的大小可以改变爆破作用及振动效应,其振动叠加强度随间隔时间的增大而减弱,随爆源距离的增大而减小。本结果与公式(17)得出的振动强度的大小与每段装药的起爆间隔时差、爆源结构特性、爆心距、岩体介质属性、不同距离、不同时间等密切相关是一致的。

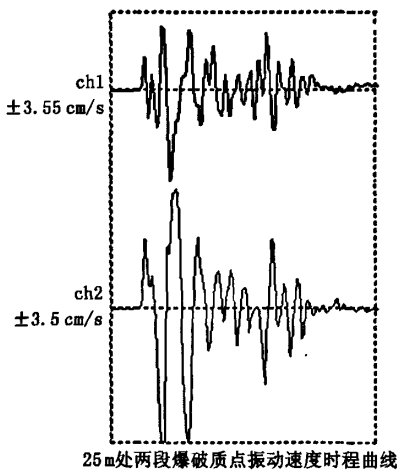


图2 两段爆破不同爆心距质点振动速度时程曲线

Fig.2 Velocity time-travel curve of different explosion source distance in two segment blasting

## 4 结语

爆炸波在隧道围岩中的传播是一个值得进一步

深入研究的问题。由于质点振动速度受多方面因素影响,其振动幅值的大小一直是研究爆破危害中的一个难点。本文根据多孔爆破荷载峰值的大小随距离的衰减关系及药包分散性的影响,并在考虑岩石初始损伤的基础上,对同段爆破、微差爆破质点的振动速度值进行了推导,得到了微差爆破的隧道围岩质点振动速度计算模型。虽然此模型有待进一步深化,但它与其它模型不同,从另一方面研究了它的机理。此模型表明:爆破后质点的振动速度值与爆破类型、装药结构、介质特性、时间、阻尼等多种因素密切相关。在地质条件一定的情况下,距离、药量和时间是影响爆破振动大小的主要因素,并且距离的影响较药量敏感。通过对它的认识,可以人为地改变爆破方法,使爆破振动频率得到控制,可主动地、有效地满足爆破安全的需要。因此,爆破振动速度解析解的提出,为隧道开挖采用合适的爆破掘进方法、减少施工误差及提高围岩的稳定性提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] 卢文波, Hustrulid W. 质点峰值振动速度衰减公式的改进[J]. 工程爆破, 2002, 8(3): 1-4.
- [2] 臧秀平, 刘升宽, 董涛. 露天矿爆破振动参数衰减模型研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2005, 57(5).
- [3] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [4] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆: 重庆出版社, 1997.
- [5] 支国华. 岩体的节理裂隙及断层对爆破地震波传播的影响的动力分析[D]. 上海: 同济大学, 1994.
- [6] 林大超, 张奇, 白春华. 近地表爆炸地震的地面竖向振动速度的随机特性[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3).
- [7] 言志信, 吴德伦, 王漪, 等. 地震效应及安全研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 201-203.
- [8] 郑治真. 波谱分析基础[M]. 北京: 地震出版社, 1979.
- [9] 甄育才, 朱传云. 中远区微差爆破振动叠加效应影响因素分析[J]. 爆破, 2005, 22(2): 11-15. □

# 隧道爆破振动速度研究

作者: [楼晓明](#), [郑俊杰](#), [马建军](#), [蔡路军](#), [Lou Xiaoming](#), [Zheng Junjie](#), [Ma Jianjun](#), [Cai Lujun](#)

作者单位: [楼晓明, 郑俊杰, Lou Xiaoming, Zheng Junjie \(华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北武汉, 430074\)](#), [马建军, 蔡路军, Ma Jianjun, Cai Lujun \(武汉科技大学\)](#)

刊名: [有色金属 \(矿山部分\)](#) **ISTIC**

英文刊名: [NONFERROUS METALS \(MINING SECTION\)](#)

年, 卷(期): 2007, 59(3)

被引用次数: 1次

## 参考文献(9条)

1. [卢文波, Hustrulid W](#) [质点峰值振动速度衰减公式的改进](#) [期刊论文]-[工程爆破](#) 2002(03)
2. [臧秀平, 刘升宽, 董涛](#) [露天矿爆破振动参数衰减模型研究](#) [期刊论文]-[有色金属\(矿山部分\)](#) 2005(05)
3. [戴俊](#) [岩石动力学特性与爆破理论](#) 2002
4. [张志呈](#) [定向断裂控制爆破](#) 1997
5. [支国华](#) [岩体的节理裂隙及断层对爆破地震波传播的影响的动力分析](#) [学位论文] 1994
6. [林大超, 张奇, 白春华](#) [近地表爆炸地震的地面竖向振动速度的随机特性](#) [期刊论文]-[爆炸与冲击](#) 2000(03)
7. [王志信, 吴德伦, 王漪](#) [地震效应及安全研究](#) [期刊论文]-[岩土力学](#) 2002(02)
8. [郑治真](#) [波谱分析基础](#) 1979
9. [甄育才, 朱传云](#) [中远区微差爆破振动叠加效应影响因素分析](#) [期刊论文]-[爆破](#) 2005(02)

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 [楼晓明, 郑俊杰, 马建军, 蔡路军, LOU Xiao-ming, ZHENG Jun-jie, MA Jian-jun, CAI Lu-jun](#) [隧道微差爆破振动速度及应力场研究—地下空间与工程学报](#) 2008, 4(2)  
 依据爆炸动力学和弹性波动理论, 分析了同段起爆在损伤岩体中所产生的爆破振动速度及引起的应力, 然后, 根据爆炸波在传播中的叠加特性, 提出了隧道微差爆破后围岩质点振动速度和应力解析解. 研究表明: 微差爆破相邻段别的地震波形随传播距离的增加而相互接近, 叠加, 在起到干扰扰震的同时, 使围岩体对其震动响应出现选择放大的几率也增加. 爆破振动速度和应力解析解的提出, 为隧道开挖采用合适的爆破掘进方法、减少施工误差及提高围岩稳定性提供了理论依据.
2. 期刊论文 [均匀介质中微差爆破对地表振动的影响—煤矿爆破](#) 2004(4)  
 根据微差爆破原理, 在均匀介质水中进行了不同组合的延期时间爆破实验. 各组合药量相同, 药包个数不同, 对地面产生的振动速度进行测量, 研究了地震波的相互作用规律, 得出了最佳延迟组合.
3. 期刊论文 [武卫星, 郭晓刚, 朱敏](#) [武汉轨道交通广虎区间隧道爆破施工方案优化—人民长江](#) 2010, 41(10)  
 武汉市轨道交通二号线广埠屯站—虎泉站区间隧道顶部分布有多座5层以下民房及厂房, 均为天然浅基础, 砖混结构. 隧道采用矿山法施工, 在穿越灰岩、石英砂岩与中风化砂岩段需爆破开挖. 在分析区间隧道周围环境、构筑物结构形式以及地形、地质条件基础上, 控制钻孔深度(循环进尺), 采用微差爆破技术, 并根据爆破监控反馈信息优化最大单段装药量, 将爆破振动控制在设计允许范围内, 减少了隧道爆破开挖施工对附近房屋的振动影响, 保证了周边建筑物的安全, 达到了设计预期的效果.
4. 期刊论文 [曾晨, 杨仕教, 谭凯旋, 孙冰, ZENG Sheng, YANG Shi-jiao, TAN Kai-xuan, SUN Bing](#) [爆破振动对地表建筑稳定性影响试验—采矿与安全工程学报](#) 2008, 25(2)  
 爆破震动灾害预测和控制对爆破施工与设计中具有非常重要的地位, 为了实现锡矿山锦矿床五窿道区浅层残矿的回收, 确保地下开采爆破振动不影响地表建筑的安全, 采用UBOX-20016爆破振动测试仪对该矿区地下爆破振动速度进行测定, 研究了爆破振动速度与单响最大爆破药量、爆心距之间的关系. 研究结果表明: 采用微差爆破技术能有效的降低爆破震动的危害, 该矿区地下开采微差爆破微差时间应在50 ms以上; 该区残矿回收时, 要严格控制单段装药量, 最大不超过28.5 kg.
5. 学位论文 [饶杨安](#) [复杂环境下爆破振动监测与控制的研究](#) 2003  
 该文在分析的基础上, 对爆破振动的产生和传播规律、爆破振动安全判据、爆破振动记录的分析解读方法进行了介绍与研究. 该文研究讨论了岩土中的爆炸特性, 爆炸冲击波、应力波和爆炸地震波的产生规律, 爆炸地震波的类型、传播衰减规律, 与自然地震波的对比. 对于爆破振动要素的标准问题该文进行了研究探讨: 在监测和分析中, 我们应选择三个方向还是某一个方向上的振动, 是选择质点振动速度还是加速度, 研究者没有统一的观点. 该文认为应尽可能考虑三个方向上的振动; 虽然质点振动加速度、速度不等价, 但由于速度标准的对于各种类型结构的一致性, 应采用质点振动速度. 对于振动安全判据中的频率和持续时间问题, 该文介绍了国外标准、一些建议标准和振动持续时间的预测公式. 对于振动分析预测方法, 该文介绍了经验公式方法、神经网络理论和几种时频分析方法. 该文结合工程实践, 介绍研究了爆破振动监测: 监测系统、监测操作方法、爆破实验. 对于监测系统, 该文介绍了数字化的监测系统, 它便捷可靠, 适合于爆破振动监测的恶劣复杂环境. 对于爆破振动监测方法, 该文介绍了测点的选择布置、仪器的安装保护. 然后该文结合某水库工程得实例, 研究了复杂环境下、靠近保护目标的爆破施工前的爆破实验. 通过模拟施工点真实情况的爆破实验得到监测记录数据, 利用萨道夫斯基公式回归出场地参数, 确定最大容许药量. 并在减振控制爆破实验中, 考察减振措施的可行性. 结合实践, 该文研究了爆破振动控制的原理和方法.
6. 期刊论文 [郑峰, 段卫东, 钟冬望, 孙波勇, ZHENG Feng, DUAN Wei-dong, ZHONG Dong-wang, SUN Bo-yong](#) [爆破震动研究现状及存在问题的探讨—爆破](#) 2006, 23(1)

爆破地震是“三大爆破公害”之首,而有效控制爆破震动主要是通过合理选择微差时间、适当的爆破参数来实现,从微差爆破、药包埋深和装药形式3个方面阐述了目前爆破震动的研究现状并对存在问题提出看法。

7. 期刊论文 [林大超, 张奇, 白春华, LIN Da-chao, ZHANG Qi, BAI Chun-hua 浅地表双源微差爆破地面振动的试验研究 - 工程爆破2000, 6\(4\)](#)

针对浅地表双源微差爆破问题提出了一种实验研究方法,对地面垂直方向上的振动速度进行了测试,给出了微差延迟时间为20、40、60和80ms时距离爆破中心10、20和40m处的测试结果,并进行了相应的理论分析,得到了地面垂直方向振动速度和功率谱的分布规律。研究结果表明,用微差的方法降低地面振动强度存在着最佳值。

8. 学位论文 [沈立晋 爆破地震波传播特性及其效应研究 2001](#)

本文通过对爆破地震波的三种主要波形及其参数的阐述,并结合拆除爆破工程,对爆破振动监测结果进行了分析,获得了高层建(构)筑物爆破拆除而引起的爆破地震波传播规律以及落地冲击引起的冲击地震波的衰减规律。通过对实测波形时域、频域、响应谱的系统分析,给出了地面振动波的几个重要特征,这为爆破工程的设计、爆破振动控制提供了重要的参考。研究了爆破地震引起的质点振动速度和频率与爆破方法、所采用的总装药量(或微差爆破中最大一段装药量)、地质地形条件、爆源、爆心距等有关。从而得出了在岩土和拆除爆破中的地震波的振动速度与频率的衰减规律并将质点振动速度和频率有机地结合起来,以此将二者作为爆破安全判据的综合指标。

9. 期刊论文 [凌同华, 李夕兵, LING Tong-hua, LI Xi-bing 多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析 - 岩石力学与工程学报2005, 24\(7\)](#)

爆破振动分析是研究爆破振动危害控制的基础,也是控制爆破振动危害的前提。根据爆破振动信号具有短时非平稳的特点,利用小波包分析技术对满足分析要求的多段微差爆破振动信号的能量分布特征进行研究。首先,简略地介绍了小波变换与小波包分析的特点;其次,对6条多段微差爆破振动信号进行小波包分析,得到了爆破振动信号在不同频带上的能量分布图;最后,总结了多段微差爆破振动信号频带能量的分布特征。该分析手段为综合研究爆破地震效应特别是为将来构建振动速度-频率相关安全准则提供了一种有效的分析技术。

10. 期刊论文 [苟兴昌 深港西部通道爆炸挤淤施工中的震动问题及对策 - 工程爆破2004, 10\(2\)](#)

在深港西部通道爆炸挤淤工程中,爆破震动对附近居民有影响,因而一次起爆总药量受到限制。在分析研究爆炸排淤振动速度和振动频率衰减特性的基础上,采用了微差爆破、减小侧爆规模及震动监测和严格的质量控制等技术措施,成功地解决了施工中爆破震动问题。钻孔检测和物探结果表明,堤身落底达到设计要求,微差爆破等以前未用过的技术措施没有影响施工质量。

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_ysjs-ks200703009.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ysjs-ks200703009.aspx)

授权使用: 武汉理工大学(whlgdx), 授权号: 0c77f95c-1463-48de-93c3-9e920143c418

下载时间: 2011年2月22日