

# 中深孔爆破分层装药分层填塞研究

李晓杰, 曲艳东, 闫鸿浩, 赵 铮

(大连理工大学, 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 以两个装药层为例阐述中深孔爆破中分层装药分层填塞的基本原理以及炸药单耗对分层装药结构和爆岩块度的影响, 并借助爆炸应力波理论和爆生气体膨胀理论分析合理进行分层装药分层填塞对于中深孔控制松动爆破爆炸效果的影响。分层装药分层填塞技术在大窑湾二期工程采场的实际应用表明: 进行合理的分层填塞分层装药能够改善装药结构、提高炸药能量利用率、获得理想的破碎块度, 同时也表明中深孔爆破中分层填塞应充分考虑各层炸药单耗这一原则应用的合理性。此原则对药包布置、改善能量分布、优化爆破设计、提高爆破质量有一定的指导意义。

**关键词:** 岩石力学; 中深孔爆破; 分层填塞; 爆破参数; 炸药单耗

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 1 - 3269 - 07

## STUDY ON THE LAYERED CHARGING AND LAYERED TAMPING FOR MEDIUM AND DEEP HOLE BLASTING

LI Xiaojie, QU Yandong, YAN Honghao, ZHAO Zheng

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,  
Dalian, Liaoning 116023, China)

**Abstract:** The basic theories of layered charging and layered tamping and the influences of explosive specific charge on distribution of explosive rock blocks for medium and deep hole blasting are discussed. Meanwhile the blasting wave theory and swelling blasting gas theory are applied to analyze the influences of layered charging and layered tamping on the blasting effect for controlled blasting of medium and deep hole. The successful application in the second-stage project of Dayaowan demonstrates that layered charging and layered tamping reasonably can improve the structure of charges, increase the utilization efficiency of explosion energy and make the distribution of block size perfect and that the rationality of explosive specific charge must be considered adequately in the structure of layered charging and layered tamping for medium and deep hole blasting. The principles obtained are expected to be useful for layout of charges, improving distribution of energy, optimizing blasting design and improving blasting quality.

**Key words:** rock mechanics; medium and deep hole blasting; layered tamping; blasting parameter; explosive specific charge

## 1 引言

随着控制爆破技术的提高与发展, 国内外的爆

破技术已经广泛应用于破碎、压实、疏松、排淤和切割物体等作业, 如爆破破碎土岩、混凝土、石材, 建筑物废钢块等, 同时还扩大到特殊环境(闹市区, 居民区甚至人体内胆结石破碎)、特殊条件(高温

**收稿日期:** 2005 - 08 - 23; **修回日期:** 2005 - 11 - 16

**作者简介:** 李晓杰(1963 -), 男, 博士, 1984年毕业于中国科技大学近代力学系爆炸力学专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事爆炸力学及爆炸合成材料方面的教学与研究工作。E-mail: dalian03@vip.sina.com; quyandong159@sohu.com

高压等)、特殊要求(金属爆炸加工,合成金刚石,地震探测等)的各种工程爆破<sup>[1]</sup>。近些年,国内外无论是爆炸理论与试验研究<sup>[2, 3]</sup>,还是爆炸数值模拟研究<sup>[4]</sup>都有了新的发展与提高。就中深孔爆破技术而言,爆破研究人员和工程爆破作业人员已经对布置药包、布孔方式、填充系统、起爆方式、微差间隔时间等技术积累了一定的经验<sup>[5, 6]</sup>,但是随着爆破施工领域的不断扩展,爆区周边环境的复杂多样化,对中深孔爆破技术的要求也越来越高。爆破设计人员必须综合分析爆炸参数的合理性,结合实践经验进行爆破设计。鉴于在复杂环境区域里,如何进行分层装药填塞,安全、有效地实施中深孔控制爆破,仍是一个有待研究的课题,同时国内外对填塞系统以及装药结构虽然有过相关的研究<sup>[5~7]</sup>,但是并没有系统阐明分层装药分层填塞技术的基本原理,特别是应充分考虑炸药单耗这一原则更没有明确提出。本文结合工程实践,利用爆炸应力波理论和爆生气体膨胀理论系统地探讨了中深孔爆破分层装药分层填塞技术,以期对今后的中深孔控制爆破技术的应用与发展起到一定的指导作用。

## 2 分层装药填塞原则

为简要说明分层装药分层填塞原则,本文以2层装药分层为例(见图1),其中 $L$ 为孔深, $L_1$ 为地表填塞高度, $L_2$ 为第1层装药高度, $L_3$ 为中间填塞高度(即第2层填塞高度), $L_4$ 为底部装药高度。

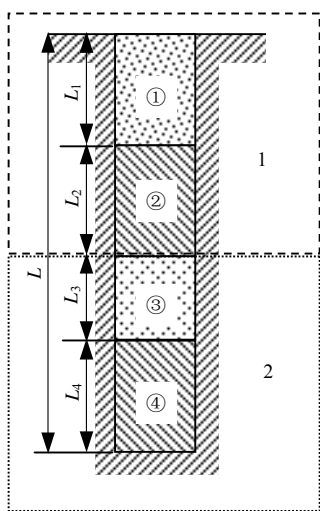


图1 分层结构图

Fig.1 Schematic diagram of layer structure

设孔网参数为:孔距 $a$ ,排距 $b$ ,最小抵抗线 $w$ ,炸

药单耗 $q$ ,炸药密度 $\rho$ ,孔径 $\phi$ 。

整体岩石爆破单耗计算:

$$q = 0.25\pi\phi^2(L_2 + L_4)\rho/L/a/b \quad (1)$$

第1层单耗计算:

$$q_1 = 0.25\pi\phi^2L_2\rho/(L_1 + L_2)/a/b \quad (2)$$

第2层单耗计算:

$$q_2 = 0.25\pi\phi^2L_4\rho/(L_3 + L_4)/a/b \quad (3)$$

各段高度满足关系式:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad (4)$$

在孔网参数(孔距 $a$ ,排距 $b$ ,最小抵抗线 $w$ ,炸药单耗 $q$ ,炸药密度 $\rho$ ,孔径 $\phi$ 等)确定的情况下,通过式(1)~(4)可以求出各段高度 $L_1, L_2, L_3, L_4$ 。

## 3 炸药单耗对分层装药填塞的影响

矿山和采石场爆破的目的就是在充分满足安全条件的前提下,最大限度地获得最合适的岩石破碎块度,使凿岩爆破、铲装、运输和磨碎的综合成本降低到最低。而炸药单耗作为一种从事爆破作业的人员根据工程实际积累的经验,合理的炸药单耗不仅能减少炸药使用成本,还能提高劳动生产率,最终改善爆破质量,提高矿山经济效益。对于中深孔爆破中的分层装药和填塞技术而言,充分考虑炸药单耗是十分必要的。分层装药分层填塞的目的就是在不改变爆破参数的条件下,通过改变装药结构来提高炸药的能量利用率,使得相同的药量发挥更大的威力,获得理想的破碎块度。虽然从理论讲,当炸药性能、自由面条件和破碎的岩石性质确定以后炸药的单耗应该为一个常数,但是实际上岩石结构(层理、节理和裂隙等)不同,物理力学性质的差异,导致炸药单耗的不同,填塞层的高度也有一定的差异,使得爆炸岩体的块度分布不同,增加了爆破设计及施工的难度。葛数高<sup>[8]</sup>利用岩石天然裂隙平均间距、矿岩单轴抗压强度、容重及声阻抗来评价岩石可爆性,并得出了炸药单耗的参数公式:

$$q = -\ln[\xi/(kpg\beta\gamma)] \quad (5)$$

式中: $\xi$ 为允许的大块率, $\beta$ 为大块的下限尺寸, $\gamma$ 为与岩石爆炸难易度有关的系数( $\gamma=1$ 时为正常可爆岩石, $\gamma=1.5$ 时为难爆岩石), $g$ 为炸药爆破比能,

$k$  为修正系数。

陈运轩<sup>[9]</sup>也讨论了爆破块度效应对炸药单耗的影响,并推导出了炸药单耗和各种爆破块度之间的定量关系式,得出块度增加一倍,炸药单耗减少一倍的结论。刘慧等<sup>[10]</sup>利用分形几何从理论角度推导出了炸药单耗与爆破块度分布分维数的方程:

$$\frac{3-D}{1.5D-2.5}(m^{1.5D-2.5}-1)=Bq \quad (6)$$

$$B=\mu e_0 / [(K_s / K_v) r_s x_{\max}^{1-D_s}] \quad (7)$$

式中:  $D$  为岩石破碎分维数;  $q$  为炸药体积单耗;  $e_0$  为单位质量炸药所能释放的能量;  $\eta$  为炸药能量利用率;  $D_s$  为岩石破碎面积分维数;  $x_{\max}$  为最大块度;  $r_s$  为岩石材料的表面能;  $K_s$ ,  $K_v$  分别为面积和体积系数,  $K_s$  取 2~3,  $K_v$  取 0.6~0.7。

联立式(6), (7), 利用数值方法可以具体确定炸药单耗与爆破块度分布分维数的关系。

总之, 炸药单耗对于爆岩块度大小以及爆后块度分布有很大的影响。从一定程度上讲, 炸药单耗是对岩石结构和物理力学性质最直接的体现, 其直接影响炸药能量的利用率, 进而影响分层装药填塞的装药结构。故中深孔爆破技术中分层装药、分层填塞应充分考虑这一因素。

## 4 填塞层中的冲击波

填塞是为了增加爆压的作用时间, 延长爆炸产物膨胀前的高温高压过程, 提高爆炸能利用率。由切尔尼高夫斯基根据有关文献计算的结果资料绘制的能量相对损失图可知, 当药包的长度与孔长之比等于 1 时, 由于爆炸产物的逸出, 能量损失达 60%, 当药包的长度与孔长之比等于 0.6, 能量损失也达 30%。只有在装药量很少, 填塞长度很大时其能量利用才是较高的<sup>[10]</sup>。试验也表明, 对于相同爆炸能量的情况下, 炮眼不填塞情况下炸药消耗能要比填塞的增大 10~15 倍, 此外爆生气体的快速膨胀, 无填塞往往使炸药不能完全反应, 炸药的爆炸能不能充分发挥, 可燃物不能充分氧化, 降低了爆炸能利用率; 炸药化学反应不完善, 产生大量的有毒有害气体, 故必须填塞。

炸药爆炸以后, 爆轰波开始在药柱中传播(图 1), 爆生气体发生膨胀, 当爆轰波先后到达填塞层①下表面、③上表面时, 填塞层①, ③会受到强烈的冲

击压缩, 所激起的冲击波沿炮孔轴向继续向前传播。由于填塞层①, ③受到轴向压缩, 其必然产生径向膨胀, 从而对侧岩石产生压缩作用, 同时由于药包④爆炸, 其所产生的冲击波一部分也将穿过填塞层③沿炮孔轴向在孔底发生反射和透射, 这样, 药包④和药包②产生的爆轰波就会相互迭加, 促使岩石破碎。同时由于药包②的起爆为药包④的起爆产生了新的自由面, 由于自由面的增加, 最小抵抗线减小, 爆破破坏范围增大。此外, 爆轰波在孔底岩石界面也会发生反射和透射, 使得炮孔周围各点受的爆炸应力几乎同时达到拉断强度, 各部分裂隙得到充分发育, 得到放射状裂隙, 形成了受裂隙包围的岩快爆炸条件, 增强了对岩体的破碎作用, 提高了炮眼利用率, 改善了爆破效果。另一方面, 先后起爆的药包爆炸后破碎下来的岩块在运动过程中发生碰撞, 借助其动能再度引起破碎。碰撞能量的消耗减弱了岩块运动的速度、抛掷的距离, 使爆破下来的岩块均匀, 大块率低, 岩块分布集中。最后由于孔间与孔内分层微差爆破改变了炸药的分把可能产生高强度地震波的齐发爆破药量在时间和空间上分解开来, 使各延期段所产生的地震波的主震相产生分离, 大大地减低爆破振动。

### 4.1 填塞层中的应力波表征

#### 4.1.1 冲击波的初始压力

炸药爆炸以后, 由于填塞层的可压缩性比较小, 而冲击波的初始压力很大, 在这种情况下可以假设爆炸产物按  $PV^\gamma = \text{常数}$  的等熵规律膨胀。如果将炸药爆轰看作为瞬时爆轰, 则对于一维流动界面处爆炸产物质点速度<sup>[11]</sup>为

$$v_x = \frac{D}{(\gamma+1)} \left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ 1 - (P_x/P_1)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \right\} \quad (8)$$

式中:  $v_x$  和  $P_x$  分别为爆轰产物与填塞层交界处爆轰产物的速度和压力,  $\gamma$  为等熵指数,  $P_1$  为爆轰波阵面上的压力,  $D$  为爆速。

根据冲击波的基本方程, 当  $v_0 = 0$  时, 填塞层中冲击波波阵面上质点的运动速度可以表示为

$$v_m = \sqrt{(P_m - P_0)(1/\rho_0 - 1/\rho_m)} \quad (9)$$

式中:  $P_0$ ,  $\rho_0$  分别为未经扰动介质的初始压力和密度;  $P_m$ ,  $\rho_m$  分别为填塞层中初始冲击波的压力和密度。

在冲击波压缩作用下, 填塞层可以根据下面的

公式表示:

$$P_m = c[(\rho_0 / \rho_m)^m - 1] \quad (10)$$

式中:  $c$ ,  $m$  均为实验常数。

根据分界面两侧压力和速度连续, 有  $P_m = P_x$ ,  $v_m = v_x$ , 联立式(8)~(10)可以求出  $P_m$ ,  $v_m$ , 然后带入数据进行数值求解。

#### 4.1.2 冲击波的反射

当冲击波传播到孔底时将发生反射, 因为岩石比较坚硬, 可以认为是不可压缩刚体, 据此有反射波的冲击波的峰值压力  $P_2$ <sup>[12]</sup>为

$$P_2 - P_a DC_a^{\frac{2n}{n-1}} = \left[ 2 \left( P_1 - P_a DC_a^{\frac{2n}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - DC_a^{\frac{2n}{n-1}} \right]^{\frac{n-1}{2n}} \quad (11)$$

式中:  $P_a$ ,  $C_a$  分别为爆轰波头压力和声速;  $D$  为爆速。

#### 4.1.3 冲击波的衰减

冲击波传播时, 压缩填塞层消耗能量并按照距离的传播呈指数规律衰减<sup>[12]</sup>:

$$P = B(L/r_0)^{-\alpha} \quad (12)$$

式中:  $L$  为冲击波传播距离;  $r_0$  为药包半径;  $\alpha$  为衰减指数, 和介质有关;  $B$  为系数, 由实验确定。

#### 4.1.4 准静态应力场

紧随冲击波之后, 膨胀气体进一步压缩填塞层, 爆生气体膨胀, 压力降低, 填塞层被压缩, 密度增加。当填塞层上下两层的爆生气体压力相等时, 爆生气体膨胀结束, 填塞层的压缩结束。此时将达到一个平衡状态, 炮孔内的压力均等, 以准静压的形式作用在孔壁, 形成一个准静态压力场。认为爆生气体服从  $PV^\gamma = \text{常数}$  的等熵规律膨胀, 膨胀过程的气体压力<sup>[13]</sup>为

$$P_y = P_w [L_c / (L_c + y)]^\gamma \quad (13)$$

则此时装药层②, ④内的爆生气体压力分别为

$$P_2 = P_w [L_2 / (L_2 + y_2)]^\gamma \quad (14)$$

$$P_4 = P_w [L_4 / (L_4 + y_4)]^\gamma \quad (15)$$

另外, 填塞层被压缩, 压力升高。根据弹性模量  $E_v$  的物理意义可知:

$$E_v = -dp / (dv / v)$$

即

$$dP = -E_v / v dv \quad (16)$$

根据式(17)积分后可以分别得到填塞层达到平衡状态时被压缩的高度  $y_2$ ,  $y_4$  应当满足:

$$P_2 - P_0 = E_v \ln(l_2 / (l_2 - y_2)) \quad (17)$$

$$P_4 - P_2 = E_v \ln[l_4 / (l_4 - y_4)] \quad (18)$$

联立式(14), (15), (17), (18)可求解出填塞层被压缩高度  $y_2$ ,  $y_4$ , 爆生气体的压力  $P_2$ ,  $P_4$ 。

## 5 大窑湾工程案例

### 5.1 工程背景

大窑湾二期工程采场, 是由走向 NW 的两座相连山体——苏达山脉双峰构成。山体由元古代震旦纪风两峰间山谷地带、中生代侏罗纪火成侵入辉绿岩及新生代第四纪沉积淤泥亚黏土和黏土夹碎石构成。采场罕见的周边环境(见图 2)限制了爆破工程的正常进展, 特别是距采场南侧开采境界 40~70 m 处的地下石油八三管线, 要求爆破振速  $v \leq 2$  cm/s, 这给爆破技术带来更大的难度。

### 5.2 工程具体设计与监测

#### 5.2.1 孔网参数及其装药结构

为使工程顺利、安全进行, 同时考虑到工期要求拟采用中深孔爆破技术。炸药选用铵油炸药, 采用两层装药(在充分考虑各层炸药单耗的情况下, 按照前文的计算方法), 孔内分别用 6, 8 段管, 地表采用 4 段管逐孔起爆, 达到控制最大单响药量, 其炮孔设计参数和实际分层装药分层填塞参数分别见表 1, 2。

#### 5.2.2 爆破振动监测

单响炸药通过用分层结构控制到最大为 70 kg, 为避免叠炮造成震动速度过大, 采取逐孔起爆。同时在离爆区 70 m 处地八三管道上面布置爆破振动仪, 型号为 EXP3850-097(成都中科动态仪器有限公司), 测试结果见图 3。由监测图谱可以看到测点的垂向分速度为 2.02 cm/s, 水平径向分速度为 1.71 cm/s, 水平切向分速度为 1.70 cm/s, 满足振速要求。从爆破现场看到岩石整体爆破松软不散, 块度大小适中, 分布均匀, 得到了预定的爆破效果。

通过上面的工程实例可知中深孔爆破中分层填塞按照本文介绍的基本原理, 并应充分考虑各层炸药单耗这一原则是非常合理的。

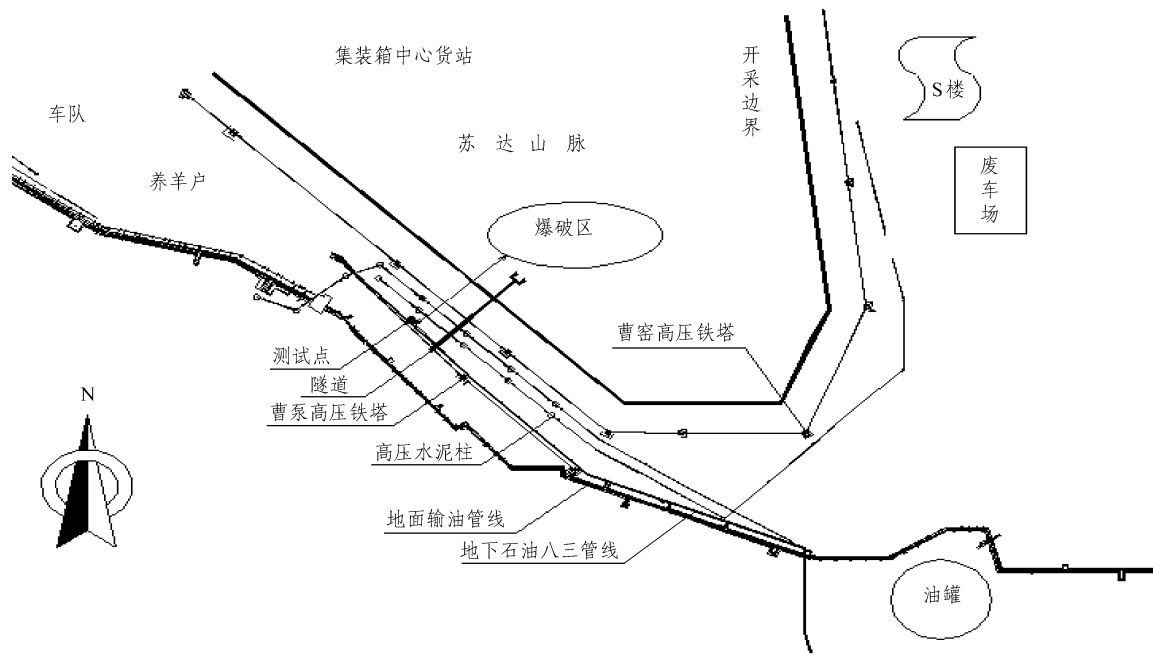


图2 大窑湾工程周边环境示意图

Fig.2 Schematic diagram of the conditions of Dayaowan Engineering

表1 孔网参数设计表

Table 1 Designing table of blasting parameters

孔径/mm	孔深/m	孔距/m	排距/m	炮孔倾角/(°)	抵抗线/m
115	16.0	6.0	4.0	90	3.5

表2 实际装药参数

Table 2 Practical charging parameters

孔序	孔深/m	$L_1/m$	$L_2/m$	$L_3/m$	$L_4/m$	$Q_1/(kg \cdot m^{-3})$	$Q_2/(kg \cdot m^{-3})$	$Q_3/(kg \cdot m^{-3})$
1	16.0	3.5	4.5	2.0	6.0	0.23	0.31	0.273
2	15.5	3.5	3.5	1.5	7.0	0.21	0.34	0.282
3	15.8	3.5	3.5	1.5	7.3	0.21	0.35	0.285
4	15.9	3.5	3.5	1.8	7.1	0.21	0.33	0.277
5	14.5	3.0	2.5	1.5	7.5	0.19	0.35	0.287
6	15.0	3.5	3.5	1.5	6.5	0.21	0.34	0.278
7	15.5	3.5	3.5	1.5	7.0	0.21	0.34	0.282
8	14.5	3.0	2.5	1.5	7.5	0.19	0.35	0.287
9	15.7	3.5	3.5	1.7	7.0	0.21	0.34	0.278

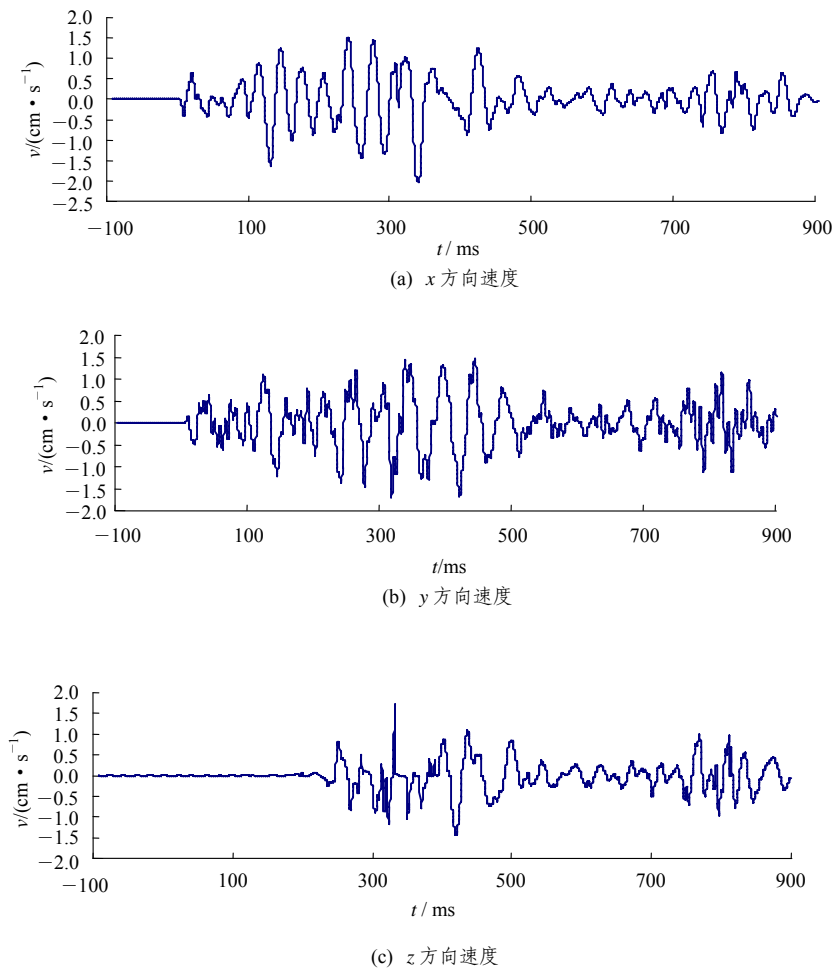


图3 速度测试图

Fig.3 Diagram of testing velocity

## 6 结 论

在中深孔分层装药爆破设计时，为了保证爆破效果，提高炸药在岩石中爆破的能量利用率，除了要考虑岩石的物理力学性质、炸药种类、爆破参数、以及装药结构和起爆顺序之外，分层填塞高度应充分考虑各层炸药单耗这一原则。此原则对药包布置、改善能量分布、优化爆破设计、提高爆破质量有一定的指导意义。但是由于中深孔爆破分层装药分层填塞技术的研究涉及到的炸药爆轰理论、应力波理论和岩石破碎理论是一个看似简单实际十分复杂和困难的课题，本文只是对其从爆炸应力波理论和爆生气体膨胀理论进行初步尝试性研究，供同行商榷。

### 参考文献(References):

[1] 郭声琨, 汪旭光, 陈积松. 中国的工程爆破的成就与发展战略[J].

工程爆破, 1999, 5(4): 1 - 7.(Guo Shengkun, Wang Xuguang, Chen Jisong. Achievements and development strategy of engineering blasting of China[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(4): 1 - 7.(in Chinese))

[2] Talhi K T, Bensaker B. Design of a model blasting system to measure peak p-wave stress[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23: 513 - 519.

[3] Chau K T, Wong R H C, Lee C F. Dynamic cavity expansion model for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics, 1996, 35(9): 431 - 433.

[4] 王仲琦, 张 奇, 白春华. 孔深影响爆炸应力波特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 550 - 553.(Wang Zhongqi, Zhang Qi, Bai Chunhua. Numerical simulation on influence of hole depth on explosion effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 550 - 553.(in Chinese))

[5] 查克兵. 优化爆破设计, 提高难爆矿岩爆破效果[J]. 有色矿山, 1999, (增): 12 - 14.(Cha Keping. Optimizing blasting design and improving Blasting effect of hard ore rock[J]. Nonferrous Mines,

- 1999, (Supp.): 12 - 14.(in Chinese))
- [6] 何广沂. 工程爆破新技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. 133.  
(He Guangyi. New Technology of Engineering Blasting[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000, 133.(in Chinese))
- [7] 黄绍钧. 工程爆破设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996.(Huang Shaojun. Design of Engineering Blasting[M]. Beijing: Weapon Industry Publishing Company, 1996.(in Chinese))
- [8] 葛数高. 矿岩可爆性评价与合理炸药单耗的确定[J]. 有色金属, 1995, 47(2): 11 - 15.(Ge Shugao. Estimation of shock blasting and determination of adaptive explosion consumption[J]. Nonferrous Metals, 1995, 47(2): 11 - 15.(in Chinese))
- [9] 陈运轩. 爆炸块度效应对炸药单耗的影响[J]. 爆破, 1996, 13(3): 19 - 22.(Chen Yunxuan. Influence of blasting fragmentation effect on explosive specific charge[J]. Blasting, 1996, 13(3): 19 - 22.(in Chinese))
- [10] 刘 慧, 冯叔瑜. 炸药单耗对爆破块度分布影响的理论探讨[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4): 359 - 362.(Liu Hui, Feng Shuyu. Theoretical research of the effect on the blasting fragmentation distribution from the explosive specific charge[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(4): 359 - 362.(in Chinese))
- [11] 张守中. 爆炸基本原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.(Zhang Shouzhong. Explosion Fundamentals[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988.(in Chinese))
- [12] 王 成, 恽寿榕, 黄风雷, 等. 软弱垫层爆破机制研究[J]. 工程爆破, 1999, 5(1): 15 - 17.(Wang Cheng, Yun Shourong, Huang Fenglei, et al. Study on Blasting mechanism of soft mat layer[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(1): 15 - 17.(in Chinese))
- [13] 宗 琦. 水垫层装药爆炸作用的探讨[J]. 爆破, 1996, 13(3): 53 - 55.(Zong Qi. Study on blasting mechanism of water layer[J]. Blasting, 1996, 3(3): 53 - 55.(in Chinese))