

# 爆炸力学进展

——第四届全国爆炸力学学术会议论文集

(二)

中国力学学会爆炸力学专业委员会



中国 合肥

1990.4.21—4.23

张素莲

### 徐州电厂1号除尘室安全拆除拆除工程

王文龙 张素莲

#### 提要

1987年9月24日应用控制爆破法成功地完成了徐州电厂1号除尘室三层钢筋混凝土框架结构厂房的拆除工作。为徐州市首创了在极为复杂环境条件下安全地实施爆破拆除大型厂房的先例。本文介绍了工程概况及其周围环境,采用的拆爆方案及主要安全保护措施,集尘灰斗水压爆破和框架爆破参数,爆破线路的敷设,以及最终取得的爆破效果。

关键词: 拆除爆破, 水压爆破。

#### 一. 工程概况:

徐州电厂为提高除尘效率,减少环境污染,需拆除1号旧式除尘室,并于原地建立新型除尘室,原1号除尘室厂房为三层钢筋混凝土框架结构建筑,全高约18M。框架由南北五排,东西四排,共20根立柱和93根纵横梁组成,梁柱结点为焊接结点,占地面积为 $27.5 \times 2.8M$ 。在框架顶上有四个与进出口烟道相连接的汇集烟箱。除东面外,框架内每个跨间有一个,总共有八个矩形截面的角锥形集尘灰斗。灰斗西侧布置有11个,总共有88个旋风除尘器,其上端位于屋面上,下端出口与灰斗上端的侧面相连接。建筑物连同其内所有设施与装置的总重量为1928.63吨。

一号除尘室拆除前的外观照片如图一所示:

#### 二. 周围环境:

拟拆除的1号除尘室位于电厂核心部位,周围环境十分复杂(见图二)。南侧毗邻灰浆泵房相隔仅1.8M,中间地下有电缆沟。东侧为主机房,相隔4.3M;框架内紧靠东侧立柱有地下管道沟,其内敷设有从主机房地下水沟引出的西面排水管和两个铸铁水井阀门。西侧3.7M处有一岩坎,地坪升高,近岩坎上安装有吸风机设备。西南方向有一高大烟囱,其基础距框架最短距离约1.2M。北侧距框架8.5M处,在地下埋设有两根 $\times 4M$ 为形截面的钢筋混凝土薄壁循环水管和一根圆形循环水钢管,埋深仅1M;马路对面有空压机房,距框架约3.6M,其东面为机炉检修



图一 拆爆前的一号除尘室

1—灰斗; 2—汇集烟箱; 3—旋风除尘器

8.5M处,在地下埋设有两根 $\times 4M$ 为形截面的钢筋混凝土薄壁循环水管和一根圆形循环水钢管,埋深仅1M;马路对面有空压机房,距框架约3.6M,其东面为机炉检修

房，西面为油站。此外，在拆除前，框架内已浇灌出拟新建的除尘装置基础。

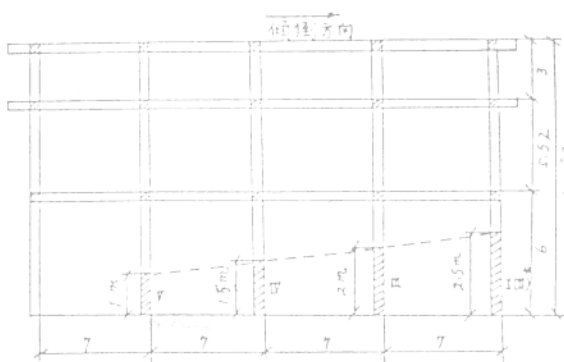
所有邻近建筑物，地上、下设施包括吸风机设备，地下电缆，排水管，水井阀门和低压水管等，均需予以保护，以维持机组的正常运转，否则造成停电事故将会影响华东电网的供电，在生产和经济上造成巨大损失。



图二 1号除尘站的周围环境

由于集尘灰斗对框架造成偏心荷载，且距地面较近，不可能随框架倒塌靠冲击力自行解体，若不予先拆除势必影响框架的倒塌和倒塌方向。予先拆除集尘灰斗采用了水压爆破方案，既保证了安全，又加快了施工进度。

根据周围环境，北侧有足够堆积坍塌物的场地，以及厂方提出须重点保护南侧毗邻框架的灰浆泵房的要求，框架爆破采用了朝北定向倾倒方案。在定向倾倒的两种方案折叠倾倒和整体倾倒中，选择了后一方案。该方案的优点是，可减少打眼和装药工作量；降低坍塌物堆积高度和减小非倾倒方向上的坍塌余量；框架失稳后梁、柱节点处产生的弯矩较大，有利于框架解体。为保证框架定向整体倾倒，采取了自北向南递减立柱炸药量和先北后南顺序起爆立柱的综合技术措施（图三）。



I-V 为起爆顺序。\* 中间西立柱为I段。 西侧立柱为II段。

图三 框架定向整体倾倒方案

柱节点实际为铰接节点，抗弯矩小于刚性节点，故在节点处未布设炮孔松圈。因施工单位采用起爆设备的能力较大，在梁上也不

### 三、拆爆方案：

拆爆前，首先人工拆除了所有防碍框架倒塌的各项设施，包括底层灰斗下方的金属构件工作台，框架南侧的铁制楼梯与框架顶层汇集烟箱连接的进出口烟道。也予先拆除了框架南侧外伸至灰浆泵房上方的层板梯板和第三层的南侧砖墙，以避免其倒塌时砸坏灰浆泵房。拆爆工作重点是框架及其内的八个集尘灰斗。

为防止最后一排南侧立柱产生爆炸“后座力”，折断倾倒时向南伸出破坏灰浆泵房，在该排立柱上未布设药包。

考虑整个框架荷载偏向西侧，有可能造成倾倒方向的偏移，故对第一排北立柱采用先起爆中间两根，后爆两侧立柱的方法来控制倾倒方向。

根据刚性框架失稳后梁、柱节点处产生弯矩的计算，顶层节点处的弯矩小于节点的抗弯矩，但考虑梁、

再布设炮孔解体。

#### 四、灰斗水压爆破参数

焦尘灰斗是矩形截面角锥体的薄壁容器，但目前文献资料中尚未见到变截面容器水压爆破参数的计算方法。为应用方形等截面容器水压爆破的药量计算公式，按等体积原则引进等效内宽 $B_1$ 和等效壁厚。

由几何关系计算出灰斗内体积为：

$$V_1 = \frac{1}{2}(F_1 + f_1)H = \frac{1}{2}(l_1 b_1 + l'_1 b'_1)H = \frac{1}{2}(5.9 \times 5.6 + 0.4 \times 0.4) \times 5.08 = 84.3 \text{ m}^3$$

式中： $F_1$ —灰斗上口内截面， $\text{m}^2$ ； $f_1$ —灰斗下口内截面， $\text{m}^2$ ； $l_1, b_1$ —灰斗上口长度和宽度， $\text{m}$ ；

$l'_1, b'_1$ —灰斗下口长度和宽度， $\text{m}$ ； $H$ —灰斗高度， $\text{m}$ 。

因此，等效内宽为：

$$B_1 = \sqrt{\frac{V_1}{H}} = \sqrt{\frac{84.3}{5.08}} = 4.07 \text{ m}$$

计算出灰斗的外体积为：

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{1}{2}(F_2 + f_2)H = \frac{1}{2}[(l_1 + 2\delta)(b_1 + 2\delta) + (l'_1 + 2\delta)(b'_1 + 2\delta)]H \\ &= \frac{1}{2}[(5.9 + 2 \times 0.18)(5.6 + 2 \times 0.18) + (0.4 + 2 \times 0.18)(0.4 + 2 \times 0.18)] \times 5.08 \\ &= 96.2 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

式中： $\delta$ —灰斗壁厚， $\text{m}$ 。

等效外宽为：

$$B_2 = \sqrt{\frac{V_2}{H}} = \sqrt{\frac{96.2}{5.08}} = 4.35 \text{ m}$$

因此，等效壁厚为： $\hat{\delta} = B_2 - B_1 = 4.35 - 4.07 = 0.28 \text{ m}$  [11]

采用TNT炸药，方形等截面薄壁容器水压爆破的药量计算公式为：

$$Q = \left( \frac{K_2 K_b K_d R_1}{8.27 K_f \Omega C} \right)^{\frac{1.59}{1.59 - 1.41}} \hat{\delta} R_1^{\frac{1.41}{1.59 - 1.41}}, \quad K_g \quad (1)$$

式中： $R_1$ —混凝土静抗压强度，300<sup>#</sup>混凝土的静抗压强度  $R_1 = 1716.8 \text{ KPa}$ ；

$K_b$ —结构的破坏程度系数，取 $K_b = 3.0$ ； $K_d$ —混凝土动强度提高系数， $K_d = 1.4$ ；

$K_r$ —弯曲系数, 取  $K_r=0.08$ ;  $\Omega$ —频率系数, 取  $\Omega=10.48$ ;

$\hat{\delta}$ —灰斗的等效壁厚,  $\hat{\delta}=0.23\text{m}$ ;  $C$ —混凝土的纵波速度,  $C=3500\text{m/s}$ ;

$R$ —药包至灰斗内壁的等效距离,  $R=B_1/2=4.07/2=2.035\text{m}$ ;

$$K_2\text{—钢筋混凝土的药量修正系数, } K_2=1+\frac{F_{dq}K_q(2\Sigma S_q)}{F_dP_d\hat{\delta}} \quad (2)$$

式中  $K_{dq}$ —钢筋的动强度提高系数,  $K_{dq}=1.3$ ;  $F_d$ —钢筋静屈服强度,  $P_d=353160\text{Kpa}$

$\Sigma S_q$ —每米长度内环形钢筋截面的总和,  $M$

灰斗每米长度内含有 $\phi 0.012\text{M}$ 环形钢筋12根, 截面面积为,  $\Sigma S_q=12 \times \frac{\pi \times 0.012^2}{4}=0.00136\text{M}^2$

利用(2)式求得药量修正系数为,

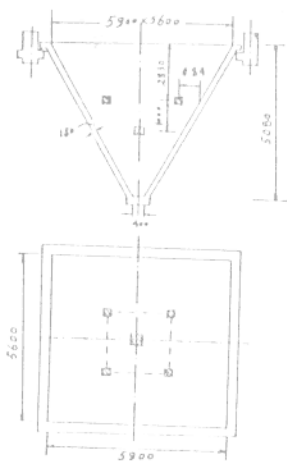
$$K_2=1+\frac{1.3 \times 353160 \times 0.00136}{1716.8 \times 1.4 \times 0.23}=1.93$$

按(1)式计算出灰斗水压爆破所需药量为,

$$Q=\left(\frac{1.93 \times 30 \times 1.4 \times 1716.8}{8.27 \times 0.08 \times 10.48 \times 3500}\right)^{1.59} \times 0.23^{1.59} \times 2.035^{1.41}=5.78\text{Kg}$$

实际总用药量为5~6Kg。

为使灰斗均匀破碎, 将总药量分为五个药包和两层布设。下层一个药包药量为2Kg, 布设在灰斗中心线上, 距灰斗上口3.83M; 其余四个药包, 药量各为0.75~1Kg, 分别布设在灰斗的四角上, 距下层药包1M, 距灰斗内壁0.84M。药包布置见图四。



图四. 灰斗药包布置图

注: 1 药包炸药为粉状TNT用2号岩石作药作起爆药柱。

2 下层药包重2Kg, 上层药包每个重0.75Kg。

3 爆破前注水, 并充药容器。

4 药包采取适当的防水措施。

灰斗下口子先用钢板焊封, 上口有铁板, 属封密型水压爆破。为悬挂药包, 子先利用预埋药包在铁板上炸出孔口, 并通过孔口向灰斗内注水。炸药和起爆药包放在两层塑料袋内, 袋口用细绳扎紧, 其间填黄油密封。

八个灰斗先后爆破了五次, 结果表明总药量在5~6Kg范围内均能获得满意的爆破效果; 灰斗从楼板上脱落, 结构完全破坏, 混凝土块大部脱离钢筋。



图五 爆破后落下的尖斗。

按铁道部科学研究院经验, 钢筋混凝土框架结构承重立柱的炸高 [2] 为:

$$h_{\max} = k (B_{\max} + h_{\min}) \quad (3)$$

式中:  $B_{\max}$ —承重立柱截面的最大边长,  $B = 0.6 \text{ M}$ ;

$K$ —框架结构刚度程度系数,  $K = 1 - 1.5$ ;

$h_{\min}$ —承重立柱的最小炸高,  $\text{m}$ 。

承重立柱的最小炸高按形成枝的控爆高度估算,

$$\text{即 } h_{\min} = h_g = (1 - 1.5) B_{\max} = 0.6 - 0.9 \text{ M},$$

代入(3)式求得立柱的最大炸高为:  $1.2 - 2.25 \text{ M}$ 。

实际采用最大炸高  $h_{\max} = 2.5 \text{ m}$ , 最小炸高  $h_{\min} = 1.0 \text{ m}$ 。

在立柱炮孔的短边面上布置单列炮孔,

最小抵抗  $\omega = 0.5 B_{\min} = 0.5 \times 0.5 = 0.25 \text{ m}$ 。(  $B_{\min}$ —承重立柱截面的短边), 孔间距  $\lambda = m \omega = 1.0 \times 0.25 = 0.25 \text{ m}$ 。

( $m$ —炮孔邻近系数, 取  $m = 1.0$ )。自北向南各排立柱的炮孔数依次为 11、9、7、5 个。为避开中间钢筋, 炮孔在立柱中心线两侧交错布置, 炮孔向下倾斜, 倾角  $30^\circ$ , 以增加堵塞长度。

$$\text{每孔药量按下式公式确定: } Q = (q_1 A + q_2 V) f \quad (4)$$

式中:  $A$ —每炮孔负担的剪切面积, 即立柱截面,  $A = 0.5 \times 0.6 = 0.3 \text{ m}^2$ ;

$V$ —每炮孔负担的破坏体积,  $V = A a = 0.3 \times 0.25 = 0.075 \text{ m}^3$ ;

$q_1$ —单位剪切面上的炸药消耗,  $q_1 = \frac{c_1 \cdot 70}{\omega} = 240 \text{ g/m}^2$ 。

$c_1$ —决定于材料类别和破坏要求的常数, 取  $c_1 = 60$ 。

$q_2$ —单位破坏体积的炸药消耗, 对钢筋混凝土取  $q_2 = 150 \text{ g/m}^3$ 。

$f$ —与自由面数目有关的系数, 对四个自由面取  $f = 0.75$ 。

按(4)式确定出的每孔药量为:  $Q = (240 \times 0.3 + 150 \times 0.075) \times 0.75 = 62.4 \text{ g}$ 。实际每孔药量为

## 六. 安全防护

在安全防护上主要考虑控制爆破振动和飞石。爆破引起地层质点的垂直振速按下列通用公式计算:

$$v = k \left( \frac{\sqrt{Q_1}}{R} \right)^{\alpha} \quad \text{cm/s} \quad (5)$$

式中  $Q_1$ —一次同时起爆的药量, Kg;  $R$ —爆源至计算点的距离, m;  $\alpha$ —衰减指数, 近距取 $\alpha=2$ ;

$k$ —与爆点地层条件有关的系数, 对土填取 $k=200$ 。

按(5)式计算出的质点垂直振速见表一:

表一.

保护建筑物	$Q_1$ (Kg)	$R$ (m)	$V$ (cm/s)	爆源	附注
压风机房	1.43	3.6	0.20	第I排立柱	立柱排由南向北编号
	2.34	4.3	0.19	第II排立柱	
主机房	2.34	1.8	1.09	第II排立柱	
灰浆泵房	2.34	22.3	0.63	第II排立柱	
	1.82	15.8	1.19	第III排立柱	
	1.30	8.8	3.90	第IV排立柱	

按《铁路工程安全规则》规定, 建筑物安全的爆破振速限值 $V < 5 \text{ cm/s}$ 。

为减小框架倒塌产生的振动和防止倒塌冲能破坏埋设的循环水管, 在埋设循环水管的地面上堆置黄土草袋, 以缓冲框架倒塌时产生的冲击作用。另外, 为防止框架倒塌时个别构件或其他物体掉落至南侧电缆沟上砸坏埋设电缆, 在电缆沟上堆置黄土草袋。

最大飞石距离按下式估算:  $L = 20n^2$ , m (6)

式中  $\omega$ —最小抵抗,  $\omega = 0.25 \text{ m}$ ;  $n$ —爆破作用指数:  $n = \sqrt[3]{\frac{Q}{K\omega} - 0.4} / 0.6$  (7)

$Q$ —每孔药量,  $Q = 0.065 \text{ Kg}$ ;  $K$ —标准药量每米的用药量, 取 $K = 1.0 \text{ Kg/m}^3$

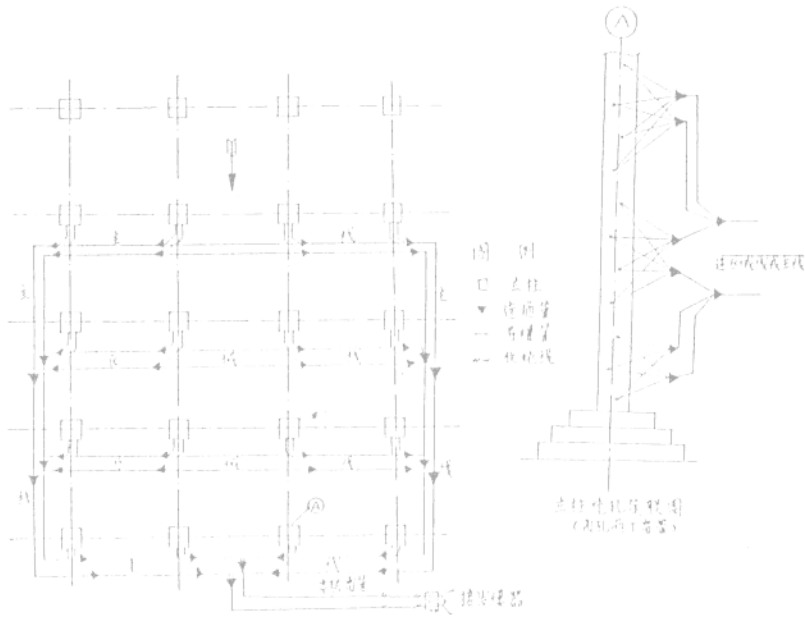
由(7)式算得:  $n = 1.84$ , 代入(6)式得:  $L = 20 \times 1.84^2 \times 0.25 = 16.9 \text{ m}$ 。

予先试验的结果表明, 个别碎块飞散距离为10~20m。为防止飞石, 在立柱布药药部位用3号铅丝编成三层淋湿的草袋。

## 七. 爆破效果

考虑电厂存在有杂散电流, 为安全起见采用非电导爆管孔内延期爆破网络。在框架四周敷设主起爆线, 沿第II和第III排立柱敷设区域线。为确保网络可靠起爆, 各孔内设置两个雷管, 主起爆线和区域线均敷设成复式线路, 采用串联并联法将立柱各孔内一个雷管连成一组, 另一雷管再连成另一组, 然后分别连接到首尾不同的主起爆线或区域线上, 每管管间的连接采用五道管, 最

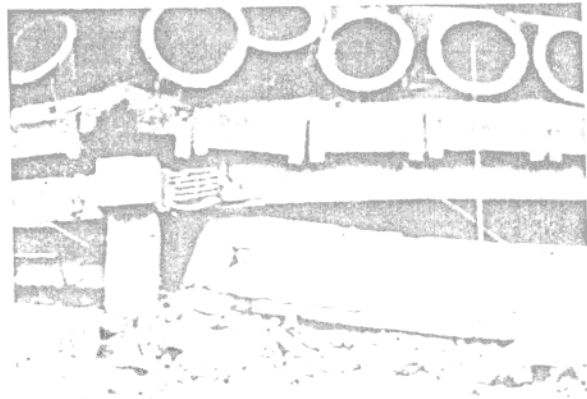
后用电雷管起爆爆破网络（图六）。



图六. 爆破网络的敷设

#### 八. 爆破效果

药包全部起爆，没有产生瞎炮。框架按预定方向倾倒，在倾倒方向上的塌散余量为7m，西侧塌散余量为3.7m。最后一排南侧立柱除东南处一根立柱已脱开框架向西北方向倾斜而未折断外，其余立柱均按事先设想靠框架倾覆力矩自行折断。由于框架顶层梁、柱节点处和梁上未布设炮孔，构件解体不够充分（图七）。



图七. 框架倾斜后的坍塌物

除东侧管道沟内水井开关因防护较差造成漏水外，周围建筑和设施均安全无恙，保证了电厂正常生产和供电。



爆破时实测了地层重点垂直振速，测定结果见表二：

测点位置	实测振速 (cm/s)
压风机房	0.75
灰浆泵房	2.00
主机房	2.50

压风机房和主机房实测振速较计算值高，可能是塌落冲能引起的，而灰浆泵房实测振速偏小的原因可能与框架的倾侧方向有关，因背向倾侧方向的振速一般偏低。

#### ABSTRACT

By use of the directional control blasting method, the dusting station No. 1 of Xiu zhou power station, a building of 3 storeys constructed by reinforced concrete frame structure, had been successfully demolished in september 24, 1987, it had created the first exemplum in demolishing large buildings in safety under special circumstances in Xiu zhou, jiangsu province china.

In the paper, the engineering situation and its surrounded circumstances, the blasting pattern and the main safe-technical measure used, the blasting parameters of dust filling funnel demolished by water pressure, the blasting parameters of frame structure, the priming network and the final blasting effect are described.

Key words:

demolition blasting and water pressure blasting

#### 参考文献

- [1] 王中黔、李铮：水压控制爆破炸药量的理论解，《中国力学学会第二届土岩爆破学术会议论文集（三）》，1982年11月。
- [2] 刘清荣：控制爆破，华中工学院出版社，1986年11月。
- [3] 柯广沂、朱志节：拆除爆破新技术，中国铁道出版社，1988年7月。

# 分段微差爆破地震效应叠加机理的探讨

国家建材局合肥水泥研究设计院 顾孔宪 蔡兆球 曹恒安 高志龙

## 摘 要

本文以作者在矿山爆破工程中对大段药量中晚段以下级药量爆破过程所产生的地震效应的观测和分析为基础, 着重探讨了分段微差爆破过程中地震效应的叠加机理, 认为分段微差爆破在爆区外某点所产生的最大地震峰值不仅取决于最大分段药量的大小, 而且与各分段药量先后起爆的相对时间间隔以及各分段药量爆炸时产生的地震效应依何参与叠加合成的机率密切相关。本文应用计算介质中爆炸应力波的传播理论, 分析了理想的微差峰值包络线的基本形态, 并通过几何作图和图解计算两种方法对分段微差爆破地震效应进行叠加分析。最后以一个具体实例, 说明了用本文介绍的方法对分段微差爆破地震效应进行叠加分析的科学性和工程适用性。

## 一、概 述

从六十年代初期开始, 我国冶金、建材、化工、煤炭等部门的许多露天矿山相继推广运用了分段微差爆破技术, 从而使矿山生产爆破的效果得到了改善, 同时, 爆破地震效应也明显降低。近年来, 分段微差爆破技术的理论和应用仍在进一步地发展, 国内外许多学者也在致力于分段微差爆破降震机理的研究, 但迄今为止, 尚没有一个完整的理论被各国学者所公认。

工程爆破界多年来在进行分段微差爆破工程设计和降震效果的分析计算中, 常以兰格福尔 (Langefors) 提出的最佳分段微差时间间隔  $\Delta t_w = T/2$  作为降震效果最佳的理论依据 ( $T$  为地震波的振动周期), 其结果往往与工程爆破实际有很大差异。

还有一种理论认为, 分段微差爆破产生的地震效应主要与最大一段起爆药量有关, 而与微差时间间隔和其它分段药量无关, 我国现行的爆破安全规程就是这样制定的。

多年来, 我们曾对各种类型的石灰石矿山爆破进行了地震效应的观测。从大量的实测结果分析中认识到, 分段微差爆破地震效应的峰值是由各分段药量在不同时刻起爆后产生的地震波相互叠加的结果。其最大震动峰值并不单独取决于最大分段药量的多少, 降震效果也不完全遵循  $\Delta t_w = T/2$  的最佳微差时间间隔的理论, 而是与各分段微差时间间隔的时间、各分段药量爆炸后产生地震效应的大小和参与正向叠加的机率密切相关。

## 二、爆炸地震波的基本特征

矿山爆破过程中的爆炸地震波通常是指在离开爆区一定距离外, 岩土介质的非弹性过程

终止而出现弹性效应后，地表质点产生的位移现象。这种位移现象常被记录下来，并通过分析，判断爆破对该点产生的地震效应程度。

随着爆破规模和爆破方式的不同，爆破所产生的地震效应差异甚大，在矿山爆破地震效应的观测中，主要记录爆炸地震速度值，并以此作为判别质点地震效应大小的依据，图1为一组实测典型爆炸地震速度波形图。

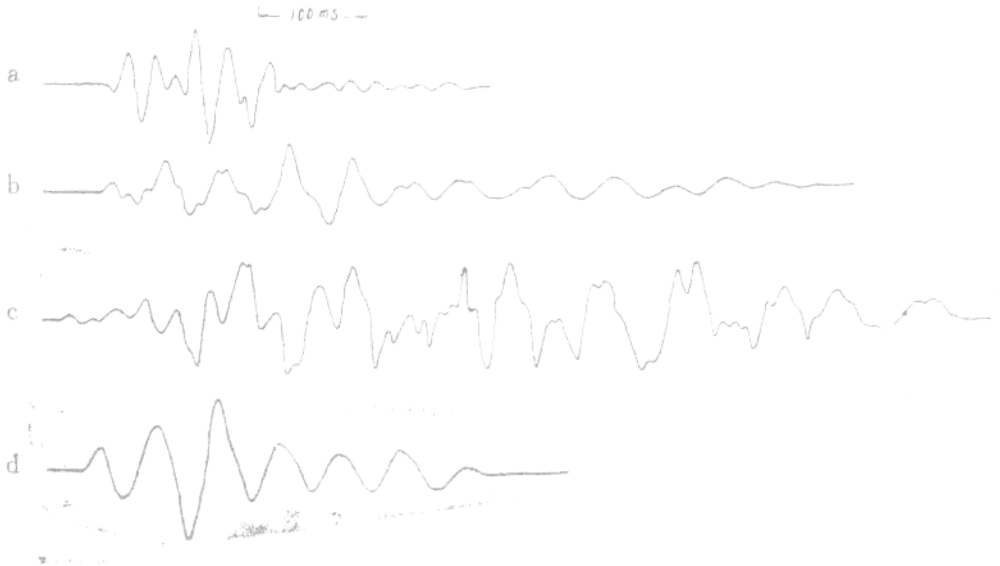


图1. 典型爆炸地震速度波形图

- a. 浅眼小爆破                      b. 中深孔多排微差爆破  
c. 峒室大爆破                      d. 齐发爆破

由图1可以看出，爆炸地震波的传播是极为复杂的。质点震动的规律受到诸多因素影响，质点震动速度大小的随机性相当突出。因此，受震质点在一定时刻是否能达到某一震动值是很难准确估算的。

### 三、爆炸地震波的传播规律

矿山爆破工程中，一次起爆的总药量大多都在数十吨级以下，爆破后，在爆区外一定区域内，地面质点震动从开始到基本稳定所持续的时间一般在 $0.2 \sim 1.5S$ 。这个震动全过程包括了初震相、主震相和余震相三个明显的作用阶段，如图2所示。

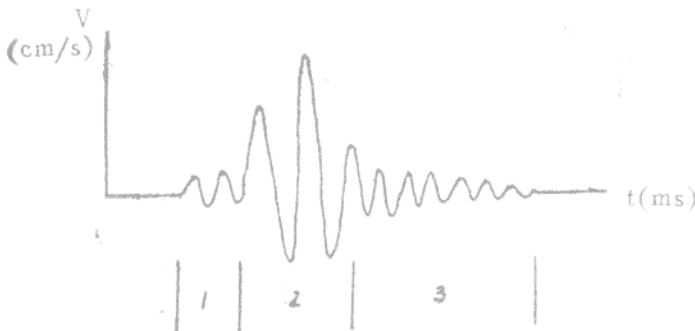


图2. 爆炸震动过程的三个作用阶段

1. 初震相    2. 主震相    3. 余震相

初至波（初震相）段主要为体波的前锋段，震幅小，频率高，破坏作用很小，随后便是震幅较大的主震相段，该段为造成有害效应的主要震动阶段，最后是余震相段，余震相段虽然持续时间较长，频率也较低，但由于震幅已衰减，因此，产生的有害效应也并不大。由此可见，地震波的主震相段是研究分析爆破震动效应的主要区段。

1. 主震相段的确定

主震相段通常指从质点达到最大爆破震动速度值 $V_{max}$ 的有效值 $V_{max}/\sqrt{2}$ 开始到最终降至 $V_{max}/\sqrt{2}$ 值时为止的那段震动过程。主震相段所经历的时间为主震相持续时间。在集中装药齐发爆破中，地震速度波形较简单，初至波，主震相，余震相三个阶段比较明显。而分散装药或分段微差间隔爆破，则地震波形图较为复杂，主震相段很垂直观看出，最大震动峰值常呈间断方式出现，持续时间也较长，对于这种复杂地震波形图，主震相段的确定则须进行具体分析。

2. 爆炸地震波特征区段的时值分析

爆炸地震波是一个由多种波组合成的复杂波，其表面波最为突出。质点振动幅度主要受表面波的影响，从图2所示的波形图上也可大致看出。在初震相段主要是体波的作用，主震相段则是表面波和体波合成作用的结果，余震相段地震波持续时间较长，体波逐渐衰退，最后主要是表面波的余波。因此，根据岩体中爆炸应力波的传播理论，可分析地震波在其主要传播区域内的基本传播规律。

体波（纵波 $V_p$ ）和表面波（瑞利波 $V_R$ ）相互间的关系如下：

$$\kappa = \frac{V_R}{V_S} = \frac{V_R}{aV_p} \dots\dots\dots(1) \quad \text{式中} \quad \kappa \text{——} V_R \text{与} V_S \text{的波速比}$$

$$\kappa \approx \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \dots\dots\dots(2) \quad \nu \text{——岩体介质的泊松比}$$

波速和泊松比之间的关系 表1

波速比 $V_p/V_R$	0.25	0.33	0.4	0.5
$\nu$	1.883	2.130	2.657	

对于石灰岩地区， $V_p = 3000 \sim 6000 \text{m/s}$      $\nu = 0.25$

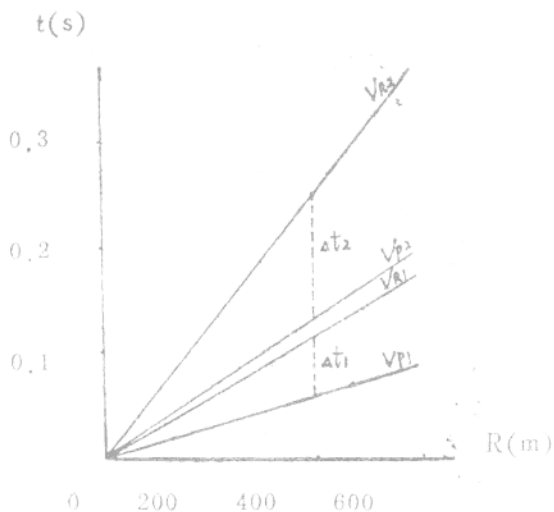
由表1可作出爆区外距离为R处的地震波纵波 $V_p$ 和瑞利波 $V_R$ 到达时间t的特征曲线，如图3

由图3可见，在距爆区400米之外， $V_p$ 与 $V_R$ 到达的时间差 $\Delta t$ 一般均在0.05~0.1s以上。随着爆区与测点间距离R的变化， $\Delta t$ 的变化如下：

$$\Delta t = t_R - t_p = \frac{R}{V_R} - \frac{R}{V_p} = R \left( \frac{0.883}{V_p} \right) \dots\dots\dots(3)$$

式中 $t_R$ 、 $t_p$ 分别为瑞利波，纵波到达距爆区R处的时间(s)。

由(3)式可作 $\Delta t$ —R图



$$V_{P1} = 6000 \text{ m/s}, \quad V_{P2} = 3000 \text{ m/s},$$

$$V_{R1} = 3186 \text{ m/s}, \quad V_{R2} = 1593 \text{ m/s},$$

图3. R—t波速时差分析图

石灰岩地区岩体的纵波速度 $V_p$ 一般都在3000~6000m/s范围内。不同距离,不同介质条件,平均纵波速度差异很大。图4表明, $\Delta t$ 的变化区域随着R的增大而扩展,由此也可看出,要准确地计算距爆区R处各种波速峰值到达时刻很困难,甚至是不可能的。 $V_p$ 和 $V_R$ 受各种构造条件的影响,其平均速度在不断变化,因而 $\Delta t$ 的波动范围也较大。爆破震动的观测区域一般距爆区400~1000m左右, $\Delta t$ 的变化区也在0.05~0.2s上下。这一分析结论与地震波实测结果是一致的。 $\Delta t$ 对应的便是初至波段的持续时间。主震相段持续时间一般约占所观测到的地震波传播全过程的1/4~1/8,即0.1~0.3s左右。

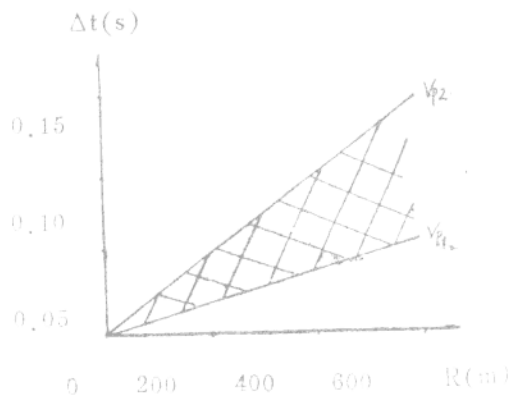


图4.  $\Delta t$ —R时差区域变化趋势

#### 四、爆炸地震速度峰值包络线及其解析式

##### 1. 地震速度峰值的衰变规律和速度峰值包络线

爆炸地震波的产生和衰变与爆源、距离、爆破方式等诸多因素有关。在一定的距离外我们把同时起爆的药量均视为点爆源。矿山的齐发爆破也可看作点爆源爆破。图1, d是一个齐发爆破的震动速度实测波形图。从波形的变化来看,初至波到达0.05~0.1s后,瑞利波即到达,其速度值在初至波到达的0.1~0.2s时间左右就达到最大值,尔后速度逐渐衰减,衰减的幅度较上升时的幅度小。震动频率的衰减在整个质点震动的过程中并不明显,但总的趋势是初震相段频率较高,主震相段略低,余震相段最低。

根据齐发爆破地震速度实测波形图的衰变规律分析,可作出齐发爆破地震速度峰值包络线。如图5

##### 2. 齐发爆破地震速度峰值包络线的近似解析分析式

分析齐发爆破地震速度峰值包络线的基本形态和峰值变化规律,其解析表达式可近似表示如下:

$$V_i = G \cdot V_{i \max} \dots \dots \dots (4)$$

$$G = At^2 \cdot e^{-bt} \dots \dots \dots (5)$$

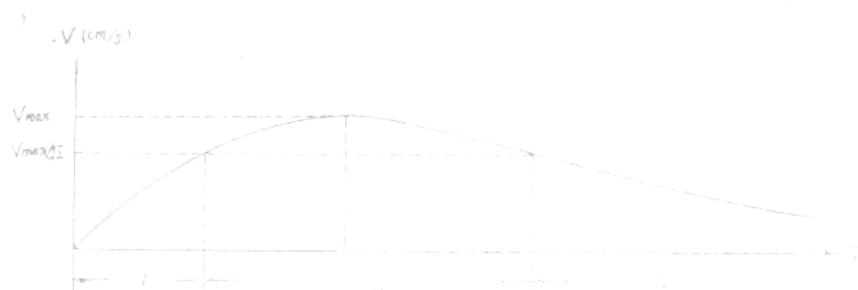


图5 齐发爆破地震速度峰值包络线

1、初震相 2、主震相 3、余震相

$V$ —质点振动任意时刻的速度峰值(cm/s)  $V_{max}$ —质点振动最大速度峰值(cm/s)

$G$ —质点振动任意时刻的相对速度比  $t$ —质点振动任意时刻( $>100ms$ )

$A$ 、 $B$ —爆破规模系数。见表2

A、B系数表

表2

药量(kg)	$>10000$		$1000 > 10000$		$< 1000$	
	A	B	A	B	A	B
系数						
取值	2.65	1.2	4.73	1.6	7.34	2.0

### 五、分段微差爆破地震速度叠加效应分析

1、速度峰值包络线几何作图叠加分析法。

根据齐发爆破地震速度峰值包络线的基本形态特征，对于分段微差爆破时各分段地震效应的相互叠加和最大震动速度峰值的估算，均可通过作图法确定。

如某矿山一次4段微差爆破，各分段药量为 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ ，相邻段微差间隔时间分别为 $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$ 。距爆源 $R$ (m)处有一建筑物，其允许震速 $V_0$ 。问能否破坏？

1)、利用齐发爆破地震速度最大峰值的经验计算式：

$$V = K \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^c, \text{ 计算各分段的地震效应最大值 } V_{1max}, V_{2max}, V_{3max}, V_{4max}.$$

2)、特征时刻可取 $0$ 、 $75ms$ 、 $125ms$ 、 $175ms$ 、 $225ms$ 、 $275ms$ 、 $350ms$ ，作为各分段爆破地震速度峰值包络线的特征点。

3)按各分段延迟的时间，将各分段速度峰值包络线分别绘制在 $V-t$ 直角坐标系内。

4)绘制叠加合成的速度峰值包络线。图6

2、速度峰值包络线解析叠加法

如果起爆 $n$ 段药量，各分段药量单独爆炸产生的地震效应最大速度值为 $V_{1max}$ ，第 $i$ 段起爆时刻与第1段起爆时刻相隔时间为 $\Delta t_i$  ( $>100ms$ )，则 $t$ 时刻的叠加震速峰值 $V(t)$ 计算式如下：

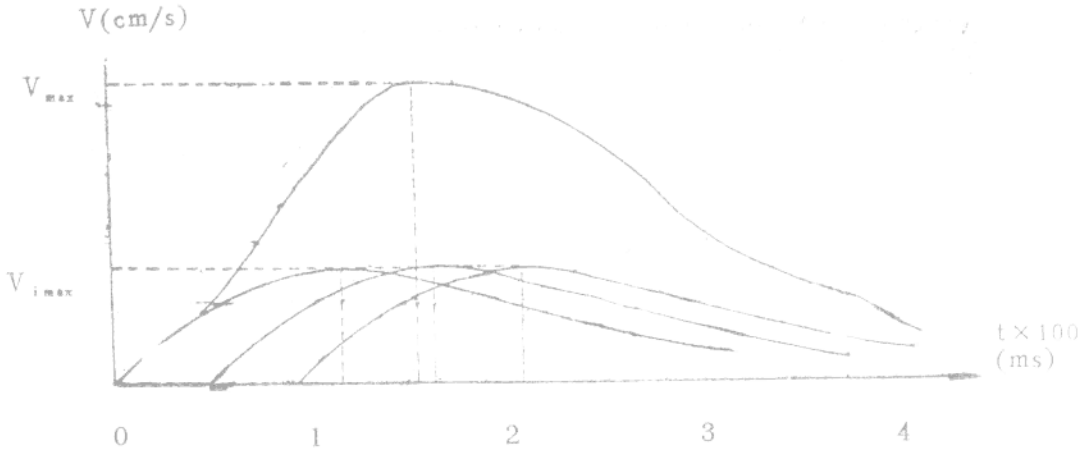


图6 速度峰值包络线叠加合成图

$$V(t) = \sum_{i=1}^n A(t - \Delta t_i)^2 \cdot e^{-B(t - \Delta t_i)} \cdot V_{i_{max}} \dots \dots \dots (6)$$

当  $V'(t) = 0$  时

$$\text{即 } \sum_{i=1}^n A \cdot (t - \Delta t_i) [2 - B(t - \Delta t_i)] e^{-B(t - \Delta t_i)} \cdot V_{i_{max}} = 0 \dots \dots \dots (7)$$

则  $V(t) = V_{max}$

$V_{max}$  —— 叠加合成后最大地震速度峰值 (cm/s)

#### 7、分段地震效应正向叠加的概率分析。

爆破地震动是一种随机震动现象，其频率和振幅都受到多因素的影响，波的传播过程也极为复杂，甚至在相同条件下爆破，其震动波形差异都很大，因此，我们无法把各分段爆破产生的地震速度波形完全视为几何相似来进行叠加分析，但对于任何地震速度波形的衰变过程，仍都呈现出由波峰到波谷这样一种周期性变化的规律。所以，在两组地震波相互叠加过程中必然存在着正向叠加增强和逆向抵消减弱的两种波的合成现象。虽然地震波在传播过程中频率也在不断地衰变，但对于同一周期内的波峰和波谷仍可视作时值相等。这样，由波形叠加分析可以得到两组地震波相互叠加时，其正向叠加增强的概率  $p_2$  为 50%，三组地震波合成正向叠加增强的概率  $p_3$  为 (50%)<sup>2</sup>，由此可以得出  $n$  段微差爆破地震效应正向叠加合成的概率为： $P_n = 0.5^{n-1} \dots \dots \dots (8)$

8 式表明， $n$  段数越多， $n$  段峰值全面正向叠加的概率越小。

#### 4、多段微差爆破地震效应叠加时主要合成段数的确定。

由分段爆破地震效应叠加的概率分析可以认识到，在分段数  $n$  较少的情况下，各分段效应正向叠加的机率较大，而当段数增至 5 段时，其概率值已接近 6%。以后各段效应参与叠加的概率很小，可以不再考虑。因此，我们在进行多微段差爆破时，以考虑 5 段较大地震效应的叠加合成为宜。即在最大地震速度峰值叠加处取 5 段较大地震效应进行叠加合成，并将其合成值作为判断和估算可能产生的最大震动速度值，分段微差爆破时质点最大震速峰值和产生的概率见表 3。

质点最大震速峰值和产生的概率对照表

表3

段数n	1	2	3	4	5
$V_{\max}$	$V_{1\max}$	$V_1(t) + V_2(t)$	$V_1(t) + V_2(t) + V_3(t)$	$V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) + V_4(t)$	$V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) + V_4(t) + V_5(t)$
$P_n$	1	0.5	0.25	0.125	0.0625

$V_i(t)$ —均为最大叠加合成前产生时刻各分段所对应的速度峰值

#### 六. 分段微差爆破地震速度叠加效应分析实例

一九八七年十二月河北某石灰石矿山一次洞室分段微差爆破, 总药量44吨, 共分九段起爆。

#### 1、原始参数表

表4

段 别	1	2	3	4	5	6	7	8	10
分段药量 $Q_i$ (kg)	4161	3504	5579	4136	6888	4218	2560	6629	3798
距 离 $R_i$ (m)	713	693	703	693	643	683	593	633	583
$V_{i\max}$ (cm/s)	0.183	0.241	0.236	0.198	0.327	0.209	0.197	0.329	0.266
$\Delta t_i$ (ms)	0	20	39	44	64	124	129	199	309
$t_i$ (ms)	20	19	5	20	60	5	70	110	

$$V_{i\max} = 422 \left( \frac{Q_i^{1/3}}{R_i} \right)^{2.035} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式为该地质剖面齐发爆破地震速度实测回归分析经验计算式。

#### 2、几何叠加分析

(1)计算各分段药量速度峰值包络线特征点的速度值由(4)(5)式得:

$$V_i = GV_{i\max} = At^2 \cdot e^{-Bt} \cdot V_{i\max}$$

取  $A = 4.73$        $B = 1.6$

各点对应的时刻均为: 0、 75ms 125ms 175ms 225ms 350ms



特征点速度峰值表

表 5

$t(\times 100ms)$	0	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.50	
G	0	0.80	1.00	0.88	0.65	0.44	0.21	
段          别	1	0	0.150	0.188	0.165	0.122	0.083	0.039
	2	0	0.193	0.241	0.212	0.157	0.106	0.051
	3	0	0.189	0.236	0.208	0.153	0.104	0.050
	4	0	0.158	0.198	0.174	0.129	0.087	0.042
	5	0	0.262	0.327	0.288	0.213	0.144	0.069
	6	0	0.166	0.207	0.182	0.135	0.091	0.043
	7	0	0.158	0.197	0.173	0.128	0.087	0.041
	8	0	0.263	0.329	0.290	0.214	0.145	0.069
	10	0	0.213	0.266	0.234	0.173	0.117	0.056

(2)、绘制各分段震动速度峰值包络线及合成曲线

将各分段药量爆炸后在不同时刻产生的震速峰值包络线绘制在V—t坐标系中，并加以合成，得出该次爆破在测点处的合成震速峰值曲线和估算可能产生的最大速度峰值曲线图，如图(7)