

# 工程爆破安全振动速度综合研究

吴德伦 叶晓明

(重庆建筑大学岩土工程研究所 重庆 630045)

**提要** 对爆破振动效应研究成果和国内外常用的安全振动速度准则进行了综合比较,结合重庆市地铁钻爆法施工爆破振动效应研究,提出了关于爆破振动安全速度规定的分类建议值。

**关键词** 振动, 爆破工程, 安全速度

## 1 概述

城市高层建筑的岩石地基开挖,岩体中地铁隧道或站场的施工等都常用钻爆法。岩石爆破过程中,以波动形式传播到地面的只是爆炸能量的很小部分,但可以引起地面质点的振动,地面建筑物也随之产生响应。严重时可使建筑物的正常工作受到影响,甚至使建筑物遭到破坏。同时,爆破振动和噪声对于附近的居民、人群等也产生干扰,容易引起民事纠纷,影响施工的正常进行。因此,爆破振动研究一直是工程和科学界十分注意的问题。

要从理论上研究爆破地振波的影响是个十分复杂的问题,这主要是由于爆破介质的复杂性和边界条件模拟的困难所致。虽然以波动理论和爆炸力学为基础建立了不同的力学模型和拟合公式形式,但难以直接用于爆破设计,实际用于施工和设计的多是以理论分析结论指导下提出的各种经验公式。经过试验或现场测试得出一定条件下的装药量、距离、装药结构、起爆方式等与质点振动速度(或加速度)的关系,便可以确定经验公式中的参数,这些参数在同一个场地往往比较稳定。当然还可用施工过程中的振动监测结果对参数不断进行调整。

爆破振动效应常以地面质点运动速度来表征,这是因为结构经受爆破振动破坏与质点振动速度的相关性比位移和加速度更为密切。目前,以质点速度作为爆破振动的度量准则已成为各国爆破振动控制的基础。对速度准则的修正主要考虑以下几方面的影响:

(1) 结构形式与动力特性。由爆破振动与结构的相互作用,使结构的动力响应不仅与地面质点速度的大小有关,而且还与爆破振动的频率成分和历程有关。

(2) 建筑物各个部分的耐振性能。研究结构的爆破振动效应时应以对振动最敏感的构件的破坏特征为准,并应高度注意非结构性的破坏特征:如抹灰的裂纹、接缝的开裂或张开等。

(3) 爆破地震波的传播特性(速度、方向、衰减、局部地形放大作用等),岩土介质特性(均匀性、节理发育程度、裂隙、裂缝、水饱和度等)以及爆破本身的条件(药包形式、装药方式、起爆方式、堵塞材料等)。

爆破振动产生的质点速度应以测试结果为依据。我们对重庆市地下轨道交通爆破振动效应进行了测试研究, 所采用的测试系统图见图 1, 速度传感器为北京科学仪器厂生产的 CD - 1 速度传感器。感受的信号经过放大由磁带仪记录其波形, 再经过分析仪将其数值化并作出需要的各种变换后, 由打印机输出其结果。通常应输出速度和相应的频谱图。图 2 表示这样的速度波形和频谱图。从图中可见质点速度的变化、振动频率、衰减、多段延时起爆的特征, 各种频率成分的振动分布等。振动测试的结果不仅可用于反馈设计, 亦是仲裁工程爆破事故的重要依据。因此, 应用爆破安全速度准则时, 实际的振动测试是一个必不可少的手段。



图 1 测试系统图

Fig 1 Schematic of measurement system

下面, 首先简要介绍爆破振动的效应和主要国家提出的爆破安全速度准则, 然后提出城市爆破安全速度准则的建议。

## 2 爆破振动效应

国内外对于爆破振动效应的研究成果可综合如表 1。

表 1 爆破振动效应

Table 1 Vibration effect of blasting

质点速度 /mm · s <sup>-1</sup>	振动效应
< 1	人难以感觉到
1	人可以感觉到的微弱振动
5	使人产生不舒适感, 有振感
10	使人扰动不安, 有明显振感
30	使人有较强的振动感
50	一般民用居住建筑的安全振动极限
100	钢筋砼结构、隧道支护结构的安全振动极限
140	使岩石介质产生裂缝、旧裂纹扩张
190	一般民用建筑严重开裂、破坏
300	无支护隧道内岩石振动脱落
600	岩石形成新的裂缝

以上列出的研究成果与各个单位的结果不一定完全一致，这是因为采用的实验观察手段和条件不同。值得注意的是以下几个门槛值：对人有严重振感的速度为 30 mm/s；一般建筑物的安全振动速度为 50 mm/s；岩石或砼内产生新的细裂缝速度为 140 mm/s。

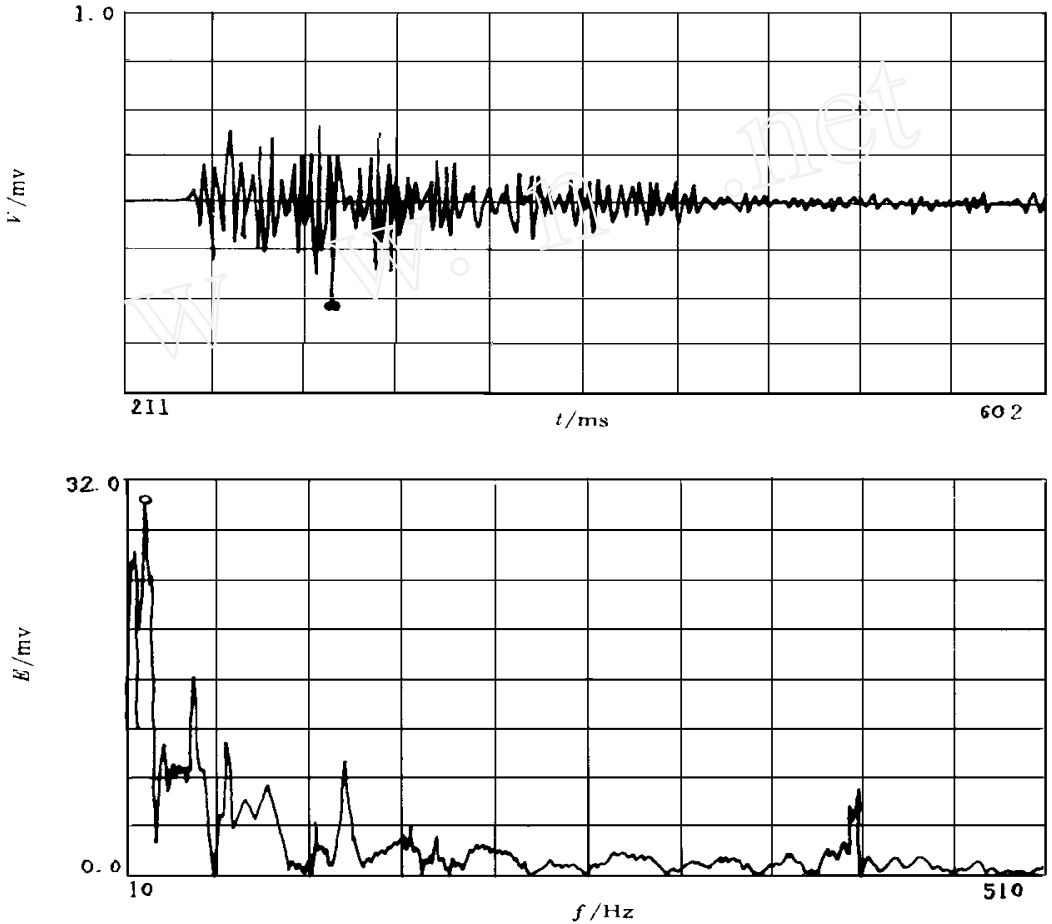


图 2 速度测试点的波形及频谱图

Fig 2 The velocity curve and its frequency response at a measurement point

### 3 主要国家和地区城市爆破振动安全速度

下面引述一些国家和地区采用的爆破振动安全速度的控制值。

#### 3.1 我国爆破安全规程

我国爆破安全规程 GB 6722 - 86 第 8.2.1 条规定一般建筑物和构筑物的爆破地震安全性应满足以下安全速度要求<sup>[5]</sup>：

- (1) 土窑洞、土坯房、毛石房屋 10 mm/s；
- (2) 一般砖房、非抗震性的大型砌块建筑物 20 ~ 30 mm/s；

(3) 钢筋砼框架房屋  $50 \text{ mm/s}$

这里仅将建筑物分为三类, 尚未考虑每类建筑物与爆破波的动力特性响应。下面几个标准对于建筑物划分较细, 且考虑了频率影响。

### 3.2 原民主德国标准(DDR - KDT)<sup>[2]</sup>

表 2 原民主德国标准  
Table 2 DDR standards-KDT Richtlinie

建筑物分类	频率范围 /Hz	垂直分量峰值质点速度 / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
有历史意义的建筑物	2 ~ 30	2
	30 ~ 100	2 ~ 14
木栅式结构	2 ~ 30	5
	30 ~ 100	5 ~ 36
砖石或混凝土墙结构	2 ~ 30	10
	30 ~ 100	10 ~ 71
钢结构、钢筋砼结构	20 ~ 30	30
	30 ~ 100	30 ~ 215

### 3.3 德国标准(BRD - D N 4150)<sup>[2]</sup>

这个标准以合速度矢量的峰值为准, 仅把建筑物分为三类, 但频率范围分得更细。

表 3 德国标准  
Table 3 BRD standards-D N 4156

建筑物分类	频率范围 /Hz	合速度 / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
工业建筑及商业建筑	< 10	20
	10 ~ 50	20 ~ 40
	50 ~ 100	40 ~ 50
居住建筑	< 10	5
	10 ~ 50	5 ~ 15
	50 ~ 100	15 ~ 20
敏感性建筑	< 10	3
	10 ~ 50	3 ~ 8
	50 ~ 100	8 ~ 12

### 3.4 瑞士标准<sup>[2]</sup>

瑞士采用的标准如表 4 所示。

表 4 瑞士标准  
Table 4 Swiss standards for buildings

建筑物分类	频率范围 /Hz	峰值质点速度 / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
钢结构、钢筋砼结构	10 ~ 60	30
	60 ~ 90	30 ~ 40
砖混结构	10 ~ 60	18
	60 ~ 90	18 ~ 25
砖石墙体、木楼阁	10 ~ 60	12
	60 ~ 90	12 ~ 18
历史性及敏感性建筑	10 ~ 60	8
	60 ~ 90	8 ~ 12

以上几个欧洲国家的标准对振动速度控制很严，其主要特点是把速度与爆破波的控制频率相关联。由于爆破引起结构的附加应力与波的频率、强度和结构自身的动力特性有关，而爆破波的高频部分比低频部分衰减快得多，建筑物的自振频率一般低于爆破波频率，因此，高频部分的质点速度允许值高一些是合理的。

### 3.5 原捷克标准(CSN 730032)

对于爆破波频带在 10 ~ 100 Hz 的情况下把建筑物分为三类，其峰值质点速度的控制值分别为 2, 4, 10 mm/s，这三类建筑物分别是：

- (1) 已有破坏征兆的建筑物、条石、空心砖等砌筑不良的建筑物；
- (2) 一般砖石建筑、预制块件结构、框架墙、石砌墙建筑；
- (3) 钢筋砼建筑。

### 3.6 法国规定

人口稠密的市区内爆破安全振动速度不得超过 10 mm/s。

### 3.7 澳大利亚标准(A S2187)

规定把建筑物分为三类：

- (1) 历史性、纪念性建筑及其它有特殊价值的建筑物，速度 < 2 mm/s；
- (2) 低层的居住建筑或商业建筑，速度 < 10 mm/s；
- (3) 钢筋砼建筑或钢结构的工业或商业建筑速度 < 25 mm/s。

### 3.8 美国矿物局标准

提出以 2 in/s(50.8 mm/s) 的峰值质点速度作为结构爆破振动安全速度的判据，美国各州基本上采用此值。这个速度是以完好居住建筑基础附近的地面质点运动速度为准的，

对于结构的动力响应、爆破波的频率影响、房屋经受振动的持续时间等一概未计入。

### 3.9 香港地区标准

地铁爆破施工时采用的质点振动速度控制值为  $25 \text{ mm/s}$ , 其他许多国家和地区对此尚无明确的规定。

由以上引述的规范、规程或规定看出, 下面几个因素应在安全速度准则中加以考虑:

(1) 对于建筑物的耐震性能应进行合理分类, 不同的类型应有不同的振动安全速度极限值;

(2) 对于爆破场地、邻近爆破的建筑物地基场地应进行适当分类, 以便大致判定爆破振动波的主频率范围;

(3) 爆破振动产生的质点速度应以建筑物基底地表的质点速度作为标准。至于房屋的响应可进一步根据基底的振动输入进行估计, 对于特别重要的建筑物则应以动力响应分析结果或实测结果判定;

(4) 对于邻近爆破施工的建筑物, 还应考虑由爆破施工的持续时间造成的重复振动影响。

## 4 城市爆破振动安全速度的建议

近几年来, 我们在重庆市渝中区、沙坪坝区和江北区等地的地面和地下爆破施工场地作过多次振动测试, 同时对一些特殊场地作了钻孔爆破振动实验, 对于爆源特性、地面振动速度、建筑物动力响应特性等因素的相关性获得了大量数据。这些数据反映了以下几方面的事实。

(1) 对于砂岩、泥岩中的爆破而言, 用经验公式(萨道夫斯基的公式)能较好地拟合爆破振动速度  $v$ , 爆心距  $R$  (m), 装药量  $w$  (kg) 之间的关系, 即

$$v = k(R/w^{1/3})^{-\alpha} \quad (1)$$

式中,  $k$ ,  $\alpha$  为拟合参数,  $R/w^{1/3}$  为比例距离, 在对数坐标中, 作出测试的 ( $v$ - $R/w^{1/3}$ ) 点的集合, 用斜直线确定集合的范围, 则  $k$  为斜线在  $\ln v$  坐标上的截距,  $\alpha$  为斜率。一般称  $\alpha$  为衰减指数。根据我们的测试结果

砂岩  $k=900\sim 1200$ ,  $\alpha=1.5\sim 1.7$

泥岩  $k=1200\sim 1500$ ,  $\alpha=1.7\sim 1.8$

砂-泥岩互层  $k=1000\sim 1400$ ,  $\alpha=1.6\sim 1.7$

实验数据整理时发现, 采用拟合公式的比例距为  $(R/w^{1/2})$ , 有些场合可得较好的拟合结果。

(2) 对于不同的爆破场地, 爆破波传播时地面质点振动频率分布有所不同。每个测点的每次振动记录都可以得到图 2 所示的速度和频谱, 因此在施工爆破监测中可以获得大量的数据。根据重庆市几种典型场地的频谱分析, 场地爆破振动的频率分布范围为

较完整的砂岩  $40\sim 100 \text{ Hz}$

砂-泥岩互层  $15\sim 40 \text{ Hz}$

泥岩中等风化  $20\sim 50 \text{ Hz}$

堆积覆盖层  $< 30 H z_0$ 。

(3) 由齐发爆破引起的地面质点振动, 从  $v-t$  图可以看出具有较明显的自由振动衰减特性, 因此可用单自由度衰减振动估计位移和加速度, 即

位移  $u_{max} = v_{max} / 2\pi f$  (2)

加速度  $a_{max} = 2\pi f v_{max}$  (3)

式中的频率  $f$  可以从实测值去取, 或者参照文献[1]的方法, 由爆破振动响应谱上的中心频率确定。

(4) 不同类型的建筑物, 对于同样的爆破振动响应不同。特别是建筑物的顶层水平振动具有明显的放大作用。

(5) 综合考虑以上实测中得出的结果, 再考虑上一节提出的爆破振动安全速度准则应体现的各方面因素, 我们对于城市爆破振动安全速度准则提出的建议如表 5 所示:

表 5 城市爆破振动控制建议标准

Table 5 Commendation standards for blasting vibration control in city

建筑物类型	爆破地震波频带 /Hz	峰值质点速度 /mm · s <sup>-1</sup>
1 现浇钢筋混凝土结构 钢结构、坚固堡坝	< 10	35
	10 ~ 40	35 ~ 40
	40 ~ 100	40 ~ 50
2 良好设计的砖混结构 一般条石砌筑堡坝、挡土墙	< 10	25
	10 ~ 40	25 ~ 30
	40 ~ 100	30 ~ 35
3 灰砂浆砌或条石建筑 砖木混合建筑、木结构	< 10	15
	10 ~ 40	15 ~ 20
	40 ~ 100	20 ~ 25
4 陈旧危险建筑、精密防振 设备建筑、历史性建筑	< 10	8
	10 ~ 40	8 ~ 10
	40 ~ 100	10 ~ 12
5 水工隧道、下水管道、良好支 护的地下洞室或地下构筑物	10 ~ 50	120
	50 ~ 120	130

这里, 对建议说明如下:

建议根据建筑物的结构形式和构筑质量, 考虑对地面振动的敏感性程度将建筑物或构筑物分为 5 类, 这是研究爆破振动对建筑物进行分类的一种尝试。其中, 把堡坝、挡土墙等也列入, 是因为城市中这类构筑物的爆破施工场地较为常见。

表中的第 4 类建筑应以正式认证为准。

参照欧洲国家的做法, 对地震波的频带进行了划分, 其界限为 10, 40, 100 Hz, 这



与几种典型的爆破场地实测结果是一致的。

峰值质点速度可用单分量的最大值, 不一定用合速度的峰值。5 类建筑的界定值为 50, 35, 25, 12 mm/s, 对于一般建筑物只要分类合理, 这样的极限值对于工程施工和环境是适宜的。

本文建议的爆破振动安全速度准则能综合反映建筑物类型和重要性程度、爆破场地和建筑物基底场地的特性, 与目前规程相比有所不同。鉴于目前的测试手段先进, 在准则中不仅要求控制振动的大小, 而且要求确定波谱的频率范围是完全可以实现的。这样, 更有利于城市爆破的安全控制。本文提出的安全速度准则的建议还有许多研究工作要做, 作者希望受益于读者的批评和指点, 同时作为今后爆破安全规程修订时的引玉之砖, 望能起到一点参考作用。

### 参 考 文 献

- 1 Dowding C H. Suggested method for blast vibration monitoring. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1992, 29(2): 143 ~ 156
- 2 Wilton T J, Hills R L. Blast vibration monitoring on anchored retaining walls and within boreholes. In: *Proc. Conf. Rock Eng. and Excavation in Urban Environment*, Hong Kong: 1986, 421 ~ 427
- 3 Carastro M, Ribacchi R and Soccol G. Blasting and support problems in the monte d'oro tunnel, Tricest Italy. In: *Proc. Conf. Rock Eng. and Excavation in Urban Environment* Hong Kong: 1986, 65 ~ 78
- 4 波林格 G A. 爆破振动分析. 北京: 科学出版社, 1975
- 5 国标 GB6722 - 86, 爆破安全规程

## A COMPREHENSIVE REVIEW AND COMMENDATION OF BLAST VIBRATION SAFETY VELOCITY

Wu Delun Ye Xiaoming

(Chongqing Jiaozhu University, Chongqing 630045)

**Abstract** A comprehensive review of research results on blast vibration effect and comparison of safety velocity criteria of blast vibrations in China and abroad have been made. Combining the work on blast vibration behaviour in Chongqing light subway, a commendation of blast vibration safety velocity criterion is presented.

**Key words** vibration, engineering blast, safety velocity criterion