DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0350-09

密集建筑物下隧道开挖微振控制爆破方法与振动分析*

龚 敏[1],吴昊骏[1],孟祥栋[2],李永强[3]

(1.北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;
2.重庆城建集团有限责任公司,重庆 400013;
3.重庆巨能建设集团,重庆 404100)

摘要:为适应城市密集建筑物下隧道爆破对振动的高安全要求,研究用普通爆破器材进行振速精确控制的爆破技术和参数确定方法。以渝中隧道为研究背景,在开发准确延时非电雷管的基础上,利用傅立叶函数和 MATLAB 软件拟合了不同药量单孔爆破振动波形,分析了 1～50 ms 不同间隔下振动叠加的量化数据;讨论了各微差间隔时间的降振效果;在指定振速的情况下,确定单孔药量和微差起爆时间;实测并分析了现场使用雷管各段微差间隔特点,据此进行针对性的爆破设计和采用逐孔掏槽爆破进行振速控制。现场应用表明:隧道爆破振速始终小于 1.00 cm/s,在此振速下避免振动叠加的最优单孔药量为 1.2 kg,爆破振速峰值位于主掏槽的第 1 段或第 2 段雷管起爆后,且与理论分析结果吻合较好;逐孔起爆 60 ms 后振速下降 50%以上。研究表明:在高安全指标下,以非电雷管实施精确控制爆破是可以实现的。

关键词:爆炸力学;降振;逐孔掏槽;隧道开挖;精确控制;振动叠加;爆破

中图分类号:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

城市隧道开挖的特点是周围有密集的建(构)筑物群,随着安全与环保意识的增强,对爆破振动控制的要求更严格,有些要求已远高于现有安全规程。众所周知:振速越低,爆破控制越难。在严苛条件下,甚至一些隧道只能以非常规进尺(数 10 cm)和多次爆破开挖[1-3],效率很低。除电子雷管一定程度上可以满足要求外[4-5],在高安全指标下如何以常规器材精确控制振动是城市隧道开挖中普遍存在并急待解决的课题。

高安全要求下隧道爆破精确控制的难点:首先在于,低振速必定要求分段药量较小,但普通雷管段数不够,迫使掏槽多为同时起爆[6-8],逐孔爆破在振动控制较严的城市隧道爆破中很难实现;其次,低振速与进尺间的矛盾难以调和;另外,低振速下,爆破参数如掏槽孔数、单孔药量、微差间隔时间等尚无较好的确定方法。

起爆时差与振动的关系是近来研究的热点:陈士海等[9]分析了子信号在不同微差时间下振动叠加和合理降振时差,用一个振动波模拟不同药量的变化,发现 2 单段信号的振动特性越接近,降振效果越好;赵明生等[10-11]探讨了基于矿山台阶爆破单段波形的振动合成。但以上文献均没得到可在现场应用的较系统而明确的隧道爆破参数。还有学者认为按单孔振动半周期或大于半周期[12-13]设计起爆时差可有效降振,这些仍有待进一步探讨。至于安全振速与相邻段微差起爆最大、最小间隔的关系,在实际隧道爆破中的量化研究还未见报道。

本文中,在使用常规爆破器材的条件下,试图为密集建筑群下爆破振动的精确控制探索一些可行的办法。以重庆渝中隧道为背景,研究其爆破技术和确定关键参数,并分析逐孔起爆的振动特点。

* **收稿日期**:2014-04-25;**修回日期**:2014-12-09
基金项目:重庆市科技开发计划重点项目(cstc2014yykfB30002)
第一作者:龚 敏(1963—),男,博士,教授,博士生导师,gongmustb@163.com。

1　研究背景

为使研究具有普遍性，选择地面建筑物密集且振速控制严格的重庆渝中连接隧道作为研究背景。目前在建的渝中连接隧道位于重庆最繁华的商业中心渝中区解放碑，地面高楼密集，间隔很小，地下有人防洞室，隧道顶板与正在运营的地铁 1 号线底板相切，环境复杂。右洞设计上下台阶开挖，断面尺寸为 11.52 m×9.57 m。隧道爆破时，全程要求地面振速在 1.00 cm/s 以下(局部 0.50 cm/s)，采用常规方法爆破，振动控制较困难。

2　根据雷管延时特点的掏槽设计和起爆段位确定

现在工程爆破中，普遍采用非电雷管的名义段别进行设计，而不是根据雷管的实际间隔特点，这往往是爆破精准控制无法实现的重要原因。在不使用电子雷管的条件下，要利用一般爆破器材实现严苛振速控制，必须利用现有技术避免雷管串段，解决雷管分段不足及精度问题。为此，与厂家合作开发 2.2 s 内 25 段不串段雷管(编号 28 段)，这为根据雷管微差间隔特点分段和掏槽逐孔精确爆破奠定了基础。

为获取各段雷管 N 的实际微差起爆时间，在每段雷管中选 10 个样本进行起爆时间实测，图 1 是各段雷管最大、最小延时时间曲线。第 1～18 段雷管起爆时间在 500 ms 以内，段内最大、最小起爆时间相差较小；第 21 段雷管后同段起爆时间误差较大，这是由延期药的特性决定的[14]。但所有雷管均无串段，相邻段雷管最小起爆时间间隔(后一段雷管所有测试样本的最小值减去前段样本内的最大值)是第 9～10、13～14 段雷管的 6 ms。

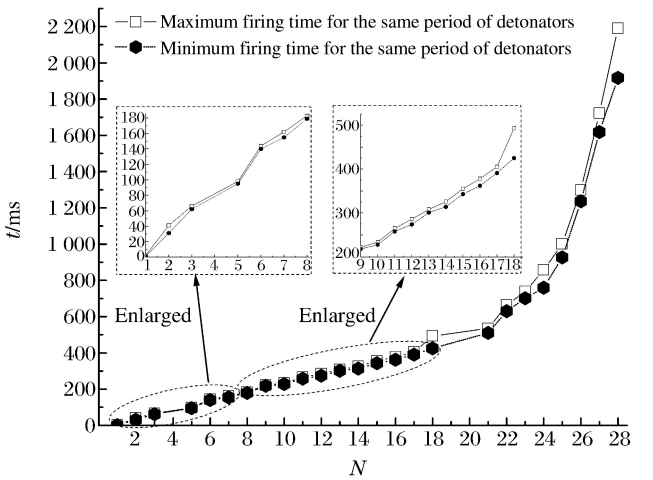

图 1　雷管各段微差起爆时间

Fig. 1　Time detonated for every period of the detonators

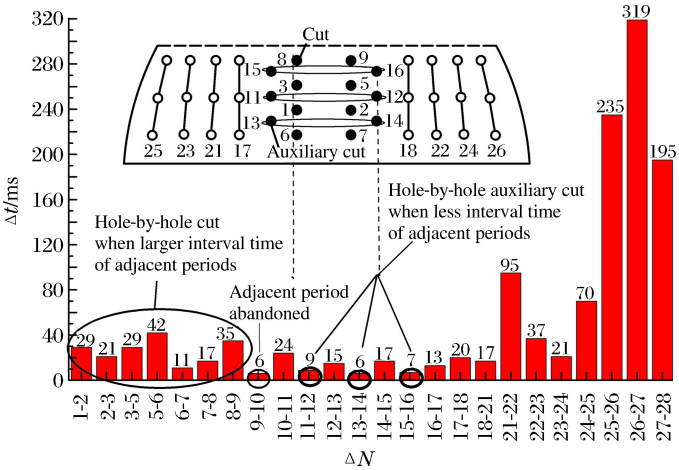

图 2　雷管相邻段最小间隔时间与渝中隧道掏槽分段设计

Fig. 2　Minimum interval time of adjacent periods of detonators and design of detonating time for cut blasting

上述雷管段数增加且不串段是实现掏槽逐段爆破的关键，这也是过去用非电管较难完成的。由于前 10 段雷管中最小段差是第 9～10 段的 6 ms，为避开主掏槽起爆在第 9 段内，初步设计八孔斜眼逐段掏槽。鉴于辅助掏槽时新自由面已形成，采用短间隔逐孔起爆并以第 11 段作为辅助掏槽的开始段。图 2 为实测雷管相邻各段 ΔN 最小间隔及根据其特点进行的掏槽孔设计，经计算得知，2 次爆破即可完成上台阶掘进。

3　掏槽药量的确定方法和不同微差间隔降振研究

药量的确定方法：现场标定不同药量单孔爆破振动波形，将曲线分不同微差时间逐一叠加，分析振动效果，获取安全振速下最大单孔药量和叠加消振时间段，再将爆前实测的雷管各段延时范围与之关联，最后确定药量。

3.1 单孔爆破振动的标定与掏槽药量范围

在隧道现场按 1.4、1.2、1.0、0.8、0.6 kg 等 5 种药量分次单孔单自由面爆破，每一药量进行 5 次实验，典型振动曲线见图 3。测试结果表明：每种药量振动峰值变化不超过 13%，主频变化不超过 20%。图 3 取自最接近各组测试数据均值的波形。表 1 是不同药量 m 单孔爆破振动峰值的比较。当药量从1.4 kg降到1.2 kg，爆破质点振动峰值速度 v_m 下降 24%；当药量从1.2 kg降到1.0 kg，则 v_m 下降 59%。少于 1.2 kg 的单孔药量下振动衰减较快。

表 1 不同药量下的单孔起爆峰值

Table 1 Maximum vibration superposition velocity by single-hole blasting with different charges

m/kg	v_m/(cm·s^{-1})	t/ms
1.4	0.74	6.5
1.2	0.56	7.0
1.0	0.23	7.5
0.8	0.19	3.5
0.6	−0.16	2.0

由表 1 可知：1.0 kg 药量下峰值振速为 0.23 cm/s，叠加最大振速不可能超过 1.00 cm/s；若定单孔药量 1.0 kg 时振速不超标，药量过于保守。1.2 和 1.4 kg 药量下单孔振动峰值均超过 0.50 cm/s，最大叠加值有可能超过 1.00 cm/s；如果分清超标的微差时段且能避开，就可增加单孔药量。因此，在单孔药量 1.2、1.4 kg 的基础上，进一步研究不同振动叠加过程后，确定药量。

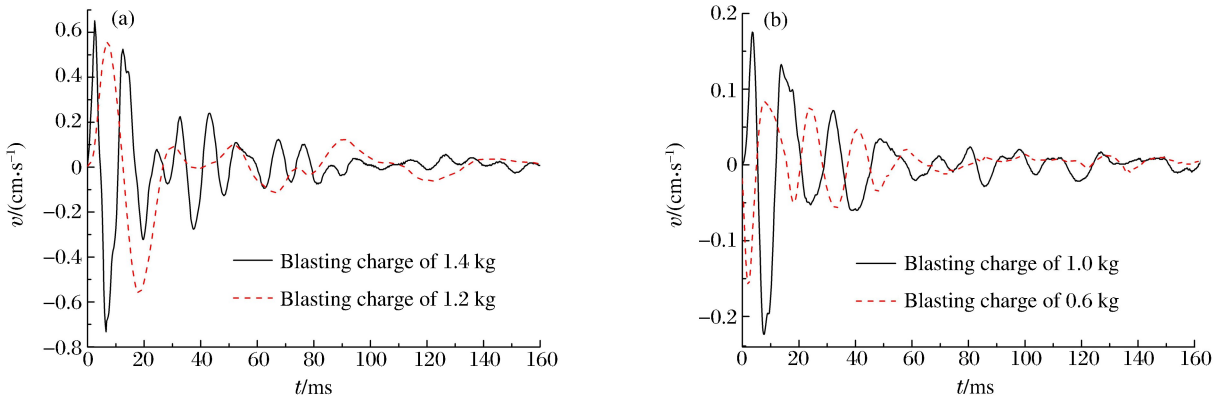

图 3 不同药量下单孔单自由面爆的破振动波形

Fig. 3 Vibration waves formed by single-hole, single free-face blasting with different charges

3.2 不同起爆间隔振动叠加分析

3.2.1 实测振动曲线的拟合

为方便各种条件下不同间隔时间振动速度的叠加计算，需对实测曲线进行拟合。爆破振动信号是非周期函数，将实测离散数据采用傅立叶函数形式拟合爆破振动波，特别复杂的波形用多段函数拟合。用 MATLAB 软件拟合的函数形式为：

$$f(x)=a_0+\sum_{i=1}^{8}a_i\cos(ix\omega)+\sum_{i=1}^{8}b_i\sin(ix\omega) \tag{1}$$

式中：a_0、a_i 和 b_i 随药量不同而不同；x 为时间。

对 1.2、1.4 kg 炸药爆炸下测点振动数据进行拟合，考虑到拟合效果，前者用单段拟合(取前 400 个离散点，时长 100 ms)，后者采用分段拟合(取前 320 个离散点，时长 80 ms，第 100 个离散点处分为 2 段)。这 2 种药量下的爆炸振动拟合结果为：方差在 0.061 以下，相关度在 0.995 以上。

3.2.2 不同微差起爆时振动叠加效果影响研究

一般隧道测点到爆源的距离相对于炮孔孔距大得多，如果掏槽孔装药量相同，则可认为是同一爆源在不同时间起爆，且振动参数相同。本文中分析影响最大的竖直方向振动，则其矢量和简化为代数和：

$$f(t)=\sum_{i=1}^{n}f_i(t) \tag{2}$$

式中：$f(t)$为质点在振动方向的总振速；$f_i(t)$为第 i 列波在该质点处引起的振速；t 为时间。

模拟振动时长 t_m，如采用分段拟合，t_1 为分段时间，由此 1.2 kg 炸药爆炸下的振动叠加公式为：

$$v_{1.2}=\begin{cases}f(t) & t\leqslant\Delta t\\ f(t)+f(t-\Delta t) & \Delta t<t\leqslant t_{\mathrm{m}}\end{cases}\tag{3}$$

$$f(t)=a_0+\sum_{i=1}^{8}a_i\cos(it\omega)+\sum_{i=1}^{8}b_i\sin(it\omega)$$

$$f(t-\Delta t)=a_0+\sum_{i=1}^{8}a_i\cos[i(t-\Delta t)\omega]+\sum_{i=1}^{8}b_i\sin[i(t-\Delta t)\omega]$$

式中：$f(t)$为全段曲线公式，$f(t-\Delta t)$为间隔时间Δt 后的曲线公式，$t_{\mathrm{m}}=100$ ms。

1.4 kg 炸药爆炸下的振动叠加公式为：

$$v_{1.4,\Delta t<t_1}=\begin{cases}f_1(t) & t\leqslant\Delta t\\ f_1(t)+f_1(t-\Delta t) & \Delta t<t\leqslant t_1\\ f_1(t-\Delta t)+f_2(t) & t_1<t\leqslant t_1+\Delta t\\ f_2(t)+f_2(t-\Delta t) & t_1+\Delta t<t\leqslant t_{\mathrm{m}}\end{cases}\tag{4a}$$

$$v_{1.4,\Delta t\geqslant t_1}=\begin{cases}f_1(t) & t\leqslant t_1\\ f_2(t) & t_1<t\leqslant\Delta t\\ f_1(t-\Delta t)+f_2(t) & \Delta t<t\leqslant t_1+\Delta t\\ f_2(t)+f_2(t-\Delta t) & t_1+\Delta t<t\leqslant t_{\mathrm{m}}\end{cases}\tag{4b}$$

式中：$f_1(t)$为第 1 段曲线公式，$f_2(t)$为第 2 段曲线公式，$f_1(t-\Delta t)$以及 $f_2(t-\Delta t)$为间隔时间Δt 后的曲线公式，公式形式与 1.2 kg 装药时类似，$t_{\mathrm{m}}=80$ ms，$t_1=25$ ms。

依据上述 2 种药量单孔爆破振动叠加公式(3)～(4)，利用 MATLAB 软件计算得到 2 种药量以每间隔1 ms为增量、不同时间间隔下波叠加形成的正负最大峰值，如图 4 所示。由于微差间隔大于 40 ms 后最大叠加振速均低于 1.00 cm/s 控制指标，因此只画出间隔时间为 1～40 ms 的振动叠加变化，先爆孔不参加叠加的部分图中未表示。在 v 轴用水平线表示单孔峰值。图中以不同标识数据点代表振速增、减(以单孔峰值为增减标准，大于 1.00 cm/s为超标)情况，特别标明第 1～2 段雷管起爆间隔的区间为 29～40 ms(根据图 1 做出)，以方便单孔药量的确定。

根据图 4，全程叠加振速最大处位于双孔同时起爆及附近小间隔时间内，1.2 kg 药量的最小叠加振速是在二分之一周期 $T/2$ 处(图 4(a)为 12.5 ms)，1.4 kg 药量的最小振速则不在 $T/2$ (4.5 ms)微差时间；总体上，起

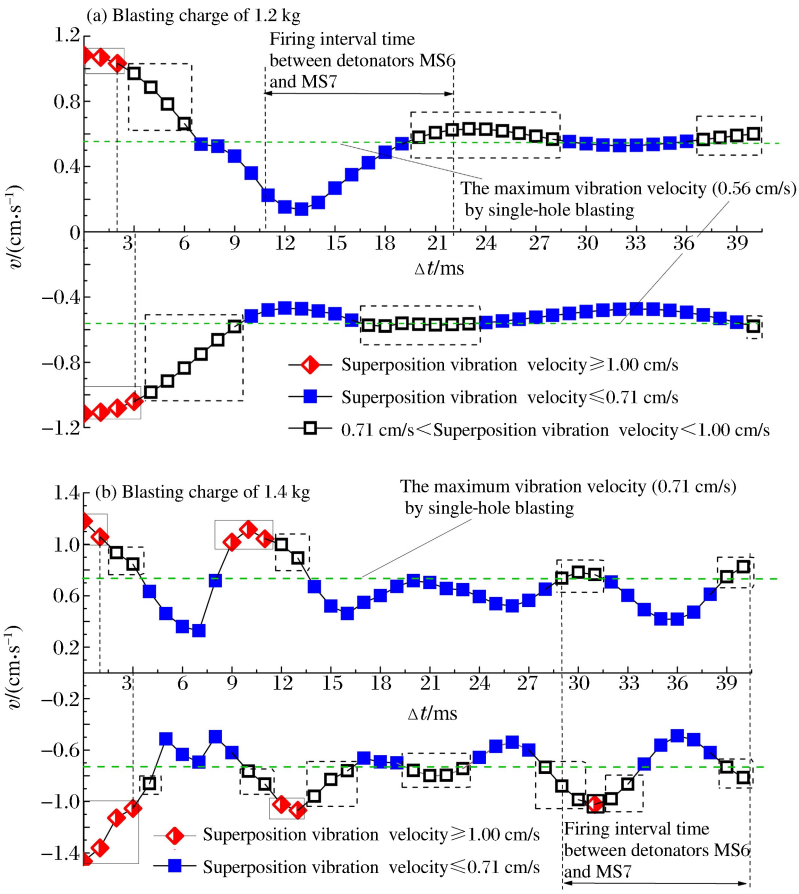

图 4　1.2 和 1.4 kg 药量下在不同微差时间起爆叠加振动峰值

Fig. 4　Variation of maximum superposition vibration velocities with millsecond blasting interval time for the charge of 1.2 and 1.4 kg

爆间隔越大,振速越低,大多不超过 1.00 cm/s,但有波动,不一定小于单孔峰值振速。

2 种药量下,振动叠加也有较大差异:装药 1.2 kg 时,起爆间隔大于 3 ms 后,振速均不超过 1.00 cm/s的安全指标;但装药 1.4 kg 时,有起爆间隔为 31 ms 时振速超过 1.00 cm/s 的情况。

针对半周期间隔起爆消振,分析了 1.2、1.4 kg 等 2 种药量半周期起爆振动波形,为节省篇幅仅列出 1.4 kg 药量下炮孔起爆间隔 4.5 ms(第 1 个半周期)时的振动波形(图 5),其中虚线部分波形为先起爆未参加叠加的部分,实线部分为叠加后的振速,计算得到的叠加峰值见表 2。

图 5 中 A 区 5～10 ms 叠加波形变化较大是由前后半周期、半周期内振速及变化趋势不同造成的。A 区 2 波叠加过程局部放大图清楚地表达了 2 波叠加时各自的变化趋势。

从图 4 可看出:1.2、1.4 kg 等 2 种单孔装药起爆时差大于半周期以上,其叠加振速超过单孔振动峰值均较普遍。

由表 1～2 可知:1.2 和 1.4 kg装药以 $T/2$ 微差间隔时间起爆后,无论正向还是负向的叠加峰值均小于叠加前的单孔振动峰值,1.4 kg药量下叠加后峰值衰减并不像 1.2 kg 药量时明显。尤其是对于主周期较短、负向振动衰减较慢的情况,降振效果有限,如 1.4 kg 药量的情况下较负向单孔振动峰值仅下降 5%。需要指出:尽管以半周期间隔起爆可以减振,但从图 4(b)可知,它不是最小值 0.33 cm/s(Δt = 7 ms),超过半周期起爆仍可能超过安全振速,如 Δt = 7～13 ms,而在现场严格按半周期起爆是很难做到的。

表 2 不同药量间隔半周期起爆叠加振动峰值对比

Table 2 Maximum vibration at different charge detonated delay $T/2$

m/kg	时间区间	t/ms	v_m/(cm·s^{-1})	t/ms	v_m/(cm·s^{-1})
		正向振动		负向振动	
1.2	叠加前全区域	7.00	0.56	18.30	−0.56
	叠加后区域	44.24	0.10	30.82	−0.47
1.4	叠加前全区域	2.50	0.65	6.50	−0.74
	叠加后区域	16.70	0.53	10.64	−0.70

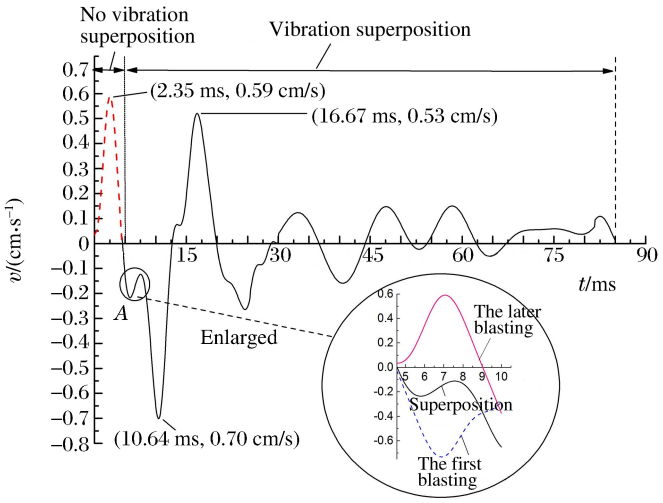

图 5 1.4 kg 炸药起爆间隔二分之一周期时的叠加振动波形

Fig. 5 Vibration superposition curves at 1.2 kg charge detonated delay half period of blasting vibration

3.3 掏槽孔药量和循环进尺的确定

将图 4 的不同微差段叠加振动峰值与图 1 实测雷管各段延时间隔范围关联,作图 6。图 6 中纵坐标为叠加振速值,横坐标是起爆间隔时差;实线椭圆区是振速超过 1.00 cm/s 的相邻段微差间隔时间,虚线椭圆区是振速超过该药量单孔起爆振速峰值但小于 1.00 cm/s 的起爆时差。图 6(a)是 1.4 kg 装药不同时差起爆叠加振速与各相邻段起爆时段的关系图,图中振速超过 1.00 cm/s 的共有 3 个时段,即当起爆时差在 0～3、9～13、31 ms 时叠加后振速一定超过控制振速。第 6～7 段雷管爆炸引起的振动叠加速度将在起爆间隔 9～13 ms 时超标;第 1～2、2～3、3～5 段雷管爆炸引起的振动速度在微差时间为 31 ms 时可能超标。由于样本测试数据存在一定误差,与其他相邻段也存在振速超标的可能,所以采用 1.4 kg 单孔药量无法控制要求的振速指标。

从图 6(b)可知:1.2 kg 装药下雷管爆炸引起的振动速度只在微差间隔 3 ms 内超过 1.00 cm/s,其余时间段不超标。其中第 1～2、2～3、3～5、5～6(因最小时差已超 42 ms,图中未表示)、6～7 段起爆时差都有部分超过单孔峰值,也有部分时差低于单孔峰值,但均不超过 1.00 cm/s 控制标准。

根据图 2 可知，用于掏槽爆破的前 9 段段间最小起爆间隔是 11 ms，因此选用 1.2 kg 单孔药量可以保证振速不超标；结合图 6(b)中雷管实际间隔内叠加振速最大不超过 0.64 cm/s，与 1.00 cm/s振速相比，有足够的安全系数。

考虑到单孔单自由面爆破波形有一定离散性，将 5 次 1.2 kg 装药单孔爆破分别进行上述振动叠加分析，超标最大微差间隔为5 ms，仍在安全范围内。为节省篇幅，不再列出其振动叠加图。

综上分析，掏槽单孔装药最终确定为 1.2 kg，这样将确保控制振速低于 1.00 cm/s。

当药量取 1.2 kg 时，依据掏槽孔(55～60)%的装药系数，孔深可取 2.0 m；按掏槽水平角 65°设计进尺大于 1.8 m，这在高安全指标下是一个较理想的进度。

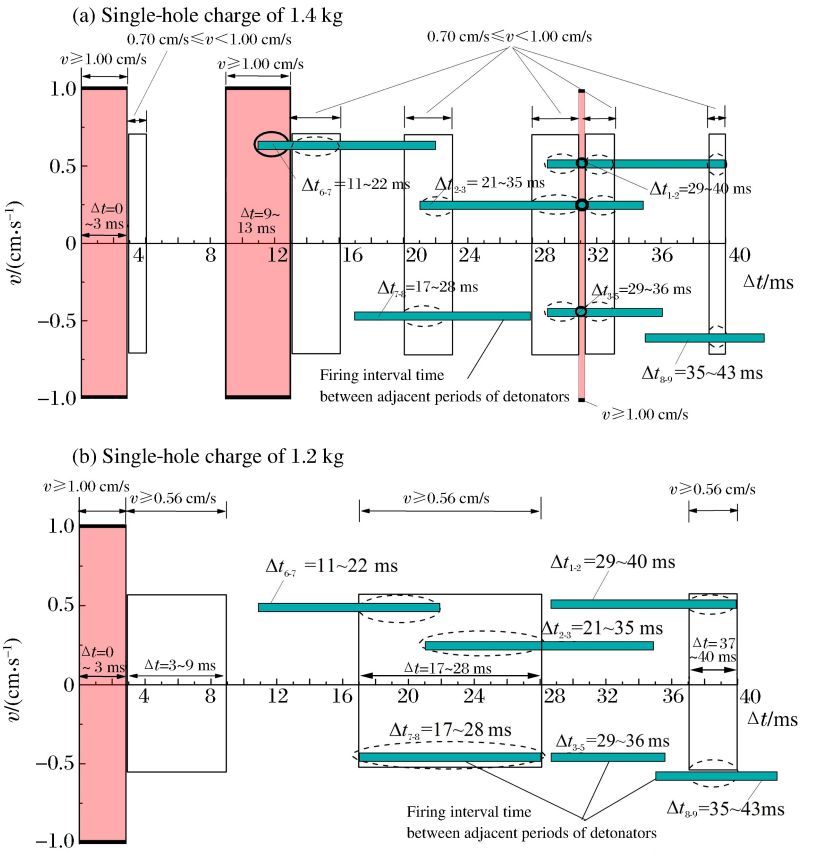

图 6　雷管各段间隔时间与图 4 振速超过单孔峰值时间段的比较

Fig. 6　Interval times of adjacent periods for detonators compared with ones at which the superposition vibration velocity is greater than the maximum vibration velocity by single-hole blasting in Fig. 4

4　现场验证与逐段爆破振动特点分析

4.1　振动控制应用效果

将以上确定的爆破参数严格按要求用于渝中连接隧道爆破施工，首次实现非电雷管逐孔逐段掏槽爆破，达到了全程微振控制目标。在 4 个月爆破施工中，每循环进尺 1.8～2.0 m，爆破振速均小于 1.00 cm/s 控制指标，大多数振动不超过 0.80 cm/s。图 7 给出了掏槽所在 1 区典型爆破振动曲线，根据各段延时范围在图中标出了主掏槽区、辅助掏槽区、扩槽区和周边眼区。

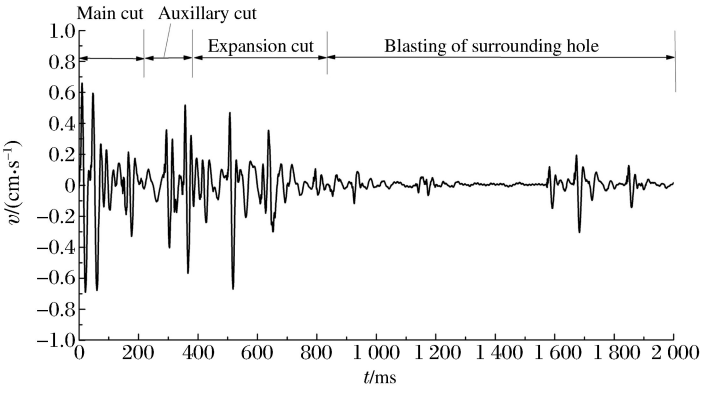

图 7　1 区爆破振动波形

Fig. 7　Vibration wave curve in the first area blasted

4.2　掏槽区振动分析

现场 100 余次爆破振动测试数据表明：掏槽爆破是爆破全程振动峰值所在区，也是振动分析的重点。逐段爆破由于爆破间隔时间短，其振动波形图与以往非电雷管有很大不同，与电子雷管爆破振动曲线相比也有自己的特点，因此，同样有必要探讨其小间隔起爆振动规律。

图 8 是同一区间上台阶爆破时提取的 5 次掏槽振动曲线，从图中可以看各次掏槽爆破振动有一些共同特征：爆破振动的主周期在 25～37 ms 之间，振速在 0.80～0.50 cm/s 波动；起爆 60 ms 后振速急剧下降。为表达清楚和进一步详细分析，将 3 月 16 日的掏槽爆破振动曲线单独作图(图 9)。

图 9 中爆破振动主周期为 29 ms，C 点为主周期结束点。根据图 1 得第 2 段起爆时间为 31～41 ms，因此第 1 段主周期内完全没有参加叠加，这从图 9 也可看出；由图分析第 2 段起爆时刻应非常接近起爆 33 ms 时，此时第 1 段起爆尾波与第 2 段起始振动叠加使波形发生了畸变，另外第 2 段峰值也与图 5 中第 1～2 段起爆间隔 21～35 ms 叠加振速减弱趋势一致。

D 点是以第 2 段为主的振动叠加的波峰，由于第 3 段起爆时间为 62～66 ms，又根据图 8 可知其他 4 次振动峰值相应时刻均在 55 ms 以内，因此可以判定这是第 2 段的另一个波峰。

一个非常重要的现象是，全部振动数据均表明：60 ms 以后振速发生了显著下降，如图 9 中全场振动峰值为 0.69 cm/s，60 ms 以后最大振动为 G 点的 0.33 cm/s，较最大值下降 50%，说明此时第 2 临空面一定形成。因为第 3 段后续各孔爆破时各相邻段微差间隔范围、药量等与前 2 段并没有根本变化。

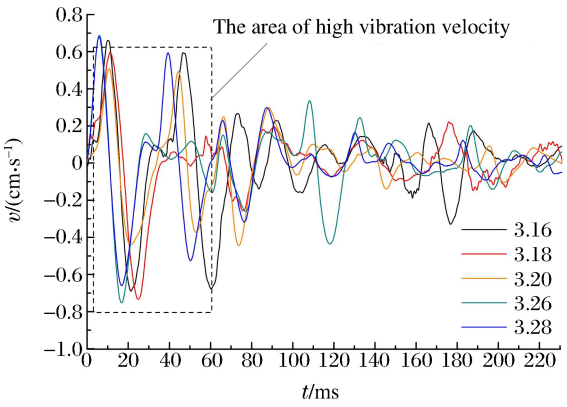

图 8 掏槽爆破振动波形

Fig. 8 Vibration wave curves for serial cut blasting

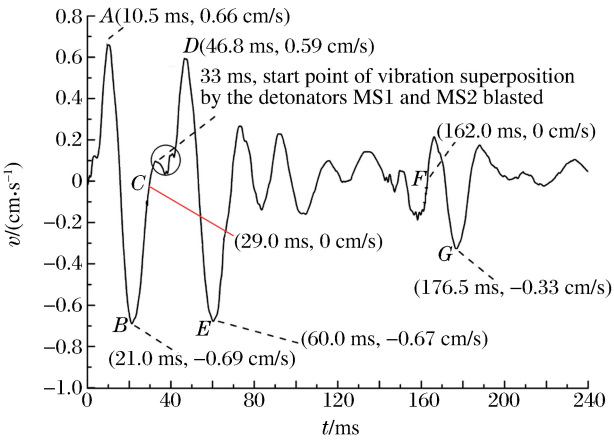

图 9 典型掏槽爆破振动分析

Fig. 9 Representative vibration wave curves for cut blasting

依据以上分析，掏槽爆破第 2 临空面形成当在 50～60 ms，它对控制振动有主导作用，在其形成后振动叠加对振速的影响已居于次要地位，如第 6～7 段间最小微差时间为 11 ms(144～155 ms)，是掏槽各段间微差间隔最小的时段，从图 9 对应时段看振速也很低。因此第 2 段以后微差时间没有必要大于 50 ms，振速即可大幅降低，这对相邻段间微差时间的选择是有意义的。

根据国外学者建议[15]，隧道微差爆破在考虑降振时时差宜大于 50 ms 以上。而从本文 3.3 节研究结果看：在一定安全振速要求下，微差起爆的叠加振速与不同单孔药量、不同微差间隔时间有关联关系。如从图 6 可知第 1～2、2～3 段起爆微差间隔范围都小于 40 ms，在 1.2 kg 单孔药量振速不超标，但在 1.4 kg 药量下超标，同样证明在一定微差间隔时间范围内，爆破降振并不单纯是以微差间隔时间大于 50 ms 就可决定的，还需要结合微差爆破叠加振速的具体情况进行分析。

5 结 论

(1)以实测雷管各段准确延时范围为基础，针对各段不同间隔时差特性进行掏槽设计和分段设计；突破了按雷管名义段别设计的传统做法；隧道掏槽实现不跳段逐孔起爆。这些对于城市隧道爆破振速精确控制具有重要意义。

(2)提供了一种隧道控制爆破选择单孔药量的新方法。即在现场测试不同药量单孔单自由面爆破振动数据，利用傅立叶函数拟合得到各药量下不同微差间隔(以 1 ms 为增量)爆破形成的叠加振速值，并将其与爆前实测的各雷管相邻段最大、最小延时时间相关联，以此确定单孔起爆药量。采用这一方法

确定的药量比根据萨氏公式计算得到的药量更准确，可为今后进行相关研究提供参考。

(3)掏槽逐孔逐段爆破中，第 1 段或 2 段雷管起爆后均有可能是全程爆破振动峰值所在时段。起爆 60 ms 后必将形成第 2 临空面，因此其形成时间为 50～60 ms。第 2 临空面形成后，所有时间段对应振速较最大振速值下降 50%以上，对爆破振动降振起主导作用，此时即使振动叠加对振速的影响也较小。

(4)一般情况下，起爆时差为半周期时叠加振速大多小于单孔振动峰值，但并不是叠加振速最小值，且超过半周期间隔起爆仍有可能出现振速叠加超标，鉴于现场爆破精确按半周期间隔起爆非常困难，其应用意义是有限的。

(5)现场应用及爆破测试表明：在采用普通爆破器材的条件下全线爆破振动均在 1.00 cm/s 以下，实现了与电子雷管类似的高安全性指标，且成本较后者大幅降低，这对今后城市隧道爆破振动的严苛控制和低成本施工具有示范意义。

参考文献：

[1] 朱泽兵，张永兴，刘新荣，等. 特大断面车站隧道爆破开挖对地表建筑物的影响[J]. 重庆大学学报，2010，33(2)：110-116.
Zhu Ze-bing, Zhang Yong-xing, Liu Xin-rong, et al. Influence of blasting vibration on adjacent buildings of station tunnel[J]. Journal of Chongqing University, 2010,33(2):110-116.

[2] 于春红，程克森. 微振控制爆破技术在浅埋暗挖地铁隧道中的应用[J]. 石家庄铁道学院学报，2004，17(4)：93-95.
Yu Chun-hong, Cheng Ke-sen. The application of micro-vibration control blasting technology in shallow subway tunnel construction[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2004,17(4):93-95.

[3] 许登根. 穿越火车站候车厅的浅埋隧道控制爆破[J]. 爆破，2004，21(4)：22-24.
Xu Deng-gen. Controlled blasting for shallow-buried tunnel under the waiting room in a railway station[J]. Blasting, 2004,21(4):22-24.

[4] 田振农，孟祥栋，王国欣. 城区隧道电子雷管起爆错相减振机理分析[J]. 振动与冲击，2012，31(21)：108-111.
Tian Zhen-nong, Meng Xiang-dong, Wang Guo-xin. Mechanism analysis of fault-phase vibration reduction for tunnel blasting initiated by electronic detonators in city area[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(21):108-111.

[5] 李顺波，杨军，陈浦，等. 精确延时控制爆破振动的实验研究[J]，爆炸与冲击，2013，33(5)：513-518.
Li Shun-bo, Yang Jun, Chen Pu, et al. Experimental study of blasting vibration with precisely-controlled delay time[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(5):513-518..

[6] 高文学，颜鹏程，李志星，等. 浅埋隧道爆破开挖及其振动效应研究[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(增刊 2)：4153-4157.
Gao Wen-xue, Yan Peng-cheng, Li Zhi-xing, et al. Blasting excavation and vibration effects of shallow tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(Suppl2):4153-4157.

[7] 郑大榕. 南京地铁隧道爆破开挖与振动控制[J]. 铁道工程学报，2004，83(3)：73-75.
Zheng Da-rong. Excavation by blasting and vibration control of tunnel in Nanjing subway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004,83(3):73-75.

[8] 林从谋，陈礼彪，蒋丽丽，等. 高速公路扩建大断面特小净距隧道爆破稳定控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(7)：1371-1378.
Lin Cong-mou, Chen Li-biao, Jiang Li-li, et al. Research on blasting stability control technology of large-span highway tunnel with super-small clear spacing at highway expansion project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(7):1371-1378.

[9] 陈士海，燕永峰，戚桂峰，等. 微差爆破降震影响因素分析[J]. 岩土力学，2011，32(10)：3003-3008.
Chen Shi-hai, Yan Yong-feng, Qi Gui-feng, et al. Analysis of influence factors of interference vibration reduction of millisecond blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(10):3003-3008.

[10] 赵明生，张建华，易长平. 基于单段波形叠加的爆破振动信号时频分析[J]. 煤炭学报，2010，35(8)：1279-1282.
Zhao Ming-sheng, Zhang Jian-hua, Yi Chang-ping. Time-frequency analysis based on single-stage addition of waveforms of blasting vibration signals[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(8):1279-1282.

[11] 赵明生,梁开水,余德运,等.段数对爆破振动信时频特性影响分析[J].煤炭学报,2012,37(1):55-61.
Zhao Ming-sheng, Liang Kai-shui, Yu De-yun, et al. Effect of segments on time frequency characteristics of blasting vibration signals[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(1):55-61.

[12] 张志毅,杨年华,卢文波,等.中国爆破振动控制技术的新进展[J].爆破,2013,30(2):25-32.
Zhang Zhi-yi, Yang Nian-hua, Lu Wen-bo, et al. Progress of blasting vibration control technology in China[J]. Blasting, 2013,30(2):25-32.

[13] 魏晓林,郑炳旭.干扰减振控制分析与应用实例[J].工程爆破,2009,15(2):1-6.
Wei Xiao-lin, Zheng Bing-xu. Analysis of control blast-induced vibration and practice[J]. Engineering Blasting, 2009,15(2):1-6.

[14] 陈剑,解立峰.影响导爆管雷管延时精度的因素分析[J].火工品,2012(6):21-24.
Chen Jian, Xie Li-feng. Analysis of the factors influencing on the delay precision of nonel detonator[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2012(6):21-24.

[15] Langefors U, Kihlström B. The modern technique of rock blasting[M]. New York, London: John Wiley & Sons Inc, 1967:192-193.

A precisely-controlled blasting method and vibration analysis for tunnel excavation under dense buildings

Gong Min[1], Wu Hao-jun[1], Meng Xiang-dong[2], Li Yong-qiang[3]
(1. *School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*;
2. *Chongqing Urban Construction Holding (Group) Co., Ltd, Chongqing* 400013, *China*;
3. *Chongqing Juneng Construction Group Co., Ltd, Chongqing* 404100, *China*)

Abstract: To meet higher security requirements for blasting vibration from urban tunnel excavation under dense buildings, a new blasting technology was proposed and the corresponding method for obtaining parameters was explored. The proposed blasting technology uses non-electric detonators to precisely control blasting vibration. Chongqing Yuzhong connecting tunnel was taken as the research background. By applying Fourier function and MATLAB software, the vibration velocity curves were fitted for single-hole blasting with different charges and the quantification data of vibration superposition at different millisecond intervals from 1 to 50 ms were analyzed. The vibration-reduction effect was discussed for different millisecond intervals. The parameters about blasting charge and detonating time delayed were determined under given vibration velocities. Interval characteristics of each period between detonators in the field were measured and analyzed. Accordingly, the blasting scheme was designed, which using hole-by-hole cut blasting to control vibration. The blasting vibration velocity measured in the field is below 1.00 cm/s, and the corresponding reasonable single-hole charge is 1.2 kg for avoiding vibration superposition. The vibration velocity peak occurs after the detonation of the first or second-period detonator in the main cut area, which is consistent with the theoretical results. And the vibration velocity decreases by more fifty percent after 60 ms of hole-by-hole blasting. So blasting vibration can be precisely controlled by using non-electric detonators under high safety standard.

Key words: mechanics of explosion; vibration reduction; hole-by-hole cut; tunnel excavation; precisely-controlled; vibration superposition; blasting

(责任编辑 张凌云)