

文章编号:1006-2106(2014)05-0079-06

# 引水隧洞电子雷管爆破震动特征研究<sup>\*</sup>

程围峰<sup>\*\*</sup> 王振宇 陈银鲁 梁 旭 刘国华

(浙江大学, 杭州 310058)

**摘要:**研究目的:受线路位置的限制,处于市区的浅埋隧道往往近距离穿越一些地表建筑物,施工环境十分复杂。爆破开挖会影响到建筑物的安全,引发工程爆破事故纠纷。本文以杭州市钱塘江引水入城工程浅埋段爆破为例,分析电子雷管爆破震动和普通雷管爆破震动的特点,为解决复杂环境条件下控制爆破问题提供依据。

**研究结论:**通过对杭州市钱塘江引水入城工程浅埋段爆破震动测试数据分析,得出:(1)电子雷管爆破震动峰值震速低、持续时间短、波形均匀、稳定性好,减震效果明显;(2)电子雷管爆破震动频带范围宽,呈现多峰特征,高频成分相对较多,其时能密度曲线峰值多而密集,无明显分离的突峰点,逐孔起爆的干扰和叠加作用明显;(3)电子雷管精度高、安全性能好,能够有效改善爆破效果和降低炸药单耗,综合效益显著;(4)本工程所采取的控制爆破和隧洞支护措施取得了较好的应用效果,对城市浅埋段控制爆破有一定的参考意义。

**关键词:**隧洞;电子雷管;爆破;震动特征;时能密度

中图分类号:TV542 文献标识码:A

## Research on the Vibration Characteristic of Electronic Detonator Blasting for Water Diversion Tunnel

CHENG Wei-feng, WANG Zhen-yu, CHEN Yin-lu, LIANG Xu, LIU Guo-hua

(Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

**Abstract: Research purposes:** The shallow tunnels in urban areas, which are close to some surface buildings, are usually excavated by blasting because of line positions. Thus, the construction conditions are very complex. The vibration effects produced by blasting will endanger the safety of buildings close to tunnels and will lead blasting accident disputes. This paper, taking the shallow tunnel of Qiantang River diversion project as an example, the vibration characteristic of electronic detonator blasting and millisecond detonator blasting and their varying laws are studied so as to offer the basis for the decision-making on controlled blasting under complicated environment conditions.

**Research conclusions:** For the research on the analysis of measured data of blasting vibration, some useful results can be concluded. Firstly, the maximum vibration velocity of Electronic Detonator Blasting (EDB) is smaller than that of Millisecond Detonator Blasting (MDB), and EDB has a relative short sustained time. Secondly, the wave of EDB is well-distributed and steady. The frequency coverage of EDB is wider and has multiple peaks, the high-frequency components of EDB are more abundant than that of MDB. The time-energy density curve of EDB doesn't have the abrupt and separated fluctuation, which indicates the interference and superposition of EDB are very distinct. Moreover, Electronic Detonator has high precision and good safety performance, and it can effectively improve the blasting effect and reduce the consumption of explosives. The controlled blasting and tunnel support measures of this project have

<sup>\*</sup> 收稿日期:2013-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50509021, 51079127)

<sup>\*\*</sup> 作者简介:程围峰,1982年出生,男,工程师。

achieved a good effect, which provide the valuable reference to the study on controlled blasting for shallow tunnels in urban areas.

**Key words:** tunnel; Electronic Detonator; blasting; vibration characteristic; time – energy density

## 1 引言

随着社会经济的发展,城市地下工程建设日益增多。由于受线路位置、工程地质条件的限制,隧道近距离穿越地面建(构)筑物的现象很多<sup>[1-3]</sup>。隧道爆破施工可能影响邻近建(构)筑物的安全,引发工程纠纷,控制爆破有重要的现实意义。近年来国内外研究者提出了减少爆破药量、优化装药结构、干扰减震、开挖减震沟等减震技术措施<sup>[5-7]</sup>。限制最大单段装药量是减震的最直接有效的方法<sup>[7]</sup>,其主要途径有:减少循环进尺和增加雷管段数。减少循环进尺能有效地减少爆破震动的影响,但会降低工效和进度。对于普通毫秒雷管来说,由于其延时误差较大,高段别雷管常发生“串段”起爆,不可能过多的增加雷管段数来降低爆破震动,这也是普通毫秒雷管减震的重要技术瓶颈之一。

数码电子雷管是一种新型电雷管产品,延期时间可以以1 ms间隔灵活设置,延期精度在0.2 ms以内,延期发火误差与设定的段别高低无关<sup>[7]</sup>,不会“串段”起爆,能够实现隧道掌子面上逐孔起爆,为最大限度地增加雷管段数和减震提供了有力的技术支持。本文结合杭州市钱塘江引水入城工程浅埋隧洞,进行爆破震动影响评估,首次批量应用国产电子雷管进行控制爆破作业,采用多种手段对大量爆破震动实测数据进行分析,对比研究电子雷管爆破震动特征和减震效果,为进一步优化爆破参数和发展精确控制爆破技术提供理论和实践支持。

## 2 电子雷管及其起爆系统

电子雷管由瞬发雷管外挂电子电路构成,其主要元件包括储能电容、点火头元件和电子延期体,如图1所示。普通毫秒雷管和电子雷管的根本区别是延时装置不同,前者用化学延期药来控制延期,后者利用数字化的电子芯片控制延期,从而能大大提高延时精度。电子雷管起爆系统由电子雷管、编码器和起爆器三部分组成<sup>[8]</sup>。将电子雷管脚线连接到编码器上,编码器会识别出该雷管的信息,在编码过程中,可利用编码器进行系统测试,使编码器与每一发电子雷管独立通信,测定其状态,如发现错误,编码器将提示出错信息,只有电子雷管本身及其在网路中的连接情况都正常时,编码器才会提示现场操作人员对该雷管设定延时。起

爆器通过双绞线与编码器连接,起爆器能自动识别与其连接的编码器,对各个编码器及编码器回路中的雷管进行检查,当雷管、编码器和起爆网络没有任何错误时,起爆器才能触发整个起爆系统,如图2所示。

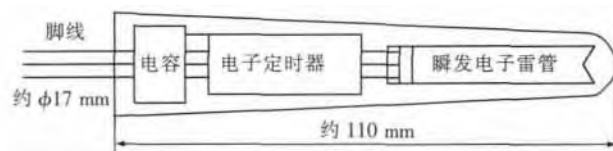


图1 电子雷管基本控制原理图

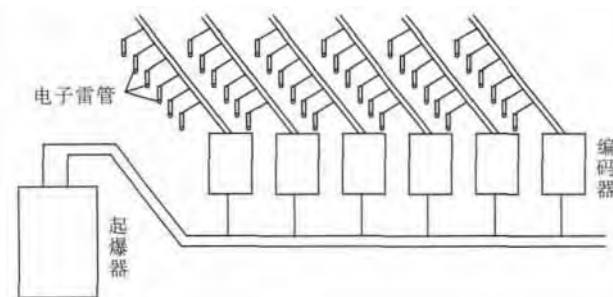


图2 电子雷管起爆网络示意图

## 3 工程概况及控制爆破方案

### 3.1 工程概况

杭州市钱塘江引水入城工程线路总长约12 km,输水规模25 m<sup>3</sup>/s,为无压输水。主要由取水枢纽、上游输水渠道、倒虹吸、输水隧洞、出口节制闸与泵站、下游输水渠道、连接河道等建筑物组成。输水隧洞全长8 022 m,马蹄形断面净内径5.3 m×5.4 m,采用C30W8F50钢筋混凝土衬砌。其中洞7+568.5~洞7+698.5为浅埋段,如图3、图4所示,沟底高程23.2~29.3 m,隧洞洞底高程为-4.99 m,洞顶高程为1.6 m,洞顶上覆盖岩土层厚度为21.6~27.7 m。浅埋段基岩以志留系上统唐家坞组二段(S<sub>3</sub>t<sup>2</sup>)厚层-块状长石英中细粒砂岩为主,围岩本身抗风化能力、抗软化能力较强,但由于断层F16通过,受构造影响围岩较破碎。根据钻孔及物探资料,该处表层残坡积含碎石粉质黏土层厚度约3~5.5 m,全强风化带一般厚5~8 m,以下为弱风化,钻孔岩芯较破碎,岩体小结构面较发育、岩体完整性差。

### 3.2 爆破安全评估

隧洞浅埋段上方有密集民房、厂房及简易瓦房,建



298组测点布置如图5所示。《爆破安全规程》(GB 6722—2011)规定以质点的最大震动速度为标准进行爆破震动安全评价。在本工程中,爆源和测点之间距离较小,监测结果表明爆破震动垂直震动速度大于水平震动速度,故本文以垂直震动速度为例,对普通毫秒雷管和电子雷管爆破震动测试数据进行对比分析,研究电子雷管的爆破震动特征。

#### 4.1 典型震速时程曲线

普通毫秒雷管爆破和电子雷管爆破垂直方向典型震动波形图如图7、图8所示。根据图7、图8,普通毫秒雷管和电子雷管爆破的最大震速均发生在起爆时刻,原因掏槽孔爆破时岩体的夹制作用大、爆破地震强烈。普通毫秒雷管爆破震动震速的离散程度较高,波形起伏大;而电子雷管爆破震速数值基本上相差不多,波形较均匀。峰值振速、频率和震动持续时间被称为爆破震动的三要素,从持续时间来看,普通毫秒雷管爆破震动持续时间比电子雷管爆破震动持续时间长,当峰值震速超过结构的弹性限值,爆破震动持续时间越长越不利于结构安全<sup>[6]</sup>,持续时间较短的电子雷管爆破在一定程度上有利于降低对地面建筑物的危害。

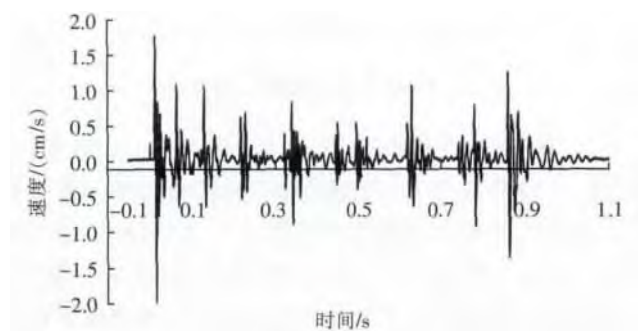


图7 普通毫秒雷管爆破垂直震速-时程曲线

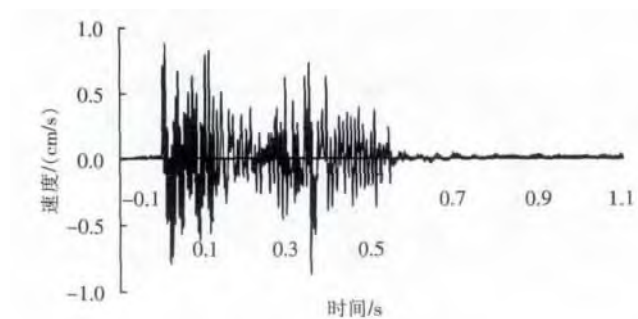


图8 电子雷管爆破垂直震速-时程曲线

#### 4.2 爆破震动信号时能密度分析

由于普通毫秒雷管延时起爆误差较大,通过实测数据识别其真实微差时间对优化爆破参数具有重要意义<sup>[9]</sup>。基于小波变换的时能密度法能突出被分析信

号的能量突变,也为分析电子雷管的爆破震动时能密度特征提供了先进手段。

##### 4.2.1 基于小波变换的时能密度法的原理

设 $\psi(t)$ 为一平方可积函数,即 $\psi(t) \in L^2(R)$ ,若其傅里叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足条件:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则 $\psi(t)$ 称为一个基本小波或小波母函数。将小波母函数 $\psi(t)$ 进行伸缩和平移,得到小波函数基 $\psi_{a,\tau}(t)$ :

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad a, \tau \in R; a > 0 \quad (2)$$

式中 $a, \tau$ ——分别为伸缩因子和平移因子。

将任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 在小波基下展开,称为函数 $f(t)$ 的连续小波变换,其表达式为:

$$\begin{aligned} WT_f(a) &= \langle f(t), \psi_{a,\tau}(t) \rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \end{aligned} \quad (3)$$

根据内积定理(Moyal定理),有下式成立:

$$\frac{1}{C_\psi} \int_R \frac{da}{a^2} \int_R |WT_f(a, \tau)|^2 d\tau = \int_R |f(t)|^2 dt \quad (4)$$

根据文献[9]引入能量密度概念,即将 $\frac{1}{a^2 C_\psi} |WT_f(a, \tau)|^2 \Delta a \Delta \tau$ 看作以尺度 $a$ 和时间 $\tau$ 为中心、尺度间隔 $\Delta a$ 、时间间隔 $\Delta \tau$ 的能量,得到:

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \int_R E(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$E(\tau) = \frac{1}{C_\psi} \int_R \frac{1}{a^2} |WT_f(a, \tau)|^2 da \quad (6)$$

式(6)就是信号的随时间 $\tau$ 变化的时能密度函数。

##### 4.2.2 时能密度特征分析

对图7、图8的典型波形进行连续小波变换并按式(6)计算其时能密度。根据图9可以清楚地分辨出时能密度曲线的8个突峰,分别对应1~15段奇数段雷管段别的起爆时刻,实际起爆时刻为0 ms, 45.2 ms, 112.8 ms, 322.2 ms, 436.2 ms, 516.6 ms, 617.4 ms, 644.4 ms。各段雷管的名义起爆时刻分别为0 ms, 50 ms, 110 ms, 200 ms, 310 ms, 460 ms, 650 ms, 880 ms,对比可见第7段以后的高段位雷管实际起爆时刻与名义起爆时刻相差很大,出现“串段”起爆现象。电子雷管震速时能密度曲线(如图10所示)的峰值多而密集,不易分辨出显著分离的突峰点,这与电子雷管逐孔起爆、微差时间很短、波形叠加有关。

##### 4.3 频谱特征

爆破地震波的频谱随距离、装药量、地形地质特征



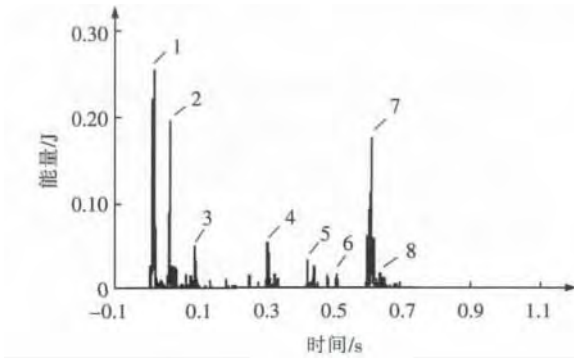


图9 普通毫秒雷管爆破垂直震速时能密度曲线

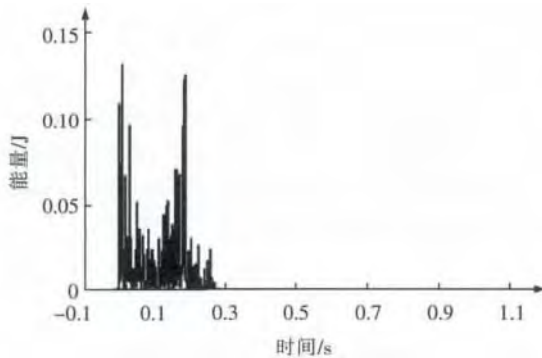
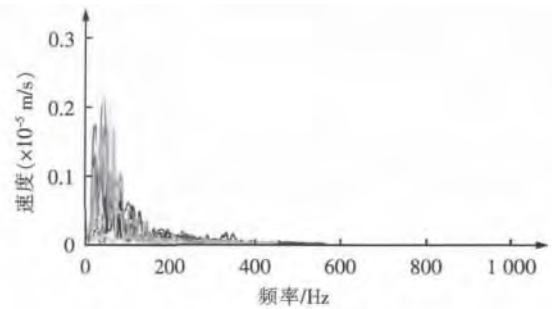


图10 电子雷管爆破垂直震速时能密度曲线

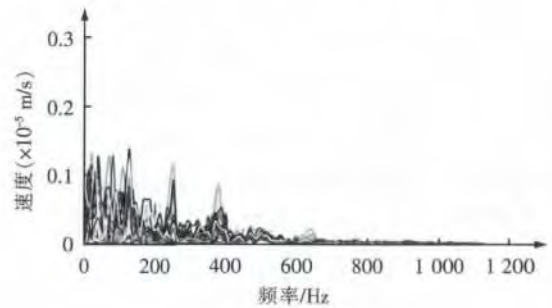
和起爆方式等不同有所变化。为了研究不同起爆方式(普通毫秒雷管起爆和电子雷管起爆)爆破震动的频谱特征,要尽量排除其他因素的影响,选择爆心距、装药量、地形特征基本相同条件下,测得的10组普通毫秒雷管爆破数据和24组电子雷管爆破数据,对其分别进行FFT频谱变换,其频谱分布如图11所示。得到以下结论:(1)爆破震动信号为典型的非平稳信号,受地质条件、爆破参数等因素的影响,其频率成份复杂。(2)电子雷管爆破震动频率主要分布在0~600 Hz之间,普通毫秒雷管爆破震动频率主要分布在0~400 Hz之间,电子雷管爆破震动信号频率较高、频率范围比普通毫秒雷管的频率范围广。(3)电子雷管震动信号有多个明显频带,呈现多峰特征,能量分布更发散,能量幅值降低,其垂直震速主要频带范围为30~130 Hz、250 Hz左右、400 Hz左右;普通毫秒雷管爆破只有一个主要频带范围,其垂直震速频率为200 Hz以下。

随着爆破理论及技术的发展,国内外学者均认为除震速外,震动频率对结构破坏有着重要的影响。结构动力学研究也表明,结构受到其他方面一样而主振频率不同的激振时,其响应也不一样。我国《爆破安全规程》(GB 6722—2011)中也区别不同频率,规定相应的安全震速限值。地面建筑物的自振频率一般较低为3~30 Hz,与普通毫秒雷管爆破震动相比电子雷管

爆破地震波的高频成份相对较多,从控制爆破的频率指标方面分析也有利于减轻对建筑物的危害。



(a) 普通毫秒雷管



(b) 电子雷管

图11 爆破震动垂直震速频谱图

#### 4.4 微差时间对电子雷管爆破震动频谱的影响

在电子雷管爆破试验过程中,采用了5 ms和4 ms两种微差时间,分别进行了6次和27次震动测试,取其中代表性的4组数据进行FFT频谱分析,如图12所示。与5 ms微差时间间隔相比,4 ms微差时间间隔的电子雷管爆破震动信号主要频带右移,主振频率有所增大。不同电子雷管微差时间间隔对爆破地震波的干扰、叠加和震动频谱特征有明显的影响,是爆破设计的主要参数之一,通过优化电子雷管微差时间来确定最优的爆破方案将是一项重要的研究内容。

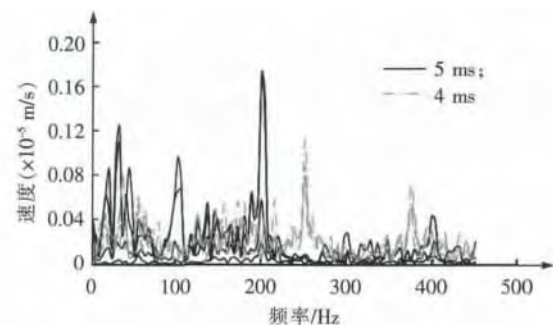


图12 不同微差时间间隔下电子雷管爆破垂直震速频谱图

#### 4.5 爆破效果

衡量爆破效果优劣的主要指标包括:爆破后围岩情况、岩石破碎块度尺寸及其分布、爆堆岩石松散程

度、爆堆的形状与位置以及广义上的飞石、空气冲击波、爆破引起的震动等,是一项综合性指标。在爆破效果事后评价方面,岩石破碎块度尺寸及其分布和爆破后围岩情况得到了更广泛的关注。反映光面爆破后围岩情况的指标主要包括<sup>[23-25]</sup>:半眼痕迹率、炮孔利用率、超欠挖情况。岩石破碎块度尺寸及其分布的评价方法传统有:筛分法、二次爆破岩块统计法、爆堆直接量测法、相关数据测量法等,随着计算机技术的发展,摄影量测方法成为了一种全新的爆破破碎效果评价方法<sup>[10]</sup>。

相同炮孔布置方式下,本工程采用电子雷管爆破的残空孔率在 30% ~ 60% 之间,能有效控制超欠挖,断面平整,光面爆破总体效果较好。采用普通毫秒雷管爆破,IV 围岩爆破残空孔率基本上没有,轮廓线凹凸不平,超挖现象严重,局部达 1 m 以上并有危石存在。对爆破后的岩石破碎块度进行抽样统计分析,电子雷管爆破中 230 mm 以下岩块含量增加 30%,占整个爆堆的 75%,爆堆的细粉和大块岩石大大减少,岩石的破碎度较高,块度尺寸分布更均匀。

#### 4.6 经济分析

钻爆法是当前隧道施工最常用的方法,影响爆破成本的直接指标是爆炸物品的单耗和价格。通过对浅埋段洞 7+585 ~ 7+625 段 27 次爆破炸药单耗的统计和对比,普通毫秒雷管爆破的炸药平均单耗为 0.821 kg/m<sup>3</sup>,电子雷管爆破炸药平均单耗为 0.633 kg/m<sup>3</sup>,电子雷管可以降低约 20% 的炸药单耗。电子雷管作为一种新产品,目前价格仍比较高,一般为普通非电雷管价格的 10 倍左右,电子雷管爆破会增加雷管使用方面的费用。但在类似本工程浅埋隧道这样的特殊地段使用电子雷管爆破,能够加快工程进度、减少爆破震动引起的纠纷和经济赔偿等,综合的经济效益显著。

## 5 结 论

为了减少城市复杂环境下浅埋隧道爆破施工对环境的不利影响,采用了电子雷管控制爆破技术,通过对大量实测爆破震动数据的对比分析可得:

(1) 与普通毫秒雷管爆破震动相比,电子雷管爆破震动峰值震速低、持续时间短、波形均匀、稳定性好,减轻环境震动的效果明显;根据频谱分析电子雷管爆破震动频带范围宽,呈现多峰特征,高频成份相对较多;其时能密度曲线峰值多而密集,无显著分离的突峰点,逐孔起爆的干扰和叠加作用明显。

(2) 本工程所采取的控制爆破和隧道支护措施取得了较好的应用效果。电子雷管精度高、安全性能好,能够有效改善爆破效果和降低炸药单耗,综合效益显

著,对于改进爆破工艺和提高爆破技术水平有重要的意义。

(3) 电子雷管作为一种刚刚投入使用的新产品,尚需要进一步改进其技术性能、总结爆破设计和现场实施方面的成果和经验。电子雷管的微差时间间隔对爆破地震波的干扰、叠加和震动频谱特征有明显的影响,是爆破设计的主要参数之一,通过优化电子雷管微差时间来确定最优的爆破方案将是一项重要的研究内容。

## 参考文献:

- [1] 刘国华,王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应和抗爆分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2004(2):204-209.  
Liu Guohua, Wang Zhenyu. Dynamic Response and Blast-resistance Analysis of a Tunnel Subjected to Blast Loading [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 2004(2):204-209.
- [2] 谭忠盛,杨小林,王梦恕. 复线隧道施工爆破既有隧道的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003(2):281-285.  
Tan Zhongsheng, Yang Xiaolin, Wang Mengshu. Effect of Blast on Double Line Tunnel Existing Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(2):281-285.
- [3] 李景龙,李术才,李延春,等. 隧道下穿既有铁路爆破的稳定控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006(增1):3596-3600.  
Li Jinglong, Li Shucai, Li Yanchun, etc. Research on Construction Control Technology for Blast in Tunnel Crossing Existing Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006(S1):3596-3600.
- [4] 马辉,李杰,左巧峰,等. 基于精细爆破的隧道微台阶开挖工法与工程应用[J]. 铁道工程学报,2012(1):57-61.  
Ma Hui, Li Jie, Zuo Qiaofeng, etc. Micro Bench Method for Tunneling with Fine Blasting and Its Engineering Application [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(1):57-61.
- [5] 张继春,曹孝君,郑爽英,等. 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(22):4158-4163.  
Zhang Jichun, Cao Xiaojun, Zheng Shuangying, etc. Experimental Study on Vibration Effects of Ground Due to Shallow Tunnel Blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(22):4158-4163.

(下转第 89 页 To P. 89)

- [2] TB/T 2075.11—2010, 电气化铁路接触网零部件 第11部分:电连接装置[S].  
TB/T 2075.11—2010, Fittings for Overhead Contact System in Electrification Railway, Part 11: Electric Connection Device[S].
- [3] TB/T 3111—2005, 电气化铁道用铜及铜合金绞线[S].  
TB/T 3111—2005, Stranded Copper and Copper - Alloy Conductors for Electric Railway [S].
- [4] 铁集成[2010]258号, 关于印发《客运专线铁路牵引供电及电力供电系统集成若干问题的指导意见》的通知[S].  
TJC[2010]258, Notice for Release of the Guidance for Some Problems in System Integration of Traction Supply and Power Supply for Passenger Dedicated Line [S].
- [5] 阮云斌, 徐鸿燕. 接触网电连接的安装及其长度的选取[J]. 铁道标准设计 2001(11):36-37.  
Ruan Yunbin, Xu Hongyan. Installation and Length Selection of Electric Connector of OCS [J]. Railway Standard Design, 2001(11): 36-37.
- [6] 王连群, 孙立金. 电气化铁路接触网电连接设计的探讨[J]. 铁道勘测与设计 2002(1):19-23.  
Wang Lianqun, Sun Lijin. Discussion of Electric Connector of OCS in Electric Railway [J]. Railway Survey and Design, 2002(1):19-23.
- [7] 刘正大. 简单链型悬挂接触网整体吊弦计算[J]. 铁道建设 2004(3):53-56.  
Liu Zhengda. Calculation of Integrated Dropper in the Simple Chain Suspension OCS [J]. Railway Construction, 2004(3):53-56.
- [8] KieBling, Puschmann, Schmieder. 电气化铁道接触网[M]. 北京:中国电力出版社 2004.  
KieBling, Puschmann, Schmieder. Catenary in Electric Railway [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [9] 楚振宇. 复线电气化铁路直供牵引网载流能力的计算[J]. 铁道工程学报 2010(8):87-90.  
Chu Zhenyu. Calculation of Current Carrying Capacity of TRNF Traction Network for Double-track Electrified Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(8): 87-90.
- [10] 楚振宇. 直供全并联供电方式牵引网载流能力分析[J]. 铁道工程学报 2011(9):88-91.  
Chu Zhenyu. Analysis of Load Capacity of Traction Network with All Parallel Supply Mode in TRNF Electrified Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society 2011(9):88-91.

=====

(上接第84页 From P. 84)

- [6] 李的林, 高振儒, 朱立新. 爆破震动危害中几个重要因素分析[J]. 工程爆破, 1999(3):64-67.  
Li Delin, Gao Zhenru, Zhu Lixin. Analysis on Several Principal Factors of Blasting Vibration Hazards [J]. Engineering Blasting, 1999(3):64-67.
- [7] 李新平, 宋桂红, 文建华, 等. 某水电站地下洞室爆破振动控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(增1):2506-2509.  
Li Xinping, Song Guihong, Wen Jianhua, etc. Control Study of Blasting Vibration of Underground Chamber of Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(S1):2506-2509.
- [8] 吴新霞, 赵根, 王文辉, 等. 数码雷管起爆系统及雷管性能测试[J]. 爆破 2006(4):93-96.  
Wu Xinxia, Zhao Gen, Wang Wenhui, etc. Digital Detonators Performance Test and Energy Control System [J]. Blasting, 2006(4):93-96.
- [9] 凌同华, 李夕兵. 基于小波变化的时-能分布确定微差爆破的实际延迟时间[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(13):2266-2270.  
Ling Tonghua, Li Xibing. Time-energy Analysis Based on Wavelet Transform for Identifying Real Delay Time in Millisecond Blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004(13): 2266-2270.
- [10] 傅洪贤, 张幼蒂. 爆破粒度的图像处理技术及其优化控制模型[J]. 矿业安全与环保 2001(2):8-10.  
Fu Hongxian, Zhang Youdi. Image Processing Technique of Blasting Fragments and Its Optimization Control Model [J]. Mining Safety & Environmental Protection 2001(2):8-10.