

# 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题

卢文波<sup>1</sup>, 李海波<sup>2</sup>, 陈明<sup>1</sup>, 周创兵<sup>1</sup>, 吴新霞<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 长江科学院, 湖北 武汉 430030)

**摘要:** 综合分析岩石高边坡和地下洞室围岩的爆破振动破坏机制、动力稳定性评价方法及爆破振动对新浇混凝土影响等方面的研究现状与进展, 介绍国内水电行业采用的有关岩石高边坡、地下洞室围岩、基岩以及新浇混凝土的主要爆破振动安全判据及爆破速度允许标准, 并与矿山领域的相关标准进行对比。指出以往爆破振动破坏机制研究中存在的问题和现有爆破安全判据的不足, 如未区分爆破地震波作用下岩体中的波传播问题和边坡动力响应问题的不同破坏机制, 爆破振动安全判据未考虑振动频率和持续时间的影响。最后提出今后在爆破振动破坏机制研究, 体现幅值、频率和持续时间综合影响的爆破振动安全判据确定, 考虑温度应力的新浇混凝土爆破振动安全允许标准制定等方面的努力方向。

**关键词:** 水电工程; 边坡; 地下洞室; 新浇混凝土; 爆破振动; 质点峰值振动速度; 安全判据

**中图分类号:** TV 542

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)08 - 1513 - 08

## SAFETY CRITERIA OF BLASTING VIBRATION IN HYDROPOWER ENGINEERING AND SEVERAL KEY PROBLEMS IN THEIR APPLICATION

LU Wenbo<sup>1</sup>, LI Haibo<sup>2</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>, ZHOU Chuangbing<sup>1</sup>, WU Xinxia<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China*; 2. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 3. *Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430030, China*)

**Abstract:** The status and progress of the mechanism of blasting vibration-induced failure or damage, the evaluation method of dynamic stability for rock slope and surrounding rock mass of underground caverns under blasting vibration, and the influence of blasting vibration on early-aged concrete, etc., are introduced and analyzed. The domestic safety criteria of blasting vibration and permitted standard of blasting velocity for high rock slope, underground caverns, foundation rock mass and early-aged concrete adopted in field of hydropower engineering are presented, which are compared with those employed in fields of mining. Main problems existing in the study of the damage mechanism induced by blasting vibration and deficiencies of currently adopted safety criteria are analyzed and discussed such as no distinction between different damage mechanisms induced by propagation of blasting seismic wave in rock mass and by dynamic response of rock slope and no consideration of influence of

**收稿日期:** 2009 - 05 - 05; **修回日期:** 2009 - 05 - 19

**基金项目:** 国家“十一五”科技支撑计划(2008BAB29B01); 国家杰出青年科学基金项目(50725931); 国家自然科学基金委、雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50639100); 国家自然科学基金面上项目(50779050)

**作者简介:** 卢文波(1968 -), 男, 博士, 1990年毕业于武汉水利电力学院水电施工专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石动力学及工程爆破方面的教学与研究工作。E-mail: wblu@whu.edu.cn

vibration frequency and duration on the adopted safety criteria. Finally, some proposals are given to further study in the fields of damage mechanism of blasting vibration, comprehensive safety criteria expressing blasting vibration incorporating factors of vibration amplitude, frequency and duration, allowable vibration standard for early-aged concrete considering the influence of thermal stress, etc..

**Key words:** hydropower engineering; slope; underground caverns; early-aged concrete; blasting vibration; peak particle vibration velocity; safety criteria

## 1 引言

水电工程的岩体爆破开挖,不仅需要完成岩体的“破碎与抛掷”,更重要的是要实现“成型和保护”,即通过控制爆破,按照设计要求形成开挖轮廓;同时爆破过程需要尽可能保护保留岩体不受损伤,并保证边坡岩体和地下洞室围岩的稳定性。

岩石爆破开挖过程中,伴随着岩石的破碎,在爆源近区,由于爆炸冲击波和应力波的作用,岩体发生爆破损伤,导致原有岩体裂隙的扩展或新增爆生裂隙的出现,在保留岩体表层形成所谓的爆破损伤区;在爆源中远区,由于爆破振动的反复作用,会导致岩体结构面的松动及其强度的降低,并造成邻近新浇混凝土的损伤;而当爆破振动达到一定强度后,甚至引起边坡和地下洞室围岩的动力失稳或其他建(构)筑物及设施设备的损坏<sup>[1, 2]</sup>。因此岩体开挖过程的爆破振动损伤及动力响应控制问题成为我国高坝枢纽施工中亟待解决的关键技术问题之一<sup>[3, 4]</sup>。

本文针对岩石高边坡、地下洞室群围岩和新浇混凝土的爆破安全评价方法及安全判据存在的问题及以后的改进方向,展开分析讨论。

## 2 大型岩体结构的爆破振动动力稳定性评价方法及安全判据

### 2.1 岩石高边坡

爆破振动对岩质高边坡稳定性的影响主要表现在以下几方面:首先是“附加荷载”作用,即爆破振动惯性力的作用使坡体下滑力增大,可能导致边坡的动力失稳;其次是“弱化”作用,即爆破振动荷载的反复作用会导致岩体结构面抗剪强度参数降低;最后,爆破振动荷载还使得地下水状态发生改变,直接或间接地影响滑动面的抗滑能力。

目前用于岩石高边坡爆破振动动力稳定性分析的方法主要有极限平衡法、反应谱法、动力有限元和离散元方法等。

采用极限平衡分析法分析边坡的动力稳定性,对爆破振动荷载的处理方法主要有两类:一类是拟静力法,另一类是时程分析法。拟静力法将爆破振动惯性力等效为静力,作用在边坡条块上,计算中忽略爆破振动相位对稳定性的影响。

杨桂桐<sup>[5]</sup>在国内较早采用拟静力法研究高边坡爆破开挖动力稳定问题。张永哲等<sup>[6, 7]</sup>认识到爆破地震波的频谱特性对边坡的动力稳定性有重要影响,因此在爆破地震等效力的计算中考虑了爆破地震波的波长及滑体尺度效应,改进了计算的精度。最近,陈明等<sup>[8]</sup>则基于 Rayleigh 波传播的波动理论,通过分析边坡振动频率与位移、振动加速度和边坡应力间的关系,建立了不同爆破振动频率下的等效加速度计算方法。

考虑到爆破振动传播过程中,作用在边坡体各条块上的爆破振动惯性力的大小和方向都是不断变化的,卢文波等<sup>[9, 10]</sup>提出了基于时程分析的边坡振动动力稳定性分析方法,体现了爆破地震波传播过程中的衰减、频谱结构特性及相位差等因素对边坡稳定性的影响;许红涛等<sup>[11]</sup>基于刚体极限平衡分析方法中的 Sarma 法,进一步完善了时程分析方法。

国内有学者<sup>[12, 13]</sup>曾尝试将地震反应谱理论引入边坡岩体的爆破振动动力稳定性分析,但该方法得到的边坡响应为结构的最大反应,是动力响应的相对峰值,对高频的爆破地震波而言,其计算结果偏于保守。

极限平衡法能给出直观评价边坡稳定性的安全系数,但是它需要事先假定滑动面,不一定能反映出边坡的最危险情况。因此,国内外不少学者<sup>[14~18]</sup>采用动力有限元法和离散元法来分析岩石高边坡的爆破振动动力稳定性。

目前, 评判爆破振动荷载作用下边坡动力稳定性的依据仍主要采用稳定性安全系数, 而后根据稳定性安全系数与质点峰值振动速度或加速度的关系, 确定岩石高边坡的爆破振动安全阈值; 但近年有学者通过边坡动力响应计算, 通过位移或动拉应力与振速的关系, 确定岩石高边坡的允许爆破振动速度<sup>[17, 18]</sup>。考虑到含潜在滑动面的岩石边坡爆破振动动力稳定性主要由岩体结构面控制, 不同地质构造条件下的岩体边坡的失稳模式和安全阈值必然存在较大差异, 因此需要根据实际工程的具体条件来确定<sup>[2]</sup>。

工程实践中, 考虑到质点振动速度最能直接反映边坡的动力响应, 质点峰值振动速度被普遍作为岩石高边坡的爆破振动安全判据。对具体工程, 一般考虑地质条件, 结合现场试验、爆破振动监测及爆破损伤检测, 按照工程类比法, 确定允许的爆破振动速度。国内部分水电工程边坡开挖中采用的允许爆破振动速度见表 1, 长沙矿冶研究院建议采用的允许爆破振动速度见表 2。J. P. Savely<sup>[19]</sup>根据多

个矿山边坡建议了不同损伤程度下的矿山边坡岩体质点峰值振动速度临界值, 见表 3<sup>[19]</sup>。

表 3 矿山边坡质点峰值振动速度临界值<sup>[19]</sup>

Table 3 Critical blasting vibration velocity for rock slopes of open mines<sup>[19]</sup>

岩体损伤表现	损伤程度	质点峰值振动速度临界值 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		
		斑岩	页岩	石英质 中长岩
台阶面松动岩块的偶而掉落	没有损伤	12.7	5.1	63.5
台阶面松动岩块的部分掉落(若未爆破该松动岩块可保持原有状态)	可能有损伤但可接受	38.1	25.4	127.0
部分台阶面松动、崩落, 台阶面上产生一些裂缝	较轻的爆破损伤	63.5	38.1	190.5
台阶底部的后冲向破坏、顶部岩体的破裂, 台阶面严重破碎, 台阶面上可见裂缝的大范围延伸, 台阶坡脚爆破漏斗的产生等	爆破损伤	>63.5	>38.1	>190.5

需要指出的是, 国内水电工程边坡的允许爆破振动速度一般考虑边坡的动力稳定性, 而矿山边坡一般侧重于防止边坡坡脚岩体的开裂。

## 2.2 地下洞室围岩

地下洞室围岩的爆破振动动力稳定性评价方法与岩石高边坡类似, 目前各国对隧洞围岩也以振动速度作为爆破振动安全评判指标。

边克信<sup>[20]</sup>建议采用一维应力波理论, 根据岩石抗拉强度或岩石拉伸极限应变推算临界振动速度; 朱瑞赓和李 铮<sup>[21]</sup>则提出以岩体动力强度与隧洞所受动、静应力之和相平衡的条件, 确定爆破振动影响下处于弹性状态的无衬砌隧洞出现裂隙、局部崩塌及大面积坍塌等不同破坏条件下隧洞围岩的临界振动速度计算方法。近年动力有限元等数值方法也开始广泛用于隧道围岩的爆破振动动力稳定性分析与评价<sup>[22, 23]</sup>。

国内外针对爆破振动对本洞影响的研究开展得相对较少, 主要涉及爆破振动的衰减与分布规律, 爆破振动对不良洞段围岩、邻近的锚固结构、喷射混凝土和永久混凝土衬砌等的影响<sup>[24~29]</sup>。在大跨度地下厂房开挖中, 则主要关注下层开挖爆破振动对厂房顶拱、两侧高边墙和岩锚吊车梁的影响<sup>[30, 31]</sup>。

由于地下工程岩体以及爆破振动荷载作用过程的复杂性, 工程实践中围岩允许爆破振动速度的确

表 1 国内部分水电工程边坡采用的允许爆破振动速度

Table 1 Safety blasting vibration velocity adopted for part of domestic rock slope excavations of hydropower projects

工程名称	部位	岩性	允许峰值质点振动速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
	厂房进出口边坡		22
隔河岩	坝肩及升船机边坡	石灰岩	28
	引航道边坡		35
长江三峡	永久船闸边坡	微风化花岗岩	15~20
		弱风化花岗岩	10~20
		强风化花岗岩	10
小湾	拱坝槽边坡	花岗岩	10~15
溪洛渡		柱状节理玄武岩	10

表 2 长沙矿冶研究院建议的矿山边坡坡脚允许爆破振动速度

Table 2 Safety blasting vibration velocity for toes of rock slopes of open mines proposed by Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy

分类	边坡稳定状况	坡脚允许爆破振动速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
I	稳定	35~45
II	较稳定	28~35
III	不稳定	22~28

定仍主要依据现场试验和工程类比。对于岩性相差较大的各类岩石,不同学者<sup>[20, 21, 32~34]</sup>通过现场试验确定的围岩开裂或局部掉块条件下的爆破振动临界值相差并不显著,一般为 20~50 cm/s。工程应用中,通常对临界爆破振动速度按照一定安全度进行折减作为允许的控制标准。表 4 为国家爆破安全规程<sup>[35]</sup>中采用的不同类型隧洞的爆破振动安全允许标准。

表 4 不同类型隧洞的爆破振动安全允许标准<sup>[35]</sup>  
Table 4 Safety criteria for blasting vibration velocities of different types of tunnels<sup>[35]</sup>

序号	隧洞类型	安全允许振动速度/(cm·s <sup>-1</sup> )
1	水工隧洞	7~15
2	交通隧道	10~20
3	矿山巷道	15~30

### 2.3 基岩的爆破振动安全判据

在爆源的近中区,岩体主要受爆炸冲击波和应力波的作用。确定波动问题下基岩开裂的爆破振动安全判据的理论依据是应力波理论:根据岩石抗拉强度反求临界振动速度和根据岩石拉伸破坏的极限应变值反求临界振动速度。

在平面波条件下有

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

$$\sigma = \rho C_p v \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$  为岩石的应变,  $\sigma$  为应力波作用下岩石中的应力,  $E$  为岩石弹性模量,  $\rho$  为岩石的密度,  $C_p$  为岩石的纵波速度,  $v$  为质点峰值振动速度。

于是,可推得

$$[PPV] = C_p [\varepsilon] = C_p \frac{[\sigma_t]}{E} \quad (3)$$

式中:  $[PPV]$  为允许的质点峰值振动速度,  $[\varepsilon]$  为允许应变,  $[\sigma_t]$  为岩石的抗拉强度。

可见,质点峰值振动速度与岩体的动应变或动应力间存在对应关系。因此,根据岩体的动力强度或极限拉伸应变值,就可确定允许的质点峰值振动速度门槛值。国内外学者通过爆前爆后岩体中新增裂隙调查、声波对比测试等手段,提出了多种基岩开裂的质点峰值振动速度判据: U. Langefors 和 B. Kihlstrom<sup>[32]</sup>把峰值质点速度为 60 cm/s 作为岩石形成新裂隙的临界值; R. Holmberg 和 P. A. Persson<sup>[36]</sup>

认为硬基岩的质点峰值振动速度安全上限为 70~100 cm/s; A. Bauer 等<sup>[37, 38]</sup>建议的岩体爆破损伤质点峰值振动速度安全判据见表 5, 6。

表 5 岩石爆破损伤的质点峰值振动速度临界值<sup>[37]</sup>  
Table 5 Critical peak particle vibration velocity adopted for blast-induced damage<sup>[37]</sup>

质点峰值振动速度 临界值/(cm·s <sup>-1</sup> )	岩体损伤效果
<25.0	完整岩石不会致裂
25.0~63.5	产生轻微的拉伸层裂
63.5~254.0	严重的拉伸裂缝及一些径向裂缝产生
>254.0	岩体完全破碎

表 6 岩石爆破损伤的质点峰值振动速度临界值<sup>[38]</sup>  
Table 6 Critical peak particle vibration velocity adopted for blast-induced damage<sup>[38]</sup>

岩石类型	单轴压缩 强度/MPa	RQD /%	质点峰值振动速度临界值/(cm·s <sup>-1</sup> )		
			轻微 损伤区	中等 损伤区	严重 损伤区
软片麻岩	14~30	20	13.0~15.5	15.5~35.5	>35.5
硬片麻岩	49	50	23.0~35.0	35.0~60.0	>60.0
Shultze 花岗岩	30~55	40	31.0~47.0	47.0~170.0	>170.0
斑晶花岗岩	30~85	40	44.0~77.5	77.5~124.0	>124.0

### 3 新浇混凝土的爆破振动安全判据

水利水电工程建设过程中,爆破开挖与邻近部位混凝土浇筑往往并行施工;同时在新浇衬砌混凝土、喷射混凝土及刚完成灌浆的锚固支护或灌浆帷幕结构等新浇混凝土结构附近进行爆破开挖作业的情况也不可避免,因此普遍存在爆破振动对新浇混凝土的影响问题。

国内外针对爆破振动对新浇混凝土的影响研究始于 20 世纪 70 年代。国外早期的研究主要针对解决水电和核电建设领域爆破开挖和混凝土浇筑间的并行施工影响问题<sup>[39~41]</sup>。国内,针对大坝基础混凝土的爆破振动影响控制,朱传统等<sup>[42]</sup>结合葛洲坝、大化、万安和隔河岩等工程的现场观测及试验资料分析,并参考国外的有关经验,提出了以质点峰值振动速度为判据的新浇大体积混凝土的爆破振动控制标准,该研究成果成为编制规范<sup>[43]</sup>的重要基础,见表 7。

在规范<sup>[44]</sup>中,将基础灌浆和砂浆黏结型预应

表 7 新浇大体积混凝土的爆破振动速度安全允许标准<sup>[43]</sup>

混凝土龄期/d	安全允许振动速度/(cm · s <sup>-1</sup> )
0~3	1.5~2.0
3~7	2.0~5.0
7~28	5.0~7.0

力锚索(锚杆)也列入新浇混凝土范畴,其采用的允许爆破振动速度见表 8。

表 8 新浇混凝土的爆破振动速度安全允许标准<sup>[44]</sup>Table 8 Safety criteria of blasting vibration velocity adopted for early-aged mass concrete<sup>[44]</sup>

混凝土龄期/d	安全允许振动速度/(cm · s <sup>-1</sup> )		
	混凝土	坝基灌浆(含坝体、接缝灌浆)	预应力锚索(含锚杆)
0~3	1~2	1.0	1.0
3~7	2~5	1.5	1.5
7~28	6~10	2.0~2.5	5.0~7.0

对大体积混凝土,规程<sup>[35]</sup>和规范<sup>[45]</sup>均采用表 9 所示的允许爆破振动速度标准,较规范<sup>[43, 44]</sup>该标准有一定的放宽。

表 9 新浇大体积混凝土的爆破振动速度安全允许标准<sup>[35, 45]</sup>Table 9 Safety criteria of blasting vibration velocity adopted for early-aged mass concrete<sup>[35, 45]</sup>

混凝土龄期/d	安全允许振动速度/(cm · s <sup>-1</sup> )
0~3	2~3
3~7	3~7
7~28	7~12

注:非挡水新浇大体积混凝土的安全允许振动速度,可按本表给出的上限值选取。

## 4 现有爆破振动判据的不足及改进方向

由前面的论述可以看出,针对爆破振动控制,国内外已经做了大量的研究工作,并提出了相应的爆破振动安全判据,尤其是我国爆破安全规程和行业规范规定的爆破振动安全判据,在确保水利水电工程爆破振动安全方面发挥了重要作用。但在应用相关爆破振动安全判据的工程实践中发现,现有判

据尚不完善,主要存在以下方面的不足,需要改进。

### 4.1 爆破振动破坏的机制与类型

在现有的爆破振动安全判据的确定和使用过程中,没有区分波传播引起的动力破坏和地震波作用下建(构)筑物的振动响应破坏这两类问题的不同力学机制。比如基岩、岩石高边坡或地下洞室围岩在爆破地震波作用下的开裂属于地震波的波动问题;而房屋等建筑物的爆破振动损伤,边坡和地下洞室在爆破振动作用下的动力失稳等则属于建(构)筑物的振动响应问题。波传播引起的动力损伤或破坏一般发生在爆源的近区或保留岩体的表层,但地震波作用下建(构)筑物的振动响应破坏范围却可能比较广。

在爆破振动机制研究、爆破振动安全判据确定和使用过程中也没有区分爆破地震波的类型以及地震波与各类界面的相互作用。在爆源近区或岩体内部,爆破地震波的能量构成主体为 P 波和 S 波;而在爆源的中远区,爆破地震波的能量主要由面波携带。因此爆源近区的基岩开裂和爆破地震波对已有邻近洞壁的冲击破坏往往由 P 波和 S 波所引起;而爆破地震波对新浇基础混凝土和高边坡爆破振动稳定性的影响问题,通常涉及 Rayleigh 面波。地震波遇到临空面或岩体的软弱结构面,会发生应力波的反射,引起动拉应力,导致出现层裂或崩片等动力破坏现象。

爆破振动破坏机制的差异和爆破地震波类型的不同,会导致相应爆破振动破坏安全判据间的巨大差异:如引起边坡岩体开裂的振动速度临界值一般要远高于导致含潜在滑动面边坡动力失稳的相应值。

而在工程实践中不同破坏机制或不同类型爆破地震波对应的爆破振动安全判据间的混用,更可能带来工程安全或者过严的爆破振动限制问题。

### 4.2 反映振动频率和持续时间影响的爆破振动安全判据

国内外在以房屋为主的建筑物爆破振动安全判据制定中已开始考虑爆破振动频率的影响,但对岩石边坡、洞室围岩和新浇混凝土等构筑物,由于结构动力响应特性的复杂性,它们的爆破振动安全判据均采用单一的质点振动速度,未能充分体现爆破频率和持续时间以及建(构)筑物动力特性的综合影响。

近年国内学者开始关注上述构筑物的考虑振动频率影响的爆破振动安全判据,如唐春海等<sup>[46]</sup>建议

水工隧道、下水管道、地下洞室或地下构筑物在不同频率段采用不同的临界振动速度；吴德伦等<sup>[47]</sup>提出了考虑频率因素的矿山巷道和隧洞允许爆破振动速度标准。但对于持续时间对爆破振动安全判据的影响，国内外尚无此方面系统的研究成果报道。

西南峡谷地区的岩石高边坡开挖中，为降低各施工工序的干扰、提高一次爆破规模，往往采用大区域微差接力起爆网路，这直接导致爆破振动的持续时间延长至数秒甚至超过 10 s。而随着电子雷管及其起爆系统的推广应用，在一定爆破规模条件下，随着分段数的增加，虽然爆破振动的峰值振动速度能够得到有效降低，但爆破振动持续时间却可能被延长。同时，由于岩土介质的黏滞特性，随着传播距离的增大，爆破地震波的主频率降低、振动波型的持续时间变长，使得爆源中远区的爆破振动叠加问题突出，建(构)筑物产生共振的可能性增大，这可能导致出现邻近爆源的建(构)筑物没有发生爆破振动损伤或失稳，但远区的建(构)筑物却出现爆破振动动力失稳的现象。

众所周知，高陡边坡和大型地下洞室群的爆破振动响应及破坏与振动的幅值、频率、持续时间和结构本身的振动特性等综合因素有关，爆破振动持续增长，必然引起结构动力响应特征的改变。因此对给定岩体结构，现阶段迫切需要研究反映幅值、频率、持续时间综合影响的爆破振动安全判据。

### 4.3 新浇混凝土的爆破振动安全判据

现有的新浇混凝土的爆破振动速度允许标准主要考虑混凝土龄期的影响，认为随着混凝土龄期的增长，其允许的质点振动速度越大。但近年的研究表明，混凝土的振动破坏与静力状态下混凝土内的初始应力状态尤其是混凝土的温度应力密切相关：对于龄期大于 7 d 的大体积混凝土，混凝土中可能出现温度拉应力，将使混凝土的允许爆破振动速度降低<sup>[48]</sup>。

新浇混凝土的爆破振动速度允许标准与混凝土的结构类型和特性密切相关。新浇基础混凝土、大体积混凝土、衬砌混凝土、灌浆帷幕或砂浆锚杆等新浇混凝土结构的动力特性间存在显著差异，导致这些结构的抗振能力有很大不同：如砂浆锚杆的安全振动速度标准要远大于新浇筑大坝基础混凝土的值，现场试验监测资料表明，在质点振动速度超过 10 cm/s 条件下，对龄期为 1~5 d 的砂浆锚杆，其锚固力不受影响<sup>[28]</sup>。

因此，对不同新浇混凝土结构，有必要根据混凝土结构特征、混凝土的龄期及其所承受的爆破振动荷载特性，综合确定新浇混凝土的爆破振动控制标准。

## 5 结 论

爆破振动控制是一个老课题，但是由于涉及爆炸力学、岩石动力学和工程爆破等多学科及领域，爆破振动安全判据的完善方面仍有许多工作需要进一步展开。

目前，在建或待建的溪洛渡、小湾、锦屏、白鹤滩和乌东德等一批大型水电站均处中西部高山峡谷，无一例外的要进行复杂地质条件下坝基、坝肩高边坡和大跨度地下洞室群的大规模、高强度的岩石爆破开挖，均涉及岩石高边坡、地下洞室和新浇混凝土的爆破振动控制难题。正因为如此，复杂岩体爆破技术及安全控制标准作为亟待解决的重要问题，列入了国家“十一五”科技支撑计划课题。

作者期望通过对现有爆破振动安全判据的分析与讨论，促进对该问题的全面认识和进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 卢文波, 赖世骧, 朱传云, 等. 三峡工程岩石基础开挖爆破震动控制安全标准[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 67 - 71.(LU Wenbo, LAI Shixiang, ZHU Chuanyun, et al. Safety standards of blast vibrations adopted in rock base excavation of the Three Gorge Project[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 67 - 71.(in Chinese))
- [2] 李海波, 蒋会军, 赵 坚, 等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 887 - 1 891.(LI Haibo, JIANG Huijun, ZHAO Jian, et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 887 - 1 891.(in Chinese))
- [3] 马洪琪. 小湾水电站枢纽工程关键技术综述[J]. 水力发电, 2004, 30(10): 13 - 17.(MA Hongqi. A summary of key engineering technologies for Xiaowan Hydropower Project[J]. Water Power, 2004, 30(10): 13 - 17.(in Chinese))
- [4] 张超然, 戴会超, 高季章, 等. 特大型水电工程建设和运行面临的主要科技问题[J]. 水利学报, 2007, 38(增): 7 - 14.(ZHANG Chaoran, DAI Huichao, GAO Jizhang, et al. The major coming science and technology problems in construction and operation of super hydropower engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering,

- 2007, 38(Supp.): 7 - 14.(in Chinese))
- [5] 杨桂桐. 爆破振动效应及边坡动态分析[J]. 爆破, 1989, 6(4): 9 - 14.(YANG Guitong. Blast shock effect and slope dynamic state analysis[J]. *Blasting*, 1989, 6(4): 9 - 14.(in Chinese))
- [6] 张永哲. 岩质高边坡开挖爆破动力稳定分析[J]. 工程爆破, 1996, 2(4): 31 - 38.(ZHANG Yongzhe. Dynamic stability analysis of blasting and excavation of rock high slope[J]. *Engineering Blasting* 1996, 2(4): 31 - 38.(in Chinese))
- [7] 甄胜利. 岩质高边坡开挖爆破动力稳定分析研究[C]// 工程爆破文集(第五辑). 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 110 - 113.(ZHEN Shengli. Dynamic stability analysis of blasting and excavation of rock high slope[C]// *Proceedings of Engineering Blasting*(Vol.5). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 110 - 113.(in Chinese))
- [8] 陈明, 卢文波, 舒大强, 等. 爆破振动作用下边坡极限平衡分析的等效加速度计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 784 - 790.(CHEN Ming, LU Wenbo, SHU Daqiang, et al. Calculation method of equivalent acceleration for limit equilibrium analysis of slope under blasting vibration[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 784 - 790.(in Chinese))
- [9] 卢文波, 赖世骧, 朱传云. 岩石高边坡爆破振动动力稳定分析[J]. 矿冶工程, 1996, 16(1): 3 - 7.(LU Wenbo, LAI Shixiang, ZHU Chuanyun. Analysis of the dynamic stability of rock slopes under blasting vibration conditions[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1996, 16(1): 3 - 7.(in Chinese))
- [10] 阎坤, 张云. 岩质高边坡爆破动力稳定分析方法研究[J]. 水力发电, 1996, 22(8): 27 - 29.(YAN Kun, ZHANG Yun. Study on dynamic stability analysis method of the high side-slope rock blasting[J]. *Water Power*, 1996, 22(8): 27 - 29.(in Chinese))
- [11] 许红涛, 卢文波, 周创兵, 等. 基于时程分析的岩质高边坡开挖爆破动力稳定性计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2213 - 2219.(XU Hongtao, LU Wenbo, ZHOU Chuangbing, et al. Time-history analysis method for evaluating dynamic stability of high rock slope under excavation blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(11): 2213 - 2219.(in Chinese))
- [12] 何蕴龙. 岩质边坡施工爆破振动加速度近似计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 19 - 25.(HE Yunlong. An approximate calculation method for the accelerations in the rock slope under blasting construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(1): 19 - 25.(in Chinese))
- [13] 李海波, 吴绵拔. 反应谱分析在确定动载折减系数中的应用[J]. 工程爆破, 1998, 4(2): 16 - 19.(LI Haibo, WU Mianba. Application of spectrum theory to determining the discounted coefficient of dynamic loading[J]. *Engineering Blasting*, 1998, 4(2): 16 - 19.(in Chinese))
- [14] KENZO T, FUSANORI M, YOSHIYUKI O. Dynamic slope stability analyses with a nonlinear finite element method[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1985, 13(2): 151 - 171.
- [15] CHARLES H D. Dynamic stability of rock slopes and high frequency traveling waves[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(10): 1069 - 1088.
- [16] 田洁, 王克成, 刘恭忍, 等. 复杂岩质边坡开挖爆破下的动力响应分析[J]. 水利学报, 1998, 29(增): 38 - 43.(TIAN Jie, WANG Kecheng, LIU Gongren, et al. Dynamic response analysis of blasting in excavation of complex rock mass slope[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 29(Supp.): 38 - 43.(in Chinese))
- [17] 刘亚群, 李海波, 李俊如, 等. 爆破荷载作用下黄麦岭磷矿岩质边坡动态响应的UDEC模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3659 - 3663.(LIU Yaqun, LI Haibo, LI Junru, et al. UDEC simulation of dynamic response of rock slope of Huangmailing Phosphorite mine under explosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3659 - 3663.(in Chinese))
- [18] 陈明, 卢文波, 吴亮, 等. 小湾水电站岩石高边坡爆破振动速度安全阈值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 51 - 56.(CHEN Ming, LU Wenbo, WU Liang, et al. Safety threshold of blasting vibration velocity to high rock slope of Xiaowan Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 51 - 56.(in Chinese))
- [19] SAVELY J P. Designing a final blast to improve stability[C]// SME Annual Conference. Louisiana: [s. n.], 1986: 86 - 89.
- [20] 边克信. 爆破地震对地下构筑物的影响[J]. 中国矿山工程, 1981, 1(6): 25 - 36.(BIAN Kexin. Influence of blasting seismic on underground structure[J]. *China Mine Engineering*, 1981, 1(6): 25 - 36.(in Chinese))
- [21] 朱瑞庚, 李铮. 爆炸地震波的现场测量及其安全距离[J]. 爆炸与冲击, 1982, 2(1): 60 - 67.(ZHU Ruigeng, LI Zheng. In-situ measurement of blasting seismic waves and their safety distance[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1982, 2(1): 60 - 67.(in Chinese))
- [22] SWOBODA O, ZENG G, LI N, et al. Dynamic analysis of blast procedure in tunnel[M]. New York: Springer-Verlag, 1991: 386 - 437.
- [23] 刘慧. 近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 175 - 181.(LIU Hui. Dynamic responses of hoof-shaped tunnels to adjacent blastings[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(2): 175 - 181.(in Chinese))
- [24] 许海亮, 张继春, 任贺靖. 隧道掘进爆破震动放大效应试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 609 - 612.(XU Hailiang, ZHANG Jichun, REN Hejing. Experimental study on magnifying effects of vibration resulting from driving blasting in tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(4): 609 - 612.(in Chinese))
- [25] 林学文, 王兰民. 隧洞的爆破地震效应问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 274 - 278.(LIN Xuewen, WANG Lanmin. The explosion seismic effect tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(3): 274 - 278.(in Chinese))
- [26] ANSELL A. In-situ testing of young shotcrete subjected to vibrations

- from blasting[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(6): 587 - 596.
- [27] ANSELL A. Recommendations for shotcrete on rock subjected to blasting vibrations based on finite element dynamic analysis[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57(3): 123 - 133
- [28] STJERN G, MYRVANG A. The influence of blasting on grouted rock bolts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1995, 13(1): 65 - 70.
- [29] TANNANT D D, BRUMMER R K. Rock bolt behavior under dynamic loading field tests and modeling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(6): 537 - 550.
- [30] 徐成光. 瀑布沟水电站地下厂房顶拱层开挖与爆破震动控制[J]. *工程爆破*, 2006, 12(1): 61 - 65.(XU Chengguang. Excavation of the top heading of underground plant and blasting vibration control in Pubugou Hydropower Station[J]. *Engineering Blasting*, 2006, 12(1): 61 - 65.(in Chinese))
- [31] CHEN M, LU W B, YI C P. Blasting vibration criterion for a rock-anchored beam in an underground powerhouse[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22(1): 69 - 79.
- [32] LANGEFORS U, KIHLMSTROM B. The modern technique of rock blasting[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1973.
- [33] PERSSON P A. 岩石动力学[C]// 岩石力学进展与工程应用译文集. 北京: 科学出版社, 1987: 78 - 98.(PERSSON P A. Rock dynamic mechanics[C]// The Translation Collected Works on the Progress of Rock Mechanics and Engineering Application. Beijing: Science Press, 1987: 78 - 98.(in Chinese))
- [34] 黄承贤. 土岩爆破中岩体和坑道爆破破坏分区的实验研究[J]. *岩土力学*, 1986, 7(1): 17 - 22.(HUANG Chengxian. Experimental study of failure zone in soil and rock blast[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1986, 7(1): 17 - 22.(in Chinese))
- [35] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722 - 2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB6722 - 2003 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.(in Chinese))
- [36] HOLMBERG R, PERSSON P A. The Swedish approach to contour blasting[C]// *Proceedings of the 4th Conference on Explosive and Blasting Technique*. [S. l.]: [s. n.], 1978: 113 - 127.
- [37] BAUER A, CALDER P N. Open pit and blast seminar[R]. Kingston: Queens University, 1978.
- [38] MOJITABAI N, BEATTI S G. Empirical approach to prediction of damage in bench blasting[J]. *Trans. Inst. Min. and Metall. Sect. A*, 1996, 10(5): 75 - 80.
- [39] HOWES E V. Effects of blasting vibration on curing concrete[C]// *Effects of Blasting Vibration on Curing Concrete*. Taxes: [s. n.], 1979: 455 - 460.
- [40] HULSHIZER A J, DESAI A J. Shock vibration effects on freshly placed concrete[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1984, 110(2): 266 - 285.
- [41] HULSHIZER A J. Acceptable shock and vibration limits for freshly placed and maturing concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1996, 93(6): 524 - 533.
- [42] 朱传统, 张正宇, 佟锦岳, 等. 爆破对新浇混凝土的影响和控制标准的研究[J]. *爆破*, 1990, 7(3): 28 - 32.(ZHU Chuantong, ZHANG Zhengyu, TONG Jinyue, et al. Study on the influence of blasting on freshly placed concrete and its control standards[J]. *Blasting*, 1990, 7(3): 28 - 32.(in Chinese))
- [43] 中华人民共和国行业标准编写组. SL47 - 94 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 1994.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL47 - 94 Technical code of construction of excavation of rock foundation of hydraulic structures[S]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994.(in Chinese))
- [44] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T 5135 - 2001 水电水利工程爆破施工技术规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T 5135 - 2001 Technical code of construction of engineering blasting of hydropower structures[S]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2001.(in Chinese))
- [45] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5389 - 2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5389 - 2007 Technical code of construction of excavation of rock foundation of hydraulic structures[S]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2007.(in Chinese))
- [46] 唐春海, 于亚伦, 王建宙. 爆破地震动安全判据的初步探讨[J]. *有色金属*, 2001, 53(1): 1 - 4.(TANG Chunhai, YU Yalun, WANG Jianzhou. Elementary study of safety criterion for blasting vibration[J]. *Nonferrous Metals*, 2001, 53(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [47] 吴德伦, 叶晓明. 工程爆破安全振动速度综合研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(3): 266 - 273.(WU Delun, YE Xiaoming. A comprehensive review and commendation of blast vibration safety velocity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(3): 266 - 273.(in Chinese))
- [48] 陈明. 爆破振动对新浇混凝土结构的影响研究[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2006.(CHEN Ming. Study on the influence of blasting vibration upon freshly placed concrete structure[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2006.(in Chinese))