DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.001

电子雷管起爆技术研究进展与发展建议

冷振东[1,2]，范勇[1*]，涂书芳[2]，周桂松[2]，郭一鸣[1]

（1. 三峡大学水利与环境学院，湖北宜昌 443002；2. 中国葛洲坝集团易普力股份有限公司，重庆 401121）

摘要：电子雷管提高了延期精度以及起爆网路设计的灵活性，可实现“生产–运输–储存–使用”全生命周期安全管控，成为民爆行业重点发展方向。本文从产品结构、应用场景、智能化水平、爆破设计理论、拒爆失效机理等方面着手，梳理了电子雷管起爆技术的发展现状，总结了系列化和标准化、智能化、短延时设计、大规模起爆网路等技术发展趋势；结合工程应用实践，凝练了复杂环境下拒爆现象频发、爆破应用研究脱节、产品类型单一、标准体系不健全等电子雷管起爆技术与应用问题。着眼民爆行业发展需求，提出了电子雷管起爆技术的重点研究方向：电子雷管精确延时控制爆破破岩理论，信息技术与电子雷管起爆技术融合，差异化的电子雷管产品体系，电子雷管标准体系。

关键词：电子雷管；起爆技术；延期参数；设计理论；标准体系

中图分类号：O384　　**文献标识码：**A

Electronic Detonator Initiation Technology: Research Progress and Development Strategies

Leng Zhendong[1,2], Fan Yong[1*], Tu Shufang[2], Zhou Guisong[2], Guo Yiming[1]

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;
2. China Gezhouba Group Explosive Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: Electronic detonators not only improve delay accuracy and the flexibility of initiation network design, but also realize the full lifecycle safety control of detonators from production to transportation, storage, and blasting operation. Therefore, electronic detonators are the key development direction of the civil explosive industry. This study summarized the development status of the electronic detonator initiation technology from the aspects of electronic detonators' structure, application scenarios, intelligent level, blasting design theory, and failure mechanism. Our study indicates that electronic detonators will develop toward serialization and standardization, the electronic detonator initiation technology will develop toward more intelligence, the electronic detonator delay design theory will develop toward short delay, and the electronic detonator initiation network will develop toward a large scale. Based on engineering practices, we summarized the technological and application problems of electronic detonators, including frequent occurrence of misfire detonation, disconnection between detonation research and application, limited product types, and a defective standards system. Considering the demand of the civil explosive industry, we proposed the following key research directions: theories of precise delay-controlled blasting, integration of information technology with electronic detonator initiation, series of differentiated electronic detonator products, and standards systems of electronic detonators.

Keywords: electronic detonator; initiation technology; delay timing; design theory; standard system

收稿日期：2022-06-21；**修回日期：**2022-09-05

通讯作者：*范勇，三峡大学水利与环境学院教授，研究方向为工程爆破及岩石动力学；E-mail: yfan@ctgu.edu.cn

资助项目：国家自然科学基金项目(51979152)；重庆市英才计划项目(cstc2022ycjh-bgzxm0079)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

民爆行业作为国家工程建设的基础性行业，产品广泛用于矿产资源开采、水电资源开发、基础设施建设、爆炸加工等领域，是基础工业的基础、能源工业的能源。雷管是爆破工程的重要起爆材料，用于产生起爆并据此引爆各种炸药及导爆索、导爆管等。工业和信息化部《“十四五”民用爆炸物品行业安全发展规划》（2021年）提出，全面推广电子雷管，严格执行工业雷管减量置换为电子雷管政策。相关政策将促进民爆器材产品结构的大调整，也将引导工程爆破技术的新变革。

电子雷管采用电子控制模块取代传统雷管中的延期药和点火装置，延期精度可控制在1%（或1 ms）以内，现场可灵活设置延期时间，为控制爆破振动、优化破碎效果提供了技术条件。早在1988年，国内相关企业采用电子计数器取代化学延期体研制了第一代电子雷管，但不具有在线编程、在线检测、数据交互等功能。2009年，“隆芯1号”电子雷管在多次爆破作业中获得成功应用[1]，标志着国产新一代电子雷管投入工程应用。经过10余年发展，国产电子雷管的芯片设计、抗电磁干扰、发火可靠性、信号传输、大规模组网检测等技术取得突破[2]，支持产品量产，性能指标达到国际先进水平。同时，针对社会治安管控的严格要求，电子雷管产品的管壳码、用户编码、起爆密码“三码合一”，便于“生产–运输–储存–使用”全生命周期安全管控。“十四五”时期，我国电子雷管使用量将超过8×10^8发/年，直接产值超过170亿元，带动上游原材料、下游爆破施工服务产值超过500亿元。由电子雷管起爆技术带来的社会安全、环保效益、爆破施工降本增效等价值也极为突出。

国内外学者在电子雷管起爆技术及应用方面开展了持续且富有成效的研究，发展了孔间微差干涉减震[3]、错相减振[4]、孔间短延时应力波叠加破岩[5]、孔内爆轰波碰撞强化破岩[6]、基于多普勒效应的振动频率调控[7]等技术。但整体来看，基于电子雷管的精确控制爆破理论研究明显滞后于工程实践需求。一些省份在前期试点推广过程中发现，电子雷管拒爆率较高、爆破设计理念未能及时革新、产品种类单一、技术标准不健全等问题，制约着电子雷管的预期应用成效。

全面梳理电子雷管起爆技术的发展现状，深刻剖析电子雷管在全面推广过程中的技术应用壁垒，精准布局电子雷管起爆技术未来重点研究方向，是我国民爆行业高质量发展的基本前提。针对于此，本文从发展现状、趋势提炼、问题剖析等角度开展电子雷管起爆技术研究综述，并就行业发展提出应对建议，以期为电子雷管技术攻关、工程应用以及行业管理研究提供基础参考。

二、电子雷管起爆技术发展现状

（一）产品结构不断优化

电子雷管具有多种结构类型（见图1），近年来国内产能快速增长，基本替代了进口产品。2021年，全国电子雷管生产企业有28家，许可产能为5.35×10^8发；实际产能从2016年的1.79×10^6发增长至2021年1.64×10^8发[8]，居世界首位。得益于行业主管部门的积极推动，电子雷管的产品结构也在快速调整；“十三五”时期，电子雷管在工业雷管总量中的占比快速增长，由2015年的0.1%增长到2021年的18.43%（见图2）。

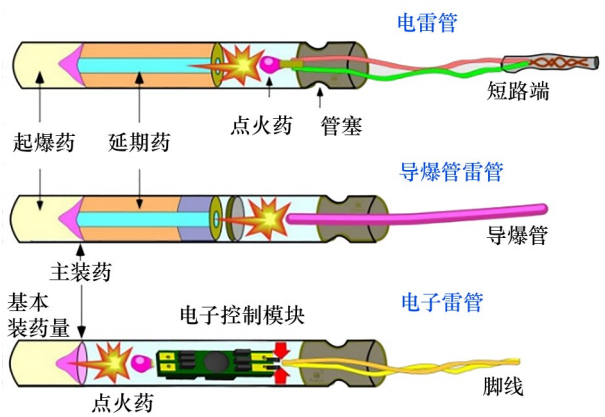


图1 不同类型雷管的结构示意图

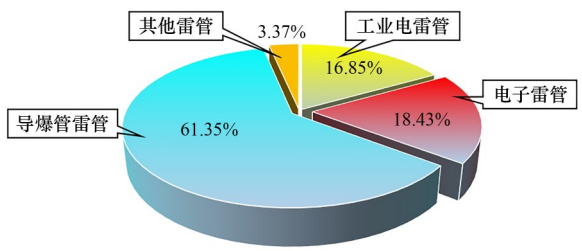


图2 我国工业雷管品种结构分布（2021年）

（二）应用场景不断丰富

近年来，随着电子雷管技术成熟度的提高，电子雷管应用场景不断丰富，使用环境由小型露天爆破快速拓展至大型露天爆破、隧道掘进、孔桩爆破、井下非煤矿山、拆除爆破（如危楼、桥梁、水工建筑物）等工程领域。

1. 水利水电工程

2006年，中国葛洲坝集团易普力股份有限公司在国内首次引进国外电子雷管产品，成功用于三峡工程三期碾压混凝土（RCC）围堰拆除爆破（见图3）；拆除总量为1.867×10^5 m^3，电子雷管用量为2506发，总延期时间为12.888 s。此后，向家坝水电站二期围堰[9]、杨房沟水电站坝基开挖[10]、大渡河双江口水电站料场爆破[11]、刘家峡水电站岩塞爆破、银江水电站边坡开挖、白鹤滩水电站进水口爆破等水利水电工程的重要部位施工，均使用了电子雷管起爆技术。工程应用表明，电子雷管相比传统雷管，在大规模起爆网络设计、现场操作便捷性方面具有优势，耐水性、抗压性表现良好。

2. 露天矿山爆破

目前，电子雷管广泛应用于各类露天矿山爆破施工（如铁矿、金矿、铜矿、石灰石矿等矿山[12~15]，见图4），顺利突破了极寒、高海拔等复杂环境下的应用瓶颈。无论是破碎效果，还是爆破振动控制，电子雷管都明显优于导爆管雷管。国产电子雷管在露天矿山爆破中的拒爆率可控制在0.3‰以内。

图3　三峡工程三期RCC围堰拆除爆破

图4　大型露天矿山电子雷管爆破

3. 地下爆破

近年来，电子雷管在隧道掘进、井下非煤矿山巷道掘进方面的应用趋势明显[16~18]。然而，多数施工单位在地下爆破中使用电子雷管时，基本沿用了导爆管雷管的设计与施工模式，现场操作使用依然繁琐。电子雷管拒爆问题成为制约地下爆破应用拓展的主要因素，这是因为各厂家的电子雷管产品质量参差不齐，部分产品在小断面隧道爆破开挖中的拒爆率高达5‰，影响了施工作业安全和工程进度。

4. 拆除爆破

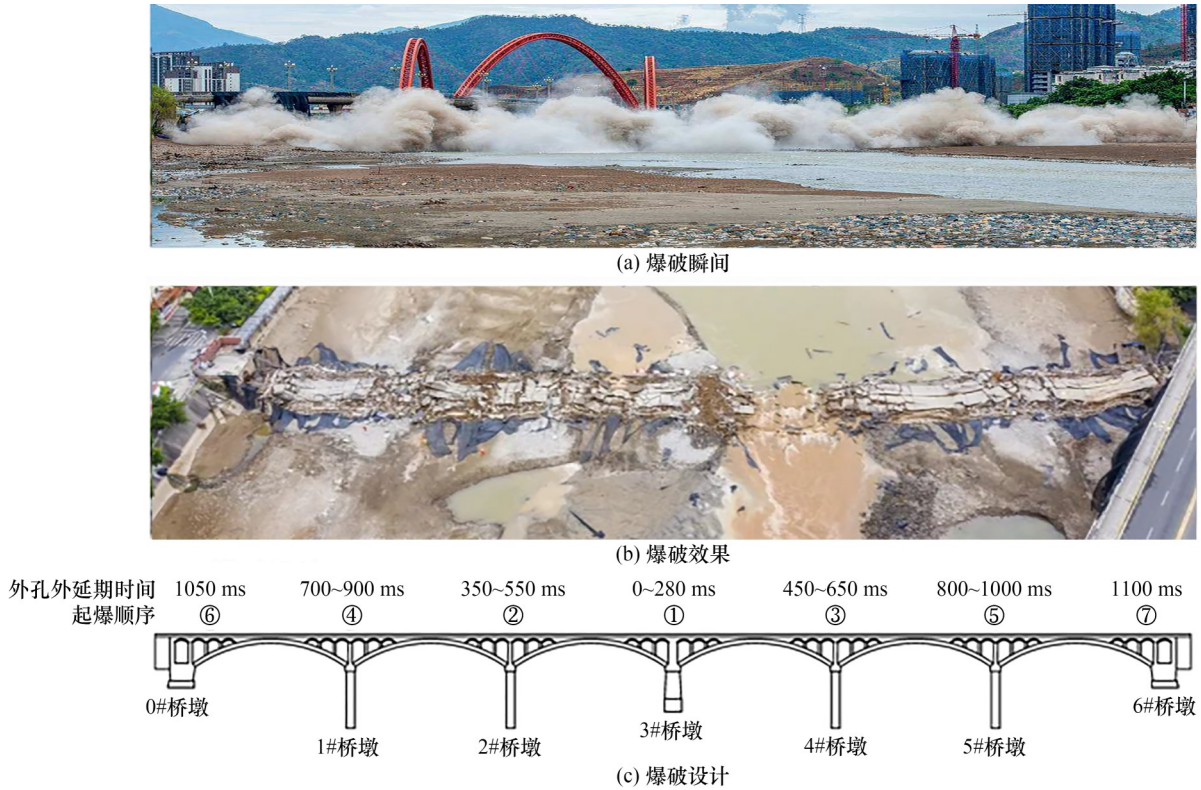
电子雷管的应用场景正在向拆除爆破方面延伸。2019—2021年，我国采用电子雷管进行的桥梁和楼房拆除爆破项目超过83个，如吉安市赣江特大桥爆破拆除、无锡市正星广场爆破拆除、襄阳市汉江沉管隧道预制场坞门爆破拆除等。相关项目较多采用电子雷管、导爆管雷管混合网路[19~22]，发挥了两种雷管的优点：前者延期精度高且可实现“断线起爆”，后者具有“无限”扩展能力。2021年6月，攀枝花市米易县安宁河大桥成功爆破拆除，爆破采用了电子雷管长延时连锁解体、不均匀沉降错位解体塌落的爆破网路设计方法（见图5），保证了周围环境安全。

（三）智能化水平不断提升

电子雷管起爆系统与物联网、大数据等信息技术融合程度不断加深，爆破设计软件、注册机的数据传输壁垒也已解决，实现了雷管延期时间的批量自动设定、非接触注册编码等功能（见图6）；改善了操作快捷性与安全性，联网效率提高50%以上[23]。基于物联网的电子雷管在线监测、实时定点、密码授权等技术，利用互联网跟踪并监控电子雷管“生产–运输–储存–使用”环节的相关数据，实现电子雷管的全生命周期动态管控（见图7）。用于电子雷管现场编程的智能注册机具有延时方案设计、非接触式扫描、信息多方交互等功能，与爆破设计施工信息化服务平台、全国电子雷管密码中心、电子雷管起爆器进行数据对接，实现自动设计、快速采集、实时传输。

（四）爆破设计理论更为完善

现场设置电子雷管延时，虽为爆破优化提供了条件，但对延期参数设计提出了更高要求。然而，



(a) 爆破瞬间

(b) 爆破效果

(c) 爆破设计

图5 攀枝花市米易县安宁河大桥爆破拆除

图6 电子雷管起爆操作流程

针对不同的爆破条件（如地质情况、岩性参数、孔网参数、爆破目的、危害效应控制标准），国内外尚未有统一的雷管延期时间计算公式。在基于改善破碎效果的延期参数设计方面，国内外学者对延期时间间隔进行了较多研究：① 合理的孔间延时间隔时间，应使先爆炮孔引起的应力波从自由面反射成拉伸波后再起爆后续炮孔[24]；② 合理的间隔时间应是先爆炮孔正好形成爆破漏斗，即合理延时间隔时

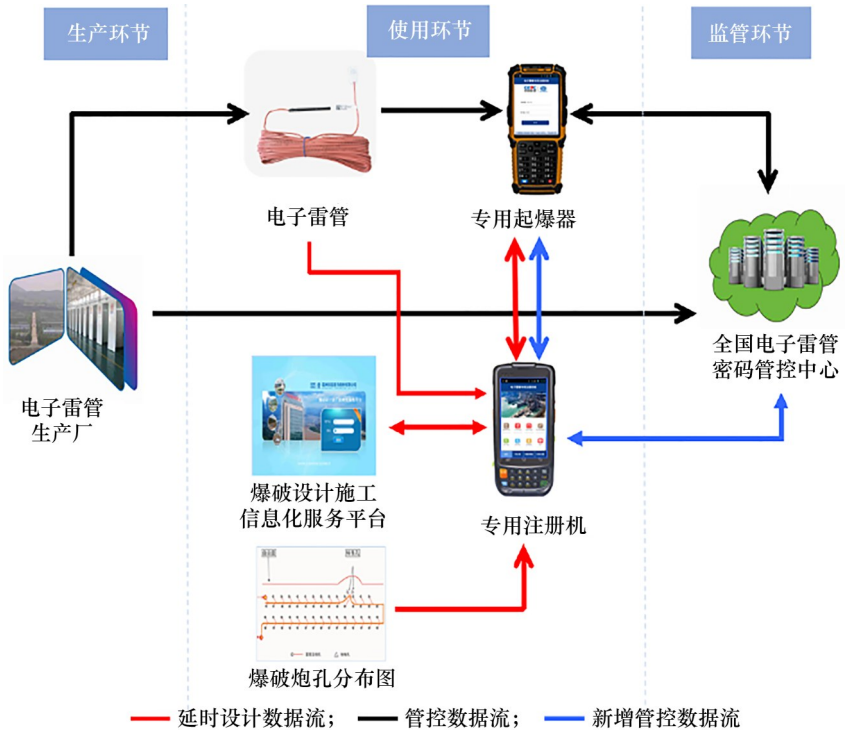


图7　电子雷管的全生命周期动态管控

间是应力波传到自由面并返回的时间、产生裂缝的时间、爆落岩石脱离岩体的时间三者之和[25]；③ 基于应力波传播和裂纹拓展理论，结合露天台阶逐孔爆破试验，得出孔间合理延时间隔时间的半经验公式[26]；④ 最小的延期时间应满足反射剪切波在下一个炮孔起爆前到达该炮孔[27]。

现有的延米延期时间（即单位孔距延期时间）推荐值见表1。从爆破破岩机理角度看，孔间最佳延时设计需综合考虑应力波叠加效应、新自由面效应、爆生气体作用、二次碰撞效应。数值仿真、现场试验统计分析表明，从改善破碎效果的角度考虑，优化的延米延期时间为1.2~2.4 ms/m[38]。

表1　现有的延米延期时间推荐值

文献	时间/年	推荐值/(ms·m^{-1})	备注
[28]	1963	2~5	应力波理论
[29]	1972	5~8.3	高速摄影
[30]	1977	4~8	现场试验
[31]	1979	11	现场试验
[32]	1981	3.3~17	现场试验
[33]	1987	3.3	现场试验
[34]	1991	3.3~13	现场试验
[35]	2010	1.0~3.3	应力波理论
[36]	2011	1.1~2	模型试验
[37]	2013	1.1~2	模型试验+数值计算
[5]	2016	2	数值计算
[38]	2020	1.2~2.4	现场试验+数值仿真

在基于爆破振动控制的延期参数设计方面，国内研究围绕电子雷管爆破振动全历程预测及主动控制展开[39~43]；应用群孔爆破振动非线性空间矢量叠加模型和Monte-Carlo随机模型，提出了基于爆堆形态、爆破块度、爆破振动综合控制的电子雷管延期时间设计流程（见图8）[38,44]，可用于爆破参数优化。

采用单孔爆破振动实测波形和爆破振动全历程预测模型，模拟了不同起爆时差条件下的毫秒爆破振动（10个炮孔，见图9）[45]。随着起爆时差加大，爆破振动峰值逐渐减小；爆破振动峰值减小到一定极值后，再继续增大起爆时差将有所增加，最后稳定在一个固定值。

在广东省某石灰石矿山开展的爆破试验[46]表明，当孔间延期间隔很短时（0~23 ms），群孔爆破质点峰值振动速度（PPV）随着电子延期间隔增大而迅速衰减。这是因为，随着电子雷管延期间隔增大，各孔振动波形的错峰效应趋于显著。当电子雷

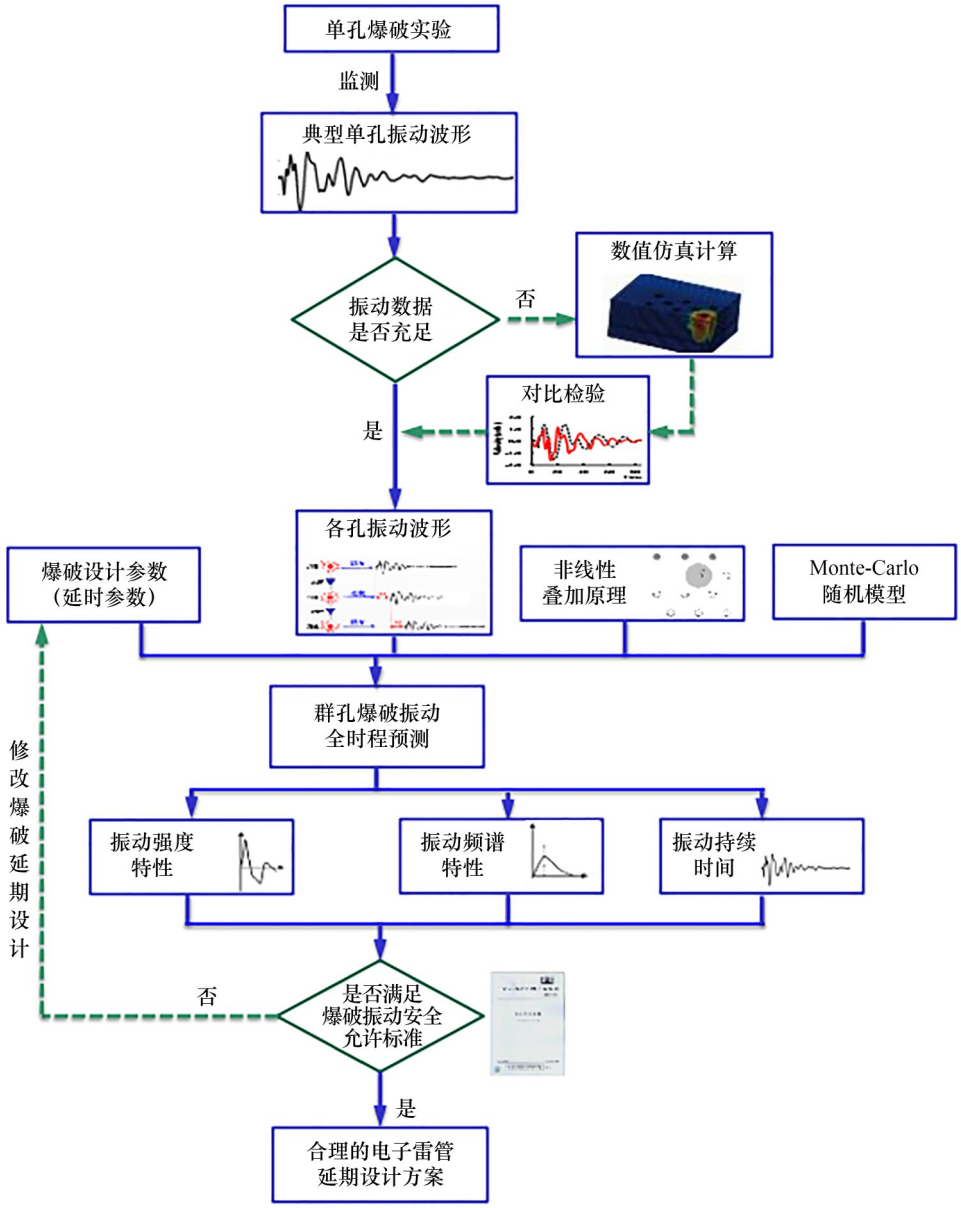


图8　电子雷管延期时间设计流程

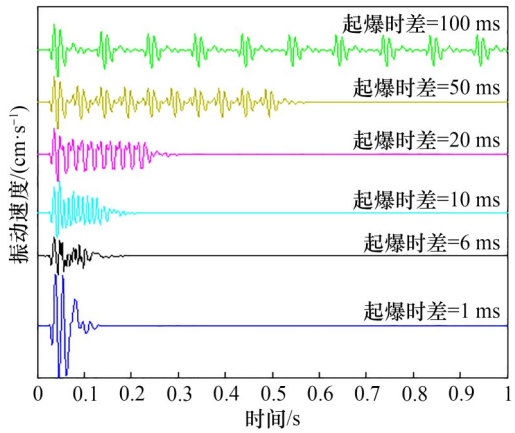


图9　不同起爆时差条件下的毫秒爆破振动波形

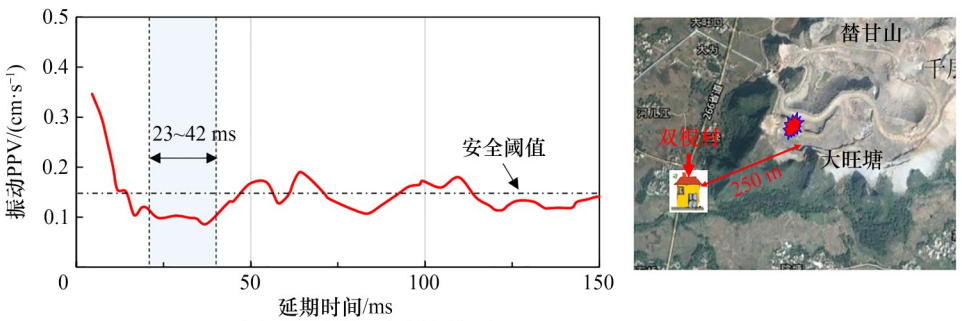
管延期间隔较大时，随着延期间隔的增大，群孔爆破振动强度呈现锯齿形起伏变化。以西侧250 m处的民房振动为控制目标时，合理延期时间是23~42 ms；以南侧210 m处的民房振动为控制目标时，合理延期时间是27~46 ms；综合多目标的振动控制要求，兼顾孔网参数偏差、装药量误差等因素，电子雷管延期间隔设置的推荐值为27~42 ms（见图10）。

（五）电子雷管拒爆与失效机理不断揭示

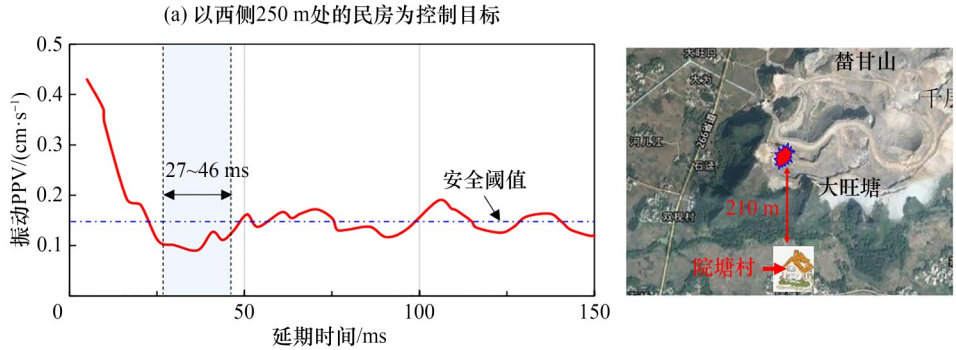
得益于芯片技术的升级，电子雷管抗杂散电流、抗电磁干扰等技术问题已基本解决，但电子雷

管受冲击失效问题一直未能解决。电子雷管抗冲击性能测试装置可模拟电子雷管在爆破过程中经受的强冲击荷载环境，得到电子雷管临界失效时的冲击荷载阈值分布[47,48]。

通过冲击波传感器可获得具有正态统计意义的试验数据。在试验中采用高速摄像仪，观察电子雷管在测试瞬间的管体动态变形。通过现场孔内冲击测试，得到电子雷管在给定爆破环境中受到的冲击荷载强度分布。在同一坐标系中绘制现场爆破环境下冲击荷载强度s的概率分布函数$f(s)$、该批次电子雷管抗冲击强度r的概率分布函数$g(r)$，两条曲线发生重叠的部分称为干涉（见图11）；干涉区域表



(a) 以西侧250 m处的民房为控制目标



(b) 以南侧210 m处的民房为控制目标

图10　基于多目标振动控制的延期时间比选过程

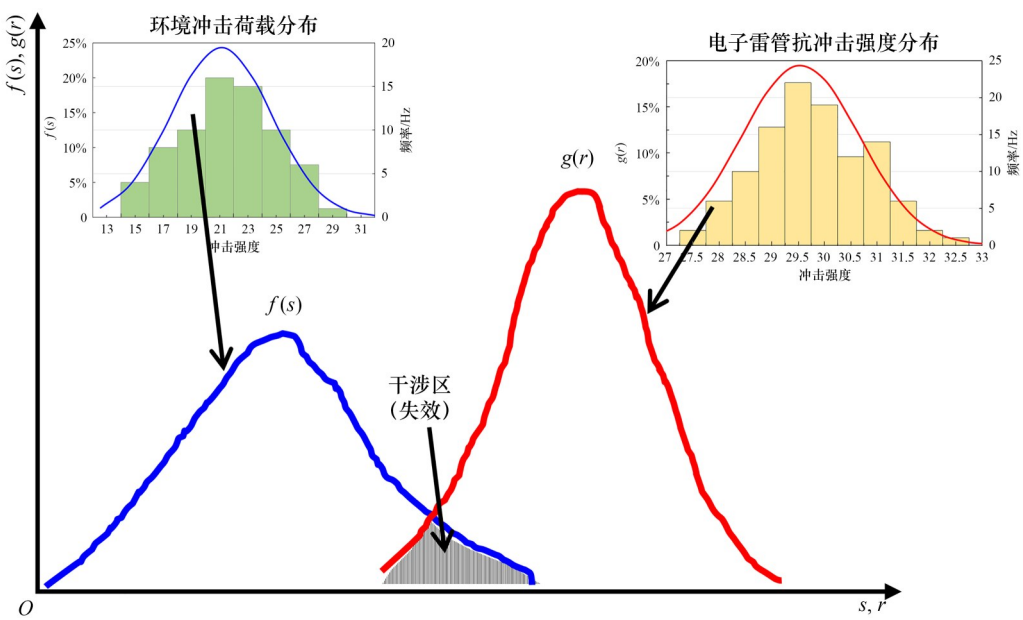


图11　基于应力-强度干涉理论的电子雷管可靠性评估

示电子雷管在冲击荷载环境下发生失效的范围。基于应力 – 强度干涉理论来评估电子雷管在给定爆破环境下的可靠性，可为电子雷管选型与优化提供判据。

统计数据表明，拒爆电子雷管较多分布在中后排，第一排几乎没有；拒爆电子雷管呈现集中分布特征，通常是两个或多个拒爆炮孔同时出现；混装乳化炸药爆破中的电子雷管拒爆概率高于混装铵油炸药爆破，成品包装炸药爆破中的电子雷管拒爆概率最低；含水炮孔中的电子雷管拒爆概率高于干孔，超硬岩中电子雷管的拒爆概率高于软弱裂隙岩体。在隧道掘进、井巷爆破等小断面爆破中，拒爆电子雷管的空间分布以后起爆的周边孔居多，少量拒爆电子雷管出现在掏槽孔附近的辅助孔中，长延期起爆网路中的电子雷管拒爆率高于短延时起爆网路。对拒爆电子雷管进行信号检测、解剖分析发现，普遍存在点火药头不同程度破裂、桥丝断裂、焊点脱落、芯片模组（含电容）故障（见图 12）。

对电子雷管失效故障进行的统计分析表明，电子雷管在强冲击荷载作用下会引起各种故障，抗冲击性能不足是首要原因，在拒爆故障中的占比达到 81.7%。冲击荷载引起的故障，主要导致点火药头无法正常发火以激发基础雷管，在电子雷管拒爆总故障中的占比达到 61.2%。冲击荷载作用下芯片模组损坏占总故障的 25.3%。芯片模组中的芯片、电容等关键元器件在瞬态强冲击作用下性能发生畸变，短暂无法正常工作；但元器件自身如果没有发生机械损坏，在冲击作用消失后又可以完全或部分恢复正常工作，即重新注册后又可以正常起爆，工程上称为“震晕”现象。当冲击荷载进一步加大或芯片模组质量较差时，芯片模组就会发生完全机械损坏；即使重新注册雷管也无法正常起爆。因此，降低电子雷管拒爆率的主要途径有：提高产品强度设计余量、减小产品强度的个体差异、降低使用环境中的冲击荷载、利用检测环节剔除薄弱产品。

三、我国电子雷管起爆技术发展趋势

（一）电子雷管产品转向系列化、标准化发展

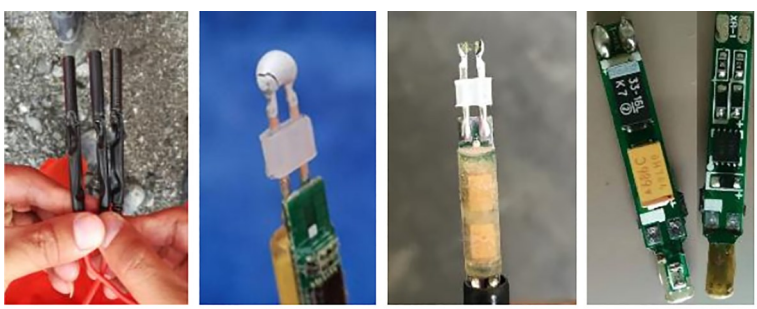
《“十四五”民用爆炸物品行业安全发展规划》提出，起爆器材生产线逐步转向自动化、智能化、少人化，年产量万发级的自动化电子雷管装配线是建设重点。受行业“撤销基础雷管生产线、奖励电子雷管产能”政策影响，基础雷管和延期元件协同生产及配送、电子雷管集中装配的生产模式成为趋势。

电子雷管产品质量问题依然是行业关注的重点。开展爆破振动破坏、金属矿磁电干扰等效应对芯片模组的破坏机理研究，针对不同市场应用场景开发差异化的电子雷管产品，依托起爆系统智能化升级来改善电子雷管应用效果。

（二）电子雷管起爆技术转向智能化发展

智能化的电子雷管编码起爆系统，易于匹配爆破方案设计，可最大限度地将软 / 硬件产品进行集成；起爆系统与智能化爆破设计软件紧密耦合，将实现起爆延时设计自动化、现场注册编码高效化、爆破效果最优化、起爆全过程管理信息化。通过电子标签、云计算等技术，方便快捷地进行相关数据的交换及通信，据此开展起爆网路智能识别和读取以及起爆网路优化，显著改善起爆网路的安全性。

具有国际先进水平的无线电子雷管产品开始投入生产应用，无需物理连接传统起爆器的导线，减少人员进入高风险区域，提升爆破作业人员的安全



(a) 管壳变形　(b) 药头破裂　(c) 桥丝断裂　(d) 芯片模组损坏

图 12　拒爆电子雷管的典型失效模式

性。中国葛洲坝集团易普力股份有限公司、广东宏大爆破工程有限公司在远程遥控起爆技术研究方面取得进展（见图13），但距离国际先进水平仍有一定差距。

（三）电子雷管延期设计理论向短延时爆破发展

自20世纪70年代起，有关延期时间对爆破效果的影响研究即大量开展。前期研究受制于雷管延时精度不足，导致延米延期时间的取值普遍偏大，主流观点认为保证最优破碎效果的取值为3.3~13 ms/m[28~34]。近10年来，随着电子雷管技术的逐步成熟、雷管延期精度不断提升，业内对延期时间的认识也在深化。

合理的孔间延时设计需满足3个条件：充分利用先爆炮孔为后爆炮孔创造的自由面；相邻炮孔破碎岩石在空中相互碰撞挤压，加强岩石破碎效果；减少最大段起爆药量，实现单孔单响、逐孔起爆，降低爆破振动效应。从爆破破碎的角度，主流观点认为延米延期时间宜小于2.5 ms/m[36~38]。目前，短延时在爆破实践中的优势受到更多关注，成为电子雷管爆破延时参数设计方面的发展趋势。

（四）电子雷管起爆网路转向大规模发展

随着爆破对象的环境与结构趋于复杂，起爆网路的规模呈现增大趋势。梳理公开资料可见，目前国内电子雷管单次起爆的最大规模超过7.5×10^4发（见表2）。电子雷管单次起爆规模增大后，要求精细控制爆破部位破坏顺序、爆破延时时间，因而基于互联网技术的大型数码电子雷管起爆技术成为发展趋势。适应不同爆破对象的网路结构和形式，大型起爆网路的准爆可靠性计算方法、抗干扰设计、施工方法等，成为研究热点。

四、我国电子雷管起爆技术与应用存在的问题

（一）电子雷管在复杂环境下的拒爆现象频发

电子雷管技术已进入快速发展阶段，但国内企业的产品质量参差不齐，产品可靠性问题成为制约电子雷管推广应用的最大障碍。例如，电子雷管露天爆破拒爆率一般可控制在在0.3‰以内，而在隧洞、孔桩、大孔径深孔金属矿混装爆破等复杂环境中的拒爆率超过1‰；某些企业的产品在隧道爆破

图13　远程起爆管理系统架构

表2　国内典型工程的电子雷管单次起爆规模

项目类型	时间	电子雷管数量/发	炸药消耗量/t
三峡工程三期RCC围堰拆除爆破	2006年6月	2506	192.0
向家坝水电站二期纵向围堰拆除爆破	2012年5月	≥3000	12.3
浙江省舟山市某船坞拆除爆破	2018年8月	1052	21.0
河南省郑州市群楼拆除爆破	2021年8月	≥75 000	2.5
山西省平朔东露天煤矿爆破	2022年5月	≥2000	427.5
四川省白塔钙芒硝矿地下矿山爆破	2022年6月	9740	—

中的拒爆率超过3‰，在桩井爆破中的拒爆率甚至超过5%，严重影响了施工作业安全和工程进度。

国外企业在电子雷管生产方面采用承受冲击荷载标准，如部分产品可承受101 MPa脉冲压力[49]。而在我国，现有检测方法研究都是基于霍普金森杆或撞击器、振动机等室内试验而展开[50]，无法合理反映电子雷管在炮孔内的真实赋存环境（如岩体特性、延期时间、群孔效应），未能兼顾厂内生产、现场应用两个环节的差异性。因此，亟待发展经济便捷的电子雷管抗冲击性能模拟测试装置与评估方法，为电子雷管的可靠性分析、设计及选型提供科学依据。

（二）电子雷管爆破应用研究与工程实践脱节

电子雷管可以现场设置延期时间，在易于爆破方案优化设计的同时，对起爆延时设计、起爆网路连接提出了更高要求。电子雷管具有延期精度极高的特点，在国外主要用于精细控制爆破。在国内，主要发挥电子雷管信息化管控方面的功能，直接替换普通雷管，而在爆破方法、爆破设计、施工操作方面的研究与应用未能同步跟进；大部分使用者沿用了导爆管雷管的延期设计方法[51,52]。电子雷管爆破应用研究与先进工程实践存在明显脱节现象。

国内部分企业的电子雷管产品联网操作过程不便捷，参数设定效率低。究其原因，研发电子雷管起爆系统以芯片厂家为主，对爆破应用的理解和认知不够深入，缺乏针对电子雷管联网的有效方案。电子雷管现场使用改变了既有的操作方式，现场作业人员未能适应；既有的操作习惯使得电子雷管被当成普通雷管使用，相应的爆破优势难以发挥。目前，国内企业的电子雷管起爆系统操作方式、使用流程各不相同，操作系统通用性差；在进行产品更新或替换时，用户需重新学习起爆系统功能。在操作便捷性、施工效率方面，部分企业的注册机智能化水平不高，使得隧道爆破施工仍套用导爆管雷管分段别起爆的作业模式，这就导致隧道爆破中的电子雷管施工效率反而比导爆管雷管降低约30%。此外，套用的导爆管雷管设计施工方法并不科学，采用电子雷管起爆技术后，由于电子雷管的延期精度极高，导致同一分组内的同段别电子雷管几乎是同时起爆，反而引发了更强的爆破振动危害效应。

（三）电子雷管产品类型单一、系列化程度不足

我国工程爆破的应用场景极为丰富：温度超过80 ℃的煤矿高温火区爆破作业，温度低于−40 ℃的高海拔极寒地区金属矿爆破作业；70 m超长脚线的深水爆破作业，不足1 m长脚线的高楼拆除爆破作业；强电磁环境下的磁铁矿爆破作业，高瓦斯含量的井下煤矿爆破作业。不同特性的应用环境对雷管性能及品质要求存在鲜明的差异性。

国产普通雷管产品已经系列化，如高强度导爆管雷管、抗水导爆管雷管、煤矿许用电雷管、耐高温电雷管、抗静电电雷管、地震勘探电雷管等。相比之下，工业电子雷管品种单一，产品系列化程度不足，无法满足各类爆破作业环境需要；尤其对于井下爆破、含瓦斯煤矿，现有电子雷管品种难以满足工程应用需求。因此，需要加强电子雷管产品的差异化研制力度，提升电子雷管产品的系列化发展水平。

（四）电子雷管技术标准体系不健全

现行的《工业数码电子雷管》（WJ9085—2015）标准为通用性要求，对产品可靠性、环境适应性等技术指标的要求较低，没有区分隧道、现场混装爆破、高原等不同应用环境的性能要求。随着电子雷管应用领域的拓宽，现行标准对煤矿许用型电子雷管、地震勘探电子雷管等产品缺少产品技术标准方面的支撑。在电子控制模块的安全性、可靠性方面，没有可执行的标准；电子雷管可靠性检测与优化设计方法的缺失，成为制约电子雷管产品质量提升的主要障碍。

目前，工业电子雷管相关的标准集中在产品生产、流向信息监管方面，没有设计施工相关的行业技术标准；不同生产企业的工业电子雷管系统，起爆作业的流程要求一致性不佳，导致用户现场使用的极大不便。需要尽快形成统一的电子雷管设计施工行业技术标准，同步提高电子雷管起爆系统的智能化水平，以终端用户操作使用的便捷化来充分发挥电子雷管的技术优势。

五、我国电子雷管起爆技术发展建议

（一）加强电子雷管控制爆破破岩理论研究

精确延时技术为改善爆破破碎效果、降低爆破有害效应提供了坚实技术支撑，而电子雷管起爆技

术理论研究已经明显滞后于工程实践需求。未来重点研究包括：短延时条件下逐孔起爆岩石破碎机理，大区爆破的起爆顺序与排间、孔间精确延时设计理论、起爆网路优化技术，精确延时起爆条件下岩石块度分布、爆堆形态、爆破振动预测与控制理论，大型起爆网路准爆可靠性、延时精确性相关计算理论。

（二）推动信息技术与电子雷管起爆技术融合发展

积极布局电子雷管配套起爆系统研究，发展操作使用便捷化、智能化的起爆系统，据此简化设计施工流程并提升作业效率。针对多种应用场景进行爆破优化设计，形成爆破施工方法、操作流程等方面的行业技术规范。发展新型电子雷管无线起爆技术，摆脱传统起爆器导线物理连接的制约，实现爆破作业场所的少人化与本质安全。创新应用场景，提高射频识别、无线传感、全球定位系统、激光扫描等信息技术在爆破网路起爆中的应用水平。发展基于现代加密技术的爆破网路以及配套的专用仪器与仪表。

（三）发展系列化、差异化的电子雷管产品

各类爆破场景下的使用环境、应用需求不同，电子雷管性能及品质要求存在差异性。从工程实践需求出发，研发适应典型作业环境的系列化电子雷管产品，丰富产品谱系。井下煤矿开采是电子雷管的主要应用市场，重点关注井下煤矿对电子雷管产品的特殊安全需求，及时研究并制定煤矿许用电子雷管安全认证标准。

（四）建立和完善电子雷管标准体系

针对电子雷管施工操作标准缺失的现状，建议组织行业优势力量编制电子雷管爆破作业规范标准。可靠性设计贯穿电子雷管产品的开发、设计、生产、试验、使用等环节，探索并建立科学合理的可靠性分析理论方法，指导电子雷管产品的可靠性设计。研究电子雷管产品使用规律并制定相应标准，建立对应的检测标准体系。对电子雷管关键原材料实行准入门槛制度，实质性提升产品质量并保障应用成效。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 21, 2022; **Revised date:** September 5, 2022

Corresponding author: Fan Yong is a professor from the College of Hydraulic & Environmental Engineering of China Three Gorges University. His major research fields include Engineering blasting and petrodynamics. E-mail: yfan@ctgu.edu.cn

Funding project: National Natural Science Fund project (51979152); Chongqing Talent Program project (cstc2022ycjh-bgzxm0079)

参考文献

[1] 张乐, 颜景龙, 李风国, 等. 隆芯1号数码电子雷管在露天采矿中的应用 [J]. 工程爆破, 2010, 16(4): 73–76.
Zhang L, Yan J L, Li F G, et al. Application of LUX No.1 digital electronic detonator in open pit mine [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4): 73–76.

[2] 颜景龙. 中国电子雷管技术与应用 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(1): 36–41.
Yan J L. Technology and application of Chinese electronic detonator [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(1): 36–41.

[3] 邢光武, 郑炳旭, 魏晓林. 延时起爆干扰减震爆破技术的发展与创新 [J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(4): 95–97.
Xing G W, Zheng B X, Wei X L. Development and innovation delay initiating techniques to reduce blasting vbration [J]. Mining Research and Development, 2009, 29(4): 95–97.

[4] 田振农, 孟祥栋, 王国欣. 城区隧道电子雷管起爆错相减震机理分析 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 108–111.
Tian Z N, Meng X D, Wang G X . 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, 杨仁树, 杨军. 精确延时对台阶爆破岩石破碎块度影响的数值模拟研究 [J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 11–16.
Li S B, Yang R S, Yang J. Numerical simulation of the impact of precise time delay on rock fragmentation in bench blasting [J]. Explosive Materials, 2016, 45(3):11–16.

[6] 冷振东, 范勇, 卢文波, 等. 孔内双点起爆条件下的爆炸能量传输与破岩效果分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2451–2462.
Leng Z D, Fan Y, Lu W B, et al. Explosion energy transmission and rock-breaking effect of in-hole dual initiation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2451–2462.

[7] 施富强. 爆破振动频率调控技术研究与应用 [J]. 工程爆破, 2012, 18(2): 54–59.
Shi F Q. Research and application of blasting vibration frequency control technology [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(2): 54–59.

[8] 中国爆破器材行业协会. 2021年民爆行业经济运行分析报告 [R]. 北京: 中国爆破器材行业协会, 2022.
China Explosive Materials Trade Association. Analysis report on economic operation of civil explosive industry in 2021 [R]. Beijing: China Explosive Materials Trade Association, 2022.

[9] 王嵬. 向家坝二期纵向围堰混凝土爆破拆除减振技术研究 [J]. 水力发电, 2014, 40(1): 79–81.
Wang W. Study on vibration damping technologies for phase-II longitudinal cofferdam concrete blasting in Xiangjiaba Hydropower

Station [J]. Water Power, 2014, 40(1): 79–81.

[10] 刘明生, 刘泽艳, 范道林. 数码电子雷管在杨房沟水电站拱坝坝基开挖中的运用 [J]. 四川水力发电, 2021, 40(6): 41–46.
Liu M S, Liu Z Y, Fan D L. Application of digital electronic detonator in arch dam foundation exaction of Yangfanggou Hydropower Station [J]. Sichuan Water Power, 2021, 40(6): 41–46.

[11] 余良松, 周龙杰, 胡英国, 等. 两河口水电站级配料开采爆破孔间延时优选的试验研究 [J]. 爆破, 2021, 38(4): 81–88.
Yu L S, Zhou L J, Hu Y G, et al. Experimental study on delay optimization between blasting holes in grade batching mining of Lianghekou Hydropower Station [J]. Blasting, 2021, 38(4): 81–88.

[12] Leng Z D, Sun J S, Lu W B, et al. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 129: 1–12.

[13] 叶春雷, 郑德明, 戴春阳, 等. 复杂环境下数码电子雷管在土石方爆破工程中的应用 [J]. 爆破, 2019, 36(4): 76–79.
Ye C L, Zheng D M, Dai C Y, et al. Application of digital electronic detonator in soil-rock blasting engineering in complex situation [J]. Blasting, 2019, 36(4):76–79.

[14] 孙鹏昌, 卢文波, 雷振, 等. 单薄山体岩质高边坡爆破振动响应分析及安全控制 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 877–885.
Sun P C, Lu W B, Lei Z, et al. Blasting vibration response and control of high rock slopes of thin mountain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 877–885.

[15] Guan X M, Guo C X, Mou B, et al. Tunnel millisecond-delay controlled blasting based on the delay time calculation method and digital electronic detonators to reduce structure vibration effects [J]. PLoS One, 2019, 14(3): 1–15.

[16] 史秀志, 邱贤阳, 聂军, 等. 超大断面竖井深孔爆破成井技术 [J]. 工程爆破, 2016, 22(5): 7–12.
Shi X Z, Qiu X Y, Nie J, et al. Technology of deep-hole blasting in ultra-large section shaft excavation [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(5): 7–12.

[17] 刘忠民, 杨年华, 石磊, 等. 电子雷管小孔距爆破拒爆试验研究 [J]. 爆破器材, 2021, 50(5): 39–42.
Liu Z M, Yang N H, Shi L, et al. Experimental study on misfire in small hole-space blasting of electronic detonator [J]. Explosive Materials, 2021, 50(5): 39–42.

[18] 刘翔宇, 龚敏, 吴昊骏, 等. 自由面变化条件下隧道电子雷管爆破参数确定方法 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 150–162.
Liu X Y, Gong M, Wu H J, et al. Determination method of tunnel blasting parameters using electronic detonator under changing condition of free surface [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10): 150–162.

[19] 徐传忠, 孙跃光, 张春玉, 等. 126 m 长水闸和交通桥控制拆除爆破 [J]. 工程爆破, 2021, 27(6): 92–95.
Xu C Z, Sun Y G, Zhang C Y, et al. Controlled demolition blasting of a 126 m long sluice and traffic bridge [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(6): 92–95.

[20] 黄雄, 田水龙, 余兴和, 等. 复杂环境下小塌落高度双曲拱桥爆破拆除 [J]. 爆破, 2022, 39(1): 120–129.
Huang X, Tian S L, Yu X H, et al. Blasting demolition of double-curved arch bridge with small collapse height in complex environment [J]. Blasting, 2022, 39(1): 120–129.

[21] 李卫群, 钟云, 周浩仓. 复杂环境刚架拱桥电子雷管拆除爆破控制技术 [J]. 工程爆破, 2020, 26(1): 65–71.
Li W Q, Zhong Y, Zhou H C. Controlled blasting demolition of electronic detonator for rigid frame arch bridge in complex environment [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(1): 65–71.

[22] 龚逞华, 周浩仓, 郭刚, 等. 电子雷管在楼房爆破拆除中的应用 [J]. 工程爆破, 2018, 24(5): 40–44.
Gong C H, Zhou H C, Guo G, et al. Application of electronic detonator in demolition blasting of building [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(5): 40–44.

[23] 刘庆, 张程娇, 郝亚飞, 等. 数码电子雷管在某露天矿爆破中的应用 [J]. 工程爆破, 2019, 25(2): 67–72.
Liu Q, Zhang C J, Hao Y F, et al. Application of digital electronic detonator in blasting of an open pit mine [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(2): 67–72.

[24] 冯叔瑜. 爆破工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1980.
Feng S Y. Blasting engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1980.

[25] 张正宇. 现代水利水电工程爆破 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
Zhang Z Y. Modern water conservancy and hydropower engineering blasting [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.

[26] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
Dai J. Dynamic behaviors and blasting theory of rock [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.

[27] Hashemi S A, Katsabanis P. The effect of stress wave interaction and delay timing on blast-Induced rock damage and fragmentation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 2327–2346.

[28] Lang L C, Favreau R F. A modern approach to open-pit blast design and analysis [C]. Montreal: The 74th Annual General Meeting of the C.I.M., 1972.

[29] Langefors U, Khilstrom B. The modern techniques of rock blasting [M]. New York: John Wiley and Sons, 1963.

[30] Hagan T N, Kennedy B J. A practical approach to the reduction of blasting nuisances from surface operations [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(3): 65.

[31] Winzer S R, Furth W, Ritter A. Initiator firing times and their relationship to blasting performance [C]. Austin: The 20th US Symposium on Rock Mechanics, 1979.

[32] Andrews A B. Design criteria for sequential blasting [C]. Phoenix: Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, 1981.

[33] Stagg M S, Rholl S A. Effects of accurate delays on fragmentation for single-row blasting in a 6.7 m bench [C]. Bethel CT: Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 1987.

[34] Otterness R E, Stagg M S, Rholl S A. Correlation of shock design parameters to fragmentation [C]. Las Vegas: Proceedings of the 7th ISEE Conference on Explosives and Blasting Research, 1991.

[35] Rossmanith H P. The use of lagrange diagrams in precise initia-

tion blasting Part I: Two interacting blastholes [J]. International Journal for Blasting and Fragmentation, 2002, 6(1): 104–136.

[36] Johansson D, Ouchterlony F. Fragmentation in small-scale confined blasting [J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2011, 3(1): 72–94.

[37] Johansson D, Ouchterlony F. Shock wave interactions in rock blasting: The use of short delays to improve fragmentation in model-scale [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(1): 1–18.

[38] 冷振东. 电子起爆条件下的孔内爆轰波碰撞效应及其破岩效果分析 [C]. 北京: 中国水利学会2020学术年会, 2020.
Leng Z D. Interactions of colliding detonation waves under dual initiation with electronic detonators [C]. Beijing: 2020 Academic Annual Meeting of China Hydraulic Society, 2020.

[39] 李鹏, 卢文波, 陈明, 等. 爆破振动全历程预测及主动控制研究进展 [J]. 力学进展, 2011, 41(5): 537–546.
Li P, Lu W B, Chen M, et al. Advances in full time-history prediction and active control of blasting vibration [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 537–546.

[40] Li P, Lu W B, Wu X X, et al. Spectral prediction and control of blast vibrations during the excavation of high dam abutment slopes with millisecond-delay blasting [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 94: 116–124.

[41] 杨仁树, 车玉龙, 孙强, 等. 高祥涛.城市地铁电子雷管爆破降振技术试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(Z2): 3741–3749.
Yang R S, Che Y L, Sun Q, et al. Experimental study of decreasing blasting vibration technology with digital detonator in urban subway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Z2): 3741–3749.

[42] Shi X Z, Qiu X Y, Zhou J, et al. Application of Hilbert-Huang transform based delay time identification in optimization of short millisecond blasting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1965–1974.

[43] 龚敏, 石发才, 吴晓东. 基于叠加和频谱分析的电子雷管延期时间研究 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(15): 134–141.
Gong M, Shi F C, Wu X D. Delay time of electronic detonators based on superposition and frequency spectral analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(15): 134–141.

[44] 冷振东, 涂书芳, 周桂松, 等. 基于多目标控制的精确延时控制爆破延时参数设计方法: CN112034006A [P]. 2020-12-04.
Leng Z D, Tu S F, Zhou G S, et al. Design method of precise delay control blasting delay parameters based on multi-objective control: CN112034006A [P]. 2020-12-04.

[45] 李鹏. 电子起爆条件下岩石高边坡爆破振动主动控制方法 [D]. 武汉: 武汉大学(博士学位论文), 2012.
Li P. Active control of blasting vibration induced by excavation of high slope with electronic detonators [D]. Wuhan: Wuhan University(Doctoral dissertation), 2012.

[46] 徐志强, 冷振东. 基于电子雷管精确时延的爆破减震试验 [J]. 露天采矿技术, 2020, 35(6): 30–33.
Xu Z Q, Leng Z D. Blasting damping experiment based on electronic detonator precise time delay [J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(6): 30–33.

[47] 冷振东, 周桂松, 郝亚飞, 等. 电子雷管抗冲击性能水下模拟试验装置: CN202120655619.1 [P]. 2021-06-30.
Leng Z D, Zhou G S, Hao Y F, et al. Underwater test device for impact resistance of electronic detonator: CN202120655619.1 [P]. 2021-06-30.

[48] 冷振东. 岩石爆破中电子雷管失效机理与抗冲击性能评估方法研究 [C]. 淮南: 中国力学学会工程爆破专业委员会2021年学术交流会暨青年爆破学者论坛, 2021.
Leng Z D. Failure mechanism and impact resistance evaluation method of electronic detonators in rock blasting [C]. Huainan: 2021 Academic Exchange Meeting and Young Blasting Scholars Forum of Engineering Blasting Professional Committee of Chinese society of mechanics, 2021.

[49] 赵根, 吴新霞, 周先平, 等. 电子雷管起爆系统及其在岩塞爆破中的应用 [J]. 爆破, 2015, 32(3): 91–94.
Zhao G, Wu X X, Zhou X P, et al. Electronic detonator initating system and application in rock plug blasting [J]. Blasting, 2015, 32(3): 91–94.

[50] 中华人民共和国工业和信息化部安全生产司. 工业数码电子雷管标准体系建设方案 [EB/OL]. (2021-11-04)[2022-06-15]. http://gxt.shaanxi.gov.cn/aqscgzdt/72335.jhtml.
Safety Production Division, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Construction scheme of industrial digital electronic detonator standard system [EB/OL]. (2021-1104)[2022-06-15]. http://gxt.shaanxi.gov.cn/aqscgzdt/72335.jhtml.

[51] 汪旭光. 爆破器材与工程爆破新进展 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(4): 36–40.
Wang X G. Progresses in explosive materials and engineering blasting [J]. Strategic Study of CAE, 2002, 4(4): 36–40.

[52] 戚天新, 魏琳, 陈小伟, 等. 数码电子雷管隧道爆破中盲炮问题浅析 [J]. 西部探矿工程, 2021, 33(10): 182–184.
Qi T X, Wei L, Cheng X W, et al. Analysis of blind shot in tunnel blasting with digital electronic detonator [J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(10): 182–184.