

工程爆破文集

全国工程爆破学术会议论文选

第五辑

主编 霍永基

中国地质大学出版社



组织委员会

主 任	霍永基					
副主任	冯叔瑜	边克信	杨振声	朱瑞赓	徐天瑞	
委 员	霍永基	冯叔瑜	边克信	杨振声	朱瑞赓	徐天瑞
	王树仁	史家靖	汪旭光	林学圣	张正宇	姚 尧
秘书长	刘殿中					
副秘书长	金人夔	李名山				

编委会

主 编	霍永基					
副主编	冯叔瑜	杨振声	朱瑞赓	徐天瑞		
编 委	王树仁	林学圣	张正宇	刘殿中	张永哲	金人夔
	董振华	许连波	吴子骏	朱德达	张天锡	刘清荣
	马柏龄	陈保基	秦明武	黄吉顺	缪垂祖	金 和
	黄明权	胡 峰				
责任编委	张天锡	刘清荣	周祖仁			

目 录

回顾与展望	霍永基 冯叔瑜 杨振声 边克信 (1)
延长药包爆破现状的分析研究	冯叔瑜 金骥良 杨年华 (4)
爆破相似原理和模拟方法若干问题	霍永基 (10)
柱状装药爆破破碎过程的数值模拟研究	刘殿书 王树仁 (16)
条形药室端部效应的研究	王鹤鸣 (23)
条形药包鼓包运动的试验研究	叶序双 毛志远 (27)
爆炸应力波与裂纹相互作用的动光弹实验观察*	朱振海 杨永琦等 (32)
爆破抛掷方向的统计数据处理方法	高尔新 李元生 (39)
管内可燃气体由燃烧向爆轰强制转化的实验研究*	魏伴云 陈灿昌等 (44)
岩体爆破作用的损伤力学分析	张 奇 (50)
岩体可爆性等级判别的人工神经网络方法	蔡煜东 姚林声 (54)
用复杂性理论的观点对岩土爆破理论与实践初探	张天锡 朱瑞庚 (57)
岩石爆破中应力波的临界作用时间	刘殿书 王树仁 (64)
滑动爆破筑坝的数值计算及应用	任京生 杨振声等 (70)
定向爆破筑高坝设计方法探讨	钱瑞五 (76)
定向爆破筑坝的抛掷堆积规律	许连坡 (83)
广东珠海炮台山万吨级大爆破工程简介*	林学圣 顾月兵 (90)
定向爆破滑动筑坝模型律与模型材料	杨振声 周家汉等 (100)
露天高台阶爆破研究	陶和彪 刘殿中 (106)
岩质高边坡开挖爆破动力稳定分析研究	甄胜利 (110)
一种新型卧式爆炸硐室的问世	张 萌 陈益尉等 (114)
集中药包与条形药包综合控制爆破开采筑坝材料方法的研究	程 康 祝文化 (120)
多排条形药包间隔堵塞 V 形起爆控制爆破	于长顺 赵丕彪等 (124)
连续回采阶段深孔爆破技术的试验研究及应用	刘文永 袁向全等 (129)
预裂爆破在高边坡梯段开采中的应用	任昌印 (134)
铁路建设中的深孔控制爆破技术	史雅语 (141)
大块标准对爆破质量评价的影响	胡晓洪 (145)
路堑边坡爆破开挖实用方法的探讨——准光面和准预裂爆破法	张志毅 戈鹤川 (150)
井巷掏槽眼参数设计方法	陈士海 (156)
立井深孔爆破的设计研究	胡 峰 周宗平等 (160)
柱状药包爆炸加密松散厚砂基的试验研究	金骥良 史雅语等 (165)
饱和砂中爆炸地表下沉量随时间变化规律的理论研究*	李世海 刘以钢等 (171)
爆炸密实饱和砂的实验研究*	刘以钢 燕 琳等 (177)
爆炸引起饱和砂地表沉降试验研究*	燕 琳 李世海等 (182)
爆炸法加固饱和粉细砂基础的试验和机理研究	张加华 燕 琳等 (187)

拆除爆破发展现状综述	林学圣 阎家良 (192)
岩滩水电站碾压混凝土围堰爆破拆除	李世洪 龚宏辉等 (196)
钢筋混凝土高耸筒形建筑物拆除爆破切口参数的优化设计	卢文波 董振华等 (202)
80m 高烟囱拆除爆破研究	吴剑峰 金人夔等 (209)
砖混结构承重墙控制爆破定向倾倒的后坐问题	丁耀章 何 仁等 (214)
楼上控制爆破	沈兆武 黄寅生等 (217)
武汉卫生防疫大楼内向倒塌控制爆破	何守仁 (220)
高层建筑拆除爆破工程	黄吉顺 王守祥等 (225)
用水压爆破拆除房屋建筑	金人夔 (231)
水压毫秒爆破拆除复杂厂房	郑长青 (235)
水下爆炸测试炸药能量方法的试验与研究	熊代余 (240)
万吨级大爆破多段毫秒延时起爆网路	齐世福 (246)
预裂爆破合理毫秒时间的研究与探讨	张电吉 (253)
孔间毫秒顺序爆破技术在大规模梯段爆破中的应用	任昌印 欧阳国宏 (257)
多层混合结构分段延时爆破拆除中结构段长度与起爆时间间隔的确定	黄小平 庄兆铃等 (263)
我国冶金矿山爆破器材和爆破技术发展的设想	马柏令 (266)
粉状工业炸药质量可靠性评估	殷海权 王国良等 (271)
电雷管电磁稳定性研究	杜云鹤 解道金等 (275)
塑料导爆管起爆机理及其爆轰波	阳世清 (280)
爆破安全技术的发展	徐天瑞 (284)
条形药包硐室爆破振动测试分析	郑炳旭 郭 峰等 (289)
爆破振动波形实测分析的若干问题	李香灿 陆 来 (291)
露天矿单孔爆破振动的数值模拟	陆 来 金保侠 (295)
东风水电站地下厂房爆破振动效应的研究	张正宇 刘 颖等 (299)
早爆、迟爆与拒爆原因的初析及其预防	吴子骏 (306)
爆破作用下隧洞动态响应及破坏分析	甄胜利 霍永基 (309)
混凝土喷层爆破安全控制标准的研究	刘 颖 张正宇等 (318)
露天矿导爆管起爆系统可靠性分析	张立群 张敢生 (324)
易燃易爆油库区油罐爆破拆除技术	刘宏刚 白立刚等 (330)
爆破振动自记仪研制与应用	付有才 钱喜萍 (335)

CONTENTS

Engineering Blasting Technique-Past, Present and Its Prospect	
..... Huo Yongji Feng Shuyu Yang Zhensheng Bian Kexin (1)	
Research on Current Situation of Columnar and Strip-Shaped Charge Blasting	
..... Feng Shuyu Jin Jiliang Yang Nianhua (4)	
Similitude Principle and Simulation Technique in Blasting	Huo Yongji (10)
Numerical Simulation of Rock Fragmentation Process by Column Blasting	
..... Liu Dianshu Wang Shuren (16)	
Study on End Effect of Strip-Shaped Chamber Blasting	Wang Heming (23)
Experimental Research on Swelling Motion by Strip-Shaped Charge Blasting	
..... Ye Xushuang Mao Zhiyuan (27)	
Observations of Interaction between Explosive Stress Wave and Crack Extension thr-	
ough Dynamic Photoelastic Experiment	Zhu Zhenhai Yang Yongqi etc (32)
Statistical Data Processing Method for Throw Directions by Blasting	
..... Gao Erxin Li Yuansheng (39)	
Experimental Research on Forced Conversion of Combustible Mixture from Combu-	
stion to Detonation in Tube	Wei Banyun Chen Canchang etc (44)
Analysis of Blasting Effect in Rock Body with Mechanics of Damage	Zhang Qi (50)
Artificial Neural Net Method for Classification of Rock Blastability	
..... Cai Yudong Yao Linsheng (54)	
Study of Blasting Theory and Practice with Complexity Theories	
..... Zhang Tianxi Zhu Ruigeng (57)	
Critical Action Time of Strees Wave on Rock Fragmentation by Blasting	
..... Liu Dianshu Wang Shuren (64)	
Numerical Calculation of Slide Motion and Its Application in Dam Construction by	
Blasting	Ren Jingsheng Yang Zhensheng etc (70)
Design Method of Directional Blasting for High Dam Construction	Qian Ruiwu (76)
Stacking Law of Rock Fragments in Dam Construction by Directional Blasting	
..... Xu Lianpo (83)	
Introduction to Large-Scale Coyote Blasting in Paotai Mountain	
..... Lin Xuesheng Gu Yuebing (90)	
Similarity Law and Model Material of Directional Slide Blasting for Dam Construction ..	
..... Yang Zhensheng Zhou Jiahan etc (100)	
Research on High Bench Blasting in Openpit Mining	
..... Tao Hebiao Liu Dianzhong (106)	
Dynamic Stability Analysis of High Rock Slope by Excavation Blasting	
..... Zhen Shengli (110)	
A New Type of Horizontal Blasting Chamber	Zhang Meng Chen Yiwei etc (114)
Quarrying Method for Dam Construction Material by Blasting with Concentrated and	

Strip-Shaped Charge	Cheng Kang Zhu Wenhua (120)
Controlled Blasting with Multiple Row Strip-Shaped Charge by V-Shaped Detonation of Decked Charge	Yu Changshun Zhao Pibiao etc (124)
Experimental Research on Deep-Hole Bench Blasting Technique in Continuous stope	Liu Wenyong Yuan Xiangquan etc (129)
Application of Presplit Blasting in Bench Excavation of High Slope	Ren Changyin (134)
Deep-Hole Controlled Blasting Technique in Railway Construction	Shi Yayu (141)
Effect of Oversized Block's Standard on Quality Evaluation of Blasting	Hu Xiaohong (145)
Practical Blasting Technique in Highwall Excavation—Quasi-Smooth and Quasi-Presplit Blasting	Zhang Zhiyi Ge Hechuan (150)
Design Method of Cutting Hole Parameters in Shaft and Tunnel Operations	Chen Shihai (156)
Design Procedures of Deep-Hole Blasting in Shaft Construction	Hu Feng Zhou Zongping etc (160)
Experimental Research on Densification of Thick Loose Sand Foundation by Explosion of Cylindrical Charge	Jin Jiliang Shi Yayu etc (165)
Theoretical Study of Variation Law of Excess Pore Water Pressure in Saturated Sand Densified by Explosion	Li Shihai Liu Yigang etc (171)
Experimental Research on Densification of Saturated Sand by Explosion	Liu Yigang Yan Lin etc (177)
Experimental Research on Surface Subsidence of Saturated Sand from Explosion	Yan lin Li Shihai etc (182)
Experiment and Mechanism Analysis of Consolidation of Silty and Fine Sand Foundation by Explosion	Zhang Jiahua Yan Lin etc (187)
Summary of Current Developments in Demolition Blasting	Lin Xuesheng Yan Jialiang (192)
Demolition of RCC Cofferdam by Blasting in Yantan Hydroelectric Power Station	Li Shihong Gong Honghui etc (196)
Optimal Design of Notch Parameters in Blasting Demolition of Reinforced Concrete Towering Tube Buildings	Lu Wenbo Dong Zhenhua etc (202)
Blasting Technique for Demolishing an 80m High Chimney	Wu Jianfeng Jin Renkui etc (209)
Recoil Movement of Bearing Wall in Directional Toppling by Controlled Blasting	Ding Yaozhang He Ren etc (214)
Controlled Blasting of Reinforced Concrete Foundation Located Upstairs	Shen Zhaowu Huang Yinsheng etc (217)
Controlled Blasting for Collapsing Office Building of Wuhan Sanitation and Antiepidemic Station	He Shouren (220)
Demolition of Tall Building 12.5m from Computer Room	Huang Jishun Wang Shouxiang etc (225)

Demolition of Buildings by Water Infusion Blasting	Jin Renkui (231)
Demolition of Complicated Factory Building	Zheng Changqing (235)
Experimental Study of Test Method for Measuring Explosive Energy of Underwater Explosion	Xiong Daiyu (240)
Detonation Network of Multiple Millisecond Delay Interval in large-Scale Coyote Bl- asting in Paotai Mountain	Qi Shifu (246)
Optimum Delay Interval in Presplit Blasting	Zhang Dianji (253)
Application of Between-Hole Sequential Millisecond Blasting Technique in Large-Scale Bench Blasting	Ren Changyin Ouyang Guohong (257)
Determination of Structural Unit and Delay Interval in Blasting Demolition of Mu- litiorey Complex Structure	Huang Xiaoping Zhuang Zhaoling etc (263)
Development Prospects of Explosive Materials and Blasting Techniques in Opencast Mine	Ma Bailing (266)
Quality and Reliability Assessment of Industrial Powder Explosives	Yin Haiquan Wang Guoliang etc (271)
Quantitative Investigation of Electromagnetic Stability of Electric Detonator	Du Yunhe Xie Daojin etc (275)
Detonation Mechanism of Nonel and it's Datonation Wave	Yang Shiqing (280)
Developments of Blasting Safety Technique	Xu Tianrui (284)
Measurement and Analysis of Vibration from Coyote Blasting with Strip-Shaped Charge	Zheng Bingxu Guo Feng etc (289)
Blasting Vibration and Its Effects on Structures	Li Xiangcan Lu Lai (291)
Numerical Simulation of Vibration from Blasting Adjacent to Highwall in Opencast Mine	Lu Lai Jin Baoxia (295)
Research on Blasting Vibration Effects in Underground Powerhouse in Dongfeng Hy- droelectric Power Station	Zhang Zhengyu Liu Ying etc (299)
Analysis and Prevention of Premature, Latemature and Missfire Explosion	Wu Zijun (306)
Analysis of Dynamic Response and Damage of Tunnel from Blasting	Zhen Shengli Huo Yongji (309)
Safety Criterion for Controlling Blasting Effect on Concrete Spouting Layer	Liu Ying Zhang Zhengyu etc (318)
Reliability Analysis of Nonel Detonation Network in Openpit Mine	Zhang Liqun Zhang Gansheng (324)
Blasting Technique for Demolition of Big Non-Metallic Oil Tanks near Inflammable and Explosive Oil Depot	Liu Honggang Bai Ligang etc (330)
Development and Application of Self Recorder for Measurement of Blasting Vibration	Fu Youcai Qian Xiping (335)

回顾与展望

霍永基 冯叔瑜 杨振声 边克信

自1978年我国工程爆破界在云南昆明召开第一届全国土岩爆破学术交流会以来已度过了15个春秋,随着我国四化建设的深入开展,工程爆破技术也相应得到很大的发展,在爆破理论研究和各类工程施工实践经验方面都取得了丰硕的成果。我们举行了四次全国性的工程爆破学术会议和各种不同规模的专题研讨会。通过广泛的学术交流沟通了信息,开拓了思路,提高了业务水平,增强了学会凝聚力。许多行业部门分别举办了多期爆破技术培训班,使得我国爆破新技术得到推广,爆破队伍不断壮大。目前,全国从事爆破专业的人数已达60余万人,参与着国家许多重大工程项目的建设,工程爆破技术在国民经济中发挥着更大的作用。

我国正处于改革和建设的关键时期,党中央提出的深化改革、发展生产力、提高综合国力的方针、政策和措施,把科学技术作为第一生产力,必将推动我国的改革和建设事业坚定而稳步发展。

自第四届年会以来,工程爆破界以面向国民经济建设、促进科技发展、探索改革方向为指导思想。在理论联系实际,科技为生产建设服务的方针指引下做了大量的工作,工程科研向总体性、可靠性、精确性与准确性的系统研究方向发展,其内容更深入更广泛。而且紧密的结合工程应用促进了科技发展,取得的研究成果,解决了生产中迫切要求解决的工程实际问题 and 关键技术问题。这些研究成果既有理论又有实践,并在一些技术难点上有所突破。这些新观点、新方法、新技术很具有生命力,有的已达国际先进水平,这些高水平的科技成果,对指导工程实践有重要意义,取得了显著的经济和社会效益。

在爆破理论方面对滑移爆破理论、实验与数值计算等方面做了大量系统研究;同时在爆破相似原理、模拟技术和模型材料研究方面取得了较大进展。动光弹三维激光全息试验研究取得的进展,为探讨爆破作用场,认识爆破作用机理提供了新的途径和思路。应用断裂力学原理切槽孔爆破已在施工工具和实际工程中开始应用。硐室爆破目前已普遍采用平面药包和条形药包相结合的设计,在爆破设计和施工方面都有了比较成熟的经验。惠州一次3200t的硐室大爆破再一次推动大爆破技术在港口建设中的应用。尤其是1992年12月28日珠海炮台山12000t炸药的大爆破采用多时段等间隔时差爆破技术,一次成功地爆破松动、抛掷了 $9 \times 10^7 \text{ m}^3$ 石方,这次爆破从规模、施工工艺、网络设计上都有所突破,使我国硐室爆破技术又迈上一个新台阶。

爆破器材的进步对爆破技术水平的提高发挥着重要作用,适用于光面爆破预裂爆破的小直径低爆速炸药及配套技术和耐高温、低温的乳化炸药标志着我国爆破器材研制与生产正在向满足各种工程条件下的系列化方向发展。新的乳化炸药已出口到哈萨克、蒙古等世界市场,为我国赢得声誉。60段高精度毫秒电雷管,可以大大增加起爆段数扩大爆破规模,减少振动影响,满足工程要求,这对于毫秒爆破技术的发展起了重要推动作用。防雷电起爆的电磁雷管——限频雷管的研制成功可以大大地减少早爆、迟爆事故。还有导爆管及其连接元件产品的更新增加了起爆的可靠性和安全性。安全检测仪表是保证爆破施工安全和提高准爆可靠度的必要技术手段,电爆网路断路检查仪则可以安全迅速检测网路,为爆破安全提供可靠保证。

深孔爆破技术应用更加广泛与普及,在露天与地下开采中都占主导地位,深孔爆破的理论和设计方法、施工工艺更加完善与成熟,爆堆块度分析的灰色理论预报方法可应用于爆破设计参数选择。18m高台阶采石爆破标志深孔爆破技术已提高到一个高水平。非电塑料导爆管的孔内孔间毫秒爆破网络设计与理论分析达到国际先进水平。水下爆破加固软弱地基技术近年来迅速兴起,在港口、码头建设中发挥着更大的作用,为建设海中堤坝,需将厚层淤泥质软弱覆盖层采用爆破挤淤的方法清除换基,这一技术已日臻完善。在连云港西700m大堤、大连、深圳机场付诸工程实践并取得了巨大的社会与经济效益。

岩质高边坡爆破开挖动力稳定分析与控制问题是当前水利电力、矿山工程建设的关键技术问题之一。在国家“七五”科技攻关中已取得了良好开端,目前正结合黄河、李家峡、红水河的天生桥和长江三峡工程开展系统性的研究。

我国城市改建和工业改造的高潮推动着拆除爆破技术的飞速发展,已成为可靠而重要的技术手段,随着建筑结构的复杂环境条件的难度增加,要求采用更高精度的控制爆破技术。福州市11层的高层建筑顺利拆除而相邻仅12.5m的计算机房与设备都安全无恙,这就是突出的例子。由于采用了合理的爆破方案及其他有效的工程技术措施,建筑物塌落时饱和砂地基未见液化。山东十里泉电厂180m钢筋混凝土高烟囱的分层爆破拆除,解决了周围环境特别复杂不可能整体倾倒或折叠爆破时的高空爆破作业技术的难题,为高烟囱拆除爆破提供了新的模式和成套经验。重庆发电厂西厂爆破拆除工程是一次起爆拆除工业建筑面积最大的项目,一次爆破拆除27000m²。这些成果说明我国的拆除爆破控制技术已达到了更高水平。这一成果也标志着爆破技术巨大生命力和日益广泛的应用。另一个可喜的现象是爆破界的同行互相合作和支持,共同推进爆破事业的进步。国家“七五”攻关项目“定向爆破筑坝技术”就组织了全国范围内的十多个兄弟单位开展大协作,发挥各自特长,对定向爆破筑高坝枢纽设计及施工新工艺、设计理论及计算方法、坝体结构特征与防渗问题、安全与施工形成全套设计软件,获得优异成果。初步建立和完善了定向爆破计算机辅助设计(CAD)系统。探索了爆破优化设计方法。着手安排爆破工程数据库和专家系统的研究。从而把爆破设计进入到现代设计技术的新时期。广东惠州港3200t填海工程大爆破,青岛某船坞进口采用一次爆破40t炸药水下爆破开挖6万多平方米的岩体爆破。炮台山12000t大爆破的成功不仅刷新了我国和世界大规模工程爆破的新纪录,而且为多排大抵抗线毫秒延迟爆破摸索了经验。这些工作都集中体现了全国各行业爆破专家的协作精神,集思广益,群策群力,对确保工程的顺利进行提供了技术保证。

在国际交流和科技合作方面,1991年7月我国成功地举办了北京国际工程爆破技术会议,有十来个国家共二百余名代表进行了广泛的学术交流,扩大了国际影响,加强了联系,有的单位还直接参加了国外、境外的爆破工程,为我国工程爆破技术走向世界创造了开端。去年国际大坝委员会鉴于中国和原苏联在定向爆破、筑坝技术上所取得的丰富经验。提请中国与俄罗斯合作提供一部专著,以“Bulletin”的方式公布于世,以利各国推广应用。该项工作于今年9月完成。

我国工程爆破界兴旺发达的另一个显著标志,就是青年爆破工作者队伍的成长,他们好学上进,理论基础扎实,思想敏锐,能动手,肯钻研,学术上比较活跃,积极参加工程实践,他们是工程爆破理论与实践的生力军。充分体现了爆破界后继有人的大好局面。

近年来爆炸量测技术、数据采集和分析技术也得到相应发展,计算机模拟试验技术也进入研究与应用平行发展阶段,为进一步提高科研能力与水平创造了良好的条件,并且电子计

算机在工程设计 CAD 系统中的应用,提高了设计精度,是进行优化设计与加强理论分析的重要手段,使爆破技术与理论水平的提高出现飞跃。数值模拟计算破坏、振动等物理过程,各种力学和相关学科与工程爆破相结合使爆破学科出现新的面貌。

爆破安全规程在全国颁布实施以来对指导全国爆破作业安全起了重大作用,随后又相继制定了大爆破与拆除爆破规程,为使这些规程得以确保贯彻执行,工程爆破委员会组织了全国专家编写了爆破技术员、工人和管理人员教材,供专业人员的培训和资格考核使用,使管理工作走向科学化、规范化。这不仅可以减少人身事故,又可减少和避免爆破有害效应对周围环境的安全影响。我们已经取得了很大的成绩,这可以作为我们前进的动力,展望未来,随着经济的飞跃发展对爆破技术提出的新要求,摆在我们面前还有许多新问题需要研究、探索 and 解决。

1. 要处理好目前与长远、应用与基础的关系,立足当前,着眼未来,在积极将先进技术推向市场,注意经济效益的同时更要注意应用基础理论和学科专业发展的专题性研讨,加强理论与应用的研究要有超前意识,有技术储备以保持爆破技术发展“后劲”,要注意开展多学科与边缘学科的研究。

2. 进一步发挥学会跨部门多学科的优势,扩大与加强各产业部门的横向联系,科研、设计、施工、高校相互间取长补短,沟通信息,开展多层次、多渠道的学术交流与技术咨询活动。对一些技术难度大或有重大意义和影响的工程、课题要联合协作,发挥集体智慧,组织专家咨询和评估,力争成功,避免失误。对重大科研成果,工程爆破专业委员会要及时组织评议、推广应用。

3. 公安部已发出通知,要做好爆破作业人员的技术培训与考核工作,加强促进对管理工作重要性的认识与专业知识教育和培训,提高爆破作业人员的素质与水平,严格规章制度,持证上岗。这是确保爆破作业安全的重要一环,工程爆破委员会要积极组织专家参与。当前工程承包存在一些值得注意的问题,只讲进度不讲安全容易出爆破事故,要大力宣传有关规程、规范及规章制度,今后要加强和各级公安部门的配合,接受公安部门的行业安全管理。使工程爆破在安全、质量、效益上都能达到要求。

4. 学会的工作要更好地适应国民经济建设这个中心需要,密切加强与各行业部门和爆破公司的联系,开展地方学会和学组活动,增强学会活力。更广泛地团结广大爆破工作者面向全国经济建设主战场,面向世界,面向未来。为工程爆破技术更好地为四化建设服务做出新的更大贡献。为此,工程爆破专业委员会倡议和积极筹组全国工程爆破协会,希望爆破界同行共同努力,真诚合作,为开创工程爆破科技事业发展新局面而努力奋斗。

延长药包爆破现状的分析研究

冯叔瑜 金骥良 杨年华

(铁道部科学研究院)

摘要 本文对延长药包的特征,作了较全面的阐述;对条形药包药量的计算方法作了广泛的介绍;对今后工作的展望与研究问题,提出了建议。

对于延长药包目前尚未有确切的定义,本文所述延长药包是泛指长径比大于20的药包。在工程应用上延长药包可分为两大类:第一类是应用于台阶深孔爆破的圆柱状药包,第二类是应用于硐室露天爆破的条形药包。这两类药包在理论计算和简化模拟实验上具有延长药包的共性,但在工程应用上由于工程目的、规模大小、施工方法、端部挟制作用等方面存在差异,有着各自的特点。本文侧重于条形药包的分析研究。

一、延长药包的爆破特征

各国学者对延长药包的研究,从空腔发展到鼓包运动;从漏斗生成到抛掷堆积;从冲击波传播到振动效应等做了大量工作,积累了不少经验,归纳起来,延长药包爆破具有以下几个主要特征。

1. 空腔发展特征

爆炸空腔的形状取决于药包的形状,集中药包的空腔一般为球形,延长药包则为圆柱形。在相同介质等药量条件下,延长药包爆炸形成稳定空腔的过程要比集中药包缓慢。在相同介质、等直径条件下,延长药包爆炸形成的空腔都要比集中药包大很多倍,如对于密度 $\rho=1.57\text{g/cm}^3$,含水量20%的粘土,延长药包形成的爆炸空腔半径将为集中药包的4倍。由爆炸空腔动力理论计算结果也证明,对同样直径的药包,延长药包的爆腔半径要比集中药包大。爆炸空腔的大小除与炸药品种、药包形状有关外,主要取决于作用介质的力学性质,对于延长药包的爆炸空腔半径,根据不同土壤性质大约为药包半径的12~25倍^[9]。

2. 爆炸冲击波参数

炸药爆炸极大部分能量消耗于形成介质的压缩空腔上,传到介质中的部分能量由冲击波所携带。爆炸初始阶段,冲击波阵面速度大于空腔发展速度,传播到一定距离就接近声速而蜕变为应力波。冲击波的强弱与炸药爆轰初始参数有关,而爆轰波参数取决于炸药性质和药包形状大小。对于同品种、同直径的药包,延长药包的爆轰波参数要比集中药包大,如对于密度为 $\rho=1.0\text{g/cm}^3$ 的硝铵炸药,试验结果^[1]其爆轰波参数为:

$$\frac{D_c}{D_s} = 1.3 \quad \frac{u_c}{u_s} = 1.8 \quad \frac{p_c}{p_s} = 2.2$$

式中: D 为爆轰速度; u 为阵面质点速度; p 为阵面爆轰压力;下标 c 及 s 表示延长药包和球形药包。

冲击波在介质中传播快慢与炸药性质、介质性质和药包形状有关。冲击波参数在硬岩中衰减较慢,在空气、土和水中衰减较快。在相同介质等直径条件下,在相同比例距离 $\bar{r}=R_0$ 处

延长药包的冲击波参数要比集中药包大,如在砂质垆垭中试验,对于集中药包在距离 $R = (10 \sim 15) R_0$ (药包半径) 处,冲击波阵面已消失,而延长药包在 $R = (20 \sim 30) R_0$ 处,冲击波阵面才消失。

3. 应力波传播特征

冲击波在介质中传播逐渐蜕变为应力波。爆炸应力波参数符合几何相似律:对集中药包有 $\frac{R_2}{R_1} = \sqrt[3]{\frac{Q_2}{Q_1}}$; 对于延长药包有 $\frac{R_2}{R_1} = \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$ 。

式中: R 为药包半径, Q 为药量; 下标 1, 2 表示第 1 次及第 2 次爆破。

如果两次爆破折算距离相等,即对于集中药包有 $\bar{R} = \frac{R_1}{\sqrt[3]{Q_1}} = \frac{R_2}{\sqrt[3]{Q_2}} = \frac{R_i}{\sqrt[3]{Q_i}}$; 对于延长药包

有 $\bar{R} = \frac{R_1}{\sqrt{Q_1}} = \frac{R_2}{\sqrt{Q_2}} = \frac{R_i}{\sqrt{Q_i}}$; 则两次爆破中的应力波参数就相等,可用一般关系式表达。应力

波参数包括应力 σ , 波速 N , 质点速度 v 等均是折算距离 $\bar{R}$ 的函数, $\sigma, N, v = f_{1,2,3}\left(\frac{1}{\bar{R}}\right)$ 。应力波传播过程中衰减规律除了与炸药和介质性质有关外,与药包形状亦有关,由于集中药包产生的球面波阵面与距离平方成正比增大,延长药包产生的柱为波阵面与距离成正比增大,因此,延长药包应力波参数随距离衰减要比集中药包慢。如由有关资料^[1]介绍,在花岗岩中用硝酸铵炸药爆炸测得的应力波参数绘成的两种药包比较曲线如图 1 所示。其归纳的经验计算公式如下:

应力波压缩相长度 τ ,

集中药包: $\tau_c = [25 + 0.134 (\bar{r} - 1)] R_0$ (ms)

延长药包: $\tau_e = [50 + 0.21 (\bar{r} - 1)] R_0$ (ms)

质点运动速度 v :

集中药包: $v_c = \frac{758}{\bar{r}^{1.84}}$ (m/s), $20 \leq \bar{r} \leq 120$

延长药包: $v_e = \frac{4072}{\bar{r}^{1.84}}$ (m/s), $60 \leq \bar{r} \leq 240$

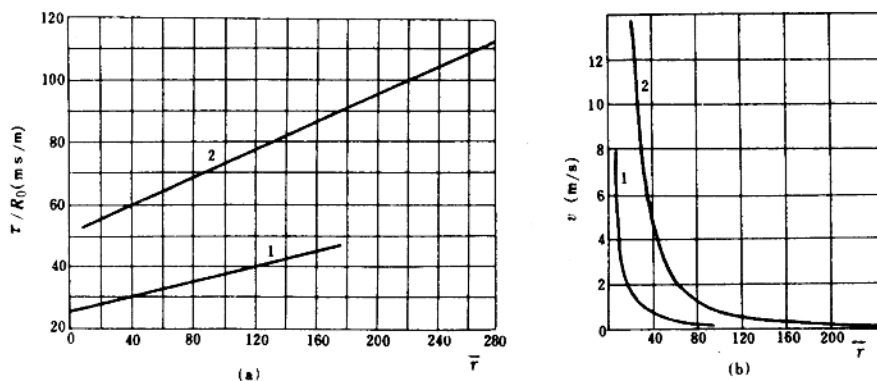


图 1 硝酸延长药包及集中药包在花岗岩中爆破

(a) 正压作用时间和相对距离的关系曲线; (b) 质点运动速度与相对距离的关系

1. 集中药包; 2. 延长药包

式中: $\bar{r}=R/R_0$; R 为距药包中心距离, m; R_0 为药包半径, m。

4. 爆炸地震波的振动效应

爆炸产生的应力波对地面产生的振动效应又称为爆炸震波。对于爆炸地震波的振动效应,除了与炸药种类大小、传播介质性质有关外,同样还与药包形状相关。实验表明,延长药包产生的地震波主频率低于与其半径相同的球状药包所产生的地震波主频率,计算值大约为 $1/6$,而且地震波的参数与药包的长度有关,药包越长,质点位移愈大。在爆破近区,对于长径比大于 20 的药包,质点的峰值速度和应变值与药包长度无关,而且当药包长径比大于 100 时,其应力波参数的传播不再符合平方根的衰减规律^[1]。在爆破远区,即药包长度与爆破距离相比足够小时,波阵面已接近球面波,那时爆破地震效应就应该按集中药包来处理。

5. 延长药包抛掷爆破特点

由上述两种药包在爆炸过程中的比较可知,延长药包与集中药包有相似之处也有不同特点。由于延长药包的爆炸空腔为圆柱形,其空腔发展过程较慢,应力波在传播过程衰减也慢,对介质的破坏作用相对比较平缓。因此,延长药包用于松动爆破,岩石破碎程度就比较均匀,大块率也就低。如果应用于抛掷爆破,就具有抛掷堆积相对集中的特点。在斜坡地带应用延长药包爆破,其对边坡坡面的损坏就较轻微。对于两种药包的抛掷爆破距离,可以从表面岩块脱离岩体时的飞行速度实测得知,根据在花岗岩中硝铵炸药爆破,用高速摄影测得的两种药包爆破时表面飞石速度如表 1 所示。

表 1 两种药包爆破时表面飞石速度

药包形式	飞石速度	抵抗线(W/d_0)				
		10	15	25	50	70
集中药包	v_1 (m/s)	8		1.2	0.6	0.5
延长药包	v_2 (m/s)	80	22		5.5	2.5

注: W 为最小抵抗线; d_0 为药包直径。

由此可见,在相同的抵抗线(比值)条件下,延长药包的表面抛掷速度比集中药包大很多倍,因此根据弹道理论其抛掷距离相应亦要远。

6. 延长药包爆破的空腔效应

在土壤和岩石中的实验表明,不耦合装药对延长药包爆破效果有较大影响。在黄土中,对长径比在 20~22 的延长药包,采用空腔比 $m=4\sim6$ (药室体积与药包体积之比) 时,其抛掷效果比耦合装药(空腔比为 1) 时要好,爆破方量增加 30~40%,抛掷方量提高 20%~30%,质心抛距增加 10%~15%^{*}。在黄土和亚粘土中进行压缩封闭爆破时,试验表明亦存在一个最佳空腔比,对延长药包 $m=1.5\sim2.0$ 时,压缩效果为最好^{**}。

二、条形药包爆破的药量计算公式

目前用于计算条形药包爆破参数的公式很多,绝大多数是从集中药包公式演变推导在实际工程应用中加以修正得到的。现予归纳如下:

* 兰州有色冶金研究院,不耦合条形药包试验爆破。第四届全国工程爆破学术会议论文,1989,5. 西安。
 ** 秦明武,对土中空腔条形药包爆破的实践与认识。第三届全国工程爆破学术会议论文汇编,1986,4. 南京。

1. 硐室爆破的药量计算

硐室条形药包药量计算公式主要是采用苏联的，常用单位长度装药量 q 表示：

(1) 苏联“动力建设爆破作业技术规程”制定的公式

$$q = 1.2KW^2 (n^2 - n + 1) \varphi_1$$

(2) $\phi \cdot A \cdot$ 阿夫捷耶夫公式

$$q = [2KW^2 (0.4 + 0.6n^3) / (n+1)] \varphi_2$$

(3) T. II. 波克罗夫斯基公式

$$q = KW^2 \cdot \frac{1}{n} \left(\frac{1+n^2}{2} \right)^2 \varphi_1$$

(4) M. M. 鲍列斯科夫公式

$$q = [KW^2 (0.4 + 0.6n^3) / 0.55 (n+1)] \varphi_1$$

(5) M. ϕ . 布尔什金公式

$$q = K'W^2n^2 [0.75 (\frac{1}{n} + n)^2 + (1 + 0.02W)]^{\cos \alpha} / [0.5 (n+1)]$$

(6) 比利时军事工程应用公式

$$q = KW^2n^2$$

(7) 我国南京工程兵学院公式

$$q = 1.2KW^2 \left(\frac{1+n^2}{2} \right)^{1.2} \varphi_1$$

(8) 我国兰州有色冶金院公式

$$q = KW^2 (0.5 + 0.5n^3)$$

上述各式中： W 为最小抵抗线， m ； n 为爆破作用指数； K 为标准抛掷单位体积耗药量系数， kg/m^3 ； K' 为松动爆破药量系数， $K' = 0.33K$ ； α 为山坡坡角； φ_1 ， φ_2 为最小抵抗线系数。

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1 & , W \leq 25 \\ \sqrt{\frac{W}{25}} & , W > 25 \end{cases}$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} 1 & , W \leq 25 \\ W^{0.0032(W-25)} & , W > 25 \end{cases}$$

以上这些公式，均由集中药包药量计算公式推导而来，对于爆破作用指数函数 $f(n)$ 的形式虽然各不相同，但只是大同小异。我们将它们做了数值计算，选取不同最小抵抗线 $W = 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, m$ ，在不同爆破作用指数 $n = 0.65, 0.8, 1.0, 1.1, 1.25, 1.5$ ，其计算结果绘制于图 2。对这些计算值，我们进行了归纳处理，得到一个平均值函数 $f(n) = \frac{1+n^2}{2}$ ，再对此加以适当工程修正，推出下式：

$$(9) \quad q = K_1 KW^2 \frac{(1+n^2)}{2} \cdot \varphi_1$$

式中： K_1 为修正系数，与爆破作用指数 n 有关，对于松动爆破， $n < 1$ 时，取 $K_1 = 1$ ；对抛掷爆破 $1 \leq n \leq 1.3$ 时，取 $K_1 = 1.1$ ；对加强抛掷爆破，在 $n > 1.3$ 时，取 $K_1 = 1.2$ 。 φ_1 同上。

该式与其它八个公式的总和平均值几乎相同，我们认为各公式都不十分精确，但都有一定合理性的情况下，其总和平均值最可靠。

2. 沟渠开挖爆破计算公式 (Ю. А. 克什麦里科)

$$D_w = AH \sqrt{n+1} \text{ (cm)}$$

$$W = B \sqrt[3]{H^2 (n+1)} \text{ (m)}$$

式中: D_w 为条形药包直径; W 为最小抵抗线(埋深);

系数 A 、 B 与介质性质有关,

对泥炭土 $A=2.34$, $B=0.44$;

对砂土、亚砂土 $A=3.81$, $B=0.61$;

对砂质硬土 $A=4.02$, $B=0.63$;

H 为渠深度, 一般 $H=W+R_{vd}$; R_{vd} 为爆炸空腔半径, $R_{vd}=kR_w$, 对于不同岩土性质, $k=12\sim25$ 。

对于多排多层的条形药包爆破参数, 包括药包间隔、排间距、可见漏斗深度和大小、质心抛距、最大抛石距离、爆堆高度等, 目前还是套用集中药包的相应公式来估算, 这里不再重复。

三、问题与展望

以上对延长药包爆破的现状做了综述, 应该肯定国内外学者已经为此做了大量的工作, 取得了不少成绩。但是也还存在不少问题。尤其在我国, 延长药包的研究与应用还刚刚起步, 需要进一步去探索、实验、研究。这里归纳了以下一些问题供研究参考。

1. 药包长径比对爆破作用的影响

试验表明, 随着药包长径比的变化, 应力波参数亦在变化, 在长径比超过 $15\sim20$ 以后, 波参数不再与长径比有关。当长径比达到 100 后, 有人发现波的参数不再符合平方根规律。由于这方面试验资料不多, 试验介质条件与范围亦不清, 尤其在理论计算上对岩土介质难以做准确的描述, 所以, 目前对药包形状的影响只能用球形、短柱、长柱、无限长柱等定性的语言去描述, 对延长药包的定义也就难以定论, 这有待于在理论研究与试验上进一步探索。

2. 端部效应的影响

药包长径比的影响实际是延长药包端部效应的影响。对垂直台阶深孔圆柱药包, 上下两端所受夹制作用极不相同, 其影响亦不同; 对水平条形药包, 在介质、炸药等相同条件下, 其两端作用应是相等的。对于这种端部效应, 在理论上如何描述, 在应用上怎样计算, 在作用上对抛掷爆破的效果又有什么影响……, 这都有待于今后在试验研究与工程应用中去总结经验。

3. 爆破波在近区与中远区的传播规律

爆破波的初始参数以及在药包附近介质中冲击波参数, 由于目前测试手段尚未成熟, 所得的某些数据大多是靠理论推测, 而且由于介质在高压冲击态下的本构方程尚未有恰当描绘, 因此, 无论是集中药包还是延长药包都有待于进一步从实验技术上去探索。

对于集中药包在中远区中爆炸应力波的传播, 在水、空气、岩石中都已有了不少理论计

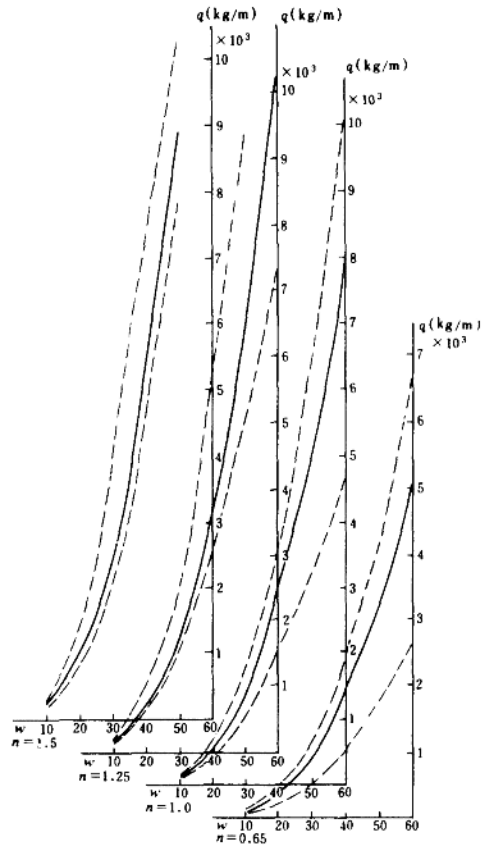


图2 各条形药包药量计算公式对比图

实线为文中推荐公式的计算值,

其余 8 个公式计算值在虚线范围内

算分析与试验资料。但是对于延长药包,无论是理论还是试验都很少。本文引述的某些数据亦很局限。在什么样条件下和范围内才能应用平方根规律,平方根与立方根规律应用的界限在哪里,这些问题都应有更多的试验研究和理论计算来解决。

4. 爆炸地震波的振动效应

延长药包与集中药包爆炸所产生的地震效应在振幅与频率上都有不同。对集中药包爆炸的地面质点速度应用萨道夫斯基公式已普遍公认。对于延长药包应用什么公式?地震波衰减的平方根规律适用在什么样的范围,对有限长的延长药包爆破振动在垂直轴线方向与沿轴线方向有什么不同,在多大距离上可以应用集中药包的公式,延长药包爆破地震波主频率低于集中药包,作用持续时间又长,那么对建筑物的破坏是否还能应用集中药包的标准……,这些问题都要靠大量的工程试验与应用才能逐个解决。

5. 条形药包爆破参数的计算

综上所述,目前延长药包药量计算、间距、排距、抛距、堆积分布等都是套用集中药包已有公式做适当处理而应用于工程的。由于目前我国应用与研究都还处于起步阶段,还需要在今后从大量试验研究与工程应用中去总结出一套像集中药包一样的半理论半经验公式。

6. 延长药包爆破作用能量的利用率

理论与试验研究都表明,延长药包爆炸能量利用率高于集中药包,这正是延长药包在爆破上显示优越性的关键。然而,就爆破作用能量的分配,用于变形破碎、介质运动,消耗于摩擦生热、空气冲击波、声、光、电等效应上的能量比例以及由于缺乏适当的测试手段,加上介质状态的复杂性,对集中药包虽有少量探索试验,对延长药包至今几乎还是空白。

7. 条形药包的空腔效应

对于条形药包的空腔效应,目前国内学者已经进行了少量试验,对于不同介质条件下的耦合比也有不同的看法,(是否存在最佳耦合比)不同炸药和不同介质条件下的最佳比值是多少?……这些问题也有待于进一步试验研究,尤其需要从爆炸空腔动力学理论上去进行探索。

随着我国改革开放的深入,科技事业日益为党与政府所重视,爆破科技在工程建设中发挥的作用越来越为人们所重视。以上这些问题亦会随着电子、材料等高科技领域的发展,被爆破科技工作者所利用,从而得到解决。

主要参考文献

- [1] A·H·哈努卡耶夫著,刘殿中译,1980,矿岩爆破物理过程.冶金工业出版社.
- [2] Borovikov, V. A., 1981, Development of a Gas Cavity When a Cylindrical Charge Is Exploded in Rock, Soviet Min. Sci.
- [3] 龙源,林学圣,许连坡,1988,条形装药土中爆炸空腔发展过程的实验研究.爆炸与冲击.第3期.
- [4] Starfield, A. M., and Pugliese, J. M., 1968, Compression Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charges; A Comparison between a Computer Model and Field Measurement, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 5, p65—77.
- [5] Borovikov, V. A., and Vanygin, I. F., 1976, On Analysis of the stress Wave Parameters for an Elongated Charge Explosion in Mountain Rocks, Vzyvnoe Delo, 79/33, Nedra, Moscow.
- [6] Neiman, I. B., 1987, Volume Models of the Action of Cylindrical-charge Explosion in Rock, Soviet Min. Sci.
- [7] Adushkin, V. V., Kryndushkin, S. K., Tikhonirov, A. M., 1987, Compressional Wave Behavior with Explosion of a Cylindrical Charge in a Solid Medium, Soviet Min. Sci.
- [8] Adushkin, V. V., 1981, Ejection Blasting Using Linear Charges, Soviet Min. Sci.
- [9] J·亨利奇著,熊建国等译,1987,爆炸动力学及其应用.科学出版社.
- [10] 张志毅,冯叔瑜,1988,延长药包水压爆破特性试验研究.工程爆破文集(第三辑).冶金工业出版社.
- [11] 边克信等,1985,条形药包抛掷爆破的设计方法.土岩爆破文集(第二辑).冶金工业出版社.

爆破相似原理和模拟方法若干问题

霍永基

(水利水电科学研究院)

摘要 本文简略地介绍了爆破相似原理和模拟方法及其在爆破工程中的实际应用,并对目前工程爆破设计计算方法作了综合评述。最后仅就抛掷爆破的模拟方法——真空模型法的相似准则和条件作了深入的探讨。

一、爆破相似原理概述

爆破作用相似性原理是以力学相似方法为基础的。两次爆破作用相似性条件应该包括几何性相似和动力性相似以及边界条件和初始条件等。若两次爆破的相似判据相等,则两次爆破的作用过程和结果相似。

相似理论对工程爆破设计计算方法,实验数据的分析整理和爆破模拟技术的发展都有十分重要的指导意义。模拟方法主要分数学模拟和物理模拟两类。

1. 数学模拟

亦称数学模型。它是根据爆破作用过程中,分析其各物理量之间的关系,用数学的形式加以描述,建立反映物理过程的微分方程组。模型和原型中信息的传递均按同一方程组进行。从而可以用数学方法借助计算工具分析物理过程和最终结果。例如,对定向爆破抛掷堆积过程的分析,目前可以根据弹道理论的力学模型,将爆破抛掷过程分为两个阶段计算,即假定炸药爆轰瞬间完成后,爆破漏斗内的介质存在一个由爆炸能产生的初速度场。随后爆破破碎的介质按照外弹道轨迹飞行而互不干扰。因此,可以首先根据药包参数和地形剖面,假定各剖面中爆破漏斗中的介质自爆源呈辐射状划分为微元角锥体。如图1所示。

而每一角锥微元所获得的初速度是遵照能量守恒原则,按照一定的速度相对分布规律建立的微分方程组为

$$v_i = \frac{A}{R_i^n}, \quad (1)$$
$$A = \sqrt{\frac{2gQU_1\eta}{\gamma \int \frac{d\omega}{R_i^{2n}}}}$$

式中: v_i 为第 i 角锥微元体的初速度; Q 为炸药量; U_1 为单位炸药的潜能; η 为炸药有效利用能量系数; γ 为介质相对密度。其余符号见图1。对于集中药包 $m=3$; 条形药包 $m=2$ 。

介质初速度确定后,便可按外弹道学轨迹方程计算各微元体的着地点,然后按照质量守恒原则进行累积叠加和散体塌散稳定坡角进行平差即得最终堆积轮廓。

2. 物理模拟

即通过实体模型实验,利用相似准则进行换算,以反映原型某些物理过程规律和最终结果的一种方法。物理模型可分

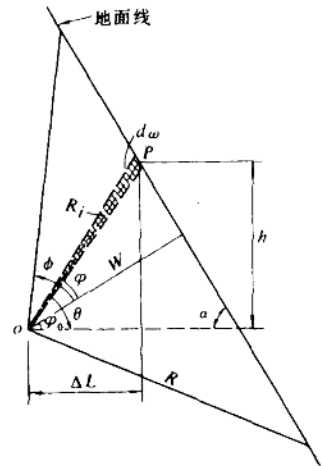


图1