

四川科学技术出版社

The Ground Vibration Effect And
The Shock Reduction Methods
Of Deep Hole Blasting In Openpit

露天深孔爆破 地震效应与降振方法

主编 张志呈 向开伟 鲍罡武



The Hazardous Effect And
The Shock Reduction Methods
Of Deep-hole Blasting In Opencast

露天深孔爆破 地震效应与降震方法

主编 张景奎 副主编 张景良



The Ground Vibration Effect And
The Shock Reduction Methods Of
Deep Hole Blasting In Openpit

露天深孔爆破
地震效应与降震方法

主编 张志呈 向开伟 鲍罡武

四川科学技术出版社

2003 年·成都

图书在版编目(CIP)数据

露天深孔爆破地震效应与降震方法/张志呈编著.
—成都:四川科学技术出版社,2003.3
ISBN 7-5364-4278-5

I. 露… II. 张… III. 凿岩爆破 IV. TD23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 016800 号

露天深孔爆破地震效应与降震 方法

编 著 者 张志呈 向开伟 鲍罡武
责任编辑 周绍传
装帧设计 力 科
责任出版 周红君
出版发行 四川科学技术出版社
成都盐道街3号 邮政编码 610012
开 本 850mm×1168mm 1/32
印张 8 字数 160 千 插页 2
印 刷 成都科星印务有限公司
版 次 2003 年 3 月成都第一版
印 次 2003 年 3 月成都第一次印刷
印 数 1-1 000 册
定 价 18.00 元
ISBN 7-5364-4278-5/P·107

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书,请与本社邮购组联系。

电 话: 86671039 86672823

邮政编码/610012

序 言

工程爆破技术的发展已经深入到国民经济建设的各个领域,在实际中条件复杂的爆破工程愈来愈多,为了解决工程爆破应用中的实际问题,提出了一些新的理论和新的方法,极大地促进了工程爆破的发展。同时爆破中的安全问题也显得越来越重要,爆破中不重视安全的现象也时有发生,特别是露天深孔爆破远区地震动在工作中往往容易被忽视。

近年来,张志呈教授等以广西鱼峰集团水泥有限公司水牯山石灰石矿的科研项目——“降低露天深孔爆破地震强度”为基础,结合多年的爆破实践和研究,参考国内外先进经验,从理论到实践完成了这本书的写作。

从本书内容的章节安排可以看出该著作有以下几个特点:

1. 试验研究了爆破地震波传播时岩体中初始应力场的波导效应。
2. 研究分析了地震波在缓倾斜岩层(或层状岩石)中传播的波道效应。
3. 较详尽的分析了建、构筑物的爆破地震波效应。从屋内地面和屋外自由场观测分析造成房屋破损的原因及建、构筑物动力响应特点。
4. 书中论述了地震波强度距爆源近区与单孔

装药量有关，中、远区主要与段药量有关。在分析研究了建筑物安全判据的现行标准后，进一步阐述以振动速度和振动频率作为安全判据标准的合理性，对于距离爆源远区 1000 米左右，其安全判据以振动频率为主较为恰当。

5. 专题讨论了振动频率对建筑物的影响、地震波主频特征和频谱分析原理。

6. 专题论述了爆破地震动持续时间增长的危害性。震动持续时间长的地震动破坏能力大，使建筑物出现永久变形的概率提高；使地震动与建筑结构反应出现较大值的机会增大。

7. 在降震方法方面，该书充实和完善了异步分区爆破的方法。较准确地界定了①异步分区排间顺序间隔起爆、②同步分区对角式顺序起爆、③同步分区 V 型对称起爆的含义和内容。

8. 采用多种方法实验和计算石灰石矿的干扰降震和不干扰降震的微差间隔时间。

本人受张志呈教授的嘱托，乐于向广大读者推荐，供读者参考。相信该书的出版，将对广大读者有所帮助。

第八届国际岩石爆破破碎学术会议国际组委会主席

亚洲爆破协会筹委会主席

中国爆破协会理事长

中国工程院院士 汪旭光

序

广西鱼峰集团水泥有限公司水牯山石灰石矿位于柳州市郊太阳村镇，为水泥原料生产基地，生产前期采矿区多为孤立山体，穿爆工作均以硐室爆破为主，1985年扩建后产量由70万吨扩大到240万吨，穿爆工作从硐室爆破过渡到深孔爆破。深孔爆破是大、中型露天矿的主要生产工序，大规模或频繁的爆破作业产生的地震效应将对周围设施和人员构成安全上的隐患。本公司已获ISO14000环境管理体系认证，降低爆破震动、飞石等有害效应是预防污染、持续改进环境行为的重要措施。

随着开采水平的降低，目前采场北部已形成60余米高的边坡，而采场南部逐步逼近家属区、厂区，距离厂子弟学校仅300多米。深孔爆破引起厂区、家属区房屋摇晃，边坡危石滑塌等现象，表明现有的爆破方式引起的振动强度不利于边坡的稳定并影响职工正常的心理状态，积极开展降低深孔爆破震动的试验研究非常必要。鉴于爆破震动试验研究难度大，故聘请西南科技大学张志呈教授来厂进行技术指导，张志呈教授在爆破震动试验研究方面有着丰富经验，他根据水牯山石灰石矿的具体情况，坚持认识、实践，再认识、再实践的原则，与工程技术人员一道从2000年元月至2002年6月历时2年半的时间完成了降低深孔爆破震动强度的试

验研究项目，试验结果达到了立项的目标，获得了显著的社会效益。

由于整个试验研究过程中收集了许多技术数据和资料，采用了许多新的研究手段并开创了新的研究领域，项目参与人员将其整理成书，奉献给同行业的广大读者，相信本书出版发行将对爆破工程实践、科研等方面起到它应有的作用。在此，感谢张志呈教授及矿山工程技术人员在降低爆破震动危害效应方面所作出的努力和贡献。

广西鱼峰集团有限公司董事长 李自明

鉴定意见

本项目经过两年多的努力，全面完成了研究任务，达到了立项的预期目标。鉴定专家在听取和审查研究报告的基础上，经过认真讨论形成以下鉴定意见：

一、所提供的鉴定资料齐全，符合鉴定要求。

二、根据矿区地形和环境条件，针对爆破地震的特点，结合露天矿深孔爆破地震效应，研究了地震波传播规律的坡面效应、裂隙效应、建筑物动力响应等，拓宽和深化了爆破地震效应的研究范围及内容，为矿区实施有关爆破规程以及制定爆破制度，提供了理论依据。

三、项目研究了孔药量、段药量与爆破源距离近、中、远区爆破震动强度的相应关系，论述了爆源近区的地震强度与单孔药量有关，中远区的地震强度主要与段药量有关的见解，提出了远离爆源区（1000 米左右）的安全判据应以振动频率为主的建议。

四、论述了降低震动强度的合理微差间隔时间、有效降低振动强度的异步分区排间的顺序间隔起爆、同步分区对角式顺序起爆与同步分区 V 型对称起爆方法等的孔网参数及布孔方式，改善了露天台阶深孔爆破的方法，在有效降低爆破振动强度的同时，也提高了爆破质量，降低了材料消耗与钻孔成本，取得了很好的经济效益和环境效益。

五、根据频谱特性进行了频谱分析，给出了近区、中远区地震的场地系数和衰减指数，为准确计算爆震速度提供了可靠的保证，改善了露天深孔微差爆破的质量，有效地降低

了爆破振动强度。改善后的深孔爆破方法有效地起到减震作用，使地面建筑物的震动减弱，提高了安全程度。

六、试验研究了爆破地震波传播时岩体中的初始应力场的波导效应以及地震波在层状岩石中传播的波道效应，为从事爆破震动研究提供了新的研究领域，有助于进一步深化地震波传播规律的研究。

七、本项目成果具有重要的理论意义，在类似的工程条件下有重要的实用价值和参考价值，该成果处于国内领先水平，部分内容达到了国际先进水平。

八、建议对爆破地震波在层状岩层中的传播规律以及爆破参数、炸药品种与爆破震动的关系，进一步开展研究。

鉴定委员会主任：冯叔瑜 副主任：古德生 李通林

2002 年 11 月

说明：本书是以该项目试验研究资料为基础编著的。因此，将鉴定意见附上。鉴定委员会主任冯叔瑜（中国工程院院士），副主任古德生（中国工程院院士）、副主任李通林（教授）；鉴定委员：史家增（教授级高级工程师、中国爆破协会副理事长）、徐映富（教授）、刘仁福（高级工程师）、余雨之（教授级高级工程师）、杨选臣（教授）、赵明特（教授级高级工程师、广西爆破工程协会理事长）。

前 言

露天深孔爆破作为一种工艺技术手段，广泛应用于资源开发，铁路、公路路堑和大型水利水电枢纽工程基础开挖。

改革开放以来，我国一些大型矿山例如大冶铁矿、南芬铁矿、水厂铁矿、金堆城露天矿，采用大孔径钻机，实现大区多排微差爆破；在青岛市环胶州湾高速公路路堑开挖工程施工中 [1]，采用深孔爆破技术成功地实现了一次爆破开挖成型长 470m、深 10m 的路堑，共 203 排、3080 孔的深孔拉槽控制爆破；广西柳桂高速公路采用了超深孔高台阶的预裂光面爆破（台阶高达 27m），实现了边坡成型机械化（达 90% 以上）；在铁路施工中仅以采用深孔光面爆破、预裂爆破技术可使路堑边坡工程量减少 10%~20% [2]，形成的光滑平整的边坡无需作任何技术处理；堪称世界之最的三峡水电枢纽工程，其开挖施工难度同样也是前所未有的 [2]，就永久船闸为例，双线五级闸室长 1607m、最大开挖深度 170m、最大边坡高 150m，武警水电施工队采用直立边坡成型、闸槽底部保护层开挖，合理的施工管理综合技术，安全、高质量地按期完成任务，百米高的边坡稳定，效果良好。据资料介绍，全球年运搬中 8 成以上是露天采掘工程量，其中又主要以深孔爆破为主 [3]。露天深孔爆破取得了巨大的经济效益和社会效益，尤其是为了解决工程爆破应

用中的实际问题，提出了一些新的理论和新的方法，极大地促进了工程爆破的发展。

当前，普遍重视爆破对露天边坡的影响，但研究露天深孔爆破距离爆源近区或中区的爆破震动和降低爆破振动强度的方法较多，而试验研究距离爆源远区的振动强度较少。

纵观国内外降低爆破震动强度方法，主要在于同一爆破区段采用分区爆破和合理选择间隔时间，以便达到应力波（地震波）干扰降震或不干扰（不迭加）降震。

早在 1971 年 T.N.Hagao 著文 [4] 预言，今后十年的炸药爆破中将应用起爆交错“V”型布孔，1975 年 A.B.Anarews 曾发表 [5] 多段顺序起爆方案，1978 年 Alan Bauey 教授 [6] 提出对角线和 V 型起爆的方法，1979 年 S.K 温译、V.I 蒙坦尼奥尔 [7] 等提出分区爆破，1980 年 Jphn.P 阿什比指出 [8]，一个最有希望的改进是采用切实可行的顺序起爆技术。1984 年长沙矿冶研究院、武钢大冶铁矿 [9] 总结了顺序起爆经验，1984 年金堆城钼业公司、西安冶金建筑学院 [10] 总结出对角线与 V 型混合起爆网路，1987 年至 1990 年本钢南芬铁矿和长沙矿冶研究院承担“七五”攻关项目南芬露天矿大区多排微差爆破 [11] 采用异步分区起爆与大规模干扰降震，1992 年长沙矿冶研究院与本钢石灰石矿又一次实行异步分区起爆的降震方案。1992 年 7 月由张志呈、王刚、杜荣贵等编著、重庆大学出版社出版的《爆破原理与设计》，系统、全面地介绍对角式、V 型、分区排间顺序爆破和组合式起爆等多种微差爆破方式。

对于微差爆破，早在 20 世纪 20 年代国外就有

人提出了微差爆破的设想。30 年代微差爆破技术首先被用于定向爆破。从 1945 年起, 作为降低地震效应的一种新型控制爆破技术, 在许多国家开始采用, 我国冶金部新疆有色金属公司可可托海矿务局、鞍山钢铁公司技术监督中心实验室于 1956 年上半年先后研制成功不同起爆方式的微差起爆器。微差爆破方法陆续在有色金属矿、煤矿、铁矿、水利水电建设等各种工程爆破中作了一些探索。1964 年白银厂露天矿首次进行了多排大区微差爆破, 到 1967 年微差爆破增加到 80% 以上, 对各项工程建设起到了好的效果。由于爆破在介质内部瞬间发生, 所产生的物理力学现象, 还没有相当准确的研究成果, 国内外至今也没有一个公认严密的微差爆破理论。而各国研究者提出的各种观点, 推导的各种计算原理和计算式, 一般也主要是定性的推断。

综合众家之说, 对微差爆破理论多数人能接受的假说, 大致归纳为: (1) 形成新自由面论; (2) 应力波干涉论; (3) 残余应力论。依据这些假说各自引伸出来许多公式。上个世纪 90 年代国内外大约有 15 个计算微差爆破间隔时间的公式。前苏联 И. В. Клевцов 等人曾按照其中的若干公式, 具体计算出不同岩性和孔网规格的合理间隔时间, 其变动为 $2 \sim 110 \text{ms}$ [12]。

2000 年应广西鱼峰集团水泥有限公司矿山部经理向开伟高级工程师的邀请, 帮助实施露天深孔爆破降低地震强度的试验研究, 以克服由于采区扩大境界范围, 爆破地震影响家属区和厂区建、构筑物, 减轻和消除职工及家属对爆破地震的忧虑。这就确定了这次研究的特点, 是爆破中、远区地震动规律, 重点又是在距爆源远区。研究爆源远区的地

震波传播规律其难度在于：一是群药包延时爆破后，传播途径复杂，地质地形条件复杂；二是建筑物、构筑物结构多样；三是以往普遍认为工程爆破地震的能量较小，仅为爆破能量的3%~5%，远区引起的地震动微弱，无普遍研究价值；而中、近区，危及边坡安全，影响连续生产，所以实际中很多单位、行业重视中、近区研究，而对爆源远区的研究相对显得缺乏。当然，爆源远区产生的地震动达到一定能量才构成一种有害效应，对房屋结构破损较隐蔽，不像爆源中、近区对边坡危石滑塌、建筑物破损和产生裂隙等有害效应那样明显。对人们感觉房屋摇晃特别明显，房屋长时间受到颤动的这种情况，被称之为延期（滞后）有害效应，或地震波隐形效应，这是不应忽视的。

在广西柳州市科技局和广西鱼峰集团水泥有限公司的大力支持下，作者在试验研究过程中，应用了中国工程物理研究院院外科学技术基金项目《微差爆破振动谱解析》的经验和总结，经过约三年时间完成了水牯山石灰石矿深孔爆破降振项目的试验研究工作。

作者在长期的爆破实践和研究中，深感距爆源远区的地震动有其内在的特点，故本着承前启后，总结提高的宗旨，以该项目的试验资料为主，同时吸收国内外先进经验编写成了这本书。

本书共12章，其主要内容综述如下：

1. 论述了露天深孔爆破孔网参数设计特点：讨论了台阶爆破孔网参数的内容和选取方法；结合宽孔距爆破似固定梁弯曲爆破机理、临空面理论、增强自由面应力波的反射理论、两孔间排除应力降低区理论、先爆钻孔内侧发展的裂隙为后爆钻孔创

造了条件的理论，并对参数作了计算方法的介绍。

2. 在露天深孔微差爆破降震原理一章中指出：一是爆破干扰降震；二是爆破地震波不干扰（不迭加）降震。其实质是通过分区和延时起爆各区段，使起爆后产生地震波的干扰降震和不干扰降震。分区是沿爆区长度（沿爆破台阶长度）将一个爆破区域（段）对称的分为2个或2个以上的爆破区段。在相邻分区，相对位置的钻孔或网路起爆雷管段别相同（延时间隔时间相同）称为同步即同步分区，反之称为异步也叫异步分区。干扰降震的原理是对称位置产生干扰，主要是控制两个波的相位差 $\omega_2 - \omega_1$ 为半周期即可由干扰而减弱；不干扰降震，是每分段爆破独立进行，各段地震效应相互间没有明显的迭加和干扰。并改变布孔形式为三角形和正方形。将常用的排间微差顺序起爆网路改为：（1）异步分区排间顺序间隔起爆网路；（2）同步分区对角式顺序起爆破网路；（3）同步分区V型对称起爆网路。

3. 论述了露天深孔爆破合理微差间隔时间：合理微差间隔时间是指在一定的地质条件、孔网参数、炸药类型等条件下，选用最优迟发时间，以使地震效应最低，爆破质量最好。在上个世纪末美国 Fish.B 认为微差时间 8~25ms；匈牙利 Kotai 指出 20ms 最好；美国 White.H 推荐 5~25ms；俄罗斯 G.L.Poktovikyi 提出 4~5ms；日本日野推出 10~100ms；俄罗斯 A.N.Knaukayev 推荐 25~60ms；长沙矿冶研究院提出 25~50ms；加拿大 Bolye 建议 1m 抵抗线取 5~7ms。可谓众说纷纭。

广西鱼峰集团水泥有限公司水牯山石灰石矿合理间隔时间确定的依据以先爆孔形成新自由面，后

爆的炮孔才可以改善破碎质量，不但不会近乎齐发爆破而使相邻孔震动显著迭加，而且会使震动按规则干扰或偶然干扰显著降低。并且采用三种方式试验研究合理间隔时间：(1) 单孔多段试验；(2) 半经验公式确定间隔时间；(3) 根据振动周期选择间隔时间。综合其结果，迭加干扰降震的合理微差间隔时间为 30~45ms；主相位错开不干扰降震间隔时间为 $\geq 50 \sim 75\text{ms}$ 。

4. 规范了采场内近期的爆破段药量和总药量：根据试验观测，厂办方向爆破最大一段换算药量应控制在 $\rho = Q^{1/3} / R = 0.01216$ 以内，爆破垂直振动以 0.1cm/s 为上限，故在靠近厂办方向的 140m 采区最大一段药量经计算控制在 800kg 以内，采场北边段药量控制在 1200kg 以内，另外在不稳定地段及边坡附近相应缩小为 600kg 和 800kg。为了防止爆破地震波迭加，总药量也应有所控制，即采场北区稳定边坡地段为 8000kg，不稳定地段 6000kg，采场南边稳定段为 5000kg，不稳定地段为 4000kg。

5. 确定了采场内不同地段的爆破方法：(1) 对整体性较好岩性较均匀岩体的地段可实行地震波干扰降震方案，对裂隙发育岩性不一致的地段实行地震波不干扰降震。(2) 采场南部或南西方向以同步分区对角式顺序起爆为主，采场北部和东部以同步分区 V 型对称起爆或异步分区排间顺序间隔起爆方法为主。

6. 爆破地震效应的观测与分析：测试采用四川拓普数字设备有限公司生产的 TOP BX 爆破震动自记仪，在采场内选择三组观测线，经过 108 次观测，基本摸清爆震波的传播规律。体现爆破地震波传播的规律如下：(1) 台阶爆破条件下，实测表

明,抛掷方向的背向振动强度最大,爆破侧面次之,抛掷方向最小。(2)露天爆破的坡面效应。工程爆破一般与坡面有关,高出爆破区域的坡面称上向坡面(简称高坡),低于爆破平台零米以下的坡面称下向坡面,高出爆区和低于爆区无论是陡坡或缓坡通称坡面,爆破在坡面上的反映称为坡面效应。下向坡面随高程的减小而振动强度减小;上向坡面随高程增大振动强度呈现高程放大作用。随着高程的增加放大到一定范围的高度作用减弱。当坡度缓于1:2以及等于或小于 15° 不存在振速明显的放大作用或减弱。(3)实验表明,地震波强度距爆源近区与单孔装药量有关,中远区主要与段药量有关。(4)观测表明距爆源远区1000m左右(当距离为钻孔直径7330倍至8330倍),多次垂直振速 $\geq 0.1\text{cm/s}$ 时,二楼以上楼层的玻璃声响大,窗门也有响声,多数人感觉房屋摇晃。这与国标GB6722-86和国内有关行业制定的爆破地震对建筑物的允许振动强度差异很大,其原因是地震波的频率接近房屋的自振频率引起共振。(5)研究分析了地震波在缓倾斜岩层(层状岩石)中传播的波道效应。(6)试验研究了爆破地震波传播时岩体中初始应力场的波导效应。(7)在裂隙效应这章内容中,研究了地震波在结构面处的反射、透射和绕射以及波型转移;断裂面的隔震机理和效果;地震波通过断层的衰减规律;综合论述了裂隙的减震效应;以及地质结构造成的能量集中效应。(8)较全面的试验研究不同爆破方法的降震效果。与试验前排间微差爆破相同条件相比,分区排间降低震动强度35%,分区对角式降低45%,分区V型爆破降低26.7%~36%。平均降震42%。(9)根据实测