

● 陈士海 逢焕东 著

爆破灾害预测与控制

煤炭工业出版社

爆破灾害预测与控制

陈士海 逢焕东 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·



个人简介

陈士海，男，1964年生。教授、博导。1985年7月毕业于山东矿业学院矿井建设专业，1988年7月毕业于山东矿业学院爆炸力学与控制爆破专业，获硕士学位，留校工作。2004年6月毕业于中国人民解放军理工大学防灾减灾工程与防护工程专业，获博士学位。1992年晋升为讲师，1995年破格晋升为副教授，1998年破格晋升为教授。主持或为主参加国家及省部级科研项目十余项，获省部级以上科技进步奖励6项，出版著作4部，在全国中文核心期刊上发表论文近50篇，是山东省优秀硕士论文指导教师。现任山东科技大学防灾减灾工程与防护工程学科带头人，岩土工程学科博士生导师，教育部高等学校教学指导委员会委员，中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会委员，中国力学学会工程爆破专业委员会委员，中国煤炭学会爆破专业委员会委员，山东力学学会爆破专业委员会委员，山东省岩石力学与工程协会常务理事，泰安市安全生产专家组成员。



个人简介

逢焕东，男。1969年4月生，博士、副教授。1993年7月毕业于山东矿业学院并留校工作，进行岩体动力学方面的教学和研究。作为技术指导，主要从事工程爆破振动的危害控制工作，先后参加了巴基斯坦印度河55号公路路基爆破、国内济南东南外环路土石方爆破和多种地面建筑物和构筑物的爆破拆除工作，具有丰富的爆破安全工作经验。2004年7月获得博士学位，发表相关专业论文20余篇，现在胜利油田进行随钻地震技术的开发和研究。

内 容 提 要

本书主要介绍爆破震动、爆破个别飞散物、爆破空气冲击波、爆生有毒气体和瓦斯煤尘爆炸等爆破灾害问题,其中重点是讨论了作为工程爆破四大灾害之首的爆破震动效应。运用动力有限元数值计算理论、岩体动力学、结构动力学、爆炸力学理论和工程爆破现场测试的理论分析方法对爆破地震波的震源机制、波传播的频谱特性、结构爆破震动效应合理评判参数、爆破震动持续时间和多维震动对结构响应的影响、爆破抛飞规律、爆破灾害的控制等问题进行了研究,提出了颇有价值的见解和建议。

本书可作为防灾减灾工程与防护工程、爆破工程、岩土工程专业研究生的教学用书,也可供防灾减灾工程与防护工程、爆破工程、岩土工程等研究人员及有关技术人员参考。

前 言

随着我国国民经济的高速发展,特别是国家西部大开发战略的实施,铁路、公路、水电和矿山等部门大型基础建设工程项目相继开工,工程爆破在工程建设中发挥了重要作用,越来越受到人们的重视。工程爆破在给人们带来快速、高效、低耗的同时,也带来了对周围环境的震动、个别飞散物、空气冲击波和噪音的负面效应,造成人员伤亡、财产损失。目前习惯上的、传统的狭义上的爆破灾害包括个别飞散物、地面震动、冲击波、噪音、炮烟、尘埃等对环境的危害。随着人民生活质量的提高和爆破环境的复杂化,对爆破效果的控制要求越来越严格。为了有效地预测、评估和削弱由爆破产生的消极作用,上面的定义是很不全面的。广义上讲,爆破灾害是指由爆破引起的人们不希望出现的效果,如爆破震动引起的结构物的破坏,个别飞散物撞击毁坏,灰尘,坍塌范围超限,光面爆破轮廓线上的爆生微裂隙,偶然性爆炸等。

由于炸药爆炸与岩石间的相互作用是一个非常复杂的过程,涉及炸药的约束爆轰、岩石高应变率下的动态特性和破坏介质特性理论,同时爆破地质条件的多样性、结构形式和爆破方式的多种化致使对这种相互作用过程的了解非常浮浅,在这方面所作的工作也是微乎其微的,由此引起对爆破灾害产生的原因机制和防治理论缺乏实质性认识,需要进行长期深入细致的研究。因此,爆破灾害的预测与控制是岩土爆破界防灾减灾与防护工程亟待解决的热点问题。特别是爆破震动效应作为工程爆破灾害之首,一直是工程爆破界关注的焦点。

本书作者从80年代末一直从事工程爆破的教学、科研和技术服务工作,完成了多项控制爆破科研项目 and 大量爆破工程实践活动,积累了较多的爆破安全经验和研究成果。特别是近年来在中国工程院院士钱七虎教授的直接指导下,借助国家自然科学基金项目(50179038)和矿山灾害预测控制省部共建教育部重点实验室支持,通过博士研究阶段的工作,在爆破地震动作用下结构破坏安全标准研究方面取得了显著成效,得到了许多有意义的结论。希望本书的出版能在爆破灾害控制研究上起到抛砖引玉的作用。

相信随着爆破安全技术的科学化、规范化建设,爆破安全技术在提高爆破作业人员的安全技术水平,预防和减少爆破事故的发生,保障国家和人民群众的生命财产安全,让工程爆破更好地服务于国民经济建设奋斗目标等方面将会

发挥更加重要的作用。

本书在编写过程中参考引用了爆破界同仁们的部分研究成果，在此一并表示感谢。书中不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 12 月于青岛

目 录

第1章 绪论	1
第2章 爆破地震波传播的震源机制	6
2.1 岩体中爆破破坏分区与应力时程研究	6
2.2 爆炸近区理论数值计算正确性分析	12
2.3 爆破震动震源物理特征	18
2.4 爆破地震波传播特性的有关研究结果	21
第3章 爆破地震效应合理评判参数研究	24
3.1 爆破地震震级和烈度的计算方法	25
3.2 表征爆破地震动的工程特征参数	27
3.3 爆破地震效应合理评判参数的结构动力学分析研究	28
3.4 爆破地震动合理评判参数的理论研究	38
3.5 爆破震动参数引起结构响应的等同性分析	43
第4章 爆破震动持续时间与震动频率对结构响应的影响	49
4.1 爆破震动速度持续时间对结构响应影响的动力学分析	49
4.2 爆破震动持续时间对结构响应影响的时程分析	53
4.3 爆破震动持续时间对结构响应影响的损伤力学分析	58
4.4 爆破震动与结构的频率特征对结构震动响应影响	60
4.5 结构的自振周期	63
第5章 爆破地震动三向速度分量对结构动态响应影响探讨	66
5.1 爆破震动垂直向震动与水平向震动大小比较的现场测试	66
5.2 三维地震平动加速度或速度分量作用下结构的地震作用	71
5.3 多维地震动速度作用下结构响应的时程分析	73
5.4 小结	82
第6章 爆破震动速度与加速度安全控制标准间的结构破坏等效性问题	83
6.1 小波变换应用	83
6.2 小波变换基本理论	84
6.3 小波包分析原理	85
6.4 爆破震动速度与加速度安全控制标准间的等效性	86
第7章 爆破个别飞散物	91
7.1 爆破个别飞散物距离经验计算公式	91
7.2 爆破个别飞散物距离的弹道学理论计算	93
第8章 爆破空气冲击波	97
8.1 空气冲击波的安全距离	97

8.2	空气冲击波破坏标准.....	98
8.3	矿山井巷(隧道)掘进爆破空气冲击波传播特性与防护.....	99
第9章	爆生有毒气体.....	102
9.1	爆破毒气产生原因.....	102
9.2	爆破毒气的传播分析.....	103
9.3	爆破有毒气体扩散安全距离.....	103
第10章	典型爆破灾害控制.....	105
10.1	降低爆破地震波效应的主要方法.....	105
10.2	爆破个别飞散物的控制.....	109
10.3	爆破空气冲击波的安全控制.....	110
10.4	爆生有毒气体与粉尘控制.....	112
第11章	煤矿开采爆破引发的瓦斯煤尘爆炸灾害与控制.....	114
11.1	炸药爆炸时瓦斯空气混合物引燃的理论和机理.....	114
11.2	炸药特性对其引燃能力的影响.....	116
11.3	爆炸条件对炸药引燃能力的影响.....	118
11.4	爆破作业中防止和消除瓦斯与空气混合物被引燃的方法.....	119
11.5	在有瓦斯和矿尘危险的煤矿预防安全炸药燃烧的方法.....	120
11.6	《煤矿安全规程》中的有关规定.....	122

第1章 绪 论

随着国民经济建设和交通道路、大型水电工程、地下空间综合开发应用、核电站建设与核废料处理、地下重要军事战略掩体防护等众多重大基础设施的兴建,岩土爆破日益发挥重要作用。它加快了工程建设的速度,节省了建设费用,但也存在着因爆破理论不成熟、爆破控制措施不合理而造成的一定的爆破灾害问题,包括爆破地面震动、爆破个别飞散物、冲击波、噪声、炮烟、尘埃等对环境的危害(如爆破工程、岩土工程和减灾防灾工程与防护工程中因爆破地震造成的结构失稳、滑坡、开裂、变形与损伤等问题或事故)。因此,寻求可靠的爆破灾害控制措施成为岩土爆破界防灾减灾与防护工程亟待解决的热点问题,它对爆破灾害控制的理论研究和工程应用可起到指导作用,对安全爆破技术的提高与完善可起到推动作用。

爆破地震动引起的地震效应是公认的爆破灾害之首,长期以来科学工作者对爆破地震动的传播规律与地表质点震动速度进行了较深入的研究,取得了许多重要成果。

Sharpe 是最早致力于利用数学公式解决爆破问题的专家之一^[1],他研究的是无限大、均匀、弹性介质中的球形空腔受爆炸压力问题。Starfield (1968)^[2]研究了孔壁上压力时程。加拿大的 R. F. Favrean 的弹性波理论模型^[3],是 80 年代初期最具影响的爆破模型,他给出了质点速度作为距离和延迟时间的函数。斯托克斯 (G. G. Stokes)^[4]建立了粘滞性型内摩擦能量损耗的波动方程。伽坦逊 (Kjartansson)^[5]的 CQ 理论提供了频域内地震波衰减规律的数学表达式。T. J. Ahrens 建立了脆性岩石冲击损伤模型^[3]。

接近爆点自由表面的存在导致地下爆炸时的波动分析复杂化,也是自由表面临近区形成横向运动分量的原因。由于问题的复杂性,对半无限体中药包的动态响应研究得较少,目前主要有:在半无限体中临近表面的膨胀的、脉冲式点源,即仅辐射 P 波的 Hoop (1961) 的点源理论^[6]。马鞍山矿山研究院^[7]根据各向同性弹性体中的应力波理论,建立了“露天矿台阶深孔爆破矿岩破碎过程三维数学模型”,并编制“BMMC”计算机程序进行了计算。

为了保持围岩的稳定性和地面与地下结构的安全,必须研究控制质点峰值速度 (PPV)。国内外一般把质点震动速度作为爆破震动对建筑物的影响大小的主要参数。速度确定常用理论算法、经验法、数值模拟法及实验测试法。理论算法^[8]有:假设柱状装药瞬时爆轰,不考虑各个方向上 PPV 的差异,将柱状装药划分小段并组合小段装药得到岩体 PPV 分布的 Holmberg-Persson 方法。Hustrulid (1999) 则利用 Starfield & Pugliese (1968) 提出的将柱状装药分成一系列球形单元,在时间与空间域上计算模拟某点应变,取得了较好结果。Colorado School of Mine 的研究人员利用 Favreau 解答,通过计算:①等效球形装药产生的速度—时间曲线;②等效装药间的爆轰波传播时间;③岩土中的 P 波速度,从而得到球形装药、柱状装药爆炸在围岩中的震动速度 PPV 值。Heelan (1953)^[9]根据有限长度的柱状装药的瞬态孔壁压力、微段长度、孔半径给出了远场低频部分的柱坐标系中位移解答。它考虑了剪切波的作用,这在以前是没有的。Blair & Minchinton (1997) 借助 Flac 模拟了炮孔

压力函数,并计算了围岩震速计算公式。丁桦等^[10]则利用点源矩和等效孔穴理论或侵彻的空腔膨胀理论研究了爆炸波的传播机制。经验公式主要有^[11]:瑞典兰格弗尔斯的经验公式,美国矿物局经验公式,前苏联萨道夫斯基经验公式。它们都是在爆炸相似理论基础上,通过大量实测数据统计与回归得到的,基本上能与爆破现场测试结果吻合。主要的缺点是公式的离散性太大,有时是不准确的,特别是在地质构造复杂情况下,也没有考虑爆破方式、装药埋深、炸药类型、结构体动态特征等。数值模拟法^{[12][13][14]}:由于介质条件的多变性和边界条件的复杂性,目前尚不能从理论上对包含有爆炸荷载作用下特定介质本构关系的波动方程精确求解,只能对特殊情况,如无限域内球腔爆炸等进行解析求解,而有限元使求解并定量分析爆破地震问题成为可能。该方法将波动方程在空间域离散成多个质点的震动方程,再在时间域上将质点的震动方程离散成代数方程求解。常用的岩土介质模型^{[15][16][17]}有线弹性、非线性弹性介质模型和采用摩尔—库仑及Drucker-Prager 准则的弹塑性介质模型与完全脆性模型,也有采用率相关的介质模型与损伤模型、各向异性介质模型。炸药模型主要为炸药爆炸的JWL 状态方程,软件常用AUTODYN、LS-DYNA、ADINA 等。从理论上讲,数值模拟可以包括几乎整个爆炸过程、岩土破坏过程、震动传播过程(近场和远场),但实际上,由于计算机的限制,数值模拟暂不能实现爆破全过程模拟计算。爆破地震波传播的实验研究^{[18][19][20][21]}:爆破地震波在岩石介质中传播受到多种因素的影响,如介质的地形、地质条件以及物理力学参数、爆破方法、爆源大小与形式。对爆破地震波在各种介质中的传播特性及规律的最可靠的研究方法是对爆破现场测试数据在幅域、时域和频域内进行研究分析。

在爆破震动安全标准研究中,国内的《爆破安全规程》(GB 6722—2003)规定,一般建筑物和构筑物的爆破地震安全性应满足震动速度要求,同时考虑爆破震动频率因素。国际流行标准^[22]上,美国、德国等一些发达国家考虑了震动速度 and 对应频率的综合影响,将这两个指标纳入爆破震动安全判据中。①美国的爆破震动安全判据。根据对建筑物的保护程度不同,不同行业部门制定了不同的安全判据。美国矿业局(USBM)和露天矿复垦管理局(OSMRE)分别给出了震动频率与建(构)筑物质点安全震动速度间的曲线关系,成为目前国际上比较流行的爆破震动安全判据;②德国爆破震动安全判据(BRD—DIN4150)。将建筑物分为3种类型,综合考虑了爆破引起的最大质点振速和振动频率的影响,充分反映了不同频率的爆破震动对建筑物的影响;③瑞士爆破震动安全判据。将建筑物分为4类,主要考虑了10~60Hz和60~90Hz两个频率范围内的质点震动速度。

在建筑结构地震反应分析方面,实际结构往往是一个很复杂的空间体系,实际荷载也是很复杂的。因此,要对多层、高层建筑结构作精确计算是十分困难的,必须作出一些简化假定,以便简化计算。最常用的动力计算模型^{[23][24]}有层间模型、杆系模型和单柱框架模型。层间模型是将质量集中于各楼层,将整个结构的竖向承重构件合并成一根竖向悬臂结构,并用串联质点系模型近似;杆系模型以梁、柱为基本单元,结构整体刚度矩阵按一般杆件系统有限元法由单元刚度矩阵组装而成,杆系模型使得从构件层次研究地震反应规律成为可能;单柱框架模型是将结构近似等换成单柱半刚架体系。上述计算简化模型不能真实反映结构体系本身的震动特性,也不能实现震动破坏过程、破坏具体部位的刻画和仿真分析,而实体建模分析则能实现此目的。例如Hong Hao、祝英杰等^{[25][26]}利用有限元二维实体模型对无钢筋混凝土的砖砌体和钢筋混凝土结构进行了模拟,效果良好;秦杰^[27]在静荷

下对结构进行了三维分析；霍永基^[28]基于反应谱理论和爆破地震波谱特性，提出了建筑结构爆破地震动力反应的分析计算方法；姜建武^[30]则对爆破震动作用下结构的响应进行了现场爆破实测，认为爆破地震波径向分量由于震动主频低、振幅高、持续时间长，因此加强了房屋结构体的震动效应程度。

在工程爆破中，被爆介质中那些脱离主爆堆而飞得较远的碎石，称为爆破个别飞散物。爆破个别飞散物的形成有一个十分复杂的过程，造成个别飞散物的因素也很多，最主要的原因有：①设计问题。如爆破方案设计不当、某些爆破参数选择有误、炮眼（或药室）布置不当、爆破器材或起爆顺序不合理等。②施工问题。如炮孔位置、炮孔深度未严格按设计施工；未随地质地形条件而调整装药量；炮孔堵塞材料不合格或堵塞不严；炮眼附近有碎石；覆盖质量不合格；由于施工不小心，弄断起爆线路，造成少数炮孔拒爆，使部分炮孔受夹制作用而改变最小抵抗线大小及方向等。文献[31]对露天岩石爆破个别飞散物产生的原因进行了详细的分析，文献[32]对控制爆破产生的个别飞散物进行了总结，文献[33]对硐室爆破个别飞散物产生的原因进行了详细分析。高文乐，胡峰利用现代外弹道学理论，考虑了个别飞散物的反弹作用和空气阻力作用，建立了个别飞散物飞掷的数学物理模型，并推导出爆破个别飞散物飞掷距离计算公式^[34]；周显慈^[35]也利用弹道分析，推导出了个别飞散物最大飞行距离的计算公式；李守巨^[36]以爆炸动力学理论为基础，通过回归建立了个别飞散物距离与单耗的关系式；程康、章昌顺利用相似理论，推导了深孔梯段爆破中个别飞散物距离。我国《爆破安全规程》在参考了大量国内外实测资料之后，规定了个别飞散物对人员的安全距离。

炸药在空气中爆破时产生的空气冲击波达到一定值后，可造成人员伤亡和建筑物、设备的损坏，其损坏程度与冲击波超压、作用时间及建筑物固有震动周期等因素有关。对于控制爆破，由于炸药的大部分能量用于破碎砖石或混凝土，只有很少一部分转化为空气冲击波，因此空气冲击波的强度较低，其危害程度远小于个别飞散物和震动。肖奎仁、蓝成仁^[37]通过计算空气冲击波的主要参数，讨论了控制爆破中空气冲击波的强度特性，说明了空气冲击波的破坏形式，提出了防止冲击波破坏作用的爆破方法和安全技术措施；Jialing LE 通过数值模拟研究了冲击波与物体相互作用的过程。

控制空气冲击波的途径有4种：防止产生强烈的冲击波；产生后设法立即削减它；在冲击波传播过程中进行削减；在条件允许的情况下，扩大空气冲击波的通道，或按设计路线设置“泄波”通道，使冲击波泻入大气。

爆破噪音是指由于爆破而产生的一种枯燥、难听、刺耳的声音。它是爆破空气冲击波的继续，是冲击波引起气流急剧变化的结果，当空气冲击波超压降低到相当低的水平之后，此噪声就衰减为声波，其传播范围极广。爆破噪声虽然持续时间很短，但当噪声峰值达90dB以上时，就会严重影响人们的正常生活和工作，甚至造成人员伤害或设备和建筑物的损坏，成为一大爆破公害。

另外，在煤矿开采过程中，瓦斯的治理是一个世界性的难题，目前还没有从根本上解决瓦斯灾害的办法。因此，许多发达国家，为了减少事故的发生，禁止开采瓦斯涌出量大的矿井，而只开采瓦斯涌出量小的矿井。为了防止瓦斯爆炸，人们现在采取的主要措施为避免瓦斯爆炸的3个条件同时成立。这3个条件具体为：一是火源（火花的能量达到0.28MJ，温度在650~750℃以上）；二是氧气（氧气含量在12%以上）；三是瓦斯本身的浓度在5%~

15%范围内。矿井生产中,常规的办法:一是防止瓦斯积聚,不允许采掘空间出现瓦斯浓度超限,即采掘空间的瓦斯浓度要远远低于瓦斯爆炸的最低值;二是防止瓦斯被引燃,采掘空间内不能出现火源;三是防止瓦斯爆炸事故的扩大。根本措施是前面2个。目前还有更多的引爆原因和有效控制措施有待探索和研究。

总之,目前我们对爆破灾害的形成、发展规律有了一些认识,积累了一定的预测、预报经验,并取得了一批有价值的科技成果,这些都将成为今后加强工程爆破防灾减灾工作,开展国际交流合作的重要基础。但因爆破灾害预测与控制是防灾减灾工程与防护工程中的边缘学科,涉及地震学、气象学、爆炸学、地质学和工程材料学等众多学科,对我国实施可持续发展战略有着积极作用,因此,还应继续加强研究各类爆破灾害的成灾机理、毁损效应,各类工程结构与工程系统在爆破灾害作用下的破坏机理、响应分析方法和试验技术,防灾减灾的设计理论、方法和工程技术,爆破灾害荷载引起的问题和周围环境的相互作用等。

参 考 文 献

- [1] G. Swoboda, Ning Li. 爆破加载的数值模型. 第四届国际岩石爆破破碎学术会议论文集. 北京:冶金工业出版社, 1995. 12, 19—27.
- [2] M. Hisatake, S. sakurai, T. Ito and Y. Kobayashi. Analytical Contribution to Tunnel Behaviour Caused by Blasting, Engineering, Japan, 191—194.
- [3] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值计算. 北京: 科学出版社, 1999. 4, 1—38.
- [4] 宋守志. 固体介质中的应力波. 北京: 煤炭工业出版社, 1989. 10, 161—197.
- [5] [澳] D. P. 布莱尔. 爆破地震的测试、模拟和控制. 见: 第二届爆破破岩国际会议论文集, 长江科学院, 1990. 62—76.
- [6] Jinjun Jiang & Graham R. baird (Australia). 地下震源引起的地表震动. 见: 第四届国际岩石爆破破碎学术会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 85—92.
- [7] 钮强. 岩石爆破机理. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990. 112—130.
- [8] Hustrulid W. Lu Wenbo. Some general design concepts regarding the control of blast-induced damage during rock slope excavation. Fragblast7; Rock fragmentation by blasting, 595—604.
- [9] Heelan P A. 1953. Radiation from a cylindrical source of finite length. Geophysics18 (3), 685—696.
- [10] 丁桦, 郑哲敏. 爆破震动等效载荷模型. 中国科学 (E 辑) 2001 (10).
- [11] 朱忠节, 何广沂. 岩石爆破新技术. 北京: 中国铁道出版社, 1986.
- [12] G. W. Ma, H. Hao & Y. X. Zhou. Modeling of wave propagation induced by underground explosion. Computers and Geotechnics, Vol. 22, No. 3/4, pp. 283—303, 1998.
- [13] 龙源, 冯长根, 等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究. 工程爆破, 2000 (9) 1—7.
- [14] 丁希平. 半无限介质中柱状药包应力场作用特性的数值模拟. 见: 中国民用爆破器材学会第五届年会论文集. 2000. 412—416.
- [15] [前苏] Г. М. 梁霍夫著, 刘光寰, 王明洋译. 岩土中爆炸动力学基础. 南京: 工程兵工程学院, 1993.
- [16] 蔡美峰等. 岩石力学与工程. 北京: 科学出版社, 2002.
- [17] 张玉军, 刘谊平. 正交各向异性岩体中地下洞室稳定的粘弹—粘塑性三维有限元分析. 岩土力学, 2002; 279—283.
- [18] 张继春. 三峡工程基岩爆破振动特性的试验研究. 爆炸与冲击, 2001 (4): 131—137.

- [19] [Croatia] S. Strelec, I. Gotic & B. Bozic: 爆破对城市环境的影响. 见: 第四届国际岩石爆破破碎学术会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 121—128.
- [20] 吴新霞, 张正宇, 等. 三峡碾压混凝土围堰爆破拆除安全控制标准. 工程爆破文集 (第七辑), 2001 (10), 743—753.
- [21] D. Linn Coursen (U. S. A.) Proposed Method of Reducing Ground Vibration From Delay Blasting. Proceedings of the eleventh annual symposium on explosive and blasting research. 1994.
- [22] 汪旭光, 于亚伦. 关于爆破震动安全判据的几个问题. 工程爆破, 2001 (6): 88—92.
- [23] 沈冯强, 林峰. 建筑结构动力分析有限元模型. 合肥工业大学学报, 2001 (2): 64—70.
- [24] 陈滔, 黄宗明. 钢筋混凝土框架非弹性地震反应分析模型研究进展. 世界地震工程, 2002 (3): 91—97.
- [25] Hong Hao, Guo-wei Ma, Yong Lu: Damage assessment of masonry infilled RC frames subjected to blasting induced ground excitations. Engineering Structures, 24 (2002), 799—809.
- [26] 祝英杰, 刘之洋. 混凝土小型空心砌块砌体的非线性动力分析有限元模型. 东北大学学报, 2000 (2): 30—33.
- [27] 秦杰, 黄达海, 等. 砌体房屋受地表变形的有限元分析. 工业建筑, 2002 (5) 41—44.
- [28] 霍永基. 建筑结构爆破地震动力反应分析法. 见: 工程爆破文集 (第六辑). 深圳: 海天出版社, 1997 (11) 719—724.
- [29] 吕西林等. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用. 上海: 同济大学出版社, 1999 (8) 182—198.
- [30] 娄建武, 龙源, 等. 普通民房在爆破地震波作用下的震动破坏分析. 解放军理工大学学报, 2001 (4): 21—25.
- [31] 关霖. 露天岩石爆破中飞石产生原因及控制. 西部探矿工程. 1999, 11 (2): 66—67.
- [32] 杨宝全, 卢琦. 控制爆破产生飞石的原因及其防治 [J]. 采矿技术, 2003, (3): 76—77.
- [33] 闵国清, 穆大耀, 等. 硐室爆破个别飞石产生原因及预防措施. 云南冶金, 2003 (3): 1—4.
- [34] 高文乐, 胡峰. 爆破飞石的外弹道研究 [J]. 爆破, 1996 (1): 12—15.
- [35] 周显慈. 建筑物拆除爆破中飞石的控制机理研究 [J]. 淮南职业技术学院学报, 2002 (2): 37—41.
- [36] 李守巨. 拆除爆破中飞石抛掷距离的研究 [J]. 爆破, 1994 (p): 10—12.
- [37] 肖奎仁, 蓝成仁. 控制爆破中空气冲击波的破坏作用及其安全技术措施 [J]. 煤炭科学技术, 1994, (3): 34—37.

第2章 爆破地震波传播的震源机制

爆炸是能量在极短的时间内释放的一种现象,爆炸能被广泛的应用于各种岩土工程领域:如水利、交通、采矿、石油、勘探及防护工程等。在岩土爆破工程中,并非所有的爆炸都能被有效地利用,其中的一部分会通过爆破区周围的介质向外传播,即所谓的爆破震动的传播,它将对周边的建筑产生不利影响。在所有爆破实验的记录中,爆破地震波无一例外地表现为频率和幅值各不相同的复杂波列。在这些波列中包含着爆炸源、介质物性、传播路径和观测环境等影响因素,也就是说在每一道复杂的地震波列中蕴含着诸多因素的信息。

爆炸近区在强烈爆炸作用下,进行着复杂的过程。这些过程包括压缩波的传播、塑性变形的发生、介质的破坏及爆炸空腔的形成。在孔隙率较低的坚硬岩石中,空腔的形成主要是压缩波向外挤压一定体积的介质所致,并与爆炸能量成正比。空腔的半径及非弹性变形区半径依赖于爆炸能量及介质的性质。空腔及非弹性变形区半径最终决定了辐射出来的爆炸震动波的基本参数。因此非弹性区在地下爆炸中被看作是地震动源。计算结果及实验研究表明,爆炸能的绝大部分被消耗在非弹性变形区。在爆炸空腔停止扩张后,地下爆炸的能量分配如下:爆炸产物含总能的10%~20%,介质的熔化占15%左右,耗散于非弹性区的能量占60%~70%,主要以热的形式耗散。在非弹性变形区域内,有90%~95%的能量被耗散掉,只有10%~15%的能量进入到弹性区,主要以介质的压缩形式存在。弹性区的能量的一部分用于地震动,而地震动由于几何发散、吸收及散射而逐渐衰减。在爆炸附近速度衰减越厉害,那么成为地震波的能量就越低。在破坏区之外利用弹性理论就能以足够的精度确定爆炸地震作用的参数。

目前的主要问题是岩石中爆炸分区及弹性区边界上的震动参数如何确定,本文的工作就是在这方面作初步探讨。

2.1 岩体中爆破破坏分区与应力时程研究

众所周知,当一装药炮孔被引爆时,炸药爆炸所产生的高压气体冲击孔壁,同时产生一向外传播的进入岩石介质的强压力波。在炸药起爆以后岩石的运动分为4个阶段(不考虑爆炸物的运动):一是来自装药表面的,压缩介质的冲击波的运动,随着扩展半径的增加,冲击波速度降低;二是冲击波波速减少到弹性压缩波的波速,这时弹性波从冲击波波阵面分离出来并超前;三是弹性区与塑性区的边界可理解为运动着的接触间断面,不断从其中产生弹性波;四是塑性变形完全消失,运动变为弹性。根据周围岩石破坏的程度,装药爆炸对岩石作用后,将形成3区:空腔区、破碎区和弹性区,弹性区又分为裂隙区和震动区。因而爆破地震波是经过破碎区、径向裂隙区滤波后的波的传播。因此,爆源机制研究应涉及炸药爆炸产物高压膨胀与岩体的相互作用、空腔壁在爆生气体的作用下经不断膨胀与收缩的脉冲过程、破坏区范围大小及破坏区与弹性震动区交界面上的应力时程等问题,并需

对其进行深入研究。这些问题的研究是爆破地震波效应研究中最基本、最重要的基础性工作。

岩石介质的变形与破坏可分为破碎区、径向裂纹区和弹性震动区，如图2.1。各区的变形与破坏特征如下：

破碎区的特征是介质受到爆炸的挤压而全部被破坏形成松散材料。考虑到介质在很小的剪切变形时就要被破坏，耗费在材料破坏上的能量份额也极小。事实上，令介质在压缩应力 σ 下破坏，它相当于相对线性变形为 $\epsilon \ll 1$ ，这时单位容积所吸收的破坏能量的数量级为 $\sigma\epsilon$ ，而耗费在介质运动上的能量的数量级为 σ 。这样一来，可以断定破碎区松散介质的运动起着主要作用，类似流体的运动，但破碎区岩体松散的摩擦型介质不同于流体而具有一定的抗剪性。

径向裂纹区的特征是介质受到裂缝的破坏，形成类似径向柱杆。主要把破碎带传来的压力过渡到弹性区介质中去。弹性震动区的特征是具有原始性质的弹性介质。在这两区中，变形属于弹性范围，即为小变形范畴，质点的运动是主要的。

根据上述变形与破坏特征的分析，对于未破坏的弹性区可以采用连续介质力学的变形

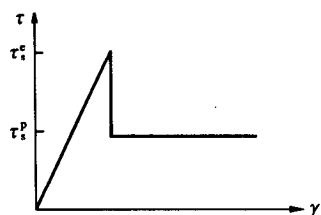


图2.2 各变形区的应力与应变关系

关系，对于破碎区，松散介质的运动起着主要作用。物理细观力学研究表明，细小破碎介质的残余强度 τ_s^0 是揭示岩体破坏的重要信息，岩体介质的脆性破坏伴随着剪应力的急剧减少并转入破坏材料的强度极限对应的状态，引入2个极限特征参数如图2.2：未破坏材料的强度 τ_s^0 和已破坏材料的强度 τ_s^0 。不管是破碎区还是径向裂缝区，因岩体空腔壁的变形较大，而不能采用小变形理论。值得指出的是炸药爆炸的能量主要分配在介质体积、形状（剪切）和动能的变化上，但是对具有自由表面的松动爆破，消耗在介质体积变形上的

能量仍远小于消耗在形状变形上的能量，因此，岩体介质实际上是不可压缩的。

2.1.1 破碎区

破碎区介质的动力变形在球坐标系下可用下列式(2.1)～式(2.5)描述：

$$\rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} \quad (2.1)$$

式中， ρ_0 为介质的初始密度， kg/m^3 ； v 为径向质点速度， m/s ； σ_r 、 σ_θ 为径向及环向应力分量 Pa 。

在冲击体的近区材料呈高压作用下的性状，Tresca 塑性条件可以相当完善地加以描述塑性部分 σ_r 和 σ_θ ：

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2\tau_s^0 \quad (2.2)$$

弹性变形部分采用广义的Hooke 定律：

$$\tau_{\max} = \mu \gamma \quad (2.3)$$

式中， τ_s^0 为岩体破碎区材料的剪切屈服强度，由实验确定； $\tau_{\max} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}$ 为最大切应力， $\gamma = \epsilon_r - \epsilon_\theta$ 为主剪应变， ϵ_r 、 ϵ_θ 为径向及环向应变分量， μ 为剪切弹性模量。

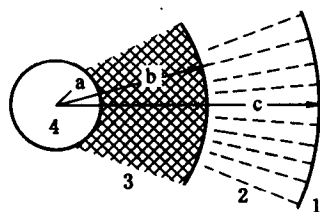


图2.1 爆破作用下岩石的变形与破坏特征

1—弹性区；2—径向裂纹区；
3—塑性区；4—空腔

爆炸引起破碎区非相容变形的扩容效应可用下列简单的关系:

$$\dot{\epsilon}_v = \psi \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

式中, ϵ_v 为体积扩容变形率; ψ 为扩容系数; $\dot{\gamma}$ 为剪切变形变化率。

以展开的形式上式可写为:

$$\frac{\partial v}{\partial r} + 2 \frac{v}{r} = \psi \left(\frac{v}{r} - \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (2.5)$$

由破坏区的膨胀条件和球腔膨胀的边界条件可得: $v(r, t) = \frac{\dot{a} a^k}{r^k}$, 式中, $k = (2 - \psi) / (1 + \psi)$; $\dot{a}$ 为球腔的膨胀速度, 球腔膨胀的边界条件为 $v|_{r=a} = \dot{a}$ (t)。

实际上, 破碎介质并非均匀流体介质, 而是具有一定残余强度的介质。实验结果表明^[6], 尽管在装药附近有显著的破坏区, 在质点速度变化图上并没有展示出由于材料破坏所引起的介质不可逆变化的任何征状。这一事实表明, 要么是材料的破坏没有损坏运动的连续性, 要么是破坏波阵面上的运动参数的变化小到可以忽略。若破坏波阵面的半径用 r 表示, 在这一位置的最大波速为 v_0 , 且引入下列无量纲距离 $r_0 = r/R_0$, $r_* = R_*/R_0$, R_* 破坏区半径, R_0 装药半径, 则质点的最大速度随距离的变化可写为

$$v_0 = \begin{cases} a_1 r_0^{-n_1}, & r_0 < r_* \\ b_1 r_0^{-p_1}, & r_0 > r_* \end{cases}$$

式中, a_1, b_1, n_1, p_1 为依赖于 η 的介质质点运动速度参数, 相对距离 η 为装药距离自由表面的距离, $\eta = h/R_0$, h 为爆心距离自由面的距离。

尽管使用的模型介质力学性质显著不同, 但最大质点速度及其随距离的衰减在装药近区的差别不大。因此, 由破坏区的膨胀条件和球腔膨胀的边界条件可写成:

$$v(r, t) = \frac{c_0 a^k}{r^k} \quad (2.6)$$

式中, c_0 为破碎介质质点运动速度参数, 一般 $c_0 = 300 \sim 600 \text{ m/s}$ 。

把式 (2.2) 代入到式 (2.1) 中, 并考虑到式 (2.6), 积分后得到破坏区内径向应力的一般解:

$$\sigma_r^p = 4\tau_s^p \ln r + \rho_0 \left(\frac{k c_0 a^{k-1} \dot{a}}{(1-k)r^{k-1}} + \frac{1}{2} \frac{c_0^2 a^{2k}}{r^{2k}} \right) + C(t) \quad (2.7)$$

式中, $C(t)$ 为时间的任意函数, 上标 p, f, e 分别表示破碎区、裂纹区、弹性区。

破碎区还存在如下边界条件:

空腔壁: $r = a(t), \sigma_r = -p(a)$

初始条件: $t = 0, r = a_0, \sigma_r = -p_0$

爆生气体绝热膨胀规律为:

$$p(a) = \begin{cases} p_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-3\gamma_1} & a \leq a^* \\ p_0 \left(\frac{a^*}{a_0} \right)^{-3\gamma_1} \left(\frac{a}{a^*} \right)^{-3\gamma_2} & a \geq a^* \end{cases}$$

式中, a^* 为临界膨胀半径, $\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 1.27, a^*/a_0 = 1.53$; p_0 为爆轰压力, 对梯恩梯来说, $p_0 = 3.56 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

2.1.2 径向裂纹区