

NUMERICAL METHODS
AND THEIR APPLICATIONS

NUMERICAL METHODS AND THEIR APPLICATIONS ON DEMOLITION BLASTING

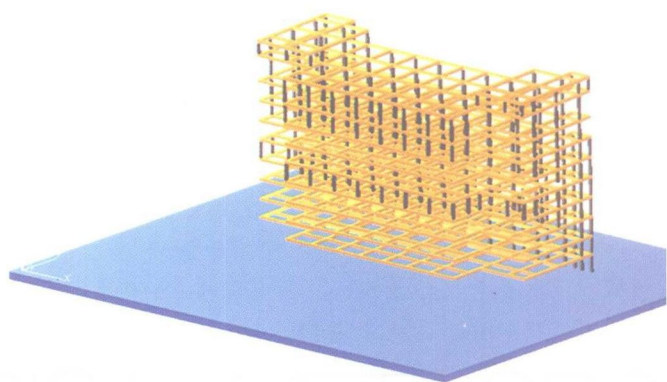
拆除爆破

数值模拟与应用

谢先启 编著



湖北科学技术出版社



NUMERICAL METHODS AND THEIR APPLICATIONS ON DEMOLITION BLASTING

拆除爆破

数值模拟与应用

谢先启 编著

湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

拆除爆破数值模拟与应用 / 谢先启编著. —武汉: 湖北
科学技术出版社, 2008.12

ISBN 978-7-5352-4262-4

I. 拆… II. 谢… III. 爆破拆除-数值模拟 IV. TU746.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 187134 号

责任编辑: 梁 琼

封面设计: 戴 旻

出版发行: 湖北科学技术出版社

电话: 027-87679468

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号

邮编: 430070

(湖北出版文化城 B 座 12-13 层)

网 址: <http://www.hbstp.com.cn>

印 刷: 湖北新华印务有限公司

邮编: 430034

787 × 1092 1/16

13.75 印张 310 千字

2008 年 12 月第 1 版

2008 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1-3 000

定价: 98.00 元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

作者简介

谢先启,1961年生,教授级高级工程师。现任武汉市市政建设集团董事长兼总经理、武汉爆破公司董事长、中国工程爆破协会副理事长、中国力学学会工程爆破专业委员会委员、湖北省爆破学会副理事长、武汉市工程爆破协会理事长等职,是武汉理工大学、武汉科技大学等多所高校兼职教授或特聘教授,享受国务院特殊专家津贴。曾获武汉市首届“杰出人才奖”、武汉市“五一劳动奖章”等荣誉称号。是武汉市第十一届人大代表,湖北省第十届政协委员。



长期从事工程爆破的理论研究与实践工作,曾获省部级科技进步奖6项、国家发明专利2项,完成国家863计划2项;在国内外学术会议与刊物发表论文40余篇;在国际上首次提出了“精细爆破”的概念。1995年12月主持设计并完成当时国内最高楼房(武汉桥苑新村18层倾斜危楼)的抢险爆破拆除;2002年11月在武汉卷烟厂煤锅炉房率先引入“绿色爆破”新理念,采用多种新技术、新工艺控制爆破“粉尘”对环境的危害,取得了满意的效果;2003年4月主持完成武汉外滩花园违章建筑群(建筑面积75 000m²)爆破拆除工程;2004年1月在武汉阳逻化肥厂首次成功实施我国100m钢筋混凝土烟囱双向折叠爆破拆除;2007年12月在国内首次成功实施19层框一剪结构楼房双向多次折叠爆破拆除等。

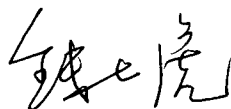
序 言

拆除爆破作为爆破工程的重要组成部分,在我国国民经济建设中运用十分广泛。就总量、规模、难度和复杂程度而言,我国的拆除爆破技术在国际上是领先的,这与我国经济的飞速发展密切相关。

因为拆除爆破机理的复杂性,目前拆除爆破的理论研究还不能满足工程实践的需要,而通过计算机数值模拟技术来优化、选择设计参数并对设计结果进行验证,是一种很好的思路。本书较系统地介绍了有限元法、离散元法、DDA 法及多刚体动力学法等数值方法应用于拆除爆破数值模拟中的基本原理,着重介绍了作者在该领域的最新研究成果。同时,书中列举的许多具有代表性的拆除爆破工程实例亦包含有很多独到的设计思路与施工技巧。该书的研究成果和工程实例,基本上反映了当前我国在该领域的研究水平,相信对相关从业人员与科技工作者会有所帮助。

本书作者从事工程爆破实践与理论研究工作近 30 年,成功地从事过许多具有挑战性的爆破工程;在工程爆破实践的同时,也非常重视爆破基础理论研究。本书就是作者多年来从事理论研究与工程实践的部分总结。鼓励和支持作者整理出版他的科技创新成果,是我本人的心愿,更是我的职责。因此,我十分乐意写下这些文字,把这本书推荐给广大读者。

中国工程院院士



2008 年 10 月

前 言

拆除爆破是在清除二战遗留建筑物的背景下兴起的。目前,在城市改建、扩建过程中,拆除爆破以其快捷、简便以及显著的社会效益和经济效益受到重视,并在拆除市场占据重要的位置,已成为拆除业中最具竞争力的方法之一。在国内,建(构)筑物尤其是高层建筑物的拆除,主要采用拆除爆破技术。据不完全统计,我国每年进行的拆除爆破工程达数千项。面对广阔的市场,拆除爆破技术的相关理论研究及工程实践已经越来越受到人们的重视。

因为拆除爆破的对象千差万别,作业环境又大多在城市闹市区,所要实现的爆破效果与常规的以破碎岩土介质为目的的爆破有着本质上的区别,除了要遵循一般常规爆破的爆轰原理、介质破碎机制外,还要分析结构倒塌机制、倒塌的复杂动力学过程以及有害效应等问题。目前,拆除爆破的理论研究远远不能满足工程实践的需要,原因在于:①炸药的爆轰与结构构件的局部破坏过程的描述在理论上还不成熟;②缺乏有效的理论模型模拟结构倒塌的复杂力学过程;③有害效应的预测与控制的理论依据不足等。

近年来,我国爆破工作者在拆除爆破理论与工程实践方面做了大量工作,但是对于建筑物的倾倒、解体形式和触地振动等技术问题的理论研究还处于发展阶段,在理论上有待于进一步完善,而通过计算机数值模拟来优化、选择设计参数并对设计结果进行验证,无疑是一个经济有效的方法。同时,将计算机模拟技术应用于建筑物拆除爆破,不仅可以了解问题的结果,而且可连续地、动态地、重复地描述事物的发展规律,了解结构整体倒塌与局部断裂破坏的详细过程。此外,还可以把模拟结果中反映的信息反馈给爆破设计,从而修正、完善爆破设计方案,因此拆除爆破数值模拟技术的研究具有重要的工程应用价值。

拆除爆破的数值模拟是按照特定的数学或物理模型,利用计算机进行过程模拟的研究方法,拆除爆破的数值模拟应该满足以下几个方面的要求:①可以描述结构构件的局部破坏与整体结构的失稳;②可以预测爆破效果,如爆堆高度、前冲距离、后坐距离等;③可以根据模拟结果优化爆破设计;④模拟和再现结构倒塌过程。

拆除爆破多在闹市区进行,如何有效控制爆破有害效应是拆除爆破成功与否的关键因素之一。在各种爆破有害效应中,结构触地振动效应与粉尘的预防与控制是拆除爆破工程中不容回避的重要问题,但在施工中还缺乏可靠的控制依据,是目前拆除爆破领域研究的热点问题之一。

作者从事工程爆破实践与理论研究工作近 30 年,成功实施各类爆破工程近千项;在科技创新和理论研究方面,先后针对复杂环境下建(构)筑物的拆除爆破技术、100m 以上高烟囱双向折叠定向倾倒拆除爆破综合技术、拆除爆破结构倒塌数值模拟技术、爆破有害效应预防等进行了系统研究,取得了一定的成果。拆除爆破的理论研究内容与形式十分浩繁,涉及到多个学科,并且处于不断发展之中,本书的写作意图是总结作者在拆除爆破数值模拟领域的理论研究成果和工程实践经验,希望为该领域的深入研究起到抛砖引玉的作用。

本书共分为 4 篇,14 章,核心内容为拆除爆破数值模拟方法、有害效应预防及典型工程实例。

第一篇介绍了国内外拆除爆破理论与实践研究的现状及发展趋势。

第二篇介绍了有限元、离散元、DDA、多刚体动力学等数值模拟方法及模拟实例。其中重点介绍了最新的研究成果——离散元框架内的网格实体模型(SLM, solid lattice model)。由于建筑物爆破拆除过程中结构经历由相对连续到离散破碎的全过程,有限单元法和离散单元法等传统数值方法对于模拟结构倒塌全过程都存在一定局限性,只能对此过程的某一阶段或某个现象进行分析与研究。为此,作者在离散单元法的基础上,耦合有限单元法中的梁单元形成了网格实体模型,并开发了模拟软件 SLM-DEM。同时,为了书稿的完整性,也介绍了该领域同行的研究工作,如数值模拟的 DDA 法等。

第三篇阐述了拆除爆破有害效应预防的两个热点问题:触地振动效应与粉尘控制。

第四篇介绍了作者主持完成的具有代表性的 12 项拆除爆破工程。目的是把作者长期积累的施工经验与技巧与读者分享。

目前关于拆除爆破方面的书籍很多,但大多针对工程设计与施工过程。作为系统介绍拆除爆破数值模拟技术的专著,本书的特点是以专题的形式介绍作者在拆除爆破数值模拟领域的研究成果,每部分内容自成体系又相辅相成。本书可作为拆除爆破同行、大专院校的学者、研究生及相关领域科技工作者的参考书。

本书在撰写过程中得到了钱七虎院士、冯叔瑜院士、汪旭光院士的悉心指导和热情帮助,钱七虎院士在百忙之中还为本书作序,武汉大学卢文波教授对书稿亦提出了许多宝贵意见,在此一并向他们表示诚挚的谢意!

在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关领域的大量文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

由于数值模拟技术在拆除爆破领域的研究尚不深入,加之作者水平有限,书中难免有错误或不妥之处,敬请读者批评指正。



2008 年 10 月于武汉

目 录

第一篇 绪论

1	爆破理论的发展历程	2
1.1	弹性理论阶段	2
1.2	断裂理论阶段	2
1.3	损伤理论阶段	3
2	拆除爆破技术的发展历程与现状	4
2.1	拆除爆破技术的发展历程	4
2.2	拆除爆破技术的现状	6
2.2.1	钢筋混凝土框架结构的爆破拆除	6
2.2.2	砌体结构的爆破拆除	6
2.2.3	高耸筒形结构的爆破拆除	7
3	拆除爆破数值模拟技术的研究现状	8
3.1	综述	8
3.2	有限元法(FEM)	9
3.3	平面杆系有限元法	10
3.4	数值流形方法	10
3.5	不连续变形分析法(DDA)	11
3.6	应用单元法(AEM)	11
3.7	离散单元法(DEM)	12
3.8	有限元与离散元耦合的方法(CFD)	13
3.9	总结	13
4	触地振动效应研究现状	14
	参考文献	15

第二篇 拆除爆破数值模拟技术

5	框架结构拆除爆破的有限元法模拟	22
5.1	倒塌模式	22
5.2	墙体剪切坍塌模型及力学判据	25
5.2.1	楼房爆破模型	25
5.2.2	爆破缺口的理论计算	25
5.2.3	剪切坍塌的力学判据	26
5.3	结构体运动稳定性分析	28
5.3.1	单自由度结构体系的运动稳定性	28

5.3.2	多自由度体系的运动稳定性分析	30
5.3.3	多自由度结构体系的静力稳定性	30
5.3.4	结构承载力极限与稳定性的关系	31
5.4	建(构)筑物失稳判别	31
5.4.1	框架结构内力的计算	32
5.4.2	建筑物构件承载力的计算	34
5.5	框架结构爆破拆除有限元模拟实例	35
5.6	小结	44
6	钢筋混凝土烟囱折叠爆破有限元法模拟	45
6.1	钢筋混凝土烟囱折叠爆破的力学原理	45
6.1.1	折叠倾倒的动力学模型	45
6.1.2	烟囱折叠运动的可能状态	46
6.1.3	烟囱上切口位置选择	47
6.1.4	上切口处支撑筒壁受力分析	47
6.2	动力有限元分析方法	49
6.2.1	非线性瞬态分析有限元基本理论与方法	49
6.2.2	建模及网格剖分	53
6.2.3	支撑断面应力计算结果及分析	55
6.3	上下切口合理时差的确定	58
6.3.1	支撑断面的受力分析结果	58
6.3.2	折叠倾倒过程动力学模拟结果	58
6.3.3	合理时差	59
6.3.4	实际时差及效果	59
7	离散元法基本理论	60
7.1	概述	60
7.2	离散单元法的发展历史	60
7.3	离散单元法的发展现状	61
7.4	离散单元法的基本思路	61
7.5	离散元法的基本原理	62
7.5.1	接触力的计算	62
7.5.2	块体的运动	64
7.5.3	时间步长的选择	65
7.5.4	阻尼	66
7.6	网格实体模型(SLM)的基本原理	66
7.6.1	网格实体模型的基本思路	66
7.6.2	网格实体模型中梁端力的计算	67
7.6.3	“梁”的强度准则	69
8	拆除爆破离散元法模拟实例	71
8.1	“武汉商场旧楼”拆除爆破数值模拟	71
8.1.1	初始化	71

8.1.2	单元间“梁”的添加	74
8.1.3	输入参数	75
8.1.4	模拟结果	76
8.1.5	模拟结果与实际结果的对比	82
8.1.6	分析	83
8.2	爱尔眼科医院大楼拆除爆破数值模拟	83
8.2.1	初始化	83
8.2.2	单元间“梁”的添加	87
8.2.3	输入参数	88
8.2.4	模拟结果	88
8.2.5	模拟结果与实际结果的对比	94
8.2.6	分析	95
8.3	小结	95
9	DDA 方法基本理论	96
9.1	概述	96
9.2	块体的位移和变形	97
9.2.1	块体变形的子矩阵	98
9.2.2	一阶近似	100
9.2.3	联立方程组	101
9.3	单一块体的应力、应变及荷载分析	102
9.3.1	弹性子矩阵	102
9.3.2	初始应力	103
9.3.3	点荷载	103
9.3.4	体积荷载	104
9.3.5	惯性力	105
9.4	块体系统运动学	107
9.4.1	两块体间的距离	107
9.4.2	接触和相互嵌入	109
9.4.3	嵌入准则	111
9.4.4	法向弹簧子矩阵	112
9.4.5	切向弹簧子矩阵	116
9.4.6	摩擦力子矩阵	119
9.4.7	弹簧位置的选择	121
9.5	单纯形积分	121
10	DDA 法模拟实例	124
10.1	烟囱计算模型	124
10.2	模型计算参数及爆破荷载	124
10.3	模型计算过程	125
10.4	模拟计算效果	125
10.5	小结	126

11 多刚体动力学模拟方法	127
11.1 多刚体动力学基本理论	127
11.1.1 多刚体动力学原理和特点	128
11.1.2 多刚体动力学基本方程	128
11.1.3 铰的类型和性质	129
11.1.4 多刚体动力学数值求解技术	129
11.1.5 多刚体动力学计算模型	130
11.2 建筑物解体失稳机理模拟	130
11.3 建筑物倒塌运动过程模拟	131
11.4 建筑物倒塌堆积状态模拟	131
11.5 多刚体动力学方法在拆除爆破方案优化中的应用	132
11.5.1 数值模型的建立	132
11.5.2 不同工况下楼房折叠爆破倾倒过程模拟	132
11.5.3 模拟结果讨论	137
11.5.4 爆破方案优化选择	137
参考文献	138

第三篇 拆除爆破触地振动效应与粉尘控制

12 结构倒塌触地振动效应	142
12.1 建(构)筑物倒塌触地振动的震源机制	142
12.1.1 建(构)筑物倒塌触地冲击力的计算	142
12.1.2 集中谐和力震源机制	143
12.1.3 分布谐和力震源机制	144
12.2 触地振动特征及减震对策	148
13 拆除爆破降尘技术	149
13.1 目前拆除爆破中常用的降尘方法	149
13.2 爆破粉尘	150
13.2.1 爆破粉尘的来源	150
13.2.2 爆破过程中粉尘飞扬的原因	150
13.2.3 爆破粉尘的特点	150
13.3 拆除爆破降尘的基本思路	150
13.4 拆除爆破降尘实验	151
13.4.1 测点布置	151
13.4.2 测试数据及其分析	151
13.5 爆炸法产生水雾的数值模拟研究	152
参考文献	155

第四篇 拆除爆破工程实例

14 拆除爆破工程实例	158
14.1 18层倾斜大楼控制爆破拆除工程	158

14.1.1	工程概况	158
14.1.2	爆破拆除设计总体方案	159
14.1.3	爆破参数设计	160
14.1.4	爆破效果	161
14.2	外滩花园 8 栋楼房爆破拆除工程	161
14.2.1	工程概况	161
14.2.2	爆破总体设计	162
14.2.3	爆破效果	164
14.3	武汉市江岸区永清片 6 栋建筑楼群爆破拆除工程	164
14.3.1	工程概况	164
14.3.2	爆破方案	166
14.3.3	5 [#] 、6 [#] 楼爆破参数设计	166
14.3.4	爆破效果	167
14.4	双向折叠爆破拆除 100m 钢筋砼烟囱	168
14.4.1	工程概况	168
14.4.2	爆破方案的确定	169
14.4.3	爆破切口设计	170
14.4.4	起爆网络	171
14.4.5	爆破效果	172
14.5	武汉商场旧楼拆除爆破工程实例	173
14.5.1	工程概况	173
14.5.2	拆除方案的选择与确定	174
14.5.3	爆破参数设计	175
14.5.4	安全设计	176
14.5.5	爆破效果	177
14.5.6	振动效应监测	177
14.6	爱尔眼科医院大楼爆破拆除工程	178
14.6.1	工程概况	178
14.6.2	爆破方案的选择与确定	180
14.6.3	预处理与预拆除	181
14.6.4	技术设计	181
14.6.5	爆破效果	182
14.7	龙华大厦爆破拆除工程	182
14.7.1	工程概况	182
14.7.2	爆破方案的选择	184
14.7.3	爆破参数设计	185
14.7.4	安全技术	186
14.7.5	爆破效果	186
14.8	150m 高钢筋混凝土烟囱爆破拆除实例	187
14.8.1	工程概况	187

14.8.2	爆破方案的确定·····	188
14.8.3	爆破切口设计·····	188
14.8.4	爆破参数设计·····	190
14.8.5	安全设计·····	190
14.8.6	爆破效果·····	190
14.8.7	振动监测结果·····	191
14.9	定向与双向三次折叠爆破拆除两栋 19 层框剪结构大楼 ·····	192
14.9.1	工程概况·····	192
14.9.2	爆破拆除设计方案·····	193
14.9.3	爆破效果·····	195
14.10	徐家河水库灌区陈家嘴渡槽爆破拆除实例 ·····	196
14.10.1	工程概况 ·····	196
14.10.2	总体拆除方案 ·····	198
14.10.3	爆破参数设计 ·····	199
14.10.4	安全设计 ·····	200
14.10.5	爆破效果 ·····	201
14.11	40m 高倒锥形水塔爆破拆除工程 ·····	201
14.11.1	工程概况 ·····	201
14.11.2	爆破方案 ·····	202
14.11.3	爆破切口设计 ·····	202
14.11.4	爆破参数设计 ·····	203
14.11.5	安全设计 ·····	204
14.11.6	爆破效果 ·····	204
14.12	75m 高砖烟囱爆破拆除工程 ·····	205
14.12.1	工程概况 ·····	205
14.12.2	爆破方案 ·····	206
14.12.3	爆破设计 ·····	206
14.12.4	爆破效果 ·····	207

第一篇

绪论

1 爆破理论的发展历程

随着工程爆破技术的发展和计算机应用技术的普及,对岩石材料爆破理论模型及数值模拟的研究日益受到各国学者的广泛关注。岩石材料爆破模型有两类,即经验模型和理论模型。前者以经验为基础,适用于处理一定范围内的具体工程设计和参数优化问题;后者以爆破机理为基础,普遍适用于各种爆破计算和分析的模型。

沃奥班(Vauban)针对固体介质爆破破碎首先提出了经验公式,后来许多学者对其加以发展,其中,鲍列斯阔夫经验公式得到了广泛的应用,至今仍是工程爆破的基本公式。美国的 C. W. Livingston 根据大量漏斗实验,第一个科学地确定了爆破漏斗的几何形态,得出了单位炸药量的爆破漏斗体积与深度比曲线。此外,比较著名的还有 O. E. 弗拉索夫理论。这三个具有代表性的理论各有特点,但均未涉及爆破过程的物理实质,属于经验计算公式^[1,2,3]。

20 世纪 60 年代初日野熊雄提出冲击波破坏理论和 U. Longfors 等人提出爆破气体膨胀压破坏理论,70 年代 L. C. Longe 明确提出爆破作用三个阶段的理论,即弹性阶段、断裂阶段和损伤阶段^[4,5,6]。

1.1 弹性理论阶段

具有代表性的是 Harries 模型^[5]和 Favreau 模型^[7],它们都将岩石视为均质弹性体。这两个模型至今还在澳大利亚和加拿大等国被广泛地使用。Harries 模型(1973)是建立在弹性应变波基础上的高度简化的准静态模型。该模型认为作用于孔壁的爆生气体压力产生的切向拉应变是形成裂缝的主要原因,并以应变值大小决定径向裂纹个数,用 Monte Carlo 法确定爆破裂缝分割的破碎块度。Harries 模型首次解决了以往爆破物理模型的使用局限性及难以量化的问题,开辟了计算机应用于爆破理论研究的新方向。

Favreau 模型是建立在爆炸应力波理论基础上的三维弹性模型。该模型充分考虑了压缩应力波及其在各个自由面的反射拉伸波和爆生气体膨胀压力的联合作用效果,最终以岩石动态抗拉强度作为破坏判据。该模型具有模拟炸药参数、孔网参数及岩石炸药匹配关系等爆破因素的综合能力,并可预报爆破块度。

1983 年我国马鞍山矿山研究院推出的利用单位表面能理论作为破坏判据的改进模型是我国第一个完整的爆破数值计算模型(BMMC)^[8]。

1.2 断裂理论阶段

有代表性的爆破模型主要有 BCM 模型^[9,10]和 NAG-FRAG 模型^[11]。NAG-FRAG 模型(Stuar Mchugh, 1983)以应力波使岩石中原有裂纹激活而形成裂缝为主,同时也考虑了爆生气体压力引起的裂缝进一步扩展。该模型认为爆炸作用下岩石破坏范围及破坏程度取决于受应力波作用激活的裂纹数量和裂纹的扩展速度。该模型还涉及到裂纹相互作用引起的应力降

低和层裂作用形成的破碎块度估算等内容。BCM 模型也称层状裂缝岩石爆破模型,是美国能源部组织研究的用于二维有限差分应力波计算程序 SHALE 中的岩石爆破模型^[10]。该模型以 Griffith 裂缝传播理论为基础,认为岩石中存在的微缺陷可看作是均匀分布的扁平状裂隙,这些裂隙的稳定性可用能量平衡理论判断。如果岩石释放的应变能超过建立新表面所需的能量,则裂纹扩展。当垂直于裂纹表面的法向力为压应力时,裂缝闭合,并用有效弹性模量表示岩石中大量存在的裂缝对应力波传播的影响。

其后,澳大利亚的 R. Danell 等人对 BCM 模型进行了如下修改:把断裂韧性引入冲击波拉剪作用下的裂纹尺寸公式,采用 Grady 的研究成果近似地预报块度^[12]。该模型在 DYNA2D 有限元程序上实现了爆破参数优化和块度预报功能,但爆破漏斗轮廓与实际出入较大。断裂力学理论构造爆破模型存在弱点,要全面顾及岩石中存在的大量的随机分布的微型微裂纹及其对爆破作用的影响,相比之下损伤力学理论显示出更大的优越性。

1.3 损伤理论阶段

岩石材料作为一种脆性损伤材料,存在着大量的微裂隙、微裂纹等缺陷,即初始损伤。岩石动态损伤和破坏过程是由于其内部大量微损伤的成核、长大和贯穿而导致岩石宏观力学性能的劣化乃至最终失效或破坏的过程。因而,从损伤力学的角度研究爆破现象是爆破理论发展的新阶段。美国 Sandia 国家实验室从 20 世纪 80 年代初就开展了岩石爆破损伤模型的研究。研究工作包括两个部分:其一为用动载程序 PRON-TO 计算应力波传播和构造岩石运载作用下破坏的损伤模型;其二为研究爆生气体作用下的破碎块度运动问题。Grady 采用 Weibull 分布描述动载下所激活的裂纹数以及所建立的损伤与裂纹密度的关系式^[13],在岩石爆破损伤模型中得到了广泛的应用。Taylor、Chen 和 Kuszmaul(1986)^[14]引进 O'connell 与 Budiansky(1976)^[15]的有效体积模量和泊松比与裂纹密度的关系表达式和 Grady 给出的碎块尺寸表达式,建立了损伤变量与裂纹密度之间的关系式,并将损伤变量以率形式耦合到动态本构方程中,建立了 TCK 模型。该模型可以预报岩石在体积拉伸载荷下的动态响应。Kuszmaul(1987)^[16]在以上两模型的基础上提出了新的 KUS 模型,该模型考虑了高密度微裂纹的荫屏效应:即微裂纹周围产生应力释放的材料能够重叠,在裂纹的激活率中考虑了损伤引起的减少。Thorne 等(1990)^[17]在 KUS 模型的基础上考虑了激活裂纹数可能引起岩石体积的变化,并通过采用不同的损伤变量定义,提高了模型在大裂纹密度条件下的适应性。Yang 等(1996)对以上模型在裂纹密度的分布及损伤变量的定义方面进行了修正^[18],认为只有在体积应变大于某一临界体积应变后裂纹才能扩展,并考虑作用时间对裂纹密度的影响,在定义损伤变量时引入了断裂概率的概念。我国在该方面的研究主要是中国矿业大学北京校区近几年的工作,见刘殿书(1992)^[19]、杨军(1994)^[20]、金乾坤(1996)^[21]所建立的岩石爆破损伤模型及数值模拟研究等工作。

2 拆除爆破技术的发展历程与现状

2.1 拆除爆破技术的发展历程

拆除爆破产生于“二战”废墟的清理中,20 世纪 70 年代才进入城市,作为“一项带有开拓性的新技术领域”^[22,23,24]正式登上国家建设的大舞台。

拆除爆破已经成为工程爆破的重要组成部分,是一种高效、经济、安全的重要施工手段。自 20 世纪 70 年代末,特别是改革开放以来,随着经济建设的加快,我国科技人员进行了大量的工程实践,也做了一些研究课题,积累了丰富的拆除爆破经验,基本上解决了当时一般建筑物和构筑物拆除爆破问题,并能一定程度上控制飞石、空气冲击波和地震效应,使我国在工程爆破特别是在拆除爆破领域技术水平处于世界前列^[23,24,25,26]。

由于高层建筑的发展极为迅速,从而为拆除爆破提供了广阔的发展前景。19 世纪中叶以前,由于建筑和提升系统的发展滞后,国外几乎没有高层建筑。19 世纪中叶至 20 世纪中叶,由于水泥和电梯的发明,高层建筑的发展很快,在此期间建筑的高度已达到 100 层,381m (美国的帝国大厦)。20 世纪 50 年代以来,高层建筑在世界的发展更为迅速,据统计,1989 年世界上超过 212m 的建筑已达到 100 座,最高的建筑物高达 443m。当一些高层建筑达到使用期限时,用爆破方法拆除高层建筑是切实可行的。目前在拆除高层建筑时,爆破拆除已成为首选的方法。在欧美的许多国家拆除爆破的应用范围十分广泛。如联邦德国仅在 1978 年至 1988 年的十年间就用爆破方法拆除了几百座桥梁^[22],英国从 1979 年至 1993 年间已用爆破方法拆除了 30~40 座 12~25 层的高大建筑物,瑞典、法国、捷克、匈牙利、美国等国也都用爆破方法拆除了大量的各类高大建筑物^[27]。

随着拆除爆破技术的发展,同时产生了一批世界著名的爆破公司^[28]:

(1) Controlled Demolition Incorporated(美国马里兰州)。

1947 年开始进行建筑物的拆除爆破,是世界上最早进行拆除爆破的公司。该公司除在美国进行拆除爆破外,还在美国以外的地区承担过数千次建筑物的拆除爆破任务。

(2) Ogden & Sons Demolition Ltd(英国约克郡)。

(3) Italesplosivi(意大利)。

(4) Veb AutofahnbauKominat(德国柏林)。

(5) Nitro consult AB(瑞典斯德哥尔摩)。

这些公司不仅在本国范围内进行拆除爆破,而且非常注重爆破技术的输出。如美国一家公司曾在巴西拆除了一座 32 层的大楼,英国一家公司曾为南非拆除了一座高达 270m 的烟囱。这些成功的实例充分显示了用爆破方法拆除巨型建筑物的优越性。

我国的拆除爆破一直是工程爆破中的重要组成部分,起步于 20 世纪 50 年代,曾于 1958 年在某市区爆破拆除钢筋混凝土烟囱。

自 20 世纪 70 年代末,随着经济建设的发展,各地改建项目日益增多,拆除爆破的任务不