



宏大爆破技术丛书

HONGDA BAOPO JISHU CONGSHU

# 建筑物倒塌动力学

(多体—离散体动力学)

# 及其爆破拆除控制技术

魏晓林 著

中山大学出版社

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑物倒塌动力学 (多体 - 离散体动力学) 及其爆破拆除控制技术/魏晓林著. —广州:  
中山大学出版社, 2011. 4  
(宏大爆破技术丛书)  
ISBN 978 - 7 - 306 - 03806 - 7

I. 建… II. 魏… III. ①建筑物—坍塌—离散—动力学 ②建筑物—爆破拆除  
IV. TU746. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 045743 号

---

出版人: 祁 军  
策划编辑: 李 文  
责任编辑: 李 文 黄龙飞  
封面设计: 曾 斌  
责任校对: 曾育林  
责任技编: 黄少伟  
出版发行: 中山大学出版社  
电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84111997, 84113349, 84110779  
          发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160  
地 址: 广州市新港西路 135 号  
邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565  
网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: [zdcbs@mail.sysu.edu.cn](mailto:zdcbs@mail.sysu.edu.cn)  
印 刷 者: 广州中大印刷有限公司  
规 格: 787mm × 1092mm 1/16 16 印张 400 千字  
版次印次: 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷  
印 数: 1 - 2500 册 定 价: 35.00 元

---

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

## 内 容 简 介

本书将初始失稳的极限分析、变拓扑多体系统动力学、多体离散动力分析和离散体动力学分析相结合，组成多体-离散体动力学，用以数值模拟爆破拆除建筑物倒塌的全过程。大多数的建筑物爆破拆除，仅用该动力学简化后的单开链系统就可以模拟，本书推导出了各种建筑物的1~3体倒塌的动力方程，提出它们的解析解和近似解。其方程的解，动量定理和功能定理分析了爆破拆除高烟囱、剪力墙、框架和排架等结构，以及多切口楼房的倒塌控制，从而解决了倾倒姿态预计，下坐、后坐、爆堆形态及其判断，控制倒塌措施及切口措施参数等。本书可供从事爆破拆除建筑物工作的研究人员和工程技术人员使用，也可供力学、建筑、矿业等类大专院校的教师和学生参考。

## 作 者 简 介

魏晓林，1940年生，1962年大学本科毕业，教授级高级工程师，博士生导师。1992年获国务院特殊津贴专家，1996年获广东省突出贡献专家。从事工程爆破和矿山安全研究工作，在国内核心期刊和国内外学术会议上发表论文40余篇，被EI收录3篇，合著一部。

通信地址：广州市珠江新城华夏路49号津滨腾越大厦21层，广东宏大爆破股份有限公司转魏晓林。邮编：510623。传真：020-38092800（转）。办公电话：020-38092895；手机：13622899257，13316112901（转）；E-mail：wxi\_40@163.com。

# 序

广东宏大爆破股份有限公司自1985年成立以来，在国内几十位爆破专家的扶持、指导下，先后完成了数千项爆破工程，其中有环境及条件十分复杂的城镇石方爆破及拆除爆破，有150m高烟囱的折叠定向爆破，有开采强度超过3万 $\text{m}^3/\text{d}$ 的采石场爆破，有装药量达3000t级的硐室爆破。这些工程磨砺了我们，也考验了我们，帮助我们成熟，促使我们奋发。经历了近20年的坎坎坷坷，爆破工作的辛酸苦辣、荣辱成败都沉积在我们心中，使我们深感爆破工作对社会、对人民负有重大的责任。因此，我们希望把自己以往工作中的经验、教训加以总结，并参照一些兄弟单位的成功工程实例，进行一些条理化和规范化的探索，既作为我们今后工作的借鉴，也借此与同行进行交流，以促进爆破工程技术的进步。

基于上述想法，我们在专家的指导和帮助下组织编写了“宏大爆破技术丛书”。我们希望该丛书的出版与发行能为从事爆破安全管理、技术设计的同行提供一些参考，同时也是我们为推动行业发展进行的一点尝试。

由于我们的工作和认识还带有一定的局限性，一些做法或看法偏颇之处在所难免，敬请爆破界同仁给予批评、指正。

广东宏大爆破股份有限公司  
2004年2月

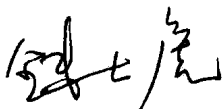
# 序 言

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，这与我国经济和建设的飞速发展密切相关。

拆除爆破机理复杂，目前拆除爆破还没有完整的力学基础，因此研究爆破拆除建筑物的动力学，并将之应用于控制拆除的工程中，是精确、高效和环保爆破的必由之路。本书提出了多体-离散体动力学来描述建筑物的倒塌运动，介绍了它的力学依据、基本原理、数值方法、程序编制，以及结构冲击撞地的破坏规律和姿态变化；提出了建筑机构多体动力学方程库及其解析解和近似解，以及相应多体系统的功能原理。应用以上原理，实现了爆破拆除各类建筑物的全局仿真，研究出控制建筑物拆除的各类各种技术，其中着重介绍了本书作者在该领域的最新科研成果。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，我相信该书对相关从业人员与科技工作者会有帮助。

本书作者从事爆破拆除研究十余年，成功从事过许多具有挑战性的爆破拆除工程。在工程爆破实践的同时，亲历科研观测，坚持从拆除效果实际中总结概括和提高，非常重视爆破拆除力学基础理论的研究。该书就是作者多年来从事理论与工程实践的部分总结。鼓励和支持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



2010年10月

# 前 言

爆破拆除建筑物的倒塌是一个力学过程，目前爆破拆除研究的主要问题，是缺少像建筑学那样，有一套如理论力学、材料力学和结构力学等的完整力学基础。要建立爆破拆除建筑物的动力学，是个长期研究积累的过程，甚至几代人才能完成。本书叙述动力学只想引起爆破界同仁的重视，起到抛砖引玉的作用。在爆破拆除钢筋混凝土建筑物的实践和现场观测基础上，提出了以多体-离散体动力学为主体组成的建筑物倒塌动力学。大多数建筑物在低位切口爆破拆除时，结构倾倒快撞地时才非完全离散，因此仅用变拓扑多体系统动力学，就可以研究其倒塌过程。多数楼层是由众多梁、柱等组成的非树平行多体系统，由于楼层都是由同跨平行的梁，同层平行的柱的多层、多跨所组成，因此，可以去掉冗余约束后并以相同自由度的等效动力体代替，以单开链体法将非树多体简化为单开链系统。建筑拆除的单开链运动，多由1~3体的拓扑所组成。因此，本书研究了建筑物倒塌1~3个体的各种动力学方程组，得到了在重力场有限域内的解析解和近似解，并均与数值解相吻合，又经建筑物倒塌的观测所证明正确。将多体-离散体动力方程的数值解、解析解以及近似解按拓扑变化组合，实现了对爆破拆除建筑物倒塌的全局模拟。应用建筑物倒塌各种动力方程的解析解、近似解和多体系统的动量定律、功能转换和守恒定律，研究了控制建筑物倒塌的技术，即控制建筑物倒塌姿态、后坐、下坐、爆堆形态及判断，以及控制建筑物倒塌的措施和措施参数。

本书依据广东宏大爆破股份有限公司的爆破拆除工程实践、观测和研究而写成，并参考了其他爆破拆除工程的有关资料。如果没有这些爆破拆除工程实践经验，本书就不可能进行建筑物倒塌动力学的研究。因此，首先要感谢广东宏大爆破股份有限公司广大工程技术人员的热情支持，特别是郑炳旭总经理的支持、关心和帮助。

本书的完成得到了中国工程院院士汪旭光的指导，中国工程院院士钱七虎为本书作序，在此深表感谢！本书的完成还得到了中国工程爆破协会副理事长、中国力学学会常务理事、水利电力科学院前院长霍永基教授，中山大学陈树坚教授，陈锦安高工，北京科技大学于亚伦教授，铁道部第四设计院关志中教授等专家的宝贵意见和建议。在此，一并表示衷心感谢！

书中采用了施富强、谢先启、张志毅、邓志勇、杨年华、曲广健、汪浩等教授所做的拆除工程及其资料，在此特向他们表示诚挚的感谢！

本书第2章以后列举的爆破工程案例，未注明施工单位和参考文献的，均由广东宏大爆破股份有限公司负责爆破。本书内容涉及多个力学分支和工程领域，由于篇幅有限，有些力学、数学及计算内容，只能简述。读者若有疑问和对描述不清内容，以及爆破拆除建筑物的其他问题，欢迎来电来信与作者深入讨论，相互学习。由于研究时间仓促，加之水平有限，书中的缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正，作者由衷地感谢！书中部分计算程序可联系作者提供。通讯地址及联系方式，见作者简介。

作者

2010年6月21日

# **Dynamics Used on Building Demolition by Blasting & Controlled Theory**

## **Abstract**

Based on this book, multibody—discretebody dynamics has been produced, which consists of initial instability extreme analysis, dynamics of vary topological multibody system, by which whirling and toppling of building mechanism can be described, multibody discrete analysis and dynamic analysis to complete discrete bodies fallen down on ground before collecting, by that overall process of building demolition by blasting can be simulated with numerical value.

Many constructions are demolished by blasting lower cutting and are crashed on ground to incomplete disintegrate, its toppling process are analyzed only by vary topological multibody dynamics. The system without tree structure with parallel bodies is made up of many pillars and beams of frame structure building, which redundant constraints are deleted and are exchanged by equipotent beam and pillar with same freedom, so that the system is simplified to single open chain system with many bodies. The movement of single open chain system with many bodies of building demolished is usually made by topologies with 1 ~ 3 bodies. In limitary region of weighted space analytics and approximate solutions of serial dynamic equations of 1 ~ 3 bodies are produced. Used for combined with numerical, analytics, approximate solutions of vary topological multibody dynamics, and theorem of momentum and work-power, large scale overall simulation of building toppling demolished by blasting is completed, and that analyzes collapse control of high chimney, shear wall, frame, and untangle demolished by blasting and building by many cutting. The forecast of tolling carriage, sitting down, sitting back, collapse form, its judgment, measurements of controlling collapse and cutting parameter have been made solution.

The researchers and engineers working on demolishing construction by blasting can be supplied by the book for application, and teaches and students of universities and colleges of mechanics, architecture and mining can also be supplier by the book fore reference.

# 目 录

1 概述 .....	(1)
1.1 拆除爆破技术的产生和发展 .....	(1)
1.2 国内外爆破拆除和建筑物倒塌力学研究现状 .....	(4)
1.3 多体系统动力学研究现状 .....	(6)
1.4 离散元法研究现状 .....	(6)
1.5 本文主要研究内容 .....	(8)
1.5.1 提出多体-离散体动力学 .....	(8)
1.5.2 拆除损伤断裂后的钢筋混凝土材料力学 .....	(9)
1.5.3 结构体撞击 .....	(10)
1.5.4 结构体倒塌的动力过程 .....	(10)
1.5.5 拆除建筑物的倒塌控制 .....	(11)
1.5.6 集合现代信息技术的拆除综合观测 .....	(12)
参考文献 .....	(12)
2 建筑倒塌的构件破损及塑性铰 .....	(14)
2.1 材料强度 .....	(14)
2.2 钢筋和混凝土的应力-应变本构关系 .....	(15)
2.3 轴心受压 .....	(16)
2.4 受弯 .....	(18)
2.4.1 极限弯矩 .....	(18)
2.4.2 塑性铰区 .....	(19)
2.4.3 塑性铰的观测 .....	(20)
2.4.4 机构残余弯矩 .....	(26)
2.5 大偏心受压 .....	(27)
2.5.1 受偏压构件极限抗力 .....	(27)
2.5.2 受偏压构件失稳 .....	(28)
2.5.3 带侧移的大偏心受压 .....	(29)
2.5.4 机构偏心受压残余弯矩 .....	(29)
2.6 梁柱横切和受拉 .....	(30)
2.7 高烟囱切口支撑部破坏失稳力学分析 .....	(30)
2.7.1 倾倒失稳的圆心角和失稳弯矩 .....	(31)
2.7.2 自重突加载荷的圆心角 .....	(33)
2.7.3 中性轴后移和机构残余弯矩 .....	(33)



2.7.4	前剪区压剪引发不对称塑性铰轴 .....	(35)
2.7.5	支撑部后剪和塑性铰消亡 .....	(35)
2.8	剪力墙受压 .....	(38)
2.9	建筑平行构件结构 .....	(42)
2.10	小结 .....	(43)
	参考文献 .....	(44)
<b>3</b>	<b>建筑构件冲击 .....</b>	<b>(45)</b>
3.1	引言 .....	(45)
3.2	冲击应力 .....	(45)
3.3	冲击破坏 .....	(47)
3.3.1	冲击破坏的位置 .....	(47)
3.3.2	破坏历程和破碎功 .....	(50)
3.3.3	冲击构件破碎高度 .....	(55)
3.4	结构体撞地姿态 .....	(57)
3.4.1	后柱撞地 .....	(58)
3.4.2	前柱撞地 .....	(59)
3.5	结构撞地破坏形态 .....	(59)
3.5.1	层间折叠柱和层内柱端压溃柱 .....	(60)
3.5.2	同层柱端铰侧移 .....	(60)
3.5.3	同跨梁端铰下移 .....	(61)
3.6	小结 .....	(62)
	参考文献 .....	(63)
<b>4</b>	<b>多体-离散体动力学 .....</b>	<b>(64)</b>
4.1	引言 .....	(64)
4.2	多体系统动力学 .....	(64)
4.2.1	多体系统动力学的基本概念 .....	(64)
4.2.2	建筑机构的多体系统 .....	(67)
4.3	多体离散动力分析 .....	(86)
4.4	完全离散体 .....	(89)
4.5	多体-离散体动力学 .....	(90)
4.6	观测验证 .....	(91)
4.6.1	数值模拟参数 .....	(91)
4.6.2	综合观测技术 .....	(93)
4.6.3	观测结果 .....	(94)
	参考文献 .....	(97)

<b>5 多体 - 离散体动力学的数值模拟</b> .....	(99)
5.1 引言 .....	(99)
5.2 多体系统动力学数值模拟 .....	(99)
5.2.1 微分方程的数值计算方法 .....	(99)
5.2.2 拓扑切换点的计算 .....	(102)
5.2.3 数值模拟计算软件的组织 .....	(102)
5.3 多体离散数值模拟 .....	(103)
5.4 小结 .....	(104)
参考文献 .....	(105)
<b>6 爆破拆除建筑物的变拓扑多体系统动力学</b> .....	(106)
6.1 引言 .....	(106)
6.2 单开链机构和冗余约束 .....	(106)
6.2.1 单开链的机构动力方程 .....	(106)
6.2.2 平行梁柱机构 .....	(111)
6.3 建筑机构的动力学方程及其近似解和解析解 .....	(112)
6.3.1 单跨框架梁倾倒 .....	(112)
6.3.2 多跨梁的逐跨断裂倾倒 .....	(114)
6.3.3 框架底层柱倾倒 .....	(116)
6.3.4 高耸建筑物的单向倾倒 .....	(118)
6.3.5 楼房定质量塌落及倾倒 .....	(121)
6.3.6 建筑物塌落质量散失及倾倒 .....	(125)
6.3.7 高层建筑、仓体和框架撞地的翻倒 .....	(128)
6.3.8 建筑物单开链 2 自由度倾倒 .....	(130)
6.3.9 框架及排架的双体倾倒近似解 .....	(135)
6.3.10 后柱爆后框架的下落 .....	(143)
6.3.11 多自由度单开链有根体倒塌 .....	(145)
6.4 钢筋混凝土结构爆破拆除的变拓扑运动 .....	(146)
6.4.1 现浇框架拆除倒塌的拓扑 .....	(146)
6.4.2 现浇框架变拓扑倒塌运动全局数值模拟 .....	(152)
6.4.3 钢筋混凝土烟囱爆破拆除全局手算仿真 .....	(155)
6.5 建筑机构多体的功能原理 .....	(157)
6.6 小结 .....	(157)
参考文献 .....	(158)
<b>7 多体动力学控制建筑物拆除技术</b> .....	(160)
7.1 引言 .....	(160)
7.2 钢筋混凝土烟囱 .....	(160)

7.2.1	高烟囱的特点	(160)
7.2.2	切口参数	(161)
7.3	砖烟囱	(164)
7.3.1	切口圆心角	(165)
7.3.2	支座剪切砖烟囱后滑	(168)
7.3.3	砖烟囱切口高度	(169)
7.4	剪力墙	(170)
7.4.1	着地姿态、爆堆和后滑	(170)
7.4.2	剪力墙下坐及起爆次序	(183)
7.4.3	剪力墙切口角和翻倒	(186)
7.5	框架和排架	(189)
7.5.1	后坐和爆堆后沿宽	(189)
7.5.2	控制后坐措施	(198)
7.5.3	框架爆堆及判断	(206)
7.5.4	楼房下坐	(212)
7.5.5	控制下坐的措施	(219)
7.5.6	切口角和撞地效果	(222)
7.6	爆破拆除建筑物的多体动力学切口控拆技术	(226)
7.6.1	高烟囱单切口倾倒爆破拆除技术	(226)
7.6.2	高烟囱定倒向、定落点折叠爆破拆除技术	(226)
7.6.3	高耸楼房同向折叠倾倒爆破拆除技术	(226)
7.6.4	楼房折叠双向倾倒爆破拆除技术	(226)
7.6.5	高耸楼房下坐倾倒爆破拆除技术	(227)
7.6.6	多层楼房地地整体坍塌爆破拆除技术	(227)
7.6.7	建(构)筑物单切口单向倾倒爆破拆除技术	(227)
7.6.8	爆破拆除建(构)筑物控制后坐综合技术	(227)
7.6.9	爆破拆除建(构)筑物控制下坐综合技术	(227)
7.6.10	高大薄壳筒体弧铰折合倾倒技术	(227)
	参考文献	(228)
8	建(构)筑物拆除的综合观测	(230)
8.1	建(构)筑物倒塌动态摄像测量	(230)
8.1.1	三维摄像测量	(230)
8.1.2	二维摄像测量	(231)
8.1.3	一维摄像测量	(232)
8.2	大断面支撑部(构件)破坏外观群组摄像观测	(233)
8.2.1	工程概况	(233)
8.2.2	摄影观测方案	(234)

---

8.3 支柱应力应变电测 .....	(236)
8.3.1 工程概况 .....	(236)
8.3.2 应变测试方案 .....	(238)
8.3.3 应变测试系统 .....	(238)
8.3.4 观测结果及分析 .....	(239)
8.4 小结 .....	(240)
参考文献 .....	(240)

# 1 概述

## 1.1 拆除爆破技术的产生和发展

一般认为，拆除爆破是在清除第二次世界大战遗留建筑物的背景下兴起的。

当建筑达到一定的规模后，传统的拆除方法在拆除这些建筑时会显得既不经济又不安全。目前，在拆除高层建筑时，爆破拆除法已经成为首选。拆除爆破一直是我国工程爆破的重要组成部分，但我国的爆破拆除技术起步较晚，20世纪80年代后，城市爆破拆除技术才有了长足发展。广东宏大爆破股份有限公司，在郑炳旭总经理的领导和主持下，于1995年12月和1996年1月，在广东茂名石化厂分别将两座120m的钢筋混凝土烟囱成功爆破拆除；2001年5月，将总面积达4.3万 $\text{m}^2$ 的旧广州体育馆成功爆破拆除，并首次应用爆破拆除降尘技术（见图1.1）；2003年12月，爆破拆除了宁波镇海发电厂的150m高的烟囱，顺利实现了在场地狭窄的情况下采用折叠爆破技术成功拆除高耸建筑物（见图1.2）；2007年1月，将位于广州繁华闹市区的广州天河城西塔楼成功爆破拆除，这次爆破是我国爆破拆除史上一个里程碑式的事例，是一次真正意义上的清洁环保爆破拆除（见图1.3）；2007年2月，将总面积逾10万 $\text{m}^2$ 的沈阳五里河体育场成功爆破拆除（见图1.4）。其中尤以2005年4月，广东宏大爆破股份有限公司将广州纸厂100m高的烟囱3折叠爆破拆除，开创了我国多折叠拆除高耸建筑物的成功典范。



图 1.1 旧广州体育馆爆破拆除瞬间

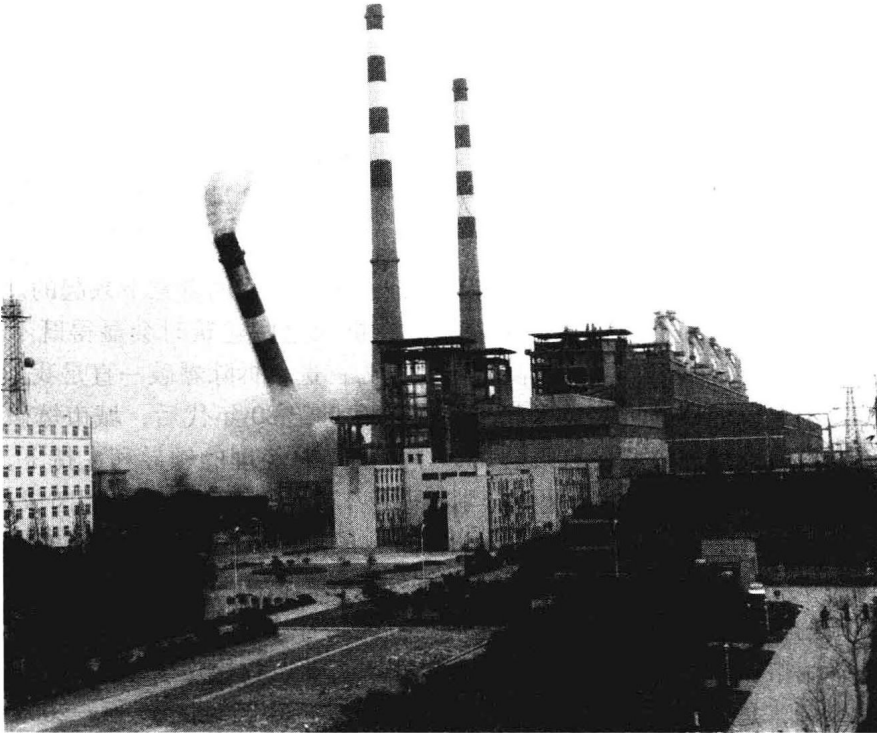


图 1.2 宁波镇海发电厂 150m 烟囱双折叠爆破拆除瞬间



图 1.3 广州天河城西塔楼环保清洁爆破拆除瞬间



图 1.4 沈阳五里河体育场爆破拆除瞬间

据不完全统计, 1995 年至 2004 年我国爆破拆除 15 层以上高楼 10 幢, 拆除 120m 高以上的烟囱 13 座 (见表 1.1、表 1.2)。

表 1.1 国内 15 层以上楼房的爆破拆除情况

工程名称	拆除年份	结构形式	楼房层数/高度	爆破切口
武汉危楼	1995	剪-筒	18 层/56m	单切口爆破
上海长征医院	1999	框-剪	16 层/67m	四切口爆破
北京东直门 16 号楼	2002	剪力墙	22 层	单切口爆破
南宁公安大楼	2003	框-剪	15 层/54.6m	单切口爆破
哈尔滨车辆厂大楼	2003	框	17 层/55m	单切口爆破
重庆轮船公司 1 号宿舍楼	2003	剪-筒	18 层/57.6m	单切口爆破
重庆轮船公司 2 号宿舍楼	2003	剪-筒	16 层/49.6m	单切口爆破
郑州田园大酒店	2004	框	16 层/52m	双切口折叠爆破
温州中银大厦	2004	框-剪	23 层/93m	三切口爆破
哈尔滨大楼	2004	框-剪	26 层/89.4m	双切口爆破

表 1.2 国内 120m 高以上烟囱爆破拆除情况

工程名称	拆除年份	烟囱高度 (m)	爆破拆除方法
山东十里泉电厂	1987	180	分段爆破切割拆除
茂名石化三、四部炉烟囱	1995	120	单切口爆破
茂名石化沸腾炉烟囱	1996	120	单切口爆破
鞍钢二发电厂烟囱	1998	120	单切口爆破
云南宣威烟囱	2001	120	单切口爆破
天津大港烟囱	2002	120	单切口爆破
广西合山电厂烟囱	2002	120	单切口爆破
山东新汶电厂烟囱	2003	120	单切口爆破
镇海电厂烟囱	2003	150	双切口双向折叠爆破
峨眉铝业烟囱	2003	120	单切口爆破
吉林电石烟囱	2004	120	单切口爆破
鞍钢第二发电厂烟囱	2004	120	单切口爆破
常州戚墅堰发电厂烟囱	2004	120	单切口爆破

由此可见，我国在爆破拆除高耸建筑物的实践方面，已经取得了巨大的成绩和飞速的发展，爆破拆除成为人工和机械拆除方法不可替代的技术手段。而且，无论是国内还是国外，高层和超高层建筑都在迅速增加，21 世纪拆除爆破建（构）筑物将趋向高层化。

但是，我国拆除爆破理论研究相对滞后于工程实践的需求。2001 年以来，我国在取得拆除爆破多例成功的同时，也出现了一些安全事故。从这些事故可见，当前以结构力学和单体动力学为基础的爆破设计理论，已经不能满足日益复杂和高耸、大型结构的拆除爆破设计要求，急需创建拆除爆破新的力学理论和相应的仿真技术，以满足我国建筑业在城市改建、扩建中飞速发展的需要。而且，中国是世界水泥和线材生产最大国，绝大多数多层及高层建筑是钢筋混凝土结构，因此，我们有责任研究具有中国特色的建筑爆破拆除力学和技术，从而促进我国国民经济和社会的发展，并且也将促进中国力学学科自身的发展。

## 1.2 国内外爆破拆除和建筑物倒塌力学研究现状

为解决日趋复杂的拆除爆破工程实际问题，国内外学者通过大量的拆除爆破模型试验、现场观测研究和理论分析，取得了许多研究成果。从 20 世纪 70 年代末开始，国内外学者运用爆炸力学、断裂力学、岩土力学、材料力学、结构力学、运动学及动力学理论，结合高速摄影、振动测试等多种观测手段，分析研究拆除爆破建筑物的破碎、倒塌、解体的力学过程，并结合工程实践经验，总结出了一批经验公式和半经验公式，这些公式和工程实例对后



来的工程发挥了极大的指导和借鉴作用,成为爆破设计、规程制定的基本依据。并且,在此基础上涌现出大量拆除爆破的新理论、新技术,表现在以下三方面:

(1) 初始失稳。用压杆稳定原理研究钢筋混凝土承载立柱的失稳条件和破坏高度的计算又有新的发展。传统的压杆原理是将立柱爆破后裸露钢筋部分看做单根主筋的压杆,利用失稳临界应力的方法计算立柱的最小爆破高度。1992年,卢文波提出小型钢架失稳模型<sup>[1]</sup>,他将承重立柱爆破后裸露钢筋骨架部分视作一个小型钢结构,提出了基于结构力学的钢架失稳计算方法,以此确定立柱的最小爆破高度。2000年,张奇提出框架楼房的变刚度有限元法<sup>[2]</sup>,将立柱爆破后裸露钢筋和整个楼房框架看做整体,以认识结构爆破前后的内力分布,计算结构的塑性铰分布,并判断结构失稳。

(2) 建筑物的倒塌过程的数值模拟。国内外虽有众多学者利用有限元方法<sup>[3]</sup>和离散元法(DEM)<sup>[4][5][6]</sup>研究倒塌过程的数值模拟,以确定爆破切口位移、爆破顺序和分段时间差对爆破倒塌的影响。具有代表意义的是用DDA法<sup>[7]</sup>(不连续变形分析法)进行倒塌过程的数值模拟。DDA法是我国留美学者石根华博士提出的,是与有限元连续变形分析法相平行的非连续变形方法。与有限元的不同点是可以计算不连续面开裂和旋转等大位移的静力和动力问题。此外,国内外许多学者将Cundall的离散元块体模型改进,引入到结构工程领域,提出了各种离散单元的结构离散模型,并以构件截面特性来反映钢筋混凝土的非线性力学性质。2008年,我国学者用网格实体的离散元模型<sup>[8]</sup>模拟了框架爆破拆除的倒塌。另具有代表意义的是采用LS-DYNA通用软件进行倒塌过程的数值模拟。LS-DYNA中包含功能齐全的几何非线性、材料非线性和接触非线性的动态显式有限元程序,能够处理大位移、大转动、大变形且具有未知接触边界条件等强非线性问题。LS-DYNA中也包含多刚体动力学程序,因此,当结构破坏成铰后,也能进行旋转等大位移的动力问题模拟。DDA法、网络实体的离散元法和LS-DYNA通用软件模拟爆破拆除的倒塌,都取得了不同程度近似实际的模拟倒塌效果。

日本的小林茂雄等人是第一个采用DDA法研究建筑物拆除倒塌的学者<sup>[9]</sup>,在充分研究了钢结构爆破解体后,他认为钢结构倒塌是弹塑性领域的动态大变形现象,因此要注意以下四方面的研究:①对主要构件弹性阶段的静力分析,核查塑性铰预定发生部位的应力。②对主要构件进行弹塑性阶段的静力分析,求出结构的极限载荷,研究倒塌的确定性。③研究钢结构发生大变形时力-位移关系。④模拟倒塌过程的各个阶段。

(3) 观测技术。瑞典的Conny Sjöberg利用高速摄影机对高层建筑物拆除爆破的倒塌过程进行了观测<sup>[10]</sup>。楼房高10层,在楼房不同位置上安置了若干标志点。高速摄影机以每秒64幅的速度记录了倒塌的全过程,共拍摄500幅,用数字化仪将摄得标志点的位置信息输入计算机,通过计算机分析绘制成时间-位移图、时间-速度图。可以计算出结构的势能、动能、总能量、建筑物爆破高度上部作用力和塌落荷载。

综上所述,虽然近年来涌现了爆破拆除的新理论和新技术,但是从中也可看出,现有建筑物倒塌的力学,大多还涉及初始失稳,较少研究倒塌姿态和爆堆形状,无法满足建筑拆除环境日益复杂和苛刻的要求;现有倒塌过程数值模拟,如不连续变形分析法的通用软件较多适合砖石结构,国外动力有限元通用软件,也难以适应钢筋混凝土结构离散的特点和中国的建筑规范;由于对钢筋混凝土构件的后破损效应和冲击破坏的机理认识欠深,也使数值模拟