

山东科技大学学术著作出版基金资助出版

陈士海 魏海霞 杜荣强 张安康 著

JIANZHU JIEGOU

建筑结构

爆破地震效应分析

BAOPO DIZHEN XIAOYING FENXI

煤炭工业出版社

山东科技大学学术著作出版基金资助出版

建筑结构爆破地震效应分析

陈士海 魏海霞 杜荣强 张安康 著



煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构爆破地震效应分析 / 陈士海等著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2011

ISBN 978-7-5020-3911-0

I. ①建… II. ①陈… III. ①建筑结果-爆破效应: 地震效应-研究 IV. ①TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 163521 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 15³/₄

字数 364 千字 印数 1—1 000

2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

社内编号 6721 定价 40.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

内 容 提 要

本书较系统深入地研究了爆破地震波传播特性及其对建筑结构的爆破地震效应问题,重点阐述了建筑结构爆破地震效应理论研究的新方法、新认识和新进展。首先完整刻画了爆破振动震源机制;成功地进行了爆破振动影响区域的区划,对爆破振动信号的幅值、主频进行了精细分析;采用数值模拟计算方法,讨论了多维地震动作用下的结构响应;基于小波包分解和重构技术,建立了考虑爆破振动荷载特性与结构特性等诸多影响因素的爆破地震效应安全判据;研究了爆破地震波三要素对多自由度弹性体系、多层弹塑性砌体结构的动力响应影响,并进行了多层钢筋混凝土结构、普通砌体结构房屋的爆破地震响应现场测试分析,讨论了结构在多点地震动非一致激励作用下的时程反应;采用动力有限元模拟计算了典型砌体结构房屋的爆破振动安全标准值,并给出了2~4层典型砌体结构房屋在各主频段爆破地震波作用下的爆破振动安全标准。其次针对结构的率相关特性和损伤敏感性,以能量等效原理为基础建立了率性损伤本构模型,进行了结构动力损伤响应分析。最后讨论了爆破振动预测与控制技术。

本书可供从事防灾减灾工程与防护工程、岩土工程、爆破工程、抗震工程、采矿工程研究与设计施工的专业人员和工程技术人员参考,也可作为相关专业的研究生教材。

前 言

随着我国经济建设的飞速发展，现代爆破技术已广泛应用于矿业、地下工程、交通工程、水利水电工程、城市建设、军事等领域。与此同时，爆破作业对周围环境和建筑设施的负面影响尤其是爆破振动危害已成为人们关注的重点。由于爆破地震波本身的复杂性、被保护对象的多变性，爆破振动致灾机理及灾害控制研究，一直是爆破安全理论研究的重要内容。

在国家自然科学基金“爆破振动特性与爆破振动对结构危害机制研究（项目编号：50778107）”、国家自然科学基金“爆破地震动作用下建筑结构损伤与破坏研究（项目编号：50878123）”、教育部高等学校博士学科点专项科研基金“爆破振动特性与结构爆破振动安全控制理论研究（编号：20060424002）”、山东省防灾减灾工程与防护工程“泰山学者”建设工程专项经费、“土木工程防灾减灾”山东省重点实验室资助和导师钱七虎院士的指导下，在查阅大量国内外相关文献和进行大量爆破振动现场监测的基础上，利用 Matlab 编程语言开发平台及 LS-DYNA3D 二次开发程序，开展了爆破地震波传播特性及其对建筑结构破坏效应方面的研究工作。主要包括：爆破地震波传播的震源机制；爆破振动信号的小波变换分析，爆破振动特征参数对建筑结构弹塑性动态响应影响的分析，建筑结构的爆破振动累积损伤破坏效应，结构振动破坏多参数安全判据标准研究，典型结构的爆破振动动态效应数值模拟，爆破振动预测与控制技术等。作者对爆破地震效应的创新性研究，为爆破振动危害控制与预测研究提供了较系统深入的理论基础。

山东科技大学土木建筑学院对本书的出版给予了大力支持。山东科技大学王海亮教授、华侨大学林从谋教授在结构爆破振动测试中提供了试验场地和大量第一手资料，山东科技大学逢焕东副教授、毕卫国教授、高文乐教授研究生燕永峰等在理论研究和现场监测中做了许多工作。本书的写作过程中，参考了国内外同行公开发表的众多研究成果，在此一并表示感谢！由于作者水平有限，有些观点和结论尚不成熟，恳请读者批评指正。

作 者

2010 年 7 月

序

爆破工程在我国大规模基础设施建设中应用越来越广，但爆破振动引起的负面效应甚至事故也日益增多，如何正确确定爆破地震动作用下结构破坏安全标准是防止爆破振动灾害的关键问题。由于炸药爆炸的瞬时性、传播介质的复杂性、波动理论研究的局限性，致使爆破地震波在介质中的传播规律研究、爆破地震波对结构作用的研究以及爆破地震波作用下结构稳定性、结构破坏标准的研究等都具有很大的不确定性和难度。为此作者开展建筑结构在爆破地震波作用下破坏效应的研究，对于爆破安全技术的提高与完善将起到有益的推动作用，对爆破灾害控制的理论研究和工程应用具有一定的指导意义。

作者在爆破地震效应方面研究历时近十年，主持或参与了多项国家自然科学基金、教育部高等学校博士学科点专项科研基金以及众多的企业委托项目，在爆破地震的震源机制、爆破地震波的传播特性、爆破振动参数对建筑结构动态响应影响、建筑结构爆破振动动态损伤累积效应、考虑结构动力特性与爆破地震波频谱特性的多参数安全判据、结构爆破振动响应现场实测、爆破振动预测与控制及振动舒适性等多个方面对建筑结构爆破地震效应进行了大量的分析、计算，得出了许多有益的创新性成果。主要创新成果如下：研究了多维爆破振动作用下结构动态响应与爆破地震波的频率效应，提出了多因素爆破振动安全判据及结构安全性的评价技术；建立了爆破振动震源理论，确定了爆破地震波传播的初始参数；进行了爆破振动区域划分，确定了爆破地震波传播特性的控制技术；建立了建筑结构材料能量基率相关损伤本构模型，研究了爆破振动下结构损伤破坏的累积效应。把这些创新成果汇集成书，为目前结构爆破地震效应研究提供了宝贵的参考资料。

中国工程院院士、国际岩石力学学会副主席
中国岩石力学与工程学会理事长
中国土木工程学会防护工程分会理事长

刘一虎

2010年8月14日

目次

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书主要研究内容	17
参考文献	19
2 爆破地震波传播的震源机制	21
2.1 岩体中爆破破坏特征与应力时程研究	21
2.2 爆破振动震源物理特征	27
2.3 本章小结	29
参考文献	29
3 爆破振动分区及其地震波传播特性研究	30
3.1 爆破振动区域划分	30
3.2 爆破地震波传播衰减规律研究	33
3.3 爆破地震波信号的频谱分析	43
3.4 本章小结	55
参考文献	56
4 垂向爆破地震波荷载对多自由度弹性体系动力响应分析	57
4.1 垂向爆破地震波作用下多自由度弹性体系动力响应数值计算原理	57
4.2 爆破地震波荷载三要素对多自由度弹性体系地震响应的影响研究	60
4.3 本章小结	70
参考文献	70
5 多维爆破地震动作用下框架结构动态响应有限元时程分析	71
5.1 多维爆破地震作用下结构的响应	71
5.2 结构多维地震动速度作用下响应的时程分析	72
5.3 本章小结	76
参考文献	77

6 爆破地震波对多层砌体结构弹塑性地震响应分析	78
6.1 Newmark 时程分析法	78
6.2 刚度退化二线型模型的程序化	79
6.3 人工模拟爆破地震波	83
6.4 爆破地震波三要素对多层砌体结构弹塑性地震响应分析	86
6.5 爆破地震波和天然地震波作用下多层砌体结构弹塑性地震响应比较	95
6.6 本章小结	100
参考文献	101
7 多层钢筋混凝土结构的爆破地震响应现场测试研究	103
7.1 工程概况及测点布置	103
7.2 多层钢筋混凝土结构沿高度方向爆破振动响应分析	104
7.3 多层钢筋混凝土结构沿水平方向爆破振动响应分析	114
7.4 本章小结	116
参考文献	116
8 普通砌体结构房屋爆破振动响应测试分析	117
8.1 工程概况	117
8.2 爆破振动监测	118
8.3 爆破振动测试结果分析	118
8.4 本章小结	122
参考文献	122
9 基于小波包技术的爆破地震效应计算模型及安全判据研究	124
9.1 单自由度结构的爆破地震效应模型及安全判据研究	124
9.2 多自由度结构的爆破地震效应模型及安全判据研究	129
9.3 爆破地震效应计算模型算例	131
9.4 本章小结	133
参考文献	133
10 基于动力有限元方法的典型砌体结构爆破振动安全标准的探讨	134
10.1 动力有限元算法基础	134
10.2 砌体结构本构模型选取	136
10.3 砌体结构爆破振动响应的现场监测及有限元模拟	137
10.4 典型砌体结构的爆破振动安全标准研究	141
10.5 本章小结	146
参考文献	146

11 爆破振动非一致激励作用下建筑结构响应研究	147
11.1 非一致激励加载的实现方法.....	147
11.2 结构响应实例分析.....	148
11.3 本章小结.....	159
参考文献.....	159
12 建筑结构材料能量基率相关损伤本构模型研究	160
12.1 损伤力学基本概念.....	160
12.2 混凝土损伤本构模型.....	166
12.3 混凝土能量基率相关损伤模型.....	176
12.4 本章小结.....	182
参考文献.....	183
13 爆破振动下结构损伤破坏的累积效应	185
13.1 LS-DYNA 用户自定义材料模型开发.....	185
13.2 建筑结构材料的动态损伤本构模型应用与验证.....	191
13.3 爆破振动作用下结构损伤破坏的累积效应分析.....	201
13.4 本章小结.....	211
参考文献.....	212
14 爆破振动预测与控制及舒适性评估	214
14.1 爆破振动预测.....	214
14.2 爆破振动舒适性评估.....	220
14.3 爆破振动控制.....	223
14.4 本章小结.....	228
参考文献.....	228
附录 1 应用于非一致激励的插值和加载程序	230
附录 2 LS-DYNA 用户自定义材料模型开发程序	233
附录 3 正交各向异性动态弹塑性损伤本构应用计算	235

1 绪 论

1.1 研究背景

随着我国经济建设的迅速发展和基建投入的增加,工程爆破作为岩土工程施工中最经济有效的手段,近年来广泛应用于矿山开采、隧道开挖、建筑物拆除与基础开挖、地下空间综合开发应用、水利水电设施建设、移山填海工程、核电站建设与核废料处理等众多工程领域。工程爆破的应用极大地降低了人们的劳动强度,大幅度地加快了工程施工进度,对国家经济建设的快速发展起着举足轻重的作用。然而,在工程爆破广泛应用的同时,随着爆破环境的复杂化和人们环保意识的日益增强,工程爆破所诱发的一系列负面效应,尤其是作为爆破公害之首的爆破地震效应问题,受到普遍的关注和重视。所谓爆破地震效应,是指爆破地震波在传播过程中引起地面振动,当这种振动达到一定的强度时,会导致爆区周围建筑物损伤甚至倒塌,民用及工业构筑物出现裂缝,露天边坡滑动以及地下巷道围岩冒落等各种破坏现象,并由此引发不少民事纠纷,致使工期延误,造成额外的经济损失。

所以研究爆破地震效应的危害机理及控制措施,尤其是爆破地震波作用下周围建筑物的地震响应机理及安全判据,是爆破地震效应研究领域中的重点和难点课题,同时也是爆破安全技术研究的重要内容。长期以来,国内外许多专家学者和工程技术人员通过加强对各种爆破条件下的爆破地震波的传播特性分析和建筑物破坏现象、破坏特征的宏观调查、结构动力响应参数和结构动力特性参数的测试工作,分别从爆破地震波的特性和传播规律、爆破振动信号特征分析、振动危害机制、安全判据、振动灾害预测与控制技术等方面进行了广泛深入的研究与探索,并取得了大量的研究成果,对于指导工程实践、实现安全爆破施工起到了重要作用。

然而,由于爆破地震波本身的瞬时性、突变性以及爆破介质和赋予条件的复杂性和多变性,爆破地震波对建筑结构的影响是一个非常复杂的现象,涉及地球物理学、爆炸动力学、结构动力学、非线性理论等多个学科领域,迄今为止许多问题还没有得到有效解决。因而在一些工程上出现研究结果与实际情况有较大出入的现象,即现有许多研究成果在理论和工程应用方面都存在一定程度的局限和不足,这给爆破安全技术的提高以及评价各类被保护建筑结构的安全性带来一定困难。

在我国的爆破工程中,人们对建筑结构在爆破地震作用下的安全评估多是依据我国《爆破安全规程》(GB 6722—2003)中的爆破振动安全允许标准来进行。爆破振动安全允许标准虽然对建筑物保护对象类别和爆破地震波频段进行了划分,但对结构的类型及动力特性却没有作出要求,没有考虑同类建筑中结构个体的振动特性差异,对爆破地震波的振动特性参数考虑过于粗糙,致使《爆破安全规程》与实践有一定的差别,即实测爆破振动速度符合《爆破安全规程》中的爆破振动安全标准,但建筑物还是因振动受损而出现

裂缝, 导致民事纠纷不断, 影响正常爆破施工作业。同时工程事例中也出现过爆破振动速度超过安全允许值的情况下却未对爆破施工环境中被保护建筑物构成威胁的现象。因此, 对爆破地震波传播特性与爆破地震波作用下建筑结构的动力响应进行研究, 改进爆破振动安全判据, 科学地预测与控制爆区周围建筑物的爆破地震效应危害, 已成为爆破工程中亟待解决的课题。它不仅关系到能否在理论层面上获得新的突破, 为下一步的深入研究提供更高的平台, 更加科学合理地在实践中指导爆破施工, 而且直接关系到爆破工程能否安全顺利地进行, 以及能否获得预期的经济效益。

基于上述情况, 本书结合国家自然科学基金“爆破振动特性与爆破振动对结构危害机制研究”(编号: 50778107)、“爆破地震波作用下建筑结构损伤与破坏研究(项目编号: 50878123)”和教育部高等学校博士学科点专项科研基金“爆破振动特性与结构爆破振动安全控制理论研究”(编号: 20060424002), 在理论研究、数值计算及数值模拟、现场试验研究的基础上, 对爆破地震波在不同传播距离上的幅值和频谱特性、爆破地震波各振动参数对建筑结构动力响应的影响、爆破振动安全判据模型、建筑结构的爆破振动累积损伤破坏效应以及典型结构的爆破振动安全标准等方面作进一步的探讨。

1.2 国内外研究现状

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, 科学工作者在爆破地震动的传播规律、结构的地震响应与爆破安全判据标准等方面进行了较深入的研究, 取得了许多重要成果。

1.2.1 爆破地震波传播规律研究

1.2.1.1 地震波在无限介质体中的传播

1) Sharpe - Duvall 理论

在早期的研究中, 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 $p(t)$ 的问题。Duvall 利用 Sharpe 的理论解决冲击波压力为如下函数的问题:

$$p(t) = p_b f(t) \quad (1-1)$$

这里 p_b 指压力峰值, $f(t)$ 通常设定为一个关于时间的确定函数, 比如指数形式的时间延迟函数可表示为

$$f(t) = P_0 (e^{-m\omega t/\sqrt{2}} - e^{-n\omega t/\sqrt{2}}) \quad (1-2)$$

这里 m 、 n 为无量纲的常数, 其值决定冲击波的上升时间和形状。 ω 是一个关于介质中纵波传播速度 c_p 和炮孔半径 a 的函数, 可表示为 $\omega = 2\sqrt{2c_p}/(3a)$ 。 P_0 是一个无量纲的常数, 其取值使 t 等于冲击波的上升时间 t_R 时函数 $f(t)$ 达到最大值 1。爆破冲击波上升时间可表示为

$$t_R = \frac{\sqrt{2} \ln(n/m)}{(n-m)\omega}$$

取不同的 m 、 n 值, 就可以研究不同形状的冲击波。

考虑炸药爆轰压力作用时间为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ s, 爆生气体作用时间为 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ s, 孔壁上压力时程为 (Starfield 1968)

$$p(t) = 4p_{\max} [\exp(-\omega t/\sqrt{2}) - \exp(-\sqrt{2}\omega t)] \quad (1-3)$$

$$\omega = 2\sqrt{2}c_p/(3a)$$

式中 ω ——波形函数;
 c_p ——纵波波速;
 a ——炮孔半径;
 $p_{\max}$ ——孔壁压力峰值。

他们的主要贡献是给出了孔壁上的压力时程函数,从而能进一步解决围岩中的应力场和速度场。

2) R. F. Favrean 弹性波理论模型

作为岩石爆破弹性理论模型,加拿大的 R. F. Favrean 弹性波理论模型,是 20 世纪 80 年代初期最具影响的爆破模型^[2]。R. F. Favrean 模型以应力波理论为基础,假设岩石为各向同性弹性体,炸药的爆轰使爆炸压力突然加载到药室壁上,而随后因药室膨胀引起的压力下降可用一个简单的多元回归状态方程来描述,于 1969 年得出了球形药包周围应力波解析解,给出了质点速度作为距离和延迟时间的函数。即质点速度 u 为

$$u(r, t) = e^{\frac{-\eta^2}{\rho c_p b}} \left[\left(\frac{\rho c_p b^2}{\eta \xi r^2} - \frac{\eta \xi b}{\rho c_p r} \right) \sin \frac{\xi \eta t}{\rho c_p b} + \frac{pb}{\rho c_p r} \cos \frac{\xi \eta t}{\rho c_p b} \right] \quad (1-4)$$

$$\eta^2 = \frac{2(1-2\mu)\rho c_p^2 + 3(1-\mu)\gamma_0 c^{-\gamma_0} p}{2(1-\mu)}$$

$$\xi^2 = \frac{2\rho c_p^2 + 3(1-\mu)\gamma_0 c^{-\gamma_0} p}{2(1-\mu)}$$

式中 b ——炮孔半径;
 t ——时间;
 ρ ——岩石密度;
 p ——爆炸压力;
 μ ——泊松比;
 c_p ——纵波波速;
 γ_0 ——爆生气体等熵指数(多方指数);
 c ——不耦合系数。

对于柱状药包可将其等效为许多个球形药包的叠加结果。

3) 按指数规律衰减的球面波解法^[3]

当球形药包爆炸时,产生的爆炸压力脉冲非常迅速,实质上是在其药包的表面突然升高到压力 p_0 ,然后按指数规律衰减,脉冲的表达式如下:

$$\begin{cases} p = 0 & t < 0 \\ p = p_0 e^{-\alpha t} & t > 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中 α ——时间衰减常数,时间是从压力突然升高后开始测量的时间。

这种类型的爆炸,其产生位移的势函数为

$$\phi = \frac{p_0 a}{B^2 \rho r} \left[-e^{-\alpha \tau} + \left(\frac{B}{\omega_0} \right) e^{-\alpha_0 \tau} \cos(\omega_0 \tau - \beta) \right]$$

式中的各种常数 α_0 、 ω_0 、 B^2 和 β ,它们与介质的性质、球形药包的半径 a 及压力脉冲的

形状有关，即

$$\alpha_0 = \frac{c_1}{a} \frac{1-2\mu}{1-\mu} \quad \overline{B^2} = \omega_0^2 + (\alpha_0 - \alpha)^2 \quad \omega_0 = \frac{c_1}{a} \frac{(1-2\mu)^{\frac{1}{2}}}{1-\mu}$$

$$\beta = \tan^{-1} [(\alpha_0 - \alpha)/\omega_0]$$

其中， c_1 为波速， μ 为泊松比。

由位移 $u_r = \frac{\partial \phi}{\partial r}$ ，速度 $v_r = \frac{\partial u_r}{\partial t}$ ，得

$$v_r = \frac{p_0 a}{\rho r c_1} \quad \sigma_r = \frac{a}{r} p_0 \quad \sigma_\theta = \frac{\lambda a}{(\lambda + 2G)r} p_0 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明：球面波的波前应力状态，随着离开球形药包中心距离的增加，按 $\frac{1}{r}$ 比例减少，这与应力按 $\frac{1}{r^3}$ 的比例减少的静力平衡有着十分显著的区别，且有 $\sigma_r = \rho c_1 v_r$ 。

对柱面波有

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{a}{r}} p_0 \quad \sigma_\theta = \frac{\lambda}{\lambda + 2G} \sqrt{\frac{a}{r}} p_0 \quad \sigma_z = 0$$

4) 斯托克斯 (G. G. Stokes) 波动方程

经典弹性波的传播理论是在精确遵守虎克定律的理想介质中建立的，其中并未考虑扰动在传播过程中因为介质的内摩擦而造成的能量耗散。对许多物质来说，当变形大到足以观测到的时候，并不遵守虎克定律。大理岩、泥岩、砂岩及页岩组成的大多数近地表的地层，严格按照经典的弹性波理论，不能真实地描述弹性波在地下岩层介质中的传播过程。为此，应考虑由内摩擦与散射造成的能量损耗对波传播的影响。

斯托克斯考虑到波在传播过程中的能量耗散，将经典弹性波动方程中出现的 G 均用 $G + \eta \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)$ 代替，其中 η 为黏滞性系数， $\frac{\partial}{\partial t}$ 为时间微分算符，建立了黏滞性型内摩擦能量损耗的波动方程。从而有

$$\begin{aligned} \nabla^2 \left(u + \frac{4\eta}{3\rho c_1^2} \frac{\partial u}{\partial t} \right) &= \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \left(v + \frac{4\eta}{3\rho c_1^2} \frac{\partial v}{\partial t} \right) &= \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \left(\omega + \frac{4\eta}{3\rho c_1^2} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) &= \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \\ \lambda + 2G &= \rho c_1^2 + \frac{4}{3} \eta \frac{\partial}{\partial t} \end{aligned} \quad (1-7)$$

5) 岩石爆破损伤模型^[2]

岩石爆破损伤模型在 20 世纪 80 年代初由美国 Sandia 国家实验室开始研究，是针对油页岩开采爆破研究需要推出的数值计算模型。研究认为：在冲击荷载作用下，岩石的破坏主要是由于微裂纹附近的拉应力集中及应力波的拉伸部分引起的。由于应力或应变迅速增加，裂纹的扩展速率及应力释放区的发展受到材料产速的限制，因而被激活的裂纹数增加。

损伤对材料刚度的劣化表现为

$$\dot{s}_{ij} = 2\mu(1-D)\dot{e}_{ij} - 2\mu e_{ij}\dot{D}$$

$$\dot{p} = 3k(1-D)\dot{\varepsilon} - 3k\varepsilon D \quad (1-8)$$

式中 k ——未损伤岩石的体积模量；
 μ ——未损伤岩石的剪切模量；
 D ——损伤参数；
 e_{ij} ——应变偏量张量。

体积压缩状态下采用理想弹塑性模型，屈服强度服从与应变率有关的 Mohr-Coulomb 准则，即

$$Y = \begin{cases} 0 & \begin{cases} p \geq 0 & \sigma_1 \geq \sigma_f \\ p < 0 & \sigma_1 < \sigma_f \end{cases} \\ [c_1(1+c_2 \ln \dot{\varepsilon}_p) + c_3 p](1-D) & \end{cases}$$

式中 c_1 ——静态屈服强度；
 c_2 ——应变率参数；
 c_3 ——围压常数；
 $\dot{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变率；
 D ——拉伸损伤；
 p ——压力；
 σ_1 ——最大主应力；
 σ_f ——最大断裂应力。

体积拉伸下的损伤演化方程为

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= k_a \dot{Y}_D \\ \dot{D} &= c \dot{\alpha} \quad (c = 1/B, \dot{Y}_D = \dot{\sigma} \varepsilon) \end{aligned} \quad (1-9)$$

体积压缩下损伤演化方程为

$$\dot{D}_c = \lambda \dot{w}_p / (1-D)$$

式中 λ ——损伤敏感参数；
 $\dot{w}_p$ ——压缩塑性功率；
 D ——拉伸损伤。

损伤参数与衰减系数之间为线性关系： $\alpha = A + BD$ 。

存在问题：未考虑初始损伤，参数确定困难（需采用模拟轻气炮实验）。

1.2.1.2 半无限体中爆破地震波的传播

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。在压缩波到达自由表面反射时形成的稀疏波削弱了介质中传播的波，也是自由表面临近区形成横向运动分量的原因。这样在具自由表面的均匀介质中，必须同时考虑运动场的非球面性质及两种波的存在。由于问题的复杂性，使得人们对半无限体中药包的动态响应研究得较少，主要研究成果如下。

1) Hoop 的点源理论

Hoop (1961)^[4]建立了半无限体中临近表面的、膨胀的、脉冲式点源，即仅辐射 P 波的点源。他给出位于表面 ($z=0$) 以下 h 处点源 P 的半无限体中自由面点 ($x, y, 0$) 的位移 $u(x, y, 0, t)$ 为

$$u = H(t - r/v_p) \int_{r/v_p}^t f''(t - \tau) g(x, y, 0, \tau) d\tau \quad (1-10)$$

式中

$H(t)$ ——Heaviside 单位步长函数；

$f(t)$ ——以时间为自变量的点源强度；

v_p ——压缩波速；

r ——点源到测点的距离；

向量函数 $g(x, y, 0, \tau)$ ——该问题的格林函数。

为了以无量纲形式描述点源理论，引入下列无量纲变量： $\xi = R/h$, $\bar{t} = tv_p/h$ 。

格林函数为 $g(x, y, 0, t) = [1/(hv_p)] \times g_d(\bar{t}, \xi, \mu)$

式中 $g_d(t)$ ——以无量纲变量 $\bar{t}$ 、 ξ 和泊松比 μ 表示的格林函数；

R ——地表点源中心至测点距离。

适于无量纲分析的 f 函数如下：

$$f = h^3 f_d(tv_p/h)$$

式中 f_d ——无量纲时间 $\bar{t}$ 的函数。

该理论没有揭示地表面地震波的传播是弹性纵波、横波和表面波综合结果的实质，只是简单地给出 P 波在地表面的作用位移。

2) 台阶爆破破岩三维数学模型

马鞍山矿山研究院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^[5]，并编制“BMMC”计算机程序进行了计算。模型认为炸药爆炸在孔壁周围的冲击波作用范围很小，可不考虑。此外，假设岩石所获得的应力波能量（应变能和动能）全部转化为产生新破坏表面能。

应用波动方程的应力函数解，考虑应力波在几个自由面反射后的各种反射波与直接到达该点的入射波的叠加，计算露天台阶岩体内任一点的应力，作出应力波能量密度及其三维能量场。

3) 丁桦等效荷载模型^[6]

丁桦等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。研究认为：在爆破区的邻近范围以外的振动信号主要来源于由于爆破作用引起的爆破后的爆破区邻近范围内地质结构的自振。振动信号是由结构进行滤波后传出的，而不是像很多人认为的那样，这种滤波作用主要是由介质的非弹性性质（如介质阻尼等）决定的。该模型对爆破地震动的激励源提出了一个全新的解释，但对结构体自振的实质需进一步研究。

1.2.2 爆破振动质点速度研究

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）。国内外一般把质点振动速度（常用垂直振动速度）作为爆破振动对建筑物的影响大小的主要参数。速度确定常用理论计算法、经验计算法、数值模拟法及实验测试法。

1.2.2.1 理论计算法

1) Holmberg - Persson 方法^[7]

假设柱状装药瞬时爆轰，不考虑各个方向上 PPV 的差异，将柱状装药分成一系列小段，组合小段装药就得到岩体 PPV 分布。

因集中装药速度为 $v = kw^\alpha R^{-\beta}$ ，则柱状装药积分形式公式为

$$v = k \left\{ q \int_T^{H+J} \frac{dz}{[R^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{\beta}{2\alpha}}} \right\}^\alpha \quad (1-11)$$

式中 v ——振速 PPV;

k 、 β 、 α ——与场地、炸药、装药结构有关的系数，建议 $k = 700$ 、 $\alpha = 0.7$ 、 $\beta = 1.5$;

z ——某测点 z 轴坐标;

R ——各小段的爆源距;

z_0 ——小段装药 z 轴坐标;

dz ——小段长度;

q ——单位装药重量;

$H + J$ 、 T ——装药 z 轴终点与起点坐标。

Savely (1986) 给出的整体装药公式为

$$v = \left(\frac{R}{w^{\frac{1}{2}}} \right)^{-\beta}$$

式中 w ——齐爆药量。

该方法没有考虑炸药爆轰速度 Hustrulid (1999) 则利用 Starfield & Pugliese (1968) 提出的观点，将柱状装药分成一系列球形单元，在时间与空间域上数值计算模拟某点应变，取得了较好效果。

2) Colorado School of Mine 解答

Colorado School of Mine 的研究人员利用 Favreau 解答，通过计算等效球形装药产生的速度-时间曲线、等效装药间的爆轰波传播时间及岩土中的 P 波速度，得到球形装药、柱状装药爆炸在围岩中的振动速度 PPV 值。它考虑了岩石的非弹性性质。

3) Heelan 解答^[8]

Heelan (1953) 根据有限长度的柱状装药的瞬态孔壁压力 $p_0 g(t)$ 、微段长度 dh 、孔半径 a 给出了远场低频部分的柱坐标系中位移解答：

$$u_p = \frac{a^2 dh p_0}{4 G c_p R} \left[1 - \left(\frac{c_s}{c_p} \right)^2 \cos^2 \theta \right] \frac{\partial g \left(t - \frac{h - h_1}{v_{od}} - \frac{R}{c_p} \right)}{\partial t}; u_\varphi = 0$$

$$u_s = \frac{a^2 dh p_0 \sin \theta \cos \theta}{4 G c_s R} \frac{\partial g \left(t - \frac{h - h_1}{v_{od}} - \frac{R}{c_s} \right)}{\partial t} \quad (1-12)$$

式中 u_p ——P 波引起的位移;

u_s ——S 波引起的位移;

v_{od} ——爆速;

c_p 、 c_s ——纵波 P、横波 S 波速;

G ——岩石剪切模量;

h_1 、 h ——柱状装药的底端和微分段的位置坐标;

R ——微分段至岩石中某点的距离;

θ ——微分段至某点方向与水平向夹角。

径向和垂向位移为

$$\begin{aligned}U_r &= u_p \sin \theta + u_s \cos \theta \\U_z &= -u_p \cos \theta + u_s \sin \theta\end{aligned}$$

微段装药引起的速度为

$$\begin{aligned}V_r &= \frac{\partial U_r}{\partial t} \\V_z &= \frac{\partial U_z}{\partial t}\end{aligned}\quad (1-13)$$

它考虑了剪切波的作用，这在以前是没有的。

4) 混合求解法^[9]

Blair & Minchinton (1997) 借助 Flac 模拟的炮孔压力为

$$p = kp_0 + (1-k)p_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t)$$

$$\alpha = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{k_a c_p}{a}$$

$$\omega = \frac{\alpha}{\sqrt{1-2\mu}}$$

式中 k ——表征爆轰产物最终准静态压力状态的常数， $0 < k < 1$ ；

α ——衰减指数；

ω ——频率；

μ ——泊松比；

k_a ——规模常数；

a ——孔半径。

利用 Heelan 结果，P、S 波引起的速度为

$$V_p = \frac{2dh(1-k)k_a^2 p_0}{3\rho c_p R} \left[1 - \left(\frac{c_s}{c_p} \right)^2 \cos^2 \theta \right] e^{-\alpha t} \sin \left[t\omega - \arctan \frac{\sqrt{1-\mu}}{\mu} \right]$$

$$V_s = \frac{2dh(1-k)k_a^2 p_0 \sin 2\theta}{3\rho c_s R} e^{-\alpha t} \sin \left[t\omega - \arctan \frac{\sqrt{1-\mu}}{\mu} \right]$$

峰值速度为

$$PPV_p = \frac{k_1 d h p_0}{\rho c_p R} \quad PPV_s = \frac{k_2 d h p_0}{\rho c_s R} \quad (1-14)$$

短柱状装药 PPV 为

$$V = k_3 \frac{a p_0}{\rho c_p R} + k_4 \frac{a p_0}{\rho c_s R}$$

式中 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 ——常数。

简化为

$$V = k V_0 \left(\frac{a}{R} \right)^\alpha, \quad V_0 = \frac{p_0}{\rho c_p} \quad (1-15)$$

1.2.2.2 经验算法^[10]

1) 瑞典兰格弗尔斯的经验公式

$$V = K \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad (1-16)$$