

土岩爆破文集

(全国土岩爆破经验交流会议论文选)

(第二辑)

冶金工业出版社

土岩爆破文集

全国土岩爆破经验交流会议论文选

第 二 辑

(中国力学学会工程爆破专业委员会)

冶金工业出版社

B

250673

内 容 提 要

本书是第二届全国土岩爆破经验交流会议的论文选编。它反映了我国近年来在爆破理论研究、设计计算方法、新爆破器材研制以及爆破施工技术等方面的新成就。它的主要内容包括基础理论研究；硃室爆破技术；深孔爆破技术；建筑物拆除爆破技术；特殊爆破技术及迫裂方法；新型爆破器材；爆破震动效应；爆炸空气冲击波；高速摄影技术和爆破安全技术。

本书可供冶金矿山、煤炭、地质、石油、化工、建筑、建材、铁道、交通运输、水利电力、农田基建和国防等部门从事土岩爆破的科研、设计和施工的工程技术人员以及大专院校和中等技术学校有关专业的师生参考。

土 岩 爆 破 文 集

全国土岩爆破经验交流会议论文选

第 二 辑

(中国力学学会工程爆破专业委员会)

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 25 1/4 字数 599 千字

1985年7月第一版 1985年7月第一次印刷

印数00,001~3,250册

统一书号: 15062·4159 定价5.65元

编 委 会

主 编 冯叔瑜

副主编 边克信 霍永基 杨振声

编 委 (以下按姓氏笔划为序)

马乃耀、马柏林、王中黔、王廷武、
王鸿渠、龙维祺、朱忠节、朱瑞赓、朱德达、
许连波、刘清荣、刘殿中、吴灵光、汪旭光、
杨善元、张正宇、张建华、林学圣、陈宝基、
金星男、庞维泰、徐天瑞、钱瑞五、黄元清、
董振华、谢秦极、缪垂祖

前 言

自一九七八年一月在云南昆明市召开第一届土岩爆破经验交流会议以来,我国土岩爆破工作在完成国家重大工程项目,提高生产建设经济效益以及用现代力学和计算技术指导工程爆破设计和开展爆破理论研究工作中,都取得了可喜的成绩。这些成绩主要表现在:

深孔爆破在冶金矿山、水电、煤炭、铁道和建材等系统得到了进一步的发展和提高。一些深孔爆破技术,如大区多排微差爆破、宽孔距或小抵抗线的深孔爆破、深孔光面和预裂爆破等得到广泛的应用,使许多矿山和工程建设都获得明显的经济效果。

控制爆破技术得到了较大的发展和应用。在复杂条件下成功地拆除了多座整体框架或高大建筑物。并在工厂厂房拆迁改建和设备更新的工程中发挥了作用。燃烧剂和破裂剂的研究和应用也取得了进展。

炸药和起爆器材的研制取得了新的成果,EL系列和RJ系列乳化炸药获得了国家二等发明奖。与此同时,非电起爆技术目前在我国地下和露天各种爆破工程中,获得日益广泛的应用。并且在使用中有所创新。

国家计委组织的某试验工程项目,通过各部门的大力协作,对大规模硐室爆破的外部效应取得了大量的、丰富的量测资料,不仅为制定有关安全规程提供了科学依据,而且也发展了我国的爆破量测技术,壮大了技术队伍。

对土岩爆破的基本理论、有关爆破的岩石力学、不同地形及条件下的爆破抛掷计算、爆破作用过程的数值计算、炸药爆轰的管道效应、爆破地震效应和空气冲击波效应以及爆破安全和环境保护等方面,都开展了一些研究和量测工作,并取得了一定的进展。

为了总结和交流数年来我国在土岩爆破工作中所取得的成果和经验,中国力学学会于一九八二年十一月五日至八日在福州市召开了第二届全国土岩爆破经验交流会议,参加会议的有来自全国各条战线122个单位的199位代表。大会收到有关爆破理论与实验技术、工程爆破新技术、爆破器材和爆破安全等方面的论文191篇。为了及时推广大会所取得的成果和经验,土岩爆破专业组决定成立编辑委员会,选编出版第二辑《土岩爆破文集》,在民主推荐的基础上,经过全体编委的审查讨论,最后收入选集中的论文为48篇。这些论文基本上反映了近年来我国在爆破工作方面的成就。必须声明的是:由于《文集》的篇幅有限,不可能将所有的论文都收入选集中,同时由于受到编委会的水平限制,可能有些优秀论文没有入选,编委会在此表示歉意。

在本《文集》编审过程中,得到广东爆破工程公司和湖北省爆破学会的有力支持,编委会在此表示感谢。

编委会

1983年8月30日

目 录

前言

1. 土中爆炸初始阶段的空腔和压密层.....许连坡 章培德 (1)
2. 用水耦合装药爆破模型试验研究.....金星男 (17)
3. 用不对称药包爆破控制抛掷方向的试验研究
.....黄元清 姚尧 刘兰亭 石怀理 (24)
4. 露天矿台阶爆破岩石块度组成计算及其验证结果.....郭初吉 (31)
5. 预裂爆破中的岩石破裂过程.....陈保基 周昕清 (41)
6. 预裂爆破成缝机理的研究.....高士才 向远芝 邢洪义 (47)
7. 岩石爆破性分级的研究.....钮强 龙凌霄 王明林 (54)
8. 不对称多面临空山型爆破理论及方法.....王鸿渠 (61)
9. 条形药包抛掷爆破的设计方法.....边克信 刘殿中 (72)
10. 空腔条形药包爆破的试验研究.....秦明武等 (80)
11. 土中空腔条形药室爆破的鼓包运动特征.....吴灵光 (88)
12. 条形药包爆破时的空腔效应.....朱瑞贵 李廷芥 黄承贤 (93)
13. 降低梯段深孔爆破大块率的探讨.....吴子骏 (100)
14. 露天矿梯段爆破过程的摄影分析.....吴子骏 许德民 李保珍 (107)
15. 小抵抗线爆破孔网参数对破岩质量的影响.....高士才 邢洪义 向远芝 (113)
16. 露天矿深孔爆破优化的研究.....马柏令 (119)
17. 井巷深孔爆破中炸药间隙效应的试验研究.....荣际凯 (124)
18. 葛洲坝水利枢纽工程二江电厂基础岩石开挖深孔预裂爆破.....杨云致 (133)
19. 控制爆破拆除建筑物的解体判据问题.....庞维泰 杨人光 周家汉 (147)
20. 折叠倾倒法爆破拆除框架大楼.....关志中 华忠民 金人夔 (162)
21. 控制爆破拆除钢筋混凝土整体框架的试验研究.....吕毅 顾毅成 金骥良 (172)
22. 用控制爆破拆除3700吨框架.....杨宏业 (185)
23. 水压爆破药量计算及其应用.....王中黔 李铮 (191)
24. 丰满水电站泄水洞水下岩塞爆破.....赵荫炳 (199)
25. 软弱围岩隧道大断面开挖爆破技术.....齐景徽 (206)
26. 挤压爆破处理软土地基——一项海港建设处理软土地基的新技术.....马乃耀 (215)
27. 急倾斜煤层中深孔挤压爆破放顶的试验与研究
.....刘天泉 文学宽 陈致和 邹寅莹 (224)
28. 静力迫裂法.....冯叔瑜 朱忠节 马乃耀 洪德君 (230)
29. EL系列乳化炸药的应用与发展
.....汪旭光 章士逊 崔安娜 郭素云 赵中元 (236)
30. 硝酸基炸药及其在爆破工程中的应用.....徐金汉 梁海林 (246)
31. JFB型导爆击发笔及SG型燃烧剂的研制与应用.....冯义希 宋蕴华 (252)

32. 爆破地震效应及安全评定方法探讨·····	霍永基 王湘钧 费骥鸣(260)
33. 工程结构的爆破地震力计算·····	钱胜国(271)
34. 官厅水库深孔爆破时砖砌房屋破坏临界振动速度值的测量·····	张正宇(279)
35. 爆破地震波作用下岩石隧道的临界振动速度·····	朱瑞贵 李铮(285)
36. 乌江渡水电站库岸滑坡体的爆破稳定处理和观测研究·····	钱瑞五 王葆沂(292)
37. 爆破荷载作用下水坝的动力反应·····	黄 涛(299)
38. 葛洲坝一期工程基岩开挖保护层厚度及爆破对基础质量影响的分析 ·····	张盛京 杨明渊(307)
39. 爆破作用对地基基础和地下建筑物的破坏程度的探讨 ·····	冯叔瑜 马乃耀 阎玉山(311)
40. 建筑物拆除爆破塌落造成的地面振动·····	周家汉 杨人光 庞维泰(317)
41. 预应力动土压传感器动态标定·····	陈新法(327)
42. 爆炸空气冲击波对远距离建筑物的破坏效应·····	王丽春(332)
43. CSR型空气冲击波速度测量系统·····	李香灿 竺忠水 陈雪霞(336)
44. 冲击波速度测量系统的标定·····	朱吾龙(348)
45. 利用扫描摄影和光导纤维测量鼓包运动过程·····	顾道良 和喜莲 王小荣(358)
46. 关于土岩爆破的高速摄影和高速立体摄影观测·····	吴灵光 黄政华(363)
47. 射频感应对电点火线路的影响·····	林学圣 铃兆荏 叶家福 刘金兴(370)
48. 烟囱爆破实践八例·····	(376)

COLLECTED PAPERS OF THE 2nd CONFERENCE OF SOIL AND ROCK BLASTING

(Organized by National Committee of Engineering Blasting China
Mechanics Society, Fuzhou, 5-8th Nov., 1982)

CONTENTS

Preface

1. Cavity and Compacted Layer During Initial Compaction Stage of Explosion
in Soil.....Xu Lianpo Zhang Peide
2. Model Experiment and Research on Blasting by Water-Coupling
Charge.....Jin Xingnan
3. Experiments on Controlling the Throwing Direction of Explosion with
Nonsymmetrical Charges.....Huang Yuanqing Yao Yao Liu Lanting Shi Huaili
4. Calculation of Rock Size Composition Formed by Blasting in Open pit Bench
and the Result of Verification.....Guo Chuji
5. The Fragmenting Process of Rock in Presplitting Blasting.....Chen Baoji Zhou Tingping
6. Study of Crack-Forming Mechanism in Presplitting Blasting
.....Gao Shicai Xiang Yuanzhi Xing Hongyi
7. A Study of the Classification of Rock Blastability
.....Niu Qiang Long Lingxiao Wang Minglin
8. Theory and Practice of Unsymmetrical Multidirectional Overhead
Mountain-Type Explosion.....Wang Hongqu
9. Design of the Use of Strip-Shaped Explosive Charge in Propelling
Explosion.....Bian Kexin Liu Dianzhong
10. Experimental Research of Explosion of Strip-shaped Explosive Charging in
the Form of Cavity.....Qin Mingwu et al
11. Characteristics of Balging Motion in Explosion by use of Strip-Shaped
Explosive Charge in Cavity Soil.....Wu Lingguang
12. Effectiveness of Cavity in Strip-Shaped Explosive Charge
.....Zhu Ruigeng Li Tingjie Huang Chengxian
13. A Study on Reduction of Rate of Large-Sized Crushed Pieces in Deep
Borehole Open-Pit Bench Blasting.....Wu Zi Jun
14. Analysis of the Process of Explosion in Open-Pit Bench by Using
High-Speed Photography.....Wu Zi Jun Xu Deming Li Baozhen
15. The Effect of Parameters of the Spaces of Burnt-Cut on the Fragmentation
in Small Burden Blasting.....Gao Shichai Xing Hongyi Xiang Yuanzhi
16. A Research of Optimization of Deep Borehole Blasting in Open-Pit Mine.....Ma Bailing
17. Experiment and Research of Spacing Effect of Explosives in Deep Hole
Blasting.....Rong Jhikai
18. Presplitting Blasting by Using Deep Holes for Foundation Rock Excavation of
the Power Plant on the Second Channel of Gezhouba Hydroelectric Project
.....Yang Yunmai
19. Problem on Criterion of Disintegration in Demoliting Structure by Using
Controlled Blasting Method.....Pang Weitai Yang Renguang Zhou Jiahao
20. A Overlapped Overturning Blasting Method for Demoliting Framed
Building.....Guan Zhizhong Hua Zhongmin Jin Renkui
21. Experiment and Research Work on Controlled Blasting for Demolition of

- Integral Reinforced Concrete Framed Buildings.....Lü Yi Gu Yicheng Jin Jiliang
22. Demolition of 3700 ton Concrete Frame by Controlled Blasting.....Yang Hongye
23. Calculation of the Amount of Explosive in Water-Pressure Blasting and
Its Use.....Wang Zhongqian Li Zhen
24. A Summary Report of Underwater Blasting for Demoliting Rock Plug of
Spillway Tunnel in Feng Man Hydroelectric Power Station.....Zhao Yinbing
25. Blasting Technique Used for Large Cross-Section Excavation in Weak Wall
Rock Tunnel.....Qi Jingyue
26. The Process of Soft Soil Foundation by Using Compactedly Splitting Blasting
—A New Technique Used in Soft Soil Foundation in a Port Engineering
Project.....Ma Naiyao
27. Tests and Research on Roof Caving With Medium-Longhole Pressurized Blasting
in Steep Seam.....Liu Tianquan Wen Xuekuan Chen Zhihe Zou Yinsheng
28. A Compactedly Splitting Method by Using Static Force
.....Feng Shuyu Zhu Zhongjie Ma Naiyao Hong Dejun
29. Application and Development of EL Series Emulsive Explosives
.....Wang Xuguang Zhang Shixun Cui Anna Guo Suyun Zhao Zhongyuan
30. Nitric Acid-Based Explosives and Their Application in Blasting Engineering
.....Xu Jinhan Liang Hailin
31. Research and Application of JFB type Igniting Pen for Blasting & SG type
Incendiary Agent.....Feng Yixi Song Yunhua
32. Study of Seismic Effects Caused by Blasting and Estimation Methods Safety
.....Huo Yongji Wang Xianjun Fei Jimin
33. A Computation on Artificial Earthquake Force Induced by Blasting on
Engineering Structure.....Qian Shengguo
34. Measurement of the Critical Vibrating Velocity for Destroying Brick masonry House
During the Deep Hole Blasting in GuanTing Reservoir.....Zhang Zhengyu
35. The Critical Vibration Velocity of Rock Tunnel under the Effect of Seismic
Wave Induced by Blasting.....Zhu Ruigeng Li Zhen
36. Stability Disposal of the Sliding Body of Reservoir Bank by Using Blasting
Method in Wujiangdu Hydroelectric Power Station and Its Survey Study
.....Qian Ruiwu Wang Baoyi
37. Kinetic Response of Dams under the Action of Blasting Loading.....Huang Tao
38. The Thickness of Protective Layer of Bedrock Excavation in the First Stage
Project of Gezhouba Dam in Yangtze River and the Analysis of the Effect of
Blasting on the Quality of Bedrock.....Zhang Shengjing Yang Mingyuan
39. Research of Blasting Effect on Destroying Degree of Ground Foundation
and Underground Structure.....Feng Shuyu Ma Naiyao Yan Yushan
40. Ground Vibration Caused by Explosive and Collapse in Demolishing Building
.....Zhou Jiahua Yang Renguang Pang Weitai
41. Dynamic Calibration of Transmitter of Prestressed Dynamic Soil Pressure
.....Chen Xinfa
42. Destroying Effect of Air Impact Wave Caused by Blasting on Far
Distance Building.....Wang Lichun
43. CSR type Measuring System for Air Impact Wave Velocity
.....Li Xiangcan Zhu Zhongshui Chen Xuexia
44. A Calibration of the System for Measuring the Velocity of Air Shock Waves
.....Zhu Wulong
45. Application of Smear Photography and Optical Fibre for Measuring the Process
of Bulging Movement in Blasting.....Gu Daoliang He Xilian Wang Xiaorong
46. Observation and Survey of Soil and Rock Blasting by Using of High-Speed
Photography and High-Speed Stereoscopic Photography.....Wu Lingguang Huang Zhenghua
47. Effect of Radio Frequency Induction on the Electric Firing Line
.....Lin Xuesheng Zhuang Zhaoling Ye Jiafu Liu Jinxing
48. Eight Examples of Funnel Blasting practice.....Pang Weitai etc.

1. 土中爆炸初始阶段的空腔和压密层^①

中国科学院力学研究所 许连坡 章培德

一、前言

土中爆炸时,波后介质被压密,形成压密层;其厚度随时间逐渐增大。压密层中的介质则发生变形和流动,到中后期还出现裂缝。它的里边是爆炸空腔。显然,这一土层的性质是影响爆炸发展过程的重要因素。

爆炸初始阶段中,用X光摄影法可以清晰地看到介质中的压密层和爆炸空腔;另外,由于初始阶段是一个高压阶段,介质的强度可以忽略,因而其运动规律较为简单。

二、爆炸空腔

1. 实验方法和结果 文献〔1〕中空腔发展曲线的经验表达式是代表空腔发展的主要阶段的,对于初始阶段尚需另作研究。按文献〔1〕的实验方法所得照片如图1a~f。实验表明,装药爆炸后约4~5微秒,爆炸冲击波的作用即成球对称的了,即空腔和压密层均呈球形,而这时空腔半径只发展了1~2毫米。

空腔和压密层的发展曲线如图2。

图2a是0.72克压装泰安在实土〔1〕和松土〔1〕中爆炸的情况。图2b是0.35克玻璃壳散装泰安在实土中爆炸的情况。图2c和图2d是0.72克压装泰安在砂和干土中爆炸的结果。计时是从给爆源送出点火电脉冲算起,点火电脉冲是高压起爆器给出的〔2〕。

2. 空腔发展规律 图2表明,除起始点附近外,空腔发展曲线可用下列关系式表示:

$$\frac{a}{r_0} = A \left(\frac{t}{r_0} \right)^\alpha \quad t \geq 10 \text{ 微秒} \quad (1)$$

式中 a ——空腔半径;

r_0 ——装药半径;

A 和 α ——常数;

t ——时间,微秒。

公式(1)还可写成:

$$\frac{a}{r_0} = \left(\frac{t}{t_*} \right)^\alpha \quad t \geq 10 \text{ 微秒} \quad (2)$$

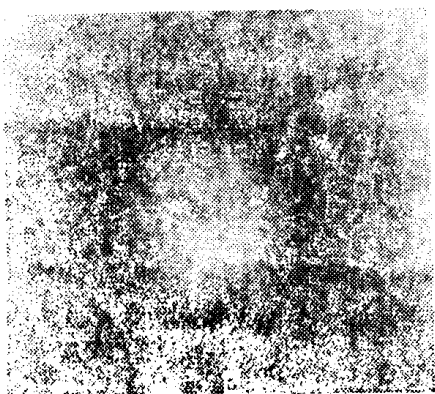
显然, t_* 是另一个常数。

关系式(2)可代表图2中空腔半径变化曲线的直线部分。各组实验中的 α 和 t_* 值如表1所列。

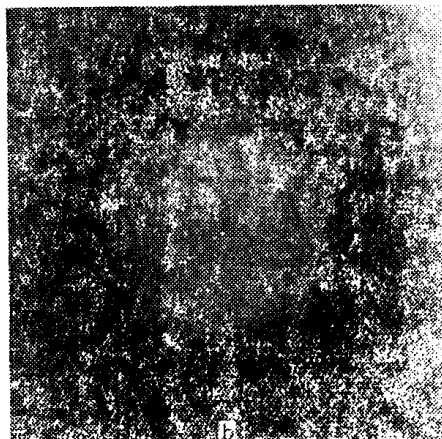
空腔曲线的中段和后段, α 值不再是常数。

由(2)式可得到空腔的发展速度:

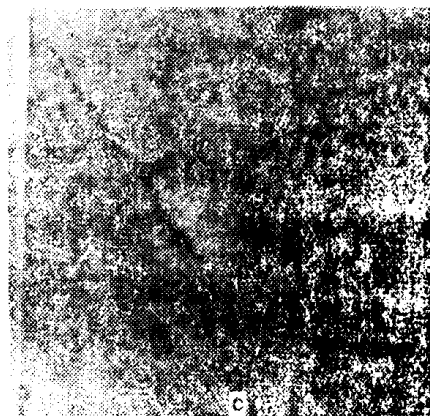
① 参加试验工作的还有金辉、黄良佐、边小兵、周燕军和杜建科,在完成本文中还得陈淑霞的帮助。



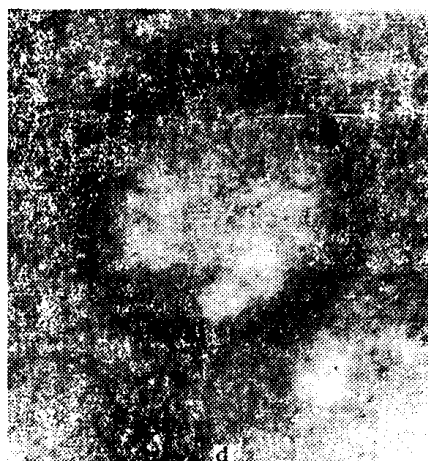
实土, 10微秒



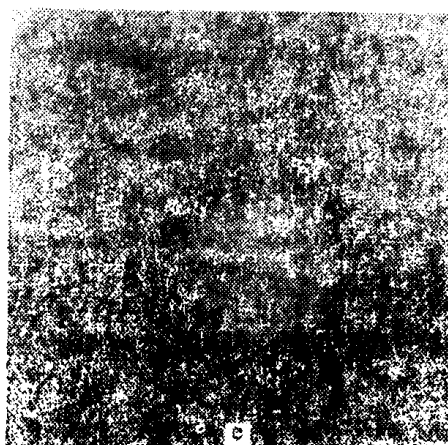
实土, 20微秒



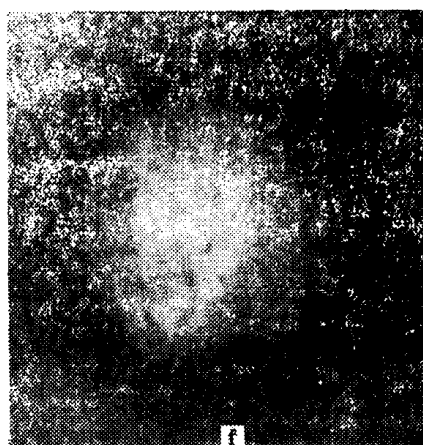
干土, 5微秒



干土, 22微秒

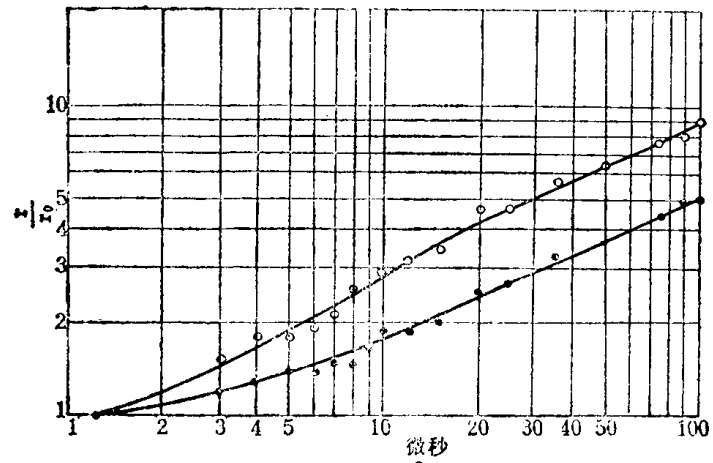


砂, 10微秒

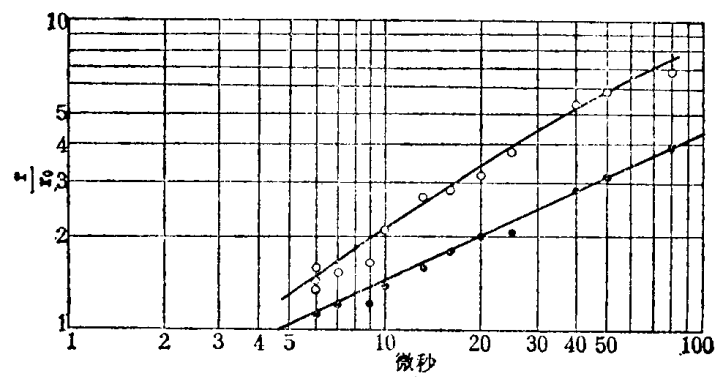


砂, 45微秒

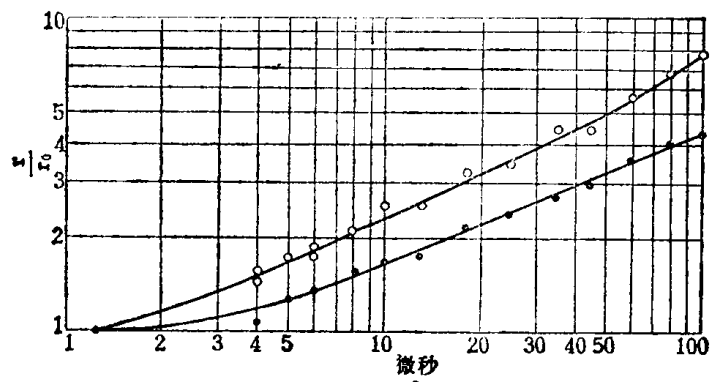
图 1 空腔和压密层的发展



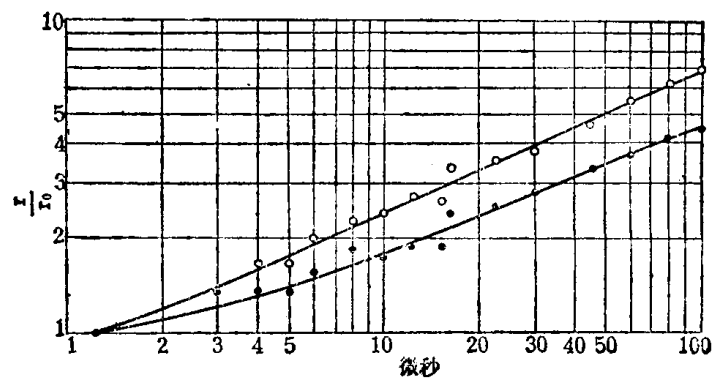
•—压密层前沿 •—空腔压装泰安—实土和松土



•—压密层前沿 •—空腔散装泰安—实土



•—压密层前沿 •—空腔压装泰安—砂



•—压密层前沿 •—空腔压装泰安—干土

图 2 空腔和压密层曲线

表 1 各组实验的数据

组 别	α	t_* (微秒)	v_* (米/秒)	$\bar{\rho}$ (克/厘米 ³)	$\bar{\rho}/\rho_0$	v_0 (米/秒)
0.72克压装泰安, 实土和松土	0.45	2.8	770	2.18	1.21	420
0.35克散装泰安, 实土	0.47	4.6	510	2.14	1.19	—
0.72克压装泰安, 砂	0.41	3.0	650	2.21	1.34	330
0.72克压装泰安, 干土	0.42	2.5	800	1.78	1.52	520
ЭД-202 雷管, 饱和土	0.40	3.0	640	—	—	—

$$\dot{a} = r_0 \frac{\alpha}{t_*} \left(\frac{r_0}{a} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \quad (3)$$

取速度

$$v_* = r_0 \frac{\alpha}{t_*} \quad (4)$$

则有:

$$\dot{a} = v_* \left(\frac{r_0}{a} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \equiv v_* \left(\frac{r_0}{a} \right)^{\beta} \quad (5)$$

其中 $\beta = \frac{1-\alpha}{\alpha}$ 是空腔发展速度的衰减指数。各组实验的速度 v_* 值亦列表 1 中。由表可以看到, 在我们既改变了介质又改变了爆源的情况下, α 值在 0.4 到 0.5 之间。

三、压密层的传播和特征

1. 压密层前沿的传播规律 由图 1、图 2 可得压密层前沿半径 R_p 和空腔半径的关系:

$$R_p^3 = \frac{\bar{\rho} a^3}{\bar{\rho} - \rho_0} - \frac{\rho_0 r_0^3}{\bar{\rho} - \rho_0} \quad (6)$$

$\bar{\rho}$ 是压密层中介质的平均密度, 它随时间的变化情况如图 3, 即对各组实验, 当 $t \geq 10 \sim 20$ 微秒时, $\bar{\rho}$ 大致不变; 而 20 微秒以前, 对砂则仍可认为 $\bar{\rho}$ 不变, 对其它各组则 $\bar{\rho}$ 随时间迅速下降。

其中 $\bar{\rho}$ 和 $\frac{\bar{\rho}}{\rho_0}$ 值 (常数段) 也见表 1。可以看到, 它们既和装药情况有关又和介质有关。 ρ_0 是介质的初始密度, 其值如文献 [1]。

显然, 关系式 (6) 不只是经验关系, 可以给出力学解释。实际上它可写成:

$$\rho_0 (R_p^3 - r_0^3) = \bar{\rho} (R_p^3 - a^3) \quad (7)$$

如果压密层前沿是冲击波, 则有:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \rho_0 (R_p^3 - r_0^3) &= 4 \pi \int_a^{R_p} \rho r^2 dr = \frac{4 \pi \int_a^{R_p} \rho r^2 dr}{\frac{4}{3} \pi (R_p^3 - a^3)} \cdot \frac{4}{3} \pi (R_p^3 - a^3) \\ &= \bar{\rho} \cdot \frac{4}{3} \pi (R_p^3 - a^3) \end{aligned}$$

这就是 (7) 式, 其中 $\bar{\rho}$ 是平均密度:

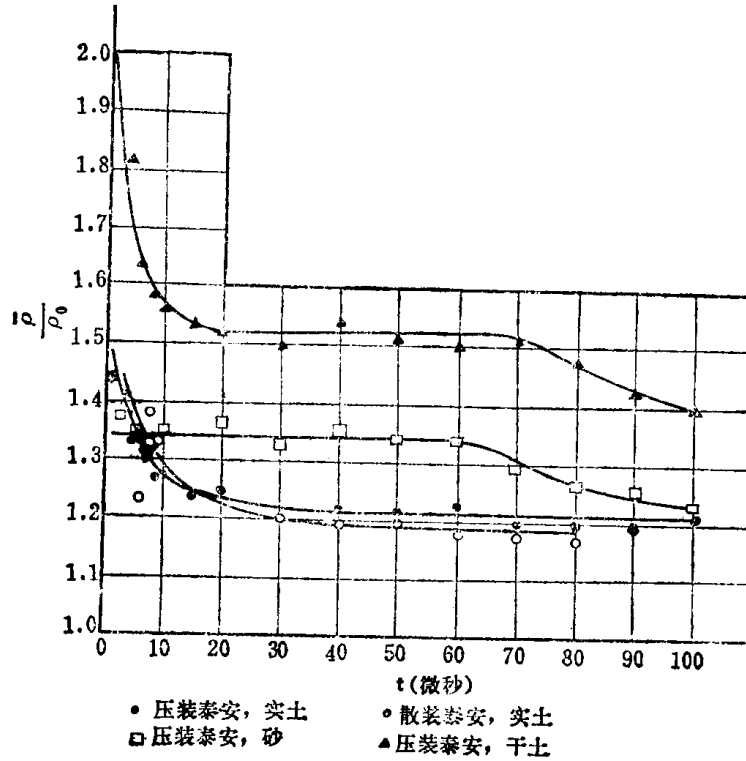


图 3 $\bar{\rho}/\rho_0$ 和 t 的关系

$$\bar{\rho} = \frac{3 \int_a^R \rho r^2 dr}{R^3 - a^3} \quad (8)$$

可见 (6) 式就是冲击波的质量守恒关系。

2. 压密层前沿的性质 如果压密层前沿是冲击波, 则有波阵面质量守恒关系:

$$u_2 - u_1 = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) (D - u_2) \quad (9)$$

若这一间断面不是介质分界面, 则 $D - u_2 \neq 0$ 。这样, 由 $\rho_2 \neq \rho_1$, 可得 $u_2 \neq u_1$, 反之亦然。即压密层前沿是冲击波, 则该处速度间断; 反之亦然。然而, 质点速度的测试表明: 速度—时间曲线是有上升段的; 且上升时间随该质点到爆源距离的增加而增加。图4a是砂中爆炸的情况^[3]; 图4b是实土中爆炸的情况。由此, 我们可以得到结论: 压密层的前沿不是冲击波波阵面。因此, 对关系 (6) 要另做分析。

一般情况下, 积分质量守恒关系可以写成

$$\frac{4}{3} \pi \rho_0 (R_*^3 - r_0^3) = 4 \pi \int_a^{R_*} \rho r^2 dr \quad (10)$$

这里 R_* 是质点的拉格朗日坐标, 如图 5。于是有:

$$\rho_0 (R_*^3 - r_0^3) = 3 \int_a^{R_*} \rho r^2 dr = \bar{\rho} (R_*^3 - a^3) \quad (11)$$

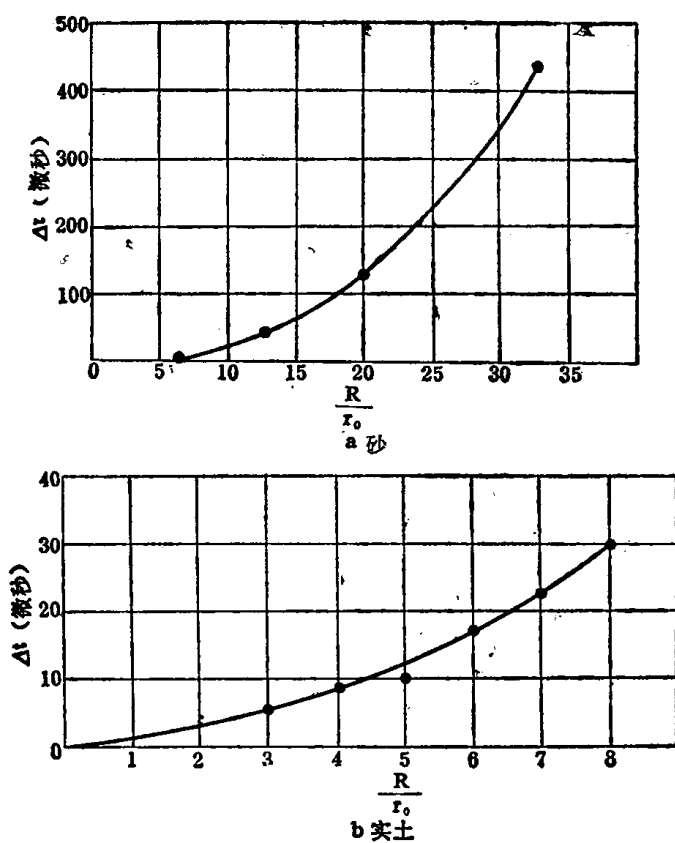


图 4 速度波形上升时间和位置的关系

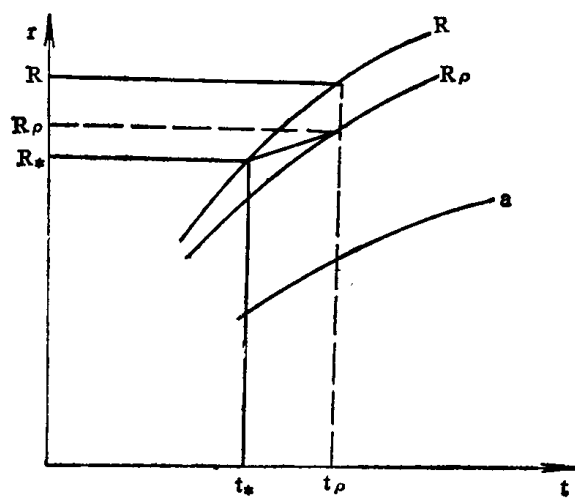


图 5 波系示意图

两端加 $\rho_0 R_\rho^3$ 得到:

$$\rho_0(R_\rho^3 - r_0^3) = \overline{\rho}(R_\rho^3 - a^3) + \rho_0(R_\rho^3 - R_*^3) \quad (12)$$

由于

$$R_\rho - R_* = \int_{t_*}^{t_\rho} u dt \quad (13)$$

比较 (7) 即得

$$\int_{t_*}^t \rho u dt \ll R_\rho - a \quad (14)$$

这一结果由质点速度的测试也可得到。它表明，对一个确定的质点来说，压密层到达之前所走的距离和压密层的总厚度相比是小量。这个条件还可写成另外一种形式。由于

$$\begin{aligned} \rho_0(R_\rho^3 - R_*^3) &= 3\rho_0 \int_{R_*}^{R_\rho} R^2 dR = 3 \int_{R_*}^{R_\rho} \rho_0 R^2 dR - 3 \int_{R_\rho}^{R_\rho} \rho_0 r^2 dr \\ &= 3 \int_{R_\rho}^{R_\rho} \rho r^2 dr - 3 \int_{R_\rho}^{R_\rho} \rho_0 r^2 dr = 3 \int_{R_\rho}^{R_\rho} (\rho - \rho_0) r^2 dr \end{aligned}$$

这样，我们又有条件：

$$3 \int_{R_\rho}^{R_\rho} (\rho - \rho_0) r^2 dr \ll \overline{\rho} (R_\rho^3 - a^3) \quad (15)$$

这个条件表示：压密层前介质质量的总增量和压密层总质量相比是小量。

这样，我们看到：尽管压密层前沿不是冲击波；但在初始阶段中，除起始点附近外，条件（14）和（15）成立。因而从运动和变形上看，压密层可看成冲击波。

3. 起始点附近的情况 由于关系式（2）不能代表 $t < 10$ 微秒的情况，因此对于起始点附近的情况需另做研究。对0.72克压装泰安在实土中爆炸时，当 $t < 10$ 微秒时，空腔—压密层曲线如图6，其它几组实验情况类似。

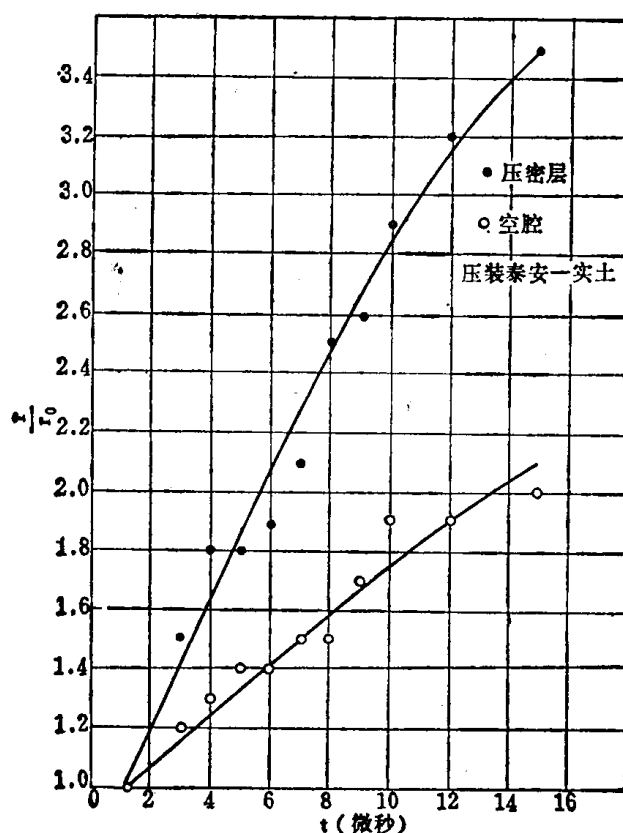


图 6 空腔—压密层曲线

测试表明：上述药球的爆炸作用时间为1.2微秒左右，此值完全符合两条曲线的交点，即起始点0。由图6我们看到，在开始的一段空腔曲线是直线， a 是常数；即爆炸完成后，在10微秒以前，空腔发展速度不衰减。我们看到，在土中爆炸的初始阶段，空腔曲线也可分成两个阶段：第二阶段中，空腔发展速度按（5）式衰减；第一阶段中，空腔发展速度是常数，而且其值不大。这可能由两个原因造成，一是材料性质的影响，一是炸药能量不是瞬时释放的。当然，由于这时空腔较小，测试精度不高，上述结果有一定误差。

四、压密层中介质的密度

1. 速度分布 И.Л.Зельманов 等用电磁法^[3]测得砂土中爆炸时速度分布为：

$$u = u_0 \left(\frac{R}{r} \right)^m \quad (16)$$

式中 u_0 ——波阵面上的质点速度；

R ——波阵面位置；

r ——空间坐标；

m ——变数，随 R 的增加而稍有增加。

我们把关系式（16）用到土中，同时为了方便把它改写成

$$u = a \left(\frac{a}{r} \right)^m \quad (17)$$

m 值可用我们的实验资料算出。

2. 质点密度的变化 由式（17）和质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} = 0 \quad (18)$$

可得到关于密度的方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} = -(2-m) \frac{u}{r} \quad (19)$$

它的特征方程是

$$dt = \frac{dr}{u} = \frac{d \ln \frac{\rho}{\rho_0}}{-(2-m) \frac{u}{r}} \quad (20)$$

由于 u 是 r 、 t 的函数，故第一个方程

$$dt = \frac{dr}{u} \quad (21)$$

可解，其解为

$$r = \int u dt + R \quad (22)$$

这就是质点的轨迹方程。第二个方程变成：

$$dr = \frac{d \ln \frac{\rho}{\rho_0}}{-(2-m) \frac{u}{r}} \quad (23)$$

由于此方程包含 m ， m 是 t 的函数，按方程组（20）的解法，应将已得到的解（22）代入