

现代爆破理论

齐金铎 编著



冶金工业出版社

52.89
0088

现代爆破理论

齐金铎 编著

冶金工业出版社

064481

图书在版编目(CIP)数据

现代爆破理论/齐金铎编著. —北京: 冶金工业出版社,
1996. 5

ISBN 7-5024-1883-0

I. 现… I. 齐… III. 爆破技术-理论 N. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 09428 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

河北固安印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1996 年 5 月第 1 版, 1996 年 5 月第 1 次印刷

787×1092mm 1/32; 8 印张; 178 千字; 245 页; 1-1050 册

18 元

序 言

《现代爆破理论》一书系作者根据多年的工作成果，经过总结、整理、完善和发展而完成的。书中的丰富内容，阐述了爆破理论的全貌，并详细地分析和评价了不同派别的产生、形成以及今后发展趋势，可使读者对众说纷纭的爆破理论，有了一个清晰的认识。同时对进一步研究爆破理论，建立爆破优化数字模型，指导爆破设计和施工，提供了理论依据，可以说是一本不可多得的参考文献。

北京科技大学采矿教授

童光照

1995. 10. 6

前 言

随着爆破技术和相邻学科的发展，爆破理论的研究也有了长足的进步。特别是岩体结构力学、岩石动力学和计算机模拟爆破技术的发展，使爆破理论的研究更实用化，更系统化了。

当今岩体力学已从以材料力学为基础连续介质岩体力学发展为以工程地质为基础的非连续介质岩体力学。岩体结构面特征对爆破的影响日益引起人们的重视。

岩石动力学作为爆炸力学、冲击力学与爆破工程相结合的一门边缘学科，它的产生和发展无疑对岩石爆破破碎原理的研究是一种推动力量。

计算机模拟爆破技术的发展，不仅可以预算出最优的爆破效果，而且可以在计算机上再现岩石爆破的动态过程，从而大大减少现场试验所消耗的人力、物力，并能准确地查明各种因素对爆破效果的影响。它代表着90年代爆破技术的最高水平，也是爆破技术由工艺过渡到科学的重要标志之一。但是，从总体上看，爆破理论的发展仍然滞后爆破技术的要求，理论研究和生产实际仍有不小的差距。再加上爆破过程的瞬时性和岩石性质的模糊性、不确定性，致使爆破理论众说纷纭，争论不止。美国矿业局 W.L. 福尔内 (Faurney) 等人认为：“岩石破碎的过程仍然没有阐明，在公开文献中尚有许多混乱和相互矛盾的论点……”；南非的 C.V.B. 坎宁安 (Cunningham) 在论及岩石爆破过程中动压与静压哪个占主导地位

时谈到“60年代以来，一直为人们所争论，毫无疑问，今后仍将争论一段时间”。南非矿业研究会高级工程师J.R 布里克曼(Brinkman)在1987年召开的第二届爆破破岩国际会议(2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting)上谈到：“岩石爆破破碎机理目前仍存在着相互矛盾的观点”。

在爆破理论迅速发展又众说纷云、相互矛盾的情况下，从发展的角度去研究不同时期各派爆破理论的主要论点、依据，从中找出发展趋势，无论是对于爆破理论本身的研究还是指导工程实践都有着重要意义。

爆破理论的传统内容包括，岩石是在什么作用力下破碎的；破碎的规律以及其影响因素。随着人们对爆破现象认识的逐步加深，对于爆破理论的研究内容和范围也相应扩大。

1958年日本召开的岩石爆破机理讨论会上，东京大学的山口梅太郎认为，爆破机理的研究范围应该包括：

(1) 力学的爆破机理：

理论的研究；

爆破时的各种测定；

现场爆破效果的总结。

(2) 关于炸药的研究：

广义的炸药破坏力的研究；

药室内压力的研究。

(3) 对作为爆炸对象的岩石性质的研究：

岩石物理性质的研究；

作为岩体的岩石性质的研究。

实践证明，这些观点已被很多人接受。前苏联学者A. H. 哈努卡耶夫(Ханукаев)认为，爆破法破碎岩石的过程就是岩

石爆破的物理过程。要使更多的炸药能量用于破碎岩石，就必须使炸药的爆轰性能与岩石的性质相匹配。因此，炸药的研究和岩石性质的研究构成了爆破机理研究的重要组成部分。我国著名学者杨善元教授认为，爆破是一种动态的力学过程，用“岩石爆破动力学”来概括岩石爆破的理论基础比较合适，其内容应该包括：

(1) 波动物理学；

(2) 爆炸力学（包括热流体力学与冲击波理论，热化学与爆轰理论）；

(3) 弹塑性理论与固体中的应力波理论；

(4) 岩石的断裂力学；

(5) 超动态量测技术。

笔者认为：爆破理论是研究工程爆破中各种爆破现象发生和发展的规律。爆炸在介质中产生高温、高压和高速等多变状态，在周围介质中引起极其复杂的效应，包括冲击波、应力波、地震波的传播和效应。因此，爆破过程是集炸药的爆轰，爆轰的控制，岩石获得爆炸能量的动力性质，岩石断裂特性和爆破块度分布所组成的一个复杂系统。要阐明爆炸的历程、机理和规律，应包括以下内容：

(1) 爆轰波理论的研究；

(2) 岩石特性，包括岩体结构、构造特征和岩石动态力学性质及其对爆破效果的影响；

(3) 爆破能量向岩石的传递效率；

(4) 岩石的动态断裂和破坏；

(5) 计算机模拟爆破过程，预测爆破块度和爆堆形状。

本书在阐明爆破理论的发展过程时，基本上以年代顺序为主，对于一些国内没有详细报导的基本理论都作了较为全

面的介绍，如日野论点，U. 兰格福斯论点，村田论点等。对于国内有过报导的基本理论，为了保持内容的连续性，也作了相应的介绍，但是，增加了最新研究成果。例如 C. W 利文斯顿的爆破漏斗理论。在介绍中对不同学派的观点进行了分析、比较和评价，同时对于爆破理论的主要依据——实验结果给予了高度重视，在篇幅允许的条件下，都尽量给予说明。

对于现代爆破理论的最新发展，为便于问题的展开，采用分专题论述的方法。

本书在编写过程中一直得到童光煦教授的鼓励和帮助。谨致衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误之处，敬请指正。

编者

1995.10

目 录

第一章 现代爆破理论的发展	1
第一节 现代爆破理论的发展阶段	1
第二节 关于岩石爆破破碎主因的争论	3
第二章 早期的爆破理论	7
第一节 炸药量与岩石破碎体积成比例理论	7
第二节 C. W. 利文斯顿爆破漏斗理论	9
第三节 流体动力学理论	26
第四节 对早期爆破理论的评价	29
第三章 冲击波拉伸破坏理论	31
第一节 基本观点	31
第二节 代表人物——日野熊雄的论点	31
第三节 冲击波拉伸破坏理论的依据	52
第四节 对冲击波拉伸破坏理论的评述	55
第四章 爆炸气体膨胀压破坏理论	58
第一节 基本观点	58
第二节 代表人物——U. 兰格福斯的论点	58
第三节 代表人物——村田勉的论点	64
第四节 爆炸气体膨胀压破坏理论的依据	87
第五节 对爆炸气体膨胀压破坏理论的评述	88
第五章 冲击波和爆炸气体综合作用理论	90
第一节 概述	90
第二节 代表人物——Φ. A. 鲍姆的论点	91
第三节 代表人物——伊藤一郎的论点	94
第四节 代表人物——P. A. 帕尔逊的论点	110

第五节	代表人物——L. C. 朗的论点	113
第六节	代表人物——T. N. 哈根的论点	115
第七节	试验研究	123
第八节	现代爆破理论的要点	126
第六章	裂隙岩体的爆破理论	130
第一节	概述	130
第二节	岩体破碎的主要因素	133
第三节	岩体结构面对爆破的影响和控制	137
第七章	岩石动载特性及其对爆破效果的影响	154
第一节	动载荷的分类	154
第二节	岩石动载特性的试验研究方法	155
第三节	高速冲击载荷作用下的岩石动载特性	164
第四节	岩石动载特性对爆破效果的影响	173
第八章	计算机模拟爆破	182
第一节	概述	182
第二节	计算机模拟爆破的步骤(阶段)	183
第三节	典型爆破数学模型的介绍	192
第四节	计算机模拟爆破的成果与发展	220
第九章	用不确定模型解决爆破问题的实例	222
第一节	工程爆破中的不确定性及问题解	222
第二节	用模糊数学进行矿岩爆破性分区	223
第三节	用分形理论预测爆破块度的分布	227
附录	爆破理论发展年表	233
参考文献		236

第一章 现代爆破理论的发展

第一节 现代爆破理论的发展阶段

爆破理论作为一个学科，划分其发展的不同阶段，在时间上是很难划分清楚的。但是就发展过程来说，必然存在不同的发展阶段。随着炸药、起爆器材的发明和应用，爆破量测技术的进步以及相邻学科的发展，爆破理论的研究也经历了不同的发展阶段。即早期发展阶段；爆破理论的确定和发展阶段；现代爆破理论的最新发展阶段。

一、早期发展阶段

炸药何时用于爆破作业其说法不一，有记载可查的是：1232 年在中国蒙古与金的战争中使用了火药，称为“火箭”、“火球”、“火枪”，1415 年意大利国王贝利五世在对法战争中使用了坑道地雷。爆破用于矿山和土木工程作业则是在 17 世纪以后的事了。1613 年德国人马林（Marlin）、韦格尔（Weigel）在弗雷斯帕格（Freisberg）矿山首先用炸药掘进坑道，开创了爆破采矿的历史^[2]。应该说从炸药用于爆破作业起，人们就有了计算炸药量的方法，也就出现了早期爆破理论。直到 20 世纪 60 年代日野熊雄的冲击波拉伸破坏理论的出现，标志着早期爆破理论发展阶段的结束。这一阶段比较著明的理论有炸药量与岩石破碎体积成比例理论，L. W 利文斯顿爆破漏斗理论和流体动力学理论。

综观早期爆破理论的特点是，出现了炸药量计算公式，但

是对爆破过程并未作实质性的说明。

二、爆破理论的确立和发展阶段

这一阶段从 20 世纪 60 年代初日野氏提出冲击波拉伸破坏理论和 U. 兰格福斯 (Longfors) 等人提出爆炸气体膨胀压破坏理论开始, 到 70 年代 L. C. 朗 (L. C. Long) 明确提出爆破作用三个阶段为止, 历时十余年, 这一阶段的特征是:

(1) 冲击波拉伸破坏理论; 爆炸气体膨胀压破坏理论; 冲击波和爆炸气体综合作用理论已经确立。

(2) 在爆炸破坏主因是冲击波压力还是爆炸气体膨胀压方面展开激烈的争论, 在争论中各派都在不断完善和发展自己的观点。

(3) 争论的结果, 冲击波和爆炸气体综合作用理论, 爆破过程的三个阶段论逐步得到多数人的承认。

(4) 利用现代测量仪器, 例如高速摄影机进行的观测, 大大丰富和完善了爆破理论的内容, 初步揭示了破坏的本质现象。

三、现代爆破理论的最新发展阶段

现代爆破理论的最新发展阶段起始于 20 世纪 80 年代, 标志之一是有裂隙介质爆破机理的产生。随着实验技术和相邻学科的发展, 爆破理论和爆破技术呈现一派蓬勃发展的新景象。近年来举行的爆破破岩国际会议基本上代表了当代爆破技术发展的最新水平。迄今为止已召开了四届爆破破岩国际会议, 其地点和时间分别是:

瑞典吕勒欧 (Luleå, 1983.)

美国柯罗拉多 (Keystone, Colorado, 1987.)

澳大利亚布里斯班 (Brisbane, 1990.)

奥地利维也纳 (Vienna, 1993.)

纵观国内外研究现状，可以看出：这一阶段各学派虽然仍在不断完善自己的观点，但这已不是研究的主流，代表该阶段的主要特征是：

(1) 裂隙岩体爆破理论的深入研究和岩体结构面对岩石爆破的影响和控制。

(2) 岩石动载特性及其对爆破效果的影响。

(3) 计算机模拟和再现爆破过程，用以研究裂纹的产生、扩展；预测爆破块度的组成和爆堆形态；供计算机模拟用的爆破模型不断涌现。

(4) 一些新的思想，新的研究方法开始进入爆破理论的研究。例如把爆破过程视为一个复杂的系统工程，在研究方法上，利用 60 年代发展起来的系统工程、信息论、控制论和 70 年代发展起来的耗散结构论、协同论、突变论以及分形理论、非线性理论等。岩石破碎理论的研究开始了一个崭新的阶段。用不确定模型解决工程爆破问题已有可能。

总之，这一阶段爆破理论的研究更加实用化、计算机化和科学化。我国学者在这一阶段的研究中也取得了丰硕的成果，做出了有益的贡献。

第二节 关于岩石爆破破碎主因的争论

岩石爆破破碎的主要原因是冲击波拉伸破坏，还是爆炸气体膨胀压破坏，这种争论一直贯穿着爆破理论发展的整个过程。

50 年代以前，爆炸气体膨胀压破坏理论一直占主导地位。里查得·阿什博士 (Richardl. Ash) 根据石灰岩试验结果，经过大量的统计、分析认为：引起岩石弯曲、破碎的不是爆炸速度而是爆炸产生的大量气体。

进入 50 年代,以日野熊雄(1953 年)等人为代表的冲击波拉伸破坏理论认为:爆炸产生的冲击波(应力波),从炮孔孔壁开始向外传播,到达自由面后反射成拉伸波,使岩石拉断形成“片落”。从本质上讲,该理论认为,岩石的初始破坏和位移都是由于应力波和自由面相遇引起的。而爆炸气体的作用很小。在此期间,尽管爆炸气体膨胀压破坏理论仍然坚持:高温、高压的爆炸气体在孔壁产生初始裂隙,然后经准静态应力场和气体直接压缩作用,使裂隙一直发展到自由面,而应力波只对裂隙的扩展起作用。但是,冲击波拉伸破坏理论的声势较大,直到 1959 年,美国的 D. E. 弗吉尔逊(Fogelson)^[6]等人,根据在钻孔附近实测到的冲击波强度得出:冲击波能量约占猛性炸药总能量的 9% 左右以后,这给冲击波拉伸破坏理论一个有力打击,致使在以后 20 年内,虽然冲击波和爆炸气体综合作用理论占了上风,但多数学者仍认为在二者之中,爆炸气体的作用更大一些。

关于冲击波在工业炸药总能量的比重,一般都认为比较小。例如:U. 兰格福斯曾指出:对于一种猛性炸药,冲击能能量最多仅占炸药总能量的 5%~15%,但是,这只是从理论上推算出来的,而真正通过试验获得数据的首推 D. E. 弗吉尔逊。他测出:冲击波在钻孔四周均匀分布,对单一炮孔形成的漏斗破裂角为 120° 时,能量的 $2/3$ 以上浪费掉而没有起到破岩作用,这意味着在破裂角范围内仅有 30% 的炸药总能量起作用。

1968 年,日本京都大学伊藤一郎^[35]在总结日野氏冲击波拉伸破碎理论和村田氏拉伸主应力破坏理论的基础上,提出冲击波和爆炸气体二者在岩石破碎上均起作用的观点。与日野氏不同之处,认为爆炸气体膨胀压的作用更大一些。同时,

在爆炸气体促进裂隙发展方面又补充了村田氏的观点。

1970年瑞典学者P. A. 帕尔逊 (Persson)^[37]根据赖克希有机玻璃的模型试验指出, 台阶爆破和漏斗爆破机理是截然不同的, 应分别讨论。在台阶爆破中, 岩石破碎是冲击波和爆炸气体综合作用的结果, 但是更强调后者的作用。

1971年美国H. K. 卡特尔 (Kutter) 和C. 费尔赫斯特 (Fairhurst) 以及J. E. 菲尔德 (Field)^[7], A. 洛德加德-佩德森 (Lodegard-Pederson) 根据有机玻璃模型和小型均质岩石模型所做的试验, 获得很有意义的结论。H. K. 卡特尔和C. 费尔赫斯特的结论要点是:

(1) 炸药在破碎岩石时, 应力波和爆炸气体压力均起作用。

(2) 应力波先使岩石在孔壁处发生径向裂隙 (受拉)。

(3) 爆炸气体膨胀压使裂隙增压并扩展裂隙。

(4) 先期存在的裂隙 (此时径向裂隙在孔壁处开始) 在应力作用下再激发, 裂隙扩展的数量反比于先期裂隙的长度。

(5) 在老裂隙占据的地方不会形成新裂隙。

(6) 自由面的存在有利于气体增压型径向裂隙向自由面方向延伸。

(7) 现场的应力状态强烈影响着径向裂隙传播方向。

J. E. 菲尔德, A. 洛德加德-佩德森^[8]研究了均匀模型中反射拉伸波对裂隙扩展的影响, 他们提出的论点如下:

(1) 反射应力波影响径向裂隙成长的方向以及裂隙长度。

(2) 反射波的相互作用可以解释岩石集中装药所造成的破碎角。

(3) 利用自由面的几何形状来控制应力波的相互作用, 或者利用相邻炮孔的间距和起爆时间来控制应力波的相互作

用，具有一定的实际意义。

1972年加拿大工业有限公司(CIL)的L.C.朗(Long)和R.F.法夫罗(Favrean)^[38]在CIL74届年会上发表了“露天矿爆破设计和参数分析的新方法”论文。他们认为：U.兰格福斯，C.W.利文斯顿；美国矿业局，M.A.库克和P.A.帕尔逊的观点很有代表性。在充分研究了他们的观点后，提出了气体膨胀、应力波、应力波/裂隙和反射的综合理论。明确指出爆破过程分为三个阶段，这在相当长的一段时间内成为爆破界的流行观点。

1973年国际炸药集团澳大利亚有限公司高级工程师T.N.哈根(Hagan)^[39]在国家岩石破碎会议上发表演讲认为：炸药爆炸时，炮孔周围的岩石在爆轰过程中受到多种载荷的综合作用，包括：冲击波产生和传播引起的动荷载；爆炸气体形成的准静荷载和岩石移动及瞬态应力场张弛导致的荷载释放。提出爆破过程中有五种破坏模式起重要作用，成为当今爆破理论的基础，为我国众多学者所引用。

1978年美国马里兰大学等开始研究裂隙岩体的爆破理论，冲击波拉伸破坏理论又有所抬头。他们认为：对于裂隙岩体来说，应变波到达岩体自由面的同时，初始碎块尺寸已被确定，应变波不是使岩石发生“片落”，而是通过岩体裂隙激发出新的裂隙或促使原有裂隙的扩大。在此之后，剩余的应变能变为岩体破碎的动能。上述作用过程发生在气体膨胀作用之前。

进入80年代以来，爆破理论进入最新发展阶段，两种观点的争论仍然没有结束。估计这种争论还要进行相当一段时间。

第二章 早期的爆破理论

第一节 炸药量与岩石破碎体积成比例理论

一、标准药包的抛掷计算原理

该理论的物理实质是位于岩石内部的炸药能量所克服的阻力，主要是介质本身的重力。重力值的大小与爆破后产生的爆破漏斗体积成正比。应用此原理导出

$$Q = q \cdot V \quad (2-1)$$

式中 Q ——炸药量，kg；

q ——单位体积岩石的炸药消耗量，kg/m³；

V ——爆破漏斗体积，m³。

在实际爆破时，由于崩落的岩石体积难以精确计算，故常用最小抵抗线的立方表示。

在标准抛掷爆破条件下，

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 \cdot W$$

式中 r ——爆破漏斗底圆半径，m；

W ——最小抵抗线，m；

V ——爆破漏斗体积，m³。

$\because r=W, \therefore V=W^3$ 则

$$Q = q \cdot W^3 \quad (2-2)$$

式中 Q ——标准抛掷爆破的装药量；kg。

由上式看出：(1) 药包的重量与岩石体积成正比。(2) 单