

力学与爆破

齐世福, 龙 源, 岳小兵, 王希之

(中国人民解放军理工大学工程兵工程学院野战工程系, 江苏 南京 210007)

摘 要: 本文通过分析力学对于爆破的形成和发展所起的作用及力学在爆破中的地位, 介绍了力学在爆破理论的研究和爆破技术设计中的应用现状及其趋势, 阐明了力学与爆破技术的关系。从爆破的形成和发展、爆破理论的研究内容、爆破技术的设计方法及爆破的实践证明, 爆破理论的研究和爆破技术的设计, 就是力学对于“炸药爆炸与爆破对象相互作用”这样一个复杂而特殊研究系统的具体运用。因此, 力学在爆破理论研究和爆破技术设计中占有特殊而重要的地位, 它对于现代爆破技术的形成和发展起了重要作用。可以说, 没有力学, 就没有现代的爆破技术。但是, 由于爆炸过程的瞬时性、爆破介质的复杂性、炸药性能的易变性和爆破参数的多样性, 对爆破这样一个复杂系统的深入研究, 仅靠经典力学方法至少在目前尚不能完全解决其复杂问题, 还需要引入一些新思想和新方法, 即使这样, 力学在其研究中的作用和地位仍是主要的。

关键词: 力学; 爆破理论; 爆破技术

Mechanics and Blasting

QI Shi-fu, LONG Yuan, YUE Xiao-bing, WANG Xi-zhi

(Department of Field Engineering EIEC, PLAUST, Nanjing 210007 China)

Abstract: This paper has analyzed the effect of mechanics on the formation and development of blasting and its status in blasting, introduced the current application and tendency of mechanics to blasting theoretical research and technological design, clarified the relationship between mechanics and blasting. The formation and development of blasting, research contents of blasting theory, design methods of technology and blasting practice have proved that blasting research is the application of mechanics to a special and complex blasting system called “the interaction between explosive and objects”. Mechanics is very important in blasting theory and blasting design, which is also very important to the development of modern blasting technology. So no mechanics, no modern blasting technology. Because of the instantaneousness of blasting process, complexity of medium, changeability of explosive performance and diversity of

blasting parameters, it is impossible to solve all the difficult problems by only classic mechanics currently, and new thinking and new methods must be introduced to study blasting system further. Even so, mechanics is primary in the research.

Key words: mechanics; blasting theory; blasting technology

1. 爆破在发展的最初阶段就受到了力学的推动作用

爆破是利用炸药在爆炸瞬间释放出的巨大能量（以爆炸冲击波和高温高压气体等形式出现），破坏炸药周围的介质，加快工程作业速度或破坏军事目标、杀伤敌有生力量的一种技术，也是一门有待于不断探索和发展的边缘学科。

收稿日期：2001-03-23

作者简介：齐世福，地爆教研室副教授；龙源，地爆教研室教授。

爆破的能源是炸药，而最早的炸药是黑火药。黑火药是我国古代四大发明之一，它的发明和应用是人类将化学能转化为机械能的伟大创举。我国远在 9 世纪的唐代（公元 808 年）就首先发明了完整的黑火药配方，在宋代已经作为燃烧性武器应用在军事上，此后则由燃烧武器发展到爆炸武器和射击武器。公元 1277 年，南宋抵抗元兵时使用了“大火炮”，《武经总要》中记载的其爆炸效应为“爆炸声如雷霆，烟气漫天，城墙皆塌”，这表明当时的爆炸威力已能破坏具有部分砖、石结构的城墙，且达到了一定的规模。据河北唐县志记载，明万历 24 年（公元 1596 年）采矿时，“用火爆炸裂”、“使山灵震裂”、“鸟惊兽骇”，可见我国将黑火药用于土岩爆破俄国人在 1627 年用巷道掘进要早 30 年。13 世纪中叶，黑火药由阿拉伯国家传至欧洲，17 世纪初，西欧、北美一些国家相继用黑火药进行爆破作业；1627 年，匈牙利第一次把黑火药用于岩石爆破，与原来的燃烧法破裂岩石相比较，黑火药爆破岩石的效率有了很大提高。黑火药虽然作为军事和民用工程中独一无二的爆破能源，一直使用到 19 世纪 70 年代中期，延续了数百年之久，但是，由于在此期间爆破的应用缺乏科学的理论依据，亦没有现代的爆破器材和技术，因此，爆破的范围、规模 and 效果都极为有限。

18 世纪后期至 19 世纪中期，由于西方化学工业的发展，一些猛炸药相继出现，为现代爆破技术的形成和发展奠定了物质基础。特别是在 18 世纪后期，瑞典科学家诺贝尔（Nobel）不仅发明了猛炸药硝化甘油，而且于 1867 年发明了雷管，并用雷管引爆硝化

甘油获得了高速爆轰现象，开创了应用猛炸药的新时代。同时，在此期间的经典力学已成熟和完善，并运用到爆破理论研究与技术设计中，为现代爆破技术的形成和发展奠定了理论基础，从而大大地推动了爆破技术的发展。从此，爆破在军事上和民用工程中的应用日趋广泛。在第一次世界大战、特别是第二次世界大战期间，交战国双方在军事上均大量地运用了爆破手段，如爆破碉堡之类的野战工事、铁丝网、桥梁、铁道线、舰船、坦克和建筑物等；在此期间，对于各种材料的爆破已有了完善的计算公式；装药在空气中、水中和固体介质中的爆炸力学理论亦有了很大提高。大量的工程实践证明，爆破作为工程施工中的一种特殊手段，可以完成人力或机械难以完成的工程项目。因此，力学对于现代爆破技术的形成和发展起到了重要作用。

20 世纪中期后，随着科学技术的进步、国民经济的发展和现代战争的需求，爆破技术有了很大发展。适合于现代爆破发展需要的新器材、新理论和新技术不断涌现，并广泛应用于军事工程和公路、铁路、水利、能源、矿山、城市改扩建及其它基础产业部门，解决了许多难度大、技术要求高的工程问题。爆破的这些巨大进步和发展，同样离不开力学在其中发挥的重要作用。目前，工程爆破技术已成为国民经济和国防建设中不可缺少的特种行业，为加速国民经济建设发挥了极其重要的作用。

2. 力学在爆破理论研究中的应用

爆破理论就是研究炸药爆炸与爆破对象（介质）相互作用规律的有关理论。对于内部爆破（装药置于爆破对象内部），例如岩土爆破，就是研究炸药在岩土介质中爆炸后的能量利用及其分配，也就是研究炸药爆炸产生的冲击波、应力波、地震波在岩土中的传播和由此引起的介质破坏规律，以及在高温高压爆生气体作用下介质的进一步破坏及其运动规律；对于外部爆破（装药与爆破对象之间有一定距离），例如军事上采用的接触或非接触构件爆破，就是研究炸药爆炸后产生的冲击波在传播过程中与目标的相互作用以及由此引起的爆破目标的破坏及其运动规律。它是一个复杂而特殊的研究系统。要阐明爆炸的历程、机理和规律，应包括以下研究内容：

（1）爆破的介质在什么作用力下破坏的；破坏的规律及其影响因素；

（2）爆破介质的特性，包括目标（岩土）的结构、构造特征、动态力学性质及其对爆破效果的影响；

(3) 爆炸能量在介质中传递过程;

(4) 介质的动态断裂特性与破坏规律;

(5) 介质破碎的块度及碎块分布、抛掷和堆积规律;

(6) 空气冲击波与爆破地震波的传播规律、个别爆破碎块的飞散距离; 以及由冲

击波、地震波、个别飞石、爆体的落地震动等引起的爆破危害效应及其控制

技术。

同其它学科对事物的认识规律一样, 对爆破理论的研究也是由浅入深的。不同学者先后提出了各种各样的假说或理论, 例如, 最初提出了克服岩石重力和摩擦力的破坏假说, 以后又相继提出了自由面与最小抵抗线原理, 爆炸流体力学理论, 最大压应力、剪应力、拉应力强度理论, 冲击波、应力波作用理论, 反射波拉伸作用理论, 爆生气体膨胀推力作用理论, 爆生气体准静楔压作用理论, 应力波与爆生气体共同作用理论, 能量强度理论, 功能平衡理论, 爆破漏斗理论和爆破断裂力学等等理论。这些理论观点各异, 有些相互矛盾, 有些互相渗透, 多数不够全面, 存在片面性, 而且这些理论大部分视爆体为连续均匀的介质, 与实际情况不符。目前, 在爆破界比较倾向一致的是“爆炸冲击波、应力波与爆生气体共同作用”理论, 而且开始以爆体为非连续性非均匀性介质进行研究, 从而能提高理论研究的深度, 使理论结果比较接近实际。以岩石爆破为例, 大量实验室和现场试验证明, 岩体的爆破破碎有以下规律: (1) 应力波不仅使岩石的自由面产生片落, 而且通过岩体原生裂隙激发出新的裂隙, 或者促使原生裂隙进一步扩大, 在应力波传播过程中, 岩体破碎的特点是: 原生裂隙的触发、裂隙生长、裂隙贯通、岩体破裂或破碎; (2) 加载速率对裂隙的成长有很大作用: 作用缓慢的荷载有利于裂隙的贯通和形成较长的裂隙, 而高速率的荷载容易产生较多裂隙, 但却拟制了裂隙的贯通, 只产生短裂隙; (3) 爆破高压气体对裂隙岩体的破碎作用很小, 但它有应力波不可替代的作用: 可以使由应力波破裂了的岩体进一步破碎和分离; (4) 岩体的结构面(岩体弱面的统称)控制着岩体的破碎, 它们远大于爆破作用力直接对岩体的破坏。包括节理、裂隙、层理等各种界面。因此, 目前对爆破理论的研究情况与爆破实际比较吻合。

从上述研究内容和研究成果不难看出, 对于爆破理论的研究, 除需要爆炸力学、岩石

力学、钢筋混凝土理论及数学等学科专业理论外，也必然包括材料力学、理论力学、结构力学、流体力学、弹性力学、弹塑性力学、粘弹塑性力学和近年来发展起来的断裂力学和损伤力学（后两门力学与经典力学不同，前者考虑了爆体的原有裂隙，后者则考虑了爆体的细微观缺陷，这与岩石或钢筋混凝土多裂纹脆性介质相吻合）的相关知识。甚至可以说，对爆破理论的研究，就是力学对于“炸药爆炸与爆破对象相互作用”这样一个复杂而特殊研究系统的具体运用，首先研究爆体的力学特性，进而研究爆体在爆炸荷载作用下发生破坏的规律（以应力、应变、位移、冲量、能量等力学参数进行分析并作为破坏判据）。由此可见，力学在爆破理论的研究中的地位是何等重要。当然，需要说明的是，由于研究系统的复杂性、模糊性、不确定性及介质的不均匀性，利用传统力学知识研究需要作若干简化，这样就必然带来一些误差，甚至不完全符合实际，而且用上述传统力学所建立的确定性计算模型（Deterministic Model）难以表征爆破中大量存在的不确定性复杂问题。爆破系统的复杂性、模糊性、不确定性及介质的不均匀性主要表现在以下方面：（1）爆体（如岩石、钢筋混凝土等）本身具有不均匀性，其力学性质非常复杂。对于复杂裂隙系统的分布问题，在理论上讲，只要采用足够多的测点其精度是可以解决的，但由于爆体出露条件的限制，使人们难以对其系统的几何参数进行系统的确定性描述；（2）有限的试验数据难以覆盖分布极不均匀的整体过程特性；（3）爆破工程的模糊性、随机性导致计算结果的不确定性。影响爆破效果的因素是多方面的，包括爆体结构、性质、炸药性能、爆破参数等等，由于爆体的复杂性、炸药参数的易变性和爆破参数的多样性就使赖以上述参数建立的计算模型产生极大的不确定性，导致测量、计算精确性与岩体性状等因素客观判断的模糊性、随机性之间的矛盾更加突出。

为了使理论更加符合实际，目前在爆破理论的研究中已引入了一些新思想、新方法，例如把爆破过程视为一复杂的系统工程，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；70 年代发展起来的耗散结构论、突变论及非线性理论等；80 年代发展起来的数值方法（Numerical Method (NM)）和中国留美学者石根华博士提出的非连续变形分析法（Discontinuous Deformation Analysis (DDA)），同时引入概率论与数理统计、模糊数学、灰色系统、分形几何（Fractal Geometry）等不确定性模型（Vn-Deterministic Model）理论，使爆破理论的研究更趋科学化、实用化和计算机化，从而将减少宏观判断中的人为因素影响，使理论与实际相吻合。即使这样，力学在其研究中的作用和地位仍是主要的。

3. 力学在爆破技术中的应用举例

爆破技术种类颇多，限于篇幅，兹举建筑物拆除控制爆破新技术一例，介绍力学在爆破技术中的应用状况。建筑物拆除控制爆破较之其它类型爆破（如土石爆破）难度最大，力学分析最为复杂。因此，以建筑物控制爆破拆除时失稳、倒塌过程的力学分析来说明力学在爆破技术中的应用情况极具代表性。

拆除控制爆破就是利用炸药爆炸释放的能量破坏建筑物的关键受力构件（部位），使其失去承载能力，在建筑物自身重力作用下整体失稳、倒塌、触地破坏。所谓控制是指对倒塌方向、破坏范围、破碎程度和爆破危害效应的控制。这种方法安全、快捷，是目前建筑物拆除的主要方法，它已成为全球建筑（城市改扩建）行业和爆破界的热门话题。国外用此方法拆除的最高大建（构）筑物是巴西圣保罗市 32 层的钢筋混凝土大楼和南非 270m 高的钢筋混凝土烟囱；国内拆除的最高大建（构）筑物是武汉高 56m 的 18 层大楼（新建，因质量问题拆除）和上海高 68m 的 18 层的长征医院病房楼以及茂名、鞍钢的三座高 120m 的钢筋混凝土烟囱。

对建筑物控制爆破拆除时失稳、倒塌过程的力学分析现状，主要有以下几点：

（1）确定钢筋混凝土建筑物承载立柱的失稳条件和最小破坏高度是拆除控制爆破设计的重要内容之一。通常采用的是力学中传统的压杆稳定原理，将承载立柱爆破后裸露钢筋部分视作单根主筋的压杆，通过计算临界失稳应力的方法确定立柱的最小破坏高度。

（2）按照压杆失稳的思路，建立小型钢架失稳模型，将承载立柱爆破后裸露钢筋骨架部分视作一个小型钢结构，按照基于结构力学钢架失稳的计算方法确定立柱的最小破坏高度。

（3）国内外许多学者还用平面杆系结构有限元法和结构力学中的直接刚度法计算在爆破前后的内力分布，并力图完成建筑物拆除爆破的辅助设计。

（4）对建筑物的倒塌过程，一是利用有限元法和离散元法（DEM）对倒塌过程进行模拟，以确定爆破切口位置、爆破顺序及其起爆先后的时间差对倒塌的影响；二是采用不连续变形分析法（DDA）对倒塌过程进行数值模拟，该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，将建筑物失稳、倒塌过程视为结构由连续变形过程到非连续变形过程的变形问题。日本一学者利用 DDA 法在研究钢结构解体时认为，钢结构倒塌是弹塑性领域的动态大变形现象，因此应研究以下问题：对主要构件作弹性阶段的静力分析，核查塑性铰预定发生部位的应力；对主要构件进行弹塑性阶段的静力分析，求出结构的极限荷载，研究倒塌的确定性；研究钢结构发生大变形时力与位移的

关系；对倒塌过程的各阶段进行模拟。

（5）通过高速摄影机记录建筑物倒塌的全过程，并用数字化仪将摄得的标志点位置信息输入计算机，绘制成 t （时间）— r （位移）、 $t-v$ （速度）图，进而计算出结构的势能、动能、总能量、建筑物爆破高度处的上部作用力和塌落荷载。

目前，对建筑物拆除爆破失稳和倒塌过程的研究趋势为：

（1）突破传统的主要承载结构失稳原理，代之以从建筑物空间整体结构出发，分析倒塌过程四个阶段（自由下落、旋转倾倒、空间解体、塌落堆积），研究结构由一个几何不可变体系转变为几何可变体的发生、发展过程，以崭新的观点阐明结构失稳倒塌原理。

（2）突破传统的针对建筑物局部结构和单一结构破坏失稳的设计方法，用整体概念来考虑结构的总体方案，并充分利用结构总体与各分体系之间的力学特征和关系，采用概念性的近似计算方法，对结构体系进行比较和选择，迅速确定最佳爆破方案和结构失稳参数。

（3）研究建立结构倒塌过程所产生的地震波和落体对地面冲击力的计算方法，并以计算机模拟方法再现结构倒塌过程及其爆破效果。

4. 结语

（1）从爆破的形成和发展、爆破理论的研究内容、爆破技术的设计方法及爆破的实践证明，力学对于现代爆破技术的形成和发展发挥了重要作用。可以说，没有力学，也就没有目前的现代爆破技术。

（2）力学在爆破理论研究和爆破技术设计中占有特殊而重要的地位。甚至可以说，对爆破理论的研究和爆破技术的设计，就是力学对于“炸药爆炸与爆破对象相互作用”这样一个复杂而特殊研究系统的具体运用，首先研究爆体的力学特性，进而研究爆体在爆炸荷载作用下发生破坏的规律（以应力、应变、位移、冲量、能量等力学参数进行分析并作为破坏判据），以此了解爆破的机理和爆破的过程，并在此基础上再进一步确定有关爆破参数。

（3）由于爆炸过程的瞬时性、爆体（介质）的复杂性、炸药参数的易变性和爆破参数的多样性，对爆破这样一个复杂系统的深入研究，仅靠经典力学方法至少在目前尚不能完全解决其复杂问题。尽管目前在爆破理论的研究和爆破技术的设计中已引入一些新思

想和新方法，即使这样，力学在其研究中的作用和地位仍是主要的，是其它学科所不能完全替代的。

参 考 文 献

- 1 林学圣. 土石爆破[M]. 工程兵工程学院（内部）. 1995.
- 2 阎家良. 结构物爆破[M]. 工程兵工程学院（内部）. 1996.
- 3 吴腾芳. 爆破器材与起爆技术[M]. 工程兵工程学院训练部（内部）. 1991.
- 4 A. H. 哈努卡耶夫著. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中译. 冶金工业出版社. 1980.
- 5 T. N. 波克罗夫斯基著. 在变形介质中冲击与爆破作用[M]. 刘清荣译. 中国工业出版社. 1965.
- 6 U. 兰格福斯著. 岩石爆破现代技术[M]. 冶金工业出版社. 1983.
- 7 中国力学学会编. 第二届土岩爆破学术会议论文详细摘要汇编. 1982.