

安全工程系列教材

中国地质大学“十五”规划教材  
中国地质大学“211工程”专项资助教材

吴立 闫天俊 周传波 编著

凿

# 岩爆破工程

中国地质大学出版社

TD23  
W-479

中国地质大学“十五”规划教材

中国地质大学“211 工程”专项资助教材

# 凿岩爆破工程

吴 立 闫天俊 周传波 编著

中国地质大学出版社

# 前 言

本书为土木工程专业地下建筑工程方向本科生的教学用书，主要作为土木工程专业地下建筑工程方向本科生“凿岩爆破”（50~60 学时）课程的教材，也可作为本专业的研究生和工程技术人员的参考书。

随着科学技术的迅猛发展，近年来出现了许多凿岩爆破的新理论、新技术和新方法。为了使能够掌握和适应这些凿岩爆破的新理论、新技术和新方法，本教材在原校内教材《凿岩爆破》（张时忠、吴立编写，1995）的基础上进行了重新编写，重新编排了章节，主要包括：岩石的物理力学性质及工程分级、凿岩方法、凿岩工具、炸药爆炸的基本理论、工业炸药、岩石的爆破作用机理、起爆器材和起爆方法、炮眼爆破、预裂爆破和光面爆破、硐室爆破、爆破安全技术和爆破测试技术等。本书除包括经典的凿岩爆破理论与技术方法外，增加了岩石静载、动载变形特性、凿岩新方法和拆除控制爆破、水压控制爆破等内容。为了便于学生课下思考和复习，本教材每章均配有一定数量的思考题。与其它同类教材相比，本书既包括凿岩爆破的理论又含有凿岩爆破的实用技术。所以，理论与实践并重和实用性强是本教材的主要特点。

本教材由绪论部分和十六章内容组成。绪论由吴立编写；第一、三、四章由闫天俊编写；第二章由闫天俊、吴立编写；第五、六、七、八、九、十、十一、十二章由吴立编写；第十三、十四、十六章由周传波编写；第十五章由周传波、吴立编写。

全书由吴立统编，由陈建平教授主审。

全书的所有图件由硕士研究生谢其勇绘制；硕士研究生吴张中、樊炼、叶小波参加了部分文字的输入工作；硕士研究生谢其勇、吴张中参加了校对工作。

限于笔者的水平，书中难免存在错误和不当之处，竭诚希望读者不吝赐教。

笔 者  
2004 年 6 月

# 目 录

|                    |      |
|--------------------|------|
| 绪论                 | (1)  |
| 第一章 岩石的物理力学性质及工程分级 | (6)  |
| 第一节 概述             | (6)  |
| 第二节 岩石和岩体的基本概念     | (6)  |
| 第三节 岩石的物理性质        | (7)  |
| 第四节 岩石的变形特性        | (8)  |
| 第五节 岩石的强度特性        | (13) |
| 第六节 岩石的可钻性、爆破性及坚固性 | (17) |
| 第七节 岩石分级和围岩分类      | (19) |
| 思考题                | (25) |
| 第二章 凿岩方法           | (26) |
| 第一节 概述             | (26) |
| 第二节 机械式凿岩方法        | (26) |
| 第三节 新型岩石破碎方法简介     | (28) |
| 思考题                | (31) |
| 第三章 凿岩工具           | (32) |
| 第一节 浅眼凿岩工具         | (32) |
| 第二节 深孔凿岩工具         | (38) |
| 第三节 凿岩生产率          | (41) |
| 思考题                | (44) |
| 第四章 冲击凿岩破碎理论       | (45) |
| 第一节 概述             | (45) |
| 第二节 冲击凿岩的能量形式      | (46) |
| 第三节 冲击凿岩能量的传递规律    | (48) |
| 第四节 冲击凿岩的岩石破碎机理    | (54) |
| 思考题                | (60) |
| 第五章 炸药爆炸的基本理论      | (61) |
| 第一节 爆炸及炸药的一般特征     | (61) |
| 第二节 炸药的起爆与感度       | (66) |
| 第三节 炸药的爆轰原理        | (74) |
| 第四节 炸药的氧平衡与热化学参数   | (85) |
| 第五节 炸药的爆炸性能        | (91) |
| 第六节 炸药的聚能效应        | (94) |
| 思考题                | (97) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>第六章 工业炸药</b> .....       | (98)  |
| 第一节 概述.....                 | (98)  |
| 第二节 单质炸药.....               | (99)  |
| 第三节 粉状硝酸类炸药.....            | (101) |
| 第四节 含水硝酸类炸药.....            | (103) |
| 第五节 其它工业炸药.....             | (107) |
| 第六节 燃烧剂与静态破碎剂.....          | (109) |
| 思考题.....                    | (110) |
| <b>第七章 起爆器材和起爆方法</b> .....  | (111) |
| 第一节 概述.....                 | (111) |
| 第二节 工业雷管.....               | (111) |
| 第三节 索状起爆材料.....             | (118) |
| 第四节 非电起爆法.....              | (123) |
| 第五节 电力起爆法.....              | (128) |
| 第六节 发展中的新型起爆方法.....         | (136) |
| 思考题.....                    | (137) |
| <b>第八章 岩体爆破作用机理</b> .....   | (138) |
| 第一节 概述.....                 | (138) |
| 第二节 岩体内的爆炸冲击波和应力波.....      | (138) |
| 第三节 岩体的爆破破碎机理.....          | (144) |
| 第四节 单个药包的爆破作用.....          | (145) |
| 第五节 成组药包的爆破作用.....          | (154) |
| 第六节 装药量计算原理.....            | (156) |
| 第七节 影响爆破作用的因素.....          | (158) |
| 思考题.....                    | (166) |
| <b>第九章 炮眼爆破</b> .....       | (167) |
| 第一节 概述.....                 | (167) |
| 第二节 隧道掘进中的炮眼爆破.....         | (167) |
| 第三节 小台阶爆破.....              | (176) |
| 思考题.....                    | (180) |
| <b>第十章 露天深孔爆破</b> .....     | (181) |
| 第一节 露天深孔的布置及爆破参数的确定.....    | (181) |
| 第二节 深孔微差爆破.....             | (186) |
| 第三节 深孔挤压爆破.....             | (188) |
| 第四节 装药结构与爆破网路敷设.....        | (189) |
| 思考题.....                    | (190) |
| <b>第十一章 预裂爆破和光面爆破</b> ..... | (191) |
| 第一节 预裂(光面)爆破的作用机理.....      | (191) |

|      |                  |       |
|------|------------------|-------|
| 第二节  | 预裂爆破             | (193) |
| 第三节  | 光面爆破             | (198) |
|      | 思考题              | (204) |
| 第十二章 | 硐室爆破             | (205) |
| 第一节  | 概述               | (205) |
| 第二节  | 爆破抛掷作用原理         | (205) |
| 第三节  | 布药设计             | (210) |
| 第四节  | 施工设计             | (218) |
| 第五节  | 爆堆尺寸估算           | (221) |
| 第六节  | 地形地质条件对爆破作用的影响   | (224) |
|      | 思考题              | (229) |
| 第十三章 | 钻眼拆除爆破           | (230) |
| 第一节  | 概述               | (230) |
| 第二节  | 钻爆参数和装药量计算       | (234) |
| 第三节  | 工程实例             | (239) |
|      | 思考题              | (246) |
| 第十四章 | 水压爆破             | (247) |
| 第一节  | 概述               | (247) |
| 第二节  | 水压爆破的特点和原理       | (247) |
| 第三节  | 水压爆破参数的计算        | (248) |
| 第四节  | 水压爆破在城市构筑物拆除中的应用 | (253) |
| 第五节  | 水压爆破在岩土和矿山工程中的应用 | (255) |
|      | 思考题              | (258) |
| 第十五章 | 爆破安全技术           | (259) |
| 第一节  | 爆破安全与爆破安全规程      | (259) |
| 第二节  | 外来电流的预防          | (262) |
| 第三节  | 爆破地震效应的预防        | (266) |
| 第四节  | 爆炸空气冲击波的预防       | (268) |
| 第五节  | 飞石和有毒气体的预防       | (269) |
|      | 思考题              | (271) |
| 第十六章 | 爆破测试技术           | (272) |
| 第一节  | 爆破地震效应的观测        | (272) |
| 第二节  | 爆炸空气冲击波的测试       | (277) |
| 第三节  | 外来电的测试           | (277) |
| 第四节  | 爆破作用过程的高速摄影观测    | (280) |
|      | 思考题              | (281) |
|      | 主要参考文献           | (282) |

# 绪 论

## 一、 凿岩爆破在国民经济建设中的作用和意义

凿岩爆破法以其施工机具结构简单、轻便灵活、操作容易、维修方便、耗能少、效率高,而广泛应用于国民经济建设的许多领域,例如矿山部门的露天开采和地下巷道的掘进及矿石开采;水利部门的定向爆破筑坝;交通部门的路堑爆破、填筑路堤和软土、冻土地带的爆破、水下炸礁、疏通航道和 underwater 码头压实软土以及堤坝地基处理的水下爆破;石油化工部门埋设地下管道和过江管道以及处理油井卡钻事故的爆破等等,都要经常使用爆破的方法。我国的“六五”期间,许多厂矿企业进行了改建、扩建和拆迁,许多城市也进行了改建和扩建,拆除控制爆破技术的应用得到了空前的发展,不仅成功地把过去危险性大的爆破作业由野外安全可靠地引入到了人口密集的城镇,更重要的是创造了许多新技术、新工艺和新经验。近年来,由于凿岩机具和爆破器材的发展,爆破技术得到了迅速的提高,出现了许多凿岩新方法和爆破新技术,应用范围也不断扩大,例如利用炸药爆炸原理在机械工业部门加工处理机械零部件的爆炸加工方法和医学上的爆炸破碎膀胱结石的方法。

新中国成立后,凿岩爆破技术在我国矿山采掘、铁路(公路)修筑、农田水利建设等国民经济基础建设的恢复和发展中立下了汗马功劳;改革开放以来,我国凿岩爆破科技事业获得了蓬勃发展。特别是近十年来,与工程建设项目紧密结合,凿岩爆破技术在三峡工程、青藏公路、西气东输工程、城市建设及其它基础建设项目中发挥着重要作用。同时,我国在起爆器材、乳化炸药、硇室爆破、城市拆除控制爆破等分支领域的科技成果和发展水平已跻身于国际先进行列;向国外出口技术和产品,在国外建设工厂、承接工程,直接参与国际市场竞争,受到国际同行的广泛关注。

总之,凿岩爆破技术的应用渗透到了国民经济建设的许多领域,为社会主义经济建设做出了巨大的贡献。

## 二、 凿岩爆破技术的发展历史

人类利用凿岩爆破的方法进行生产实践活动的历史久远。

在爆破器材方面,早在公元7世纪到9世纪,我国就发明了黑火药,人类从此知道了“爆炸”。南宋时期,黑火药被首次应用于战争;13世纪黑火药传入欧洲;17世纪匈牙利人首先将黑火药用于采矿业,从此出现了“爆破”。此后西欧人发明了硝化甘油、梯恩梯、黑索金等多种后来叫做猛炸药的物质,由于没有可靠的起爆手段,军事上和工业上都难以有效利用。直到1867年,瑞典人诺贝尔同时发明了雷管和工业硝化甘油炸药,从此揭开了现代工业炸药的序幕,带动了爆破技术的飞速发展。20世纪中叶,爆破规模的不断扩大和爆炸工艺的多样化,刺激了爆破器材的快速发展;爆破器材的快速发展又推动了爆破和爆炸工艺的巨大进步。我国在20世纪60年代生产出了浆状炸药,以后又陆续生产了露天岩石炸药、煤矿安全



炸药、高威力铵梯炸药和抗水岩石炸药及段发雷管。20 世纪 60 年代末, 由于梯恩梯供应紧张, 开始开发无梯露天炸药, 如铵油炸药、铵沥蜡炸药、铵松蜡炸药和铵黑炸药及毫秒雷管等。20 世纪 70 年代, 我国开始引进研制乳化炸药和水胶炸药等含水炸药, 因不含梯恩梯, 爆破炮烟浓度低, 生产使用安全, 抗水性能好而迅速发展。因此, 有的学者总结出了 20 世纪爆破器材的五大发明: 电和非电毫秒延时起爆系统、硝铵基炸药及其含水衍生品种系列炸药、不偶合装药、塑性薄膜炸药、无起爆药雷管。固体火焰理论促进了微气体产物的毫秒延时药剂的诞生; 管道效应导致了非电导爆管和不偶合装药的发明; 表面化学和表面物理学的进展演化出了抗水硝铵类炸药; 爆燃转为爆轰的研究成果促进了无起爆药雷管的构思。电和非电延时起爆系统的先后发明, 成为大规模群药包依序爆破的开端, 同时又成为减轻爆破地震、冲击波等有害效应的有力工具; 抗水起爆器材和抗水炸药是软基处理和各种水下爆破工程的可靠手段; 比硝化甘油安全、便宜得多的硝铵基炸药及其含水衍生品种的发明为实施上述爆破奠定了坚实的基础; 塑性、薄层或聚能装药是爆炸成型、复合、穿孔、切割、表面硬化和消除残余应力的动力。无起爆药雷管的问世则根本改善了雷管造、存、运、用的安全性, 并为根治起爆药的生产污水提供了保证。目前, 我国共有爆破器材生产厂家 400 多家。

在凿岩机具方面, 1813 年英国人制造了以蒸汽为动力的冲击式凿岩机; 1857 年意大利人制作了以压缩空气为动力的凿岩机; 1920 年英国人研制成功了液压凿岩机。我国于 1970 年试制成功了第 1 台液压凿岩机, 20 世纪 80 年代制造出了用于中小断面的液压凿岩台车, 20 世纪 90 年代试制成功了轻型液压凿岩机。

在凿岩工具方面, 1938 年德国人发明了碳化钨凿岩钎头; 1951 年美国休斯公司研制成功了球齿钎头。我国 1951 年试制成功了硬质合金钎头。

在凿岩爆破理论研究方面, 1907 年出现了以静力学为基础的乌斯宾斯基理论; 20 世纪 50 年代开始, 弹性力学、光弹实验等理论和实验方法应用于凿岩爆破理论; 20 世纪 60 年代, 应力波理论逐渐成为分析凿岩爆破问题的主流理论。

20 世纪中叶, 风动、液压凿岩机和硬质合金钻头的发展, 极大地提高了凿岩效率; 与爆破器材的进步相配合, 使万吨级硐室群药包一次爆破  $1\,300\text{万 m}^3$  岩石成为可行的工艺方法(中国); 而配备了大容积铲斗的电力或液压挖装机械和大型运载车型的出现, 则使  $1\,500\sim 3\,000\text{t}$  炸药深孔群药包一次爆破  $70\sim 150\text{万 m}^3$  矿岩成为日常生产环节(美国)。新型机械、新型爆破器材与爆破技术的配合, 极大地提高了生产效率, 为人类社会创造了巨大的财富。

### 三、凿岩爆破学科存在的主要问题

由于凿岩爆破的研究和实践存在条件和对象的多样化、复杂化, 目前凿岩爆破的理论研究深度还不够深入, 对一些问题尚无统一的认识, 理论与实际应用尚有较大的差距。因此, 加强理论与工程实际相结合仍是国内凿岩爆破界的当务之急, 以理论指导实践、克服经验主义, 首先要加强凿岩爆破基础理论的研究, 探索和解决与实践有关的凿岩爆破作用机理问题。此外, 就全国普遍情况来讲, 从事凿岩爆破工程实践的人员众多, 长期以来除因炸药雷管的生产供应由有关部门统一管理外, 在爆破工艺的好坏与爆破器材的应用、新理论、新器材、新技术的研究推广等方面还缺乏统一的强有力的组织领导和管理工作。



#### 四、凿岩爆破的发展方向 and 前景

作为一种破岩的基本方法, 凿岩爆破法仍然是目前乃至将来相当长一段时间内的一种不可替代的岩石破碎方法, 特别是坚硬岩石的破碎主要还是依赖于凿岩爆破方法。从爆破能量的利用上来看, 提高爆破安全和提高爆破效率实质上是一个问题的两个方面, 爆破的有效性和爆破的危害性都是爆炸威力造成的, 如何改善凿岩机具和爆破器材的性能以及爆破技术工艺、提高爆破效率和爆破安全是目前凿岩爆破工作者最根本的任务。

可以预计, 凿岩爆破领域将在以下几个方面产生飞跃并具有广阔的发展前景。

##### 1. 实现凿岩机械化

实现凿岩机械化是当前的任务之一。隧道掘进中大型钻凿机械如凿岩台车、钻装机虽也已被采用, 但普及程度仍很低。凿岩机械化的滞后发展, 严重影响了新的爆破技术的应用, 因此今后应该加快凿岩机械化的进程, 研制凿岩装药综合机械, 实现凿岩装药机械化。

##### 2. 发展内部药包和大抵抗线药包爆破技术

内部药包已在扩大油田产油生产率、提高早井出水率等方面做出了贡献。预期在 21 世纪中叶, 由于煤层气化、油页岩原地析馏以及陆地、深海浸析采矿的需求, 以内部药包爆炸获取范围广阔、裂缝细匀的爆破技术将会得到发展。这种爆破的装药应有高能量密度, 以减小钻孔直径和孔网密度; 有适当的爆炸初压, 既促使裂缝产生又无大范围过度粉碎; 有较长的爆压持续时间, 以支持裂缝扩展。因此, 可能的方案之一是不偶合或水偶合的、间隔装填的或相继起爆的药包群。美国 Los Alamos 国家试验室的 Shale 模型是解决原地爆炸油页岩的有益尝试, 说明内部药包有发展前景。另一方面, 大抵抗线药包爆破用于山脉、冰川、沙漠或河道改造以及海底非浸析采矿可能会逐渐普及。

##### 3. 爆破器材将有划时代的进展

首先, 工业炸药可能向以下 3 个方面发展。

###### (1) 可能出现比硝酸铵炸药更经济有效的缔合键能炸药

以空气和煤为原料的硝酸铵价格低廉, 爆炸力中等, 成为 20 世纪工业炸药的基础成分。然而, 绝大多数现有工业炸药都是氧化还原型炸药, 爆炸产生有害气体。据估计, 工业爆炸每年排入大气的一氧化碳约为 70~80 万 t, 氮氧化物约为 20~30 万 t, 成为环保问题之一。地球能接受的爆炸产物是  $N_2$ 、 $O_2$  和  $H_2O$ 。因此, 发展以空气为原料、爆炸后再生成空气成分的炸药将是需要探索的方向之一。相同原子的缔合键比不同原子的化合键的能量大, 以缔合键能炸药取代化合键能炸药也应是发展方向之一, 试制  $N_3$  或  $O_3$  及其缔合物值得实践。 $N_3$  已经在美国试验室爆炸成功, 预示着以空气为原料的振荡共价键能炸药的诞生, 其爆炸产物为  $N_2$ , 故同时也是环保炸药。

###### (2) 核爆炸能的和平利用

核爆炸现实的困难是保安、价格和产物的放射性污染。保安在于加强管理。降低价格在于民用化, 面向市场的规模生产是降低成本的关键。放射污染有待发展清洁的核爆炸。在没有清洁核爆炸之前, 核炸药可以用作内部药包, 即利用核爆炸的高温使药包附近的岩石熔化形成玻璃体壳, 将放射产物“关闭”在壳中。俄罗斯成功地在地面销毁了核武器, 表明了这个方案的可行性。在实现清洁的核爆炸之后, 核炸药在大抵抗线药包爆破中将举足轻重, 并可能为大地改造和深海爆破做出极大的贡献。

### (3) 更小夸克的爆炸能源的利用

李政道在 1999 年预言: 尽管宇称守恒定律已被证明, 但现实中宇称都不守恒, 表明空间中存在着无限的能源。并且说: 正像 20 世纪初蒲朗克常数和测不准关系引导出核能、激光一样, 新的发现将会出现。这是否预示着爆破业在将来可能利用更小夸克的爆炸能, 尽管利用的方式目前还不清楚。

其次, 起爆器材也将有更进一步的发展。

#### (1) 信息延时起爆技术

信息技术将促进更精确且延时段别可任意控制的起爆系统的问世, 使爆破效果和爆破有害效应得到更精确的控制。

#### (2) 无起爆药雷管将会普及, 无雷管起爆也可能实现

虽然 20 世纪未能实现工业炸药的无雷管起爆, 但将来可能会有一种价格可与雷管竞争的非雷管高新技术起爆器材问世。

#### (3) 高抗水和耐热起爆器材

随着地层深部采矿和海底采矿的发展, 耐地热和耐深水起爆器材将会发展。双层管真壳的水压自补偿式雷管和非雷管起爆应当有广阔的应用前景。

### 4. 可能形成兴旺的爆炸产业

钱学森在 1981 年就指出: “爆炸可以产生极强的脉冲电流、脉冲磁场和极高的压力。这里有能量转化问题, 而对研究来说, 特别要求转化过程的精密控制。爆炸所产生的高压已用于生产, 如爆炸成型和爆炸金刚石等。”近年来, 利用爆炸产生的极强脉冲电磁场作为军用电子对抗手段已装备部队, 用爆炸效应育种、纤维酯化等也有报导。

#### (1) 巩固和发展爆炸加工业

爆炸成型、复合、异型件冲孔等已经形成一定规模的产业, 而爆炸切割、硬化和消除残余应力多在废旧结构拆除、大型设备维修中发挥作用。从一定意义上说, 爆炸加工是机械制造业的组成部分。

#### (2) 发展爆破伴生品产业

20 世纪用于爆破的数十亿吨炸药, 只有爆破效果, 没有伴生产品, 极大地降低了爆破效益。不过, 从理想到现实, 需要解决的关键问题, 首先是如何实现能量转化的精密控制。例如, 利用电磁场的产品, 要避免高压或负压的损伤; 利用高压或负压的产品, 要排除电磁场的干扰, 等等。有的学者把爆破伴生产业称为“黑匣子”产业, 含义就在此。因此, 设计各种“黑匣子”, 是未来产业成败的核心。其次, 要使炮孔和药室装药满足生产伴生产品所需的参数。以爆炸金刚石为例, 硝铵类炸药的爆速和爆压峰值可能偏低, 或需以高能炸药包围“黑匣子”, 或需设计聚能装药结构向“黑匣子”聚集能量。同理, 生产其它产品所需的参数也要采取附加措施加以满足, 才能获得所需产品。人们早有预测, 仅实现金刚石生产这一项, 就比工程爆破本身的效益更好。还可以设想生产贮存脉冲电磁能器件、高压记忆和回放器件等等。

#### (3) 利用爆炸扩展食物链产业

利用爆炸脉冲高压、负压或电磁场进行育种、纤维酯化或膨化等已有报导。这里指的是精细产业, 可能需要造成瞬态环境参数跨度很大的条件, 需要从气体爆炸直至核爆的瞬态脉冲参数, 相信爆炸科学会予以满足, 同时爆炸科学本身也将得到极大的促进。当然其它的物

理、化学工艺在扩展食物链方面将是爆炸方法的有力竞争伙伴。

### 5. 完善爆破技术的多方控制

实现多方控制是爆破工作者们多年来共同努力的方向，工程爆破中的城市拆除爆破、抛掷爆破、松动爆破等都已成功地实现了安全和效果的双面控制，主要表现在爆破时间、爆破能量、爆破顺序、爆破环境等方面对爆破机理、爆破质量、爆破方向、爆破产物、爆破危害、爆破效果等实行控制。只要能够对各种爆破作业实行准确控制，凿岩爆破法的生命力就是无尽的。

## 五、本书的主要内容和特点

随着科学技术的迅猛发展，近年来出现了许多凿岩爆破的新理论、新技术和新方法。为了使读者能够掌握和适应这些凿岩爆破的新理论、新技术和新方法，本书根据笔者多年从事凿岩爆破教学、科研和开发工作的实际经验，在原校内教材《凿岩爆破》（张时忠、吴立编写，1995）的基础上进行了重新编写，重新编排了章节，主要包括岩石的物理力学性质及工程分级、凿岩方法、凿岩工具、冲击凿岩破碎理论、炸药爆炸的基本理论、工业炸药、起爆器材和起爆方法、岩石的爆破作用机理、炮眼爆破、预裂爆破和光面爆破、硐室爆破、爆破安全技术和爆破测试技术等内容。本书除包括经典的凿岩爆破理论与技术方法外，增加了岩石静载、动载变形特性、凿岩新方法和拆除控制爆破、水压控制爆破等内容。

与其它同类教材相比，本书既包括凿岩爆破的基本理论又含有凿岩爆破的实用技术。所以，理论与实践并重和实用性强是本教材的主要特点。

# 第一章 岩石的物理力学性质及工程分级

## 第一节 概 述

凿岩爆破是隧道施工的基本方法，其工作对象是岩石，也就是说，在具体施工时，凿岩方法、钻机类型、钻眼工作参数、炸药类型、爆破参数的选择，首先取决于岩石的组成、结构、构造及其物理力学性质。

隧道施工的基本过程就是把岩石从岩体上破碎下来，形成设计所要求的各种用途的地下空间，在此过程中，还需对这些地下空间进行必要的维护，以防止围岩产生过大的变形和坍塌。因此，有效地破碎岩石和维护围岩就成为隧道等地下工程施工中的主要问题。为了有效合理地进行破岩和维护围岩，就必须对岩石和岩体的物理力学性质有所了解，并在此基础上制定出岩石的工程分级方法。只有这样，才能在不同的条件下，使所选用的破岩和围岩维护方法有科学依据。

## 第二节 岩石和岩体的基本概念

岩石和岩体是描述岩石的两个不同概念，它们既相互联系，同时又有较大的区别。

### 1. 岩石

岩石是指由一种或多种矿物组成的集合体，其物理力学性质与组成该岩石的矿物成分及其含量、岩石结构和构造特征有密切关系。

### 2. 岩体与岩块

岩体是指在一定工程范围内的自然地质体。岩体结构的基本要素包括结构面和结构体。

结构面指褶皱、断层、节理、劈理等，结构体指有不同产状的结构面组合切割而成的单元块体。

岩块是指从天然岩体中取出的较为标准的样块，人为地排除了大部分天然的软弱面。在研究岩体问题时，可以把岩块视为均质的、各向同性的连续介质；而岩体一般均属于非均质的各向异性的不连续介质。

### 3. 岩体与岩块的区别

岩体与岩块的主要区别表现在：

(1) 岩体具有明显的弱面，因此具有显著的非均质性和各向异性。而岩块不包含显著的弱面，可以相对地把岩块近似地视为均质、各向同性的连续介质；

(2) 岩体强度低，易变形；

(3) 岩体和岩块的渗透性也存在显著差异。

### 第三节 岩石的物理性质

岩石的物理性质指标包括岩石的重量指标、孔隙性和吸水性。

#### 一、岩石的重量指标

岩石由固体、水、空气三相组成，具有比重和容重等重量指标。

##### 1. 比重

岩石的比重是指岩石固体实体积的重量与同体积水的重量之比。所谓固体实体积，是指不包括孔隙体积在内的实在体积，即：

$$\Delta = \frac{G}{V_c \gamma_w} \quad (1-1)$$

式中： $\Delta$ ——岩石的比重；

$G$ ——绝对干燥时体积为  $V_c$  的岩石的重量，g；

$V_c$ ——岩石固体实在体积， $\text{cm}^3$ ；

$\gamma_w$ ——水的容重， $\text{g/cm}^3$ 。

岩石的比重取决于组成岩石的矿物的比重。一般在已鉴定出岩石矿物成分后，岩石的比重就可以粗略地进行估计。例如，石灰石的比重与方解石的相近，砂岩的比重接近于石英。

##### 2. 容重

单位体积岩石的重量称为岩石的容重。所谓单位体积是指包括孔隙体积在内的体积。岩石的容重又分为干容重和湿容重。

干容重：单位体积岩石绝对干燥后的容重，用  $\gamma_c$  表示；

湿容重：岩石在天然含水或饱和状态下的容重，用  $\gamma$  表示。

$$\gamma_c = G/V, \quad \gamma = G_1/V \quad (1-2)$$

式中： $\gamma_c$ ——岩石的干容重， $\text{g/cm}^3$ ；

$G$ ——岩石试件干燥后的重量，g；

$V$ ——岩石试件的体积， $\text{cm}^3$ ；

$\gamma$ ——岩石的湿容重， $\text{g/cm}^3$ ；

$G_1$ ——岩石试件的重量（天然含水或饱和），g。

一般地， $\gamma_c$  与  $\gamma$  差别不大，但对粘土来说则差别很大； $\gamma$  取决于岩石的矿物成分、孔隙大小及含水量，在其它条件相同时， $\gamma$  还与岩石的埋深有关，埋深浅的容重小，埋深大的容重大。

#### 二、岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是指岩石的裂隙发育程度，通常用孔隙度  $n$  和孔隙比  $e$  来表示。孔隙度指岩石试件内各种裂隙、孔隙的体积总和与岩石试件总体积的比值。孔隙比指岩石试件内各种

裂隙、孔隙的体积总和与岩石试件内固体矿物颗粒体积  $V_c$  的比值, 用式(1-3)和式(1-4)表示。

$$n = \frac{V - V_c}{V} = 1 - \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{\gamma_c}{\Delta\gamma_w} \quad (1-3)$$

$$e = \frac{V - V_c}{V_c} = \frac{\Delta\gamma_w}{\gamma_c} - 1 \quad (1-4)$$

$n$  和  $e$  通常是根据岩石的比重  $\Delta$  和干容重  $\gamma_c$  计算求得。

岩石的孔隙性对岩石的其它性质有显著的影响。一般地, 随着岩石孔隙度  $n$  的增大, 岩石的整体性降低, 比重和强度降低, 而透水性提高; 同时, 岩石中的孔隙加快了风化的速度, 进一步增大了岩石的透水性, 降低了其力学强度。

### 三、岩石的吸水率

吸水率  $W$  是指岩石试件在大气压力下吸入水的重量  $G_w$  与岩石干重量  $G_s$  之比, 即  $W = \frac{G_w}{G_s}$ 。一般地, 岩石吸水率  $W$  的大小取决于岩石中所含孔隙、裂隙的数量和大小、孔隙

和裂隙的开闭程度及分布状况, 且与试验条件有关; 整体岩石试件的吸水率  $W$  要比同一岩石碎块试件的吸水率  $W$  小, 同时随着浸入时间的增加, 吸水率  $W$  有所增大。

## 第四节 岩石的变形特性

在荷载作用下, 岩石首先要发生变形, 当作用的荷载不断增大, 或当荷载超过某一数值而保持恒定不变时, 随着该恒定荷载作用时间的延长, 均可导致岩石的破坏。因此, 岩石的变形和破坏, 是在荷载作用下岩石性能变化过程中的两个不同阶段, 变形阶段含有岩石破坏的因素, 而岩石的破坏阶段则可看作是变形不断发展的最终结果。

### 一、静荷载作用下岩石的变形特性

所谓静荷载, 一般指加载速率小于  $3 \sim 5 \text{ kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。根据加载方式的不同, 分为单向压缩和三向压缩加载。常用应力-应变曲线 ( $\sigma$ - $\epsilon$  曲线)、弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$  来表示岩石的变形特性。

#### (一) 岩石在单向压缩条件下的变形特性

##### 1. 脆性岩石的应力-应变曲线

脆性岩石在破坏之前, 没有明显的塑性变形, 当应力达到岩石的强度极限  $R_a$  时, 岩石突然破坏。

如图 1-1 所示, 若用普通材料试验机加压, 只能得到  $C$  点前 (破坏前) 的应力-应变曲线, 原因是普通试验机的刚度小, 压头会产生变形, 储存弹性变形能, 试件破坏时突然释放。

若用刚性试验机加压, 则可得到包括  $C$  点前后的完整的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线, 该曲线称为全过程  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线。

一般地, 脆性岩石的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线可以分为 4 个阶段:  $OA$  段、 $AB$  段、 $BC$  段和  $CD$  段。

(1)  $OA$  段: 曲线向上弯曲, 为岩石裂隙压实闭合阶段, 此过程由于岩石中的裂隙受压闭合, 变形较大,  $E$  较小且不为常数;

(2)  $AB$  段: 线弹性变形阶段,  $E$  为常数,  $B$  点为弹性极限;

(3)  $BC$  段: 破坏发展阶段,  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线由直线向曲线转变。  $E$  降低直至趋于零, 自  $B$  点开始, 岩石内就有微破裂不断发生, 至  $C$  点发生破坏,  $C$  点为强度极限 ( $R_a$ );

(4)  $CD$  段:  $C$  点之后,  $\sigma$  随  $\epsilon$  的增大而下降, 到  $D$  点时保持某一较小的应力值, 称为剩余强度。

## 2. 塑性岩石的应力-应变曲线

如图 1-2 所示, 塑性岩石的塑性变形比弹性变形大, 曲线的斜率开始较陡, 以后逐渐平缓。开始平缓的转折点, 即  $\sigma$  增加很小而变形有很大增长时的应力值, 称为屈服极限  $\sigma_T$ 。  $OE$  段可以看作弹性变形阶段,  $EG$  段可以看作是塑性流动阶段。

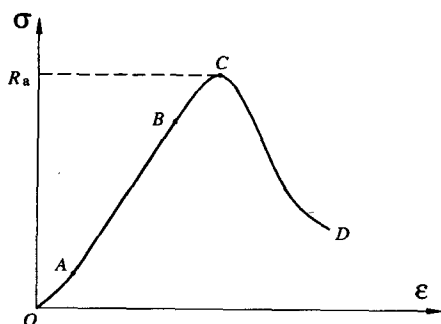


图 1-1 脆性岩石的应力-应变曲线

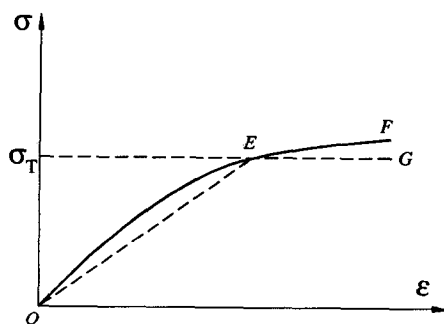


图 1-2 塑性岩石的应力-应变曲线

## (二) 岩石在三向压缩条件下的变形特性

有侧向约束作用时的岩石变形特性与单向压缩时的变形特性大不相同, 如图 1-3 所示, 岩石在三向压缩条件下的变形特性如下:

(1) 由于侧向压力的存在, 岩石破坏时的应变较单向压缩时增加了, 并且随着侧向应力的增大而增加;

(2) 随着侧向压力的增加, 岩石表现出比较明显的塑性变形;

(3) 三向压缩条件下全过程应力-应变曲线的获得, 证明了当应力达到破坏点后, 岩石仍然保留一定的承载能力。

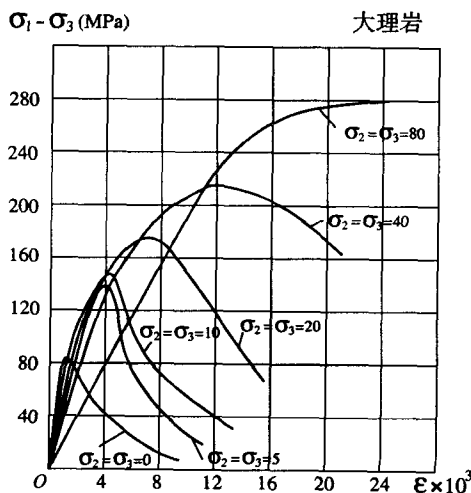


图 1-3 三向压缩条件下全过程应力-应变曲线



## 二、动荷载作用下的岩石的变形特性

动荷载一般指加载速率大于  $3 \sim 5 \text{ kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  的荷载，如冲击荷载等。

### 1. 冲击荷载和波

无论是冲击式凿岩还是爆破破碎岩石，岩石承受的外力都不是静载，而是一种冲击荷载，荷载是时间的函数。岩石在这种急剧变化的荷载作用下，既产生运动又产生变形。

如图 1-4 所示，当冲击荷载  $P$  施加于岩石端面时，岩石质点便失去原来的平衡而发生变形和位移，并形成扰动。一个质点的扰动必然引起相邻质点的扰动。这样使质点扰动一个接一个地连续地由冲击端向另一端传播下去，这种扰动的传播叫做波。

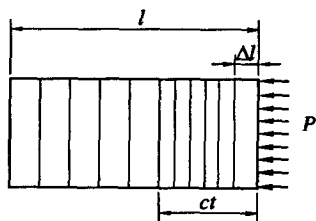


图 1-4 波的传播过程图

岩石内只有  $ct$  段发生变形，其它部分仍处于静止状态。所以，在动荷载作用下，岩石的变形不是整体的均匀变形，质点的运动速度也不是整体一致的，即变形和速度都有一个传播过程。

按照波的传播位置可将波分为体积波和表面波，体积波在介质内部传播，而表面波沿介质表面传播；按照波的振动方向与波的传播方向之间的相对关系，又可分为纵波和横波。

### 2. 波动方程

从弹性力学中的波动理论知道，假设从受冲击荷载作用的各向同性的弹性体中取出一个边长分别为  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  的微小单元六面体，如图 1-5 所示，则该单元体的各个面上均有 3 个力。只要分析一下各个面上的应力改变量，就可以导出相应的波动方程。

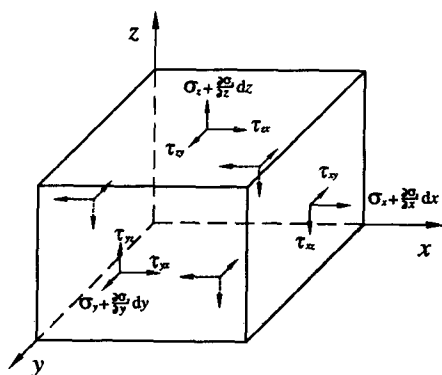


图 1-5 微小单元六面体受力状态分析示意图

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \end{cases} \quad (1-5)$$

或者

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \quad (1-6)$$

式中： $x$ 、 $y$ 、 $z$ ——直角坐标分量；

$u, v, w$ ——与  $x, y, z$  坐标相对应的位移函数;

$t$ ——时间;

$C$ ——应力波传播速度。

波动方程表示的是在冲击荷载作用下, 弹性变形的质点运动加速度同变形加速度之间以及惯性同弹性之间的一种平衡关系。

如果假定质点的位移只在  $x$  轴方向传播, 即位移  $u$  仅仅是坐标  $x$  和时间  $t$  的函数, 在  $y$  轴和  $z$  轴方向的位移均为零, 则

$$\sigma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1-7)$$

经求解可得纵波所产生的正应力  $\sigma$  和横波产生的剪应力  $\tau$  为

$$\begin{cases} \sigma = \rho c_p v_p \\ \tau = \rho c_s v_s \end{cases} \quad (1-8)$$

式中:  $C_p, C_s$ ——纵波和横波的传播速度;

$V_p, V_s$ ——纵波和横波引起的介质质点的振动速度;

$\rho$ ——介质的密度。

在无限介质三维情况下, 纵波和横波的传播速度分别为

$$\begin{cases} C_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu_d)}{\rho(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}} \\ C_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\mu_d)}} \end{cases} \quad (1-9)$$

式中:  $E_d$ ——介质的动弹性模量;

$\mu_d$ ——介质的动泊松比;

$G_d$ ——介质的动剪切模量,  $G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu_d)}$ 。

在一维情况下, 即波长比杆的截面尺寸 (或直径) 大很多的情况下, 可以不考虑横向变形的影响, 此时,  $C_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}$ ,  $C_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho}}$ 。

### 3. 应力波的叠加

当两个扰动同时传播到某一点时, 那么这点的总状态就等于两个扰动分别抵达该点的代数和, 称为波的叠加。

### 4. 应力波的反射与透射

应力波在传播过程中, 遇到岩石中的层理、节理、裂隙、断层和自由面时, 或者介质性质发生改变时, 应力波的一部分会从交界面反射回来, 另一部分则透过交界面进入第二种介质, 这种现象叫应力波的反射与透射。因入射的角度不同, 可以有垂直入射和斜入射两种情况。