



工程

爆破

GONGCHENG BAOPO

翁春林 叶加冕 主编

冶金工业出版社



工 程 爆 破

翁春林 叶加冕 主编



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2004

内 容 提 要

本书以矿山生产爆破为主,兼顾水利水电工程爆破、公路铁路工程爆破及城市拆除爆破,从工程爆破设计和施工的实际需要出发,系统地介绍了岩石的性质、炸药爆炸的基本理论、工业炸药、起爆器材、起爆方法、爆破破岩机理、浅眼爆破、地下深孔爆破、露天深孔爆破、硐室爆破、药壶爆破、控制爆破、拆除爆破、爆破安全技术、爆破施工组织等与工程爆破设计和现场施工管理有关的概念、原理、方法和施工工艺。

本书具有较强的实用性,可作为高等职业教育、职业培训、在职职工自修的教材,也可作为工程爆破技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程爆破/翁春林,叶加冕主编. —北京:冶金工业出版社, 2004. 9

ISBN 7-5024-3554-9

I. 工… II. ①翁…②叶… III. 爆破—高等学校—教学参考资料 IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 064820 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 王秋芬 美术编辑 王耀忠

责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 李玉山

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2004 年 9 月第 1 版, 2004 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.75 印张; 350 千字; 224 页

30.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

工程爆破技术应用十分广泛，在矿床开采及水利、水电、铁路、公路等工程建设中有着极为重要的作用。本书以矿山生产爆破为主，兼顾水利水电工程爆破、公路铁路工程爆破及城市拆除爆破，从工程爆破设计和施工的实际需要出发，系统地介绍了岩石的性质、炸药爆炸的基本理论、工业炸药、起爆器材、起爆方法、爆破破岩机理、浅眼爆破、地下深孔爆破、露天深孔爆破、硐室爆破、药壶爆破、控制爆破、拆除爆破、爆破安全技术、爆破施工组织等与工程爆破设计和现场施工管理有关的概念、原理、方法和施工工艺。

本书具有较强的实用性，可用作高等职业教育、职业培训、在职职工自修的教材，也可作为工程爆破技术人员的参考书。

本书由昆明冶金高等专科学校翁春林和叶加冕两位同志任主编。具体分工是：翁春林编写绪论、第二章、第六章、第八章、第九章、第十章；叶加冕编写第三章、第四章、第五章、第十二章、第十三章；云南国土资源学院王建波编写第一章、第七章和第十一章；云南省路桥五公司的李德编写第十四章，杨伟编写第十五章。全书由翁春林和叶加冕两位老师统稿。

本书在编写过程中，参考了大量的相关文献，并得到了昆明理工大学庙延钢教授的大力帮助，在此表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免有不妥之处，诚恳地欢迎读者批评指正。

编 者
2004 年 5 月

目 录

绪论	(1)
第一章 岩石的性质与分级	(4)
第一节 岩石的物理及力学性质	(4)
第二节 岩石分级	(8)
第二章 炸药爆炸的基本理论	(13)
第一节 爆炸和炸药的基本概念	(13)
第二节 炸药的起爆和敏感度	(15)
第三节 炸药的传爆过程	(20)
第四节 炸药的氧平衡	(25)
第五节 炸药的爆炸特性	(28)
第三章 工业炸药	(33)
第一节 炸药及工业炸药分类	(33)
第二节 粉状硝铵炸药	(36)
第三节 含水硝铵炸药	(40)
第四节 新型工业炸药	(44)
第四章 起爆器材	(48)
第一节 雷管及其性能	(48)
第二节 导火索及其性能	(56)
第三节 导爆索及其性能	(58)
第四节 导爆管及其性能	(59)
第五章 起爆方法	(62)
第一节 非电起爆法	(62)
第二节 电力起爆法	(69)
第六章 爆破破岩机理	(77)
第一节 爆破破岩的原理	(77)

第二节 爆破漏斗及利文斯顿爆破理论	(83)
第三节 群药包爆破岩石破坏特征	(86)
第四节 装药量计算原理	(87)
第七章 浅眼爆破	(90)
第一节 装药与堵塞	(90)
第二节 井巷掘进爆破技术	(93)
第三节 地下采场爆破技术	(101)
第八章 地下深孔爆破	(105)
第一节 深孔排列和爆破参数	(105)
第二节 深孔设计施工及验收	(112)
第三节 深孔爆破设计	(116)
第四节 深孔爆破掘进天井	(119)
第九章 露天深孔爆破	(123)
第一节 露天深孔布置及爆破参数的确定	(123)
第二节 多排孔微差爆破	(127)
第三节 多排孔微差挤压爆破	(130)
第四节 预裂爆破、光面爆破和缓冲爆破	(132)
第五节 露天深孔爆破效果的评价	(135)
第十章 硐室爆破	(138)
第一节 硐室爆破的基本原理	(139)
第二节 布药设计	(144)
第三节 施工设计	(156)
第十一章 药壶爆破	(160)
第一节 设计计算	(160)
第二节 施工工艺	(162)
第十二章 控制爆破	(166)
第一节 微差爆破	(167)
第二节 挤压爆破	(168)
第三节 光面爆破与预裂爆破	(170)
第四节 静态破碎技术	(173)
第十三章 拆除爆破	(177)
第一节 拆除爆破的基本原理	(178)

第二节	楼房的拆除爆破	(180)
第三节	烟囱与水塔的拆除爆破	(188)
第十四章	爆破安全技术	(196)
第一节	爆破器材的贮存、运输和保管	(196)
第二节	爆破器材的销毁	(201)
第三节	早爆及预防	(202)
第四节	炮烟及盲炮	(204)
第五节	爆破引起的瓦斯、煤尘爆炸事故及预防	(206)
第六节	爆破安全距离	(209)
第十五章	爆破施工与管理	(214)
第一节	爆破施工组织管理	(214)
第二节	爆破施工	(217)
第三节	爆破作业人员的职责	(220)
参考文献		(224)

绪 论

一、爆破技术的发展

古代在岩石上进行开挖是非常困难的。收缩破裂法是我们祖先采用的一种原始方法,即用火将岩石加热后,泼水使其迅速冷却和收缩,在岩石中引起应力变化,从而造成开裂,再用大锤、钢钎和楔子破开岩石。工程爆破是随着炸药的出现而产生的一门技术。我国是黑火药的诞生地,也是世界上爆破工程发展最早的国家。火药的发明,为人类社会的发展起到了巨大的推动作用。

1799年,英国人高瓦尔德制成了雷汞;1831年出现毕氏导火索;1867年瑞典人诺贝尔发明了火雷管,同年又研制成功以硅藻土为吸收剂的硝化甘油炸药,并由瑞典化学家德里森和诺贝尔首次研制成功铵梯炸药。至此,工程爆破所用的最基本的爆破器材已经齐全。进入20世纪,爆破器材和爆破技术有了新的进展。1919年出现了以泰安为药芯的导爆索;1927年又在瞬发电雷管的基础上研制成功秒延期电雷管;1964年研制成功毫秒延期电雷管;50年代初期,铵油炸药得到了推广应用;1956年库克发明了浆状炸药,解决了硝铵炸药的防水问题。

爆破技术的诞生,使人类拥有了改造自然和征服自然的更有力的武器,特别是20世纪以来的爆破器材新品种的发明问世和爆破理论的进一步深入,对爆破工程起到了重大促进作用,为爆破工程的发展开辟了广阔的前景。

近年来,国内外在爆破理论、爆破工艺、爆破技术方面都有了新的发展和提高。国内外推广运用了导爆管系统及抗静电、杂电和射频电的安全电雷管及耐高温、高压电雷管,研制出了无起爆药雷管、电磁雷管和电子雷管等新型起爆器材。随着爆破作业机械化程度的提高,推动了爆破新技术与爆破安全工作的迅速发展。又如现场混装乳化炸药技术的进一步发展和应用及数码电子雷管技术的研发成功与逐步完善,受到了国内外爆破界的广泛关注,这也必将推动国际工业炸药、起爆器材与爆破技术的整体进步;在地下钻孔爆破中,自动化控制技术和爆堆矿岩块度计算机图像分析技术的广泛应用,为爆破工程实践中质量管理工作提供了重要参考依据。

随着我国科学技术的进步,工程爆破已在越来越多的领域内得到迅速发展,尤其是20世纪80年代以来,我国在爆破理论研究和工程实践方面都取得了显著的成绩,为我国的国民经济建设做出了巨大的贡献。1949年我国的炸药消耗量为2万t,到2000年,我国的炸药消耗量已经达到120万t,工业雷管21亿发,导火索6亿多米。工程爆破是直接为我国矿业、交通、水力、电力和城市建设服务的,有力地促进了我国现代化建设的发展。从1949年到2000年,原煤产量已由3200万t增加到13亿t,原油产量由12万t增加到1.58亿t,钢产量由15万t增加到1亿t,10种主要有色金属已由1.5万t增加到616.4万t,黄金由4t增加到121t,化肥由6000t增加到2718万t,水泥由66万t增加到4.92亿t;铁路营业里程由2.2万km增加到5.75万km,公路已由8.3万km增加到127.85万km。

目前我国从事工程爆破的教学、科研、施工和管理人员有 105 万余人, 其中工程技术人员为 3 万人。近 20 多年来我国 30 余所院校和科研单位已培养了工程爆破硕士 500 余人、博士 80 余人, 为我国工程爆破的发展增添了新的活力。

在工程爆破方面, 我国将面临着艰巨的任务。按照我国制定的 2010 年远景目标纲要规定, 到 2010 年, 人口控制在 14 亿以内, 国民生产总值要翻一番, 达到 17 万亿元。为实现这个宏伟目标, 必然有更多、更大的工程, 例如由于经济持续高速增长, 对矿业的需求将长期旺盛; 国家采用积极的财政政策大力发展铁路、公路、水利、电力和城市建筑等基础设施建设, 我国工程爆破将迎来一个新的高速发展期。

二、工程爆破技术的应用

工程爆破技术包括了浅孔爆破、深孔爆破、硐室爆破、预裂爆破、光面爆破、定向筑坝爆破、水下爆破、建(构)筑物拆除爆破、金属爆炸加工、油气井爆破、微型爆破等。

深孔爆破是一种常规爆破, 它广泛用于露天和地下矿山、铁路、公路、水利、水电建设中, 根据工程的不同要求, 发展了微差爆破、挤压爆破、预裂爆破和光面爆破技术等。

硐室爆破是指一次起爆炸药量较大的爆破, 通常炸药量有十几吨至上千吨。其中规模最大的一次是 1993 年 12 月广东珠海炮台山的移山填海大爆破工程, 一次起爆总药量为 1.2 万 t, 爆落破碎和抛掷岩石的总方量达 1085 万 m^3 , 抛掷率 51.36%, 创造了我国和世界大爆破新纪录。定向爆破筑坝也是采用硐室爆破, 目前全国已采用定向爆破筑坝 60 多座。

在工程爆破技术中发展最快的还是建(构)筑物的爆破拆除。例如地处闹市区的北京华侨大厦, 建筑物高度 34m, 建筑面积 1.3 万余平方米, 共钻孔 6000 余个, 装药 600 多千克, 分 9 段毫秒顺序起爆, 达到了安全拆除的设计效果。又如 1999 年 2 月上海长征医院旧楼拆除, 该楼最高点(电梯动力房)为 68.4m, 宽 20.28m, 长 29.34m, 分两个爆区, 共 16 段, 每段间隔时间 0.5s, 总时间为 4s, 从起爆到楼房倒塌历时 8.4s, 取得了较好的爆破效果。

目前, 国内控制爆破研究与施工组织相继成立, 水压爆破、静态破碎和成型爆破等控制爆破方法和技术正得到不断的改进与发展。

在机电工程中, 爆炸加工技术发展迅速, 例如爆炸成型、爆炸焊接、爆炸复合、爆炸切割等, 利用爆炸余能可以人工合成金刚石。在石油地质部门, 爆破用于坑探、掘进、地震勘探、油井和气井爆破等。采用高温爆破法可清除高炉、平炉和炼焦炉中的炉瘤或爆破金属炽热物等。

此外, 在农林方面, 爆破可以用于平整土地、造林、伐木、驱雹、深耕及森林灭火等。在医疗方面, 用控制爆破排除肾、尿结石已取得临床上的成功。至于在军事工程方面, 爆破的应用就更加广泛了。

进入 21 世纪后, 发展炸药能量转化过程的精密控制技术、提高炸药能量的利用率、降低有害效应是新世纪工程爆破的发展战略, 同时还要不断开发新的应用领域。随着科学技术和经济的不断发展, 爆破技术的应用范围会越来越广。预计在新世纪, 将利用爆炸加工合成具有多种金属性能的新材料, 处理各种废料, 改变气候和环境条件, 为人类做出新的贡献。

三、工程爆破课程的特点及学习方法

工程爆破不仅是一种工程技术，而且是一门比较复杂的边缘学科。在学习中不仅要学习和应用流体力学、热化学、冲击波理论，还要掌握工程力学、岩石力学、电工学、物理学及地质学中的有关内容，并且要与矿床开采、井巷工程（隧道工程）及安全技术等密切地结合起来，才能在实际工作中有效地进行工程爆破的设计和施工工作。

本课程的基本理论比较系统、完整，基本知识的适应性比较广泛。学习时应重点掌握基本理论和基本知识，并运用这些基本理论和基本知识去分析和解决爆破工程中的实际问题。

本课程具有较强的实践性。因为它所研究的问题都是来自于生产实践，在学习过程中一定要理论联系实际，结合工程爆破的具体条件，用学到的基本知识去解决工程中的实际问题，要通过实验、测试、实习及设计等实践教学培养动手能力。

本课程的另一个特点是综合性强。在爆破设计施工过程中涉及的因素很多，各因素之间可能相互联系并构成各种不同的系统，情况错综复杂。学习中要学会进行综合分析，运用辩证唯物主义的观点找出主要矛盾，解决实际问题。

第一章 岩石的性质与分级

本章要点及学习目的

岩石是工程爆破的工作对象。要有效地开展工程爆破工作，必须先了解岩石的基本性质，主要是与工程爆破有关的物理性质和力学性质，同时要掌握工程爆破中通俗易懂的岩石性质表述方式——岩石的分级。

在工程爆破的工作中，通常是用凿岩设备在岩石内进行穿孔并装入炸药进行爆破的方法来破碎矿石或岩石。正确地认识岩石的有关性质，并在此基础上对岩石进行分级，能为爆破设计、施工、制定生产定额以及成本核算等提供依据。

第一节 岩石的物理及力学性质

一、岩石的物理性质

1. 孔隙率

孔隙率 η ，是指岩石中各孔隙的总体积 V_0 与岩石总体积 V 之比，用百分率表示。

$$\eta = \frac{V_0}{V} \times 100\% \quad (1-1)$$

岩石孔隙的存在，能削弱岩石颗粒之间的连结力而使岩石强度降低。孔隙率越大，岩石强度降低得就越严重。岩石内孔隙的存在，一方面使所需要的炸药能量降低，但另一方面会因炸药爆炸的能量会从孔隙逸出而使爆破效果受到影响。

2. 密度及容重

密度 ρ (g/cm^3)，是指构成岩石的物质质量 M 对该物质所具有的体积 $V - V_0$ 之比，即

$$\rho = \frac{M}{V - V_0} \quad (1-2)$$

式中， V 、 V_0 意义同前。

容重 γ (t/m^3)，是指岩石的重量 G 对包括孔隙在内的岩石体积 V 之比，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

可以看出，岩石的密度与容重是不同的。一般地说，岩石的密度和容重越大，就越难以破碎，在抛掷爆破时需消耗较多的能量去克服重力的影响。

3. 岩石的碎胀性

岩石破碎成块后,因碎块之间存在空隙而使总体积增加,这一性质称为岩石的碎胀性,它可用碎胀系数(或松散系数) K 表示(其值为1.2~1.3之间)。 K 是指岩石破碎后的总体积 V_1 与破碎前总体积 V 之比,即

$$K = \frac{V_1}{V} \quad (1-4)$$

在采掘工程或其他土石方工程中选择采装、运输、提升等设备的容器时,必须考虑岩石的碎胀性,特别是地下开采矿石爆破所需要或允许碎胀空间的大小,同该矿石的碎胀系数有着密切的关系。

4. 岩石的强度与硬度

岩石的强度是指岩石抵抗外力破坏的能力,或者说是指岩石的完整性开始被破坏的极限应力值。在材料力学中,用强度来表示各种材料抵抗压缩、拉伸、剪切等简单作用力的能力。但是在爆破工程中,由于岩石承受的是冲击载荷,因而强度只是用来说明岩石坚固性的一个方面。

岩石的硬度,是指岩石抵抗工具侵入的能力。凡是用刀具切削或挤压的方法凿岩,首先必须将工具压入岩石才能达到钻进的目的,因此研究岩石的硬度具有一定的意义。

一般地说,强度和硬度越大的岩石就越难以凿岩和爆破。但值得注意的是,某些硬度较大的岩石往往比较脆,因而也就易于爆破。

5. 岩石的裂隙性

由于岩体存在节理、裂隙等结构面,所以岩体的弹性模量、波传播速度不同于岩石试件。实验表明,对同一种岩石而言,岩体的泊松比要比单个岩石试件的值大,而弹性模量及波速则比试件小。工程上常用岩体与岩石试件内的波速比值的平方来评价岩体的完整性,称为岩体的完整系数。由此可见,岩体只能被认为是“由结构面网络和岩块组成的地质体”,它的性质由岩块与结构面共同决定。岩石的裂隙性对爆破能量的传递影响很大,并且由于岩石裂隙存在的差异性很大,使岩体的受力破坏问题更加复杂化。

以上岩石性质都从不同方面影响着爆破效果。

几种岩石的孔隙率、密度、容重和波阻抗值列于表1-1中。

表 1-1 几种岩石的孔隙度、密度、容重和波阻抗

岩石名称	孔隙率/%	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	容重/ $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$	纵波波速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	波阻抗 / $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
花岗岩	0.5~1.5	2.6~3.0	2.56~2.67	4000~6800	800~1900
玄武岩	0.1~0.2	2.7~2.86	2.65~2.8	4500~7000	1400~2000
辉绿岩	0.6~1.2	2.85~3.05	2.8~2.9	4700~7500	1800~2300
石灰岩	5.0~20	2.3~2.8	2.46~2.65	3200~5500	700~1900
白云岩	1.0~5.0	2.3~2.8	2.3~2.4	5200~6700	1200~1900
砂岩	5.0~23	2.1~2.9	2.0~2.8	3000~4600	600~1300
板岩	10~30	2.3~2.7	2.1~2.57	2500~6000	575~1620
片麻岩	0.5~1.5	2.5~2.8	2.4~2.65	5500~6000	1400~1700
大理岩	0.5~2.0	2.6~2.8	2.5	4400~5900	1200~1700
石英岩	0.1~0.8	2.63~2.9	2.45~2.85	5000~6500	1100~1900

二、岩石的力学性质

用炸药爆炸来破碎岩石是爆破工程的主要内容，而炸药爆炸加载于介质的载荷是冲击载荷，属于动力学范畴。因此，必须对岩石的动力学性质进行研究。冲击载荷能引起介质中产生波的传播，这种波在介质中统称为应力波。研究岩石动力学性质，首先应研究载荷性质、应力波性质及其传播规律。

1. 炸药爆炸的载荷性质

根据介质的应变速率（表 1-2）、冲击速度或加载速度的不同，载荷性质可分为动载荷和静载荷。

表 1-2 载荷状态分类

应变速率	$< 10^{-6}$	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-2} \sim 10$	$10 \sim 10^3$	$> 10^4$
载荷状态	流 变	静 态	准静态	准动态	动 态
试验方法	稳定加载	液 压 机 加 载	气 动 式 快 速 加 载	霍金逊杆加载	爆炸或冲击加载

应变速率是指应变随时间的变化率，即 $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ （单轴弹性变形范围内）。

冲击速度定义为试件一端质点相对另一端质点的运动速度。

加载速度定义为应力随时间的变化率。

由表中可看出，炸药爆炸时周围岩石的应变速率达 10^4 以上，属于动载荷。矿（岩）石受到爆炸作用时，其力学特性为动力学。

2. 岩石的波阻抗

岩石密度 ρ 与纵波在该岩石中传播速度 C_p 的乘积，称为岩石的波阻抗。它有阻止波传播的作用，即所谓对应力波传播的阻尼作用。实验表明，波阻抗值的大小除与岩石性质有关外，还与作用于岩石界面的介质性质有关。岩石的波阻抗值对爆破能量在岩体中的传播效率有直接影响，即炸药的波阻抗值与岩石的波阻抗值相接近（相匹配）时，爆破传给岩石的能量就多，在岩石中所引起的应变值也就大，可获得较好的爆破效果。

3. 岩石的弹性与塑性

岩石在外力作用下产生变形，其变形性质可用应力—应变曲线表示，如图 1-1 所示。

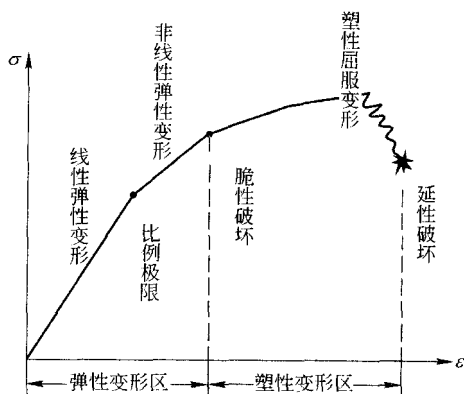


图 1-1 岩石的应力—应变曲线

根据变形性质的不同，可分为弹性变形和塑性变形。弹性变形具有可逆性，即载荷消除后变形跟着消失。这种变形又分为线性变形和非线性弹性变形两种。应力值在比例极限之内时，应力与应变呈线性关系，并遵守虎克定律，即 $\sigma = E\epsilon$ ；当应力值超过比例极限时，则进入非线性弹性变形阶段，其应力应变关系不遵守虎克定律；当应力值超过极限抗压强度（峰值）时，脆性材料则立即发生破坏，而塑性材料则进入具有永久变形特性的塑性变形区。塑性变形是不可逆的，载荷消除后，部分变形将永久保留

下来。但是,岩石与其他材料不同,在弹性区内,应力消除之后,应变并不能立即消失,而需要经过一定时间才能恢复,这种现象称为岩石的弹性后效。在弹性后效没有消除之前,如果重新加载,岩石就会出现如图 1-2 所示的应力—应变曲线,其中加载与卸载围成的环形,称为岩石的弹性滞环。岩石破坏前,不产生明显残余变形者称为脆性岩石。冶金、有色金属矿山的矿岩,大多属于脆性岩石。

4. 岩体在爆炸冲击载荷作用下的力学反应

岩体在爆炸冲击载荷作用下产生一种波,通常叫做应力波或纵波,它在岩体中传播,能引起岩体的变形乃至破坏。这种动力学反应的特点是:

(1) 炸药爆炸首先形成应力脉冲,使岩体表面产生变形和运动。由于爆轰压力瞬间高达数千乃至数万兆帕,会在岩体表面产生冲击波。爆轰压力的特点是突跃式上升,峰值高而作用时间短,并随着冲击波的传播和衰减而变成应力波。如图 1-3 所示。

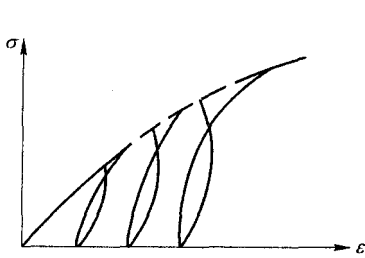


图 1-2 反复加载与卸载的
应力—应变曲线

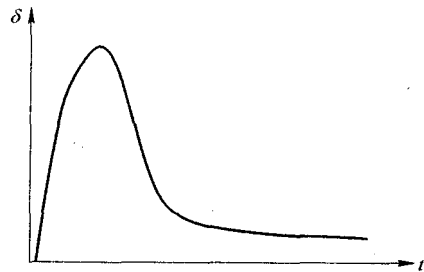


图 1-3 炸药爆炸形成的
应力波变化示意图

(2) 岩体中某局部被激发的应力脉冲是时间和距离的函数。由于应力作用时间短,往往其前沿扰动才传播了一小段距离而载荷已作用完毕。因此在岩体中产生明显的应力不均现象。

(3) 岩体中各点产生的应力呈动态,即所发生的变形、位移和运动均随时间而变化。

(4) 载荷与岩体之间有明显的“匹配”作用。在炸药与岩体紧密接触的条件下爆炸时,爆轰压力值与作用在岩体表面的应力值并不相等。这是由于介质或岩体的性质不同,在不同程度上改变了载荷作用的大小。换言之,由于加载体与承载体性质不同,匹配程度也不同,从而改变了作用结果和能量传递效率。

三、影响岩石物理力学性质的因素

岩石的物理力学性质与下述因素有关:

(1) 与组成岩石的矿物成分、结构构造有关。例如由重矿物组成的岩石比重大;由硬度高、晶粒小而均匀矿物组成的岩石坚硬;结构致密的岩石比结构疏松的岩石孔隙率小;成层结构的岩石具有各向异性等等。

(2) 与岩石的生成环境有关。生成环境是指形成岩石过程的环境和后来环境的演变。如岩浆岩体,深成岩常成伟晶结构,浅成岩及喷出岩则常为细晶结构。又如沉积岩体,海相与陆相沉积相比,其性质有很大差别。成岩后是否受构造运动的影响等,都会引起物理力学性质的变化。

(3) 与受力状况有关。实践证明,同一种岩石,其静、动力学性质有明显的差别。同样载荷下,单向受力和三向受力所表现的力学性质也有所不同。

第二节 岩石分级

由于岩石性质参数较多且较为复杂,为使工程爆破的设计施工人员对岩石的性质有一个整体把握,必须进行岩石分级。岩石分级广泛应用于各种与岩石有关的工程施工中,但由于问题的复杂性、各种类型工程差异性以及各学术派别观点的不一致,有关岩石分级的方法很多,而且目前尚无统一的或比较公认的分级方法,在工程施工中可考虑不同的工程特点参考选用。下面简要介绍几种有代表性的岩石分级方法。

一、按岩石坚固性分级

这种分级方法是前苏联学者普洛吉亚柯夫于20世纪20年代提出来的。他经过长期的研究,建立了一种岩石坚固性的抽象概念,即岩石的坚固性是凿岩性、爆破性和采掘性等的综合,也是岩石物理力学性质的体现。岩石坚固性在各种方式的破坏中的表现是趋于一致的。例如,某种岩石在各种破坏条件下,若难于凿岩,也难于爆破,难于崩落、破碎,等等。普氏有岩石强度、凿岩速度、凿碎单位体积岩石所消耗的功和单位炸药消耗量等多项指标来综合表征岩石的坚固性,并按岩石坚固性系数值的大小将岩石分为十个等级,如表1-3所示。由于生产力和科学技术的飞速发展,普氏当年采用的多项指标已经不适用,只剩下一个静载抗压强度指标沿用至今,即现在的普氏坚固性系数值直接用岩石的单轴抗压强度来确定。

表 1-3 普氏岩石分级简表

等 级	坚固性程度	典 型 的 岩 石	f
I	最坚固	最坚固、致密和有韧性的石英岩、玄武岩及其他各种特别坚固岩石	20
II	很坚固	很坚固花岗岩、石英斑岩、硅质片岩,较坚固的石英岩,最坚固的砂岩和石灰岩	15
III	坚 固	致密花岗岩,很坚固砂岩和石灰岩、石英质矿脉,坚固的砾岩,极坚固的铁矿石	10
IIIa	坚 固	坚固的石灰岩、砂岩、大理岩,不坚固花岗岩、黄铁矿	8
IV	较坚固	一般的砂岩、铁矿	6
IVa	较坚固	砂质页岩、页岩质砂岩	5
V	中 等	坚固的黏土质岩石,不坚固的砂岩和石灰岩	4
Va	中 等	各种不坚固的页岩,致密的泥灰岩	3
VI	较软弱	软弱的页岩,很软的石灰岩、白垩、岩盐、石膏、冻土、无烟煤,普通泥灰岩、破碎砂岩、胶结砾岩、石质土壤	2
VIa	较软弱	碎石质土壤、破碎页岩、凝结成块的砾石和碎石,坚固的烟煤、硬化黏土	1.5
VII	软 弱	致密黏土、软弱的烟煤、坚固的冲积层、黏土质土壤	1.0
VIIa	软 弱	轻砂质黏土、黄土、砾石	0.8
VIII	土质岩石	腐殖土、泥煤、轻砂质土壤、湿砂	0.6
IX	松散性岩石	砂、山麓堆积、细砾石、松土、采下的煤	0.5
X	流沙性岩石	流沙、沼泽土壤、含水黄土及其他含水土壤	0.3

$$f = \frac{R}{10} \quad (1-5)$$

式中 f ——普氏坚固性系数（无量纲）；

R ——岩石的单轴抗压强度，MPa（ $1\text{kg}/\text{cm}^2 \approx 0.1\text{MPa}$ ）。

实际上有的岩石单轴抗压强度大于 300MPa，为了保持原来的普氏系数最大值 $f=20$ ，1955 年苏联的巴隆（П. Н. Барон）修正上式为

$$f = \frac{R}{30} + \sqrt{\frac{R}{3}} \quad (1-6)$$

表 1-3 中所列 f 值在 0.3 ~ 20 之间。在 f 值大于 2 以后，一般只取整数值，以简单化便于使用。 f 值越大，说明岩石越坚固。

普氏岩石坚固性分级方法抓住了岩石抵抗各种破坏方式能力趋于一致的这个主要性质，并从数量上用一个简单明了的岩石坚固性系数 f 表示这种共性，所以在工程爆破中被广泛采用。但是，由于岩石坚固性这个概念过于概括，因而只能作为笼统的、总的分级。实际上有些岩石的可钻性、可爆性和稳定性并不趋于一致。有的岩石易于凿岩，难爆破；相反，有的岩石难凿岩，易爆破。而且以小块岩石试件的静载单向抗压强度来表征岩石的坚固性是不妥当的。再则，测定值的离散性很大，使其合理性和准确性都受到很大的影响。

二、东北工学院（现东北大学）岩石分级法

我国目前岩石分级状况，在概念上是普氏分级，而普氏系数 f 值的确定并无统一标准。为了适应现代化生产的需要，东北工学院综合考虑了在爆破材料、工艺、参数等标准条件下进行爆破漏斗实验和声波测定。根据爆破漏斗的体积、大块率、小块率、平均合格率和波阻抗等大量数据，运用数理统计多元回归分析以及电子计算机处理，得出了岩石可爆性指数 f 的公式（式 1-7），并按 f 值的大小将岩石划分为五级，如表 1-4 所示。

$$f = \ln \left[\frac{e^{67.22} K_d^{7.42} (\rho C)^{2.03}}{e^{38.44V} K_p^{1.89} K_x^{4.75}} \right] \quad (1-7)$$

式中 f ——岩石可爆性指数；

K_d ——大块率，%；

K_x ——小块率，%；

K_p ——平均合格率，%；

ρC ——岩石波阻抗， $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \times 10^5$ 。

这种岩石爆破性分级方法虽然可在现场进行测定，具有可行性，但存在的问题是块度测定工作量及劳动强度都很大，并有一定的随机性，求算指数的计算也不够简便，方法有待于完善。

表 1-4 东北工学院岩石可爆性分级

级 别	f	爆破性程度	代表性岩石
I	I ₁	极易爆	千枚岩、破碎性砂岩、泥质板岩、破碎性白云岩
	I ₂		
II	II ₁	易 爆	角砾岩、绿泥片岩、米黄色白云岩
	II ₂		
III	III ₁	中 等	阳起石石英岩、煌斑岩、大理岩、灰白色白云岩
	III ₂		
IV	IV ₁	难 爆	磁铁石英岩、角闪斜长片麻岩
	IV ₂		
V	V ₁	极难爆	矽卡岩、花岗岩、矿体浅色砂岩、石英片岩
	V ₂		

三、铁路隧道工程分级法

为适应我国铁路隧道建设发展的需要,在总结我国隧道围岩分类的基础上,并参考国内外有关围岩分类的成果,以 1972 年制定的我国铁路隧道围岩分类法(该分类法的特点是考虑岩石强度、岩体破碎程度、地下水、风化程度等因素,以定性为主)为基础,增加了 K_1 (完整性系数)、 J_v (体积节理数 (条/ m^3))、 RQD (岩石质量指标 (%))、 I_p (岩石点荷载强 (MPa))、 V_{pm} (岩体声波或地震波纵波速度 (m/s)) 等定量指标,又有工程地质条件的定性描述,提出了以岩体质量数 (RMQ) 作为划分岩体级别的主要综合定性指标的新方案。此外还在表中简要叙述各级岩体的毛洞稳定性。按 RMQ 值的多少将隧道工程岩体(围岩)分成五级,见表 1-5。我国铁路隧道现在就是使用这种方法进行岩体(围岩)分级。

表 1-5 我国铁路隧道工程岩体(围岩)分级法

级 别	主要工程地质特征	岩体质量数 (RMQ)	毛洞稳定状态(单、双线)
I	极坚硬、极完整岩体,呈整体或厚层结构,节理裂隙极不发育,含少量大间距或分散的节理。 $J_v < 5$ 条/ m^3 , $R_b > 100\text{MPa}$, $V_{pm} > 5.0\text{km/s}$	100 ~ 85	极稳定、无塌方,可能产生岩爆
II	坚硬完整岩体,呈块状结构或层间结合良好的中厚层状结构,节理裂隙较发育。 $J_v = 5 \sim 15$ 条/ m^3 , $R_b > 60\text{MPa}$, $V_{pm} > 4.0 \sim 5.5\text{km/s}$	85 ~ 65	稳定,局部有小塌方
	中等坚硬完整岩体,呈大块状整体或厚层状结构,节理不发育。 $J_v \leq 5$, $R_b = 30 \sim 60$, $V_{pm} = 4 \sim 5$	80 ~ 65	稳定,局部有小塌方
III	坚硬块状岩体,呈碎裂镶嵌结构,节理裂隙中等发育,含小断层,层状岩体结合力一般。 $J_v = 15 \sim 25$, $R_b \approx 60$, $V_{pm} = 3.5 \sim 4.5$	65 ~ 45	暂时稳定,由于局部不稳定块体的坍塌可能引起较大的塌方
	中等坚硬、中等完整岩体,呈碎裂镶嵌结构或中厚层块状结构和软硬互层结构。 $J_v = 5 \sim 15$, $R_b \approx 30 \sim 60$, $V_{pm} = 3.4 \sim 4.0$	65 ~ 45	暂时稳定,有不稳定块体塌落
	软质完整岩体,呈整体-巨块状结构,节理裂隙稍发育。 $J_v = 5 \sim 15$, $R_b = 20 \sim 30$, $V_{pm} = 3.0 \sim 4.0$	60 ~ 45	暂时稳定,高应力时容易产生塑性变形和剪切破坏