



高等专科学校教学用书

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

爆破工程

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

爆破工程

昆明冶金高等专科学校 管伯伦 主编

冶金工业出版社

前 言

本教材是在昆明冶金高等专科学校和本溪冶金高等专科学校多年教学实践和生产实践的基础上,并参考有关学校、科研和生产部门的资料与经验编写的,供高等专科学校采矿工程专业师生教学之用,亦可供有关工程技术人员参考。

本教材内容的选取除考虑金属矿山开采专业要求外,还考虑了化工、建材、水电、铁路、公路等专业的需要。各校在使用本教材时,可根据教学要求,对内容进行取舍或适当补充。

本教材的绪论、第一、九、十、十一章由本溪冶金高等专科学校薛若衡编写;第二、三、四、五、六、七、八、十二章由昆明冶金高等专科学校管伯伦编写。全书由管伯伦任主编,长沙有色冶金专科学校伍汉审稿,沈阳黄金学院张腾,连云港化学矿业专科学校李林、孙明铎参加了审稿工作。

在本书编写过程中,得到许多矿山、院校、科研设计部门和有关单位的支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,诚恳地欢迎读者批评指正。

编 者

1992.2.

目 录

绪论	1
第一章 岩石的性质及其分级	4
第一节 岩石的物理及力学性质	4
第二节 岩石分级	7
复习思考题	10
第二章 工业炸药	11
第一节 爆炸和炸药的基本概念	11
第二节 起爆药和单质猛性炸药	14
第三节 粉状硝铵类炸药	15
第四节 含水硝铵类炸药和其它炸药	22
复习思考题	29
第三章 炸药爆炸的基本理论	30
第一节 炸药的起爆和敏感度	30
第二节 炸药的传爆过程	35
第三节 炸药的氧平衡	41
第四节 炸药的爆容与爆热	44
第五节 炸药的爆炸特性及爆炸作用	48
复习思考题	51
第四章 起爆器材及其性能	52
第一节 雷管及其性能	52
第二节 导火索及其性能	60
第三节 导爆索及其性能	62
第四节 导爆管及其性能	63
复习思考题	64
第五章 起爆方法	65
第一节 非电起爆法	65
第二节 电力起爆法	72
第三节 发展中的新型起爆方法	83
复习思考题	85
第六章 爆破破岩机理	86
第一节 爆破破岩的原理	86
第二节 爆破漏斗及利文斯顿爆破理论	91
第三节 群药包爆破岩石破坏特征	103
第四节 装药量计算原理	104
复习思考题	106
第七章 浅眼爆破	108
第一节 概述	108
第二节 井巷掘进浅眼爆破	108

第三节	回采落矿浅眼爆破	119
第四节	装药和堵塞	121
第五节	药壶爆破	122
	复习思考题	124
第八章	地下深孔爆破	125
第一节	深孔排列和爆破参数	125
第二节	深孔设计施工及验收	122
第三节	深孔爆破设计	135
第四节	深孔爆破掘进天井	142
	复习思考题	145
第九章	露天深孔爆破	146
第一节	露天深孔的布置及爆破参数的确定	146
第二节	多排孔微差爆破	149
第三节	多排孔微差挤压爆破	153
第四节	预裂爆破	155
	复习思考题	161
第十章	露天药室爆破	162
第一节	抛掷爆破作用原理	162
第二节	抛掷作用原理	164
第三节	布药设计	169
第四节	施工设计	176
第五节	爆堆尺寸估算	180
第六节	地形地质条件对爆破作用的影响	182
	复习思考题	187
第十一章	控制爆破	188
第一节	微差爆破机理	188
第二节	挤压爆破机理	189
第三节	光面爆破	193
第四节	拆除爆破简介	199
第五节	静态爆破简介	204
	复习思考题	208
第十二章	爆破用仪表及爆破安全技术	210
第一节	爆破工程中常用的仪表	210
第二节	爆破安全技术	221
	复习思考题	224
	主要参考文献	225

绪 论

一、爆破工程研究的对象及其主要内容

爆破工程是研究爆炸对邻近介质破坏的一门科学。现代爆破工程所研究的爆炸，一般是指炸药的化学爆炸，即研究炸药爆炸对邻近介质做功或破坏。

1kg梯恩梯（TNT）爆炸时放出的热量为 $24 \times 10^5 \text{ J}$ ，这样大的热量在万分之几秒内产生，相当于功率为 10^8 kW 以上。如此巨大的功率是任何巨型机械所无法比拟的。

爆破工程课学习的主要内容：

（1）岩石物理力学性质及其分级。介绍岩石物理的及静、动态力学性质及爆破分级方法，旨在给爆破工作制定定额指标；

（2）工业炸药及其性能。除了讲述常用工业炸药的种类、组分、加工制作方法外，还较系统地介绍炸药爆炸的基本理论、参数及其性能，并学习计算及检验的方法，以便合理地选择和使用工业炸药；

（3）起爆器材与起爆方法。学习起爆与传爆的基本理论，并掌握常用起爆器材的使用方法和各种起爆技术；

（4）爆破技术。主要讲述爆破破岩的基本理论。爆破技术方面，重点介绍地下开采、露天开采、井巷掘进中的浅眼、深孔、药室爆破参数的确定、装药量计算方法、起爆方案的选择、爆破网路设计和计算方法、施工组织工作及爆破效果的分析方法等。在控制爆破中，还介绍各种控制爆破机理及控制爆破技术的具体应用；

（5）爆破仪表及爆破安全技术。介绍常用爆破仪表的原理、构造及使用方法。掌握爆破安全规程的主要内容及各种安全距离的计算方法、熟悉爆破工作所采取的各种安全措施，并牢固树立爆破安全的思想。

二、爆破工程在国民经济和矿山生产中的重要作用

采掘工业是国民经济的基础工业，为冶金、有色金属、化工、煤炭、石油、建材等部门提供矿物原料。到目前为止，冶金、有色金属等部门所需的矿石，绝大部分仍然依靠凿岩爆破或穿孔爆破的方法从岩体上采掘下来，即爆破工作仍为当前采掘矿岩的主要手段，而且在采矿成本中，爆破工程费用大约占40~50%。尤其在地下矿的井巷掘进中，凿岩爆破工作所需工时和成本都占整个掘进工时和成本的一半以上。地下采场的崩矿、二次破碎等更离不开凿岩爆破工作。为了提高采掘效率，降低采掘成本，加速矿山建设和开采强度，为国民经济和四化建设更多地提供优质的矿物原料，必须大力发展爆破技术。

在矿山生产中，利用爆破方法代替机械作业具有节省劳力、降低成本、加快工程进度等明显优越性。当前，矿山爆破工程的特点是，规模越来越大，技术要求越来越严格，方法越来越完善，安全防护措施越来越齐全。

除此之外，爆破工程在国民经济的其它部门也有着日益广泛的应用。例如，铁路公路工程中的隧道掘进、路堑平场、桥基处理；水路运输中的港口建设、炸礁疏浚、破冰抢险、爆破压砂；水利电力部门的爆破筑坝、截流、改河、炸堤排洪、掘沟导流；农林部门的爆炸驱雹、播种、灭火、人工降水、深翻土地、改良土壤；机械工业的爆炸成型、爆炸

焊接、复合、硬化、切割、人造金刚石及特种金属的加工；石油地质部门的爆炸钻孔、压裂、切割、探矿；在医疗方面，除部分炸药原料作药用之外，利用微型爆破炸碎各种结石；在航空航天、人造卫星、军事、其它科技等方面也有广泛的应用。由此可见，爆破工程在国民经济，尤其在采掘工业中的地位 and 作用是十分重要的，并具有非常广阔的发展前景。

采矿工程技术人员工作的一项主要内容就是从事爆破工作。所以，学好爆破工程，努力发展爆破技术，具有重要的意义，也是我们的光荣职责。另外，把爆破技术应用到新领域，还有待于我们不断地探索，不断地努力。

三、爆破工程的发展概况

早在6~7世纪，中国首先发明了黑火药，成为我国古代四大发明之一。唐代孙思邈所著《丹经内伏硫黄法》中已记载了由硫、硝、炭三种成分混制而成的黑火药。但当时黑火药仅用来制造鞭炮和焰火，而未用于采掘工业，直到南宋时期才用于军事。13世纪黑火药传入欧洲，直到1627年匈牙利首先将黑火药用于采矿的爆破工作中。1867年诺贝尔（A·Nobel）在发明火雷管的同时，发明了以硅藻土为吸收剂的硝化甘油炸药。从此，世界上才真正有了第一代工业炸药。

本世纪初，在一次硝酸铵意外爆炸的事故中发现了硝酸铵的爆炸性能。1925年，以硝酸铵为主要成分的粉状硝酸铵炸药问世，出现了第二代工业炸药。这种炸药的推广使用，使爆破技术向着安全、经济、高效的方向迈进了一大步。

早在抗战时期，中国共产党领导下的抗日根据地的军民利用缴获来的硝酸铵和柴油混合制成铵油炸药，成为世界上使用最早的铵油炸药，用来抗击日本侵略者。

1919年制成了以泰安为药芯的导爆索；1946年制成了毫秒电雷管，使爆破技术又大大提高了一步。

1956年，迈尔文·库克发明了浆状炸药，之后又研制成功了水胶炸药。以浆状炸药为代表的抗水硝酸铵炸药被称为第三代工业炸药。60年代推广使用了多孔粒状铵油炸药，这种炸药加工工艺简单，抗水性能比粉状铵油炸药高，成本较低。1967年，诺贝尔公司发明了导爆管非电导爆系统；70年代研制成功了乳化炸药，这是一种新型的抗水炸药，被称为第四代工业炸药。

与此同时，爆破理论的研究也有长足的发展。由于测试技术的日益进步，在生产实践中人们已逐步掌握了岩石爆破破坏的基本规律，先后提出了克服重力和摩擦力的破坏假说；自由面和最小抵抗线原理；爆破流体力学理论；最大应力强度理论；冲击波、应力波作用、反射波拉伸作用、爆生气体膨胀推力作用、爆生气体准静楔压作用、应力波与爆生气体共同作用原理；能量强度理论、功能平衡理论、爆破漏斗理论以及爆破断裂力学理论等等。这些理论都来源于实践又指导实践，大大促进了爆破技术的进步。特别是由于电子技术的发展，在爆破破岩机理、爆破块度分布规律等方面，可通过建立数学模型，运用现代计算机技术，进行系统研究。

这些都为现代爆破技术的发展奠定了基础，并使爆破工程成为一门独立的学科。

我国是黑火药发明的文明古国，又是冲击式凿岩的始祖。但是在旧社会，特别是自鸦片战争以来的一百多年半封建半殖民地的旧中国，由于外国列强的侵略瓜分，由于闭关锁国的政策以及三座大山的压迫，我国的科学技术得不到发展，爆破技术更远远落后于西方，

就连一些常用的工业炸药和起爆器材都不能生产，长期依赖进口。

解放后，党和政府十分重视采掘工业，爆破技术得到了迅速的发展。在炸药方面，建国后重视了各种系列工业炸药的研制和生产。硝铵类炸药得到了应用和推广；浆状炸药和乳化炸药在某些指标上，已达到或接近世界先进水平。由于炸药品种的增多，质量的提高，那种长期依赖进口的局面已经成为过去。在起爆器材方面，1965年生产了毫秒电雷管，继爆管和导爆管也相继问世，并得到了广泛的应用；无起爆药雷管的研制成功为我国独创。在爆破技术方面，例如1956年白银露天大爆破成为当时世界上最大的一次药室爆破；1959年东川口进行了定向爆破筑坝，取得了成功；党的十一届三中全会以后，在葛洲坝成功地实施了大规模的定向抛掷爆破，取得了理想的效果，堪称国内外控制爆破的又一典范。在爆破理论方面也取得了相当大的成就，某些方面已达到世界先进水平。

虽然我国在爆破工程方面取得了巨大的成就，但是与世界先进水平相比还存在一定的差距。所以，我们要学习国外的先进技术和经验以及先进的理论，不断探索与提高，勇于开拓新的领域并不断攀登新的高峰。

四、爆破工程课的特点及学习方法

对采矿专业来说，《爆破工程》是一门专业性很强的专业课，又是为某些专业课打基础的专业基础课。所以，它既有基础课的特点，又有专业课的特点。

本课的基本理论比较系统、完整，基本知识的适用性比较广泛。学习时应牢固地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。

本课的专业特点是实践性强，因为它所研究的问题都是来自生产实践。所以在学习时一定要理论联系实际，要结合矿山及其它爆破工程的具体条件，用学到的基本理论和基本知识去解决爆破工程中的实际问题。结合理论学习还要进行实验、测试、实习以及课程设计等实践教学，以加强动手能力的培养。

本课的另一个特点是技术更新快，就是说爆破技术发展很快。新药种、新材料、新工艺、新技术不断涌现，爆破理论也在不断地充实和完善。昨天本来很适用的东西，今天就可能被淘汰。所以在学习时要有时间观念。要不断地总结经验，吸收先进的东西，不应满足现有教材中、课堂上所讲述的内容。

本课的再一个特点是综合性强。所谓综合性强，就是指爆破破岩的过程中涉及的因素很多。各因素之间可能相互联系构成各种不同的系统，情况错综复杂。学习中必须运用矛盾对立统一唯物辩证法的观点，去综合分析，找出主要矛盾，解决实际问题。

爆破工程不仅仅是一种工程技术，而且是一门比较复杂的边缘科学。在学习过程中，要学习和运用流体动力学、热化学、冲击波理论，还要掌握工程力学、岩体力学、电工学、物理学及地质学等课程中的有关内容，并且要与金属矿床地下开采、露天开采、井巷掘进、矿山运输、安全技术等专业课密切联系起来。

第一章 岩石的性质及其分级

在矿山采掘工作中，通常是用凿岩或穿孔和爆破的方法来破碎岩石。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，能为开采设计、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、岩石的物理及静力学性质

1. 孔隙度、密度及容重 孔隙度 η ，是指岩石中各孔隙的总体积 V_0 对岩石总体积 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。孔隙度越大，岩石强度降低的就越严重。

密度 ρ ，是指构成岩石的物质质量 M 对该物质所据有的体积 $V - V_0$ 之比，即

$$\rho = \frac{M}{V - V_0}, \text{ g/cm}^3 \quad (1-2)$$

式中 V 、 V_0 意义同前。

容重 γ ，是指岩石的重力 G 对包括孔隙在内的岩石体积 V 之比，即

$$\gamma = \frac{G}{V}, \text{ t/m}^3 \quad (1-3)$$

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。

2. 岩石的碎胀性 岩石破碎成块后，因碎块之间存有空隙而总体积增加，这一性质称为岩石的碎胀性，它可用碎胀或松散系数 K 表示。 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系数，特别是地下开采矿石爆破所需容许碎胀空间的大小，同该矿石的碎胀系数有着密切的关系。

3. 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。它有阻止波能传播的作用，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越大，可获得较好的爆破效果。

4. 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。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 $\sigma = E\varepsilon$;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;当应力值超过弹性极限时,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,岩石与其它材料不同,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,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,大多数属于脆性岩石。

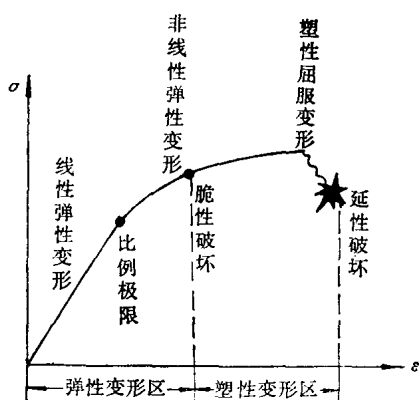


图 1-1 岩石的应力-应变曲线

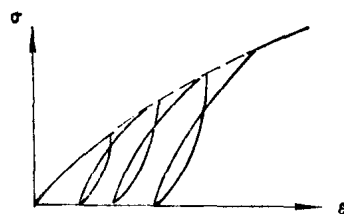


图 1-2 反复加载与卸载的应力-应变曲线

5. 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。

硬度,是指岩石抵抗工具侵入的能力。凡是用刃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。

6. 岩石的裂隙性 由于岩体存在节理、裂隙等结构面,所以岩体的弹性常数、波传播速度不同于岩石试件。实验表明,对同一种岩石而言,岩体的波桑比要比试件的值大,而弹性常数及波速则比试件小。工程上常用岩体与试件内的波速的比值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“被若干组结构面切割形成的岩块组成的地质体”。它的性质由岩块与结构面共同决定。岩石的裂隙性对爆炸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,使问题的研究更加复杂化。

以上岩石性质都从不同方面影响着爆破效果。

几种岩石的孔隙度、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、容重和波阻抗值

岩石名称	孔隙度 (%)	密度 (t/m ³)	容重 (t/m ³)	纵波波速 (m/s)	波阻抗 (kg·cm ³ ·s)
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、岩石的动力学性质

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 炸药爆炸以动和静两种载荷先后对岩石发生作用并传递能量。可用介质的应变率(表1-2),或用冲击速度、加载速度来区分动、静载荷。

表 1-2 载荷状态分类

应变率 $\dot{\epsilon}(\text{s}^{-1})$	$<10^{-6}$	$10^{-6}\sim 10^{-4}$	$10^{-2}\sim 10$	$10\sim 10^3$	$>10^4$
载荷状态 试验方法	流变 稳定加载	静态 液压机加载	准静态 气动式快速加载	准动态 霍金逊杆加载	动态 爆炸或冲击加载

应变率 $\dot{\epsilon}$ 定义为应变随时间的变化率, $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ (单轴向弹性变形范围内), 或 $\dot{\epsilon} =$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)}{dt} = \frac{1}{l_0} \times \frac{d(\Delta l)}{dt}.$$

冲击速度 v_0 定义为试件一端质点相对另一端质点的运动速度, $v_0 = \frac{d(\Delta l)}{dt}$ 。

加载速度 u_0 定义为应力随时间的变化率, $u_0 = \frac{d\sigma}{dt}$ 。

按上述定义, 不难导出三者之间的关系。

2. 岩体在爆炸冲击载荷作用下的力学反应 岩体在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 MPa, 则在岩体表面产生冲击波。压力特点是突跃式上升, 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。

(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所激发的应力值,两者并不一定相等。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。

研究岩体动力学性质,重点在于研究岩体内应力波的运动形式、运动参数及其在岩体内引起的变形特征。这些问题将在《弹性力学》和《岩体力学》中讲授。

岩石的物理力学性质与下述条件有关。

(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度小;成层构造的岩石具有各向异性等等。

(2) 与岩石生成环境有关 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、深成岩易成伟晶结构,浅成岩及喷出岩则常为细晶或非晶结构。又如沉积岩体,海相与陆相沉积相比,其性质有很大差别。成岩后是否遭受到构造运动的影响等,都会引起岩体的物理力学性质的变化。

(3) 与受力情况有关 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(详见《岩体力学》)。

第二节 岩石分级

目前,在采掘工业中有关岩石分级的方法很多,但由于问题的复杂性以及各派论点的不一致,因此尚无统一的或比较公认的分级方法。下面简要介绍几种具有代表性的岩石分级方法。

一、按岩石坚固性的分级方法

这种分级方法是苏联学者普洛托吉亚柯诺夫(М.М.Пороцкий Яконов)于本世纪二十年代提出来的。普氏通过长期的观测,建立了一种岩石坚固性的抽象概念。即岩石坚固性是凿岩性、爆破性及采掘性等之综合,也是岩石物理力学性质的概括体现。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,若难以凿岩,也难以爆破,难以崩落,等等。普氏用岩石强度、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 f 值的大小将岩石分成十个等级,如表1-3所示。由于生产力和科技飞速发展,普氏当年采用的多项指标已经过时,只剩下一个静载抗压强度指标沿用至今,即现今的普氏坚固性系数值直接用岩石的静载单轴抗压强度来确定。

$$f = R/10 \quad (1-5)$$

式中 f ——普氏坚固性系数(无量纲); R ——岩石单轴抗压强度, MPa*。

* $1\text{kg/cm}^2 \approx 0.1\text{MPa}$

表 1-3 普氏岩石分级简表

等 级	坚固性程度	典 型 的 岩 石	f 值
I	最 坚 固	最坚固、细致和有韧性的石英岩、玄武岩及其它各种特别坚固岩石	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
III _a	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
IV _a	较 坚 固	砂质页岩、页岩质砂岩	5
V	中 等	坚固的粘土质岩石、不坚固的砂岩和石灰岩	4
V _a	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
VI _a	较 软 弱	碎石质土壤、破碎页岩、凝结成块的砾石和碎石、坚固的煤、硬化粘土	1.5
VII	软 弱	致密粘土、软弱的烟煤、坚固的冲积层、粘土质土壤	1.0
VII _a	软 弱	轻砂质粘土、黄土、砾石	0.8
VIII	土 质 岩 石	腐植土、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、含水黄土及其它含水土壤	0.3

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 (Л.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 来表示这种共性, 所以在采矿工程中被广泛采用。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、苏氏岩石分级方法

苏联A.Φ.苏哈诺夫认为用不同的方式破岩时, 由于破岩机理不同, 岩石所表现的坚固性也未必趋于一致。所以, 他根据实际采用的采掘方法, 并规定了标准条件下的钻速、单位耗药量等对岩石进行分级, 以表征岩石的坚固性, 还给出了非标准条件时的修正系数。

表 1-4 哈努卡耶夫岩石可爆性分级

裂隙等级	裂隙程度	天然裂隙 平均间距 (m)	岩石成块 性程度	每m ³ 岩体天 然裂隙的面 积 (m ²)	f 值	密度 (t/m ³)	波阻抗值 ($\times 10^9$ g/cm ³ ·cm/s)
I	极度裂隙(破碎岩石)	<0.1	碎块	33	<8	<2.5	<5
II	强烈裂隙	0.1~0.5	中块	33~9	8~12	2.5~2.6	5~8
III	中等裂隙	0.5~1	大块	9~6	12~16	2.6~2.7	8~12
IV	轻微裂隙	1~1.5	很大块	6~2	16~18	2.7~3.0	12~15
V	微小裂隙(整体岩石)	>1.5	特大块(整体)	2	>18	>3.0	>15

裂隙等级	岩体内结构体含量 (%)			炸药单耗 (kg/m ³)	爆破性级别
	>0.3m	>0.7m	>1m		
I	<10	0	0	<0.35	易 爆
II	10~17	0~30	0~5	0.35~0.45	中 爆
III	70~90	30~70	5~40	0.45~0.65	难 爆
IV	100	70~90	40~70	0.65~0.9	很难爆
V			70~100	>0.9	极难爆

表 1-5 东北工学院岩石可爆性分级

级	别	F 值	爆破性程度	代 表 性 岩 石
I	I ₁	<29	极易爆	千枚岩、破碎性砂岩、泥质板岩、破碎性白云岩
	I ₂	29.001~38		
II	II ₁	38.001~46	易 爆	角砾岩、绿泥片岩、米黄色白云岩
	II ₂	46.001~53		
III	III ₁	53.001~63	中 等	阳起石石英岩、煌斑岩、大理岩、灰白色白云岩
	III ₂	63.001~68		
IV	IV ₁	68.001~74	难 爆	磁铁石英岩、角闪斜长片麻岩
	IV ₂	74.001~81		
V	V ₁	81.001~86	极难爆	砂卡岩、花岗岩、矿体浅色砂岩石英片岩
	V ₂	>86		

普氏强调各种破岩方式的共性、同一性，而苏氏则强调其个性、差异性。苏氏岩石分级方法虽现场可自行测定，但因其过于繁琐而很少采用。

三、哈努卡耶夫岩石分级方法

苏联的哈努卡耶夫 (A. H. Ханукаев) 根据岩石弹性纵波速度是岩石的动态属性，可以作为岩石物理力学性质的综合量度，又可以测量裂隙的影响，提出了岩石波阻抗是岩石可爆性分级方法的依据。按岩石波阻抗值的大小可将岩石分为五级，如表1-4所示。表中波阻抗值小者易爆，大者难爆。该分类同时还考虑了岩石结构体尺寸和含量、岩石裂隙的平均间距、每m³岩石中天然裂隙的面积以及单位耗药量等因素。

四、以能量消耗为准则的利文斯顿爆破漏斗岩石分级方法

美国的利文斯顿 (C. W. Livingston) 认为，能量准则是研究岩石破坏的根本准则，

它最能反映岩石爆破性的实质。当炸药量和埋深一定时，爆破漏斗体积的大小和爆后破岩块度的组成，直接反映消耗能量的大小和爆破效果的好坏，从而也表征了岩石的可爆性。

五、我国岩石分级概况

我国目前岩石分级状况也较混乱。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。由于工程性质和状况不同，不同行业系统的岩石分级方法差异性很大。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，并按 F 值的大小将岩石划分为五级，如表1-5所示。

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

式中 F ——岩石可爆性指数；

V ——爆破漏斗体积， m^3 ；

K_d ——大块率，%；

K_x ——小块率，%；

K_p ——平均合格率，%；

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

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 F 值的计算不够简便，方法还有待于完善。我国另一些科研单位根据不同工程的需要，也先后提出了自己的岩石分级方法。

复习思考题

1. 岩石有哪些主要的物理力学性质？它们对爆破效果有何影响？
2. 什么叫波阻抗？它有何意义？
3. 岩石有哪些静、动力学特征？
4. 岩石分级的意义是什么？
5. 简述与评价各种岩石分级方法。你对我国岩石分级方法有何看法？
6. 试提出自己的岩石分级方案。

第二章 工业炸药

第一节 爆炸和炸药的基本概念

一、爆炸现象

自然界广泛地存在着爆炸现象。根据产生的原因和特点，爆炸可分三类。

1. 物理爆炸 爆炸前后，仅发生物态的急剧变化，而物质的分子组成并未改变，则这类爆炸称为物理爆炸。如锅炉爆炸是由于炉内的水受热后转化为水蒸汽，随水蒸汽的增多，压力不断升高（假设调压阀失控）。当炉内蒸汽压力值超过炉壁强度时，就会发生爆炸，炉壁破裂和飞散。这种仅仅是物质形态发生转化而物质分子组成并未改变的爆炸，属物理爆炸。

2. 化学爆炸 爆炸前后，不仅发生物态的急剧变化，而且产生化学反应，使物质的分子组成发生变化，这类爆炸称为化学爆炸。如炸药获得外界一定能量的作用后，迅速产生化学反应，产生大量气体，释放出能量。炸药爆炸前后，不仅物态发生变化，并且物质的分子组成也发生变化。炸药爆炸属化学爆炸。

3. 核爆炸 某些物质的原子核发生裂变或聚变的连锁反应，在瞬时释放出巨大能量，形成高温高压并辐射多种射线，这种反应称为核爆炸。

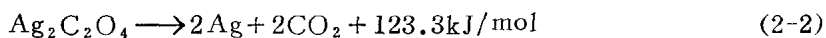
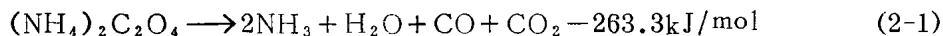
爆炸是能量的瞬时转化过程，在该过程中物质的潜能瞬时转化为机械功，并伴随声音和热效应。

二、化学爆炸必备的条件

在矿业工程中，应用最广泛的是化学爆炸，尤其是在金属矿山和多数非金属矿山，几乎都利用工业炸药的爆炸破碎岩石和矿石。

利用炸药爆破矿岩时，爆炸瞬间可以看到火光、烟雾、飞石，随即听到响声。这表明爆炸反应是放热的，有大量气体产物，而且反应的速度极快。这是炸药爆炸时的三个基本特征，是形成化学爆炸的三个必备条件，常又称为化学爆炸三要素。

1. 放热反应 是炸药爆炸最基本特征。放热才有能量使反应过程自行传播，否则就不能形成爆炸。如草酸铵在吸热反应条件下不爆炸；而草酸银在放热反应条件下则爆炸，即：



同时热是作功的能源。爆炸放出的热量是炸药做功能力的基本标志，常以此作为比较炸药能量的指标。1kg常用炸药爆炸可释放出的热量为2500~5500kJ，瞬时它能把爆炸产物加热到2000~5000℃高温。

2. 反应速度极快 是炸药爆炸区别一般化学反应的标志。仅有反应过程大量放热的条件，还不足以形成爆炸，必须还要化学反应速度快，才能产生爆炸。因为，只有高速的化学反应，才能忽略能量转变过程中热传导和热辐射的损失，使反应所释放的热量全部用来加热气体产物，使其温度、压力猛增，借助气体的膨胀对外界做功，便产生爆炸现

象。例如，1kg煤在空气中燃烧可放出10032kJ热量，这就比1kg炸药爆炸反应时放出的热量（2900~6300kJ/kg）多得多，然而却并不能形成爆炸。

一般工业炸药的爆炸反应速度可达到3000~6000m/s。一个普通的小药卷可在 10^{-3} ~ 10^{-4} s内反应完毕。

3. 反应生成大量气体 炸药通过化学反应所产生的气体产物是对外界做功的媒介物。由于气体具有可缩性和很高的膨胀系数，炸药爆炸瞬间产生的气体产物处于强烈的压缩状态，在反应所释放的热量的作用下形成高温气体，急剧膨胀，对周围介质产生巨大压力而造成破坏。也就是说，炸药的內能借助于气体的膨胀迅速转变为对外界的机械功。如果反应时没有大量气体产生，那么，即使这种反应的放热量很大，反应速度很快，也不会形成爆炸。

工业炸药爆炸时的气体生成量，一般为700~1000L/kg左右。

综上所述，产生化学爆炸的三个条件是相辅相成的，缺一不可。凡能同时具备上述三个条件的物质，当其受到外界某种能量作用激发后，化学反应就能自行传播，并以爆炸形式在瞬间完成。

三、炸药的定义和特点

炸药是一种在一定外能作用下，能发生高速化学反应、放出大量的热和生成大量气体的物质，即炸药是一种能把它所集中的能量在瞬间释放出来的物质。

从本质上对炸药进行分析，可归纳出如下几个特点：

1. 炸药的含能量很集中 炸药与一般燃料比较，它的单位容积所含的能量高，这一点可由炸药爆炸与燃料燃烧所释放出来的热量多少进行比较说明，如表2-1中所列。

表 2-1 某些炸药和燃料的能量比较表

物 质 名 称		单位质量的 热量 (J/kg)	单位容积的热量 (J/L)	物 质 名 称		单位质量的 热量 (J/kg)	单位容积 的热量 (J/L)
炸 药	梯恩梯	4222	6772($\rho=1.6\text{g/cm}^3$)	燃	碳氧混合物（完全燃烧）	8945	17.1
	黑索金	6207	9948($\rho=1.6\text{g/cm}^3$)		氢氧混合物（完全燃烧）	13501	7.1
	硝化甘油	5359	8569($\rho=1.6\text{g/cm}^3$)	料			

由表2-1看出，单位质量炸药爆炸时的放热量比相同质量的燃料与空气混合燃烧时所产生的热量少，但单位容积炸药爆炸放热量要比燃料燃烧产生的热量大几百倍。这说明炸药能量的密度大，所含能量集中。

从功率角度看，炸药所含的能量能在瞬间（常以 μs 或 ms 量级表示）释放出来，可达到相当大的理论功率，产生巨大的作功效果，这是一般能源无法比拟的。

2. 炸药的组成包含了爆炸反应所需的元素或基团 炸药受到外界一定能量激发后，即能进行高速爆炸反应，不需要再从外界补充其它物质。这主要是因为炸药本身同时含有氧化剂和可燃剂等。

3. 绝大多数炸药的物质结构是一种暂时相对稳定的体系 在常温常压的环境中，炸药并不是“一触即发”极不稳定的物质，特别是矿山爆破常用的炸药是比较稳定的。因为在炸药分子中，化学性活泼的碳、氢原子与氧原子之间间隔有化学性稳定的氮原子，形成相对稳定的化学键，使炸药处于暂时相对稳定状态。当受到足够外能作用时，碳、氢原子