

高等学校教材

岩石爆破机理

钮强 编著

东北工学院出版社

高等学校教学用书

岩石爆破机理

钮 强 编著

东北工学院出版社

内 容 简 介

本书从岩石爆破破碎原理出发,论述岩石爆破性及其分级;根据冲击波、应力波、地震波的波动作用和爆生气体的准静作用,分析爆破近区、中区、自由面区、远区的破坏规律和地震效应;阐述利文斯顿爆破理论、爆破数学模型和块度分布电算方法。控制爆破机理的论述有助于推动理论与实践的结合和发展。

本书可用作高等院校本科生教材和研究生参考书,亦可供从事爆破生产、科研、设计的有关技术人员参考使用。

岩 石 爆 破 机 理

钮 强 编 著

东北工学院出版社出版发行	东北工学院印刷厂印刷
(沈阳·南湖)	(辽新出许字 89084 号)

开本: 787×1092 1/16	印张: 10	字数: 250 千字
1990 年 8 月第 1 版	1990 年 8 月第 1 次印刷	
印数: 1~1650 册		

责任编辑: 刘宗玉	责任校对: 郭爱民
-----------	-----------

封面设计: 唐敏智

ISBN 7-81006-235-2/TD·12	定价: 2.40 元
--------------------------	------------

前 言

我国最早发明了火药。此后，爆破技术在国内外得到广泛的应用，发展亦十分迅速。长期以来，岩石爆破仅被认为是利用炸药能来破碎岩石的一种技术，很少有人深入研究其原理和理论问题。直至 20 世纪 50 年代人们才逐渐地了解到它不仅是一种技术，而且是一门比较复杂的边缘科学。

采矿、基建、交通、水电等工程，面对岩体的坚固与庞大，不采用爆破技术难以解决工程问题。为达到安全与高效的预期目的，不能光凭经验，应有岩石爆破理论的指导。理论来源于实践又指导实践。炸药爆炸的热化学与爆轰波理论、热流体动力学与冲击波理论等构成了爆炸力学的新课题。岩石的各向异性，非均质性和地质构造的复杂性，在爆炸作用下的弹性动力学、固体中的应力波、岩石断裂力学等组成了爆炸岩石力学的新内容。

随着先进测试技术的应用，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。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，爆破流体力学理论，最大压应力、剪应力、拉应力强度理论，冲击波、应力波作用，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，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，有些互相矛盾，有些互相渗透。本书论点建立在冲击波、应力波与爆生气体共同作用的基础上，比较系统地分析了爆破近区、中区、自由面区和远区的爆破规律和地震效应，阐明了爆破漏斗形成过程及其与生产应用的关系，计算了冲击波、应力波、地震波和爆生气体作用的有关参数，阐述了爆破数学模型和爆破块度分布的电算方法，并扼要地论述了控制爆破机理。

期望本书能对岩石爆破机理的深入研究、对生产爆破效果的改善起到“开卷有益”的作用。由于编者水平有限，不足和错编之处在所难免，恳请读者不吝赐教。

钮 强

1989 年 10 月于沈阳

目 录

前 言

第一章 岩石爆破性及其分级

- 第一节 影响岩石爆破性因素..... (1)
- 第二节 岩石的变形性质及其力学特性..... (4)
- 第三节 岩石爆破性的判据和分级..... (8)

第二章 岩石爆破中冲击波参数计算

- 第一节 岩石爆破冲击波特点..... (13)
- 第二节 高温、高压作用下坚固岩石的状态方程..... (15)
- 第三节 岩石爆破中冲击波参数计算..... (16)
- 第四节 岩石中冲击波参数与炸药爆轰波参数间的关系..... (18)
- 第五节 岩石中冲击波的衰减..... (19)

第三章 岩石爆破应力波参数计算

- 第一节 应力波参数计算..... (23)
- 第二节 岩石中的动态应力场..... (26)

第四章 爆生气体的作用及参数计算

- 第一节 爆生气体的参数计算..... (34)
- 第二节 爆生气体的膨胀与作用..... (36)
- 第三节 以爆生气体作用为主导的岩石破裂模型..... (37)

第五章 爆破近区岩石破坏过程及冲击波传播规律

- 第一节 压缩、粉碎区的破坏过程..... (44)
- 第二节 爆破近区硬岩冲击波参数计算..... (47)
- 第三节 爆破近区岩石中冲击波随距离的衰减规律..... (51)

第六章 爆破中区岩石破坏过程及应力波、裂隙的传播规律

- 第一节 破裂区的破坏过程..... (53)
- 第二节 应力波参数计算..... (54)
- 第三节 爆破裂隙与断裂力学的关系..... (57)
- 第四节 裂隙形成的几个阶段..... (61)
- 第五节 岩石中裂隙的传播速度..... (63)
- 第六节 裂隙的传播与分叉..... (66)

第七节 相邻炮眼间裂隙的传播.....	(70)
第七章 自由面附近的破坏过程及其应力计算	
第一节 自由面的破坏作用.....	(71)
第二节 自由面附近的应力计算.....	(72)
第八章 爆破远区的地震效应及地震波传播规律	
第一节 爆破地震效应.....	(78)
第二节 爆破地震波的传播.....	(81)
第三节 毫秒爆破降震及爆震安全距离的确定.....	(87)
第九章 爆破漏斗形成过程及利文斯顿爆破理论	
第一节 爆破漏斗形成过程.....	(92)
第二节 爆破漏斗的几何参数及其四种基本形式.....	(93)
第三节 利文斯顿爆破漏斗理论.....	(94)
第十章 岩石爆破破坏过程的数学模型和爆破块度分布的电算方法	
第一节 怀里尔和哈里斯的数学模型.....	(112)
第二节 露天矿台阶爆破矿岩破碎过程的三维数学模型.....	(116)
第三节 爆破块度分布的计算.....	(127)
第十一章 控制爆破机理	
第一节 定向爆破机理.....	(131)
第二节 微差爆破机理.....	(137)
第三节 挤压爆破机理.....	(139)
第四节 光面爆破与预裂爆破成缝机理.....	(141)
第五节 水压爆破机理.....	(145)
结 论	(147)
参考文献	

第一章 岩石爆破性及其分级

岩石是爆破的对象,金属矿山的绝大部分、非金属矿及煤矿等矿山的不少矿岩都采用爆破方法进行破碎和采掘。为了取得良好的爆破效果,必须了解和掌握岩石的爆破性。

岩石的爆破性是指岩石对爆破的抵抗能力或可爆的难易程度。爆破岩石的目的是根据爆破任务的要求,把岩石从岩体中脱离,破碎成一定的块度,移动或抛扔出一定的距离,并堆成一定的形状等等。岩石的爆破性是岩石自身物理力学性质和炸药、爆破工艺的综合反映,它不仅是岩石的单一固有属性,而且是岩石一系列固有属性的复合体,它在爆破过程中表现出来,并影响着整个爆破效果。

岩石爆破性分级,是根据岩石爆破性的定量指标,将岩石划分为爆破难易的等级。它是采矿方法或井巷掘进不同方案的选择、爆破定额的编制和爆破参数的确定等爆破设计的重要依据,并为建立统一的爆破工程的优化计算体系提供基础资料,而且,岩石爆破性分级也是矿山企业管理的科学根据之一。

第一节 影响岩石爆破性的因素

影响岩石爆破性的主要因素,一方面是岩石本身的物理力学性质的内在因素(见表1-1);另一方面是炸药性质、爆破工艺等外在因素。前者决定于岩石的地质生成条件、矿物成分、

表 1-1 几种典型岩石的物理力学特性

岩 石		容 重 (g/cm³)	孔 隙 度 (%)	纵波速度 (km/s)	波 阻 抗 (MPa/s)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊 松 比
岩 浆 岩	花 岗 岩	2.6~2.8	0.1~5	4.35~6.8	113~190	100~250	10~20	50~90	0.1~0.37
	石 英 岩	2.65~2.66	0.3	4.9~6.7	130~178	290~300	10~15	40~100	0.07~0.28
	玄 武 岩	2.7~2.86	0.6~19	5.4~7.0	146~200	300~400	—	70~120	0.2~0.3
	辉 绿 岩	2.85~3.05	0.6~12	6.3~7.5	180~230	160~230	10~20	90~140	0.2~0.32
	辉 长 岩	2.9~3.1	0.6~1	5.6~6.3	162~195	260~310	14~20	70~110	0.2~0.3
沉 积 岩	石 煤	1.3~1.65	0.4	1.5~2.4	19.5~39.6	1~35	0.2~2.5	3~10	0.14~0.36
	岩 盐	2.0~2.2	—	4.2~5.6	90~121	20~40	1~4	16~36	0.25~0.45
	板 岩	2.3~2.7	—	2.5~6.0	57.5~162	50~150	4~25	15~43	0.22~0.25
	砂 岩	2.1~2.9	2.6	3.0~4.6	63~133	35~150	3~10	17~50	0.19~0.45
	石 灰 岩	2.3~3.0	1.5~15	3.2~5.5	73.5~165	90~160	10~15	40~75	0.2~0.33
	白 云 岩	2.3~2.8	3~20	5.2~6.7	120~188	100~190	30~40	50~95	0.2~0.4
变 质 岩	片 麻 岩	2.65~2.85	—	5.5~6.0	146~171	110~280	10~20	60~80	0.28~0.4
	大 理 岩	2.7~2.88	0.1	4.4~5.9	119~170	60~190	6~16	60~90	0.34~0.4
	石 英 岩	2.65~2.9	0.71	4.3~6.5	114~189	290~300	10~15	40~100	0.15~0.09

结构和后期的地质构造，它表征为岩石密度或容重、孔隙性、碎胀性、弹性、塑性、脆性和岩石强度等物理力学性质；后者则取决于炸药类型、药包形式和重量、装药结构、起爆方式和间隔时间、最小抵抗线与自由面的大小、数量、方向以及自由面与药包的相对位置等等。此外，还包括对爆破块度、爆堆形式以及抛掷距离等爆破效果的影响。显然，岩石本身的物理力学性质是最主要的影响因素。

〔炸药爆炸对岩石的爆破作用主要有两个方面，其一是克服岩石颗粒之间的内聚力，使岩石内部结构破裂，产生新鲜断裂面；其二是使岩石原生的、次生的裂隙扩张而破坏。前者取决于岩石本身的坚固程度；后者则受岩石裂隙性所控制。因此，岩石的坚固性和岩石的裂隙性是影响岩石爆破性最根本的影响因素。〕

一、岩石的结构（组分）、内聚力和裂隙性对岩石爆破性的影响

岩石由固体颗粒组成，其间有空隙，充填有空气、水或其它杂物。当岩石受外载荷作用，特别是在受炸药爆炸冲击载荷作用下，将引起物态变化，从而导致岩石性质的变化。

矿物是构成岩石的主要成分，矿物颗粒愈细、密度愈大，愈坚固，则愈难于爆破破碎。矿物密度可达 4g/cm^3 以上，岩石的容重不超过其组成矿物的密度。岩石容重一般为 $1.0 \sim 3.5\text{g/cm}^3$ 。随着密度增加，岩石的强度和抵抗爆破作用的能力也增大，破碎或抛移岩石所消耗的能量也增加，这就是一般岩浆岩比较难以爆破的原因。至于沉积岩的爆破性，除了取决于其矿物成分之外，很大程度受其胶结物成分和颗粒大小的影响。例如，沉积岩中细粒有硅质胶结物的，则坚固，难爆破；含氧化铁质胶结物的次之；含有石灰质和粘土质胶结物的沉积岩不坚固，易爆破。变质岩的组分和结构比较复杂，它与变质程度有关。一般变质程度高、质量致密的变质岩比较坚固，难爆；反之则易爆破。

岩石又是由具有不同化学成分和不同结晶格架的矿物以不同的结构方式所组成。由于矿物成分的化学键各不相同，则其分子的内聚力也各不相同。于是，矿物晶体的强度便取决于晶体分子之间作用的内力、晶体结构和晶体的缺陷。通常，晶体之间的内聚力，都小于晶体内部分子之间的内聚力。并且，晶粒越大，内聚力越小，细粒岩石的强度一般比粗粒岩石的大。又因为晶体之间的内聚力小于晶体内的内聚力，所以，破坏裂缝都出现在晶粒之间。

岩石中普遍存在着以孔隙、气泡、微观裂隙、解理面等形态表现出来的缺陷，这些缺陷都可能导致应力集中。因此，微观缺陷将影响岩石组分的性质，大的裂隙还会影响整体岩石的坚固性，使其易于爆破。

岩体的裂隙性，不但包括岩石生成当时和生成以后的地质作用所产生的原生裂隙，而且包括受生产施工、周期性连续爆破作用所产生的次生裂隙。它们包括断层、褶曲、层理、解理、不同岩层的接触面、裂隙等弱面。这些弱面对于爆破性的影响有两重性：一方面，弱面可能导致爆生气体和压力的泄漏，降低爆破能的作用，影响爆破效果；另一方面，这些弱面破坏了岩体的完整性，易于从弱面破裂、崩落，而且，弱面又增加了爆破应力波的反射作用，有利于岩石的破碎。但是，必须指出，当岩体本身包含着许多尺寸超过生产矿山所规定的大块（不合格大块）的结构尺寸时，只有直接靠近药包的小部分岩石得到充分破碎，而离开药包一定距离的大部分岩石，由于已被原生或次生裂隙所切割，在爆破过程中，没有得到充分破碎，在爆破震动或爆生气体的推力作用下，脱离岩体、移动、抛掷成大块。这就是裂隙性岩石有的易于爆破破碎，有的则易于产生大块的两重性。因此，必须了解和掌握岩体中

裂隙的宽窄、长短、间距、疏密、方向、裂隙内的充填物、结构体尺寸和结构体含量百分率，以及它们与炸药、爆破工艺参数的相互关系等等。例如，垂直层理、裂隙爆破时，比较容易破碎；而平行或顺着层理、裂隙的爆破则比较困难。

此外，风化作用瓦解岩石各组分之间的联系，因此，风化严重的岩石，易于爆破破碎。

二、岩石容重、孔隙度和碎胀性对岩石爆破性的影响

岩石容重表示单位体积岩石的重量，其体积包括岩石内部的孔隙。岩石孔隙度，等于孔隙的体积（包括气相或液相体积）与岩石总体积之比。可用单位体积岩石中孔隙所占的体积表示，也可用百分数表示。通常岩石的孔隙度为 $(0.1\sim 50)\%$ （一般岩浆岩为 $(0.5\sim 2)\%$ ，沉积岩为 $(2.5\sim 15)\%$ ）。一些岩石的孔隙度和容重见表 1-1。当岩石受压时，孔隙度减少，例如，粘土孔隙度 50% ，受压后为 7% 。随着孔隙度增大，冲击波和应力波在其中的传播速度降低。容重大的岩石难以爆破，因为要耗费很大的炸药能量来克服重力，才能把岩石破裂、移动和抛扔。

岩石的碎胀性是岩体破碎后体积松散膨胀的性质。破碎后的岩石体积与破碎前的比值称为碎胀系数。碎胀性与岩体结构及被破碎的程度有关，根据它可以衡量岩石的破碎程度，挤压爆破采矿时用它计算补偿空间的大小。表 1-2 列出几种岩石的碎胀系数。

表 1-2 几种岩石的碎胀系数

砂与砾石	砂质粘土	中硬岩石	坚硬岩石
1.05~1.20	1.20~1.25	1.3~1.5	1.5~2.5

三、岩石弹性、塑性、脆性和岩石强度对岩石爆破性的影响

从力学观点看，根据外力作用和岩石变形特点的不同，岩石可能表现为塑性、弹性、粘弹性、弹脆性和脆性等特征。

塑性岩石和弹性岩石受外载作用超过其弹性极限后，产生塑性变形，能量消耗大，将难于爆破（如粘土性岩石）；而脆性岩石（几乎不产生残余变形）、弹脆性岩石均易于爆破（如脆性煤炭）。岩石的塑性和脆性不仅与岩石性质有关，而且与它的受力状态和加载速度有关。位于地下深处的岩石，相当于全面受压，常呈塑性，而在冲击载荷下又表现为脆性。当温度和湿度增加，也能使岩石塑性增大。通常，在爆破作用下，岩石的脆性破坏是主要的、大量的。相反，靠近药包的岩石，却易呈塑性破坏，虽然其破坏范围很小，但却消耗大部分能量于塑性变形上。

为了深入研究岩石爆破性与爆破载荷的关系，一般把岩石视作弹性体或粘弹性体，炸药在岩体内爆破时，以冲击波和弹性波的形式从药包中心向周围岩石传播，并以弹性变形能或强度作为分析和探讨岩石爆破性的依据。

岩石强度是表示岩石抵抗压、剪、拉诸应力，从而导致岩石破坏的能力。它本来是材料力学中用以表示材料抵抗上述三种简单应力的常量，往往是在单轴静载作用下的测定指标。爆破时，岩石受的是瞬时冲击载荷，所以应对岩石强度赋予新的内容，要强调在三轴作用下的动态强度指标。只有如此，才能真实地反映岩石的爆破性。

表 1-3 是用雷管模拟爆破和用材料试验机加载试验所得的几种岩石的动、静强度。从表

中可见, 动载强度比静载强度为大。

岩石的抗压极限强度($\sigma_{\text{压}}$)最大, 抗剪($\sigma_{\text{剪}}$)次之, 抗拉($\sigma_{\text{拉}}$)最小。一般有如下关系:
 $\sigma_{\text{拉}} = (1/10 \sim 1/50) \sigma_{\text{压}}$, $\sigma_{\text{剪}} = (1/8 \sim 1/12) \sigma_{\text{压}}$ 。因此, 尽可能使岩石处于受拉伸或剪切状态下, 以利于爆破破碎, 提高爆破效果。

表 1-3 几种岩石动、静载强度试验结果

岩 石	容 重 (g/cm^3)	波 速 (m/s)	抗压强度 (MPa)		抗拉强度 (MPa)		动载速度 (MPa/s)	载荷持续时间 (ms)
			静 载	动 载	静 载	动 载		
大理岩	2.7	4500~6000	90~110	120~200	50~90	20~40	$10^7 \sim 10^8$	10~30
砂岩(1)	2.6	3700~4300	100~140	120~200	8~9	50~70	$10^7 \sim 10^8$	20~30
砂岩(2)	2.0	1800~3500	15~25	20~50	2~8	10~20	$10^8 \sim 10^9$	50~100
砂岩(3)	2.7	4100~5700	200~240	35~50	16~23	20~30	$10^7 \sim 10^8$	10~20
辉绿岩	2.8	5300~6000	320~350	700~800	22~32	50~60	$10^7 \sim 10^8$	20~50
石英闪长岩	2.6	3700~5900	240~330	300~400	11~19	20~30	$10^7 \sim 10^8$	30~60

第二节 岩石的变形性质及其力学特性

一、岩石应力-应变特性

通常, 坚固岩石皆视为弹性体。当岩石受载后, 随应力增加应变也增大, 当应力增大到岩石强度值或应力长期恒定保持在某一水平时都能使岩石破坏。在实验室对多种岩石做大量试验所得单向受压的岩石应力-应变关系如图 1-1。对于坚固、均质的岩浆岩、变质岩, 其应力-应变曲线近似呈可逆直线型, 如图 1-1(a)。由于非均质性和各向异性的岩石, 内含节理、裂隙等构造, 当加载后, 岩石的应力-应变曲线下凹, 如图 1-1(b) 之 1' 段曲线。它表示受力后节理面闭合, 初始曲率较大, 呈塑弹性变形。1', 2' 段仍属可逆的弹性体。至 k 点才开始破裂, 此时横向应变速度增加, 岩石体积增大。如果应力继续增加, 将导致岩石的破坏, 如图 1-1(c) 所示。大多数岩石在破坏前处于弹性变形区 T 内, 其中比例极限 2 属线性弹性变形, 只有岩石受载达到或超过弹性极限 4, 岩石才产生脆性破坏 A; 或者, 对于塑性

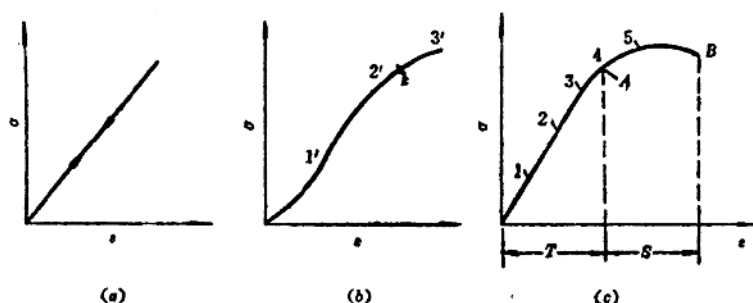


图 1-1 岩石应力-应变曲线

1~2—线性弹性变形; 2—比例极限; A—脆性破坏;
 3—非线性弹性变形; 4—弹性极限; B—塑性破坏;
 5—塑性屈服变形; T—弹性变形区; S—塑性变形区;
 k—屈服极限

岩石, 应力继续增加, 则产生塑性变形区 S 内的塑性屈服变形 δ , 以致达到塑性破坏 B 。

二、岩石应力率-应变率特性

岩石变形性质随时间变化的另一表现是应力率(加载率)或应变率的作用。一般说, 岩石的破坏应力与变形模量随加载率的增加而增加, 表 1-4 列出了几种岩石的动态试验和静态试验的结果, 它表示出应力速度对拉伸破坏应力和应变的影响。

表 1-4 岩石动态特性与静态特性比较

岩石特性		大理石	砂岩 A	砂岩 B	花岗岩
动态试验	应力率 (TPa/s)	0.17	0.14	0.15	0.15
	应变率 ($\times 10^{-4}/s$)	3.6	3.7	3.3	5.5
	破坏应力 (MPa)	21.5	22	19	17
	破坏应变 ($\times 10^{-4}$)	460	610	460	630
	弹性模量 (GPa)	51	64	40	30
静态试验	应力率 (MPa/s)	0.11	0.18	0.05	0.22
	破坏应力 (MPa)	5.3	8	2.9	5.3
	破坏应变 ($\times 10^{-4}$)	145	410	370	510
	弹性模量 (GPa)	47	19	10	12

从表 1-4 可见, 动载荷的应力率(加载率)比静载荷时大 10^0 倍, 而破坏应力大 3~4 倍, 在炸药爆破的动载荷作用下, 应力率、应变率、破坏应力和破坏应变都很高。这里, 可以引用动态指标来表征岩石破坏的动态特性。

动态指标:

加载率或应变率表征施加载荷的快慢, 亦即表征在增量 dt 时间内, 外载荷所引起的岩石应力增量 $d\sigma$ 或应变增量 $d\varepsilon$ 与 dt 的比值, 即

$$\text{加载率} \quad \sigma = \frac{d\sigma}{dt} \quad (1-1)$$

$$\text{应变率} \quad \varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1-2)$$

应变率与冲击速度的关系:

应变率是试件中一个质点相对于另一质点的位移速度与该两质点之间的间距之比。

冲击速度是试件的一端相对于另一端的位移速度。可见, 应变率 ε 与冲击速度 v 成正比, 如下式:

$$\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d(l/L)}{dt} = \frac{v}{L} \quad (1-3)$$

式中 l ——试件伸长长度;

L ——试件原始长度。

加载率与应变率的关系:

在试件弹性变形范围内, 应变率 ε 与加载率 σ 成正比, 即

$$\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\sigma}{E} \quad (1-4)$$

通常, 可以用变形过程中的平均加载率或平均应变率来评价载荷的动态特性。根据试验

研究结果，不同载荷的应变率有表 1-5 所述的差别。

表 1-5 载 荷 状 态 种 类 比 较

应变率 $\dot{\epsilon}$ (1/s)	$<10^{-6}$	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-4} \sim 10$	$10 \sim 10^3$	$>10^4$
载荷状态	流 变	静 态	准 静 态	准 动 态	动 态
加载方式	稳定载荷	液 压 机	压 气 机	冲 击 杆	爆 炸 冲 击

现场岩体在爆炸作用下的应变率受爆源强度及距离大小的影响变化范围很大，例如，有人测得爆破应力波的应变率为 $5 \times 10^4/s$ ，爆破冲击波的应变率为 $10^{11}/s$ （该冲击波阵面厚 $m = 10^{-6}cm$ ，质点速度 $v = 1000 m/s$ ，按 $\dot{\epsilon} = v/m$ 求得）。

利用混凝土试块相似材料做加载试验，得到如图 1-2 所示的不同加载速度下的应力应变曲线。随着加载速度的增加，试块的塑性减小，脆性加大，弹性模量也增大。

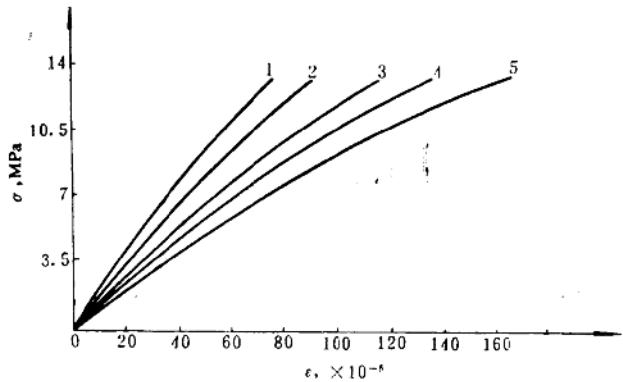


图 1-2 最终应力为 14MPa 时混凝土试块在不同加载速度下的应力-应变曲线
1—瞬间加载；2—5s；3—15s；4—30s；5—60s

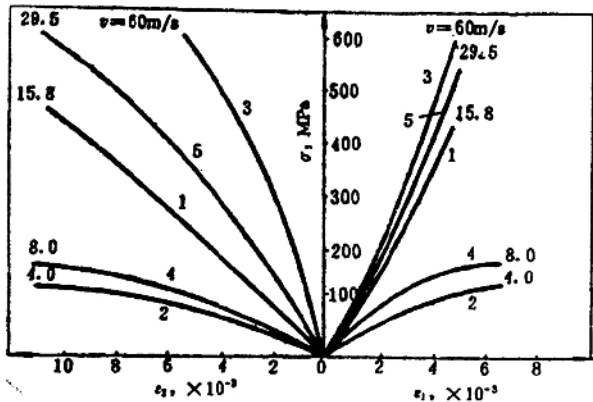


图 1-3 几种岩石在不同加载速度 (v) 下的应力-应变曲线
1—滑石；2—大理石；3—石灰岩；4—砂岩；5—辉绿岩； ϵ_2 —横向应变； ϵ_1 —沿作用力方向应变

用几种岩石做试验（如坚固的辉绿岩，脆性的大理石等），可得不同加载速度的应力-应变曲线，如图 1-3。加载速度越高，曲线越陡。在坐标原点附近呈线性关系，远处则呈指数变化。说明了应力加大，会出现残余变形。随着岩石强度增大，岩石中的应力也增大，但是应变值变小；相反，当岩石坚固性较差时，岩石中的应力增加不多，而应变却大幅度地增加。

中国科学院武汉岩土力学研究所用动载试验机对花岗岩、石灰岩、煌斑岩等岩石在不同

表 1-6 花岗岩快速加载试验结果

试件数	应变率 $\dot{\epsilon}$ (1/s)	弹性模量 (GPa)	泊松比	破坏强度 (MPa)
7	1.4×10^{-4}	72.6	0.209	120.1
8	2.04×10^{-2}	75.0	0.171	142.3
4	2.67×10^{-1}	86.4	0.214	149.8

应变率条件下做了单轴压缩试验，现以粉红色花岗岩为例，结果见表 1-6 及图 1-4。

三、岩石爆破载荷特性

为了获得岩石破坏时所需的最小冲击速度值，在钢制的白炮里用少量太安炸药对不同岩石做了一系列的爆破试验。炸药爆炸使岩石质点获得一定的运动速度，当运动速度达到某一定值时，岩石试件开始破坏。通过试验得到油母页岩、大理岩、花岗岩和辉绿岩发生破坏的最小位移速度分别为：20, 32, 37 和 60m/s，相应的压应力为 415, 445, 540 和

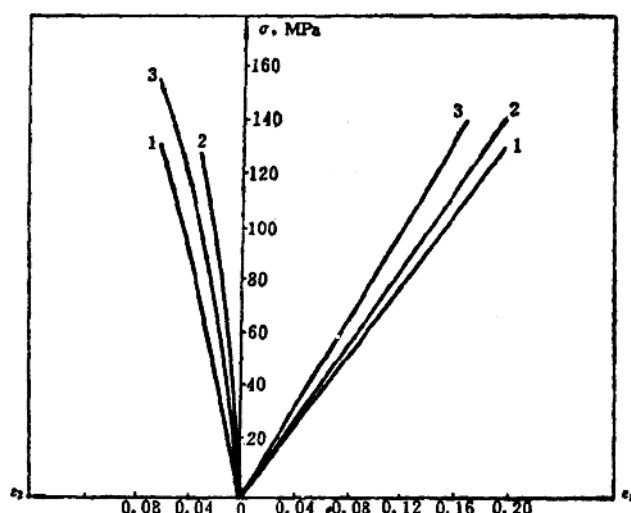


图 1-4 花岗岩在不同应变率下的应力-应变曲线
(应变率分别为：1— 1.4×10^{-4} /s；2— 2.04×10^{-2} /s；3— 2.67×10^{-1} /s)

1130 MPa。这些动态压应力值比其在静态极限抗压强度值分别高 10, 9, 4 和 3.5 倍。可见，在冲击载荷作用下，软岩的极限强度增加得多，而硬岩增加得少。

苏联哈努卡耶夫等人对岩石杆件的爆炸破坏做了一系列试验，用不同重量、不同断面积的平面炸药包放在长条岩石杆件的一端（加载端）进行爆破试验。爆破后，由于反射拉应力的作用，在试件的另一端（自由端）形成碎块（拉断片）。根据试验结果可以确定出这些碎块断裂处的质点运动速度及与其相对应的拉应力值，亦即该长条岩石杆件的极限抗拉强度值。测得花岗岩、大理石、石灰岩等试件的最小断裂速度为 2.4~2.8m/s（达到该速度时，岩石杆件被拉断），与此断裂速度相对应的波阵面质点位移速度为 1.2~1.4m/s。试验结果与理论推导一致，即最小断裂速度(u)是质点位移速度(v)的两倍，即：

$$v = u/2 \quad (1-5)$$

于是质点位移速度与岩石波阻抗的乘积等于该岩石的动态极限抗拉强度(σ)：

$$\sigma = \rho C v$$

(1-6)

哈努卡耶夫认为, 根据爆破近区、中区和远区的距离不同, 其应力大小、破坏范围与程度有差异, 爆破载荷下的强度极限也不同。

爆破近区, 在相当于爆破后形成的爆破空腔或压缩粉碎区, 即 $(1.1 \sim 3.0)R_0$ 处(R_0 为药包半径), 岩石中的应力值达到 $7000 \sim 1000 \text{ MPa}$, 它比该岩石的单轴静载极限抗压强度高 $40 \sim 110$ 倍(小值为油母页岩, 大值为大理岩的试验结果)。

在距爆破中心 $5R_0$ 距离处, 岩石中的压应力值达 $4000 \sim 800 \text{ MPa}$, 在这个区域里岩石的破碎主要是靠各向不等的压应力所产生的剪应力造成的, 该区的剪应力值比单轴静载极限抗剪强度高 $65 \sim 35$ 倍。

在距爆破中心 $(15 \sim 20)R_0$ 处, 还可以看到初始裂纹, 它是侧向承压的拉应力作用的结果。其应力张量的压应力分量是 $500 \sim 50 \text{ MPa}$, 而拉应力分量是 $150 \sim 30 \text{ MPa}$, 该压应力分量是岩石单轴静载极限抗压强度的 $8 \sim 5$ 倍。拉应力分量比单轴静载极限抗拉强度高 $10 \sim 12$ 倍。

第三节 岩石爆破性的判据和分级

岩石分级不同于岩石分类。通常岩石分类是指按照岩石成因或成分的不同, 对岩石加以质的划分, 如地质学上按成因分为岩浆岩(火成岩)、沉积岩(水成岩)和变质岩三类, 而岩石分级应该是以量的指标来划分各种岩石的等级, 根据采矿工程的不同要求, 有凿岩性分级、爆破性分级和稳定性分级等。

一、分级的判据

根据什么判据和指标进行岩石分级, 这是一个非常关键的问题。由于炸药爆炸时间的短促、爆炸能量的巨大、岩石结构构造的复杂、测试记录手段不能臻于完善等等, 给研究工作带来了不少困难。几十年来国内外学者做了大量工作, 根据岩石爆破性的主要影响因素, 提出了各种各样的判据、指标进行岩石分级。其主要判据有: 岩石强度、单位炸药消耗量、工程地质参数、岩石弹性波速度、岩石波阻抗、爆破岩石质点位移、临界速度、爆破功指数、岩石弹性变形能系数等等, 它们从不同的侧面反映了岩石的爆破性。但是, 这些指标并没有阐明爆破性的真正含义, 没有建立完整的分级体系, 所以迄今为止国内外尚无一种公认的岩石爆破性分级方法。

二、普氏分级和苏氏分级

建国以来, 我国没有建立自己的岩石爆破性分级, 一直沿用苏联的普氏分级和苏氏分级。

1. 普氏分级

早在 1926 年前, 普氏(ПротоДьяконов М. М.)提出了用岩石试块的单轴静载极限抗压强度、手工凿 1 cm^3 岩石所消耗的功、手打眼每班生产率、掘进工生产率、在地面挖掘的生产率、巷道掘进速度、爆破 1 m^3 岩石的黑火药消耗量等七项指标的平均值来表征岩

石的坚固性。由于采矿科学技术的发展,普氏规定的几项指标已失去了实际意义,只有一个最简单的指标——以岩石试块的静载极限抗压强度(R , MPa)为岩石分级的判据,即普氏岩石坚固性系数 $f = R/10$ 。根据 $f = 0.3 \sim 20$ 将岩石分为 10 级, f 值大,则难钻岩、难爆破、岩石稳定;反之, f 值小,则易钻岩、易爆破、岩石不稳定。普氏认为:岩石的坚固性在各方面的表现趋于一致。实际上岩石的钻岩性、爆破性、稳定性并非完全一致,有的易钻难爆,有的难钻易爆,而且小块的岩石试样(如 $7 \times 7 \times 7$ cm)的单轴静载抗压强度并不能表征整体岩石受炸药爆炸冲击作用的爆破性。再者,其测定值的离散性较大,一般为 15%~40%,个别达 80%,所以普氏分级方法以其简便的指标,虽曾在采矿工程中作为笼统的总的分级,得到普遍应用,但也正是由于上述缺点,它表征不了爆破工程实际所需的岩石爆破性分级。

2. 苏氏分级

苏氏分级是苏哈诺夫(Суханов А. Ф.)在 30 年代针对普氏分级而提出的岩石分级。他认为:决定岩石坚固性的基础是在某一特定情况下,应当用实际被应用着的具体采掘方法。他用崩落 1m^3 岩石所消耗的炸药量(kg/m^3)或单位炮眼长度(m/m^3)来表征岩石的爆破性,同时,规定了一系列的测试标准条件。根据单位炸药消耗量和单位炮眼长度将岩石分为 16 级。如果需要的炸药单耗量多、单位炮眼长,则岩石难爆;反之,则易爆。必须指出,炸药单耗是一个常量又是一个变数,影响因素很多,因而,苏氏又提出了一系列非标准条件

表 1-7 普氏分级与苏氏分级(爆破性)对比参考表

普 氏 分 级			苏 氏 分 级 (爆 破 性)			
坚固性系数 f	等 级	坚固程度	代表性岩石	爆 破 性	等 级	2 号硝铵炸药单耗 q (kg/m^3)
20	I	最 坚 固	致密微晶石英岩, 极致密无铍化物石英岩, 最致密石英岩和玄武岩	最 难 爆	1	8.3
					2	6.7
					3	5.3
18	II	很 坚 固	极致密安山岩和辉绿岩 石英斑岩 极致密硅质砂岩	很 难	4	4.2
15					5	3.8
12					6	3.0
10	III	坚 固	致密花岗岩, 坚固铁矿石 致密砂岩和石灰岩	难	7	2.4
8					8	2.0
6	IV	相当坚固	砂岩 砂质页岩	中 上 等	9	1.5
5					10	1.25
4	V	中 等	不坚固的砂岩和石灰岩 页岩, 致密泥质岩	中 等	11	1.0
3					12	0.8
2	VI	相当软弱	软页岩 无烟煤	中 下 等	13	0.6
1.5					14	0.5
1.0	VII	软 弱	致密粘土, 软弱烟煤 浮石, 凝灰岩	易 爆	15	0.4
0.8					16	0.3
0.6	VIII	土 质	腐植土, 泥煤	不 用 爆	—	—
0.5	IX	松 散	松土, 砂			
0.3	X	流 沙	流沙, 含水土			

下的修正系数, 非常繁琐, 也影响了岩石爆破性的真实性。再者, 炸药单耗没有很好地反映爆破块度这一重要爆破效果。因此, 苏氏分级方法并不能确切地表征岩石的爆破性。

普氏分级与苏氏分级(爆破性)的对比见表 1-7。

三、新提出的岩石爆破性分级

岩石爆破性是岩石本身物理力学性质和炸药爆破参数、爆破工艺的综合效应, 它们之间既有其内在联系, 又受外因的控制, 有明显的因果关系, 因而岩石爆破性不是岩石单一的固有属性, 而是岩石在爆破过程中诸因素的综合反映, 并影响着爆破数量和质量的具体效果。通过试验研究和实践证明, 能量平衡准则是岩石爆破最普遍、最根本的准则, 它表征了岩石爆破性的本质。爆破漏斗是一般爆破工程的根本形式。炸药爆炸释放的能量传递给岩石, 岩石吸收能量导致岩石的变形和破坏。由于不同岩石破坏所消耗的能量不同, 当炸药能量及其它条件一定时, 爆破漏斗体积的大小和爆破块度的粒级组成, 均直接反映能量的消耗状态和爆破效果, 从而表征了岩石的爆破性。此外, 必须指出, 岩石的结构特征(如节理、裂隙)也是影响岩石爆破的重要因素之一, 由于岩体结构影响着岩石爆破的难易, 更影响着爆破块度的大小, 所以, 声测指标(如岩石弹性波速度、岩石波阻抗、岩石结构裂隙系数等)也是岩石爆破性分级的重要判据之一。这就综合考虑了上述影响岩石爆破性的主要因素——包括岩石的结构(组分)、内聚力、裂隙性、岩石物理力学性质、特别是岩石的变形性质及其动力特性。

据此, 岩石爆破性分级的判据, 是在爆破材料、参数、工艺等一定的条件下进行现场爆破漏斗试验和声波测定所获得, 然后计算出岩石爆破性指数, 综合评价岩石的爆破性, 并进行岩石爆破性分级。

1. 测定方法

(1) 爆破漏斗体积与块度的测定

在矿山现场选择典型的矿岩地段, 用凿岩机垂直自由面打眼, 钎头直径 45mm, 眼深 1m, 用 2 号岩石硝铵炸药, 药量 450g, 药卷直径 32mm, 连续柱状装药, 炮泥填塞, 一支 8 号雷管起爆。爆破后量取爆破漏斗体积, 清理岩块, 进行块度分析。分别称量, 计算容积, 求出大块(大于 300mm)、小块(小于 50mm)、平均合格块度(300~200mm, 200~100mm, 100~50mm)的百分率, 并且据此核算出爆破漏斗的总体积。

(2) 声 测

用声波速度测定仪测定现场岩体的声波速度及岩块试样的声波速度, 求得岩石裂隙性和岩体波阻抗(岩体密度与波速的乘积)。

2. 岩石爆破性指数

根据爆破漏斗体积、大块率、小块率、平均合格率和岩体波阻抗的大量数据, 运用数理统计的多元回归分析, 通过电子计算机运算, 最终求得岩石爆破性指数

$$N = \ln \frac{e^{57.22} \cdot K_1^{1.42} \cdot 1.01(\rho C)^{2.43}}{e^{35.44V} \cdot K_2^{1.43} \cdot K_3^{4.75}}$$

式中 V ——岩石爆破漏斗体积, m^3 ;

K_1 ——大块率, %;

K_2 ——平均合格率, %;

K_3 ——小块率, %;

(ρC)——岩体波阻抗, $\text{kPa}\cdot\text{s/m}$;

e ——自然对数之底。

通过模量识别, 结合现场调查, 定出岩石爆破性分级表, 见表 1-8。

表 1-8 岩石爆破性分级表

级 别	爆破性指数 N	爆破性程度	代 表 性 岩 石
I	I_1 I_2	极 易 爆	千枚岩, 破碎性砂岩, 泥质板岩, 破碎性白云岩
	<29 $29.001\sim38$		
II	II_1 II_2	易 爆	角砾岩, 绿泥岩, 米黄色白云岩
	$38.001\sim46$ $46.001\sim53$		
III	III_1 III_2	中 等	阳起石英英岩, 煌斑岩, 大理岩, 灰白色白云岩
	$53.001\sim60$ $60.001\sim68$		
IV	IV_1 IV_2	难 爆	磁铁矿英岩, 角闪斜长片麻岩
	$68.001\sim74$ $74.001\sim81$		
V	V_1 V_2	极 难 爆	砂卡岩, 花岗岩, 矿体浅色砂岩
	$81.001\sim86$ >86		

在我国东北、华北、西南 3 个地区 10 个矿山的 56 种典型矿岩中进行试验研究取得大量数据的基础上, 通过整理、分析并与矿山实际资料对比, 按照岩石爆破性指数 N 和分级准则, 编制出我国部分矿山的岩石爆破性分级表 (表 1-9)。

表 1-9 我国 10 个金属矿山岩石爆破性分级

矿 山	矿 岩 名 称	爆破漏斗 体 积 (m^3)	矿岩块度分布率(%)			声 波 参 数		爆破性 指 数 N	爆破性 分 级
			大块率	小块率	平 均 合格 率	岩体波速 (m/s)	波 阻 抗 $\text{kPa}\cdot\text{s/m}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
歪头山铁矿	磁铁矿英岩	0.424	56.60	5.20	12.70	4357	14.90	73.63	N_1
	三层铁	0.663	25.60	7.80	22.20	3487	11.50	55.07	III_1
	四层铁	0.652	43.30	7.40	16.40	3566	11.80	60.33	III_2
	阳起石英英岩	0.697	38.70	8.30	17.70	4055	10.50	56.85	III_1
	煌斑岩	0.819	49.20	10.40	13.50	3103	8.10	52.78	I_2
眼前山铁矿	磁铁矿	0.188	47.80	30.00	7.40	4450	14.70	74.13	N_2
	混合岩	0.483	42.20	28.00	9.90	3140	8.50	60.63	III_2
	绿泥片岩	0.508	10.00	68.00	7.30	2050	5.30	44.31	I_1
	千枚岩	0.918	11.60	75.00	4.50	1984	5.20	30.08	I_2
弓长岭铁矿	-100m 六层铁	0.073	37.70	14.70	15.70	5490	21.90	79.55	N_1
	-100m 四层铁	0.088	36.00	16.00	16.00	4283	14.60	77.39	N_2
	-100m 石英片岩	0.105	26.00	28.00	15.30	2545	6.60	70.14	N_1
	-160m 西 角闪岩	0.064	35.90	6.70	19.10	2751	7.40	80.78	N_2
	-160m 西 四层铁	0.171	51.40	7.50	13.70	3593	11.50	80.32	N_1
	-160m 西 六层铁	0.057	20.50	7.80	23.90	4597	18.80	77.63	N_2
	-100m 东 六层铁	0.101	53.50	7.70	17.60	3982	16.30	83.44	V_1
	+140m 混合岩	0.596	21.20	17.60	20.40	1307	3.40	50.13	I_2