

高等学校教学用书

凿岩爆破

冶金出版社

高等学校教学用书

凿 岩 爆 破

中南工业大学 陶颂霖 编

冶金工业出版社

前 言

《凿岩爆破》一书是根据1982年制订的冶金高等院校教材编写、出版五年规划编写的，是在1979年冶金工业出版社出版的《爆破工程》基础上更新内容，充实提高，删繁就简加工而成。本书的试用打印稿曾在中南矿冶学院四年制本科采矿专业和两年制采矿专科教学过程中使用，受到学生欢迎。与此同时，广西大学等兄弟院校也曾试用过这份打印稿。打印稿经过有关院校教师的审查、修改后形成本书稿。

本书主要包括岩石性质及按凿岩性和爆破性的岩石分级、深眼和浅眼凿岩、矿用炸药和起爆器材、常用的土岩爆破方法以及有关的爆炸和爆破的基本理论等。

本书适合于高等学校地下采矿、露天采矿、矿井建设等专业教学使用，也可供从事凿岩爆破工作的其他专业的工程技术人员参考。

由于编者水平所限，书中缺点、错误在所难免，敬希读者批评指正。

目 录

前言

第一章 岩石性质及其分级	1
第一节 岩石的物理性质.....	1
第二节 岩石的力学性质.....	3
第三节 岩石的分级.....	14
第二章 浅眼冲击式凿岩	19
第一节 冲击式凿岩机.....	19
第二节 浅眼凿岩工具.....	21
第三节 冲击式凿岩机.....	28
第三章 深孔凿岩	34
第一节 接杆式凿岩.....	34
第二节 潜孔式凿岩.....	37
第三节 牙轮钻进.....	41
第四节 凿岩效率.....	43
第四章 炸药及爆炸的基本理论	48
第一节 爆炸和炸药的基本概念.....	48
第二节 起爆药与猛炸药.....	50
第三节 炸药的起爆.....	51
第四节 炸药的感度.....	53
第五节 炸药的爆轰理论.....	58
第六节 炸药爆轰产物及氧平衡.....	73
第七节 爆热.....	78
第八节 爆炸功.....	82
第五章 矿用炸药	87
第一节 铵梯炸药.....	87
第二节 铵油炸药.....	89
第三节 铵松蜡炸药.....	90
第四节 硝化甘油炸药.....	92
第五节 浆状炸药.....	92
第六节 水胶炸药.....	94
第七节 乳化炸药.....	96
第六章 起爆方法及器材	99
第一节 火雷管起爆法.....	99
第二节 电雷管起爆法.....	101

第三节	导爆索起爆法	110
第四节	导爆管起爆法	113
第七章	岩石的爆破破碎机理	119
第一节	岩石爆破破坏原因的几种假说	119
第二节	单个药包爆破作用的分析	121
第三节	成组药包爆破时岩石破坏的特征	128
第四节	装药量计算原理	130
第五节	影响爆破作用的因素	133
第八章	炮眼爆破和深孔爆破	139
第一节	井巷掘进的爆破	139
第二节	采场崩矿的爆破	149
第九章	露天药室爆破	169
第一节	控制抛掷作用的基本原理	170
第二节	布药设计	174
第三节	施工设计要点	179
第四节	安全距离的确定	180
第五节	爆堆尺寸估算	182
第十章	控制爆破技术	187
第一节	微差爆破	187
第二节	挤压爆破	189
第三节	光面爆破	193
第四节	预裂爆破	199

第一章 岩石性质及其分级

在矿山采掘工作中，通常都必须经过凿岩和爆破来破碎岩石。凿岩爆破直接影响后续的有关工序和整个采掘工程施工的速度、质量、安全和成本。凿岩爆破的加工对象是岩石，对于岩石性质的认识和研究并在此基础上对岩石进行合理的分级，能为设计、施工和成本核算提供依据。

第一节 岩石的物理性质

一、岩石的矿物成分和组织特征

岩石是由一种或多种矿物组成的集合体，每种矿物都有各自的物理力学性质、晶体结构和破裂特点。所以，岩石的性质同它的矿物成分和组织特征有关。

在十来种主要造岩矿物中，硅酸铝、铁镁硅酸盐和氧化矿物等几类硬度较高，约在莫氏硬度5~6.5之间，个别的如石英，莫氏硬度可达到7。碳酸盐类、硫酸盐类、氯化物类、泥质矿物和云母等类的硬度都较低，一般在莫氏硬度2~3.5之间。

岩石的组织特征是指岩石的结构和构造。岩石的结构是指组成岩石的矿物晶粒的大小、形状、表面特征和矿物晶粒之间的连结方式。岩石的结构不同，它的坚固程度也不同。组成岩石的矿物颗粒愈细、愈致密或者粗中有细，粗细结合，这种岩石就愈坚固。沉积岩的破碎的难易程度除了同矿物成分、晶粒大小等有关之外，还同胶结物成分和矿物晶粒之间胶结的强弱有关。从胶结物成分来看，硅质成分最坚固，铁质成分次之，钙质和泥质成分最差；从晶粒之间胶结强弱来看，胶结牢固、致密而孔隙少的岩石坚固性好。对于变质岩而言，一般变质程度愈高，组织愈致密而难于破碎。

岩石的构造是指大范围岩体内的组织特征。它表示矿物晶粒之间总的相互关系、空间排列状况。构造的主要形式有层理、裂隙和节理。

层理面、裂隙面和节理面都是岩石的弱面，它们赋予岩石各向异性的特点，在外载荷作用下，岩石容易首先沿着这些弱面破碎。因此，在层理、节理比较发育的岩石中进行凿岩爆破时，为了避免卡钎、爆炸气体泄漏和改善凿岩爆破效果，炮眼必须垂直或斜交于层理面或节理面。

二、岩石的孔隙度、密度、容重

岩石的孔隙度 η 是指岩石中的各种孔隙的总体积 V_0 对岩石的总体积（包括孔隙） V 之比。它一般用百分率表示：

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

岩石的孔隙度，是影响岩石力学性质的一个重要的物理性。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。

岩石的密度 ρ ，是指构成岩石的物质集合相（固体的矿物和岩屑以及气体或液体）的质量 M 对该物质集合相所据有体积 $(V - V_0)$ 之比，即：

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

式中 V 、 V_0 意义同前。

岩石的容重 γ ，是指原岩重量 G 对包括孔隙在内的原岩体积 V 之比，即：

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

密度高的岩石波阻抗值也高，对应力波的传播不利。容重大的岩石在抛掷爆破时需消耗较多的能量去克服重力的影响。原岩中或多或少都含有孔隙，所以在采矿工程中多应用容重的指标而少用密度。表1-1中列出部分岩石的孔隙度、密度和容重。

几种岩石的孔隙度、密度和容重 表 1-1

岩石名称	孔隙度 (%)	密度 (g/cm³)	容重 (t/m³)
花岗岩	0.5~1.5	2.6~2.7	2.56~2.67
玄武岩	0.1~0.2	2.8~3.0	2.75~2.9
辉绿岩	0.6~1.2	2.85~3.0	2.8~2.9
石灰岩	5.0~20	2.71~2.85	2.46~2.65
白云岩	1.0~5.0	2.5~2.6	2.3~2.4
砂 岩	5.0~25	2.58~2.69	2.47~2.56
页 岩	10~30	2.2~2.4	2.0~2.3
板 岩		2.3~2.7	2.1~2.57
片麻岩	0.5~1.5	2.9~3.0	2.65~2.85
大理岩	0.5~2.0	2.6~2.7	2.5
石英岩	0.1~0.8	2.65~2.9	2.54~2.85
粘 土	45	1.6~2.1	1.6~2.0
砂 子	30~50	1.5~1.7	1.4~1.6

三、岩石的碎胀性

岩石破碎后因碎片间孔隙增多而总体积增大的性质称为碎胀性。碎胀性可用碎胀系数来表示，碎胀系数 K 是指岩石破碎后的总体积 V_1 对原岩破碎前体积 V 之比，即：

$$K=\frac{V_1}{V} \tag{1-4}$$

表1-2中列出几种常见岩石的碎胀系数。在采掘工程中选用装载、运输、提升等设备的容器时，必须考虑岩石的碎胀系数。岩石爆破所需容许膨胀的空间大小也同该岩石的碎胀系数有关。

几种岩石的碎胀系数 表 1-2

岩石名称	砂、砾石	砂质粘土	中硬岩石	坚硬岩石
碎胀系数 K	1.05~1.20	1.20~1.25	1.30~1.50	1.50~2.50

四、岩石的波阻抗

岩石的密度同纵波在岩石中传播速度的乘积，称为该岩石的波阻抗，它表征岩石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，如钎杆的材料种类和粗细以及炸药的种类和性能等。岩石的波阻抗值同凿岩爆破能量在岩体中的传递效率有直接关系。当钎杆或炸药的波阻抗值同岩石波阻抗值匹配愈好（数值相近）时，传给岩石的能量就愈多，在岩石中所引起的应变值也愈大。部分材料及岩石的波阻抗值列入表1-3中。

几种材料的波阻抗值 表 1-3

材料名称	密度 (g/cm³)	纵波速度 (m/s)	波阻抗 (kg/cm² · s)
钢	7.8	5130	4000
铜	8.4~8.9	3670	3170
铝	2.5~2.9	5090	1370
玻 璃	2.4	5300	1270
橡 胶	1.3	46	6
花 岗 岩	2.6~3.0	4000~6800	800~1900
玄 武 岩	2.7~2.86	4500~7000	1400~2000
辉 绿 岩	2.85~3.05	4700~7500	1800~2300
辉 长 岩	2.9~3.1	5600~6300	1600~1950
石 灰 岩	2.3~2.8	3200~5500	700~1900
白 云 岩	2.3~2.8	5200~6700	1200~1900
砂 岩	2.1~2.9	3000~4600	600~1300
板 岩	2.3~2.7	2500~6000	575~1620
岩 盐	2.0~2.2	4200~5700	900~1200
片 麻 岩	2.5~2.8	5500~6000	1400~1700
大 理 岩	2.6~2.8	4400~5900	1200~1700
石 英 岩	2.65~2.9	5000~6500	1100~1900

第二节 岩石的力学性质

一、岩石的变形特征

岩石是各向异性体，其变形特征相当复杂，它除了与岩石的种类、矿物成分、结构构造、温度等有关外，还与外载荷作用性质（加载方式、大小、方向和时间）和破坏面性质等有关。

凿岩爆破工作所造成的各种破碎力学现象，都和岩石的变形特征有关。当我们研究这些现象时，首先必须了解岩石在外载荷作用下发生形状和体积变化的特征，即岩石的应力-应变关系。

外载荷按作用性质有静载荷和动载荷之分。要研究岩石在动载荷作用下的变形性质，必须先研究岩石在静载荷作用下的变形性质。

1. 岩石的静载变形特征 从材料力学中得知，材料受到静载作用时，如果其体积和形状发生变化，而在载荷去掉以后能恢复原来状态的性质称为弹性，这种性质的变形称为弹性变形。如果材料受到超过其弹性极限的载荷而变形，则当载荷去掉后，其形状大小不能完全恢复而产生残余（永久）变形，这种性质的变形称为塑性变形。材料在外载作用下，没有产生显著的塑性变形就开始破坏的性质称为脆性。

岩石的静载变形性质可以用静载压缩试验获得的应力-应变曲线来描述。通过对一系列不同岩石试件的试验得知，自然界中的岩石既不是完全的弹性体，也不是完全的塑性

体。为了研究的方便，可以根据岩石性质，将岩石的应力-应变曲线简化为两大类。一类是弹脆性岩石的应力-应变曲线（图1-1a）。它的特点是在应力达到强度极限以前的总变形量很小，曲线近似于直线，可以按线性弹性体来研究，即符合虎克定律（ $\sigma = E\varepsilon$ ），式中弹性模量 E 为一常数；另一类是弹塑性岩石的应力-应变曲线（图1-1b）。它的特点是应力达到某一值后，应力-应变曲线不再成线性关系，曲线在开始阶段较陡，以后逐渐变缓。工程上把曲线开始平缓的转折点称为屈服极限。实践中，只有少数极为软弱的沉积岩才可近似地视为弹塑性体。

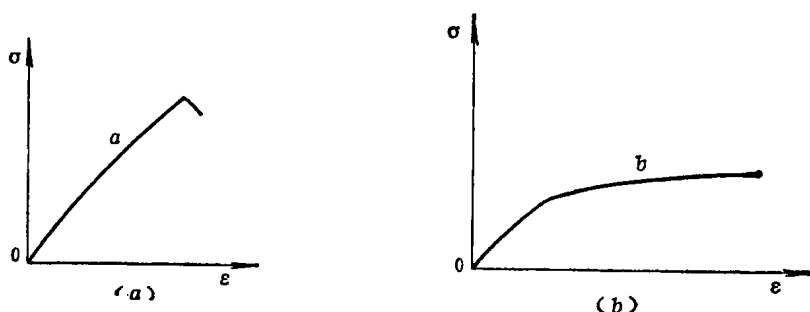


图 1-1 岩石的应力-应变曲线

岩石的弹性、塑性和脆性对凿岩爆破效果的影响很大。在弹性变形过程中，岩石只产生变形而不破碎，结果白白地浪费了能量，达不到破碎岩石的预期效果。如果凿岩冲击功不够大，弹性大的岩石会使钎头在孔底弹跳而影响钻进速度；在爆破时，药包爆炸能量中有相当大一部分能量消耗在岩石的弹性震动上。

脆性显著的岩石在冲击载荷的作用下易于破碎，凿岩爆破效果好。塑性显著的岩石，凿岩爆破效果差，但对剪切力的抵抗能力较差。因此，在实际工作中，对脆性岩石多采用冲击式凿岩，选用猛度高的炸药；对塑性岩石则多采用回转式凿岩，选用猛度低、静力作用大的炸药。

岩石的弹性、塑性和脆性不是绝对的，可以随着受力状态、加载速度、温度等条件而相互转化。例如，多数岩石在单向或三向低压应力状态下表现出脆性；但在三向高压应力作用下，脆性岩石在破坏前却表现出很大的塑性变形；在静载荷作用下产生塑性变形的岩石，在冲击载荷作用下脆性显著增长；在常温下表现为脆性的岩石，在高温下塑性有显著地提高。

在虎克定律范围内，岩石和其他弹性物体一样，其变形特征可用以下几个弹性常数表示：

弹性模量 E ：它是岩石在简单拉伸或压缩时的应力 σ 与应变 ε 之比，即 $E = \sigma / \varepsilon$ 。如果岩石具有非线性弹性特征，则弹性模量就不是不变的，而是随应力增大而减小或增大。

泊松比 μ ：它是岩石的横向应变 ε_2 与沿载荷作用方向的纵向应变 ε_1 之比值，即：

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right|$$

泊松比的值也不是固定不变的，它随应力增高而有变大的趋势，但不大于0.5；若等于0.5时，则相当于岩石不发生体积变形，即岩石具有不可压缩性。

剪切模量 G ：它是岩石受两相等的剪切力（如 τ_{xy} 、 τ_{yx} ）作用时剪应力 τ 与剪应变 γ 之比值，即 $G=\tau/\gamma$ 。在线性弹性范围内，剪切模量可以由弹性模量 E 及泊松比 μ 求出，对于各向同性的均质岩石为：

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1-5)$$

体积压缩模量是指在三向应力作用下，三个正应力之和 $\Theta=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$ 与相对体积应变 $\theta=\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3$ 之比，即 $K=\Theta/\theta$ 。在线性弹性范围内，体积压缩模量 K 可由弹性模量 E 和泊松比 μ 求得：

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (1-6)$$

2. 岩石的动载变形特征

(1) 冲击载荷和波。无论是冲击式凿岩机凿碎岩石或是爆破破碎岩石，岩石承受的外力不是静载，而是一种冲击载荷；它不是一个常数，而是时间的函数。图1-2所示为凿岩机活塞冲击钎尾时，作用力随时间变化的实测曲线。从图可以看出，作用力在数十微秒内由零骤增到数吨，再经数百微秒又重新下降到零。

岩石在这种急剧变化的载荷作用下，既产生运动，又产生变形。这种动载变形用肉眼是看不出的，可用图1-3来示意说明。当冲击载荷 P 施于岩石的端面时，其质点便失去原来的平衡而发生变形和位移，而形成扰动。一个质点的扰动必将引起相邻质点的扰动。这样一个传一个地使质点的扰动链锁反应地由冲击端向另一端传播下去，这种扰动的传播叫

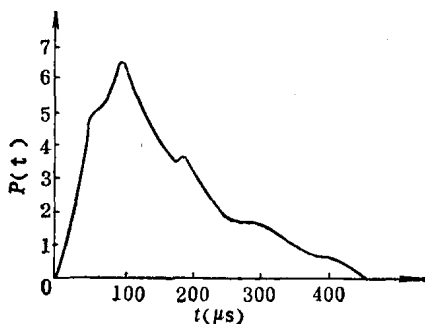


图 1-2 作用力-时间曲线

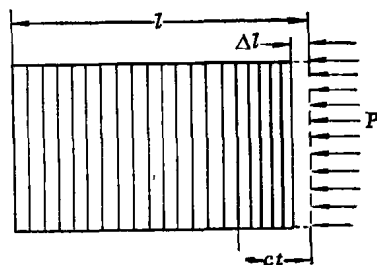


图 1-3 由冲击端面产生的变形

做波。同时，变形将引起质点之间的应力和应变，这种应力-应变的变化的传播叫做应力波或应变波。图中 Δl 为质点扰动的位移， c 为质点扰动的传播速度（即波速）， t 为质点扰动的传播时间，则 t 时间内变形范围为 ct 。此时，岩石试件中只有 ct 段的变形，其它部分仍处于原来的静止状态。所以，在动载荷作用下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，变形和速度都有一个传播的过程。因此，岩石的动载变形特征同静载变形有本质的区别。

波是质点扰动的传播而不是质点本身的移动。例如，我们可以观察到，水面上漂浮着的树叶或草屑并不跟随水波的传播而移动，只是在原位置处上下浮动。

根据波的传播位置不同可分为体积波和表面波。在介质内部传播的波叫体积波；只沿介质体的边界面传播的波叫表面波。根据介质质点的振动方向同波的传播方向之间的相对

关系，又可分为纵波、横波、瑞利波和勒夫波。介质质点振动方向同波的传播方向一致的叫纵波。纵波可引起介质体积的压缩或膨胀（拉伸）变形，故又叫压缩波或拉伸波（图1-4a）。介质质点振动方向同扰动传播方向垂直的叫横波。横波可引起介质体形状改变的纯

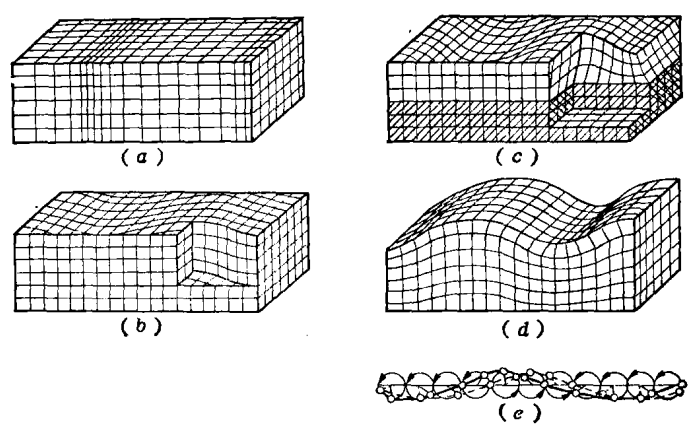
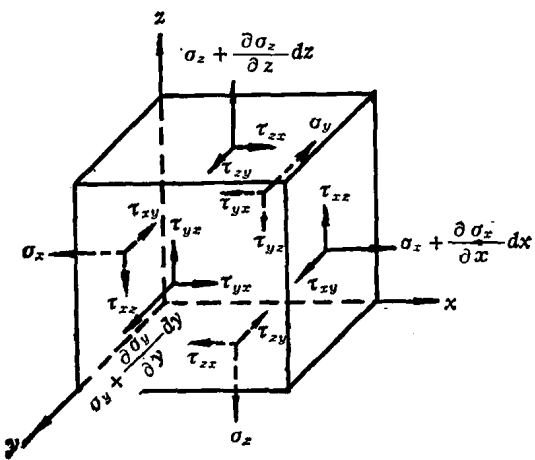


图 1-4 应力波传播引起的介质变形
(a) 纵波；(b) 横波；(c) 勒夫波；(d) 瑞利波；(e) 瑞利波质点运动方向

剪切变形，故又叫剪切波或畸变波或旋转波（图1-4b）。介质质点沿椭圆形轨迹运动的叫瑞利波（图1-4c）。介质体表面质点运动方向垂直于波的传播方向时，这种波叫勒夫波（图1-4d）。瑞利波和勒夫波都属于表面波。表面波的传播速度很低而衰减较慢。它在有限介质中传播时携带的能量较大，在一定距离内振幅最大。其中尤其是瑞利波，它是造成地震破坏的主要因素。以上所述几种波又叫做应力波或应变波。但通常应力波是指纵波。如果传播的应力值是在介质的弹性极限范围以内时，则称为弹性波。

(2) 波动方程。从弹性力学中的波动理论知道，假设从经受冲击载荷的各向同性的



弹性固体内取出一个边长为 dx 、 dy 、 dz 的微单元六面体（图1-5），则该单元的各个面上均有三个力。只要分析一个面上的应力改变量，就可以导出相应的波动方程，其纵波和横波的波动方程通式为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= c^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

图 1-5 微单元六面体上的应力
式中 x, y, z ——直角坐标；
 u, v, w ——与 x, y, z 坐标对应的位移函数；
 t ——时间；

c ——应力波传播速度。

波动方程的物理意义是，在冲击载荷作用下，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平衡关系。为了说明波动中有关问题，这里只讨论较为简单的一类问题。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 v 、 w 均为零，则波动方程可简化为：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

根据弹性力学求解此波动方程，经推导可得纵波所产生的正应力 σ 和横波所产生的剪切应力 τ 为：

$$\sigma = \rho c_p v_p \quad (1-8)$$

$$\tau = \rho c_s v_s \quad (1-9)$$

式中 c_p 、 c_s ——纵、横波的传播速度；

ρ ——介质的密度；

v_p 、 v_s ——纵、横波传播过程中介质质点的振动速度。

式 (1-8) 和 (1-9) 说明 σ 、 τ 是与波速及质点的振动速度成正比。不同类型的波，有不同的 c 值； c 值取决于介质的密度和弹性。在无限介质的三维传播情况下，纵波和横波的传播速度为：

$$c_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu_d)}{\rho(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}} \quad (1-10)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\mu_d)}} \quad (1-11)$$

式中 E_d ——介质的动弹性模量；

μ_d ——介质的动泊松比；

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

在一维时，即波长比杆的断面尺寸（或直径）大得多的情况下，可以不考虑横向变形的影响。这时纵波的传播速度可简化为：

$$c_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1-12)$$

应力波所到之处，会引起所在位置的介质质点发生弹性变形和振动，即应力波能量的一部分消耗于介质质点间的弹性变形，另一部分消耗于介质质点的振动。因此，对于纵波，可以利用功能平衡原理（外力功等于其单元岩体弹性能和动能之和）来确定介质的应力、应变和振动速度之间的关系：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{v_p(1-\mu_d)}{c_p(1+\mu_d)(1-2\mu_d)} \quad (1-13)$$

在一维情况下，上式可改写成如下形式：

$$\varepsilon = \frac{v_p}{c_p} \quad (1-14)$$

(3) 应力波的叠加。当两个扰动同时传到某一点时，那么这点的总状态参量等于两

个扰动分别抵达这点的代数和，这便叫波的叠加性。图1-6中绘出了一个矩形分布的顺波 $\sigma = \rho cv$ 和一个三角形分布的逆波 $\sigma' = -\rho cv'$ 相遇时叠加的情景。顺逆两波相遇时，状态（应力和速度）是叠加了，但每个波仍然各行各素，继续按原先的方向传播。所以在经历一段时间以后，仍然是分道扬镳。

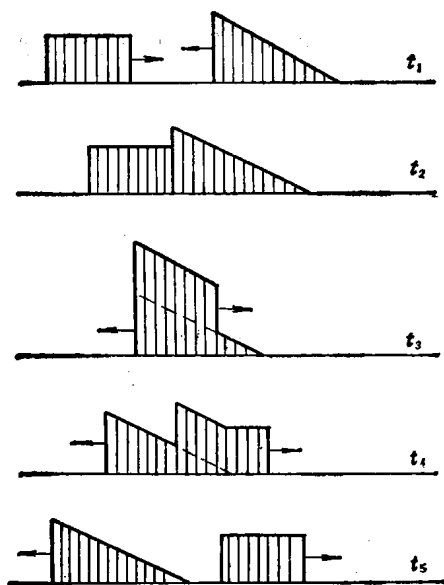


图 1-6 波的叠加性

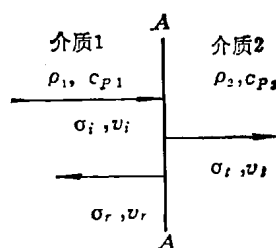


图 1-7 纵波垂直入射

顺、逆两波相遇叠加，便成为一个合成状态波，即：

$$\sigma_{\text{合成}} = \sigma + \sigma' \quad (1-15)$$

(4) 应力波的反射和透射。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，或者介质性质发生改变(例如从钎头到岩石界面或岩性不同的交界面)时，应力波的一部分会从交界面反射回来，另一部分透过交界面进入第二种介质。因应力波的人射角不同，可以有垂直入射和倾斜入射两种情况，但其前提条件是，在交界面上应保持连续性和作用力与反作用力相等。

1) 应力波从交界面垂直入射。如图1-7所示，设介质1 (ρ_1, c_{P1}) 与介质2 (ρ_2, c_{P2}) 的交界面为 $A-A$ 。当应力波到达交界面是垂直入射时，就会产生垂直反射和垂直透射。由于交界面处应力波具有连续性，即不考虑应力波的衰减和损失，则质点的振动速度相等，即：

$$v_i - v_r = v_t \quad (1-16)$$

同时，在交界面处的作用力与反作用力相等，即交界面两侧的应力状态相等，则：

$$\sigma_i + \sigma_r = \sigma_t \quad (1-17)$$

式中 下标 i, r, t ——分别表示入射、反射和透射。

如果传播中的应力波为纵波，那么根据公式 (1-8) 得：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \rho_1 c_{P1} v_i & v_i &= \frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{P1}} \\ \sigma_r &= \rho_1 c_{P1} v_r & v_r &= \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{P1}} \\ \sigma_t &= \rho_2 c_{P2} v_t & v_t &= \frac{\sigma_t}{\rho_2 c_{P2}} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

将公式 (1-18) 代入公式 (1-16) 得:

$$\frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{P1}} - \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{P1}} = \frac{\sigma_t}{\rho_2 c_{P2}} \quad (1-19)$$

将公式 (1-19) 与公式 (1-17) 联立解之, 得:

$$\sigma_r = R_r \sigma_i \quad (1-20)$$

$$\sigma_t = R_t \sigma_i \quad (1-21)$$

$$\text{式中 } R_r \text{——应力波的垂直反射系数, 且 } R_r = \frac{\rho_2 c_{P2} - \rho_1 c_{P1}}{\rho_2 c_{P2} + \rho_1 c_{P1}}; \quad (1-22)$$

$$R_t \text{——应力波的垂直透射系数, 且 } R_t = \frac{2\rho_2 c_{P2}}{\rho_2 c_{P2} + \rho_1 c_{P1}}. \quad (1-23)$$

公式 (1-20) 和 (1-21) 表明, 反射应力波和透射应力波的大小是交界面两侧介质波阻抗 (ρc) 的函数。

①当两种介质的波阻抗相等, 即 $\rho_1 c_{P1} = \rho_2 c_{P2}$ 时, $\sigma_r = 0$, $\sigma_t = \sigma_i$, 说明透射波与入射波性质完全一样, 并全部通过交界面进入第二种介质, 不产生波的反射。

②当 $\rho_2 c_{P2} > \rho_1 c_{P1}$ 时, 则 $\sigma_r > 0$, $\sigma_t > 0$, 说明在交界面上有反射波, 也有透射波; 如果 $\rho_2 c_{P2} \gg \rho_1 c_{P1}$ 时, 则 $\rho_1 c_{P1}$ 可以忽略不计, 即 $\sigma_r = \sigma_i$, $\sigma_t = 2\sigma_i$ 。这说明在交界面上的反射应力波的符号、大小与入射应力波完全一样, 透射应力波是入射应力波的两倍。叠加的结果使交界面处的应力值为入射应力波的两倍, 其质点的运动速度为零。此交界面即为固定端。

③当 $\rho_2 c_{P2} = 0$ 或 $\rho_2 c_{P2} \ll \rho_1 c_{P1}$ 时, 即应力波到达的交界面是自由端, 则 $\sigma_r = -\sigma_i$, $\sigma_t = 0$ 。这时反射波与入射波的符号相反, 大小相等, 叠加的结果使交界面处的应力值为零。即入射压缩波全部反射成拉伸波, 而没有透射波产生。

④当 $\rho_2 c_{P2} < \rho_1 c_{P1}$ 时, 则 $\sigma_r < 0$, $\sigma_t > 0$, 即在交界面处既有透射压缩波, 又有反射拉伸波。

由于岩石的极限抗拉强度小, 后两种情况都会引起岩石破碎, 特别是 $\rho_2 c_{P2} = 0$ 的情况。为了进一步说明应力波从自由端反射的过程, 用图 1-8 说明锯齿波在自由端的反射情况。

取入射应力波为压缩波, 从左向右传播。当压缩波到达自由端之前, 介质处于压缩状态; 当到达自由端之后, 部分入射压缩波被反射成拉伸波。首、尾的应力叠加后得一合成波。当入射压缩波完全通过自由端时, 全部被反射成拉伸波。如果此拉伸应力值超过介质的极限抗拉强度时, 自由端处就从原来的压缩状态转变为拉伸破坏状态。

2) 应力波向交界面倾斜入射。应力波向交界面倾斜入射的情况非常复杂。入射波不管是纵波或横波, 经过交界面反射后, 都要再度产生纵波和横波。图 1-9 是理想和简单的

倾斜入射情况。入射纵波 P 在自由面上产生一个反射的初波 P_P 波和一个反射的次波 P_S 波。若入射波是横波 S ，也会产生 S_P 和 S_S 波。

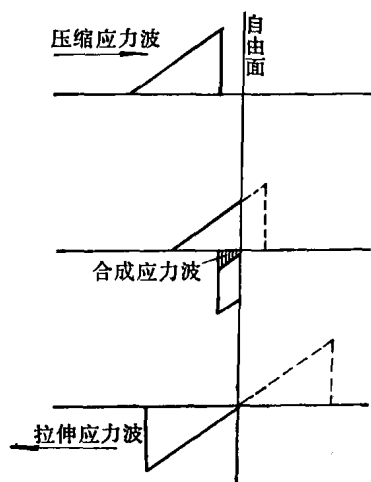


图 1-8 锯齿波在自由端的反射

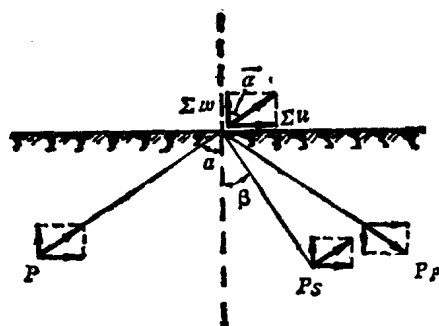


图 1-9 纵波倾斜入射

正如前述，当 P 波入射时，自由面的边界条件是应力值等于零，其入射角与反射角相等，以 α 表示；由反射生成的横波 P_S 的反射角（反射横波与自由面法线的夹角）以 β 表示。由弹性力学知道：

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_P}{c_S}$$

$$\text{即} \quad \sin \beta = \frac{c_S}{c_P} \sin \alpha \quad (1-24)$$

从公式(1-24)可以看出，反射角可以用 c 和 α 的关系表示出来。在这种情况下，入射纵波引起的应力 σ_i 和反射纵波及反射横波引起的应力 σ_r 及 τ_r 之间，有如下的关系式：

$$\sigma_r = R_0 \sigma_i \quad (1-25)$$

$$\tau_r = [(R_0 + 1) \operatorname{ctg} 2\beta] \sigma_i \quad (1-26)$$

式中 R_0 ——应力波的倾斜反射系数。

$$R_0 = \frac{\operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}^2 2\beta - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta \operatorname{tg}^2 2\beta + \operatorname{tg} \alpha} \quad (1-27)$$

纵波倾斜入射时，自由面上质点的运动方向为三个波引起的质点位移的合成方向，如图1-9所示。

$$\bar{\alpha} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\Sigma u}{\Sigma w} \right) \quad (1-28)$$

式中 Σu ——平行自由面方向质点位移的合成值；

Σw ——垂直自由面方向质点位移的合成值。

同理，如果入射波是横波，可得如下关系式：

$$\tau_r = R_0 \tau_i \quad (1-29)$$

$$\sigma_r = [(R_0 + 1) \operatorname{ctg} 2\beta] \tau_i \quad (1-30)$$

3. 岩石的变形能 前面介绍的是岩石在静载和动载下的变形性质，而且两种变形有本质的不同。但是，不论在何种载荷作用下，岩石从变形到破坏，都是一个获得能量到释放能量的过程。

从能量观点看，变形的一切能量，都消耗在固体质点运动的势能上。从功能平衡原理上说，外力对岩石所作的功在数值上应等于岩石的总变形能。但实际上，总有一部分功是消耗在岩石缺陷的调整、内摩擦损失和对岩石质点加热等方面，所以，从能量的观点分析变形，只能得到近似的应力-应变的关系。

岩石的变形能 W_T 是以静载变形能 W_E 与动载变形能 W_K 之总和来表示，即：

$$W_T = W_E + W_K \quad (1-31)$$

从弹性力学中知道，外力所作的功以变形能的形式储存在物体内部。当去掉外力时，在物体恢复原状的过程中，储存的变形能又重新释放出来。在弹性限度内，当外力由零逐渐增加到 P ，力 P 作用点的位移由零逐渐增加到 ΔL 时，力 P 在位移 ΔL 上所作的功 u 为：

$$u = \frac{1}{2} P \Delta L \quad (1-32)$$

这个功 u ，在数值上等于 $P-\Delta L$ 关系图曲线下的面积，如图1-10中所示的阴影三角形的面积。这功在数值上等于物体的变形能。

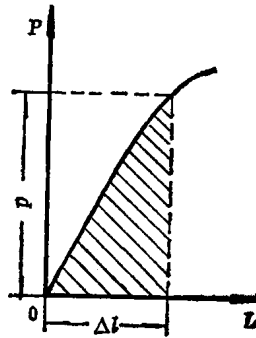


图 1-10 $P-\Delta L$ 关系图

现取一小块立方单元体岩石，其边长为 L ，面积为 A ，体积为 V 。作用在立方单元体面上的力由零逐渐增加到 P ，则静载变形能 W_E 在数值上等于外力所作的功，可由公式(1-32)改写为：

$$W_E = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{A} \cdot \frac{\Delta L}{L} V = \frac{1}{2} \sigma \epsilon V = \frac{1}{2E} \sigma^2 V \quad (1-33)$$

式中 σ ——应力；
 ϵ ——应变。

如果外力以一定的速度加载时，岩石质点产生运动，其动能即为岩石得到的动载变形能 W_K ，则：

$$W_K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2E} \sigma^2 V \quad (1-34)$$

式中 m ——岩石的质量, $m = \rho V$;
 v ——加载后体变形速度, 即质点的运动速度;
 ρ ——岩石的密度。

因此, 将公式 (1-33)、(1-34) 代入公式 (1-31) 中可得岩石的总变形能 W_T :

$$W_T = \frac{1}{E} \sigma^2 V \quad (1-35)$$

从公式 (1-33)、(1-34) 可以看出, 静载变形能与动载变形能相等, 即岩石的总变形能中, 静载变形能和动载变形能各占一半, 并且与岩石的体积和应力平方成正比。这一结论对于研究岩石破碎的问题是很重要的。

二、岩石的强度特征

从力学观点来说, 岩石强度是在一定条件下或一定范围内, 能承受某种外力作用而不破坏的性能。岩石的强度包括静载强度和动载强度。一般情况下, 强度是用来表示工程结构岩石稳定性的指标, 同时, 也是作为采掘工程中岩石破碎难易程度的参考性指标。

岩石强度 R 是以岩石在破坏时单位面积 A 上所受的力 P 来量度的, 即:

$$R = \frac{P}{A} \quad (\text{Pa}) \quad (1-36)$$

1. 岩石的静载强度性质 岩石静载强度的测定方法, 是将岩石做成规定的形状和尺寸的试件, 在万能材料试验机或三轴压力试验机上进行拉、压、剪、弯等强度试验。试验表明, 岩石的静载强度有如下的主要性质。

(1) 在大多数情况下, 岩石表现为脆性破坏。

(2) 岩石的强度, 就同一种岩石而言并非常数。影响强度的因素很多, 例如岩石的组成成分、组织结构、颗粒形状大小、孔隙度、温度、湿度, 容重、受力状态和时间、风化程度等。

(3) 在不同受力状态下, 岩石的各种强度极限不同, 相差悬殊。但一般可归纳为以下规律: 从载荷性质看, 单向抗压强度 > 单向抗剪强度 > 单向抗弯强度 > 单向抗拉强度。例如, 一般岩石抗压强度值约为 $2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^7 \text{ Pa}$, 个别情况可达 $5 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8 \text{ Pa}$ 而抗剪强度值仅为抗压强度的 $1/8 \sim 1/12$ 。抗拉强度值最低, 为抗压强度的 $1/10 \sim 1/50$; 从应力状态看, 三向抗压强度 > 双向抗压强度 > 单向抗压强度。因此, 为了加强凿岩爆破效果, 应当尽可能使岩石受拉伸或剪切破坏。

2. 岩石的动载强度性质 前已述及, 岩石在静载下同动载下的变形过程有本质的区别。当岩石受静载达到强度极限前, 外载卸除后, 岩石立即恢复到原来的静止状态。而在动载情况下, 虽然外载已解除, 但是, 岩石的质点由运动恢复到静止状态还需有一个持续过程。所以, 岩石的动载强度也不同于静载强度, 它同加载速度有关。岩石在冲击载荷作用下, 无论是抗压强度还是抗拉强度都比静载强度大。

表1-4中列出几种岩石的动、静载强度值。

岩石的动载强度可用一些综合指标来加以说明。

(1) 岩石的动态弹性常数。

1) 动弹性模量 E_d 。