

# 岩石力学性质的研究和爆破技术的改进

中国科学院力学研究所 寇绍全 周家汉

## 一、前言

炸药爆炸后释放出大量能量，通过爆炸产物气体膨胀对岩石做功，能量以波的形式在岩石中传播，引起岩石变形、破坏、抛掷。爆破工程的任务就是要高效率地利用这种能量对岩石造成理想的块度，抛掷的岩石获得一定的初速，不应破坏的则要完整无损。要做到这些，一方面需对爆炸载荷如何引起岩石的变形、运动和破坏进行系统的实验观察，做出正确的理论分析，加深对爆破机理的认识，为爆破的最优设计打下理论基础；另一方面要有把这种理论变成现实，付诸工程实践的相应技术。

爆破作用下岩石的变形、破坏、抛掷，取决于岩石的力学性质，爆炸载荷本身，及问题的几何条件。本文从描述爆炸载荷的特征出发，阐述了在这种载荷作用下岩石的一些特殊性质，并介绍了近年来国外利用这些性质对爆破技术的改进所做的部分研究工作，试图把岩石动力学性质的研究与爆破技术的改进结合起来，为爆破机理研究及爆破技术的发展提供岩石力学性质方面的依据。

## 二、爆破作用下岩石性质的特点

炸药爆炸后生成高温高压气体。许多固体炸药的爆炸产物都可以采用绝热指数 $\gamma=3$ 的理想气体来近似描述其初期膨胀。从而给出爆震压力的近似公式<sup>[1]</sup>

$$p = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (1)$$

其中 $p$ 为爆震压力， $\rho_0$ 为炸药密度， $D$ 为爆速。从式(1)我们可以估计几种常用工业炸药

表1 几种常用工业炸药的爆震压力

炸 药 品 种	密度(克/厘米 <sup>3</sup> )	爆速(毫米/微秒)	爆压(万巴)
TNT	1.59	6.9	18.9
2*岩石硝酸铵炸药	1.0	~ 3	2.25
铵油炸药	0.9	~ 3	2.03

的爆压(表1)。爆震结束后，爆炸产物内各部分的能量是不均匀的。为估计岩石中作用的最高压力，不妨设想产物气体的能量均匀分布在气体中，压力、密度的分布也一样，即采用所谓定容绝热爆炸的假设。这个假设在药室壁附近不成立，但在大于几倍药包半径以外的地

方就显得合理了。对于装药密度为 1.59 克/厘米<sup>3</sup> 的 TNT 炸药, 均匀分布的气体压力约 8.17 万巴 [2]。

均匀的高压气体作用于岩石, 在岩石中形成击波, 在产物气体中传播稀疏波。在产物气体和岩石界面两边的压力和速度相等。利用击波面上的 Hugoniot 数据, 把产物当成  $\gamma=3$  的理想气体, 得到石灰岩中压力为 5.6 万巴。考虑爆炸产物能量非均匀分布, 药室壁上压力要高些, 但药室附近压力衰减也更快。多数较致密的岩石中压力都接近这个数值, 松软的岩石则要低一些。其值是我们估计爆破时岩石中可能承受的最大压力。

在这个压力下, 波头上的体应变约为 11%, 当应力峰值衰减到 2 万巴或 5 千巴时, 相应的体应变为 4% 和 2%。因此, 除破裂带附近以外, 我们可用小变形理论描述岩石在爆破作用下的运动和变形。

相应于 5—6 万巴的压力, 波头上质量速度为 0.4—0.5 毫米/微秒。假定药室是直径为 100 毫米的圆柱形空腔, 则相应的体应变率  $\dot{\epsilon} \approx (8-10) \times 10^3$  /秒, 离药室越远, 应变率越低。

应力波到自由面后要反射, 多次反射后应力梯度大大下降。实验观察说明, 鼓包破裂时, 从药室中心发生的同一条辐射线上, 各点的初始抛速大致相等 [3], 可见鼓包运动后期可当成准静态问题处理。

如果从做功的角度来考虑岩石中击波头上关系, 这时波头可当成一维应变问题, 得到

$$dW = -\nabla p d\epsilon_r \{1 - [4\tau/(3p)]\} \quad (2)$$

其中  $\tau$  为波头上剪应力,  $\epsilon_r$  表示径向应变,  $W$  是压力和剪应力对单位质量岩石所做的功。  $[-4\tau/(3p)]$  表示形变功与压缩功之比。从式 (2) 可以看到, 若  $\tau=0$  或  $4\tau/(3p) \ll 1$ , 则可认为只有静水压做功, 可以把岩石当成无粘流体。可是, 在爆破问题中, 岩石强度为几千巴,  $p$  为几万巴或更小, 因此  $4\tau/(3p)$  不是很小, 即使在药室附近, 也必须考虑剪应力的影响。

岩石爆破时可能引起的温度升高的热源有两个。一是产物气体的高温造成的热传导和辐射。由于岩石的传热能力很差 (花岗岩传热系数只为铜的 1/204), 爆破过程作用时间短, 岩石的热透明度差, 所以热传导和辐射都可以不考虑。二是塑性功生成的热。以强度为 6000 公斤/厘米<sup>2</sup> 的花岗岩为例, 剪应变达 5%, 考虑有 90% 的塑性功生成热, 其温升大约为 56°C, 这对岩石的强度、应力和应变关系的影响可以忽略。

以上讨论, 说明研究岩石爆破问题, 需要知道压力在 5—6 万巴以下, 应变率为  $10^4$  /秒以下直到准静态 ( $10^{-4}$ — $10^{-5}$  /秒) 岩石的力学特性, 包括断裂特性。在破坏发生之前可采用小应变理论, 要考虑强度对爆破的影响, 而温度效应可以不用考虑。

### 三、应力和变形的关系

应力和变形的关系是岩石本身的力学特性。图 1 是从刚性试验机上得到的无围压时完整岩石的应力应变关系 [17]。图中 BC 段, 材料有永久变形, CD 段表明材料承载能力随变形增加而减小。CD 的最大斜率称为脆度。其 C 点即为材料的抗压强度。

一般说来, OA 并不是直线, 然而, 无论静态和动态试验, 都证明对一些坚硬致密的细颗粒岩石 (如石灰岩), 加载初始阶段都可近似地当作线弹性处理。不过, 弹性极限应为剪胀开始点 [4]。在岩石力学中, 把压缩时岩样相对于线弹性材料的性状的体积增加称为剪胀 (图 3)。

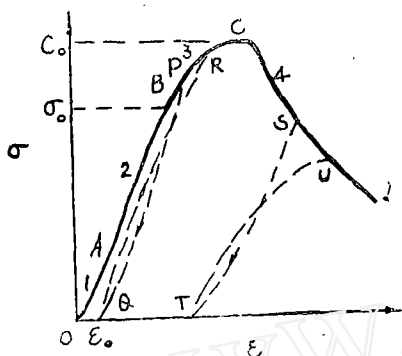


图1 完整岩石的应力-应变关系<sup>[17]</sup>

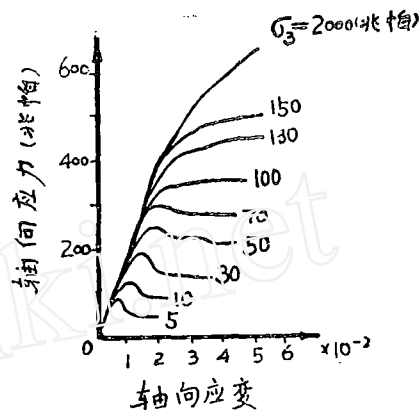


图2 Bunt 砂岩在不同围压下轴向应力和轴向应变的关系

爆破时岩石受力状态并非一维问题，任一主应力方向的应力和变形的关系都受其他两个方向应力的制约。图2是Bunt砂岩在不同围压下的轴向应力-轴向应变曲线( $\sigma_1-\epsilon_1$ )。这种岩石的初始孔隙率较高(15%)，但其结果仍具有典型性。从图2可以看到，随着围压提高，强度提高。到某个围压时(对这种岩石约为100兆帕)，材料从脆性变成柔性。

图3是Bunt砂岩的轴向应力和体应变关系。当围压升高时，剪胀要减小，到某个围压时(约100兆帕)，剪胀不再出现。爆破时，岩石受力并不象单轴压缩时显得那末脆。并且，围压高到一定程度时可以不发生剪胀。这是分析爆破问题时必须注意的。剪胀发生后，压力增加，岩石的体积不仅不压缩，反而膨胀。其原因在于新的微裂隙生成和张开引起的体积膨胀超过了压缩效应。微裂隙主要是沿最大压应力方向排列。剪胀是破坏的标志，因之也伴有能量衰减。这是脆性材料所具有的特性。

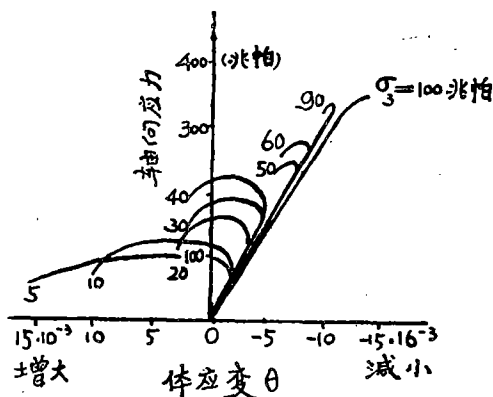


图3 Bunt 砂岩在不同围压下轴向应力和体应变的关系

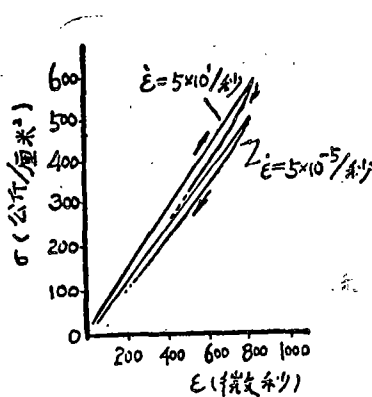


图4 14#石灰岩动静态下应力-应变关系比较

应变率对应力应变关系的影响是使岩样的模量提高<sup>[4,8]</sup>，如图4。提高的大小随岩石种类而不同。即使是同一种岩石，初始裂隙的多少不同，提高量也不相同。对某种砂岩的试验结果是，应变率提高一个量级，杨氏模量提高7%。而在石灰岩中只提高3%。

这一节里，应该强调指出几点：1. 应力波在岩石中的衰减与岩石的应力和变形关系十分密切，衰减主要取决于加卸载间的滞回<sup>[8]</sup>。然而应力峰值衰减指数不仅取决于材料性质，还与加载波形有关。例如，若加卸载的应力-应变关系表现为线性滞回，加载波速为  $c$ ，卸载波波速为  $c_1$ ，按指数规律卸载，卸载初始斜率为  $\beta$ ，则应力波幅值成指数规律衰减，在一维应力下，随距离衰减指数  $\alpha = \frac{\beta}{c} (1 - \frac{c}{c_1})$ <sup>[8]</sup>。

2. 实际计算处理应力波衰减问题时，把应力-应变关系简化成线性滞回往往可以得到比较满意的结果<sup>[9]</sup>。凿岩钻机对岩石的冲击作用就是简化处理的结果<sup>[10]</sup>。

3. 带盖帽模型<sup>[11]</sup>被认为是研究岩石在爆炸载荷作用下描述土岩性质的好模型。它属于增量型的，弹性部分遵从 Hooke 定律，超过弹性时采用相关的流动准则

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$$

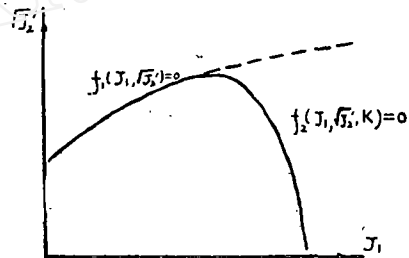


图5 土岩盖帽模型的屈服条件<sup>[11]</sup>

其中  $f$  包括  $f_1$  和  $f_2$ ，如图5， $K$  为硬化参数。这个模型的特点，是能把从不同侧面获得的本构关系的资料，组织在逻辑上不互相矛盾的框架中，既可用于静态，也适合于动态，还可考虑剪胀。压力变化范围为几巴到几万巴。由于待定参数太多，显得复杂和具一定经验性。

#### 四、爆破问题中的岩石强度

岩石强度在爆破问题中占有特殊的地位。现在岩石可爆性的分类分级有的就是根据岩石的静态抗压强度。岩石的抗拉能力很差，因此，充分利用临空面，开创临空面，成为爆破设计中的重要指导思想。许多爆破参数的确定都与岩石的强度相关。如预留边坡保护层厚度的确定，葫芦炮扩孔量的大小估计，岩石工程在应力波作用下的稳定性评价，地震波引起的基岩破坏，掘进机开挖及钻机打眼等。

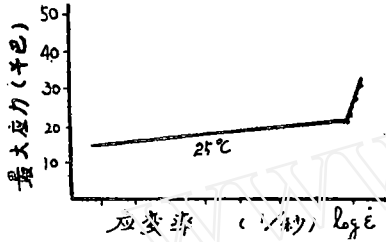
表2 静态和动态破坏强度与杨氏模量的比较

岩石种类	应变率(秒 <sup>-1</sup> )	强度(公斤/厘米 <sup>2</sup> )	$\eta$	杨氏模量 $\times 10^5$ (公斤/厘米 <sup>3/2</sup> )	$\xi$
砂石	$10^{-4}$	2015	9—10%	5.7	7%
	200—300	3519 $\pm$ 500		8.6 $\pm$ 0.5	
石灰岩	$10^{-4}$	1780	6—7%	9.0	3%
	100—200	2530 $\pm$ 500		10.8 $\pm$ 1	

是否可直接用静态的强度试验结果来分析爆破问题呢？这涉及应变率与强度的关系。表2是一种石灰岩和砂岩在不同加载条件下的结果<sup>[4]</sup>。表中  $\eta$ ， $\xi$  分别表示应变率每增加一个量级岩石强度和杨氏模量平均提高的百分数。结果说明，岩石的破坏强度随应变率增加而增

加,且砂岩比石灰岩对应变率更敏感。无论静态或动态单轴压缩时的破坏形式都是劈裂,动态时有一劈几瓣的情况。其他岩石也有同样的结果。岩石强度随应变率增加而提高,即说明岩石达到破坏的时间越短,所需外加载荷要越高。应变率每提高一个量级,随岩石不同,强度提高为1.5—10%。有些实验者观察到在 $\dot{\epsilon} = 10^3$ /秒左右,强度对应力敏感程度突然增大<sup>[12]</sup>

(图6)。强度随应变率的关系可以简写成



$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right) \propto \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^n \quad (4)$$

下标  $s$  表示静态结果,  $\sigma$  表示强度。Green 和 Perkins 早期对 Solenhofen 石灰岩实验结果给出

$$n = 0.007, \text{ 当 } \dot{\epsilon} < 10^3/\text{秒时}$$

$$n = 0.31, \text{ 当 } \dot{\epsilon} > 10^3/\text{秒时}$$

图6 应变率和最大应力的关系

Grady 从理论上分析说明,当  $\dot{\epsilon} > 10^3$ /秒时,  $n = 1/3$ ,

与材料无关<sup>[13]</sup>。利用热激活理论可较好地解释上述现象。利用 Arrhenius 方程

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{U(\sigma)}{RT}\right) \quad (5)$$

其中  $U$  为活化能,它是等效应力的函数;  $T$  是绝对温度,  $R$  为气体常数,  $\dot{\epsilon}_0$  为常数。将式(5)中的  $U(\sigma)$  进行泰勒展开,令  $U(\sigma) = U_0 - V(\sigma - \sigma_0)$ , 则式(5)变成

$$\dot{\sigma} = \frac{U_0}{V} + \sigma_0 - \frac{RT}{V} \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

可见强度随温度升高而线性下降,随应变率的对数增加而线性增加。式中  $(U_0/V) + \sigma_0$  相应于  $T = 0$  或  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$  时的极限应力,它应是材料的一种内在性质。这也说明无论应变率增加或减小对强度的影响都是有限的。有趣的是达到极限的应变率并不高。如 Lindholm<sup>[14]</sup> 所举玄武岩  $\dot{\epsilon}_0 = 4.02 \times 10^4$ /秒。Hoard<sup>[15]</sup> 给出大理石  $\dot{\epsilon}_0 = 1.6 \times 10^7$ /秒。而爆破时,药室壁附近  $\dot{\epsilon}$  是可以达到  $10^4$ /秒的。

在实际爆破问题中,我们更关心有围压下岩石的强度。从图2可见:(1)强度随围压增加而增加;(2)围压继续升高,岩石可以从脆性变成柔性,甚至可以有硬化。由此可以看到  $\sigma_1$  应有  $\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3)$  的形式。和金属不一样,岩石的强度在低压时随静水压增加而增加,压力再升高,则只是增加的幅度变小。而一般认为静水压对金属的强度无影响。金属屈服后被认为体积不再变化,各向等应力不再对金属的变形做功。而岩石的体积则会随压力增加而变化。其原因在于金属的屈服是与位错有关,而岩石的体积变化则是由于破裂的结果。

在多维应力作用下,采用不变量间的关系描述破坏或屈服。冯遗兴等<sup>[16]</sup> 给出一种花岗岩屈服强度为

$$\sqrt{I_2} = 0.27 + 0.37I_1 - 0.10 \exp(-0.09I_1) \quad (7)$$

其中  $I_2$  为第二应力偏量,  $I_1$  为应力的第一不变量,单位为千巴。Nelson等<sup>[11]</sup> 给出一种闪长岩的强度表达式为

$$\sqrt{I_2} = 152 - 145 \exp(-0.0029I_1) \quad (8)$$

其中单位为千磅/英寸<sup>2</sup>。

在有围压时，破坏多是与最大压应力方向有一定夹角的剪切。爆破设计时要充分利用临空面，工程中提到的夹制作用是围压相联系的。

由于岩石中总有孔隙和裂隙，孔隙中经常充满着流体。流体的存在对岩石的破坏强度有影响。Handin<sup>[17]</sup>等指出，如果岩石中孔隙互相连通，则渗透率较高，以致流体可在岩石内流动。这时破坏的 Mohr 包络线可以用等效应力来表示。等效应力定义为

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - p, \quad \sigma'_2 = \sigma_2 - p, \quad \sigma'_3 = \sigma_3 - p \quad (9)$$

$\sigma'$  表示等效应力， $p$  为孔隙水压力。库仑破坏准则变成

$$\sigma_1 - p = C_0 + q(\sigma_3 - p) \quad (10)$$

$C_0, q$  为两个常数。

实验说明，岩石从脆性到柔性的转变受到  $\sigma_3 - p$  的控制(图7)。如果围压一定，则孔隙压力增加，等效围压减小，岩石又可从柔性变为脆性。例如 Raleigh 和 Perterson<sup>[17]</sup> 在 1965 年做的蛇纹石的脱水试验，先加围压，使岩石表现为柔性，再加温到 500℃ 围压为 3.5 千巴时，如果试件和大气相通，强度没有什么下降。但如果试件是密封的，则强度将会降低一多半，岩石由柔性变成了脆性。如果  $\sigma_3$  相同，

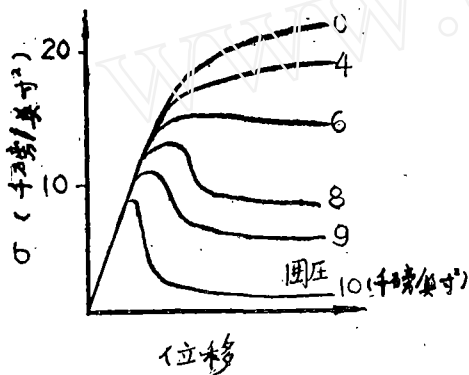


图7 不同围压下的岩石强度变化曲线

孔隙压力增加，材料的脆性减小。水、瓦斯及其他气体常常存在于煤层、岩石中，如果由于开挖或别的原因使  $\sigma_3$  突然下降，则岩石的强度迅速降低，易于发生脆性断裂失稳，这可能是岩石或煤突出的重要原因。

流体压力会影响断层和节理间的滑动。层面间剪应力可以表示为

$$|\tau| = s_0 + \mu(\sigma_n - p) \quad (11)$$

其中  $s_0$  为断层或节理的内聚力， $\sigma_n$  为垂直于节理或断裂面的压应力。由式(11)可见，流体压力使滑动所需的剪应力减小。Hubert 等人的数值计算结果说明，有流体压力时，滑动的岩体尺寸可比无流体时大一个量级。

有孔隙流体压力时的拉伸破坏准则为

$$\sigma_3 = \sigma_3 - p = -T_0 \quad (12)$$

其中  $T_0$  为岩石的抗拉强度。如地下某一深度应力为  $\sigma_2$ ，若  $p > (\sigma_2 + T_0)$ ，则岩石就要发生开裂。在石油开采中采用压水办法增加  $p$ ，造成石油流通的通路，这就是水压致裂。有水的岩石好钻进，易于爆破，也是由于流体压力使岩石强度降低的结果。

### 五、岩石的断裂力学性质和切割爆破技术的改进

岩石爆破中的破碎，实质上是岩石在爆炸载荷作用下裂纹扩展的结果。

要判别完整材料的断裂，常采用临界拉应力或冲量累积损伤准则。岩石内部总含有裂隙，对于这类多裂隙体，

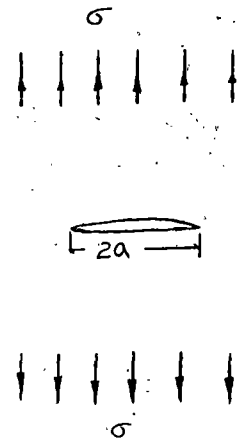


图8 无限大平板中的裂纹

相应的临界值应是裂纹扩展单位面积所释放的应变能，或临界应力强度因子。超过这个临界值，裂纹就扩展。

在无限大的平板中，有一个长度为 $2a$ 的贯穿裂纹，而在无穷远处作用着垂直于裂纹的拉应力 $\sigma$ ，则可用

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (13)$$

来判断裂纹的状态。 $K_I$ 称为裂纹尖端的拉伸型应力强度因子。Ouchterlony<sup>[10]</sup>讨论了无限长的炮孔内作用一个压力 $p$ ，周边对称分布着等长度 $a$ 的 $n$ 条裂纹，裂纹尖端处应力强度因子(图9)为

$$K_I = (2\sqrt{n-1/n})p\sqrt{\pi a} \quad (14)$$

若裂纹很短， $K_I$ 与裂纹数目无关： $K_I = 2.24p\sqrt{\pi a}$  (15)

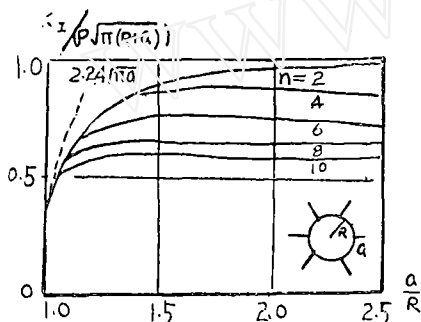


图9 应力强度因子和裂纹长度的关系

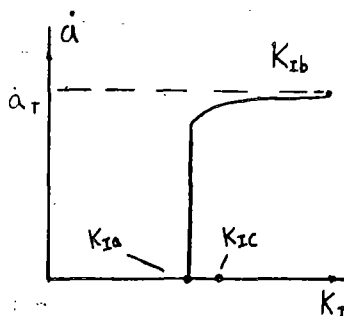


图10 裂纹速度和应力强度因子的关系

断裂力学的结果说明，当 $K_I \geq K_{Ic}$ 时，裂纹就要扩展。 $K_{Ic}$ 称为临界应力强度因子。若是冲击载荷，则应用 $K_{Ia}$ 代替 $K_{Ic}$ 。 $K_{Ia}$ 与加载速度有关。裂纹传播的方向是与最大主应力(拉应力为正)垂直的。若 $K_I > K_{Ib}$ ，裂纹将会分叉。若 $K_I < K_{Ia}$ ，则裂纹停止扩展。 $K_{Ic}$ 、 $K_{Ib}$ 、 $K_{Ia}$ 都是只与材料性质有关的常数，它们之间的大小关系如图10。

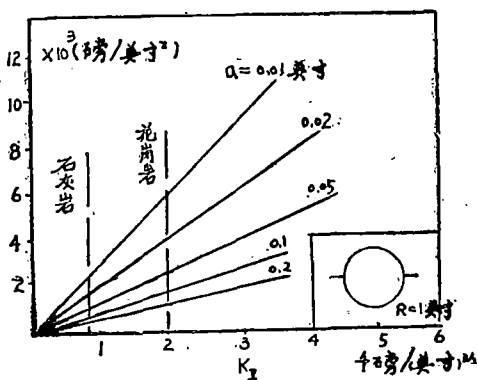


图11 不同沟槽深度与所需炮孔最小压力的关系

也可以从此处开始扩展。若沟槽深为0.5毫米，则对某种石灰岩只要 $p \geq 105$ 巴，对某种花岗岩只要 $p \geq 253$ 巴，就可以实现裂纹扩展(图11)。

要控制裂纹的传播方向，主要是要防止裂纹分叉和拐弯。有两种情况可以造成裂纹分叉。一是炮孔内压力过高，以致 $K_I > K_{Ib}$ 。二是岩石的局部缺陷造成 $K_{Ib}$ 下降。实验说明，

一个好的钻眼爆破设计要能控制裂纹初始开裂点的位置，裂纹的传播方向，裂纹发展的长度。我们利用岩石的断裂性质，能够对现有的爆破技术加以改进，得到最优的设计方案。

由式(14)和(15)可以看到，在压力相同情况下，裂纹越长， $K_I$ 就越大，说明长裂纹比短的易于扩展。在药室壁上开沟槽控制初始开裂点<sup>[21]</sup>，正是利用这一原理。然而，要 $K_I > K_{Ic}$ ，就要求 $p > p_1$ ，其中 $p_1$ 为最长裂纹扩展所需孔压的下限。Dally等人<sup>[10]</sup>的实验结果说明，对于大多数岩石，只要炮孔内压力 $p > 70-350$ 巴，即使是很浅的沟槽，裂纹

小裂隙对裂纹扩展影响不大,而节理、断层则可使断裂面转向。因此在设计炮孔位置时要注意断层和节理的存在。硝酸类炸药直接作用于孔壁上的压力,比那怕是很细小的沟槽裂纹扩展所需的压力还要大30倍。然而,炮孔内的压力不能过高,这可以采用不耦合装药和低爆速炸药。炮孔处岩石中的围压也会使裂纹传播方向偏离,其原因在于围压的存在可能改变最大主应力的方向。Ouchterlony<sup>[18]</sup>的研究结果还说明,如果爆炸气体封闭在炮孔内,不进入裂纹中,则 $K_I \propto (\text{裂纹长度})^{-1/2}$ 。如果气体流进扩展的裂纹中使断裂面受压,则当压力保持不变时, $K_I \propto (\text{裂纹长度})^{1/2}$ 。当然裂纹扩张时,炮孔也要扩张,因而压力要下降, $K_I$ 也必然会下降,最终 $K_I < K_{Ic}$ ,裂纹停止发展。但气体流进裂缝,随裂纹长度的增加, $K_I$ 衰减很慢(图12)。为要使裂纹扩展得足够长,就要使气体能流入张开着裂纹,这同样应采用不耦合装药和低爆速炸药,以免过高的压力炸坏孔壁。另外,要防止气体过早逸出,以维持炮孔内压力有较长的作用时间。为此要求炮孔的堵塞质量要好,有足够的堵塞长度,如 $l = s/2$ 就是一种合适的选择, $s$ 为孔间距。Plewman<sup>[19]</sup>的实验说明,保证气体能流进扩张的裂纹时,炮孔间距可以长达50D, $D$ 为炮孔直径。由于控制了断裂面的发展,可以增大炮孔间距,减少钻孔数量,节省炸药,不易出现超挖和欠挖,并可以减小地面振动,从而大大增加爆破所形成的结构物的强度。这种研究很可能导致一种较好的爆破切割方法。然而,这方面的工作还多停留于实验室内,有待进一步与工程实际结合起来。

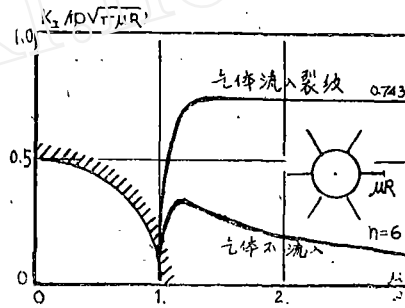


图12 气体流进裂纹时应力强度因子与裂纹长度的关系

### 参 考 文 献

- 1 Chou,Pei-chi,Hopkins,A.(eds.),Dynamic Response of Materials to Intense Impulsive(1972).
- 2 Kirkwood,J.G.,et al.Progress Report on"The pressure wave produced by an underwater explosion",Pt.V, PB-32184(1945).
- 3 黄元清,爆破介质的运动观测和研究,《岩土爆破文集》(冯叔瑜等编),冶金工业出版社(1980):55-44.
- 4 寇绍全,度吉林,杨根荣,石灰岩中应力波衰减机制的试验研究,《力学学报》,6(1982):582-589.
- 5 Gowd,T.N.,Runmel,F.,Effect of confining pressure on the fracture behaviour of a porous rock,Int.J.Rock Mech.& Min.Sci.,V.17(1980):225-229.
- 6 陆岳屏,杨业敏,寇绍全,杨根荣,章根德,褚瑶,霍布生作法测定砂岩石灰岩动态破坏强度和弹性模量的试验研究,第1届全国爆炸力学会议(1977).
- 7 Christensen,R.J.,et al,Split-Hopkinson-bar test on rock under confining pressure,Exper.Mech.,V.12(1972):303-317.
- 8 寇绍全,波动问题的一道问题——从测得的应力波形成材料的应力-应变-应变率关系,《爆炸与冲击》,V.3,1(1983):44-51.
- 9 白以龙,应力波在粘性流体中的衰减,《力学学报》,2(1978):135-146.
- 10 Lundberg,B.,Energ transfer in percussive rock destruction II,Int.J.Rock Mech.& Min.Sci.,V.10(1973):401-419.
- 11 Nelson,I.,et al,Mathematical models for geological Materials for wave-propagation studies,Shock Wave and the Mechanical Properties of Solids,Syracuse Univ.Press(1971).
- 12 杜金声,岩石在不同围压、温度、应变速率下的力学效应,《力学情报》,2(总38)(1977):31-39.
- 13 Lankford,J.,The role of tensile microfracture in the strain dependence of compressive strength of fine-grained limestone analogy with strong ceramics,Int.J.Rock Mech. & Min.Sci.,V.18(1981):173-176.
- 14 Lindholm,U.S.,et al,A study of dynamic strength and fracture properties of rock,AD-751057(1972).
- 15 hend,H.C.,effect of large change of strain rate in the experimental deformation of rock,J.Geophys.,V.71(1963):501
- 16 冯建兴,徐志平,花岗岩的本构关系的试验研究,中国科学院岩体力学研究所研究报告(1979).
- 17 Jaeger,J.C.,Cook,N.G.W.(eds.),Fundamental of Rock Mechanics,Chapman and Hall,Ltd(1979).
- 18 Ouchterlony,F.,Fracture mechanics applied to rock blasting,3rd Int.Cong.of the Int.Soc.for Rock Mech.(1974).
- 19 Dally,J.W.,Fournay,W.L.,Fracture control in construction blasting,PB-264132(1976).
- 20 Bienawski,Z.T.,Mechanism of brittle fracture of rock,Pt II Experimental studies,Int.J.Rock Mech.& Min.Sci.,V.4,4(1967).
- 21 Langerferz,U.,Kihlstrom,B.,Rock Blasting(1963):390.



# THE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK AND THE IMPROVEMENT OF BLASTING TECHNIQUE

Kou Shao-quan Zhou Jia-han  
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

(上接第 335 页)

腱、韧带的动态平衡的影响”；立石哲也 (T. Tateishi) 等“生物硬组织的压缩冲击特性”；E. R. Myers (美) 等“关节软骨的等距离膨胀——实验和理论”；吴文周等“中国的固体生物力学总述”；柳兆荣“腕桡动脉血压的生理意义”；大岛宣雄 (N. Ohshima) “肠系膜毛细血管血流的微血液动力学”；王伯祥“中医理论一瞥”；M. M. Gola (意) 等“人造内膜和股骨耦合的理论和实验的重要评论”；漱口靖幸 (Y. Seguchi) 等“离散过程的液体-气体组织树系统的动力学计算机模拟及其对肺的呼吸动力学的应用”；李仁师 (J. S. Lee 美) “用高频通气技术诱导的气体交换”；颜荣次 (R. T. Yen 美) 等“猫肺的血液流动实验”；张信刚 (H. K. Chang 美) 等“在高频振荡时混合的气体对流和弥散”；毛昭宪 (V. C. Mow 美) “两个滑动关节的生物力学”；Van Campen (荷兰) 等“人工膝关节的衰竭的生物力学”；尚天裕“中医的骨折综合概念治疗”；胡良俊等“心包力学”；吴望一“解任意形状长轴对称体 Stokes 流动的奇点线分布法”。3) 墙报 (Poster) 展出。第一次展出为生物流体和软组织，有论文 22 篇。如林擷仙“椭圆形静脉中血流分析”；杉原真佑子 (M. Sugihara) 等“壁面附近红细胞运动的有限元处理”等。第二次展出为骨和其他生物力学课题，有论文 20 篇。如 S. Bernick (美) 等“椎间盘环状纤维化的年龄变化”；钱民全等“骨折愈合的应力适应性假定——兼论小夹板固定的优越性”等。由于墙报这种形式有充分的时间进行面对面讨论，各国科学工作者有可能对自己感兴趣的课题进行充分交流。

通过这次会议，各国代表不但交流了学术思想，而且也增进了友谊，也为以后联系打下了基础。与会代表认为这次会议是各国生物力学工作者交流的一个良好开端。

钱民全 盛家宁

## 致 读 者

本刊 1984 年仍为季刊，每期定价 1.00 元，全年共 4.00 元。国内由河北省承德市邮电局总发行，刊号：18—36。请读者在邮局征订期间及时前往当地邮电局、所订阅，中国科学院力学研究所资料室不再办理订阅工作。国外由中国国际书店总发行，刊号：Q 693。