

应力波对裂隙的作用

黄理兴

提 要

强大的应力波冲击加载,能使完整介质发生变形,形成新的裂隙,导致破坏。而介质中原有的裂隙,除能提高破碎效率,还能吸收应力波的能量,使得应力波在传播过程中衰减。因此,研究应力波与裂隙的相互作用,对于研究岩石爆破机理、应力波传播规律以及波的反演——材料的动态特性等有着十分重要的意义。本文着重论述了应力波与裂隙的相互作用和裂隙对应力波传播的衰减影响,也综述了当前国内外对此所进行的模型计算和实验技术。

一、应力波与裂隙的相互作用

(一) 爆炸荷载作用下岩石的破碎机理

当炸药在炮孔中爆炸后,瞬时产生的爆轰波以高达数万至数十万大气压,并以每秒数千米的速度向外传播,同时对周围介质猛烈冲击,使其受到不同程度的破坏。爆炸对周围介质的作用首先是应力波效应。在应力波向外传播过程中,它将迫使岩石质点作径向位移,若该点所受压缩应力为 σ_p ,则在切线方向上引起拉应力 σ_t 。因为岩石是脆性材料,抗拉强度仅为抗压强度的十几分之一,所以岩石在拉应力的作用下极易破坏。当某处质点的拉应力 σ_t 大于岩石的动抗拉强度时,岩石则被拉断。在这种切向拉应力的作用下药包周围的岩石必将产生一系列的放射状径向裂隙,这种裂隙一直延伸到拉应力小于岩石极限抗拉强度为止。

在岩石遭受应力波作用的同时,爆炸生成的高温高压气体也急剧膨胀,从而加强了应力波的破坏作用,并使已产生的裂隙继续扩大和发展,同时迫使已破碎的岩石作径向移动。但是距爆心远的地方的原岩运动滞后,致使药包附近的岩石暂时储存了一部分能量(称为弹性能)。随着时间的延续,爆心附近的温度和压力逐渐下降,在其周围形成一个负压区,原暂储存的弹性能便释放出来,使得被强烈压缩的岩石即行卸载并返回爆心运动,原来的压缩波迅速变成拉伸波。在此过程中,岩石发生切向压缩,在压应力 σ_p' 的作用下,引起拉应力 σ_t' ,当它超过岩石抗拉强度时(这时岩石的抗拉强度小于爆前的抗拉强度),岩石就被拉断,这样便在药包周围形成一系列的环向裂隙。

当药包附近存在自由面时,压缩应力波在自由面上会产生反射拉伸波,使得自由面的岩石产生层裂和剥离。在最小抵抗线适合时,自由面上所产生的裂隙与药

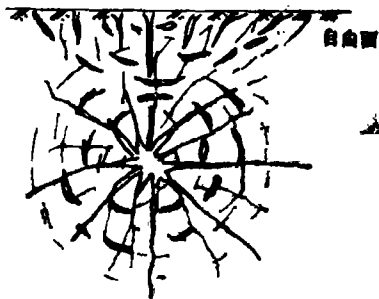


图1 炸药在均质岩石中爆炸后裂隙体系的形成

包周围的裂隙贯通在一起,如图1所示。

(二) 应力波作用下裂隙的扩展与传播速度

我们知道,岩体(石)介质是一种天然材料,它含有一定的节理、断层等。由于岩块是由晶体或不定型体通过粘结连接起来的,其中通常含有裂隙和孔隙。因此,岩石与裂隙有着不可分割的关系。

如果我们把应力波的作用使岩石中应力 σ 的加载而产生的应变 ε 用下式表示

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{E} \right) [1 + \Sigma f(c)] \quad (1)$$

式中 $f(c)$ 为超过由于应力和固有杨氏模量所产生的应变值之后单位岩石体积内所有裂隙对应变的贡献; c 为裂隙长度。那么,当应力达到 $\sigma_a = F(c)$ 时,某些裂隙将开始破坏,其中 $F(c)$ 表示用裂隙的尺寸、斜度、摩擦系数以及岩石性质表示的裂隙扩展时的应力。裂隙扩展稳定不稳定则取决于导数

$$\frac{\partial \sigma_a}{\partial c} = F' \quad (2)$$

是正还是负。由于 $f(c)$ 值总是随 c 的增加而增加。稳定扩展时, $f' > 0$, $F' > 0$,若 $\sigma \Sigma (f'/F')$ 的数量随应力的增加而增加,则应力应变曲线的斜率随应力的增加而减小。一旦裂隙不稳定地扩展, F' 就变成负的,而且岩石抵抗荷载的能力减小,若此项数值是小量,则破坏时应力应变曲线的斜率将保持正的。此外,应力应变曲线的斜率当 $F' = 0$ 时,从正变到零;当 $F' < 0$ 时,变为负。

1977年,小林(Kobayashi)和达利(Dally)认为,在应力波与介质中的天然裂隙相互作用时,如果裂隙尖端的应力强度因子 K 达到材料抵抗断裂的韧性指标——断裂韧性 K_{IC} 时,材料就会开始失稳而使裂隙扩展。当 $K > K_{IC}$ 时,裂隙将以较快的速度扩展;当 $K < K_{IC}$ 时,裂隙停止扩展。应力强度因子是表征裂隙尖端附近应力场强弱的一个有效参量,是用来作为判断裂隙是否进入失稳状态的一个指标,它取决于应力波峰值压力,也随着裂隙长度的增加而增加。早在1972年,奥契特朗(Ouchterlony)也指出了这一点,他将炮孔周围介质产生裂隙所需的应力波峰值压力用下式表示

$$P_c = K_{IC} / 2.24 \sqrt{\pi c} \quad (3)$$

式中 c 为裂隙长度。炮孔周围介质产生裂隙所需压力如图2所示。

实验证明,当瞬时应力强度因子 K 超过这种材料的分岔韧性 K_{Ib} 时,裂隙会发生分岔。裂隙的分岔是一个很有趣的现象,约菲(Yoffe, E.H.)提出裂隙尖端的应力场随裂隙扩展速度的增加而变化,而且最大的拉应力移到与主裂隙方向有一个角度的点上(在裂隙尖端的一边),这样当裂隙扩展的速度很高时就有了一个分岔趋势。1978年,基尔赫纳(Kirchner, H.P.)提出脆性材料分

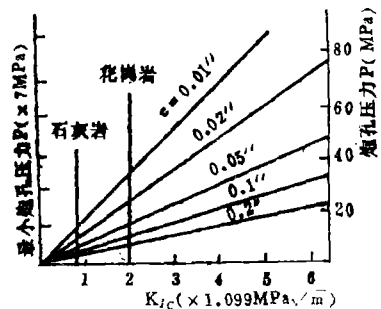


图2 应力波峰值压力与裂隙长度、断裂韧性的关系

岔的应变强度判据为

$$K_{Ib}/E = \text{Const.} \quad (4)$$

天然裂隙对新生裂隙的扩展方向影响很大, 在它们之间相互垂直时, 天然裂隙将阻止新生裂隙的扩展; 相互平行时, 新生裂隙扩展加剧, 且常在天然裂隙处产生分岔; 如果天然裂隙与新生裂隙相交成 $30\sim 60^\circ$ 度时, 分岔现象最易产生。

为了充分了解在应力波作用下岩石中裂隙扩展的有关现象, 比恩纳斯基 (Bienanski) 曾使用拍摄频率为 1.59×10^6 幅/秒的高速摄影机, 在实验室对一边加工成“V”形槽的火成岩平板进行观察, 得到扩展速度与应力波波速为: $V_{\text{分}} = 1875$ 米/秒, $V_p = 6485$ 米/秒, $V_s = 3663$ 米/秒, 裂隙扩展速度是纵波速度的28%, 是横波速度的51%。达利等人在岩石模拟材料 (Homalite 100 有机玻璃) 上钻孔爆破, 拍摄结果 $V_{\text{分}} = 368$ 米/秒, 是纵波速度的17%, 是横波速度的29%。1975年, 多尔 (Doll) 测得玻璃板中 $V_{\text{分}} = 1500$ 米/秒, 为横波的47%。测得花岗岩中裂隙扩展速度介于 $1200\sim 1700$ 米/秒之间, 约为其材料中声速的25~32%。这些值都远低于理论上裂隙前端扩展速度的极限值。从理论上分析, 在裂隙分岔初期, 裂隙扩展速度稍低于极限速度, 然后又加速, 裂隙再行分岔。分岔现象使裂隙扩展速度有一上限值, 若能抑制分岔, 可使裂隙扩展速度接近于横波速度, 即为横波的92%。

(三) 应力波强度与裂隙率的关系

实验证明, 随着应力波强度的增加, 材料因应力波作用而产生的裂隙率也越高。哈里斯 (Harries, G.) 等人指出, 在距离爆心 b 处孔壁周围裂隙的数目 N 可用下式求得

$$N = K/T \left(\frac{R}{b} \right) \quad (5)$$

式中 K 为炸药对孔壁的初始应变; T 为动态拉伸破坏应变; R 为炮孔半径。由于应力波峰值、速度、上升及作用时间均与药量有关, 所以奥尔逊 (Olson, J.J.) 等人经过在花岗岩中的定量试验, 得出了微裂隙密度与小剂量装药量的关系为

$$F = a \exp(bW) \quad (6)$$

式中 F 为所求微裂隙密度; W 为药量, (公斤), $a = 92.61$, $b = 0.79$ 。通过爆前与爆后岩芯薄片上微裂隙密度的对比, 结果表明, 爆后岩芯薄片上的裂隙密度比爆前的高50%~170%, 据国内某次大型爆破后的数据统计, 距空腔壁比例距离6~18的范围内, 裂隙率的平均值是爆前的4倍, 在0~6的范围内, 裂隙率达18倍之多。苏联曾采用爆破致裂的方法, 增加煤层渗透性, 提高瓦斯抽放量。统计, 在150~200米长的钻孔内放25~40公斤的细长药包, 爆破后三到四个月内, 瓦斯涌出量较爆前增加30~40%。

二、裂隙对应力波传播的影响

在应力波的作用下, 裂隙由张开到闭合, 形成应力应变的非线性关系, 裂隙间的摩擦会引起加卸载间的滞回和应力波衰减。

(一) 裂隙对应力波阵面曲率的影响

在对岩石介质爆破效果有影响的各因素中,应该特别注意应力波阵面的曲率,它尤其与成组装药爆破的效果有关,因为确保主体范围破碎量的切向拉应力与应力波阵面曲率有关。

炸药在岩石介质中爆破引起的应力波阵面曲率,除了与爆心距有关外,还取决于介质的物性。当应力波穿过天然的或人为的裂隙时,应力波阵面曲率将有很大变化。假定应力波在岩石介质中传播速度为 c_1 ,在裂隙充填材料中的速度为 c_2 ,裂隙距爆心为 R ,裂隙宽度为 b ,药包在 A 点起爆,如图3所示。

经过推算,可以得到波阵面曲率半径 r 的值为

$$r = \frac{b}{2} \left(\frac{c_1}{c_2} \right)^2 + R \left(\frac{c_1}{c_2} \right) + \frac{b}{2} \approx \frac{c_1}{c_2} \left(R + \frac{b c_1}{2 c_2} \right) \quad (7)$$

即应力波阵面曲率与岩石介质裂隙材料中波速的比成正比。从式(7)可见应力波阵面穿过裂隙时,若 $c_1 > c_2$ (一般情况下岩石裂隙内的充填物的波速总是低于岩石中的波速),裂隙越宽,那么波阵面曲率半径将越大,这意味着波有很大稀疏,波峰、波速和波频等均有很大的衰减。

(二) 裂隙面对爆破震动强度的影响

戈德史密斯(Goldsmith)用钢球冲击岩石杆,观察在应变幅值 $1000 \sim 4000 \mu\epsilon$ 的范围内应力波传播的衰减情况,发现闪绿岩、淡色花岗岩和砂岩对应力波有很大的衰减作用,实验中还发现大约20倍脉冲作用时间后,与初始振幅相比,应变振幅的递减量级达20:1,这说明破裂扩展时裂隙表面间的互相摩擦等在应力波传播中起着很大的作用。实验证明,地质材料与构成这种地质材料的单晶对应力波的衰减可以差到一个量级。可见裂隙面的相互摩擦、运动、扩展是衰减过程中的能量吸收源,是宏观上均质介质中最重要的耗散机制。另外,应力波向介质内部传播时,若遇到裂隙,将发生反射、折射、绕射等现象,其过程也将对应力波的传播起衰减作用,特别是在无限体介质中,应力波传播遇到一条有限长非贯穿性裂隙时,在裂隙的两端将分别形成新的波,其现象就相当复杂,如图4所示。

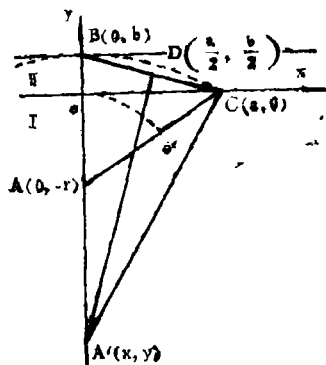


图3 应力波阵面穿过裂隙时曲率的变化

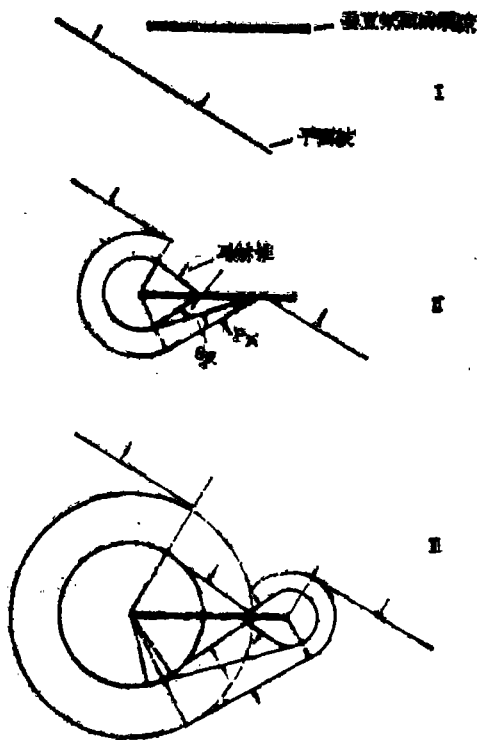


图4 平面波遇到有限长裂隙的反射、绕射现象

贝尔托尔(Berzal, J.L.)在研究降低爆破震动强度的方法时,在现场分别实测了爆炸应力波通过一条预裂面、通过一条自然裂隙面或节理面和通过相距一米的两条人工预裂面时,震动强度的衰减,然后将测得的震动强度与通过完整岩体的震动强度作了对比,结果见图5,图6。

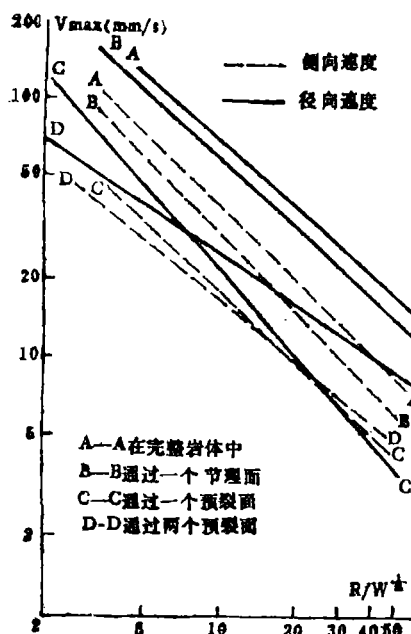


图5 径向、侧向质点最大速度与 R 的关系

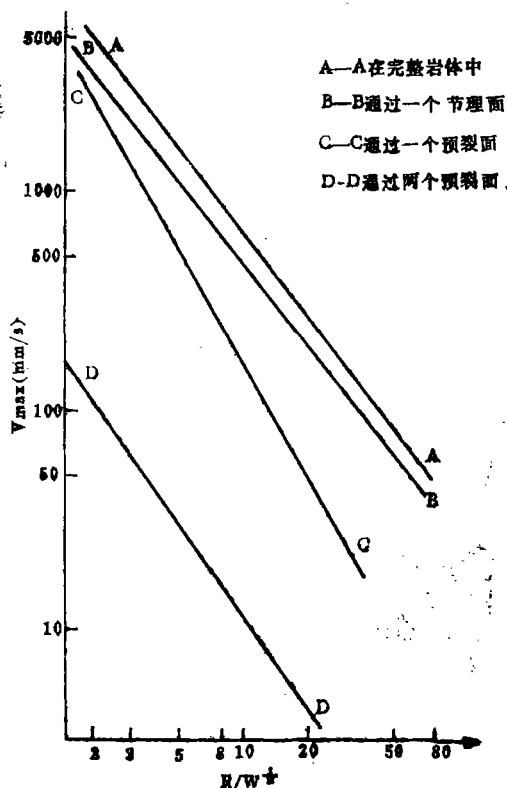


图6 垂向质点最大速度与 R 的关系

我国在某工程爆破中,采用预裂缝减震,实测结果,在预裂缝宽度为2~5厘米时,震动强度可衰减50%~90%。铃木及吉井研究了防振沟效应,振动衰减率 r 为

$$r = \frac{\text{有防振沟时振幅}}{\text{无防振沟时振幅}} = e^{-2.35 \left(\frac{n}{x} \right)} \quad (8)$$

式中 n 为沟深, x 为距离。

三、应力波与裂隙相互作用的计算模型

(一) C.D.M.模型

目前国外对应力波与裂隙相互作用的研究中,在建立模型方面做了不少工作,其中最具有代表性的是C.D.M.模型,它称为连续破坏模型。其基本观点是以材料中微裂隙的活动、扩展、贯通及形成碎块的连续累积作用来定量地描述材料在动载下的破坏过程。现以 NAG / FRAG模型来说明它的特点。

1. 裂隙的成核及扩展 首先要有一个对裂隙尺寸分布的定量描述方法,根据对固体材

料的显微结构的观察,脆性材料的固有缺陷多数呈圆片形裂隙,裂隙的数量、尺寸、方向可用裂隙半径 R 及方位角 ϕ, ψ 的裂隙密度函数 $n(R, \phi, \psi)$ 来表示。因此, $n(R, \phi, \psi)dR \cdot d\phi \cdot d\psi$ 表示单位体积内半径为 R 至 $(R+dR)$,方位角 ϕ 至 $(\phi+d\phi)$ 及 ψ 至 $(\psi+d\psi)$ 内的裂隙数。为了便于计算,把连续函数 $n(R, \phi, \psi)$ 对参数 ϕ 及 ψ 作离散化处理,使函数 n 仅是 R 的连续函数 $n_{ij}(R, \phi_i, \psi_j)$ 。根据对多种材料的统计,裂隙方向在方位矩阵单元 (ij) 内的累计密度 $N_{ij}^{II}(R)$ 可近似用下式表示

$$N_{ij}^{II}(R) = N_0^{II} \exp(-R/R_{ij}^{II}) \quad (9)$$

式中 N_0^{II} 为单位体积内裂隙方向在方位矩阵单元 (ij) 内的裂隙总数; R_{ij}^{II} 为决定 (ij) 内裂隙尺寸分布的特征参数。依据动态断裂实验观察,裂隙成核的速率 N 可用下式计算

$$N = N_0 \exp\left(\frac{\sigma_{\phi\phi} - \sigma_{\phi\phi 0}}{\sigma_1}\right) \quad (10)$$

式中 $\sigma_{\phi\phi 0}$ 为材料成核的起始应力; $\sigma_{\phi\phi}$ 为作用在裂隙面上的法向拉应力; N_0 及 σ_1 为材料的断裂常数。应用断裂力学的原理可导出裂隙扩展的定律,裂隙扩展的速率 $\dot{R}$ 可用下式表示

$$\dot{R} = (\sigma - \sigma_{\phi\phi 0}) R / 4 \eta \quad (11)$$

式中 $\sigma_{\phi\phi 0}$ 为裂隙扩展的临界应力常数; η 为材料的粘滞系数; σ 是半径为 R 的裂隙所受的法向拉应力。

2. 裂隙的贯通及碎块的形成 从裂隙的成核到裂隙的合并,材料破碎并形成分离的碎块是一个连续发展的累积过程,裂隙的合并是以裂隙区的重合来判断的。裂隙区定义为,裂隙因应力集中效应在其周围形成某一形状的扩容区。裂隙区的总体积 V_{cr} 可将所有方位矩阵单元中各种尺寸裂隙区体积相加而求得:

$$V_{cr} = 6 T_c \sum_{ij} N_0^{II} (R_{ij}^{II})^3 \quad (12)$$

式中 T_c 为材料常数,对于极脆性材料可高达20,对延性材料可接近1。假设材料中某一单元体积被裂隙区充满时材料开始破碎,因此材料开始破碎的判据是 $V_{cr} = 1$ 。最后可求得单位体积中裂隙方向在方位单元 (ij) 内的实际碎块数 $(N_0^{II})_a$ 。

$$(N_0^{II})_a = N_0^{II} (1 - f_n) \quad (13)$$

式中 N_0^{II} 为单位体积中 (ij) 方向裂隙所构成的碎块数; f_n 为材料未破碎部分所占的体积比。体积比 f_n 中包含有部分合并的裂隙,但还未形成分离的碎块,这部分材料可作为部分破碎来处理。将各方位单元的碎块数相加即得总碎块数,由裂隙扩展定律可得各方位矩阵单元中的裂隙尺寸分布,再假设一个裂隙尺寸跟碎块尺寸之间的函数关系,即可求出碎块的尺寸分布累计曲线。

用此模型计算岩石试件在一维二维冲击荷载下断裂与破坏过程,计算结果与实验结果吻合得很好。说明C.D.M.很可能成为定量描述裂隙材料在动载下破坏过程的一种有效方法。用C.D.M.代替现有地质材料中应力波传播计算程序中的破坏判据,可以求得评价爆破效果的

重要指标——碎块尺寸分布，这是弹塑性模型所做不到的。

(二) SHEP模型

SHEP模型为综合的流体动力学-弹塑性模型。布莱斯 (Blatz, P.J.) 等在七十年代曾用此模型对应力波与裂隙相互作用的三种情况进行了计算，并描述了应力波通过裂隙时产生的应力场、速度场分布以及裂隙在应力波作用下的扩展情况。计算的第一种情况是应力波与单个、无限长裂隙的相互作用；第二种情况是应力波与单个、有限长裂隙的相互作用；第三种情况是应力波与单个、有限长、扩展裂隙的相互作用。他们在计算中采用的数学公式基本上类似于威尔金斯 (Wilkins) 描述的那样，在弹塑性变形之间的分界处，各种屈服准则都可使用，当 $\sqrt{3J_2} < Y$ 时，在屈服表面的表达式遵循Prandtl-Reuss流动准则，这里 J_2 是应力张量第二不变量， Y 是屈服强度。对于裂隙表面，模型是由对偶晶格点的网络线组成的。另外，在裂隙面上，认为连续的两个晶格点沿着线性段相互闭合，不能承受剪切波。实验的荷载，是由一个三角形应力波脉冲形成的，其峰值压力为 5×10^8 帕斯卡，持续时间为 0.2 毫秒。计算结果，当波传过裂隙时，由于裂隙面不能将应力波沿裂隙面方向的剪应力分量全部传递给另一面，因而裂隙面对应力波传播起了阻碍作用，透射波的峰值压力比入射波峰值压力大约减少 20%。在第二种情况中，当波阵面到达裂隙尖端时，波系列近似地分为两部分，在裂隙尖端上面部分为简单的平面波，下面为膨胀波和尾随的剪切波。从裂隙尖端开始，产生一个冲击波传播到上面的平面波区域和下面的裂隙区域，并改变两者的流动范围。另外，它们之间还产生一个交叉的膨胀区域。在第三种情况中，除了存在上述两种情况的现象外，裂隙的扩展还吸收了应变能、动能和表面能。三种情况的计算结果见图 7，图 8。

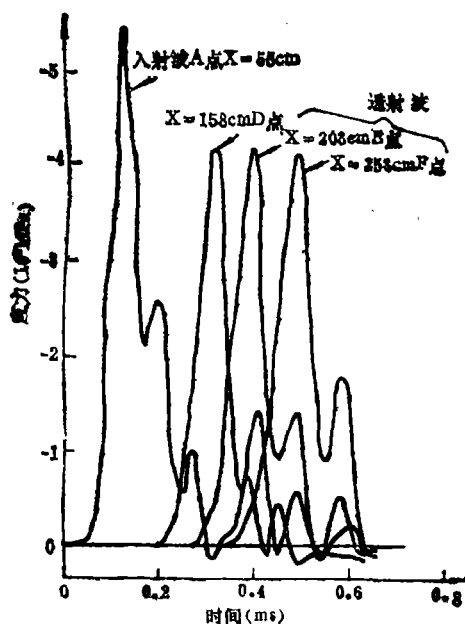


图7 情况1中沿 $Y=0$ 平面应力波波形

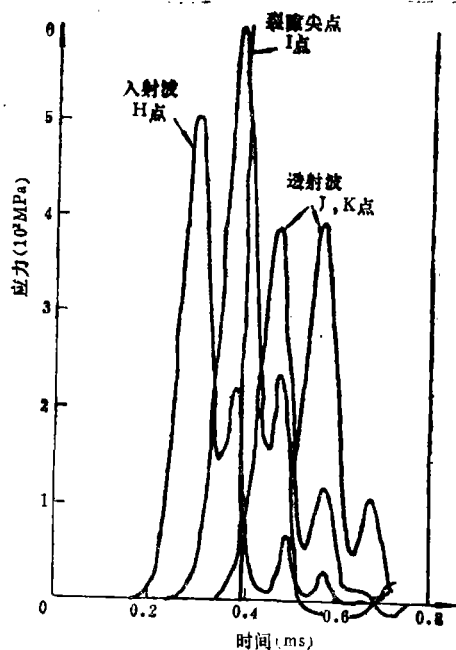


图8 情况2中在 $Y=0$ 沿着水平面处的应力波波形

四、研究应力波与裂隙相互作用的实验技术

随着人们逐步对应力波与裂隙相互作用的重视,这方面的实验技术也有了相应的发展。但由于受到裂隙存在于材料内部的限制,所以到目前为止,人们对应力波与裂隙相互作用还不能完全认识,实验技术也仅限制在下面几个方面。

(一) 测量裂隙在应力波作用下的扩展速度

目前主要采用高速摄影机拍摄材料表面裂隙的扩展速度,或用X光衍射仪观测材料内部裂隙的扩展情况与扩展速度,也可将裂纹扩展片等专门的感受元件粘贴在材料的表面或内部,以测量材料在应力波作用下裂隙的扩展速度。

(二) 测量爆炸荷载下材料内部产生裂隙所需的应力波峰值

前面我们曾经讲到,产生裂隙所需要的应力波峰值压力与断裂强度因子有关。随着断裂力学学科的蓬勃发展,测量断裂强度因子的方法也相应增多。动态断裂韧性 K_{Ia} 是随着加载速度而变化的,目前测量 K_{Ia} 除了用电液伺服万能试验机外,也可在冲击试验机上用线弹性法和J积分法来测量。直接测量应力波峰值的技术,在近区可用锰铜、碳、钽应力计,稍远区可用压电、应变等测试系统。

(三) 测量爆炸前后材料内部的裂隙率

国内外均做了不少这方面的工作,大多从材料的外观进行统计分析,这是为了避免在钻取岩样时引起材料裂隙率的失真带来人为的误差。为了研究材料内部裂隙率的变化,许多学者还是利用爆前爆后的岩芯切片在电子显微镜下观察,分析裂隙率的变化,这虽然也会带来一定的误差,但它比起从表面观察裂隙的变化率要真实得多,并能反映材料内部裂隙的变化情况。为了避免上述矛盾,利用现代化的钻孔电视来观察分析爆前爆后材料内部裂隙率的变化,看来是比较理想的手段之一。另外,用弹性波法观察爆破前后材料声速的变化,以推测材料裂隙率的变化也是一种较好的办法。

(四) 研究裂隙对应力波衰减的影响

这方面的工作主要是利用预裂面来防止爆破引起的振动。目前已经开展的工作主要是根据现场材料的特性,在不同的模拟预裂面两侧安置传感器,研究应力波通过裂隙时的衰减率。此项工作对于防护工程和工程爆破的研究都有一定的意义和价值。

五、结 语

综上所述,应力波与材料裂隙的相互作用是一个非常复杂的过程。强大的应力波冲击加载,能使完整介质发生变形,形成新的裂隙,并使裂隙扩展导致材料的破坏。而材料中原有的裂隙,除了能提高破碎效率外,还能吸收应力波的能量,使得应力波在传播过程中衰减。利用这一特性,研究其规律,对国民经济建设有着十分重要的作用。

本文在资料收集整理和编写过程中曾得到朱瑞赓、李廷芥等同志的帮助,在此谨表感谢。

参 考 文 献

- [1] 桥本清·本间久郎, 岩石爆破力学的研究, 日本矿业会志, Vol.88, No.1007, 1972年。
- [2] A.N.哈努卡夫, 用爆破法破碎岩石的某些理论和实践, 岩石力学进展, Vol.1B, 1974年。
- [3] 陶松林, 爆破工程, 冶金工业出版社, 1979年。
- [4] Yoffé, E.H., Philosophical Magazine, 12, 1951.
- [5] Dally, J.W., et al., Proceeding 18th U.S.Symposium on Rock Mech.77, 1977.
- [6] Kirchner, H.P., Engineering Fracture Mechanics 10, 1978.
- [7] Olson, J.J., et al., Rock Damage from Small Charge Blasting in Granite, 1973.
- [8] Dally, J.W., et al., Mining Engineering, 1978.
- [9] Goldsmith, W., Wave Transmission in Rocks, in Rock Mechanics Symposium AM-D—Vol. 8, 1970.
- [10] Goldsmith, W., et al., Stress Wave in Igneous Rock J.Geophys.Res.1971.
- [11] Berzal, J.L., Mining Magazine, 1976.
- [12] Grady, D.E., Int. J.Rock.Mech.Min.&Sci. 1980, 3.
- [13] Dienes, J.D., CA—7438—PE.Los.Alamos.Lab.1978.
- [14] Blatz, P.J., Interactions of Stress Wave With Cracks in Rock Media, AD 751546, 1972.

Interaction of Stress Waves with Crack

Huang Lixing

Abstract

The shock of stress waves causes deformation in intact medium, the form of new cracks and finally the failure in the material. The preexisting cracks not only help increase fracture efficiency but also absorb the energy of the stress wave to induce a decay of its propagation. Therefore the study of interaction of Stress waves with cracks will greatly contribute to the interpretation of blasting mechanism, the stress wave propagation and the dynamic behaviour of material.

Our emphasis is laid on interaction of stress wave with cracks, and the influence of cracks on attenuation of the wave propagation. A view is made of the current state of model calculation and experimental technique carried out in this field.