

爆炸处理时裂纹动态扩展行为的研究

高 桦

(上海工程技术大学材料系)

孙琦清 郑哲敏

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文研究爆炸处理时裂纹在应力波作用下的动态扩展行为。分别讨论了入射波、反射波和应力波持续时间的作用,并根据线弹性断裂力学复合型准则和动态断裂准则对裂纹的扩展进行了分析。作者建议用吸能块的办法控制爆炸处理时裂纹的扩展,并作了实验验证。

关键词 动态断裂、应力波、爆炸处理

一、引言

利用掠过爆轰进行表面处理,可以强化金属的表面层,提高疲劳性能^[1]。对于像海洋平台、石油输送管道、压力容器等,尺寸庞大,而且需要在施工现场焊接后就地处理的构件,用爆炸表面处理代替常规的处理方法,诸如热处理、喷丸、机械滚压等,有明显的优越性。但是,由于工程结构中,尤其是焊接部位常常不可避免地存在裂纹样的缺陷,爆炸处理时在应力波的作用下,裂纹会不会扩展?其扩展特性如何?能否控制?会否导致断裂?这些问题不能不引起人们的担忧和关注。为此,本文对爆炸处理时试件中预制裂纹的扩展行为作了研究;对入射波、反射波以及应力波持续时间的作用分别进行了讨论;并对采用吸能块限制裂纹扩展的作用作了实验验证。

二、爆炸处理

本工作采用16Mn热轧正火钢板,试件尺寸: $L \times W \times B = 180 \times 30 \times 15\text{mm}$ 。爆炸处理前试件先用电火花切割狭缝,再在疲劳试验机上预制疲劳裂纹,然后铣去电火花切缝,在试件上只留下疲劳裂纹。

爆炸处理时将试件紧压在由同样材料制成的平板夹具之间(如图1示)以保证试件加上夹具后总的横向尺寸与试件的高度(W)相比足够地大,因此爆炸引起的应力波可以近似地看作一维应变平面波。把RDX橡胶挠性炸药切成需要的尺寸贴敷在试件和夹具的表面,炸药从一端由雷管引爆后,爆轰波以 $c_D = 6 \times 10^3\text{m/s}$ 的速度向前传播,掠过金属表面时在炸药和金属界面处形成应力波传入金属。

本文于1986年8月21日收到。

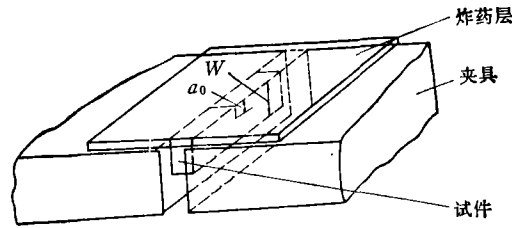


图 1 试件爆炸处理装置示意图

三、入射应力波及其作用

爆炸处理时掠射爆轰波与试件作用在试件中形成应力波, 其入射角 (θ) 取决于爆速 c_D 与金属中应力波波速 c_l 之比^[3], 即

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{c_l}{c_D} \quad (1)$$

在一维应变条件下弹性波波速 (c_l) 和塑性波波速 (c_p) 分别为

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho_{m0}} \left[\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2}} \quad (2)$$

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho_{m0}} \left[\frac{1}{3(1-2\nu)} \right]^{1/2}} \quad (3)$$

在本实验中, 16Mn 钢的初始密度 $\rho_{m0} = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊桑比 $\nu = \frac{1}{3}$, 因此求得 $c_l = 6300 \text{ m/s}$, $\theta = 46.4^\circ$.

入射应力波的持续时间 (t_0) 可以根据实验测定的塑性变形层深度计算。爆炸处理时, 金属试件从表面开始塑性变形, 并以塑性波的速度向内部传播, 直到爆轰后稀疏波 (即卸载弹性波) 赶上塑性波为止。在一维应变条件下弹性卸载波与加载弹性前驱波的波速相同, 即 $c_u = c_l$, 因此, 在本实验条件下, 当炸药厚度为 5mm 时, 计算得到 $t_0 = 0.75 \mu\text{s}$ 。

假定弹性波在试件中传播没有衰减和弥散, 则入射应力波在其透入深度超过塑性变形层深度之后就成为了波前强度为 $\sigma_{\max} = Y_H$, 持续时间为 $0.75 \mu\text{s}$ 的方波。 Y_H 为试件材料的 Hugoniot 弹性极限。在一维应变条件下 $Y_H = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \cdot \sigma_s$ 。将 16 Mn 钢在相应应变率下的单轴拉压屈服极限 $\sigma_s = 608 \text{ MPa}$ 代入, 得到 $Y_H = 1216 \text{ MPa}$ 。

入射应力波给金属以瞬态高压, 使之在一定深度范围内以极高的应变速率塑性变形, 形成大量变形双晶。应力波向材料内部传播, 随着塑性变形位错大量增殖, 由于应力波持续时间很短, 增殖的位错来不及形成完善的脆状结构, 而呈较分散的分布, 从而有较高的强化效果。此外, 在高速应变过程中, 位错的增殖和运动均以高速进行, 运动位错上的割阶难以实现保守运动, 被迫产生大量点缺陷, 点缺陷对冲击强化亦有直接作用。位错密度的测定和微观残余应力测定^[3] 均表明爆炸处理引起的塑性变形层深度可达 10mm 以上, 大大超过喷丸、机械锤击和表面热处理的影响深度。经爆炸处理以后, 光滑试件的疲劳寿命

成倍提高, 疲劳裂纹形成所需要的循环周次增多, 裂纹在强化层内的扩展速率降低^[1,3]。

入射压缩波使试件中预先存在的裂纹面相互贴合, 不产生应力奇异性。但是, 应力波在裂纹面的衍射却会在裂端附近造成应力奇异性^[4], 可能引起裂纹的扩展。由于衍射引起的应力奇异性持续时间比应力脉冲的持续时间小一个数量级, 只可能引起裂纹极微小的扩展, 如图版 I 照片 1(C) 示。因此, 本工作暂不考虑塑性压缩波对裂纹扩展的影响。

四、反射拉伸波作用下裂纹扩展

入射角为 θ 的弹性压缩波传到试件底面, 经自由面反射产生反射 P 波和反射 SV 波^[5], 如图 2 示。根据 Snell 定律, 反射剪切波(SV 波)的反射角 β 为

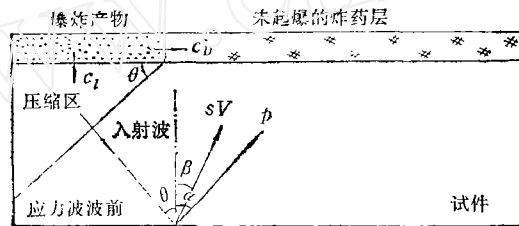


图 2 爆炸物理过程简图

$$\beta = \sin^{-1} \left[\frac{c_t}{c_l} \sin \theta \right] \quad (4)$$

$$\frac{c_t}{c_l} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (5)$$

其中 c_t 为 SV 波波速。在本实验条件下, 由(4)、(5)式算得 $\beta = 21.2^\circ$, $\frac{c_t}{c_l} = 0.5$ 。反射纵波(P 波)的反射角 $\alpha = \theta = 46.4^\circ$ 。

反射系数

$$R = \frac{\lg \beta \lg^2 2\beta - \lg \alpha}{\lg \beta \lg^2 2\beta + \lg \alpha} \quad (6)$$

反射 P 波的峰值压力 $\sigma_p = R \cdot Y_H = -643.54 \text{ MPa}$, 其中负号表示拉应力。反射 SV 波的峰值压力 $\tau_{sv} = [(R+1) \text{ctg} 2\beta] \cdot Y_H = 627.16 \text{ MPa}$ 。P 波和 SV 波均系持续时间为 $0.75 \mu\text{s}$ 的方波。但是, P 波的波速为 $c_l = 6300 \text{ m/s}$, 而 SV 波的波速为 $c_t = 3150 \text{ m/s}$ 。反射 P 波首先传到裂纹处, 经过时间 $\tau = 4.8 \mu\text{s}$ 之后 SV 波才到达, 所以, P 波和 SV 波系先后单独作用于裂纹。

P 波的作用

(1) 斜入射 P 波在裂纹 ($a_0 = 3 \text{ mm}$) 顶端引起的复合型应力强度因子可查应力强度因子手册^[6]并计算得到: $(K_I)_P^{\text{stat}} = 53.59 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$, $(K_{II})_P^{\text{stat}} = 48.40 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。

(2) 动态情况下, 应力强度因子 $K_d(t)$ 是时间(t)的函数。 $\frac{K_i^{\text{dyn}}}{K_i^{\text{stat}}}$, ($i = \text{I, II, III}$) 与应力波的持续时间 (t_0)、波速 (c_i) 以及裂纹的初始长度 (a_0) 有关。在本实验条件下,

$\frac{c_1 t_0}{a_0} = 1.6$ 。查文献[7]提供的曲线得 $(K_I)_{P}^{dyn}/(K_I)_{P}^{stat} = 1.15$, $(K_{II})_{P}^{dyn}/(K_{II})_{P}^{stat} = 0.6$, 所

以, $(K_I)_{P}^{dyn} = 61.63 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$, $(K_{II})_{P}^{dyn} = 29.04 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。

(3) 根据复合型最大正应力准则

$$K_{\theta_{\max}} = \sigma_{\theta_{\max}} \sqrt{2\pi r} = \left(K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right) \cos \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

$$K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (8)$$

即如果作用于裂端最大正应力方向的应力强度因子 ($K_{\theta_{\max}}$) 超过了临界值, 则裂纹将沿最大正应力面的方向 (θ_0) 扩展。对于本实验, 作用于裂端最大正应力方向的应力强度因子 $(K_{\theta_{\max}})_{P}^{dyn} = 74.66 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 已超过材料在该应变速率下的动态断裂韧性。实验测得, 在原始裂纹顶端 $\theta_0^P = -35^\circ \pm 10^\circ$ 方向出现扩展分支(图版 II 照片 2), 与最大正应力面的方向 $\theta_0^P = -39^\circ$ 基本一致。实验值有一定分散性是因为实际材料并非均匀、连续、各向同性, 因此实际开裂方向不仅与宏观应力场有关, 而且与裂端材料的取向和不均匀性有关。

反射 SV 波的作用

(1) 反射 SV 波的幅值 $\tau_{sv} = 627 \text{ MPa}$, 反射角 21.2° , 持续时间 $0.75 \mu\text{s}$ 。与 P 波类似, 斜入射的 SV 波也会在裂纹顶端引起复合型应力场, 同样需要从 $(K_i)_{sv}^{stat}$ 根据应力波的持续时间 (t_0)、波速 (c_i) 及原始裂纹长度 (a_0) 计算 $(K_i)_{sv}^{dyn}$, $i = I, II$; 然后按复合型最大正应力准则计算 $(K_{\theta_{\max}})_{sv}^{dyn}$ 和 θ_0^{sv} 。

(2) 与 P 波不同的是, 当 SV 波传到裂纹时, 原始裂纹 (a_0) 已在 P 波作用下形成了扩展分支 (Δa_P), 成了折裂纹 ($a_0 + \Delta a_P$)。因此必须根据文献[8]计算折裂纹顶端的应力强度因子。

计算结果: $(K_I)_{sv}^{dyn} = 76.41 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$, $(K_{II})_{sv}^{dyn} = -43.39 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$, 根据最大正应力准则 $(K_{\theta_{\max}})_{sv}^{dyn} = 102.83 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$, 它已超过材料的动态断裂韧性, 裂纹还将扩展。实验测得 $\theta_0^{sv} = 40^\circ \pm 5^\circ$, 与理论计算值 $\theta_0^{sv} = 42.8^\circ$ 一致。

五、应力波持续时间的影响

静载下的快速断裂一般不考虑载荷持续时间的影响。但是, 当 t_0 (即载荷脉冲持续时间) 与 $t = \frac{a_0}{c}$ (即应力波运行相当于裂纹长度 a_0 的距离所需的时间) 两者数量级相同时,

就必须考虑波与裂纹的相互作用。在本实验条件下, 应力波的持续时间仅 $0.75 \mu\text{s}$, 如果裂纹长度为 1—10mm, 则 t 与 t_0 同数量级。这时, 应力波持续时间的影响主要表现在以下两方面:

(1) 应力脉冲 (峰值 σ_0 , 持续时间 t_0 的方波) 在裂纹顶端引起的动态应力强度因子 K^{dyn} 是时间的函数, K^{dyn}/K^{stat} 比值与无量纲时间 ct/a_0 的关系如图 3 示。在阶跃应力波 ($t_0 \rightarrow \infty$) 的作用下, K^{dyn} 从 0 开始迅速上升, 超过静载 σ_0 引起的应力强度因子 K^{stat} 约 20—30% 后, 即以 K^{stat} 为基准作衰减振荡, 最后趋于 K^{stat} 。如果冲击载荷只持续有限时间(到图 3 箭头处为止), 则 K^{dyn}/K^{stat} 振荡到图上箭头处之后即卸载下降到零^[9]。

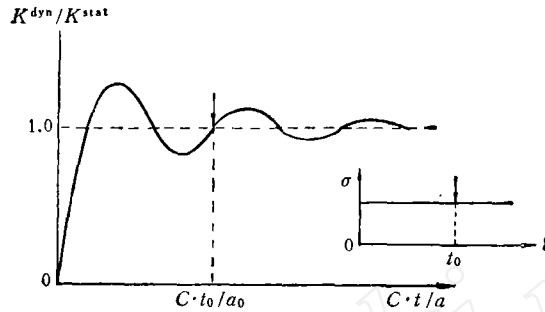


图 3 动态应力强度因子随应力波持续时间变化的变化

(2) 应力波作用下裂纹失稳扩展的充分必要条件是: $K_i^{dyn} \geq K_{i,d}$; 同时, 其持续时间必须大于最小作用时间^[10]. 因为要使裂端断裂过程区达到断前临界状态需要时间; 此外, 裂纹从开始扩展加速到失稳扩展也需要时间. 所以, 即使 $K_i^{dyn} > K_{i,d}$, 如果持续的时间不够, 仍不可能发生裂纹的失稳扩展.

本实验在反射波作用下 ($K_{\theta_{max}}^{dyn}$) 已超过该材料的动态断裂韧性, 如果在其持续的 $0.75 \mu s$ 时间内裂纹始终以极限速度 (即瑞利波的传播速度) 扩展, 则裂纹的扩展量应超过 2 mm , 而实验测得 $\Delta a_p \approx 0.17 \text{ mm}$. 这是因为 K_i^{dyn} 值是变化的, 在 $0.75 \mu s$ 中只有一部分时间满足 $K_i^{dyn} \geq K_{i,d}$ 的条件; 而且在 $K_i^{dyn} \geq K_{i,d}$ 的时间内裂纹也并非全部在作失稳扩展, 其中一部分时间用于建立断裂过程区的临界状态, 另一部分又用于加速裂纹的扩展.

如果脉冲载荷的持续时间增长, 裂纹的有效扩展时间增加, 扩展量就将增大. 本实验采用 5 mm 和 3 mm 两种炸药层厚度以获得不同的应力波持续时间, 实验结果表明, 随着药层加厚裂纹扩展量明显增加, 见图版 I 照片 1. 此外, 虽然 SV 波和 P 波的持续时间相同, 但是 $(K_{\theta_{max}}^{dyn})^{sv} > (K_{\theta_{max}}^{dyn})^p$. 因此, 对 SV 波来说, 满足 $(K_{\theta_{max}}^{dyn})^{sv} > K_{i,d}$ 条件的有效时间较长, 在其作用下裂纹的扩展量 Δa_{sv} 应大于 Δa_p , 实验证实了上述论断.

六、裂纹扩展特点

为了研究裂纹在应力波作用下的扩展特点, 本试验将全部预制疲劳裂纹的试件在进行了爆炸处理之后, 用电火花法沿试件的纵剖面切开, 其中一半经抛光、腐蚀后在光学显微镜下观察裂纹的扩展路径及其与微观组织的关系; 另一半再进行疲劳裂纹扩展直至断裂, 然后作电子断口分析.

爆炸处理时裂纹在拉伸应力波作用下快速扩展, 断口呈解理型 (图版 II 照片 3(A) 示), 它与爆炸处理前及处理后的疲劳断口形貌截然不同, 因此从断口上很容易量测爆炸过程中裂纹的扩展量. 由于 P 波和 SV 波对裂纹引起的 II 型位移分量方向相反, 在应力波多次反射过程中断面被反复磨蹭, 使解理断口上某些凸出部分的河流花样变得模糊, 不像液氮下一次拉断的解理断口那么清晰 (图版 II 照片 3(B)).

爆炸处理时主裂纹受到若干次过载, 除发生一定量的解理扩展外, 还在主裂纹前方形成大量微裂纹. 爆炸处理后进行疲劳试验, 疲劳裂纹在钝化的微裂纹前沿附近推进速率降低, 疲劳条纹间距减小 (图版 III 照片 4).

在光学显微镜下首先看到的是, 由于 P 波和 SV 波的先后多次作用使裂纹扩展方向不断改变, 裂纹路径呈锯齿状(图版 II 照片 2); 同时可以看到在主裂纹前方有一些已经相互连结和未相互连结的微裂纹。这表明: 爆炸处理时主裂纹的扩展是不连续的。首先在主裂纹前方形成微裂纹, 然后微裂纹相互联结, 并与主裂纹连通。微裂纹的形核常常发生在铁素体中, 尤其是铁素体与 MnS、MnO 夹杂的界面处(图版 III 照片 5); 而裂纹的转折和中止则常常在珠光体处发生(图版 III 照片 6), 说明珠光体对裂纹扩展的阻力较大。

七、吸能块的作用

从以上分析可见, 掠过爆轰过程中裂纹的扩展主要是由反射拉伸波引起的, 如果能设法阻止反射拉伸波传入试件, 则裂纹的扩展应可得到限制, 本实验试图采用吸能块来实现此目的。

把试件的下自由表面磨光, 涂上黄油, 再密贴一块与试件同样材料、同样尺寸的吸能块, 然后架空作爆炸处理。这时, 爆炸引起的人射压缩波可透过试件/吸能块的界面传入吸能块; 但是, 自吸能块下自由表面反射回来的拉伸波传到试件/吸能块界面时, 由于界面上只涂了一层黄油无法承受拉力, 拉伸波不可能透过界面传入试件, 而只能使吸能块在界面处脱开发生整体运动, 应力波的能量大部分转变成吸能块的动能被带走。吸能块阻止反射拉伸波传入试件, 从而有效地限制了裂纹的扩展。经如上处理后, 在光学显微镜下没有发现裂纹的扩展。在扫描电镜下观察整个预制疲劳裂纹的前沿, 仅在极个别地区有微量扩展(图版 I 照片 1(C)), 这可能是由于入射压缩波在裂纹面的衍射引起的。

八、结 论

(1) 由爆炸表面处理引起的人射压缩波, 使金属表面层塑变强化、位错密度和点缺陷密度增高, 从而提高了材料的疲劳抗力。

(2) 爆炸处理时试件中原已存在的裂纹在反射拉伸波的作用下有可能扩展。扩展的条件是 $K_{I, \max}^{dyn} \geq K_{I, d}$, 并且持续的时间要超过临界值。

(3) 裂纹在反射拉伸波作用下的扩展呈解理型。裂纹的扩展不连续。扩展方向与复合型裂纹顶端最大正应力垂直。

(4) 采用吸能块可以有效地阻止反射拉伸波传入试件, 从而限制其中裂纹的扩展。

致谢: 陈维波和石成同志承担了全部爆炸工作; 褚瑶同志参加了部分金相工作。作者在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 高桦, 褚瑶, 陈维波, 李禾, “爆炸处理提高 16Mn 钢疲劳性能”, 固体力学学报, 1987 年 2 期 164 页。
- [2] Rinehart J. S. and Pearson, J. <Explosive Working of Metals> Oxford, Pergamon (1963).
- [3] Gao Hua, Chu Yao, Chen Weibo, “Effect of Explosive Treatment on Microstructure and Fatigue Behaviour” <Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials> II, EMAS, (1986).
- [4] G. C. Sih, <Mechanics of Fracture—Elastodynamic Crack Problems> Noordhoff International Publishing, Leyden.
- [5] Julius Miklowitz, <The Theory of Elastic Waves and Waveguides> North-Holland Pub. Co., Amsterdam (1978).
- [6] G. C. Sih, <Handbook of Stress Intensity Factors> Institute of Fracture and Solid Mechanics, Lehigh

Univ., Bethlehem, PA.

- [7] Shockey, D. A. Kalthoff J. F. and Erlich, D. C. "Evaluation of Dynamic Crack Instability Criteria" Ponton Laboratory Technical Report, Stanford Research Institute, Menlo Park, CA94025.
- [8] Chatterjee, S. N. *Int. J. Solids and Structure*, **11**, (1975), 521—538.
- [9] Ravera R. J. and Sih, G. C. *J. Acoustical Society of America*, **47**, (1969), 875—880.
- [10] Kalthoff J. F. and Shockey, D. A., *J. Applied Physics*, **48**, 3(1977), 986—993.

DYNAMIC CRACK GROWTH BEHAVIOUR DURING EXPLOSIVE TREATMENT

Gao Hua

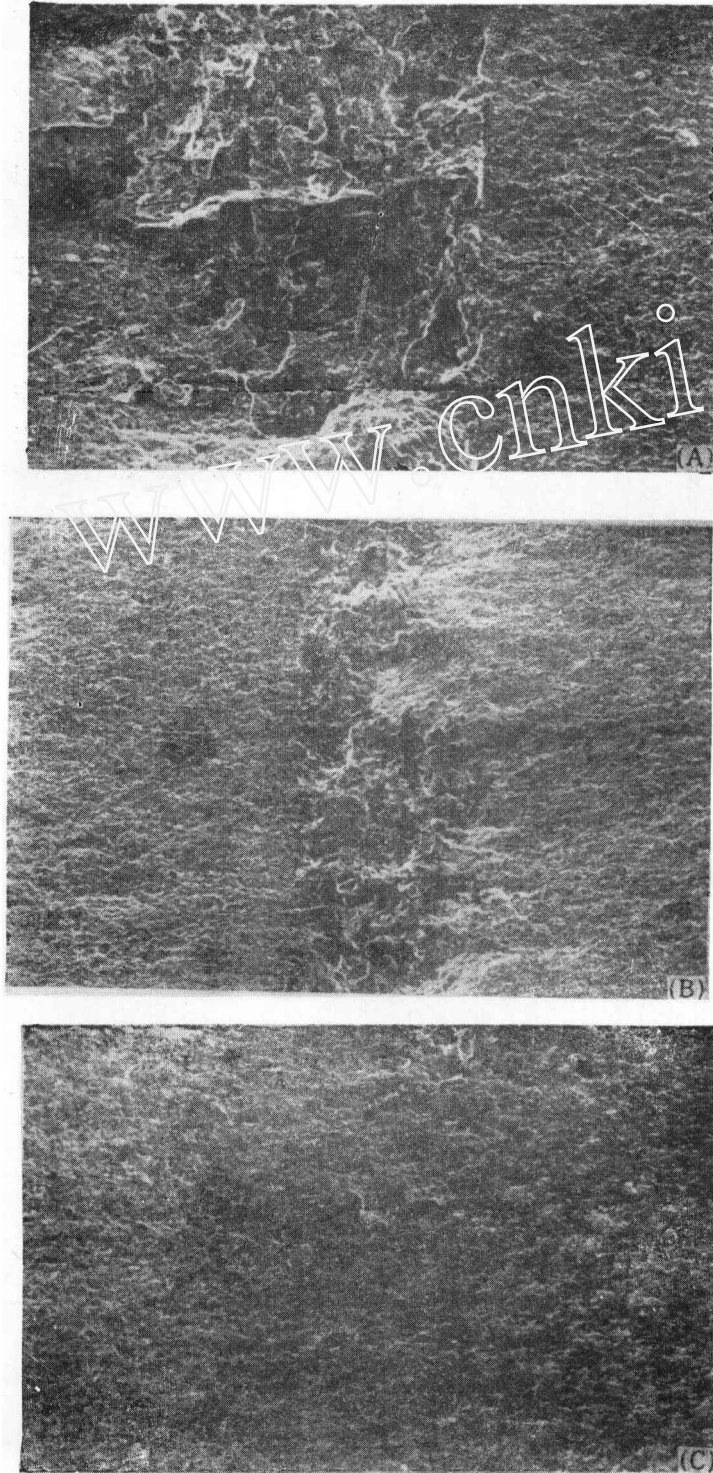
(*Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, China*)

Sun Qiqing, Zhen Zhemin

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*)

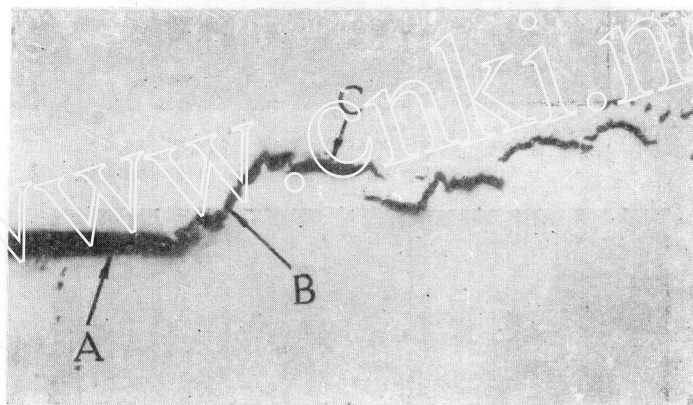
Abstract On the basis of mixed mode fracture as well as dynamic fracture mechanics crack growth behaviour caused by stress wave during explosive treatment has been studied experimentally and theoretically. The effects of incident wave, reflected wave and stress wave duration on crack growth behaviour were discussed. Further more a method for restricting crack growth by using an energy absorber was tested and recommended.

Key words dynamic crack growth, stress wave, explosive treatment



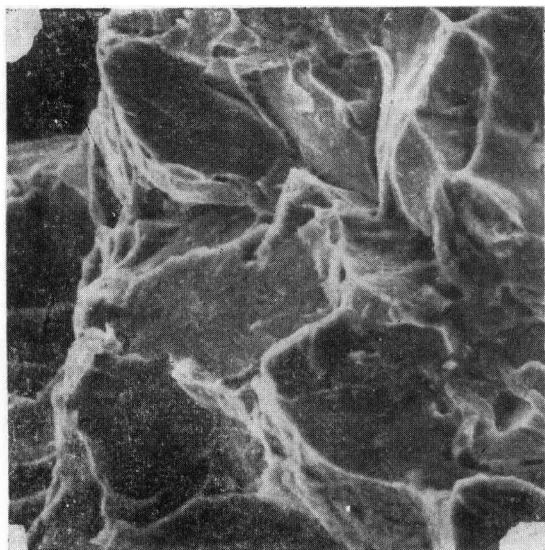
照片1 爆炸处理时裂纹的扩展(20×)

- (A) 不加吸能块,炸药层厚 5mm
- (B) 不加吸能块,炸药层厚 3mm
- (C) 加吸能块,炸药层厚 3mm



照片2 原始裂纹 ($a_0 = 3-5\text{mm}$)
在反射拉伸波作用下扩展 (100 \times)

- A——原始裂纹
- B——裂纹在反射 P 波作用下的扩展分支
- C——裂纹在反射 SV 波作用下扩展分支



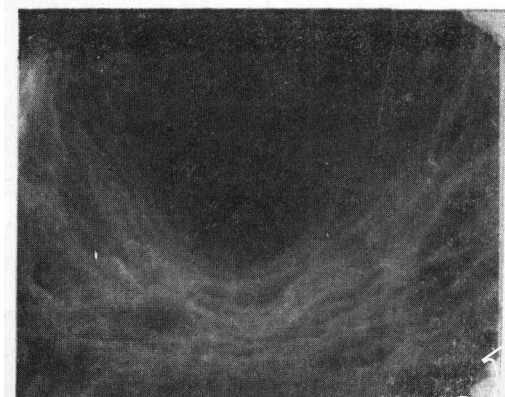
(A)



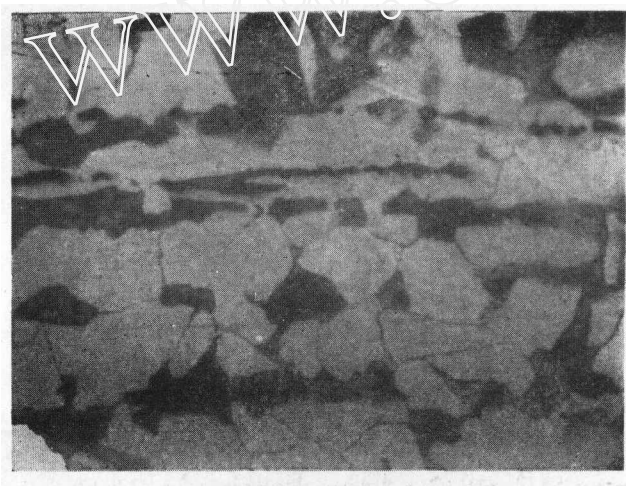
(B)

照片3 解理断口

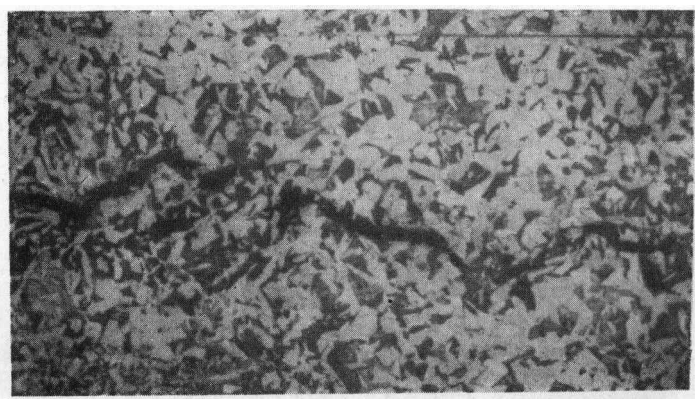
- (A) 爆炸处理时裂纹快速扩展
- (B) 液 N_2 下拉断



照片4 疲劳条纹(6000 \times)在纯化的微裂纹端部附近，条纹间距减小



照片5 微裂纹常在铁素体中夹杂物处形成(625 \times)



照片6 裂纹常在珠光体处中止和转折(250 \times)