

亚微秒应力波载荷作用下裂纹扩展机理研究¹⁾

马 维 段祝平

(中国科学院力学研究所, LNM, 北京 100080)

摘要 提出模型 II 裂纹的亚微秒单脉冲平板冲击实验技术。加载率达到 $dK/dt \sim 10^8 \text{MPa m}^{1/2} \text{s}^{-1}$ 。在 60°钢冲击实验中观察到: 这种极端冲击载荷在裂纹尖端区域造成材料严重损伤, 引起裂纹变向和分叉等现象; 裂纹传播中发生由模型 I 裂纹向模型 II 裂纹破坏方式的转变; 裂纹传播规律符合裂纹扩展损伤模型。

关键词 单脉冲应力波, 压-剪复合应力波, 压-剪炮

引 言

已有材料动态断裂实验^[1-8]没有考虑试样边界效应和应力波载荷在试样中和裂尖发生的多次反射和衍射效应的影响。可是这些效应对裂纹扩展机理将产生明显的影响。通过实验方法研究这些效应需要应用大尺寸试样的亚微秒单脉冲冲击实验技术。本文介绍模型 II 裂纹的亚微秒单脉冲平板冲击实验技术, 加载率达到 $dK/dt \sim 10^8 \text{MPa m}^{1/2} \text{s}^{-1}$ 。并以 60°钢为模拟材料, 在这种极端加载条件下对这些问题进行探讨。

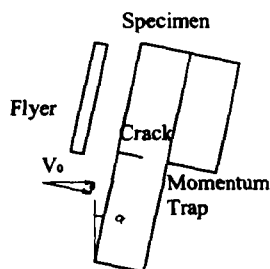


图 1 亚微秒冲击实验加载方案

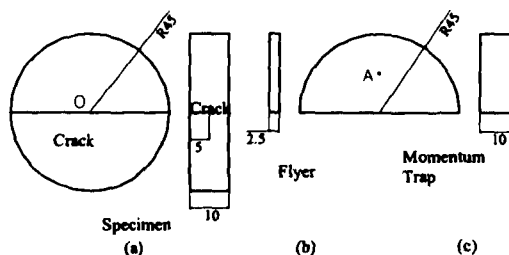


图 2 试样(a), 飞片(b)和动量吸收板(c)示意图

1 实验原理和过程

根据弹性波理论并结合文献[1-8]的实验方案, 可以设计单脉冲亚微秒应力波加载条件下模型 II 裂纹的平板冲击实验(图 1)。其基本原理和设计方案参见文献[9]。

实验材料选于直径为 70mm 的 60°钢棒料, 其化学成份、性能参数和热处理状态列于表 1 中; 试样、飞片和动量吸收板的制作工艺相同。形状和尺寸如图 2 所示; 实验装置是压-剪炮。炮管长 6m, 口径 60mm。实验前设备进行过调试^[9]。冲击实验时真空度维持在 2~7 μmHg 。平均撞击平面度为 0.04mrad; 实验气体为氮气, 气压分别为 1.5, 1.0 和 0.3MPa; 冲击实验发生在室温环境下的真空腔体内。真空室内设计安装有软回收装置, 目的是完整回收试样进行材

1) 国家自然科学基金(18981180-4)和中科院“九五”基础研究重大项目(KJ951-1-20)资助

料破坏机理的事后微观分析。冲击速度由探针测试，范围是 150~210m/s，误差小于 3%；锰铜压力片直接测试压应力的成功率为 90%；通过断裂面扫描电镜微观观察研究 60# 钢破坏的机理、材料破坏方式和损伤破坏机理。

表 1 60#钢化学成分、材料性能及热处理条件参数

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.61	0.27	0.65	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.25

热处理条件：淬火温度 880℃,快速油淬,回火温度 200℃,时效 3h
 洛氏硬度：52~54HRC
 泊松比： $\nu=0.3$
 静态屈服极限：605 MPa
 摩擦系数： $f_m=0.24$
 密度： $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$
 强度极限：925 MPa
 弹性模量=1.26GPa
 纵波波速： $c_p=6020\text{m/s}$
 横波波速： $c_s=3200\text{m/s}$
 瑞雷波波速： $c_R=2980\text{m/s}$

2 实验结果

表 2 列出相关实验资料。有冲击速度 V_0 ，冲击倾角 α ，气压值 P ，根据冲击速度计算的正压力 σ_0 和锰铜压力片测得的压应力 σ_{exp} ，两者间的相对误差 e_r ，剪应力 τ_0 和裂纹扩展平均长度 Δl 。裂纹扩展平均长度 Δl 约为 100 μm 。冲击速度大致可分为三个级别：低速 160m/s，中速 170~190m/s 和高速 200~210 m/s。

图 3 是 2#试样缺口中部区域断面的扫描电镜照片。有三个不同区域：a—预制缺口区，b—动态裂纹扩展区，c—准静态断裂区。动态裂纹扩展区比较均匀，表明缺口尖端中部变形状态近似为平面应变；动态裂纹扩展区（图 4(a)）表现为塑性破坏机制。准静态断裂区表现为解理断裂（图 4(b)）；图 5 表明不同冲击角度时，缺口周边裂纹起裂位置。不论正冲击还是斜冲击实验，主裂纹起裂位置与缺口中线约成 60°；由该图还看到：材料破坏过程中发生由模型 I 裂纹破坏方式向模型 II 裂纹破坏方式的转变；应力波在缺口尖端的衍射现象还产生了若干次裂纹。图 6 表明缺口尖端区域存在大量类似“彗星”的斑点，由图 6(b)可见为微孔洞。说明单脉冲压缩应力波一次作用引起裂尖附近区域材料的严重损伤。

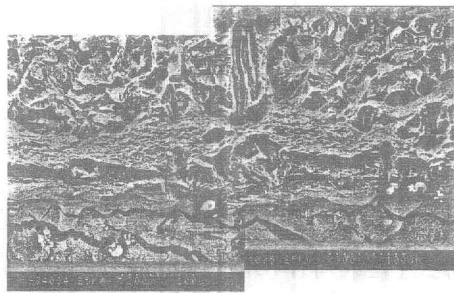


图 3 2#试样的断口微观照片, $\alpha=0^\circ$, $V_0=173\text{m/s}$

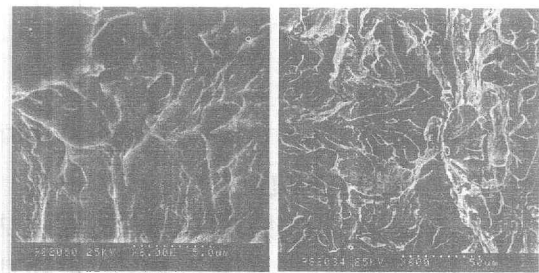


图 4 (a) 动态裂纹断口微观照片; (b) 静态裂纹断口微观照片

表2 相关实验参数

Shot No.	V_0 m/s	α °	P MPa	σ_0^* GPa	τ_0 GPa	σ_{exp}^* GPa	e_r %	Δl mm
01	181	0	1.5	3.67	0.00	3.81 (2.47)	3.9	0.10
02	173	0	1.5	3.46	0.00	3.71 (3.04)	7.1	0.11
03	183	0	1.5	3.71	0.00	3.69 (3.19)	0.4	0.09
04	192	15	1.5	3.76	0.90	3.48 (3.16)	7.4	0.10
05	187	0	1.5	3.79	0.00	3.94 (3.24)	4.1	0.07
06	184	15	1.5	3.60	0.86	3.65 (—)	1.5	0.10
07	204	15	1.0	3.99	0.96	— (3.58)	—	0.11
08	208	30	1.0	3.65	0.88	— (3.15)	—	0.11
09	156	15	0.3	3.05	0.73	— (2.89)	—	0.09

* 按弹性应力波理论估算结果。† 此列上、下两组数据分别为靶片前、后表面应力片测试结果。

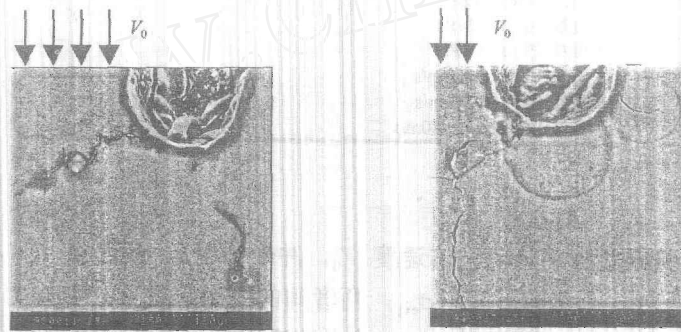


图5 不同冲击角度时裂纹在缺口周边的起裂位置 (a)正冲击, (b)斜冲击

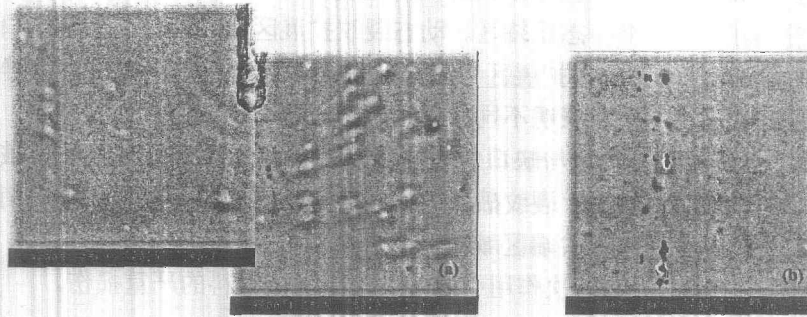


图6 缺口尖端区域材料损失现象 (a) “彗星”斑点, (b) “彗星”斑点的局部放大

3 结论

1) 在非对称模型 II 裂纹冲击载荷作用下, 60#钢动态断裂表现为韧性破坏机理, 准静态断裂表现为解理断裂机理。

2) 材料只发生裂纹破坏。裂纹扩展发生模型 I 裂纹破坏形式向模型 II 裂纹破坏形式的转变。未观察到热塑剪切带破坏现象。亚微秒单脉冲应力波载荷作用时间或应力波脉冲波长是决定材料破坏形式和弹、塑性破坏机理转变的主要因素。应力波在试样中多次反射和在裂纹尖端多次衍射现象是另一影响因素; 而其强度则是次要因素。

3) 单脉冲应力波载荷一次作用将明显造成材料损伤; 在裂尖区域由于存在应力集中和高

应力梯度现象, 材料损伤尤其严重; 裂尖区域材料微裂纹引起裂纹微观变向和分叉现象。裂纹扩展机制满足裂纹扩展损伤模型。

参 考 文 献

- 1 Kalthoff JF. Shadow optical analysis of dynamic shear fracture. *Proc Int Conf on Photo-mechanics and Speckle Metrology*, San Diego, Calif. 1987, 16~21 and *Optical Engineering*, 1988, 27, 127~133
- 2 Zhou M, Rosakis AJ and Ravichandran G. Dynamically propagating shear bands in impact-loaded prenotched plates-I. Experimental Investigation of Temperature Signatures and Propagation Speed. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1996, 44 (6): 981~1006
- 3 Ravi-Chandar K and Knauss WG. An experimental investigation into dynamic fracture: I. Crack Initiation and Arrest. *International Journal of Fracture*, 1984, 25, 247~262
- 4 Ravi-Chandar K and Knauss WG. An experimental investigation into dynamic fracture: II. Microstructural Aspects. *International Journal of Fracture*, 1984, 26, 65~80
- 5 Ravi-Chandar K and Knauss WG. An experimental investigation into dynamic fracture: III. Steady-State Crack Propagation and Crack Branching. *International Journal of Fracture*, 1984, 26, 141~154
- 6 Ravi-Chandar K and Knauss WG. An experimental investigation into dynamic fracture: IV. On the Interaction of Stress Wave with Propagating Cracks. *International Journal of Fracture*, 1984, 26, 189~200.
- 7 Ravichandran G and Clifton RJ. Dynamic fracture under plane wave loading. *International Journal of Fracture*, 1989, 40, 157-201
- 8 Prakash V and Clifton RJ. Experiment and analytical investigation of dynamic fracture under conditions of plane strain. *Fracture Mechanics: Twenty-Second Symposium*, 1992, I, ASTM STP 1131, H. A. Ernst, A. Saxena, and D. L. McDowell, Eds. American Society for Testing and Material, Philadelphia, 412~444
- 9 马维. 压-剪复合应力波作用下材料动态断裂韧性的实验研究和理论分析. 博士学位论文. 中国科学院力学所. 北京, 1998 (Ma Wei, Experimental and Theoretical Studies on the Dynamic Fracture Toughness of Materials under Pressure-Shear Combined Stress Waves. [Ph.D. thesis], Institute of Mechanics of CAS. Beijing, 1998)