

文章编号: 1001-1455(2007)03-0193-05

拉伸应变率对 20 钢层裂特性的影响*

王永刚^{1,2}, 贺红亮¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆炸物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 宁波大学工学院力学与材料研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采用轻气炮加载技术和激光速度干涉(VISAR)测速技术相结合, 对不同拉伸应变率条件下 20 钢的层裂特性进行了实验研究。通过改变飞片和样品的几何尺寸来调整拉伸应变率的大小, 研究了拉伸应变率对 20 钢层裂强度的影响。实验的拉伸应变率的变化范围为 $10^4 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$, 最大拉伸应变率接近激光加载所能产生的拉伸应变率, 相比激光加载, 薄飞片技术容易保证一维应变条件。实验结果显示 20 钢的层裂特性明显依赖于拉伸应变率的大小, 10^6 s^{-1} 条件下层裂强度比 10^4 s^{-1} 时提高近 70%。基于对数值计算结果的分析, 讨论了影响层裂强度的主要外载荷因素。

关键词: 固体力学; 拉伸应变率; 层裂; 20 钢

中图分类号: O346.5

国标学科代码: 130 · 1540

文献标志码: A

1 引 言

虽然对材料动态拉伸断裂进行了大量的实验和理论研究, 但由于材料动态拉伸断裂本身的复杂性, 目前对材料动态拉伸断裂的机理认识还是很有限的, 它仍然是冲击动力学的一个研究热点^[1-4]。近来, 许多新的加载和诊断技术被用于研究材料的动态拉伸断裂, 比如激光辐照加载^[5]、质子照相技术^[6]、电子背散射衍射技术(electron backscatter diffraction, EBSD)^[7]等, 同时, 新的理论模型也层出不穷, 比如 J. Eftis 等^[8], J. R. Klepaczko 等^[9], ZHANG Lin 等^[10]、J. D. Clayton^[11]、CHEN Da-nian 等^[12]。

层裂是一种典型动态拉伸破坏形式, 实验较易实现, 理论分析较简单, 一直受到广泛关注。F. R. Tuler 等^[13]认为层裂的外载荷控制因素是拉伸波幅值和持续时间, 提出了累积损伤模型。A. N. Dremmin 等^[14]认为层裂的主要外载荷控制因素是拉伸波波阵面宽度, 因为在拉伸波波阵面内, 塑性应变速率最大。分子动力学模拟的研究结果表明, 动态拉伸条件下微孔洞成核和长大过程与位错运动密切相关, 即与塑性形变过程相关^[15-17]。J. N. Johnson 等^[18]对铜初始层裂行为进行的实验表明脉冲持续时间和拉伸应变率对层裂特性影响很小。综上分析, 外载荷对材料层裂特性的影响需进一步研究。常规轻气炮加载在样品中所能产生的拉伸应变率约是 10^4 s^{-1} , 而激光辐照加载, 拉伸应变率可达 10^6 s^{-1} 以上, 但是激光加载难以完全满足一维应变条件。本文中用轻气炮驱动超薄飞片对 20 钢在不同拉伸应变率下的层裂特性进行实验, 拉伸应变率变化范围欲达到 2 个量级, 考察拉伸应变率对层裂强度的影响。

2 20 钢层裂实验

实验在 $\varnothing 100 \text{ mm}$ 一级轻气炮上进行, 对称碰撞, 飞片击靶的平面性由电探针来监测, 飞片击靶速度由刷子电探针测量, 采用 VISAR 测量靶后自由面速度-时间剖面。对于 $\varnothing 60 \text{ mm}$ 的厚飞片和样品, 实验装置见图 1(a), 对于 $\varnothing 10 \text{ mm}$ 的薄飞片和样品, 为了保证飞片在飞行过程中不变形和平面性, 飞片被粘在有机玻璃基板上, 实验装置见图 1(b)。为了消除加载压力的影响, 实验中尽量保证飞片击靶速度不变, 具体实验条件见表 1, 其中 h_t 为靶板厚度, h_f 为飞片厚度, v_f 为飞片速度, $\dot{\epsilon}$ 为拉伸应变率, σ_s 为层

* 收稿日期: 2005-12-19; 修回日期: 2006-04-04

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 项目(10476027)

作者简介: 王永刚(1976—), 男, 博士。

裂强度, θ 为碰撞角, 上标 a、b 分别代表实验所使用的实验装置 a 和 b。

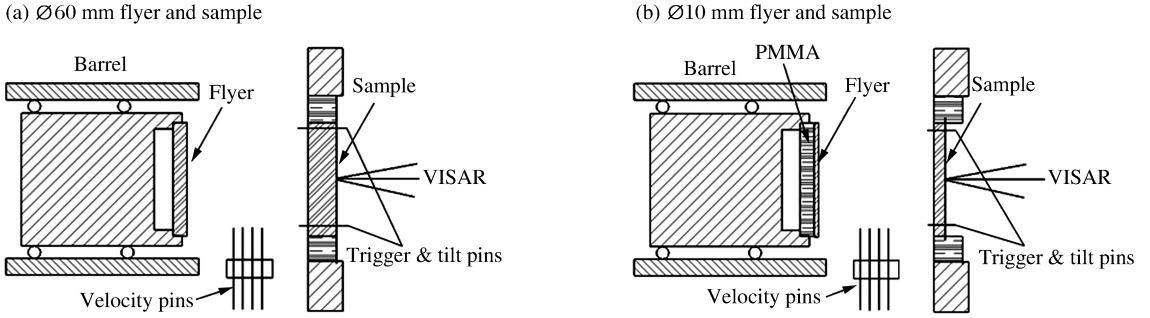


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

表 1 20 钢层裂实验参数及结果

Table 1 Parameters and results of spall experiment for 20 steel

实验编号	h_f / mm	h_s / mm	$v_f / (\text{m/s})$	$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	σ_s / GPa	θ
1 ^a	8.00	4.08	425	0.22×10^5	2.41	1.0×10^{-3}
2 ^a	4.08	2.08	402	0.44×10^5	2.50	9.8×10^{-4}
3 ^b	0.90	0.33	420	3.44×10^5	3.74	1.1×10^{-3}
4 ^b	0.40	0.19	405	12.35×10^5	3.77	1.2×10^{-3}

3 实验结果与讨论

根据平面性监测电探针记录的触发时间, 进行数据处理后得到的碰撞角 θ 列于表 1, 结果显示碰撞角都在千分之一弧度左右, 表明了飞片击靶的平面性较好, 满足一维应变条件, 保证了实验结果的可靠性。实测的靶后自由面速度历史如图 2 所示。为了容易区分, 表 1 中 2 号、3 号和 4 号实验的自由面粒子速度历史曲线被整体抬升, 抬升幅度分别为 150, 350, 500 m/s。图中有上下两个时间轴, 1 号、2 号曲线使用下时间轴, 3 号、4 号曲线使用上时间轴。从自由面速度历史剖面上可以清楚看到不同飞片厚度条件下, 自由面速度卸载速率发生了明显变化。

利用自由面速度剖面, 通过计算可以得到拉伸应变率 $\dot{\epsilon}$ 和层裂强度 σ_s 。平均拉伸应变率

$$\dot{\epsilon} = \dot{u} / (2c_b) \quad (1)$$

式中: \dot{u} 为卸载段速度变化率, c_b 为体波声速。拉伸应变率最高达到 10^6 s^{-1} (见表 1), 接近激光辐照加载所能达到的拉伸应变率^[5]。但与激光辐照加载相比, 气炮驱动薄飞片技术容易保证一维应变条件, 实验数据可靠。关于层裂强度的计算, 人们提出了很多计算公式。S. A. Novikov^[19] 在声学近似条件下提出了估算层裂强度的公式

$$\sigma_s = \rho_0 c_b \Delta u_{fs} / 2 \quad (2)$$

式中: ρ_0 为材料的密度, Δu_{fs} 为自由面速度最大值与信号第一次反弹时自由面速度最小值之差, $\Delta u_{fs} = u_{\max} - u_{\min}$ 。此公式形式简单, 现在还被广泛使用。考虑到弹塑变形的影响, G. V. Stepanov 等^[20] 对方程(2)进行了修正

$$\sigma_s = \rho_0 c_1 \Delta u_{fs} \frac{1}{1 + c_1 / c_b} \quad (3)$$

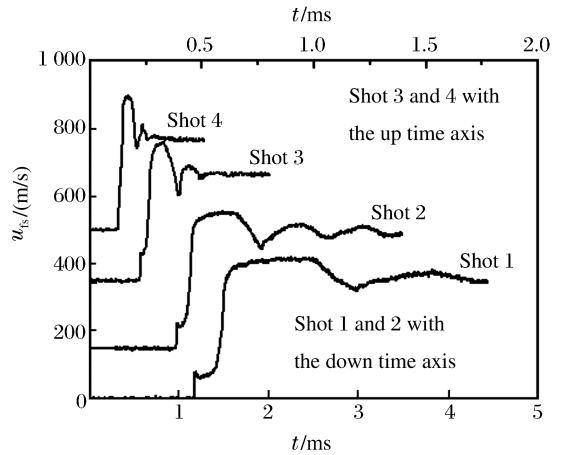


图 2 不同飞片和样品厚度条件下的自由面速度历史曲线

Fig. 2 Free surface velocity profiles under the different thicknesses of the flyers and the samples

式中： c_1 为纵波声速。层裂发生后，应力波从层裂面传播到自由面的过程中波形改变，强度衰减，从而导致计算层裂强度偏小，为此 V. I. Romanchenko 等^[21]考虑了层裂片厚度的影响对公式(3)又进行了修正

$$\sigma_s = \rho_0 c_1 \Delta u_{fs} \frac{1}{1 + c_1/c_b} + \frac{h_{sp}}{2} \frac{d\sigma}{dt} \left(\frac{1}{c_b} - \frac{1}{c_1} \right) \quad (4)$$

式中： h_{sp} 为层裂片厚度， $d\sigma/dt$ 为拉伸应力率。根据公式(4)，计算了 20 钢的层裂强度，见表 1。计算结果显示，拉伸应变率大小对材料层裂强度有明显影响，拉伸应变率有倍数变化时，层裂强度提高不明显，而当拉伸应变率有量级变化时，层裂强度显著增大， 10^6 s^{-1} 条件下层裂强度比 10^4 s^{-1} 时提高近 70% (见图 3)。

4 层裂外载荷控制因素的讨论

冲击波在靶样品和飞片的自由面反射的稀疏波是中心稀疏波，稀疏波相遇后在层裂面上产生的拉伸应力不是瞬时发生的，拉伸波波阵面有一定宽度。样品与飞片厚度之比为 2 : 1，对称碰撞条件下，图 4 给出了平面一维有限差分计算得到考虑层裂和不考虑层裂时样品中心附近(层裂面)的应力剖面，其中层裂判据采用损伤度函数模型^[24]。结果显示，层裂发生时材料承受的最大拉伸应力仍然处于拉伸波波阵面上，没有达到拉伸应力平台区。在拉伸波波阵面上，材料的塑性形变速率很大，损伤的成核、长大以及连通过程都与塑性形变紧密相关，拉伸波波阵面内，损伤迅速发展，累积到一定数量后，材料失稳导

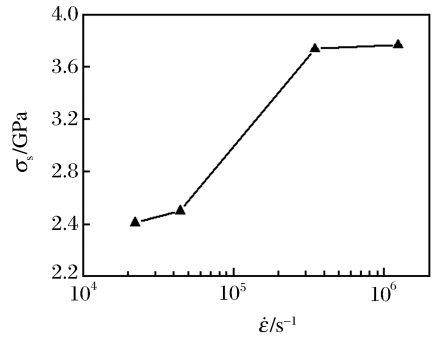


图 3 层裂强度随拉伸应变率的变化
Fig. 3 Spall strength vs tensile strain rate

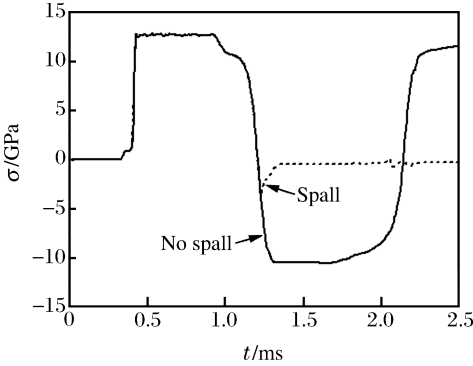


图 4 样品中心附近应力剖面
Fig. 4 Stress profiles in the center of the sample

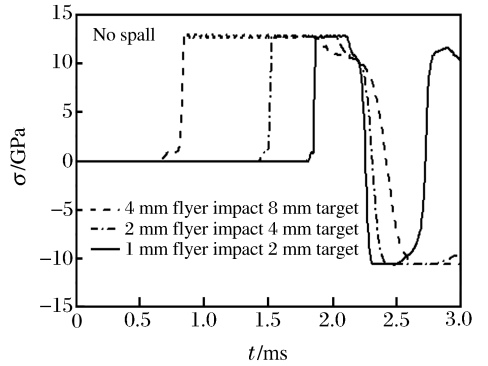


图 5 不同飞片和样品厚度下样品中心处的应力剖面
Fig. 5 Stress profiles in the center of the sample

致断裂发生，伴随应力快速向零应力状态松弛。图 5 为相同加载强度不同飞片厚度条件下，不考虑层裂时样品中心处的应力剖面，结果显示，飞片厚度小时，拉伸波波阵面比陡，则拉伸应变率高；飞片厚度大时，拉伸波波阵面较平缓，则拉伸应变率低。层裂发生条件下，图 6 则显示拉伸应变率高对应材料将在较高拉伸应力值下发生断裂，而拉伸应变率低则材料将在较低拉伸应力值下发生断裂。图 7 为不同加载强度下样品中心位置处应力剖面，图中显示加载强度不同对拉伸应变率的影响很小，加载强度仅决定拉伸应力平台区的幅值，而层裂发生时所需要的拉伸应力没有达到应力平台区，因此加载强度对

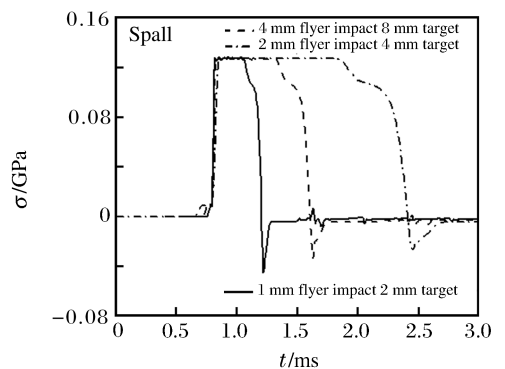


图 6 不同飞片和样品尺寸下层裂面附近的应力剖面
Fig. 6 The stress profiles in the near spall surface

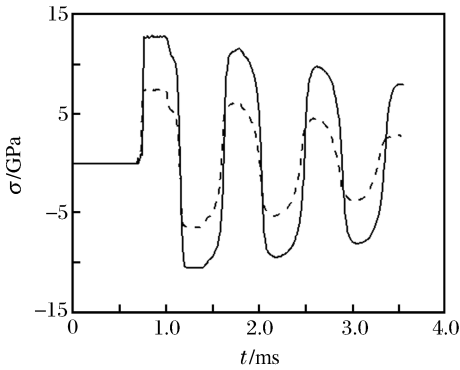


图7 不同加载幅值下样品中心处的应力剖面
Fig. 7 Stress profiles in the center of the sample under the different loading magnitude

材料层裂强度的影响很小,许多材料的层裂实验结果也显示了这一点^[23-24]。综上分析,拉伸波波阵面的宽度,即拉伸应变率对材料的层裂特性起决定作用,这与实验结果一致。

5 结论

采用轻气炮加载和 VISAR 自由面速度测量技术对 20 钢的层裂特性进行了实验研究,通过改变飞片和样品的厚度来调节样品承受的拉伸应变率,实验中产生的拉伸应变率变化范围为 $10^4 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$,实现了 2 个量级的变化。实验结果显示,拉伸应变率的大小明显影响 20 钢的层裂强度,拉伸应变率有倍数变化时,层裂强度的提高不明显,而当拉伸应变

率有量级变化时,层裂强度显著增大。基于对数值计算的分析,讨论了影响材料层裂特性主要外载荷因素,指出拉伸应变率是影响材料层裂强度大小的主要外载条件,而加载应力对层裂强度影响很小。

参考文献:

- [1] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computation models for ductile and brittle fracture[J]. Journal of Applied Physics, 1976,47(11):4 814-4 826.
- [2] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solid[J]. Physics Reports, 1987,147(5/6):253-388.
- [3] Johnson J N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids[J]. Journal of Appl Phys, 1981,52(4):2 812-2 825.
- [4] 王永刚,贺红亮,陈登平,等. 延性金属层裂模型比较[J]. 爆炸与冲击,2005,25(5):467-471.
WANG Yong-gang, HE Hong-liang, CHEN Deng-ping, et al. Comparison of different spall models for simulation spallation in ductile metals[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):467-471.
- [5] 王永刚, Boustie M, 贺红亮,等. 强激光辐照下纯铝的力学响应层裂的实验测量与分析 [J]. 强激光与粒子束, 2005,17(7):966-970.
WANG Yong-gang, Boustie M, HE Hong-liang, et al. Experimental study on mechanical behavior and tensile spallation of pure aluminium under laser shock loading[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(7): 966-970.
- [6] Holtkamp D B, Clark D A, Ferm E N, et al. A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography[C]//Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter-2003, American Institute of Physics, 2003:477-480.
- [7] Zurek A K, Thissell W R, Trujillo C P, et al. Damage evolution in ductile metals[J]. Los Alamos Science, 2003, 28:111-113.
- [8] Kleczko J R, Chevrier P. A meso-model of spalling with thermal coupling for hard metallic materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003,70:2 543-2 558.
- [9] Eftis J, Carrasco C, Osegueda R A. A constitutive-microdamage model to simulate hypervelocity projectile-target impact, material damage and fracture[J]. International Journal of Plasticity, 2003,19:1 321-1 354.
- [10] ZHANG Lin, CAI Ling-cang, LI Ying-lei, et al. Simplified model for prediction of dynamic damage and fracture of ductile materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004,41:7 063-7 074.
- [11] Clayton J D. Modeling dynamic plasticity and spall fracture in density polycrystalline alloys[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005,42:4 613-4 640.
- [12] CHEN Da-nian, YU Yu-ying, YING Zhi-hua, et al. A modified Cochran-Banner spall model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31:1 106-1 118.
- [13] Tuler F R, Butcher B M. A criterion for the time dependence of dynamic fracture[J]. International Journal of

Fracture and Mechanics, 1968,4(4):431-437.

- [14] Dremin A N, Molodets A M. Kinetic characteristics of spall fracture[C]//Schmidt S C, Johnson J N, Davison L W. In Shock Compression of condensed Matter-1989. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990:415-518.
- [15] Lubarda V A, Schneider M S, Kalantar D H, et al. Void growth by dislocation emission[J]. Acta Mater, 2004, 52:1 397-1 408.
- [16] Gungor M R, Maroudas D. Atomistic mechanisms of strain relaxation due to ductile void growth in ultrathin films of face-centered-cubic metals[J]. Journal of Applied Physics, 2005,97:113 527-113 532.
- [17] Marian J, Knap J, Ortiz M. Nanovoid cavitation by dislocation emission in aluminum[J]. Phys Rev Lett, 2005,93 (16):1 655 039-1 655 042.
- [18] Johnson J N, Gray III G T, Bourne N K. Effect of pulse duration and strain rate on incipient spall fracture in copper[J]. Journal of Applied Physics, 1999,86(9):4 892-4 901.
- [19] Novikov S A. Spall strength of materials under shock load[J]. J Appl Mech Tech Phys, 1967,3:109-120.
- [20] Stepanov G V, Romanchenko V I, Astanin V V. Experimental determination of failure stresses under spallation in elastic-plastic waves[J]. Probl Strength, 1977,8:96-99.
- [21] Romanchenko V I, Stepanov G V. The dependence of critical stresses upon the time parameters of load at spalling in copper, aluminum, and steel[J]. J Appl Mech Tech Phys, 1980,21(4):141-147.
- [22] FENG Jia-po, JING Fu-qian, ZHANG Guan-ren. Dynamic ductile fragmentation and the damage function model [J]. Journal of Applied Physics, 1997,81(6):2 578-2 581.
- [23] Stevens A L, Tuler F R. Effect of shock precompression on the dynamic fracture strength of 1020 steel and 6061-T6 aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 1971,42(13):5 665-5 670.
- [24] Antoun T, Seaman L, Curran D R, et al. Spall Fracture[M]. New York: Springer-Verlag, 2003:97.

Effect of tensile strain rate on spall fracture in 20 steel

WANG Yong-gang^{1,2*}, HE Hong-liang¹

- (1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*
 2. *Mechanics and Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China*)

Abstract: Using a gas gun, a set of plate impact experiments were performed for 20 steel by measuring the rear free-surface velocity profiles with a velocity interferometer system for any reflector (VISAR). Experiments were arranged by adjusting the thicknesses of flyer and sample to change the tensile strain rate, in order to investigate the effect of the tensile strain rate on the spall strength. The maximum tensile strain rate approximately reaches 10^6 s^{-1} , and approaches to the value determined by the laser irradiation. Compared with laser irradiation, the thin flyer technique is easy to satisfy the one-dimensional strain condition for spall fracture. The measured results show that an apparent increase of spall strength with tensile strain rate is evidenced, and 70% increase of spall strength is determined in the present tensile strain rate range of $10^4 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$. Based on the numerical simulation results, the influence of the loading conditions on the spall strength was discussed.

Key words: solid mechanics; tensile strain rate; spall; 20 steel

* Corresponding author: WANG Yong-gang

E-mail address: wyg76612@163.com

Telephone: 86-574-87609958