文章编号：1000-5773(2007)01-0035-05

# 冲击加载下 20 钢中弹性前驱波衰减与应力松弛行为实验研究*

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轰物理实验室，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**：通过改变样品厚度，对平面冲击加载下 20 钢的弹性前驱波的波幅衰减和应力松弛进行了实验研究。采用激光速度干涉测速仪(VISAR)实测了样品后自由面速度历史，采样频率达到 1 ns，保证了实验结果的准确性。实验结果显示：Hugoniot 弹性极限随着传播距离呈指数衰减，在所研究的样品厚度范围内，Hugoniot 弹性极限减小了 44%；应力松弛行为和弹性前驱波的上升沿时间也依赖于传播距离；冲击加载的强度对材料动态屈服行为的影响很小。

**关键词**：固体力学；弹性前驱波；应力松弛；20 钢
**中图分类号**：O347.3；O346.5 **文献标识码**：A

## 1 引 言

在强动载荷作用下，金属材料将发生变形，并表现出明显的弹塑性特征。如果冲击载荷强度超过金属材料的屈服强度，在金属材料中传播的压缩波是不稳定的，随着传播距离的增加，压缩波将分离成弹性波和随后的塑性波。描述金属材料这种动态响应行为最简单的本构方程是流体弹塑性本构方程，即把变形分解为形状变形和体积变形，相应地将应力分解为偏应力和压力，偏应力由材料的屈服行为决定，压力由高压固体状态方程决定。在一维应变条件下，一般认为金属材料的屈服强度是一个常数，即 Hugoniot弹性极限，材料进入屈服后，偏应力即为常数。事实上，动态加载下金属材料的屈服行为是很复杂的，屈服强度具有应变强化效应、应变率效应以及温度效应等等，由此也发展了很多高压高应变率本构，例如 Steinberg-Cochran-Guinan(SCG)本构模型[1]和 Zerilli-Armstrong(ZA)本构模型[2]等。然而，实验结果还发现，弹性前驱波的波幅随传播距离而衰减[3-5]，弹性前驱波的波幅决定材料的 Hugoniot弹性极限，而且在弹性前驱波之后，还会有一段应力松弛，这在现有本构模型中基本都没有考虑。Jones 等[6]采用石英压电传感器测量了几种钢的动态屈服强度，发现动态屈服强度随着样品厚度的增加而衰减。Rességuier 等[7]采用激光加载和一种聚合物压电传感器，研究了铁中弹性前驱波的衰减和应力松弛行为。最近，Marom 等[8]在采用锰铜计研究 $Al_2O_3$ 陶瓷中弹性前驱波衰减时指出，传感器的分辨率对实验结果的分析有比较严重的影响，如果分辨率不高，实验结果甚至可能是一种实验假象。Herrmann 等[9]也指出弹性前驱波的上升沿时间非常短，压电传感器或锰铜计很难准确地记录到这瞬态过程。因此，为了很好地了解弹性前驱波随着传播距离的衰减行为，发展时间分辨很高的诊断和测量手段是很重要的。

本工作采用激光速度干涉测速仪(VISAR)[10]和轻气炮加载手段，对一维应变冲击压缩下 20 钢中

* **收稿日期**：2006-02-15；**修回日期**：2006-04-13
**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，博士研究生，主要从事材料在强动载荷下的力学响应研究. E-mail：wangyonggang@nbu.edu.cn
**通讯作者**：贺红亮(1963—)，男，研究员，博士生导师，主要从事高压材料科学与力学研究. E-mail：honglianghe@263.net

弹性前驱波的衰减和应力松弛行为进行了实验研究。实测了不同厚度(0.4～8 mm)样品的自由面速度历史,时间分辨率达到了 1 ns。结果显示,随着样品厚度的增加,弹性前驱波的波幅发生了明显的衰减,并伴随有应力松弛现象。通过改变飞片击靶速度,探讨冲击加载强度对材料动态屈服行为的影响。

## 2 实验研究

### 2.1 实验材料

实验材料为 20 钢。它的化学成分为:(0.17%～0.22%)C,(0.35～0.65%)Mn,(0.17%～0.37%) Si,0.035%S, 0.035P, 其余为 Fe 。密度 7.85 g/cm$^3$,纵波声速 5 917 m/s。

### 2.2 实验设计

实验在 100 mm 口径一级轻气炮上进行,对称碰撞,飞片击靶的平面性由 8 根均布的光杆探针来监测,飞片击靶速度由刷子探针测量,靶后自由面速度-时间剖面的测量由 VISAR 完成。样品厚度范围为 0.4～8 mm。对于厚飞片和样品,实验装置示意图见图 1(a);对于薄飞片和样品,为了保证飞片在飞行过程中不变形并保持平面性,飞片被粘在有机玻璃基板上,实验装置示意图见图 1(b)。实验中,通过改变样品厚度,研究弹性前驱波随着传播距离的衰减特性;保持样品厚度不变,通过改变飞片击靶速度,研究加载强度对材料动态屈服行为的影响。具体实验参数见表 1。

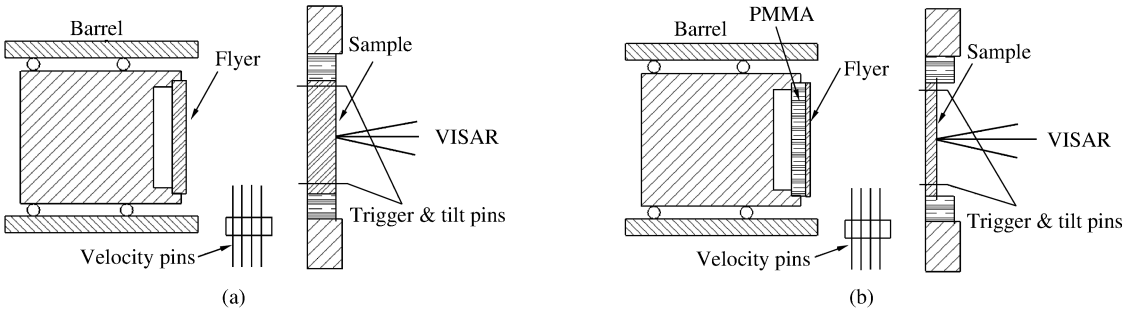



图 1 实验装置示意图

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**

| Shot No. | Sample thickness/(mm) | Flyer thickness/(mm) | Flyer velocity/(m/s) | $t_r$/(ns) | $\sigma_{HEL}$/(GPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8.00 | 4.08 | 425 | 14 | 1.63 |
| 2 | 4.08 | 2.08 | 402 | 14 | 1.62 |
| 3 | 0.90 | 0.33 | 420 | 8 | 1.93 |
| 4 | 0.40 | 0.19 | 405 | 5 | 2.88 |
| 5 | 4.08 | 2.08 | 543 | 14 | 1.62 |
| 6 | 4.06 | 2.08 | 267 | 14 | 1.61 |

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 弹性前驱波衰减

图 2 给出了 1 号实验的 VISAR 信号原始波形图,图中显示干涉条纹是比较清晰的。根据干涉条纹变化数与样品表面粒子速度变化量成正比,可得自由面粒子速度,即

$$u(t) = K \cdot F(t) \tag{1}$$

式中:$u(t)$为样品自由面粒子速度,$F(t)$为干涉条纹变化量,$K$ 为干涉条纹常数。利用公式(1)对 6 发实

验的VISAR干涉条纹信号进行数据处理后,即可得到样品自由面粒子速度历史。图 3 给出了在基本相同的加载强度和不同样品厚度条件下实测的自由面速度历史,图中显示弹性前驱波的波幅随着样品厚度的增加而减小。由实测自由面速度历史,可以得到不同样品厚度下 20 钢的 Hugoniot 弹性极限 $\sigma_{\mathrm{HEL}}$,即

$$\sigma_{\mathrm{HEL}}=\rho c_1 u_{\mathrm{fs}}^{\mathrm{HEL}}/2 \tag{2}$$

式中:$\rho$ 为密度,$c_1$为弹性纵波声速,$u_{\mathrm{fs}}^{\mathrm{HEL}}$为弹性段自由面速度幅值。结果显示,Hugoniot 弹性极限随样品厚度增加而衰减,在我们所研究的样品厚度范围内,Hugoniot 弹性极限减小了 44%,如图 4 所示。

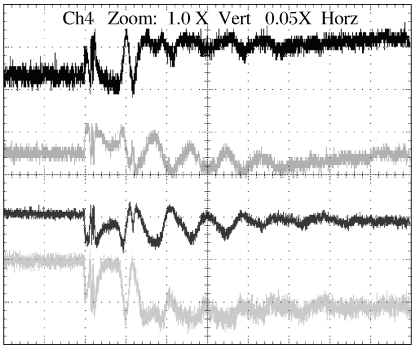



图 2　VISAR 信号的原始波形

Fig. 2　The initial signals of VISAR

Hugoniot 弹性极限是材料在一维平面应变冲击加载下的屈服强度。材料屈服的微观过程牵涉到位错成核、增殖、滑移以及变形孪晶等。根据位错理论,位错速率 $v$ 与剪切应力 $\tau$ 的关系为[11]

$$v=v_\infty \exp(-\tau_0/\tau) \tag{3}$$

式中:$v_\infty$、$\tau_0$ 为材料常数。随着弹性前驱波在样品中传播,在冲击应力作用下,样品中发生位错成核、脱钉以及增值,位错密度 $\rho_{\mathrm{m}}$突然增大,从而引起位错速率的下降,而根据位错速率与剪切应力的关系式(3),将导致剪切应力的突然下降,这就是屈服现象的位错增值理论的基本观点[12],即 Hugoniot 弹性极限随着传播距离而衰减的物理机制。对公式(3)的函数形式进行分析可知,随着位错速率的下降,开始时剪切应力迅速减小,随后进入缓慢变化过程,这与我们的实验结果是一致的。在 0.4～0.9 mm 范围内,Hugoniot 弹性极限从 2.88 GPa 减小到 1.93 GPa,衰减速率很快,而在 4～8 mm 范围内,弹性极限基本没有减小,衰减速率很慢。另外,在冲击加载下,体心立方金属中常常产生大量的变形孪晶。Rességuier 等[7]和 Johnson 等[13]在实验中发现,动态冲击加载下铁样品中出现了大量的变形孪晶,认为 Hugoniot 弹性极限随距离衰减是由于孪晶变形引起的,并建立了相应的理论模型。基于位错运动速度与剪应力之间指数衰减关系,我们采用指数衰减函数,对 Hugoniot 弹性极限与样品厚度之间的关系进行了拟合,具体函数形式为

$$\sigma_{\mathrm{HEL}}=\sigma_0+A\exp(-x/B) \tag{4}$$

式中拟合系数分别为 $\sigma_0=1.62$ GPa,$A=3.86$ GPa,$B=0.36$ mm,拟合曲线见图 4。

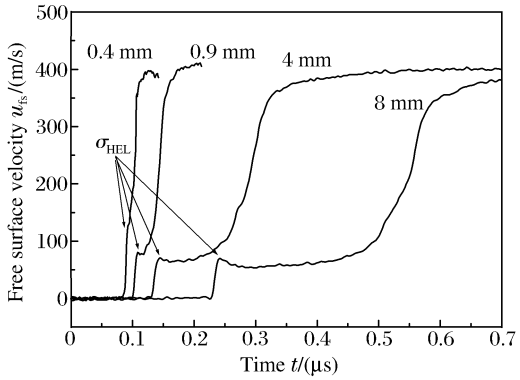



图 3　不同厚度样品的自由面粒子速度历史

Fig. 3　Free surface velocity profiles in different thickness samples

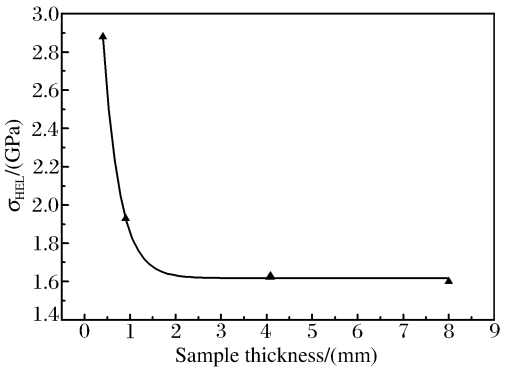



图 4　Hugoniot 弹性极限随着样品厚度的变化

Fig. 4　Hugoniot elastic limit versus sample thickness

## 3.2　应力松弛与弹性前驱波上升沿时间

从图 3 中还发现,对于较厚样品,在弹性前驱波后发生了应力松弛,样品越厚,松弛越严重,计算的松弛应力随着样品厚度的变化关系如图 5 所示,这种行为与单向压缩实验中出现的上下屈服点行为有

点类似,这也与位错运动密切相关[14]。另外,分子动力学模拟也发现了弹性前驱波后有应力松弛过程[13]。但在 0.4 mm 厚样品的自由面速度历史曲线上,没有发现应力松弛行为,我们认为应力松弛过程需要一段弛豫时间,薄样品中弹性前驱波与随后塑性波之间的时间间隔非常短,不能为应力松弛过程提供足够的弛豫时间。

从 VISAR 测量的自由面速度历史上,可以直接得到弹性前驱波的上升沿时间,在本工作实验范围内,上升沿时间为 5～14 ns,明显短于以前的压电传感器和锰铜计的测量结果。图 6 给出了上升沿时间随着样品厚度的变化,发现样品厚度在 0.4 ～4 mm 范围内,上升沿时间变化比较明显,而在 4～8 mm 范围内没有变化。Meryers [16] 研究指出,弹性前驱波的上升沿时间与波速的各向异性、晶界的散射、位错缺陷等因素相关,一般单晶金属的上升沿时间比多晶金属的上升沿时间短。另外值得注意的是,飞片击靶的平面性对弹性前驱波上升沿时间的影响是很严重的,实验中通过 8 根探针对飞片击靶的平面性进行了监测,监测结果显示,碰撞角在千分之一弧度左右,击靶平面性很好,保证了实验结果的可靠性。

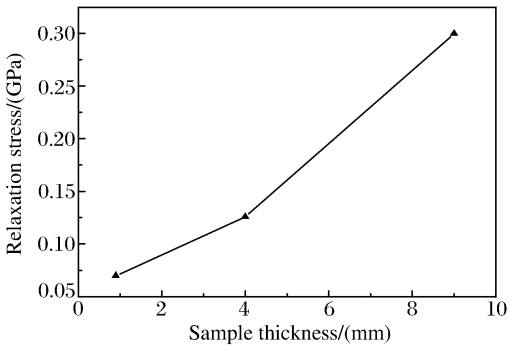



图 5 松弛应力随着样品厚度的变化

Fig. 5 Relaxation stress versus sample thickness

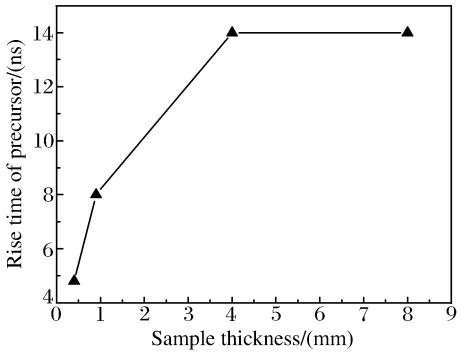



图 6 弹性前驱波上升沿时间随着样品厚度的变化

Fig. 6 Rise time of precursor wave versus sample thickness

### 3.3 冲击强度对材料屈服行为的影响

图 7 给出了在相同样品厚度、不同飞片速度条件下实测的样品自由面速度历史曲线,图中清楚地显示冲击加载的强度对 Hugoniot 弹性极限的大小、上升沿时间以及应力松弛行为都没有影响。这是由于材料的屈服行为完全由剪切应力所决定,也就是与流体弹塑性本构模型中的偏应力有关,冲击加载强度超过屈服强度以后,载荷强度增加仅仅使得压力增加,使得体积变形,对形状变形没有影响。后续塑性波的上升沿时间随着飞片击靶速度增加而减小,这是由塑性冲击波与粒子速度之间的关系所决定的。

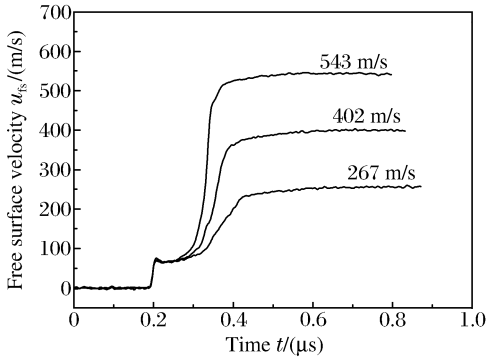



图 7 不同飞片速度下的样品自由面速度历史

Fig. 7 Free surface velocity profiles with different flyer velocities

## 4 结 论

采用轻气炮加载和 VISAR 测量技术,对不同厚度的 20 钢样品的自由面速度历史进行了实时测量。通过改变样品厚度,对弹性前驱波的波幅随着传播距离的衰减进行了研究;通过改变飞片击靶速度,探讨了冲击强度对动态屈服行为的影响。实验结果显示:(1) Hugoniot 弹性极限随着样品厚度的增加而减小,在 0.4～0.9 mm 范围内,衰减速率很快,而在 4～8 mm 范围内,弹性极限基本没有减小,衰减速率非常缓慢;(2) 在较厚的样品中,在弹性前驱波的波峰后发现了应力松弛现象;(3) 弹性前驱波的上升沿时间也随着样品厚度的增大而增加;(4) 冲击载荷的强度对 Hugoniot 弹性极限、应力松弛以及上升沿时间没有影响。

## References:


[1] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High-Strain Rate [J]. J Appl Phys, 1980, 51: 1498-1504.

[2] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamic Calculations [J]. J Appl Phys, 1987, 61: 1816-1826.

[3] Jones O E, Mote J D. Shock-Induced Dynamic Yielding in Copper Single Crystals [J]. J Appl Phys, 1969, 40: 4920-4928.

[4] Asay J R, Fowles G R, Gupta Y M. Determination of Material Relaxation Properties from Measurements on Decaying Elastic Shock Fronts [J]. J Appl Phys, 1972, 43: 744-746.

[5] Gupta Y M, Duvall G E, Fowles G R. Dislocation Mechanisms for Stress Relaxation in Shocked LiF [J]. J Appl Phys, 1975, 46: 532-546.

[6] Jones O E, Neilson F W, Benedick W B. Dynamic Yield Behavior of Explosively Loaded Metals Determined by a Quartz Transducer Technique [J]. J Appl Phys, 1962, 33: 3224-3232.

[7] de Rességuier T, Hallouin M. Stress Relaxation and Precursor Decay in Laser Shock-Loaded Iron [J]. J Appl Phys, 1998, 84: 1932-1938.

[8] Marom H, Sherman D, Rosenberg Z. Decay of Elastic Waves in Alumina [J]. J Appl Phys, 2000, 88: 5666-5670.

[9] Burke J J, Weiss V. Shock Wave and the Mechanical Properties of Solid [M]. New York: Syracuse University Press, 1970: 23.

[10] Barker L M, Hollenback R E. Laser Interferometer for Measuring High Velocities of Any Reflecting Surface [J]. J Appl Phys, 1972, 43: 4669-4675.

[11] Taylor J W. Dislocation Dynamic and Dynamic Yielding [J]. J Appl Phys, 1965, 36: 3146-3150.

[12] Johnston W G. Yield Points and Delay Times in Single Crystals [J]. J Appl Phys, 1962, 33: 2716-2730.

[13] Johnson J N, Rhode R W. Dynamic Deformation Twinning in Shock-Loaded Iron [J]. J Appl Phys, 1971, 42: 4171-4182.

[14] Kadau K, Germann T C, Lomdahl P S, et al. Atomistic Simulation of Shock-Induced Transformations and Their Orientation Dependence in bcc Fe Single Crystals [J]. Phys Rev B, 2005, 72: 064120.

[15] Cottrell A H. Dislocations and Plastic Flow in Crystals [M]. London: Oxford University Press, 1953: 133.

[16] Meryers M A. A Model for Elastic Precursor Waves in the Shock Loading of Polycrystalline Metals [J]. Mater Sci Eng, 1977, 30: 99-111.


# Investigation of Precursor Decay and Stress Relaxation in Shock-Compressed 20 Steel


WANG Yong-Gang[1,2], HE Hong-Liang[1]

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



**Abstract**: The precursor decay and stress relaxation behavior of 20 steel under shock compression were studied using planar impact experiments with different sample thickness. Time resolved free surface velocity profile measurements are performed by means of a velocity interferometer system for any reflector (VISAR) with the time resolution of 1 ns. The results show an apparent decay in the Hugoniot elastic limit with increasing propagation distance, as well as a stress relaxation behind the elastic wave front, and nearly 44% loss of Hugoniot elastic limit was observed in the present sample thickness range. The rise time of elastic wave fronts as a function of the sample thickness has also been determined accurately. Experiments with different impact velocities are carried out, and indicate apparently the independence of the dynamic yield behavior on the loading stress amplitude.



**Key words**: solid mechanics; precursor decay; stress relaxation; 20 steel