

文章编号: 1001-1455(2008)05-0462-05

# 晶粒度对纯铝动态力学性能的影响\*

兰胜威<sup>1,2</sup>, 曾新吾<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国空气动力学研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 622663)

**摘要:** 通过热处理方式制备了 3 种不同晶粒度的纯铝样品。利用分离式霍普金森压杆加载装置测量了 3 种纯铝在应变率  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  范围内的应力应变曲线。实验曲线表明, 纯铝的屈服应力和流动应力随晶粒度的增大而减小; 根据实验数据拟合了纯铝在动态下的 Hall-Petch 公式。同时采用一级轻气炮对 3 种纯铝进行了层裂实验, 结果表明晶粒度对纯铝的层裂特性几乎没有影响。

**关键词:** 固体力学; 动态力学性能; 分离式霍普金森压杆; 纯铝; 晶粒度; 应变率; 层裂

**中图分类号:** O347.3

**国标学科代码:** 130 · 1540

**文献标志码:** A

## 1 引言

多晶体金属的宏观力学性能由其内部组织结构决定。晶界对金属塑性变形起阻碍作用。由于晶界数量取决于金属组织中晶粒的大小, 因此晶粒度成为影响金属力学性能的重要因素。在准静态条件下, 金属的屈服强度与晶粒度的关系可用 Hall-Petch 公式表示为<sup>[1-2]</sup>  $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ , 其中  $\sigma_0$  是晶格内摩擦力,  $K$  为材料常数,  $d$  为晶体的晶粒度。进一步的研究表明, Hall-Petch 公式不仅适用于屈服应力, 也适用于整个流变范围以至断裂<sup>[3]</sup>。然而以上研究都是在准静态条件下进行的。众所周知, 动载荷下材料的变形与破坏机理和静态情况有着本质的、显著的区别。因此, 研究动态条件下晶粒度对金属力学性能的影响有十分重要的理论和实际意义<sup>[4-7]</sup>。本文中研究不同晶粒度纯铝样品的动态压缩特性和层裂特性, 探讨晶粒度对纯铝动态力学性能的影响。

## 2 实验方法

### 2.1 材料制备

选用纯度为 99.992% 的高纯铝锭, 经熔炼、铸造、轧制、退火等工艺流程, 得到了 3 种不同晶粒度的纯铝样品。图 1 所示为 3 种样品的显微组织。经定量金相分析, 3 种纯铝样品平均晶粒度分别约为 15、60、500  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 动态压缩实验

采用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 实验装置<sup>[8]</sup> 如图 2 所示, 分别对 3 种不同晶粒度的纯铝进行冲击加载, 并测量他们在 400、1 000、6 000  $\text{s}^{-1}$  应变率下的应力应变曲线。在应变率为 400 和 1 000  $\text{s}^{-1}$  的实验中样品尺寸为  $\varnothing 30 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ , 在应变率为 6 000  $\text{s}^{-1}$  的实验中样品尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。实验中采用了整形器消除波形振荡。

### 2.3 层裂实验

采用内径为 100 mm 的一级轻气炮测量 3 种纯铝的层裂特性, 实验装置见图 3。把 3 种纯铝样品放置在一圆形靶盘上, 同时被飞片撞击。样品尺寸为  $\varnothing 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 纯铝飞片尺寸为  $\varnothing 95 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ; 设计弹速为 600 和 250 m/s。采用多点光纤 VISAR 测量 3 个样品的自由面速度历史。

\* 收稿日期: 2007-03-03; 修回日期: 2007-12-20

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理国防重点实验室基金项目(51478040205KG0101)

作者简介: 兰胜威(1982—), 男, 硕士研究生。

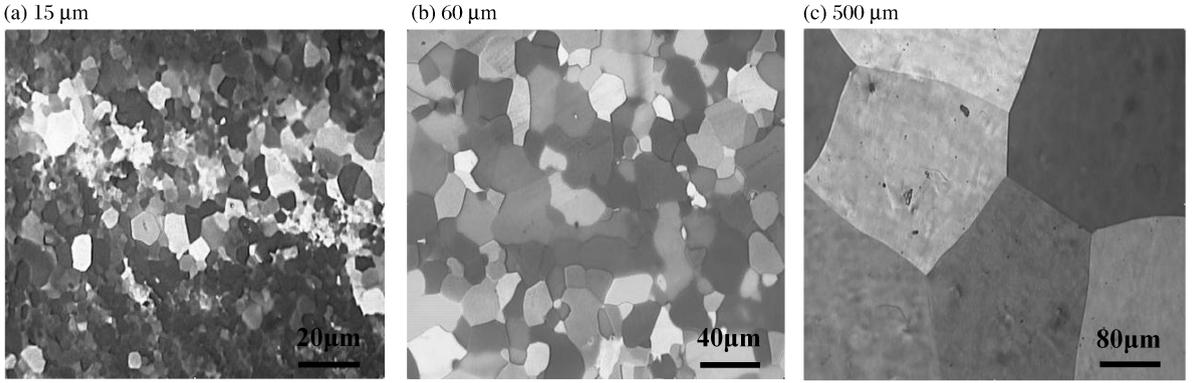


图 1 三种纯铝样品的显微组织

Fig. 1 Optical micrographs of the three pure aluminum specimens with different grain sizes

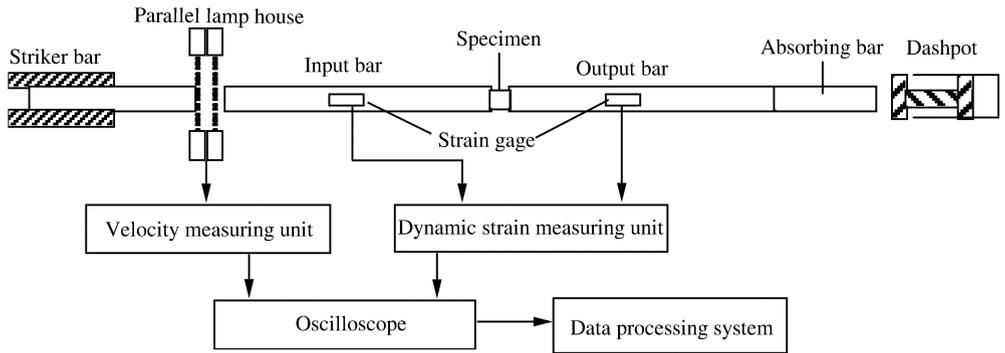


图 2 SHPB 实验装置简图<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Experimental setup of SHPB<sup>[8]</sup>

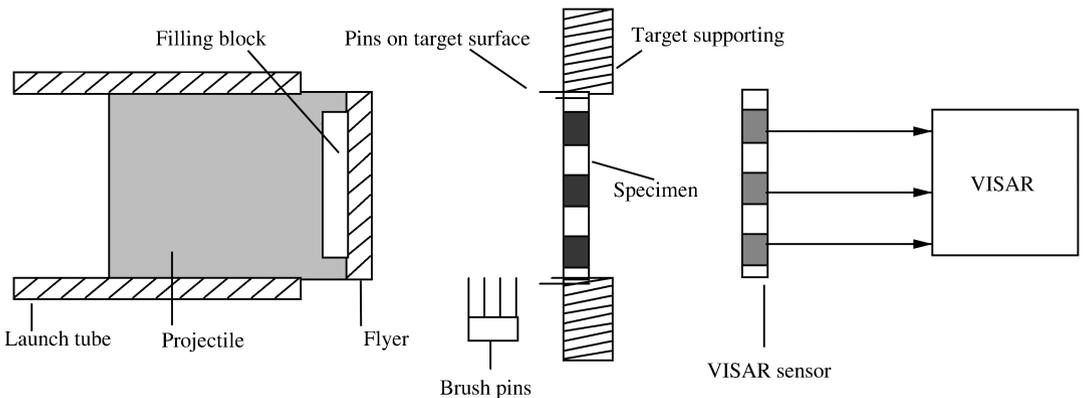


图 3 层裂实验装置简图

Fig. 3 Experimental setup of spall

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 应力应变曲线与 Hall-Petch 关系

从图 4 实验测得的给定应变率下 3 种样品的应力应变曲线可以看出,在给定应变率下,晶粒度越小,样品的屈服应力越高,在相同应变处的流动应力也越高,表现出明显的晶粒细化强化效应。

将 3 种样品在相同应变率和相同应变下的流动应力与晶粒尺寸的  $-1/2$  次方对应标记于  $\sigma-d^{-1/2}$  关系图中,再将同一应变率和同一应变的点连接,如图 5 所示。可以明显看出,在给定的  $\epsilon$  和  $\dot{\epsilon}$  下,  $\sigma$  与  $d^{-1/2}$  近似为直线关系。这意味着在动态压缩条件下,纯铝的流动应力与晶粒度之间也存在类似于静态条件下的 Hall-Petch 关系。为此,对图 5 中的  $\sigma-d^{-1/2}$  曲线进行线性拟合,便得到了动态压缩条件下纯铝的 Hall-Petch 系数,如表 1 所示。从表 1 中可以看出,在不同的应变率和应变处, Hall-Petch 系数是不同的,也即  $\sigma_0$  和  $K$  与  $\epsilon$  和  $\dot{\epsilon}$  具有相关性。因此动态压缩条件下描述晶粒度对纯铝流动应力的影响应该采用如下形式的 Hall-Petch 公式

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = \sigma_0(\epsilon, \dot{\epsilon}) + K(\epsilon, \dot{\epsilon})d^{-1/2}$$

式中:  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$  是流动应力,  $d$  是晶体的晶粒度,  $\sigma_0(\epsilon, \dot{\epsilon})$  和  $K(\epsilon, \dot{\epsilon})$  是与应变率和应变有关的材料常数。表 1 的数据表明,  $\sigma_0(\epsilon, \dot{\epsilon})$  随应变和应变率的增大而增大;但  $K(\epsilon, \dot{\epsilon})$  随应变和应变率的变化则没有明显的规律。

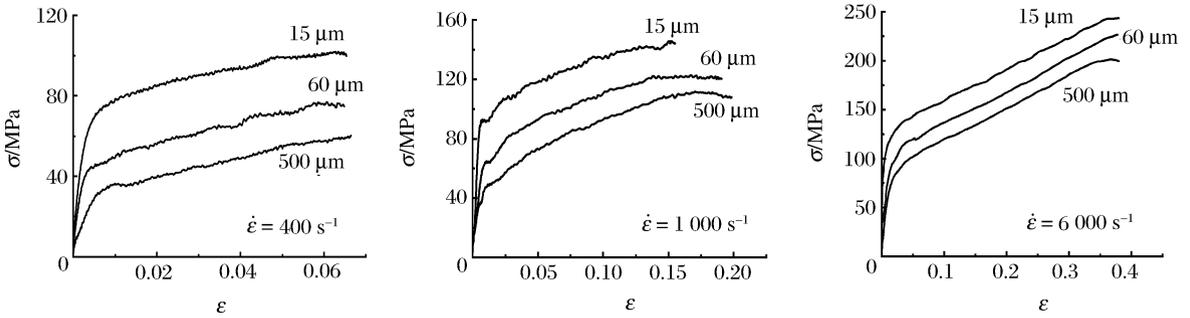


图 4 三种样品在给定应变率下的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of the three pure aluminum specimens with different grain sizes at given strain rates

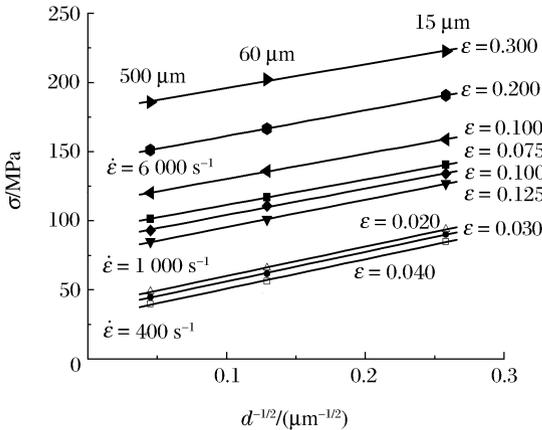


图 5 纯铝的动态 Hall-Petch 关系

Fig. 5 Dynamic Hall-Petch relationship of aluminum

表 1 纯铝的动态 Hall-Petch 系数

Table 1 Dynamic Hall-Petch coefficient of aluminum			
$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$\epsilon$	$\sigma_0/MPa$	$K/(kPa \cdot m^{1/2})$
400	0.020	29.7	212.8
	0.030	34.8	213.8
	0.040	38.9	212.5
1000	0.075	75.7	197.9
	0.100	85.1	191.2
	0.125	93.2	183.6
6000	0.100	112.2	182.0
	0.200	142.8	186.3
	0.300	179.0	171.7

### 3.2 层裂特性

实验测得了 3 种样品受高速飞片撞击后的自由面速度历史曲线,如图 6 所示,  $v_0$  为飞片撞击速度。图中曲线具有典型的层裂特征,说明在设计弹速下,3 种样品都发生了较完全层裂;同时,3 种样品的自由面曲线基本重合,表明他们的层裂特性基本相同。根据自由面曲线的速度下降量  $\Delta u_{fs}$  和振荡周期  $\Delta t$ ,可以计算样品的层裂强度  $\sigma_f$  和层裂片厚度  $\delta^{[9]}$

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \rho_0 c \Delta u_{fs}, \quad \delta = \frac{1}{2} c \Delta t$$

式中： $\rho_0$  为材料的初始密度， $c$  为纵波速度。计算得到的各样品层裂强度和裂片厚度如表 2 所示。

表 2 显示，纯铝的层裂强度约为 0.9 GPa，这与文献[10]报道的数据相符合。同时可以看出，3 种样品的层裂强度和裂片厚度在数值上非常接近，并没有明显的变化规律。考虑到测量和人工数据处理带来的误差，可以认为 3 种样品具有基本相同的层裂特性，也就是晶粒度对纯铝的层裂特性基本没有影响。这与 SHPB 实验的结论有所不同，这是因为晶粒度对纯铝力学性能的影响主要是通过 Hall-Petch 公式中的 2 个系数  $\sigma_0(\epsilon, \dot{\epsilon})$  和  $K(\epsilon, \dot{\epsilon})$  体现出来。根据表 1 中的数据来看， $\sigma_0(\epsilon, \dot{\epsilon})$  和  $K(\epsilon, \dot{\epsilon})$  的数值都不大。在 SHPB 实验中，撞击杆的速度和产生的峰值压力，与  $\sigma_0(\epsilon, \dot{\epsilon})$  和  $K(\epsilon, \dot{\epsilon})$  的数值基本在一个量级，因此晶粒度的影响表现得很明显，应力应变曲线也体现出较大的差别。而在层裂实验中，飞片撞靶速度和靶内压力远大于  $\sigma_0(\epsilon, \dot{\epsilon})$  和  $K(\epsilon, \dot{\epsilon})$  的数值，晶格内阻力很难对层裂的发生造成影响，即使晶粒度不同，其层裂特性也没有显著差别。

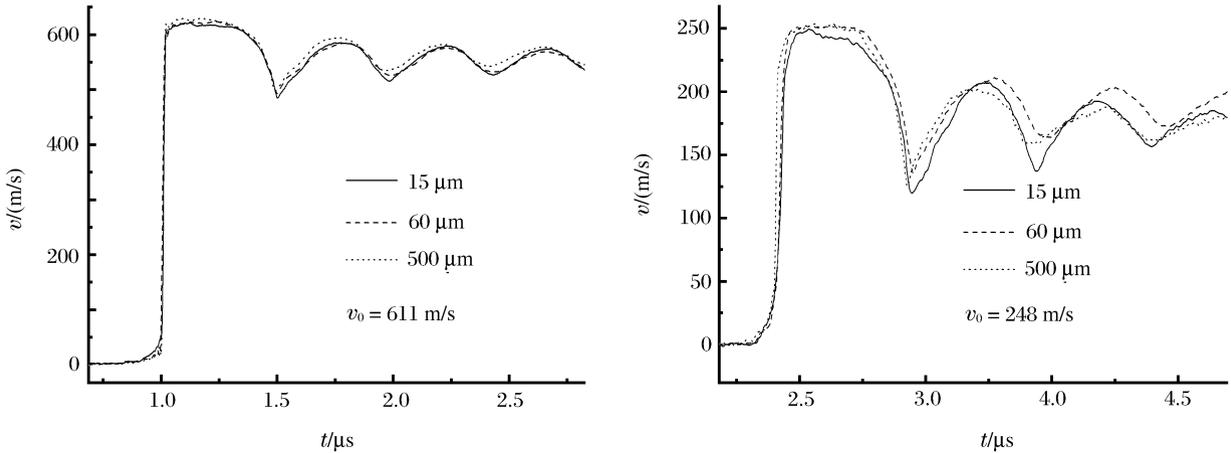


图 6 纯铝的自由面速度曲线

Fig. 6 Free-surface velocity curves of the three pure aluminum specimens with different grain sizes subjected to different impact velocities

表 2 纯铝的层裂强度和裂片厚度

Table 2 Spall strength of pure aluminum and thickness of its spallation fragment

样品的晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$c/(\text{km}/\text{s})$	$v_0/(\text{m}/\text{s})$	$\sigma_f/\text{GPa}$	$\delta/\text{mm}$
15	2.679	5.3	611	0.929	1.331
			248	0.937	1.350
60	2.677	5.3	611	0.915	1.272
			248	0.837	1.378
500	2.641	5.3	611	0.923	1.272
			248	0.909	1.325

#### 4 结束语

(1) 用热处理工艺制备了 3 种不同晶粒度的纯铝样品，晶粒度分别为 15、60 和 500  $\mu\text{m}$ 。

(2) 采用 SHPB 实验装置测量了 3 种纯铝在  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  应变率范围的应力应变曲线。结果表明，在动态压缩条件下，纯铝的流动应力与晶粒尺寸的一/2 次方呈直线关系。通过线性拟合得到了纯铝的动态 Hall-Petch 系数，拟合结果表明此系数与应变率和应变相关。

(3) 利用一级轻气炮对 3 种纯铝进行了层裂实验，根据样品自由面速度历史曲线计算了 3 种纯铝的层裂强度和层裂片厚度，结果表明晶粒度对纯铝的层裂特性没有明显影响。

实验期间,得到胡时胜教授、赵峰研究员、蔡灵仓研究员、张林研究员和田杰老师等的支持和帮助,在此表示感谢!

## 参考文献:

- [1] Hall E O. The deformation and ageing of mild steel (Ⅲ): Discussion of results[J]. Proceedings of Physical Society: B, 1951,64:747-753.
- [2] Petch N J. The cleavage strength of crystals[J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1953,5:25-28.
- [3] 哈宽富. 金属力学性质的微观理论[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [4] Zurek A K, Meyers M A. Microstructural aspects of dynamic failure[C]//Davison L, Grady D E, Shahinpoor M. Dynamic Fracture and Fragmentation. New York: Springer, 1996:25-70.
- [5] Meyers M A, Murr L E. Shock Waves and High-strain Rate Phenomena in Metals: Concepts and Application[M]. New York: Plenum Press, 1981.
- [6] Meyers M A, Andrade U, Chokshi A H. The effect of grain size on the high-strain, high-strain-rate behavior of copper[J]. Metal and Material Transactions: A, 1995,26:2881-2893.
- [7] Chen X, Asay J R, Dwivedi S K. Spall behavior of aluminum with varying microstructures[J]. Journal of Applied Physics, 2006,99(2):3528-3540.
- [8] 胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. 兵器材料科学与工程, 1991,11:40-47.  
HU Shi-sheng. Technique of the Hopkinson pressure bar[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 1991, 11:40-47.
- [9] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [10] Meyers M A, Aimone C T. Dynamic fracture (spalling) of metals[J]. Progress in Material Science, 1983,28:1-96.

## Effect of grain size on dynamic mechanical properties of pure aluminum

LAN Sheng-wei<sup>1,2</sup>, ZENG Xin-wu<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Optoelectronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

2. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 622663, Sichuan, China)

**Abstract:** Three pure aluminum specimens with different grain sizes were obtained by the controlled heat treatment process. The stress-strain curves of the three pure aluminum specimens at  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  were obtained by using the split Hopkinson pressure bar technique. The yield stress and flow stress increase with the decrease of the grain size. A Hall-Petch relationship of pure aluminum under dynamic loadings was fitted out. Spall tests were performed for the three specimens by utilizing a one-stage gas gun. The results show that the grain size can hardly influence the spall properties of pure aluminum.

**Key words:** solid mechanics; dynamic mechanical properties; split Hopkinson pressure bar; pure aluminum; grain size; strain rate; spall

\* Corresponding author: ZENG Xin-wu  
E-mail address: xinwuzeng@hnmcc.com  
Telephone: 86-731-4573775