

# 高锰钢爆炸硬化的微观机制

李明山<sup>†</sup> 赵士达 史国顺

(中国科学院力学研究所)

(北京市理化分析测试中心)

**摘要** 选择压力峰值10—20GPa、脉冲宽度0.04—1.6 $\mu$ s等一系列脉冲载荷,利用轻气炮等模拟爆炸硬化过程,探索高锰钢爆炸硬化的微观机制。根据实验结果判断,激波作用后高锰钢中产生的大量孪晶是引起高锰钢爆炸硬化的主要原因。

**关键词** 高锰钢, 爆炸硬化, 孪晶, 层错, 位错

对于高锰钢的加工硬化机制,特别是爆炸硬化的微观机制的研究,主要有以下几方面:马氏体相变<sup>[1]</sup>、动态应变时效<sup>[2]</sup>、孪晶<sup>[3]</sup>和位错<sup>[4]</sup>等,对这一问题现在还存在着争论。本文利用轻气炮等模拟爆炸硬化过程,探索高锰钢爆炸硬化的微观机制。高锰钢表面产生的爆炸载荷的压力峰值和脉冲宽度是影响硬化效果的主要因素<sup>[4]</sup>,爆炸硬化所用板状炸药在高锰钢表面产生的爆炸载荷的压力峰值约16GPa,脉宽约1.2 $\mu$ s<sup>[5]</sup>。为此,作者选取压力峰值10—20GPa、脉宽0.04—1.6 $\mu$ s等一系列脉冲载荷进行模拟实验,研究不同脉宽和压力峰值对高锰钢的硬化和微观结构的影响。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 材料

所用高锰钢试件是从直径85mm,长350mm的高锰钢铸造圆棒上用线切割方法切取的,其化学成分(wt-%)为: C 1.03, Mn 13.107, Si 0.543, P 0.049, S 0.006, Cu 0.084, Ni 0.049, Cr 0.089,经过水韧处理:以150 $^{\circ}$ C/h的速度加热到1050 $^{\circ}$ C,在此温度下保温2h,然后迅速淬于水中。其密度为7.87g/cm<sup>3</sup>,硬度为HB190—210,晶粒度三级。

### 1.2 轻气炮实验

所用轻气炮口径为101mm,弹速在50—1450m/s范围内连续可调,详见资料<sup>[6]</sup>。

根据所选定的压力范围(10—20GPa),对称碰撞时弹速取500—1000m/s,采用两高锰钢靶片(靶片直径40mm,厚度8mm)之间粘接传感器的方法测量碰撞压力。为防止层裂,再在两靶片后粘接一直径40mm,厚2—4mm的吸能片。在前一高锰钢靶片上进行硬度和微观结构分析。根据所选定的脉宽范围,所用飞板分为三组:(1)厚4mm,直径70mm

<sup>†</sup>现在在中国矿业大学任教。

1990年3月19日收到初稿,1990年5月31日收到修改稿。

本文通讯联系人:李明山,助教,江苏徐州(221008)中国矿业大学建筑系。

的高锰钢飞板, 外加厚3.8mm, 内径76mm, 外径98mm的硬铝环。(2)厚1.65mm, 直径96mm的不锈钢飞板。(3)厚0.1mm, 直径96mm的不锈钢飞板, 因高锰钢易加工硬化, 而不锈钢的激波阻抗与高锰钢接近<sup>[4]</sup>, 故较薄的飞板用不锈钢代替高锰钢。

轻气炮实验时碰撞压力测量采用锰铜传感器进行<sup>[7]</sup>, 阻值约0.05Ω, 选用0.13mm厚的PTFE薄膜作为粘接传感器的绝缘膜, 采用四通道脉冲恒流源给传感器供电。

### 1.3 硬度测量和金相、透射电镜观察

硬度测量是在初始及碰撞后前一靶片碰撞面上直径20mm的中间区域进行。

使用Neophot-21型光学显微镜对碰撞前后的部分高锰钢试件进行观察。用线切割方法从初始及碰撞后前一靶片中间直径20mm的区域内取样, 用6%的硝酸酒精溶液进行化学腐蚀, 再用2%的盐酸水溶液清除腐蚀膜。

采用金属薄膜直接透射技术, 使用Philips-EN400透射电子显微镜对碰撞前后的高锰钢试样进行观察, 也是用线切割方法从初始及碰撞后前一靶片中间直径20mm的区域内取样。试样先经手工磨至0.05mm厚, 再用TEVUPOL-2型双喷电解抛光机最终减薄, 双喷液为: 10%高氯酸+40%无水乙醇+50%丁醇。使用丁醇可抑制Mn的腐蚀。

## 2 实验结果与讨论

激波作用前高锰钢的水韧组织如图1所示, 为均匀单相的奥氏体, 晶粒中含有密度不高的线状位错, 无孪晶、层错或马氏体等, 晶界附近含有少量碳化物。

激波作用后高锰钢的微观结构如图2a, b所示。由图2看出, 晶粒内产生很多孪晶或层错条纹, 晶粒基体中含有大量位错。压力较小且脉冲较窄时, 只有部分晶粒中含有这些条纹, 位错呈线状或环状; 随压力升高和脉冲变宽, 含这种条纹的晶粒增加, 层错逐渐让位于孪晶, 位错呈网状; 当压力较高且脉冲较宽时, 几乎每个晶粒中都含有孪晶和稠密位错, 实际的爆炸硬化与此时的情况接近。实验中没观察到马氏体相变发生。用DT-100型机械称对碰撞前后的高锰钢试件进行磁性分析, 也证实没发生马氏体相变。

通过测量垂直于孪晶或层错条纹方向1μm长度上穿过的孪晶或层错条纹个数, 近似地定量比较各试样所含孪晶和层错的密集度; 通过测量1μm<sup>2</sup>面积内所含位错数, 近似地比较各试样所含位错的密集度。其测量结果及硬度测量结果如图3所示。

由图3a看出: (1) 弹速越高、飞板越厚, 碰撞后高锰钢表面硬度提高越多, 且脉宽的影响相当显著。在一定范围内要提高一定的硬度, 可用高压窄脉冲, 也可用低压宽脉冲; 但脉冲越宽, 单位脉宽引起的表面硬度提高越小。(2) 弹速低于一定值的碰撞不能引起高锰钢表面硬度提高, 此值随脉宽增加而减小。(3) 弹速高于一定值后, 硬度增加趋势变缓。(4) 一定脉宽的碰撞所能提高的硬度低于一定值。

从图3b, c看出, 碰撞速度低于一定值时, 不会使高锰钢中产生层错或孪晶, 也不会使位错密集度增加, 此值也随脉宽增加而减小。碰撞速度大于此值后, 孪晶和层错的密集度及位错密集度随弹速增加而增加; 弹速增加到一定值后, 其增加趋势变缓。

根据以上结果推断, 高锰钢爆炸硬化的微观机制可能是: 激波作用后, 高锰钢中产生孪晶, 孪晶与孪晶、孪晶与层错和晶界等相互作用, 阻止了位错的运动, 使位错密集度增加, 从而产生宏观硬化效果。孪晶是引起爆炸硬化的主要因素。这与文献[8]中静态拉伸实验下的

结果一致。

### 3 结 论

(1) 激波作用后，高锰钢中产生孪晶或层错，晶粒基体中含有大量位错，高锰钢中没发生马氏体相变。

(2) 高锰钢爆炸硬化的微观机制是：激波作用后高锰钢中产生的孪晶与晶界等相互作用，引起位错密集度增加，产生宏观硬化效果。孪晶是引起其爆炸硬化的主要因素。

(3) 进行爆炸硬化时，所用炸药越厚，其硬化效率越低。

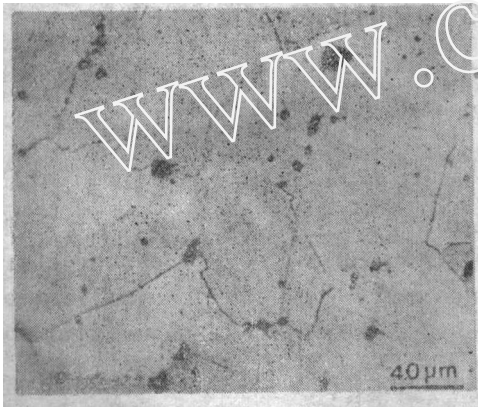


图 1 高Mn钢初始微观组织

Fig. 1 Initial microstructure of high Mn steel

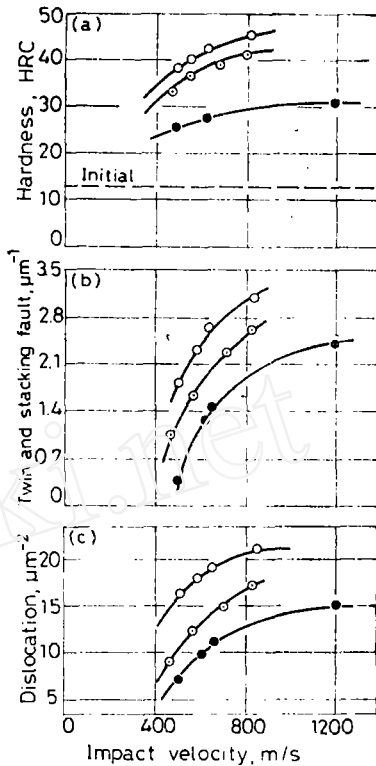


图 3 实验结果

Fig. 3 Experimental results

Thickness of flyer plate:

○—4mm; ◐—1.65mm; ●—0.1mm

- (a) hardness;
- (b) concentrated degree of twins and stacking faults;
- (c) concentrated degree of dislocations

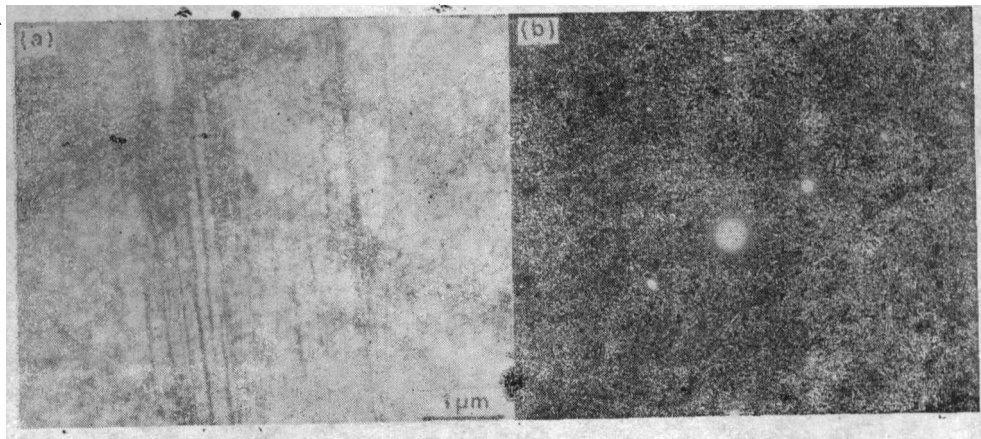


图 2 激波作用后高Mn钢的透射电镜图

Fig. 2. TEM, shocked high Mn steel

- (a) twin and dislocation;
- (b) electron diffraction pattern of (a), twin spots

本文为国家自然科学基金资助项目

本工作得到中国科学院力学研究所沈乐天、陈淑霞、李天佑等的帮助，特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 Hall J H. *Trans AIME*, 1929; 84: 382
- 2 Dastur Y N, Leslie W C. *Metall Trans*, 1981; 12A: 759
- 3 Sant S B, Smith R W. In: McQueen H J, Bailon JP, et al eds, *Strength of Metals and Alloys (IC-SMA 7)*, Vol. I, Proc of the 7th Int Conf on the Strength of Metals and Alloys, Montreal, Canada, 12—16 August, 1985, Oxford: Pergamon, 1986: 219
- 4 Champion A R, Rohde R W. *J Appl Phys*, 1970, 41: 2213
- 5 李明山, 李天佑, 赵士达, 火炸药, 1990; (3): 45
- 6 赵士达, 沈乐天, 赵双录, 兵工学报, 1985; (4): 49
- 7 Peggs G.N. *High Temp High Pressures*, 1980; 12: 1
- 8 石德珂, 刘军海, 金属学报, 1989; 25: B282

## EXPLOSIVE HARDENING OF HIGH Mn STEEL

LI Mingshan, ZHAO Shida (*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing*), SHI Guoshun (*Beijing Centre of Physical Testing and Chemical analysis*)

(Manuscript received 19 March, 1990; revised manuscript 31 May, 1990)

**ABSTRACT** The explosive hardening of high Mn steel was simulated by using light gas gun under selected ranges of impact load from 10 to 20 GPa and pulse duration from 0.04 to 1.6  $\mu$ s. The experimental results show that a lot of twins formed in the shocked high Mn steel may be the principal cause of the explosive hardening.

**KEY WORDS** high Mn steel, explosive hardening, twin, stacking fault, dislocation

*Correspondent: LI Mingshan, Construction Department China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008*