文章编号：1000-5773(2009)02-0117-06

FeMnNi 合金高压加卸载历程测量和相变层裂分析*

李庆忠，陈永涛，汤铁钢

（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
国防科技重点实验室，四川绵阳 621900）

摘要：采用 VISAR 和 X 光联合测试技术，利用等厚对称和逆向碰撞法测量了 FeMnNi 合金高压加卸载历程和相变层裂信息。加载过程中，FeMnNi 合金样品发生 $\alpha \rightarrow \varepsilon$ 相转变，相变波速大于塑性波速，在撞击面上相变波与塑性波合并成单一相变波；卸载过程中，FeMnNi 合金样品可能发生了逆相变，形成了除合并相变波在自由面反射中心稀疏波 R 以外的两道卸载波 S1 和 S2。等厚对称高压加载下，FeMnNi 合金样品发生了二次层裂。分析中心稀疏波 R、卸载波 S1 和 S2 在样品中的传播作用过程，发现样品发生冲击相变和卸载逆转变是导致其等厚对称高压加载下发生二次层裂行为的主要原因。

关键词：FeMnNi 合金；相变；逆相变；层裂；卸载波
中图分类号：O347.4 **文献标识码**：A

1 引 言

铁及铁基合金的冲击相变与层裂行为研究自 20 世纪中后期以来已成为国内外研究关注的重点。1974 年，L. M. Barker 和 R. E. Hollenbach 等[1]对纯铁的相变层裂特性进行了系统研究；1999 年，L. R. Veeser 等[2]在 L. M. Barker 和 R. E. Hollenbach 研究的基础上，对纯铁中相变波的形成和演化进行了量化的分析，重点关注了卸载历程的测量和层裂的具体发生条件和机制，并在相变层裂问题中引入了逆相变卸载稀疏冲击波的概念。2003 和 2005 年，V. Christophe 和 R. Gilles[3-4]在纯铁非等厚对称碰撞实验中发现了二次层裂现象，数值模拟指出层裂行为可能与冲击相变有关。2005 年，唐小军、胡海波、唐志平等[5]首次在纯铁的等厚对称加载实验中发现了“反常”层裂行为，指出相变和逆相变可能是导致该“反常”层裂行为的主要因素。2007 年，张兴华、唐志平等[6]在低相变阈值金属 FeMnNi 合金的冲击加载实验中发现了二次层裂和浅表层裂现象，指出该现象可能与冲击相变和卸载逆相变行为有关。

上述研究指出，铁及铁基合金的冲击相变、层裂行为及两者的关联机制是当前国内外研究关注的焦点。然而，当前国内外的研究主要集中在中低压力区，高压区的研究相对较少。针对该研究现状，本研究拟设计等厚对称加载和逆向加载实验，采用 VISAR 和 X 光联合测试技术，在冲击加载压力远大于相变阈值的高压加载情况下，研究 FeMnNi 合金含冲击相变、卸载逆相变的加卸载历程、层裂行为特征及两者的关联机理。

* **收稿日期**：2008-07-17；**修回日期**：2008-11-17
基金项目：中国工程物理研究院面上基金(20060104)；国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金(10776032)
作者简介：李庆忠(1972－)，男，硕士，副研究员，主要从事爆炸冲击动力学研究. E-mail：zhongli4909@163.com

2 实验方法

实验设计为两种:一种为等厚对称加载实验(见图 1),飞片和样品均为 FeMnNi 合金,采用 VISAR 和 X 光联合测试技术,研究 FeMnNi 合金高压加载下的加载历程和层裂行为特征;另一种为逆向加载实验(见图 2),待测 FeMnNi 合金样品作为飞片,直接撞击 LiF 窗口,LiF 窗口撞击面镀 0.5 μm 厚的铝膜,利用 VISAR 记录飞片/窗口界面速度剖面,研究 FeMnNi 合金高压卸载历程。等厚对称加载与逆向加载实验相结合,获得 FeMnNi 合金含冲击相变和卸载逆相变的冲击加卸载历程及层裂信息,分析冲击相变与层裂行为的关联机制。实验用 FeMnNi 合金的质量分数为:$w_{Fe}=86.74\%$,$w_{Mn}=6.83\%$,$w_{Ni}=6.43\%$;相变阈值为 6～7 GPa,X 射线衍射表明其微观结构全部为 α 相[6]。

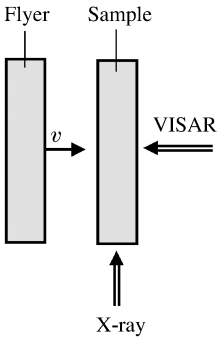


图 1 等厚对称加载实验装置

Fig. 1 Experimental set-up of symmetric and same thickness impact

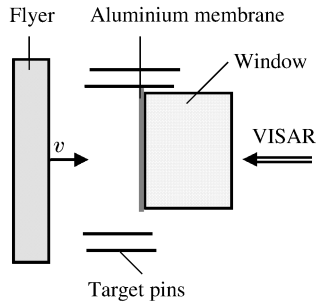


图 2 逆向加载实验装置

Fig. 2 Experimental set-up of reverse impact

图 1 为等厚对称加载实验装置示意图。飞片与样品中应力波沿撞击面对称,稀疏波在撞击面上相遇,无相变行为时样品不会发生层裂行为。采用等厚对称加载方式便于分析冲击相变与层裂行为的关联特性。双灵敏度 VISAR(100 m/s 和 250 m/s)记录样品自由面速度剖面,给出 FeMnNi 合金冲击加载历程和层裂信息,X 光从侧面检测 FeMnNi 合金样品的层裂信息。

图 2 为逆向加载实验装置示意图。待测 FeMnNi 合金样品作为飞片,直接撞击 LiF 窗口。窗口后表面(撞击面)镀 0.5 μm 厚的铝膜,作为 VISAR 入射光的反射面。窗口厚度较大,保证在测试时间内冲击波没有在自由面反射。FeMnNi 合金飞片与窗口碰撞瞬间($t=0$),飞片中传入左行冲击波,窗口中传入右行冲击波,界面粒子速度 v 起跳,如图 3 所示。当飞片中左行冲击波到达其后自由面时,立即反射中心稀疏波 R1,中心稀疏波 R1 到达飞片与窗口界面时($t=t_1$),界面粒子速度下降。如果飞片存在其它的卸载波 R2,如逆相变引发的卸载波,同样会导致飞片与窗口间的界面粒子速度发生变化($t=t_2$)。因此,依据飞片与窗口间界面粒子速度的变化特征可推断 FeMnNi 合金飞片中的波系特征,从而研究其逆相变行为及相应的卸载波。

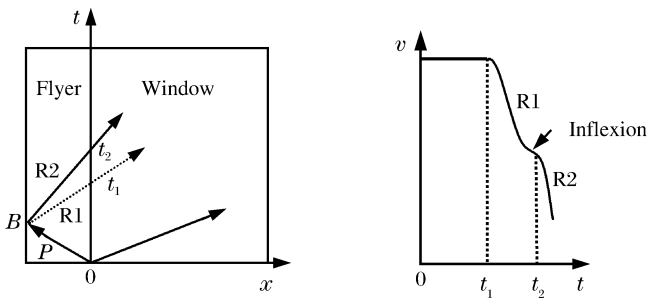


图 3 逆向加载实验应力波系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of waves in a reverse-impact experimental set-up

3　实验结果与分析

在∅32 mm 二级炮上进行了 3 发实验,其中 1#、2# 实验为等厚对称加载实验,3# 实验为逆向加载实验。材料的状态方程参数和冲击实验参数分别列于表 1 和表 2。表 1 中 FeMnNi 合金参数依据 Fe、Mn、Ni 元素所占质量分数,由混合物材料参数预估方法(叠加原理)得到,σ 为 FeMnNi 合金的相变阈值[6]。

表 1　状态方程参数

Table 1　Parameters of equation of state

Materials	ρ_0/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ	γ_0	σ/(GPa)
FeMnNi	7.87	4.61	1.83	1.66	6～7
LiF	2.638	5.148	1.358	1.63	>80[7]

表 2　实验参数

Table 2　Parameters of experimental conditions

No.	Velocity /(km/s)	Pressure /(GPa)	Size of FeMnNi flyer /(mm×mm)	Size of FeMnNi sample /(mm×mm)	Size of LiF window /(mm×mm)
1#	1.96	48.5	∅30×3	∅30×3	
2#	1.97	48.9	∅30×3	∅30×3	
3#	3.19	48.7	∅30×2		∅30×15

图 4 给出了等厚对称加载 1# 实验中 FeMnNi 合金样品自由面速度剖面。2# 实验中 VISAR 记录信号的信噪比较低,未能处理成速度剖面信号。1# 实验的冲击加载压力约为 48.5 GPa,远大于FeMnNi 合金样品相变阈值 6～7 GPa,加载过程中 FeMnNi 合金样品发生 $\alpha\rightarrow\varepsilon$ 冲击相变,生成弹性波、塑性波和相变波,但由于相变波速度大于塑性波速度,在撞击面上相变波与塑性波合并形成了单一相变波,自由面速度剖面呈现弹性波、相变波 2 波结构。塑性波与相变波合并这一现象,可通过图 5 所示的 FeMnNi合金 Hugoniot 线示意图定性解释。斜线 AB 的斜率代表塑性波速,斜线 BC、BD 和 BE 的斜率代表不同加载压力下的相变波速。分析图 5 发现,随着加载压力的增大,相变波速不断增加,当加载压力达到某值时,相变波速将大于塑性波速,与塑性波合并,VISAR 记录到单一相变波。

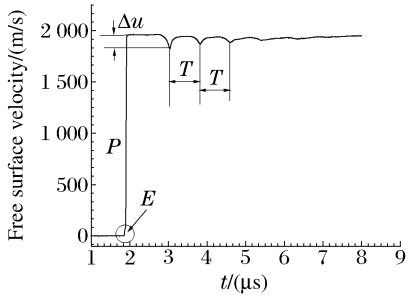


图 4　FeMnNi 合金样品自由面速度剖面

Fig. 4　Free surface velocity profile of FeMnNi alloy

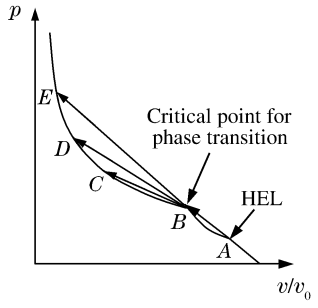


图 5　铁基合金 Hugoniot 线示意图

Fig. 5　Schematic Hugoniot curve of FeMnNi alloy

分析图 4 所示的 FeMnNi 合金样品自由面速度剖面,由公式

$$\delta = c_1 T/2 \tag{1}$$

得 FeMnNi 合金层裂片厚度 δ=2.3 mm,式中:c_1=5.919 km/s 为弹性纵波声速,T=0.779 μs 为自由面速度剖面卸载段振荡周期。

由公式

$$\sigma=\rho_0 c_b \Delta u/2 \tag{2}$$

计算得到 FeMnNi 合金的层裂强度 $\sigma=2.3$ GPa，式中：ρ_0 为 FeMnNi 合金样品的密度，$c_b=4.9$ km/s 为体波声速，$\Delta u=117$ m/s 为速度差。

X 光测试结果如图 6(a)和图 6(b)所示，其中图 6(a)为 1# 实验中飞片与样品撞击 20 μs 后的状态，图 6(b)为 2# 实验中飞片与样品撞击 27 μs 后的状态。为了从 X 光图像上判断层裂片的厚度，2# 实验中设定了标定块，标定块的厚度为 7 mm。

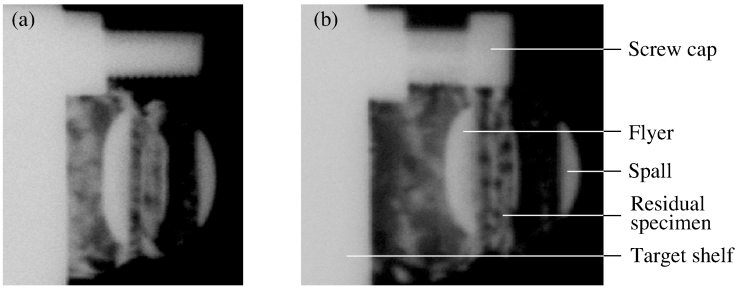


图 6 X 光测试层裂信息

Fig. 6 Spall information of FeMnNi alloy by X-ray

根据 X 光的透射原理，图中黑色区域没有物质，白色区域为物质存在区域。依据碰撞加载后飞片、样品和层裂片所处的相对位置，判定图 6(a)和图 6(b)中最左边的白色物质为靶架，最右边月牙形白色物质为层裂片，靠近靶架的厚度较大的白色物质为飞片，飞片和层裂片间物质为剩余样品。从图 6(a)和图6(b)可以看出，剩余样品为两层，表明样品可能发生了二次层裂。由标定块得层裂片厚度约为 2.2 mm，与自由面速度剖面计算结果 2.3 mm 基本一致。

图 7 给出了逆向加载 3# 实验中 FeMnNi 合金飞片/LiF 窗口界面粒子速度剖面。加载过程中 FeMnNi 合金发生冲击相变(3# 实验加载压力约 48 GPa，与 1# 实验加载压力相当)，飞片中产生左行冲击波，向飞片后自由面传播，在飞片后自由面反射形成中心稀疏波 R，中心稀疏波 R 在飞片中向右传播，FeMnNi 合金飞片内压力降低，发生了某种逆相变行为，并形成两道卸载波 S1 和 S2。依据文献[8]中纯铁高压卸载历程，推断由于加载压力较大，导致 FeMnNi 合金样品内温度升高，卸载过程中FeMnNi 合金可能出现了 γ 相，先后发生了 ε→γ 和 γ→α 逆转变行为。该种分析仅为推测，FeMnNi 合金逆相变的具体物理过程将在后续工作中研究。不过，由图 7 可以肯定：在卸载过程中 FeMnNi 合金样品确实形成了除合并相变波反射稀疏波 R 以外的两道卸载波 S1 和 S2。

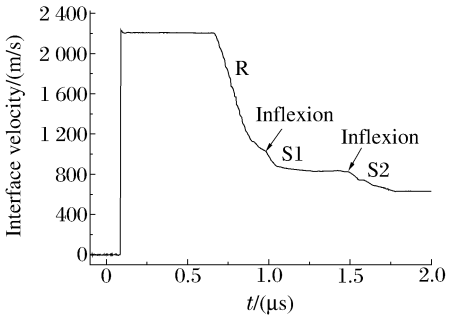


图 7 FeMnNi 合金高压卸载剖面

Fig. 7 The rarefaction profile of FeMnNi alloy under high pressure

根据应力波理论，对于等厚对称加载实验，无冲击相变行为时，稀疏波在碰撞面上相遇，样品不会发生层裂行为。因此，1# 实验和 2# 实验中二次层裂行为势必与冲击相变或逆相变行为有关。本研究采用 1# 实验和 3# 实验中 VISAR 记录的加卸载剖面，分析 1# 实验中 FeMnNi 合金样品二次层裂形成的物理机制。FeMnNi 合金样品内应力波传播作用过程如图 8 所示，应力-粒子速度关系如图 9 所示。由于弹性波幅值相对较小，分析中忽略其影响。FeMnNi 合金样品中右行冲击波在自由面反射中心稀疏波 R，使样品内部压力降低(2 区)，导致样品发生逆相变，形成卸载波 S1 和 S2(样品压力处于 3 区和 4

区),与飞片后表面反射的中心稀疏波 R 在样品中相遇,形成拉伸应力区(5 区、6 区),从而样品发生层裂。

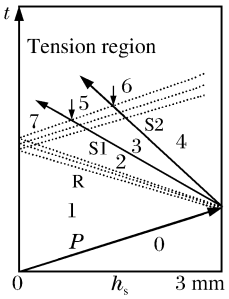


图 8　样品中波系示意图

Fig. 8　Schematic diagram of wave interaction in sample

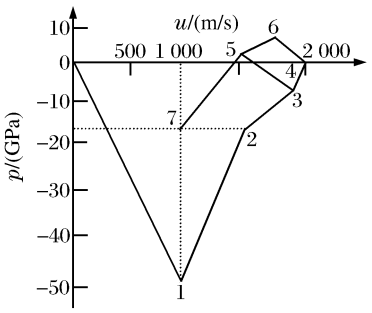


图 9　样品中应力-粒子速度剖面

Fig. 9　Stress versus particle velocity in sample

4　结　论

(1) 在冲击加载压力远大于 FeMnNi 合金相变阈值的等厚对称高压加载下,FeMnNi 合金样品发生了二次层裂。

(2) 加载压力远大于 FeMnNi 合金相变阈值时,加载过程中 FeMnNi 合金发生 $\alpha \rightarrow \varepsilon$ 相转变,在撞击面上相变波与塑性波合并成单一相变波,加载剖面呈现弹性波、相变波双波结构;卸载过程中 FeMnNi合金可能发生了逆相变,形成除合并相变波在自由面反射中心稀疏波 R 以外的两道卸载波 S1 和 S2。

(3) 分析卸载波 S1、S2 与中心稀疏波 R 在 FeMnNi 合金样品中的传播作用过程,指出样品发生冲击相变和卸载逆转变是其等厚对称高压下发生二次层裂的主导机制。

References:

[1] Barker L M, Hollenbach R E. Shock Wave Study of the $\alpha \leftrightarrow \varepsilon$ Phase Transition in Iron [J]. J Appl Phys, 1974, 45(11): 4872-4887.

[2] Veeser L R, Gray G T, Vorthman J E, et al. High Pressure Response of a High Purity Iron [A]//Furnish M D, Chhabidas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter-1999 [C]. Utah: American Institute of Physics, 2000: 73-76.

[3] Christophe V, Francois B, Gilles R. Study of Spalling for High Purity Iron below and above Induced $\alpha \leftrightarrow \beta$ Phase Transition [A]//Furnish M D, Cupta Y M, Forbes J M. Shock Compression of Condensed Matter-2003 [C]. New York: American Institute of Physics, 2004: 511-514.

[4] Christophe V, Gilles R. Iron Damage and Spalling Behavior below and above Induced $\alpha \leftrightarrow \beta$ Phase Transition [A]// Furnish M D, Elert M, Russell T P. Shock Compression of Condensed Matter-2005 [C]. Maryland: American Institute of Physics, 2006: 678-681.

[5] Tang Z P, Tang X J, Zhang X H, et al. Abnormal Spall Behavior Observation in Pure Iron and FeMnNi Alloy Undergoing $\alpha \leftrightarrow \varepsilon$ Phase Transition [A]//Furnish M D, Elert M, Russell T P. Shock Compression of Condensed Matter-2005 [C]. Maryland: American Institute of Physics, 2006: 662-665.

[6] Zhang X H, Tang Z P. Experimental Study on Characteristics of Shock-Induced Phase Transition and Spallation in FeMnNi Alloy [J]. Chinese Journal Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2): 103-108. (in Chinese)
张兴华,唐志平. FeMnNi 合金的冲击相变和层裂特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 7(2): 103-108.

[7] Yu J Q, Xiao Y B, Zhou X M. Study on Sound Velocity and Unloading Path for Single Crystal LiF under Shock Compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(2): 206-212. (in Chinese)
于锦泉，肖亚斌，周显明. 冲击压缩下单晶 LiF 高压声速及卸载路径研究 [J]. 高压物理学报，2005，19(2)：206-212.

[8] Petrovtsev A V, Bychenkov V A. Numerical Simulation of Elastic-Viscous-Plastic Properties, Polymorphous Transformations and Spall Fracture in Iron [A]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta: American Institute of Physics, 2002: 591-594.

Loading and Unloading Process, Phase Transition, and Spallation in FeMnNi Alloy under High Shock-Compression

LI Qing-Zhong, CHEN Yong-Tao, TANG Tie-Gang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Using VISAR interferometer and X-ray, phase transition and spalling behavior of FeMnNi alloy under high pressure were studied by symmetric impact and reverse impact experiments. In the loading process, the FeMnNi alloy experienced a $\alpha \rightarrow \varepsilon$ phase transformation, the velocity of the transition was greater than that of the plastic wave, and thus incorporated into a single phase transition wave. In the unloading history, the reverse phase transition also might take place and the rarefaction waves S1 and S2 formed besides the center-rarefaction wave R. The multi-spallation happened for symmetrical and same thickness high pressure in FeMnNi alloy. By analyzing the interaction among the rarefaction waves S1, S2 and the rarefaction R, it was found that the phase transition and reverse transition of the sample are the main causes of multi-spallation.

Key words: FeMnNi alloy; phase transition; reverse transition; spallation; rarefaction wave

CAEP-IFP-DISAR-01 全光纤激光干涉测速仪

CAEP-IFP-DISAR-01 型全光纤激光干涉测速仪(All Fiber Displacement Interferometer System for Any Reflector, AFDISAR)是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国防科技重点实验室研制的最新一代先进激光干涉测速仪，主要用于冲击波物理和爆轰物理实验研究中位移或速度剖面的连续测量。该仪器采用全光纤结构，具有测速范围宽广、结构简单、体积小巧、抗振动、免调试和可靠性高等特点。仪器操作简单(非专业人员经过简单培训即可独立操作)，测试效果佳，实验准备周期短，运行成本低，在冲击波物理和爆轰物理实验以及航空、航天、工业控制与检测等领域具有广泛用途。

仪器的主要技术性能指标：(1) 激光波长：1 550 nm；(2) 同时测量点数：1 点、2 点、4 点任选；(3) 速度测量范围：1 m/s～9 km/s；(4) 速度测量精度：1%；(5) 系统最快响应时间：50 ps；(6) 测量景深：0～15 mm(更长景深可定制)；(7) 一体化干涉主机架构，免调试，易操作；(8) 仪器外形尺寸：427 mm×350 mm×133 mm(19″标准 3U 机箱)；(9) 仪器供电要求：200～240 VAC，50/60 Hz，功耗小于 50 VA；(10) 仪器重量：约 10 kg。

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国防科技重点实验室

通信地址：四川省绵阳市 919 信箱 150 分箱

邮　　编：621900

电　　话：(0816)2484150，2484102

传　　真：(0816)2484102，2282695

电子邮箱：IFPJZC@126.com