文章编号：1000-5773(2011)02-0153-06

FeMnNi合金冲击相变与卸载逆相变历程研究*

陈永涛[1]，李庆忠[1]，唐小军[1]，刘文韬[2]

(1.中国工程物理研究院流体物理研究所，冲击波物理与爆轰波物理国防科技重点实验室，四川绵阳 621900；
2.北京应用物理与计算数学研究所，北京 100094)

摘要：采用VISAR测试技术，将正向加载和逆向加载实验相结合，研究了不同加载压力下FeMnNi合金的冲击相变和卸载逆相变历程。结果表明：冲击加载压力与冲击相变阈值之差小于逆相变阈值时，即$0<\sigma_p-\sigma_t<\sigma_n$，FeMnNi合金发生$\alpha\rightarrow\varepsilon$相变，加载段呈现弹性波、塑性波和相变波三波结构，塑性波在自由面反射稀疏波使FeMnNi合金完成$\varepsilon\rightarrow\alpha$逆相变，卸载段呈现稀疏波、稀疏冲击波和稀疏波三波结构；$\sigma_p-\sigma_t>\sigma_n$时，加载段呈现弹性波、塑性波、相变波和相界面反射压缩波的四波结构，卸载过程中相变波反射稀疏波使FeMnNi合金完成$\varepsilon\rightarrow\alpha$逆相变，卸载段呈现稀疏波和稀疏冲击波的两波结构。

关键词：固体力学；FeMnNi；相变；逆相变

中图分类号：O347.4　　**文献标识码**：A

1 引　言

自1956年Bancroft等人[1]发现铁的$\alpha\rightarrow\varepsilon$相变，铁基材料的冲击相变特性就成为国内外学者关注的焦点。1972年，Barker和Hollenbach[2]实验研究了纯铁材料的冲击相变特性，初步分析了纯铁材料的冲击相变及可能的逆相变历程，指出逆相变阈值约为9.8 GPa。1999年，Veeser等人[3]在Barker和Hollenbach的研究基础上，利用带窗的加载测试技术，实验研究了纯铁材料含冲击相变和卸载逆相变的加、卸载历程，并引入了卸载稀疏冲击波的概念。2007年，张兴华等人[4]的实验研究发现FeMnNi合金(其中Fe、Mn、Ni、Al的质量分数分别为85.03%、7.63%、7.01%和0.3%)的冲击相变阈值为6～7 GPa，远低于纯铁的相变阈值，指出Mn、Ni合金元素的加入极大地降低了相变阈值。

本研究针对FeMnNi合金，开展逆向加载实验，分析含逆相变的卸载历程，结合正向加载实验结果，系统研究不同加载压力下FeMnNi合金含冲击相变和卸载逆相变的加、卸载历程。

2 实验方法

实验选用密度为7.89 g/cm^{3}的FeMnNi合金，各元素的质量分数为：$w_{Fe}=85.03\%$，$w_{Mn}=7.63\%$，$w_{Ni}=7.01\%$，$w_{Al}=0.3\%$。X射线衍射结果表明，FeMnNi合金材料处于低压α相。根据混合物材料参数预估方法(叠加原理)，得到具有低压α相的FeMnNi状态方程参数[5](见表1)，与张兴华等人[4]测得的FeMnNi合金Hugoniot线吻合。

* **收稿日期**：2009-09-02；**修回日期**：2009-12-15

基金项目：国家自然科学基金(10902102)；中国工程物理研究院科学技术基金(2009B0201014)

作者简介：陈永涛(1980－)，男，硕士，助理研究员，主要从事冲击相变动力学研究. E-mail：zhongli4909@163.com

表 1 FeMnNi 合金和蓝宝石的状态方程参数

Table 1 Parameters of equation of states of FeMnNi and sapphire

Material	ρ_0/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ
FeMnNi	7.89	4.65	1.53
Sapphire	3.95	11.19	1.0

逆向加载实验 1# 中,将待测 FeMnNi 合金样品作为飞片,直接撞击蓝宝石窗口,窗口撞击面镀 0.5 μm厚的铝膜,通过 VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)记录飞片/窗口界面速度,研究 FeMnNi 合金的卸载历程。正向加载实验 2#、3# 的具体过程见文献[4],实验参数列于表 2。

表 2 实验参数

Table 2 Parameters of experimental conditions

No.	Velocity /(m/s)	Size of FeMnNi flyer /(mm×mm)	Size of A3 steel flyer /(mm×mm)	Size of FeMnNi sample /(mm×mm)	Size of sapphire window /(mm×mm)
1#	596	∅95×2			∅50×20
2#	524		∅95×4.8	∅80×9.9	
3#	805		∅95×4.8	∅80×8.0	

图 1 为逆向加载实验的应力波结构示意图。飞片与窗口发生碰撞的瞬间($t=0$),界面粒子速度起跳,飞片中传入左行冲击波,窗口中传入右行冲击波。选择合适的窗口半径和厚度,保证在测试时间内无边侧稀疏波的影响,并且右行冲击波没有到达窗口自由面。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,中心稀疏波到达飞片/窗口界面时($t=t_{R1}$),界面粒子速度下降。如果飞片存在其它卸载波,如逆相变引发的卸载冲击波 RSW,同样会使飞片/窗口界面速度发生变化($t=t_{R2}$)。依据飞片/窗口界面粒子速度,可以推断飞片中的应力波结构以及逆相变历程。应力波波速 c_f 满足

$$c_f = h_f/(\Delta t - h_f/D_f) \tag{1}$$

式中:D_f 为冲击波速度,h_f 为飞片厚度,Δt 对应 t_{R1} 或 t_{R2}。

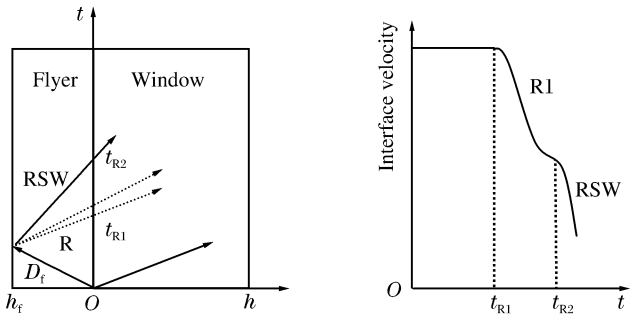


图 1 逆向加载实验应力波系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the stress wave for the reverse impact test

3 实验结果与分析

利用 VISAR 记录了逆向加载实验 1# 中 FeMnNi 飞片/蓝宝石窗口界面速度剖面,如图 2 所示。正向加载实验 2# 和 3# 中 FeMnNi 样品的自由面速度剖面如图 3 所示。由图 2、图 3 可知:逆向加载实验 1# 的冲击加载压力为 $\sigma_p=12$ GPa,正向加载实验 2# 的加载极限压力为 $\sigma_p=9.3$ GPa,加载段呈现弹性波 E、塑性波 P1 和相变波 P2 三波结构;正向加载实验 3# 的加载极限压力为 $\sigma_p=13.7$ GPa,加载段呈现弹性波 E、塑性波 P1、相变波 P2 和相界面反射波 PIR 四波结构。由于弹性波 E 的幅值相对较低,分析时忽略弹性波的影响。

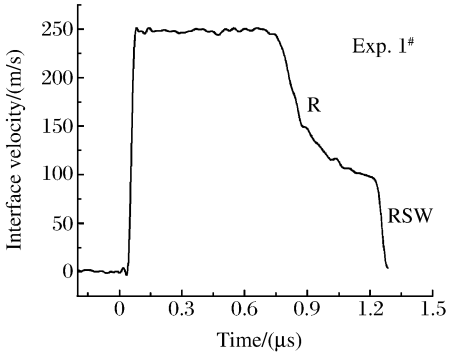


图 2 FeMnNi 飞片/蓝宝石窗口界面速度剖面

Fig. 2 The interface velocity of the FeMnNi flyer/sapphire window

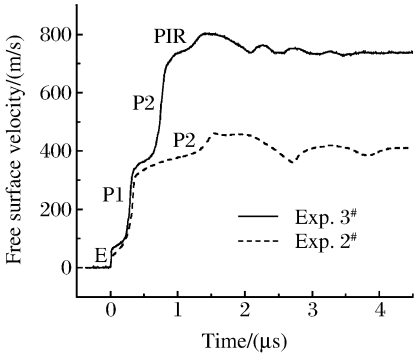


图 3 FeMnNi 合金样品自由面速度剖面

Fig. 3 The free surface velocity of FeMnNi sample

逆向实验 1# 的冲击加载压力 $\sigma_p=12$ GPa，大于 FeMnNi 合金的相变阈值，飞片中的应力波及相组织结构见图 4。在碰撞面上飞片发生 $\alpha\rightarrow\varepsilon$ 相变，形成包括弹性波、塑性波和相变波的多波结构，并向飞片后自由面(左行)传播。由于在碰撞面上应力波尚未分开，VISAR 只记录到一个冲击波起跳信号。将飞片与窗口的碰撞时刻定为零时，在 t_1 时刻塑性波 P1 到达飞片后自由面，反射稀疏波 R1(R1 对飞片进行第 1 次卸载，使 R1 波后状态处于零压 α 相)，R1 与右行相变波 P2 于 t_2 时刻在距撞击面 h_2 处相遇，与相变波 P2 相互作用后稀疏波右行传播到飞片/窗口界面，VISAR 记录到第 1 道卸载波 R。与 R1 相互作用后的剩余应力波 $P2^R$ 在 t_3 时刻到达自由面，反射稀疏波 R2，使界面粒子速度再次降低，此为 VISAR 记录到的第 2 道卸载波。由于该卸载波使飞片/窗口界面速度在极短时间内急速下降(下降沿的时间尺度与正向加载实验 2#、3# 中测得的塑性波上升沿的时间尺度相当[4])，因此可以认为该卸载波为飞片卸载过程中发生 $\varepsilon\rightarrow\alpha$ 逆相变引发的稀疏冲击波 RSW。

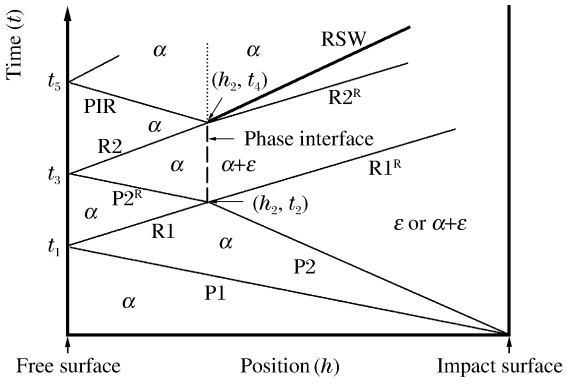


图 4 FeMnNi 飞片中的应力波及相组织示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wave interaction and phase structure in FeMnNi flyer

物态方程采用

$$\Delta\sigma=\rho_0 D\Delta u_p \tag{2}$$

$$D=c_0+\lambda u_p \tag{3}$$

式中：$\Delta\sigma$、Δu_p 分别为冲击波前后的应力和粒子速度增量，D 为冲击波速度，c_0 为体波声速，u_p 为粒子速度，λ 为材料的 Hugoniot 系数。由(2)式、(3)式及表 1 中蓝宝石窗口的 Hugoniot 参数，可得 FeMnNi 合金的逆相变阈值 $\sigma_n=4.2$ GPa，滞后冲击相变阈值为 2～3 GPa。

正向加载实验 2#、3# 中 FeMnNi 样品的应力波及各相区的变化见图 5、图 6，应力-粒子速度关系示意图见图 7、图 8。

对于正向加载实验 2# 和 3#，同样将飞片与样品的撞击时刻设为零时刻，塑性波 P1 到达样品自由面时刻为 t_1，此时样品的自由面速度为 u_{s1}。依据表 1 中 FeMnNi 合金低压 α 相的状态参数以及(2)式和(3)式，可以得到 FeMnNi 合金的冲击相变阈值，见表 3。

塑性波 P1 在样品自由面反射稀疏波 R1(R1 波后状态处于零压 α 相)，R1 与相变波 P2 于 t_2 时刻在距撞击面 h_2 处相遇(相变波 P2 的波后状态可能为 ε 相或 $\alpha+\varepsilon$ 相)，剩余应力波 $P2^R$ 在 t_3 时刻到达自由

面，此时样品自由面速度为 u_{s3}，$P2^R$ 波后粒子速度为 $u_p=(u_{s1}+u_{s3})/2$，$P2^R$ 波使粒子速度增加了 $\Delta u_p=(u_{s3}-u_{s1})/2$。由于 $P2^R$ 波在低压 α 相中传播，依据表 1 中 FeMnNi 合金低压 α 相的状态参数以及(2)式和(3)式，可得 $P2^R$ 波速 D_{P2^R} 和 $P2^R$ 波后应力 σ_r。利用同样的方法，可得 PIR 波后的应力 σ_s，结果列于表 3。

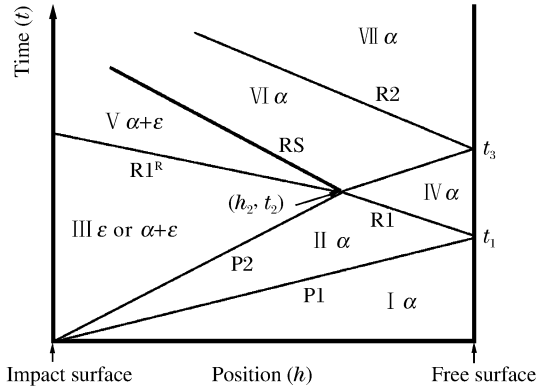


图 5 实验 2# 中 FeMnNi 样品应力波及相状态示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stress wave interaction and phase structure of FeMnNi sample in experiment 2#

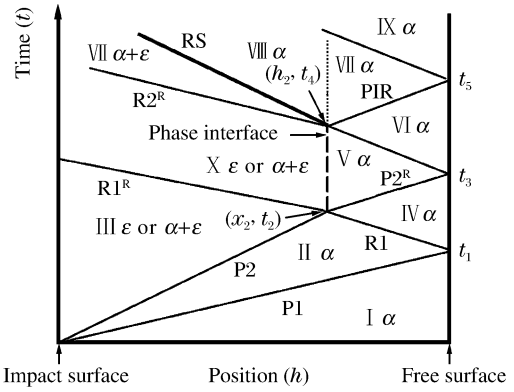


图 6 实验 3# 中 FeMnNi 样品应力波及相状态示意图

Fig. 6 Schematic diagram of stress wave interaction and phase structure of FeMnNi sample in experiment 3#

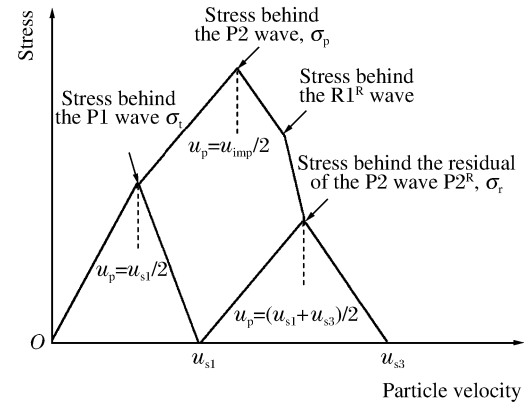


图 7 实验 2# FeMnNi 样品的应力-粒子速度关系图

Fig. 7 Stress-particle velocity plot for FeMnNi sample in experiment 2#

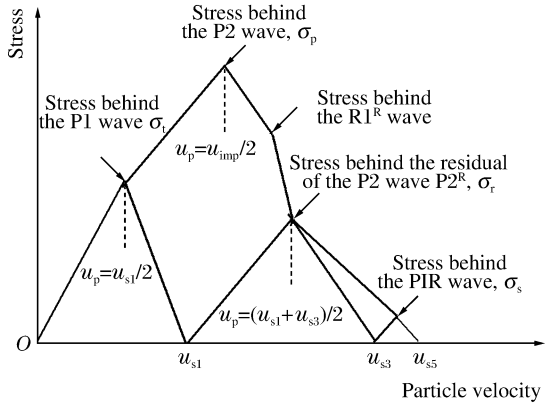


图 8 实验 3# FeMnNi 样品的应力-粒子速度关系图

Fig. 8 Stress-particle velocity plot for FeMnNi sample in experiment 3#

由样品厚度和塑性波速 D_{P1} 可得塑性波在样品中的传播时间 t_1。根据图 3 中的样品自由面速度剖面以及 $P2^R$ 波速 D_{P2^R}，可得 $P2^R$ 波到达自由面的时间 t_3。假定反射稀疏波 R1 的波速 D_{R1} 与塑性波 P1 的波速 D_{P1} 近似相等，可得 h_2 和 t_2，进而计算得到相变波 P2 的波速 D_{P2}。根据(2)式和(3)式，可以计算出冲击加载极限压力 σ_p(见表 3)。

表 3 实验结果

Table 3 Experimental results

No.	σ_p/(GPa)	σ_t/(GPa)	σ_n/(GPa)	σ_r/(GPa)	σ_s/(GPa)
1#	12.0		4.2		
2#	9.3	6.3		2.9	
3#	13.7	6.9		6.5	1.2

进一步分析 $P2^R$ 的波后应力 σ_r 发现:实验 2# 中 $\sigma_r=2.9$ GPa,小于 FeMnNi 合金的逆相变阈值(4.2 GPa),依据应力连续条件,t_2 时刻后 h_2 左侧区域压力小于 FeMnNi 合金的逆相变阈值,表明稀疏波 $R1^R$ 已使相变波 P2 的波后状态卸载为低压 α 相,卸载波系结构为 $R1^R$ 后跟随逆相变稀疏冲击波 RSW、而后再跟随稀疏波 R2 的三波结构(见图 5);实验 3# 中 $\sigma_r=6.5$ GPa,大于 FeMnNi 合金的逆相变阈值(4.2 GPa),依据应力连续条件,t_2 时刻后 h_2 左侧区域压力也大于 FeMnNi 合金的逆相变阈值,即 h_2 左侧区域样品处于高压 ε 相或亚稳态 $\alpha+\varepsilon$ 混合相(徐薇薇等人[6]认为 h_2 左侧区域样品极可能处于亚稳态$\alpha+\varepsilon$ 混合相),在 h_2 处形成相界面,$P2^R$ 波在自由面反射稀疏波后在该相界面再次反射压缩波 PIR,样品自由面呈现了弹性波 E、塑性波 P1、相变波 P2 和相界面反射压缩波 PIR 四波结构。PIR 波后应力 $\sigma_s=1.2$ GPa,远小于 FeMnNi 合金的逆相变阈值(4.2 GPa),依据应力连续条件,t_4 时刻后 h_2 左侧区域压力远小于 FeMnNi 合金的相变阈值,表明此时 h_2 左侧区域已完成了逆相变转变,形成了逆相变稀疏冲击波 RSW,卸载波系结构可能为稀疏波 $R1^R$ 后跟随稀疏波 $R2^R$,而后再跟随逆相变稀疏冲击波 RSW 的三波结构(见图 6)。但是,由于 $R1^R$ 与 $R2^R$ 均为中心稀疏波,而且它们在时间尺度上的差异相对于在样品中的传播时间为小量,实验测量时很难区分 $R1^R$ 和 $R2^R$,因此,实验记录到的卸载历程极可能为稀疏波后跟逆相变稀疏冲击波的二波结构,这与实验 1# 记录到的实验结果吻合。

上述实验结果及分析表明,$P2^R$ 波后应力 σ_r 与逆相变阈值 σ_n 的大小关系决定 FeMnNi 合金的冲击加、卸载历程,而 $P2^R$ 波后应力 σ_r 由冲击加载压力 σ_p 与冲击相变阈值 σ_t 的差值决定,因此,FeMnNi 合金的冲击相变阈值 σ_t、逆相变阈值 σ_n 和冲击加载压力 σ_p 共同决定冲击加、卸载历程。当 $0<\sigma_p-\sigma_t<\sigma_n$ 时,FeMnNi 合金加载段呈现弹性波、塑性波和相变波三波结构,塑性波在自由面反射稀疏波,使 FeMnNi合金完成 $\varepsilon\rightarrow\alpha$ 逆相变,卸载段呈现稀疏波、稀疏冲击波和稀疏波的三波结构;当 $\sigma_p-\sigma_t>\sigma_n$ 时,FeMnNi 合金加载段呈现弹性波、塑性波、相变波和相界面反射压缩波 PIR 的四波结构,相变波反射稀疏波使其完成 $\varepsilon\rightarrow\alpha$ 逆转变,卸载段呈现稀疏波和稀疏冲击波的两波结构。对于 σ_p 极大,导致塑性波与相变波合并的情况,本研究不做讨论。

4　结　论

通过开展逆向加载实验,结合已发表的正向加载实验结果,分析得到如下结论:

(1) 实验获得了 FeMnNi 合金含冲击相变和卸载逆相变的完整加、卸载历程,冲击相变阈值为 6～7 GPa,逆相变阈值约为 4.2 GPa,滞后压力为 2～3 GPa;

(2) 不同加载压力下 FeMnNi 合金的冲击相变和逆相变历程存在较大差异,即 $0<\sigma_p-\sigma_t<\sigma_n$ 时,FeMnNi 合金发生 $\alpha\rightarrow\varepsilon$ 相变,加载段呈现弹性波、塑性波和相变波三波结构,塑性波在自由面反射稀疏波使 FeMnNi 合金完成 $\varepsilon\rightarrow\alpha$ 逆相变,卸载段呈现稀疏波、稀疏冲击波和稀疏波的三波结构,$\sigma_p-\sigma_t>\sigma_n$ 时,加载段呈现弹性波、塑性波、相变波和相界面反射压缩波的四波结构,相变波反射稀疏波使其完成 $\varepsilon\rightarrow\alpha$ 逆转变,卸载段呈现稀疏波和稀疏冲击波的两波结构;

(3) 正向加载和逆向加载实验相结合是研究材料冲击加、卸载历程的有效方法。

References:

[1] Bancroft D, Peterson E L, Minshall S. Polymorphism of Iron at High Pressure [J]. J Appl Phys, 1956, 27(3): 291-298.

[2] 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.

[3] 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 Phys-

ics,2000:73-76.

[4] Zhang X H,Tang Z P. Experimental Study on Characteristics of Shock-Induced Phase Transition and Spallation in FeMnNi Alloy [J]. 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,2007,27(2):103-108.

[5] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,1999. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 第 2 版. 北京:科学出版社,1999.

[6] Xu W W,Tang Z P,Zhang X H. Stress Wave Analysis of Abnormal Spall in Metal Target Relating to Phase Transition [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2009,23(1):17-23. (in Chinese)
徐薇薇,唐志平,张兴华. 相变引起金属靶板异常层裂的应力波分析 [J]. 高压物理学报,2009,23(1):17-23.

Phase Transition and Reverse Transition in FeMnNi Alloy

CHEN Yong-Tao[1],LI Qing-Zhong[1],TANG Xiao-Jun[1],LIU Wen-Tao[2]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: By means of VISAR, the phase transition and reverse phase transition in FeMnNi alloy under different pressures were studied through direct impact and reverse impact experiments. As the difference between shock pressure and phase transition threshold is larger than reverse transition threshold, namely $0<\sigma_p-\sigma_t<\sigma_n$, it may lead to an occurrence of the $\alpha\rightarrow\varepsilon$ phase transition in FeMnNi alloy, and produces a multi-wave structure consisting of an elastic wave, a plastic wave and a phase transition wave. Under the release process, the rarefaction wave reflecting by the plastic wave from the free surface induces the complete reverse phase transition $\varepsilon\rightarrow\alpha$, and forms a multi-wave structure comprising a rarefaction wave, a rarefaction shock wave and another rarefaction wave. As $\sigma_p-\sigma_t>\sigma_n$, it may produce a multi-wave structure with phase interface reflection (PIR) wave. During the release process, the rarefaction wave reflecting by the residual phase wave causes the reverse phase transition $\varepsilon\rightarrow\alpha$, and forms a two-wave structure consisting of a rarefaction wave and a rarefaction shock wave.

Key words: solid mechanics; FeMnNi alloy; phase transition; reverse phase transition