文章编号:1000-5773(2010)03-0213-06

给定压力下纯铁材料的冲击相变与层裂特性研究*

陈永涛[1],李庆忠[1],唐小军[1],卢秋虹[2]

(1.中国工程物理研究院流体物理研究所,冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室,四川绵阳 621900;
2.中国科学院金属研究所材料科学国家实验室,辽宁沈阳 110016)

摘要:采用 VISAR 测量样品自由面速度剖面和回收样品观测分析联合技术,开展等厚对称碰撞实验,结合文献中的实验结果,研究了冲击加载压力大于纯铁材料冲击相变阈值约 2～5 GPa 和大于冲击相变阈值约 10 GPa 两种压力状态下纯铁材料的加卸载历程及各相区的变化,并从应力波相互作用的角度,指出了冲击加载压力略大于纯铁材料相变阈值约 2 GPa 时,等厚对称碰撞样品"反常"二次层裂与冲击相变及逆相变的关联机制。

关键词:纯铁;冲击相变;逆相变;层裂
中图分类号:O347.3 **文献标识码**:A

1 引 言

自 1956 年 Bancroft 等[1]发现铁的 α－ε 相变以来,铁的 α－ε 冲击相变及层裂特性研究一直是国内外研究关注的焦点。1972 年 Barker 等[2]实验研究了纯铁的冲击相变特性,初步分析了纯铁材料冲击相变及可能的逆相变历程,指出纯铁材料的逆相变阈值约 9.8 GPa; 1999 年 Veeser 等[3-4]在 Barker 等研究工作的基础上,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;Voltz 等[5-6]设计非等厚对称加载实验,研究指出纯铁材料的层裂行为可能与冲击相变存在某种关联。不过,到目前为止,国内外对纯铁材料的冲击相变和逆相变特性及其与层裂行为关联机制的认识仍不十分清楚。

考虑到不同加载压力下,纯铁材料的相变状态及应力波结构存在较大差异(如加载压力小于冲击相变阈值,纯铁材料不能发生相转变;冲击加载压力大于冲击相变阈值,但小于某压力值时,样品自由面呈现弹性波、塑性波和相变波三波结构;冲击加载压力远大于相变阈值时,相变波与塑性波合并,自由面呈现弹性波、相变波两波结构),仅通过一项工作解决所有问题存在困难,需开展大量系统的研究才能解决。因此,本研究拟重点关注样品自由面呈现三波结构的中间压力段,通过设计纯铁材料的等厚对称加载实验,结合 Barker 和 Hollenbach 开展的部分实验结果,详细研究该压力范围内纯铁材料的冲击相变和逆相变历程,并探讨冲击相变和层裂行为可能的关联机制。

2 研究方法

考虑到使纯铁样品自由面呈现三波结构的压力范围较大(约 20 GPa),在该压力范围内的不同区域

* **收稿日期**:2009-04-20;**修回日期**:2009-08-19
基金项目:中物院发展基金(2009B0201014,20060104);国家自然科学基金(10776032,10902102)
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

纯铁材料的相变和逆相变历程也可能存在差异，因此，本研究将研究冲击加载压力略大于纯铁冲击相变阈值 2～5 GPa 和冲击加载压力大于相变阈值约 10 GPa 两个压力状态下纯铁材料的冲击相变和层裂特性。实验状态和参数见表 1。实验设计中飞片和样品均为纯铁，其低压 α 相的状态方程参数见表 2，采用 VISAR 记录样品自由面速度剖面和回收分析研究其冲击相变和层裂行为。其中，依据无相变行为时等厚对称碰撞样品无层裂的基本特性，实验 1 设计为等厚对称加载状态，以便分析冲击相变和层裂行为的关联机制。同时，为了准确获得纯铁材料的层裂特征信息，本研究专门开展了与实验 1 加载状态和样品厚度完全一致的纯回收实验 2，具体实验结果见文献[7]。其它为文献[2]中 Barker 和 Hollenbach 开展的实验。

表 1 实验参数

Table 1 The experimental parameters

No.	Impact Velocity u_i/(km/s)	Peak stress σ_p/(GPa)	Impactor thickness h_f/(mm)	Sample thickness h_s/(mm)	Measuring method
1	0.848	−15.0	6.28	6.28	VISAR
2	0.847	−15.0	6.28	6.28	Recovered
3[2]	0.997	−17.3	19.1	15.8	VISAR
4[2]	1.247	−22.6	19.1	15.8	VISAR
5[2]	1.292	−23.7	12.8	19.1	VISAR

表 2 状态方程参数

Table 2 Parameters of equation of state

Material	ρ_0/ (g/cm^3)	C_0/ (km/s)	λ
Fe	7.85	4.63	1.33

3 实验结果与分析

3.1 冲击相变与逆相变历程分析

VISAR 记录的纯铁样品自由面速度剖面见图 1。其中，实验 1 和实验 3 加载极限压力分别为 −15.0 GPa 和 −17.3 GPa，加载段呈现弹性波 E、塑性波 P1 和相变波 P2 三波结构；实验 4 和实验 7 加载极限压力分别为 −22.6 GPa 和 −23.7 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(文中定义压应力为负，拉应力为正，应力幅值大小比较均为绝对值比较)。由于弹性波幅值相对较低，本研究将忽略弹性波的影响。

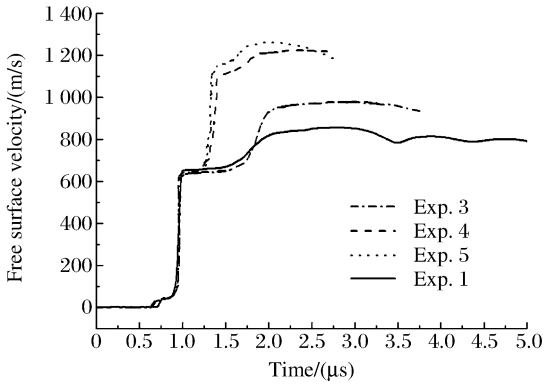


图 1 纯铁样品自由面速度剖面

Fig. 1 Free surface velocity histories of pure iron sample

在实验 1、实验 2 和实验 3 中，纯铁样品中的应力波结构见图 2，应力-粒子速度关系见图 3。以飞片和样品撞击时刻为零时刻，塑性波 P1 到达样品自由面时刻为 t_1，此时样品自由面速度为 u_1，利用自由面速度近似为材料内部粒子速度两倍的结论，塑性波 P1 波后粒子速度为 $u=u_1/2$。由冲击波间断方程(1)、方程(2)和物态方程(3)可得塑性波 P1 速度

D_{P1}、P1 波后应力 σ_t 和 P1 波后压缩比 $\Delta v/v_0$,结果见表 3。

$$\Delta\sigma = -\rho_0 D\Delta u \tag{1}$$

$$\Delta v/v_0 = -\Delta u/D \tag{2}$$

$$D = C_0 + \lambda u \tag{3}$$

式中:$\Delta\sigma$、Δu 和 Δv 分别为冲击波前后应力、粒子速度和比容的变化,D 为冲击波速度。

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,与相变波 P2 于 t_2 时刻在距撞击面 x_2 处相遇(相变波 P2 波后状态可能为 ε 相或 $\alpha+\varepsilon$ 相),剩余加载波 $P2^R$ 在 t_3 时刻到达自由面,此时样品自由面速度为 u_3,$P2^R$ 波后粒子速度为 $u=(u_1+u_3)/2$,$P2^R$ 波后相对波前粒子速度增加值 $\Delta u=(u_3-u_1)/2$(波前粒子速度为 u_1)。由于 $P2^R$ 波在零压 α 相传播,依据表 2 纯铁低压 α 相的状态参数和(1)式、(3)式可得 $P2^R$ 波速 D_{P2R} 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(见表 3)。

表 3　实验结果

Table 3　The experimental results

No.	v/v_0	u_1/(km/s)	D_{P1}/(km/s)	σ_t/(GPa)	D_{P2}/(km/s)	σ_r/(GPa)	σ_s/(GPa)
1	0.900 1	0.649	5.06	−12. 9	2.64	−4.5	—
2	—	—	—	—	—	—	—
3	0.881 9	0.645	5.06	−12.9	3.15	−7.8	—
4	0.863 3	0.637	5.05	−13.0	4.08	−12.3	−1.3
7	0.860 2	0.634	5.06	−12.9	4.21	−12.4	−1.3

上述分析已得到了塑性波速 D_{P1} 和 $P2^R$ 波速 D_{P2R},由样品厚度和塑性波速 D_{P1} 可得塑性波在样品中传播的时间 t_1,则由图 1 样品自由面速度剖面可得 $P2^R$ 波到达自由面的时间 t_3。依据反射稀疏波 R1 波速与塑性波 P1 波速近似相等的假定,可得 x_2 和 t_2,则可得相变波 P2 波速 D_{P2}。因此,由(1)式、(2)式和(3)式可得冲击加载极限压力 σ_p 和样品最终压缩比 $\Delta v/v_0$(见表 1 和表 3)。

进一步分析 $P2^R$ 波后应力 σ_r 发现:实验 1 和实验 2 中 $\sigma_r=-4.5$ GPa,实验 3 中 $\sigma_r=-7.8$ GPa,均小于纯铁材料逆相变阈值(−9.8 GPa),依据应力连续条件,t_2 时刻后 x_2 左侧区域压力亦小于纯铁逆相变阈值,稀疏波 $R1^R$ 已使相变波 P2 波后状态卸载为低压 α 相,卸载波系结构为 $R1^R$ 后跟逆相变波 RS,再后跟稀疏波 R2 的三波结构(见图 2);实验 4 和实验 7 中 $\sigma_r=-12.3$ GPa,大于纯铁材料逆相变阈值(−9.8 GPa),依据应力连续条件,t_2 时刻后 x_2 左侧区域压力亦大于纯铁材料逆相变阈值,即 x_2 左侧区域样品仍处于高压 ε 相或 $\alpha+\varepsilon$ 混合相,在 x_2 处形成相界面,$P2^R$ 波在自由面反射稀疏波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 和相界面反射波 PIR 四波结构,PIR 波后应力 $\sigma_s=-1.3$ GPa,远小于纯铁材料逆相变阈值(−9.8 GPa),依据应力连续条件,t_4 时刻后 x_2 左侧区域压力亦远小于纯铁逆相变阈值,表明 x_2 左侧区域此时已完成了逆相变转变,形成了逆相变稀疏冲击波 RS,卸载波系结构可能为稀疏波 $R1^R$ 后跟稀疏波 $R2^R$,再后跟逆相变稀疏冲击波 RS 的三波结构(见图 4),不过,由于 $R1^R$ 与 $R2^R$ 均为中心稀疏波,而且在时间尺度上的差异 $\Delta t=t_4-t_2=0.6$ μs(计算中假设 $P2^R$ 波速与其自由面反射稀疏波速近似相等)相对于其本身在样品中的传播时间(约 3～4 μs)为小量,在实验测量中很难将 $R1^R$ 与 $R2^R$ 区分,因此,推测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。

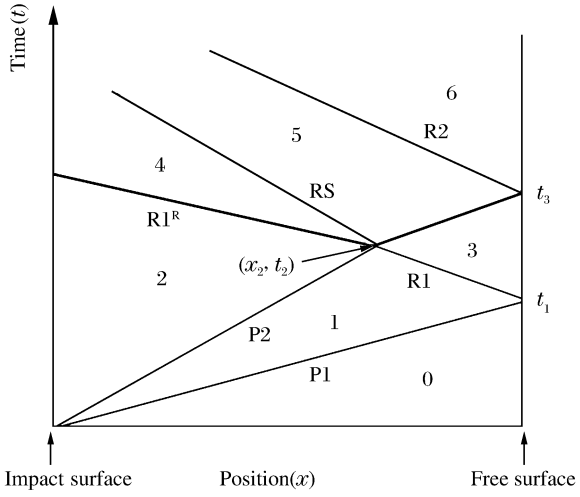


图 2 实验 1、实验 2、实验 3 样品应力波示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress wave in Exp. 1, Exp. 2 and Exp. 3

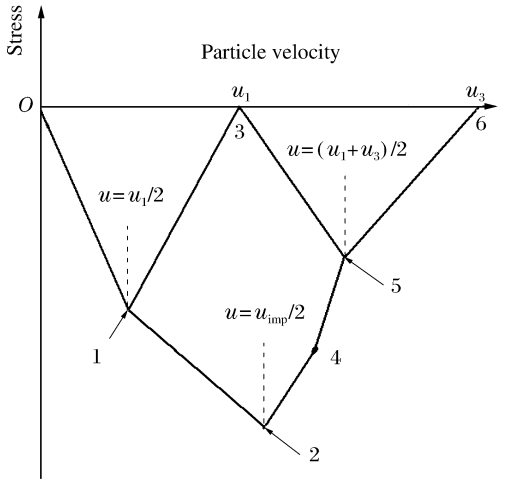


图 3 实验 1、实验 2、实验 3 样品应力-粒子速度关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stress versus particle velocity in Exp. 1, Exp. 2 and Exp. 3

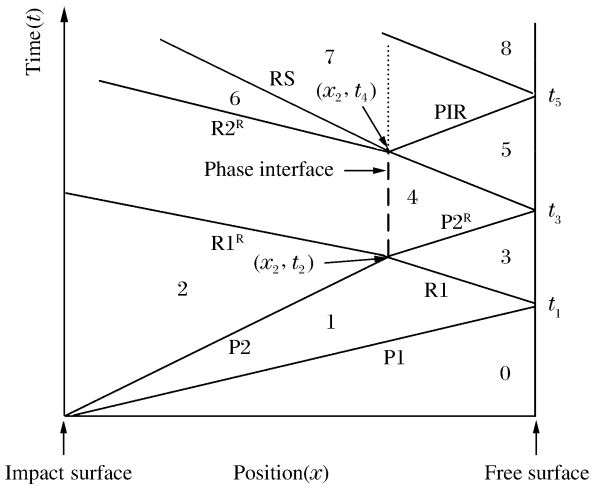


图 4 实验 4、实验 5 样品应力波示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stress wave in Exp. 4 and Exp. 5

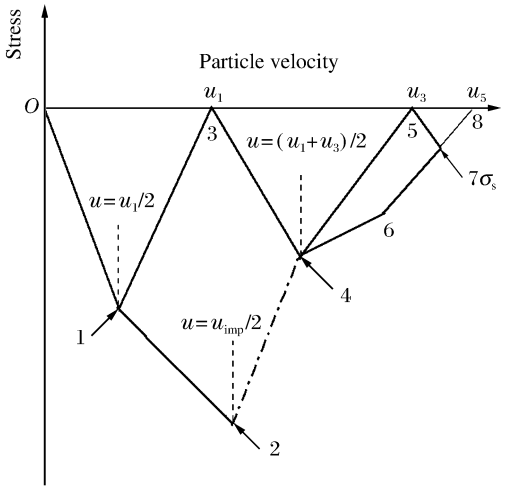


图 5 实验 4、实验 5 样品应力-粒子速度关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stress versus particle velocity in Exp. 4 and Exp. 5

3.2 “反常”层裂特性分析

由实验 1 纯铁样品自由面速度剖面发现样品出现了“反常”的层裂现象，由(4)式计算得样品层裂片厚度 $\delta=2.02$ mm。

$$\delta = C_0 T/2 \tag{4}$$

式中：$C_0=4.63$ km/s 为纯铁样品体波声速，$T=0.87$ μs 为样品自由面速度剖面卸载段振荡周期。

由(5)式得实验 1 中纯铁样品层裂强度 $\sigma_{sp}=1.36$ GPa。

$$\sigma_{sp} = \rho_0 C_0 \Delta u/2 \tag{5}$$

式中：$\Delta u=74.84$ m/s 为样品自由面速度峰值与振荡平台之后起跳点速度值的差值。

实验状态与实验 1 完全一致的纯回收实验 2 回收到的纯铁样品宏观形貌见图 6。纯铁样品发生

“反常”二次层裂,靠近自由面的层裂片厚度约 2 mm,与自由速度剖面波形分析结果(2.02 mm)基本一致,距撞击面约 2 mm 处存在微裂纹,样品在此处发生不完全层裂。

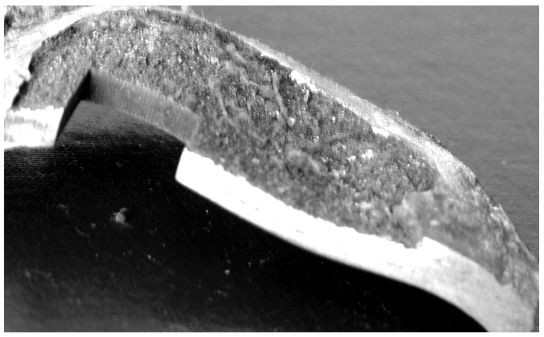


图 6　实验 2 回收纯铁样品

Fig. 6　Recovered pure iron sample in Exp. 2

依据应力波理论,正常加载状态下等厚对称碰撞样品无层裂,该“反常”层裂现象势必与冲击相变存在某种关联。纯铁样品中应力波作用过程及对应的应力-粒子速度半定量关系分别见图 7 和图 8(横坐标左侧为样品撞击面,右侧为自由面)。弹性波幅值相对较小,分析中忽略其影响。飞片后界面反射稀疏波 $R1^{Rf}$ 与逆相变波 RS 在样品中相互作用形成一次层裂(8 区)。$P2^{R}$ 波在样品自由面反射形成稀疏波 R2,与经过第一个层裂面的右行稀疏波 $R1^{RfR}$ 在样品内相遇并相互作用形成二次层裂(9 区)。图 8 中应力-粒子速度关系定性表明,靠近自由面拉伸区的拉伸应力大于靠近撞击面拉伸区的拉伸应力,与回收样品观测到的靠近自由面形成完全层裂、靠近撞击面处形成微裂纹的结果吻合,说明样品中应力波系的分析正确可靠。

徐薇薇等也从应力波相互作用的角度解释了该“反常”二次层裂现象,与本文分析基本一致[8],即相变、逆相变及稀疏冲击波的形成是导致该“反常”层裂的主要原因,但在具体分析过程上略有差异。基于本研究和徐薇薇的分析均为半定量结论,拟计划在后续研究中开展以待测样品作为飞片直接撞击透明窗口的逆向加载实验,准确获得材料卸载波的结构及其对应波速,得到量化结论,加深冲击相变和层裂行为关联机制的认识。

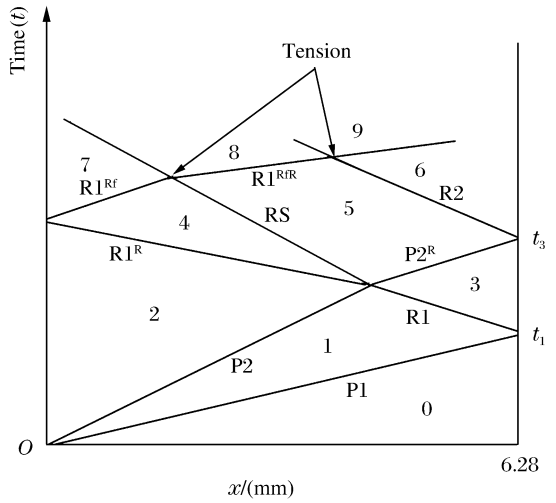


图 7　实验 1 样品层裂机理示意图

Fig. 7　Schematic diagram of spalling in Exp. 1

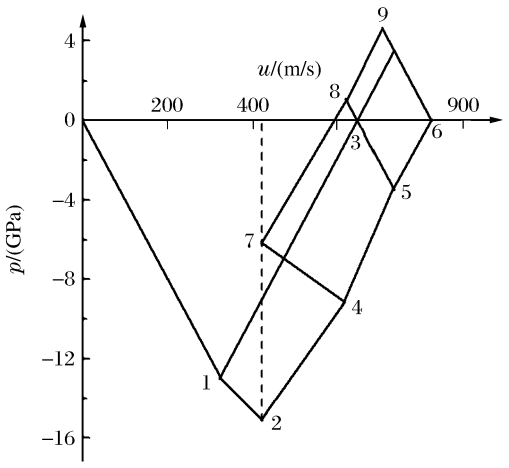


图 8　实验 1 样品中应力-粒子速度关系图

Fig. 8　Stress versus particle velocity in Exp. 1

4　结　论

通过分析本研究开展的等厚对称加载实验和 Barker 等的部分实验结果,得到如下结论:

(1) 研究了冲击加载压力略大于纯铁材料冲击相变阈值 2～5 GPa 和大于冲击相变阈值约10 GPa 两种压力状态下纯铁材料的应力波及各相区的变化,阐示了该压力状态下纯铁材料的冲击相变和逆相变历程;

(2) 利用实验分析得到的纯铁材料的冲击加卸载历程,从应力波相互作用的角度,指出了冲击加载

压力略大于纯铁材料相变阈值范围内，等厚对称碰撞样品“反常”二次层裂行为与冲击相变及逆相变的关联机制。

References:

[1] Bancroft D, Peterson E, 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 Phase Transition in Iron [J]. J App Phys, 1974, 45(11): 4872-4887.

[3] Veeser L R, Gray G T, Vorthman J E. High Pressure Response of a High Purity Iron [A]//Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter-1999 [C]. Utah: Melville, 2000: 73-76.

[4] Veeser L R, Gray G T, Vorthman J E, et al. Spall Strength and Shock Release Kinetics following the Alpha-Epsilon Phase Transition in Iron [R]. Physics Division Progress Report, 1999-2000: 140-145.

[5] Voltz C, Roy G, Francois B. Iron Damage and Spalling Behavior below and above Induced $\alpha \Leftrightarrow \beta$ Phase Transition [A]//Furnish M D, Elert M, Russell Th P, et al. Shock Compression of Condensed Matter-2005 [C]. New York: AIP, 2006: 678-681.

[6] Voltz C, Roy G, Francois B. Study of Spalling for High Purity Iron below and above Induced $\alpha \Leftrightarrow \beta$ Phase Transition [A]//Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter-2003 [C]. New York: Melville, 2004: 511-514.

[7] Tang X J, Hu H B, Li Q Z, et al. Experimental Studies on Shock-Induced Phase Transition in HR2 and Other Fe-Based Materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 115-120. (in Chinese)
唐小军，胡海波，李庆忠，等. HR2 钢及击中铁基材料的冲击相变行为 [J]. 爆炸与冲击，2006，26(2)：115-120.

[8] 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，张新华. 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.

Study on Phase Transition and Spallation of Pure Iron under Given Pressure

CHEN Yong-Tao[1], LI Qing-Zhong[1], TANG Xiao-Jun[1], LU Qiu-Hong[2]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016, *China*)

Abstract: By means of VISAR and metallography, phase transition and saplling behavior in pure iron under the given pressure were studied through symmetric and same thickness flyer/sample experiments. In combination with the experimental results from references, and the loading and unloading histories and phase structure in iron sample are obtained. The given pressure are beyond the phase transition pressure of 13 GPa about 2～5 GPa and 10 GPa, respectively. Abnormal multiple saplling behavior happens in the pure iron sample as the impact pressure beyond the phase transition pressure of 13 GPa about 2 GPa. From the interaction process of stress waves, the contacting mechanism among the spalling behavior and the phase transition and the reverse phase transition have been studied.

Key words: pure iron; phase transition; reverse transition; saplling