

# Fe 基 $\alpha$ 相合金的冲击相变及其对层裂行为的影响研究\*

陈永涛<sup>†</sup> 唐小军 李庆忠

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2010年5月4日收到; 2010年7月13日收到修改稿)

利用正向加载和逆向加载相结合的实验方法, 实验研究了从低压到高压三种不同压力范围内 Fe 基  $\alpha$  相合金 (Fe-85.03wt%, Mn-7.63wt%, Ni-7.01wt%, Al-0.3wt%) 的冲击相变和卸载逆相变历程及对应加载状态的层裂行为特征. 给出了 Fe 基  $\alpha$  相合金含冲击相变和卸载逆相变的加卸载 Hugoniot 线, 发现冲击相变阈值、逆相变阈值和冲击加载压力共同决定其冲击加卸载历程, 冲击相变强烈影响其层裂行为, 导致样品发生了“异常”层裂. 利用获得的冲击加卸载历程从应力波相互作用的角度解释了“异常”层裂的成因, 探讨了冲击相变对层裂行为的影响机制.

**关键词:** Fe 基  $\alpha$  相合金, 相变, 逆相变, 层裂

**PACS:** 64.70. Kd, 62.20. mm, 62.50. Ef

## 1. 引言

冲击相变是冲击波物理的重要组成部分之一, 它探索和揭示物质在冲击加载下结构和物态变化的临界现象和规律. 层裂作为冲击载荷作用下材料的一种常见破坏模式, 它是材料内部大量微损伤在极短时间内经历了成核、长大、连接演化过程的最终结果, 与材料内部拉伸应力波的作用过程密切相关. 材料的冲击相变强烈影响其层裂行为特征: 一方面材料相变后的物理、力学性质与初相有本质不同; 另一方面, 相变会改变冲击波在介质中的波形. 如何准确获得材料的冲击相变和对应加载状态的层裂行为特征, 进而探讨二者的关联机理是目前国内外研究关注的焦点.

自 1956 年 Bancroft 等<sup>[1]</sup> 发现铁的  $\alpha$ - $\epsilon$  相变, Bancroft 等测量得到铁由体心立方到六角密排结构相变的临界应力约 13 GPa, 给出铁的冲击波压缩 Hugoniot 曲线以来, 国内外研究者一直在研究铁基材料的冲击相变及层裂特性<sup>[2-5]</sup>. 1972 年 Barker 和 Hollenbach<sup>[6]</sup> 实验研究了纯铁材料的冲击相变特

性, 分析了纯铁材料冲击相变及可能的逆相变历程, 指出逆相变阈值约 9.8 GPa, 卸载路径存在明显的滞后效应; 1999 年 Veaser 等<sup>[7]</sup> 在 Barker 和 Hollenbach 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, 引入了卸载稀疏冲击波的概念; 2003 至 2005 年 Christophe 和 Gilles<sup>[8,9]</sup> 设计对称加载实验, 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. 2005 年唐小军等<sup>[10]</sup> 在纯铁等厚对称碰撞实验中发现“异常”二次层裂现象, 推断冲击相变可能是导致“异常”层裂的主要原因. 2007 年张兴华等<sup>[11]</sup> 在 Fe 基  $\alpha$  相合金 (Fe-85.03wt%, Mn-7.63wt%, Ni-7.01wt%, Al-0.3wt%) 的冲击加载实验中发现了层裂片厚度远小于飞片厚度的浅表层裂现象, 指出该现象可能与冲击相变有关.

本文拟选择文献[11]中材料 Fe 基  $\alpha$  相合金作为研究材料, 通过轻气炮平板撞击实验获得不同加载压力下其含冲击相变和卸载逆相变的加卸载物理过程以及对应加载状态的层裂行为特征, 分析材料中的相结构转变历程和应力波传播作用过程, 探讨冲击相变对材料层裂行为的影响机理.

\* 国家自然科学基金(批准号:10902102), 中国工程物理研究院科学发展基金(批准号:2009B0201014, 20060104) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhongli4909@163.com

## 2. 实验方法

实验研究材料选 Fe 基  $\alpha$  相合金,各元素所占质量百分比 85.03Fe/7.63Mn/7.01Ni/0.3Al, 密度为  $7.89 \text{ g/cm}^3$ , X 射线衍射表明材料初始相结构为  $\alpha$  相.

实验加载方式采用轻气炮平板撞击,具体实验设计为两种:一种为正向加载实验,VISAR 记录 Fe 基  $\alpha$  相合金样品自由面速度剖面,X 射线侧向实时照相,宏观观测和细观表征回收样品,研究其加载历程和层裂行为;另一种为逆向加载实验,待测 Fe 基  $\alpha$  相合金作为飞片,直接撞击透明窗口,VISAR 记录飞片/窗口界面速度,研究其卸载历程.其中,对于较低压力的逆向加载实验,窗口材料选用蓝宝石,窗口撞击面镀  $0.5 \mu\text{m}$  厚铝膜作为 VISAR 反光面;对于较高压力的逆向加载实验,因该压力下蓝宝石窗口发生混浊,窗口材料选用 LiF,窗口撞击面用环氧树脂胶黏结  $7 \mu\text{m}$  厚铝膜作为 VISAR 反光面(较高压力下空气冲击波对窗口撞击面镀膜破坏严

重,直接在窗口撞击面镀铝膜无法获得有效信号).结合正向加载和逆向加载实验结果,获得其含冲击相变和卸载逆相变的加卸载历程及层裂行为特征,分析冲击相变对材料层裂行为的影响机理.实验装置示意图见图 1.实验加载状态参数见表 1,其中,加载速度较低的实验 1 号,2 号,3 号,5 号和 6 号采用  $\varnothing 100 \text{ mm}$  一级轻气炮驱动,加载速度较高的 4 号和 7 号采用  $\varnothing 32 \text{ mm}$  的二级轻气炮驱动.材料的冲击 Hugoniot 数据见表 2,其中,A3 钢和研究用材料 Fe 基  $\alpha$  相合金的参数均为低压  $\alpha$  相数据,A3 钢参数近似采用纯铁数据,研究用材料 Fe 基  $\alpha$  相合金参数由混合物材料参数预估方法叠加原理得到.

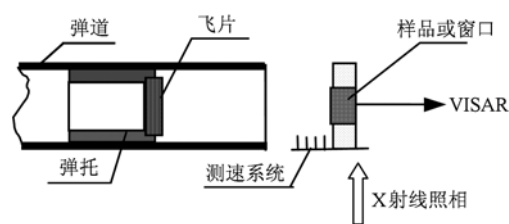


图 1 实验装置示意图

表 1 实验加载状态参数

编号	加载速度 $u_{\text{imp}}/(\text{m/s})$	飞片/ $\text{mm} \times \text{mm}$	样品/ $\text{mm} \times \text{mm}$	窗口/ $\text{mm} \times \text{mm}$
1 号 <sup>[11]</sup>	524	A3 钢 $\varnothing 95 \times 4.8$	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 80 \times 9.9$	—
2 号	613	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 95 \times 6$	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 95 \times 6$	—
3 号 <sup>[11]</sup>	805	A3 钢 $\varnothing 95 \times 4.8$	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 80 \times 8$	—
4 号	1966	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 32 \times 3$	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 50 \times 3$	—
5 号	596	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 95 \times 2$	—	蓝宝石 $\varnothing 50 \times 20$
6 号	595	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 95 \times 2$	—	蓝宝石 $\varnothing 50 \times 20$
7 号	3190	Fe 基 $\alpha$ 相合金 $\varnothing 32 \times 2$	—	LiF $\varnothing 50 \times 30$

表 2 材料 Hugoniot 参数

材料	密度 $\rho_0/(\text{g/cm}^3)$	体波速度 $C_0/(\text{km/s})$	$\lambda$
Fe 基 $\alpha$ 相合金	7.89	4.65	1.53
A3 钢	7.85	4.63	1.33
蓝宝石	3.95	11.19	1.0
LiF	2.64	5.148	1.358

如图 1 所示,对于正向加载实验,靶板材料选用 Fe 基  $\alpha$  相合金,加载波结构较为常见,在此不再赘述.对于逆向加载实验,靶板材料选用蓝宝石或 LiF 窗口,应力波结构见图 2.飞片与窗口发生碰撞瞬间 ( $t=0$ ),界面粒子速度起跳,飞片中传入左行冲击

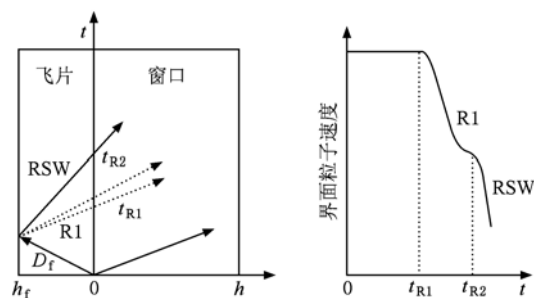


图 2 逆向加载实验应力波系示意图

波,窗口中传入右行冲击波,设计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和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.如果飞片中存在其他的卸载波,如逆相变引发的稀疏冲击波 RSW,同样会使飞片/窗口界面速度发生变化( $t = t_{R2}$ ).因此,依据飞片/窗口界面粒子速度可推断飞片中应力波结构,判断逆相变历程.如果飞片中冲击波为多波结构,如塑性波和相变波,将图2所示应力波结构示意图作相应调整既可,仍可通过飞片/窗口界面粒子速度推断飞片中应力波结构.

### 3. 实验结果与分析

#### 3.1. 冲击相变特性

VISAR 记录正向加载实验 1 号,2 号,3 号和 4 号中 Fe 基  $\alpha$  相合金样品自由面速度剖面见图 3.从图 3 所示实验 1 号,2 号和 3 号波形可以看出,加载段呈现出明显的三波结构,三道波依次为弹性波 E,塑性波 P1 和相变波 P2,其中实验 2 号和 3 号还出现了由自由面反射回来的卸载波与样品内部形成的驻定相变间断面相互作用形成的 PIR 压缩波,P2 和 PIR 波的出现表明实验中 Fe 基  $\alpha$  相合金样品发生了相变( $\alpha \rightarrow \epsilon$ ).由间断方程(1),Hugoniot 关系式(2)和塑性波到达自由面时速度值  $u_{S1}$  得其冲击相变阈值  $\sigma_t$  及对应的压缩比  $V_t/V_0$ ,结果见表 3.

$$\Delta\sigma = \rho_0 D \Delta u_p, \quad (1)$$

$$\Delta V/V_0 = -\Delta u_p/D,$$

$$D = C_0 + \lambda u_p, \quad (2)$$

(1),(2)式中  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta u_p$ ,  $\Delta V$  分别为冲击波前后的应力、粒子速度和比容的改变, $D$  为冲击波速度, $C_0$  为体波声速, $V_0$  为材料初始比容, $u_p$  为粒子速度, $\lambda$  为材料的 Hugoniot 系数.

从图 3 所示实验 4 号波形可以看出,由于加载压力远远大于 Fe 基  $\alpha$  相合金的冲击相变阈值,加载过程中样品发生  $\alpha \rightarrow \epsilon$  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,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.

VISAR 记录逆向加载实验 5 号和 6 号中飞片/窗口界面速度剖面见图 4,冲击加载压力  $\sigma_p$  约为 11.3 GPa,大于 Fe 基  $\alpha$  相合金相变阈值,飞片中应力波及相组织结构见图 5.实验 5 号和实验 6 号重

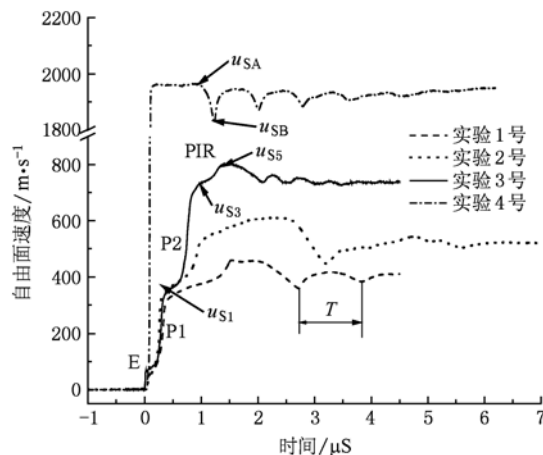


图3 Fe 基  $\alpha$  相合金样品自由面速度剖面

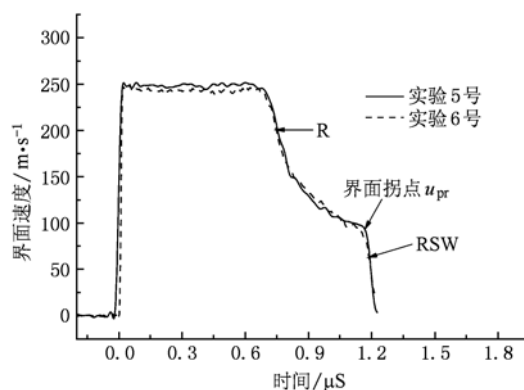


图4 实验 5 号和 6 号中飞片/窗口界面速度剖面

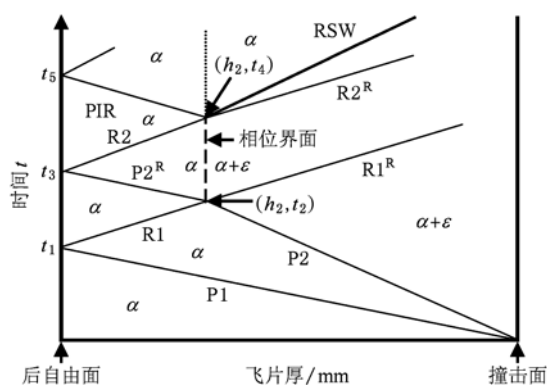


图5 实验 5 号和 6 号飞片中应力波及相组织结构示意图

复性较好.在碰撞面上飞片发生  $\alpha \rightarrow \epsilon$  相变,形成包括弹性波、塑性波和相变波的多波结构,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 记录的是一个冲击波起跳信号.飞片与窗口碰撞时刻定为零时,在  $t_1$  时刻塑性波 P1 到达

飞片后自由面,反射稀疏波 R1,对飞片进行第一次卸载(弹性波幅值较小,分析中忽略其影响),使 R1 波后状态处于零压  $\alpha$  相,与左行相变波 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达飞片/窗口界面,VISAR 记录到第一道卸载波 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,引起界面粒子速度再次下降,VISAR 记录到第二道卸载波. 依据第二道卸载波导致飞片/窗口界面速度在极短时间内急速下降的特征,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. 由(1),(2)式卸载波界面拐点速度  $u_{pr}$  和表 2 所示蓝宝石窗口 Hugoniot 参数得研究用 Fe 基  $\alpha$  相合金  $\varepsilon \rightarrow \alpha$  逆相变阈值  $\sigma_n = 4.2$  GPa 及对应压缩状态的压缩比  $V_n/V_0$ ,见表 3.

VISAR 记录逆向加载实验 7 号中飞片/窗口界面速度剖面见图 6,冲击加载压力约 48.7 GPa,远大于研究材料 Fe 基  $\alpha$  相合金相变阈值. 碰撞瞬间飞片中产生左行冲击波(合并相变波),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,飞片内压力降低,发生逆相变行为,形成两道卸载波 S1 和 S2. 依据文献 [12] 中纯铁高压卸载历程,推断由于加载压力较大,导致样品内温度升高,卸载过程中样品可能出现了  $\gamma$  相,先后发生了  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  和  $\gamma \rightarrow \alpha$  逆转变行为(该种分析仅为推测,高压加载下 Fe 基  $\alpha$  相合金逆相变的物理过程将在后续工作中研究). 不过,由图 6 可以肯定卸载过程中 Fe 基  $\alpha$  相合金样品确实因逆转变行为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.

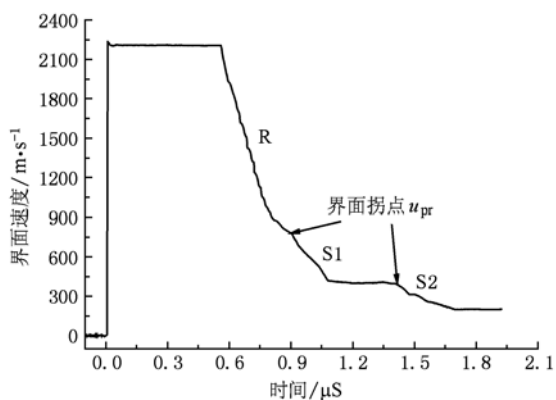


图 6 实验 7 号中飞片/窗口界面速度剖面

为准确掌握研究材料 Fe 基  $\alpha$  相合金含冲击相

变和卸载逆相变的加卸载历程,本文对 Fe 基  $\alpha$  相合金样品中的应力波及相组织结构进行了分析. 其中,正向加载实验 1 号样品中应力波及相组织结构见图 7,实验 2 号和 3 号样品中应力波及相组织结构见图 8.

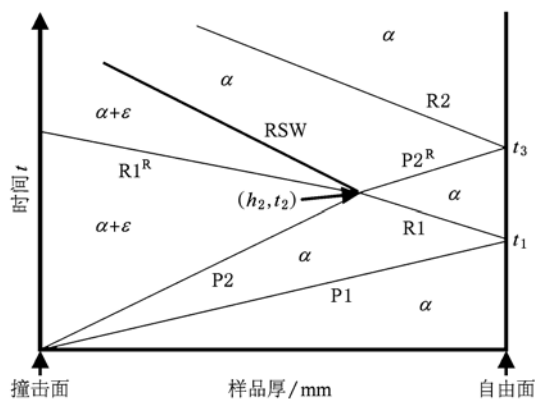


图 7 实验 1 号样品中应力波及相状态示意图

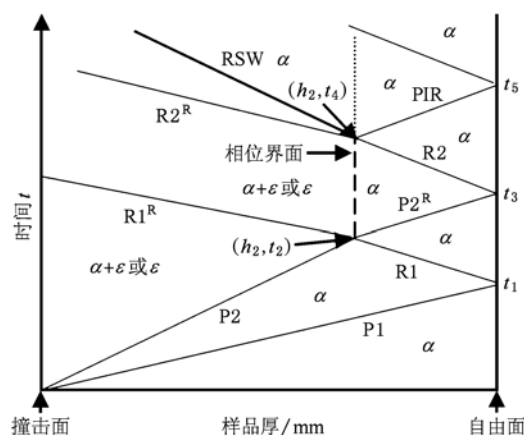


图 8 实验 2 号和 3 号样品中应力波及相状态示意图

如图 7 和图 8 所示,飞片和样品撞击时刻定义为 0 时刻. 塑性波 P1 到达样品自由面时刻为  $t_1$ ,自由面速度为  $u_{s1}$ ,反射稀疏波 R1. R1 波后状态处于零压  $\alpha$  相,与相变波 P2 于  $t_2$  时刻在距撞击面  $h_2$  处相遇,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  $u_p = (u_{s1} + u_{s3})/2$ ,  $P2^R$  波后相对波前粒子速度增加值  $\Delta u_p = (u_{s3} - u_{s1})/2$ . 由于  $P2^R$  波在低压(相传播,依据表 2 中 Fe 基  $\alpha$  相合金的状态参数和(1)和(2)式可得  $P2^R$  波速  $D_{P2R}$  和  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$ ,见表 3.

由上述分析得塑性波速  $D_{P1}$  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

经历时间  $t_1$ , 由图 3 所示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  $h_2$  和  $t_2$ , 则可得相变波  $P2$  波速  $D_{p2}$ . 因此, 由式 (1) 和 (2) 可得冲击加载极限压力  $\sigma_p$  和相变波  $P2$  波后压缩比  $V_p/V_0$ , 见表 3. 计算中近似认为相变波  $P2$  波后相对波前粒子速度的改变为  $(u_{imp} - u_{s1})/2$ , 其中  $u_{imp}$  为冲击加载速度.

进一步分析  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  发现: 实验 1 号中  $\sigma_r = 2.9$  GPa, 小于 Fe 基  $\alpha$  相合金逆相变阈值 4.2 GPa, 依据应力连续条件,  $t_2$  时刻后  $h_2$  左侧区域压力亦小于 Fe 基  $\alpha$  相合金逆相变阈值, 表明稀疏波  $R1^R$  已使相变波  $P2$  波后状态卸载为低压  $\alpha$  相, 卸载波系结构为  $R1^R$  后跟逆相变稀疏冲击波 RSW, 再后跟稀疏波  $R2$  的三波结构 (见图 7); 实验 2 号和 3 号中  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  分别为 4.8 GPa 和 6.5 GPa, 大于 Fe 基  $\alpha$  相合金逆相变阈值 4.2 GPa, 依据应力连续条件,  $t_2$  时刻后  $h_2$  左侧区域压力亦大于 Fe 基  $\alpha$  相合金逆相变阈值, 即  $h_2$  左侧区域样品处于高压  $\varepsilon$  相或亚稳态  $\alpha + \varepsilon$  混合相, 在  $h_2$  处形成驻定相界面,  $P2^R$  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. 实验 2 号和 3 号中 PIR 波后应力  $\sigma_s$  分别为 0.3 和 1.2 GPa, 远小于 Fe 基  $\alpha$  相合金逆相变阈值 4.2 GPa, 依据应力连续条件,  $t_4$  时刻后  $h_2$  左侧区域压力亦远小于其逆相变阈值, 表明  $h_2$  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 RSW, 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 RSW 的三波结构 (见图 8). 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相对于其本身在样品中的传播时间为小量, 在实验测量中很难将  $R1^R$  与  $R2^R$  区分, 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, 与实验 5 号和 6 号记录到实验结果符合.

对于实验 2 号和 3 号 ( $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  大于材料逆相变阈值  $\sigma_n$ ), 前面分析得到  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  和波后粒子速度  $u_p = (u_{s1} + u_{s3})/2$ , 基于 ( $h_2, t_2$ ) 处驻定相界面左右两侧应力和粒子速度相等的基本认识, 可得卸载波  $R1^R$  波后的应力和粒子速度, 加之前面得到的相变波  $P2$  波后的应力  $\sigma_p$  和粒子速度  $u_{imp}/2$ , 由方程 (1) 可得卸载波  $R1^R$  的波速, 进而

得  $R1^R$  波后压缩比  $V_r/V_0$ , 见表 3.

对于实验 1 号,  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  小于材料逆相变阈值  $\sigma_n$ , 表明在该卸载过程中样品经历了  $\varepsilon \rightarrow \alpha$  逆相变, 形成了稀疏冲击波 RSW, 见图 7. 即在  $t_2$  时刻后  $h_2$  左侧区域样品实际先后经历了稀疏波  $R1^R$  和稀疏冲击波 RSW 两道波卸载. 因此, 卸载过程中  $\sigma_r$  压力状态下对应压缩比  $V_r/V_0$  不能像实验 2 号和 3 号简单由相变波  $P2$  波后的应力  $\sigma_p$ 、粒子速度  $u_{imp}/2$ ,  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  和对应粒子速度直接得到, 需要借助逆向加载实验 5 号和 6 号得到的逆相变阈值  $\sigma_n$  及对应的粒子速度分析给出. 即卸载过程中  $\sigma_r$  压力状态下对应压缩比  $V_r/V_0$  需要由前面分析给出的逆相变阈值  $\sigma_n$  及对应粒子速度、 $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  及对应粒子速度, 结合间断方程 (1) 得到, 结果见表 3. 对于实验 2 号和 3 号中, PIR 波后的压缩比也可由同样方法得到, 结果见表 3.

表 3 Fe 基  $\alpha$  相合金冲击加卸载历程数据

No.	$\sigma_p$	$V_p/V_0$	$u_{s1}$	$D_{p1}$	$\sigma_r$	$V_r/V_0$	$u_{s3}$	$D_{p2}$
1 号	9.3	0.922	0.35	4.9	6.3	0.964	0.46	2.8
2 号	11.1	0.912	0.35	4.9	6.3	0.964	0.59	3.8
3 号	13.7	0.905	0.37	4.9	6.9	0.962	0.74	3.6
4 号	48.5	0.843	—	—	—	—	—	—
5 号	11.3	0.911	—	—	—	—	—	—
6 号	11.3	0.911	—	—	—	—	—	—
7 号	48.7	0.843	—	—	—	—	—	—

表 3 续

No.	$u_{pr}$	$\sigma_n$	$V_n/V_0$	$\sigma_r$	$V_r/V_0$	$u_{s5}$	$\sigma_s$	$V_s/V_0$
1 号	—	—	—	2.9	0.98	—	—	—
2 号	—	—	—	4.8	0.931	0.6	0.3	0.999
3 号	—	—	—	6.5	0.918	0.8	1.2	0.994
4 号	—	—	—	—	—	—	—	—
5 号	0.09	4.2	0.934	—	—	—	—	—
6 号	0.09	4.2	0.934	—	—	—	—	—
7 号	0.8, 0.4	13.6	—	—	—	—	—	—

表 3 中  $\sigma_p$  为加载极限压力,  $\sigma_r$  为冲击相变阈值,  $u_{s1}$  为塑性波到达自由面后剖面极值,  $D_{p1}$  为塑性波波速,  $u_{s3}$  为剩余相变波到达自由面后剖面极值,  $D_{p2}$  为相变波速,  $V_p/V_0$  和  $V_r/V_0$  分别为相变波  $P2$  和塑性波  $P1$  波后样品的压缩比,  $u_{pr}$  为卸载波拐点界面粒子速度,  $\sigma_n$  为逆相变阈值,  $V_n/V_0$  为逆相变发生时对应的压缩比,  $\sigma_r$  为  $P2^R$  波后应力,  $u_{s5}$  为 PIR 波到达自由面后剖面极值,  $\sigma_s$  为 PIR 波后应力,  $V_r/V_0$  和

$V_s/V_0$  分别为卸载过程中  $\sigma_r$  和  $\sigma_s$  压力状态对应的压缩比. 其中应力单位为 GPa, 速度单位为 km/s.

由表 3 所示加卸载数据, 结合文献[11]中实验数据, 初步给出了研究材料 Fe 基  $\alpha$  相合金含冲击相变和卸载逆相变的加卸载 Hugoniot 线, 见图 9. 图 9 中实线代表其加卸载 Hugoniot 线, 虚线为由  $\sigma_p$  卸载到  $\sigma_r$  的历程(实验 1 号中  $\sigma_p$  先卸载到  $\sigma_n$  再卸载到  $\sigma_r$ ). 对于逆向高压加载实验 7 号, 由于卸载过程中样品可能经历  $\gamma$  相, 目前现有数据无法准确给出相关认识, 在图 9 中没分析其加卸载数据. 另外, 由于实验数据较少, 目前仅给出了加卸载 Hugoniot 线的初步部分结果, 其完整性和精确性将通过后续研究逐步完善.

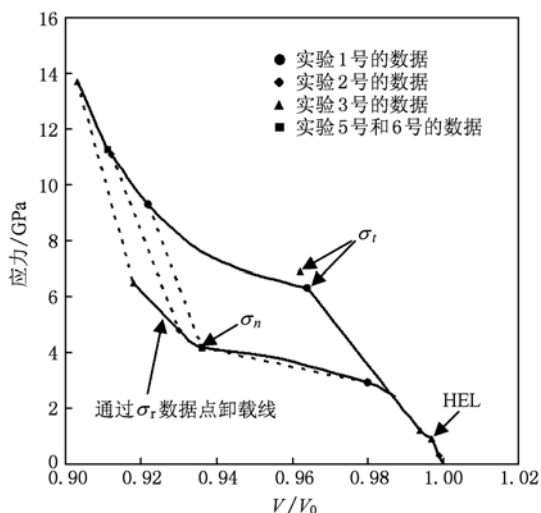


图 9 Fe 基  $\alpha$  相合金加卸载 Hugoniot 线

综合上述分析结果发现:  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  与逆相变阈值  $\sigma_n$  的大小关系决定 Fe 基  $\alpha$  相合金冲击加卸载历程特征, 而  $P2^R$  波后应力  $\sigma_r$  基本由冲击加载压力  $\sigma_p$  与冲击相变阈值  $\sigma_1$  的差值决定, 因此, Fe 基  $\alpha$  相合金的冲击相变阈值、逆相变阈值和冲击加载压力共同决定其冲击加卸载历程.  $0 < \sigma_p - \sigma_1 < \sigma_n$  时, Fe 基  $\alpha$  相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其完成  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  逆相变, 卸载段呈现稀疏波 R1, 稀疏冲击波 RSW 和稀疏波 R2 的三波结构;  $\sigma_p - \sigma_1 > \sigma_n$  时, Fe 基  $\alpha$  相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 四波结构, 卸载段呈现稀疏波和稀疏冲击波两波结构; 对于  $\sigma_p - \sigma_1 \gg \sigma_n$ , 由于相变波速大于塑性波速, Fe 基  $\alpha$  相合金加载段可能呈现弹性波和合并相变波两波结构, 卸载过程中

可能经历了  $\gamma$  相, 先后发生了  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  和  $\gamma \rightarrow \alpha$  逆转行为, 生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.

### 3.2. Fe 基 $\alpha$ 相合金的层裂特性及与冲击相变的关联

Fe 基  $\alpha$  相合金的层裂特征由 VISAR 记录的自由面速度剖面波形、回收样品和 X 射线照片给出, 结果见表 4, 表 4 中振荡周期单位为  $\mu s$ , 层裂片厚度单位为 mm, 速度单位为 km/s, 应力单位为 GPa. 其中, 由自由面速度波形经式(3)可得层裂片厚度  $\delta_w$ , 经(4)式可得层裂强度  $\sigma_{st}$ , 由回收样品可得层裂片厚度  $\delta_r$  及断口形貌, 由 X 射线照片可得层裂片厚度  $\delta_x$  及数量.

$$\delta_w = C_L \times T/2, \tag{3}$$

$$\sigma_{st} = \rho_0 C_b \Delta u_s / 2. \tag{4}$$

(3)式中  $C_L$  为 Fe 基  $\alpha$  相合金弹性纵波声速,  $T$  为自由面速度剖面卸载段振荡周期, (4)式中  $C_b$  为 Fe 基  $\alpha$  相合金体波声速,  $\Delta u_s = u_{sA} - u_{sB}$  为速度差,  $u_{sA}$  为自由面速度峰值,  $u_{sB}$  为平台之后起跳点速度值.

表 4 Fe 基  $\alpha$  相合金样品层裂特征信息

No.	$\sigma_p$	$T$	$\delta_w$	$\delta_r$	$\delta_x$	$u_{sA}$	$u_{sB}$	$\sigma_{st}$
1号 <sup>[11]</sup>	9.3	1.11	3.28	3.2, 2.0	—	0.457	0.36	1.9
2号	11.1	—	—	未完全层裂	—	—	—	—
3号 <sup>[11]</sup>	13.7	0.44	1.29	未回收到	—	0.801	0.738	1.2
4号	48.5	0.78	2.3	—	2.2	1.959	1.842	2.3

3.1 节分析给出了 Fe 基  $\alpha$  相合金含冲击相变和卸载逆相变的加卸载 Hugoniot 数据, 指出不同加载压力下样品中加卸载历程及应力波结构存在较大差异, 因此, 不同加载压力下冲击相变对层裂的影响机理也可能存在差异. 基于此, 文中分析了三种不同压力范围  $0 < \sigma_p - \sigma_1 < \sigma_n$ ,  $\sigma_p - \sigma_1 > \sigma_n$  和  $\sigma_p - \sigma_1 \gg \sigma_n$  内样品的层裂特征, 并利用前面得到的冲击加卸载历程探讨了冲击相变对层裂行为的影响机理.

对于  $0 < \sigma_p - \sigma_1 < \sigma_n$  的正向加载实验 1 号, Fe 基  $\alpha$  相合金样品发生了与冲击相变相关的“异常”二次层裂, 靠近自由面层裂片厚度约 3.2 mm, 自由面速度波形计算结果与回收结果一致, 中间层裂片厚度约 2 mm, 其中靠近撞击面断口光滑, 裂纹深度小于 20  $\mu m$ , 见图 10, 即该层裂面可能由稀疏冲击波相互作用形成(如果样品不发生冲击相变, 层裂

仅发生一次,且厚度应基本与飞片厚度相同). 由图 7 所示 Fe 基  $\alpha$  相合金样品中应力波及相组织结构得其“异常”二次层裂形成原因示意图,见图 11,定性指出了冲击相变对层裂行为的影响机理. 飞片后自由面反射稀疏波使样品发生逆相变引发的稀疏冲击波  $RSW^f$  与样品中左行稀疏冲击波  $RSW$  在样品中相互作用,形成靠近撞击面的光滑层裂面. 经第一个层裂面的右行稀疏波与样品自由面反射稀疏波  $R2$  在样品中相互作用,形成靠近自由面的粗糙层裂面.

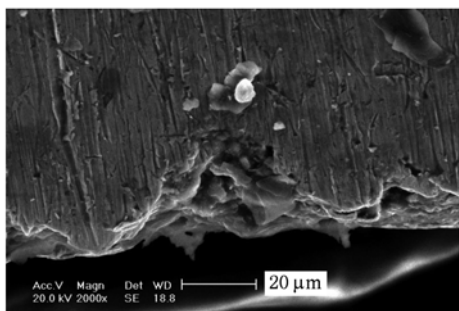


图 10 实验 1 号中层裂片断口形貌扫描照片

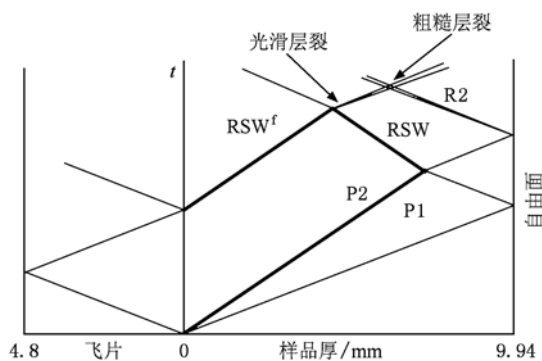


图 11 实验 1 号中样品层裂成因示意图

对于  $\sigma_p - \sigma_l > \sigma_n$  的正向加载实验 2 号, Fe 基  $\alpha$  相合金样品没能形成完全层裂,但对样品中应力波传播作用过程分析指出其存在形成“异常”二次层裂的物理机理,如图 12 所示,不过可能因为稀疏波形成的拉伸应力小于材料层裂强度,而没能形成完全层裂. 图 12 所示两个拉伸应力区形成原因分别为:飞片后自由面反射稀疏波使样品发生逆相变引发的稀疏冲击波  $RSW^f$  与样品中稀疏波  $R2^R$  相遇形成靠近撞击面的第一个拉伸应力区  $TR1$ ;逆相变稀疏冲击波  $RSW$  与经过第一个拉伸应力区的稀疏波相互作用形成靠近自由面的第二个拉伸应力区

TR2. 对于正向加载实验 3 号, Fe 基  $\alpha$  相合金样品的冲击加卸载历程与实验 2 号基本相同,冲击相变对层裂行为的影响与实验 2 号一致,文献[13]给出了初步分析结果,在此不再讨论.

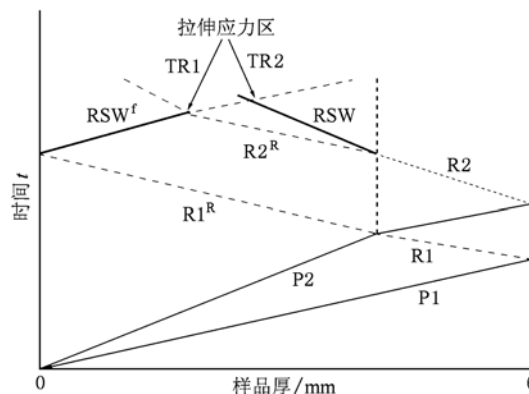


图 12 实验 2 号样品中应力波作用图

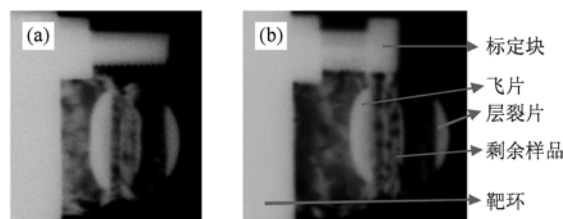


图 13 实验 4 号中 X 射线照片 ((a)和(b)分别为飞片和样品撞击 20  $\mu s$  和 27  $\mu s$  后状态)

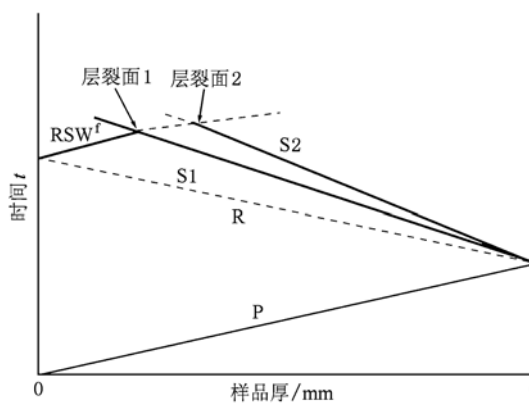


图 14 实验 4 号样品层裂形成应力波作用示意图

对于  $\sigma_p - \sigma_l \gg \sigma_n$  的正向加载实验 4 号, X 射线照相诊断层裂信息见图 13. 根据 X 射线的透射原理,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 13(a)和图 13(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白色物质为飞片,飞片和层裂片间物质为剩余样品,比较图 13(a)和图 13(b)发现,剩余样品可能为两层,样品发生了“异常”二次层裂.由标定块得层裂片厚度约 2.2 mm,与自由面速度剖面计算结果 2.3 mm 基本一致.由于实验为等厚对称碰撞,依据应力波理论飞片亦应该发生同样的层裂行为,不过,由于飞片后界面弹托的驱动作用,飞片的层裂片与飞片主体不能分离,X 射线侧向照相仅能给出飞片为一整体的图像,未能给出层裂信息,见图 13.由图 3 所示 Fe 基  $\alpha$  相合金样品自由面速度剖面和图 6 所示飞片/窗口界面速度剖面得其“异常”二次层裂的形成原因,见图 14.飞片后自由面反射稀疏波使样品发生逆相变引发的稀疏冲击波 RSW<sup>f</sup> 与样品中卸载波 S1 相遇形成靠近撞击面的第一个层裂面;经过第一个拉伸应力区的稀疏波与卸载波 S2 相互作用形成靠近自由面的第二个层裂面.

## 4. 结 论

### 1. 给出了研究材料 Fe 基 $\alpha$ 相合金含冲击相变

和卸载逆相变的冲击加卸载 Hugoniot 线,指出其冲击相变阈值约 6—7 GPa,逆相变阈值约 4.2 GPa,滞后压力约 2—3 GPa,呈现典型的马氏体相变滞后特征;

2. 研究指出冲击相变阈值、逆相变阈值和冲击加载压力共同决定 Fe 基  $\alpha$  相合金的冲击加卸载历程: $0 < \sigma_p - \sigma_t < \sigma_n$  时,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其完成  $\varepsilon \rightarrow \alpha$  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 PIR 四波结构,卸载段呈现稀疏波和稀疏冲击波两波结构;对于  $\sigma_p - \sigma_t \gg \sigma_n$ ,由于相变波速大于塑性波速,加载段可能呈现弹性波和合并相变波两波结构,卸载过程中可能经历了  $\gamma$  相,生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;

3. 研究发现冲击相变强烈影响 Fe 基  $\alpha$  相合金样品的层裂行为,导致其发生了“异常”层裂,利用获得的冲击加卸载历程从应力波相互作用的角度解释了“异常”层裂的成因,探讨了从低压到高压三种不同加载压力范围内冲击相变对层裂行为的影响机理.

- [1] Bancroft D, Peterson E, Minshall S 1956 *J. Appl. Phys.* **27** 291
- [2] Cui X L, Zhu W J, Deng X L, Li Y J, He H L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5545 (in Chinese) [崔新林、祝文军、邓小良、李英俊、贺红亮 2006 物理学报 **55** 5545]
- [3] Shao J L, Wang P, Qin C S, Zhou H Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1254 (in Chinese) [邵建立、王 裴、秦承森、周洪强 2008 物理学报 **57** 1254]
- [4] Shao J L, Wang P, Qin C S, Zhou H Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5389 (in Chinese) [邵建立、王 裴、秦承森、周洪强 2007 物理学报 **56** 5389]
- [5] Shao J L, Wang P, Qin C S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1936 (in Chinese) [邵建立、王 裴、秦承森 2009 物理学报 **58** 1936]
- [6] Barker L M, Hollenbach R E 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 4872
- [7] Veaser L R, Gray G T, Vorthman J E, Rodriguez P J, Hixson R S, Hayes D B 1999 *Shock Compression of Condensed Matter* 73
- [8] Christophe Voltz, Gilles Roy 2003 *Shock Compression of Condensed Matter* 511
- [9] Christophe Voltz, Francois Buy, Gilles Roy 2005 *Shock Compression of Condensed Matter* 678
- [10] Tang X J, HU H B 2006 *Explosion and Shock Waves* **26** 115 (in Chinese) [唐小军、胡海波 2006 爆炸与冲击 **26** 115]
- [11] Zhang X H, Tang Z P, Tang X J 2007 *Explosion and Shock Waves* **27** 103 (in Chinese) [张兴华、唐志平、唐小军 2007 爆炸与冲击 **27** 103]
- [12] Petrovtsev A V, Bychenkov V A 2001 *Shock Compression of Condensed Matter* 591
- [13] Xu W W, Tang Z P, Zhang X H 2009 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **23** 17 (in Chinese) [徐薇薇、唐志平、张兴华 2009 高压物理学报 **23** 17]

## Phase transition and influence of phase transition on spall in $\alpha$ phase Fe-based alloy\*

Chen Yong-Tao<sup>†</sup> Tang Xiao-Jun Li Qing-Zhong

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physical Research, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 4 May 2010; revised manuscript received 13 July 2010)

### Abstract

This paper provides an investigation of the phase transition and the spalling characteristics induced during shock loading and unloading in an  $\alpha$  phase Fe-based alloy. Two kinds of impact set-ups are used. One is referred to as the direct impact, and the other is the reverse impact. The shock Hugoniot and the release stress-volume adiabat of the  $\alpha$  phase Fe-based alloy are obtained. And the results show that the history of loading and unloading is determined by the relationship among the phase transition threshold and the reverse transition threshold and the shock pressure. It is found that abnormal spallations happen in the  $\alpha$  phase Fe-based alloy sample as the pressure exceeds the phase transition threshold. Such abnormal spalling phenomena are believed to be related to the shocked  $\alpha \rightarrow \varepsilon$  phase transition, and a possible reason for the abnormal spalling is discussed also from the interaction process of stress wave.

**Keywords:**  $\alpha$  phase Fe-based alloy, phase transition, reverse phase transition, spall

**PACS:** 64.70. Kd, 62.20. mm, 62.50. Ef

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundations of China (Grant No. 10902102), the Science Foundations of China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. 20060104, 2009B021014).

<sup>†</sup> E-mail: zhongli4909@163.com