

冲击相变对 FeMnNi 合金层裂行为影响研究¹⁾李庆忠* 陈永涛*,²⁾ 刘文韬† 胡海波* 徐永波**

*(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实验室, 绵阳 621900)

†(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**(中国科学院金属研究所材料科学国家实验室, 沈阳 110016)

摘要 通过逆向加载和等厚对称碰撞实验相结合的方法, 确定了 FeMnNi 合金含冲击相变和卸载逆相变的完整加卸载物理过程 and 对应加载状态的层裂特征. 采用修正的 Boettger 模型与非平衡两相相变理论模型, 成功模拟再现了实验过程, 解释了冲击相变、卸载逆相变及卸载冲击波形成的物理机理. 利用获得的冲击加卸载历程, 从应力波相互作用的角度分析了等厚对称碰撞样品形成“异常”层裂的物理原因, 指出层裂发生的机制正是由于受载样品发生了冲击相变和卸载逆相变.

关键词 FeMnNi, 相变, 逆相变, 层裂, 卸载冲击波

中图分类号: O346.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2010)05-0971-07

引 言

冲击相变是冲击波物理的重要组成部分之一, 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, 是材料内部大量微损伤在极短时间内经历成核、长大和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即逆相变历程和对应加载状态的层裂行为特征, 进而探讨分析二者的关联机制是目前国内外研究关注的焦点.

自 Bancroft 等^[1]发现铁的 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 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为 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. Barker 等^[2]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, 指出逆相变阈值约为 9.8 GPa, 卸载路径存在明显的滞后效应; Veaser 等^[3]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, 引入了卸载冲击波的概念; Voltz 等^[4-5]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; Tang 等^[6]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; 张新华等^[7]在 FeMnNi 合金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.

本文选择 FeMnNi 合金材料, 拟通过轻气炮平板撞击实验获得含冲击相变和卸载逆相变的加卸载物理过程及对应加载状态的层裂行为特征, 依据实验结果构建相应的物理模型, 数值模拟解释实验现象, 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制.

1 实验方法和计算模型

1.1 实验方法

轻气炮平板撞击实验设计为两种: 一种为逆向加载实验 #1, 待测 FeMnNi 合金样品作为飞片, 直接撞击蓝宝石窗口, 蓝宝石窗口撞击面镀 0.5 μm 铝膜, VISAR 记录飞片 / 窗口界面速度剖面, 研究 FeMnNi 合金卸载历程; 一种为等厚对称加载实验

2008-07-17 收到第 1 稿, 2010-05-26 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10776032, 10902102) 和中国工程物理研究科学基金 (20060104, 2009B0201014) 资助项目.

2) E-mail: zhongli4909@163.com

#2, 飞片和样品均为 FeMnNi 合金, VISAR 记录样品自由面速度剖面, 宏观观测和细观表征回收样品, 研究 FeMnNi 合金的加载历程和层裂行为. 结合等厚对称加载和逆向加载实验结果, 获得 FeMnNi 合金含冲击相变和卸载逆相变的加卸载历程及层裂行为特征, 分析冲击相变对层裂行为的影响机制.

实验用材料的状态方程参数和实验参数分别列于表 1 和表 2. 表 1 中 FeMnNi 参数依据 Fe, Mn 和

Ni 元素所占质量百分比 (86.74:6.83:6.43), 由混合物材料参数预估方法叠加原理 [8] 得到, 与文献 [7] 中给出的 FeMnNi 合金 Hugoniot 线吻合.

表 1 状态方程参数

Table 1 Parameters of equation of state

Material	$\rho_0/(g\cdot cm^{-3})$	$C_0/(km\cdot s^{-1})$	λ
FeMnNi alloy	7.87	4.61	1.83
sapphire	3.95	11.19	1.0

表 2 实验参数

Table 2 Parameters of experimental conditions

Experiment No.	Velocity/ ($m\cdot s^{-1}$)	Pressure/ GPa	FeMnNi flyer/ mm×mm	FeMnNi sample/ mm×mm	Sapphire window/ mm×mm
#1	603	11.9	Ø95×2	—	Ø35×15
#2	607	12.1	Ø95×6	Ø80×6	—

对于等厚对称加载实验, 靶板材料选用 FeMnNi 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窗口, 应力波结构见图 1. 飞片与窗口碰撞瞬间 ($t=0$), 界面速度起跳, 飞片中传入左行冲击波, 窗口中传入右行冲击波. 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 R, 中心稀疏波到达飞片 / 窗口界面时 ($t=t_1$), 界面粒子速度下降. 如果飞片中存在其他的卸载波, 如逆相变引发的卸载冲击波 RSW, 同样会使飞片 / 窗口界面速度发生变化 ($t=t_2$). 因此, 依据飞片 / 窗口界面速度的变化特征可推断飞片中的波系特征, 判断是否有逆相变及相应的卸载冲击波形成.

1.2 计算模型

材料的本构关系采用理想弹塑性模型, 材料的损伤演化过程采用 Gurson 损伤理论模型, 冲击相变模型采用文献 [9] 提出的非平衡两相相变模型. 满足关系

$$\left. \begin{aligned} v &= (1 - \eta)v_1 + \eta v_2 \\ E &= (1 - \eta)E_1 + \eta E_2 \\ S &= (1 - \eta)S_1 + \eta S_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, η 为第 2 相材料的质量份额; v, E 和 S 分别为材料的比容、比内能和比熵; 下标 1 和 2 分别代表 α 相和 ϵ 相.

相变动力学过程采用 Boettger 等 [10] 提出的亚稳态相变动力学松弛模型, 正相变亚稳态面采用原形式 (式 (2)). 为了与观察到的 FeMnNi 合金的实验现象吻合, 对 Boettger 提出的逆相变亚稳态形式进行了修正 (式 (3)).

$$\eta_{mf} = 1 - \exp[(A_f - \Delta G)/B_f] \quad (2)$$

$$\eta_{mr} = 1 - \exp[(-\Delta G - A_r)/B_r] \quad (3)$$

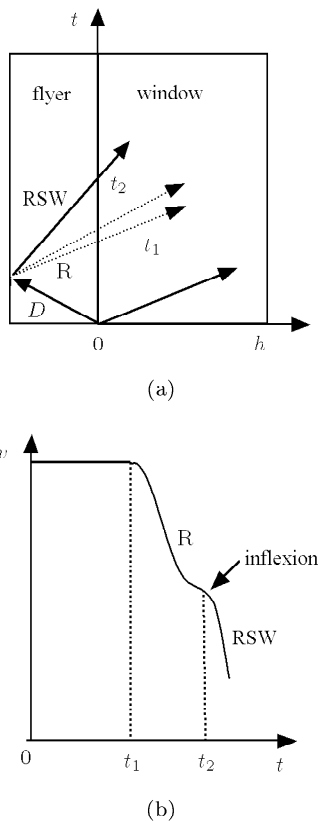


图 1 逆向加载实验应力波示意图

Fig.1 Schematic of wave using reverse impact

式中, η_{mf} 和 η_{mr} 分别为相变和逆相变过程中达到亚稳态时 ε 相的质量份额; $\Delta G = G_1 - G_2$ 为两相 Gibbs 自由能之差; A_f, B_f, A_r 和 B_r 为材料参数. 数值计算用 FeMnNi 合金 Hugoniot 数据 (见表 3) 由文献 [7] 和本文实验数据拟合得到. 其中, D_E 为弹性波速; D_{P1} 为塑性波速; D_{P2} 为相变波速; u_P 为粒子速度; v/v_0 为压缩比; σ 为加载压力. 另外, 考虑到 FeMnNi 合金的比热、相边界斜率、相变潜热等热物理参数缺乏, 基于在当前的加载压力下热物理参数对材料动力学行为影响较小的基本特性, 本文中这些参数取纯铁的数据.

表 3 FeMnNi 合金的 Hugoniot 数据

Table 3 Hugoniot parameters of FeMnNi alloy

$D_E/$ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	$D_{P1}/$ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	$D_{P2}/$ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	$u_P/$ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	v/v_0	$\sigma/$ GPa
5.919	4.900	2.997	0.356	0.9055	12.0

2 实验结果分析及数值模拟

等厚对称实验 #2 中 VISAR 记录 FeMnNi 合金样品自由面速度剖面和数值模拟结果见图 2. 计算结果与实验结果基本吻合. 加载过程中样品发生 $\alpha \rightarrow \varepsilon$ 相转变, 自由面速度剖面呈现弹性波 E、塑性波 P1、相变波 P2 和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 波的四波结构. 由冲击间断方程 (4)、Hugoniot 关系式 (5) 和塑性波到达自由面时速度值 u_{S1} 可得 FeMnNi 合金冲击相变阈值 $\sigma_t = 6.8 \text{ GPa}$.

$$\Delta\sigma = \rho_0 D \Delta u_p, \quad \Delta v/v_0 = -\Delta u_p/D \quad (4)$$

$$D = C_0 + \lambda u_p \quad (5)$$

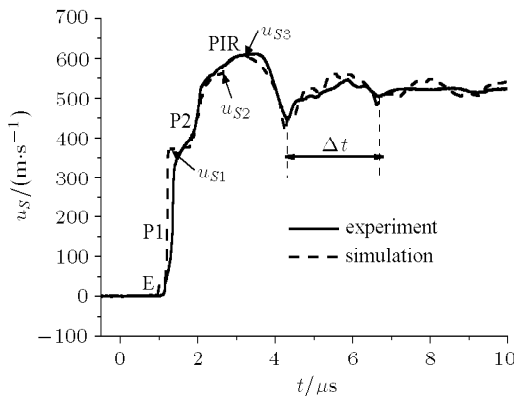


图 2 实验 #2 中 FeMnNi 合金样品自由面速度剖面
Fig.2 Free surface velocity profile of FeMnNi sample
in experiment #2

式中, $\Delta\sigma$, Δu_p 和 Δv 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; u_P 为粒子速度; v_0 为材料初始比容; λ 为材料的 Hugoniot 系数.

逆向加载实验 #1 中, VISAR 记录飞片 / 窗口界面速度剖面实测值见图 3, FeMnNi 合金飞片中的应力波结构及相组织状态见图 4. 冲击加载压力约为 12 GPa, 大于 FeMnNi 合金相变阈值, 在碰撞面上飞片开始发生 $\alpha \rightarrow \varepsilon$ 冲击相变, 形成包括弹性波 E、塑性波 P1 和相变波 P2 的多波结构, 向飞片后自由面方向 (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 1 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 α 相, 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达飞片 / 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, 引起界面粒子速度再次下降, VISAR 记录到第 2 道卸载波. 依据该卸载波导致飞片 / 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 $\varepsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变引发的卸载冲击波 RSW (下降沿时间尺度与等厚对称加载实验 #2 中塑性波上升沿时间尺度相当). 由式 (4) 和 (5) 卸载波界面拐点速度 u_{Pr} 和表 1 所示蓝宝石窗口 Hugoniot 参数得 FeMnNi 合金 $\varepsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变阈值 $\sigma_n = 4.2 \text{ GPa}$. 滞后相变阈值约 2.6 GPa, 呈现典型的马氏体相变滞后特征.

对于不同的波阻抗、相变压力和逆相变压力, 塑性波反射稀疏波对材料进行第 1 次卸载后, 目前

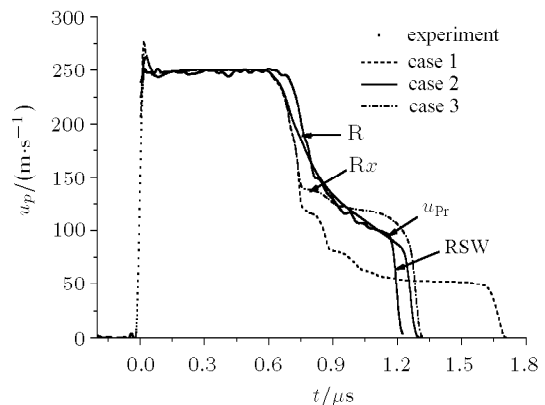


图 3 实验 #1 中飞片 / 窗口界面速度剖面
Fig.3 The flyer/window interface velocity in experiment #1

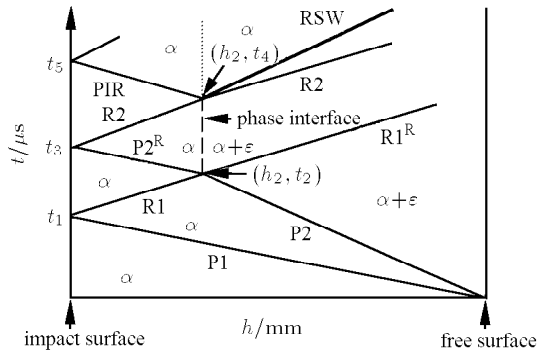


图 4 实验 #1 中应力波系示意图
Fig.4 Schematic diagram of wave interaction
in experiment #1

通常认为存在以下 3 种情况 (见图 3): 第 1 种情况是逆相变压力较低, 第 1 次卸载后材料没有发生逆相变, 材料仍处于高压 ϵ 相; 第 2 种情况是由于加载压力较低, 冲击加载后 P2 波后状态为 $\alpha + \epsilon$ 混合相, 而非纯 ϵ 相, 经历塑性波反射稀疏波第 1 次卸载后没有发生 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变; 第 3 种情况是第 1 次卸载材料即发生了 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变, 并形成了卸载冲击波 RSW. 本文针对 3 种不同情况分别开展了数值模拟, 结果见图 3. 对于第 1 种情况, 数值模拟结果与实验数据的对比表明, 第 1 次卸载后期的速度剖面形状明显与高压 ϵ 相比较高的声速不符合, 说明卸载波 R1 波后为高压 ϵ 相的可能性不大. 对于第 3 种情况, 假设卸载过程材料即发生了 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变, 数值模拟结果表明卸载过程将会出现逆相变引起的另一个卸载波结构 Rx, 但实验中并没有观察到这种现象, 说明该种情况发生的可能性亦不大. 针对第 2 种情况, 计算结果见图 3 模拟值, 计算结果的平台速度、卸载过程与实验数据基本符合, 说明发生该种情况的可能性极大 (第 2 道卸载波的波速略慢, 可能是由于本文采用简单的两相参数模型近似该逆相变过程, 而波速对混合相状态又非常敏感引起的). 综合分析数值模拟计算的 3 种情况, 初步认为 FeMnNi 飞片冲击加载后相组织结构为 $\alpha + \epsilon$ 混合相, 卸载过程中塑性波在自由面反射中心稀疏波使材料内压力降低, 但没能使材料发生逆转变, 剩余相变波 P2^R 在自由面反射中心稀疏波使材料发生 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变, 形成卸载冲击波 RSW.

为进一步证明上述分析的正确性, 本文结合等厚对称加载样品中应力波结构对该问题进行了更进一步的分析 (由于实验 #1 和实验 #2 加载压力基本相同, 实验 #1 飞片后自由面速度剖面结构与实验 #2 自由面结构相同). 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 α 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 α 相传播, 依据表 1 中 FeMnNi 合金低压 α 相的状态参数和式 (4) 及式 (5) 可得 P2^R 波速 D_{P2^R} 和 P2^R 波后应力 $\sigma_r = 4.8$ GPa.

进一步分析 P2^R 波后应力 σ_r 发现: 实验 #2 中 P2^R 波后应力 σ_r 为 4.8 GPa, 大于 FeMnNi 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 FeMnNi 合金逆相变阈值, 即 h_2 左侧区域样品处于 $\alpha + \epsilon$ 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 中 PIR 波后应力 σ_S 为 0.3 GPa, 远小于 FeMnNi 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 FeMnNi 合金逆相变阈值, 表明 h_2 左侧区域此时已完成了逆相变转变, 形成了卸载冲击波 RSW, 卸载波系结构可能为稀疏波 R1^R 后跟稀疏波 R2^R, 再后跟逆相变卸载冲击波 RSW 的三波结构. 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 区分开, 因此, 实验记录到的卸载历程极可能为稀疏波后跟卸载冲击波的二波结构, 与实验 #1 记录到的实验结果吻合. 上述分析从实验数据解读角度给出了飞片及样品中的加卸载波结构, 指出逆向加载实验 #1 记录到第 2 道卸载波确为 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变引发形成的卸载冲击波 RSW, 证明了上述数值模拟的正确性和可靠性.

对于等厚对称碰撞 FeMnNi 样品的层裂特性, 由式 (6) 计算的层裂片厚度 $\delta = 6.5$ mm, 略大于样品初始厚度, 表明 FeMnNi 合金样品没有发生完全层裂行为. 实验设计“软回收”装置对加载 FeMnNi 合金样品进行了回收, 宏观观测回收样品发现, 回收样品中存在部分微孔洞, 不过受载样品加载面和自由面完整, 样品没有形成完全层裂行为, 与自由面速度剖面波形分析结果一致.

$$\delta = C_L \Delta t / 2 \quad (6)$$

式中, $C_L = 5.919\text{km/s}$, $\Delta t = 1.06\mu\text{s}$ 分别为 FeMnNi 合金样品弹性纵波声速和样品自由面速度剖面卸载段振荡周期.

对回收样品进行 X 射线衍射和扫描电镜观测发现, 样品初始相组织为 α 相, 经历加卸载历程后相组织仍为 α 相, 没有发现高压 ϵ 相 (见图 5 和图 6). 将 X 射线衍射、扫描电镜观测结果与 VISAR 测试结果对比发现, 加载过程中样品发生了 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相转变, 但高压相组织 ϵ 相极其不稳定, 在卸载过程中样品又发生了 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆转变. 该结果与逆向加载实验分析结果一致.

另外, 本文数值模拟了 FeMnNi 合金样品的损伤分布 (图 7). 分析图 7 所示样品损伤分布发现, 样品中存在两个距撞击面分别约为 1.7mm 和 2.2mm 的损伤集中区, 即存在两个稀疏波形成的拉伸应力区, 说明样品存在形成二次层裂的物理机制, 样品中没能形成完全层裂的原因可能为卸载波形成的拉伸应力小于 FeMnNi 材料的层裂强度.

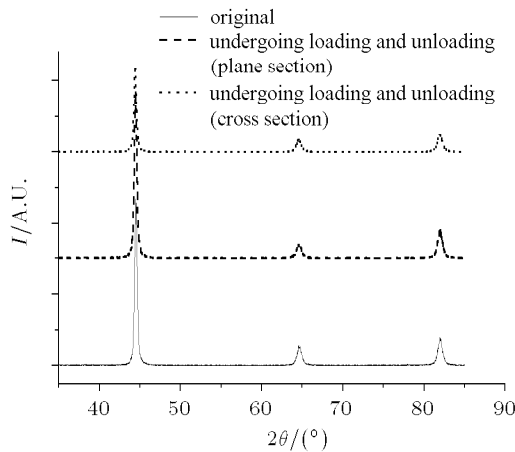
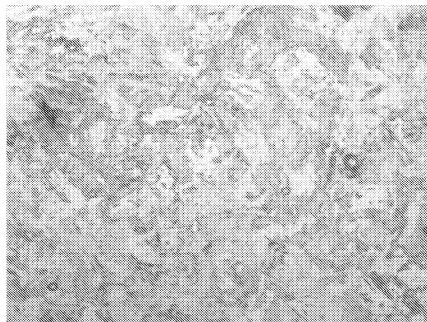


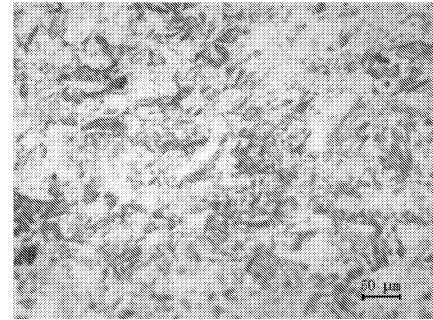
图 5 FeMnNi 合金样品加卸载前后 X 射线衍射图谱

Fig.5 X-ray diffraction pattern of original and undergoing loading and unloading in FeMnNi sample



(a) 原始金相组织

(a) Original



(b) 经历加卸载后金相组织

(b) Undergoing loading and unloading process

图 6 FeMnNi 样品的金相组织

Fig.6 Micrographs of FeMnNi alloy

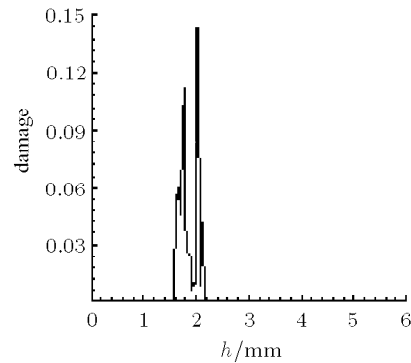


图 7 实验 #2 样品损伤分布

Fig.7 The damage distribution of sample in experiment #2

依据逆向加载实验 #1 和等厚对称加载实验 #2 的实验和数值模拟结果, 分析认为实验 #2 中 FeMnNi 合金样品中应力波的传播作用过程如图 8 所示 (忽略弹性波). 两个拉伸应力区形成机理分别为: 飞片后自由面反射稀疏波使样品发生逆相变引发的卸载冲击波 RSW^f 与样品中稀疏波 $R2^R$ 相遇

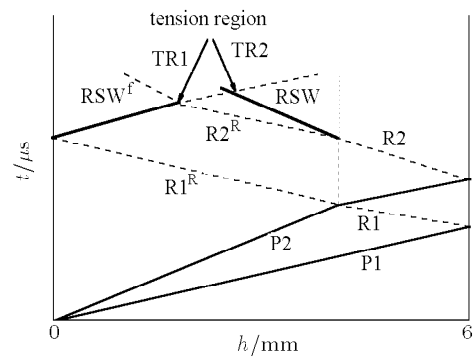


图 8 样品中应力波传播作用过程

Fig.8 Schematic diagram of stress wave interaction in the sample

形成靠近撞击面的第 1 个拉伸应力区 TR1; 逆相变引发卸载冲击波 RSW 与经过第 1 个拉伸应力区的稀疏波相互作用形成靠近自由面的第 2 个拉伸应力区 TR2.

3 结 论

本文通过等厚对称碰撞实验和逆向加载实验, 借助数值模拟分析, 在冲击加载压力下, 取得了如下认识:

(1) 揭示了 FeMnNi 合金含冲击相变和卸载逆相变的完整加卸载物理过程, 加载过程中样品发生 $\alpha \rightarrow \varepsilon$ 相转变, 相变阈值约为 6.8 GPa, 自由面呈现弹性波 E、塑性波 P1、相变波 P2 和驻定相边界反射压缩波 PIR 四波结构特征, 卸载过程中塑性波在自由面反射中心稀疏波使样品中压力降低, 但没能发生逆相变, 与塑性波反射稀疏波相互作用后的剩余相变波在自由面反射形成的中心稀疏波使样品完成 $\varepsilon \rightarrow \alpha$ 逆转变, 形成卸载冲击波 RSW, 逆相变阈值约为 4.2 GPa, 滞后相变阈值约 2.6 GPa, 呈现典型的马氏体相变滞后特征;

(2) 冲击相变强烈影响材料的层裂行为, 并从应力波相互作用角度初步指出冲击相变、卸载逆相变及其引起的应力波结构的改变是影响材料层裂行为的重要物理机制.

参 考 文 献

- 1 Bancroft D, Peterson EL, Minshall S. Polymorphism of iron at high pressure. *J Appl Phys*, 1956, 27(3): 291-298
- 2 Barker LM, Hollenbach RE. Shock wave study of the $\alpha \leftrightarrow \varepsilon$ phase transition in iron. *J Appl Phys*, 1974, 45 (11): 4872-4887
- 3 Veerer LR, Gray GT, Vorthman JE, et al. High pressure response of a high purity iron. In: Shock Compression of Condensed Matter. Utah: AIP Conference Proceeding, 2000, 505(1): 73-76
- 4 Voltz C, Buy F, Roy G. Iron damage and spalling behavior below and above shock induced $\alpha \leftrightarrow \beta$ phase transition. Shock Compression of Condensed Matter-2005, Proceeding of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Maryland, 2005. AIP Conf Proc, 2006, 845(1): 678-681
- 5 Voltz C, Roy G. Study of spalling for high purity iron below and above induced $\alpha \leftrightarrow \beta$ phase transition. Shock Compression of Condensed Matter-2003. Proceeding of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, New York, 2003, AIP Conf Proc, 2004, 706(1): 511-514
- 6 Tang Zhiping, Tang Xiaojun, Zhang Xinhua. Abnormal spall behavior observation in pure iron and FeMnNi alloy undergoing $\alpha \leftrightarrow \varepsilon$ phase transition. Shock Compression of Condensed Matter-2005. Proceeding of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Maryland, 2005. AIP Conf Proc, 2006, 845(1): 662-665
- 7 张新华, 唐志平, 徐薇薇等. FeMnNi 合金的冲击相变和层裂特性的实验研究. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 103-108 (Zhang Xinhua, Tang Zhiping, Xu Weiwei, et al. Experimental study on characteristics of shock-induced phase transition and spallation in FeMnNi alloy. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2): 103-108 (in Chinese))
- 8 经福谦. 实验方程物态导引. 北京: 科学出版社, 1999 (Jing Fuqian. Introduction to Experimental Equation of State. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese))
- 9 Hayes DB. Wave propagation in a condensed medium with N transforming phases: Application to solid-I-solid-II-liquid bismuth. *J Appl Phys*, 1975, 46: 3438-3445
- 10 Boettger JC, Wallace DC. Metastability and dynamic of the shock-induced phase transition in iron. *Phys Rev B*, 1997, 55(5): 2840-2849

(责任编辑: 陶彩军)

INFLUENCE OF PHASE TRANSITION ON SPALLING BEHAVIOR IN FEMNNI ALLOY¹⁾

Li Qingzhong* Chen Yongtao*,²⁾ Liu Wentao[†] Hu Haibo* Xu Yongbo**

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

†(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

*** (National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences,
Shenyang 110016, China)*

Abstract This paper provides an investigation of the phase transition and spalling characteristics induced by shock loading and unloading process in FeMnNi alloy through two symmetric impact experiments of same thickness and reverse impact technique. The experimental process is simulated successfully from the non-equilibrium two-phase model and the modified Boettger's model. The physical mechanisms of the shock phase transition and reverse transition as well as rarefaction shock wave formation are studied. A possible reason for the abnormal spalling phenomenon in the experiments is also discussed from the view of the interaction process of stress wave. It is found that the phase transition and reverse transition induced the spallation in the FeMnNi alloy samples.

Key words FeMnNi, phase transition, reverse transition, spallation, rarefaction shock wave

Received 17 July 2008, revised 26 May 2010.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10776032, 10902102) and Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (20060104, 2009B0201014).

2) E-mail: zhongli4909@163.com