

文章编号: 1001-1455(2009)06-0637-05

纯铁材料的冲击相变与“反常”层裂*

陈永涛¹, 唐小军¹, 李庆忠¹, 胡海波¹, 徐永波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. 中科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、X 射线衍射和金相处理联合测试分析技术, 开展等厚对称碰撞实验, 研究了纯铁材料的冲击相变与层裂行为特征。结果发现, 冲击加载压力大于纯铁材料相变阈值(13 GPa)时, 等厚对称碰撞样品发生“反常”2 次层裂。结合相关文献的实验结果, 从应力波相互作用的角度分析了“反常”层裂形成的原因, 指出纯铁材料的冲击相变和卸载逆转变及引发的稀疏冲击波是导致“反常”2 次层裂的物理机制。

关键词: 固体力学; 相变; 碰撞; 纯铁; 层裂

中图分类号: O346.4

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

纯铁及铁基材料的冲击相变及层裂特性近年来成为关注的焦点。1972 年, L. M. Barker 等^[1]对纯铁的相变层裂特性进行了系统研究; 1999 年, L. R. Veaser 等^[2-3]在文献[1]的基础上, 利用带窗的加载技术, 研究了纯铁材料的冲击加卸载历程, 引入了稀疏冲击波的概念; 2003~2005 年, C. Voltz 等^[4-5]指出, 纯铁材料的层裂行为可能与冲击相变行为存在某种关联。2007 年, 张兴华等^[6]在 FeMnNi 合金的冲击加载实验中发现了 2 次层裂和浅表层裂现象, 指出该现象可能与冲击相变有关。

以上研究关注的焦点主要集中在冲击相变与层裂行为的关联上。然而, 这些研究基本上为非等厚或非对称加载, 样品中应力波的传播作用过程相当复杂, 不利于分析冲击相变与层裂行为的关联机理。本文中拟开展等厚对称加载实验, 利用飞片和样品中应力波沿撞击面对称, 样品中应力波作用过程相对简单的优势, 参照文献[2-3]的部分实验结果, 揭示冲击相变与层裂的关联机理。

2 实验

在 $\varnothing 100$ mm 的一级轻气炮上进行了 2 发等厚对称碰撞实验(图 1)。飞片和样品均为纯铁材料, 尺寸均为 $\varnothing 95$ mm \times 6.28 mm。实验 1 的冲击速度为 455 m/s, 加载压力约 8.9 GPa。实验 2 的冲击速度为 848 m/s, 加载压力约 17.5 GPa。

实验 1 和实验 2 的冲击加载压力分别低于和高于纯铁材料的相变阈值, 双灵敏度 VISAR(100 m/s 和 250 m/s)记录样品自由面速度剖面, “软回收”装置回收受试样品, 宏观观测和细观表征回收样品, 研究纯铁材料的冲击相变和层裂行为特征。利用文献[2-3]中带蓝宝石窗口加载实验获得的纯铁材料的冲击加卸载历程, 从应力波相互作用的角度分析等厚对称碰撞实验中纯铁样品层裂形成的原因, 揭示冲击相变对层裂行为影响的

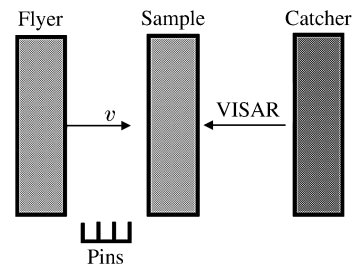


图 1 等厚对称加载实验装置示意图

Fig. 1 Schematic symmetric impact setup with the same-thickness flyer and sample

* 收稿日期: 2008-07-23; 修回日期: 2008-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(10776032, 10902102);

中国工程物理研究院发展基金项目(20060104, 2009B0201014)

作者简介: 陈永涛(1980—), 男, 硕士, 助理研究员。

物理机制。实验用纯铁材料与文献[2-3]中研究的纯铁材料成分基本相同,原始微观组织均为 α 相。纯铁材料的状态方程参数为 $\rho_0 = 7.85 \text{ g/cm}^3, c_0 = 4.63 \text{ km/s}, \lambda = 1.33$ 。蓝宝石的状态方程参数为 $\rho_0 = 3.95 \text{ g/cm}^3, c_0 = 11.90 \text{ km/s}, \lambda = 1.0$ 。

3 实验结果与分析

VISAR 记录的纯铁样品自由面速度剖面如图 2 所示。实验 1 冲击加载压力约 8.9 GPa,小于纯铁材料冲击相变阈值 13 GPa^[1-3],加载段呈现弹性波、塑性波 2 波结构,纯铁样品无冲击相变行为。实验 2 冲击加载压力极值约 17.5 GPa,大于纯铁材料冲击相变阈值 13 GPa,加载过程中样品发生 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相转变,加载段呈现弹性波 E、塑性波 P1、与塑性波反射稀疏波相互作用后的剩余相变波 P2,以及剩余相变波在 α 和 ϵ 相界发射的压缩波 PIR,样品中应力波结构如图 3 所示。

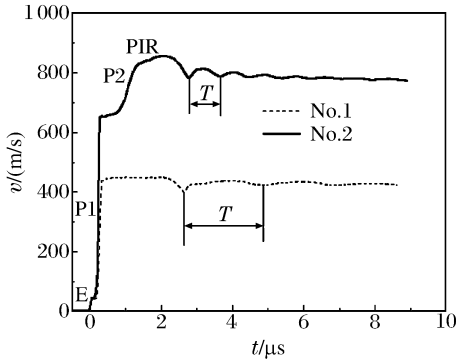


图 2 纯铁样品自由面速度剖面

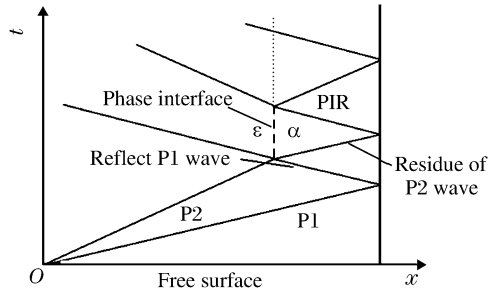


图 3 实验 2 纯铁样品中的应力波结构

Fig. 2 Free surface velocity histories of pure iron samples Fig. 3 Stress wave structure of the iron sample in No. 2

纯铁样品的冲击相变阈值由冲击间断方程得到,具体计算时作如下假设:(1)近似认为自由面速度为材料内部粒子速度的 2 倍^[7];(2)由于弹性波幅值相对较低,忽略弹性波的影响。冲击波间断方程为

$$\Delta\sigma = \rho_0 D \Delta u_p \tag{1}$$

式中: $\Delta\sigma$ 和 Δu_p 分别为冲击波前后的应力和粒子速度的改变, ρ_0 为纯铁样品初始密度,计算得到纯铁样品冲击相变阈值 $\sigma = 12.9 \text{ GPa}$,与文献[1-3]中的 13 GPa 吻合。层裂片厚度

$$\delta = c_0 T / 2 \tag{2}$$

式中: $c_0 = 4.63 \text{ km/s}$, T 为自由面速度剖面卸载段振荡周期,实验 1 自由面速度剖面卸载段振荡周期 $T = 2.7 \mu\text{s}$,实验 2 自由面速度剖面卸载段振荡周期 $T = 0.87 \mu\text{s}$ 。由式(2)计算得到实验 1 中样品层裂片厚度 $\delta = 6.26 \text{ mm}$,与样品初始厚度基本一致,说明样品没有发生层裂行为。实验 2 中纯铁样品层裂片厚度 $\delta = 2.02 \text{ mm}$ 。层裂强度

$$\sigma_s = \rho_0 c_0 \Delta u_s / 2 \tag{3}$$

式中:速度差 $\Delta u_s = 74.84 \text{ m/s}$ 。由式(3)计算得到实验 2 中纯铁样品层裂强度 $\sigma_s = 1.36 \text{ GPa}$ 。

回收纯铁样品宏观形貌见图 4。实验 1 中回收样品撞击面与自由面完整,说明纯铁样品无层裂,与

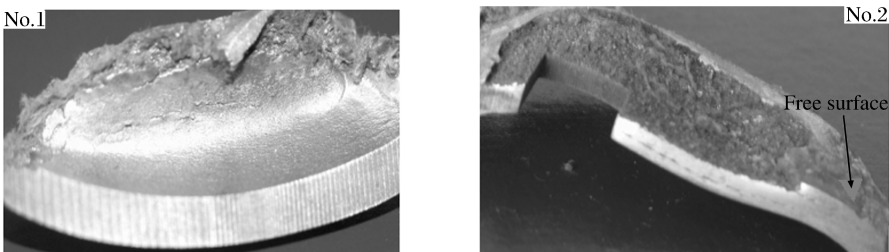


图 4 回收纯铁样品

Fig. 4 Recovered pure iron samples

自由面速度剖面波形分析结果一致。实验 2 回收样品发生 2 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)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。

采用 X 射线衍射和金相处理技术对回收样品的微观结构组织进行了分析，X 射线衍射结果见图 5，金相分析结果见图 6。其中，图 6(a)、(b)、(c)分别为未加载样品、实验 1 回收样品、实验 2 回收样品的金相组织结构。

分析图 5 中 X 射线衍射结果发现，经历冲击加卸载后回收样品的细观组织与初始结构相同，均为 α 相。分析图 6(b)实验 1 回收样品金相组织发现，由于冲击加卸载过程中材料的剪切效应，样品金相

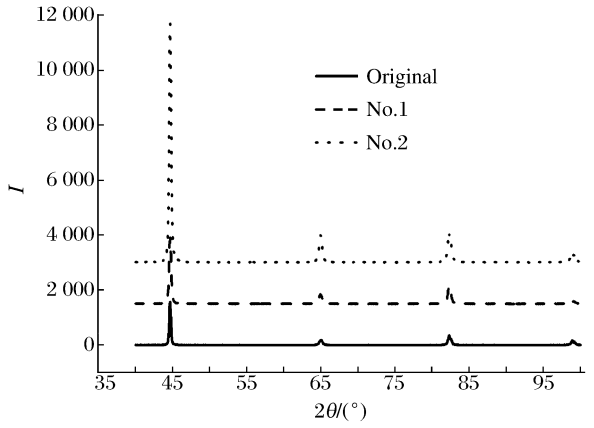


图 5 纯铁样品 X 射线衍射结果

Fig. 5 X-ray diffraction spectra of pure iron samples

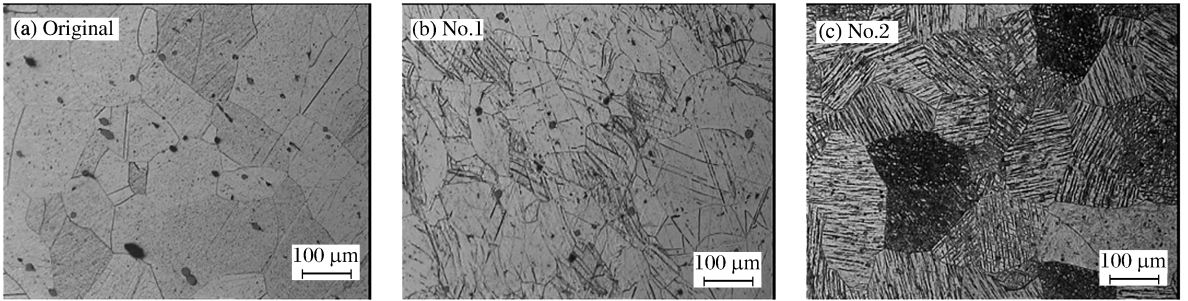


图 6 纯铁样品金相组织

Fig. 6 Micrographs of pure iron sample

组织中存在少量孪晶和滑移变形，但相组织仍为 α 相。分析图 6(c)回收样品金相组织发现，样品金相组织中存在大量孪晶和滑移变形(部分孪晶是由于冲击剪切产生，部分孪晶为透镜片状马氏体，与样品经历了 $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ 相变过程有关)，但相组织均为 α 相。与 VISAR 记录实验 1 和实验 2 中样品自由面速度剖面分析结果进行比较发现，实验 1 中纯铁样品在加载过程中无相变行为发生；实验 2 中纯铁样品在冲击加载过程中发生了 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相转变，但高压 ϵ 相极其不稳定，在卸载过程中发生了 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆转变行为。

文献[2-3]中实验装置结构为蓝宝石飞片/纯铁样品/蓝宝石窗，加载压力为 16.3 GPa，大于纯铁相变阈值 13 GPa，样品与窗口界面速度如图 7 所示。飞片/样品/窗口中应力波传播作用过程见图 8(弹性波幅值较小，分析中忽略其影响)。飞片与样品碰撞瞬间，纯铁样品发生 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相变，样品中产生右行冲

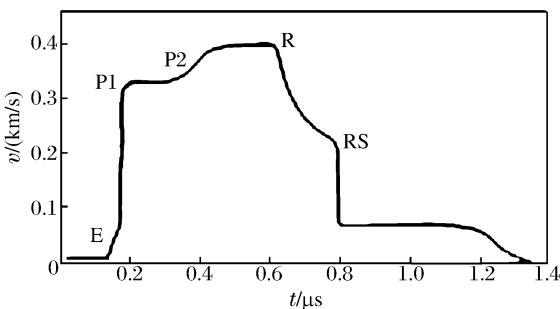


图 7 样品与窗口界面速度剖面^[2-3]

Fig. 7 Sample-window interface velocity

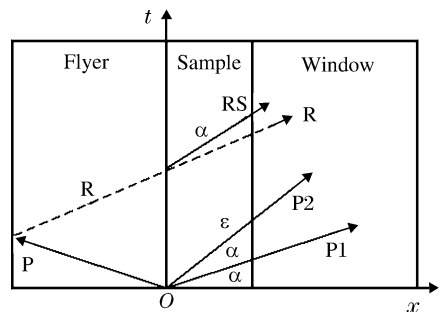


图 8 带窗加载实验波系作用图

Fig. 8 Schematic diagram of wave interaction

击波,飞片中左行冲击波在后自由面反射右行中心稀疏波传入样品时,样品内压力降低,样品发生 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变(与实验 2 中加载过程中纯铁样品发生 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相变,卸载过程中样品发生 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆转变分析结果吻合),形成稀疏冲击波 RS。

4 应力波系分析

对于等厚对称加载实验 1,由于冲击加载压力小于纯铁材料相变阈值,纯铁材料没有发生冲击相变,稀疏波在飞片与样品撞击面上相遇(弹性波幅值相对较小,忽略其影响),样品不可能发生层裂行为。

对于等厚对称加载实验 2,冲击加载压力大于纯铁材料相变阈值,加载过程中纯铁样品发生了 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相转变,卸载过程中纯铁样品发生了 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆相变,并引发形成了稀疏冲击波 RS。样品中应力波传播作用过程如图 9 所示(弹性波幅值相对较小,分析中忽略其影响),图中 $x_0 = 6.28 \text{ mm}$ 。样品中应力-粒子速度关系示意图见图 10。飞片后界面反射形成稀疏冲击波与逆相变引发稀疏冲击波 RS 在样品中相互作用形成 1 次层裂(8 区,靠近撞击面的层裂)。相变波 P2 与塑性波 P1 在样品自由面反射稀疏波 R1 相互作用后继续向右传播,在样品自由面反射形成稀疏波 R2,与经过第 1 个层裂面的右行稀疏波在样品内相遇并相互作用,导致纯铁样品发生 2 次层裂(9 区,靠近自由面的层裂)。图 10 的应力-粒子速度关系表明,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。

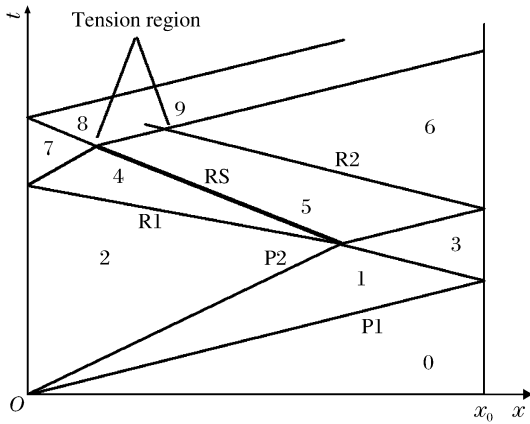


图 9 实验 2 中应力波传播作用图

Fig. 9 Schematic diagram of wave interaction in No. 2

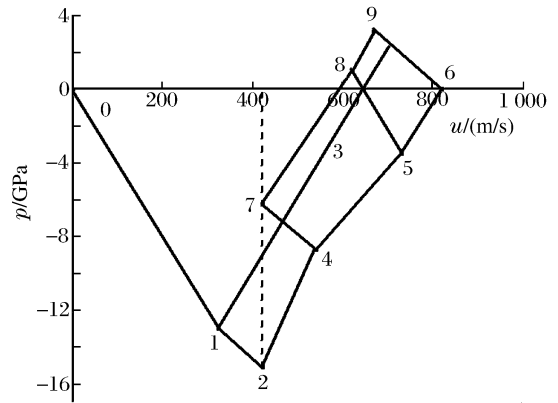


图 10 样品中应力-粒子速度关系图

Fig. 10 Stress versus particle velocity in the sample

5 结论

(1)冲击加载压力小于纯铁材料相变阈值时,纯铁样品无相变行为,等厚对称碰撞样品无层裂行为;冲击加载压力大于纯铁材料相变阈值时,加载过程中纯铁样品发生 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相转变,卸载过程中发生 $\epsilon \rightarrow \alpha$ 逆转变,形成稀疏冲击波 RS,等厚对称碰撞纯铁样品形成“反常”2 次层裂。

(2)纯铁样品发生“反常”2 次层裂的物理机制正是由于其发生了冲击相变和卸载逆转变。

参考文献:

[1] Barker L M, Hollenbach R E. Shock wave study of the $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ phase transition in iron[J]. Journal of Applied Physics, 1974,45(11):4872-4887.

[2] Veerer L R, Gray G T, Vorthman J E, et al. High pressure response of a high purity iron[C]// Shock Compression of Condensed Matter-1999. Utah: AIP Conference Proceeding, 1999:73-76.

[3] Veerer 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.

- [4] Voltz C, Roy G, Buy F. Iron damage and spalling behavior below and above induced $\alpha \leftrightarrow \beta$ phase transition[C]// Shock Compression of Condensed Matter. Maryland: AIP Conference Proceeding, 2005:678-681.
- [5] Voltz C, Roy G, Buy F. Study of spalling for high purity iron below and above induced $\alpha \leftrightarrow \beta$ phase transition[C]// Shock Compression of Condensed Matter. New York: AIP Conference Proceeding, 2003:511-514.
- [6] 张兴华,唐志平,唐小军,等. FeMnNi 合金的冲击相变和层裂特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 103-108.
ZHANG Xing-hua, TANG Zhi-ping, TANG Xiao-jun, et al. Experimental study on characteristics of shock-induced phase transition and spallation in FeMnNi alloy[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2): 103-108.
- [7] 王礼立. 应力波基础[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 41-42.

Phase transition and abnormal spallation in pure iron

CHEN Yong-tao^{1*}, TANG Xiao-jun¹, LI Qing-zhong¹,
HU Hai-bo¹, XU Yong-bo²

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

Abstract: An experimental setup, containing the pure iron flyer and sample with the same thickness, was applied to carry out symmetric impact tests on pure iron. The free-surface velocities of the pure iron samples were obtained by VISAR. The X-ray diffraction and metallographic examination of the recovered samples exhibit that abnormal multiple spalling behaviors happen in the pure iron samples as the impact pressure is above the phase transition pressure 13 GPa. By referring the experimental results by L. R. Veaser, et al, the spalling mechanism was explored by analyzing the interaction process of stress waves. It is found that the shock-induced phase transition, release-induced reverse phase transition and rarefaction shock wave lead to the abnormal (secondary) spalling phenomena in the pure iron samples.

Key words: solid mechanics; phase transition; impact; pure iron; spalling

* Corresponding author: CHEN Yong-tao
Telephone: 86-816-2485132

E-mail address: zhongli4909@163.com