文章编号：1000-5773(2008)01-0089-06

纯铁和铁基合金楔形样品中的冲击相变研究*

于锦泉，唐小军，袁 帅，胡海波

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900）

摘要：使用平面爆轰波起爆元件起爆 TNT 炸药，分别对 DT2 工业纯铁和 HR2 抗氢钢楔形样品进行了冲击加载实验。在回收样品中，DT2 纯铁表现为宏观不规则破坏，而 HR2 钢仅在样品内部沿加载面约 45°角和垂直方向出现了宏观裂纹。通过金相组织观察、显微硬度分布测量，结合数值计算，表明 DT2 纯铁样品在距加载面约 2 mm 范围内产生了不完全 $\alpha-\varepsilon$ 相变，在 HR2 钢中未发生相变。不完全相变可能是导致两种材料宏观破坏特征差异的因素。

关键词：冲击相变；DT2 工业纯铁；HR2 抗氢钢；金相分析；显微硬度

中图分类号：O521.2；O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

冲击相变是指材料在冲击波作用下产生的相转变。冲击相变研究是冲击波物理的重要研究方向，它关心材料在冲击加载下其结构和物态变化的临界现象和规律。自 1956 年 Minshall 等人[1]发现了铁在 13 GPa 压力下的 $\alpha-\varepsilon$ 多形性相变以来，国内外已经广泛开展了铁和铁基合金的冲击相变研究，如 Baker[2]和 Kozlov[3]等分别利用轻气炮加载及化爆加载手段对铁和铁基合金的冲击相变进行了研究。

对铁和铁基合金进行不规则构形（如楔形）下冲击相变对材料动态行为影响的研究，对于理解亚稳态相的性质以及材料中的不完全相变有着重要作用。2005 年，Kozlov 等人[4]对滑移爆轰加载下的楔形工业纯铁 DT2 样品进行了研究，爆轰加载装置如图 1 所示，将 DT2 工业纯铁楔形样品放置在有机玻璃支撑架上，炸药的爆轰波沿楔形样品表面传播。他们发现，样品只是在斜面部分发生了局部层裂，材料中明显存在几个不同的区域：(1) 材料无破坏区域，(2) 层裂开始区，(3) 层裂发展区域，(4) 加载表面-高能炸药接触面，(5) 满足 $\alpha-\varepsilon$ 相变条件的加载表面邻近区域，(6) 初始状态为 α 相、发生高应变率变形的材料区域。但是，这种滑移爆轰加载实验条件下的波系作用非常复杂，无法准确给出各区域宏细观变形破坏所对应的加载应力状态。

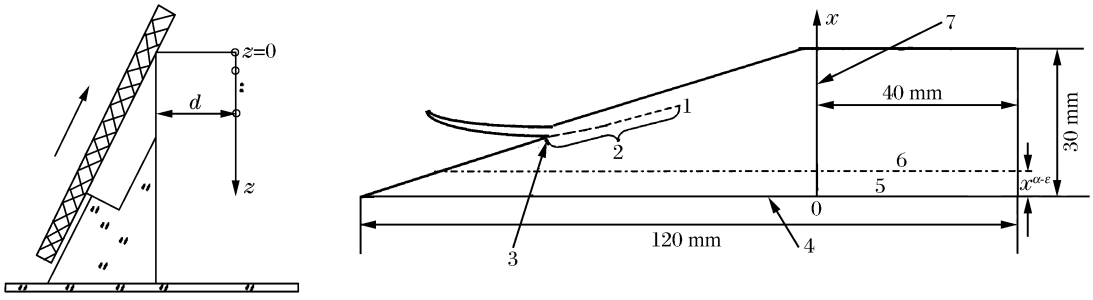


图 1 楔形样品滑移爆轰加载装置及实验结果示意图[4]

Fig. 1 Slip detonation loading experimental setup and results of cuneal sample[4]

* **收稿日期**：2007-01-03；**修回日期**：2007-03-10

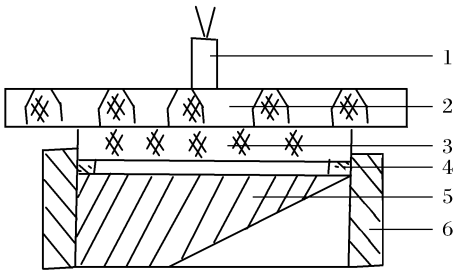
基金项目：中国工程物理研究院面上基金(20030102)

作者简介：于锦泉(1980—)，男，硕士，助理研究员，主要研究方向为冲击波物理. E-mail：tl_2n@126.com

基于上述研究,本工作使用平面爆轰波起爆元件起爆 TNT 炸药,分别对 DT2 工业纯铁和 HR2 抗氢钢楔性样品进行加载,实验后对样品进行了回收。从宏观和细观角度对其回收样品进行了初步观测与分析,并进行了相应的数值分析。

2 实验装置

实验装置如图 2 所示。楔形样品的顶角和厚度的选择与 Kozlov 等人所设计的滑移爆轰加载装置保持一致,具体尺寸为:顶角 24°,厚度 30 mm,直径 100 mm。在平面爆轰波起爆元件下紧贴着片状 TNT 炸药,炸药厚度为 5～10 mm。炸药和样品中间留有一个 1～3 mm 厚的空腔,以调整加载应力及波形。实验样品分别为 DT2 纯铁和 HR2 钢,DT2 纯铁和 HR2 钢样品中的最高压力约为 15 GPa。



1. Detonator; 2. Planar detonating wave component; 3. TNT; 4. Polymethyl methacrylate loop; 5. Cuneal sample; 6. Steel nest

图 2 楔形样品实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup

DT2 工业纯铁的化学成分主要是铁,含量在 99.50%～99.90%,含碳量在 0.04%以下,各种成分的质量分数见表 1。实验用样品均在 900 ℃的真空炉中进行了热处理,初始金相组织为 α 相。工业纯铁在成分和性能上与阿姆克铁极为相近。

HR2 抗氢钢在武器中有重要的应用,是一种重要的结构材料,其化学成分见表 2,材料在 1 050 ℃下进行了固溶处理,初始金相组织为 γ 相。

为了较好地回收实验样品,两发实验均采用填充浇注石蜡的面纱-水袋-细沙(自上而下)回收层的回收箱对样品进行回收。

表 1 工业纯铁化学成分表(除 Fe 外)

Table 1 Chemical composition of pure Fe (%)

w_C	w_{Si}	w_{Mn}	w_P	w_S	w_{Cr}	w_{Ni}	w_{Cu}
0.025	0.020	0.035	0.015	0.020	0.100	0.200	0.150

表 2 HR2 化学成分表(除 Fe 外)

Table 2 Chemical composition of HR2 (%)

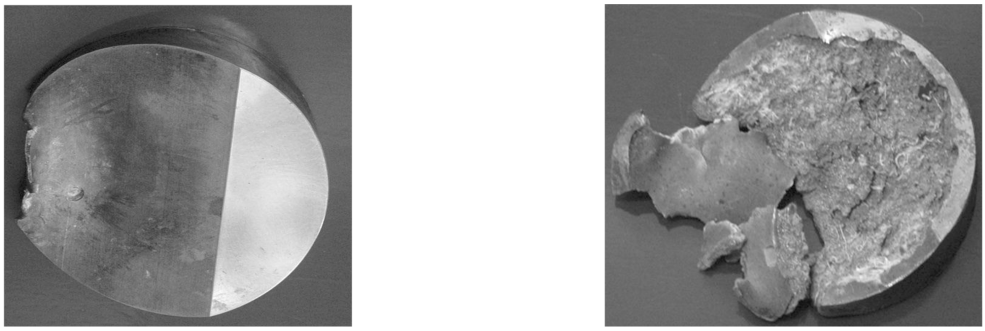
w_C	w_{Mn}	w_{Si}	w_S	w_P	w_{Ni}	w_{Cr}	w_N
0.029	9.290	0.280	0.005	0.015	7.660	20.060	0.310

3 回收样品宏观形貌分析

爆轰加载后回收到的 HR2 钢和 DT2 纯铁楔形样品的宏观形貌见图 3。HR2 钢除薄边卷起外,未见其它宏观破坏特征,宏观形貌与 Kozlov 等人的楔形样品的宏观形貌类似;DT2 工业纯铁则发生了崩落现象,各回收样品外观极不规则,崩落碎片平均厚度约为 3 mm。在轴向剖面上(见图 4),在 HR2 钢和 DT2 纯铁样品中均有与加载面约成 45°角或者近于垂直的裂纹。这些现象并未在 Kozlov 等人的实验结果中出现,出现这些差异的原因可能为加载方式之间的区别,平面爆轰加载面的应力高于滑移爆轰加载,从而平面爆轰加载对材料的破坏大于滑移爆轰加载。

利用 LS-DYNA 程序分别对 DT2 纯铁和 HR2 钢样品中的应力进行了计算,图 5、图 6 分别为 HR2 钢和 DT2 纯铁楔形样品中的应力分布计算结果。由图 5 和图 6 可以发现,楔形样品中的拉伸区域主要集中在加载面约为 45°角附近区域,这和回收的楔形样品的宏观形貌是一致的。计算结果表明,后侧稀疏波与斜面反射稀疏波相互作用是产生近 45°角和垂直裂纹的主要原因。然而,在计算中并未考虑材

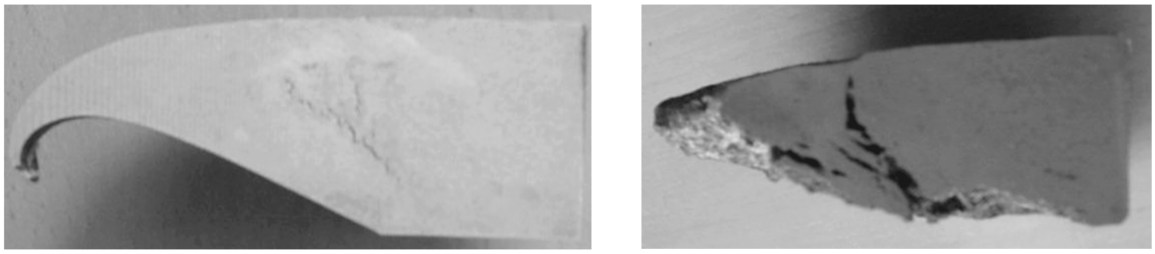
料的断裂和相变,因此计算结果和实验结果之间存在一定的差异,在 DT2 纯铁样品的计算结果中未能发现材料发生表面崩落现象的迹象(见图 6),这在一定程度上说明了冲击相变对材料的宏细观破坏特性有着重要的作用。



(a) HR2 steel　　(b) DT2 iron

图 3　楔形样品回收原貌

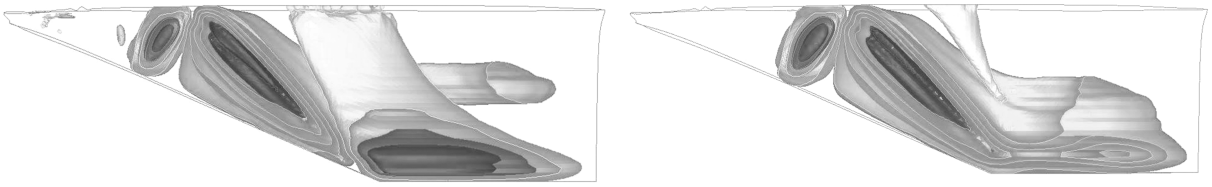
Fig. 3　Morphology of cuneal samples



(a) HR2 steel　　(b) DT2 iron

图 4　楔形样品实验后剖面宏观形貌

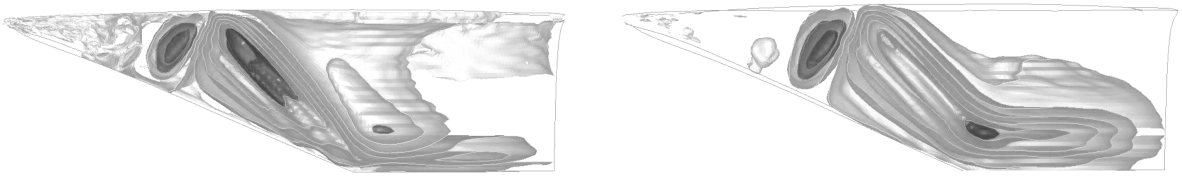
Fig. 4　Section appearance of cuneal samples



(a) $t=7.0\ \mu s$　　(b) $t=8.0\ \mu s$

图 5　HR2 钢样品实验计算图像

Fig. 5　Simulational image of HR2 steel sample



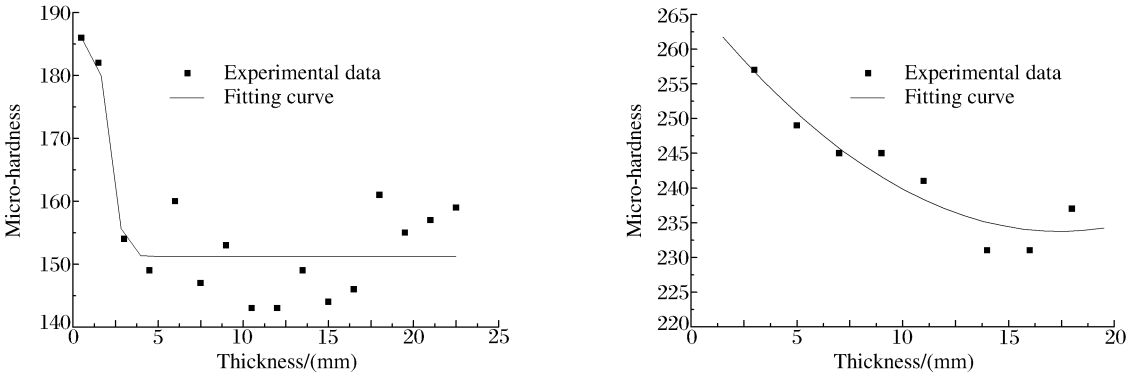
(a) $t=7.0\ \mu s$　　(b) $t=8.0\ \mu s$

图 6　DT2 纯铁样品实验计算图像

Fig. 6　Simulational image of DT2 iron sample

4 回收样品细观分析

采用维氏法对回收到的 DT2 工业纯铁和 HR2 钢实验样品进行了显微硬度分析，如图 7 所示，图中的方形黑点表示测试点的硬度值，曲线由方形黑点拟合得到。由硬度分布可以看出，DT2 纯铁回收样品的显微硬度沿轴向看，在碰撞面附近的硬度远高于其它位置，由于应变率和应变沿轴向连续变化，应变率硬化和应变硬化后材料的硬度亦连续变化，而相变发生时材料可以认为变成了另外一种材料，材料的硬度也发生了突变，因此可以判定 DT2 纯铁除了应变率、应变硬化外，可能还受到相变硬化的作用，由图 7(a)可以看出，发生相变的区域是在距加载面约 2 mm 的区域内。HR2 钢的显微硬度则显得较为连续，呈下凹的抛物线形状，材料仅受到应变率、应变硬化，材料中未发生明显的相变，这与轻气炮实验结果[5]中的在 10～17 GPa 加载强度下奥氏体 HR2 钢不发生冲击相变的结论是相符的。

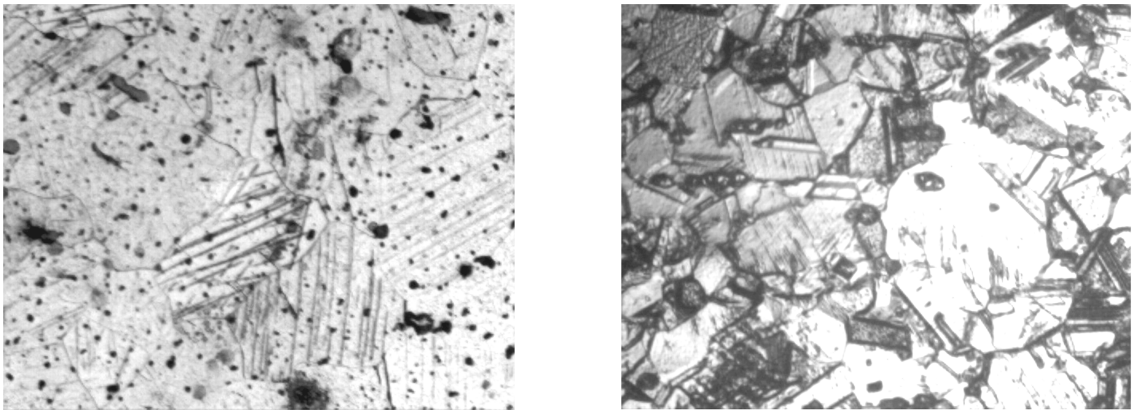


(a) DT2 iron (b) HR2 steel

图 7 显微硬度沿轴向位移的分布

Fig. 7 Axial microhardness

实验后对回收的 DT2 纯铁和 HR2 钢楔形样品的微观组织进行了相应的微观观测，典型的金相组织如图 8 所示。在 DT2 纯铁的回收样品中存在着少量的孪晶和滑移变形，大部分区域未发生明显的相变；HR2 钢的金相组织大部分仍然保持奥氏体结构。在 DT2 纯铁样品中没有观察到不同厚度处由于加载应力不同而造成的微观组织明显变化，也没有观察到 α-ε 相边界，究其原因可能主要在于本研究中使用的炸药较薄，爆轰波在样品中的衰减很快，致使 $\alpha-\varepsilon$ 相变发生区域较小(约为 2 mm)。而且，样品中的应力较低，相变速率较低，且相变区域中高于相变应力的维持时间较短，相变区域未发生完全的 $\alpha-\varepsilon$相变，因此在金相组织中无法观测到明显的 α 相与 ε 相的分界。

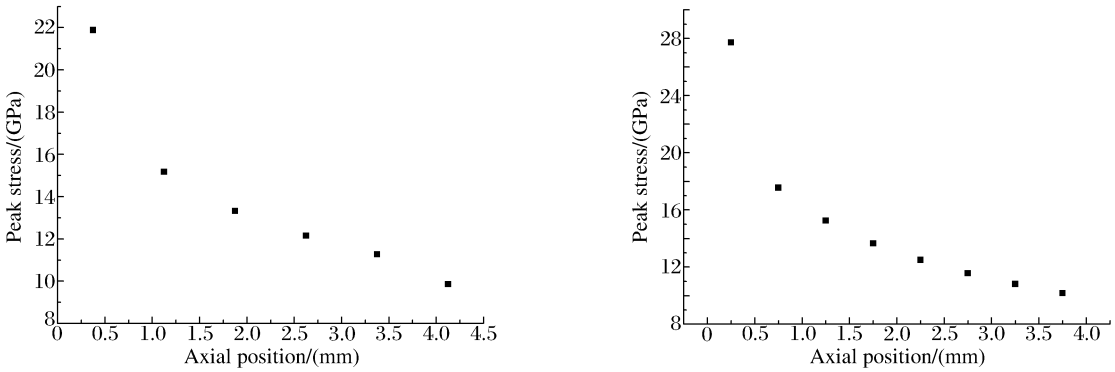


(a) DT2 iron (b) HR2 steel

图 8 楔形样品的金相组织(×100)

Fig. 8 Metallographic structure of cuneal sample(×100)

利用 LS-DYNA 程序还计算了实验加载条件下 HR2 钢和 DT2 纯铁楔形样品轴向位置的最大应力分布,计算结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,楔形样品中在加载面附近的最大应力急剧下降,HR2 钢楔形样品中最大应力的变化范围约为 10～28 GPa,DT2 纯铁楔形样品中最大应力的变化范围约为 10～22 GPa。由图 9(a)可以看出,在距加载面约 2 mm 处,DT2 纯铁楔形样品中的最大应力小于相变所需的压力(13 GPa)。由于在计算样品轴向最大应力分布时并未考虑材料中的相变,因此实际情况中 DT2 纯铁样品中轴向位置的最大应力衰减得更加迅速。这说明 DT2 楔形样品中可能发生相变的区域在加载面和距加载面约为 2 mm 之间的区域,这与显微硬度测量结果和金相分析结果相符合。



(a) DT2 iron　　(b) HR2 steel

图 9　楔形样品中轴向位置最大应力分布

Fig. 9　Axial peak stress of cuneal sample

5　结　论

使用平面爆轰波起爆元件起爆 TNT 炸药,分别对 DT2 工业纯铁和 HR2 抗氢钢楔性样品进行了冲击加载实验,对实验后的样品进行了回收,从宏观和细观角度对其回收样品进行了初步观测和计算分析。分析结果表明:

(1) 金相分析和显微硬度测量结果表明,在 HR2 抗氢钢的回收样品中未发现相变;

(2) 在 DT2 纯铁回收样品的金相组织中未发现明显的 α-ε 相边界,显微硬度测量结合 LY-DYNA 程序数值模拟计算,结果表明,DT2 纯铁样品中在加载面附近局部小范围内发生了不完全的 $\alpha-\varepsilon$ 相变;

(3) 轴向位置的最大应力计算进一步验证了在 DT2 纯铁样品中发生了局部相变,但未考虑相变的数值模拟结果未能再现 DT2 纯铁样品会出现宏观不规则崩落特征,冲击相变、甚至局部小范围的冲击相变可能对材料的宏细观破坏特性有着重要的作用。

由以上结论可见,构建含多形态相变的物态方程对于正确描述材料的断裂破坏行为具有极为现实的意义。

References:

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

[2] Barker L M, Hollenbach R E. Shock Wave of the Phase Transition in Iron [J]. J Appl Phys, 1974, 45(11): 4872.

[3] Kozlov E A. Macrokinetics of the $\alpha-\varepsilon$ Phase Transition in Steel 3 under Explosive Loading, First All-Union Symposium on Macrokinetics and Chemical Gas Dynamics [J]. Chernogolovka, 1984, 2(2): 52-53.

[4] Kozlov E A, Tarzhanov V I, Telichko V I, et al. Metastability and Incompleteness of $\alpha-\varepsilon$-Phase Transformation in Unalloyed Iron under Threshold Loading Pulses [A]//China-Russia Workshop on Shock Wave and Detonation Physics-2005 [C]. Mianyang, 2005: 115-120.

[5] 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 钢及几种铁基材料的冲击相变行为 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 115-120.

Shock Induced Phase Transition of Pure Iron and Fe-Based Alloy Cuneal Samples

YU Jin-Quan, TANG Xiao-Jun, YUAN Shuai, HU Hai-Bo

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

Abstract: Planar detonation wave was generated to load the DT2 iron and HR2 steel cuneal sample by detonating TNT. Macroscopical crack perpendicular or 45° angle to the load interface was found in recovered HR2 steel sample and irregular fracture at back surface was found in recovered DT2 iron sample. Metallographic structure observation, microhardness measurement of recovered sample and numerical simulation indicate that there was no shock-induced phase transition in HR2 steel but local incomplete phase transition in DT2 iron. The failure difference between the two materials may be caused by local incomplete phase transition.

Key words: shock induced phase transition; DT2 iron; HR2 steel; metallurgical analysis; microhardness