

文章编号: 1001-1455(2006)02-0115-06

HR2 钢及几种铁基材料的冲击相变行为*

唐小军¹, 胡海波¹, 李庆忠¹, 张兴华², 唐志平², 胡八一¹, 汤铁钢¹

(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实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 利用双灵敏度 VISAR 测量了抗氢钢 HR2、工业纯铁 DT2 和铁锰镍合金 FeMnNi 在一维应变冲击载荷下的自由面速度历史, 结合受载样品的回收分析对其动载行为和断裂表现进行了分析。研究表明, 在实验加载压力范围内 DT2 和 FeMnNi 样品的自由面速度历史呈现包括相变波在内的典型三波结构, 而对 HR2 钢, 尽管金相分析显示其加载前后样品的相组织已发生变化, 但速度剖面呈现的仅是典型的弹塑性双波结构。分析认为溶质材料成分和初始相组织是无相变波的主要原因。从冲击相变和卸载逆相变角度解释了在等厚靶碰撞时 DT2 和 FeMnNi 材料中出现的多重层裂、浅表层裂现象。

关键词: 固体力学; 冲击相变; 双灵敏度 VISAR; HR2 抗氢钢; 铁基材料; 自由面速度; 层裂

中图分类号: O347.4 **国标学科代码:** 130·15 **文献标志码:** A

1 引 言

铁及铁基材料因它们在工业和军事上的广泛应用而备受重视, 铁基材料在冲击加载下的相变及由相变引起的动载行为变化近几十年来一直是冲击波物理中的研究热点^[1~4]。本文的主要目标是研究抗氢钢 HR2 在相变压力附近的动载行为, 选取工业纯铁 DT2 和成份为 Fe-7.6%Mn-7.0%Ni 的铁锰镍合金 FeMnNi 作为研究的比对材料, 利用双灵敏度 VISAR 和样品回收方法研究上述三种材料在一维应变加载下的冲击相变与断裂行为。

2 实验装置

一维应变加载装置采用 $\varnothing 100$ mm 一级轻气炮^[5]。自由面速度采用条纹常数为 101、386 m/s/Fr 的双灵敏度 VISAR 进行测量。飞片和样品材料分别为 A3 钢、DT2、FeMnNi 和 HR2, 共做了 7 发实验, 状态参数见表 1。

表 1 实验状态参数

Table 1 Parameters for experimental conditions

实验号	飞片		样品		撞击速度/(m/s)	备 注
	材料	尺寸/mm	材料	尺寸/mm		
1	DT2	$\varnothing 95 \times 6.28$	DT2	$\varnothing 85 \times 6.28$	848.4	等厚撞击, 高于相变压力
2	DT2	$\varnothing 95 \times 6.28$	DT2	$\varnothing 85 \times 6.28$	455.7	等厚撞击, 低于相变压力
3	HR2	$\varnothing 95 \times 6.36$	HR2	$\varnothing 85 \times 6.38$	534.5	等厚撞击
4	HR2	$\varnothing 95 \times 6.38$	HR2	$\varnothing 85 \times 6.38$	683.0	等厚撞击
5	HR2	$\varnothing 95 \times 3.08$	HR2	$\varnothing 85 \times 6.38$	774.2	非等厚撞击, 拟观测层裂
6	A3 钢	$\varnothing 95 \times 4.78$	FeMnNi	$\varnothing 45 \times 8.00$	805.0	非对称碰撞, 拟观测层裂
7	A3 钢	$\varnothing 95 \times 4.80$	FeMnNi	$\varnothing 45 \times 9.94$	527.7	非对称碰撞, 拟观测层裂

* 收稿日期: 2005-01-12; 修回日期: 2006-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10176029); 中国工程物理研究院面上基金项目(20030102)

作者简介: 唐小军(1975—), 男, 硕士, 助理研究员。

3 实验结果及分析

3.1 实验波形及分析

各发实验有由 VISAR 测量得到的自由面速度历史曲线如图 1 所示,典型含相变波的三波结构的各特征量定义如图 2 所示,按此定义测得图 1 中各波形的对应特征量数据见表 2。

图 1 和表 2 显示,冲击加载压力低于 13 GPa 时,在 DT2 材料中只有弹塑性波剖面结构;冲击加载压力达到 17.3 GPa 时,得到了与文献[6~7]中相同的三波结构,相变平台宽度为 $0.58 \mu\text{s}$ 。图 1(c) 中的两发 FeMnNi 材料实验均得到了典型的三波结构,三波结构中的塑性波 p1 峰值速度随撞击速度增加而增加,相变平台宽度随撞击速度增加而变窄,说明冲击相变中存在明显的应变率效应[6~7];同时还发现 FeMnNi 材料的塑性波峰值速度较 DT2 的显著降低,这与铁基材料的相变点由于锰、镍等溶质元素加入而降低的预测一致[8]。

但在相当宽的加载强度(8.47 ~ 15.13 GPa)范围内 HR2 样品(见图 1(c))中均没有观察到三波波剖面结构,只有弹塑性双波结构。实验研究取得的 HR2 弹塑性波间的驰豫时间为 $0.16 \sim 0.25 \mu\text{s}$,与 DT2 和 FeMnNi 中相变波之前塑性波的驰豫时间相当,甚至更小,注意到 DT2 和 FeMnNi 中相变波的特征时间,说明对 HR2 也不太可能存在以阈值弥散展宽加载波前沿的方式存在的相变波。

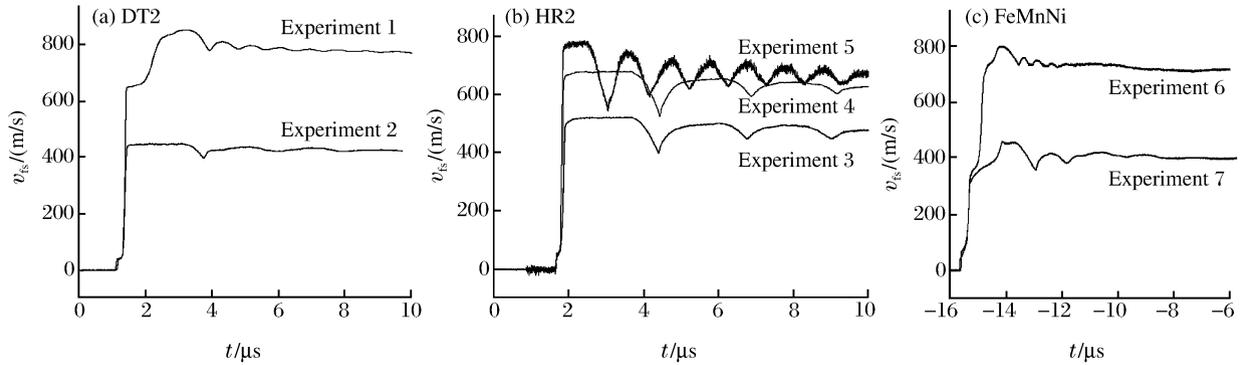


图 1 不同样品的自由面速度图

Fig. 1 Free-surface velocity profiles of the different samples

对 HR2 中相变波的存在,相关文献报导有两类预测。一般而言,与 HR2 同成份系列的合金的相变点大多会降到 13 GPa 以下,如本文实验中 FeMnNi 相变点的实测值已低于 7.0 GPa,成份最接近 HR2 的合金(Fe-20wt%Cr-8.5wt%Ni)的相变点实验测量值约 7.0 GPa[8]。而 M. B. 热尔诺科列托夫等[9]对成份类似 HR2 的 18X18H10T,在 $6.4 \text{ GPa} < p < 184 \text{ GPa}$ 内测得的冲击两贡组曲线上没有相变拐点。对与抗氢钢 HR2 成份接近的 12Cr18Ni10Ti,在 $10 \text{ GPa} \leq \sigma_{ox} \leq 56 \text{ GPa}$ 的冲击应力内,V. G. Vil'danov 等用锰铜传感器的测量结果表明,样品中应力波剖面前沿为双波结构,无铁基材料中典型的相变波。黄土辉等[10]亦测过类似 HR2 材料的冲击绝热线,在其自由面速度历史曲线上没有出现相变拐点,但因当时所用 VISAR 系统精度限制,不能肯定三波结构是否存在。从本实验中所用双灵敏度 VISAR 系统对 DT2 等比材料的测量结果看,测量方法对铁中典型的相变波有足够的识别能力;在对 HR2 样品的测量中,弹性前驱波和层裂等细节也被清楚记录;实验在多种应力条件下进行,均未观察到三波结构,所以可肯定 HR2 中相变波现象不存在。这与其中锰、镍等溶质元素比例份额有关,同时注意本实验中 HR2 样品初始相结构为固溶奥氏体(γ 相),所以对其他据称成分相近、但有相变波的实验中样品的初始状态及具体测试方法都还需仔细分析。

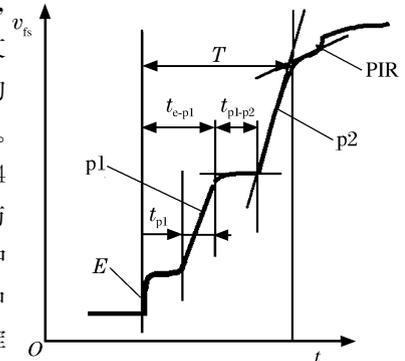


图 2 波前沿特征量示意图
Fig. 2 Schematic diagrams for the wave front

表 2 自由面速度曲线上各特征现象的测量结果

Table 2 Measured values of typical phenomena on free-surface velocity profiles

实验号	$v_{e\text{-speak}}/(m/s)$	$v_{p1\text{-speak}}/(m/s)$	$v_{p2\text{-speak}}/(m/s)$	相变初始应力/GPa	$T/\mu s$	$t_{e-p1}/\mu s$	$t_{p1-p2}/\mu s$	$t_{p1}/\mu s$
1	47.1	650.0	822.5	12.9	1.30	0.21	0.58	0.05
2	43.0	448.8	—	—	0.34	0.30	—	0.04
3	41.7	503.4	—	—	0.25	0.25	—	0.09
4	42.2	664.7	—	—	0.16	0.16	—	0.03
5	52.6	763.3	—	—	0.19	0.19	—	0.08
6	62.0	348.3	718.9	6.85	0.82	0.33	0.32	0.12
7	35.0	333.7	462.1	6.46	1.51	0.36	0.95	0.09

3.2 加载样品中层裂现象的观测与分析

通过自由面速度剖面计算和回收样品的观测结果列于表 3 中。非等厚撞击下 HR2 中层裂厚度与应力波计算的接近,而等厚撞击条件下,速度波形上和回收样品中均显示无层裂发生。

表 3 层裂及自由面速度波形特征参数

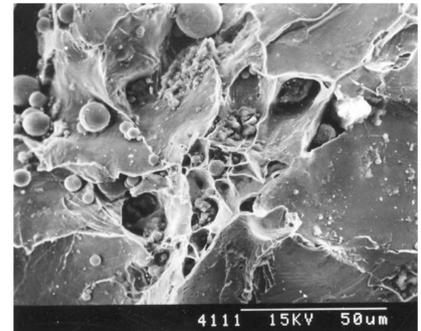
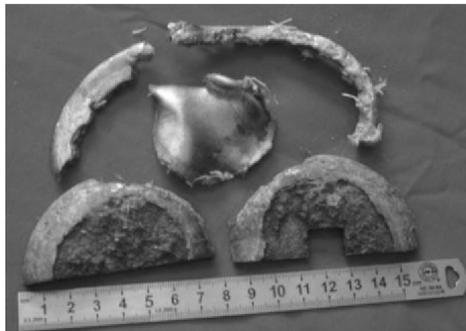
Table 3 Parameters for spallations and configurations of free-surface velocity profiles

实验号	样品	层裂片厚度/mm		层裂强度/GPa (速度波形计算)	波形结构
		速度波形计算	回收实测值		
1	DT2	2.02	~2.0	1.36	三波
2	DT2	无层裂信号	无层裂	—	双波
3	HR2	无层裂信号	无层裂	—	双波
4	HR2	无层裂信号	无层裂	—	双波
5	HR2	2.45	~2.5	3.76	双波
6	FeMnNi	1.26	层裂片破碎	1.55	三波
7	FeMnNi	3.33	层裂片破碎	2.47	三波

在等厚撞击 DT2 样品 (a) Recovered sample

(b) SEM micrograph of the section

实验系列中,在无相变波的碰撞实验(撞击速度为 455.7 m/s)中,自由面速度波形上和回收样品中均显示无层裂发生。而撞击速度为 848 m/s 时,自由面速度波形显示样品中发生了层裂,层裂强度为 1.36 GPa。为确认层裂现象,进行了相同速度(实测 847.0 m/s)下的回收实验。图 3 中回收样品形貌显示在样品自由面一侧浅表发生大面积层裂,厚度约 2.0 mm,断面粗糙有起伏,层裂面外观与光面层裂特征^[11]不符。金相照片显示断口呈解理特征为主、夹少量韧窝的形貌。此外,在距碰撞面约 2.0 mm 处有一条宏观上未断开的大面积层裂缝隙。这种二次层裂现象可能和卸载波中稀



(c) Two spallation positions on the section of the recovered sample

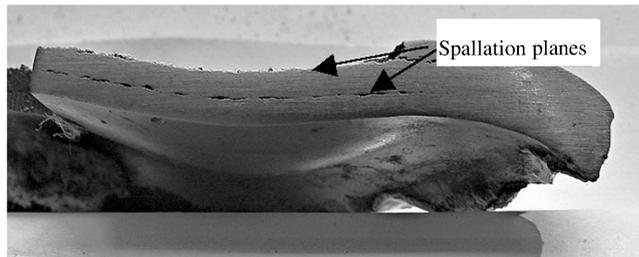


图 3 847.0 m/s 冲击速度下 DT2 回收样品形貌

Fig. 3 Recovered samples of DT2 under impact velocity of 847.0 m/s

疏冲击波形成有关,仅通过不考虑相变行为的应力波分析很难合理解释这一现象。

对 FeMnNi 样品,自由面速度波形上显示的层裂特征较复杂。两发实验从自由面速度波形计算的层裂片厚度约 1.3、3.3 mm,但远小于预期层裂厚度,对应的层裂强度分别为 1.55、2.47 GPa。实验样品破碎严重,内部可能发生多次层裂,但还需进一步实验证明。

3.3 样品加载前后的金相分析

对加载前后 DT2 和 HR2 实验样品进行了微观观测。由图 4 可以看到,实验前后 DT2 的金相组织有明显不同。其原始组织(见图 4(a))中,铁素体中有极少量的滑移变形,且含有一些杂质(图中大小不一的黑色斑点),经历了高于初始相变压力的加载过程后,铁素体中存在大量孪晶和滑移变形(见图 4(b)),这与 DT2 经历了 $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ 相变过程有关;而经过低于初始相变压力加载后的微观组织只存在少量孪晶和滑移变形(见图 4(c)),与图 4(b)有明显差别,与原始相相比较则没有质的区别。

(a) Original microstructure of DT2

(b) Microstructure of recovered DT2
under impact of 848.4 m/s

(c) Microstructure of recovered DT2
under impact of 455.7 m/s

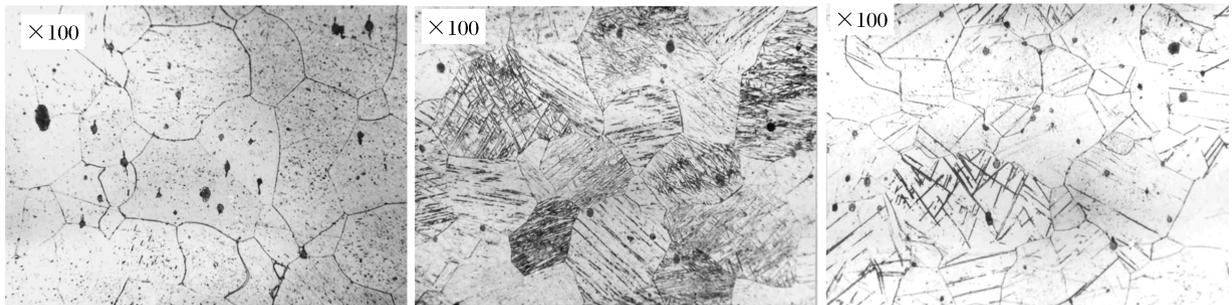


图 4 工业纯铁 DT2 的微观金相组织

Fig. 4 SEM of DT2

由图 5 看出,加载前 HR2 的初始微观金相组织为奥氏体晶粒(见图 5(a)),加载后其组织中(见图 5(b)、5(c))形成了少量孔洞和多系滑移变形,并有少量孪晶。结合图 1(c)中不同应力下测得的双波结构,说明 HR2 的微观组织变化并未以相变波形式反映在其动态特性上。此外,L. E. Murr 等^[12]在对与 HR2 成份相近的 304 不锈钢形变诱发马氏体相变研究中证明了马氏体相变的存在,观察到不同加载方式的应变状态对 α' 马氏体生成影响有明显差别。可见 HR2 的行为机制及其动态表现复杂,不同应力条件下的具体机制和物理模型还需深入研究。

(a) Original microstructure of HR2

(b) Microstructure of recovered
HR2 under impact of 683 m/s

(c) Microstructure of recovered HR2
under impact of 455.7 m/s

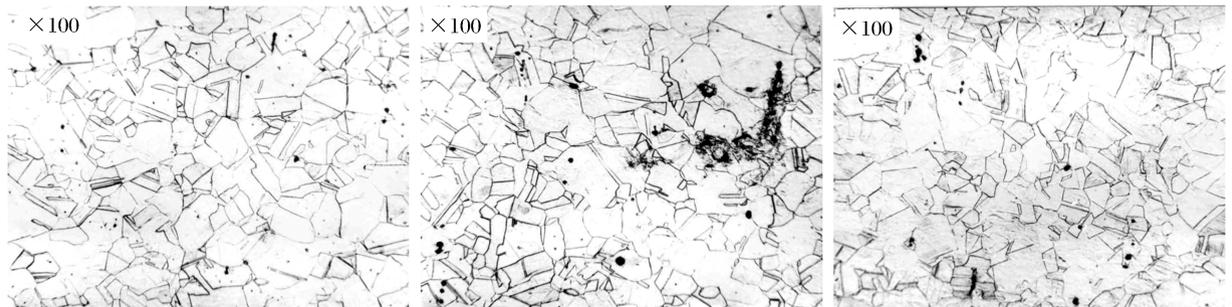


图 5 HR2 的微观金相组织

Fig. 5 SEM of HR2

4 结论

通过对三种铁基材料的实验研究,初步获得了以下认识:

(1) HR2 材料受成分和初始相组织影响,动载过程中材料相组织结构的变化信息没有反映到自由

面速度波形结构中;

(2)DT2 和 FeMnNi 中观测到了典型的弹性前驱波-塑性波-相变波三波结构,对应的相变压力在 DT2 中为 12.9 GPa,在 FeMnNi 中分别为 6.46、6.85 GPa。初始相变点(塑性波 p1 峰值速度点)随加载强度变化,呈现明显的应变率效应;

(3)在对称碰撞下 HR2 中无层裂现象,但对称碰撞下的 DT2 发生了浅表及二次层裂现象,在 FeMnNi 中也有类似的浅表层裂现象,这些差别均与冲击相变及卸载冲击波生成有关。

5 讨论

对抗氢钢 HR2 而言,在 DEFEL 程序中应用弹塑性流体模型和损伤判据试算,与实验 3~5 中的动态特性符合较好,由此看来似乎可用通常的弹塑性流体模型来描述其动载力学行为,包括其卸载行为。但 HR2 金相组织在动载过程中发生了变化,所以这类近似的等效物态方程并不完全对应真实物理过程,尤其在不同加载应力状态下,相变机制和结果会有严重差别,能近似描述一维力学响应的等效物态方程是否还照样适用,仍是一个需要研究的问题。

对于 DT2 和 FeMnNi,若对包括三波结构的动载行为和层裂现象进行描述,显然需专门构建能反映其多形态相变动力学的物态方程来描述材料断裂行为的影响。特别是描述某些相变体系更复杂的材料的断裂行为时,相变因素的考虑就显得越发重要。

感谢流体物理研究所的彭其先、刘乔、刘俊、马冬莉、邓向阳、袁淑云、马云、方茂林、陈智云、王为等在实验和结果分析中给予的合作和帮助,感谢华劲松、张世文、于锦泉在课题完成过程中的讨论。特别感谢西南交通大学的高国庆老师等在金相分析方面给予的大力协作。

参考文献:

- [1] Morris J P, Lomov I N. Numerical investigation into the performance of a rarefaction shock wave cutter for off-shore oil-gas platform removal[A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001[C]. Melville, New York: American Institute of Physics, 2002:287-290.
- [2] Petrovtsev A V, Bychenkov V A, Kovalenko G V. Numerical simulation of elastic-viscous-plastic properties, polymorphous transformations and spall fracture in iron[A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001[C]. Melville, New York: American Institute of Physics, 2002:591-594.
- [3] Dremov V V, Kutepov A L, Petrovtsev A V, et al. Equation of state and phase diagram of iron[A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001[C]. Melville, New York: American Institute of Physics, 2002:87-90.
- [4] Kadau K, Timothy C. Shock-induced structural phase transformations studied by large-scale molecular-dynamics simulations[A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001[C]. Melville, New York: American Institute of Physics, 2002:351-354.
- [5] 张林,张祖根,秦晓云,等. D6A、921 和 45 钢的动态破坏和低压冲击特性[J]. 高压物理学报,2003,17(4):305-310.
ZHANG Lin, ZHANG Zu-gen, QIN Xiao-yun, et al. Dynamic fracture and mechanical property of D6A,921 and 45 steels under low shock pressure[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003,17(4):305-310.
- [6] Barker L, Hollenbach R E. Shock wave study of the $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ phase transition in iron[J]. Journal of Applied Physics, 1974,45:4872-4887.
- [7] Veaser L R, Gray G T III, Vorthman J E, et al. 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]. American Institute of Physics, 2000:73-76.
- [8] 唐志平. 冲击相变基础[M]. 合肥:中国科技大学出版社,1992.
- [9] M. B. 热尔诺科列托夫, B. H. 祖巴列夫, P. Ф. 特鲁宁, 等. 高能量密度下凝聚介质的冲击压缩和绝热膨胀的实验数

据[M]. 韩均万, 译. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1997.

- [10] 黄土辉. 气炮加载下 HR2(2169)钢的动态特性研究[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1993.
- [11] Иванов А Г, Новиков С А, Тарасов Ю И. Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения[J]. Физика Твёрдого Тела, 1962, 4(1): 249—260.
- [12] Murr L E. 高应变率下的材料[M]. 唐志平, 译. 安徽: 中国科学技术大学, 1992.

Experimental studies on shock-induced phase transition in HR2 and other Fe-based materials

TANG Xiao-jun^{1*}, HU Hai-bo¹, LI Qing-zhong¹, ZHANG Xing-hua²,

TANG Zhi-ping², HU Ba-yi¹, TANG Tie-gang¹

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

2. Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: The free-surface velocity profiles of HR2, DT2 and FeMnNi under one-dimensional shock loading were measured by using double-sensitivity VISAR. Combined with the analysis of recovered fragments, dynamic behaviors and spallation phenomena of these materials were studied. Typical triple-wave configurations with phase transition were recorded in DT2 and FeMnNi, but only elastic-plastic double waves were observed in HR2, although the metallographic characters were changed after impact. Multi-spallation and shallow spallation phenomena of DT2 and FeMnNi under homo-thickness target impact were discussed.

Key words: solid mechanics; shock-induced phase transition; double-sensitivity VISAR; HR2 steel; Fe-based material; free surface velocity; spallation

* Corresponding author: TANG Xiao-jun
E-mail address: 101txj@163.com
Telephone: 0816-2485129