文章编号：1000-5773(2009)01-0017-07

相变引起金属靶板异常层裂的应力波分析*

徐薇薇，唐志平，张兴华

（中国科学技术大学，中国科学院材料力学行为和设计重点实验室，安徽合肥 230027）

摘要：采用唐志平等提出的一种简单混合相相变本构模型，运用特征线分析方法，通过对靶板中弹塑性波和宏观相边界传播情况的分析，对一些异常层裂现象产生的机理给出了理论解释。分析表明，(逆)相变过程的发生会强烈地改变靶板中的冲击波波形，形成所谓的三波结构和稀疏冲击波，板中某些位置还可能出现驻定相边界，各波系间的相互作用更加复杂，从而可能导致一些特殊层裂现象的发生。

关键词：相边界；异常层裂；特征线法；等厚对称碰撞；浅表层裂

中图分类号：O347.4 **文献标识码**：A

1 引 言

自 Hopkinson 以来[1]，层裂问题的研究至今已历时近一个世纪，然而，平板碰撞层裂的实验和理论分析仍相当活跃。根据层裂发生的原理，平板等厚对称碰撞条件下是不可能出现层裂现象的，故平板层裂实验一般以较薄的飞片撞击靶板，靶板产生的主层裂片的厚度一般接近飞片厚度。然而最近，唐小军等[2]在对工业纯铁 DT2 的平板等厚对称碰撞实验中，首次观察到了靶板的层裂现象。张兴华等[3]在对 FeMnNi 合金的非等厚碰撞实验中，则发现了多重层裂和浅表层裂现象。这些特殊现象用传统的弹塑性波理论难以解释，应该是冲击相变的影响，但是尚未给出定量的分析。

相变是一种普遍的临界现象。材料在强冲击载荷下发生相变能严重地改变材料和结构的动态特性，Shockey 等[4-5]的研究表明，相变对于层裂和开坑效应有重大的影响。近年来国内外学者关于相变对层裂影响的研究工作也不断见诸报道[6-10]，但主要集中在层裂强度方面。

本工作采用涉及相变的应力波理论，分析和模拟冲击条件下加、卸载相变波和弹塑性应力波的相互作用，试图探索上述异常层裂的可能性和条件，更好地认识其产生机理。

2 纯铁 DT2 和 FeMnNi 合金层裂结果简介

文献[2-3]给出，在样品的相变压力幅值(纯铁 DT2 是 13 GPa，FeMnNi 是 6.2～7 GPa)以下的撞击实验中，纯铁的等厚对称碰撞未发生层裂，FeMnNi 样品的层裂厚度与 A3 钢飞片厚度基本相同，属于正常现象。当冲击应力高于相应的相变应力后，则开始产生异常层裂现象(见表 1)。(1) 纯铁的等厚对称碰撞发生了层裂，这一结果由样品自由面 VISAR 记录的粒子速度波形和回收样品得到确认。回收样品表明，样品自由面一侧约 2.0 mm 处发生完全层裂，在距碰撞面约 2.0 mm 处另有一条宏观上未断开的层裂缝隙。(2) 对于 FeMnNi 样品，有两点变化：首先，靠近自由面的层裂片厚度远小于飞片厚度，而且随着撞击速度的提高，层裂片厚度变得愈来愈薄(飞片速度 524 m/s 时厚 3.28 mm，飞片速度

* **收稿日期**：2007-12-20；**修回日期**：2008-03-10

基金项目：国家自然科学基金(10672158)

作者简介：徐薇薇(1980—)，女，博士研究生，主要研究方向为动载下相变材料结构的力学响应研究.
E-mail：wwxu@mail.ustc.edu.cn

805 m/s时厚 1.29 mm);其次,回收样品表明产生了多次层裂,不同层裂面粗糙度明显不同,表明断裂过程有差异,其中 805 m/s 的实验由于样品严重破碎未回收到完整样品。正如文献[2-3]所指出的,以上现象明显与冲击相变有关。

表 1 异常层裂实验结果[2-3]

Table 1 Experimental results of abnormal spallation[2-3]

No.	Structure: flyer/target		Impact velocity /(m/s)	Peak stress /(GPa)	Thickness of spalled layer /(mm)		Spall strength /(GPa)
	Materials	Thickness /(mm)			From wave profile	From recovered sample	
1#	DT2/DT2	6.28/6.28	848.4	−14.5	2.02	≈2.0	1.3
2#	A3 Steel/FeMnNi	4.80/9.94	524.0	−9.3	3.28	3.2,2.0	1.9
3#	A3 Steel/FeMnNi	4.78/8.00	805.0	−13.7	1.29	—	1.2

3 本构模型和简化假定

采用 Tang 等[11-12]提出的 CdS 材料的冲击相变本构模型(图 1),各相区均用线性近似,该模型对混合相和逆相变均有较好地描述。图中 OB 段为纯Ⅰ相变形段,模量为 E_1,EF 为纯Ⅱ相变形段,模量为 E_2,B 和 E 分别为正相变起始点和完成点,R 和 W 分别为逆相变起始点和完成点,它们对应的应力阈值分别记为 σ_B、σ_E、σ_R 和 σ_W,BE 的斜率为 K_1,RW 的斜率为 K_2。F 点为 OB 延长线与 EF 的交点。本文中以拉为正,图 1 中纵向应力 σ 和应变 ε 加负号表示受压。

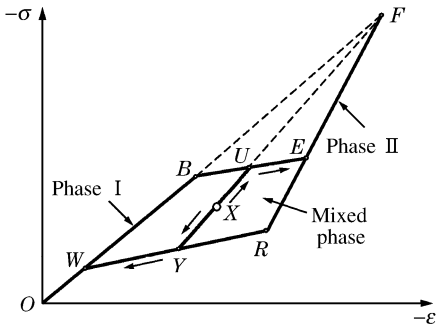


图 1 一级可逆相变材料的加卸载曲线

Fig. 1 Loading and unloading curves of materials undergoing reversible phase transition

对处于混合相区 $BERW$ 中的任意一点 X,其应力、应变状态为(σ_1,ε_1),其加、卸载路径首先沿直线 XF,加载时到达 U 点后沿 UE 继续相变,卸载时到达 Y 点后沿 YW 继续逆相变。具体数学表达式可参见文献[13]。

本工作中纯铁和 A3 钢的冲击绝热线近似取 Armco 铁的曲线[14],FeMnNi 合金的 Hugoniot 线引自文献[3],并作如下假定:(1) 忽略弹性前驱波的影响;(2) 本构中各相区均作线性简化;(3) 由于文献[3]中 FeMnNi 合金的卸载路径未知,依照 Armco 铁,人为假定其逆相变起始应力低于相变起始应力约 3 GPa,不妨假定为−3.2 GPa,同时假定逆相变终止应力为−1.6 GPa。根据以上假定得到的图 1 所示的简化本构关系中各参数的值列于表 2。

表 2 计算采用的纯铁和 FeMnNi 合金相变材料参数

Table 2 Material parameters applied for calculation

Materials	σ_B /(GPa)	σ_E /(GPa)	σ_R /(GPa)	σ_W /(GPa)	σ_F /(GPa)	E_1 /(GPa)	E_2 /(GPa)	K_1 /(GPa)	K_2 /(GPa)
Pure Iron DT2, A3 Steel	−13	−13.2	−9.8	−7.4	−42.0	203	302	4.3	36
FeMnNi(2#)	−6.3	−6.5	−3.2	−1.6	−26.4	194	304	5.2	31
FeMnNi(3#)	−6.9	−8.0	−3.2	−1.6	−26.1	194	304	27.9	31

4 冲击相变对层裂影响的应力波分析

由上述模型,纯Ⅰ、纯Ⅱ相的加、卸载波等同弹性波(实质上加载应为塑性波,卸载应为中心稀疏

波),在图 2～图 4 中,用细实线表示加载塑性波,短细虚线表示卸载稀疏波;相变和逆相变将产生加载和卸载相变冲击,下文称为加、卸载相边界,分别用粗实线和粗虚线表示;长细虚线表示反向拉伸加载。

4.1　纯铁等厚对称碰撞

飞片和靶板材料均为纯铁(密度 7 870 kg/m^3),厚 6.28 mm,其它参数见表 2。

在实验 1 的条件下,飞片以 848.4 m/s 的速度撞击靶板,碰撞压力－14.5 GPa,超过了铁的 $\alpha-\varepsilon$ 相变的压力。该问题可由应力波理论求得解析解[15]。由于完全对称,仅对靶板进行分析。

图 2(a)为波系在时空域内的传播和相互作用图,图 2(b)给出了图 2(a)中各区在应力-速度域内所对应的状态,图 2(c)是实验测得的自由面粒子速度波形。靶板被来自左方的飞片高速撞击后,撞击端产生一道右行加载塑性波 0-1,和一道右行加载相边界 1-2。相边界在 A 点与自由面反射的左行卸载波 1-3 相遇后被迎面卸载,由于波 1-3 卸载幅度较大,2 区材料将发生完全的逆相变。A 点作用结果将向右透射一道弱化的塑性加载波 3-5,和左行的两道卸载波:卸载稀疏波 2-4 和卸载相边界 4-5。卸载波2-4至碰撞面反射,产生卸载相边界 4-7,与左行的卸载相边界 4-5 在 C 处相遇后,向左、向右分别传播一道卸载相边界 7-8 和一道卸载波 5-8,该卸载波与自由面反射的左行卸载波 5-6 在 F 点相遇后,在 9 区将产生较大的拉伸应力(约 2.76 GPa),材料将迅速断裂产生层裂箔片,并形成新的自由面。自 C 点出发的左行卸载相边界传播至撞击面(E 处)后,应力卸载为零,飞片和靶板自此分离;右行卸载波 8-10 与左行卸载波在 G 处相遇后也进入应力拉伸区(11 区)。经计算,11 区的拉伸应力(约 1.24 GPa)在拉伸强度附近,不足以造成如第一次层裂那样的完全破坏,但可能使材料局部产生损伤裂纹。经过计算,两次层裂位置分别距靶板右自由面为 3.2 mm 和4.2 mm,与实验中测到的2.0 mm 和 4.3 mm 比较,计算的第一次层裂位置偏左约 1.2 mm,第二次层裂位置与实验观测符合较好。计算产生偏差的原因将在后文中讨论。从以上的分析可见,如果材料在加、卸载时发生了相变/逆相变,加、卸载波会分裂为两道波,加之界面(板两端面)的影响,板中波系传播图案较复杂,可能导致等厚对称撞击的平板发生层裂现象。

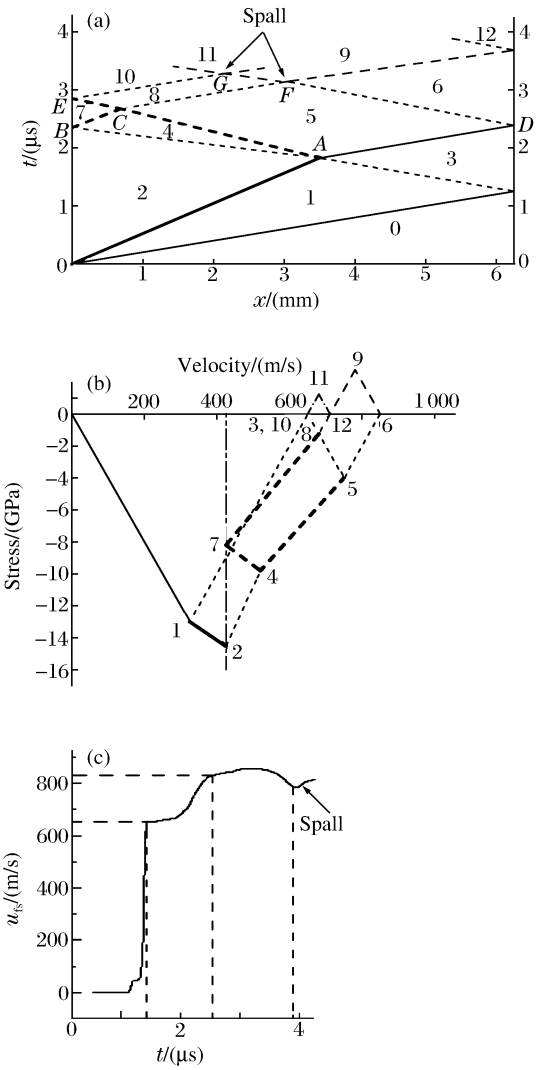


图 2　实验 1 条件下靶板中的波系图

Fig. 2　Wave interaction pattern in the target for experiment No. 1

4.2　FeMnNi 合金

几何尺寸与实验一致,飞片和靶板分别为 A3 钢和 FeMnNi 合金(密度 7 895 kg/m^3),其它材料参数见表 2。

4.2.1　飞片速度 524 m/s(实验 2)

在实验 2 中,飞片以 524 m/s 的速度撞击靶板,产生的最高冲击应力为－9.3 GPa,高于 FeMnNi 合金的相变应力,但低于 A3 钢的相变压力。运用应力波理论求得的解析计算结果示于图 3,图的含义同

图 2,其中线 ξ 表示驻定相边界。靶板受飞片撞击后,产生右行加载塑性波 0-2 和加载相边界 2-3,相边界与自由面反射的左行卸载波 2-5 在 A 点相遇后被迎面卸载,产生左行卸载波 3-8_l 和右行加载波 5-8_r。由于 3 区应力较大,卸载波3-8_l不足以使其发生逆相变,因而在 A 处将形成一个驻定相边界 8_l-8_r,两侧材料分别处于Ⅱ相(ε 相)和Ⅰ相(α 相),加载波 5-8_r 行至右自由面后反射一道左行卸载波8_r-9。飞片中加载波 1-3 左行至自由面后,反射卸载波 3-4 右行至撞击面,由于卸载后应力幅值为零,低于靶板材料的逆相变点,将分裂为两道卸载波:卸载稀疏波 3-6 和卸载相边界 6-7,这两道卸载波与靶板自由面反射的卸载波 3-8_l 依次相遇后在 12 区进入应力拉伸状态,拉伸应力(3.7 GPa)超过了靶板的拉伸强度,将发生层裂。几乎同一时刻,右行卸载波 8_l-10_l-11与靶板自由面反射的左行卸载波 8_r-9 依次相遇卸载,在 14 区产生大的拉伸应力(3.5 GPa),靶板中出现第 2 次层裂。由于靶板中材料相变和逆相变的发生,飞片通过撞击面传入靶板的卸载波分裂为两道:卸载波 3-6 和相边界 6-7;从靶板右自由面反射的卸载波也增至两道:卸载波2-5 和 8_r-9,正是 8_r-9 波导致了第 2 次层裂的发生,层裂位置比一般意义上的层裂位置距靶板自由面更近,这是靶板材料在发生了相变的情况下所特有的。经计算,两次层裂的位置分别距靶板自由面约2.7 mm 和 5.9 mm,与实验测到的 3.2 mm 和 5.2 mm相比,分别偏右 0.5 mm 和偏左 0.7 mm。计算产生偏差的原因将在后文中讨论。

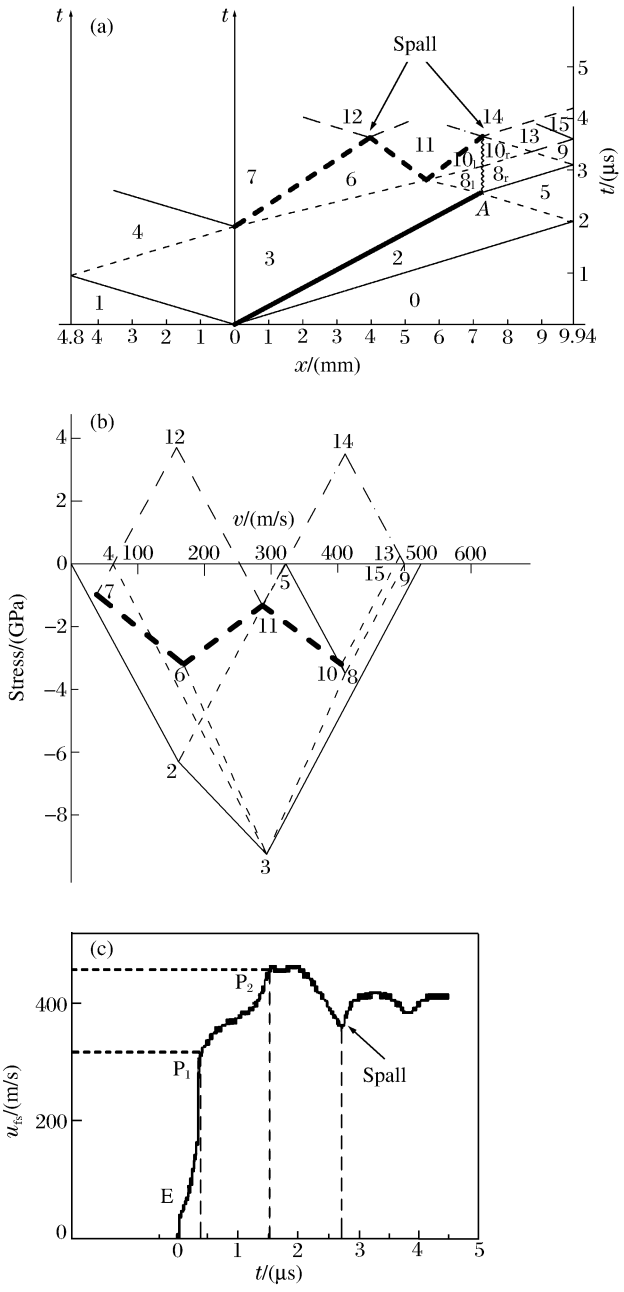


图 3 实验 2 条件下飞片和靶板中的波系图

Fig. 3 Wave interaction pattern in the flyer and target for experiment No. 2

张兴华等对实验 2 的回收试样进行了显微观察,发现靠近自由面的层裂面粗糙,靠近撞击端的层裂面较光滑[3]。这一现象通过对图 3 中的波形分析可以得到解释:由于逆相变的发生,两道卸载相边界 6-7 与 6-11 相遇,使 12 区内瞬时产生大的拉应力,材料迅速断裂,由此产生的层裂面比较光滑;而靠近自由面的 14 区是由右行卸载相边界 10_l-11 与从右侧自由面反射的卸载波 10_r-13 相遇产生拉应力导致的层裂,由于卸载波 10_r-13 是中心稀疏波,因而尽管 14 区能达到较大的拉伸应力,其断裂却是一个相对缓慢的过程,由此产生的断裂面也比较粗糙。此外,相变造成的材料温升可能也是一方面原因,铁已知当温度升高时显示韧性破坏,如果假定 FeMnNi 也有类似的特性,从图 3的分析可知,靶板中 12 区处于相变区中心,而 14 区处于驻定相边界附近,12 区的温升应高于 14 区,这也将利于该处产生较光滑的韧性破坏。

4.2.2　飞片速度 805 m/s(实验 3)

实验 3 中,撞击最高应力达到－13.7 GPa,超过了 A3 钢的相变应力,飞片和靶板中均发生了相变,分析过程类似于 4.2.1 节所述,示于图 4,图的含义同图 3。靶板受飞片撞击后,产生右行加载塑性波 0-2 和加载相边界 2-4,类似地,相边界与自由面反射的左行卸载波 2-5 在 A 点相遇后被迎面卸载,向左透射一道卸载塑性波 4-6_l,并在该处形成一个驻定相边界 6_l-6_r。自 A 点出发的右行加载波 5-6_r 在自由面反射卸载波 6_r-8,该波左行至驻定相边界后将向左透射一道卸载塑性波 6_l-7 和一道卸载相边界 7-9,同时反射加载波 8-9。加载波 8-9 右行至自由面将反射卸载波 9-10。至此,靶板中加载波右行至右自由面后将反射 3 簇卸载波:4-6_l、6_l-7-9 和 9-10。

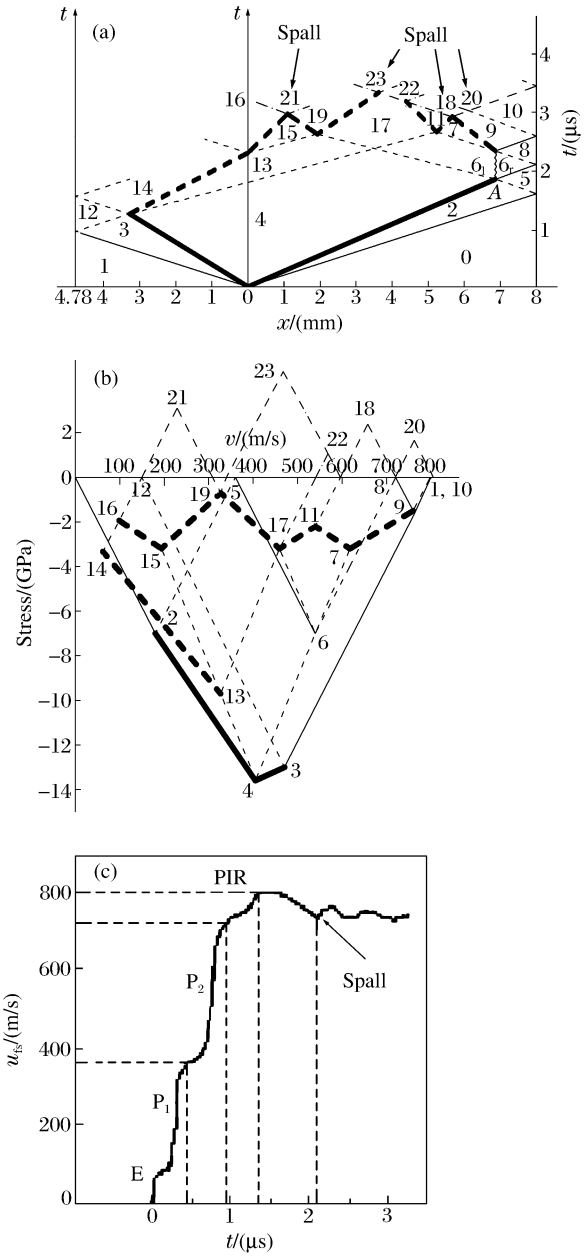


图 4　实验 3 条件下飞片和靶板中的波系图

Fig. 4　Wave interaction pattern in the flyer and target for experiment No. 3

对飞片进行类似的应力波分析:与靶板撞击后飞片中将产生一道左行加载塑性波 1-3 和一道加载相边界 3-4,经过各波间及波与左自由面的相互作用后,飞片将从撞击端向靶板中传入两簇卸载波:4-13 和 13-15-16。从飞片传入的两簇卸载波与靶板中自右自由面反射的 3 簇卸载波依次相遇,发生较复杂的波系间相互作用,经计算在 18 区(距右自由面约 2.3 mm)、20 区(距右自由面约 1.8 mm)、21 区(距右自由面约 6.8 mm)和 23 区(距右自由面约 4.3 mm),应力会先后达到拉伸层裂强度(分别为 2.38 GPa(18 区)、1.65 GPa(20 区)、3.10 GPa(21 区)、4.73 GPa(23 区)),导致靶板多重层裂。其中最靠右的一处层裂在 20 区,距右自由面为 1.8 mm,张兴华等[3]称这种层裂为浅表层裂,是比较形象的。通过实验波形计算得到的层裂片厚度为 1.29 mm,比通过图 4 分析得到的(1.8 mm)薄约 0.5 mm,计算产生偏差的原因将在稍后讨论。

分析多重层裂发生的原因:由于相变、逆相变的发生以及驻定相边界的存在,使得从飞片和靶板自由面反射的卸载波分别由原来的一道增加到两道甚至更多道,这些卸载波之间发生迎面卸载,其相互作用结果可能导致靶板中多处位置先后进入拉伸应力状态,一旦拉伸应力超过了层裂强度,就出现了多重层裂现象。从图 1 所示的本构模型可知,在其它条件不变的情况下,飞片撞击靶板的速度越高,靶板中加载相边界后应力幅值越高、相边界传播速度越快(导致驻定相边界产生的位置越接近靶板自由面)。相边界后应力幅值越高,则从靶板右自由面反射的卸载波就需要更多次地反射、透射卸载,才可使驻定相边界消失,因而透过驻定相边界向靶板中央传入的左行卸载波数量也越多,从而可能导致更多次层裂的发生;另外,驻定相边界位置越接近靶板自由面,也可能导致靠近自由面的层裂片厚度变薄。这是冲

击下可发生相变/逆相变的材料在平板撞击时的特有现象。当飞片撞击速度高到相变波波速超过弹塑性波波速、加载波转变为单波结构时,情况又会发生新的变化,本文不做探讨。

5 讨论与总结

采用 TANG 等提出的本构模型,运用特征线分析方法,通过对弹塑性应力波和宏观相边界传播情况的分析,分别对最近唐小军等在纯铁 DT2 平板等厚对称碰撞实验中靶板中观测到的二次层裂现象,和张兴华等在 FeMnNi 合金平板非等厚对称碰撞实验中发现的多重层裂和浅表层裂现象的机理进行了理论探讨,从计算结果来看,即使是采用最简单的相变模型,计算和实验的吻合程度就有很大的改进。

由于本工作旨在初步探索异常层裂产生的机理,为了简化分析,如第 3 节中所述,计算中作了如下假定:(1) 忽略弹性前驱波的影响;(2) 本构中各相区均作线性简化;(3) 人为地假定了 FeMnNi 合金的卸载路径。此外还忽略了塑性卸载稀疏波的发散效应,材料破坏准则也采用最简单的最大拉应力瞬态断裂准则,这些因素都可能给分析带来误差,造成层裂位置的计算与实验有所偏差。

相变、逆相变等过程能强烈地改变介质中的冲击波波形,形成所谓的三波结构和稀疏冲击波。在忽略弹性前驱波和塑性卸载波发散效应的前提下,对于本文讨论的纯铁及 FeMnNi 合金材料,在一定的速度范围内进行平板撞击,板中相边界传播速度与弹塑性波波速差别明显,加(卸)载波呈现由塑性加载波和加载相边界(塑性卸载波和卸载相边界)构成的明显双波结构,尤其是卸载相边界和驻定相边界的出现,使得各波系间的相互作用更加复杂,可能导致对于弹塑性材料而言不会发生的特殊层裂:如等厚对称碰撞层裂、非等厚碰撞多重层裂等现象的发生。可见,冲击下材料中相变的发生对结构的破坏机理有着重要的影响。

References:

[1] Hopkinson B. A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets [J]. Phil Trans Roy Soc Lond, 1914, A213: 437-452.

[2] 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.

[3] Zhang X H, Tang Z P, Xu W W, et al. Experimental Study on Characteristic of Shock-Induced Phase Transition and Spallation in FeMnNi Alloy [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2): 103-108. (in Chinese)
张兴华,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 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 103-108.

[4] Shockey D A, Curran D R, DeCarli P S. Damage in Steel Plates from Hypervelocity Impact. Ⅰ. Physical Changes and Effect of Projectile Material [J]. J Appl Phys, 1975, 46(9): 3766-3775.

[5] Bertholf L D, Buxton L D, Thorne B J, et al. Damage in Steel Plates from Hypervelocity Impact. Ⅱ. Numerical Results and Spall Measurement [J]. J Appl Phys, 1975, 46(9): 3776-3783.

[6] Veeser L R, Gray G T, 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 [C]. Utah, 1999: 73-76.

[7] Reinhart W D, Chhabildas L C, Wilson L T. Dynamic Yield Strength and Spall Strength Determination for AerMet® 100 Steels [A]//Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter [C]. Utah, 1999: 471-474.

[8] Christophe V, Gilles R. Study of Spalling for High Purity Iron below and above Induced $\alpha\leftrightarrow\beta$ Phase Transition [A]//Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter [C]. New York, 2003: 511-514.

[9] Christophe V, Francois B, Gilles R. Iron Damage and Spalling Behavior Below and above Induced $\alpha\leftrightarrow\beta$ Phase Transition [A]//Furnish M D, Elert M, Russell T P, et al. Shock Compression of Condensed Matter [C]. Maryland,

2005:678-681.

[10] Tang Z P, Tang X J, Zhang X H, et al. Abnormal Spall Behavior Observation in Pure Iron and FeMnNi Alloy undergoing $\alpha\leftrightarrow\beta$ Phase Transition [A]//Furnish M D, Elert M, Russell T P, et al. Shock Compression of Condensed Matter [C]. Maryland, 2005:662-665.

[11] Tang Z P, Gupta Y M. Shock Induced Phase Transition in Cadmium Sulphide Dispersed in an Elastomer [J]. J Appl Phys, 1988, 64:1827-1837.

[12] Tang Z P, Gupta Y M. Phase Transition in Cadmium Sulfide Single Crystals Shocked along the c Axis [J]. J Appl Phys, 1997, 81(11):7203-7212.

[13] Dai X Y, Tang Z P, Xu S L, et al. Propagation of Macroscopic Phase Boundaries under Impact Loading [J]. Int J Impact Eng, 2004, 30:385-401.

[14] Barker L M, Hollenbach R E. Shock Wave Study of the $\alpha\leftrightarrow\beta$ Phase Transition in Iron [J]. J Appl Phys, 1974, 45(11):4872-4887.

[15] Wang L L. Foundation of Stress Waves (2nd ed) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础(第 2 版) [M]. 北京:国防工业出版社, 2005.

Stress Wave Analysis of Abnormal Spall in Metal Target Relating to Phase Transition

XU Wei-Wei, TANG Zhi-Ping, ZHANG Xing-Hua

(*Key Laboratory for Mechanical Behavior an Design of Materials (LMBD), Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: With a simple multi-phase mixture model proposed by TANG Zhi-Ping et al earlier, we have studied the propagation of the elastic and plastic waves as well as the macroscopic phase boundary in the targets by characteristic line method, and the mechanism of the abnormal spall phenomena mentioned above are explained theoretically. The investigation shows that (reverse) phase transition can strongly affect the profiles of the shock waves, leading to the so-called three-wave structure and the release shock waves, and the static phase boundary may appear somewhere in the plates. The more complex interactions of the waves in the plates may cause some special spall phenomena.

Key words: phase boundary; abnormal spall; characteristic line method; symmetrical and the same thickness impact; shallow spallation