



固定温度界面对相变波传播规律的影响

刘永贵, 沈玲燕

引用本文:

刘永贵, 沈玲燕. 固定温度界面对相变波传播规律的影响 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 042301.

LIU Yonggui, SHEN Lingyan. Effect of the Fixed Temperature Interface on the Propagation of the Phase Transition Wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4): 042301.

当期更多内容>>

您可能感兴趣的其他文章:

激波冲击 V 形界面的 RM 不稳定性实验研究

翟志刚, 董平, 罗喜胜

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.06.006

冲击加载下 NaCl 单晶高压声速与温度的同步测量

金柯, 吴强, 李加波, 周显明, 叶素华, 李俊

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.06.005

基于量纲分析的平面冲击波经验模型研究

赵传荣, 孔德仁

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.06.014

磁驱动飞片加载下纯铁的冲击相变和层裂特性

曹落霞, 胡海波, 陈永涛, 王桂吉, 汤铁钢

DOI: 10.11858/gywlxb.2015.04.002

冲击作用下 PBX 炸药预制孔洞塌陷过程的实验探索

傅华, 李涛, 吴廷烈, 张光升, 李克武

DOI: 10.11858/gywlxb.2015.04.005

固定温度界面对相变波传播规律的影响^{*}

刘永贵^{1,2}, 沈玲燕¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 中国科学技术大学近代力学系, 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要: 冲击载荷作用下, 相变波的传播及相互作用是一热力耦合过程。采用理论和实验相结合的方法研究了固定温度界面对相变波传播特性的影响。首先基于形状记忆本构模型和一维特征线理论分析了各类间断面和温度界面的基本相互作用规律, 发现温度界面对相变波的作用与相变波强度及界面两侧温度的相对高低有关; 然后进行了相变波在具有固定温度界面的形状记忆 TiNi 杆中的传播实验, 并实时测量了相变波传播过程中的温度变化。实验结果与理论分析基本一致, 冲击载荷作用下相变波不仅是物质间断面, 还是移动的温度界面。

关键词: 相变波; 温度界面; 热力耦合; 冲击载荷

中图分类号: O382.3

文献标识码: A

相变受应力和温度的双重控制^[1], 因此, 相变波的形成和传播也必然受到温度的影响。由于相变潜热和相变耗散功等因素的作用, 相变波阵面两侧存在温度间断, 使其自身成为一个事实上的移动温度间断面; 该温度界面反过来又对相变波的传播及相互作用产生影响。因此, 相变波的传播是一热力耦合问题。研究温度对相变波传播的影响, 一方面将应力波传播理论拓展到热力学领域, 另一方面可以加深对材料冲击响应的认识。

目前已开展了不少关于相变波传播特性的研究工作。在理论方面, Abeyaratne 和 Knowles^[2-3]将驱动力的概念应用到非连续界面上, 建立了成核判据和动力学关系, 研究了非稳定弹性材料中相变波传播问题。Dai 等^[4]和 Tang 等^[5]系统地研究了一维宏观相变波的传播规律, 并提出了一种产生梯度材料的新方法。但上述研究均未考虑相变波传播过程中温度的变化及影响。事实上, 相变波就是一个移动热源, Balk 等^[6]、Berezovski 等^[7]考虑了相变潜热的作用, 在其相边界传播速度和相变驱动力的表达式中显含温度变量。Chen 等^[8]研究了矩形脉冲载荷下半无限长杆中相变波的传播和相互作用, 给出了相变波传播过程中杆中温度的分布。Bekker 等^[9]采用内变量形状记忆本构模型和 Lax 差分算法, 数值分析了冲击加载时等温和绝热条件下一维应力杆中相变波的传播。上述理论工作只单方面考虑了相变波传播过程中材料温度的变化, 而未涉及温度变化对相变波传播的影响。实验方面的工作多集中在准静态条件下, Shaw 等^[10]在 TiNi 合金丝单轴拉伸试验中观察到相边界的扩展过程, 并实时测量了该过程中温度的演化规律; Sun 等^[11-12]也观察到类似的现象, 更进一步分析了相边界传播的温度机制和应变率效应。在动态加载方面, Niemczura 和 Ravi-Chandar^[13]进行了 TiNi 合金的动态拉伸实验, 根据应变计的记录信号计算了相变波传播速度, 建立了不显含温度效应的相变动力学关系。

上述理论和实验方面的研究工作均未涉及动载荷作用下温度对相变波传播特性的影响。本研究主要考虑温度界面对相变波传播的影响, 温度界面预先人为给出, 为简化分析, 不考虑相变波传播过程中材料自身的温度变化, 因此, 相变波是纯力学框架下的应力波, 并且温度界面两侧的温度不受相变波影

^{*} 收稿日期: 2017-04-02; 修回日期: 2017-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(11072240, 11702086)

作者简介: 刘永贵(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事相变热冲击动力学研究。E-mail: liuyongg@hpu.edu.cn

通信作者: 沈玲燕(1984—), 女, 博士, 讲师, 主要从事复合材料冲击动力学研究。E-mail: lyshen@hpu.edu.cn

响,是一固定温度界面。这种假设下所得到的结论和规律,将为后续深入研究相变波传播的热力耦合行为奠定基础。

1 控制方程

细长杆受冲击载荷可简化为一维应力问题。在相变波阵面 $s=s(t)$ 处,根据一维应力波理论,有冲击突跃条件

$$[\sigma] = \mp \rho_0 \dot{s} [u] \quad (1)$$

$$[u] = \mp \dot{s} [\epsilon] \quad (2)$$

$$[\sigma u - q] = \mp \rho_0 \dot{s} [e + u^2/2] \quad (3)$$

$$\pm \rho_0 \dot{s} [\eta] + [q/T] \geq 0 \quad (4)$$

式中: ρ_0 、 ϵ 、 σ 、 u 分别为密度、应变、应力和质点速度, q 、 e 、 η 分别表示热流、单位体积内能和熵, T 代表温度, $\dot{s}$ 为相变波的传播速度,算符 $[f] = f^- - f^+$ 代表波阵面前 (f^+)、后 (f^-) 物理量 f 的变化。

相变波传播的温度相关性究其原因在于相变材料的温度敏感性,以形状记忆 TiNi 合金为例,宏观上主要体现在以下两方面。

(1) 相变加、卸载路径受温度的影响:当初始材料温度高于奥氏体相变完成温度 T_{Af} 时,外加载荷作用下表现为可逆的超弹性效应;而当初始材料温度低于奥氏体相变起始温度 T_{As} 时,则沿弹性路径卸载。但应当注意的是,在冲击载荷作用下,由于绝热温升作用,加载后的材料温度显著升高,若高于 T_{As} ,则卸载时将不再完全按弹性方式卸载,而是沿着逆相变的路径进行卸载,如图 1(a) 中 BC 所示。

(2) 相变阈值应力 (σ_M) 具有显著的温度敏感性^[14],温度越高,其值越大,如图 1(b) 所示,因此,固定温度间断面本质上是相变阈值应力的间断面,这也是温度间断面对相变波传播具有影响的根本物理机制之一。从微观上讲,相变材料的温度敏感性与晶体结构的热稳定性有关,奥氏体相是高温稳定相,马氏体相属于低温稳定相,因此若材料初始处于奥氏体形状记忆状态,则升高环境温度,奥氏体相稳定性增强,体现为宏观上相变阈值应力的增大,如图 1(b) 中 $\sigma_M(T_2) > \sigma_M(T_1)$;加载相变过程中,温度的升高使马氏体相变得不稳定,若撤去载荷,则发生马氏体逆相变,转化为高温奥氏体稳定相。

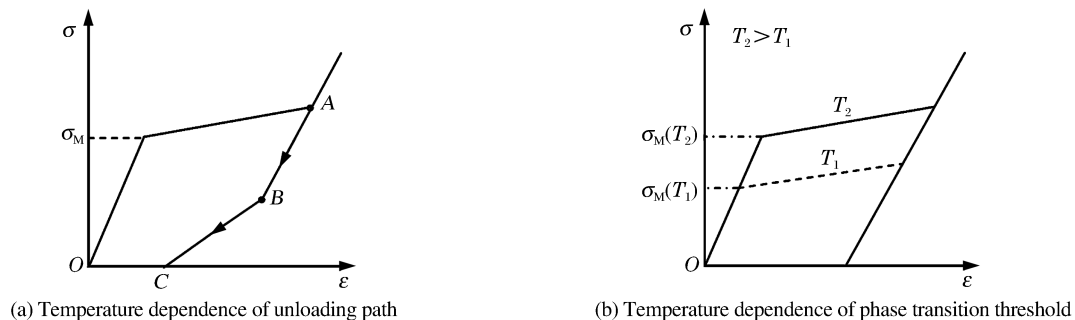


图1 形状记忆本构模型的温度相关性

Fig. 1 Temperature dependence of the shape memory constitutive model

2 基本规律

在温度界面两侧,由于温度不同,材料具有不同的初始阈值应力;当来波入射到温度界面上时,有可能将一侧带入弹性状态,而将另一侧材料带入相变状态,于是两侧材料的波阻抗不同,从而对来波产生干扰,其结果是在温度界面处产生反射和透射。图2给出了几种典型的相互作用的波系结构图,其中粗实线表示相变波,细实线代表弹性波,温度界面以虚线表示,初始时温度界面两侧材料均处于形状记忆状态。

2.1 弹性波与温度界面的相互作用

弹性波与温度界面的相互作用和温度界面两侧温度的相对高低有关。当弹性波由低温区进入高温

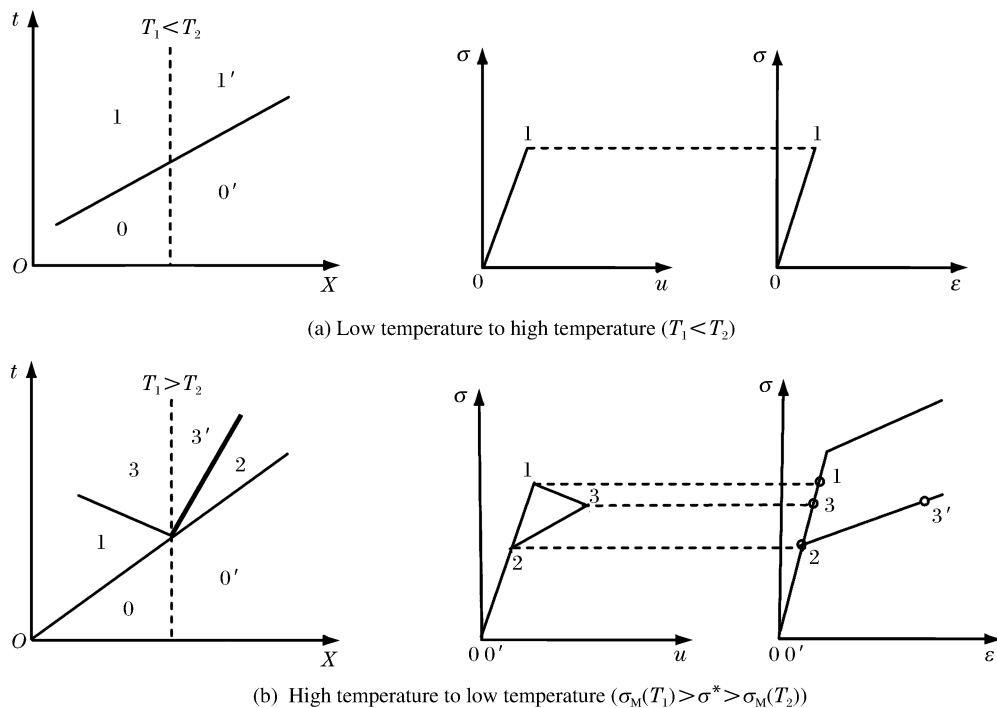


图 2 弹性波和温度界面的相互作用

Fig. 2 Interaction between elastic wave and temperature interface

区时(见图 2(a)),弹性波将直接透射进入高温区,无反射波产生,温度界面对弹性波的传播无任何影响。当弹性波由高温区进入低温区时(见图 2(b)),若弹性波强度满足 $\sigma_M(T_1) > \sigma^* > \sigma_M(T_2)$,则弹性波 0-1 与温度界面作用,向低温区透射弹性加载波 0'-2 和相变波 2-3',同时向高温区反射卸载弹性波 1-3,从而在温度界面处形成驻定应变间断面 3-3',温度界面左侧处于高温奥氏体相,右侧处于低温混合相,如图 2(b)中 $\sigma-u$ 图所示;增大入射弹性波强度,则透射波 2-3'可由相变波转变为相变冲击波,温度界面右侧完全处于马氏体弹性相。

2.2 相变波与温度界面的相互作用

(1) 温度界面两侧材料具有相同的初始状态,见图 3(a) $t-X$ 图中 1 区和 1'区。相变波 1-2 在由低温区进入高温区时,把低温区材料带入混合相,而高温区仍为 I 相弹性状态,故在温度界面处出现波阻抗的不匹配,必然导致温度界面对相变波 1-2 产生干扰,其结果是向低温区反射一相变冲击波 2-3,同时向高温区透射弹性加载波 1'-4 和相变波 4-3',从而在温度界面处形成应变间断面和物质间断面,如图 3(a) $\sigma-\epsilon$ 图所示。事实上,其反射和透射波性质还与入射相变波的强度有关:若入射相变波强度足够大,直接把 2 区带入 II 相弹性状态,则反射波 2-3 为弹性加载波;若其强度较小,不足以把高温区带入相变状态,则透射波只有弹性波,而不是双波结构。

(2) 相变波由高温区进入低温区时,温度界面两侧材料的初始状态为 1 和 1',此时温度界面也是物质和应变间断面。若相变波强度不太高,则相变波直接透过温度界面,无反射作用,如图 3(b) $t-X$ 图所示;若相变波强度足以把低温区带入 II 相状态,则向高温区反射相变加载波,如图 3(c) $t-X$ 图所示。

综上所述可知,相变波与温度界面相互作用,和相变波强度及温度界面两侧温度的相对高低有关。

3 实验条件和结果

为研究温度界面对相变波传播的影响,采用带有瞬态红外测温系统的分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 冲击压缩装置(见图 4)对 TiNi 合金长杆进行撞击实验。TiNi 合金杆由两根杆组成。实验前,

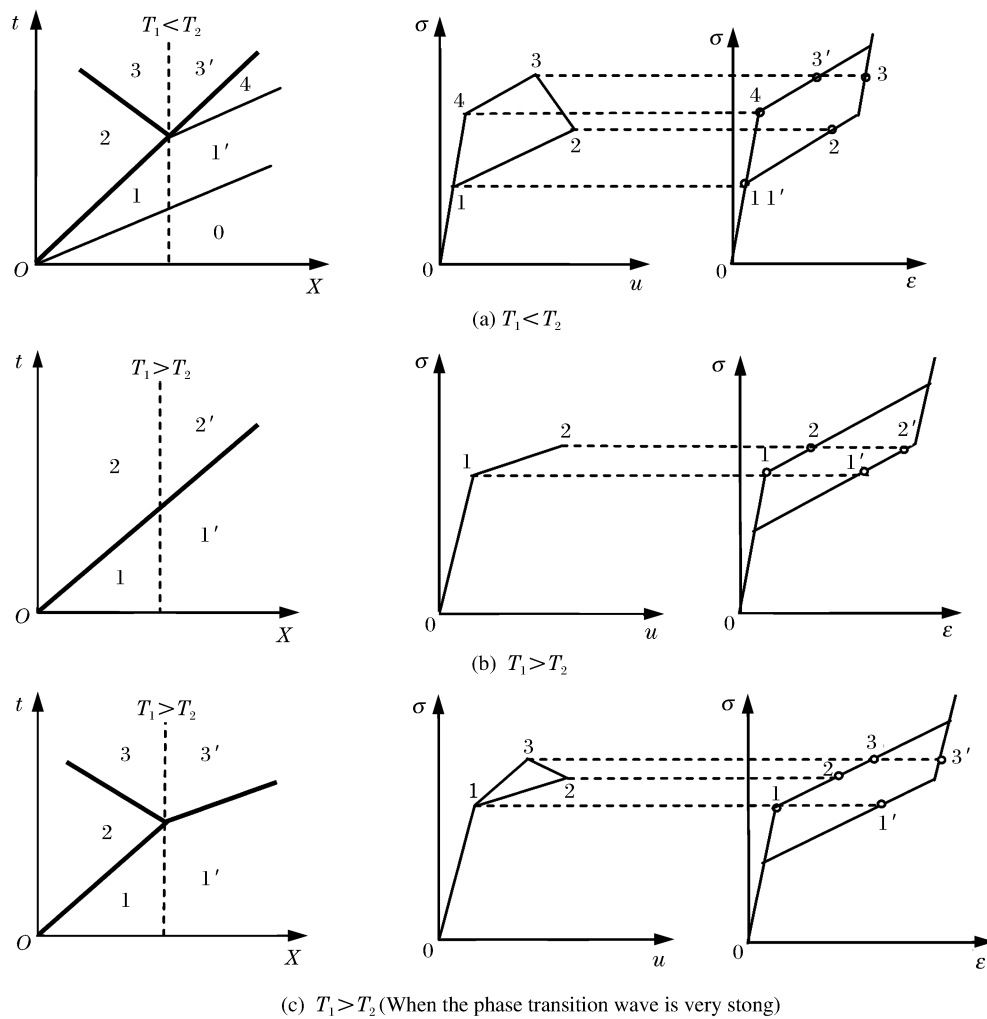


图3 相变波和温度界面相互作用

Fig. 3 Interaction between phase transition wave and temperature interface

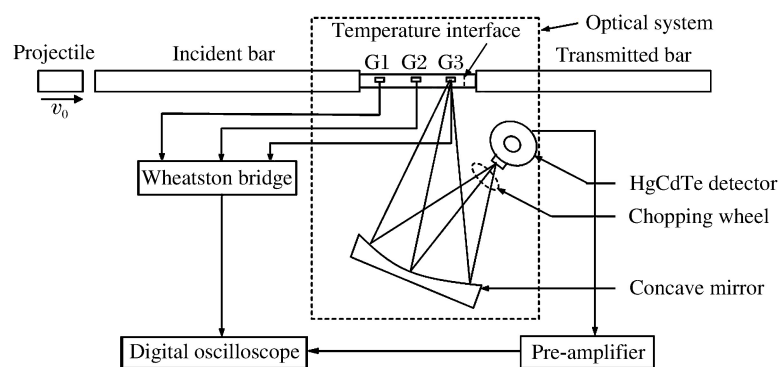


图4 具有红外测温功能的 SHPB 装置示意图

Fig. 4 Split Hopkinson pressure bar with infrared detection system

将两根不同长度的杆分别置于不同温度的水中,实验时,将两根不同温度的杆迅速接触并置于入射杆和透射杆之间,从而人为形成一温度界面,撞击瞬间界面两侧杆上的实际温度由热电偶读出。子弹材料为A3钢,长300 mm。TiNi杆上的相变波形由应变计G1、G2和G3记录。红外测温系统的建立和相关参数见文献[15],为将红外测温系统记录的电压信号转化为温度值,需要在实验前对材料进行原位标定,

标定方法和结果由文献[16]给出。表 1 给出了具体的实验条件,其中:位置(Location)指的是距 TiNi 杆加载端面的距离, T_1 和 T_2 分别为 TiNi 杆上温度界面左、右两侧区域的初始温度。

实验中,长杆长度为 150 mm,短杆为 30 mm,长杆和短杆的初始温度分别为 30 和 14 ℃,均小于奥氏体相变起始温度 46.2 ℃,处于形状记忆状态。来自撞击端的入射脉冲从长杆传播进入短杆,与温度界面(30 ℃/14 ℃)相互作用,3 个应变计均位于高温长杆上,距入射杆与长杆接触面的距离分别为 20、83 和 137 mm。单点红外测温系统测量 G3 应变计对应位置处 TiNi 杆的表面温度变化。

表 1 实验条件
Table 1 Experimental conditions

Temperature condition/℃	$v_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Location/mm				
		G1	G2	G3	Temperature measurement	Temperature interface
$T_1(30) > T_2(14)$	24	20	83	137	137	150

图 5 给出了实验中 TiNi 杆上 3 个应变计所记录的应变信号,以拉应变为正。图 5(a)中,G1 记录到完整的加、卸载脉冲信号,脉冲宽度约为 132 μs ,其中加载脉冲约 114 μs ,卸载后应变基本完全恢复,说明在撞击端面处只产生弹性加载波,反映在 G2 和 G3 信号中分别为 $A'B'$ 段和 OA 段,该弹性波强度约为 0.62%,根据 3 个应变片间的距离和波到达时间,计算得到该弹性波的速度约为 4 100 m/s。该弹性波传播至温度界面时与温度界面相互作用,根据前面分析可知,此时将往高温区反射弹性卸载波,分别对应于 G3 信号中的 AB 段和 G2 信号中的 $B'C'$ 段,同时向低温区透射弹性波或者弹性波和相变波。低温杆中的透射弹性波传播至与透射杆的接触界面时,由于波阻抗不匹配,将反射弹性波和相变加载波,该弹性波和相变加载波传播至温度界面(14 ℃/30 ℃)时,形成从低温区进入高温区问题,将往高温杆中依次透射弹性波(C_{BC})和相变波(P_{CD}),C 点为相变点,其应变大小约为 1.06%,实验结果与基本相互作用规律的理论分析基本一致。在 D 点处开始卸载,OD 时间间隔约为 114 μs ,与 G1 记录的加载历时一致,说明卸载弹性波 C_{DE} 来自撞击端面,但由于弹性波与一系列相变波和卸载波不断地相互作用,卸载波强度已显著降低,只有 0.4% 左右;于 E 点后继续卸载,卸载弹性波 C_{EF} 来自卸载波 C_{DE} 与温度界面的反射卸载作用。基于一维应力波传播的特征线理论,采用矩形加载应力脉冲对上述实验进行近似分析,波形传播和相互作用的 $t-X$ 图见图 5(b),其中, G_3 靠近温度界面位于高温区,其所经历的波形信息与图 5(a)中 G3 记录的应变历史基本一致。值得注意的是,在 G2 所记录的波形信号中, $C_{CD'}$ 是来自温度界面的反射弹性波,与 G3 信号对比可发现,该波与 C_{BC} 一致,只是幅值显著降低了。G2 和 G3 信号的另一个更重要的区别在于,相变波 P_{CD} 并没有被 G2 记录,其原因可能是 G2 应变计距离撞击面相对较近,来自撞击面的持续弹性卸载波与来自温度界面的反射弹性加载波及相变波相互作用,削弱了弹性波的强度,湮灭了相变波。

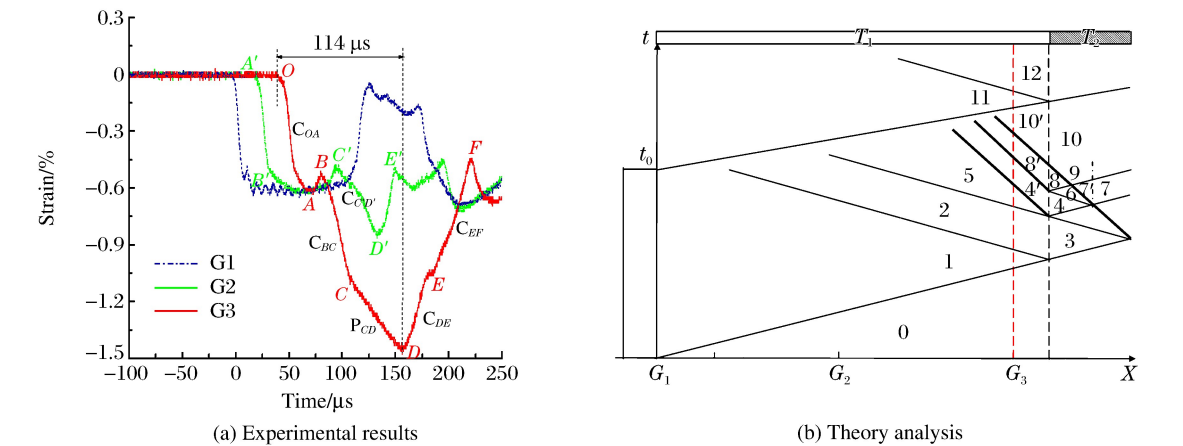


图 5 实验结果及分析
Fig. 5 Experimental results and analysis

图6给出了G3位置处温度随时间的变化。弹性波 C_{OA} 和 C_{BC} 传播至G3位置时,温度基本不变;当相变波 P_{CD} 扫过G3位置时,由于相变潜热的释放和相变变形功的作用,温度连续升高($T_A \rightarrow T_B$),升高幅值约 3°C ,相应的相变应变增加 0.46% ,根据文献[15]中相关数据,估算理论温升约为 2.9°C ,与实验测量结果基本吻合。在D点,弹性卸载波传播至G3位置,卸载过程中,温度保持最高值基本不变。通过测量相变过程温度的变化,一方面说明相变波本身就是移动温度界面,有可能改变相变波后方区域材料的状态,使后来的卸载波结构发生变化,如图1(b)所示;另一方面,温度的变化从侧面反映了相变波的存在。

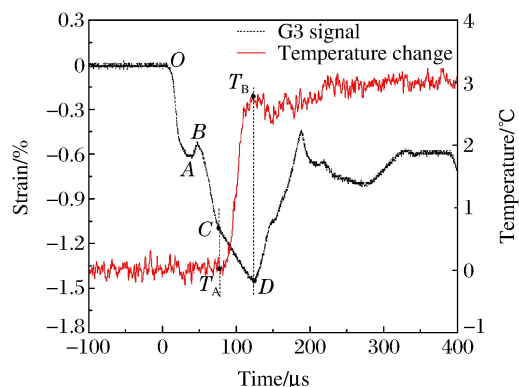


图6 温度和应变随时间的变化

Fig. 6 Variation of temperature and strain with time

4 结 论

采用一维应力杆模型,理论分析了固定温度界面对相变波传播的影响,并对具有初始温度界面的形状记忆TiNi杆进行了撞击实验,实时测量了TiNi杆表面一点处温度的变化,得到如下结论。

(1) 温度界面对弹性波和相变波传播的作用与界面两侧温度的相对高低有关。弹性波由低温区进入高温区时,温度界面对其无影响;反之,则反射弹性卸载波。相变波由低温区进入高温区时,反射加载波,具体加载波性质与相变波强度有关;而由高温区进入低温区时,温度界面对其可能无影响,也可能反射相变加载波或弹性波,取决于温度界面两侧材料的初始状态和相变波强度。

(2) 本质上,温度界面是相变阈值强度间断面。进一步而言,由于温度界面两侧具有不同的相变阈值,故入射弹性波或相变波可能将温度界面两侧材料带入不同的状态,使入射波和透射波的波阻抗不匹配,从而必然导致对入射波产生干扰。若温度界面两侧具有相同的状态,则温度界面两侧材料具有相同的波阻抗,其结果是不产生反射波。

(3) 实验应变计所记录的波形信息较好地验证了温度界面对弹性波和相变波的基本作用规律。实时温度测量结果表明,相变波即是移动温度界面,相变波后方区域温度的升高有可能改变卸载波结构。这也是温度界面对相变波作用的物理机制之一,将在后续工作中展开研究。

参考文献:

- [1] 唐志平. 冲击相变 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
TANG Z P. Shock induced phase transition [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] ABEYARATNE R, KNOWLES J K. Kinetic relations and the propagation of phase boundaries in solids [J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1991, 114(2): 119-154.
- [3] ABEYARATNE R, KNOWLES J K. On the driving traction acting on a surface of strain discontinuity in a continuum [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1990, 38(3): 345-360.
- [4] DAI X Y, TANG Z P, XU S L, et al. Propagation of macroscopic phase boundaries under impact loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(4): 385-401.
- [5] TANG Z P, DAI X Y. A preparation method of functionally graded materials with phase transition under shock loading [J]. Shock Waves, 2006, 15(6): 447-452.
- [6] BALK A M, CHERKAEV A V, SLEPYAN L I. Dynamic of chain with non-monotone stress-strain relations. II. nonlinear wave and waves of phase transition [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49(1): 149-171.

- [7] BEREZOVSKI A, MAUGIN G A. On the thermodynamic conditions at moving phase-transition fronts in thermoelastic solids [J]. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 2004, 29(1): 37-51.
- [8] CHEN Y C, LAGOUDAS D C. Impact induced phase transformation in shape memory alloys [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48(2): 275-300.
- [9] BEKKER A, JIMENEZ-VICTORY J C, POPOV P, et. al. Impact induced propagation of phase transformation in a shape memory alloy rod [J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18(11): 1447-1479.
- [10] SHAW J A, KYRIAKIDES S. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy [J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(2): 683-700.
- [11] SUN Q P, LI Z Q. Phase transformation in superelastic NiTi polycrystalline micro-tubes under tension and torsion—from localization to homogeneous deformation [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(13/14): 3797-3809.
- [12] SUN Q P, ZHONG Z. An inclusion theory for the propagation of martensite band in NiTi shape memory alloy wires under tension [J]. *International Journal of Plasticity*, 2000, 16(10): 1169-1187.
- [13] NIEMCZURA J, RAVI-CHANDAR K. Dynamic propagating phase boundaries in NiTi [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, 54(10): 2136-2161.
- [14] CHEN Y C, LAGOUDAS D C. Impact induced phase transformation in shape memory alloys [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48(2): 275-300.
- [15] 刘永贵, 唐志平, 崔世堂. 冲击载荷作用下瞬态温度的实时测量方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(4): 471-475.
LIU Y G, TANG Z P, CUI S T. Real-time measuring methods for transient temperature under shock loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(4): 471-475.
- [16] 刘永贵, 唐志平, 崔世堂. TiNi 合金冲击相变过程中温度变化规律的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(6): 679-684.
LIU Y G, TANG Z P, CUI S T. Experimental study on temperature evolution of TiNi alloy under shock induced phase transformation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(6): 679-684.

Effect of the Fixed Temperature Interface on the Propagation of the Phase Transition Wave

LIU Yonggui^{1,2}, SHEN Lingyan¹

(1. *School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;*

2. CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The propagation and interaction of the phase transformation waves is a thermal-mechanical coupling process under shock loading. In this research, we investigated the effect of a fixed temperature interface on the phase transition propagating by theoretical analysis combining with experiment. First, on the basis of the shape memory constitutive model and the one-dimensional characteristic line theory, we analyzed the basic law of interactions between kinds of cross sections and the temperature interface. The results reveal that the property of the interaction is associated with the strength of phase transition wave and the relative size of temperature on two sides of the temperature interface. Then, we carried out the experiment of the phase transition wave propagating in a shape memory TiNi bar with a temperature interface, the results of which is consistent with the theory analysis; and we *in situ* measured the change of temperature in the process of the phase transformation propagation, showing that the phase transition wave is not only the material cross section, but also the moving temperature interface under shock loading.

Keywords: phase transition wave; temperature interface; thermal-mechanical coupling; shock loading