文章编号：1001-1455(2014)04-0471-05 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0471-05

冲击载荷下瞬态温度的实时测量方法*

刘永贵，唐志平，崔世堂
（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：将红外瞬态测温装置引入 SHPB 冲击实验，确定了不同材料试件的温度标定曲线，并实时测量了冲击下 Al 合金和伪弹性 TiNi 合金试样的表面温度。结果表明，2 种试样温度变化都经历了加载过程的温度升高，主要不同在于卸载过程，Al 合金卸载过程中温度保持最大加载温度不变，而 TiNi 合金试样卸载过程中温度降低，这反映了 2 种材料不同的物理变形过程和温度变化机制。直接红外测温的实验结果与根据能量守恒理论计算的温度较好吻合，说明采用的红外测温方法实时测量冲击瞬态温度是可行的。

关键词：固体力学；瞬态温度；红外测温；Al 合金；实时；冲击；伪弹性 TiNi 合金
中图分类号：O347.1 **国标学科代码**：1301515 **文献标志码**：A

冲击载荷作用下，材料变形过程可近似为绝热过程。变形过程中可能存在塑性功、相变和断裂等因素，引起材料温度的变化，反过来温度变化又会影响材料性能和瞬态响应，如改变后继阈值应力、材料热力学状态等。总之，温度是描述材料性能的一个重要物理参量，实时测量冲击过程中温度变化有利于理解材料的热力学性能、分析冲击过程中热和力的耦合作用。

温度变化具有瞬时性，要求测温系统的响应时间跟得上冲击载荷的作用时间。目前，实时测温主要采用热电偶和红外测温方法，前者结构简单使用方便，但响应时间较长，一般不适用高速冲击过程。红外测温是一种光学测温方法，具有 2 个显著特点：一是非接触，适用于各种复杂环境；二是响应时间快可达亚微妙量级，能够满足冲击过程对时间分辨率的要求。

目前，利用红外测温方法实时测量材料瞬态温度，已开展了不少工作。J. Hodowany[1]、J. J. Mason 等[2]和 S. J. Craig 等[3]采用 1 单元 HgTeGe 红外探测器测量了冲击下 Al 合金试件表面温度，确定了塑性功的热转化系数。A. Marchand 等[4]利用 12 单元线阵 HgCdTe 探测器测量了钢中剪切带区域温度变化。A. T. Zehnder 等[5]采用 16 单元线阵 HgCdTe 探测器实时得到了冲击下裂纹尖端温度场，分析了温度对裂纹扩展的影响。P. R. Guduru 等[6]利用自制 8×8 单元面阵 HgCdTe 探测器获得了裂纹起裂和传播过程中的温度场。夏源明等[7]采用 1 单元 HgCdTe 探测器测量了纤维复合材料冲击拉伸断裂过程中温度变化。可见，红外测温技术已广泛应用于冲击力学领域，为了解材料瞬态变形和破坏机理提供了途径。

本文中，采用 1 单元 HgCdTe 红外探测器装置，在 SHPB 冲击压缩条件下，实时测量 Al 合金试件和处于伪弹性状态的 TiNi 形状记忆合金试样的表面温度，分析温度测量的可靠性，得到 2 种材料绝热变形过程中温度变化规律。

1 红外瞬态测温原理和标定

1.1 基本原理和方法

红外测温的基本原理是斯特藩-玻耳兹曼定理[8]：

$$P(T)=\varepsilon\sigma T^4 \tag{1}$$

式中：$P(T)$为温度为 T 时单位时间从物体单位面积上辐射出的总辐射能，称为总辐射度；σ 为斯特藩-

* **收稿日期**：2012-11-29；**修回日期**：2013-01-14
基金项目：国家自然科学基金项目(11072240)
作者简介：刘永贵(1982—)，男，博士研究生。

玻耳兹曼常量;T 为物体热力学温度,ε 为物体灰度。由上式可得:

$$T=\left(\frac{P(T)}{\varepsilon\sigma}\right)^{1/4} \tag{2}$$

式(2)是物体热辐射测温的数学描述。

1.2 标 定

红外测温的关键和难点是标定,实验测温精度取决于标定精度。标定建立示波器电压信号和被测试样表面温度的关系。原则上有理论和实验方法,但理论存在一些难以确定的因素,实际常采用实验标定办法。标定实验在∅14.5 mm SHPB 压杆上完成,如图 1 所示。标定后的实验装置直接用于冲击红外瞬态温度测量,以确保实验和标定条件的一致性。红外测温系统由光学聚焦镜、红外探测器、前置放大器、斩波器及记录仪器等组成。当试件产生瞬态温度变化时,试件表面小块面积上的辐射能量通过光学系统聚焦到红外探测器光敏单元上转化为电信号,经前置放大器记录到示波器上。

光学聚焦系统形式繁多[5,9-10],本文中采用镀金凹面反射镜,焦距 200 mm,有效通光口径 50 mm,试样表面距凹面镜中心 600 mm。探测器采用 Judson 公司 1 单元 HgCdTe 红外探测器,传感器尺寸 1 mm×1 mm,响应时间 0.5 μs,波长范围 2~14 μm(对应黑体温度 300~1 200 K),温度分辨率0.1 K,为减小探测器噪音需置于 77 K 液氮环境下工作。红外探测器距凹面镜中心距离为 300 mm,根据几何光学,此时凹面镜的缩小倍数为 2 倍,因此对应的待测试样的表面辐射面积为 2 mm×2 mm。前置放大器 PA-101 带宽 10 Hz~1 MHz。由于前置放大器的隔直流作用,静标时需要在探测器前方置一个斩波器。

激光器用于对准光路,并对试件在光路中的位置进行精确定位。标定前,先把直径 8 mm、厚度 6 mm的圆柱试样钻孔,将热电偶埋于孔内。静态标定温度范围为 24~120 ℃。曾尝试多种改变温度的方法,如恒温浴方法,均不理想。我们在标定时通过酒精灯对试样直接加热至 300 ℃,撤去酒精灯,使降温过程中试件待测区域达到温度均衡,至 120 ℃起分别记录热电偶读出值和对应的红外探测器输出值,以热电偶测量值作为标定基准温度,得到电压-温度标定曲线。

图 2 给出了典型的 Al 合金试样和 TiNi 试样的标定结果(环境温度为室温 24 ℃),多次重复标定结果稳定。由图 2 可以看到,2 种不同材料试样在相同条件下其标定结果差别较大,主要原因是其灰度不同,如式(2)所示。利用二次多项式对图 2 中标定结果拟合,得到 Al 合金试样和 TiNi 试样的拟合曲线分别为:

$$\theta_{\mathrm{Al}}=24.03+0.34U-2.01\times10^{-4}U^2 \tag{3}$$

$$\theta_{\mathrm{TiNi}}=24.40+8.54\times10^{-2}U-1.38\times10^{-5}U^2 \tag{4}$$

式中:θ 为摄氏温度,℃,U 为电压,mV。

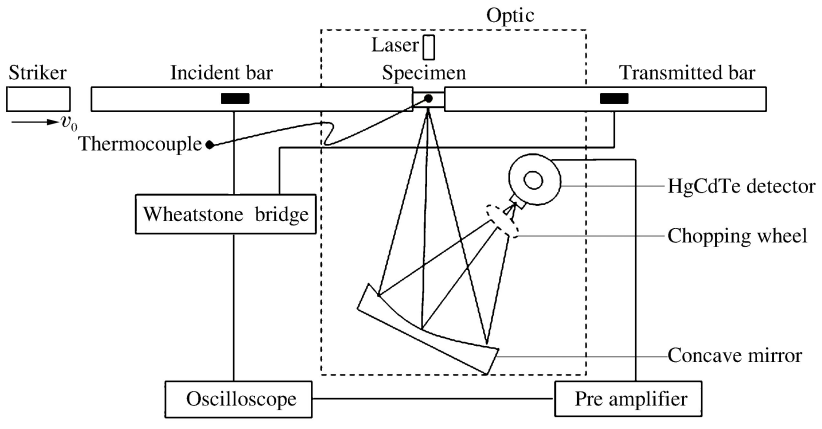

图 1 具有红外测温功能的 SHPB 装置示意图

Fig. 1 Split Hopkinson compression bar with infrared detection system

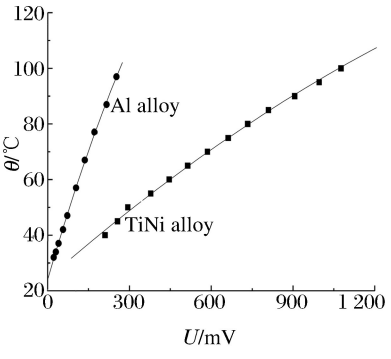

图 2 典型温度标定结果

Fig. 2 Typical calibration curves

2　实　验

2.1　材　料

试样为直径 8 mm、厚度 6 mm 的 Al 合金和 TiNi 合金圆柱体，Al 合金密度为 2.60 t/m^3，比定压热容为 0.88 J/(g·K)，TiNi 合金室温下处于伪弹性状态，密度为 6.45 t/m^3，比定压热容和相变潜热分别为 0.45 J/(g·K)和 8.77 J/g。冲击加载时，由于脉冲时间短(对于 200 mm 长子弹，约 80 μs)，可以忽略与外界的热交换，视为绝热过程。

2.2　实验结果和分析

图 3 是在相同子弹长度(200 mm)和子弹速度(16 m/s)条件下，Al 合金和 TiNi 合金试样在冲击压缩过程中应力波信号和相应温度波形。为减小横向惯性震荡的影响，在入射杆和子弹撞击端面处加了厚度 0.3 mm、直径约 1.5 mm 的橡胶片。

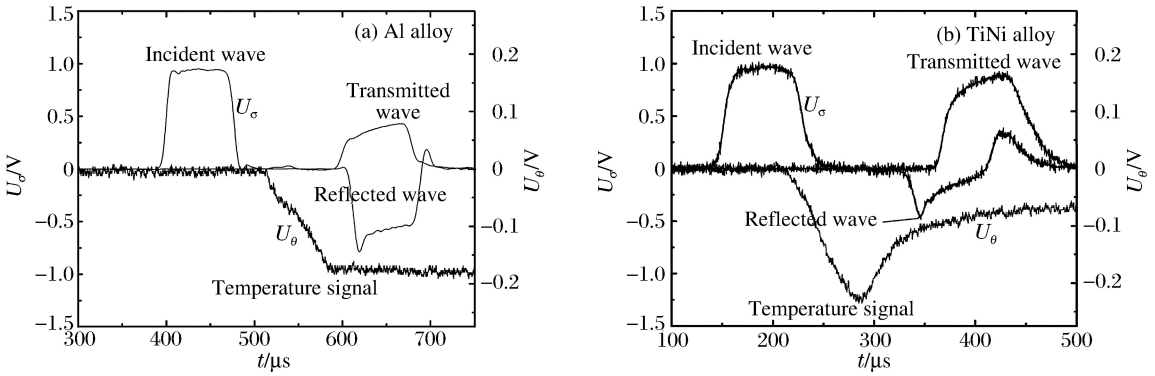

图 3　Al 合金和 TiNi 合金试样的典型冲击压缩波形

Fig. 3　Recorded waves of shock compression of Al alloy and TiNi alloy specimen

图 4 给出了冲击压缩过程中 2 种材料试样的测量温度波形。在一个加、卸载过程中，2 种材料试样温度变化都先经过约 81 μs 的升温过程，不同处在于，Al 合金试样升温至最高温度 65.4 ℃后保持不变，而 TiNi 合金在达到 43.6 ℃后，先经过较长时间的降温过程至约 30.4 ℃，然后保持 30.4 ℃不变。这是因为在冲击变形过程中，引起 2 种材料温度变化的物理机制不同。

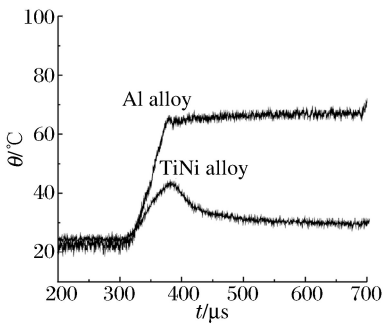

图 4　Al 合金和 TiNi 合金试样的温度波形

Fig. 4　The temperature of Al alloy and TiNi alloy specimen

为了更好反映材料冲击变形过程中温度的变化规律，图 5 给出了实验得到的 2 种材料的应力应变关系和温度变化曲线。在图 5(a)中，Al 合金试样温度随着塑性加载应变的增大而升高，当加载应力最大时，温度最高，卸载过程近似为弹性卸载，温度基本保持不变；在图 5(b)中，TiNi 合金试样在冲击加载绝热相变过程中，由于相变潜热的释放和相变功的存在，温度随着相变应变的增大而升高，其大小同加载幅值和材料性质有关，卸载过程中，由于发生逆相变吸热，温度降低，经过一个加、卸载循环后材料温度高于初始值，所增加温度来源于图 5(b)中应力应变关系所围面积。定性地，冲击过程中，Al 合金试样温度变化的根本机制在于塑性功转化为热，TiNi 合金温度变化主要原因在于正、逆相变过程中相变潜热的释放/吸收和相变变形功的贡献。

冲击变形过程中温度的定量值，一方面可以通过测得的温度信号和标定结果计算得到(见图 4)，另一方面可根据能量守恒定律计算。根据能量守恒，2 种材料温度的变化分别为：

$$\theta_{\mathrm{Al}}-\theta_0=\eta W/\rho c_p,\qquad \theta_{\mathrm{TiNi}}-\theta_0=(W+Q)/\rho c_p \tag{5}$$

式中：第 1 式，W 为塑性功，η 为塑性功转化系数；第 2 式，W 和 Q 分别代表相变功和相变潜热。ρ 为材料密度，c_p 是材料比定压热容。

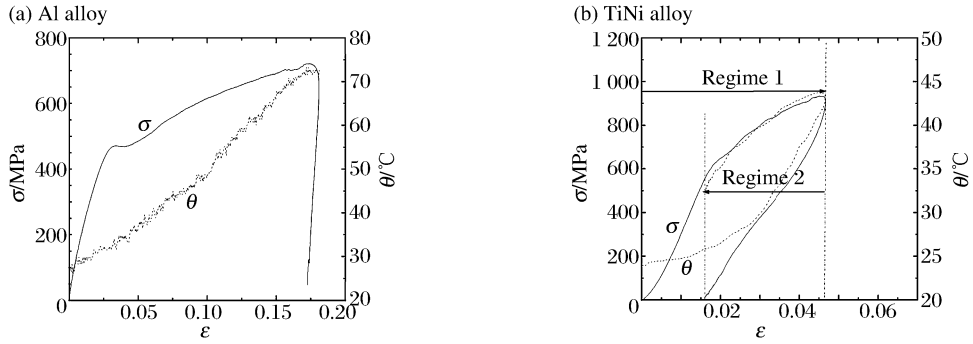

图 5 Al 合金和 TiNi 合金试样的应力应变关系和温度曲线

Fig. 5 Stress-strain relations and temperature cures of Al alloy and TiNi alloy specimen

表 1 给出了由式(5)计算得到的 2 种材料冲击变形过程温度变化和通过标定式(3)和(4)换算得到的结果。θ_m 为最大加载温度,θ_u 为卸载温度,θ_1 为相变功产生的温升,θ_2 为相变潜热产生的温升。由表 1 可知,当塑性功热转化系数 η 取 0.9 时,Al 合金试样计算最大加载温度 62.9 ℃略低于测量值;TiNi 合金试样加载相变过程中由相变功产生的温升为由相变潜热产生温升的约 1/3,并且由计算得到的最大加载温度和卸载后温度均略高于标定值,可能同计算时采用固定比定压热容有关。比定压热容一般随温度升高而增大,同时进入混合相区后由于奥氏体相和马氏体相比定压热容不同,因此在混合相区比定压热容与马氏体体积分数相关,而在计算中仍采用奥氏体相比热,可能带来一定误差。但总体来看,数据基本吻合。

表 1 测量和计算温度的比较

Table 1 Comparison of measured and calculated temperatrues

材料	测量		计算			
	θ_m/℃	θ_u/℃	θ_1/℃	θ_2/℃	θ_m/℃	θ_u/℃
Al 合金	65.4	65.4	38.9	—	62.9	62.9
TiNi 合金	43.8	30.4	5.4	15.3	44.7	32.5

3 结 论

将红外瞬态测温装置引入 SHPB 冲击实验,确定了不同材料试件的温度标定曲线,并实时测量了动态冲击压缩条件下 Al 合金和 TiNi 合金试样变形过程中的瞬态温度变化。

(1)定性上,2 种不同材料试样温度变化规律反映了冲击加、卸变形过程中不同的物理机制。从能量看,Al 合金试样温度变化来源于塑性功,TiNi 合金温度变化来源于相变潜热和相变变形功的贡献。

(2)定量上,由实验通过红外测量得到的温度和通过变形功、相变潜热理论计算得到的温度基本一致,说明红外瞬态测温方法用于材料冲击变形过程中是可行的。

(3)影响红外瞬态测温精度的不确定因素很多。试样变形过程中表面粗糙度、灰度和曲率等的变化,泊松效应引起的试样径向膨胀会轻微改变测量位置等,意味着标定条件和实际实验条件不完全一致,由此带来一定的误差,需要进一步研究。

参考文献:

[1] Hodowany J. On the conversion of plastic work into heat[D]. California Institute of Technology, 1997.

[2] Mason J J, Rosakis A J, Ravichandran G. On the strain and strain rate dependence of the fraction of plastic work converted into heat: An experimental study using high-speed infrared detectors and the Kolsky bar[J]. Mechanics of Materials, 1994,17(2/3):135-145.

[3] Craig S J, Gaskell D R, Rockett P, et al. An experimental technique for measuring the temperature rise during im-

pact testing[J]. Le Journal de Physique Ⅳ, 1994,4(C8):41-46.

[4] Marchand A, Duffy J. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1988,36(3):251-283.

[5] Zehnder A T, Rosakis A J. Temperature rise at the tip of dynamically propagating cracks: Measurements using high-speed infrared detectors[C]. Experimental Techniques in Fracture. New York: VCH Publishers Inc, 1993: 125-169.

[6] Guduru P R, Zehnder A T, Rosakis A J, et al. Dynamic full field measurements of crack tip temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001,68(14):1535-1556.

[7] 夏源明,饶世国,杨报昌.红外瞬态测温装置及其在冲击拉什试验中的应用[J].实验力学,1990,5(2):170-177.
Xia Yuan-ming, Rao Shi-guo, Yang Bao-chang. An infrared transient temperature measuring apparatus and its application to the tensile impact testing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1990,5(2):170-177.

[8] Jy R D.红外系统原理[M].北京:国防工业出版社,1975.

[9] Duffy J, Cambell J D, Hawley R H. On the use of the torsional Hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 Aluminum[J]. Journal of Applied Mechanics, 1971,38(1):83-92.

[10] Li Z, Lambors J. Dynamic thermomechanical behavior of fiber reinforced composites[J]. Composites, 2000,31: 537-547.

Real-time measuring methods for transient temperature under shock loading*

Liu Yong-gui, Tang Zhi-ping, Cui Shi-tang

(*CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*)

Abstract: An infrared detector system was introduced into the apparatus of the split Hopkinson pressure bar. Real-time temperature of the dynamic deformed specimens of pseudo-elastic TiNi alloy and aluminium alloy was measured with calibrated curves of temperature and voltage. The temperature results varied significantly. During loading, the temperature of two kinds of materials kept to rise. The main difference of temperature evolution of two kinds of specimen appeared during unloading. For specimen of aluminium alloy, temperature during unloading kept constant as the maximum temperature during loading. In contrast, temperature of specimen of TiNi alloy decreased significantly. The difference of temperature evolution of specimens reflects that there are different mechanisms of deformation and temperature variation for two kinds of materials. The measured temperature in the infrared method was in good agreement with the temperature calculated by the principle of energy conservation. It means that the infrared method is adaptable for real-time measurement of transient temperature.

Key words: solid mechanics; transient temperature; infrared temperature measurement; Al alloy; real-time; shock loading; pseudo-elastic TiNi alloy

---

* Received 29 November 2012; Revised 14 January 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11072240)
Corresponding author: Liu Yong-gui, liuyongg@mail.ustc.edu.cn

(责任编辑　丁　峰)