文章编号：1000-5773(2011)05-0421-08

预加热金属 Hugoniot 参数和界面温度的联合测试技术*

李　俊，李加波，周显明，王青松，戴诚达

（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国防科技重点实验室，四川绵阳　621900）

摘要：发展了一种可用于轻气炮压缩实验的电阻丝预加热装置和高温靶实验测试技术，通过微热电偶丝实时测量了预加热金属的初始温度，并利用非接触式光纤探针技术实现了 Hugoniot 参数和界面温度的同时测量。常温下实测的金属 Ta 的冲击波速度 D 和粒子速度 u 与文献报道的冲击实验数据相符，而初温 773 K 金属 Ta 的 (D,u) 数据则低于采用 Mie-Grüneisen 状态方程计算的结果；实测的界面温度与 Lindeman 熔化线和第一性原理的计算结果均符合较好。实验结果表明，所设计的高温靶装置及相关实验诊断技术是可行并有效的，为今后开展材料动态性能的温度效应研究提供了一种有效的技术途径。

关键词：电阻丝预加热；非接触式光纤探针；冲击 Hugoniot 参数；界面温度

中图分类号：O521.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

物态方程是冲击波物理和地球行星科学领域中一项重要的研究内容[1]。多年来，人们在常温下对材料的冲击压缩特性进行了大量的实验研究，积累了丰富的数据[2-3]，但测量的 Hugoniot 参数仅能得到 p-V-T 物态方程的冲击绝热线在 p-V 面上的投影线，对于检验和发展全区物态方程理论模型是不够的。实际上，开展初始高温环境下材料的动态性能研究也是 p-V-T 完全物态方程研究的重要内容之一。通过预加热实验技术改变材料的初始温度，由此取得材料在不同温度甚至不同形态下的冲击实验数据，对于检验和发展多相物态方程理论模型，尤其是对于高压熔化线的研究十分关键。一方面，改变初温可较好地拓宽目前高压熔化线测量的压力范围，为确定低压区的固-液相边界，解决静高压、动高压熔化线研究的实验分歧提供直接的实验数据；另一方面，还可有效地控制冲击 Hugoniot 加载路径，为开展低熔点金属 Bi 冲击熔化-再凝固相变研究提供必要的技术手段[4]。因此，建立和发展一套预加热实验装置及相关高温靶测试技术，并在同一实验中获得 Hugoniot 参数和界面温度数据，为动态响应性能的温度效应研究提供更为全面的认识[5]，是十分重要和有价值的。

在预加热材料动态性能的研究报道中[6-13]，一般采用两种方法加热样品：电阻丝加热和高频炉电磁感应加热。早在 20 世纪 70 年代，Asay 等[6]在金属 Bi 冲击熔化的研究中，采用螺线管加热盘对试样的前、后端面同时进行加热，至预定温度后拆除加热盘进行冲击实验。最近，Kanel 等[7]在化爆加载方式下采用镍铬铁合金丝加热圆盘对样品后端面进行预热。Davis 等[8]则采用带状电加热器侧面加热方式

* **收稿日期**：2010-08-21；**修回日期**：2010-12-31

基金项目：中国工程物理研究院科学技术发展基金(2008B01001，2010A0101001)；国防基础科研计划资助项目(A1520070078)

作者简介：李　俊(1982—)，男，硕士，助理研究员，主要从事高压材料动态特性研究. E-mail：lijun102@caep.ac.cn

通讯作者：周显明(1963—)，男，博士，研究员，主要从事冲击波物理研究. E-mail：xianming_zhou@tom.com

和“Al_2O_3 基板/试样/LiF 窗口”夹心装置对液态金属锡的凝固相变进行研究。上述电阻丝加热方式虽操作简单,但对加热均匀性的控制较为困难。另一方面,Ahrens 小组等[9-12]利用高频炉电磁感应加热方式,开展了液体 SiO_2(初温 2000 K)和高温金属 Mo(初温 1400 ℃)的动态特性研究;谷卓伟等[13]也进行过少量高温不锈钢的动态实验。该技术虽然可以实现均匀加热并可达到较高的加热温度,但不适用于金属 Bi 等抗磁性材料,同时加热系统过于庞大、复杂且危险,需要水冷循环装置和 10 kW 高频加热器。

从上述研究报道不难发现,无论是电阻丝加热方式还是高频感应加热方式,预加热实验的一个关键技术问题——高温试样的 Hugoniot 参数测量——至今未能得到很好地解决。作为传统的 Hugoniot 参数测量方法,电探针测试技术虽然具有较高的测试精度,但由于需要与被测样品直接接触,对于高温靶实验已无法适用。而近年来发展的新型非接触式 Doppler 光探针(DPS)测试技术,由于测量景深的限制也不太满足使用要求。针对上述问题,本研究发展了一种用于轻气炮压缩实验的电阻丝预加热系统,采用多通道辐射高温计和光探针诊断系统,实现了非接触式 Hugoniot 参数和界面温度的同时测量,通过常温和高温金属 Ta 的冲击压缩实验,考核了上述测试技术的可行性和实用性,为 Hugoniot 参数测量提供了一种新的实验诊断方法。

2 实验方法及技术

2.1 预加热实验装置

考虑到高温靶实验技术的适用性,本实验选用了电阻丝加热方式,主要技术难点如下:(1) 预热温度的均匀性、稳定性问题 选用的加热装置应保证样品受热尽量均匀,同时还需保证动态实验前预热温度稳定;(2) 高温靶样品盒的密封问题 若预热温度高于被测样品的熔点,设计高温靶装置时应考虑熔化样品的完全密封;(3) 测量系统的安全性和可行性问题 由于被测样品具有较高的初始温度,电探针测量技术是不可行的,诊断系统应尽量避免高温条件的影响,才能保证实测信号精确有效;(4) 系统各器件的连接问题 由于高温靶装置包括加热器、热电耦和绝热器等复杂部件,设计时应考虑实验装配的可行性以及实验的安全性。

为了解决上述技术问题,设计了一种电加热样品盒,将电加热器密封于金属铸件中作为样品盒的主体,可使系统各器件的连接简化;通过小尺寸样品设计(四周形成恒温池)和长时间预热方式,尽可能保证预加热的均匀性和稳定性;选用高熔点金属作为基板,Al_2O_3 或 LiF 组合窗作为样品盒盖板和观测窗口,希望通过各器件的紧密加工和装配,以确保样品盒的完整密封;同时,利用光学透镜耦合系统实现非接触式光探针测量,避免测试探头与靶样品的直接接触,确保了实验测试的安全有效。

图 1 为高温靶装置结构示意图,系统各主件之间采用金属滑套连接,由此可确定各主件的装配精度和同轴度。系统主件如下。

(1) 电加热器 选用铜(或铁)铸件电阻丝加热器作为样品盒主体,其额定功率为 450 W,工作电压为 50 V,样品盒外部加覆隔热保护层。利用金属良好的热传导特性可对样品盒内部(通孔直径为 30 mm)的试样进行长时间加热,并使样品到达最终的热平衡状态。

(2) 温度测量系统 采用镍-铬(正极)/镍-铝(负极)K 型热电偶(测温范围为 −270～1370 ℃)夹压于金属基板与试样界面,连接数字式温度计,以测量被测试样的初始加热温度(T_0);每次实验前均采用 Fluke 714 热电偶温度校准仪对热电偶进行标定,校准仪的测量精度为 0.3 ℃。实验所用数字式温度计为英国 RS 公司的 Digitron 2022T K 型热电偶数字温度计,测温范围为 −200～1350 ℃,测量精确度为 ±0.1 %,满足本实验使用要求。

(3) 光学耦合系统 利用凸透镜(R=42.3 mm,f=50 mm)和多根光纤探针作为光学耦合系统,根据光路转换原理使样品表面与测试光纤端面处于共轭物像关系,等效于将测试光纤安装在样品表面处[14],由此实现非接触式测量,以确保测试光纤不受预加热高温的影响或破坏。此外,每次实验前需利用溴钨灯对光纤探针等效在样品表面的相对位置进行实时标定,图 1 中右侧图为光探针所对应的相对位置成像照片。

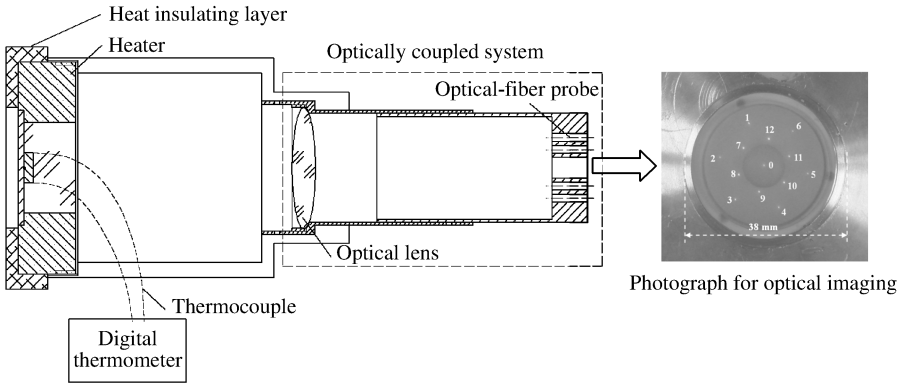


图 1 高温靶装置结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of experimental set-up for preheating

2.2 实验方法

在二级轻气炮上(发射管内径 32 mm)采用高速平板撞击方法进行冲击加载,可控弹速范围为 2～7 km/s,飞片击靶速度 w 由发射管口的磁测速系统测量,相对测量不确定度小于 0.5%。为达到实验压力范围,可选用不同冲击阻抗的金属材料作为飞片(Hugoniot 参数已知),高熔点金属 Ta 作为基板,样品尺寸的设计需确保界面观测区域不受样品边侧稀疏波和飞片后界面追赶稀疏波的影响。实验使用的装置参数见表 1。

表 1 实验装置参数(名义尺寸)

Table 1 Experimental configuration parameters (nominal)

Ta flyer/(mm×mm)	Ta buffer/(mm×mm)	Ta sample/(mm×mm)	Sapphire/LiF window/(mm×mm)
28×1.5	36×1.5	10×3	30×10

预加热金属样品的 Hugoniot 参数和界面温度测量采用非接触式光探针测试技术,测试系统如图 2 所示。当冲击波到达金属基板/窗口界面时(界面 1),由于基板在冲击载荷作用下产生较强的热辐射而导致光强幅度突然增加,因此通过外围均布的光纤探针,利用多通道辐射高温计记录的光辐射信号即可判读出对应各点的冲击波到达时刻,结合冲击波阵面等位修正技术,进而得出冲击波到达样品前端面中心点的时刻。当冲击波继续传至样品/窗口界面时(界面 2),利用中心光纤探针还可得到样品/窗口界面的光谱辐亮度历史及冲击波到达样品后端面的时刻。根据上述实测的冲击波走时和样品的初始厚度计算出冲击波波速 D,再利用阻抗匹配法和样品初始密度(ρ_0)得出预加热样品的粒子速度 u_p、冲击终态压力 p_H 和比容 v 等。此外,由于实验中高温计各通道所使用的光电转换器件和传输光纤长度并不相

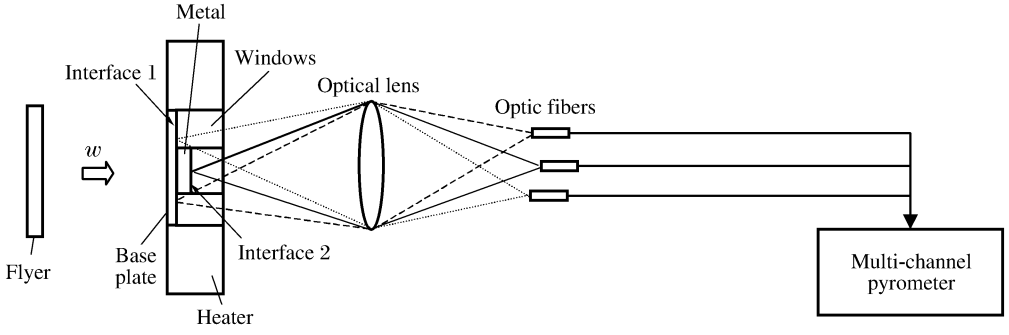


图 2 预加热实验测试系统示意图

Fig. 2 A combined diagnostic technique of Hugoniot and temperature for preheated shock-wave experiments

同,因此每次实验前都需采用纳秒脉冲激光器对测试系统各通道之间的传输和响应时间差异进行标定,以扣除由测试系统自身带来的测量不确定度的影响。

为确定样品发射的光谱辐亮度值,每次实验前需用溴钨标准灯(OSRAM 400 W,由中国测试技术研究院标定光谱辐照度曲线)对高温计各通道进行标定。若在标定和动态实验时示波器记录波形的幅度分别为 h_c 和 h,则根据光纤的空间张角(接收角 θ)按照被测源满足余弦辐射定律的前提,可导出中心波长 λ_i 的光谱辐亮度 $I_{\mathrm{pl}}(\lambda_i)$ 的计算公式

$$I_{\mathrm{pl}}(\lambda_i)=\frac{hR_{\mathrm{C}}}{(\pi\sin^2\theta)h_cR_{\mathrm{L}}}I_{\mathrm{C}}(\lambda_i),\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中:R_{L} 和 R_{C} 分别为动态实验负载电阻和标定负载电阻,$I_{\mathrm{C}}(\lambda_i)$ 为标准灯的光谱辐照度随波长的变化曲线,n 为高温计通道数。根据 Planck 热辐射定律,利用灰体模型对各波长实测光谱辐亮度进行最小二乘法拟合,即可得样品/窗口的界面温度 T_{i},即

$$I_{\mathrm{grey}}=\varepsilon I_{\mathrm{pl}}(\lambda,T_{\mathrm{i}})=\varepsilon c_1\lambda^{-5}\left[\exp(c_2/\lambda T_{\mathrm{i}})-1\right]^{-1} \tag{2}$$

式中:$c_1=0.119\,106\ \mathrm{fW\cdot m^2/Sr}$、$c_2=14.387\,8\ \mathrm{mm\cdot K}$,分别为第一辐射常数和第二辐射常数;$I_{\mathrm{grey}}$ 为灰体模型的光谱幅亮度,ε 为与波长 λ 无关的发射率值。。

3 实验结果与讨论

在中国工程物理研究院的二级轻气炮上,共完成了 1 发常温金属 Ta 和 3 发预加热金属钽的冲击压缩实验,初始预热温度均为 773 K。预加热实验中,每次实验前均利用微热电偶多点检测预加热样品温度分布的均匀性,实测金属 Ta 试样前、后表面的温度差小于 5 K,在直径∅10 mm 范围内的径向温度分布差极值小于 2%。实测金属 Ta 的 Hugoniot 数据和界面温度见表 2。

表 2 常温和高温金属 Ta 的冲击压缩实验条件及结果

Table 2 Shock compression experimental conditions and results of Ta

Exp. No.	Initial temperature T_0/(K)	Initial density ρ_0/(g/cm³)	Impact velocity w/(km/s)	Particle velocity u_{p}/(km/s)	Shock-wave velocity D/(km/s)	Shock pressure p_{H}/(GPa)	Interfacial temperature T_{i}/(kK)
Ta0[a)]	300±2	16.653	4.95±0.025	2.48±0.04	6.53±0.06	269.3±1.3	7.64±0.6
HTa1[b)]	773±5	16.505	5.15±0.025	2.60±0.06	6.54±0.13	281.0±4.1	7.28±0.3
HTa2[a)]	773±5	16.505	5.38±0.027	2.72±0.07	6.69±0.17	299.9±5.4	7.50±0.2
HTa3[a)]	773±5	16.505	5.46±0.027	2.76±0.08	6.74±0.19	306.8±6.2	7.80±0.2

Note: a) Al_2O_3 single crystal window with orientation of 〈001〉;

b) LiF single crystal window with orientation of 〈100〉.

图 3 是编号为 Ta0 实验中测得的典型光探针输出波形,由图 3 可见,当冲击波到达基板后端面时立刻产生很强的光辐射信号。将初始尖峰 A 点作为光探针各点对应的冲击波到达时刻,结合光纤探针的结构布局,利用冲击波阵面修正技术拟合的冲击波阵面如图 4 所示,表明冲击波阵面具有较好的平面性,飞片击靶倾角小于 0.5°。结合中心点记录的冲击波到达样品后界面的时刻,得到样品中冲击波的走时为 477.2 ns、冲击波速度为 6.527 km/s。根据阻抗匹配法和已知飞片的 Hugoniot 关系,得到粒子速度为 2.478 km/s。实验中采用常温金属 Ta 进行对称碰撞,根据实测弹速得出的粒子速度与上述结果是一致的,验证了我们实验测量方法的有效性。图 5 和图 6 是编号为 HTa2 实验获得的典型光探针输出波形和对应的冲击波阵面拟合结果,飞片击靶倾角约为 1°,冲击波速度为 6.685 km/s。

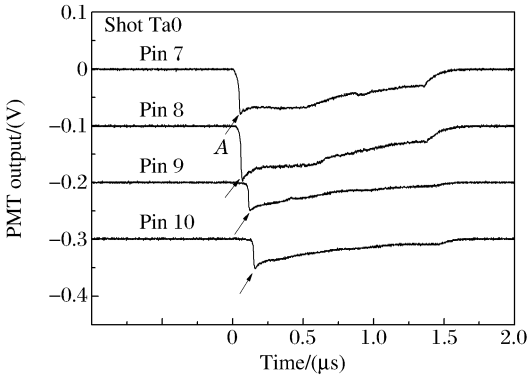


图 3　Ta0 号实验中光纤探针记录的原始输出波形

Fig. 3　The output signal of optical-fiber pins in shot Ta0

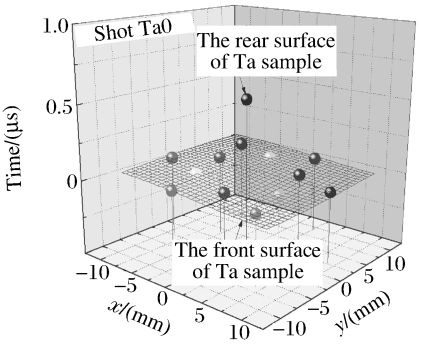


图 4　常温 Ta 冲击波阵面拟合结果

Fig. 4　Measured shock wave front of Ta without preheated

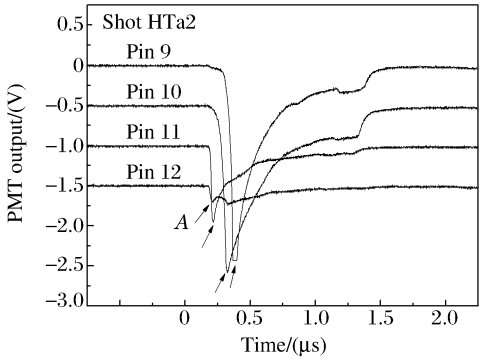


图 5　光纤探针记录的原始输出波形

Fig. 5　The output signal of optical-fiber pins in shot No. 3

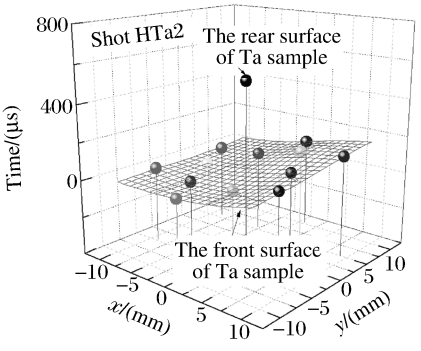


图 6　高温 Ta 冲击波阵面拟合结果

Fig. 6　Measured shock wave front of Ta preheated to 773 K

实测的金属 Ta 冲击波速度 D-粒子速度 u_p 曲线与理论计算曲线的比较如图 7 所示。在常温环境下,我们的实验数据与 Nellis 等[2]利用电探针技术测量的冲击实验结果是相符的,由此进一步表明利用非接触式光探针技术测量 Hugoniot 参数是可靠、有效的。而在高温环境下(初温 773 K),实测的(D,u)数据(相对不确定度小于 4%)则低于由 Mie-Grüneisen 状态方程计算的结果(在假定 $\gamma\rho = \gamma_0\rho_0$ 的条件下,利用常态 Hugoniot 数据计算得到[15],见表 3,表 3 中 c_0、λ、γ_0 和 α 分别表示零压体积声速、$D(u)$直线关系式中的斜率、Grüneisen 系数和体热膨胀系数),类似现象在高温(1 400 ℃)金属 Mo 的物态方程研究中也曾观测到[10-12],对此还需开展进一步的研究工作。

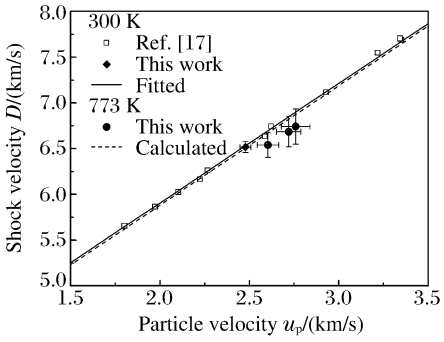


图 7　常温及高温金属钽的冲击波速度与粒子速度关系比较

Fig. 7　Comparison for shock velocity versus particle velocity of Ta at 300 K and 773 K

图 8 是编号为 HTa2 实验中由多通道辐射高温计记录的中心点光辐射信号,初始尖峰由冲击波到达 Ta 样品后端面/Al_2O_3 窗口时引起的界面高温层发光所致,可判读为冲击波到达 B 点的时刻;尖峰信号的急剧下降表示高温薄夹层与窗口和试样之间的快速热平衡过程,弛豫时间约为 20 ns;随后一平台信号的幅度略微降低则是由 Al_2O_3 窗口的冲击消光而导致光辐射衰减所致,两者间呈现出清晰的信

号拐点(即 B' 点时刻)应为界面平衡温度辐射,进而得出预加热试样的界面温度。图 9 为典型的温度数据拟合曲线,实测的 Ta/Al_2O_3 界面温度为 7 500 K,拟合相对测量不确定度约为 3%。由于实验前预估的弹速和压力使 Ta 样品冲击态处于固-液混合相区,根据文献[16-18]中含固-液相变的热传导模型分析,当发生冲击熔化时可以把界面温度当作在样品与窗口阻抗匹配压力下的熔化温度。

表 3 Ta 和 Al_2O_3 的常态和高温 Hugoniot 参数

Table 3 Hugoniot parameters of Ta and Al_2O_3 under ambient and preheating conditions

Material	T_0/(K)	ρ_0/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ	γ_0	α/(10^{-6}/K)
Ta[2]	300	16.653	3.293	1.307	1.8	6.3
	773	16.505	3.272	1.308	—	—
Al_2O_3[3]	300	3.989	8.729	1.000	1.324	8.4
	773	3.941	8.694	1.003	—	—

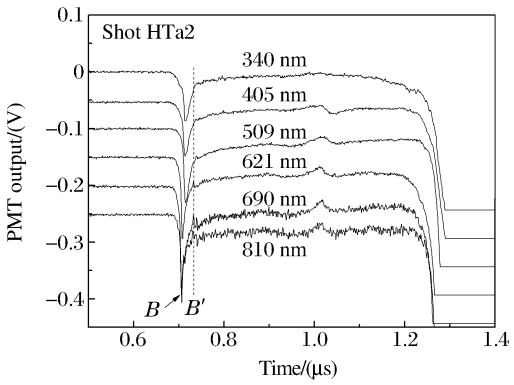


图 8 高温计输出波形

Fig. 8 The output signal of pyrometer

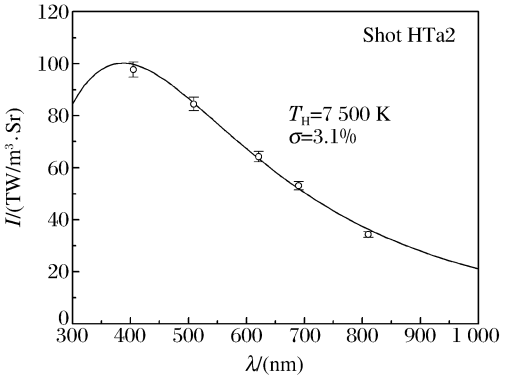


图 9 样品/窗口界面温度拟合

Fig. 9 Shock temperature for sample/window interface

图 10 是实测的 Ta 冲击熔化温度与热力学理论计算和文献报道结果的比较,其中预加热 Ta 的卸载压力由实测(D,u)数据和理论计算的窗口高温(773 K)Hugoniot 线(见表 3)通过阻抗匹配法得到。由图 10 可见,我们测得的常温和高温金属 Ta 的冲击熔化温度与 Dai 等[19]报道的室温金属 Ta 的冲击熔化温度数据是一致的,与计算的 Lindemann 熔化线和 Strachan 等[20]的第一性原理计算结果也符合较好,但与金刚石压砧(DAC)的静压实验结果[21]仍存在较大的差异。

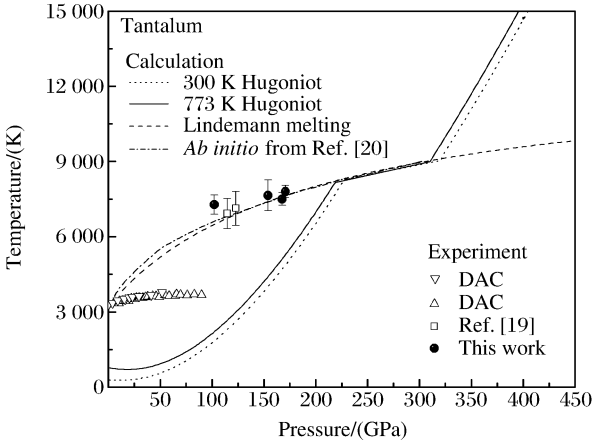


图 10 实测熔化温度与理论计算结果的比较

Fig. 10 Comparison between measured melting temperature and theoretical calculations

4 结 论

建立了用于轻气炮压缩实验的高温靶实验诊断技术,开展了一种新的非接触式 Hugoniot 参数测量方法,得到以下结论和认识。

(1) 设计了以金属铸件电加热器作为高温靶样品盒的主体,有效简化了高温靶系统各器件的连接,

实现了预加热控温范围为 300～800 K。

(2) 利用光学耦合诊断系统,发展了用于高温靶的非接触式光纤探针与多通道辐射高温计的联合诊断技术,在一发实验中实现了预加热样品的 Hugoniot 数据和界面温度的同时测量。

(3) 实测金属 Ta 的 Hugoniot 结果显示,常温(D,u)数据与文献报道的冲击实验点是相符合的,表明我们的诊断技术是可靠并有效的;而初温 773 K 的实验数据点则低于 Mie-Grüneisen 状态方程的计算结果;同时,实测的固-液混合相区的界面温度值与文献报道的室温 Ta 冲击熔化温度是一致的,与理论计算的 Lindemann 熔化线及第一性原理计算结果均符合较好,验证了该高温靶诊断技术的有效性。本工作发展的联合诊断技术可为开展材料动态性能的温度效应研究提供一种新的技术途径。

References:

[1] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1999: 5. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 第 2 版. 北京:科学出版社, 1999: 5.

[2] Mitchell A C, Nellis W J. Shock Compression of Aluminum, Copper, and Tantalum [J]. J Appl Phys, 1980, 52: 3363-3374.

[3] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. Los Angeles: University of California Press, 1980.

[4] Colvin J D, Reed B W, Jankowski A F, et al. Microstructure Morphology of Shock-Induced Melt and Rapid Resolidification in Bismuth [J]. J Appl Phys, 2007, 101: 084906(1)-084906(10).

[5] Li J, Zhou X M, Wang X, et al. A Combined Measurement with Pyrometer and VIASR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(2): 203-207. (in Chinese)
李　俊, 周显明, 王　翔, 等. 多通道辐射高温计与 VISAR 的联合诊断技术 [J]. 高压物理学报, 2008, 22(2): 203-207.

[6] Asay J R. Shock-Induced Melting in Bismuth [J]. J Appl Phys, 1974, 45: 4441-4452.

[7] Kanel G I, Razorenov S V, Bogatch A, et al. Spall Fracture Properties of Aluminum and Magnesium at High Temperatures [J]. J Appl Phys, 1996, 79: 8310-8317.

[8] Davis J P, Hayes D B. Isentropic Compression Experiments on Dynamic Solidification in Tin [A]//Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter-2003 [C]. New York: Elsevier Science Publishers, 2004: 163-166.

[9] Rigden S M, Ahrens T J, Stolper E M. Shock Compression of Molten Silicate: Results for a Model Basaltic Compression [J]. J Geophys Res, 1988, 93: 367-382.

[10] Miller G H, Ahrens T J, Stolper E M. The Equation of State of Molybdenum at 1 400 ℃ [J]. J Appl Phys, 1988, 63: 4469-4475.

[11] Duffy T S, Ahrens T J. Free Surface Velocity Profiles in Molybdenum Shock Compressed at 1 400 ℃ [A]//Schmidt S C, Shaner J W, Semara G A, et al. High-Pressure Science and Technology [C]. New York: Plenum Press, 1993: 1079-1082.

[12] Duffy T S, Ahrens T J. Dynamic Response of Molybdenum Shock Compressed at 1 400 ℃ [J]. J Appl Phys, 1994, 76: 835-842.

[13] Gu Z W, Jin X G, Zhang Q F, et al. A Set of Experimental Device of Preheating Materials under Shock Compression and Shock Response of Stainless Steel with High Temperature [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1998, 12(3): 190-197. (in Chinese)
谷卓伟, 金孝刚, 张清福, 等. 材料预加热冲击压缩实验技术及高温下不锈钢的动态响应 [J]. 高压物理学报, 1998, 12(3): 190-197.

[14] Li J, Zhou X M, Li J B, et al. A Shock-Induced Phase Transformation in a $LiTaO_3$ Crystal [J]. J Appl Phys, 2007,

102:083503(1)-083503(5).

[15] Dai C D, Tan H, Hu J B, et al. Hugoniot Evaluation of the Preheated Metal from Its Principal Hugoniot [J]. J Appl Phys, 2006, 99: 056102(1)-056102(3).

[16] Tan H. Introduction to Experimental Shock-Wave Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 137. (in Chinese)
谭 华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 137.

[17] Tan H, Dai C D, Zhang L Y, et al. Method to Determine the Melting Temperatures of Metals under Megabar Shock Pressures [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87: 221905(1)-221905(3).

[18] Partouche-Sebban D, Pelissier J L, Abeyta F G, et al. Measurement of the Shock-Heated Melt Curve of Lead Using Pyrometry and Reflectometry [J]. J Appl Phys, 2005, 97: 043521(1)-043521(11).

[19] Dai C D, Hu J B, Tan H. Hugoniot Temperature and Melting of Tantalum under Shock Compression Determined by Optical Pyrometry [J]. J Appl Phys, 2009, 106: 043519(1)-043519(7).

[20] Strachan A, Cagin T, Gulseren O, et al. First Principles Force Field for Metallic Tantalum [J]. Model Simul Mater Sci Eng, 2004, 12: 445-456.

[21] Errandonea D, Somayazulu B, Ditz R, et al. Systematics of Transition-Metal Melting [J]. Phys Rev B, 2003, 63: 132104(1)-132104(4).

A Combined Technique for Measuring Hugoniot and Interfacial Temperature of Preheating Metals

LI Jun, LI Jia-Bo, ZHOU Xian-Ming,
WANG Qing-Song, DAI Cheng-Da

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

Abstract: Research of dynamic respond properties for metal at initial high-temperature condition is very important to develop the universal equation of state. Thus, resistance-wire preheating apparatus over initial temperature range of 300-800 K has been built up by our group in light-gas-gun experiments, and a non-contact pyrometer diagnostic technique was developed to perform simultaneous measurements of the shock-Hugoniot and the interfacial temperature on a preheated metal. Examples for measuring dynamic respond properties of tantalum are presented. The measured data for shock velocity versus particle velocity at initial temperature of 300 K is in agreement with previous shock compression data, while the data of 773 K lies below the theoretical Hugoniot that was calculated based on the principal Hugoniot. The obtained interfacial temperatures are in agreement with the melting points that shocked from the ambient conditions and *ab initio* results. It indicates that our target-preheating apparatus and non-contact pyrometer diagnostic technique is a viable approach to study the temperature effects on shock response of metals.

Key words: resistance-wire heater; non-contact optic fiber probes; shock-Hugoniot parameter; interfacial temperature