

强冲击下金属铜界面辐射特性测量研究

张宁超¹, 张苗苗², 史国清³, 任娟², 高雅¹, 刘福生⁴

(1. 西安工业大学电子信息工程学院, 西安 710021; 2. 西北机电工程研究所, 咸阳 712099;
3. 西安工业大学理学院, 西安 710021; 4. 西南交通大学高压物理研究所, 成都 610031)

摘要: 强冲击条件下金属温度是其重要的状态参量, 由于冲击加载过程时间短以及辐射温度高等特点, 导致常规静态测温方法不适用. 本文利用二级轻气炮发射高速弹丸, 与金属碰撞后形成冲击波对样品进行压缩, 再利用多通道辐射高温计测试系统获取强冲击下金属铜的辐射信号. 通过改进样品加工和靶体装配技术, 成功获得了金属铜界面稳定的发光辐射历史. 通过普朗克灰体模型拟合得到金属在冲击压缩下接近理想模型的辐射温度值.

关键词: 强冲击; 高温计; 金属铜; 辐射特性

中图分类号: O521 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0769-06

Research on radiation from copper interface under strong impact

ZHANG Ning-Chao¹, ZHANG Miao-Miao², SHI Guo-Qing³, REN Juan², GAO Ya¹, LIU Fu-Sheng⁴

(1. College of Electronics and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China;
3. School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
4. Institute of High Pressure Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Temperature is an important parameter under strong impact conditions to study the state of metal. It is very difficult to be measured under high pressure because the short impact loading process and the high radiation temperature. In this work, the radiation pyrometer is used to study the radiation characteristics from metal interface. By improving the processing technology to the metal sample and assembly technology to the target, the stable history of radiation from the metal interface has been successfully obtained. It is confirmed that the temperature values is consistent with ideal model.

Keywords: Strong impact; Pyrometer; Copper; Radiation

1 引言

在强冲击条件下金属材料的物理性质是高温高压物理科学中重要的研究课题之一, 而温度参数更是描述金属在极端压缩条件下的重要热力学参量, 对于金属在强冲击压缩下温度的测量, 人们进行了大量的实验以及理论研究^[1-3]. 高速碰撞产生

的冲击压缩过程在样品中持续时间非常短暂, 而且在整个压缩过程产生的压力和温度值都非常高, 因此在高速的冲击压缩过程中要获取材料的冲击温度异常困难, 对于静态下的常用测温方案一般都无法实现, 只有选用动态响应灵敏度高且能够测试超高温的设备才能够对其进行测量. 当前的研究中, 人们往往都是通过收集获取材料在强冲击

收稿日期: 2017-11-16

基金项目: 陕西省教育厅科研专项(17JK0366); 陕西省科技厅重点研发计划(2017ZDXM-GY-114); 西安市科技局科研专项(RC038XAGY010, RC038XAGY005)

作者简介: 张宁超(1986-), 讲师, 主要从事冲击高压下材料性质研究. E-mail: zhangningchao123@126.com

压缩过程的发光辐射信号来得到其温度信息, 这就是辐射法测温^[4-6]. 然而对于不透明的金属, 整个压缩过程我们又不能直接观测到辐射信息. 在早期, Taylor^[7]就采用辐射法研究了金属铜在冲击过程温度的测量, 然而由于冲击波进入金属后压缩产生的辐射信息并不能透过未压缩层被接收到, 所以他最后只得到了冲击波到达铜的后界面时卸载到空气中的残余温度. 到了上世纪 70 年代, 金属冲击温度测量工作不论是实验技术和理论分析上都有了较大突破, 最具代表性的是 Grover 和 Urtiew 的研究工作^[8]. 实验技术上他们提出在样品后端面加一个透明窗口, 这样当冲击波到达金属后界面时不至于快速卸载到常压, 同时通过对加了窗口后获得的界面辐射信号进行了分析建模. 由于实验中金属后界面加窗口带来最大的问题是间隙无法消除, 因此他们根据不同的热传导模型对不同情况作出解释, 但对于理想接触情况, 他们认为界面处应该出现稳定辐射历史. 随着镀膜技术的发展, 上世纪 90 年代国内学者^[9-11]利用在透明窗口上镀金属膜以达到金属与窗口理想接触的条件, 但是实验中得到的界面辐射与 Grover 模型预测并不一致, 并提出一种“热阻模型”来解释实验信号. 对于实验中无法消除的界面间隙的强辐射, 谭华等人^[12-14]做了系统地研究, 提出了“三层介质”模型来分析界面处金属物质经历“冲击—卸载—再冲击”的物理过程.

对于上述研究中产生的各种不统一, 本文认为主要有两个方面的原因: 首先是实验样品的制备和靶装配过程中能否保证样品表面光洁度以及

与窗口的紧密接触程度; 其次是测量过程中, 窗口透明性是否发生变化, 从而判断对实验信号有无影响. 本文在前期研究蓝宝石窗口辐射特性工作基础上^[15], 优化了测试技术, 选用透明性好的 LiF 单晶作为窗口材料, 利用多通道辐射高温计测试系统, 对金属铜的界面辐射特性做了研究, 获得了稳定真实金属/窗口界面的辐射历史.

2 实验

2.1 实验样品制备

不透明金属材料辐射发光原则上通过冲击波到达样品后界面光纤引入界面处金属卸载的辐射强度来测量, 然而实验中使用了透明窗口材料后, 金属/窗口界面处无法避免间隙的存在, 如果间隙发光辐射过强或者持续时间较长将淹没金属的自身辐射. 所以样品制备中如何保证其表面光滑且平整是实验中控制间隙发光的重要条件. 本文在实验设计过程中, 通过技术的改进与优化在实验室对其进行机械抛光. 图 1(a)是利用原子力显微镜观察到铜的表面形貌. 由于金刚石研磨膏颗粒太小金属表面非常容易氧化, 所以机械抛光产生的划痕依然存在, 但是我们看到大部分区域能够保证形成的划痕在 20 nm 的范围内. 图 1(b)是 LiF 单晶表面, 由于该晶体硬度小, 操作过程容易产生新划痕, 所以测得划痕在 40 nm 以内. 但是实验装配中如果能保证两者紧密相切, 理论上对于界面接触就能保证小于 1 μm 的量级, 也可以得到力学接触上的理想界面.

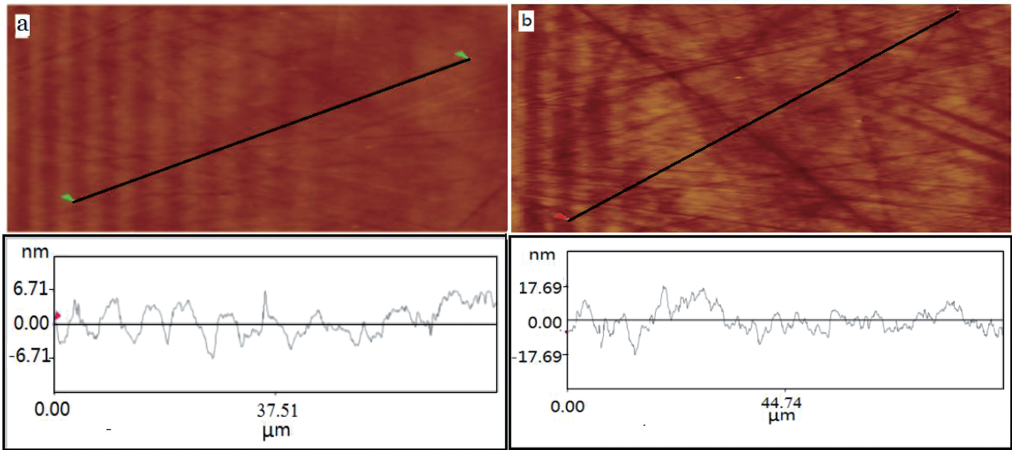


图 1 Cu 和 LiF 单晶抛光后表面形貌及粗糙度
Fig. 1 The surface topography and roughness of Cu and LiF

2.2 测试方案

强冲击压缩过程中金属卸载的光辐射与界面发光总是叠加在一起同时被光纤接收导入. 为了尽量减弱或者消除界面发光的影响, 我们从界面接触间隙和接触区域面积大小进行控制, 使用组合基板与窗口紧贴, 通过螺杆的机械预压以及气体的均匀挤压实现界面更大区域的“理想接触”, 同时使用吸波材料将靶体内部腔体涂黑, 削弱腔壁

的漫反射后杂散光间接进入接收光纤.

图 2 所示为冲击压缩下金属/窗口界面辐射特性测量平台示意图. 图中飞片由二级轻气炮发射并与靶面基板发生碰撞, 在金属样品中将产生冲击波并对其冲击压缩. 飞片的速度将决定每次实验的冲击加载和卸载压力的计算^[16,17]. 顶在窗口后方的光纤束将记录冲击波压缩过程界面产生的发光效应, 并由多通道辐射高温计记录最后导入计算机.

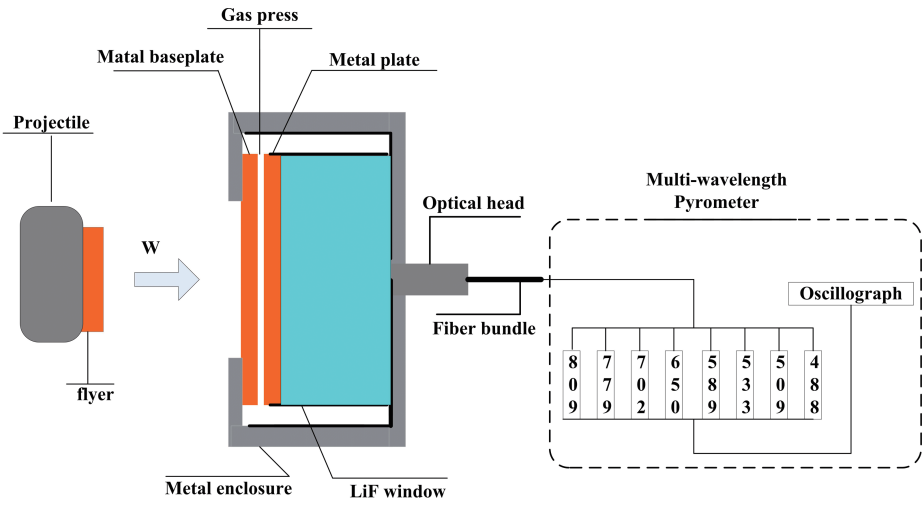


图 2 强冲击下光辐射测试平台

Fig. 2 The emission measurement platform schematic diagram

3 结果与讨论

3.1 典型瞬态光谱信号特性

借助优化后的实验样品装配以及高温计测试系统, 我们设计完成了 Cu/LiF 界面辐射特性的测试实验. 实验装置示意如图 2, 二级轻气炮发射载有无氧铜飞片的弹丸, 碰撞前由磁测速系统获取飞片速度为 4.7 km/s, 同时与金属铜样品发生对称碰撞. 图 3 是根据阻抗匹配方法给出了强冲击压缩过程中冲击波粒子速度与压力的关系^[16,17]. 图中我们可以看到, 该速度碰撞后样品中此时的冲击压力将达到 157 GPa, 但是当冲击波到达金属后界面处时发生卸载、与窗口材料进行阻抗匹配、二者压力达到平衡时得到样品的卸载压力, 该压力也代表了窗口的冲击压力值, 其结果为 82 GPa.

图 4 是本次实验利用高精度多通道辐射高温计给出的波长分别为 701、589、509 和 488 nm 的典型辐射历史. 当冲击波通过不透明金属到达金属后界面时, 在 t_1 时刻由于金属/窗口间隙的存在仍然有辐射“尖峰”的出现, 该时刻也代表了金属样

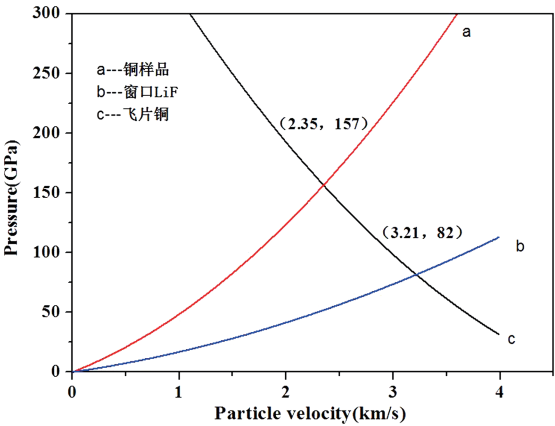


图 3 Cu/LiF 冲击压缩过程粒子速度与压力关系

Fig. 3 The relationship between particle velocity and pressure of Cu/LiF

品从此刻开始进入卸载并与窗口材料进行阻抗匹配, 并且辐射历史特征在理论上应该保持稳定不变的状态. 实验信号中 t_2 时刻辐射明显上翘减弱现象, 根据此时波系的传播特征以及辐射减弱的特征, 认为该现象是飞片后界面反射的稀疏追赶波到达界面影响了辐射的稳定性. 但是该结果的出现说明此刻还能够观测到追赶波影响, 从而判定在

此刻压力下氟化锂窗口仍然透明. 虽然我们优化了样品装配, 但是实验中每个通道的间隙辐射尖峰并没有完全消除. 可以看到, 本实验中间隙尖峰的脉冲宽度几乎在 10 ns 时间内快速熄灭, 从后期稳定而平滑的辐射强度变化历史来看, 认为间隙闪光并没有对界面处金属卸载辐射产生影响.

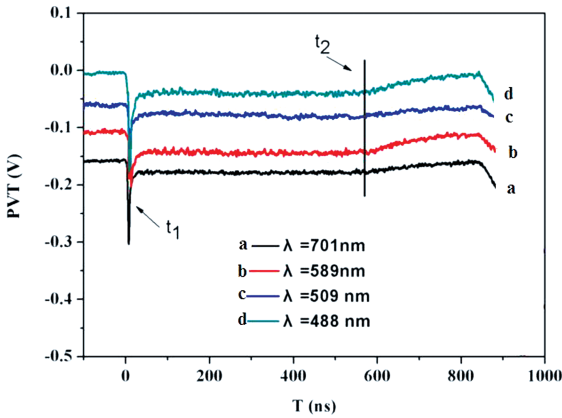


图 4 Cu/LiF 界面辐射历史
Fig. 4 The radiation history from interface of Cu/LiF

3.2 辐射温度分析

根据冲击压缩物质在高温高压下会发射出光辐射能量的原理, 实验中得到的辐射高温计信号就是将物质辐射的光信号, 通过光电转换传感器转变为电信号. 在强冲击实验中, 物质被冲击加载到高温高压状态且处于热力学平衡时, 辐射发光信号由高温计接收, 对不同波长的辐射用最小二乘法原理, 拟合后获得辐射温度值.

根据基尔霍夫辐射定律, 一定的温度 T 对应的光谱辐射强度 $I_{\text{pl}}(\lambda, T)$ 的值可由 Planck 公式^[18]给出:

$$I_{\text{pl}}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$
 C_1, C_2 为 Planck 第一和第二辐射系数: $C_1 = 2\pi c^2 = 1.1910 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Sr}^{-1}$, $C_2 = hc/k = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, λ 为辐射波长. $I_{\text{pl}}(\lambda, T)$ 为光谱辐射强度, 表示温度为 T 的黑体向立体角内辐射的能量. 这样就可以得到灰体辐射光谱辐射强度表达式 $I_{\text{gre}}(\epsilon, \lambda, T)$ 写为:

$$I_{\text{gre}}(\epsilon, \lambda, T) = \epsilon \cdot I_{\text{pl}}(\lambda, T) \quad (2)$$
其中, ϵ 表示灰体的发射率.

对于多通道辐射高温计测量光谱辐射强度实验中, 滤波片的中心波长值决定每个通道将接收的波长, 而且在使用前需要对每个通道的输出强度值通过标准灯进行标定, 获得对已知辐射能量的响应系数. 实验中, 通过滤波片获得八通道的不同

波长信号, 结果根据(1)式进行最小二乘法拟合获得发射率 ϵ 和温度 T .

为了获得高温计对每个通道已知辐射能的响应, 每次实验现场标定, 实验中我们的测试系统标定选用能量为已知的 WBr 灯. 标定过程中, l_0 为标定光纤距标准灯的距离, 光纤探头接收到标准光源 s_0 的能量 E 为:

$$E_c(\lambda) = N_r(\lambda) \cdot \eta(\lambda) S_0 \quad (3)$$

$\eta(\lambda)$ 为系统的光学几何因子, 如表 1 所示.

表 1 标准溴钨灯的 $N_r(\lambda)$ 标定值
Tab. 1 The standard calibration value of the bromine tungsten lamp $N_r(\lambda)$

λ (nm)	809	779	702	650	589	533	509	488
$N_r(\lambda)$	1.58	1.55	1.40	1.23	0.98	0.71	0.59	0.49

标定条件: 室温 25 ℃, 电流 11.51 A, $l_0 = 100 \text{ mm}$, 单位为 $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm}$

实验中为了减小杂散光影响, 使用的光纤直径为 200 μm , 孔径角 $\theta = 12^\circ$. 为了增加标定幅度, 标定时光电倍增管匹配高阻值的负载电阻 R_c , 此时示波器记录幅度可表示为:

$$h_c = E_c \cdot R_c \quad (4)$$

此时光纤接收的能量为:

$$E_c = \eta(\lambda) \cdot I_e \cdot \omega \cdot S_0 = \eta(\lambda) \cdot I_e \cdot 2\pi(1 - \cos\theta)S_0 \quad (5)$$

实验中如果选用匹配电阻为 R_L , 则输出幅度为:

$$h_e = E_c \cdot R_L \quad (6)$$

可得到样品的辐射强度为:

$$I_{\text{exp}} = \frac{h_e}{h_c} \cdot \frac{R_c \cdot N_r(\lambda)}{R_L \cdot 2\pi \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (7)$$

对不同波长的辐射对应同一温度 T , 根据 Planck 平衡热辐射定律, 测得不同波长 I_{exp} 的值. 由于每个通道的辐射强度不一样, 故使用不等权最小二乘法对不同通道的 $I_{\text{exp}}(\epsilon, \lambda, T)$ 拟合:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[\epsilon \cdot I_{\text{pl}}(\lambda_i, T) - I_{\text{exp}}(\lambda_i, T)]^2}{\sigma_{i\text{exp}}^2} \quad (8)$$

根据以上理论, 图 5 分别给出了本文实验中金属/窗口界面辐射温度和拟合误差结果. 与辐射历史信号相比较, 我们认为温度变化的趋势与界面辐射相一致, 能够看到短暂的间隙发光、界面稳定辐射的平台温度和追赶波导致下降的特征. 该特征与 Grove“理想界面”模型的理论预言相一致, 也没有出现“热阻模型”提出的多温度的热弛豫. 本文中的“平台温度”应该代表该了压力下金属/窗口界面真实的温度值.

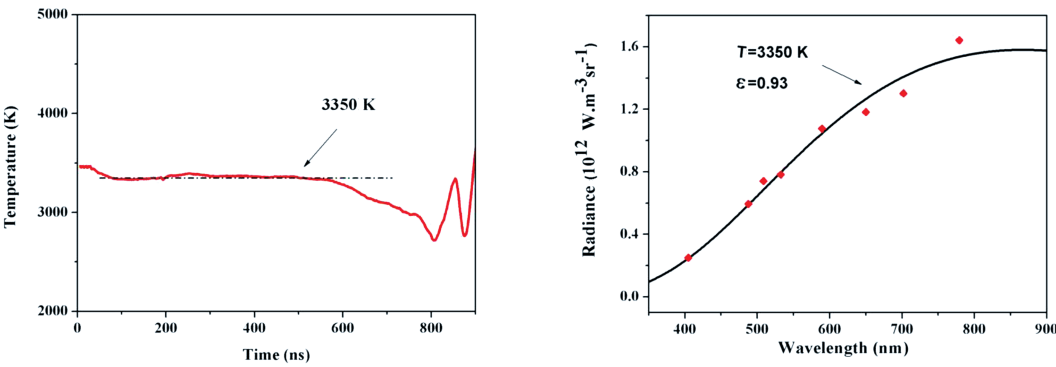


图 5 拟合温度以及拟合误差
Fig. 5 The fitting temperature and fitting error

3.3 辐射温度分析

图 6 为本次实验 Cu 冲击-卸载过程中温度和压力关系, 图中熔化线是根据 Lindemann 熔化定律^[19]计算得到的. A 点代表冲击波进入样品内的冲击压力和冲击温度计算值, B 代表卸载的压力和温度值. 从图中可判断该压力下金属冲击-卸载过程都发生在固态区, 并没有出现熔化现象.

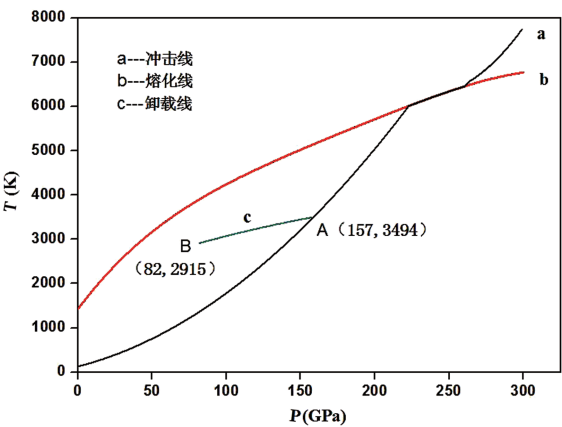


图 6 Cu 冲击-卸载过程中温度和压力关系
Fig. 6 The relationship between temperature and pressure during shock-unloading of Cu

根据金属测温中物理模型分析, 该次实验测得界面温度与金属界面的卸载温度并不相等, 而且界面处金属物质并没有发生相变或者熔化. 因此根据“理想界面模型”中表示界面温度、金属卸载温度以及窗口冲击温度三者间的关系式计算得到表 2 中的结果.

$$T_1 = T_R - \frac{T_R - T_w}{1 + \alpha}$$

(9)

上式中 T_1 代表界面温度、 T_R 代表金属卸载温度、 T_w 代表窗口的冲击温度, 其中 $\alpha = \sqrt{\frac{K_s \rho_s C_s}{K_w \rho_w C_w}}$, K 为热导率、 ρ 为密度、 C 为比热^[20,21].

表 2 界面辐射温度与计算结果的比较

Tab. 2 The temperature from interface radiation and calculation results

实验	冲击压力/GPa	卸载压力/GPa	冲击温度/K	卸载温度/K	计算界面温度/K	实验测界面温度/K
Cu/LiF	157	82	3494	2915	2877	3350±160

表 2 给出了本次实验相关的计算和实验结果, 数据显示实验测量值仍然高于计算结果. 该现象是目前冲击波测温实验中遇到的瓶颈, 包括高速碰撞下直接测量金属熔化温度的实验结论^[22, 23]. 对于计算的温度结果, 由于所选用的高压参数大多来自于理论分析并推到高压下的理论值, 给整个计算过程也是带来了更多的不确定因素. 但是本文通过接近“理想界面”模型的界面辐射所拟合的温度值应该更接近真实结果.

4 结 论

在强冲击压缩下金属界面辐射测量实验中, 本文通过样品抛光技术优化, 引入机械加压和气体二次均匀加压的靶装配技术, 使得金属/窗口达到理想接触界面的要求. 各通道间隙引起的辐射尖峰的瞬间闪光对界面辐射并没有产生影响. 界面辐射亮度与波长之间的分布表明了界面辐射是一种典型的普朗克热辐射. 辐射温度值特征表现为短暂的间隙发光、界面稳定辐射的平台温度和追赶波导致下降的特征, 该现象表明本实验得到的结论避免了界面热阻对辐射的影响, 也说明本实验得到界面辐射符合 Grover“理想界面”的物理模型.

参考文献:

[1] Yoo C S, Holmes N C, Ross M, *et al.* Shock temperatures and melting of iron at Earth core condi-

- tions [J]. Phys Rev Lett, 1993, 70: 3931.
- [2] Boehler R. Temperatures in the Earth's core from melting-point measurements of iron at high static pressures [J]. Nature, 1993, 363: 534.
- [3] Anderson W W, Ahrens T J. Shock temperature and melting in iron sulfides at core pressures [J]. J Geophys Res, 1996, 101: 5627.
- [4] Lyzenga G A, Ahrens T J. Multiwavelength optical pyrometer for shock compression experiments [J]. Rev Sci Instrum, 1979, 50: 1421.
- [5] 陈浩, 刘福生, 汪怡高, 等. 冲击加载下硅烷流体的导电特性研究[J]. 原子与分子物理学报, 2017, 34: 489.
- [6] 王亚平, 刘福生, 刘其军, 等. 冲击高压下硝基甲烷的拉曼光谱及其结构稳定性[J]. 原子与分子物理学报, 2016, 33: 661.
- [7] Taylor J W. Residual temperatures of shocked copper [J]. J Appl Phys, 1963, 34: 2727.
- [8] Grover R, Urtiew P A. Thermal relaxation at interfaces following shock compression [J]. J Appl Phys, 1974, 45: 146.
- [9] Dai C, Jin X, Zhou X, *et al.* Sound velocity variations and melting of vanadium under shock compression [J]. J Phys D: Appl Phys, 2001, 34: 3064.
- [10] 戴诚达, 谭华. 金属冲击温度的辐射法测量问题[J]. 高压物理学报, 2006, 20: 113.
- [11] 古成刚. 冲击波后物质界面的热弛豫及铁的冲击温度、熔化温度与熔化规律的研究[D]. 成都: 成都科学技术大学, 1992.
- [12] 谭华, 戴诚达. 金属的冲击波温度测量(Ⅳ)——“三层介质模型”及其应用[J]. 高压物理学报, 2000, 14: 81.
- [13] 谭华. 金属的冲击波温度测量(Ⅲ)——“基板/样品”界面间隙对辐射法测量冲击波温度的影响[J]. 高压物理学报, 1999, 13: 161.
- [14] Tan H, Dai C D. Problems of shock temperature measurements for metals by using optical radiometry method [J]. High Pressure Res, 2001, 21: 183.
- [15] 张宁超, 刘福生, 彭小娟, 等. 40—60 GPa 冲击加载下蓝宝石发光机理研究[J]. 物理学报, 2012, 61: 345.
- [16] 宋萍, 蔡灵仓, 周显明, 等. 无氧铜等熵卸载路径的实验研究[J]. 高压物理学报, 2005, 19: 174.
- [17] 经福谦, 陈俊祥. 动高压实验原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [18] 谭华. 金属的冲击波温度测量(Ⅰ)——高温计的标定和界面温度的确定[J]. 高压物理学报 1994, 8: 254.
- [19] Lazicki A, Fei Y, Hemley R J. High-pressure differential thermal analysis measurements of the melting curve of lithium [J]. Solid State Commun, 2010, 150: 625.
- [20] 张凌云. 无氧铜冲击熔化特性的实验研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.
- [21] 赵万广. LiF 单晶冲击高压热导率研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013.
- [22] 王浩, 夏继宏, 程正富. 高压下金属 Mo 熔化性质与其熔化结构的理论研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 1317.
- [23] 彭小娟, 刘福生. 液相及固/液混合相区金属物态方程 Grover 模型存在的问题及修正[J]. 物理学报, 2012, 61: 367.

引用本文格式:

中 文: 张宁超, 任娟, 史国清, 等. 强冲击下金属铜界面辐射特性测量研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 769.

英 文: Zhang N C, Ren J, Shi G Q, *et al.* Research on radiation from copper interface under strong impact [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2018, 55: 769.