

文章编号: 1001-1455(2002)03-0281-04

# 165GPa 冲击压缩下钨靶漫反射率的色散效应研究

李泽仁

(中物院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 用瞬态漫反射率测量系统在二级轻气炮上实验研究了表面粗糙度为  $(82 \pm 1) \mu\text{m}$  的钨靶在 165GPa 的固定冲击压力下对 488.0, 514.5 和 632.8nm 的入射激光的漫反射率  $R_b'$ , 实验结果发现  $R_b'$  在 0.07 ~ 0.093 之间, 并与入射激光波长成反比:  $R_b' = \zeta / \lambda_0$  ( $\zeta = 44.29\text{nm}$ )。并对测试误差进行了分析和讨论。

关键词: 冲击压缩; 钨靶; 漫反射率; 色散

中图分类号: O384 文献标识码: A

## 1 引 言

在冲击波物理与爆轰物理实验研究中, 瞬态光学测试技术是重要的实验手段, 研究爆炸与冲击下材料对入射光的反射特性, 不但可以了解强动载下材料的漫反射率变化规律, 而且对瞬态光学测量系统的设计与应用极为重要。

常温常压下有随机粗糙的材料表面对入射激光的反射特性的研究已有大量报道<sup>[1-5]</sup>。在强冲击或爆轰作用下, 材料与入射激光的相互作用过程极短(几微秒 ~ 几十微秒), 并伴随较强的热辐射发光, 给动态漫反射率的实验研究带来较大难度, 有关冲击或爆轰过程中材料表面漫反射率的色散效应研究, 目前国内外还没有报道。我们用自己研制的瞬态漫反射率的测量系统<sup>[6-7]</sup>, 实验研究了在 165GPa 固定冲击压力下钨靶的漫反射率随入射激光波长变化的色散规律, 获得了良好的实验结果。

## 2 实验布置及结果

### 2.1 实验布置

165GPa 固定冲击压缩下钨靶漫反射率色散效应的实验装置如图 1, 实验在二级轻气炮上完成。飞片的材料是黄铜, 尺寸为  $\Phi 22\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ , 其碰撞速度固定在  $(3.5 \pm 0.1)\text{km/s}$  (由磁测速装置测量)。靶板的材料是纯钨, 尺寸为  $\Phi 15\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ , 表面粗糙度为  $(82 \pm 1) \mu\text{m}$ , 经计算, 靶中的冲击压力大约为 165GPa<sup>[8]</sup>。

实验中, 保持弹丸、飞片及靶的状态参数不变。入射激光分别为 488.0、514.5 和 632.8nm 的线偏振激光, 其偏振方向为垂直偏振。入射激光经过带孔反射镜后, 由前置透镜将它聚焦并照射钨靶的漫反射面。来自靶板的漫反射激光同样由前置透镜收集, 并以平行光的形式传输到测量系统中进行实时强度测量。设靶板在冲击压缩前的漫反射率为  $R_b$ , 冲击压缩后的漫反射率为  $R_b'$ , 则它们与漫反射激光的强度有如下关系<sup>[9]</sup>

$$R_b' = \frac{P_v' - P_h'}{P_v} R_b \quad (1)$$

$$R_b' = \frac{y_v' - y_h'}{y_v} R_b \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2001-05-24; 修回日期: 2001-07-17

作者简介: 李泽仁 (1961—), 男, 博士, 研究员。

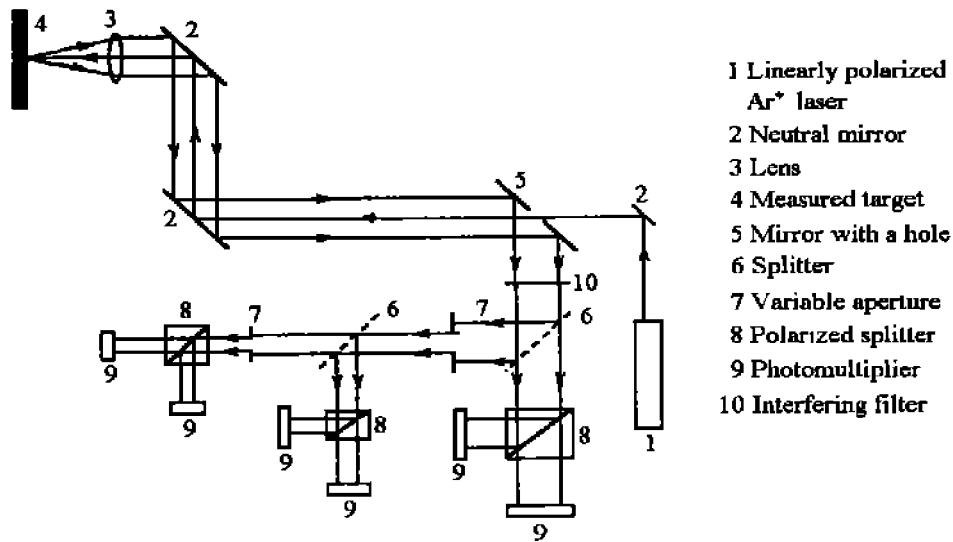


图 1 瞬态漫反射率测量系统的示意图

Fig. 1 Diagram of measurement system on dynamic diffuse reflectivity

式中： $P_v$  是冲击压缩前垂直偏振方向的光强，而  $y_v$  是与之对应的电压幅度； $P_v'$  是冲击压缩后垂直偏振方向的光强， $y_v'$  是与之对应的电压幅度； $P_h'$  是冲击压缩后水平偏振方向的光强， $y_h'$  是对应的电压幅度。需要指出的是，由于冲击压缩使钨靶发光，因此， $P_v'$  是漫反射激光与热辐射光的强度之和，而  $P_h'$  则完全是热辐射强度。由于热辐射是自然偏振的，在垂直和水平偏振方向的强度相等，从(1)式看出，当检测的光电探测器的线性特性相同时，可以消除热辐射发光的影响。另外，为了提高测量精度，一次实验中同时测量  $M$  ( $M=3$ ) 个不同立体张角的漫反射激光的强度变化，然后对测量结果取平均

$$R_b' = \sum_{i=1}^M R_{bi}' / M \tag{3}$$

2.2 实验结果

实验参数如表 1。对于不同波长的入射激光，所得的典型波形信号如图 2。图 2 中，上面的曲线是水平偏振方向的光强所对应的电压波形，即热辐射光强的信号曲线，下面的曲线是垂直偏振方向的光强所对应的电压信号，它是激光与垂直偏振的热辐射光的光强之和。用图 2 中的电压幅度，计算出漫反射率  $R_b'$  如表 2。

值得指出的是，静态条件下钨靶的漫反射率  $R_b$  是用微分测量法测量的，其结果如表 3。

表 1 测量强动载下钨靶漫反射率随激光波长变化的实验参数

Table 1 Experimental parameters for measuring diffuse reflectivity to incident laser

试验号	激光波长/nm	飞片速度/(km/s)	靶中冲击压力/GPa	立体角/(sr)	离子速度/(km/s)
1	488.0	3.51	164.6	5.0	3.9
2	514.5	3.49	163.2	5.0	3.9
3	632.8	3.52	165.2	5.0	3.9

表 2 实验测量数据及  $R_b'$

Table 2 Experimental data and  $R_b'$

试验号	入射激光波长/nm	$y_v$ /mV	$y_v'$ /mV	$y_h'$ /mV	$R_b'/R_b$	$R_b'$
1	488.0	90	18.0	2.0	0.18	0.093
2	514.5	184	32.5	3.5	0.16	0.084
3	632.8	216	32.0	4.0	0.13	0.070

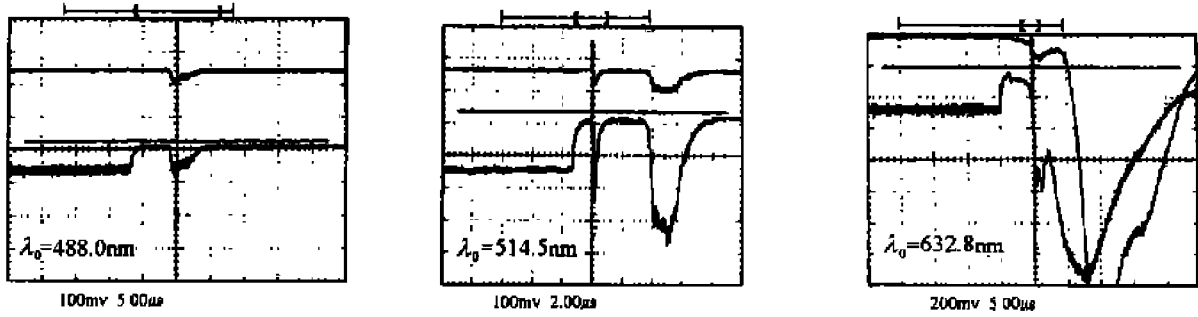


图 2 示波器记录的典型波形信号

Fig. 2 Typical experimental signals recorded by oscilloscope

表 3 钨靶的静态反射率随激光波长变化的实验值

Table 3 Experimental results on static diffuse reflectivity varying with incident laser

$\lambda_0/\text{nm}$	488.0	514.5	632.8
$R_b$	0.515	0.520	0.540

图 3 给出了  $R_b'$  的实验数据及用这些数据所拟合的关系曲线, 实验研究结果表明:

(1) 将粗糙度为  $(82 \pm 1) \mu\text{m}$  的钨靶冲击压缩到 165GPa 的同一高压状态, 对于不同波长的入射激光, 它的表面漫反射率  $R_b'$  均比静态反射率  $R_b$  低, 但不低于一个量级。

(2) 动态反射率  $R_b'$  随入射激光波长的增大而减小, 且满足关系式

$$R_b' = \zeta / \lambda_0 \quad (4)$$

式中:  $\lambda_0$  是激光的波长,  $\zeta$  是常数,  $\zeta = (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) / 3$ ,  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  由实验值给出

$$\begin{cases} \zeta_1 = R_{b1}' \cdot \lambda_{01} = 45.24\text{nm} \\ \zeta_2 = R_{b2}' \cdot \lambda_{02} = 43.20\text{nm} \\ \zeta_3 = R_{b3}' \cdot \lambda_{03} = 44.42\text{nm} \end{cases} \quad (5)$$

由(5)求出:  $\zeta = 44.29\text{nm}$ 。另外, 实验测量值与用  $R_b' = \zeta / \lambda_0$  计算的理论值之间的最大相对偏差小于 3.1%, 可见(4)式具有普遍性。

### 3 测量误差分析

动高压下靶板的漫反射率  $R_b'$  由(2)式表示, 将(2)式微分, 得到

$$\Delta R_b' = \frac{\Delta(y_v' - y_h') y_v - (y_v' - y_h') \Delta y_v}{y_v^2} \cdot R_b + \frac{y_v' - y_h'}{y_v} \cdot \Delta R_b \quad (6)$$

$$\frac{\Delta R_b'}{R_b} = \frac{\Delta(y_v' - y_h')}{y_v - y_h} - \frac{\Delta y_v}{y_v} + \frac{\Delta R_b}{R_b} \quad (7)$$

将  $R_b'$  的相对测量误差  $\hat{\delta}_R$  定义为(7)式中各项相对误差的均方根差, 则有

$$\hat{\delta}_R = \sqrt{\left[ \frac{\Delta(y_v' - y_h')}{y_v - y_h} \right]^2 + \left[ \frac{\Delta y_v}{y_v} \right]^2 + \left[ \frac{\Delta R_b}{R_b} \right]^2} \quad (8)$$

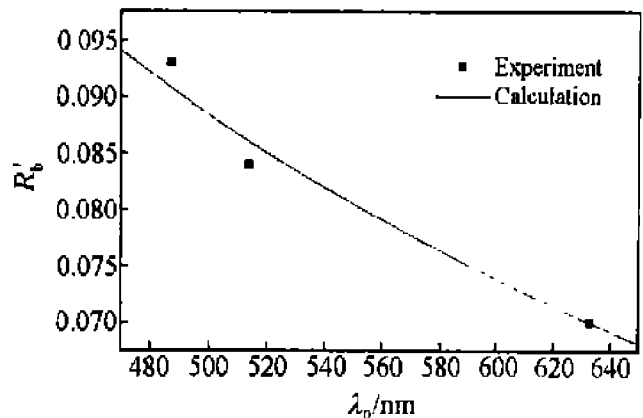


图 3 165GPa 的冲击压力下钨靶的  $R_b'$  随激光波长变化的实验曲线

Fig. 3 Experimental curve of  $R_b'$  varied with laser wavelengths on tungsten target shock-compressed to 165GPa

实验中,静态反射率的测量误差主要由激光输出功率漂移及功率计的测量误差引起。由于激光器的输出功率相当稳定,在2h内的功率不稳定性低于2%,1830C功率计的测量误差为1%,因此,静态反射率的相对测量误差小于2.5%。

$\Delta y_v/y_v$  以及  $\Delta(y_v' - y_h')/(y_v' - y_h')$  为冲击压缩前后信号幅度的相对测量误差,对于图2给出的信号,  $\Delta y_v/y_v \leq 3\%$ ,  $\Delta(y_v' - y_h')/(y_v' - y_h') \leq 5\%$ , 将这些结果代入(8)式,算得  $R_b'$  的相对测量误差  $\hat{q}_b \leq 6.0\%$ 。

## 4 结 论

用我们自己研究的瞬态漫反射率测量系统,首次实验研究了强动载下钨靶瞬态漫反射率随入射激光波长变化的色散效应,获得了很好的实验结果。系统中,采用对比测量和偏振分光法,彻底消除了强冲击过程中热辐射光的影响,使实验结果具有较高的可信度。对于  $(82 \pm 1)\mu\text{m}$  的钨靶,在165GPa的固定冲击压力下其漫反射率比静态漫反射率低几倍,且随入射激光波长的增加而减小,满足关系式  $R_b' = 44.29/\lambda_0$ 。另外,经分析该实验结果的相对误差  $\hat{q}_R \leq 6.0\%$ 。

## 参考文献:

- [1] Celli V, Marvin A. Light Scattering from Rough Surfaces [J]. Phys Rev B, 1975, 11(4): 1779-1786.
- [2] Kotz R, ZHANG He-yi. High Reflectivity Self-pumped Phase Conjugator Using Total Internal Reflection in  $\text{KnbNO}_3:\text{Fe}$  [J]. Phys Lett A, 1979, 70: 452-458.
- [3] Celli V, Maradudin A A, Marvin A M, et al. Some Aspects of Light Scattering from a Randomly Rough Metal Surface [J]. J Opt Soc Am A, 1985, 12(12): 2225-2237.
- [4] Brown G C, Celli V, Haller M. Optical Interactions at Rough Surfaces [J]. Surface Science, 1984, 136: 381-395.
- [5] Brown G C, Celli V, Haller M, et al. Resonant Light Scattering from a Randomly Rough Surface [J]. Phys Rev B, 1986, 31(8): 4993-5003.
- [6] 李泽仁, 刘俊, 程晓锋, 等. 测量冲击压缩下靶板表面漫反射率的光电系统[J]. 光电工程, 1997, 23: 86-90.  
LI Ze-ren, LIU Jun, CHENG Xiao-feng, et al. Photoelectric System of Measuring Diffuse Reflectivity of Target Shocked to High Pressure [J]. Photoelectric Engineering, 1997, 23: 86-90.
- [7] 李泽仁, 刘俊, 程晓锋, 等. 冲击压缩下钨靶对514.5nm激光的漫反射率[J]. 高压物理学报, 1999, 13(1): 71-75.  
LI Ze-ren, LUI Jun, CHENG Xiao-feng, et al. Diffuse Reflectivity of Shock-compressed Tungsten Target to 514.5nm Laser [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(1): 71-75.
- [8] LI Ze-ren, LUI Jun, CHENG Xiao-feng, et al. Dynamic Measurement of Diffuse Reflectivity [R]. SPIE, 1997, 2965: 611-615.

## Dispersive Effect Study of Diffuse Reflectivity on Tungsten Target Shock-compressed to 165 GPa

LI Ze-ren

(Intitute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** The measuring system for diffuse reflectivity was used on a two-stage light gas gun and the diffuse reflectivity  $R_b'$  of  $(82 \pm 1)\mu\text{m}$  roughness tungsten target to incident laser was studied under 165GPa shock-compression. The experimental results show that  $R_b'$  is between 0.07~0.093 and is inversely proportional to incident laser wase-lengths:  $R_b' = \zeta/\lambda_0$  ( $\zeta = 44.29\text{nm}$ ). The measuring error of diffuse reflectivity is analyzed and discussed in this paper.

**Key words:** shock-compression; tungsten target; diffuse reflectivity; dispersion