

CN9200864

CNIC-00448

IAPCM-0017

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

激光高压状态方程铝铜阻抗匹配靶的理论研究

THEORETICAL STUDY OF ALUMINIUM—COPPER  
IMPEDANCE MATCHING TARGETS FOR  
LASER-HIGH-PRESSURE STATE EQUATION

*(In Chinese)*



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00448

IAPCM-0017

# 激光高压状态方程 铝铜阻抗匹配靶的理论研究

赖东显 罗平庆 张永慧  
于仁 解汉明 刘福铭

(北京应用物理与计算数学研究所)

## 摘 要

重点研究了激光驱动冲击波在嵌金层的组合靶中传播规律、金层对超热电子的屏蔽作用和对冲击波的致稳作用。给出了铝铜阻抗匹配靶基底的设计原则。设计了实验用的组合靶及不嵌金层的简单靶。对1989年在“神光”激光器上获取的实验数据进行了理论处理和分析,确认在铜样品中获得了0.8TPa的高压,而且冲击波测量误差 $\leq 5\%$ 。铝铜阻抗匹配实验取得了成功,得到的铜的高压冲击压缩数据与Nellis等人1988年发表的实验结果(包含地下核爆实验结果)拟合曲线非常接近。

**THEORETICAL STUDY OF ALUMINIUM-COPPER  
IMPEDANCE MATCHING TARGETS  
FOR LASER-HIGH-PRESSURE STATE EQUATION**

*(In Chinese)*

Lai Dongxian Luo Pingqing Zhang Yonghui

Yu Ren Xie Hanming Liu Leiming

(INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS AND COMPUTATIONAL MATHEMATICS,  
BEIJING)

**ABSTRACT**

The propagation of laser-driven shock wave in the combined targets with gold-layer, the shielding effects of gold-layer on the superthermal electrons and the function of gold-layer to the stability of shock wave are introduced. The designing method of target bases for Al-Cu impedance matching is also given. Targets with and without inserted gold-layer were constructed and tested at Senguang laser facility in 1989. After analyzing the tested data, it is confirmed that the 0.8TPa high pressure was produced at the Cu sample and the measuring accuracy of shock wave velocity was better than 5%. The Al-Cu impedance matching test was fully success. These results are close to the experimental fitting curves (including the data of underground nuclear explosions) published by Nellis in 1988.

# 引言

高功率激光器的建成开创了实验室实现超高压冲击压缩的新途径。激光高压状态方程的研究主要采用阻抗匹配方法。图 1 是 1989 年我们用于该实验的两类靶（组合靶和简单靶）的示意图。这里 Al 为标准样品，Cu 为待测样品。组合靶的基底由  $Al_1$ -Au- $Al_2$  构成，简单靶基底为单一的 Al，实验中激光照射 Al 吸收层并在靶中驱动出高压冲击波。高速条纹照相机在靶背面分别记录冲击波到达靶基底后表面及 Al、Cu 样品后表面信号。根据信号时间差和样品厚度分别计算冲击波在 Al 和 Cu 内的平均速度。经理论处理，在  $p-u$  平面上做出相应的波直线，而后，再根据 Al 介质的状态方程式和冲击波关系式做出 Al 的二次冲击压缩线与 Cu 的波直线交点 B，即为 Cu 的冲击压缩点，从而获得了 Cu 的冲击波压强  $p$  和粒子速度  $u$ （如图 2）。

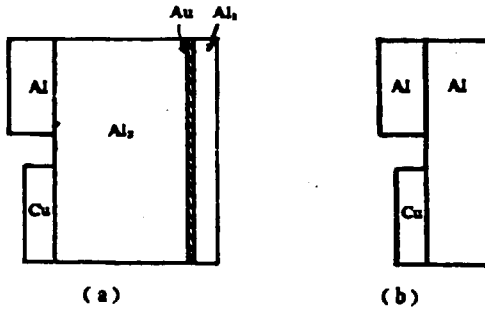


图 1 Al-Cu 阻抗匹配靶结构示意图  
(a) 组合靶 (b) 简单靶

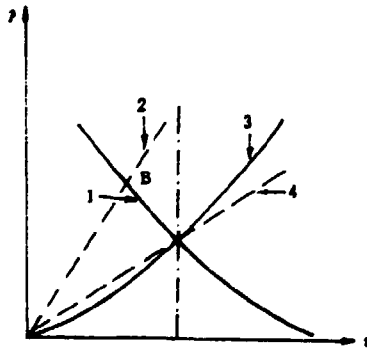


图 2 阻抗匹配法获得 Hugoniot 数据示意图

- 1—二次冲击压缩线，
- 2—待测材料波直线，
- 3—标准材料 Hugoniot 曲线，
- 4—标准材料波直线。

激光在介质中产生高压冲击波,但用于研究状态方程时,需要综合平衡冲击波压强幅度、冲击波平面性、干净性和稳定性诸方面的要求。对单介质箔靶,必须满足如下关系式:

$$L \ll \phi$$

$$L \gg R$$

$$L < 2D\tau$$

其中,  $L$ ——靶厚度,  $\phi$ ——激光焦斑直径,  $R$ ——超热电子射程,  $D$ ——冲击波速度,  $\tau$ ——激光脉冲宽度。R. More<sup>[1]</sup>通过数值模拟和解析估计,给出这种靶冲击波压强  $p$  和激光能量  $B$  之间的定标关系  $p \propto B^{1/4}$ 。这表明要提高冲击波压力必须大幅度提高激光能量。为此,他提出在 Al 中嵌入高  $z$  介质的设想。Vezer 等人<sup>[2]</sup>报道过这种组合靶的实验结果,激光波长  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ ,  $\tau = 0.3\text{ns}$ , 靶上功率密度  $I = (0.5 \sim 4) \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ , 激光高压实验得到 Al、Cu 样品中,冲击波速度近似有线性关系(见图 3)。实验点散布在低压实验外推线的两侧,误差为  $\pm 10\%$ , Cu 的冲击波压强最高达 0.7TPa。

“神光”激光装置为  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$  钕玻璃激光器,可提供能量为 500J,脉宽  $\tau = 1\text{ns}$  (FWHM) 的脉冲。为改善激光在靶面的空间均匀性,在靶前方装有组合透镜,它可使到达靶面上直径为  $450\mu\text{m}$  的焦斑内激光能量分布为常数值。

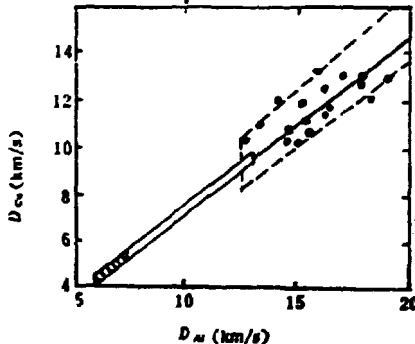


图 3. L. Vezer 等人的 Al-Cu 阻抗匹配实验结果

## 1 Al-Cu 阻抗匹配靶的理论研究和靶设计

理论研究使用的计算机程序有 JB-2 和 JB-3。JB-2 为超热电子输运考虑了自洽电场及多群限流扩散的流体力学程序<sup>[3]</sup>, JB-3 是超热电子输运采用简化处理的流体力学程序。两个程序对主冲击波轨迹均可自动处理。利用这些程序我们重点研究激光高压冲击波在阻抗匹配靶中的传播特性,协调冲击波强度幅度,平面性、干净性和稳定性等方面的要求,根据物理规律得出靶设计原则,由此设计出实验用靶的基本尺寸。

### 1.1 阻抗匹配靶的基本物理规律

#### 1.1.1 激光条件及吸收

理论研究设想的激光条件是  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ , 峰值功率密度  $I_0 = (0.74 \sim 1.84) \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ ,  $\tau = 1\text{ns}$  (FWHM), 高斯型脉冲。

数值模拟时, 激光吸收效率为:

$I_0$ ( $10^{14} \text{W/cm}^2$ )	0.74	1.10	1.47	1.84
$\zeta_0$	0.49	0.44	0.42	0.39
$\zeta_{\text{反}}$	0.072	0.074	0.076	0.076

其中  $\zeta_0$  和  $\zeta_{\text{反}}$  分别是激光总吸收效率和反常吸收效率。

### 1.1.2 烧蚀传热深度及烧蚀压时间特性

激光在临界面附近被吸收, 最初依靠电子传热烧蚀稠密介质, 当电子温度下降到接近光子温度时 (大约 0.1keV), 光子传热变成主要烧蚀因素。对于上述激光参量, Al 介质的电子传热烧蚀深度为  $d_e = (0.5 \sim 0.8)\mu\text{m}$ , 光子传热烧蚀深度  $\delta = (3 \sim 4)\mu\text{m}$ 。

激光烧蚀靶介质产生烧蚀压强, 后者是产生冲击波压力源, 它的时间波形影响冲击波在靶介质内的传播特性。数值模拟表明, 与激光脉冲相比, 烧蚀压波形有滞后和展宽的特性, 并可用下式近似表示之

$$p_0 \propto e^{-b(t-t_0)^2}$$

式中  $b = \frac{4\ln 2}{(\beta\tau)^2}$ ,

$$t_0 = \alpha t_1$$

当激光功率密度  $I$  满足条件

$$8 \times 10^{13} \text{W/cm}^2 \leq I \leq 3 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$$

时,  $\alpha = 1.1 \sim 1.2$ ,  $\beta \approx 1.5$ 。

### 1.1.3 Au 层对超热电子的屏蔽作用及对冲击波的致稳作用

#### Au 层对超热电子的屏蔽作用

激光照射靶时产生的超热电子有很高的能量。它可以穿入冲击波前方的冷介质并使之预热, 靶内嵌入一定厚度的 Au, 可有效地阻止超热电子进入波前避免介质预热, 这便是 Au 层的屏蔽作用。

我们用 JB-2 程序模拟计算超热电子在运输过程中沿途沉积能量情况, 从而考察它对靶的预热程度。计算认为靶上激光功率密度  $I_0 = 1.84 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ , 脉宽  $\tau = 1\text{ns}$ , 超热电子按能量划分为 20 群, 每群的宽度  $\Delta\epsilon = 4\text{keV}$ 。靶为嵌 Au 层和不嵌 Au 层的两种 Al 靶。计算给出了在激光峰值时刻的结果: 激光总吸收效率为 40%, 其中反常吸收效率为 10%, 超热电子最高平均温度为 6.7keV。图 4 为该时刻单位质量靶介质内超热电子沉积的能量  $W_e$  随靶空间拉氏坐标的变化情况, 虚线为不嵌 Au 层的纯 Al 结果。由图可见  $1\mu\text{m}$  厚的 Au, 可使  $W_e$  下降约二个数量级, 这使在 Al<sub>1</sub> 层内传播的冲击波更加干净 (见图中 P<sub>1</sub> 和 T<sub>1</sub> 分布曲线)。比较两种靶的计算结果, 还可知道就屏蔽超热电子的效果而言,  $1\mu\text{m}$  的 Au 层相当于  $7\mu\text{m}$  的 Al 层。

#### Au 层的运动及对冲击波的致稳作用

Au 层除了上述屏蔽作用外, 另一个重要作用是靶设计得当, 一定厚度的 Au 层对其后面的冲击波有致稳作用。大量数值计算表明, Al<sub>1</sub> 层厚度、Au 层本身厚度和激光脉冲参量变

化都会影响 Au 层的运动及对冲击波的致稳作用, 下面我们分别叙述:

### i) Al<sub>1</sub>层厚度的影响

激光烧蚀 Al<sub>1</sub>层, Au 层则在烧蚀压强推动下运动, 对于给定的激光参量, 若 Al<sub>1</sub>层厚度选择适当, Au 层的运动将经历加速、近似等速和减速三个阶段。

图5是  $I_0 = 1.84 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ ,  $\tau = 1 \text{ns}$ , Au 层厚度  $\Delta Au = 1 \mu\text{m}$ , Al<sub>1</sub>层厚度  $\Delta Al_1$  分别为  $2 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 、 $6 \mu\text{m}$  和  $8 \mu\text{m}$  时, Au-Al<sub>2</sub> 交界面运动速度  $v_{Au-Al_2}$  随时间的变化。由图可见, Al<sub>1</sub>层厚度由  $4 \mu\text{m}$  增加到  $8 \mu\text{m}$  时, Au 层运动状态变化不大, 交界面速度仍存在近似等速段。当 Al<sub>1</sub>层较薄, 如  $2 \mu\text{m}$  时,  $v_{Au-Al_2}$  上升到峰值后便较快地下降, 这是因为 Al<sub>1</sub>太薄, 在临近激光峰值时刻就被烧穿, 烧蚀波过早地进入 Au 层, 后面跟着的稀疏波影响到 Au 层的运动。我们注意到, 对于上述激光条件, 电子和光子的传热烧蚀深度为  $4 \mu\text{m}$  左右, 这说明若 Al<sub>1</sub>层厚度相当于该烧蚀深度或稍大一些, Au 层运动存在近似等速段。Al<sub>1</sub>层厚度比该烧蚀深度大得多时, Au 层的运动状态变为快速加速和减速, 原因是 Al<sub>1</sub>层形成了强冲击波, 其后又紧跟着稀疏波 (见图6)。

### ii) Au 层厚度的影响

计算结果表明, Au 层厚度在一定范围内改变, 只影响交界面速度峰值大小, 而对维持等速状态影响不大。若 Au 层厚度增加较多, 同时有 Al<sub>2</sub>层增大, 则 Al<sub>2</sub>内的冲击波稳定性会更好, 但却要以降低较多冲击波压力为代价。

### iii) 激光参量的影响

数值计算中, 保持  $\Delta Al_1 = 4 \mu\text{m}$ ,  $\Delta Au = 1 \mu\text{m}$  和  $\tau = 1 \text{ns}$  不变, 而  $I_0$  从  $0.74 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$  增大到  $1.84 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ , 那么相应的 Au~Al<sub>2</sub> 界面峰值运动速度由  $8.1 \text{km/s}$  增大到  $11.4 \text{km/s}$ , 而近似等速段的时间宽度几乎不变 (近似等于  $0.65\tau$ )。当保持  $I_0 = 1.84 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$  不变, 脉宽  $\tau$  由  $0.8 \text{ns}$  增大到  $1.2 \text{ns}$  时, Au-Al<sub>2</sub> 界面运动达到峰值速度时刻从  $1.3 \text{ns}$  推迟到  $1.9 \text{ns}$ , 而峰值速度近似不变。这表明, 激光强度  $I_0$  主要影响 Au 层运动的峰值速度值, 而脉宽  $\tau$  主要影响相应的峰值速度出现的时间。

#### 1.1.4 冲击波在 Al<sub>2</sub>中的传播

设想 Au 层后面的 Al<sub>2</sub>层厚度  $\Delta Al_2$  足够大。若 Au 层运动明显地经历前述三个阶段, 则在 Al<sub>2</sub>中传播的冲击波, 也将经历加速、近似等速和减速三个阶段 (图7)。这意味着, 在冲击波压强达到峰值以前, 波后跟着从 Au-Al<sub>2</sub> 界面发出的压缩波, 而在峰值以后跟着稀疏波。图7表明  $\tau$  一定,  $I_0$  主要影响冲击波的峰值压力, 对其峰值位置  $\Delta Al_2$  影响不大, 而  $\tau$  却主要影响冲击波压强的峰值位置。如,  $\Delta Al_1 = 4 \mu\text{m}$ ,  $\Delta Au = 1 \mu\text{m}$ ,  $I_0 = 0.74 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ , 而  $\tau$  为  $0.8 \text{ns}$ 、 $1 \text{ns}$  和  $1.2 \text{ns}$  时, 冲击波压强峰值位置分别为  $25 \mu\text{m}$ ,  $28 \mu\text{m}$  和  $31 \mu\text{m}$  (坐标原点取在 Au-Al<sub>2</sub> 界面的初始位置上)。

#### 1.1.5 冲击波在样品 Cu 和 Al 中的传播

保持激光参量, Al<sub>1</sub>层和 Au 层厚度不变, 冲击波在样品 Cu 中的传播特性与  $\Delta Al_2$  有关。若厚度  $\Delta Al_2 < \Delta Al_1$ , 在样品 Cu 中的冲击波将经历加速、近似等速和减速三个阶段。若  $\Delta Al_2 > \Delta Al_1$ , 则冲击波在样品 Cu 中一直是衰减的, 这是因为厚度  $\Delta Al_2$  不同时, 到达 Al<sub>2</sub>-Cu 界面的冲击波波后流场分布不同, 对冲击波在样品 Cu 中的传播影响也不同 (图8)。

冲击波在样品 Al 中的传播规律与样品 Cu 中的传播规律相似。

## 1.2 阻抗匹配实验靶的设计

### 1.2.1 组合靶设计原则

根据1.1节所述,冲击波在样品中的传播特性与它在 $Al_2$ 层的传播特性及该层的厚度密切相关。因而基底的设计是整个靶设计的关键。综合上面的分析,确定基底各层的厚度时,应遵循下述原则:

①基底各层厚度选择要与激光参量相匹配。其中,脉宽对靶设计影响较大。对于同一种脉宽,激光功率密度在一定的范围内变化,可以使用同一结构和尺寸的靶。

② $Al_1$ 层是激光吸收和烧蚀层。它的厚度以大致相当于电子和光子传热的烧蚀深度为宜,略厚一些影响不大。

③ $Au$ 层的厚度主要由屏蔽超热电子效应及冲击波稳定性要求决定。对于 $J_0 \leq 2 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>,  $\tau = 1$  ns,  $T_e < 7$  keV,  $1 \mu\text{m}$ 的 $Au$ 足以屏蔽超热电子。 $Au$ 层还能改善冲击波的稳定性, $Au$ 层越厚( $\Delta Al_2$ 相应增大),致稳效应越显著,但是压强幅度减少也越大。

④ $Al_2$ 层厚度的选取原则是 $\Delta Al_2 < \Delta Al_1$ ,使到达 $Al_2$ 和样品交界面的冲击波处于缓慢加速阶段,且使冲击波压强在样品中间达到峰值。

### 1.2.2 简单靶设计原则

简单靶不含 $Au$ 层,基底 $Al$ 层内的冲击波由激光烧蚀靶介质直接产生,所以冲击波的传播特性对激光脉冲条件比较敏感。冲击波在 $Al$ 层中的传播,先是逐渐增大到压强峰值,后逐渐减弱,但变化速率较在组合靶中的快。设计这类靶的基本原则是基底厚度 $\Delta Al < \Delta Al_1$ (冲击波压强峰值位置,坐标原点为靶外表面初始位置),使冲击波压强在样品中间达到峰值。当然,基底厚度的选取还应满足冲击波干净性的要求。

### 1.2.3 阻抗匹配靶的基本尺寸

根据上述设计原则和实验激光参量 $\tau = 1$  ns,  $J_0 = (0.74 \sim 1.84) \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>。组合靶基底各层厚度为

$$\Delta Al_1 = 4 \mu\text{m} \text{ (或略厚)}$$

$$\Delta Au = 1 \mu\text{m}$$

$$\Delta Al_2 = 20 \mu\text{m} \text{ (或略厚)}$$

简单靶基底厚度

$$\Delta Al = 20 \mu\text{m}$$

样品厚度的选择,既要考虑冲击波在样品中都达到峰值压强。同时,还要考虑到仪器分辨率和测试精度的要求。上述两种靶的样品厚度,我们均取为

$$\Delta Al = 15 \mu\text{m}$$

$$\Delta Cu = 10 \mu\text{m}$$

组合靶总厚度 $L_t \approx 40 \mu\text{m}$  (或略厚),简单靶 $L_t = 35 \mu\text{m}$ ,而焦距直径 $\phi = 50 \mu\text{m}$ ,满足 $L_t \ll \phi$ 的要求,旁侧稀薄影响可以忽略。

## 2 实验结果分析

根据上述设计,制备了一系列组合靶和简单靶,并于1989年在“神光”钠玻璃激光器上进行了实验。实验中测量了 $Al$ 、 $Cu$ 样品中的冲击波速度 $D_N$ 和 $D_C$ 。下面,我们对这些实验



结果进行分析讨论。

测量的  $D_{Al}$  和  $D_{Cu}$  数据, 按照阻抗匹配原理便可容易地得到标准样品 Al 和待测样品 Cu 中的冲击波压强  $p$  和粒子速度  $u$ 。表1和表2分别列出了这些结果。

表1 组合靶实验数据

靶号	$D_{Al}$	$p_{Al}$	$D_{Cu}$	$p_{Cu}$	$u_{Cu}$
145	14.0	0.261	10.9	0.438	4.50
135	15.1	0.317	11.1	0.521	5.27
150	14.7	0.297	10.5	0.482	5.12
142	14.4	0.283	11.2	0.475	4.75
140	15.2	0.327	11.7	0.550	5.27
152	14.4	0.279	11.1	0.468	4.71
132	15.8	0.358	12.9	0.623	5.42
137	16.4	0.397	12.5	0.670	6.01
148	16.3	0.391	12.9	0.673	5.82

表2 简单靶实验数据

靶号	$D_{Al}$	$p_{Al}$	$D_{Cu}$	$p_{Cu}$	$u_{Cu}$
123	13.4	0.232	9.8	0.376	4.31
119	13.9	0.254	10.9	0.427	4.39
106	14.5	0.285	11.6	0.486	4.71
105	15.1	0.322	12.7	0.554	5.08
116	16.1	0.378	13.0	0.655	5.65
114	16.1	0.378	12.8	0.650	5.70
107	16.1	0.378	13.4	0.642	5.53
120	16.8	0.420	13.3	0.725	6.11
117	15.8	0.358	12.5	0.614	5.51
110	17.6	0.478	13.4	0.812	6.79

表中  $D_{Al}$ 、 $D_{Cu}$  为实验测量的样品 Al、Cu 内的冲击波速度, km/s。

$p_{Al}$ 、 $p_{Cu}$  为理论处理得到的 Al、Cu 内冲击波压强, TPa

$u_{Cu}$  为 Cu 内粒子速度, km/s

由表1和表2可见, 在组合靶和简单靶内, 分别获得了0.67TPa和0.81TPa的最大压强, 它可以给出 Cu 的  $D-u$  线性拟合关系式:

$$D = 4.502 + 1.369u \quad (\text{组合靶})$$

$$D = 4.866 + 1.377u \quad (\text{简单靶})$$

对同一粒子速度  $u$ , 两个公式所描述的冲击波压强相对差别为 (3~4)%。

利用  $D-u$  线性关系式, 可以进一步得到 Cu 在冲击压缩下的压强  $p = \rho_0 D u$ 、体积压缩比

$\epsilon = \frac{V_0}{V} = \frac{D}{(D-u)}$  和比内能  $e = u^2/2$  的表达式。

通常习惯在  $(p, u)$  平面讨论冲击压缩特性。由  $D-u$  线性关系导出的  $p-u$  关系与实验结果直接进行理论处理的  $(p, u)$  点有一定分散性。为了衡量这种分散度，定义固定粒子速度  $u$ （或冲击波速度  $D$ ）时、压强的相对分散度  $\overline{|\epsilon|}$ （或  $\overline{|\epsilon'|}$ ）。对上述两类实验靶，相对分散度的绝对值平均值分别为：

组合靶  $|\overline{\epsilon}| = 3.7\%$  ,  $|\overline{\epsilon'}| = 5.5\%$  ;

简单靶  $|\overline{\epsilon}| = 3.2\%$  ,  $|\overline{\epsilon'}| = 5.3\%$  .

我们的实验结果与文献 [4] 相比较，二者十分接近（见图9）。

影响实验结果的因素很多，仅就三个方面作些讨论。

首先，讨论冲击波速度  $D_M$  和  $D_\infty$  测量误差对 Cu 样品中冲击波压强  $p_\infty$  的影响。研究表明，在实验范围内，Al、Cu 样品中的冲击压强有较好的线性关系，因此，可以近似认为  $D_M$  测量误差对  $p_M$  的影响就是对  $p_\infty$  的影响。为此，利用  $p = \rho_0 D^2$  和  $D = C + \lambda u$  关系式，可以得到  $D_M$  测量误差对 Al 的一次冲击压强  $p_M$  的影响为

$$\eta_p = \frac{dp}{p} = \frac{du}{u} + \frac{dD}{D} = \left( \frac{D}{D-C} + 1 \right) \frac{dD}{D}$$

如果利用 Al 的低压实验数据  $C = 5.38$ ，则当  $dD/D$  值为 5% 时， $\eta_p$  大约为 13%。

$D_\infty$  的测量误差对 Cu 的冲击压强  $p_\infty$  影响要小。这是由阻抗匹配方法所决定的。由图 2 可见，当  $dD$  为正误差时，B 点左移，相应粒子速度  $u$  下降，因而减少了压强  $p$  的误差； $dD$  为负误差时，也有同样结论。当  $dD/D$  值为 5% 时，则对  $p_\infty$  的影响为 2.2% 左右。

由此可见，在 Al、Cu 阻抗匹配实验中， $D_M$  和  $D_\infty$  的测量误差对  $p_\infty$  的影响是不同的，两者相差 6 倍。在靶设计、制靶和实验测量中，必须十分注意标准样品中冲击波速度的测试精度。

前面我们提到 Cu 的  $p-u$  线与实验直接处理数据的平均偏差值  $|\overline{\epsilon}|$  和  $|\overline{\epsilon'}|$ ，分别为 (3.2~3.7)% 和 (5.3~5.5)%，可以认为实验测试的冲击波速度精度在 5% 以内。

其次，应用阻抗匹配方法需要标准材料 Al 的状态方程公式，状态方程的误差也会影响  $p_\infty$  的精度，状态方程的误差主要影响  $D-u$  关系式，具体说影响  $D = C + \lambda u$  中的系数  $C$  和  $\lambda$ 。因而，当标准材料的状态方程存在误差时，则当冲击波速度  $D$  值给定时，对 Al 的一次冲击压缩终态压强影响为

$$\eta_p = 1 - \frac{D-C}{D-C} \frac{\lambda}{N}$$

这个误差也近似是  $p_\infty$  的误差。估计这个数值为百分之几。

最后，样品中冲击波的稳定性对实验结果也有一定影响。实验测量的是平均速度。当冲击波平均速度十分接近基底与样品的交界面处速度时，才有较高的实验精度。当两种材料的阻抗失配较多时，兼顾两种样品中的冲击波稳定性比较困难。我们采用组合靶就是为了提高样品中冲击波的稳定性。实验测试 Al 槽（即基底后表面）和 Al 样品后表面的发光信号，观察到简单靶发光强度普遍衰减较多，表明冲击波稳定性差一些，这可能是两类靶实验结果有所差别的主要原因，尚需要在提高测试精度的前提下，进一步验证。

### 3 结论

通过实验结果的分析,证实了在激光高压状态方程研究中应用 Al-Cu 阻抗匹配靶,在 Cu 样品内获得了 0.8TPa 的最大压强,冲击波速度测量精度在 5% 以内,获得的这个高压为其他常规实验技术所能达到的压强的 3 倍以上,到目前为止,仅有地下核爆方式才能提供这种供状态方程研究的高压,实验的成功也证实了理论研究的可靠性,进一步提高压强和改进测试精度是可能的,在激光高压状态方程研究中,应用阻抗匹配原理有良好的发展前景。

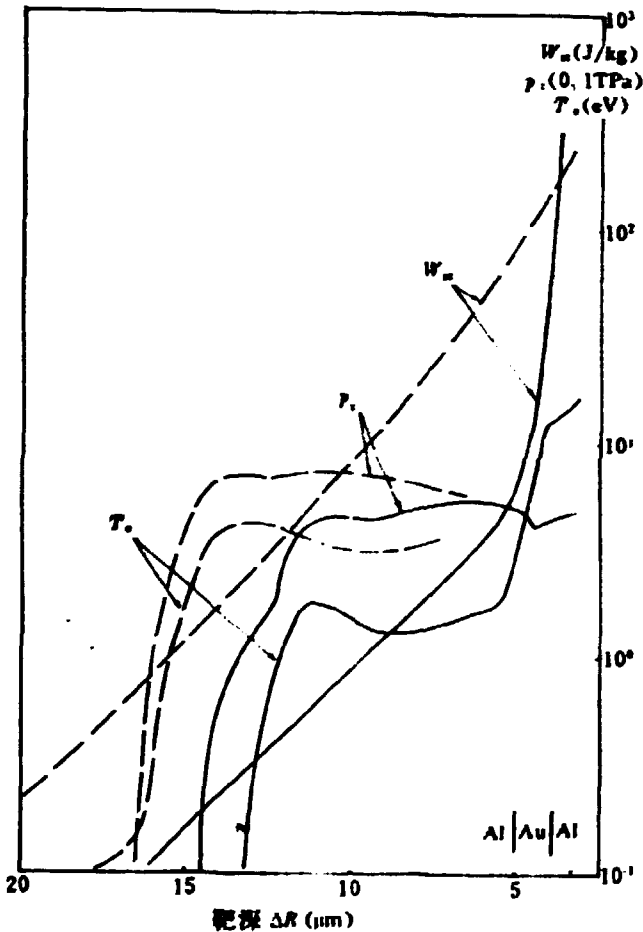


图4 激光峰值时刻  $W_e$ ,  $T_e$  和  $p$  随空阿拉氏坐标的变化

— 复合靶  
 --- 简单靶

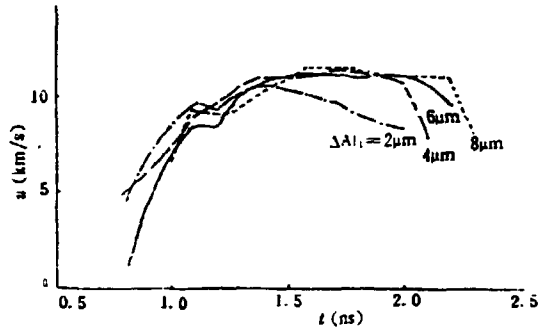


图5 外 Al 层厚度  $\Delta Al_1$  对金层内界面运动的影响

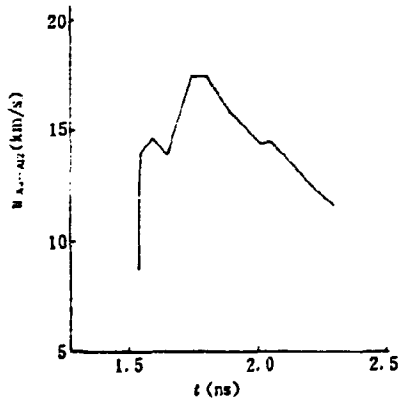


图6 外 Al 层厚度  $\Delta Al_1 = 20 \mu m$  时, 金层内界面速度的变化

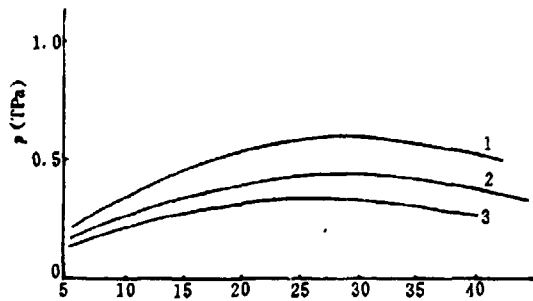


图7  $\tau$  不变而  $I_0$  改变时,  $Al_1$  内冲击波传播情况

1—  $I_0 = 1.84 \times 10^{14} W/cm^2$  , 2—  $I_0 = 1.10 \times 10^{14} W/cm^2$  ; 3—  $I_0 = 0.74 \times 10^{14} W/cm^2$

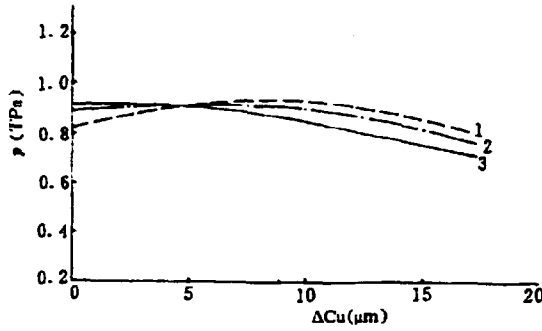


图8  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 层厚度  $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 对铜样品中冲击波传播的影响  
1— $15\mu\text{m}$  ; 2— $20\mu\text{m}$  ; 3— $30\mu\text{m}$

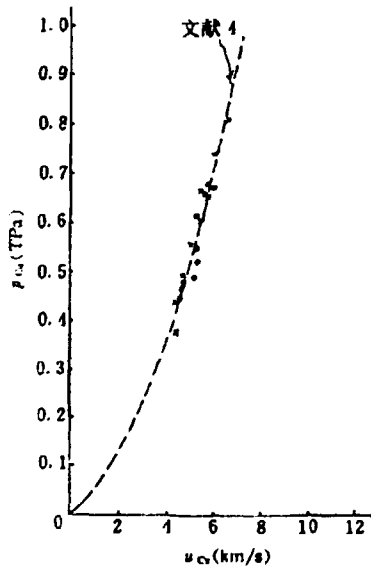


图9 本实验结果与 Nellis 等人数据拟合线的比较

本文实验数据系中国工程物理研究院上海激光室顾援、马民勋等同志提供，在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] R. More, *Laser Interaction and Related Physical Phenomena*. Vol. 5. 1981.
- [2] L. Veerer et al., 8th AIRPT Conference and 19th EHPRG Conference Proceeding. 1981.
- [3] 张永慧等, 包含超热电子运输的激光聚变总体方程组计算方法的研究及其在应用, 中国核科技报告 CNIC-00160.
- [4] W. J. Nellis et al., *Metals Physics at Ultrahigh Pressure; Aluminium, Copper and Lead as Prototypes*, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 16, No. 14, 1414 (1988).

**激光高压状态方钨钨阻抗匹配靶的理论研究**

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社激光照排中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本787×1092 1/16 印张1 字数10千字

1990年10月北京第一版1990年10月北京第一次印刷

ISBN 7-5022-0321-4

TL·142

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



ISBN 7-5022-0321-4  
TL-142

P.O.Box 2103  
Beijing, China

**China Nuclear Information Centre**