文章编号：1000-5773(2005)02-0174-05

无氧铜等熵卸载路径的实验研究*

宋 萍，蔡灵仓，周显明，谭 华

（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实验室，四川绵阳 621900）

摘要：采用化爆加载，以黄铜为飞片、无氧铜为靶板，测量了以抗氢钢(HR2)、重玻璃(SiO_2)、铝合金(LY12/LF6)、镁铝合金(MB2)、有机玻璃(PMMA)和空气(Air)为垫块(Anvil)材料中的冲击波速度(上述材料的 Hugoniot 状态参数 C_0、λ 均为已知)，由此确定了无氧铜的等熵卸载路径。结果表明：在冲击态(即初始卸载态)高达 219 GPa 的压力范围内，无氧铜的等熵卸载过程可用 Grüneisen 状态方程在 $\rho\gamma=\rho_0\gamma_0$ 近似下作很好的描述；各条卸载路径到一个大气压的终态粒子速度 U_S 与镜像反演的粒子速度 $2u$ 的偏差 $(U_S-2u)/(2u)$，随冲击波压力的增加而增大。

关键词：化爆加载；无氧铜；卸载路径；Hugoniot 关系式；Grüneisen 物态方程

中图分类号：O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

在全区物态方程的研究中，通过冲击绝热线测量可以得到材料在冲击绝热路径上的状态，但在该路径线之外的状态量，我们无法直接测定。但是如果从某个冲击状态出发测得它的卸载过程状态线，就可以得到该冲击压缩态以下某个区域内的状态量。因此，通过等熵卸载线，可以为了解材料在高温高压下的性质提供更全面的知识，加深对全区物态方程的理解，同时，也可为多种工程设计提供重要的基础物理数据。

从 20 世纪 80 年代以来，前苏联及俄罗斯的科学家们一直对许多材料的等熵卸载进行了研究，测量了铜、铁、钼、铅和钽等密实固体的多条等熵卸载线，并与冲击绝热线的镜像线作了比较。他们发现，等熵卸载线与冲击绝热镜像线在卸载至低压时会出现偏差，而且存在一个粒子速度临界值，在这个速度临界值以外，镜像线近似假设不可用。对不同的材料和不同的加载压力，这个值的大小不一样，且随着冲击压力的升高，样品加热作用增强，等熵卸载线与冲击绝热镜像线的差别也增大[1,2]。

美国 Nellis 和 Mitchell[3] 利用 Grover 唯象定标规则计算了铝材料的等熵卸载线，并与冲击绝热镜像线作了比较，发现计算得到的等熵线上的粒子速度超过镜像线的粒子速度 0.44%(冲击压力为 21 GPa 时)到 2.0%(冲击压力为 64 GPa 时)，相应的体积变化达到 5%(冲击压力为 64 GPa 时)。

国内迄今还没有对这一问题开展过比较系统的实验研究。本研究沿用俄罗斯 Zhernokletov 等人的方法，采用化爆加载手段，利用被冲击压缩无氧铜向冲击阻抗比无氧铜小的不同垫层(Anvil)材料样品中等熵膨胀的方法(垫层材料样品的冲击绝热线已知)，通过测量各垫层样品中的冲击波速度，得到无氧铜样品从其冲击压缩状态出发的等熵卸载路径。

2 等熵卸载路径的实验测量原理

在从冲击压缩状态出发的等熵卸载测量实践中广泛采用反射法，在这种方法中，冲击波经过金属基板进入一系列阻抗各不相同的一些标准材料阻挡层样品，基板和标准材料样品中的冲击波参数是预先

* **收稿日期**：2004-04-16；**修回日期**：2004-10-09

作者简介：宋 萍(1974—)，女，硕士，研究实习员.

确定的,通过测量样品中的冲击波速度,构建 p-u 图求出被压缩物质的其它状态量(压力 p,粒子速度 u 和密度 ρ),获得待测样品的卸载路径。

实验原理图如图 1 所示[4]。飞片以速度 W 碰撞基板后,在基板中产生一向下传播的冲击波。基板与样品 X 为同一种材料铜,其余为垫层材料样品。如果垫层材料和铜样品(X)的冲击绝热线为已知,厚度分别为 h_X、h_1、h_2、h_3。则利用探针 1～探针 5 测量飞片击靶波形的平面性和冲击波到达靶板与样品界面的时间 t_0,探针 6～探针 9 用于测量冲击波到达各样品自由面的时间 t_X、t_1、t_2、t_3,故各样品中的冲击波速度可用下式计算

$$D_i = h_i/(t_i - t_0) \qquad i = X,1,2,3 \qquad (1)$$

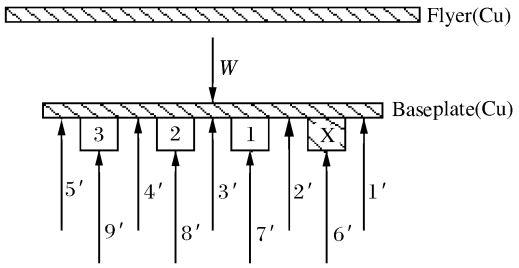


图 1　等熵卸载路径测量实验结构示意图
(1,2,3 为垫层样品,X 为铜样品)

Fig. 1　Schematic diagram for the release isentrope measurement
(1,2,3 are the anvil samples, X the Cu sample)

再通过实验前测量的各样品密度 ρ_{0X}、ρ_{01}、ρ_{02}、ρ_{03}和实验测得的冲击波速度值 D_X、D_1、D_2、D_3,在 p-u 图上分别绘出对应于各样品的 Rayleigh 线 OR_X、OR_1、OR_2、OR_3(见图 2)。因为根据样品材料的动量守恒关系有

$$\begin{aligned} p_a - p_0 &= (\rho_{0X} D_X) u_a \\ p_b - p_0 &= (\rho_{01} D_1) u_b \\ p_c - p_0 &= (\rho_{02} D_2) u_c \\ p_d - p_0 &= (\rho_{03} D_3) u_d \end{aligned} \qquad (2)$$

其各条 Rayleigh 线的斜率为 $\rho_{0i} D_i$。在 p-u 图上做出瑞利(Rayleigh)线后,它们与铜样品和垫层材料冲击绝热线的交点 a、b、c、d 的连线即为从 a 点出发的等熵卸载线。a、b、c、d 状态点的粒子速度和压力的计算求解方法如下。

已知各材料的状态方程参数 C_0、λ,则由 Hugoniot 速度关系式

$$D = C_0 + \lambda u \qquad (3)$$

从实测 D 值计算出样品的粒子速度

$$u = (D - C_0)/\lambda \qquad (4)$$

及样品材料中的冲击压力

$$p = \rho_0 D u \qquad (5)$$

实验选用的材料 Hugoniot 参数列于表 1。

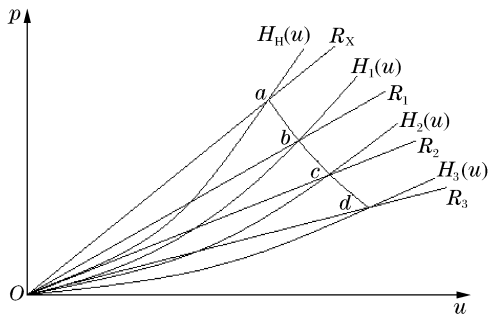


图 2　等熵卸载测量的 p-u 关系原理图

Fig. 2　Schematic in p-u relationship of release isentrope measurement

表 1　无氧铜及垫块材料的 Hugoniot 参数表

Table 1　Hugoniot parameters of Cu and anvil materials

Material	ρ_0/(g/cm^3)	C_0/(km/s)	λ	Ref.
OFHC-Cu	8.933	3.910	1.510	[5]
HR2	7.830	4.566	1.494	[5]
SiO_2(1)	4.783	2.012	1.532	[5]
TC4(2)	4.402	5.050	1.034	
LY12Al	2.779	5.370	1.290	[5]
LF6	2.633	5.549	1.216	[6]
MB2	1.774	4.497	1.219	[5]
PMMA	1.180	3.854	1.072	[5]
Air	0.299	1.035	0.001 29	[7]

Note:(1) High density glass;
(2) From Kanel's IMPACT program.

3 实验装置

实验装置见图 3。化爆加载时采用了空腔增压技术，加载装置中包括∅200 mm×50 mm 平面波炸药透镜、∅200 mm×45 mm JO-9159 主药柱、有机玻璃缓冲片、H62 黄铜飞片以及空腔支架。靶装置包括无氧铜靶板、垫层样品、探针架、探针和靶支架等。靶板下是垫层样品，样品的设计和探针的布局避免了测试时间范围内追赶稀疏和边侧稀疏的影响。考虑到化爆加载波形具有旋转轴对称性的特点，样品布置在同心圆上，测试探针布置在 3 个同心圆上，这也有利于进行波形的修正。波形修正采用平面等位修正技术[8]。垫块的厚度列于表 2。

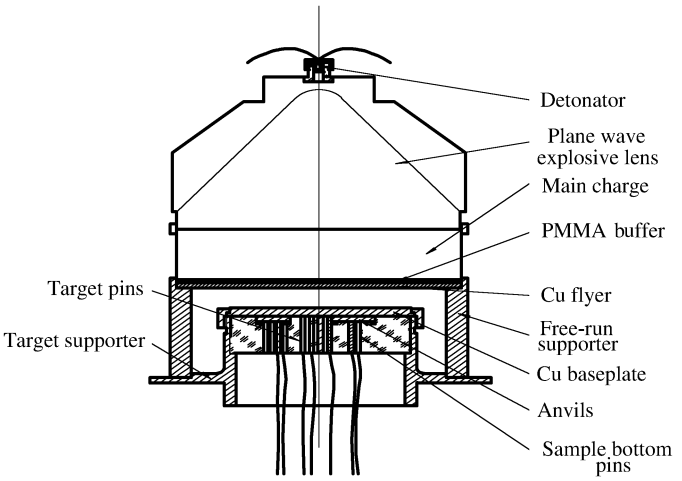


图 3 实验装置结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental arrangement

通过测得的冲击波传播的时间，利用原理中所述方法即可得到各标准材料样品中的冲击波速度，进而得到无氧铜卸载到各低阻抗样品材料的状态。

表 2 铜样品及垫块的厚度

Table 2 Thicknesses of Cu and anvil samples (**Unit**: mm)

Exp. No.	OFHC	HR2	SiO_2	TC4	LY12Al	LF6	MB2	PMMA	Air
Rpath-01	2.994	2.988	—	—	2.995	—	2.968	2.994	—
Rpath-02	2.997	2.991	—	3.000	2.997	—	2.948	2.981	—
Rpath-03	3.977	4.093	4.935	—	—	4.069	2.499	2.591	2.818

4 等熵卸载线的理论计算

在 $\rho\gamma=\rho_0\gamma_0$ 的假定条件下，等熵线上的压力 p_S[9] 可用下式计算

$$p_S=\exp[\gamma_0(\eta-\eta_i)]\left\{p_i+\rho_0 c_0^2\int_{\eta_i}^{\eta}\frac{1+\lambda x-\gamma_0 x}{(1-\lambda x)^3}\exp[\gamma_0(\eta_i-x)]\mathrm{d}x\right\} \tag{6}$$

式中：η、p_i 为起始点上的 Hugoniot 状态参数，$p_i=p_H$，$\eta_i=\eta_H=1-V_H/V_0$，$\gamma_0=1.99$。等熵线上的粒子速度 U_S

$$U_S=U_P+\int_{\eta_R}^{\eta_H}\sqrt{\left[\frac{\gamma_0}{\rho_0}p_S+C_0^2\frac{1+\lambda\eta-\gamma_0\eta}{(1-\lambda\eta)^3}\right]}\,\mathrm{d}\eta \tag{7}$$

式中：η 为压缩度，ρ 为密度，C_0、λ 为 Hugoniot 参数，γ 为 Grüneisen 参数，U_P 为冲击状态的粒子速度，下标 R 代表等熵卸载线上的状态。

5 实验结果与分析

用以上实验原理和数据处理方法，测量的无氧铜从 3 个不同压力点(148 GPa、124 GPa 和 116 GPa)向不同冲击阻抗的垫层卸载的实验结果如表 3 所示。将(6)式、(7)式计算的无氧铜的等熵卸载线与本文和文献[6]的实验数据的比较见图 4 所示。从图 4 可以看出，用 Grüneisen 状态方程计算的无氧铜等熵卸载线与实验点有比较好的符合程度。

为了比较无氧铜的等熵卸载线与冲击绝热线的镜像线的差距，图 5 给出了等熵卸载线与镜像线近似的比较。从图中可以看出，从 102 GPa 卸载的等熵线与其镜像线偏离很小。但是随着 Hugoniot 压

力增大,偏离也随之增大。表 4 中给出了卸载到空气中的粒子速度 U_S 与由冲击绝热线的镜像线获得的粒子速度 $2u$,以及 U_S 与 $2u$ 的绝对差值($\Delta=U_S-2u$)和相对差值 $\Delta/2u$。从表 4 可以明显看出,等熵卸载线与镜像线的偏离趋势。有关这方面尚需做进一步的工作。

表 3　无氧铜等熵卸载路径实验测量结果

Table 3　Experimental release isentropes of OFHC

Material	1			2			3		
	D /(km/s)	u /(km/s)	p /(GPa)	D /(km/s)	u /(km/s)	p /(GPa)	D /(km/s)	u /(km/s)	p /(GPa)
OFHC-Cu[1]	6.80	1.911	116	6.94	2.004	124	7.323	2.260	148
HR2	7.50	1.964	115	7.55	1.997	118	7.921	2.246	139
SiO_2	—	—	—	—	—	—	6.373	2.847	87
TC4	—	—	—	7.57	2.437	81	—	—	—
LY12Al	8.80	2.659	65	8.95	2.775	69	—	—	—
LF6	—	—	—	—	—	—	9.375	3.146	78
MB2	8.11	2.964	43	8.26	3.087	45	8.818	3.545	55
PMMA	7.42	3.330	29	7.41	3.326	29	7.880	3.756	35
Air	—	—	—	—	—	—	5.139	4.676	0.03

Note:(1) Pressure, shock velocity and particle velocity in the shocked state.

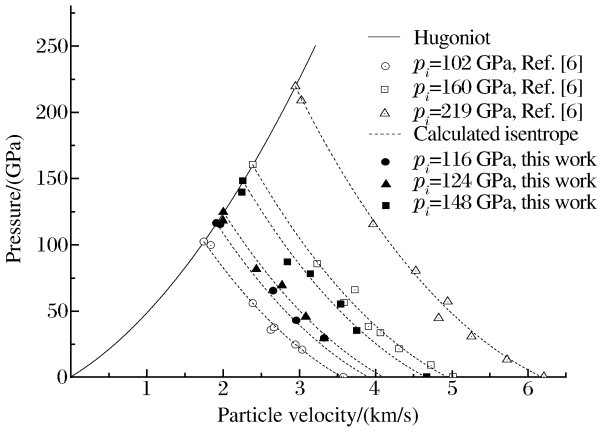


图 4　实验与计算的无氧铜等熵卸载线的比较

Fig. 4　Comparison between the experimental and calculational release isentrope of OFHC copper

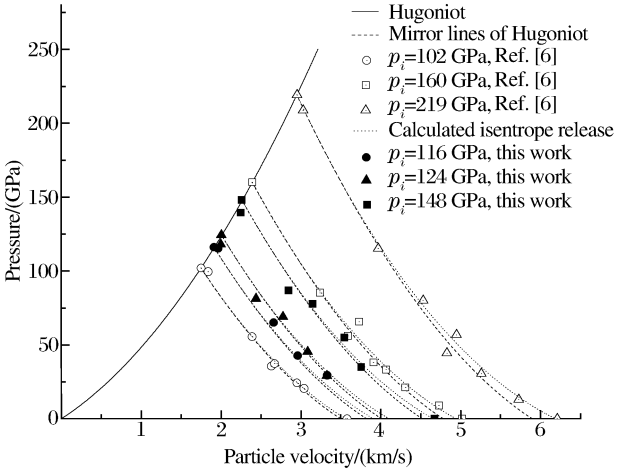


图 5　无氧铜等熵卸载线与冲击绝热线的镜像线的比较

Fig. 5　Comparison between the experimental and mirror-line approximations of the release isentropes of OFHC copper

表 4　无氧铜向空气中卸载的实测粒子速度

Table 4　Experimental particle velocities of the release isentropes to air for OFHC copper

p/(GPa)	u/(km/s)	Particle velocity releasing to air U_S/(km/s)	$\Delta=U_S-2u$ /(km/s)	$\Delta/2u$ /(%)	Ref.
102	1.75	3.58	0.08	2.3	[6]
148	2.26	4.68	0.16	3.5	This work
161	2.40	5.02	0.22	4.6	[6]
194	2.72	5.73	0.29	5.3	[6]
219	2.95	6.21	0.31	5.3	[6]

感谢刘晓海、靳开诚等在装配上给予的帮助,感谢杨慕松在现场安装方面的指导,感谢谢庆海和叶素华在测试上给予的热情帮助。

References:

[1] Zhernokletov M V, Medvedev A B, Simakov G V. Unloading Isentropes and Equation of State of Molybdenum at High Energy Densities [J]. Khimicheskaya Fizika, 1995, 14(2-3): 49－55.

[2] Zhernokletov M V, Simakov G V, Sutulov Y N, et al. Expansion Isentropes of Aluminium, Iron, Molybdenum, Lead, and Tantalum [J]. Teplofizika Temperatur, 1995, 33(1): 40－43.

[3] Nellis W J, Mitchell A C. Shock Compression of Liquid Argon, Nitrogen, and Oxygen to 90 GPa(900 kbar) [J]. J Chem Phys, 1980, 73(12): 6137－6145.

[4] Gathers G R. Selected Topics in Shock Wave Physics and Equation of State Modeling [D]. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1994.

[5] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. California: Univercity of California Press, 1980.

[6] 热尔诺科列托夫 M B. 高能两密度下凝聚物质的冲击压缩和绝热膨胀的实验数据 [M]. 韩均万. 绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所, 1997. 378.

[7] 鲍姆 Φ A, 斯达纽柯维奇 K П. 爆炸物理学 [M]. 尹祥础. 北京: 科学出版社, 1959. 179.

[8] 周显明. 化爆加载等位修正波形 [R]. 绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所, 2001.

[9] 汤文辉, 张若棋. 物态方程理论及计算概论 [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1999. 269.

Experimental Investigation of the Release Isentropes for OFHC Copper

SONG Ping, CAI Ling-Cang, ZHOU Xian-Ming, TAN Hua

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

Abstract: The release isetropes of oxygen-free copper have been measured by explosive loading technique, in which brass is used as the flyer material, copper as the material both for baseplate and sample, and HR2-steel, SiO_2-heavyglass, LY12/LF6 Al, MB2 alloy, PMMA and air as the anvil materials. The results showed the measured release isentropes can be described through Grüneisen equation of state with constant $\rho\gamma$ approximation in the initial releasing pressure range up to 219 GPa, and the relative deviation, $(U_S-2u)/(2u)$, of the measured end particle velocity, U_S, with the value of the mirror-line approximation, $2u$, increases with increasing initial releasing pressure.

Key words: explosive loading; OFHC copper; release path; Grüneisen equation of state; Hugoniot relation