

# 一种测量金属电爆炸过程中电导率的新方法<sup>\*</sup>

蒋吉昊 王桂吉 杨 宇

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2007 年 4 月 20 日收到 2007 年 7 月 9 日收到修改稿)

金属电导率是金属电爆炸过程中的重要参数, 利用金属箔电爆炸驱动飞片原理设计了一种测量金属电爆炸过程中电导率随密度、比内能变化的方法, 并采用实验数据计算得到了一条铜箔电爆炸过程中电导率随密度、比内能的变化关系曲线, 结果反映了电导率随密度的剧烈变化.

关键词: 金属电爆炸, 电导率, 比内能, 密度

PACC: 7215, 5225F

## 1. 引 言

金属电爆炸是指强脉冲电流快速加热金属箔或金属丝, 导致其在纳秒或微秒时间尺度内形成气体或等离子体的现象. 在该过程中金属比内能急剧升高, 压力、密度等力学量以及电导率等输运参数产生急剧变化. 利用金属在电爆炸过程中电导率急剧降低这一特点, 金属箔或金属丝可以作为电路的断路开关, 广泛应用于电感储能的实验以及高电压应用中<sup>[1-3]</sup>. 电爆炸过程中金属在短时间内汽化形成高压气体或等离子体的特点, 可被用于驱动聚酯薄膜飞片, 制成电炮, 用于材料状态方程的测量<sup>[4,5]</sup>和钝感炸药起爆装置<sup>[6]</sup>.

金属电爆炸过程中, 电导率是重要的输运参数, 它对电爆炸开关以及电炮装置的设计具有重要的意义. 但电爆炸过程中金属历经了多种物态(固态、液态、气态和等离子态), 测量随金属状态参数改变的电导率比较困难, 实验设计中常用电导率和比作用量( $\int j^2 dt$ )的经验公式代替实际的电导率随比内能和密度的变化关系<sup>[7]</sup>, 经验公式随加载脉冲电流的大小和波形的变化而不同, 因此电导率和比作用量的经验公式是和过程相关的<sup>[8]</sup>. 这改变了电导率是物质的状态量的本质, 使得在应用电导率与比作用量关系设计实验装置时需要经过多次修正.

本文利用金属箔电爆炸驱动飞片的原理, 设计

了一种测量金属电阻率随密度及比内能变化的方法. 通过同步测量金属箔两端电压和通过金属箔的电流, 计算金属箔的电导率和比内能的时间曲线. 同时, 用 VISAR (velocity interferometer system for any reflectors) 激光干涉仪<sup>[9]</sup>测量飞片的速度历史<sup>[10]</sup>, 通过时间上的积分, 得到电爆炸箔的体积变化, 从而得到电爆炸箔密度随时间变化历程. 当电流、电压和 VISAR 测量时间同步时, 计算得到的电导率与该时刻金属状态(密度、比内能)对应, 形成一条电导率随密度和比内能变化的曲线.

## 2. 金属箔电爆炸驱动飞片实验

金属箔电爆炸驱动飞片实验装置的原理示意图如图 1<sup>[11]</sup>所示, 图 1(a)为装置电路原理示意图, 图 1(b)为加载区结构示意图.

实验中利用双灵敏度 VISAR 测量 Mylar 膜飞片的自由表面速度时程<sup>[10]</sup>, 测量所用激光由芯径 60  $\mu\text{m}$  石英光纤探针引入电炮炮膛, 用光电倍增管作为记录系统, 其响应时间约为 1 ns, 比扫描相机的时间分辨率高, 通过对飞片速度时程积分得到飞片位移时程. 回路的放电电流由图 1 中罗果夫斯基线圈 (Rogowski coil) 测量, 桥箔两端的电压由高压探头进行测量<sup>[11]</sup>. 当高电压加载到桥箔上, 在桥箔上形成大电流, 使得金属桥箔发生电爆炸.

由于实验中电容器储能较小, 为达到完全电爆

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10472108)和中国工程物理研究院重大基金项目(批准号: 2004Z0101)资助的课题.

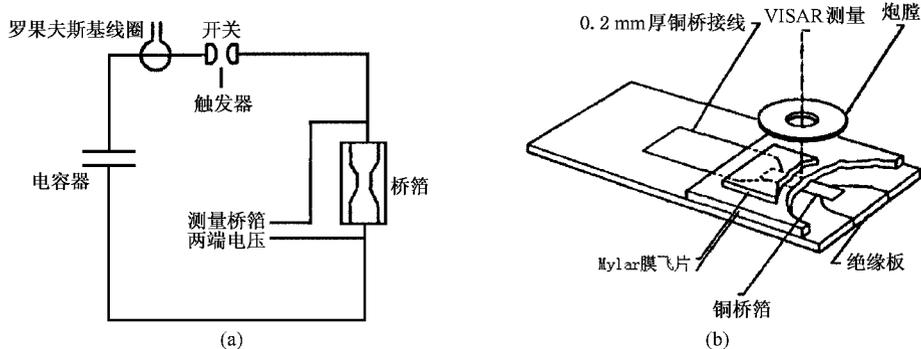


图 1 金属箔电爆炸驱动飞片实验装置原理示意图 (a)电路原理;(b)加载区结构

炸,实验中铜箔(桥箔)较小,尺寸为  $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.004 \text{ mm}$ ,Mylar 膜飞片厚度为  $25 \text{ }\mu\text{m}$ . 测量结果见图 2 和图 3.

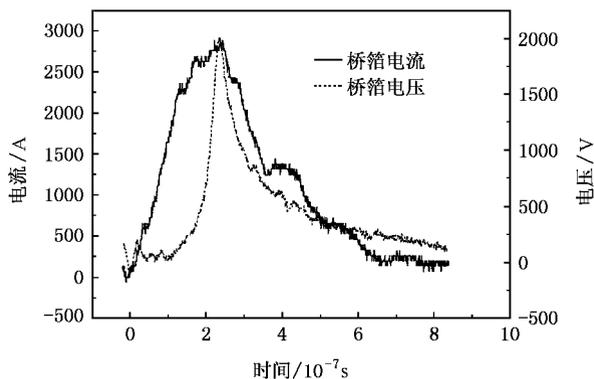


图 2 桥箔上电流、电压随时间变化曲线

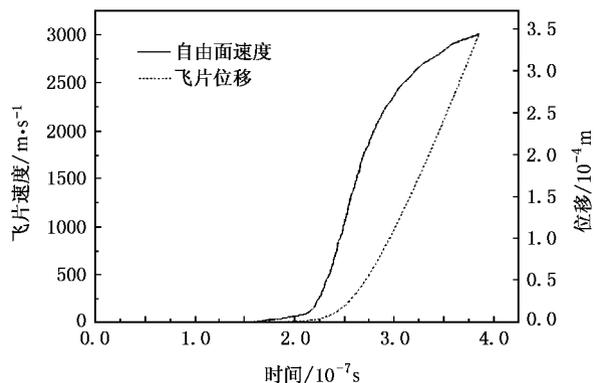


图 3 VISAR 测量飞片自由面速度和位移随时间变化曲线

是不可压缩流体,即用 Mylar 膜自由面的位移代了金属箔膨胀大小,并假设 Mylar 膜不吸收能量;2) 电流在金属箔中均匀流过,并且金属箔的状态和电导率是均匀的;3) 测量得到的电压是金属箔上的电压,即忽略了金属箔和连接线的接触电阻以及金属箔上电感对电压的影响.由此引起的误差将在下一节讨论.

在上述假设下,对 VISAR 速度进行时间积分得到飞片位移  $s$ (图 3),可以计算得到金属箔密度  $\rho$  的变化,通过测量金属箔两端电流  $I$ 、电压  $U$  以及飞片动能  $E_{fly}$  随时间的变化,采用金属箔输入总能量  $E$  减飞片动能  $E(t) = \int_0^t U(t)I(t)dt - E_{fly}(t)$ ,得到金属箔上增加的内能  $E_{foil}$ ,如图 4 所示,通过  $R(t) = U(t)I(t)$  计算得到电阻  $R$  随时间的变化,如图 5 所示,电阻在上升阶段在时间上呈现指数增长的趋势,这与电爆炸过程中电阻变化趋势相符合<sup>[13]</sup>.

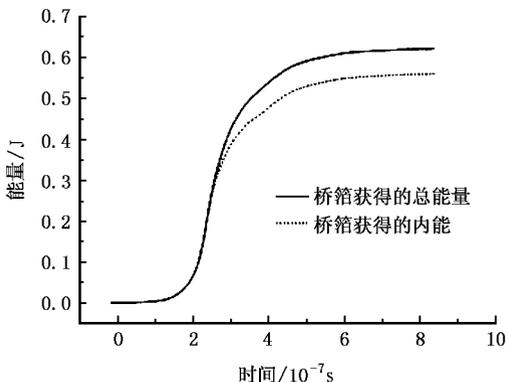


图 4 桥箔获得的总能量、内能随时间变化曲线

### 3. 电导率计算

本文对电爆炸驱动飞片测量电导率进行原理性的探索,因此采用较粗糙的三点假设:1) Mylar 飞片

计算得到电导率  $\sigma$  随金属密度  $\rho$ ,比内能  $e$  变化的关系曲线如图 6 所示,该曲线在比内能和密度平面上的投影反映了金属电爆炸的物理过程的状态

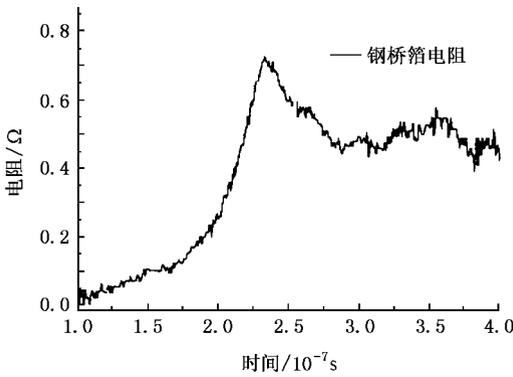


图5 桥箔电阻随时间变化曲线

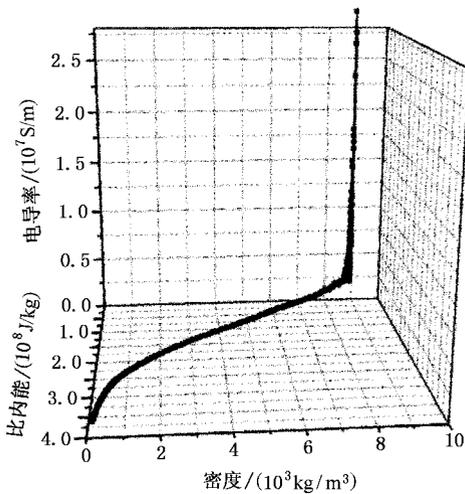


图6 铜电导率和密度、比内能关系曲线

态,即历经的状态线.电导率变化曲线在密度、温度变化开始不久有急剧变化.这是由于在温度较低的情况下,金属原子的间距随密度的降低而增加,金属中的能带被破坏,电子被越来越多的束缚在金属原子周围,从而使的电导率发生剧烈变化.图6的结果显示铜在密度为  $8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  附件电导率呈现指数变化,这一结果与 DeSilva 和 Katsouros 测量铜等离子体电导率随密度变化的结果相近似<sup>[12]</sup>(见图 7<sup>[12]</sup>).

原理性实验只测量了一条电导率变化曲线.实际应用中可通过调节加载电流的脉冲波形、电流大小和金属桥箔的几何尺寸,测量多条电导率随密度、比内能的变化曲线,在一定范围内构成金属电导率随密度、比内能变化的一个曲面,从而确定该范围内金属电导率随密度、比内能的变化关系.

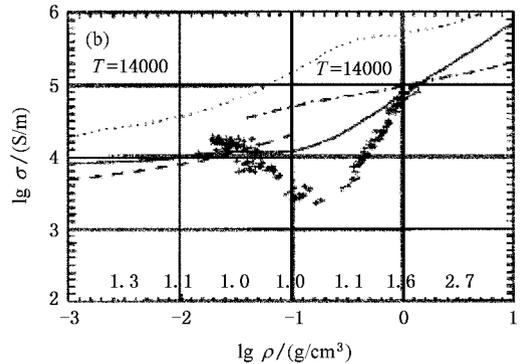
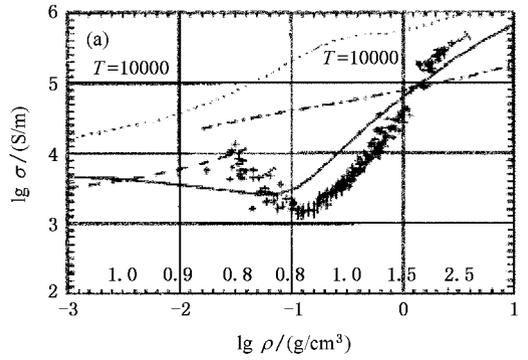


图7  $1 \times 10^4 \text{ K}$  和  $1.4 \times 10^4 \text{ K}$  下铜电导率随密度变化关系 十字点是实验数据和误差,实线、虚线和点划线分别由 Ebeling 等人模型、Lee 和 More 模型、Kurilenkov 和 Valuev 模型计算得到

### 4. 结果分析

利用金属箔电爆炸驱动飞片实验数据,计算得到了电导率随密度、比内能变化的一条关系曲线.该曲线在电导率-密度平面的投影上呈现指数变化,与电爆炸过程中电阻率变化趋势一致<sup>[1,3]</sup>,表明这种利用金属箔电爆炸驱动飞片的原理来测量金属电导率随密度和比内能是可行的.由于这套电爆炸装置主要用于材料动力学性能实验研究,没有对电导率测量而进行优化设计,上述原理性测量的结果存在较大的误差.

主要误差来源有 1)电压测量的误差.实验中的是金属箔上的阻抗(包括电阻和电感的贡献),电感随着金属箔几何形状和电导率的变化而改变,这里假设电感很小,在计算中认为电阻近似等于阻抗;这一假设带来的误差,可通过改进测量方法和装置的几何结构来减少金属箔的电感变化,并通过测量电流随时间变化梯度,采用数值计算减除由金属电感引起的电压降,从而降低金属电感对电阻测量的影响 2)接触电阻的影响.由于电容器储能较小,

金属箔的体积较小,温度升高时,金属箔两端的接触电阻增大,可能带来较大误差,为减小接触电阻的影响,金属箔的长度应该增大,使得接触电阻相对金属箔上的电阻是个小量;3)衬底材料和 Mylar 是可压缩材料,采用不可压缩流体假设,给金属箔体积的计算带来误差,尤其是在电爆炸起爆时刻会带来较大误差.另外可压缩流体在被压缩时内能增加,也给金属箔比内能计算带来误差.采用较硬的绝缘材料做衬底替代 Mylar,或减小飞片厚度可以减少这种误差的影响;在数值上可以通过对飞片自由面速度进行反演计算<sup>[13]</sup>得到飞片的动能、内能变化和飞片加载面的速度历程和压力历程,从而修正由飞片是可压缩流体引起的误差;还可依据加载面的压力估算衬底材料上的压缩情况从而减小衬底材料被压缩引起的误差;4)电流在金属箔内均匀流过假设带来的误差,初始时金属箔的厚度仅有  $4\ \mu\text{m}$ ,远小于铜的趋肤深度( $\sim 2\ \text{mm}$ ),因此在初始时电流均匀假设是近似成立的,金属箔气化膨胀后厚度  $\sim 0.3\ \text{mm}$ ,但此时

金属的电导率比始时刻小了 3 量级,它的趋肤深度( $\sim 20\ \text{mm}$ )仍远大于金属厚度,因此电流均匀假设带来的误差不大,并且实验中金属桥箔厚度越小,这一近似带来的误差越小;5)时间同步的误差:在电炮实验中时间同步的误差  $< 1\ \text{ns}$ ,因而由此引起误差可以忽略.

## 5. 结 论

本文利用电爆炸飞片的实验原理设计了一种测量金属电爆炸过程中电导率随密度、比内能变化的方法,并利用相关实验数据计算得到了铜箔电爆炸过程中电导率随密度、比内能变化的关系曲线.虽然由于实验装置的限制,计算结果有较大误差,但结果能够反映出金属电导率随内能、密度的变化趋势,尤其是在较低温度下电导率与密度的关系,说明该方法的可行性.

- [1] Chace W G 1964 *Exploding Wires* 3 1
- [2] Tucker T J, Toth R P 1975 *SAND* -75-0041 p1
- [3] Burtsev V A, Kalinin N V, Luchinskya V 1990 *Electric Explosion of Conductors and its Application in Electrophysical Devices*. (Moscow) p99 (in Russian)
- [4] Wang G J, Zhao J H, Tang X S, Tan F L, Wu G, Liu H T, Kuang X W 2005 *J. High Pres. Phys.* 19 269 (in Chinese) [王桂吉、赵剑衡、唐小松、谭福利、吴刚、刘海涛、匡学武 2005 高压物理学报 19 269]
- [5] Wang G J, Zhao J H, Tan F L, Tang X S 2005 *6th Asia-Pacific Conference on SHOCK & IMPACT LOADS on STRUCTURES* December 7—9 Perth, W. Australia.
- [6] Tan Y X, Zhang J L, Wang G J 2003 *Acta Armamentarii* 24 253 (in Chinese) [谭迎新、张景林、王桂吉 2003 兵工学报 24 253]
- [7] Yang H W, Zhong H H 2000 *Journal of National University of Defense Technology* 22 38 (in Chinese) [杨汉武、钟辉煌 2000 国防科技大学学报 22 38]
- [8] Gong X G 2002 *High Power Laser and Particle Beams* 14 577 (in Chinese) [龚兴根 2002 强激光与粒子束 14 577]
- [9] Chau H H, Memilan C F, Osher J E 1998 VCR-98483 p1
- [10] Deng X Y, Zhao J H, Ma D L, Peng Q X 2005 *Explosion and Shock Waves* 25 382 (in Chinese) [邓向阳、赵剑衡、马冬莉、彭其先 2005 爆炸与冲击 25 382]
- [11] Zhao J H, Sun C W, Tang X S, Tan F L, Wang G J, Zhang N 2006 *J. Exp. Mech.* 21 369 (in Chinese) [赵剑衡、孙承纬、唐小松、谭福利、王桂吉、张宁 2006 实验力学 21 369]
- [12] Desilva A W, Katsourous J D 1998 *Phys. Rev. E* 57 5945
- [13] Hayes D 2001 *SAND* 1440 3

# A new method to measure the electrical conductivity of metals in electric exploding<sup>\*</sup>

Jiang Ji-Hao Wang Gui-Ji Yang Yu

( *Institute of Fluid Physics , Chinese Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China* )

( Received 20 April 2007 ; revised manuscript received 9 July 2007 )

## Abstract

The electrical conductivity is an important transport coefficient for electric exploding. A new method to measure the electrical conductivity is designed using the experiment of electric gun. The electrical conductivity of copper is calculated using the data of electric gun. The electrical conductivity change exponentially with of the density.

**Keywords** : electric exploding , electrical conductivity , specific internal energy , density

**PACC** : 7215 , 5225F

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10472108 ) and the Key Foundation of Chinese Academy of Engineering Physics , China ( Grant No. 2004Z0101 ).