文章编号：1000-5773(2012)04-0389-06

低冲击应力下脆性介质电阻率的实时测量*

杨　佳[1]，喻　寅[1]，蒋冬冬[1]，张明建[2]，
李永宏[2]，刘福生[2]，贺红亮[1]

（1.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；
2.西南交通大学高温高压物理研究所，四川成都　610031）

摘要：冲击波压缩下材料宏观性质的变化与微观结构演化有着密切联系。通过改进对称差分电路测量方法，测量K9玻璃在失效破坏过程中的电阻率变化，研究了脆性介质在低冲击波应力下的损伤破坏机制。结果表明，随着冲击波在K9玻璃中传播，K9玻璃的电阻率逐渐下降；在7.6 GPa冲击压缩下，K9玻璃由最初的绝缘体状态逐渐转变为电阻率约420 Ω·m的稳定状态。

关键词：脆性介质；冲击波；损伤破坏；电阻率
中图分类号：O521.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

材料宏观性质的变化与微观结构演化有着密切联系。冲击波压缩下介质的波阻抗、抗拉强度、透明度等宏观力学和光学性质的变化能够间接反映其内部的损伤破坏和力学失效行为。在高冲击应力作用下，材料内部温度、绝热剪切带引入的缺陷浓度以及能带宽度等因素的变化会造成材料电阻率改变。许多实验已经证实：K9玻璃等脆性介质在Hugoniot弹性极限应力范围内会出现独特的破坏现象，例如，Grady[1]、Bourne[2-3]、贺红亮[4]和赵剑衡[5]等人通过测量样品后自由表面的速度剖面，应力、应变变化历史，或者利用高速摄影技术，观测到在冲击波波阵面后的压缩区内存在一个由大量裂纹和裂纹分叉组成的随冲击波向前传播的破坏区。然而，关于它的物理机制仍需要深入认识。可以预见，多角度研究损伤破坏引起的宏观物理性质变化将有助于研究脆性介质中损伤破坏与力学失效的物理机制。

冲击波压缩对材料电阻率的影响一直是高压物理研究领域的重要方向，例如，绝缘体金属化转变、压力诱导超导、高压下金属电阻率的变化等。蓝宝石[6]、KCl晶体[7]、岩石[8]、聚乙烯[9-11]等固体材料，在常温常压下均为绝缘体，而在较高冲击压力下（远高于其Hugoniot弹性极限），电阻率均会出现不同程度的降低。1996年，Weir等人[6]测量了不同冲击压力下蓝宝石的电阻率：当应力达到92 GPa时，蓝宝石的电阻率下降至170 Ω·cm；当应力升至220 GPa时，其电阻率将继续下降两个数量级[6]。最近，Nellis[12]从理论上预测了蓝宝石会在300 GPa压力下变成金属玻璃，电阻率会下降至5 μΩ·m。水[13]、溴[14]等液体绝缘介质在一定的高压下也存在明显的电阻率降低现象。然而，在低冲击波压力范围内，特别是在介质Hugoniot弹性极限范围内，相关介质的电阻率下降及其物理机制等研究鲜有报道。

冲击波压缩下介质电阻率的实验测量方法已有很多报道，如电容器法[8-9]、恒流源法[13]、四电极法[15]、对称差分电路法[6-7]。其中，对称差分电路法的设计非常巧妙，不仅可以减小侧向稀疏、冲击极化

* **收稿日期**：2010-12-29；**修回日期**：2011-04-01
基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金(2010A0201005)；冲击波物理与爆轰物理实验室基金(9140C6702030904)
作者简介：杨　佳(1985－)，男，硕士研究生，主要从事高压材料科学研究. E-mail：whuyj168@126.com
通讯作者：贺红亮(1963－)，男，博士，研究员，主要从事高压材料科学与力学研究. E-mail：honglianghe@263.net

效应和材料介电系数变化等因素对电阻率测量的影响，而且可以实时观测样品电阻率。目前，冲击波压缩下介质电学性质研究呈现两种趋势：(1) 进一步提高冲击压缩应力，研究介质在超高压力下材料的电学性质；(2) 降低冲击波压缩应力，研究介质在较低压力下材料的电学性质转变。在第 2 种趋势中，关注 Hugoniot 弹性极限范围内材料的电学性质是否发生变化，特别是对于脆性介质，其内部介质是否因损伤破坏而发生电学性质改变[16-17]。

本研究针对低冲击波应力加载下样品的电阻率，通过改进 Weir 等人[6-7]的对称差分电路电阻率测量方法，测量 K9 玻璃在 Hugoniot 弹性极限范围内的电阻率变化，初步分析低冲击应力诱导 K9 玻璃电阻率变化的物理机制。

2 实验原理和方法

实验在∅57 mm 的一级轻气炮上进行。飞片材料为无氧铜，样品材料为 K9 玻璃。K9 玻璃是以碱硼硅酸盐玻璃(R_2O-B_2O_3-SiO_2)和碱铝硼硅酸盐玻璃(R_2O-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2)为基础的光学玻璃，是一种典型的脆性透明介质[18]。考虑到冲击波加载下玻璃样品微观结构的破坏行为可能是影响电阻率变化的因素之一，为了研究冲击波波阵面传播过程中玻璃样品电阻率随时间的变化，在 Grady[1]、Bourne[2]等人所采用的方法基础上，对实验装置进行了改进。

首先，增加样品和飞片的厚度(样品和飞片厚度分别为 20 mm 和 10 mm)，使损伤破坏有足够的时间演化发展。实验装置如图 1 所示，样品中心对称地钻两个直径为 1.5 mm 的小孔，小孔中心距为 3.5 mm。在小孔中插入测量电极，电极材料选择与 K9 玻璃波阻抗相近的 LY12 铝合金。整块样品装在一个接地的 LY12 铝合金样品盒中。为了避免飞片压缩稀薄气体导电对电阻率测量的干扰，样品前表面粘一层 25 μm 厚的铜箔。

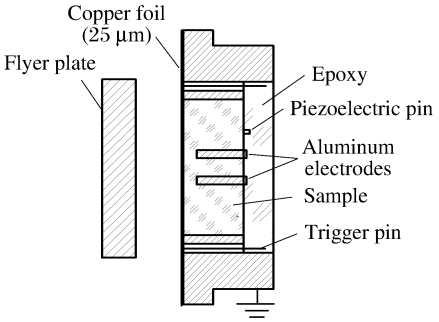


图 1 K9 玻璃电阻率测量靶装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the target assembly for electrical resistivity test on shocked K9 glass

其次，为了识别冲击波作用下样品电阻变化引起的电压信号，在实验装置中特别增加了时标信号，即：在样品前、后界面分别用电探针和 PZT 压电探针获得时标，以判断测量的电阻率变化与冲击波传播时间的对应关系。

再次，采用对称差分电路法测量电阻率，并对电路进行了改进，如图 2 所示。通过测量两个电极与地之间的电势差，获得一正一负两个电压信号，将它们相减，即可计算两电极之间的总电压。如果电路中有相同的干扰信号，如冲击极化、电流在冲击波波阵面上的串扰等，采用对称差分电路可以消除干扰信号对总电压信号的影响。图 2 中：R_s 为样品电阻，R_4、R_6、R_7 为 2 MΩ 的充电电阻，C_1、C_2 为 0.2 μF 的高压电容，R_3、R_5 为 300 Ω 的分压电阻，R_1、R_2 为 50 Ω 的匹配电阻，示波器实时记录匹配电阻上的电压。考虑到低冲击波应力下玻璃样品的电阻率仍然很高，对 Weir 电路进行了改进：提高测量电路电压，将 70 V[6-7]电压增加到 750 V。为此，测

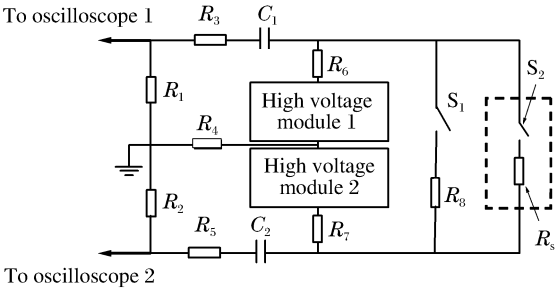


图 2 冲击波作用下 K9 玻璃电阻测量电路图

Fig. 2 Circuit for measuring electrical resistance of K9 glass under shock compression

量电路采用的电源为一对高电压电源模块,电源电压最高可升至 1 kV。待电容器充电至稳定状态后,开始冲击波实验。冲击波加载后,在冲击波压缩下样品电阻率开始变化。当两电极间的介质部分导通时,相当于开关 S_2 闭合,示波器记录的扫描线上显示出两个对称变化的电压,如图 3 中的 V_+ 和 V_- 所示。随着冲击波传播,样品电阻逐渐减小,示波器上的电压逐渐增加,直至冲击波传播出样品。图 3 中:t_A、t_B、t_C 分别为飞片撞击样品、两电极开始导通和冲击波到达样品后界面的时刻,T 和 P 分别为样品前表面触发探针和样品后表面压电探针的测量信号。

最后,为了确定每次冲击波实验前测量电路工作是否正常,用一个 600 Ω 的纯电阻 R_8 和开关 S_1 组成零前检查系统。电容 C_1 和 C_2 通过 R_1、R_2、R_3、R_5 与 R_8 放电,示波器记录的扫描线上显示出两个突然上升的电压信号 V_{0+} 和 V_{0-}。此外,通过零前检查结果还可以获得电容器放电时的电压值,为计算样品电阻率提供可靠依据。

根据零前检查输出的电压信号 V_{0+}、V_{0-} 和电路分析计算样品两电极上的电压 U_1、U_2,即

$$\begin{cases} U_1 = V_{0+}\dfrac{R}{R_1}\exp\left(\dfrac{t-t_0}{RC}\right) \\ U_2 = -V_{0+}\dfrac{R}{R_2}\exp\left(\dfrac{t-t_0}{RC}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中:$R=R_1+R_2+R_3+R_5+R_8$,$C=C_1C_2/(C_1+C_2)$,t_0 为冲击波进入样品的时刻。因为冲击波实验时间 t 远小于电容器充放电时间 RC,所以 $\exp[(t-t_0)/RC]\approx 1$,同时对称差分电路中 $R_1\approx R_2$,则样品电阻 R_s 可表示为

$$R_s = \frac{U_1-U_2}{V_+-V_-}(R_1+R_2) \approx \frac{2R(U_{0+}-U_{0-})}{V_+-V_-} = \frac{2RV_0}{V} \tag{2}$$

式中:$V_0=V_{0+}-V_{0-}$,表示冲击波加载前两个测量电极之间的电势差;$V=V_+-V_-$。两个电极之间的电阻由欧姆定律给出,即

$$R_s = \frac{\rho V}{\int_S(-\nabla\Phi)\mathrm{d}s} \tag{3}$$

式中:$V/[\int_S(-\nabla\Phi)\mathrm{d}s]$ 为样品的几何因子,通过有限差分法计算;R_s 和 ρ 分别为样品电阻和电阻率。假设在任意冲击波波阵面位置处,样品内部均有稳定的电场,则样品中的电势分布满足 Laplace 方程,即

$$\nabla^2\Phi = 0 \tag{4}$$

对不同冲击波波阵面位置的样品划分网格,计算样品内部的电势分布和电极表面电场积分,进而获得不同冲击波波阵面位置处样品的几何因子。计算过程中的边界条件为:两电极的电势分别为 $\Phi_+=V_{0+}$ 和 $\Phi_-=-V_{0+}$;样品与飞片之间的撞击面电势 $\Phi=0$;样品侧面电势 $\Phi=0$。将样品分成约 116 200 个计算网格,网格中的每个节点都满足 Laplace 方程,迭代后可以计算出样品的几何因子。

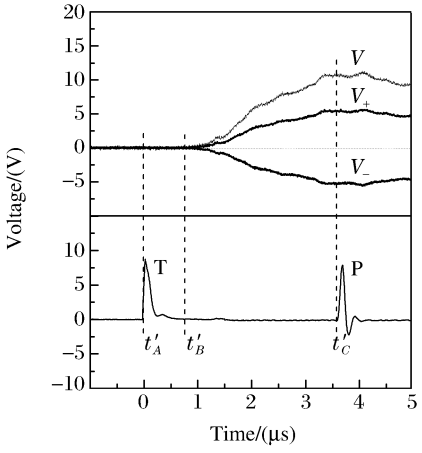


图 3 冲击波压力为 7.6 GPa 时电压测量波形

Fig. 3 Voltage waveform at shock pressure of 7.6 GPa

3 结果与讨论

K9 玻璃 Hugoniot 弹性极限应力为 8.6~9.1 GPa[12]。为了研究低冲击波应力下介质电学性质的变化行为,本研究在 K9 玻璃 Hugoniot 弹性极限应力范围内,对冲击波压缩过程中 K9 玻璃电阻率进行了实时测量。图 3 给出了冲击波应力为 7.6 GPa 时典型的测试结果。冲击波在 t_A 时刻进入样品,冲击

波到达电极之前，电极间没有电流；只有冲击波经过电极顶端位置之后，即在 t_B 时刻后，两电极才开始响应；电路中的电压开始逐渐上升，直到冲击波在 t_C 时刻传出样品。根据示波器获得的电压信号和(2)式可计算出样品实时变化的电阻，结合数值计算得到的几何因子，由(3)式可计算出样品实时变化的电阻率。图 4 给出了计算后得到的电阻率随时间演化的规律(时间范围在 t_B 与 t_C 之间)。常温常压下 K9 玻璃样品为绝缘体，随着冲击波在样品中传播，样品电阻率逐渐下降。从图 4 中可以看出，在 7.6 GPa 冲击波压缩下，经过约 1.2 μs 的持续下降，样品电阻率达到相对稳定状态，即 420 Ω·m。

在 Hugoniot 弹性极限应力范围内，K9 玻璃的温度、能带宽度等因素基本保持不变，什么因素导致其电阻率发生明显变化？目前，低冲击应力诱导 K9 玻璃电阻率变化尚未见报道，其物理机制还有待进一步研究。作为一种可能机理，本研究认为电阻率的下降与冲击波加载下玻璃内部的结构破坏有关。在 Hugoniot 弹性极限范围内，冲击压缩状态下玻璃等脆性介质中产生大量裂纹，根据 Krotova[16]、Dickinson[17]等人的脆性介质断裂粒子发射理论，在快速扩展过程中裂纹尖端处会有带电粒子喷射出来，使介质中载流子浓度增加，电阻率降低。可以预期，样品中的裂纹数 n 越多，载流子浓度将越高，电阻率将越小，即

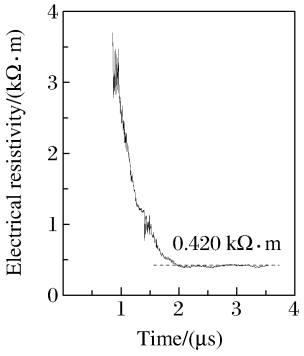


图 4 7.6 GPa 冲击压力下 K9 玻璃电阻率随时间的变化

Fig. 4 Change of Electrical resistivity of K9 glass with time at shock pressure of 7.6 GPa

$$\frac{1}{\rho} \propto n \tag{5}$$

介质中裂纹数 n 直接反映材料的损伤状态，而裂纹数则与冲击波应力大小、应力加载时间等因素有关，结合(5)式可知介质的电阻率在一定程度上反映了介质内部的损伤状态，这为分析脆性介质的宏观力学性质与材料细观结构变化的关系提供了新的方法。

4 结 论

采用改进的动高压电阻率测量方法，研究了低冲击波加载应力下脆性介质的电学性质变化。以 K9 玻璃为例，在 Hugoniot 弹性极限范围内，实时测量了 K9 玻璃电阻率随冲击波传播的变化。测量结果表明：在 7.6 GPa 冲击加载下，K9 玻璃的电阻率随冲击波在样品中的传播逐渐下降，经过约 1.2 μs 的持续下降后，电阻率达到稳定值，保持在 420 Ω·m 左右。研究结果拓展了传统动高压电阻率的测量范围，从一个新的角度研究材料动态损伤失效问题，有助于研究脆性介质在较低冲击波应力作用下的微观结构变化及其物理机制。

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所周显明研究员在研究工作中进行的十分有益的讨论，感谢中国工程物理研究院流体物理研究所王为以及西南交通大学高温高压物理研究所薛学东、程小里、王军国等人在实验工作中给予的帮助。

References:

[1] Grady D E. Dynamic failure in brittle solids, SAND 94-0777C [R]. Washington D C: Sandia National Labs, 1994.

[2] Bourne N K, Rosenberg Z, Ginzburg A. The ramping of shock waves in three glasses [J]. Proc Math Phys Eng Sci, 1996, 452: 1491-1496.

[3] Bourne N, Millett J, Rosenberg Z. On the origin of failure waves in glass [J]. J Appl Phys, 1997, 81(10): 6670-6674.

[4] He H L, Jing F Q, Jin X G, et al. Microstructure damage of glasses under shock wave compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1998, 12(4): 241-249. (in Chinese)
贺红亮,经福谦,金孝刚,等. 冲击波极端条件下玻璃的细观结构破坏 [J]. 高压物理学报, 1998, 12(4): 241-249.

[5] Zhao J H, Sun C W, Duan Z P. Progress in the study of failure waves in glass sample under shock wave loading [J]. Progress in Physics, 2001, 21(2): 157-175. (in Chinese)
赵剑衡,孙承纬,段祝平. 冲击压缩下玻璃等脆性材料中失效波的研究进展 [J]. 物理学进展, 2001, 21(2): 157-175.

[6] Weir S T, Mitchell A C, Nellis W J, et al. Electrical resistivity of single-crystal Al_2O_3 shock-compressed in the pressure range 91-220 GPa (0.91-2.20 Mbar) [J]. J Appl Phys, 1996, 80(3): 1522-1525.

[7] Bourne N K, Townsend D, Braithwaite M. On conductivity changes in shocked potassium chloride [J]. J Appl Phys, 2005, 97(12): 123506.

[8] Mashimo T, Kondo K, Sawaoka A, et al. Electrical conductivity measurement of fayalite under shock compression up to 56 GPa [J]. J Geophys Res, 1980, 85(B4): 1876-1881.

[9] Champion A R. Effect of shock compression on electrical resistivity of three polymers [J]. J Appl Phys, 1972, 43(5): 2216-2219.

[10] Gu C G, Xie P H, Wang J G, et al. An improvement on resistance measuring technique of insulant under shock compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1988, 2(4): 340-345. (in Chinese)
古成钢,谢盘海,王金贵,等. 测量冲击压缩下绝缘材料电阻率技术的一个改进 [J]. 高压物理学报, 1988, 2(4): 340-345.

[11] Gu C G, Jing F Q, Xie P H, et al. Resistivity and Hugoniot measurements of polytetrofluoroethylene (teflon) under shock compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1989, 3(1): 31-41. (in Chinese)
古成钢,经福谦,谢盘海,等. 冲击压缩下聚四氟乙烯电阻率及冲击绝热线的实验研究 [J]. 高压物理学报, 1989, 3(1): 31-41.

[12] Nellis W J. Al_2O_3 as a metallic glass at 300 GPa [J]. Phys Rev B, 2010, 82(9): 092101.

[13] Hamann S D, Linton M. Electrical conductivity of water in shock compression [J]. Trans Faraday Soc, 1966, 62: 2234-2241.

[14] Yakushev V V. Electrical conductivity of shock-compressed sulphur, iodine, bromine and water [J]. Mater Res Soc, 1997, 499: 121-126.

[15] Bi Y. The electrical conductivity of iron under shock compression up to megabar pressures and its implications in geophysics [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2002. (in Chinese)
毕　延. 冲击压缩至兆巴压力下铁的电导率及其地球物理意义 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2002.

[16] Krotova N A, Karasev V V. Examination of electron emission in cleaving of solids in vacuum [J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1953, 92(3): 607-611.

[17] Dickinson J T, Donaldson E E, Park M K. The emission of electrons and positive ions from fracture of materials [J]. J Mater Sci, 1981, 16(10): 2897-2908.

[18] Wang C Y, Tao Y. Handbook of Glass Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 465-470. (in Chinese)
王承遇,陶　瑛. 玻璃材料手册 [M]. 北京:化学工业出版社, 2007: 465-470.

Measurement of Electrical Resistivity of Brittle Materials under Weak Shock Compression

YANG Jia[1], YU Yin[1], JIANG Dong-Dong[1], ZHANG Ming-Jian[2], LI Yong-Hong[2], LIU Fu-Sheng[2], HE Hong-Liang[1]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Laboratory of High Pressure Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*)

Abstract: The property variation of brittle material is closely related to its microstructure variation under shock compression. The present work is aimed to understand such a failure process by the measurement of electrical resistivity changes under weak shock compression. After improvements on the Weir's differental technique, the electrical resistivity of K9 glass has been measured under shock loading. Experimental results indicate that the electrical conductibility increases as shock wave propagating in the K9 glass. At the shock pressure of 7.6 GPa, the electrical resistivity changes gradually from the insulation state to a constant of about 420 Ω · m.

Key words: brittle material; shock wave; failure; electrical resistivity