文章编号: 1001-1455(2014)02-0252-05

铜丝电爆炸的光谱分析*

金 涌,栗保明
(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 通过搭建脉冲成形网络放电模块和光谱测试系统,利用 Andor SR750 光谱仪测量了铜丝电爆炸等离子体在 400~500 nm 范围内的发射光谱。根据热力学平衡理论,采用双谱线相对强度法计算了等离子体的激发温度,并研究了激发温度随时间变化的特性。研究结果表明,铜丝电爆炸产生的稳态等离子体的激发温度约为 5 400 K。在脉冲放电前期,激发温度变化较大;在放电后期,激发温度较稳定;整个脉冲时间内激发温度差约达 800 K。

关键词: 爆炸力学;激发温度;双谱线相对强度法;铜丝;电爆炸;等离子体
中图分类号: O389;O536 **国标学科代码**: 1303599;140553 **文献标志码**: A

电热化学发射一般通过金属电爆炸产生的等离子体消融毛细管壁点燃发射药[1-2],等离子体的性质直接影响电热化学发射的效率,因此,研究电弧等离子体的特性对实际工程应用具有重要意义[3-6]。等离子体温度是描述等离子体热力学状态的重要参数之一,用光谱研究等离子体是实时和非破坏性的实验研究方法,对等离子体温度的测量始终是光谱学和测试专业的热门课题[7-8]。本文中,通过搭建脉冲成形网络(PFN)放电模块和光谱测试系统,测量铜丝电爆炸过程中的发射光谱,计算铜丝电爆炸产生的等离子体的激发温度并分析其变化特性。

1 测量原理

测量高温物质的方法[9-11]有分子带状光谱法、光谱线多普勒宽度法、双谱线相对强度法、绝对谱线强度法、多谱线斜率法、等电子谱线法和声速法等。本文中采用双谱线相对强度法计算等离子体的激发温度。常压下,假设电弧等离子体处于热力学平衡状态,则其内部的气体温度 T_g、电子温度 T_e 和激发温度 T_a 均相等[12],即 $T=T_g=T_e=T_a$。此时各激发态和基态的粒子浓度满足 Boltzmann 分布:

$$n_i = n_0 \frac{g_i}{g_0}\exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \tag{1}$$

式中:n_0 为单位体积内处于基态的粒子数,n_i 为单位体积内处于第 i 激发态的粒子数,g_i 和 g_0 分别为第 i 激发态和基态的统计权重,E_i 为第 i 激发态的能级能量,k 为 Boltzmann 常数,T 为等离子体温度。

谱线强度公式为:

$$I_{i,m} = n_i A_{i,m} h\nu_{i,m} \tag{2}$$

式中:$A_{i,m}$ 为从第 i 到第 m 能级的跃迁几率,h 为 Planck 常数,$\nu_{i,m}$ 为从第 i 到第 m 能级跃迁时发射光子的频率。将式(1)代入式(2)得:

$$I_{i,m} = n_0 \frac{g_i}{g_0}\exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) A_{i,m} h\nu_{i,m} \tag{3}$$

若测得某元素的 2 条谱线强度分别为 I_1 和 I_2,不考虑自吸收等其他因素,则有:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{g_1}{g_2}\frac{A_1}{A_2}\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\exp\left(-\frac{E_1-E_2}{kT}\right) \tag{4}$$

* **收稿日期**: 2012-09-03; **修回日期**: 2013-03-26
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA8091201)
作者简介: 金 涌(1986—),男,博士研究生。

式中：λ_1 和 λ_2 分别为对应谱线的波长。将式(4)取以 e 为底的对数并整理得等离子体激发温度：

$$T=\frac{E_1-E_2}{k\left(\ln\frac{A_1g_1}{A_2g_2}-\ln\frac{\lambda_1}{\lambda_2}-\ln\frac{I_1}{I_2}\right)} \tag{5}$$

2　实验系统

实验系统如图 1 所示，热化学发射中主要由 PFN 放电模块为等离子体提供能量，通过调整各模块的参数和放电时间，灵活地调整脉冲电流峰值、宽度和输出功率。PFN 电路主要由高密度电容 C、脉冲成形电感 L、触发开关 K 和快恢复硅堆 D 组成，负载电阻值为 R，如图 1 虚线左边所示。光谱测试系统主要由光谱仪和高速数据处理电脑组成，如图 1 虚线右边所示。电爆炸现场与光谱仪采用光纤耦合，经过 iCCD 相机采集的信号通过数据线传送给高速数据处理电脑。

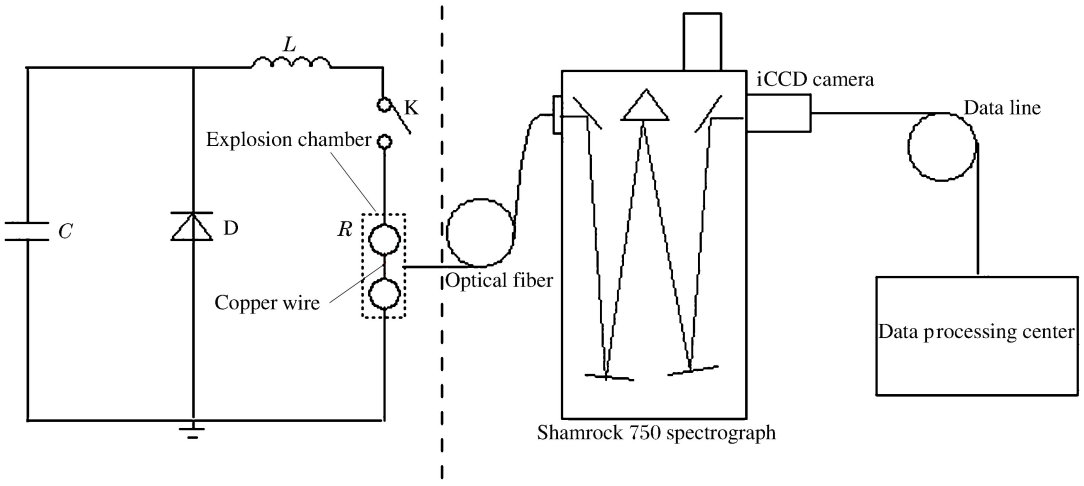


图 1　实验系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental system

3　结果与分析

实验中 PFN 模块的电容为 2.0 mF，电感为 8.0 μH，充电电压为 3.0 kV，对长 100 mm、直径 0.25 mm 的铜丝进行脉冲放电，获得的铜丝电爆炸时的电压和电流如图 2 所示。图 2 中红色和绿色分别为铜丝电爆炸的电压和电流的变化曲线，可以看出，电压瞬时峰值为 2.5 kV，电流峰值为 30 kA，脉宽约为 1.35 ms。铜丝电爆炸时间约为 0.1 ms，因此，等离子体持续的时间约为 1.2 ms。由于电爆炸往往发生在 PFN 放电电流的上升阶段，可以推测通过这种方式所产生的等离子体的温度有一个先上升、后衰减的过程。图 2 中蓝色为触发信号，2 次触发时刻 t_1 和 t_2 的间隔为 1 ms，分别用于测量电爆炸早期和后期的光谱数据。把触发信号控制在电压峰值之后，保证了所测的光谱为等离子体的光谱。由于金属电爆炸过程涉及固态至

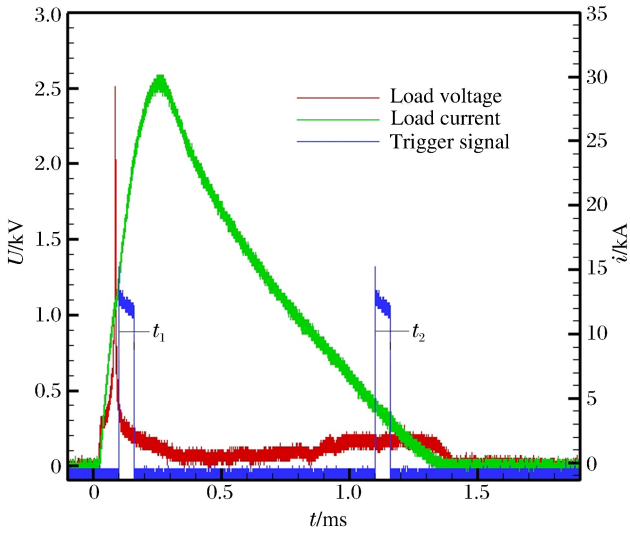


图 2　PFN 放电时负载电压和电流

Fig. 2　Load voltage and current by PFN discharging

等离子体的迅速相变和状态转移,图中电压曲线的峰值时刻为铜丝完全汽化的时刻,之后即由于电离而使电压迅速下降,因此,将电压曲线的峰值点作为是否处于等离子体状态的判断依据。

实验中使用 Shamrock 750 Czerny-Turner 光谱仪和配套的 iCCD 相机。选择的光栅的刻线密度为 1 200 mm^{-1},线色散值为 1.0 nm/mm。测得的 400 ~ 500 nm波段的光谱如图 3 所示。

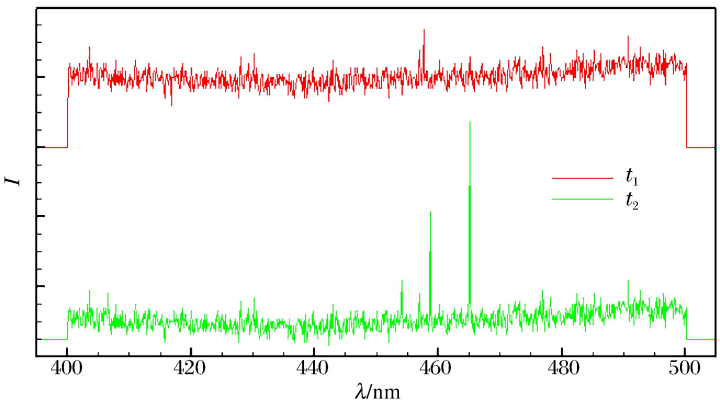


图 3 铜丝电爆炸等离子体光谱

Fig. 3 Plasma spectra by exploding a copper wire

由图 3 可知,等离子体光谱是在连续谱上叠加了一系列分立谱线,连续谱来源于热电子的韧致辐射和电子-离子的复合辐射,在这个波长范围内的分立谱主要用来辨认一次电离铜离子 Cu Ⅰ的谱线。

显然,t_1 时刻为铜丝电爆炸形成等离子体的初始时刻,注入的电能很强,等离子体处在发展上升阶段,铜离子和空气电离成分等各种谱线均很丰富,谱线强度也较高;t_2 时刻 PFN 放电即将结束,等离子体由稳定期即将衰减,杂质粒子温度已经下降,此时 Cu Ⅰ的谱线较明显。因此,重点分析 t_2 时刻等离子体的光谱(见图 4)来获得等离子体稳定时期的激发温度。

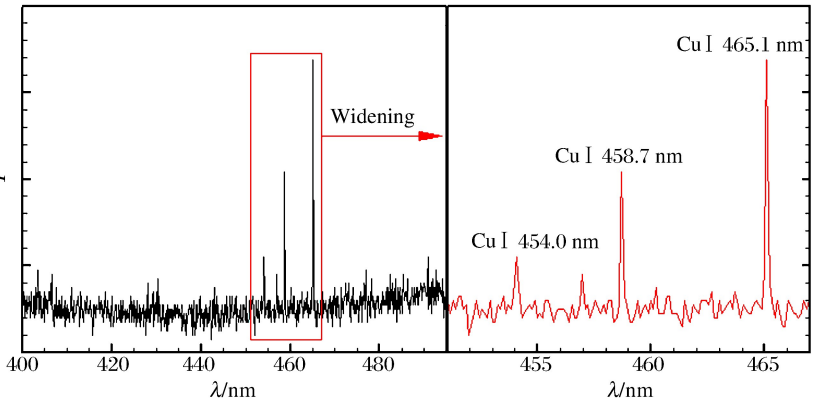


图 4 t_2 时刻的等离子体光谱

Fig. 4 Plasma spectrum at t_2

图 4 中 454.0、458.7 和 465.1 nm 等 3 条谱线很清晰,将表 1 所示的光谱参数[13-15]代入式(5)计算等离子体的激发温度。利用 454.0 nm/458.7 nm、458.7 nm/465.1 nm 和 454.0 nm/465.1 nm 谱线对计算得到的激发温度分别为 5 427.26、5 376.27 和 5 318.65 K,取其平均值得到等离子体的平均激发温度约为 5 374 K。可以看出,采用不同谱线对引起的计算误差约为 1.2%。

表 1 Cu Ⅰ若干谱线的光谱参数[13-15]

Table 1 Parameters of Cu Ⅰ emission lines[13-15]

λ_m/nm	E_m/cm^{-1}	g_m	A_m/(10^{-8} s^{-1})	λ_m/nm	E_m/cm^{-1}	g_m	A_m/(10^{-8} s^{-1})
406.5			0.210	458.7	62 952	6	0.320
450.9			0.275	465.1	62 403	8	0.380
454.0	63 585	4	0.212	470.5	62 403	8	0.055

为了获得铜丝电爆炸等离子体温度的时间演化特性,将时序触发间隔设为 0.1 ms 进行了更多的放电实验,图 5 中给出了 3 次相同放电条件下所测的等离子体温度随时间的变化曲线。由图 5 可以看出,铜丝电爆炸产生的等离子体的温度变化趋势和负载电流波形相似,存在之前所推测的先上升、后下降的变化。在等离子体形成早期,由于环境条件和等离子体本身的状态都在迅速改变,所测得的等离子体的温度变化较大(图 5 中前 0.6 ms);在等离子体稳定期,电弧具有稳定的形态,等离子体的状态较稳定,

所测得的等离子体的温度变化平缓且较集中(图 5 中后 0.4 ms)。由铜丝电爆炸产生的稳态等离子体的激发温度约为 5 400 K，整个脉冲时间内温度差约为 800 K。

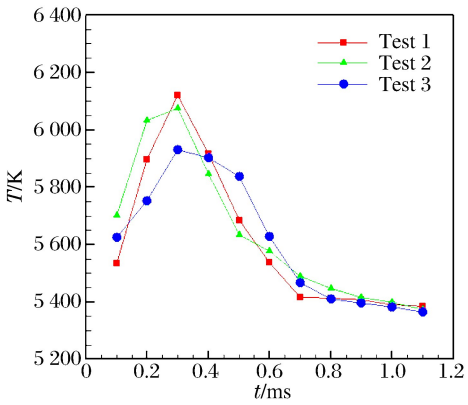


图 5 等离子体温度变化曲线

Fig. 5 Plasma temperature curves

4 结　论

发射光谱分析方法是一种简单有效的获取等离子体内部信息的重要手段。用发射光谱法测量电热等离子体温度，若能正确选择光谱参数，可以获得准确的等离子温度，实验的可信度达 98%～99.5%[16]。

利用 Andor SR750 光谱仪实现了对铜丝电爆炸等离子体光谱的实时数据采集；选取等离子体稳定期内的光谱数据，采用双谱线相对强度法计算得到等离子体的激发温度约为 5 400 K；对脉冲电流放电时间内电爆炸产生等离子体后的光谱数据进行了采集和分析。

结果表明：开始产生等离子体时(前 0.6 ms)，等离子体的激发温度变化较大；在放电后期，等离子体的激发温度变化平缓且较集中(后 0.4 ms)；整个脉冲时间内，等离子体的激发温度差约为 800 K。采用发射光谱法测量等离子体的激发温度可为研究等离子体的内部细节和变化规律提供重要数据。

参考文献：

[1] Dyvik J, Herbig J, Appleton R, et al. Recent activities in electrothermal chemical launcher technologies at BAE systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007,43(1):303-307.

[2] Kim K. Time-dependent one-dimensional modeling of pulsed plasma discharge in a capillary plasma device[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003,31(4):729-735.

[3] Christou C. Temporally resolved visible and UV spectroscopy of exploding wires[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995,31(1):689-691.

[4] 王广海，李国新，焦清介，等. 光谱辐射测量金属薄膜桥电爆炸温度[J]. 含能材料，2009,17(5):616-618.
Wang Guang-hai, Li Guo-xin, Jiao qing-jie, et al. Electrical explosion temperature of metal thin film bridge measured by spectrum radiation method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(5):616-618.

[5] 陈林，周之奎，孙承纬. 电热化学发射中等离子体发生器放电特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击，1997,17(4):375-381.
Chen Lin, Zhou Zhi-kui, Sun Cheng-wei. Experimental studies on discharge characteristics of plasma generator in electrothermal-chemical launchers[J]. Explosion and Shock Waves, 1997,17(4):375-381.

[6] 伍俊英，冯长根，陈朗，等. 金属电爆炸等离子体辐射温度测量[J]. 战术导弹技术，2006,9(5):31-33.
Wu Jun-ying, Feng Chang-gen, Chen Lang, et al. Plasma radiation temperature measurement of metal explosion [J]. Tactical Missile Technology, 2006,9(5):31-33.

[7] 林兆祥，李小银，程学武，等. 激光大气等离子体时间演化特性的光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析，2003,23(3):421-425.
Lin Zhao-xiang, Li Xiao-yin, Cheng Xue-wu, et al. Spectroscopic study on the time evolution behaviors of the laser-induced air plasma[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003,23(3):421-425.

[8] 任庆磊，林麒. 低温等离子体的光谱测量研究[J]. 光谱实验室，2007,24(5):839-843.
Ren Qing-Lei, Lin Qi. Study on spectral measurement of low temperature plasma[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2007,24(5):839-843.

[9] 吴蓉，李燕，朱顺官，等. 等离子体电子温度的发射光谱法诊断[J]. 光谱学与光谱分析，2008,28(4):731-735.
Wu Rong, Li Yan, Zhu Shun-guan, et al. Emission spectroscopy diagnostics of plasma electron temperature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(4):731-735.

[10] 王中辉，蒋力培，齐铂金，等. 发展中的电弧等离子体温度场诊断技术[J]. 材料科学与工艺，2007,15(5):654-657.

Wang Zhong-hui, Jiang Li-pei, Qi Bo-jin, et al. Developing diagnostics of the arc plasma temperature field[J]. Materials Science & Technology, 2007,15(5):654-657.

[11] 沈华,陈磊,朱日宏,等.等离子体激发和辐射温度瞬态光谱测试方法[J].光学学报,2009,29(8):2216-2220.
Shen Hua, Chen Lei, Zhu Ri-hong, et al. Spectroscopic diagnostication of transient excitation and radiation temperature of plasma[J]. Acta Optica Sinica, 2009,29(8):2216-2220.

[12] 李倩,徐送宁,宁日波.用发射光谱法测量电弧等离子体的激发温度[J].沈阳理工大学学报,2011,30(1):45-48,89.
Li Qian, Xu Song-ning, Ning Ri-bo. Measurement of the arc plasma excitation temperature by emission spectroscopy method[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2011,30(1):45-48,89.

[13] 苏茂根,陈冠英,张树东,等.空气中激光烧蚀 Cu 产生等离子体发射光谱的研究[J].原子与分子物理学报,2005,22(3):472-477.
Su Mao-gen, Chen Guan-ying, Zhang Shu-dong, et al. The research of laser induced Cu plasma emission spectra in air[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2005,22(3):472-477.

[14] Cho C, Choi Y W, Jiang W. Time-resolved spectroscopic investigation of an exploding Cu wire process for nanosized powder synthesis[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2005,47(6):987-990.

[15] Baudelet M, Willis C C C, Shah L, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy of copper with a 2 μm thulium fiber laser[J]. Optics Express, 2010,18(8):7905-7910.

[16] 孙秀云,周学铁,李燕,等.发射光谱 Boltzmann 法测量毛细管放电产生的电热高密度等离子体温度之误差分析[J].光谱学与光谱分析,2003,23(3):563-565.
Sun Xiu-yun, Zhou Xue-tie, Li Yan, et al. Error analysis of temperature measurement by Boltzmann plot in atomic emission spectroscopy for a high-density plasma produced by electrothermal capillary discharge[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003,23(3):563-565.

Spectral analysis on electrical explosion of copper wire*

Jin Yong, Li Bao-ming

(*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: A pulse forming network (PFN) discharge module and a spectroscopy system were employed to discuss the electrical explosion of copper wire. The plasma emission spectra were obtained in the wavelength range of 400－500 nm by an Andor SR750 spectrograph. Based on the thermodynamic equilibrium theory, the arc plasma excitation temperature was calculated by the relative line intensities. And the variation characteristic of the excitation temperature was discussed. The results show that the steady-state plasma excitation temperature by the exploding copper wire is approximately 5 400 K. The excitation temperature changes obviously in the prophase of the pulse discharge and it is relatively stable at the later stage of the pulse discharge. The excitation temperature difference during the whole pulse time is about 800 K.

Key words: mechanics of explosion; excitation temperature; relative line intensities; copper wire; electrical explosion; arc plasma

* Received 3 September 2012; Revised 26 March 2013
Supported by the National High-tech R&D Program (863 Program) (2012AA8091201)
Corresponding author: Jin Yong, kingdeyu@163.com

(责任编辑 张凌云)