双绞铝丝纳秒电爆炸实验研究^{*}

盛亮1)[†] 李阳1)²) 吴坚²) 袁媛¹) 赵吉祯¹) 张美¹) 彭博栋¹) 黑东炜¹)

(西北核技术研究所,强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室,西安 710024)
2)(西安交通大学,电力设备电气绝缘国家重点实验室,西安 710049)

(2014年3月6日收到;2014年6月6日收到修改稿)

在快前沿放电装置 (约 2 kA, 12 ns) 上对四种绞合波长 ($\lambda_t = 0.37, 0.5, 0.75, 1.0$ mm) 的双绞铝丝开展了 纳秒电爆炸实验研究. 实验结果表明, 特定绞合波长会对能量沉积、膨胀过程、光辐射产生显著影响, 当绞合 波长为 0.5 mm 时, 能量沉积为原子化焓的 3.2 倍, 而其他三种绞合波长能量沉积变化不大, 约为原子化焓的 1.8 倍; 绞合波长为 0.5 mm 时膨胀速度达 3.8×10^3 m/s, 光辐射相对强度也最高, 在膨胀过程中较好地保持 了初始结构, 在 t = 246 ns 时, 形成了密度约为 10^{19} cm⁻³, 直径约为 1.6 mm 的中性原子柱, 并且在表面形成 了波长约为 0.5 mm, 幅值约为 0.3 mm 的周期性结构.

关键词:双绞铝丝,电爆炸,能量沉积,Z箍缩 PACS: 52.80.Qj, 52.59.Qy

DOI: 10.7498/aps.63.205203

1引言

金属丝电爆炸相关研究持续了近一个世纪,第 一个研究高潮在20世纪50年代,以实现受控聚变 研究为目标,试图利用大电流通过金属丝产生高 温、高密度、稳定的等离子体,由于磁流体不稳定性 的影响,这一研究目标始终未能实现;第二个研究 高潮在20世纪90年代,受到圣地亚实验室丝阵负 载Z箍缩实验的鼓舞,在国内脉冲功率装置上开展 了各种材料与构型的丝阵负载Z箍缩实验^[1-3],与 此同时为了研究金属丝阵Z箍缩早期物理过程,开 展了大量的金属单丝电爆炸实验^[4].实验发现,高 密度电爆炸环境,如气体、水、真空泵油等^[5],以及 在金属丝表面镀绝缘膜^[6,7]等都能提高能量沉积; 同时提高电流上升时间也能够提高电压崩溃前的 能量沉积^[8], Sarkisov等^[9]将快电流上升时间与表 面绝缘技术结合起来,在聚酰亚胺表面绝缘的钨 丝快放电实验中实现了高达20倍原子化焓的能量 输入. 另外, 在金属丝阵上制备特定的几何结构能 够影响丝阵Z箍缩最终的X射线功率输出,如Hall 等^[10] 采用8根螺旋波长为3.7 mm, 螺旋角为45° 的 20 μm 铝丝构成的铝丝阵时, 软X 射线峰值功 率明显高于相同丝数的标准丝阵,而与32 根铝丝 阵输出的X光产额相当. Hovt等^[11]在Cobra装 置上采用双绞合线结构引入大的扰动波长,当扰 动波长为0.75 mm时,比相同质量的标准金属丝阵 K 层辐射峰值功率高了1.5倍,当扰动波长更大或 者更小时,峰值功率都比标准丝阵要低. Harvey-Thompson和Lebedev^[12]提出二级Z箍缩概念,在 上部内爆丝阵中形成一个kA级快放电预脉冲,在 主脉冲到来之前存在百纳秒的膨胀时间,从而在内 爆前形成无先驱等离子体的气态金属负载,实现准 零维内爆. 受这些研究的启发, 本文将快前沿放电 与特定几何结构这两种方式结合起来,研究具有一 定初始几何结构的金属丝在快放电条件下的电爆 炸特性.

* 国家自然科学基金青年基金(批准号: 11105109)和强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基础研究基金(批准号: SKLIPR1208)资助的课题.

†通讯作者. E-mail: shengliang@tsinghua.org.cn

© 2014 中国物理学会 Chinese Physical Society

2 实验装置及诊断系统

本文中的实验在西安交通大学kA级快前沿放 电装置上进行,该装置在双绞丝负载下电流约为 2kA,上升时间约为12 ns.利用双绞这一较易制 备的几何结构,实验中对四种绞合波长的铝金属 丝负载进行了实验,绞合波长(λ_t)分别为0.37, 0.5, 0.75, 1.0 mm,如图1所示.

单根铝丝直径15 μm, 阴阳极间距为2 cm. 不 同绞合波长负载的铝丝长度可以近似用下式来 表示:

$$l = l_0 \sqrt{1 + 4(d/\lambda_{\rm t})^2},\tag{1}$$

式中, l_0 为阴阳极之间距离, d为铝丝直径, λ_t 为绞 合波长, 由于实验中 $d \ll \lambda_t$, 因此由绞合结构引入 的铝丝长度差别 < 1%, 每一小段双绞铝丝可以近 似看作两根紧靠在一起的平行铝丝, 其电感近似为

$$L_{\rm H} \approx \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{4r}{D},$$
 (2)

其中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 为真空磁导率, r = 35 mm, 为回流柱半径; D = 30 μ m, 为负 载等效宽度. 由此计算的负载电感约为34 nH, 放 电回路固有电感 L_0 为26 nH,放电回路总电感L为60 nH.

在电压崩溃前,双绞铝丝负载结构基本不变, 因此能量馈入阶段放电回路电感基本不变,其电压 可以用下式来表示

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) = I(t)R(t) + L\frac{\mathrm{d}I(t)}{\mathrm{d}t}, \quad (3)$$

式中, $U_R(t)$ 为阻性加热电压, 为金属丝中能量沉积 来源; $U_L(t)$ 为感性电压; I(t) 为负载电流; R(t) 为 金属丝电阻, 上述物理量都为随时间变化量.

实验采用脉宽为30 ps,波长为532 nm的 EKSPLA-PL2251C激光器作为探针光发生器,后 端采用4-f成像方式,利用商用EOS600D单反相机 作为图像获取设备.建立了激光干涉、阴影、纹影三 种测量方法获取双绞铝丝电爆炸过程的参数,基于 中性原子和等离子体对激光偏转方向相反的性质, 采用刀口纹影成像方式来定性判断不同时刻的负 载组分;根据(3)式,采用电阻分压器和Rogowski 线圈获得负载的电压(U(t))与电流(I(t)),用于计 算馈入负载的能量及电阻;采用光纤-光电倍增管 探测器用来监测双绞铝丝电爆炸过程光辐射强度. 诊断系统安排如图2所示.





3 实验结果与讨论

3.1 不同绞合波长实验结果比较

双绞铝丝典型的放电电流波形图3(a)所示, 绞合波长 $\lambda_t = 0.5 \text{ mm}$ 时,负载峰值电流为2.3 kA, 比其他绞合结构高约21%,其他三种绞合波长负载 峰值电流都约为1.9 kA,没有明显变化.

由(3)式可以求得负载两端的阻性电压,根据 计算得到的阻性电压和负载电流可以求得双绞铝 丝在放电过程中沉积的能量,如图3(b)所示.



图3 (网刊彩色)不同绞合波长铝丝负载电流波形及放 电过程能量沉积 (a)不同绞合波长铝丝负载电流波形; (b)不同绞合波长铝丝负载能量沉积



当绞合波长 $\lambda_t = 0.5 \text{ mm}$ 时,能量沉积最高,为 10.6 eV/atom, 是铝原子化焓 (3.38 eV/atom) 的 3.2 倍;其他三种绞合波长能量沉积约为6 eV/atom, 为铝原子化焓的1.8倍,与文献[8]中单根铝丝快 放电单原子能量沉积结果(5.8-6.5 eV/atom)相 当. 不同绞合波长在放电过程中的光辐射如图4所 示,光辐射强度与能量沉积结果一致,当绞合波长 $\lambda_{\rm t} = 0.5 \, {\rm mm}$ 时光辐射最强, 光辐射主要由这个过 程中负载表面吸附的气体或杂质及部分铝金属被 加热电离形成等离子体发光产生,因此能量沉积 越大,光辐射越强. 在t = 15 ns时,达到峰值强 度, 在t > 40 ns时, 光辐射趋于稳定. 图 5(a)—(d) 为不同绞合波长的双绞铝丝激光阴影图像,在较 长波长情况下, 如 $\lambda_t = 0.75 \text{ mm} \, \pi \lambda_t = 1.0 \text{ mm}$, 金属丝的膨胀速度较慢,且初始绞合波长在膨胀 过程中保持的也较差,而小绞合波长情况下膨胀 明显,并且在膨胀过程中很好地保持了初始设定 的绞合波长,由图5(a)—(d)获得的 $\lambda_t = 0.37$ mm $和 \lambda_t = 0.50 \, \text{mm} \, \chi \phi 铝丝直径变化如图 6 所示.$ 当绞合波长 $\lambda_t = 0.50 \text{ mm}$ 时,其膨胀速度约为 3.8×10^3 m/s, 当 $\lambda_t = 0.37$ mm时, 其膨胀速度为 0.6×10³ m/s. 实验中的纹影成像系统采用刀口 成像方式,由于中性原子和等离子体对激光偏折 的方向相反, $\lambda_t = 0.50 \text{ mm}$ 时, t = 246 ns时的在 等离子体一侧未观察到明显纹影图像,如图5(e) 所示,说明此时主要以中性粒子为主,其密度约为 10¹⁹ cm⁻³,约为固体密度的1/6000,中性粒子柱表 面周期结构波长为0.5 mm, 与初始设定绞合波长 相一致,幅值约为0.3 mm.在不改变放电装置的情 况下,通过在金属丝上制作特定的结构,能够进一 步提高金属丝中的能量沉积,从而对其随后的膨胀 过程产生显著的影响. 在本文实验中的最优波长 与文献[11]在Cobra装置上的结果不同,可以推断 采用双绞合这种方式制作的微结构对能量沉积的 影响与装置参数具有较强的依赖关系,不具备一般 性. 并且不同的绞合波长在膨胀过程中的保持能力 也不同,要将这种具有双绞结构的丝阵负载直接应 用于大电流放电装置上,需要结合实验装置驱动电 流进行细致的实验研究.

3.2 单发实验时间关联结果分析

绞合波长为 $\lambda_t = 0.50 \text{ mm}$ 电流、阻性电压、光 辐射以及由计算得到的能量沉积、电阻的时间关联 如图7所示.

205203-3







图 6 (网刊彩色) $\lambda_t = 0.37 \text{ mm} \ \pi \lambda_t = 0.50 \text{ mm} \ \chi_{00}$ 铝丝直径随时间变化

从图7可以看出,在整个放电过程都未发生 电压崩溃,这说明在这种实验条件下,表明形成 的等离子体通道不足以使电阻快速下降导致电压 的崩溃.因此双绞铝丝整个阻性加热阶段历经整

个放电电流周期,这是与通常的单丝放电实验不 同之处. 根据电流电压之间的时间关系可知, 在 $t < 8.8 \, \text{ns}$ 时,以感性电压为主,有效阻性加热阶 段在t > 8.8 ns 后开始, 随着 dI/dt 的减小, 阻性电 压分量快速上升, 在t = 14.4 ns 达到峰值, 滞后于 电流峰值2.8 ns,此时能量沉积约为总能量沉积的 60%. 尽管此后电阻仍在变大, 但由于放电电流的 减小,阻性电压也在降低,在加热结束附近,电阻升 至42 Ω , 光辐射在 t = 16 ns 时达到峰值, 此时能量 沉积约为总能量沉积的90%. 采用光纤-光电倍增 管系统为高灵敏探测系统,而在实验中监测信号很 弱,由于光辐射主要来自与电离辐射,尽管未对该 测量系统进行定量标定,仍可定性判断实验过程中 的电离辐射强度不高. 这与整个过程都没有观察到 因为等离子体的形成而导致电压崩溃的现象是一 致的.



图 7 (网刊彩色) 双绞铝丝放电电流、电压、能量沉积、光 辐射、电阻时间关联 (96 炮)

4 结 论

实验研究发现, 绞合波长 $\lambda_t = 0.50 \text{ mm}$ 的双 绞铝丝在kA级纳秒放电中的能量沉积、发光强度、 膨胀速度等明显大于所研究的其他三种绞合波长 的实验结果. 这说明通过制作恰当的结构, 有可能 在不改变实验装置的条件下进一步增强金属丝中 的能量沉积, 在快前沿放电条件下, 初始结构在膨 胀过程中也能够得到较好的保持.

这项技术为大电流放电装置提供了一种较好 的负载状态控制方法,合适地控制膨胀时间能够获 得不同密度的中性金属原子负载;准周期性的初始 结构为磁流体不稳定性的发展提供了可控的初始 条件,通过恰当的负载设计,有可能对X射线的产 额与波形产生影响.我们将在以后的工作中逐步开 展相关研究.

参考文献

- Ding N, Zhang Y, Ning C, Shu X J, Xiao D L 2008 Acta Phys. Sin. 57 3027 (in Chinese) [丁宁, 张扬, 宁成, 束小 建, 肖德龙 2008 物理学报 57 3027]
- [2] Sheng L, Wang L P, Wu J, Li Y, Peng B D, Zhang M 2011 Chin. Phys. B 20 055202
- [3] Sheng L, Qiu M T, Hei D W, Qiu A C, Cong P T, Wang L P, Wei F L 2011 Acta Phys. Sin 60 055205 (in Chinese) [盛亮, 邱孟通, 黑东炜, 邱爱慈, 丛培天, 王亮平, 魏福 利 2011 物理学报 60 055205]
- [4] Hammer D A, Sinars D B 2001 Laser and Particle Beams 19 377
- [5] Pikuz S A, Shelkovenko T A, Mingaleev A R, Hammer D A, Neves H P 1999 Phys. Plasmas 6 4272
- [6] Stephens J, Neuber A, Kristiansen M 2012 Phys. Plasmas 19 032702
- [7] Sheng L, Li Y, Yuan Y, Peng B D, Li M, Zhang M, Zhao J Z, Wei F L, Wang L P, Hei D W, Qiu A C 2014 Acta Phys. Sin. 63 055201 (in Chinese) [盛亮, 李阳, 袁媛, 彭 博栋, 李沫, 张美, 赵吉祯, 魏福利, 王亮平, 黑东炜, 邱爱慈 2014 物理学报 63 055201]
- [8] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Cochrane K R, Struve K W, Deeney C, McDaniel D H 2005 Phys. Rev. E 71 046404
- [9] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Struve K W 2008 Phys. Rev. E 77 056406
- [10] Hall G N, Chittenden J P, Bland S N, Lebedev S V, Bott S C, Jennings C, Palmer J B A, Suzuki-Vidal F 2008 Phys. Rev. Lett. 100 065003
- [11] Hoyt C L, Knapp P F, Pikuz S A, Shelkovenko T A, Cahill A D 2012 Appl. Phys. Lett. 100 244106
- [12] Harvey-Thompson A J, Lebedev S V, Burdiak G, Wiasman E M, Hall G N, Suzuki-Vidal F, Bland S N, Chittenden J P, De-Grouchy P, Khoory E, Pickworth L, Skidmore J, Swadling G 2011 Phys. Rev. Lett. 106 205002

Nanosecond electrical explosion of twisted aluminum wires^{*}

Sheng Liang^{1)†} Li Yang¹⁾²⁾ Wu Jian²⁾ Yuan Yuan¹⁾ Zhao Ji-Zhen¹⁾ Zhang Mei¹⁾ Peng Bo-Dong¹⁾ Hei Dong-Wei¹⁾

1) (State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

2) (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)
(Received 6 March 2014; revised manuscript received 6 June 2014)

Abstract

The experiments on nanosecond electrical explosion of twisted aluminum wires with different wavelengths ($\lambda_t = 0.37$, 0.5, 0.75, 1.0 mm) are carried out. The experimental results indicate that a specific wavelength can strongly affect the energy deposition, expansion velocity, and radiation intensity. The energy deposition is about 3.3 times the atomic enthalpy of aluminum when the twisted wavelength is 0.5 mm. While for the other three twisted wavelengths, the energy depositions are all about 1.8 times the atomic enthalpy. The expansion velocity is about $3.8 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for the wavelength 0.5 mm, and the optical radiation intensity is also strongest for this wavelength. The initial twisted structure is strongly imprinted in the freely expanding aluminum column after the electrical explosion. In the experiments for the wavelength 0.5 mm, a neural particle column with a diameter of 1.6 mm is formed and its density is about 10^{19} cm^{-3} at t = 246 ns. A periodic structure with the wavelength 0.5 mm and the amplitude 0.3 mm is observed on the surface of this column.

Keywords: twisted aluminum wires, electrical explosion, energy deposition, Z pinch PACS: 52.80.Qj, 52.59.Qy DOI: 10.7498/aps.63.205203

^{*} Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11105109) and the Basic Research Foundation of State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, China (Grant No. SKLIPR1208).

 $[\]dagger$ Corresponding author. E-mail: shengliang@tsinghua.org.cn