

文章编号:1006-9941(2023)06-0577-12

非晶合金新型换能元材料性能初探

宁爵勇^{1,2}, 简昊天^{1,2}, 朱正旺³, 郑国强⁴, 李鸿高⁴, 朱朋^{1,2}, 沈瑞琪^{1,2}

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 微纳含能器件工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210094; 3. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 4. 中国电子科技集团公司第四十三研究所, 微系统安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要: 为论证非晶合金作为新型换能元的可行性, 设计制作了桥丝式非晶合金换能元, 采用DSC热分析方法研究构成组分对非晶合金材料释能效果的影响, 通过实验探究了非晶合金桥丝换能元在恒定电流激发下的电热温度响应、电阻温度系数变化以及电容放电激发的电爆特性。结果表明, 非晶合金是一种亚稳态的含能材料, 在晶化过程中释放能量。桥丝式非晶合金换能元具有电阻负温特性, 电阻相对变化率为6.38%, 电热换能功率可提高17.5%, 与电阻-温度线性变化的镍-铬桥丝换能元相比, 表现出更优良的释能效果。研究初步论证了非晶合金作为新型换能元材料的可行性, 为电火工品换能增效技术发展提供了新方案。

关键词: 非晶合金; 换能元; 热分析; 晶化; 温度系数; 电爆

中图分类号: TJ5; TJ450

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2023050

0 引言

火工品是武器系统的始发能源, 能够实现对外界输入能量形式的转化, 以达到点火、起爆、做功等效能^[1]。换能元是火工品中实现能量引发、能量转换的核心部件, 也是实现火工换能器件低能发火和高能量转换效率的关键。随着火工品微型化和集成化的发展, 传统火工品的输出能量受到其材料等方面的限制, 激发条件越发苛刻。此外, 在电刺激下换能元作用速度快, 火工品存在作用可靠性问题^[2]。因此, 探索新的材料和工艺来研发新型火工品以提高其安全性和可靠性是当前火工品发展的重要方向之一。

目前, 换能元常使用镍-铬^[3-4]、多晶硅^[5]、金属薄膜^[6-7]等材料实现火工品的电热换能作用。镍-铬合金作为一种最常用的换能元材料, 其作用机制是通过外

部提供的电能产生焦耳热效应来激发含能材料。多晶硅是用于半导体桥火工品 (Semiconductor Bridge, SCB) 中的一种换能材料, 具有负电阻温度系数特性, 在一定温度下, 电阻随温度升高而下降, 电流急剧增大, 有助于增大火工品的输出功率, 提高其瞬发性和安全性。半导体桥火工品包含多晶硅半导体桥^[8]、单层/多层金属复合半导体桥^[9-10]、含能复合半导体桥^[11-12]等多种类型。其中, 含能复合半导体桥 (Energetic Semiconductor Bridge, ESCB) 集成了含能薄膜与半导体桥, 通过含能薄膜的反应热或晶格热, 改善了半导体桥作用可靠性, 提高了其点火能力。朱朋等^[13]采用磁控溅射的方法将纳米级 Al/Ni 薄膜沉积到 SCB 桥区上, 制备了含能复合半导体桥, 结果表明, 在电容放电 35 V/47 uF 的条件下, Al/Ni-SCB 能够可靠发火, 火焰强度明显增加, 提高了换能元的输出能量。近年来研究者在推动火工品换能增效技术发展的过程中, 还探索了许多新型的换能元材料, 包括碳膜换能元^[14]、银膜换能元^[15]、氮化钽换能元^[16]和含能金属有机骨架 (Metal-Organic Frameworks, MOFs)^[17]等。通过持续探索新型换能元材料能从根本上有效提升火工品的能量转换效率, 推动高安全和低能发火技术的发展。

非晶合金是一类采用冶金快速凝固技术和熵调控

收稿日期: 2023-03-11; 修回日期: 2023-04-17

网络出版日期: 2023-06-06

基金项目: 安徽省微系统重点实验室基金 (2ZQT2324018)

作者简介: 宁爵勇 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事火工品和微流控制备含能材料研究。e-mail: ningjy@njjust.edu.cn

通信联系人: 朱朋 (1978-), 男, 研究员, 主要从事爆炸箔点火与起爆微系统、微流控芯片和微化学反应系统等研究。

e-mail: zhupeng@njjust.edu.cn

引用本文: 宁爵勇, 简昊天, 朱正旺, 等. 非晶合金新型换能元材料性能初探[J]. 含能材料, 2023, 31(6):577-588.

NING Jue-yong, JIAN Hao-tian, ZHU Zheng-wang, et al. A Preliminary Research on the Properties of Amorphous Alloy as New Microheater Material of Initiator [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(6):577-588.

理念来抑制合金熔体原子的结晶, 保持和调控熔体无序结构特征而得到的新型金属材料^[18]。非晶合金的主要特点是组成成分无序和原子结构长程无序, 不存在晶界与堆垛层错等缺陷。目前还没有关于将非晶合金作为火工换能元材料的相关报道, 但已有研究表明非晶合金可作为一种高能材料被应用^[19]。中科院物理研究所发明了一种高含能非晶合金材料的制备方法, 材料燃烧热值可达 $10\sim 25\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, 并指明该高含能非晶合金可在炸药、烟火剂和固体推进剂中有所应用^[20]。胡祥等^[21]研究了铁基非晶合金带的燃烧机制, 发现非晶合金 $(\text{Fe}_{0.72}\text{B}_{0.24}\text{Nb}_{0.04})_{95.5}\text{Y}_{4.5}$ 有异常放热现象, 且由于快速结晶放热过程的催化作用而具有低点火温度和自传播燃烧行为。非晶合金作为一种新型功能材料还被广泛应用于多个领域, 具有强大的功能可塑性和应用潜力。

为此, 本研究结合非晶合金的材料属性, 创新性地提出将非晶合金作为一种新型火工换能元材料, 并制备了桥丝式非晶合金换能元。通过热分析测试、恒定电流激励下的电热效应和电容放电激励下的电爆特性等方面的研究, 总结了桥丝式非晶合金换能元的能量特性和在电激发下的能量转换规律, 初步论证非晶合金在火工换能元材料领域应用的可行性。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

原料: 金属原料 (Ni、Fe、Mo、V、Co、Cu、Ti、Zr, 纯度 99.9%, 中国科学院沈阳金属研究所) 和非金属原料 (B、P、Si, 纯度 99.99%, 上海迈瑞尔生化科技有限公司)。

仪器: 精密天平, 德国赛多利斯公司 BS223; 电弧熔炼炉, 德国埃德蒙·布勒公司 AM/0.5; 差示扫描量热仪 (DSC), 德国耐驰公司 204F1 Phoenix; X 射线衍射 (XRD) 仪, 德国布鲁克公司 D8-advanced; 示波器, 美国特励达力科公司 104 Xi-A; 红外热像仪, 上海热像科技股份有限公司 Fotric 226S-L28; 储能放电起爆仪, 南京理工大学自研 ALG-CN1; 电容器, 中国振华(集团)新云电子元器件有限责任公司 $47\ \mu\text{F}$ 固体钽电容; 光电探测器, 索雷博光电科技(上海)有限公司 DET02AFC; 高速摄影机, 美国阿美特克公司 Phantom HG-100 K。

1.2 非晶合金点火桥丝制备

非晶态材料可制备成膜、丝、薄带等形态, 研究以

丝状非晶合金为研究对象, 基于非晶态快速淬冷原理制备出非晶合金丝样^[18]。制备过程主要分为 3 个阶段: 原料准备、熔炼合金锭、重熔甩带。

首先, 依据表 1 各样品组分元素进行原料准备, 利用钢刷或酸洗去除纯金属原料表面的氧化层, 再按组成合金的原子比例称取一定质量的各组元纯金属, 每种样品原料质量总计 10 g。熔炼合金锭阶段将各纯金属混置于铜坩锅中, 抽真空后充入高纯氩气, 熔炼。熔炼过程中辅助以翻转和电磁搅拌, 保证合金锭的化学成分均匀, 待合金各组分完全熔融混合后再冷却凝固成型。重熔甩带是将制备好的合金锭高温重新熔融, 再快速冷却制备成非晶态合金, 重熔甩带制备装置如图 1 所示^[22]。采用电磁感应重熔的加热方法, 将小块合金置于底部带有小孔的石英管中, 调整好石英管与铜轮的距离后抽真空, 在真空条件下通电感应熔化

表 1 非晶合金编号及成分

Table 1 Amorphous alloy number and composition

samples	compound
1 [#]	$\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{B}_{20}$
2 [#]	$(\text{Ni}_3\text{Fe})_{77.5}\text{Mo}_{2.5}\text{B}_{20}$
3 [#]	$(\text{Ni}_3\text{Fe})_{79.8}\text{V}_{0.2}\text{B}_{20}$
4 [#]	$\text{Co}_{60}\text{Fe}_{20}\text{B}_{20}$
5 [#]	$\text{Ni}_{38}\text{Fe}_{38}\text{B}_{19}\text{P}_5$
6 [#]	$(\text{NiFeCo})_{83}\text{B}_{17}$
7 [#]	$\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{30}$
8 [#]	$\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{40}\text{Si}_{10}\text{B}_{10}$

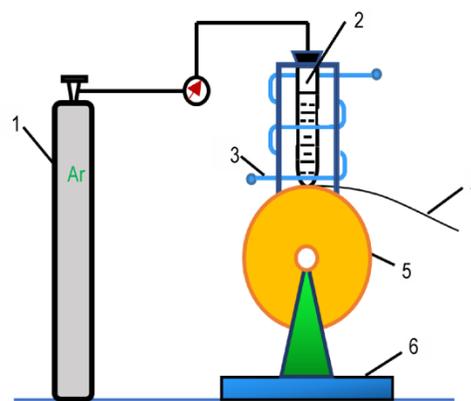
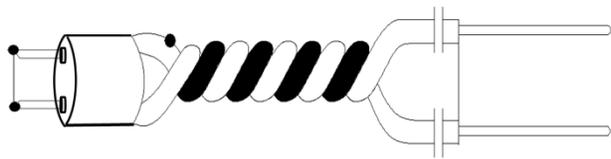


图 1 非晶合金丝真空感应熔炼及单辊甩带装置示意图
1—氩气瓶, 2—石英管, 3—感应线圈, 4—非晶合金丝, 5—铜辊, 6—支座

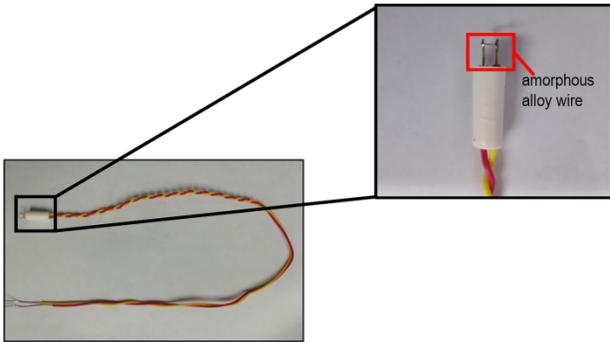
Fig. 1 Schematic diagram of vacuum induction melting and single-roller belt-dumping device for amorphous alloy wire
1—argon cylinder, 2—quartz tube, 3—induction loop, 4—amorphous alloy wire, 5—copper roller, 6—pedestal

母合金,打开铜辊控制开关,向石英管中充入氩气,熔体喷出与高速旋转的铜轮接触,急速冷却,被甩出而形成丝状非晶合金。

点火桥丝的焊接采用锡焊的方法,将非晶合金丝1#~8#焊接在脚线两端,得到焊接后的非晶合金点火桥丝为ABW-1#~ABW-8#,示意图和实物图如图2所示。



a. schematic diagram of amorphous alloy bridge wire



b. photograph of amorphous alloy bridge wire

图2 非晶合金点火桥丝示意图与实物图

Fig.2 Schematic and photograph of amorphous alloy bridge wire

1.3 材料分析测试

热分析测试:升温速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,升温区间 $30\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,封闭式铝坩埚,氩气气氛,气体流量为 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

X射线衍射:扫描范围设置为 $5^{\circ}\sim 80^{\circ}$,扫描速度 0.1 s/step ,步长为 0.0504° ,Cu靶辐射,工作电压和工作电流分别为 40 kV 和 40 mA 。

1.4 电性能测试

非晶合金的电热效应测试:非晶合金桥丝和Ni-Cr桥丝的平均直径 $\Phi=0.15\text{ mm}$,平均长度 $l=3.16\text{ mm}$ 。选择 $0.9, 1.9\text{ A}$ 2种恒定电流激励条件,示波器记录1#、2#、3#样品和Ni-Cr桥丝参照样两端的电压和回路中的电流变化,红外热像仪实时记录表面红外辐射能量密度分布,红外相机的帧率 25 fps ,温度测量范围 $0\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

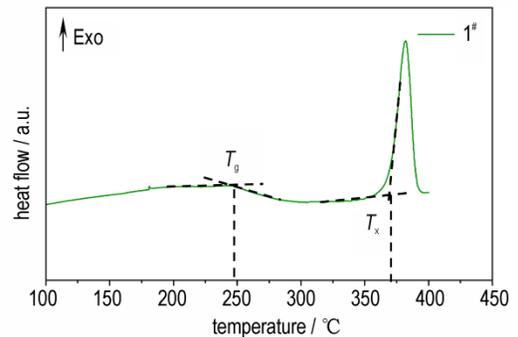
电阻温度系数研究实验:控制电流输出量,改变桥丝温度,以 0.1 A 为电流初始值,步长 0.1 A ,每间隔 60 s 增大电流, 60 s 末记录桥丝温度值,由示波器记录的电压电流计算电阻,研究电阻随温度的变化。

非晶合金电爆特性实验:采用电容放电激发,放电电压为 $70, 80\text{ V}$ 和 90 V ,每种电压测试3次,电爆起始时间、起始发火能量、电容作用于样品的作用总时间和作用总能量的数据结果取平均值。高速相机记录电爆过程,帧率为 50000 fps ,曝光时间 $15\text{ }\mu\text{s}$ 。

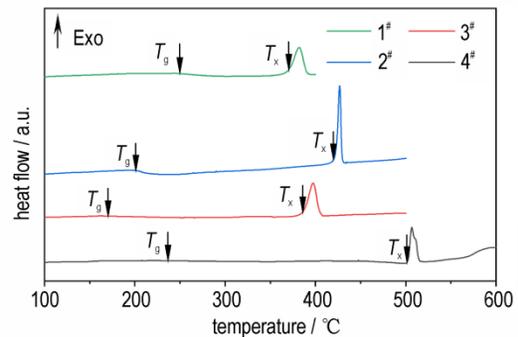
2 结果与讨论

2.1 DSC热分析测试

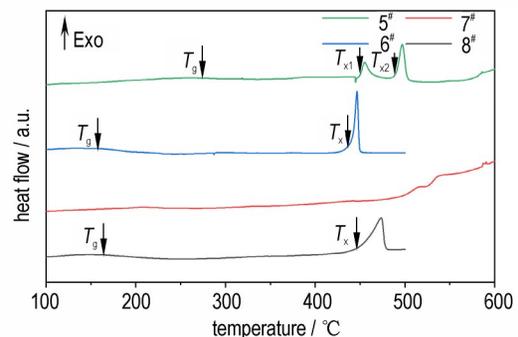
为研究非晶合金热力学性能,对8种非晶合金样品(1#~8#)进行了DSC测试,结果如图3所示。测试中发现在常温~ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间内非晶合金无明显热效



a. DSC curves of samples 1#



b. DSC curves of samples 1#-4#



c. DSC curves of samples 5#-8#

图3 不同非晶合金样品DSC曲线

Fig.3 DSC curves of different amorphous alloy samples

应,因此图3所示温度范围仅显示为100~600℃。根据国际热分析联合会(ICTA)规定的标准切线法^[23],定义吸热玻璃化转变前后曲线的切线交点温度为玻璃化转变温度 T_g ,晶化放热转变开始前后切线交点温度为晶化起始温度 T_x (图3a)。

图3中温度点 T_g 处表现为吸热, T_x 表现为放热,释放出焓变能量。由图3b和3c可以看出,7#非晶合金样品无晶化放热峰,未测量到其晶化起始温度点 T_x ,其余样品(1#~6#,8#)均有温度点 T_g 和 T_x 。分析认为这可能是由于非晶合金7#样品的晶化起始温度过高,测试无法达到,故未出现放热。此外,由图3c还可以看到,5#样品有2个放热峰,说明样品的晶化过程分2个阶段进行。

依据 T_g 和 T_x 温度点以及不同的阶段热效应特征,非晶合金的DSC曲线可分为3个阶段: $T < T_g$, β 结构弛豫阶段; $T_g < T < T_x$,过冷液相阶段; $T > T_x$,晶化反应阶段。 $T < T_g$ 阶段无明显热效应,但在外界温度触发下,某些区域的结构会发生细微的变化,被称为 β 结构弛豫^[24]。过冷液相阶段为 $T_g \sim T_x$ 阶段,此时非晶合金在温度点 T_g 开始发生吸热玻璃化转变,比同组分同温度下的晶态物质体积(V)和焓(H)大,成为过冷态。过冷态的温度区间称为过冷液相区,过冷液相区宽度($\Delta T_x = T_x - T_g$),是衡量非晶态合金热稳定性的指标之一^[25]。晶化反应阶段,非晶合金在温度点 T_x 处释放出焓变能量,有明显的放热释能。

ΔT_x 越大,过冷液相存在的温度区间越大,在 T_g 以上很宽温度范围内非晶态越不易发生晶化,玻璃态的稳定性越高。表2列出不同非晶合金样品(1#~8#)的 T_g 、 T_x 和 ΔT_x 。由表2可以看出,8#样品晶化起始温度 T_x 高(446.9℃),过冷液相区宽度 ΔT_x (283.6℃)最大,玻璃态稳定性最高,而1#的过冷液相区宽度 ΔT_x 最小,

表2 不同非晶合金的热性能参数

Table 2 DSC results of different amorphous alloy samples

samples	$T_g / ^\circ\text{C}$	$T_x / ^\circ\text{C}$	$\Delta T_x / ^\circ\text{C}$	$Q / \text{J}\cdot\text{g}^{-1}$
1#	249.2	370.2	121.0	112.3
2#	200.7	422.1	221.4	100.4
3#	170.8	385.8	215.0	116.4
4#	236.5	502.2	265.7	78.41
5#	274.5	449.8	175.3	80.52
6#	158.1	438.8	280.7	67.52
8#	163.3	446.9	283.6	95.66

Note: T_g is glass transition temperature. T_x is crystallization temperature. ΔT_x is the supercooled liquid region. Q is the heat release during crystallization.

稳定性差。

DSC曲线中放热峰面积与相变或化学反应中的放热量呈正比。据此,研究采用热分析软件NETZSCH Proteus^[26]通过放热峰面积计算了每个晶化放热峰的放热量,其中5#样品的2个放热峰合并计算,7#不计入,计算结果见表2。由表2可以看出,非晶合金1#~3#样品的放热量 Q 均大于 $100 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$,三者具有较强的晶化放热能力,放热量大小依次为 $3\# > 1\# > 2\#$ 。因此,在后续非晶合金电热电爆性能测试中优选1#、2#和3#非晶合金样品进行研究。

外界能量驱动下非晶材料自身能量状态降低是非平衡态材料的本征特征^[27]。由表2可看出1#、2#、3#样品不仅具有较高的晶化放热能力,且具有较小的过冷液相区宽度值 ΔT_x (5#样品两步晶化过程除外),说明非晶的不稳定的状态是由体系的高焓值所决定的,热焓值高,晶化放热能力强,体系越不稳定。受到外界刺激,不稳定非晶体系释放出的能量越多。因此,非晶合金如作为一种换能元材料,应选择过冷液相区宽度小、晶化放热量多的类型。

2.2 恒流激励下的电热性能研究

为了解非晶合金的电热换能,对1#、2#、3#非晶合金制备的桥丝在0.9 A恒定小电流下电热温度和1.9 A恒定大电流下的电参量进行了研究,并Ni-Cr桥丝为参照对象,结果图4所示。在其中,所在空间场的温度数值为所记录到的最高平衡温度。

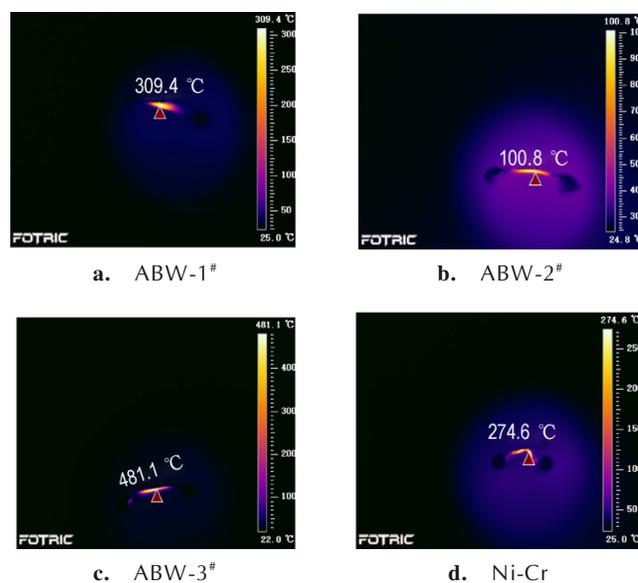


图4 0.9 A恒流下3种非晶合金丝与Ni-Cr桥丝的红外记录图
Fig. 4 Infrared diagram of 3 kind of amorphous alloy wire and Ni-Cr bridge wire at 0.9 A

图4可以看出,不同桥丝的平衡温度依次为: $T_{ABW-3\#} > T_{ABW-1\#} > T_{Ni-Cr} > T_{ABW-2\#}$,由焦耳热效应,在相同的通电电流和时间条件下,产热量大小与电阻值成正比(忽略温度变化对电阻大小的影响),测得各桥丝的初始电阻值分别为: $R_{ABW-1\#} = 0.606 \Omega$ 、 $R_{ABW-2\#} = 0.346 \Omega$ 、 $R_{ABW-3\#} = 0.699 \Omega$ 、 $R_{Ni-Cr} = 0.671 \Omega$ ($R_{ABW-3\#} > R_{Ni-Cr} > R_{ABW-1\#} > R_{ABW-2\#}$)。可见与最高平衡温度大小顺序不完全相同,差异在于Ni-Cr桥丝电阻大于ABW-1#,但平衡温度较小。表明除电阻外,桥丝的热容也可能影响了最终的平衡温度。

进一步分析平衡温度受材料热容的影响,建立桥丝恒流电热升温公式,假设桥丝在快速通以电流 I 时,桥温上升时间将比冷却时间短,此时忽略热损失(即假设电热输入能量只用于加热桥丝),根据能量守恒定律^[28]:

$$C_p \frac{dT}{dt} = I^2 R_0 (1 + \alpha T) \quad (1)$$

式中, C_p 为热容, $J \cdot K^{-1}$; R_0 为桥丝常温下的电阻, Ω ; α 为材料温度系数, K^{-1} ; T 为桥丝温度, K 。

将式(2)分离变量再积分,得到桥丝温度 T 和时间 t 的关系,当电流大小恒定时,桥丝温度 T 是时间 t 的函数 $T=f(t)$,从函数中分离出热容 C_p 得到公式:

$$C_p = I^2 R_0 \alpha t + \frac{I^2 R_0 t}{T} \quad (2)$$

由文献中非晶合金的物性参数^[29],可知ABW-1#桥丝的温度系数 $\alpha_1 = 3.0 \times 10^{-4} K^{-1}$ 。Ni-Cr桥丝(80/20)温度数 $\alpha_2 = 1.5 \times 10^{-4} J \cdot K^{-1}$,平衡温度时的时间 $t = 100 s$,由式(3)计算得到2个桥丝的热容: $C_p(ABW-1\#) = 0.101 J \cdot K^{-1}$, $C_p(Ni-Cr) = 0.211 J \cdot K^{-1}$,可见,ABW-1#的热容比Ni-Cr桥丝的小,解释了Ni-Cr桥丝电阻较大但平衡温度小的原因。

进一步对ABW-2#桥丝施加更大的恒定电流1.9 A,桥丝经历升温-熔融-汽化,在通电后的0.018~0.120 s内均受热熔断,熔断过程变化示意如图5。由于输入能量并不足以使其产生等离子体,故迅速断路。由图5a和图5b可以看出ABW-2#桥丝发生熔断前,中心区域温度最高。在持续通电过程中,温度不断升高,120 ms时刻(图5c)该桥丝中心点处亮度下降,说明达到非晶合金熔点后桥丝从温度最高的中心处断开。桥丝熔化断开后回路中即不再有导通电流,全域视场内亮度明显变暗,只在桥丝断口处仍有余温(图5d)。

研究作出图6的 $U-I-R$ 曲线,以分析在恒流1.9 A作用下的电参量变化。由图6可以看出,在桥丝开始

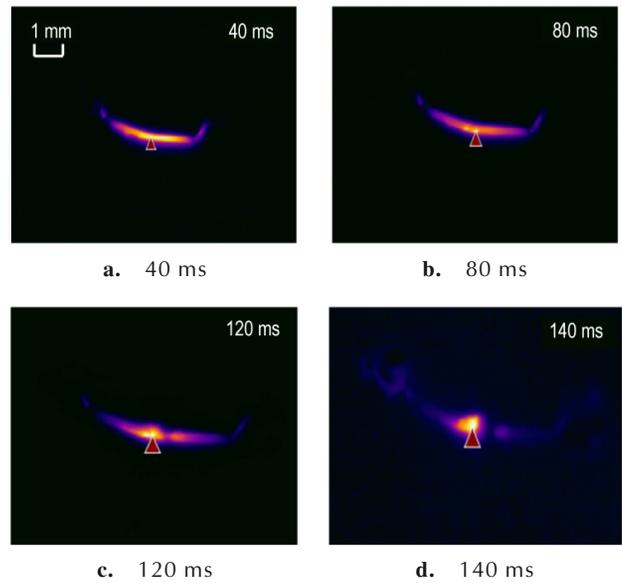


图5 ABW-2#在1.9 A条件下的熔断过程红外记录图

Fig.5 Infrared diagram of ABW-2# bridge wire under 1.9A

通电至熔断的全过程中,电阻先由大变小,在某一时刻有最小值,然后再缓慢上升,最后变为无穷大。进一步发现,3种非晶合金桥丝在电压和电流初始上升沿中均有一明显的突变尖峰,而Ni-Cr桥丝的电压电流为平稳变化。分析其原因为非晶合金在电热过程中的内部结构改变引起的电参量变化,由于电阻是材料结构变化的敏感量,材料电阻的变化很容易通过电压电流变化显现出来。如图6a~6c所示,非晶合金在电压电流曲线的突变点,对应电阻的最小值。分析其机理认为处于亚稳态的非晶合金,在通电受热后,由于原子振动作用加剧,失去不稳定的非晶无序结构,逐渐转变为稳定有序的晶态结构。电阻率由相应非晶态下的结构无序散射机制变为有序晶格散射机制,电阻率下降,电流导通性瞬间增大。由于是否发生由非晶态到晶态的转变取决于温度的高低,因此在初始电流快速增大的迅速升温过程中,结构转变过程很快,在电流电压曲线显示出变化尖锐峰。

以ABW-1#样品为例,采用XRD研究了非晶合金在恒流电加热刺激后的晶化转变行为。取ABW-1#中的非晶合金桥丝,得出其电激励前后的XRD,如图7所示。经电流加载后,图7a中在 $2\theta = 20.0^\circ$ 左右的非晶弥散漫射特征峰消失,取而代之的是在图7b中 $2\theta = 43.97^\circ, 44.58^\circ, 51.26^\circ$ 等处出现了许多强晶体衍射峰,表明合金已由原本的非晶态向晶态发生了转变,生成了晶态产物。将ABW-1#晶化样XRD谱图与标准谱图库中的物质进行比对,发现与 $Fe_x Ni_{23-x} B_6$ ($x=1\sim 22$)

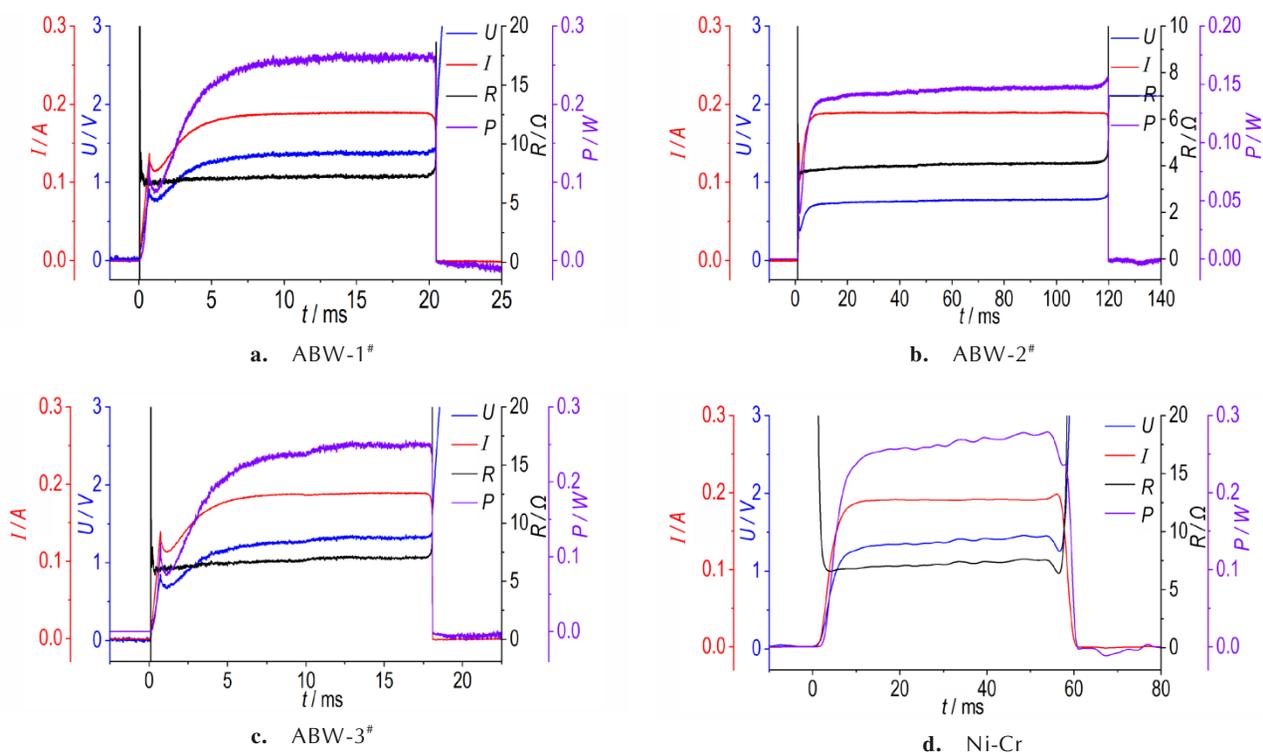


图6 1.9 A电流激励下不同非晶合金丝和Ni-Cr桥丝的 $U-I-R$ 曲线

Fig.6 $U-I-R$ curves of different amorphous alloy wire and Ni-Cr bridge wire under 1.9 A

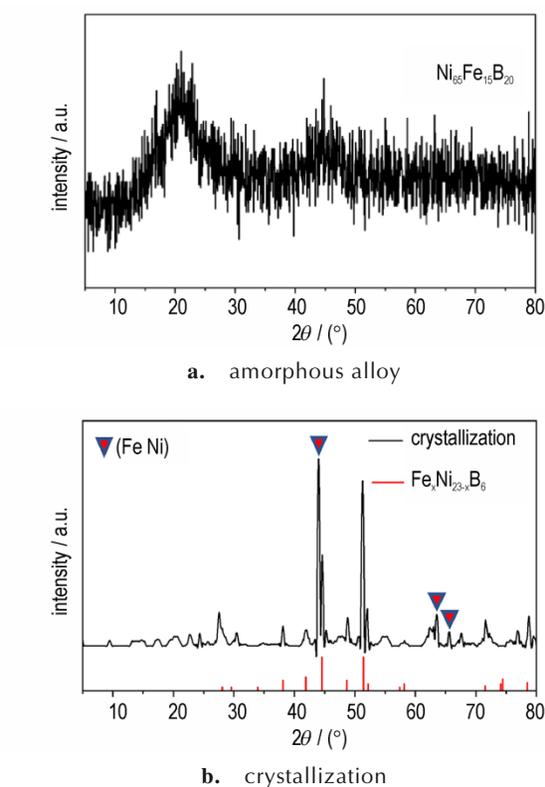


图7 ABW-1[#]晶化前后XRD衍射图

Fig.7 XRD diffraction patterns of original and crystallized ABW-1[#] samples

图谱(PDF-36-0978)和(Fe Ni)固溶体晶相物质衍射峰相吻合,特别是在 $2\theta=44^\circ$ 有一处(Fe Ni)强衍射峰。表明ABW-1[#]($Ni_{65}Fe_{15}B_{20}$)在受电流加热刺激后生成了 $Fe_xNi_{23-x}B_6$ 和(Fe Ni)固溶体2种晶态相,证实了电刺激加热下非晶合金存在由非晶态到晶态的物相转变过程。

2.3 非晶合金电阻温度系数研究

电阻温度系数是换能元评价的重要参数,对非晶合金电阻及其温度依赖性的探究对获得材料微观结构变化提供了可行性^[30]。为了比较电阻在升温过程中的相对变化,以 R/R_0 为纵坐标(R_0 为常温下桥丝电阻值),温度 T 为横坐标,绘制相对电阻大小随温度的变化曲线。如图8a为所绘制的ABW-1[#]相对电阻-温度关系,图8b为电流-温度和电流-温度系数关系曲线。

如图8a所示,ABW-1[#]电阻与温度并不是简单的线性关系,而是波动变化,随着桥丝温度的升高,电阻有3次明显的变化过程,波谷温度区间分别在 $25\sim 50^\circ C$ (低温段)、 $80\sim 100^\circ C$ (中温段)和 $480\sim 550^\circ C$ (高温段)。首先在 $25\sim 50^\circ C$ 的低温度段区间内,随桥丝温度增大,电阻先迅速降低,随后又升高。对应图8b中电流大小 $0.1\sim 0.8 A$ 阶段,电阻温度系数由正到负再变为正。分析原因可能是在初始时电流加载和材

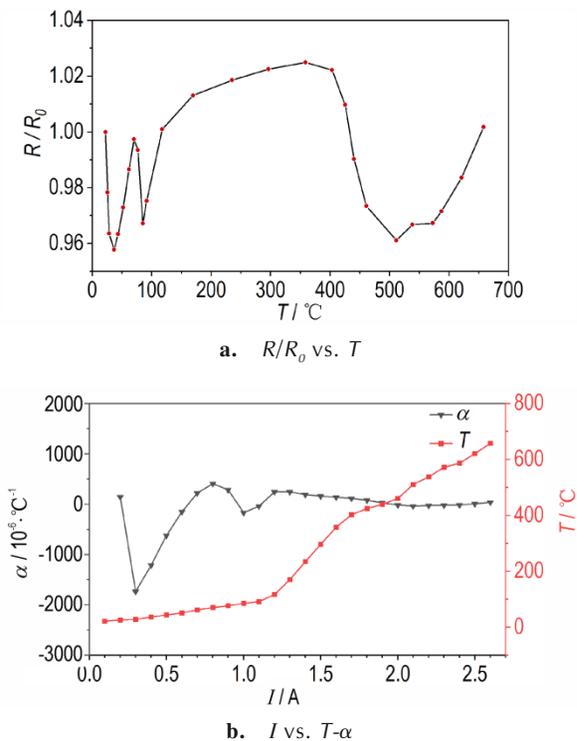


图8 ABW-1#的电阻-温度特性图

Fig.8 Resistance-temperature relationship of ABW-1# amorphous alloy bridge wire

料升温下,非晶合金发生结构弛豫使得局域范围内原子分布状态调整^[31],达到新的较稳定的排布状态。结构弛豫的发生引起了非晶合金电子散射中心数目的下降,电子流动阻碍减少,电阻降低。在中温段(80~100 °C),对应温度下图8b中电阻温度系数先下降再升高。电阻的变化推测是非晶合金的预晶化行为引起的,预晶化过程使得非晶材料中的一部分非晶态向晶态转变,宏观上表现出电阻随温度的升高而下降的现象。在发生预晶化以后由于温度并未达到非晶体的实际晶化起始温度,桥丝大部分仍保持为非晶态。

当温度升至约400 °C时,电阻再一次随温度升高而下降,呈现负温度系数效应,曲线波谷显示更大的温度宽度,对应温度下图8b显示出负的温度系数值。从电阻下降的起始温度来看,其变化的原因是在约400 °C左右非晶合金发生了晶化反应,与DSC曲线中的1#非晶合金晶化起始温度 T_c 基本吻合。全范围域内的非晶相到晶相的急剧变化显著影响了材料电阻输运特性,大量定域态电子跃迁到扩展态,更多的电子能在整个材料空间中进行共有化的运动状态,导致电导率增大,电阻突降。在约500 °C时,电阻有极小值,此

时所有定域态电子都被激发到扩展态,电阻不再变化,晶化过程结束。在经历了结构弛豫、预晶化、晶化过程后,非晶合金物性发生了不可逆的变化,在500 °C之后的温升中,被激发到扩展态的电子以与晶态合金中电子传导相同的方式影响电阻输运特性,呈现出与一般合金相同的正温度系数特征。

进一步地,对桥丝电热换能过程进行定量理论计算分析,根据焦耳-楞次定律变式:

$$P = I^2 R \quad (3)$$

式中, P 为功率, J ; I 为电流, A ; R 为电阻, Ω 。

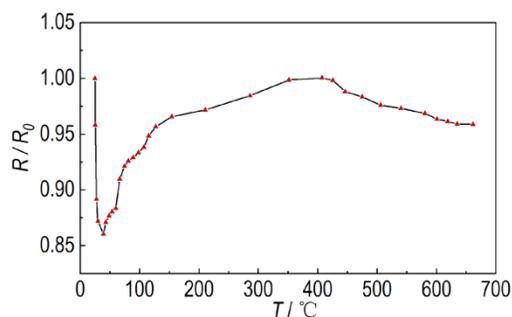
由图8a可知,当电流大小为2.1 A时,电阻相对变化有一极小值,此时的电流为非晶合金发生完全晶化最小电流。在晶化过程中 R/R_0 电阻相对变化率为6.38%,则可计算出晶化阶段电热能量转换的功率变化率 $P=17.05\%$ 。即若非晶桥丝在恒流2.1 A条件通电,达到1#非晶合金晶化起始温度而发生晶化反应,过程中的电阻变化会使得桥丝能量转换功率提高17.05%,将有利于火工品药剂的发火。

其余2种非晶合金桥丝以及Ni-Cr桥丝的 R/R_0 - T 曲线如下图9所示。基于对ABW-1#的电阻-温度曲线分析,图9a中ABW-2#样品观察到了低温段的结构弛豫和高温区的晶化电阻下降现象,但无预晶化现象。ABW-3#样品也呈现出相应的电阻变化规律。图9c中Ni-Cr桥丝换能元呈现正的温度系数,电阻随温度升高而增大。观察发现图9c中Ni-Cr桥丝的电阻随温度升高的变化率约为10%,而ABW-1#对应温度区间下的变化率仅有约2%,Ni-Cr合金远比非晶合金的变化大,其原因非晶合金材料具有低得多的电阻温度敏感性^[32],当变化温度相同时,电阻相对变化小。

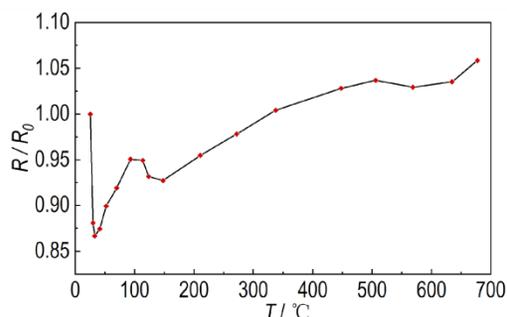
2.4 电容放电激励下的电爆特性研究

换能元的电爆能量转换是指把电能以较大电功率方式快速释放,使换能元迅速发生固-液-汽-等离子体的相变过程,在极短的时间内将电能转化为热能、电磁辐射能等形式的能量。以电容放电激励的作用方式,研究不同组分、不同激发能量非晶合金丝的电爆过程,分析得出非晶合金丝的电爆换能规律。为了探究3种不同组分非晶合金的电爆过程,分别记录了3种非晶合金丝的电压、电流和光信号曲线,计算得到电阻变化曲线,并以Ni-Cr桥丝为参照对象,图10为90 V/47 μF 下各桥丝的电爆曲线。

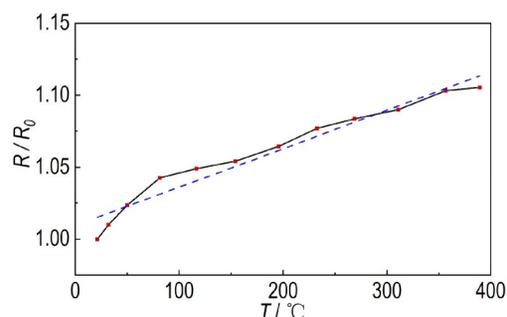
图10中在90 V/47 μF 的电容放电条件下,ABW-1#和ABW-3#有明显的电爆特征,ABW-2#和Ni-Cr桥丝电压和电流在开关闭合放电后逐渐衰减且



a. ABW-2#



b. ABW-3#



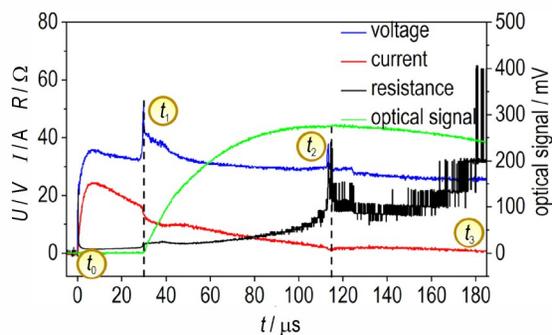
c. Ni-Cr

图9 3种不同种类桥丝的电阻-温度关系图

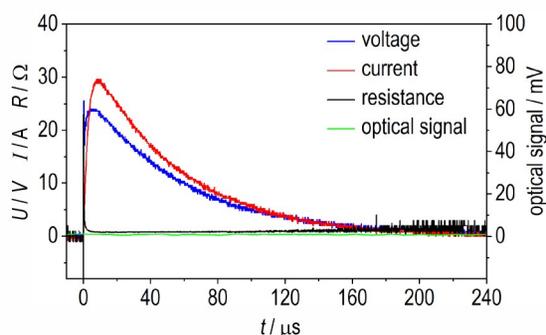
Fig. 9 Resistance-temperature relationship of three types of bridge wires

无显著光信号变化, 没有明显电爆特征。由于ABW-1#和ABW-3#电爆曲线呈现出类似的变化规律, 以ABW-1#为例(图10a)分析非晶合金的电爆过程。根据电压、电流和电阻变化首先定义了特征时间参数点 t_1 、 t_2 和 t_3 , 以此将非晶合金桥丝电爆过程分3个阶段: 升温阶段($t_0 \rightarrow t_1$), 汽化及电离阶段($t_1 \rightarrow t_2$)和湮灭阶段($t_2 \rightarrow t_3$)。

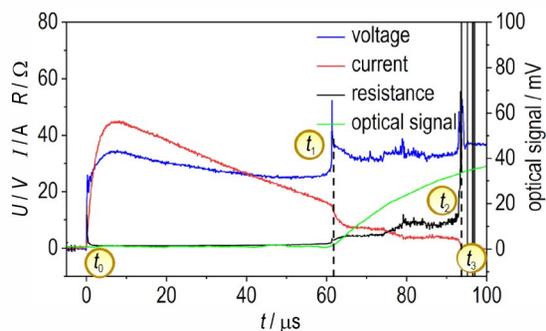
在 t_0 时刻, 放电回路开关闭合, 进行放电, 电压电流开始快速上升。 $t_0 \rightarrow t_1$ 阶段输入电能大部分转化为桥丝热能, 桥丝温度不断升高。同时, 从图10a中可以看出, ABW-1#的电阻在 t_0 至 t_1 阶段呈平缓变化, 这是因为非晶合金较低的温度敏感特性^[32], 在 $t_0 \rightarrow t_1$ 的短时间



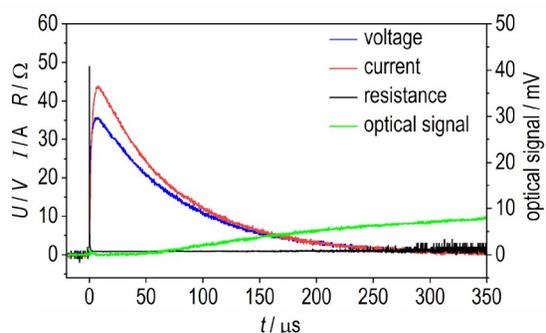
a. ABW-1#



b. ABW-2#



c. ABW-3#



d. Ni-Cr

图10 不同桥丝在90 V/47 μF的电压、电流、电阻和光信号变化曲线

Fig. 10 Voltage, current, resistance and optical signal variation curves of different bridge wires at 90 V/47 μF

段内,电阻变化受温度影响较弱。在 t_1 时刻,电压达到最高峰值,光信号开始出现,说明非晶合金桥丝部分开始电离产生等离子体。此时(t_1 时刻)电流曲线下降,电阻开始增大,非晶桥丝经升温-汽化-电离后产生的等离子体破坏了桥丝结构,使得桥丝径向尺寸减小,电阻变大,而产生并在两电极间流通的等离子体不足以弥补桥丝直径减小带来的电阻增大效应,因此, t_1 时刻电阻曲线升高,电流曲线陡降。 t_1 时刻后,光信号强度和电阻值均不断增大。在 $t_1 \rightarrow t_2$ 时间段内,非晶桥丝在本身的材料电热效应和不断电离出等离子体的热传递双重作用下,加速发生非晶合金丝的气化及电离,至 t_2 时刻光信号达到峰值。在 $t_1 \rightarrow t_2$ 阶段内,电流曲线的不断下降除了与非晶桥丝结构变化带来的电阻增大有关,还与被激发出来的等离子体的远离桥丝本体相关。最后,在 $t_2 \rightarrow t_3$ 阶段,产生的等离子体远离桥丝,大部分非晶丝均被加热至气化电离,电阻不断升高,直至电阻趋于无穷大,电流降为零,此时桥丝断开,电路断路。

材料的电爆特性与外界刺激能量有关,不同大小电压激励下的电爆效果不同。图 11 为发生电爆的 ABW-1# 和 ABW-3# 在不同电压下电爆过程的高速摄影图,时间间隔分别取为 $80 \mu\text{s}$ 和 $20 \mu\text{s}$ 。

由图 11a~11c,随着外界激发电压的增大,非晶桥丝的电爆过程也更为剧烈,发光强度增大,电爆持续时间变长,气化电离产生了更多且温度更高的等离子体向周围喷射。图 11d~11f 中 ABW-3# 的电爆效果远不及 ABW-1# 剧烈,电爆持续时间短,电爆释放等离子体的强度弱。这种现象可以用不同非晶合金的过冷液相区宽度 ΔT_x 大小的差异来解释。在非晶合金 DSC 测试结果中,ABW-1#、ABW-2# 和 ABW-3# 非晶合金的 ΔT_x 大小排序为:ABW-2# > ABW-3# > ABW-1#, 由于越小的过冷液相区宽度表明玻璃态的稳定性越低,ABW-1# 的稳定性为最低,在相同的能量激发下可产生更强烈的电爆效果。ABW-3# 因其较高的非晶材料稳定性,电爆释能效应远不及 ABW-1# 强烈。ABW-2# 由于其玻璃态稳定性极高,即使在外界刺激电压为 90 V 条件下也依然不能发生电爆。另一方面,从非晶的组成来分析,ABW-2# 和 ABW-3# 样品较 ABW-1# 中分别多添加了 Mo 和 V 元素,在非晶态的形成过程中,Mo 和 V 等过渡元素的添加有利于提高玻璃化形成能力,增强材料稳定性。在外加放电激励下,含过渡元素的非晶合金晶化反应不易被激活,电爆效果越不显著。

电爆特征参数是表征材料电爆效果的重要参量,

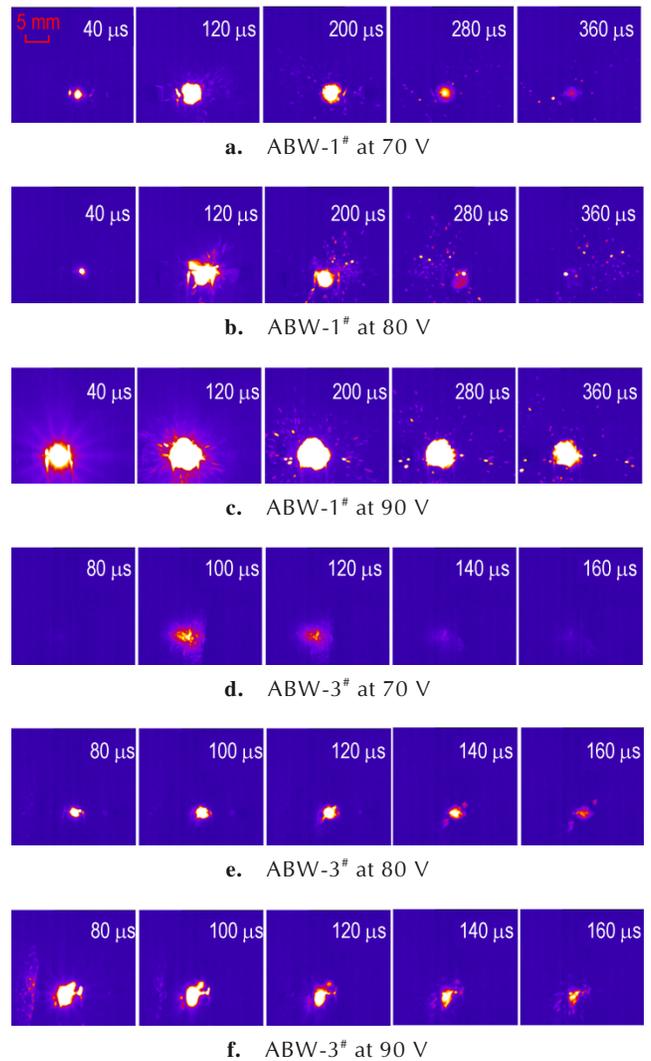


图 11 ABW-1# 和 ABW-3# 在不同电压下的电爆过程

Fig. 11 The electric explosion process of ABW-1# and ABW-3# under different voltages

主要包括以下 4 项:样品从通电开始至桥区开始电离形成等离子体的时间,称为电爆起始时间(或延迟时间) t_c 、起始电爆能量 E_c ,电容作用于样品的总时间 t_t ,电容作用于样品的总能量 E_t 。 E_c 、 E_t 的定义分别为式(4)和式(5)。

$$E_c = \int_{t_0}^{t_1} U(t) \cdot I(t) dt \quad (4)$$

$$E_t = \int_{t_0}^{t_3} U(t) \cdot I(t) dt \quad (5)$$

式中, t_0 、 t_1 和 t_3 分别为通电起始时刻、电爆开始时刻和通电结束时刻,s。 $U(t)$ 为桥丝换能元上的电压值,V, $I(t)$ 为通过桥丝电流值,A。

ABW-1# 非晶合金丝电爆特征参数如表 3 所示,ABW-3# 非晶合金丝各项电爆特征参数如表 4 所示。

表3 ABW-1#非晶合金桥丝电爆特征参数

Table 3 Electric explosion characteristic parameters of ABW-1# amorphous alloy bridge wire

voltage / V	$t_c / \mu s$	$t_t / \mu s$	E_c / mJ	E_t / mJ
70	46.48	151.28	17.086	25.133
80	41.88	156.78	19.671	29.951
90	30.02	221.54	20.454	41.394

Note: t_c is ignition time. t_t is total time. E_c is ignition energy. E_t is total energy.

表4 ABW-3#非晶合金桥丝电爆特征参数

Table 4 Electric explosion characteristic parameters of ABW-3# amorphous alloy bridge wire

voltage / V	$t_c / \mu s$	$t_t / \mu s$	E_c / mJ	E_t / mJ
70	80.47	115.15	38.438	40.682
80	72.19	129.80	48.359	50.236
90	61.29	154.07	54.553	60.927

Note: t_c is ignition time. t_t is total time. E_c is ignition energy. E_t is total energy.

从表3中看出,延迟时间 t_c 随电压升高而减小,而起始电爆能量 E_c 随着激励电压的增大而略微增加。电容放电一般在 $3\tau \sim 5\tau$ (τ 为时间常数)时间内结束^[33],电压越高,电容存储的能量增大,单位时间作用于桥丝的能量增大,而某一种桥丝被激发能量基本恒定,因此延迟时间随着激发电压的增大而缩短。同时从表3和表4可知,随电压的增大,电容放电能量总作用时间和总能量也增大。表4中ABW-3#非晶合金的延迟时间也随激发电压的升高而缩短,但与ABW-1#相比,ABW-3#的延迟时间和起始电爆能量均大于ABW-1#样品,说明ABW-3#样品在相同的外界激发条件下,更不容易发生电爆,达到电爆条件的能量阈值较高,需要更长的能量积蓄时间。

3 结论

以丝状非晶合金为对象,研究将其作为一种新型的火工品换能元。探究了不同种类非晶合金的热分析性能参数、材料电阻随温度变化规律和电激发下的能量转换过程和释放规律。

(1)非晶合金的热分析测试结果表明,非晶合金晶化反应过程会放热释能,最大放热量为 $116.4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。放热能力与其过冷液相区宽度所定义的玻璃态稳定性有关。过冷液相区宽度越小,则非晶合金玻璃态稳定性越低,晶化过程能量释放量就越大。

(2)研究了非晶合金的电阻随温度变化行为,结果表明,非晶合金随温度升高而使其内部原子结构改变,电阻特性呈现出相应的波动变化规律。非晶桥丝

在晶化阶段具有负的电阻温度系数,其中ABW-1#桥丝的电阻相对变化率(R/R_0)为6.38%,在完全晶化最小电流下可提高电热能量转换功率17.05%,将有利于火工药剂的发火。

(3)电爆特性研究表明,非晶合金的组分稳定性和外界激励电压大小影响电爆效果。在90 V电容放电激励下,ABW-1#和ABW-3#的电爆延迟时间 t_c 分别为30.02,61.29 μs ,起始电爆能量 E_c 分别为20.454,54.553 mJ。ABW-1#组分稳定性低,其电爆能量阈值也较低,电爆效果好。同时,激励电压值越高,电爆效果也越明显。

(4)基于以上结论分析,非晶合金以其晶化释能效应、晶化反应负电阻温度系数特性和电爆释能产生等离子体等展现出其作为新型火工换能元材料的潜力。同时,基于非晶合金的配方种类繁多、外观形式多样和能量状态可调等特点,其性能可进一步由材料自身改良而优化。因此,将非晶合金作为一种新型火工换能元材料的研究值得进一步深入探索。

参考文献:

- [1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 1-2.
YE Ying-hua. Initiator technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 1-2
- [2] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. MEMS火工品换能元的研究进展[J]. 含能材料, 2017, 25(5): 428-436.
ZHANG Bin, CHU En-yi, REN Wei, et al. Reserch progress in energy conversion components for MEMS initiating explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(5): 428-436.
- [3] 任小明, 解瑞珍, 薛艳, 等. Ni-Cr薄膜换能元点火性能研究[J]. 火工品, 2011, 2: 4-6.
REN Xiao-ming, XIE Rui-zhen, XUE Yan, et al. Study on firing performance of Ni-Cr film igniting resistor [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011, 2: 4-6.
- [4] 周庆, 焦清介. 电流激励Ni-Cr桥带式电火工品发火模型[J]. 含能材料, 2014(6): 824-827.
ZHOU Qing, JIAO Qing-jie. Firing model of Ni-Cr bridge-belt electric initiating devices under current input [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014 (6): 824-827.
- [5] DAVID H L, SIEGFRIED W J, RONALD B C, et al. Digital micropropulsion [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 80: 1
- [6] ZHANG K L, CHOU S K, ANG S S, et al. A MEMS-based solid propellant microthruster with Au/Ti igniter [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 122(1): 113-123.
- [7] 徐超, 李兆泽, 万红, 等. MEMS固体微推进器中Cr薄膜点火电阻的研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1411-1414, 1418.
XU Chao, LI Zhao-ze, WAN Hong, et al. Research on the Cr membrane igniting resistance in MEMS solid propellant

- micro-thruster [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1411-1414, 1418.
- [8] BICKES Jr R W, SCHWARZ A C. Semiconductor bridge (SCB) igniter [P]. U.S. Patent 4,708,060, 1987.
- [9] BENSON D A, BICKES Jr R W, BLEWER R S. Tungsten bridge for the low energy ignition of explosive and energetic materials [P]. U.S. Patent 4976200, 1990.
- [10] MARTINEZ T B, MONTOYA J A. Semiconductor bridge device and method of making the same [P]. U.S. Patent 6133146, 2000.
- [11] XU J B, SHEN Y, WANG C A. Controlling the energetic characteristics of micro energy storage device by in situ deposition Al/MoO₃ nanolaminates with varying internal structure [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 373: 345-354.
- [12] ZHU P, JIAO J S, SHEN R Q, et al. Energetic semiconductor bridge device incorporating Al/MoO_x multilayer nanofilms and negative temperature coefficient thermistor chip [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(19): 194502.
- [13] ZHU P, LI D L, FU S, et al. Improving reliability of SCB initiators based on Al/Ni multilayer nanofilms [J]. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 2013, 63(1): 10302.
- [14] 易镇鑫. 两种碳材料火工品的设计/制备与性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- YI Zhen-xin. Design and preparation/performance on two types of carbon-based igniter [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [15] 易镇鑫, 李林, 魏梦焱, 等. 银膜换能元的喷墨打印及其性能表征 [J]. *含能材料*, 2023, 31(3): 215-221.
- YI Zhen-xin, LI Lin, WEI Meng-yan, et al. Preparation and properties of inkjet printing silver film bridge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(3): 215-221.
- [16] 任小明, 刘兰, 余可馨, 等. 氮化钽薄膜换能元低能化研究 [J]. *火工品*, 2021, 1: 5-8.
- REN Xiao-ming, LIU Lan, YU Ke-xin, et al. Study on the energy reduction of TaN thin film transducers [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021, 1: 5-8.
- [17] 张文超, 王嘉鑫, 郑子龙, 等. 含能 MOFs 薄膜半导体桥及其制备方法. CN201710741380.8 [P]. 2019.
- ZHANG Wen-chao, WANG Jia-xin, ZHENG Zi-long, et al. Energetic MOFs thin film semiconductor bridge and its preparation method. CN201710741380.8 [P]. 2019.
- [18] DEBENEDETTI P G, STILLINGER F H. Supercooled liquids and the glass transition [J]. *Nature*, 2001, 410: 259-267.
- [19] YU B S, SUN Y H, BAI H Y, et al. Highly energetic and flammable metallic glasses [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63(7): 1-5.
- [20] 余帮生, 孙永昊, 白海洋, 等. 一种高含能非晶合金材料、其制备方法及应用. CN112981278A [P]. 2021.
- YU Bang-sheng, SUN Yong-hao, BAI Hai-yang, et al. A high energetic amorphous alloy material, its preparation method and applications. CN112981278A [P]. 2021.
- [21] HU X, GE J, LIU S, et al. Combustion Mechanism of Fe-Nb-BY Amorphous alloys with an anomalous exothermic phenomenon [J]. *Acta Metall Sin*, 2020, 57(4): 542-552.
- [22] 王丽芳. 电阻和内耗法探索 Cu-Zr-Al-Ag 系非晶合金热稳定性和晶化/弛豫行为与玻璃形成能力 [D]. 安徽: 安徽: 合肥工业大学, 2016.
- WANG Li-fang. Studying the thermal stability, crystallization/relaxation behaviors and glass forming ability of Cu-Zr-Al-Ag amorphous alloys by electrical resistance and internal friction measurements [D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2016.
- [23] 刘振海. 热分析标准试验方法 [J]. *化学研究与应用*, 1991, (4): 99-104.
- LIU Zhen-hai. Standard test methods of thermal analysis [J]. *Chemical Research and Application*, 1991, (4): 99-104.
- [24] YU H B, WANG W H, BAI H Y, et al. The β -relaxation in metallic glasses [J]. *National Science Review*, 2014, 1(3): 429-461.
- [25] INOUE A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys [J]. *Acta materialia*, 2000, 48(1): 279-306.
- [26] FUEGLEIN, EKKEHARD, KAISERSBERGER, et al. About the development of databases in thermal analysis [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, 120(1): 23-31.
- [27] 宋丽建, 许巍, 霍军涛, 等. 大激活熵是触发非晶合金记忆效应的关键 [J]. *自然杂志*, 2021, 43(1): 53-60.
- SONG Li-jian, XU Wei, HUO Jun-tao, et al. Large activation entropy is a key factor to trigger the memory effect of amorphous alloys [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2021, 43(1): 53-60.
- [28] 王鹏, 杜志明. 桥丝式电火工品热点火理论 [J]. *火工品*, 2007(4): 26-30.
- WANG Peng, DU Zhi-ming. Thermal ignition theory of electric hot wire initiating devices [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(4): 26-30.
- [29] KAWAZOE Y, CAROW W U, YU J Z. Physical Properties of Ternary Amorphous Alloys. Part 1: Systems from Ag-Al-Ca to Au-Pd-Si [M]. 2011.
- [30] 王丽芳, 满达虎. 电阻法和 DSC 法研究 Cu₃₆Zr₄₈Al₈Ag₈ 非晶合金结构变化的对比 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(8): 40-42.
- WANG Li-fang, MAN Da-hu. Comparison of structural change of Cu₃₆Zr₄₈Al₈Ag₈ amorphous alloy studied by electrical resistance and DSC methods [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(8): 40-42.
- [31] DMOWSKI W, Fan C, MORRISON M L, et al. Structural changes in bulk metallic glass after annealing below the glass-transition temperature [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 471(1-2): 125-129.
- [32] 卢博斯基 F.E. 非晶态金属合金 [M]. 冶金工业出版社, 1989: 58-59
- LUBORSKY F E. Amorphous metal alloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989: 58-59.
- [33] 蔡瑞娇. 火工品设计原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 106-107.
- CAI Rui-jiao. Design principles of initiating devices [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999: 106-107.

A Preliminary Research on the Properties of Amorphous Alloy as New Microheater Material of Initiator

NING Jue-yong^{1,2}, JIAN Hao-tian^{1,2}, ZHU Zheng-wang³, ZHENG Guo-qiang⁴, LI Hong-gao⁴, ZHU Peng^{1,2}, SHEN Rui-qi^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Micro-Nano Energetic Devices Key Laboratory, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 210094, China; 3. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 4. The 43rd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Anhui Province Key Laboratory of Microsystem, Hefei 230088, China)

Abstract: In order to demonstrate the feasibility of amorphous alloy as a new type of micro-heater material, the amorphous alloy bridge wire micro-heater was designed and fabricated, and the influence of constituent components on the energy release effect of amorphous alloy material was studied by DSC thermal analysis. On this basis, the electrothermal temperature response, change in temperature coefficient of resistance and the electro-explosive characteristics of the amorphous alloy bridge wire micro-heater were investigated. Results show that the amorphous alloy is regarded as a metastable energetic material when it releases energy, and exhibits negative temperature coefficient of resistance during crystallization process, leading to that relative change in resistance is 6.38%, and the electrothermal energy transfer power is increased by 17.5%. Compared to the Ni-Cr bridge wire micro-heater with linear temperature coefficient of resistance, amorphous alloy bridge wire micro-heater characterizes a better energy release effect. These preliminarily demonstrate the feasibility of amorphous alloy as a promising initiator micro-heater material, and expand the approach on efficiency improvement of electrical initiator micro-heater.

Key words: amorphous alloy; micro-heater; thermal analysis; crystallization; temperature coefficient of resistance; electro-explosive

CLC number: TJ5;TJ450

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023050

Grant support: Microsystems Key Laboratory Fund of Anhui Province(No. 2ZQT2324018)

(责编:王馨逸)