

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0001-05

# Ni-Cr异形电桥的换能规律研究

齐雅松, 吴瑞德, 刘红娥, 张涛, 陈文龙, 常英珂

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

**摘要:** 为了探索 Ni-Cr 合金异形电桥的换能规律, 采用高速摄影技术对异形电桥在不同恒流激励下的作用过程进行分析, 利用高速示波器记录其两端的电压和电流信号, 并通过共聚焦显微镜观察异形电桥作用后的表现形貌。结果表明: 不同恒流激励条件下异形电桥的换能特性存在差异, 电流由小到大对应电热到电爆转化的过程。在小电流激励下以电热换能为主, 电桥在集热区最窄处发生熔化或汽化而断开, 作用过程中只有发光现象。随着电流的增加, 电桥开始出现电爆现象, 作用过程中不仅出现发光现象, 还伴随着高温颗粒产物向外喷溅。当电流继续增大时, 金属电桥完全汽化, 并伴随有柱状的火焰产生。

**关键词:** 异形电桥; 换能规律; 电热发火; 电爆发火

中图分类号: TJ450.3+2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.001

## Study on Energy Conversion Property of Ni-Cr Special Shaped Electric Bridge

QI Ya-song, WU Rui-de, LIU Hong-e, ZHANG Tao, CHEN Wen-long, CHANG Ying-ke

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** In order to explore the energy conversion property of special shaped electric bridge, the action process under different constant current excitation was analyzed by high-speed photography technology. Meanwhile, the voltage and current signals were recorded by high-speed oscilloscope, and then the apparent morphology was observed by confocal microscope. The results show that the energy conversion property of special shaped electric bridge is different under different constant current excitation, and the current from small to large corresponds to the conversion process from electric-thermal to electric-explosion. Under the small current excitation, the electric-thermal energy conversion property is main form. The melting or vaporization occurs in the narrowest part of the heat collection area of the electric bridge and only luminescence occurs in the process. With the increase of the current, electric-explosion phenomenon appears in the electric bridge, which is accompanied by the high temperature particle products splashing outward. As the current continues to increase, the electric bridge completely vaporizes and is accompanied by a columnar flame.

**Key words:** Special shaped electric bridge; Energy conversion property; Electric-thermal ignition; Electric-explosion ignition

电热火工品是利用恒定或脉冲电流通过电阻发热而激发的火工品<sup>[1]</sup>, 一般采用 Ni-Cr 合金作为换能元材料, 最早出现的电热火工品是桥丝式电火工品。为了解决桥丝式电火工品的安全性问题, 在其基础上

发展了异形电桥火工品。异形电桥的集-散热一体化设计能够兼顾集热和散热的设计要求, 具有良好的安全性和可靠性, 加之生产成本低、加工过程易于控制等优点, 被广泛应用于武器系统、航空航天等国防领

收稿日期: 2021-10-19

作者简介: 齐雅松 (1995-), 男, 在读硕士研究生, 从事先进火工技术研究。

域<sup>[2]</sup>。

一般认为异形电桥火工品与灼热桥丝式电火工品都属于电热发火原理<sup>[3]</sup>,即电桥在焦耳热的作用下温度升高,并经过热传导使药剂升温至爆发点<sup>[4]</sup>,从而引起药剂发火。但在异形电桥火工品发火性能试验中,发现在大电流激励下存在电桥的熔断时间小于药剂的作用时间,而电火工品依然可以发火的情况,因此在大电流激励下异形电桥可能以其它的形式引发药剂。周庆等<sup>[5]</sup>针对发火试验中电桥熔断在先、药剂发火在后这一现象,认为在全发火电流激励下,桥带式电火工品的发火原理为电爆发火,即金属电桥在高电流激励下瞬间受热汽化,产生高温高压气体,并迅速膨胀引发药剂。

虽然有些学者提出了异形电桥火工品在强电流激励下属于电爆发火<sup>[6]</sup>,但并未对其作用过程及规律进行深入研究。因此,为了更好地了解异形电桥火工品在不同激励下的作用特性,本文对异形电桥换能元开展了换能规律研究,利用高速摄影技术记录了异形电桥在恒流激励下的物理形态转变过程,并通过分析其两端的电压和电流信号研究异形电桥的换能规律。

## 1 实验

### 1.1 实验样品

异形电桥火工品的换能元结构较多,其特征是具有明显的集热区和散热区,典型异形电桥如图1所示,由图1可见异形电桥两边大面积为散热区,中间细腰部(S形或者S形的变形)为集热区。集热区电阻大、电流密度大,从而保证发火可靠性以及作用时间的一致性;散热区面积大、电阻小,能够将热量通过热传导作用散失,从而保证安全性<sup>[7]</sup>。

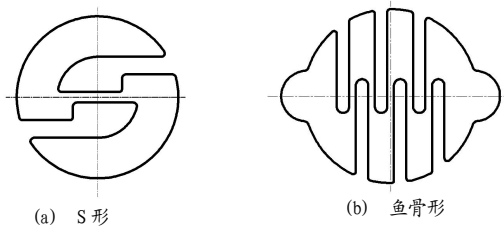


图1 典型异形电桥示意图

Fig.1 Typical shapes of special shaped electric bridge

实验以图1(b)电桥结构为研究对象(电阻为 $1.0\ \Omega$ ,材料为Cr20Ni80),测试前将金属电桥利用贮能焊工艺焊接在电极塞的电极上,电极塞由陶瓷片烧结在玻璃基底制作而成。测试时通过电极塞的脚线将恒流激励作用于金属电桥,实物如图2所示。



图2 试验件实物图

Fig.2 Photo of firing unit sample

### 1.2 实验原理

测试系统主要包括恒流电源激励装置和性能测试装置<sup>[8]</sup>,如图3所示,主要包括恒流电源(型号AT-NS1132,可提供 $0\sim 12.5\ \text{A}$ 的恒流激励)、高速摄影仪(型号V311,最高可达 $10^5$ 帧/s)、计算机分析系统、电压探头、电流探头(型号CPL100B,可测量 $0\sim 100\ \text{A}$ 的恒定电流)和示波器(型号DP0724)等。测试中将试验件用夹具固定,通过调节高速摄影仪的距离、焦距、图像分辨率、采集速率( $10^4$ 帧/s)等,使样品在图像中清晰可见。当恒流激励通过异形电桥时,电桥在焦耳热的作用下温度迅速升高,在极短的时间内发生物理形态转变,利用高速摄影仪记录这一变化过程。同时利用电压、电流探头测得电桥两端电压、电流的变化,并在示波器上呈现出变化曲线。

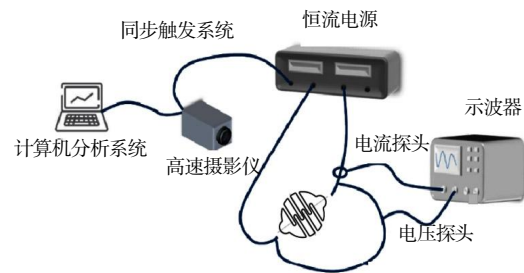


图3 恒流激励测试系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of test system under constant current excitation

## 2 结果与讨论

### 2.1 电信号特征分析

在恒流激励下,金属电桥在焦耳热的作用下温度

持续升高,先后经历固态升温阶段、熔化阶段和汽化阶段。在固态升温阶段,由于镍铬合金的温度系数是正值,所以电桥电阻会随着温度的升高而逐渐增大,两端电压也随之增大。在熔化阶段,由于镍铬系合金存在K-状态<sup>[9]</sup>(电阻率随温度的升高有一个下降的过程),此时电桥电阻会有小幅度变化,两端电压会有一个减小的过程。随着温度的进一步升高,金属电桥开始汽化,汽化过程首先发生在电桥集热区的外表面,然后逐渐向中心蔓延。随着电桥的汽化导电面积不断缩小,其电阻不断增加,当电桥全部汽化时电阻迅速升高。随着金属蒸汽不断向外部膨胀,电子的碰撞会使金属蒸汽发生电离<sup>[10]</sup>,此时电阻会出现连续震荡的不稳定状态。

利用电压、电流探头测试不同恒流激励下异形电桥两端电压、电流随时间的变化,并根据欧姆定律计算电阻随时间的变化。不同恒流激励下电桥两端电压和电阻随时间变化的曲线如图4所示。

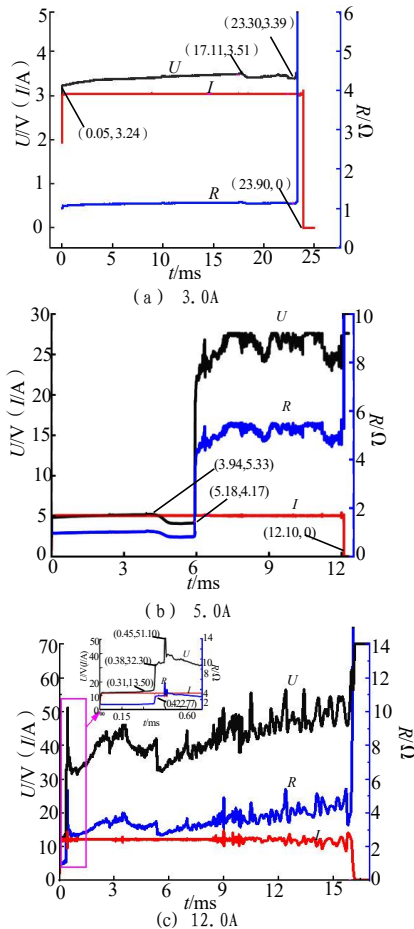


图4 不同恒流激励下异形电桥电信号变化曲线  
Fig.4 Curves of electric signal under different constant current excitation

以图4(b)为例,在5.0A恒流激励下金属电桥的电阻逐渐升高,电压从5.00V逐步增加到 $t=3.94\text{ms}$ 时的5.33V,此时金属电桥处于固态升温阶段。随后电阻逐渐下降,电压逐步下降至 $t=5.18\text{ms}$ 时的4.17V,此时金属电桥处于熔化阶段。在 $t=5.18\text{ms}$ 时,金属电桥开始汽化,此时电阻呈现连续震荡的不稳定状态。最后在 $t=12.10\text{ms}$ 时金属电桥断开,电流变为0,电阻增到无穷大,作用过程结束(此时间定义为作用时间)。

不同恒流激励下金属电桥作用过程各阶段时间分布如表1、图5所示。从图5(a)可以看出随着电流的增大,固态升温阶段和熔化阶段的持续时间逐渐减少,这是因为随着电流的增加,电桥的换能效率增加,而固态和液态都属于相对稳定的状态(凝聚态),所以固态升温阶段和熔化阶段所需的时间逐渐减少。

表1 不同恒流激励下金属电桥作用过程各阶段持续时间(ms)

Tab.1 The duration of each stage action process under different constant current excitation

I/A	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	8.0	10.0	12.0
固态升温阶段	17.11	9.54	5.92	4.05	3.94	1.62	0.73	0.46	0.31
熔化阶段	6.19	8.61	6.89	2.00	1.24	1.59	0.49	0.09	0.07
汽化阶段	0.60	0.85	3.84	6.05	6.92	7.70	20.69	20.11	15.73
作用时间	23.90	19.00	16.64	12.11	12.10	10.91	21.18	20.66	16.11

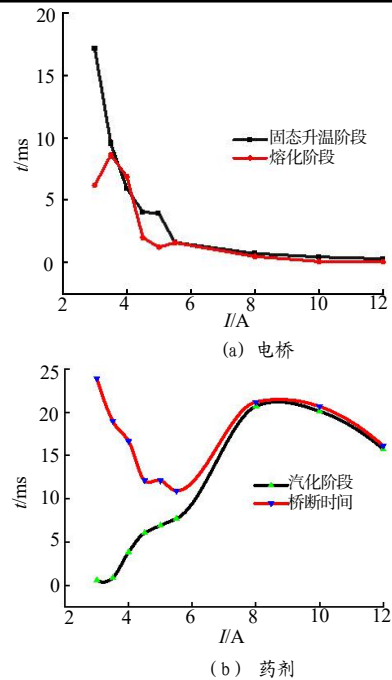


图5 电桥作用过程中各阶段持续时间随电流的变化曲线  
Fig.5 Curves of the duration of each stage action process under different constant current excitation

由图5(b)可以看出,汽化阶段持续时间从3.0A时的0.60ms逐渐增加到8.0A时的20.69ms,随后又

逐渐减小至 12.0A 时的 15.73ms。这是因为在电流较小时,只有集热区的电桥发生了汽化,而随着电流的增加,更多的电桥发生了汽化,所以汽化阶段所需的时间也会增加;当电桥完全发生汽化后,汽化阶段所需的时间又会随着电流的增加而减少。

电桥作用过程的作用时间从 3.0A 时的 23.90ms 逐渐减小至 5.5A 时的 10.91ms,这是因为在电流较小时,电桥在集热区的某一点发生熔化或汽化而使电桥断开,所以随着电流的增加电桥温升速率越大,作用时间越小。当电流增加至 8.0A 时,作用时间又逐渐增大至 21.18ms,此时的电流密度会使电桥在汽化的同时发生电离,只有当气态金属完全扩散后电桥才会彻底断开,更多的电桥发生汽化会使电桥的作用时间增加。当电流为 8.0A 左右时电桥完全发生汽化,此时电桥作用时间最长,随后又会随着电流的增加而减少,因此作用时间随着电流的增大先减小后增大再减小。

## 2.2 发火过程及试验后表现形貌分析

利用高速摄影仪记录了异形电桥在不同恒流激励下的作用过程,高速摄影图像如图 6 所示。

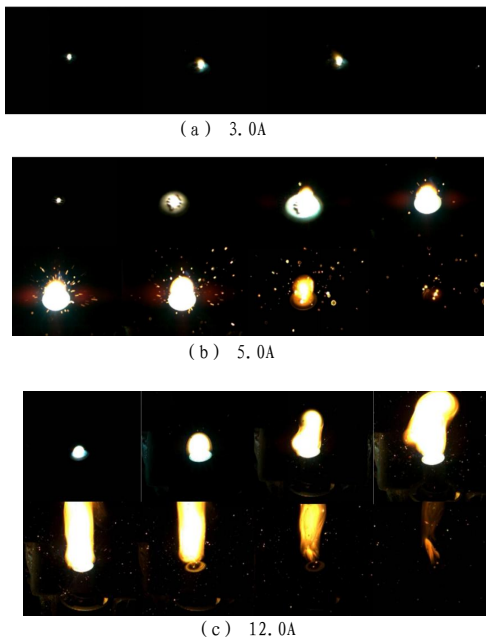


图 6 不同恒流激励下异形电桥作用过程高速摄影图像  
Fig.6 High speed camera images of the special shaped electric bridge under different constant current excitation

从图 6 可以看出,在 3.0A 恒流激励下,金属电桥在焦耳热的作用下温度升高,在集热区最窄处出现发光现象。随着通电时间的增加,温度不断升高,亮

度不断增加,最终电桥在集热区断开。因为在整个作用过程中并未有高温颗粒产物或火焰产生,此时电桥换能过程以电热为主。

随着电流激励增加至 5.0A 时,电桥首先在集热区最窄处出现发光现象,并且亮度明显增加。接着整个集热区出现发光现象,电桥开始剧烈燃烧,并伴随着高温颗粒产物向外喷溅,喷溅距离约有 15mm,此时电桥开始出现电爆现象。

当电流增大至 12.0A 时,单位时间输入到电桥的能量增加,使电桥反应更加剧烈,在极短的时间内发生了熔化、汽化等物理形态转变。与典型半导体桥高速摄影图像<sup>[1]</sup>对比还可以推断出:电桥在汽化过程中还伴随着等离子体的产生。在作用过程中电桥不仅向四周喷射了大量高温火花颗粒,而且形成了柱状火焰,火焰高度约为 20mm,持续时间约有十几毫秒。此时电桥换能过程以电爆为主。

试验后异形电桥在不同恒流激励作用后的表现形貌如图 7 所示。

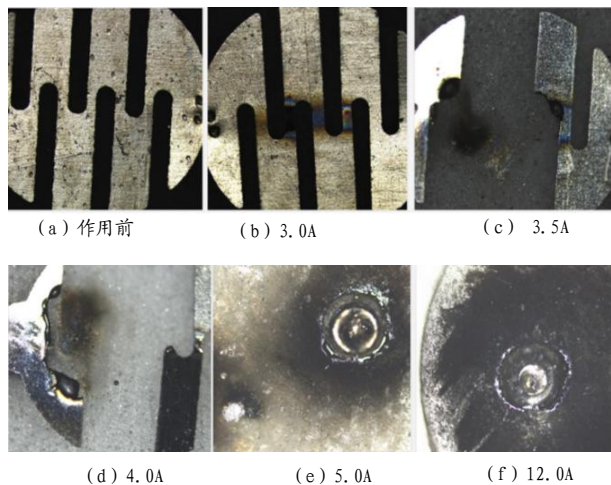


图 7 不同恒流激励下异形电桥作用前后的表现形貌图  
Fig.7 The apparent morphology of the special shaped electric bridge under different constant current excitation

从图 7 (b) 可以看出,在 3.0A 恒流激励下,电桥在集热区最窄的区域发生熔断,与试验前相比,集热区的颜色由白色变为紫色,有明显的烧蚀痕迹,说明电桥集热区发生了高温氧化反应。而电桥的散热区形状保持完整,无明显的颜色变化和烧蚀痕迹,说明电桥散热区并未发生氧化反应。从图 7 (c)~(d) 中可以看出,电桥大部分发生了烧蚀,在断面处有明显的黑色溶液斑点;残留的电桥颜色发生了变化,位于



电桥下方的散热片有明显的烧蚀痕迹。从图7(e)~(f)中可以看出几乎没有残留的电桥,只有在与插针焊接处有烧蚀熔融的痕迹,而且散热片有明显的烧蚀痕迹,而且电流越大,烧蚀痕迹越严重。

从图7不同恒流激励作用后异形电桥的表观形貌图中可以看出:电桥首先在集热区最窄处发生熔化或汽化,其余电桥保持原有形状。随着通电时间的增加,熔化和汽化区域向四周蔓延,最终导致整个电桥发生熔化或汽化。

### 3 结论

根据本研究获得的不同恒流激励下电桥两端电信号变化、高速摄影图像和表观形貌图,可以得出以下结论:

(1) Ni-Cr 异形电桥的换能过程先后经历固态升温、熔化、汽化3个阶段,不同恒流激励下各个阶段的持续时间、作用过程、表观形貌有所区别;

(2) 异形电桥在小电流激励下以电热换能为主,在集热区最窄处发生熔化或汽化而断开;大电流激励下则以电爆换能为主,整个电桥发生汽化而断开;

(3) 在5A左右恒流激励下,电桥开始出现电爆现象,伴随着高温颗粒产物向外喷溅,喷溅距离约有15mm。当恒流激励为12.0A时,还伴随着等离子体的产生,并形成了柱状火焰,火焰高度约为20mm。这种现象对于实现火工品的隔离点火有重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 王可暄,白颖伟,任炜,等.电热火工品连续电磁波环境下响应规律[J].含能材料,2012,20(05):610-613.
- [2] 高泽志.某钝感电底火电磁环境适应性模拟研究及结构优化设计[D].南京:南京理工大学,2017.
- [3] 成一,陈守文.电点火头发火过程的时间结构的研究[J].爆破器材,2001(05):22-24.
- [4] 石蓝,杨安民,张迎春,等.电火工品桥带温升数学模型及可靠性设计应用[J].火工品,2016(06):24-27.
- [5] 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,2014,22(06):824-827.
- [6] Walter S,Heinz H,Roland R,et al. FEM failure analysis of thick-film initiators for automotive applications[J]. Engineering Failure Analysis,2003,11(4):475-484.
- [7] 王凯民,张学舜.火工品工程设计与试验[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [8] 张宇新.基于 MEMS 技术的薄膜换能元及其电爆性能研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [9] 姜定成,田茂江,王勇,等.镍铬系精密电阻合金的特性与研究现状[J].电工材料,2017(05):23-28.
- [10] 成剑,栗保明.电爆炸过程导体放电电阻的一种计算模型[J].南京理工大学学报(自然科学版),2003(04):371-375.
- [11] 杨程,胡艳,沈瑞琪,等.多层 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆性能研究[J].爆破器材,2015,44(01):33-36.