

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0066-05

并联热敏电阻对半导体桥换能元 直流响应的影响研究

金豪杰¹, 牛惠媛¹, 任 炜¹, 纪向飞¹, 李 慧¹, 安骋远²

(1.陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 陕西 西安, 710061; 2.北京理工大学 机电学院, 北京, 100081)

摘要: 并联热敏电阻是提升半导体桥 (SCB) 火工品临界熔断电流的有效措施。本研究利用恒流电源和红外测试系统, 对不同直流激励条件下并联热敏电阻对半导体桥响应的影响进行了试验研究。试验测试了换能元桥区温度及临界熔断电流, 结果表明, 并联负温度系数 (NTC) 热敏电阻能显著提高 SCB 的临界熔断电流至原来的 1 倍以上, 同时使桥区温度最大降低 68%。经计算, NTC 热敏电阻的分流效果范围为 34.4%~74.4%。本研究不仅验证了并联 NTC 热敏电阻对提高 3 Ω 敏感型 SCB 火工品安全性的显著效果, 而且为 SCB 火工品在复杂电磁环境下的应用提供了技术支撑。

关键词: 半导体桥; 热敏电阻; 直流激励; 临界熔断电流; 安全性能

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.010

Study on the Influence of Parallel Thermistor on the DC Response of Semiconductor Bridge Transducer

JIN Hao-jie¹, NIU Hui-yuan¹, REN Wei¹, JI Xiang-fei¹, LI Hui¹, AN Cheng-yuan²

(1.State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 2.School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: Parallel thermistor is an effective measure to raise the critical fusing current of semiconductor bridge (SCB) initiating explosive device. The effects of parallel thermistor on the response of SCB under different DC excitation conditions were studied by using the constant current power supply and an infrared testing system. The temperature and the critical fusing current in the bridge area were tested, and the results show that the negative temperature coefficient (NTC) thermistor can significantly increase the critical fusing current of SCB to more than 1 times the SCB without an NTC. Additionally, the bridge area temperature is reduced by up to 68%, the shunting effect of the NTC thermistor is calculated to be between 34.4% and 74.4%. This study not only confirms the significant effect of parallel NTC thermistor on improving the safety performance of 3 Ω sensitive SCB initiating explosive devices, but also provides technical support for the application of SCB initiating explosive devices in complex electromagnetic environments.

Key words: Semiconductor bridge; Thermistor; DC excitation; Critical fusing current; Safety performance

半导体桥 (Semiconductor Bridge, SCB) 火工品采用微电子技术在硅基片或蓝宝石基片上制造精密的重掺杂硅桥作为点火起爆单元, 具有发火能量低、安全电流高和作用时间短等显著优势^[1]。相比于传统

的桥丝式火工品, SCB 火工品的发火能量低、安全性高, 并具有较强的抗射频、抗静电能力, 已广泛应用于武器弹药和航天领域装备中^[2-4]。随着战场电磁环境的日益复杂, 在长时间、高强度电磁干扰下, SCB 火

收稿日期: 2024-05-31

作者简介: 金豪杰 (2001-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事高新火工品技术研究。

通讯作者: 任炜 (1982-), 男, 研究员, 主要从事先进火工品及器件技术研究。

基金项目: 国防科技重点实验室基金 (No.6142603032107); “叶企孙” 科学基金 (U2341249)。

引用本文: 金豪杰, 牛惠媛, 任炜, 等. 并联热敏电阻对半导体桥换能元直流响应的影响研究[J]. 火工品, 2024(5): 66-70.

工品桥区会产生热积累,可能超出其耐受范围,进而影响 SCB 火工品的安全性。

国内外已有研究表明,通过在 SCB 火工品的两脚线端并联不同功能的防护器件,以分流加载于 SCB 火工品上的危害能量,可提高 SCB 火工品的安全性。李慧等^[5]设计了一种集成 PN 结防护结构的薄膜换能芯片,利用 PN 结结构的击穿效应,提高了换能芯片的抗静电和抗电磁脉冲的能力。郑子龙等^[6]在 SCB 极脚间并联负温度系数 (Negative Temperature Co-efficient, NTC) 热敏电阻,形成的 NTC-SCB 能够满足 1.5 A/2.25 W/5 min 不发火的高钝感要求,且 NTC-SCB 仍具有高瞬发性和低点火能量的特点。陈飞等^[7]将热敏电阻与半导体桥火工品并联,用于提高半导体桥的抗射频能力,结果表明该设计可显著降低射频干扰下 SCB 桥区温度。

但国内多数研究主要针对 1 Ω 的钝感 SCB 火工品,验证了并联 NTC 热敏电阻可有效衰减电磁干扰并提升不发火电流。而针对敏感型 SCB 火工品的防护研究暂无报道,且不同激励条件下的 SCB 桥区响应特性及临界规律研究较少。但在武器系统如炮弹、导弹、地雷中,敏感型 SCB 火工品作为点火或起爆装置,其快速响应和高安全性是不可或缺的。在安全系统、工业应用、军事装备、电子点火装置等领域,敏感型 SCB 同样因其小型化、高可靠性和抗干扰能力而被广泛应用。为了研究热敏电阻对敏感型半导体桥换能元直流响应的规律,本文以电阻为 3 Ω 的敏感半导体桥为研究对象,进行了不同直流激励下的临界熔断电流测试与分析研究,并采用红外测试系统研究并联热敏电阻前后半导体桥桥区的温度变化,为敏感型 SCB 火工品在复杂电磁环境下的应用提供参考。

1 负温度系数热敏电阻防护原理

NTC 热敏电阻在火工品中的安全防护设计原理是:利用热敏电阻负温度系数的特点,将 NTC 热敏电阻并联在半导体桥脚线两端,随着输入能量的增大,NTC 热敏电阻的温度迅速升高但电阻值迅速降低至

与桥区电阻同数量级,分走流经桥区的大部分电流,起到保护作用。

NTC 热敏电阻是一类电阻值随温度升高而减小的传感器电阻,其阻值随温度的上升而减小,阻值与温度之间的关系为^[8]:

$$R_T = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

式(1)中: R_0 为初温(298.15 K)下的电阻值; T_0 为初始温度,298.15 K;B为热敏电阻的材料系数,与热敏电阻本身有关。在 NTC 热敏电阻的选用中,B值是一个关键参数,它直接影响热敏电阻的响应特性。B值越大,热敏电阻对温度变化的响应越灵敏,其电阻值随温度的升高而降低的速率也越快。

基于对 SCB 火工品在不同环境温度下的安全性要求,以及对快速响应和高灵敏度的需求,本研究选取的热敏电阻在室温(278.15 K)的静态电阻值为 33 Ω ,与此静态电阻值相对应的 B 值为 2 750。通过试验验证,所选用的 NTC 热敏电阻在试验环境温度范围内(25 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$,即 298.15 ~ 303.15 K)展现出了良好的性能。而有关 NTC-SCB 的试验,最高温度小于 200 $^{\circ}\text{C}$ (473.15 K)。因此,将 T 定义在 300 ~ 500 K,得到 R_T 与 T 的负指数变化曲线,如图 1 所示。

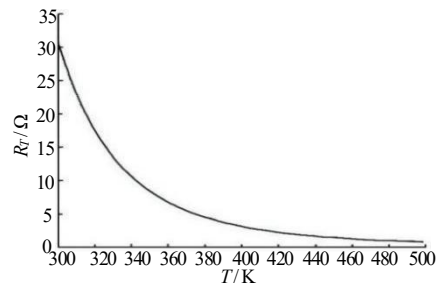


图1 R_T 与 T 的函数曲线图

Fig.1 Function graph of R_T and T

此外,通过监测 NTC-SCB 在稳定状态下的电阻值变化,进一步确认了所选 B 值的适宜性。电阻值的变化曲线与预期的 R_T 与 T 的关系一致。

2 NTC 热敏电阻防护性能试验研究

2.1 试验样品

试验选用某敏感型产品用半导体桥(SCB),样

品桥区电阻值为 $3\ \Omega$ ，SCB 结构示意图如图 2 所示，芯片桥区显微镜照片如图 3 所示。

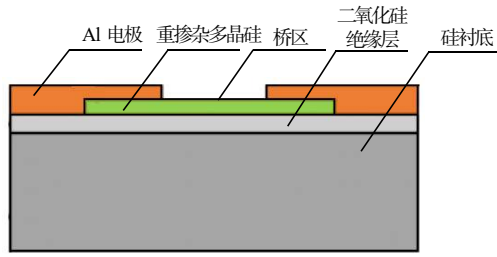


图 2 SCB 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SCB structure

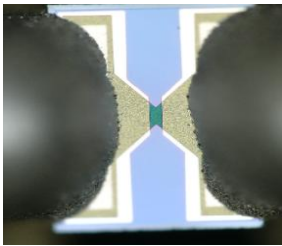


图 3 桥区光学显微照片

Fig.3 Optical micrograph of bridge area

图 2~3 中，SCB 芯片以硅为衬底，二氧化硅为绝缘层，以重掺杂多晶硅为发火部分，导电电极为 Al 电极。

为对比研究并联 NTC 热敏电阻的防护效果，在原样品（如图 4（a））的基础上，用焊锡将 NTC 热敏电阻并联接在半导体桥的脚线两端，热敏电阻位于陶瓷塞底部，形成 NTC-SCB，样品如图 4（b）所示。该 NTC 热敏电阻在室温（278.15 K）时的静态电阻值为 $33\ \Omega$ ，将其与 $3\ \Omega$ 的桥区并联，得到该条件下的理论阻值为 $2.75\ \Omega$ ，实际测得电阻值区间为 $2.71\sim 2.85\ \Omega$ ，样本量为 15。

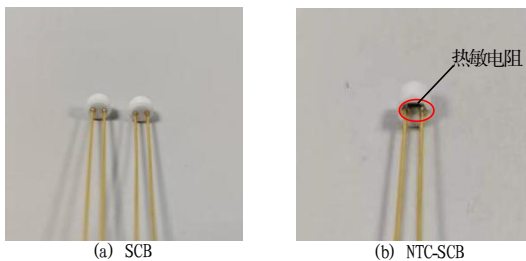


图 4 SCB 与 NTC-SCB 样品图

Fig.4 SCB and NTC-SCB sample diagram

2.2 试验装置与条件

测试系统由红外热像仪、量程为 $0\sim 30\ \text{V}/0\sim 5\ \text{A}$ 恒流源、计算机及 DZC-6S 型火工品电阻测量仪组成，具体如图 5 所示。

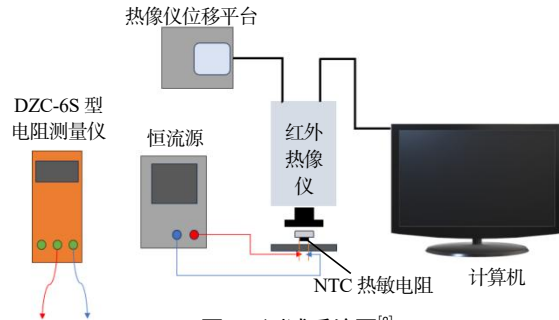


图 5 测试系统图^[9]

Fig.5 Test system diagram

图 5 中，红外热像仪用于记录 SCB 桥区静态及动态条件下的红外输出温度，恒流源用于提供恒定的直流激励，计算机用于试验过程记录及图像显示，电阻测量仪用于电阻等电性能参数监测。

本试验结合 SCB 电阻值的大小和敏感程度，主要开展 $0.10\sim 1.0\ \text{A}$ 激励条件下 SCB 和 NTC-SCB 2 种样品响应规律测试，重点研究不同激励下桥区红外响应温度、电性能参数变化和临界熔断电流情况，恒流激励测试的通电时间为 $5\ \text{min}$ 。

2.3 试验结果对比

通过试验测试，获取不同直流激励下 2 种 SCB 样品桥区变化情况，同时结合电性能参数监测，得到 2 种样品临界熔断电流和热平衡状态下对应温度。试验结果见表 1。

表 1 SCB 及 NTC-SCB 在不同直流激励下的桥区温度
Tab.1 Bridge area temperature of SCB and NTC-SCB under different DC excitation conditions

| 样品 | 输入电流/A | 桥区温度/ $^{\circ}\text{C}$ | |
|----|--------|--------------------------|---------|
| | | SCB | NTC-SCB |
| 1 | 0.10 | 35 | 31 |
| 2 | 0.20 | 63 | 60 |
| 3 | 0.25 | 96 | 62 |
| 4 | 0.30 | 147 | 115 |
| 5 | 0.35 | 203 | 78 |
| 6 | 0.40 | 331 | 77 |
| 7 | 0.45 | 断桥 | 95 |
| 8 | 0.50 | - | 120 |
| 9 | 0.60 | - | 103 |
| 10 | 0.70 | - | 114 |
| 11 | 0.80 | - | 119 |
| 12 | 0.90 | - | 116 |
| 13 | 1.0 | - | * |

注：“*”试验后测量样品电阻为 $20.9\ \Omega$ ，远远高于恢复至室温所测得的正常范围 $2.71\sim 2.85\ \Omega$ ，并且试验后观察样品的桥区形貌图，发现部分已烧蚀，认为桥区已经明显损坏。

分析表 1 的试验结果可知，在 $0.45\ \text{A}$ 的恒流激励下，未并联 NTC 热敏电阻的 SCB 发生了桥区熔断；与之相比，并联 NTC 热敏电阻的 NTC-SCB 在 $0.9\ \text{A}$ 的恒流激励下仍可正常输出，直至 $1.0\ \text{A}$ 激励后，通过观察桥区显微图，判断桥区发生明显损坏，如图 6

所示。

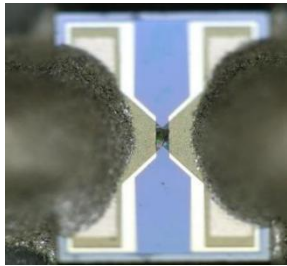
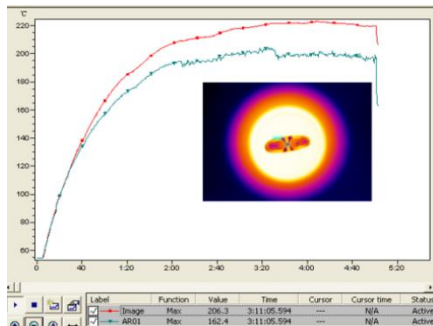


图6 1A 激励后 NTC-SCB 桥区形貌图

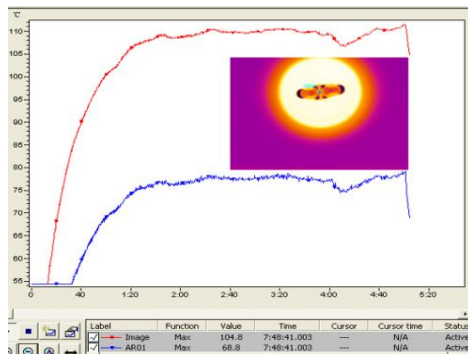
Fig.6 Morphology of NTC-SCB bridge area after 1A excitation

2.4 不同恒流激励下的桥区红外温度对比

试验过程中实时记录样品 SCB 桥区的红外温度，结合表 1 的试验结果可知：在 0.25 A 的恒流激励下，NTC 热敏电阻开始发挥作用；在 0.35 A 时，SCB 与 NTC-SCB 的红外温度对比图如图 7 所示，对应桥区温度分别为 203 °C 和 78 °C，表明并联 NTC 后，桥区温度显著下降，下降幅度达 62%。



(a) SCB 红外图 (桥区温度 203 °C)



(b) NTC-SCB 红外图 (桥区温度 78 °C)

图7 0.35 A 激励下桥区红外温度对比图

Fig.7 Comparison of infrared temperature of bridge area under 0.35 A excitation

为了进一步验证并联 NTC 热敏电阻的分流效果，给出不同直流激励下桥区的温度响应，0.40, 0.45, 0.50, 0.60 A 激励下的 NTC-SCB 桥区红外温度图如图 8 所示。

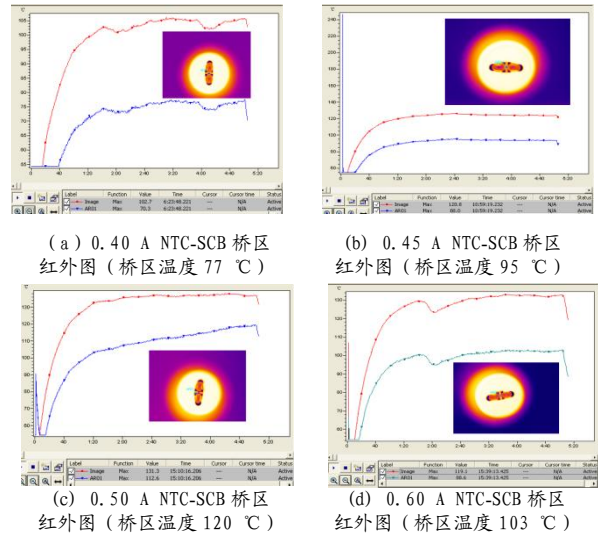


图8 不同电流激励下的 NTC-SCB 桥区红外温度图

Fig.8 Infrared temperature image of NTC-SCB bridge area under different current excitations

图 8 结果显示，随着激励电流的增加，桥区升温速度加快，并逐渐达到热平衡状态，对应温度分别为 106, 79, 120, 103 °C，均低于无 NTC 的 SCB 0.30 A 激励下对应的热平衡温度。

获得的测试温度较桥区温度略高，是由于热敏电阻的阻值效应导致电流激励条件下同样会产生温度积累。在热敏电阻热积累的复合作用下，导致器件的整体温度大于桥区温度。

试验还测试了对应条件下部分热敏电阻的温度情况，见表 2。由表 2 可见，热敏电阻温度均大于桥区温度，表明热敏电阻具备分流效果的同时，也是导致器件温度高于桥区温度的重要依据。

表 2 部分热敏电阻温度分布情况

Tab.2 Temperature distribution of some thermistors

| 输入条件/A | 热敏电阻温度/°C | 对应桥区温度/°C |
|--------|-----------|-----------|
| 0.25 | 83.4 | 62.0 |
| 0.30 | 102.7 | 115.0 |
| 0.35 | 110.5 | 78.0 |
| 0.40 | 166.8 | 77.0 |
| 0.45 | 116.0 | 95.0 |

2.5 分析与讨论

根据表 1 的试验数据进行拟合，得到 SCB 与 NTC-SCB 的桥区温度——电流变化曲线，如图 9 所示。

由图 9 可知：(1) 大约在 0.25 A/62 °C 时，NTC 热敏电阻开始起作用，在 0.35 ~ 0.40 A 之间时，桥区温度下降幅度最大，其中，在 0.4 A，NTC-SCB 桥区温度相比 SCB 桥区温度下降幅度达到 68%；(2) 在

红外输出温度相近时，例如 SCB (0.25 A/96 °C) 与 NTC-SCB (0.6 A/103 °C)，其桥区输出温度相近，但 NTC-SCB 对应的输入电流值要高 1 倍以上；(3) 对比 2 种样品临界熔断电流，并联 NTC 后临界熔断电流由 0.45 A 提升至 1.0 A 以上。上述结果均说明并联 NTC 热敏电阻的 NTC-SCB 能够有效降低桥区温度，有助于提升样品的临界熔断电流。

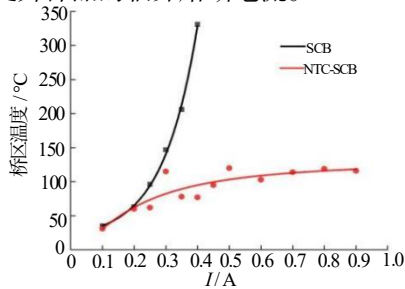


图9 NTC-SCB 与 SCB 桥区温度——电流变化曲线

Fig.9 Temperature vs current curves of NTC-SCB and SCB bridge area

试验过程中，对 NTC-SCB 达到稳定状态时样品的电阻值进行监测和记录，得到如图 10 所示的 NTC 热敏电阻在不同激励下电阻值变化曲线，结果表明，与图 1 所示 R_T 与 T 曲线变化趋势一致。

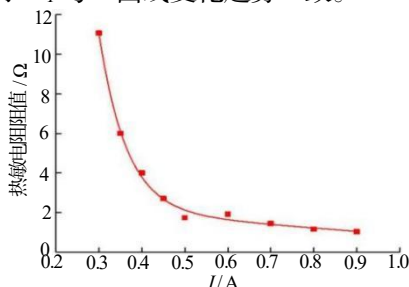


图 10 NTC 热敏电阻稳定时电阻变化曲线

Fig.10 Resistance change curve of stabilized NTC thermistor

由于在同种恒流激励条件下，电阻值是反映器件热积累量的关键参数，因此，在并联状态下，可通过 NTC 热敏电阻的电阻值占比来表征其分流效果，具体结果见表 3。表 3 表明在 0.3~0.9 A 输入电流下，NTC 热敏电阻的分流效果为 34.4%~74.4%。

表 3 热敏电阻在稳定时的分流效果

Tab.3 The shunt effect of a thermistor when stabilized

| 输入电流/A | NTC 热敏电阻值/Ω | 计算分流效果/% |
|--------|-------------|----------|
| 0.30 | 11.06 | 34.4 |
| 0.35 | 6.00 | 50.0 |
| 0.40 | 4.00 | 42.8 |
| 0.45 | 2.70 | 51.1 |
| 0.50 | 1.74 | 63.3 |
| 0.60 | 1.91 | 61.1 |
| 0.70 | 1.44 | 67.6 |
| 0.80 | 1.16 | 72.1 |
| 0.90 | 1.03 | 74.4 |

3 结论

本文分析研究了并联 NTC 热敏电阻对 3 Ω 敏感型 SCB 火工品半导体桥换能元直流响应的影响规律，通过试验测试与分析，得到如下结论：

(1) 并联 NTC 热敏电阻可将 3 Ω 的敏感型 SCB 的临界熔断电流由 0.45 A 提升至 1.0 A 以上，其电流安全性能提高 1 倍以上。

(2) 并联 NTC 热敏电阻可对 SCB 桥区温度进行衰减，对桥路电流进行分流，经测试与计算表明在 0.35~0.40 A 输入电流时，桥区温度下降幅度最大可达 68%；在 0.3~0.9 A 输入电流下，热敏电阻的电流分流效果为 34.4%~74.4%。

参考文献：

- [1] 任炜, 周智, 刘举鹏. 半导体桥点火器的设计与研究[J]. 火工品, 2007(6): 43-46.
- [2] 张文超, 张伟, 徐振相, 等. 半导体桥的研究进展与发展趋势[J]. 爆破器材, 2009, 38(2): 21-24.
- [3] 刘西广, 徐振相, 宋敬埔, 等. 半导体桥火工品的发展[J]. 爆破器材, 1995(4): 12-17.
- [4] 祝逢春, 徐振相, 陈西武, 等. 半导体桥火工品研究新进展[J]. 兵工学报, 2003(1): 106-110.
- [5] 李慧, 骆建军, 任炜, 等. 集成 PN 结防护结构的薄膜换能芯片[J]. 含能材料, 2023, 31(03): 222-228.
- [6] 郑子龙, 张文超, 秦志春, 等. 高钝感半导体桥发火性能研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 954-961.
- [7] 陈飞, 周彬, 秦志春. 负温度系数热敏电阻用于半导体桥火工品射频防护的研究[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(01): 171-175.
- [8] Baginski T. A., Johnson R.W. . A novel RF-insensitive EED utilizing a balanced reactive bridge[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1990(1): 69-73.
- [9] 任炜, 白颖伟, 杨光强. 火工品换能元红外热波无损检测研究[J]. 陕西兵工, 2010(3): 1-3.