

文章编号:1006-9941(2025)11-1333-08

## 基于电-磁-热耦合的半导体桥热爆安全性数值研究

马佳旭<sup>1</sup>,封 锋<sup>1</sup>,段佳宁<sup>1</sup>,张 晓<sup>1</sup>,高 博<sup>2</sup>

(1.南京理工大学 机械工程学院 特种动力技术教育部重点实验室,江苏 南京 210094; 2.华东光电集成器件研究所,安徽 蚌埠 233030)

**摘要:** 为满足半导体桥火工品对安全电流与抗电磁辐射功率的双重约束要求,基于GJB 344A-2020《钝感电起爆器通用规范》:不发火试验标准,采用数值模拟方法,在COMSOL Multiphysics平台构建电-磁-热多物理场耦合模型,通过集成负温度系数(Negative Temperature Coefficient, NTC)热敏电阻的并联分流机制,实时监测回路电阻并动态补偿电流输入,对比分析了恒流1 A、恒功率1 W及双约束1A1W 3种工况下热安全性的影响。结果表明:1 A恒流工况因回路电阻降至0.78  $\Omega$ ,功率仅为0.78 W,偏离标准22%;1 W恒功率工况初始电流为0.91 A,低于安全阈值。动态调整策略通过闭环控制实现电流与功率协同稳定,桥区热平衡温度控制在449.06 K,较1 A恒流工况分流率由29%提升至41.26%,较1 W恒功率工况分流率提升0.6%。

**关键词:** 半导体桥;火工品;安全电流;COMSOL仿真;NTC热敏电阻;多物理场耦合

**中图分类号:** TJ55;TJ45<sup>+</sup>9

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025063

## 0 引言

近年来,伴随武器朝着小型化、集成化、智能化方向发展,微型电火工品成为广泛研究的焦点<sup>[1]</sup>。半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)火工品以半导体膜作为换能元件,相比传统热桥丝火工品,具备作用时间短、输入能量低、安全性高、体积小等显著优势<sup>[2]</sup>,广泛应用于武器弹药、航天和民用爆破领域<sup>[3]</sup>。作为火工品中的触发元件,其在复杂电磁环境中的稳定性至关重要。钝感火工品需满足“1A1W5min不发火”安全标准,其中“1 A”指固有安全电流(发火电流通常为5 A),“1 W”指抗电磁辐射的最低功率要求<sup>[4]</sup>。

为提升SCB的安全性,学者们开展了诸多研究。Bernardo M T等<sup>[5]</sup>用金属Ti代替钨层,增强SCB的点火能力和提高可靠性。陈飞等<sup>[6]</sup>通过并联负温度系数(NTC)的热敏电阻,在温度上升至140  $^{\circ}\text{C}$ 时热敏电阻的阻值减小到1  $\Omega$ 以下,分流抑制桥区升温,提高了SCB

的抗射频能力。李勇等<sup>[7]</sup>通过1A5min恒流激励实验,发现NTC热敏电阻在25  $^{\circ}\text{C}$ 和70  $^{\circ}\text{C}$ 时分别分流59%和63%的电流,且对爆发性无显著影响。郑子龙等<sup>[8]</sup>探究了1 A和1.5 A激励下NTC热敏电阻的分流比及热平衡温度。李晨铭等<sup>[9]</sup>设计集成NTC热敏电阻的高钝感半导体桥火工品,验证了2 A条件下的安全性。上述研究将SCB钝感性能从1A1W5min提升至2A4W5min。与传统的桥丝火工品相比,该类火工品回路电阻变化明显,有时会小于1  $\Omega$ 。然而,以上研究的输入条件均为恒定电流,忽略了并联NTC热敏电阻会导致功率达不到最低要求的问题。当电磁辐射能量通过天线、孔隙和电缆等途径耦合进入武器系统内部,轻则引起武器系统性能的退化,严重则导致火工品误爆造成人员伤亡,因此在工程应用中约束火工品功率十分重要<sup>[10]</sup>。

为此,研究在“1A1W5min不发火”安全标准下,分别开展了NTC-SCB在恒流1 A工况、恒功率1 W工况及动态调整满足1A1W三种工况下对桥区温度和分流的影响研究,探究不同工况下NTC-SCB的性能响应机制。并且,研究采用数值模拟的方法,依据GJB 344A-2020<sup>[11]</sup>中的规定,通过实时监测回路电阻以动态调整电流的输入条件,确保回路同时满足安全电流和抗电磁辐射的最低要求,弥补恒流、恒功率工况的局限性,实现SCB火工品的钝感不发火要求,完善

收稿日期:2025-04-08;修回日期:2025-05-14

网络出版日期:2025-07-10

作者简介:马佳旭(1998-),女,硕士研究生,主要从事先进火工动力、传热研究。e-mail:mjx@njust.edu.cn

通信联系人:封锋(1982-),男,副教授,主要从事固体可控动力技术研究。e-mail:njust203@njust.edu.cn

引用本文:马佳旭,封锋,段佳宁,等.基于电-磁-热耦合的半导体桥热爆安全性数值研究[J].含能材料,2025,33(11):1333-1340.

MA Jia-xu, FENG Feng, DUAN Jia-ning, et al. Numerical Study on Thermal Explosion Safety of Semiconductor Bridge Based on Electro-magnetic-thermal Coupling[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(11):1333-1340.

钝感火工品安全性与可靠性研究, 为后续试验提供一种高效的数值评估方法。

## 1 数学物理模型

### 1.1 SCB 电极塞

研究的 SCB 模型包括陶瓷塞、SCB 组件、脚线、电极等。陶瓷塞采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷, 其顶部开有椭圆形凹槽, 用于放置 SCB 组件, 同时将 NTC 热敏电阻粘贴在电极塞底部。根据陶瓷塞的结构, 研究选用体积小贴片式 NTC 热敏电阻, 长度  $L=1.6\text{ mm}$ 、宽度  $W=0.8\text{ mm}$ 、高度  $H=0.8\text{ mm}$ , 其中热敏电阻阻值随温度变化的计算采用文献[8]中的关系式如式(1)所示:

$$R_t = 21.95 \exp \left[ 3046 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{297.93} \right) \right] \quad (1)$$

式中,  $T$  为 NTC 热敏电阻的温度, K;  $R_t$  为 NTC 热敏电阻在  $T$  温度下的阻值,  $\Omega$ 。

采用自由四面体网格对模型进行网格划分。由于进行电磁-电热耦合仿真时, 桥区散热不可忽略, 因此需要建立完整的桥区模型, 数值模型和网格划分如图 1 所示。

通过 COMSOL Multiphysics 软件<sup>[9]</sup>对 NTC-SCB 在不同电流条件下的温度变化进行模拟。基于基本物理过程, 模拟做出以下假设: 各组件之间热量传递以热

传导和热对流为主, 忽略热辐射效应, 且陶瓷塞、电极、脚线等组件的导热系数、比热容与电导率等物理参数在整个升温过程中保持恒定, 不随温度变化。模型中的材料都是均质、各向同性的。NTC 热敏电阻的阻值与电导率之间的关系<sup>[12]</sup>如式(2)所示:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为 NTC 热敏电阻的电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $l$  为 NTC 热敏电阻的长度, m;  $S$  为 NTC 热敏电阻侧面面积,  $\text{m}^2$ 。由于 NTC 热敏电阻阻值随着温度变化, 由式(1)和式(2)可得 NTC 热敏电阻电导率的关系式如式(3)所示:

$$\sigma_N = 1.14 \exp \left[ 3046 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{297.93} \right) \right] \quad (3)$$

根据文献[13]考虑桥区实际电阻会随着温度变化, 其中芯片电阻与温度的关系如式(4)所示:

$$R_s = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4)$$

式中,  $T_0$  下 SCB 芯片电阻和电阻温度系数分别为  $R_0$  和  $\alpha$ ;  $R_s$  为 SCB 芯片在  $T$  时刻下阻值,  $\Omega$ 。

数值模拟模型分为三部分: 电流模块、固体传热模块和电-磁-热耦合模块<sup>[14]</sup>, 涉及到的控制方程细分如下。

### 1.2 电流模型

在动态调整电流输入的过程中需要满足电流守恒, 其中电流密度、电位移矢量的表达式如式(5)所示:

$$\begin{cases} J_c = \sigma E \\ D = \epsilon_0 \epsilon_r E \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $J_c$  为电流密度,  $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\sigma$  为电导率,  $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $E$  为电场强度,  $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $D$  为电通密度,  $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\epsilon_r$  为相对介电常数, 由材料属性决定。

在整个研究过程中, 由于陶瓷塞、二氧化硅层、基底均为绝缘体, 因此在瞬态研究过程中, 须定义电绝缘, 其方程如式(6)所示:

$$n \cdot J = 0 \quad (6)$$

式中,  $n$  是法向单位向量;  $J$  是电流密度矢量,  $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

初始条件定义时, 在电极一端表面分别设定 1 A 恒流、1 W 恒功率、同时满足 1A1W 的三种工况条件, 另一端接地。电流的输入均以法向电流密度的方式给定, 其控制方程如式(7)所示。

$$-n \cdot J = J_n \quad (7)$$

式中,  $J_n$  是法向电流密度,  $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

### 1.3 固体传热模型

在本研究中, 各组件之间考虑热传导, 整个模型与空气之间考虑热对流<sup>[15]</sup>。通入电流的过程会产生焦耳热, 整个固体域间传热的控制方程式(8)所示:

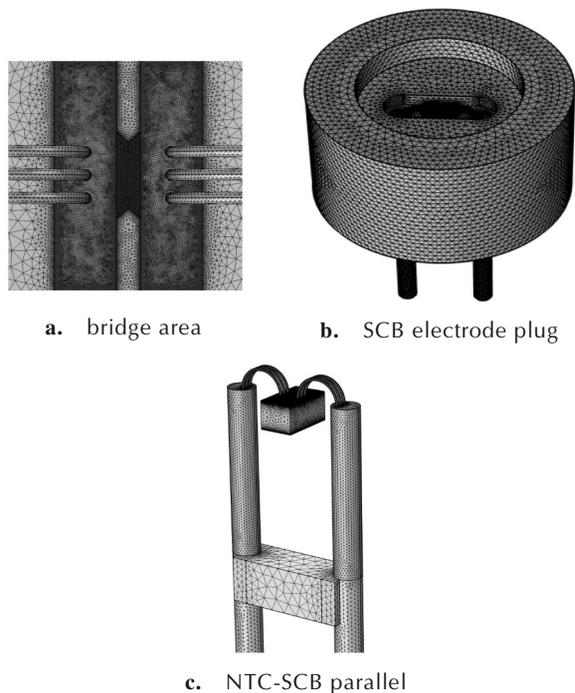


图1 网格划分图

Fig.1 Model and grid division diagram

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla q = Q + Q_{ted} \\ q = -k \nabla T \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_p$  为比热,  $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 为温度随时间的变化率,  $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q$  为桥区产生的焦耳热;  $Q_{ted}$  为外部热源,  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u$  为速度场,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\nabla$  为矢量运算符。

初始时刻, SCB 温度为 293.15 K (未通电流), 且均匀分布, 通电后 SCB 边界与外界空气因热对流产生热通量, 如式(9)所示:

$$q_0 = h(T - T_0) \quad (9)$$

式中,  $h$  为对流换热系数;  $T$  为某一时刻温度,  $\text{K}$ ;  $T_0$  为初始时刻温度,  $\text{K}$ 。

### 1.4 电热耦合模型

SCB 在通电以后由于焦耳热的作用导致温度升

高, 在桥区融化前是电热转换的过程, 瞬态电-磁-热耦合如式(10)所示:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (10)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_p$  为比热,  $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $u$  为速度场,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $Q_e$  为桥区产生的焦耳热。

## 2 模型验证

### 2.1 边界条件与参数

为得到准确可靠的计算结果, 在对模型进行数值模拟之前, 需要先设定符合实际工况的计算初始条件、边界条件和材料参数, 初始温度条件外部温度设定为 293.15 K, 具体设置见表 1。

表 1 模型材料及参数<sup>[16]</sup>

Table 1 Model materials and parameters<sup>[16]</sup>

name	material	$\sigma / \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\varepsilon$	$k / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ceramic seal	ceramics	$1 \times 10^{-10}$	9.5	24.7	3780
thermistor NTC	thermistor	Eq. (3)	11.0	400.0	460
electrode	aluminium	$3.78 \times 10^7$	1.0	238.0	2700
bridge area	polysilicon	$1.3 \times 10^5$	4.5	148.0	2320

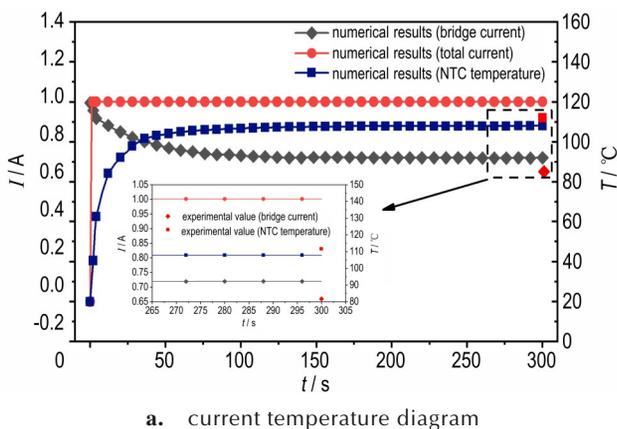
Note:  $\sigma$  is electric conductivity.  $\varepsilon$  is dielectric constant.  $k$  is thermal conductivity.  $\rho$  is density.

此外, 电流边界条件设置上, 为研究满足 1A5min、1W5min 和 1A1W5min 3 种不同工况下半导体桥的安全特性结果, 在电极一端表面分别设置对应的法向电流密度, 电极另一端表面设置接地。电绝缘边界条件设置上, 在工作的整个过程中, 陶瓷塞、半导体桥基层和二氧化硅层均为绝缘材料, 设为电绝缘边界。模型边界条件设置上, 在固体传热模块中, SCB

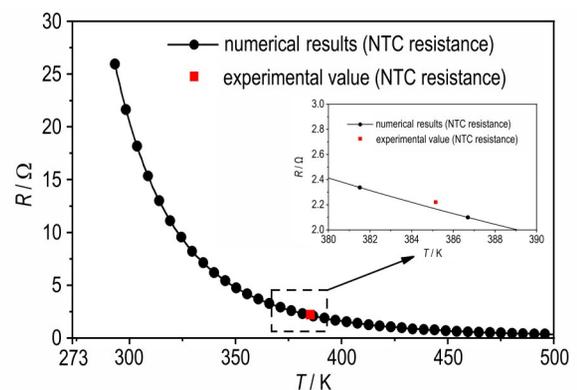
边界与空气之间进行的自然对流换热。采用瞬态求解器进行求解, 模拟时间范围为 0~300 s, 时间步长设为 1 s, 以观察半导体桥温度随时间的变化<sup>[17]</sup>。

### 2.2 数值模型结果

对 NTC-SCB 模型进行数值模拟, 为验证多物理场电-磁-热耦合计算方法的正确性, 与文献[8]中的实验数据进行对比, 结果如图 2 所示。



a. current temperature diagram



b. thermistor resistance value

图 2 1A 恒流实验值与数值模拟结果对比

Fig.2 Comparison of 1A constant current experimental value and numerical simulation results

由图 2a 可知, 当脚线底面通入 1 A 的电流时, 桥区因产生焦耳热温度上升, 由于热量的传递 NTC 热敏电阻的温度随之升高, 使得电阻持续降低, 导致回路电阻小于  $1 \Omega$ , 分流效果趋于显著, 继续通入 1 A 的电流导致回路功率低于 1 W。通过桥区的电流由最初的 0.995 A 约在 50 s 左右减小到 0.71 A, 相应地, NTC 热敏电阻的分流比由 0.5% 增加至 29%。图 2b 为数值模拟下的 NTC 热敏电阻阻值随温度变化曲线和文献 [8] 中实验值进行对比, 当 NTC 热敏电阻温度达到 381.07 K 时阻值为  $2.35 \Omega$ , 与实验电阻值的误差为 5.53%。当桥区产生的焦耳热速率等于系统向外的散热速率时, 模型达到热稳定平衡状态, 热平衡参数如表 2 所示, 表 2 罗列了实验中总电流、热平衡时 NTC 热敏电阻的温度、SCB 桥区电压和数值模拟计算值。由表 2 可见, 实验测量得到的数据与数值模拟计算值吻

表 2 热平衡参数对比

Table 2 Comparison of thermal equilibrium parameters

	thermal equilibrium parameters			
	total current / A	thermistor / $\Omega$	thermistor temperature / K	bridge current / A
experimental value <sup>[8]</sup>	1	2.22	385.15	0.66
simulation results	1.0013	2.35	381.07	0.71
calculation error	0.13%	5.53%	1.06%	7.04%

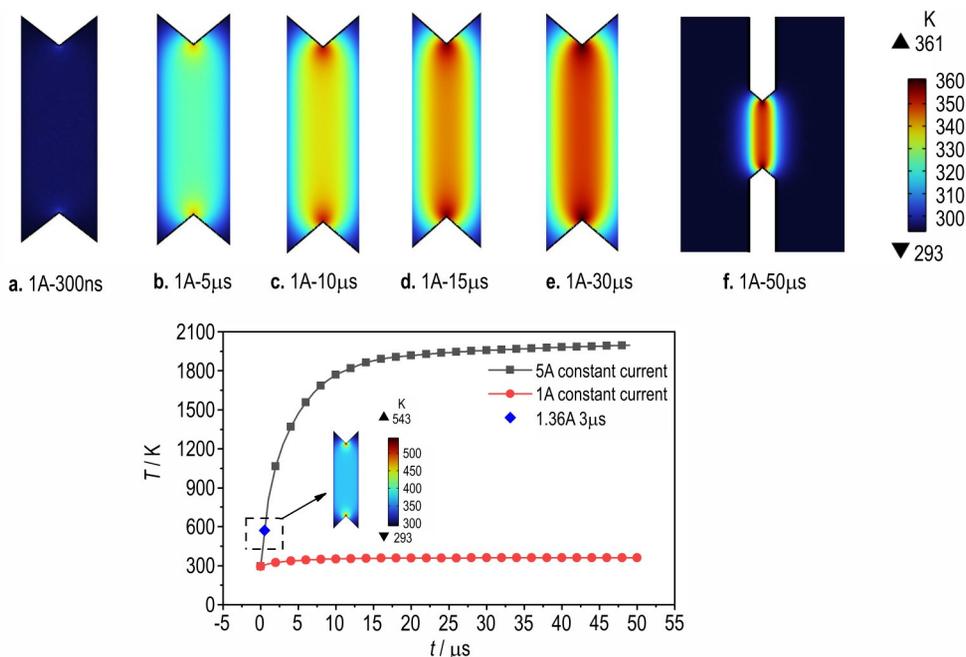
合良好, 误差均在 10% 以内, 验证了仿真流程与计算方法的可靠性和可信度, 能够满足工程设计的精度要求<sup>[18]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 恒流激励下桥区热响应特性分析

由于半导体桥 (SCB) 结构尺寸微小, 传热过程呈现瞬态特性, 且通常发生于微秒级时间尺度内<sup>[19]</sup>, 针对桥区  $50 \mu\text{s}$  内的热传递规律开展研究十分重要。采用并联 NTC 热敏电阻的 SCB 模型, 其中材料参数如表 1 所示, 设置求解时间为  $0 \sim 50 \mu\text{s}$ , 步长设置为  $1 \mu\text{s}$ , 选取桥区表面作为研究对象, 分别获取 1 A 恒流与 5 A 恒流激励下不同时刻桥区温度分布云图, 本研究结果表明热点最先出现在拐角处与文献 [20] 中的结论一致, 具体如图 3 所示。

由图 3a~f 可知, 1 A 恒流激励下, 受 NTC 热敏电阻影响, 桥区在  $50 \mu\text{s}$  内的温升过程被显著抑制, 在  $0.3 \mu\text{s}$  时桥区温度仅为 316 K, 温升幅度为 68 K。典型起爆药斯蒂酚酸铅 (LTNR), 燃温在 540 K 左右, 由图 3g 可知, 在 5 A 恒流激励下, 桥区升温呈现指数级增长趋势, 在  $0.3 \mu\text{s}$  时桥区温度已达 543 K, 该温度值已超过起爆药斯蒂酚酸铅 (LTNR) 的热激发阈值, 这一特性确保半导体桥可通过 NTC 热敏电阻实现能量的可控注



g. The temperature comparison result of 1A constant current and 5A constant current bridge area

图 3 1A 与 5A 恒流下桥区热响应温度及结果对比图

Fig.3 The thermal response temperature of the bridge area under 1A and 5A constant current and the comparison of the results

入,同时在微秒级时间内仍能达到起爆阈值<sup>[21]</sup>。

### 3.2 动态调整约束下电极塞热响应特性分析

为确保半导体桥火工品的安全性,对并联 NTC 热敏电阻的 SCB 组件系统开展 1.1A1.21W 至 1.5A2.25W

共 6 组动态调整工况的数值模拟研究,材料参数如表 1 所示。设置求解时间为 0~300 s,时间步长设为 1 s,监测电极塞热平衡温度,结果如图 4 所示。同步监测桥区温度随时间的变化,如图 5 所示。

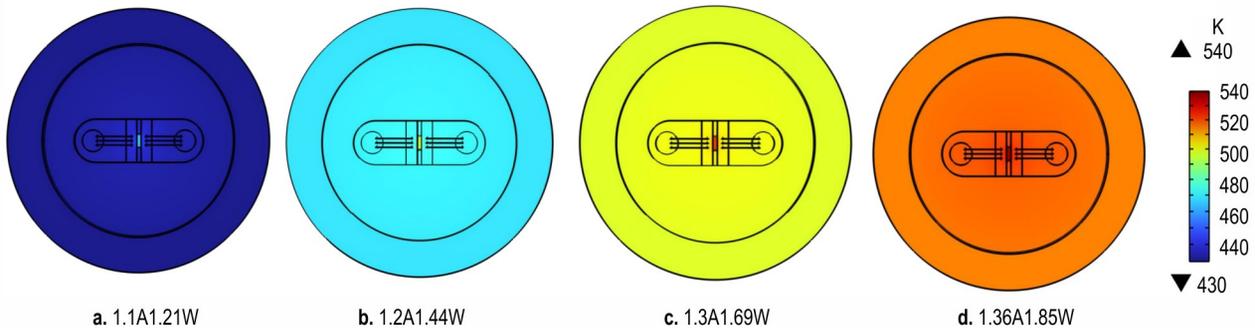


图 4 NTC-SCB 不同工况下的热平衡温度云图

Fig.4 Thermal equilibrium temperature cloud diagram of NTC-SCB under different working conditions

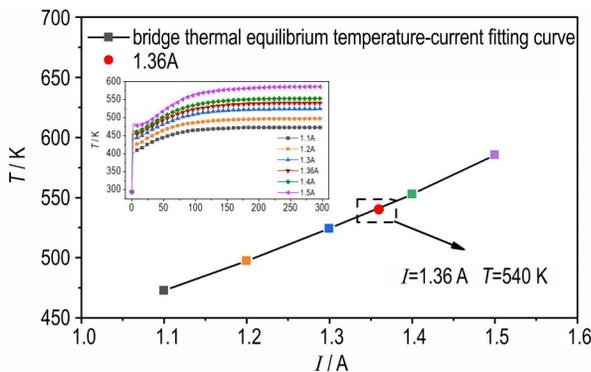


图 5 NTC-SCB 不同工况下桥区温度变化图

Fig.5 Temperature change diagram of the bridge area under different working conditions of NTC-SCB

由图 4 可知,随着工作电流的持续增加,桥区热平衡温度呈现阶梯式增长趋势,相邻工况间稳态温升幅度维持在 20~30 K。由图 5 可知,结合动态电流调控结果可知,当电流参数优化至 1.36 A(对应功率 1.85 W)时,桥区达到 540 K 的热平衡温度值,该结果为集成 NTC 热敏电阻的火工品安全边界的确定提供量化依据,避免因电流过大导致温度突破安全阈值引发意外起爆。同时建议在实际工程中设置电流阈值报警,与燃温保持一定的安全裕度,还能有效补偿温度波动和器件老化带来的风险。

### 3.3 三种工况激励下电极塞热响应特性分析

为探究电流和功率对半导体桥安全性能的影响,开展数值模拟研究,在模型导入软件后首先定义监测的总电压和总电流,得到总电阻。3 种工况分别为 1 A 恒流、1 W 恒功率以及 1A1W 在 300 s 下的电-磁-热耦合仿真。将 1A1W 工况结果分别与 1 A 恒流和 1 W 恒

功率进行对比,分析其电流、电压、功率和电阻的变化,相关结果如图 6 和图 7 所示:

由图 6 可知,在 1 A 恒流条件下,由于回路电阻持续降低(热平衡时  $R=0.78 \Omega$ ),实际功率仅为 0.78 W,偏离标准 22%,无法满足 1W 要求。但动态调整策略通过电流闭环补偿机制,使功率稳定在 1W 左右,回路电阻低于  $1 \Omega$  时,电流标准差随电阻降低呈单调递增趋势。1A1W 工况的电压随电阻下降逐渐稳定,波动逐步收敛,最终实现电流、功率、电阻的协同稳定。动态调整策略通过主动调节电流,解决了 1 A 恒流模式下功率不足的问题。图 6 反映的波动范围也表明其在满足 1A1W 约束时,对多物理量耦合变化的适应性更强,该策略在兼顾电流安全与功率需求方面更具优势。

由图 7 可知,在满足 1W 恒功率工况下,因初始并联电阻阻值大于  $1 \Omega$ ,导致通入的电流小于 1 A。随着桥区温度升高,29 s 时回路电阻开始小于  $1 \Omega$ ,电流逐渐增大,随着通电时间的增长,热敏电阻的阻值变化显著,与芯片并联后总电阻趋于  $0.61 \Omega$ ,电流趋于 1.28 A。1 W 恒功率工况虽功率稳定在 1 W,但未考虑电流超限风险;1A1W 工况不仅确保功率不低于 1 W,还通过电流调节规避安全隐患,实现电流-功率的协同控制。与 1 W 恒功率条件相比,1A1W 工况下的火工品热平衡温度略高,最终桥区温度稳定在 449.06 K, NTC 热敏电阻温度提高 12.18 K,分流率由 40.66% 提升至 41.26%,桥区温度均处于安全阈值范围内,满足火工品钝感不发火要求。上述 3 种工况热平衡的各项参数如表 3 所示。

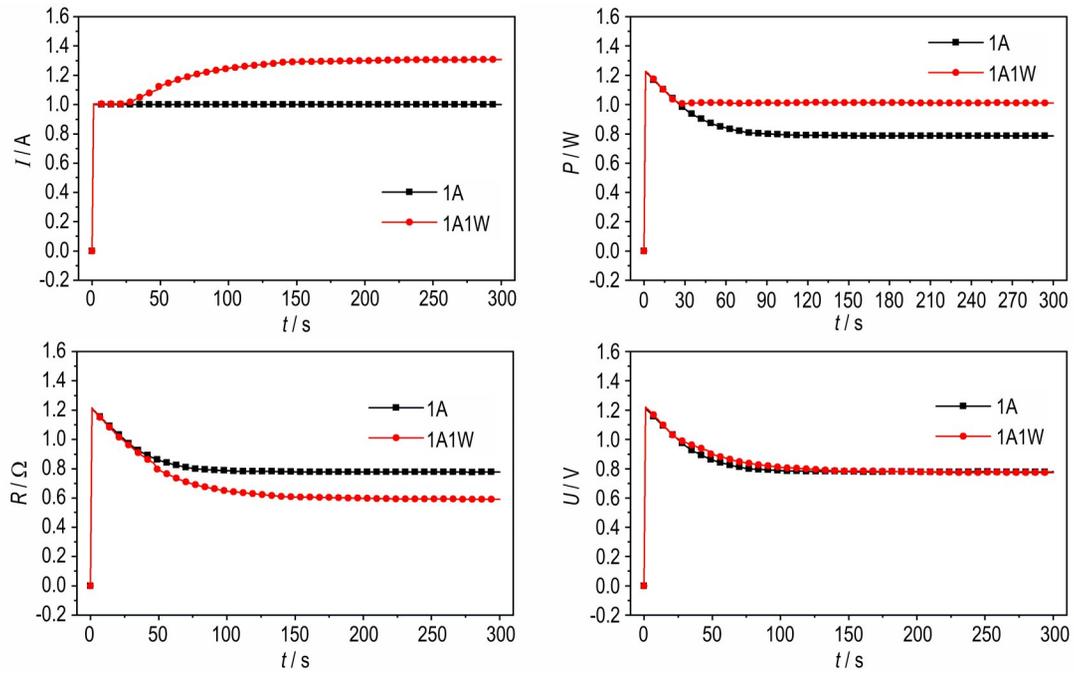


图6 1A恒流与1A1W工况干路的数据结果

Fig.6 Data of 1A constant current and 1A1W working conditions in the main circuit

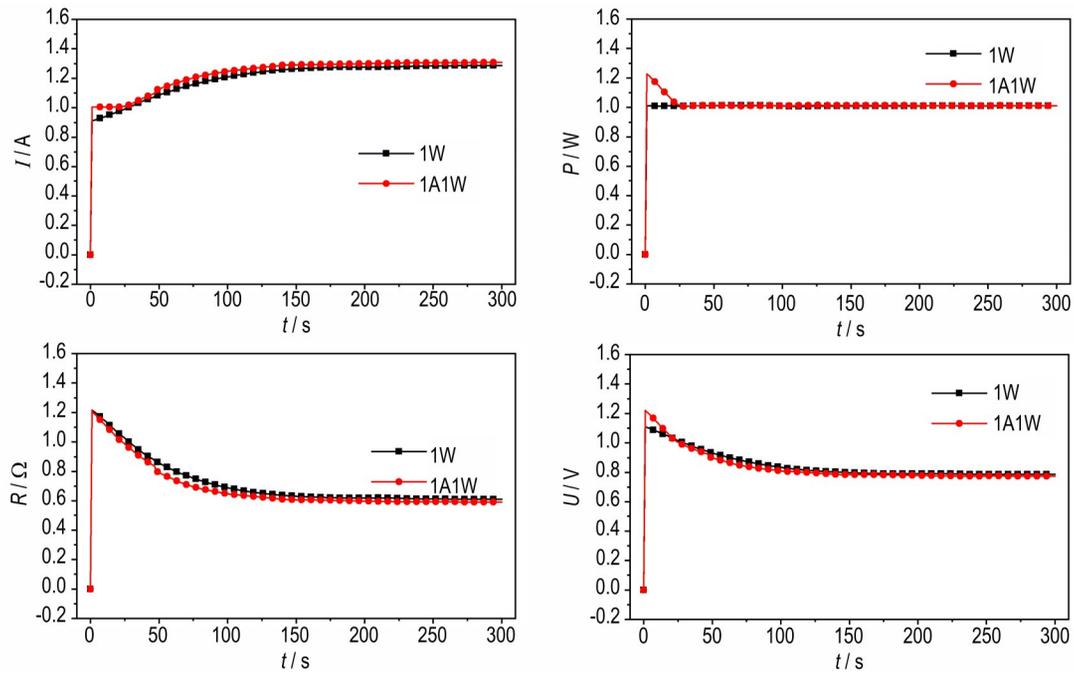


图7 1W恒功率与1A1W工况干路的数据结果

Fig.7 Data of 1W constant power and 1A1W working condition in the main circuit

表3 电极塞热平衡参数

Table 3 Heat balance parameters of electrode plug

current condition	total resistance / $\Omega$	total current / A	total power / W	NTC splitting ratio / %	NTC temperature / K
Satisfy 1A	0.78	1.0013	0.78	29.00	381.07
Satisfy 1W	0.61	1.28	1.00	40.66	405.08
Satisfy 1A1W	0.59	1.31	1.01	41.26	417.26

由表3可知,相较于恒流1 A工况,采用NTC热敏电阻并联结构的火工品在动态1A1W调控策略下可产生更高的热功率,分流率增幅达12.26%;与恒功率1 W工况相比,动态工况的分流率提升0.6%,更符合火工品的钝感设计要求。最终得到热平衡下恒流1 A、恒功率1 W分别与动态1A1W工况的电流、功率及电阻的偏差率,其中最大偏差率为恒流1 A下的电阻偏差,达到了24.36%。在恒流模式下的功率约束为关键控制指标,若功率低于1 W阈值,将导致火工品存在误爆风险。值得注意的是,恒功率1 W工况时总电阻的偏差较小,仅为3.28%,对应温度场的热平衡温升偏差较小,如表4所示。

表4 不同工况下的电参数最大偏差

Table 4 Maximum deviation of electrical parameters under different working conditions %

comparison condition	total current	total power	total resistance
1A1W vs 1A	23.56	22.77	24.36
1A1W vs 1W	2.29	0.99	3.28

## 4 结论

基于GJB 344A-2020标准要求,通过构建电-磁-热耦合数值模型,对并联NTC热敏电阻的火工品开展1A1W5min不发火试验的仿真研究。通过实时监测回路电阻动态调整激励电流,实现了安全电流( $\geq 1$  A)与抗辐射功率( $\geq 1$  W)的双约束控制,获得以下结论:

(1) 提出一种基于实时电阻反馈的快速数值评估方法,通过COMSOL耦合电-磁-热模块,在整个过程完成动态电流补偿,将仿真误差控制在10%以内。结果表明,动态调节对电流约束的修正率高于功率约束,验证了双参数闭环控制的必要性。

(2) 数据表明单一约束条件存在局限性,在1 A恒流工况下,NTC热敏电阻的负温度特性导致回路电阻降至 $0.78 \Omega$ ,功率仅 $0.78$  W,偏离标准22%;1W恒功率工况下,初始回路电阻 $>1 \Omega$ 时电流起初值为 $0.91$  A,偏离标准9.0%。动态调节模式较单一约束条件显著优化性能:与1 A恒流相比,NTC热敏电阻的热平衡温度提升 $36.19$  K,相对增幅9.5%,分流率由29%增至41.26%;与1 W恒功率相比,热敏电阻温度上升 $12.18$  K,相对增幅3.0%,分流率提高0.6%。

(3) 试验实施建议采用具备实时阻抗扫描功能

的程控电源,并在试验前对NTC热敏电阻进行 $-40\sim 230$  °C温域的特征曲线标定,以降低元件参数离散性导致的控制误差。同时,建议设置电流阈值报警,防止动态调节中温度超限风险。

## 参考文献:

- [1] XU J, ZHOU Y, SHEN Y, et al. Identifying the enhancement mechanism of Al/MoO<sub>3</sub> reactive multilayered films on the ignition ability of semiconductor bridge using a one-dimensional gas-solid two-phase flow model [J]. *Defence Technology*, 2024, 33(3): 168-179
- [2] YI Z, CAO Y, YUAN J, et al. Functionalized carbon fibers assembly with Al/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: A new strategy for high-reliability ignition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 389: 124254.
- [3] BENSON D A, LARSEN M E, RENLUND A M, et al. Semiconductor bridge: A plasma generator for the ignition of explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(5):1622-1632.
- [4] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014. WANG Kai-min. Engineering of initiators and pyrotechnics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [5] BERNARDO Martinez-Tovar, MARTIN C. Foster. Titanium Semiconductor Bridge Igniter: US11829526[P]. 2007.
- [6] 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(自然科学版), 2012, 36(1): 171-175. CHEN Fei, ZHOU Bin, QIN Zhi-chun. Application of NTC thermistors in radio frequency protection of semiconductor bridge initiators [J]. *Jouranal of Nanjing University of Science & Technology*, 2012, 36(1): 171-175.
- [7] 李勇,李凯,刘恩良,等. 负温度系数热敏电阻对半导体桥电爆性能影响[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 808-812. LI Yong, LI Kai, LIU En-liang, et al. Influence of NTC thermistors on electro-explosive performances of SCB [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 808-812.
- [8] 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. ZHENG Zi-long, ZHANG Wen-chao, QIN Zhi-chun, et al. Research on the Ignition Performance of High Insensitive Semiconductor Bridge [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(5): 954-961.
- [9] 李晨铭,冀小刚,王云鹏,等. 高钝感半导体桥安全性能研究[J]. 火工品, 2023(3): 7-13. LI Chen-ming, Ji Xiao-gang, WANG Yun-peng, et al. Research on the Safety Performance of High Insensitive Semiconductor Bridge [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2023(3): 7-13.
- [10] 王军,李勇,周彬,等. 电火工品电磁环境适应性的研究进展及展望[J]. 含能材料, 2017, 25(11): 954-963. WANG Jun, LI Yong, ZHOU Bin, et al. Research progress and prospect of electromagnetic compatibility of electro-explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(11): 954-963.
- [11] GJB344A-2020钝感电起爆器通用规范[S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2020. GJB344A-2020 General specification for insensitive electric initiators [S]. Beijing: Equipment Development Department of

- Central Military Commission, 2020.
- [12] 陈浩. 低电阻率高B值NTC热敏电阻制备及稳定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.  
CHEN Hao. Preparation and stability of NTC thermistor with low resistivity and high B value[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [13] LIU M F, ZHANG X B. The Theoretical Study of Semiconductor-Bridge Dynamic Resistance [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10 Pt.2): 2812–2818.
- [14] XU Jian-bing. Modeling the heating dynamics of a semiconductor bridge initiator with deep neural network [J]. *Micromachines*, 2022, 13(10): 1611.
- [15] CHEN J, HUA X, ZHANG X. Two-dimensional numerical simulation of thermo-electric coupling model in semiconductor bridge ignition system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 195–202.
- [16] 牛惠媛, 任炜, 李慧, 等. 半导体桥火工品电磁响应及其防护技术仿真研究[J]. 火工品, 2024(1): 43–47.  
NIU Hui-yuan, REN Wei, LI Hui, et al. Simulation study of electromagnetic protection of ignition chip [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2024(1): 43–47.
- [17] LU Y, GUO R, WANG J, et al. 3-D temperature measurement of transient plasma during semiconductor bridge electroburst with high-speed interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 181(Oct.): 108447.
- [18] 郭松军. 钢基体无熔深熔敷铜高频感应焊接数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.  
GUO Song-jun. Numerical simulation of high frequency induction welding of non-penetration deposited copper on steel substrate[D]. Nnanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [19] CHEN, J, ZHANG X. Investigations of electrical and thermal properties in semiconductor device based on a thermoelectrical model [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(3): 2392–2405.
- [20] 杨贵丽, 焦清介. 双V型半导体桥电阻计算方法研究[J]. 火工品, 2009, 34(3):1–5.  
YANG Gui-li, JIAO Qing-jie. Study on Calculation Method for Resistance of Double V-shaped Semiconductor Bridge [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009, 34(3):1–5.
- [21] ZUO B, ZHENG X, FENG C, et al. Investigation on heat transfer mechanism of semiconductor bridge ignition based on thermoelectric coupling analysis [J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35(March): 105820.

## Numerical Study on Thermal Explosion Safety of Semiconductor Bridge Based on Electro-magnetic-thermal Coupling

MA Jia-xu<sup>1</sup>, FENG Feng<sup>1</sup>, DUAN Jia-ning<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>, GAO Bo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Special Engine Technology, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. East China Institute of Photo-Electron IC, Bengbu 233030, China)

**Abstract:** In order to meet the dual constraint requirements of safety current and anti-electromagnetic radiation power of semiconductor bridge initiating explosive devices, based on GJB 344A–2020' General specification for insensitive electric initiators': Non-fire test standard, the electro-magnetic-thermal multi-physical field coupling model was constructed on COMSOL Multiphysics platform by numerical simulation method. By integrating the parallel shunt mechanism of negative temperature coefficient (NTC) thermistor, the loop resistance was monitored in real time and the current input was dynamically compensated. The effects of thermal safety under three working conditions of constant current 1A, constant power 1 W and double constraints 1A1W were compared and analyzed. The results show that the power of 1 A constant current condition is only 0.78 W, which deviates from the standard by 22% because the loop resistance is reduced to 0.78  $\Omega$ . The initial current of 1W constant power condition is 0.91 A, which is lower than the safety threshold. The dynamic adjustment strategy realizes the coordinated stability of current and power through closed-loop control. The heat balance temperature of the bridge area is controlled at 449.06 K, and the shunt rate is increased from 29% to 41.26% compared with the 1A constant current condition, and the shunt rate is increased by 0.6% compared with the 1 W constant power condition.

**Key words:** semiconductor bridge; initiating devices; safety current; COMSOL simulation; negative temperature coefficient thermistor; multiphysics coupling

**CLC number:** TJ55; TJ45<sup>+</sup>9

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025063

(责编: 姜梅)