文章编号：1003-1480（2025）05-0070-08

爆炸箔桥区微缺陷对发火能量转换效率的影响机制

周 密[1]，张 川[2]，李 蛟[1]，王蒋旭[3]，李 明[1]，郭 瑶[1]，雷 杰[1]

（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. 中国人民解放军93170部队，陕西 西安，710000 ；3. 西安北方庆华机电有限公司，陕西 西安，710025）

摘 要：为量化爆炸箔桥区微缺陷对其发火性能的影响，本文基于 COMSOL Multiphysics 构建了电热耦合三维有限元模型，系统对比了理想桥箔与含盲孔、通孔缺陷桥箔在 0.22 μF/1 500 V 放电回路中的瞬态温升及能量转换规律。结果表明：无缺陷桥箔通电后四角因电流密度集中率先升温，100 ns 内桥区中心温度达 1 400 K，桥区整体均匀熔化；含缺陷桥箔中，盲孔或通孔导致局部电流密度畸变，形成低温电流盲区，未熔金属碎片随射流飞散，能量转换效率显著降低（极端情况下相对降幅>21.7%）；缺陷尺寸效应呈现临界尺寸阈值，通孔直径>50 μm 或盲孔深度>3 μm 时，临界效应显著。当通孔直径>50 μm 时，桥区平均温升起点提前 3 ns，爆发时间缩短 33 ns；盲孔深度>3 μm 时，电流盲区范围扩大，能量转换效率相对降幅大于 8%。本研究首次建立了爆炸箔微缺陷容限的定量判据，为高可靠性火工品制造工艺优化提供理论支撑。

关键词：爆炸箔；微缺陷；电热耦合；有限元法；能量转换效率

中图分类号：TJ450 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.009

Impact Mechanism of Micro-defects in the Exploding Foil Bridge Region on Energy Conversion Efficiency During Ignition

ZHOU Mi[1]，ZHANG Chuan[2]，LI Jiao[1]，WANG Jiang-xu[3]，LI Ming[1]，GUO Yao[1]，LEI Jie[1]

（1.State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi’an, 710061; 2. Unit 93170 of the PLA，Xi’an, 710000; 3. Xi’an North Qinghua Electromechanical Co. Ltd., Xi’an, 710025）

Abstract： To quantitatively evaluate the influence of micro-defects(blind holes or through-holes) in the bridge region of exploding foil initiators (EFI), a three-dimensional electro-thermal coupled finite element model was established using COMSOL Multiphysics. Transient temperature rise and energy utilization were compared between defect-free and defective copper bridge foils under a 0.22 μF / 1 500 V discharge circuit. Results show that: for defect-free foils, the four corners heat first , and the centre reaches 1 400 K within 100 ns, leading to uniform melting; In defective foils, micro-holes distort local current density, forming low-temperature “current blind zones”; Unmelted metal fragments are ejected with the plasma jet, significantly reducing energy conversion efficiency (up to 21.7 % relative decrease in extreme cases). A critical size threshold is identified: when the through-hole diameter exceeds 50 μm or the blind-hole depth exceeds 3 μm, the threshold effect becomes pronounced. Specifically, for through-holes > 50 μm, the average temperature rise onset advances by 3 ns and the burst time is shortened by 33 ns; for blind-holes > 3 μm the current blind zone expands, and the relative decrease in energy conversion efficiency exceeds 8 %. This study establishes quantitative defect-tolerance criteria for EFI micro-defects for the first time, providing theoretical support for optimizing the manufacturing process of highly reliable pyrotechnic devices.

Key words：Exploding foil initiator；Micro-defects；Electro-thermal coupling；Finite element analysis；Energy conversion efficiency

收稿日期：2025-02-26

作者简介：周密（1984-），女，研究员，从事先进火工品技术研究。

通讯作者：李明（1982-），女，高级工程师，从事火工品测试技术研究。

基金项目：国家十四五预研项目（90903050301）。

引用本文：周密，张川，李蛟，等.爆炸箔桥区微缺陷对发火能量转换效率的影响机制[J]. 火工品, 2025(5):70-77.

桥箔作为爆炸箔火工品的核心换能元件，其性能直接影响到火工品的作用可靠性以及低能化和小型化的实现。其材料选型、结构参数以及工艺质量共同决定了起爆阈值和能量转换效率，因此一直是国内外研究的热点[1]。然而，受基底粗糙度、沉积环境、刻蚀工艺及转运过程等多因素影响，桥箔表面常残留盲孔、通孔等缺陷，完全消除薄膜缺陷在工程上难以实现[2-4]。造成薄膜缺陷的核心环节，大致可归纳为 4 类：（1）沉积污染。真空腔内残留的粉尘与微粒随膜层共沉积，溅射功率及速率的波动进一步降低薄膜致密性，诱发孔洞。（2）基底缺陷。基片表面原有的凹坑、裂纹等形貌在沉积过程中被复制扩展，形成尺寸不一的盲孔和通孔。（3）图形转移。光刻及刻蚀过程中的过刻、侧蚀或胶残留易在桥区留下物理缺口。（4）后道损伤。划片、转运、封装等工序的机械刮擦、碰撞会在表面产生微缺陷。这些缺陷的存在将对爆炸箔的起爆过程中的爆发时间和能量转换效率产生显著影响。定量研究缺陷对桥区热量分布的扰动规律，可以为爆炸箔的检验提供表面缺陷控制的依据，对爆炸箔火工品的工程应用和质量控制具有指导意义。

金属爆炸箔电爆炸全过程可划分为 4 个阶段：（1）高压开关闭合后，储能电容向桥箔释放脉冲电流；（2）桥箔因焦耳热效应而升温，局部金属熔化并气化；（3）电流与气态金属相互作用，形成高温高压等离子体；（4）等离子体膨胀驱动飞片，实现冲击起爆。其中前 2 个阶段直接决定了等离子体的生成效率和飞片动能，因此深入解析桥箔在此期间的温升机制具有重要的学术价值。国外在桥箔表面缺陷的研究方面起步较早，并已形成一些成熟的理论基础。Cutting 等[5]于 1994 年发现美军批量生产的金属桥箔存在划痕缺陷，但未对缺陷引起的电热特性变化做定量分析。2008 年，Morris C J 等[6]运用有限元软件模拟了理想箔的熔化过程。国际研究已将桥箔电爆炸的诊断与模拟推进至三维、多物理场层面。2016 年，美国 Los Alamos 国家实验室[7]采用 X 射线相衬成像技术对完整桥箔的熔化过程、含缺陷桥箔的热量分布以及飞片的生成过程进行了高速摄影并进行了三维重建。2017 年，Neal W 等[8]利用高速摄影捕捉到桥箔表面不均匀性导致的温度场畸变。相比之下，国内进展相对滞后，现有工作多停留在一维或二维简化框架，空间分辨率不足，难以揭示微米级缺陷与电流收缩之间的耦合机理。王亮等[9]于 2012 年运用有限元软件探讨了桥箔尺寸对熔化时间的影响，但未涉及缺陷效应；胡博[10]在 2015 年以正弦电流作为激励源，分析了厚度对熔化特性的作用，同样未建立缺陷模型。陕西应用物理化学研究所[11]在 2018 年采用故障树分析指出，微小通孔或边缘凸起可使发火电压显著增加，但缺乏定量温度场与电流场的支撑。

综上所述，国内外尚未建立可直观描述缺陷诱导电流集中并量化其对熔化过程影响的三维电热耦合模型。本研究采用多物理场耦合仿真软件（COMSOL），建立了桥箔在电容放电回路作用下的电热耦合模型，首次将盲孔、通孔缺陷引入三维有限元框架，系统研究其对桥区热量累积、熔化均匀性及能量转换效率的作用规律，并通过实验对比验证了模型可靠性，为建立高可靠性桥箔缺陷容限标准提供理论依据。

1　理论模型

1.1　电热耦合方程

为定量表征微缺陷对桥箔能量沉积的影响，建立脉冲电流作用下的三维瞬态电热耦合理论框架。金属桥箔为厚度 4 μm 的铜薄膜，在 0.22 μF／1 500 V 脉冲放电条件下，因焦耳效应产生热量，导致其温度在极短时间内急剧升高。热能传递过程遵循经典热传导方程：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla T-\nabla\cdot(k\nabla T)=Q \qquad (1)$$

式（1）中：ρ 为材料密度，kg・m^{-3}；c 为恒定压力条件下材料的比热容，J・(kg・K)$^{-1}$；T 为桥区的平均温度，K；$\vec{u}$ 为速度矢量，m・s^{-1}；Q 为附加热源项，W・m^{-3}。

针对铜材料，其恒压比热容 c_p 与热导率系数 k 随温度 T 呈线性变化关系，具体表达式如式（2）~（3）所示[6]：

$$c_p = 0.100\,4\,T + 355.12 \quad (2)$$

$$k = -0.068\,5\,T + 420.75 \quad (3)$$

电流分布行为由电磁场基本定律支配，包括电流守恒定律、麦克斯韦-安培方程及法拉第定律。电流密度方程如式（4）所示：

$$\nabla \cdot J = Q_{j,v} \quad (4)$$

式（4）中：J 为电流密度，A・m^{-2}；$Q_{j,v}$ 为电流源项，A・m^{-3}。

进一步扩展电流密度表达式：

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (5)$$

电流强度与电势关系为：

$$E = -\nabla V \quad (6)$$

式(5)~(6)中：D 为电位移或电通量密度，C・m^{-2}；J_e 为感应电流（反映非线性介质引起的电通量与磁通量非线性修正项）；σ 为电导率，S・m^{-1}，其值由铜的电导率-温度线性关系确定，具体表达式见式（7）。

本研究通过多物理场耦合方法，将电磁功率耗散作为热源纳入热能方程。电导率 σ 在高温条件下（$T \geqslant 3\,000$ K）遵循线性模型：

$$\sigma = \rho_0 (1 + \alpha_e (T_0 - T)) \quad (7)$$

式(7)中：ρ_0 为参考温度 T_0 下的电导率，S・m^{-1}；α_e 为电导率温度系数，K^{-1}。对于金属铜，参数取值：$\rho_0 = 0.8 \times 10^8$ S・m^{-1}，$T_0 = 250$ K，$\alpha_e = 0.005\,4$ K^{-1}。

电磁热源项 Q_e 由电场与电流密度计算，得到公式（8）：

$$Q_e = J \cdot E \quad (8)$$

式（8）中：Q_e 为电磁热源，W・m^{-3}。

将式（8）的 Q_e 作为式（1）的附加热源项，通过联立求解方程组（1）~（8），可以实现桥箔在电容短路电流作用下的热源动态计算，为后续电热耦合仿真提供理论基础。

1.2 基本假设与物理简化

本研究选取金属铜作为爆炸箔的典型材料。其作用机制如下：电路闭合后，电流流经铜桥箔时，因桥区中心部位的几何特征尺寸显著小于桥箔整体，导致电流密度在桥区高度集中，进而引发焦耳热效应。随着电流强度的急剧上升，热量在桥区快速累积。此过程伴随对流散热（主要发生于桥区中心与空气接触界面）和表面热辐射散热（主要发生于桥区高温暴露表面）等多种散热机制。基于已有的研究成果可知，电阻减小诱发的磁压效应峰值压力低于 10 MPa，且集肤效应的特征时间尺度远大于桥箔电爆炸的瞬态过程，不足以对温度分布产生显著影响。因此，本研究在建模分析中忽略磁压效应和集肤效应。

利用 COMSOL Multi-physics 软件的焦耳热模块进行仿真模拟，并作出以下假设：

（1）热传递主导机制：整个桥区结构内部的热量传递以热传导方式为主；对流散热仅限于桥区中心与空气直接接触的界面区域；表面热辐射则主要发生在中心桥区与外界环境相接触的高温表面。

（2）恒定导热系数：除特别说明外（如比热容），模型中所有材料的导热系数设定为不随温度变化的恒定值。

（3）能量转化与物性变化：假设输入能量完全转化为金属桥箔的内能。材料的比热容等物理属性依据给定的温度函数关系；铜箔的电阻率则根据其物理状态（初始加热、本征爆炸、等离子体形成）进行分段变化处理[12]。

1.3 边界与初始条件

为准确表征桥区箔材与环境间的热交换，需重点考虑其与空气的接触界面。该界面需同时引入两种散热机制：对流换热模型，用于模拟空气对桥区表面的强制/自然对流散热，作用于桥区与空气接触的全部表面。表面辐射传热模型，用于模拟高温桥区表面（特别是温度显著升高的区域）对周围环境的热辐射散热，仅施加于桥区与外界热辐射交换显著的表层区域。对于模型中未参与外部热交换的其他表面（如内部截面或结构对称面），需设定为热绝缘及电绝缘边界条件，即表面法向热流密度为零（$\nabla T \cdot n = 0$）且法向电流密度为零（$\nabla V \cdot n = 0$）。具体边界条件设置见图 1。

仿真模型构建与几何参数：本研究基于实际工程尺寸，利用 COMSOL Multiphysics 软件构建了金属铜桥箔的三维有限元模型以模拟其在强电流作用下的电-热耦合特性。模型关键几何参数如下：桥区中心几何尺寸设定为 0.5 mm × 0.5 mm；夹角为 45°，桥区的 4 个圆角半径 R 设定为 0.1 mm，桥区厚度为 4

μm。桥箔的总长度和总宽度分别为 12 mm 和 4 mm。桥箔及其中间桥区尺寸的建模示意图如图 2 所示。

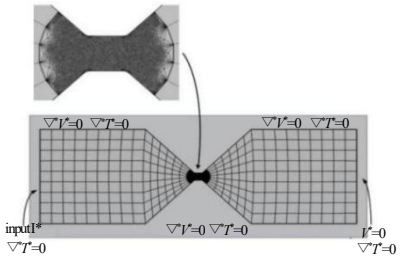


图 1　桥箔网格划分及边界条件示意图

Fig. 1　Schematic diagram of mesh generation and boundary conditions for the bridge foil

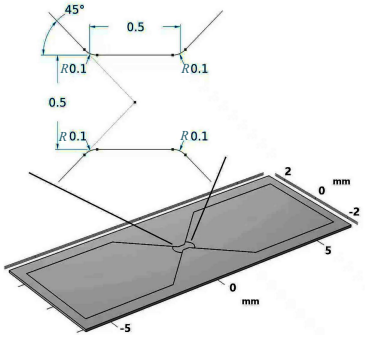


图 2　桥箔与桥区尺寸建模示意图

Fig.2　Schematic diagram of the dimensional modeling of the bridge foil

1.4　放电回路

在电爆炸过程中，首先通过电源对 0.22 μF 的电容器充电。考虑到放电回路中导线分布参数的影响，回路等效电感为 120 nH。电容器充电达到设定的电源电压（1 500 V）时，即视为充电过程完成。充电完成后，起爆系统接收到起爆指令后，高压开关闭合，电容器开始放电，产生高幅值脉冲电流。在该脉冲电流的作用下，金属铜桥箔发生电爆炸。电感和电容值分别为 120 nH 和 0.22 μF。通过实施放电回路短路测试，可以精确计算出回路的电感 L 和电阻 R。将这些计算值代入桥箔回路电流的计算公式中，即可获得桥箔流过的电流值。该电流值是依据式（9）计算得出的。基于此方程，计算所得的电流曲线与实验曲线在第 1 个放电周期内保持一致，且在放电周期的前半段，计算曲线与实验曲线的放电电流曲线基本吻合，误差不超过 10%。这一结果表明，所采用的计算模型参数选择与实际应用情况基本相符。

$$I=U_0\left[\sqrt{\frac{1}{LC}-\left(\frac{R+R(t)}{LC}\right)^2}L\right]^{-1}\mathrm{e}^{-\frac{(R+R(t))t}{2L}}\sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC}-\left(\frac{R+R(t)}{LC}\right)^2}t\right) \quad (9)$$

式（9）中：U_0 为充电回路的电压；L 为计算所得的充电回路电感值；R 为回路电阻；$R(t)$ 为桥箔在爆炸过程中电阻随时间变化的函数。初始时刻桥区温度设定为 273.15 K，即环境温度。桥箔的输入模拟电容值 C 为 0.22 μF 的电容放电单元，用于模拟该电容在 1 500 V 充电电压、120 nH 电感值下的短路放电波形，如图 3 所示。将短路放电波形输入桥箔，桥箔因焦耳热效应产生热量，导致温度升高。随着温度的上升，桥箔铜材料的电导率 R_e 将随时间递减，从而实现温度与电流波动的耦合效应。

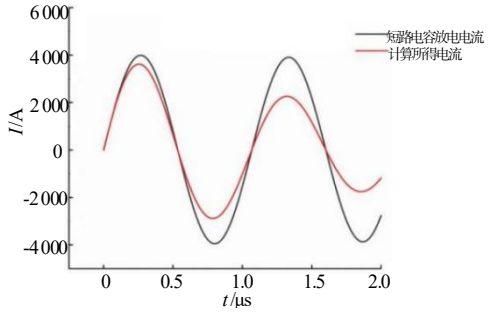


图 3　计算电流与电容电路放电电流对比

Fig. 3　Comparison between calculated current and capacitor circuit discharge current

2　有限元仿真与验证

2.1　脉冲电流作用下桥箔温度的变化

在脉冲电流作用下，金属铜爆炸箔产生焦耳热效应，进而影响桥箔区域的温度分布。通过计算分析，可获得在不同爆炸时刻的理想状态下桥箔的温度变化情况，具体结果如图 4 所示。

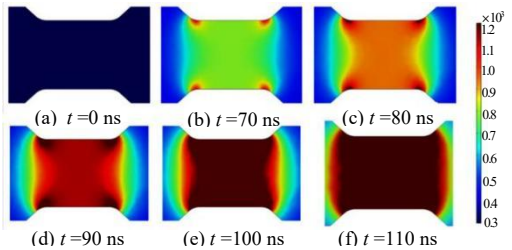


图 4　无缺陷铜箔温度变化

Fig. 4　Temperature variation of defect-free copper foil

由图 4 可见，在爆炸初始的 100 ns 内，桥区的 4 个角落区域温度率先出现上升趋势，而桥区其他部分的温度增长则相对缓慢。随着脉冲电流作用时间的延长，桥箔 4 角区域温度的率先升高导致了电导率的下

降。然而，桥箔中心区域的温度相对较低，电导率较高，电流的流向使得桥箔其他区域的温度逐渐升高，进而促进了桥箔整体的熔化。在 100 ns 时，桥区中心温度达 1 400 K，已高于铜的熔点（1 357 K），桥区中心的深红色区域完全熔化。若脉冲电流持续作用于爆炸箔，桥区将经历更广泛的熔化和气化过程，随后电流将对铜蒸气进行电离，产生等离子体，并形成电爆炸等离子体冲击波。鉴于目前计算 3D 模型等离子体状态方程存在较大挑战，本研究通过热量计算来分析电爆炸过程。

2.2 缺陷桥箔温度变化

基于理想状态下爆炸桥箔的研究成果，进一步考虑在爆炸桥箔制备过程中不可避免地产生的盲孔、通孔等缺陷问题。通过前文构建的金属铜桥箔的 3D 模型，分析了这些缺陷对桥箔电爆炸过程的具体影响。鉴于在生产和运输过程中缺陷的出现位置随机性较大，本研究中缺陷位置的选取以实际观测到的样品桥箔中的缺陷位置为基准。

2.2.1 盲孔缺陷分析

盲孔缺陷底面半径 0.01 mm，深度 3 μm。桥箔厚度为 4 μm。盲孔的孔径和深度数据是通过白光干涉仪测得的。基于这些实际测量数据，对盲孔缺陷的桥箔进行了建模分析。含单盲孔金属铜箔在不同时刻（0, 70, 80, 90, 100, 110 ns）的温度分布变化如图 5 所示。

分析图 5 可知，盲孔形成导致其周围局部区域的温度迅速升高，且升温速率显著高于其他区域。然而，这一现象对桥区整体熔化时间的影响相对较小。在 90 ns 时刻的温度分布图可见，沿电流主要流向（垂直于盲孔轴线方向），盲孔两侧形成了两处电流难以有效流经的区域（电流盲区）。这两个盲区的温度远低于铜的熔点（1 400 K），并且持续吸收放电回路的能量。仿真结果表明，位于电流盲区的未熔融金属碎片将随等离子体射流分散，这不仅降低了爆炸桥箔对电容初始储存能量的有效利用率，还可能干扰飞片在加速膛内的飞行姿态。盲孔周围不同位置点（图 6 中标注为点 1~点 4）的温度随时间上升曲线如图 6 所示。由图 6 可见，盲孔周围温度分布呈现明显的不均匀性：位于盲孔左右两侧的点 1 和点 4，其温度上升速率明显慢于上下两侧的点 2 和点 3）。这进一步证实了盲孔左右两侧所在区域形成了电流盲区。电流盲区焦耳热效应微弱，导致该区域桥箔在 110 ns 内无法达到熔融温度。这些未完全熔化的金属碎片在电爆炸过程中极可能以微小飞片形式随热射流喷出，将本应转化为等离子体内能和飞片动能的部分电能无效耗散，从而显著降低了发火过程的电能转换效率。高速摄像机拍摄到的实验中爆炸射流中的碎片如图 7 所示。

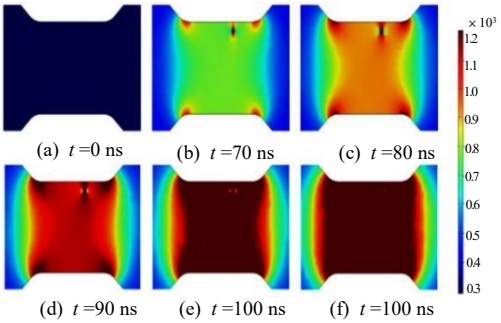


图 5 含单盲孔金属铜箔温度变化

Fig. 5 Temperature variation of copper foil with a single blind hole

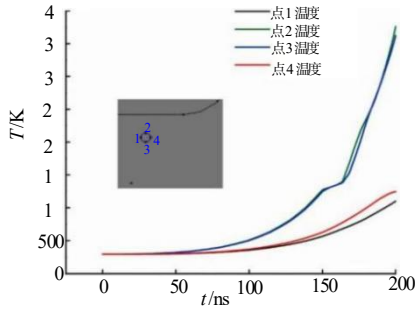
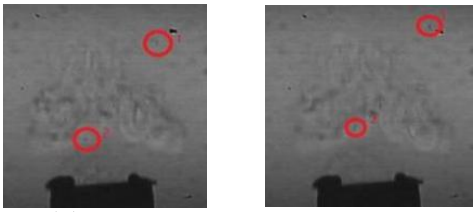


图 6 盲孔周围温度随时间变化曲线

Fig. 6 Temperature rise curves over time at different locations of the blind hole



（a） t=3 ms （b） t=4 ms

图 7 高速相机拍摄的未熔化金属碎片图像

Fig. 7 High-speed camera images of ejected small fragments

图 7 表明，桥箔缺陷的存在的确会导致桥区局部区域发生不完全爆炸，产生金属微碎片并进入后续驱动飞片的过程。

2.2.2 通孔缺陷

通孔位于桥区右上角，底面半径为 0.01 mm。通孔的具体位置与精确尺寸通过光学显微镜和白光干涉仪获得。含单通孔金属铜箔在 0, 70, 80, 90, 100, 110

ns 等关键时刻的温度分布变化如图 8 所示。

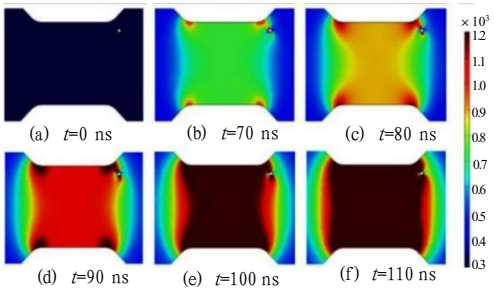


图 8　含单通孔铜箔温度变化

Fig. 8　Temperature variation of copper foil with a single through-hole

由图 8 可见，通孔上端区域同样形成了两处电流难以有效流经的盲区。与前述盲孔缺陷相比，通孔导致的电流盲区范围更大。此外，对比桥区达到相同温度水平的时间发现，通孔的存在显著加快了桥区的整体熔化进程，进而导致桥箔的爆发时间缩短。具体通孔各处温度随时间的变化规律如图 9 所示。

由图 9 可见，点 2 处的温度最先开始上升，表明桥区熔化首先发生在该位置。这一现象源于通孔导致的电流分布改变，通孔的出现迫使电流在通孔上方区域高度集中。电流在通孔上下方区域的集中导致了这些区域的桥箔温度率先急剧升高。相反，位于通孔左右两侧的点 2 和点 3（对应于图 9 中的曲线），其温度在爆发时间窗口内（约 200 ns）均无法达到铜的熔点，形成未熔化的金属碎片。这种桥区熔化不完全的现象直接造成爆炸箔火工品部分失效。

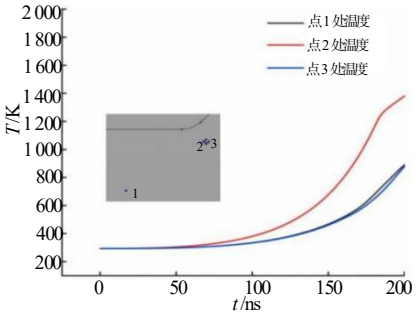


图 9　通孔各处温度随时间变化曲线

Fig. 9　Temperature rise curves over time at various locations of the through-hole

2.2.3　缺陷尺寸对桥箔桥区平均温度影响分析

铜桥箔表面缺陷会引发电爆炸过程中温度在缺陷处高度集中。即使在桥区（0.5 mm × 0.5 mm）范围内，这种局部温度集中效应也会导致整体平均温度加速上升。为系统研究缺陷尺寸对桥区平均温度演变规律的影响，本文计算了无缺陷及直径分别为 20，30，40，50，80，100，150 μm 的通孔缺陷对铜桥箔桥区平均温度的影响。不同直径通孔缺陷对桥箔桥区温度的影响规律如图 10 所示。

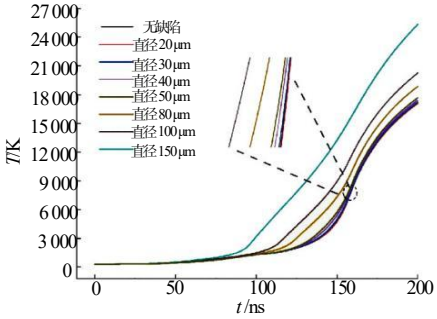


图 10　通孔缺陷对桥区平均温度的影响

Fig. 10　Impact of through-hole defects on the average temperature

由图 10 可见，当通孔直径≤50 μm 时，不同尺寸缺陷对应的桥区平均温度曲线升温起点基本重合，且温升速率差异较小，升温时间提前幅度有限；然而当通孔直径 > 50 μm 时，温度曲线呈现显著变化，升温起点明显提前，且随着缺陷直径增大，温升速率差异显著扩大。

进一步研究盲孔缺陷尺寸效应，直径分别为 20，30，40，50，100，150 μm，深度分别为 1，2，3 μm 的盲孔缺陷对桥区平均温度的影响如图 11 所示。

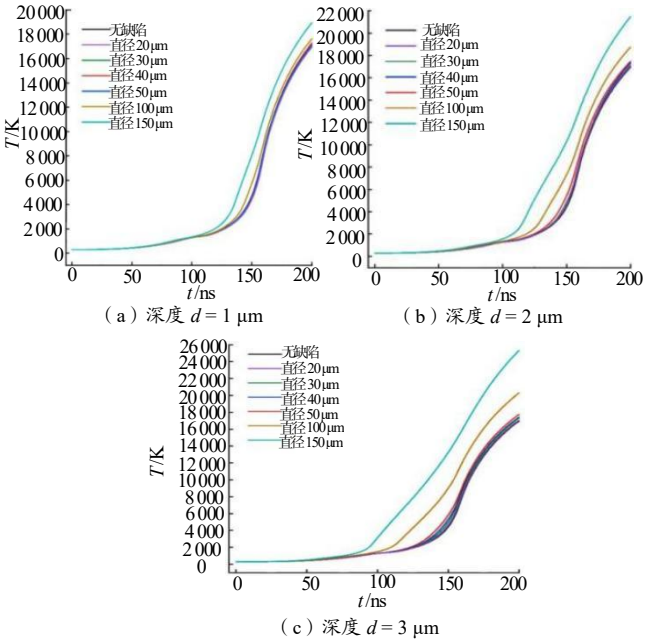


图 11　盲孔缺陷对桥区平均温度的影响

Fig. 11　Impact of blind hole defects on the average temperature

由图 11 可见，对于相同深度的盲孔缺陷，当缺

陷直径≤50 μm 时，温度曲线升温起点基本一致，直径增大对升温速率影响有限，升温时间提前不明显；当缺陷直径 > 50 μm 时，升温起点明显提前，且随直径增大升温速率差异显著增大。在相同直径条件下，随着盲孔缺陷深度的增加，桥区平均温度的升温起始时间呈现提前的趋势。

2.2.4　缺陷尺寸对桥箔爆发电流影响分析

为系统研究缺陷尺寸对桥箔爆发特性的影响，本文首先计算了通孔缺陷（直径为 20，30，40，50，80，100 μm）及无缺陷桥箔在 1 500 V 充电电压下的爆发电流与爆发电压。不同直径通孔缺陷的爆发电流与电压曲线如图 12 所示。

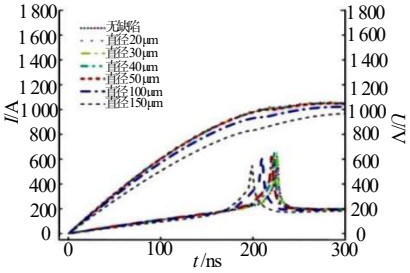


图 12　通孔缺陷爆发电流与电压曲线

Fig. 12　Current and voltage curves of through-hole defects

由图 12 可知，随着通孔直径的增大，爆发时间呈现提前趋势，同时爆发电流与电压幅值同步减小。基于飞片加速过程约持续 200 ns 的实验经验，本研究将 200 ns 后的电流与电压数据视为无效并予以剔除。通过对剩余有效时段的电流-电压曲线进行乘积运算，得到桥区功率消耗曲线；进一步积分运算有效能量值，并结合初始储能（0.22 μF 电容在 1 500 V 下的储能），最终推导出能量转换效率。计算得出的爆炸箔能量转换效率数据如表 1 所示。

表 1　不同直径通孔缺陷能量转换效率

Tab.1　Energy conversion efficiency data for through-hole defects

通孔直径/μm	无缺陷	20	30	40	50	60	100
爆发时间/ns	226.0	226.0	225.0	223.0	218.0	211.0	193.0
有效能量/mJ	122.9	122.6	121.7	119.5	112.6	107.2	96.2
能量转换效率/%	49.7	49.5	49.2	48.3	45.5	43.3	38.9

由表 1 可见，通孔直径增加导致有效能量减少与能量转换效率下降，且直径 > 50 μm 时效率降幅加剧，通孔直径 100 μm 时相对降幅达到 21.7%。证实了通孔尺寸对能量转换的临界阈值效应。

本研究通过数值模拟方法，对直径为 20，30，40，50，100 μm 及深度分别为 1，2，3 μm 的盲孔缺陷在相同放电条件下的电流与电压特性。深度 1，2，3 μm 盲孔缺陷的爆发电流与电压曲线如图 13 所示。

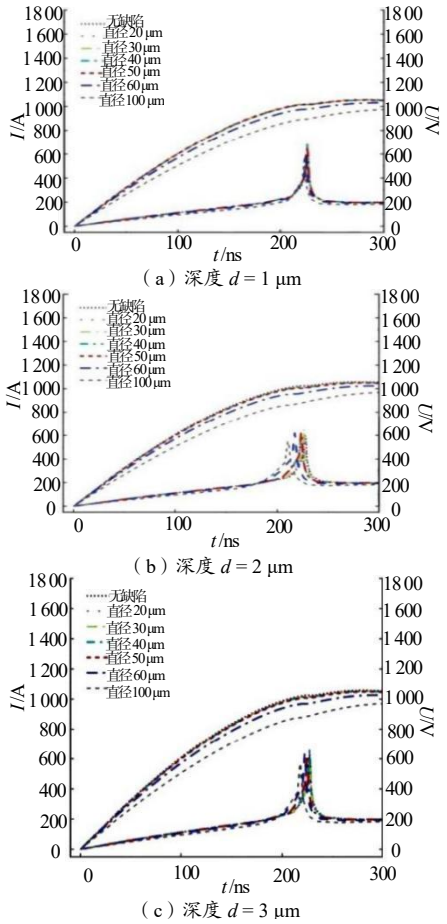


图 13　盲孔缺陷爆发电流与电压曲线

Fig. 13　Current and voltage curves of blind hole defects

基于图 13 的各曲线，采用与通孔缺陷相同的能量计算方法，得到不同直径盲孔缺陷的爆炸箔能量转换效率数据如表 2 所示。

表 2　3 种深度盲孔缺陷能量转换效率表

Tab.2　Energy conversion efficiency of blind hole defects with three depths

深度/μm	直径/μm	爆发时间/ns	有效能/mJ	能量转换效率/%
1	无缺陷	226	122.9	49.7
	20	226	122.6	49.5
	30	226	122.1	49.3
	40	225	121.2	49.0
	50	223	120.5	48.7
	60	220	116.1	46.9
	100	220	109.9	44.4
2	20	226	121.8	49.2
	30	224	120.1	48.5
	40	225	118.8	48.0
	50	222	115.5	46.7
	60	220	111.6	45.1
	100	116	107.6	43.5
3	20	226	121.8	49.2
	30	223	119.1	48.1
	40	223	117.6	47.5
	50	218	114.5	46.3
	60	218	110.1	44.5
	100	199	99.6	40.2

由图 13 可知，对于相同深度的盲孔缺陷，缺陷直径的增加会显著提前爆发时间并降低电流/电压幅值。而相同直径下，缺陷深度的增加同样会加剧该趋势。由表 2 可知，在 1 500 V 的充电电压条件下，对于等深度的盲孔缺陷，直径的增大使有效能量下降且能量转换效率降低，例如深度 1 μm 时直径 100 μm 的转换效率降至 44.4%；相同直径下，盲孔深度的增加也导致转换效率下降，例如直径 50 μm 时深度 3 μm 的效率为 46.3%，较深度 1 μm 降低 2.4%，说明了缺陷尺寸对能量转换的协同抑制作用。

3 结论

本文基于三维电热耦合有限元模型，系统揭示了爆炸箔桥区微缺陷（盲孔、通孔）对其发火能量转换效率的影响规律，并首次给出了可工程应用的缺陷容限定量判据。主要结论如下：

（1）无缺陷桥箔的温升呈“4 角优先、中心跟进”的均匀熔化模式，100 ns 内中心温度可达 1 400 K，能量转换效率为 49.7%。

（2）盲孔或通孔均会在缺陷周边形成低温“电流盲区”，未熔金属碎片随等离子体射流飞散，导致能量转换效率下降；极端条件下（通孔直径 100 μm 或盲孔深度 3 μm），效率最大降幅达 21.7%。

（3）缺陷尺寸存在明显临界阈值：通孔直径 > 50 μm 时，桥区平均温升起点提前 3 ns，爆发时间缩短 33 ns，效率下降速率显著加剧；盲孔深度 > 3 μm 时，电流盲区范围扩大，效率相对降幅超过 8%。

（4）建立了爆炸箔微缺陷容限的定量判据：通孔直径≤50 μm 且盲孔深度≤3 μm 为当前工艺条件下可接受的缺陷上限，为高可靠性火工品的制造与检验提供了直接依据。

综上所述，本研究构建了三维电热耦合模型，阐明了爆炸箔桥区微缺陷对能量转换效率的影响机制，首次从缺陷尺寸-阈值效应角度建立可量化容限判据。研究结果深化了对缺陷诱导电流集中与局部热失配耦合机理的认识，为高可靠性火工品在工艺优化、缺陷筛查及性能评估方面提供理论依据与工程化评价标准，对推动爆炸箔起爆器件向低能化、微型化及高可靠性发展具有工程指导意义。

参考文献：

[1] 李艺,周庆,王窈.爆炸箔桥翼形状对电爆特性及飞片速度影响研究[J].火工品,2020(4):16-18.

[2] 马永胜,杨雨晨,景泳淼,等.薄膜缺陷研究进展综述[J].表面技术,2021,50(3):91-100.

[3] Costa M Y P, Venditti M L R, Cioffi M O H, et al. Fatigue behavior of PVD coated Ti-6Al-4V alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(6): 759-765.

[4] Panjan P, Čekada M, Panjan M, et al. Surface density of growth defects in different PVD hard coatings prepared by sputtering[J]. Vacuum, 2012, 86(6): 794-799.

[5] Cutting J L, Lee R S, Hodgin R L. Quantic Industries, Inc. slapper detonator performance[R]. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1994.

[6] Morris C J, Zakar E, Mary B, et al. Modeling microfabricated multipoint fuze initiators part 1: pre-melting behavior[R]. Adelphi, MD, USA: Army Research Laboratory, 2008.

[7] Sanchez N J, Jensen B J, Ramos K J, et al. Dynamic initiator experiments using X-ray phase contrast imaging at the advanced photon source[R]. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory, 2016.

[8] Neal W, Bowden M. High fidelity studies of exploding foil initiator bridges, Part 2: Experimental results[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2017.

[9] 王亮,邹苑楠,蒋小华,等.短脉冲电流作用下铜微桥箔的电热分析[J].含能材料,2013,21(4):500-505.

[10] 胡博. 适用于爆炸箔起爆器的电爆炸等离子体开关技术研究[D].南京:南京理工大学,2016.

[11] 张玉若,梁车平,程涛,等.爆炸箔换能元失效模式分析[J].火工品,2018(4):5-7.

[12] 陈清畴. 冲击片雷管作用特征及影响规律研究[D].北京:北京理工大学,2016.