

温湿度应力对火工品金属桥带温度场影响的仿真与试验研究

张宸赫, 张蕊, 付东晓

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 西安 710061)

摘要: **目的** 研究火工品换能元所用的金属桥带表面划痕等缺陷在温湿度应力作用下的扩展情况及其对火工品功能的影响。**方法** 设计温湿度为 80 °C/95% 的双应力试验, 采用形貌分析和红外热波等手段, 结合仿真计算, 研究温湿度应力对划痕尺寸的影响及其对换能元桥区温度场的影响规律。**结果** 金属桥带在温湿度应力的作用下, 180 d 的试验时间内, 表面无划痕样品未出现明显缺陷, 温度场分布和温升曲线也与试验前保持一致。划痕样品的划痕宽×长由试验前的 0.015 mm×0.01 mm 扩展到试验后的 0.020 mm×0.015 mm, 桥区最高温度由试验前的 187.5 °C 上升到试验后的 237 °C。红外试验结果和仿真计算结果趋势一致。**结论** 温湿度应力会加速桥带表面划痕的扩展, 并在桥区心集热区产生温度聚集, 影响发火时间和发火可靠性。

关键词: 火工品; 换能元; 温湿度试验; 红外热波试验; 仿真计算

中图分类号: TJ450.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)02-0020-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.004

Simulation and Experimental Research on the Effect of Temperature and Humidity Stress on Temperature Field of Metal Bridge Belt of Pyrotechnic Product

ZHANG Chen-he, ZHANG Rui, FU Dong-xiao

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

ABSTRACT: This paper is to study the temperature and humidity stress expansion of the metal bridge belt surface scratches and other defects used in pyrotechnic energy conversion elements and its influence on the function of the pyrotechnics. The influence of temperature and humidity stress scratch size and its influence on the temperature field in the bridge area of the energy conversion element are studied by designing temperature and humidity double stress 80 °C/95% test using temperature and humidity test and using the topographic analysis and infrared thermal wave experiments combined with simulation calculation. Under the action of temperature and humidity stress, the non-scratched samples on the surface of the metal bridge belt did not have obvious defects within the test time of 180 days, and the temperature field distribution and temperature rise curve were also consistent with those before the test; the width × length of the sample with scratches on the surface extends from 0.015×0.01mm

收稿日期: 2022-01-25; 修订日期: 2022-02-10

Received: 2022-01-25; Revised: 2022-02-10

作者简介: 张宸赫 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火工品安全性、可靠性。

Biography: ZHANG Chen-he (1995—), Male, Postgraduate, Research focus: safety and reliability of initiating explosive devices.

引文格式: 张宸赫, 张蕊, 付东晓. 温湿度应力对火工品金属桥带温度场影响的仿真与试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 020-026.

ZHANG Chen-he, ZHANG Rui, FU Dong-xiao. Simulation and Experimental Research on the Effect of Temperature and Humidity Stress on Temperature Field of Metal Bridge Belt of Pyrotechnic Product[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 020-026.

before the test to $0.020 \times 0.015 \text{ mm}$ after the test, and the maximum temperature value of the bridge area rises from $187.5 \text{ }^\circ\text{C}$ before the test to $237 \text{ }^\circ\text{C}$ after the test; at the same time, the trend of infrared test results and simulation calculation results is consistent. The temperature and humidity stress will accelerate the expansion of scratches on the surface of the bridge belt, and generate temperature accumulation in the heat collecting area in the center of the bridge area, which affects the ignition time and ignition reliability.

KEY WORDS: pyrotechnics; energy conversion element; temperature and humidity test; infrared heat wave test; simulation calculation

点火器是一种常见的火工品,广泛用于各类航天装备,如点火发动机和爆炸分离装置等,是武器装备的首发元件。换能元是点火器的关键器件,是将电能转换成化学能,实现火工品燃烧或爆轰输出的核心。目前,桥带换能元是一种主要的换能器件,其作用原理是将桥带焊接在电极塞上的两电极间,形成一定的电阻,并与火工药剂直接接触,通电后,电阻产生热量,引发电火药,形成燃烧或爆轰输出。为提高换能效率,常见的桥带结构形状有“S”型双“S”型^[1-2],如图 1 所示。随着航天装备的发展,对于火工品在使用和贮存环境下的老化失效问题更加重视。桥带换能元作为电热火工品的核心器件,研究其在温湿度环境下的温升特性变化,掌握其不同环境中的工艺,对提高其可靠性具有重要意义。

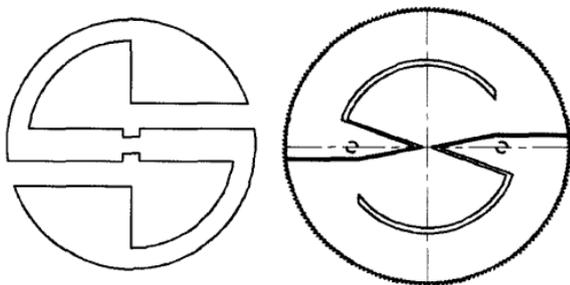
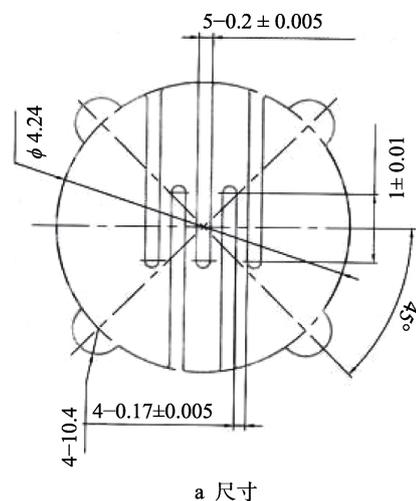


图 1 常见桥带结构
Fig.1 Common bridge belt structure

国内外从 20 世纪 60 年代开始就开始关注温湿度应力对火工品性能的影响,但多是进行失效模式分析。目前也相对缺少从元器件角度来进行火工品性能变化分析的方法,这样不利于更有针对性地提升火工品的安全性与可靠性。本文研究对象为某型电点火器的桥带换能元,桥带换能元在加工和装配中往往会因工艺问题在其表面产生不规则的细小划痕,为探究这些划痕在温湿环境下是否会增长,导致桥区表面缺陷进一步扩大,影响换能元的温度场分布,进而影响换能元的换能效率和火工品的可靠性^[3-4]。设计温湿度试验,采用仿真分析和试验验证的方法,通过不同试验时间桥带在温湿度应力下产生的桥路电阻、表面缺陷、桥区温度场的变化情况,研究点火器桥带的失效规律,为电热火工品设计改进提供依据。

1 试验

本研究选择了一种常用点火器的金属桥带换能元作为试验样品,共 20 发,编号 1—20。桥区材料为 Ni-Cr 合金,厚度 0.03 mm ,设计电阻为 $(1 \pm 0.1) \Omega$ 。样品桥区尺寸和显微照片如图 2 所示。



a 尺寸



b 局部显微照片

图 2 桥带尺寸和显微照片

Fig.2 Size and photo micrograph of bridge belt: a) size; b) part micrograph

参考 Q/AH 0180—1993《火工品加速寿命试验高温高湿试验法》^[5],综合火工品失效模式及失效机理研究的多篇文献经验^[6-8],采用温湿度箱对样品进行了温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 和相对湿度为 95% 的温湿度双应力试验,试验总时长为 180 d。为了观察划痕的变化情况,

分别在试验前和 90、180 d 对样品进行取样, 采用共聚焦显微镜和红外热像仪, 观察样品表面微观形貌, 对桥区温度的变化进行测试和分析研究。

2 结果及讨论

2.1 划痕变化规律

对比试验前后样品的形貌, 发现试验前未见明显划痕和裂纹的样品, 在试验前后显微镜下桥区均保持光亮, 形貌产生未明显变化。无划痕的样品试验前和不同试验时间的桥区显微照片如图 3 所示。从图 3 中

可以看出, 桥区形貌无明显变化。

桥区表面存在划痕的样品在试验前和 90、180 d 的桥区形貌照片如图 4 所示。可以看出, 经过温湿度试验后, 划痕宽度和长度明显增加, 最大长度由试验前的 0.015 mm 扩展到 180 d 后的 0.02 mm, 划痕最大宽度由试验前 0.01 mm 扩大到 180 d 后的 0.015 mm。

桥区电阻是目前考核火工品换能元性能的重要参数^[9]。试验表明, 桥区无划痕样品经过 180 d 的试验后, 电阻无明显变化, 且均未超差, 如图 5a 所示。桥区有划痕的#2、#4、#8 样品的电阻有增大的趋势, 如图 5b 所示。

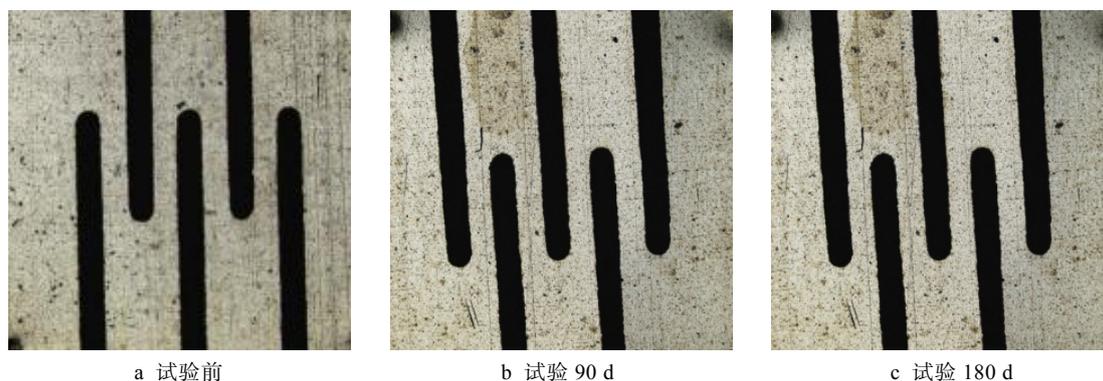


图 3 无划痕样品试验前后桥区的显微形貌

Fig.3 Micrograph of the non-scratched sample in bridge area before (a) and after (b), (c) the test

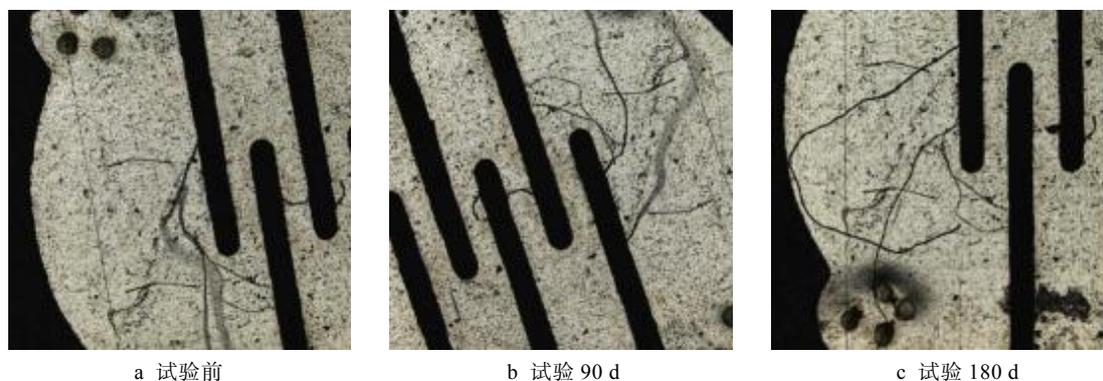


图 4 有划痕样品试验前和不同试验时间后桥区的显微形貌

Fig.4 Micrograph of the non-scratched sample in bridge area before (a) and after (b), (c) different test times

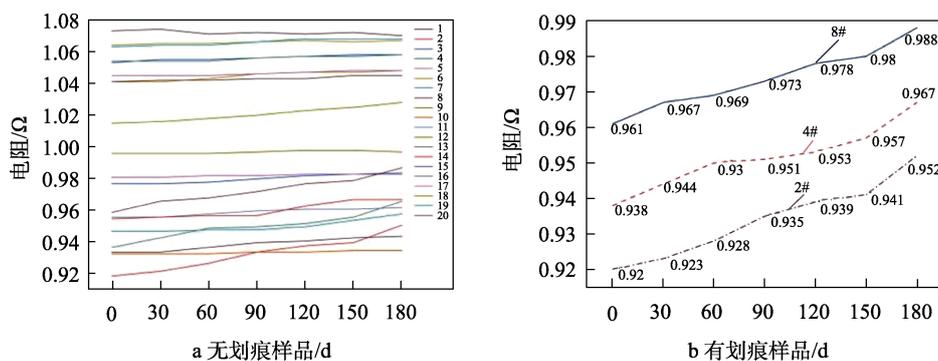


图 5 样品电阻随时间变化趋势

Fig.5 Trend of sample resistance over time: a) non-scratched samples; b) scratched samples

2.2 温度场变化规律

因为电阻的变化无法定量表征换能元在温湿度环境下性能的退化规律, 本文通过研究换能元温度场的变化情况, 获取划痕与换能元性能参数的变化关系, 进而更加准确地判断温湿度等环境因素对火工品可靠性的影响。

2.2.1 桥区温度场变化仿真

首先, 建立桥带温升过程的物理和几何模型。电火工品桥带温升过程可描述为: 火工品换能元接收通入的恒定电流, 将电能转化为热能, 并逐渐升温, 该过程遵守焦耳-楞次定律; 桥带在温升的同时, 将热量传递到后面的背板陶瓷片及正面的火工药剂上, 该过程符合傅里叶导热定律^[10-12]。由于一般情况下桥带式电火工品的发火区域相对药剂及陶瓷片的体积较小, 桥带散热面积较大, 因此可将药剂和陶瓷片导热区域看作半个空心球壁, 内热源为直径为 $2r_1=d$ (d 为桥带厚度) 的球体^[14-15]。药剂球壁与陶瓷片球壁的厚度不同, 球壁传热如图 6 所示。

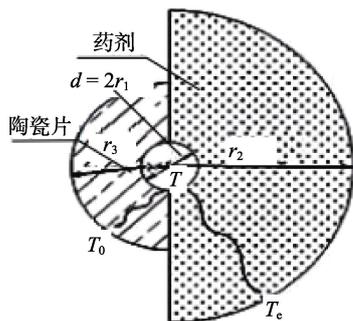


图 6 球壁传热示意

Fig.6 Schematic diagram of heat transfer on the spherical wall

其次, 建立恒流激励下桥带温升方程^[16-17], 如式 (1) 所示。

$$V\rho c \frac{d\theta}{dt} = I^2 R(1+\partial\theta) - \frac{4\pi\lambda(\theta-\theta_0)}{1/r_1-1/r_2} - \frac{4\pi\lambda'(\theta-\theta_0)}{1/r_1-1/r_3} \quad (1)$$

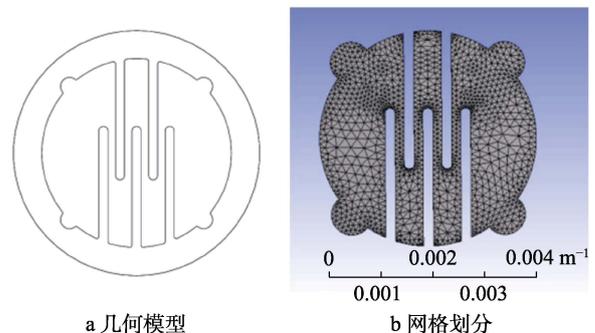
式中: V 为桥带体积, m^3 ; ρ 为桥带材料密度, kg/m^3 ; c 为桥带材料比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; t 为通电时间, s ; I 为输入电流, A ; R 为桥带电阻, Ω ; α 为桥带材料电阻温度系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; λ 为药剂导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; λ' 为陶瓷片导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; θ 为桥带温度, $^\circ\text{C}$; θ_0 为初始环境温度, $^\circ\text{C}$; r_1 ($r_1=0.5d$) 为桥带表面到桥带中心的距离, m ; r_2 ($r_2=5d$) 为药剂球壁外表面到桥带中心的距离, m ; r_3 ($r_3=2d$) 为陶瓷片球壁外表面到桥带中心的距离, m ; d 为桥带厚度, m 。

式 (1) 中等号左边为桥带温升吸热速率, 等号右边第一项为桥带通入电流产热速率, 第二项为桥带向药剂散热速率, 第三项为桥带向陶瓷片散热速率。

由初始条件 $\theta|_{t=0}=\theta_0$, 对式 (1) 求解得:

$$\theta = \frac{I^2 R(1+\partial\theta)}{I^2 R\partial - \frac{4\pi\lambda}{1/r_1-1/r_2} - \frac{4\pi\lambda'}{1/r_1-1/r_3}} \exp\left[\frac{I^2 R\partial - \frac{4\pi\lambda}{1/r_1-1/r_2} - \frac{4\pi\lambda'}{1/r_1-1/r_3}}{V\rho c} t\right] - \frac{I^2 R - \left(\frac{4\pi\lambda}{1/r_1-1/r_2} + \frac{4\pi\lambda'}{1/r_1-1/r_3}\right) T_0}{I^2 R\partial - \frac{4\pi\lambda}{1/r_1-1/r_2} - \frac{4\pi\lambda'}{1/r_1-1/r_3}} T_0 \quad (2)$$

最后, 对桥带温升过程进行计算。其中, 桥带基底材料为陶瓷, 桥带材料为 Ni-Cr 合金, 建立桥带的几何模型并进行网格划分, 如图 7 所示。



a 几何模型

b 网格划分

图 7 桥带几何模型和网格划分

Fig.7 Bridge belt geometry (a) and meshing diagram (b)

计算直流 (1 A) 激励模式 30 s 下典型桥区的升温速率与温度场分布^[18], 如图 8 所示。可以看出, 桥区最低温出现在边缘散热区, 最高温出现在中心集热区, 达到最高温的响应时间为 0.823 s, 桥区最低温为 45°C , 最高温为 175.04°C 。

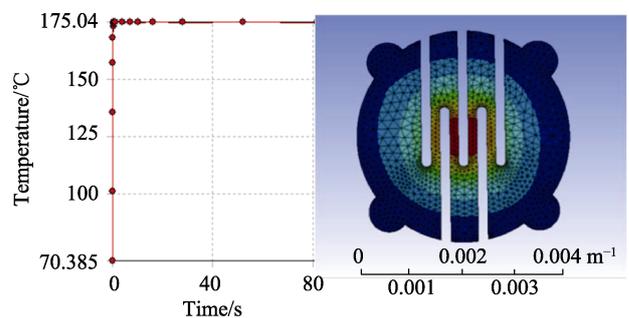


图 8 无划痕桥带温升曲线及温度场

Fig.8 Temperature rise curve and temperature field of non-scratch bridge belt

根据有划痕 2# 样品在试验期间划痕宽度和长度的变化情况, 在换能元温度场计算模型的基础上, 计算了不同划痕不同宽度、长度和不同缺陷位置的换能元的温度场变化情况。划痕宽度为 0.01、0.015 mm, 长度为 0.015、0.02 mm 时的温度场分布情况如图 9 所示。

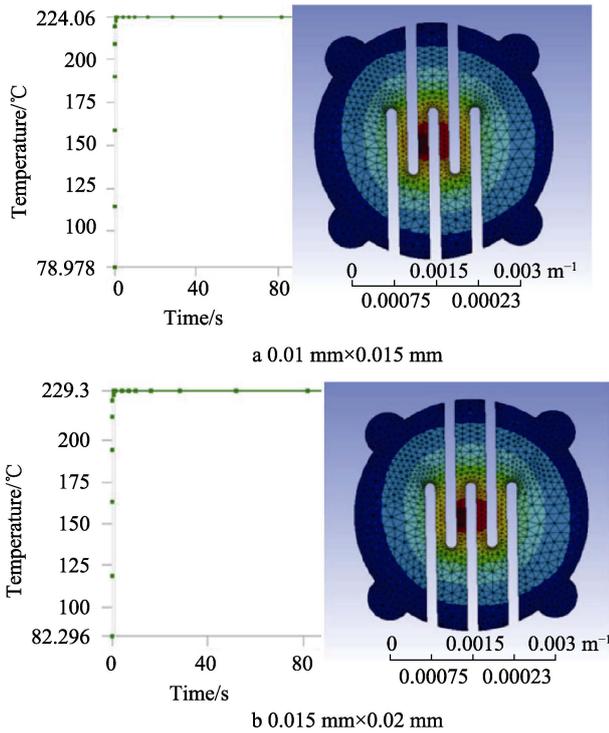


图9 不同划痕尺寸样品的温升曲线及温度场

Fig.9 Temperature rise curve and field of samples with different scratch sizes

从图9中可以看出,当划痕较小(0.01 mm×0.015 mm)时,在划痕附近出现了明显的应力集中区,在0.836 s时,最低温为47℃,最高温为224.06℃。设置划痕宽度为0.015 mm,长度为0.02 mm,可以看到桥区中心划痕处的应力集中进一步加强,达到最高温的响应时间为0.847 s,最低温为48℃,最高温为229.3℃。

此外,本文还对划痕处于桥区不同位置进行了计算。设置划痕宽度为0.015 mm,长度为0.020 mm,深度为0.03 mm,模拟深度大于桥带厚度,出现划痕贯穿的现象,位置分别位于中心集热区和边缘散热区^[19],两种情况的温度场分布如图10所示。可以看出,当划痕位于桥区中心集热区时,最低温为50℃,温度应力明显集中在划痕处,达到最高温度(236.1℃)的时间为0.934 s;当划痕位于桥区边缘散热区时,对桥区温度场分布无明显影响,桥区达到最高温(175.04℃)的时间为0.847 s,与无划痕样品计算结果基本相同。

从以上结果可以看出,有划痕缺陷的换能元,当划痕出现在桥区中心集热区时,宽度越宽,深度越深,对集热区的温度场影响越大。主要表现在:达到最高温的响应时间增长,划痕处出现热应力集中,桥区中心的其他位置温度出现不同程度的下降。

2.2.2 桥区温升试验

本文采用红外热波对桥带换能元在30 s直流激励下(1 A、5 V)的温度场进行了测试,获得了温度

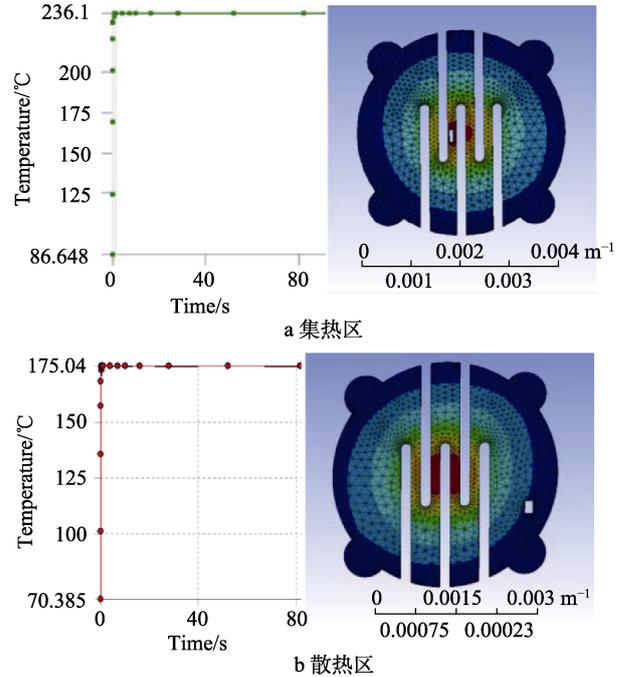


图10 不同划痕位置样品的温升曲线及温度场

Fig.10 Temperature rise curve and field of samples at different scratch positions: a) heat collecting area; b) heat dissipation area

场的分布情况。红外热波是一种主动式红外无损检测技术,其原理主要是用热能的传播来对材料的热导特性的变化进行检测,如图11所示。被广泛应用于金属、非金属、复合材料中存在的脱粘、裂纹、锈蚀、疲劳、损伤等缺陷的检测^[20]。

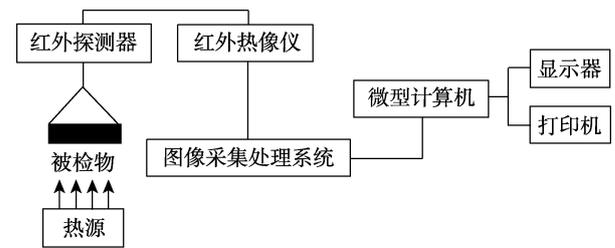


图11 红外热波无损检测原理

Fig.11 Principle of infrared thermal wave non-destructive testing

桥区表面没有划痕的样品,在温湿度环境下试验180 d前后的温度场分布对比和桥区内温度最高点的变化曲线如图12所示。可以看出,试验前后,温度场变化分布不大,如1#样品试验前和试验180 d达到最高温的响应时间分别为0.834、0.840 s,最高温均为160.5℃。温度场在最高温附近达到稳定,桥区中心集热区与药剂接触部分发热。散热区温度一般为40~100℃,远低于桥区中心处,能够保证正常能量转换,实现点火功能。结果表明,表面光洁度对于保证火工品换能元的能量转换过程十分重要。

采用同样的方法分析了桥区划痕明显的2#样品在温湿度试验前后桥区的温度场变化情况,如图13所示。

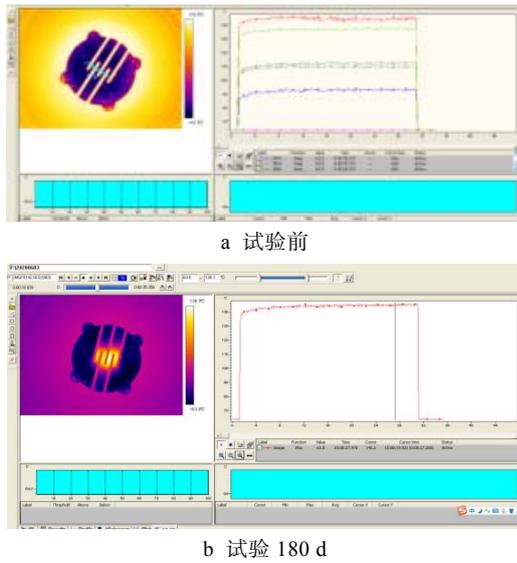


图 12 无划痕样品试验前后温度场和温升曲线
Fig.12 Temperature field and rise curve of non-scratched sample before (a) and after (b) test

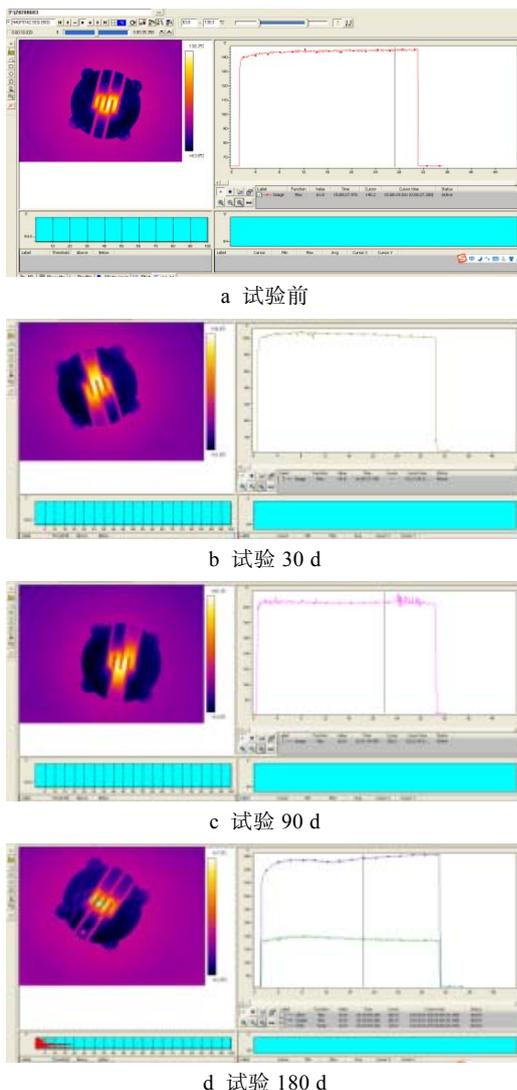


图 13 #2 样品试验前后温度场和温升曲线
Fig.13 Temperature field and rise curve of sample #2 before (a) and after (b—d) the test

可以看出，#2 样品桥区的最高温在温湿度试验 30 d 后出现明显上升，且在划痕处出现应力集中。

不同试验时间下，桥区最高温度的变化情况如图 14 所示。可以看出，无划痕样品桥区最高温不会随着试验时间的增加出现波动，试验期间内桥区最高温的均值为 160.4 °C，标准差为 0.115 °C；而有划痕样品桥区的最高温度随试验时间的增长而不断上升，由试验前的 187.5 °C 上升到试验 180 d 后的 237 °C，均值为 222.9 °C，标准差为 22.1 °C，均远高于没有划痕的样品。

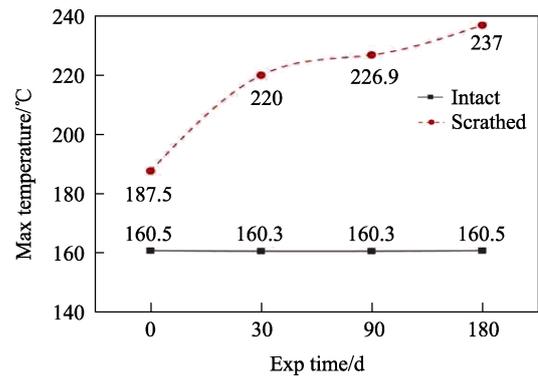


图 14 样品桥区最高温随试验时间的变化趋势
Fig.14 Trend of the maximum temperature in the bridge area of the sample with the test time

将红外试验与仿真模拟按桥区有无划痕、划痕宽度和长度大小进行一一对比，如图 15 所示。可以看出，无划痕状态下，仿真与试验结果整体趋势保持一致，且数值误差均在允许范围内，说明仿真结果真实可信。

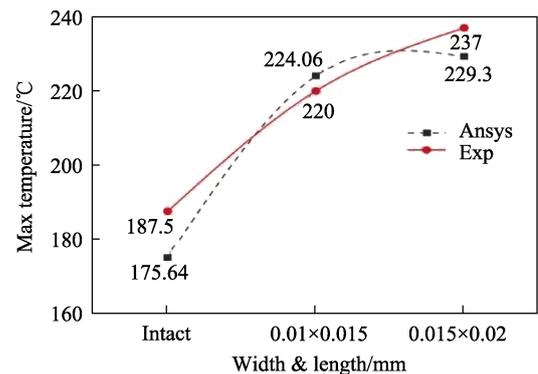


图 15 桥区最高温仿真与试验结果对比
Fig.15 Comparison of simulation and test results of the highest temperature in the bridge area

3 结论

- 1) 桥带表面划痕的尺寸和位置会影响桥区温度场分布的均匀性，进而影响换能元的发火特性。
- 2) 温湿度应力会使桥带表面划痕加速扩展。桥区最高温会随着集热区划痕深度的增大而逐渐升高，同时改变集热区的温度场分布。当桥区表面划痕深到

一定程度时,极有可能导致药剂不能正常发火,从而影响火工品的发火可靠性。

3) 桥带表面划痕对于桥路电阻造成的影响不明显,因此通过电阻测量,筛选有缺陷换能元的方法不准确。通过红外热波等一类无损检测的方法,分析桥区的温度场分布,可进行问题换能元的筛选。

参考文献:

- [1] GJB 347A—2005, 火工品分类和命名原则[S].
GJB 347A—2005, Principles of Classification and Nomenclature of Pyrotechnics[S].
- [2] MIL-HDBK-83578, Technical Standards for Explosive Systems and Devices for Space Vehicles[S].
- [3] KLASSEN S, SORENSEN N. An Investigation of Corrosion in Semiconductor Bridge Explosive Devices[R]. USA: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2007.
- [4] WHALLEY I. Preventing Failures in the EED-Avionics Interface[C]/41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Virginia: AIAA, 2005.
- [5] 都振华, 孙新申, 张蕊, 等. 爆炸桥箔加速贮存前后的电爆特性[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 479-484.
DU Zhen-hua, SUN Xin-shen, ZHANG Rui, et al. Electric Burst Characteristic of Exploding Foil before and after Aging[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(5): 479-484.
- [6] 李东阳, 刘占岭. 火工品长贮失效情况分析[J]. 火工品, 1996(2): 28-30.
LI Dong-yang, LIU Zhan-ling. An Analysis on the Failure of Initiating Explosive Device during Long Term Storage[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1996(2): 28-30.
- [7] 周彬, 秦志春, 徐振相, 等. 电点火头加速寿命试验药剂及桥丝变化分析[J]. 爆破器材, 2000, 29(6): 18-20.
ZHOU Bin, QIN Zhi-chun, XU Zhen-xiang, et al. The Change of the Fusehead Composition and Bridgewire after the Accelerating Life Test of the Fusehead[J]. Explosive Materials, 2000, 29(6): 18-20.
- [8] 严楠. 火工品失效分析概论[J]. 失效分析与预防, 2006, 1(1): 10-14.
YAN Nan. Generality of Analysis on Initiating Explosive Device Failure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2006, 1(1): 10-14.
- [9] 张蕊, 李芳, 都振华, 等. 电火工品单一温度下的贮存特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 329-333.
ZHANG Rui, LI Fang, DU Zhen-hua, et al. Research on Storage Characteristics of Electric Explosive Devices under Single Temperature Storage Condition[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 329-333.
- [10] 韩体飞, 邬敦杰, 张晔, 等. 桥丝式电点火头发火能量的输出形式[J]. 火工品, 2016(5): 21-24.
HAN Ti-fei, WU Dun-jie, ZHANG Ye, et al. Firing Energy Output Forms of the Bridgewire Fusehead[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(5): 21-24.
- [11] 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(6): 24-27.
SHI Lan, YANG An-min, ZHANG Ying-chun, et al. Temperature Rise Mathematical Model of Bridge Strip Electric Initiator and Its Reliability Design[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(6): 24-27.
- [12] 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(6): 824-827.
ZHOU Qing, JIAD Qing-jie. Firing Model of Ni-Cr Bridge-Belt Electric Initiating Devices under Current Input[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(6): 824-827.
- [13] 陶谦, 谭伟. 灼热桥线式电火工品静电发火数理模型初探[J]. 静电, 1996, 11(3): 5.
TAO Qian, TAN Wei. A Preliminary Study on the Mathematical Model of Electrostatic Ignition of Hot Bridge-Wire Electrical Explosives[J]. Electrostatic, 1996, 11(3): 5.
- [14] 强涛. 桥丝式电火工品发火时间与安全电流的预测[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
QIANG Tao. Study on Forecast of the Function Time and the No-Function Current of Bridgewire Electric Explosive Device[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [15] 周庆, 焦清介. Ni-Cr 桥丝式电火工品发火规律[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4): 144-147.
ZHOU Qing, JIAO Qing-jie. Study on Firing Property of Ni-Cr Electric Hot Wire Initiating Devices[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(4): 144-147.
- [16] 马鲁铭, 刘燕, 崔卫麒, 等. 电流激励 Ni-Cr 桥带式电火工品发火模型[J]. 环境科学学报, 1995, 15(2): 163-169.
MA Luming, LIU Yan, CUI Wei-qi, et al. Ignition Model of Ni-Cr Bridge-Type Electro-Thermal Products Excited by Current[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1995, 15(2): 163-169.
- [17] 王科伟, 杨正才, 刘海旭, 等. 钝感 Ni-Cr 金属桥膜换能元的制备及性能[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 819-823.
WANG Ke-wei, YANG Zheng-cai, LIU Hai-xu, et al. Preparation and Characterization of Insensitive Ni-Cr Metal Film Igniting Component[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(6): 819-823.
- [18] 鲍凯, 王俊涛, 吴东流. 新兴的无损检测技术——红外热波成像检测[J]. 无损检测, 2006, 28(8): 393-398.
BAO Kai, WANG Jun-tao, WU Dong-liu. New Nondestructive Testing Technology: Infrared Thermography Testing[J]. Nondestructive Testing Technology, 2006, 28(8): 393-398.
- [19] 任炜, 白颖伟, 同红海, 等. 红外热波无损检测技术在火工器件性能测试中的应用[C]/第二届全国危险物质与安全应急技术研讨会. 成都: [出版者不详], 2013.
REN Wei, BAI Ying-wei, TONG Hong-hai, et al. Application of Infrared Thermal wave Nondestructive Testing Technology in Performance Testing of Pyrotechnic Devices[C]/2nd National Seminar on Hazardous Substances and Safety Emergency Technology. Chengdu: [s. n.], 2013.
- [20] 李慧, 白颖伟, 任炜, 等. 火工品换能元直流激励下温度响应特性仿真研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 138-143.
LI Hui, BAI Ying-wei, REN Wei, et al. Simulation Research on Temperature Response Characteristics of Initiating Device Transformer under DC Excitation[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(S2): 138-143.