

文章编号:1006-9941(2023)03-0243-08

温度交变中光纤接触式激光火工品的失效原因及抑制研究

先明春^{1,2},佟乐乐²,矫金福²,谢浚尧²,张月萍²,孟燕刚²,陈勇²,周彬¹,沈瑞琪¹

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210000; 2. 四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州 646000)

摘要: 为研究温度冲击、温度循环等温度交变环境对激光火工品发火时间的影响规律及作用机理,采用掺杂炭黑的高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(BNCP)为始发药剂及光纤窗口结构的激光火工品为实验样机,对经历47 h和94 h温度交变实验后的掺杂BNCP始发药剂性能、激光火工品结构变化、药剂和光纤约束情况进行了研究。结果表明,温度交变前激光火工品发火时间具有小于0.2 ms的高瞬发性,经历47 h温度交变后,发火时间会延迟至0.5 ms以上;随着温度交变时间的增长,达到94 h后个别产品发火延迟时间超过1 ms,甚至出现瞎火情况。掺杂BNCP始发药经历47 h的温度交变环境后出现碎晶,堆积密度从 $0.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 降低到 $0.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,但碎晶现象不影响药剂的热分解性能及激光火工品的发火性能。温度交变环境下,火工品壳体结构与药剂膨胀系数的差异导致光纤和药剂间出现点火间隙,点火间隙同时影响激光光斑强度与热点的扩散效应,进而影响发火。通过增强药剂和光纤之间的约束可有效减少温度交变情况下点火间隙的产生,提高激光火工品的环境适应能力。

关键词: 激光火工品;BNCP;温度交变;点火间隙;点火延迟;环境适应性

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022218

0 引言

激光火工品具有结构简单、安全性高、抗电磁干扰能力强等优点,是第三代火工技术的典型代表,近年来逐步应用于航天、航空等领域^[1-2]。根据作用方式,激光火工品可以分为激光驱动飞片起爆和激光直接耦合光敏药剂起爆2种,其中激光直接耦合光敏药剂起爆所需起爆能量低,可用小型化半导体激光器直接起爆,是目前工程应用研究的重点^[3]。

在光敏药剂选择方面,高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(BNCP)具有良好的光敏感性,通过掺杂炭黑或碳纳米管等方法可进一步提升其激光点火感度,因此,在激光火工品中得到了广泛的应用^[4-5]。盛滌伦等^[6-8]在国内首先实现了BNCP的合成,并对其性能及应用等方面进行了深入分析,尚静等^[9]采

用密度泛函理论研究了BNCP的晶体结构,周建华等^[10]对BNCP的热分解性能进行了深入研究。上述研究从微观和理论上为BNCP的结构和能量释放机理提供了依据。针对BNCP药剂性能提升方面,郁卫飞等^[11]对BNCP粒度与其性能的关系进行了实验研究,表明细颗粒BNCP的热分解时间、起爆延迟等性能均有所提升;陈利魁等^[12]通过引入碳纳米管等掺杂物,大幅提升了BNCP的激光发火性能,同时分析了BNCP的粒度对激光点火感度和延期的影响^[13-14],并研究了掺杂BNCP的发火感度,获得了不同掺杂物的感度阈值。综上所述,目前研究人员在BNCP的结构与作用机理,以及BNCP在激光火工品上的应用领域开展了广泛的研究。随着越来越多采用BNCP作为始发药剂的激光火工品应用于航空航天领域,如何提升其环境适应能力成为了急需解决的问题,然而,目前针对BNCP类激光火工品环境适应能力的研究报道较少,无法对该类火工品在极限环境下的使用提供指导。

激光火工品光窗耦合形式主要有2种结构:透镜接触式结构和光纤接触式结构,贺爱锋等^[15]研究了透镜封接结构激光火工品的发火性能,获得了430℃低温玻璃封接的光窗口耦合结构,并研究了其密封性能,

收稿日期:2022-08-31;修回日期:2022-10-09

网络出版日期:2023-03-14

基金项目:装备预研航天科技联合基金项目(6141B06210501)

作者简介:先明春(1982-),男,博士研究生,研究员,主要从事先进航天火工技术研究。e-mail:85742506@qq.com

通信联系人:沈瑞琪(1963-),男,教授,主要从事含能材料、固体推进及火工技术研究。e-mail:rqshen@njust.edu.cn

引用本文:先明春,佟乐乐,矫金福,等.温度交变中光纤接触式激光火工品的失效原因及抑制研究[J].含能材料,2023,31(3):243-250.

XIAN Ming-chun, TONG Le-le, JIAO Jin-fu, et al. Failure Causes and Restraining Method of Fiber Contact Laser Ignited Initiators in Temperature Alternation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(3):243-250.

同时针对低温对激光起爆系统能量传输效率的影响展开了研究,得到了激光起爆系统在 $-40\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下半导体激光器和光纤传输系统的特性;曹军胜等^[16]对透镜封接结构的激光火工品的检测方法开展了研究,提出了一种激光火工品反射特性的高精度检测方法;祝明水等^[17]对激光火工品单光纤光路检测方法进行了研究,提出了一种在光纤断面蒸镀使其能够透过发火激光但反射检测光的光学膜的方法。综上,虽然国内外学者对不同光窗口耦合结构的激光火工品光学特性、密封性能、检测方法等开展了大量的研究,但对于光窗结构激光火工品的环境适应性研究较少。随着激光火工品应用领域的拓展,需要对光窗结构在各种极限环境下的工作及失效机理进行深入研究,为提升激光火工品环境适应能力提供技术支撑。

光纤接触式激光火工品的激光能量输入采用光纤和光纤直接耦合,相对光纤和透镜耦合结构,在光路反射检测上具有更高准确性,在工程应用中具有重要的意义。但是光纤接触式激光火工品由于光纤端面和药剂接触面积小,对环境更加敏感,为此,本文针对温度交变环境中光纤接触式激光火工品失效原因及抑制方法进行研究。首先研究了不同温度交变实验条件下的激光火工品发火时间变化,针对实验样机发火时间随温度交变时间增长而增长甚至失效的现象,采用热分析、晶体分析等方法研究了温度交变环境对药剂理化性能的影响;采用半透明实验样机研究了温度交变环境对样机结构的影响。基于上述实验结论,分析了实验样机发火时间的变化规律及产生发火时间延迟的机理,探究了提升激光火工品适应温度交变环境能力的改进方法,为激光火工品的工程应用提供支撑。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

由于碳对于激光波长没有选择性且掺杂后效果明显,因此通常作为提升BNCP激光感度的掺杂物,且根据相关研究^[14],碳的掺杂含量在5%时所需激光能量最小。为此,本研究综合考虑激光吸收能量与发火能量,确定BNCP最优炭黑掺杂比例为4%,研究所采用的BNCP为四川航天川南火工技术有限公司自制,炭黑来源于天津亿博瑞化工股份有限公司。

差热-热重联用仪(DSC-TG),SDT Q600,美国TA仪器公司;红外光谱仪,VERTEX70,德国布鲁克公司;超景深显微镜,Olympus DSX1000,仪景通光学科

技(上海)有限公司;激光粒度仪, Mastersizer 2000,英国马尔文公司;压力传感器, KISTLER 6904, Kistler Instrumente AG。

1.2 温度交变实验样机

研究所用的激光点火实验样机如图1所示,输入端为光纤接触式密封结构,输出端采用膜片与卷边的形式进行密封。装药尺寸 $\Phi 3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,装药密度 $1.55\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

由于激光火工品壳体、光纤与药剂属于不同种材料,其膨胀系数存在较大差异,经过温度交变实验后,结构和药剂的热胀冷缩不一致容易造成光纤和药剂间产生间隙,从而影响产品发火性能。为了研究温度交变对激光火工品结构的影响,设计了如图2所示的半剖实验样机进行研究。通过剖面处的透明玻璃可实现对光纤与药剂耦合面的观察和测量,从而分析温度交变前后光纤与药剂接触面的变化。

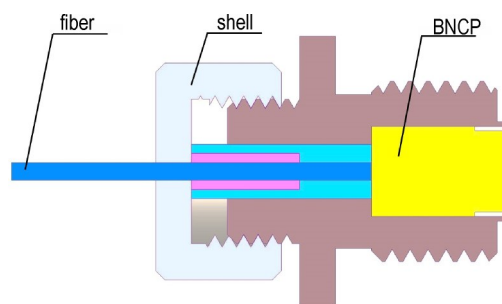
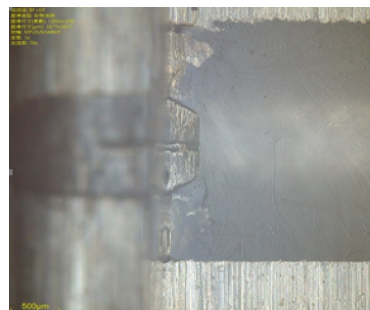


图1 激光点火实验样机结构示意图

Fig.1 Schematic structure of laser ignition experimental prototype



a. semitransparency prototype



b. section diagram

图2 半剖实验样机

Fig.2 Images of translucent experimental prototype

1.3 实验设计

(1) 药剂热性能分析:采用差热-热重联用仪对BNCP始发药剂的热性能进行测试。样品质量为 (3 ± 0.1) mg,氮气气氛,流量为 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,测试温度范围为室温 $25\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 显微表征:采用超景深显微镜对掺杂BNCP始发药颗粒及半透明实验样机内部结构进行观察,从而获得BNCP药剂颗粒形貌与样机内部结构变化情况。

(3) 粒度测试:采用激光粒度仪对不同实验样品进行粒度测试,记录样品粒度及粒度分布。

(4) 点火实验:激光点火测试系统如图3所示。激光器为半导体激光器,波长 980 nm ,最大输出功率 5 W ,点火功率设置为 1 W ,脉宽 100 ms ,光纤直径 $125\text{ }\mu\text{m}$,使用 1 m 长光纤连接激光器和激光火工品。

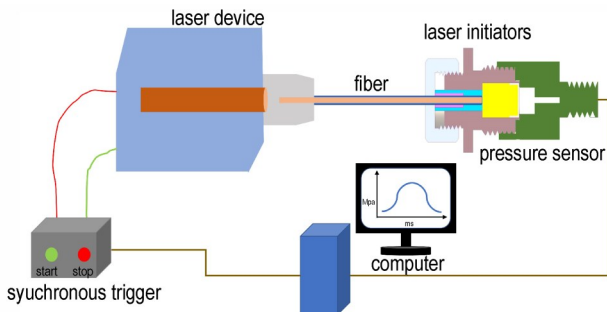


图3 激光点火测试系统组成

Fig.3 Composition diagram of laser ignition test system

激光器发出的激光由光纤传递至激光火工品,激光火工品受激发被引爆而产生高压气体,压力传感器获得高压信号传至计算机。电源输出电平信号和压力传感器测得的建压信号之间的时间差即发火时间。

(5) 温度交变实验

为了研究温度交变对激光火工品的影响,采用图1中的激光点火实验样机进行温度交变实验,实验样机分组及实验条件如表1所示。其中,A组不经过温度交变实验,B组经历1次温度交变实验,共计 47 h ;C组经历2次温度交变实验,共计 94 h 。3组试样各10发,实验先进行温度循环,再进行温度冲击。

表1 温度交变实验所用激光点火实验样机分组

Table 1 Grouping of laser ignition prototype for alternating temperature experiment

group	quantity of prototypes	test condition
A	10	without alternating temperature
B	10	with once alternating temperature
C	10	with twice alternating temperature

为了研究温度交变对掺杂BNCP始发药的影响,使用相同掺杂BNCP始发药分别作为对照组、分别进行一次温度交变实验和2次温度交变实验,药剂分组及实验条件如表2所示。

表2 掺杂BNCP始发药分组及实验条件

Table 2 Grouping and experimental conditions of doped BNCP

group	quantity of prototypes	test condition
I	10	without alternating temperature
II	10	with once alternating temperature
III	10	with twice alternating temperature

样机温度循环按GJB2034《航天飞行器系统电爆炸分系统的安全要求及实验方法》中202方法进行,低温 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温 $+71\text{ }^{\circ}\text{C}$,一轮温度循环高低温交替8次,每次循环高、低温端保持大于 2 h ,高低温之间的温度交变速率不低于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

样机温度冲击按GJB150.5A《军用设备环境试验方法 温度冲击试验》进行,其中低温 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温 $+71\text{ }^{\circ}\text{C}$,一轮温度冲击高低温交替3次,每次循环高、低温端保持大于 1 h ,采用两箱法进行实验,高低温之间转化不大于 1 min 。研究中经历1轮温度循环和1轮温度冲击实验计为1次温度交变实验。

(6) 大压力压药实验

为了研究增加实验样机压药压力是否可以改善温度交变环境下光纤和药剂之间产生点火间隙,采用 160 kg 压药压力(是普通压药压力的1.6倍)进行实验样机的装配,并对实验样机进行温度交变实验,实验样机分组及实验条件如表3所示。其中D组进行1轮温度交变实验,E组经历2轮温度交变实验,2组试样各10发,实验后再次进行发火测试。

表3 大压药压力实验样机分组

Table 3 Grouping of high charge pressure prototype

group	quantity of prototypes	test condition
D	10	with once alternating temperature
E	10	with twice alternating temperature

2 结果与讨论

2.1 温度交变对火工品发火性能的影响

为了研究温度交变对采用掺杂BNCP始发药及光

纤接触式密封结构激光火工品发火性能的影响,采用表1中所示实验样机进行经历不同时间的温度交变实验对比研究,得到掺杂BNCP激光火工品发火时间如表4所示。

表4 不同温度交变实验环境下发火时间对比

Table 4 Comparison of ignition time under different alternating temperature conditions

parameters	group A	group B	group C	
ignition time / ms	0.18	0.67	0.95	
	0.19	0.34	0.87	
	0.20	0.36	1.35	
	0.17	0.48	1.15	
	0.15	0.67	0.88	
	0.19	0.53	0.75	
	0.16	0.64	2.50	
	0.17	0.22	misfire	
	0.18	0.78	2.18	
	0.19	0.37	1.35	
	average / ms	0.178	0.506	1.331
	standard deviation / ms	0.015	0.181	0.614

Note: A represented ignition without alternating temperature. B represented ignition with once alternating temperature. C represented ignition with twice alternating temperature.

由表4中A组发火时间数据可知,光纤窗口结构的掺杂BNCP激光火工品发火时间可达到小于0.2 ms的高瞬发性,B组较未经温度交变实验的A组激光火工品发火时间均值延长了0.328 ms,这表明发火延迟时间在经历温度交变环境后有显著增长;C组较A组发火时间均值延长了1.153 ms,表明经历长时间温度交变环境后,发火时间会进一步延迟,甚至出现瞎火情况(如C组第8试样)。为了深入分析瞎火原因,将C组未发火的实验件进行解剖,光纤-药剂接触面解剖图如图4所示。由图4可以看到,虽然产品未发火,但在光纤与药剂接触面处药剂颜色变深,并有约1.5 mm烧蚀凹坑,证明此处药剂在激光作用下有明显烧蚀。而随着逐渐远离光纤中心位置,药剂颜色逐渐由深变浅,表明虽然光窗口处药剂吸收了光并产生了热量,但此时热点产生的热量过小,热量散失速度大于累积速度,无法完成正常的起爆过程。

根据激光作用下炸药点火过程的相关研究^[18-20],激光火工品的点火机理如图5所示。掺杂BNCP受激光照射时,在光纤的接触点处产生热量、发生分解,释放大量的热,形成“热点”。当热量不断累积,热点逐渐增多时,药剂反应速度不断加快,达到一定极限时反应

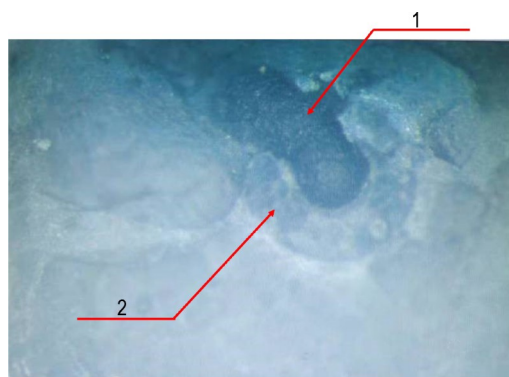


图4 解剖实验件光纤-药剂端面

1—激光烧蚀表面,2—正常药剂

Fig.4 The fiber-powder interface of failure igniter

1—ablation surface, 2—normal explosive

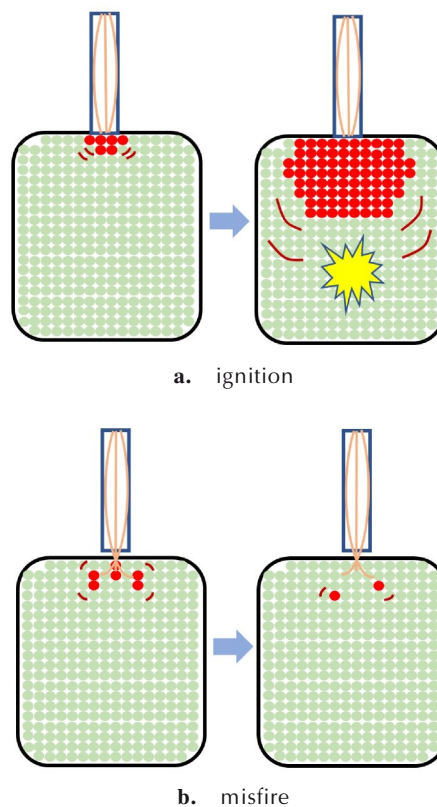


图5 激光点火机理示意图

Fig.5 Schematic diagram of laser ignition mechanism

区瞬间扩大并发生燃烧或爆炸。如果作用初期热点分散或释放的热量较小,热量散失速度大于累积速度,无法完成热量的聚集,则无法达到起爆阈值,导致点火失效。因此温度交变后出现延迟或者瞎火,主要是因为输入激光点火能量无法在掺杂BNCP始发药表面形成足够的热点,进而无法实现掺杂BNCP始发药自持燃烧。为了提升光纤结构激光火工品抗温度交变性能,

需对这一现象产生的机理进行进一步分析。

2.2 温度交变对BNCP药剂性能影响

2.2.1 对BNCP药剂的热性能影响

为探究温度循环后出现发火延迟与掺杂BNCP始发药药剂的关联性,对温度交变前后掺杂BNCP始发药的性能进行了研究。依据表2所示条件进行I、II、III三组实验,并将三组掺杂BNCP始发药分别取样进行DSC分析和TG热失重分析,结果见图6。

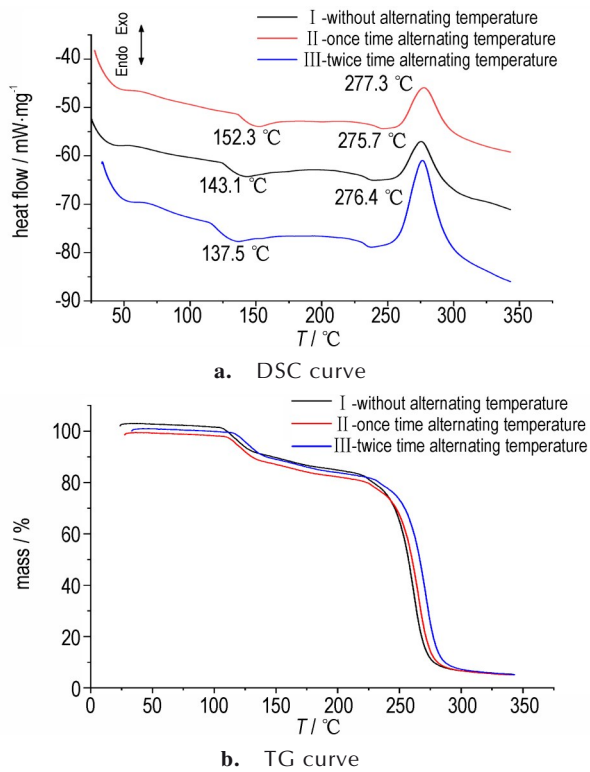


图6 不同温度交变实验后BNCP样品DSC与TG曲线图
Fig.6 DSC and TG curves of BNCP after different alternating temperature experiments

从图6a可以看出,未经历温度交变的I组掺杂BNCP始发药与经历1次温度交变实验的II组和经历2次温度交变实验的III组的吸收峰出现的温度无明显差异,主要表现为掺杂BNCP始发药晶体的熔化,无反应发生。3组样品的放热峰温度基本相同,均在276℃左右,与文献[10]的掺杂BNCP始发药分解放热峰基本吻合。这表明经历温度交变实验前后,掺杂BNCP始发药的热分解性能基本未发生变化。

从图6b可以看出,3组掺杂BNCP始发药的质量损失变化趋势基本相同:100℃以下时掺杂BNCP始发药状态稳定,基本没有质量变化;100~250℃间有部分质量损失;当温度高于250℃(对应于图6a中掺杂BNCP始发药的分解温度)后质量快速减少,此时掺

杂BNCP始发药快速反应;超过300℃后,剩余掺杂BNCP始发药质量不足10%,表明掺杂BNCP始发药分解殆尽,且产物大部分为气相产物。根据上述温度曲线变化分析可知,温度交变实验对BNCP的热反应性能未造成明显影响。

2.2.2 对BNCP药剂的晶体性能的影响

利用超景深显微镜对I组(未经历温度交变)和III组(经历2轮温度交变)掺杂BNCP始发药进行观测,晶型如图7所示。采用激光粒度仪对温度交变前后的颗粒进行粒度分布测试,结果如表5所示。

由图7可以看到,经历温度交变前后的两组药剂颗粒均为淡黄色半透明晶体;而经历两轮温度交变后的药剂出现碎晶现象。由表5可以看出,经历温度交变后,大尺寸颗粒明显减小,小尺寸颗粒明显增多,同时BNCP堆积密度下降,这表明在温度交变过程中部分大颗粒出现裂纹,最终破碎为小颗粒。可见温度交变可引起BNCP药剂晶体的破碎,大幅降低颗粒尺寸。

为分析BNCP始发药晶体破碎对其发火性能的影响,研究将I组、II组及III组掺杂BNCP始发药按图1样机装配成实验样机,并进行发火测试,发火时间相关

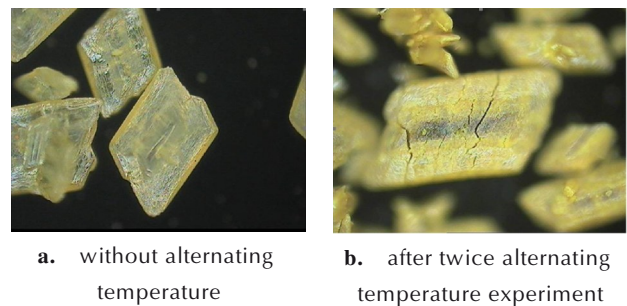


图7 温度交变前后药剂显微图
Fig.7 Micrographs of BNCP before and after alternating temperature experiment

表5 不同温度交变前后药剂粒度分布
Table 5 Distribution of grain size with different alternating temperature experiment

group	particle size and proportion	bulk density/g·cm ⁻³
I	big: 5.50×3.00, 50%	0.43
	middle: 3.00×2.60, 31%	
	small: 1.10×1.00, 19%	
II	big: 5.50×3.50, 38%	0.38
	middle: 2.20×2.00, 34%	
	small: 1.30×1.00, 28%	
III	big: 5.50×3.50, 30%	0.32
	middle: 2.20×2.00, 32%	
	small: 1.30×1.00, 38%	

结果如表6所示。温度交变后掺杂BNCP始发药装配的实验件与未经历温度交变的掺杂BNCP始发药装配的实验件相比,发火时间平均值略有减小,而标准差未出现明显变化,表明温度交变过程虽然会造成药剂晶体破碎,但不会影响掺杂BNCP始发药的发火性能。

表6 掺杂BNCP始发药发火时间平均值及标准差

Table 6 Average ignition time and standard deviation of different group of doped BNCP

parameters	I	II	III
average/ms	0.186	0.168	0.158
standard deviation/ms	0.020	0.017	0.013

2.3 温度交变对激光火工品结构影响分析

2.3.1 温度交变对火工品光纤与药剂接触面的影响

采用图2设计的半透明样机按相同条件进行2次温度交变实验后,在超景深显微镜下观察光纤与药剂接触面,温度交变前后对比如图8所示,可以看到经历温度交变环境前药剂与光纤接触紧密基本无缝隙;而经历2轮温度交变环境后,由于药剂膨胀系数与光纤和壳体膨胀系数的差异,在光纤与药剂接触面出现间隙,最长间隙约为 $30\ \mu\text{m}$ 。

根据光热转换机理,在光纤传输的激光能量相同的条件下,形成的光斑越大则光斑强度越小。基于上述原理,对光纤与药剂接触面出现间隙进行光斑面积与强度变化的研究,得到间隙前后激光经光纤在药剂表面形成光斑的示意图(图9)。激光经过光纤产生散射角(25.2°),这是光纤的固有性质。光纤与药剂接触面产生 $30\ \mu\text{m}$ 的间隙后,激光投向药剂表面的光斑面积增大23%,由于激光输出能量不变,产生间隙后激光功率密度降低23%。

为了研究消除间隙后发火延迟时间是否能够恢复,将经历2轮温度交变实验的实验样机去掉输出端面膜片,用100 kg压力对掺杂BNCP始发药进行复压,再进行发火实验,共进行10发,结果如图10所示。

经过复压后,经历温度交变的实验件均可正常发火,平均发火时间为0.16 ms,标准差为0.02 ms,与未经历温度交变实验的A组样机相当,表明复压使经历温度交变实验后的样机恢复了原有发火性能。光纤接触式密封结构激光火工品对点火间隙敏感,光纤-药剂间的间隙既会影响热点的形成与扩散;同时由于激光光纤的发散作用,导致和药剂接触的激光功率能量密度降低,使得药剂接受的能量减小,最终导致火工品点火延迟增大,甚至出现无法达到起爆条件的情况引起失效。

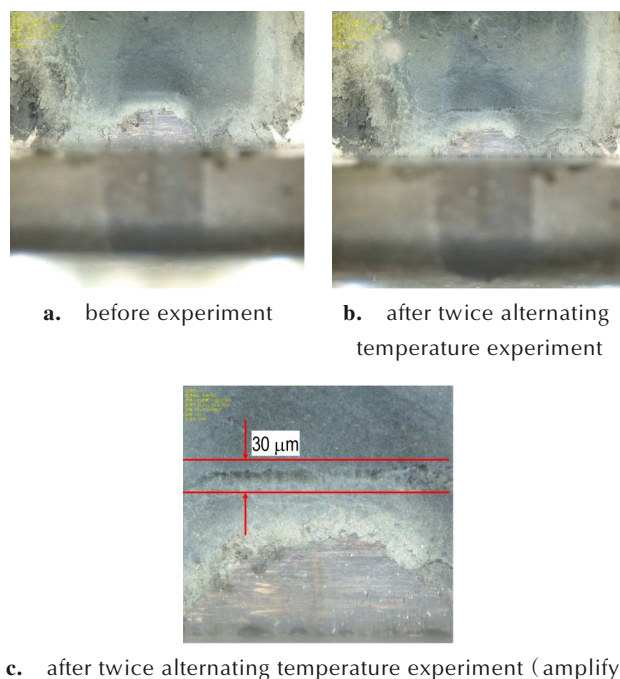


图8 温度交变前后光纤-药剂接触面显微图(70×)

Fig.8 Micrographs of fiber-powder interface before and after twice alternating temperature experiment (70×)

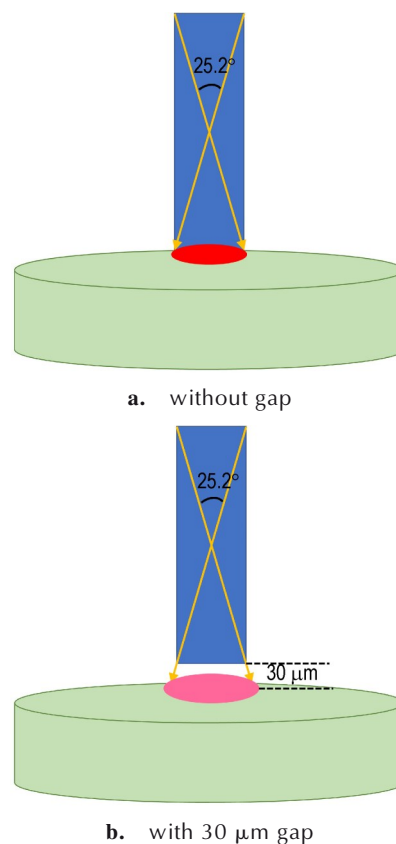


图9 光纤-药剂不同间隙下激光光斑强度变化示意图

Fig.9 Schematic of laser spot intensity with different gap between fiber and explosive

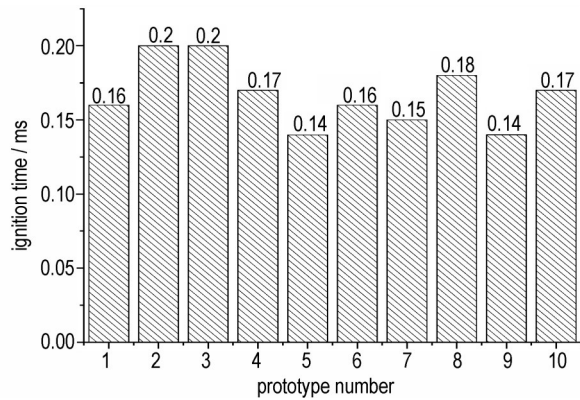


图10 复压始发药剂后样机发火时间

Fig.10 Ignition time of experimental prototypes with re-loading primary explosive

2.3.2 压药压力对激光火工品温度交变前后性能的影响

采用160 kg压药压力装配的改进实验样机进行温度交变实验后再次进行发火测试,实验结果如表7所示。由表7可以看到,经历温度交变后,改进样机的发火平均时间与未进行温度交变实验的A组基本相同,发火时间标准差分别较A组增大0.054 ms和0.02 ms,其发火一致性显著优于B组和C组,这表明增大压药压力可显著改善温度交变实验后的样机发火性能。

表7 160 kg压药压力下温度交变实验后的发火时间

Table 7 Ignition time of alternating temperature experiment at 160 kg loading pressure

parameters	group D	group E
average / ms	0.182	0.196
standard deviation / ms	0.069	0.035

通过上述实验可知,光纤接触式密封结构激光火工品对点火间隙敏感。经历温度交变环境后,光纤-药剂之间可能产生间隙,该间隙会显著影响热点的形成与最终照射到药剂表面的激光功率密度,导致激光火工品发火时间延迟、甚至失效。通过增强药剂和光纤之间的结构约束,可有效降低温度交变情况下点火间隙的产生,从而提高激光火工品的环境适应性。

3 结论

(1)掺杂BNCP始发药的光纤窗口结构激光火工品可获得低于0.2 ms的低发火延迟时间,随着温度交变环境时间的增加,发火延迟时间会延长至0.5 ms以上,多次温度交变实验后发火延迟时间会超过1 ms甚至出现发火失效。原因在于:温度交变环境下光纤组

件和壳体膨胀系数存在差异,及温度交变后掺杂BNCP始发药存在碎晶现象,使得光纤和掺杂BNCP始发药之间产生间隙,该间隙既会影响热点的形成与扩散,也会显著降低投射到药剂表面的激光功率密度,最终影响到激光火工品的发火性能。

(2)在长时间温度交变环境下掺杂BNCP始发药存在碎晶现象,一次温度交变过程堆积密度降低12%,两次温度交变过程堆积密度降低25%,而经过温度交变环境后掺杂BNCP始发药的热性能不会产生明显的变化,不影响其激光发火性能。

(3)通过增强药剂和光纤之间的约束,可有效降低温度交变情况下点火间隙的产生,从而提高激光火工品的环境适应能力。

参考文献:

- [1] 钟海文. 半导体激光点火技术的研究与应用[D]. 长春: 中国科学院大学中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020. ZHONG Hai-wen. Research and application of semiconductor laser ignition technology [D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, 2020.
- [2] 付世斌. 激光点火火工品系统的设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2021. FU Shi-bin. Design and research of laser ignition initiating explosive device system [D]. Taiyuan: The North University of China, 2020.
- [3] SETCHELL R E, TROTT W M. Prompt laser ignition and transition to detonation in a secondary explosive [R]. DE9404141, 1995:1-18.
- [4] BATES L R. The potential of tetrazoles in initiating explosive systems[C]//13th Symposium on Explosives and Pyrotechnics, Hilton Head Island, SC, USA, 1986.
- [5] 张蕊, 冯长根, 姚朴, 等. 钝感起爆药BNCP的热安全性[J]. 火炸药学报, 2003(02):66-69. ZHANG Rui, FENG Chang-gen, YAO Pu, et al. The thermal safety of a new kind of initiating explosives BNCP [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003(02):66-69.
- [6] 盛涤伦, 马凤娥, 孙飞龙, 等. BNCP起爆药的合成及其主要性能[J]. 含能材料, 2000, 8(3):100-103. SHENG Di-lun, MA Feng-e, SUN Fei-long, et al. Study on synthesis and main properties of BNCP [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2000, 8(3):100-103.
- [7] 盛涤伦, 吕巧莉, 朱雅红, 等. BNCP在雷管中的应用技术研究[J]. 火工品, 2011(05):9-13. SHENG Di-lun, LV Qiao-li, ZHU Ya-hong, et al. Application technology of tetraaminebis (5-nitrotetrazolato) cobalt (III) perchlorate (BNCP) in detonators [J]. Initiators & pyrotechnics, 2011(05):9-13.
- [8] 盛涤伦, 马凤娥, 张裕峰, 等. 高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(III)(BNCP)的晶体结构[J]. 含能材料, 2007(05):511-514. SHENG Di-lun, MA Feng-e, ZHANG Yu-feng, et al. Crystal structure of initiating explosive BNCP [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2007(05):511-514.
- [9] 尚静, 张建国, 舒远杰, 等. 高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(III)分子和晶体结构与性能的理论研究[J]. 含能材料, 2011,

- 19(5):491-496.
SHANG Jing, ZHANG Jian-guo, SHU Yuan-jie, et al. Theoretical studies on structure and properties of bis-(5-nitro-tetrazolato) tetraammine cobalt(III) perchlorate molecule and crystal[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011,19(5):491-496.
- [10] 周建华,程碧波,李金山,等.高氯酸[四氨·双(5-硝基四唑)]合钴(III)的热分解性能[J].火炸药学报,2008,31(3):64-66.
ZHOU Jian-hua, CHENG Bi-bo, LI Jin-shan, et al. Thermal decomposition property of BNCP[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008,31(3):64-66.
- [11] 郁卫飞,陈娅,聂福德,等.超细BNCP比表面积对其性能的影响[J].含能材料,2008(05):519-520.
YU Wei-fei, CHEN Ya, NIE Fu-de, et al. Effect of surface area on sensitivity and properties of BNCP superfine particles[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008(05):519-520.
- [12] 陈利魁,盛涤伦,杨斌,等.碳纳米管及碳黑对BNCP感度性能的影响[J].含能材料,2013,21(1):35-38.
CHEN Li-kui, SHENG Di-lun, YANG bin, et al. Effects of carbon nanotubes and carbon black on sensitivity performances of BNCP[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013,21(1):35-38.
- [13] 陈利魁,盛涤伦,马凤娥,等.BNCP粒度对固体激光起爆感度和延期时间的影响[J].含能材料,2007(03):217-219.
CHEN Li-kui, SHENG Di-lun, MA Feng-e, et al. Effects of particle size of BNCP on the laser initiation sensitivity and delay time[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007(03):217-219.
- [14] 陈利魁,盛涤伦,杨斌,等.掺杂对BNCP半导体激光起爆感度的影响[J].含能材料,2009,17(2):229-232.
CHEN Li-kui, SHENG Di-lun, YANG Bin, et al. Effect of dopant on BNCP semiconductor laser sensitivity[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009,17(2):229-232.
- [15] 贺爱锋,褚恩义,曹椿强,等.低温对激光起爆系统能量传输效率的影响(英文)[J].含能材料,2016,24(7):698-702.
HE Ai-feng, CHU En-yi, CAO Chun-qiang, et al. Influence of low temperature on laser transmission efficiency in laser initiation subsystem[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016,24(7):698-702.
- [16] 曹军胜.激光火工品反射特性的高精度自动测试[J].应用科技,2011,38(12):1-4.
CAO Jun-sheng. High-precision automatic test for laser initiators[J]. *Applied science and technology*, 2011,38(12):1-4.
- [17] 祝明水,邢宗仁,蒋明,等.激光火工品单光纤光路检测技术[J].含能材料,2014,22(4):525-528.
ZHU Ming-shui, XING Zong-ren, JIANG Ming, et al. Light path checking technology of laser ignited initiators with single optical fiber[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014,22(4):525-528.
- [18] 沈忱.KP基光敏含能材料制备及性能研究[D].太原:中北大学,2018.
SHEN Chen. Preparation and properties of KP-based photosensitive energetic materials[D]. Taiyuan: The North University of China, 2018.
- [19] 杨波.V₂C MXene的光热转换机理及其在激光点火中的应用研究[D].绵阳:西南科技大学,2021.
YANG Bo. Research on photothermal conversion mechanism of V₂C MXene and its application in laser ignition[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [20] 刘彦汝.激光作用下炸药晶体微结构变化研究[D].绵阳:西南科技大学,2021.
LIU Yan-ru. Study on the changes of explosive crystal microstructure with laser[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.

Failure Causes and Restraining Method of Fiber Contact Laser Ignited Initiators in Temperature Alternation

XIAN Ming-chun^{1,2}, TONG Le-le², JIAO Jin-fu², XIE Jun-yao², ZHANG Yue-ping², MENG Yan-gang², CHEN Yong², ZHOU Bin¹, SHEN Rui-qi¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China.; 2. Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou 646000, China)

Abstract: In order to explore the influence of temperature impact and cycling on ignition time of laser pyrotechnics, the laser initiators with carbon doped tetraammine bis (5-nitrotetrazolato) cobalt (III) perchlorate (BNCP) as primary explosive and fiber-window structure were employed to study performance of BNCP, structure change of laser initiators and structural constraint between fiber and explosive under different temperature alternating experiments (47 h and 94 h). The experiment results show that the ignition time can reach less than 0.2 ms indicating a great ignition performance before temperature alternating experiment. However, the ignition time delayed more than 0.5 ms after 47 h temperature alternating experiment and some initiators delayed more than 1 ms even misfired after 94 h temperature alternating experiment. The crystal grains of BNCP broke up and the bulk density decreased from 0.43 g·cm⁻³ to 0.32 g·cm⁻³ after alternating temperature experiment. However, the change of bulk density has no influence on thermal decomposition and ignition performance. The difference of expansion coefficient between ceramic fiber optic components and igniter shell leads to a gap between fiber and doped BNCP during alternating temperature experiment. The gap has a great influence on both laser spot intensity and hot spot diffusion. With structural constraints of fiber and explosive increasing, the ignition gap can decrease effectively during alternating temperature environment and the environment adaptability of laser initiators can be improved.

Key words: laser ignited initiators; BNCP; alternating temperature; ignition gap; ignition delay; environmental adaptability

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022218

Grant support: Joint Fund for Equipment Pre-research of Aerospace Science and Technology (No. 6141B06210501)

(责编:姜梅)