

弹射座椅激光点火程控器光路通断检测和点火时序研究



李帅¹, 吴洪伟¹, 李志刚¹, 康俊峰¹, 贺爱锋², 曹椿强², 井波²

1. 航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441003

2. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安 710061

摘要: 激光点火由于具有防静电、抗电磁干扰和安全性高的优点, 在军事、航空、航天等领域具有重要的应用价值。本文主要针对激光点火在弹射座椅中的工程应用可行性及相关关键点火参数的选择进行理论与试验对比研究。利用有限元分析软件内置的物质与激光相互作用模型建立激光对奥克托金(HMX)炸药起爆过程火药温度分布的仿真模型, 并进行激光起爆试验, 起爆时间和温度分布模拟预测和试验结果基本相符; 对检测方法进行改进, 采用双波长激光器和2×1耦合器实现对全光路通断的检测; 通过九路激光器的同时检测, 实现激光信号传输时序的检测, 试验结果满足弹射座椅九路点火总时间小于1s的要求。在此基础上进行了高低温条件下实际点火试验, 完成了激光起爆, 首次对多路激光点火时序进行研究, 点火时序满足工程化应用的标准, 该新型激光点火程控器可直接应用在弹射座椅上, 验证了激光点火在防护救生领域应用的可行性。

关键词: 激光点火; 光路检测; 点火时序; 程控器

中图分类号: V211.7

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.03.015

目前, 国内弹射座椅防护救生领域^[1-2]多采用电信号传输的方式激发火工品, 该点火方式容易受到电磁波、雷电、静电、射频等信号的干扰, 会引起火工品的误触发^[3-4]; 且火药与半导体桥直接接触, 长时间存放, 容易造成火药和半导体桥材质变性, 造成点火失效, 因此迫切需要一种抗电磁干扰能力强、隔离度好、安全性高、能量可调节的传输技术^[5-6]。激光点火技术在此背景下成功应用于该领域。激光传输技术具有独特优势, (1) 激光火工品的钝感药剂仅对特定波长范围的激光敏感, 只有点火装置出射的激光容易实现对其触发, 其他波长的光能量和热能量都很难实现对其爆燃, 提高了安全性; (2) 激光传输采用全光纤传输, 实现了点火激光装置和火药的完全分离, 激光火工品完全密封在药剂盒内部, 火药内不存在半导体桥, 激光火工品加工和贮存方便持久, 且点火激光能量可调节, 在火药部分失效的情况下仍可以采用增加激光能量的手段来实现点火^[7-9]。因此, 未来弹射座椅防护救生领域采用激光传输技术, 将提升我军在复杂电磁环境下的作战能力、战场生存能力, 这对实现国防现代化具有重要意义^[10]。

在实际的工程应用中, 需要采用多级光缆将激光器和火工品连接到一起, 实现激光信号从激光器到火工品的传输, 为了便于操作和具有重复性, 需要具有可插拔结构。如本文采用的具有能够插拔的圆形带螺纹(FC)光纤头进行逐级连接, 而这种圆形带螺纹接头由于污染和误操作, 容易发生由端面污损和光纤折断造成的光信号损失, 从而导致整个传输光路的完整性受到破坏, 造成系统功能异常, 不能实现点火^[11-12]。因此为了保证激光点火系统的工作可靠性, 需要在点火前, 在确保不发火的情况下, 对整个点火系统的光学通路进行安全的在线检测^[13]。目前, 激光点火系统的自诊断技术已经有很多研究^[14-16], 本文基于双波长激光器和2×1光纤耦合器实现自诊断, 即半导体激光器除了发射点火激光外, 还能发射检测激光, 利用耦合器和火药端面的波长镀膜处理, 实现点火控制系统中整体光路检测。

1 试验装置

1.1 单路激光点火检测装置

单路激光点火检测装置主要由双波长半导体激光器及

收稿日期: 2022-05-18; 退修日期: 2022-12-18; 录用日期: 2023-01-10

基金项目: 航空科学基金(2019ZC010001)

引用格式: Li Shuai, Wu Hongwei, Li Zhigang, et al. Study on optical circuit on-off detection and ignition timing of laser ignition program controller for ejection seat[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(03): 104-110. 李帅, 吴洪伟, 李志刚, 等. 弹射座椅激光点火程控器光路通断检测和点火时序研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(03): 104-110.

其驱动电源、光纤耦合器、激光起爆器等部分组成,如图1所示。双波长半导体激光器在驱动电源的激励下能够发射波长为915nm的点火主激光和波长为1310nm的检测激光。光纤耦合器为2×1拉锥耦合器,用于主激光和检测激光的传输。激光起爆器由光学窗口和封装的火药构成,窗口的格林透镜将点火主激光透过后汇聚于火药剂表面;光学窗口镀双色膜,915nm点火主激光增透和1310nm检测激光全反。

单路激光点火检测装置的工作原理为:双波长半导体激光器出射的915nm点火主激光和1310nm检测激光一起入射到耦合器端口1的光纤。自检时激光器发出小功率的检测光,经耦合器进入起爆器,起爆器光学窗口的镀膜将检测激光反射回拉锥耦合器,然后大部分1310nm检测激光不能返回原路,而是返回到光纤耦合PD探测的检测端口2,实现对1310nm激光的检测,根据光电探测器电信号判断光路的通断。点火时,激光器发出大功率的点火激光,经耦合器进入起爆器,然后由起爆器端面格林透镜将点火主激光透过后汇聚于火药剂表面,实现点火。

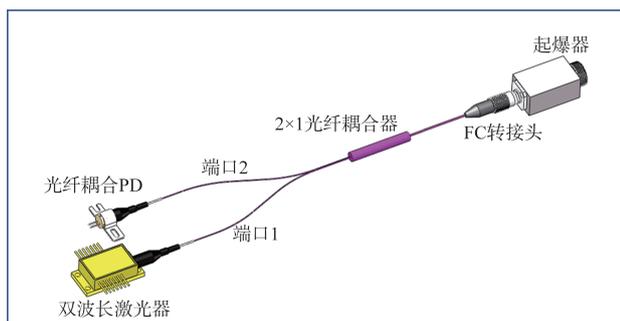


图1 单路光功率双波长检测结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-channel optical power and dual-wavelength detection structure

1.2 半导体激光器参数

半导体激光器在常温25°C下,其输出激光波长为915nm,额定工作电流为11A,额定输出功率为10W,电光转换效率大于50%,波长温漂系数为0.28nm/°C,采用的点火炸药的吸收系数对该波长变化不敏感,在整个温漂范围内895~930nm都有几乎恒定的吸收系数0.9。

1.3 火药参数

HMX炸药的物理性质和热力学参数见表1。

2 单路激光点火理论模拟分析与试验

2.1 单路激光点火理论模拟

本文对单路激光点火进行研究,主要利用有限元分析软件对光与火药作用进行温度变化的模拟。有限元分析软件

表1 HMX炸药的物理性质和热力学参数^[17-18]

Table 1 The physical properties and thermodynamic parameters of HMX explosive^[17-18]

物理参数	数值
密度/(g/cm ³)	1.2
吸收系数	0.9
颗粒大小尺寸/μm	100
导热系数/(W/m·K)	0.15
点火温度/K	560
比热容/(J/kg·K)	1.163
反射率	0.34

能够实现任意多物理场直接耦合分析,由于被加热物体和激光光斑尺寸都远大于波长,因此使用Beer-Lambert定律来模拟材料内激光的吸收现象,实现对光场吸收和温度场分布的模拟。Beer-Lambert定律是光吸收的基本定律,适用于所有的电磁辐射和所有的吸光物质,其基本模型为光照射到吸收介质表面,在通过一定厚度的介质后,由于吸收的效应,透射的光强会减弱,吸收系数和介质厚度越大,则光强减弱越明显。材料内部的温度分布又可以通过吸收光能量产生的热源进行偏微分求得,将上述激光功率和材料参数直接填入软件的核心功能模拟模块即可实现热分布的模拟。

根据试验条件建立简化的激光起爆仿真模型,起爆药密封为轴对称结构,药面直径为3mm,药厚4mm,相关的热力学参数与表1相同。模拟采用的光源参数与实际光源参数相同,激光经整形系统被聚焦至圆柱火药的中心,激光光斑大小为微米量级。由于炸药表面不能将激光完全吸收,因此不仅端面存在温升,在炸药内部也存在温升点。

模拟的结果显示,采用脉冲半导体激光器照射,300μs后火药表面及内部的温度分布如图2所示,从图2中可以看出,能量相对分散,但中心温度接近600K,超过点火温度。火药内部随时间的变化趋势如图3所示,从曲线可以看出,温度一直随时间的增加不断升高,且增长效率逐渐降低,但在300μs后的最高温度达到590K,根据火药温升的时间特性以及HMX炸药的点火温度为560K,可以估算大概在260μs后达到点火温度,实现起爆。

2.2 单路激光点火理论试验

由于点火采用密封结构,激光封闭在火药壳体内,在实际点火时不能同时测定出光和起爆的时刻,但激光器上电的时刻、在不加火药密封结构的情况下,上电后激光发射的时刻以及上电后火药起爆的时刻都可以检测到,因此需要采用间接的方法来测定激光发射多久后火药可实现起爆。试验通过光电探测器探测激光的输出和火药爆炸的时间特性,将激光输出的光信号转换成电信号,作为激光输出开始

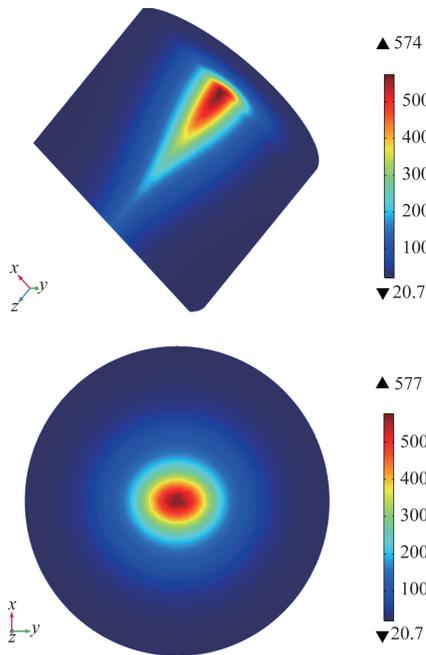


图2 激光照射300 μ s后火药表面和内部温度分布(单位:K)
Fig.2 Surface and internal temperature distribution of gunpowder after 300 μ s of irradiation of the laser

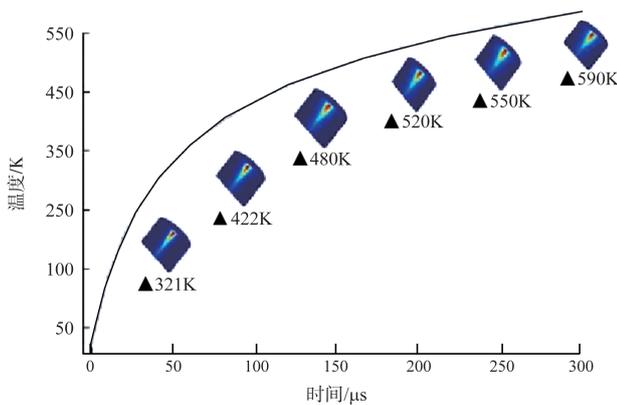


图3 火药内部最高温度随时间变化的规律
Fig.3 The law of the maximum temperature inside the gunpowder with time

的信号;同时含能材料被点燃而产生光信号,光信号同样转换成电信号,同样传输到同一示波器上,确定火药点火时刻,以上电为同一时间起点进行检测,分别测定出射激光和起爆的时间间隔,利用起爆时间间隔减去出光的时间间隔即为激光开始照射火药到火药起爆的时间,由此研究含能材料激光点火所用时间和随各种条件的变化规律。试验装置由上位机控制软件、激光电源、激光器、空间光路、炸药、示波器和光电探测器构成,如图4所示。

首先测试了在不加火药的情况下,通过光电探测器和

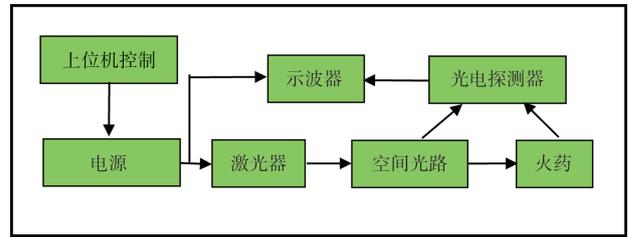


图4 试验装置组成图
Fig.4 Experimental setup

示波器测定激光器从上电开始到达到最大功率的时间参数,确定上电到激光发射的时间间隔,如图5所示,绿色曲线为脉冲半导体激光器的上电信号,黄色曲线为半导体激光输出激光信号,由测定结果可知,上电10 μ s后激光器开始输出激光,经过20 μ s后输出功率达到峰值。

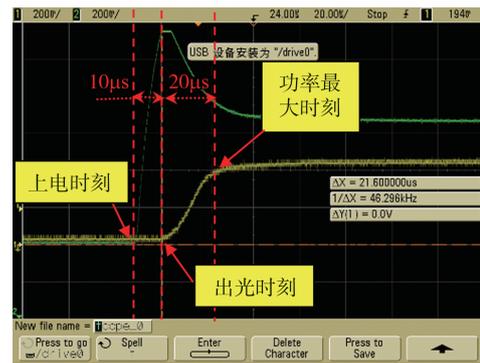


图5 脉冲半导体激光光强变化曲线
Fig.5 The intensity variation of pulsed semiconductor laser

然后将封装好的火药接入光路中,此时光电探测器只能探测火药爆炸产生的光信号。测定结果如图6所示,绿色曲线为上电信号,黄色曲线为火药起爆后探测的爆炸光信号,由此可知上电282 μ s后起爆,由于上电后延时不能即刻出光,而是在上电10 μ s后才有激光产生,相当于激光照射火药272 μ s后火药起爆。测试的结果272 μ s与理论模拟的260 μ s起爆时间接近。

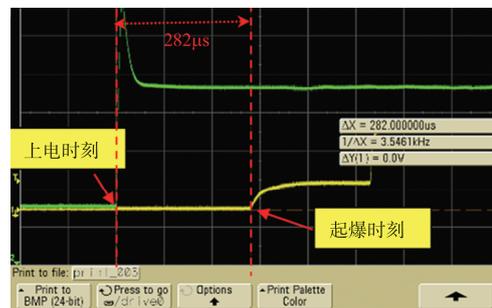


图6 火药起爆的波形
Fig.6 Waveform of gunpowder initiation

3 单路光功率双波长检测

在实现单路点火后,实际工程应用中还需要对点火状态能够实现检测。为了实现全光路通断的检测,将双波长激光器、耦合器、光纤耦合探测器PD通过光纤熔接机连接到一起,耦合器输出端通过FC头与未装药起爆器连接到一起,通过控制1310nm激光电流,检测PD输出端电压,从而实现整体光路通断的检测。

从图7可以看出,1310nm探测激光的输出功率随着电流的增大不断增加,当到达最高40mA工作电流时,输出功率800 μ W。PD两端的电压随着电流不断增加,增加到30mA时达到饱和,最大电压为3.7V。因此在实际检测时,将检测电流设定为25mA。

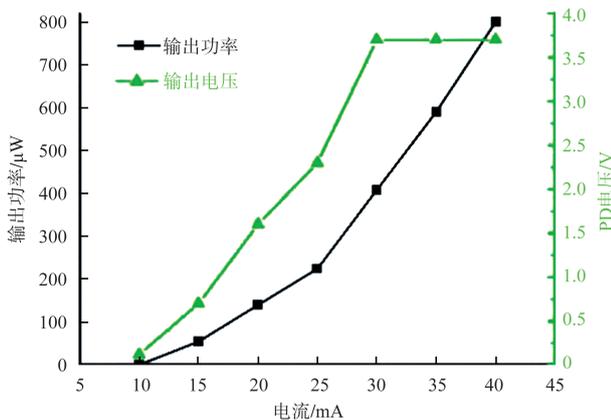


图7 检测电压及输出功率随电流的变化曲线

Fig.7 Change curve of detection voltage and output power with current

为了实现工程化一致性,对6个未装火药的激光点火器进行了测试,在相同电流下,输出电压见表2,不同的激光点火器在相同电流下,探测到的反馈电压为1.0~1.1V,对应输出功率差异在 $\pm 5\%$ 范围内,由此可见激光点火器光学特性的一致性较强,满足工程化需求。

表2 光功率反馈测试

Table 2 Optical power feedback test

激光点火器	1	2	3	4	5	6
电流/mA	25	25	25	25	25	25
输出电压/V	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1

4 激光点火程控器多路点火激光检测

在实际工程应用中,弹射座椅主要由程控器、弹射动力装置、电气系统组成。其中程控器是信号传输与安全救生的核心控制系统,其控制弹射座椅多路点火的工作时机。

在实现接口兼容的条件下,完成了现有电子式程控器的贯改,现有程控器体积为403mm \times 105mm \times 73mm,因此需要在该体积范围内,将目前多路电信号传输方式的程控器改装成多路激光信号传输的方式,实现多路激光点火程控器的总体设计和装配,整体结构如图8所示。

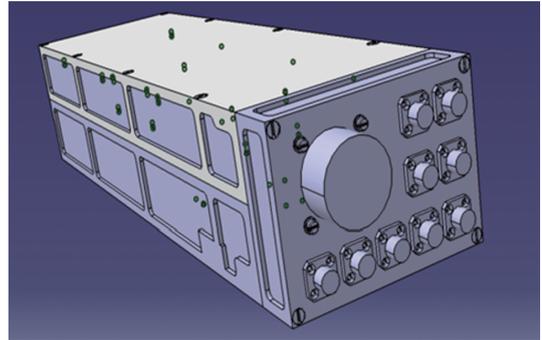


图8 激光点火程控器结构示意图

Fig.8 Structure diagram of laser ignition program controller

在满足体积要求的条件下,还需要测定多路激光点火的能量和时序特性。测定各路激光输出功率的试验装置由激光点火程控器、光纤、光纤法兰和能量计组成。其示意图如图9所示,测试了激光器的输出能量,见表3。



图9 激光能量测试框图

Fig.9 Laser energy test block diagram

表3 不同环境下的激光能量测试

Table 3 Laser energy testing in different environments

能量值/mJ	常温测试	70 $^{\circ}$ C测试	-55 $^{\circ}$ C测试
第1路	830	813	837
第2路	127	120	133
第3路	107	95	93
第4路	96	88	94
第5路	114	100	109
第6路	170	155	159
第7路	131	121	131
第8路	205	192	202
第9路	210	192	206

为了实现程控器9路915nm点火激光时序的测试,设计和加工了时序检测装置,如图10所示。将程控器的9个输出端,通过两端都为FC头的光纤连接到时序测试装置,通过该装置测试9路激光的点火时序,获得的时序如图11所示,每路间隔100ms,总共时间800ms,9路点火总时间小于1s,满足需求。



图10 激光时序测试图

Fig.10 Laser timing test chart

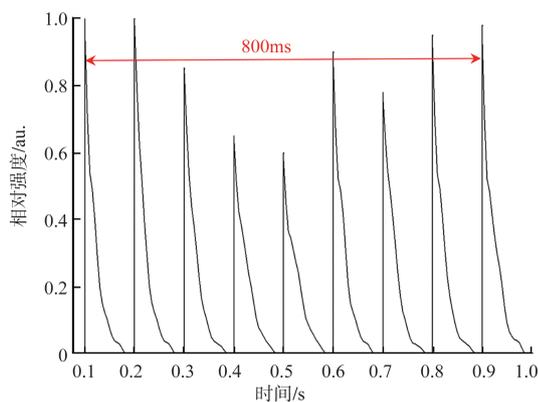


图11 激光测试时序图

Fig.11 Laser test timing diagram

5 环境试验后的激光点火试验

5.1 测试条件

激光点火程控器和激光点火器满足点火需求和实现原理验证后,其工程化应用还需要满足其特殊的环境适应性,主要包括高低温环境和振动环境,根据实际检测标准,对程控器和激光点火器进行环境试验,在 $-55^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $70^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 进行振动试验,其功能试验每轴向持续时间为1h,试验量值 $0.1\text{g}^2/\text{Hz}$,耐久试验每轴向持续3h,试验值为 $0.16\text{g}^2/\text{Hz}$,振动试验完成后,将程控器和激光点火器在 $70^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $-55^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的温箱中贮存2h,从温箱拿出来后通过光纤连接激光点火器,直接进行激光点火试验,并测量其点火时序,由此确定该系统的工程化程度和可行性。由于实验室内只有6台防爆箱,因此在高低温、振动试验结束后,仅针对不同组合的6路激光输出进行点火时序的测试,通过拨动点火开关(以代替弹射座椅的中央拉环信号),程控器按照特定时序输出点火激光,其时序通过软件可调。

5.2 测试结果

选定了第1路的激光输出作为起始信号:程控器共有9路

输出,第1路点火由硬件电路控制,点火脉宽由点火开关控制,因此点火时间较长,刚好与常温、高温、低温测试的能量830mJ、813mJ、837mJ相吻合,此后的第2~7路激光的点火脉宽由软件控制,约为50ms,其软件设定的每路时序间隔为100ms(暂定),测定了第1路激光信号与第2路的爆炸光的时序间隔,由于点火开关去抖,占用了5ms,导致第1路激光光信号延迟5ms后输出,因此第1路和第2路间隔时间约为95ms,点火后探测到的第2~7路的爆炸光的时序间隔约为100ms,如图12所示,测定高温试验下的时序满足弹射试验要求。

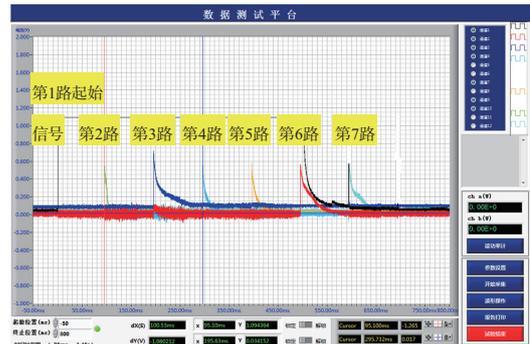


图12 高温激光点火测试曲线

Fig.12 High temperature laser ignition test curve

选定第2路的激光输出作为起始信号:程控器共有9路输出点火,其第2~8路的点火脉宽约为50ms,其软件设定的每路时序间隔为100ms,测定了第2路激光信号与第3路的爆炸光的时序间隔,约为100.5ms,其探测到的第3~8路的爆炸光的时序间隔约为100ms,如图13所示,测定低温时序满足弹射试验要求。

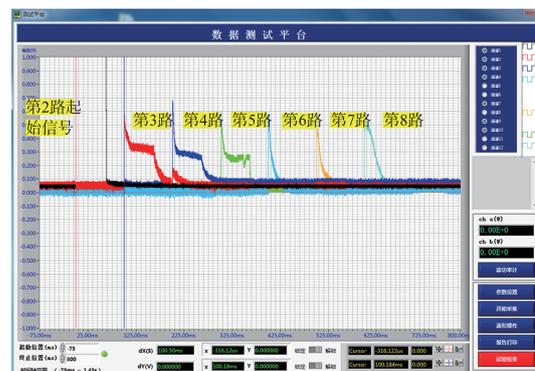


图13 低温激光点火测试曲线

Fig.13 Low temperature laser ignition test curve

6 结束语

本文从理论和试验两方面研究了激光点火在弹射座椅中的工程应用可行性及相关关键点火参数的选择,主要包

括:(1)单路激光点火时间的特性,确定了实现点火的时间;(2)改进了检测方法,采用双波长的方法,实现了全光路检测,避免了现有检测方法部分检测可能造成光路检测不完全不准确的不足;(3)实现对多路激光点火程控器装置点火功率和时序的控制,且经过振动和高低温测试后,输出性能指标稳定一致,满足多路点火的时间要求,达到了预期的技术指标。该激光点火程控器装置基本达到了工程化应用的水平,可供弹射座椅直接使用,为将来军用工品由电点火升级为激光点火积累了宝贵的经验,在国内首次报道了多路激光点火和全光路检测。

AST

参考文献

- [1] 周昊,宋亚丽,冯志杰,等.基于ADAMS的弹射座椅弹射出舱姿态研究[J].航空科学技术,2021,32(2):66-73.
Zhou Hao, Song Yali, Feng Zhijie, et al. Research on ejection attitude of ejection seat based on ADAMS[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2): 66-73. (in Chinese)
- [2] 冯志杰,宋亚丽,王海云,等.飞机弹射座椅椅载设备载荷谱获取方法研究[J].航空科学技术,2019,30(11):62-68.
Feng Zhijie, Song Yali, Wang Haiyun, et al. Research on the acquisition method of load spectrum of equipment for aircraft ejection seat[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 62-68. (in Chinese)
- [3] 胡艳,沈瑞琪,叶迎华.激光点火技术的发展[J].含能材料,2000,8(3):141-143.
Hu Yan, Shen Ruiqi, Ye Yinghua. Development of laser ignition [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2000, 8(3): 141-143. (in Chinese)
- [4] 赵兴海,高杨,赵翔.激光起爆技术研究进展[J].红外与激光工程,2009,38(5):797-802.
Zhao Xinghai, Gao Yang, Zhao Xiang. Development of laser ignition technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 797-802. (in Chinese)
- [5] Heric O, Nils R. Laser ignition of pyrotechnic mixtures: Ignition mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(4): 1993-2003.
- [6] 曹军胜. 半导体激光起爆试验研究[J]. 激光杂志, 2014, 35(10):29-32.
Cao Junsheng. Experimental study on the initiation of semiconductor laser[J]. Laser Journal, 2014, 35(10): 29-32. (in Chinese)
- [7] 赵翔,苏伟,杜涛,等.激光点火技术综述[J].红外与激光工程,2009,38:405-406.
Zhao Xiang, Su Wei, Du Tao, et al. Overview of laser ignition technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38: 405-406. (in Chinese)
- [8] 项仕标,冯长根,王丽琼,等.激光二极管点火机理研究[J].红外与激光工程,2003,32(2):141-144.
Xiang Shibiao, Feng Changgen, Wang Liqiong, et al. Investigation on mechanisms of laser diode ignition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(2): 141-144. (in Chinese)
- [9] 李帅,朱元明,张政,等.半导体激光器和光纤激光器不同工作方式下HMX点火研究[J].火工品,2022(1):29-33.
Li Shuai, Zhu Yuanming, Zhang Zheng, et al. Research on the HMX ignition under different working modes of semiconductor laser and fiber laser[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(1): 29-33. (in Chinese)
- [10] 徐良法,查国云.用于弹射救生设备的激光起爆系统的设计[J].电光与控制,2002,9(1):61-64.
Xu Liangfa, Zha Guoyun. Design of laser detonation system for ejection life-saving equipment[J]. Electronics Optics & Control, 2002, 9(1): 61-64. (in Chinese)
- [11] 王岳泰.光纤活动连接器插针体端面质量对光学性能的影响[C]//中国通信学会2020年通信线路学术年会,2020:309315.
Wang Yuetai. Influence of the quality of the end face of the pin body of the fiber optic connector on the optical performance [C]//Proceedings of the 2020 Communication Line Academic Annual Conference of China Society of Communications, 2020: 309315. (in Chinese)
- [12] 吴昌,许立新,张先明.光纤弯曲损耗系数随环境变化的研究[J].量子电子学报,2018,35(6):752-758.
Wu Chang, Xu Lixin, Zhang Xianming. Alteration of fiber bending loss coefficient with environment[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(6): 752-758. (in Chinese)
- [13] 叶志鹏,贾睿,吴强,等.一种单光路激光点火系统通路分析方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(4):121-127.
Ye Zhipeng, Jia Rui, Wu Qiang, et al. A single optical path analysis method for laser ignition system[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2019, 46(4): 121-127. (in Chinese)

- [14] 王殿湘,尹国福,贺爱锋,等. 激光多点点火系统自诊断检测技术研究[J]. 火工品,2013(6):51-53.
Wang Dianxiang, Yin Guofu, He Aifeng, et al. Study on build-in test technology for laser multi-point initiation system[J]. Initiators & Pyrotechnics,2013(6):51-53. (in Chinese)
- [15] 张磊,凌震,项宗友. 基于双光纤检测技术的激光点火控制系统设计[J]. 航天控制,2013,31(4):84-87.
Zhang Lei, Ling Zhen, Xiang Zongyou. Design of laser initiation control system based on dual-fiber detection technology[J]. Aerospace Control, 2013, 31(4): 84-87. (in Chinese)
- [16] 唐黄,冯阳,赵栋,等. 激光点火检测系统的研究[J]. 激光杂志,2010,31(2):46-47.
Tang Huang, Feng Yang, Zhao Dong, et al. The research on laser ignition detection system[J]. Laser Journal,2010,31(2):46-47.(in Chinese)
- [17] 周霖,刘鸿明,徐更光. 炸药激光起爆过程的准三维有限差分数值模拟[J]. 火炸药学报,2004(1):16-19.
Zhou Lin, Liu Hongming, Xu Gengguang. Three-dimensional finite difference model of simulating the process of laser ignition of explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2004(1):16-19. (in Chinese)
- [18] Jacqueline A. The chemistry of explosives[M]. UK:Athenaeum Press Ltd.,1998.

Study on Optical Circuit On-off Detection and Ignition Timing of Laser Ignition Program Controller for Ejection Seat

Li Shuai¹, Wu Hongwei¹, Li Zhigang¹, Kang Junfeng¹, He Aifeng², Cao Chunqiang², Jing Bo²

1. Aerospace Life-Support Industries Co.,Ltd., Xiangyang 441003, China

2. Shanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China

Abstract: In this paper, because of the advantages of anti-static, anti-electromagnetic interference and high safety, laser ignition has important application value in military, aviation, space and other fields. The application of laser ignition technology in the ejection seat is researched. The simulation model of temperature distribution of HMX explosive during laser initiation is established by using the interaction model of material and laser in Finite element analysis software, and the laser initiation test is carried out. The simulation prediction of initiation time and temperature distribution is basically consistent with the experimental results. The detection method is improved, and a dual-wavelength laser and a 2x1 coupler are used to detect the on-off of the all-optical path. Through the simultaneous detection of nine laser channels, the detection of laser signal transmission sequence is realized. The test results meet the requirement that the total ignition time of nine channels of ejection seat is less than 1s. On this basis, the actual ignition test under the conditions of high and low temperature is carried out, and the laser initiation is completed, multi-channel laser ignition timing is studied for the first time, the ignition timing meets the standard of engineering application, and the new laser ignition program controller can be directly applied to the ejection seat, the feasibility of laser ignition in the field of protection and lifesaving is verified.

Key Words: laser ignition; optical path detection; ignition timing; program controller

Received: 2022-05-18; **Revised:** 2022-12-18; **Accepted:** 2023-01-10

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2019ZC010001)