

一种单光路激光点火系统通路分析方法

叶志鹏[†], 贾睿, 吴强, 郭闻昊, 高雅, 李华滨

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要:研究了激光点火系统通路分析方法, 首先给出了单光路激光点火系统光路传输模型, 接下来提出了一种光通路分析方法, 分别分析了光路连接器数目对光路插入损耗和回波损耗的影响, 并给出了不同光路连接器对应的光通路判据和激光火工品正常工作判据, 提高了分析方法的适应性和准确性. 试验证明, 所提出的单光路激光点火系统分析方法的正确性, 为箭载控制计算机软件提供设计依据.

关键词:点火系统; 固态激光器; 光学工程; 单光路模型; 光通路检测.

中图分类号:TP391.8

文献标志码:A

A Single Optical Path Analysis Method for Laser Ignition System

YE Zhipeng[†], JIA Rui, WU Qiang, GUO Wenhao, GAO Ya, LI Huabin

(Beijing Institution of Astronautic Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: A path analysis method of the laser ignition system was investigated. First, an optical transmission model was given for the single optical path, and an analysis method was proposed by analyzing the effect of the number of optical connectors on the insertion and reflection loss. The criteria of the optical path for different number of connectors and work of laser explosives was deduced to improve the adaption and precision of the method. The experiments of ignition proves the correctness of the proposed method, which provides a reference for the design of on-board controlling computer software of launch vehicle.

Key words: ignition systems; solid state lasers; optical engineering; single optical path model; optical path test

激光点火系统内部电能与光能的换能部件为激光二极管, 取消了与药剂直接接触的桥丝或桥带等换能器件, 火工品与控制设备采用光纤连接, 消除了外界电磁干扰(电磁脉冲、射频、雷电、静电等)在传输线路上产生的感应电流, 从根本上解决了火工品的电磁环境安全问题, 因而激光火工品内部结构简单, 可靠性高^[1], 为激光点火装置小型化提供了

良好的前景.

激光点火系统根据传输光路数量不同可分为双光纤光路和单光纤光路两类. 双光纤光路检测方案发火通路与检测通路各用一根光纤, 其检测原理是利用激光器发出低功率荧光, 通过发火光纤传输至起爆器, 经过光窗口反射后部分反射光再耦合进入检测光纤反向传输, 到达光探测器从而判断光路

* 收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671175), National Natural Science Foundation of China(61671175)

作者简介: 叶志鹏(1989—), 男, 内蒙古包头人, 北京宇航系统工程研究所工程师, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: yzpdsg@126.com

状态. 双光纤光路检测面临的主要问题是难以证明低功率荧光与高功率点火激光光路状态的一致性, 不利于准确检测光路状态. 单光纤光路检测方案是一种光纤耦合技术, 即发火通路 with 检测通路共用一根光纤. 检测时控制激光器发出低功率光并传输至激光起爆器光窗口, 经过反射后大部分反射光沿光纤反向传输, 经分束器到达光探测器, 根据测量结果判断光路状态. 单光路方案解决了双光路方案的一致性难题, 且光路结构简单可靠, 获得了广泛的关注.

国内外关于激光点火技术的研究已有几十年的历史. 在早期研究中, Bowden 等^[2]研究了药剂热点 (hot spot) 与点火温度和持续时间之间的关系. 随着激光器小型化及激光二极管、低损耗光纤的出现, 美国在 20 世纪八九十年代开展了大量激光火工品的工程应用研究, 并突破了多项工程应用关键技术. 1992 年, 美国军事标准“火箭弹和导弹发动机点火系统设计安全准则”(MIL-STD-1901) 中首次提出了将激光点火系统用于直列式点火的要求; 1993 年 McDonnell Douglas 导弹系统公司发展了用于空空导弹的激光点火子系统^[3]; Jacobs 等^[4]采用两种不同波长的激光完成了光缆网完整性检测; NASA 于 1995 年在飞马座空基运载火箭上进行了激光起爆试验, 取得了成功, 验证了此类产品的可靠性^[5]; 2002 年, Quantic 工业公司开发了用于激光点火的在线光回路检测系统^[6]; NASA 发布的标准《发射和空间飞行器用爆炸系统和装置鉴定》^[7] 中已要求激光火工品应采用系统嵌入式自检. 目前, 激光点火相关产品在国外已发展为较为成熟的货架产品.

我国陕西物理化学研究所早在 1975 年就开展了激光引爆炸药的实验研究, 在“九·五”期间对激光点火机理进行了初步研究, 并实现了用于火炮发射的激光点火器. 鲁建存^[8]介绍了激光反射率的测定原理, 利用 45°定向法测定了起爆药对铍玻璃脉冲的激光反射率; 刘贯虹^[9]介绍了由壳体、激光雷管和光导索组成的激光起爆器结构及其药剂组成; 2000 年, 川南机械厂利用半导体激光器实现了对烟火药和钝感猛炸药的起爆, 迈出了激光发火技术在航天火工品应用研究领域的的第一步. 此后, 对于激光火工品的研究开始呈现百花齐放的趋势. 崔卫东等^[10]研究了光纤直径对起爆阈值和点火阈值的影响. 张秋芳等^[11]对固体发动机激光点火装置进行了研究, 实现了双路点火并具备了实际应用功能; 韦爱勇等^[12]对火工品药剂激光敏感度进行了研究, 获

得了常用火工药剂粒径能量吸收比; 张小兵等^[13]设计了一种多点均匀点火模拟装置, 通过光学玻璃窗耦合将能量分配到各燃点实现同时点火; 李芳等^[14]对激光起爆系统的可靠性进行了仿真研究, 并对不同可靠度下所需激光器输出能量进行了模拟计算; 贺爱锋等^[15]对阶跃与渐变折射多模光纤的轴偏离影响进行了理论分析; 魏继锋等^[16]研究了激光二极管阈值电流和输出光功率随温度变化的规律; 王悦勇等^[17]从激光器控制、激光火工品测试、激光起爆及装药、激光传输及光缆接插件等方面详细叙述了激光点火系统的关键技术; 曹军胜^[18]采用光分路方法和低功率窄脉冲测试技术研制出一种激光火工品反射率自动测试系统, 提高了测试精度; 曾雅琴等^[19]设计了一种双光纤光路自检系统, 建立了一种利用检测光路损耗推导发火光路损耗的光能传输模型, 提高了检测光的接收率; 祝明水等^[20]针对激光点火系统的光路检测问题, 在激光火工品与药剂接触的光纤端面蒸镀能透过点火激光而反射检测激光的滤光膜片, 通过判断检测激光反射电流大小判断光路的连续性. 曹军胜^[21-22]介绍了一种基于双光路的集成化三路多时序半导体激光点火系统; 梅崑等^[23]对大行程 1×2 MEMS 光开关驱动结构及加工工艺进行了分析, 证明了 MEMS 光开关能够满足激光点火系统应用需求. 鄢铿等^[24]测定了 Al₂O₃ 陶瓷对 CO₂ 激光的折射率和吸收率. 陈刚等^[25]研究了 CO₂ 激光器对材料力学性能的影响.

国内现有研究大多停留在原理样机阶段, 缺乏从总体角度对光路进行分析以及制定光路检测判据的方法. 本文针对单光路激光点火系统的光路检测问题, 从总体顶层设计角度提出了一种分析方法, 对全光路进行了系统分析并给出了不同光路连接器对应的光通路判据.

1 单光路激光点火系统光通路计算

1.1 光通路分析模型

激光点火系统的起爆机理是在箭载计算机控制下, 通过激光器电源驱动半导体激光器发出一定功率的光能, 经光纤传输使激光火工品点火药剂产生热量, 达到点火或起爆所需的热能, 从而起爆火工品.

对于单光路激光点火系统, 通过在光路中传输不同波长的点火和检测激光实现光路复用. 点火前, 利用检测激光器通过测量光路中光强的衰减实现

光路的通路检测.点火时,利用点火激光器发出高能激光,沿相同光路传输起爆火工品.本文对单光路检测激光传输系统进行了建模,火工品起爆前后光传输模型如图 1 和图 2 所示.图中: P 为发射光的光强; γ 为激光器输出光强; α 为单个光纤连接器的衰减损耗; β 为单个光纤连接器的回波损耗; n 为连接器的个数; ϕ 为反射膜的反射率,规定从激光器到火工品反射膜的传播方向为正向.

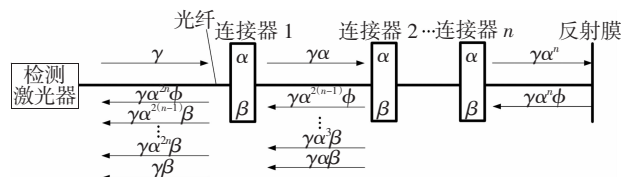


图 1 火工品起爆前,包含 n 个连接器的检测光路示意图

Fig.1 A sample light path containing n connectors before ignition.

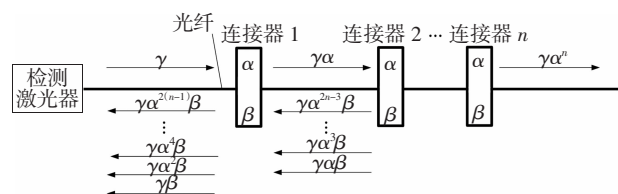


图 2 火工品起爆后,包含 n 个连接器的检测光路示意图

Fig.2 A sample light path containing n connectors after ignition

无反射膜(未挂接激光火工品)时光路的反射光功率如式(1)所示.

$$P = \gamma\beta(\alpha^0 + \alpha^2 + \dots + \alpha^{2(n-1)}) = \gamma\beta \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^{2i} \quad (1)$$

有反射膜(挂接激光火工品)时光路的反射光功率按式(2)计算.

$$P = \gamma\beta(\alpha^0 + \alpha^2 + \dots + \alpha^{2(n-1)}) + \gamma\phi\alpha^{2n} \\ = \gamma\beta \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^{2i} + \gamma\phi\alpha^{2n} \quad (2)$$

由此可根据检测到的反射光功率计算光路衰减,制定光通路判据,从而判断光路的通断状态.

1.2 光通路分析

本文从总体设计角度出发,依据激光点火系统输入指标,从上游激光点火控制模块到下游激光火工品的全系统层级对单光路激光点火系统光通路进行系统分析,包括全光路衰减、干扰光功率分析和光通路检测判据分析.

本文提出的光通路分析方法如图 3 所示.首先分析了激光点火系统光纤连接器个数对全光路光

强衰减的影响,得到了不同光路连接器数对应的光路衰减值;接下来聚焦激光点火控制模块,对其内外光路进行综合分析,得到光路连接器产生的回波反射引起的干扰光功率;最后综合上述分析结果,给出不同光路连接器对应的激光点火系统通路检测判据.

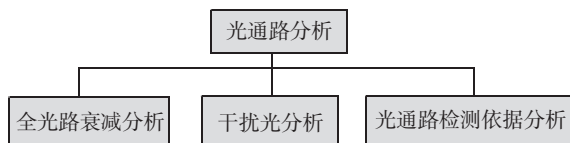


图 3 自顶向下的光通路分析方法

Fig.3 A top-down optical path analysis method

激光点火系统设计输入指标如表 1 所示,其中区分度为光路中挂接与不挂接激光火工品对应的光路衰减的差值,该值越大,两种情况的差异越明显,有利于判断激光火工品是否正常起爆.点火与检测激光器均采用成熟货架产品,生产单位包括武汉光迅、中电 44 所等,广泛应用于各类工业产品.激光火工品镀膜采用蒸镀方式,相关参数要求可参见文献[20].

从顶层设计中指标闭合的角度考虑,需考察最不利条件下光路的衰减,即选取激光点火控制模块输出功率最小、激光火工品输入光功率最小、火工品镀膜反射率最小、光纤连接器插入和回波损耗最大的情况进行分析.

表 1 激光点火系统设计要素

Tab.1 Constrains of the laser ignition system

部件	指标名称	要求
点火激光器	点火激光波长	980 nm
检测激光器	检测激光波长	1 310 nm
激光点火控制模块	输出功率	≥ 2.4 W
检测激光器	稳定输出功率	≤ 1 mW
激光火工品	输入光功率	≥ 1 W
激光火工品	镀膜反射率	$\geq 95\%$
光纤连接器	插入损耗	≤ 0.6 dB
光纤连接器	回波损耗	≤ 20 dB
—	区分度	≥ 7 dB

1.2.1 全光路分析

对于单光路光纤,点火与检测激光共用同一条光路,因此可通过点火激光的指标估计全光路衰减.根据式(1)和式(2)分别针对光路有无火工品反射

膜(是否挂接火工品)进行了仿真计算,取单个光纤连接器的衰减损耗 $\alpha = 0.6$ dB,回波损耗 $\beta = 20$ dB,反射膜的反射率 $\phi = 95\%$,输出点火激光功率为 2.4 W,计算结果如表 2 和表 3 所示,相同连接器对应的挂接和不挂接火工品时光路的衰减差值越大,火工品点火起爆前后可区分性越好。

表 2 挂接火工品通路测试计算结果(有反射膜)

Tab.2 Results of path test with explosive device connected (with reflecting coating)

连接器数	镀膜反射率/%	衰减损耗 /dB	回波损耗 /dB	输出光强 /W	光路衰减 /dB
1	95	0.6	20	1.75	1.36
2	95	0.6	20	1.35	2.49
3	95	0.6	20	1.05	3.59
4	95	0.6	20	0.82	4.66
5	95	0.6	20	0.65	5.69
6	95	0.6	20	0.52	6.69
7	95	0.6	20	0.42	7.63
8	95	0.6	20	0.34	8.51
9	95	0.6	20	0.28	9.32
10	95	0.6	20	0.24	10.06

表 3 不挂接火工品通路测试仿真计算结果(无反射膜)

Tab.3 Results of path test with explosive device disconnected (without reflecting coating)

连接器数	衰减损耗/dB	回波损耗/dB	输出光强/W	光路衰减/dB
1	0.6	20	0.024	20.00
2	0.6	20	0.042	17.55
3	0.6	20	0.056	16.32
4	0.6	20	0.066 5	15.57
5	0.6	20	0.074	15.08
6	0.6	20	0.080	14.75
7	0.6	20	0.085	14.10
8	0.6	20	0.088 5	13.88
9	0.6	20	0.091	13.72
10	0.6	20	0.093	13.59

1.2.2 干扰光分析

光路干扰光分析的目的在于获取光路连接器回波反射产生的干扰光强,从而更加准确地计算出反射光强,提高通路判据的准确性.干扰光传输光路如图 4 所示. 外光路光缆网包含的光纤连接器个数

为 $n-1, n$ 为外光路包含的光纤连接器总数。

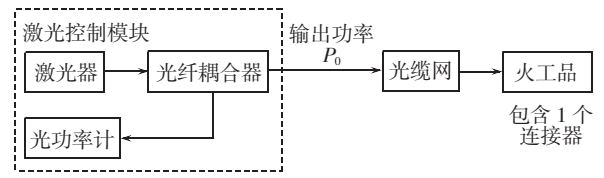


图 4 干扰光传输光路

Fig.4 Transmission path of light of interference

激光经过第 1 个、第 2 个直至第 n 个光路连接器由回波反射所产生的光功率按式(3)计算。

$$P_{\text{回}}=P_0(\beta+\alpha^2\beta+\alpha^4\beta+\dots+\alpha^{2n}\beta) \quad (3)$$

根据输入指标,不同光纤连接器个数对应的回波损耗误差如表 4 所示.从表中数据可以看出,光路中连接器个数越多,回波损耗产生的干扰光占比越大。

表 4 不同光纤连接器个数回波损耗误差计算结果

Tab.4 Results of return loss of different connectors

连接器数	回波损耗误差/dB	干扰光占比/%
1	0.06	1.37
2	0.14	3.12
3	0.24	5.33
4	0.37	8.09
5	0.53	11.50
6	0.74	15.62
7	1.00	20.51
8	1.32	26.14
9	1.70	32.45

以光纤连接器个数 $n = 6$ (包含火工品连接器)为例进行分析.忽略点火控制模块内部的损耗,回波反射产生的干扰光的功率为:

$$P_{\text{回}} = P_0(\beta+\alpha^2\beta+\alpha^4\beta+\dots+\alpha^{2n}\beta) = P_0\beta\frac{1-\alpha^{2n}}{1-\alpha^2} \\ = 2.4 \times 0.01 \times \frac{1-0.871^{12}}{1-0.871^2} = 0.08 \text{ W}$$

由光纤耦合器反向分光损耗为 10 dB (换算成光通过率为 0.1),可得出到达光功率计的光功率:

$$0.08 \times 0.871 \times 0.1 \approx 0.007 \text{ W}$$

检测光经火工品反射膜反射到达控制模块的功率:

$$P_{\text{测}}=P_0\alpha^{2n} \times 0.95=2.4 \times 0.871^{12} \times 0.95=0.435 \text{ W}$$

经过反向分光衰减,到达光功率计的功率为 $0.435 \times 0.871 \times 0.1 \approx 0.038 \text{ W}$.因此实测值中,干扰光占

比为 $\frac{0.007}{0.007 + 0.038} \times 100\% = 15.62\%$ 。

回波损耗造成的误差为:

$$-10\log_{10}\frac{0.038}{2.4} - (-10\log_{10}\frac{0.045}{2.4}) \approx 0.734 \text{ dB}$$

出于系统留取余量的考虑,向上取为 0.74 dB。

1.2.3 光通路检测判据分析

1.2.3.1 光通路检测判据上限分析

以满足指标约束为前提,取各指标临界值进行分析。令到达点火头反射面的激光功率为 1.0 W。由激光器输出点火功率为 2.4 W,可以计算得到到达点火端面的链路最大衰减为 $-10 \times \log_{10} \frac{1}{2.4} = 3.80 \text{ dB}$;火工品反射膜处光的衰减可通过火工品反射膜的反射率计算。当反射率为 95%时,反射膜处光的衰减为 $-10 \times \log_{10} 0.95 = 0.22 \text{ dB}$;测试光通过激光火工品光连接器时的最大损耗 0.6 dB,因此测试光经来回两次行程和激光火工品光纤连接器的总衰减率为 $3.8 \times 2 + 0.22 + 0.6 \times 2 = 9.02 \text{ dB}$ 。排除干扰光及光电探测器实际测量误差 ($\pm 0.5 \text{ dB}$) 的影响,不同连接器个数对应的光路总衰减值上限值如表 5 和表 6 所示。出于判据加严的原则,取表 5 的计算结果作为判据上限。

以 6 个连接器为例,总衰减率应不大于 $(9.02 - 0.74 - 0.5) \text{ dB} = 7.78 \text{ dB}$ 。从顶层设计角度考虑需留取一定余量,因此对结果向下取整从而得到通路判据上限为 7 dB。

表 5 光路回波损耗误差及衰减上限
(光功率计误差为 0.5 dB)

Tab.5 Results of return loss and upper limits of light path (error rate of the light power detector is 0.5 dB)

连接器数	回波损耗误差/dB	总衰减上限值
1	0.06	$[9.02 - 0.06 - 0.5] = 8$
2	0.14	$[9.02 - 0.14 - 0.5] = 8$
3	0.24	$[9.02 - 0.24 - 0.5] = 8$
4	0.37	$[9.02 - 0.37 - 0.5] = 8$
5	0.53	$[9.02 - 0.53 - 0.5] = 7$
6	0.74	$[9.02 - 0.74 - 0.5] = 7$
7	1.00	$[9.02 - 1 - 0.5] = 7$
8	1.32	$[9.02 - 1.32 - 0.5] = 7$
9	1.70	$[9.02 - 1.70 - 0.5] = 6$

表 6 光路回波损耗误差及衰减上限
(光功率计误差为 -0.5 dB)

Tab.6 Results of return loss and upper limits of light path (error rate of the light power detector is -0.5 dB)

连接器数	回波损耗误差/dB	总衰减上限值
1	0.06	$[9.02 - 0.06 + 0.5] = 9$
2	0.14	$[9.02 - 0.14 + 0.5] = 9$
3	0.24	$[9.02 - 0.24 + 0.5] = 9$
4	0.37	$[9.02 - 0.37 + 0.5] = 9$
5	0.53	$[9.02 - 0.53 + 0.5] = 8$
6	0.74	$[9.02 - 0.74 + 0.5] = 8$
7	1.00	$[9.02 - 1 + 0.5] = 8$
8	1.32	$[9.02 - 1.32 + 0.5] = 8$
9	1.70	$[9.02 - 1.70 + 0.5] = 8$

1.2.3.2 光通路检测判据下限分析

与判据上限可根据理论分析确定不同,通路检测衰减率下限除受光路连接器个数、插接损耗和回波损耗的影响外,还与镀膜反射率、光纤连接器最大耐受光强和火工品最大耐受光强有关。同时,与上限分析具有明确的指标约束作为输入不同,检测激光器输出的光功率 1 mW 小于光缆网最大耐受光强和火工品最大耐受功率,导致分析时没有有效的光功率下限数据作为输入,给计算带来困难。

为解决这一问题,针对单光纤光路激光点火系统的特点,在进行通路检测判据下限分析时,借用火工品挂接状态点火激光的功率数据,同时忽略全光路最大耐受光强,分析结果如表 7 所示。

表 7 光路衰减下限及通路检测判据

Tab.7 Results of lower limits of light path and criteria of the status of the light path

连接器数	光路衰减/dB	光路衰减下限($\phi = 95\%$)	光通路检测判据
1	1.36	$[1.36 - 0.06 - 0.5] = 0$	[0, 8]
2	2.49	$[3.58 - 0.14 - 0.5] = 2$	[2, 8]
3	3.58	$[3.58 - 0.24 - 0.5] = 2$	[2, 8]
4	4.66	$[4.66 - 0.37 - 0.5] = 3$	[3, 8]
5	5.69	$[5.69 - 0.53 - 0.5] = 4$	[4, 7]
6	6.69	$[6.68 - 0.74 - 0.5] = 5$	[5, 7]
7	7.63	$[7.63 - 1 - 0.5] = 6$	[6, 7]
8	8.51	$[8.51 - 1.32 - 0.5] = 6$	[6, 7]
9	9.32	$[9.32 - 1.70 - 0.5] = 7$	—

当光路中连接器数为9个及以上时,光通路判据上限小于下限导致无实际应用意义.因此光路中连接器个数应控制在8个以内,表7给出了相应光通路检测判据.对光路进行检测时,若测得的光路衰减值超出了判据范围,则认为光路出现异常,应进行排查.

1.2.3.3 火工品正常起爆判据

火工品起爆后反射镀膜被破坏,光路为无反射膜状态.因此若测得的光路衰减同时大于通路判据和区分度,即可认为火工品正常起爆.例如,光路中包含4个连接器时,若光路衰减大于8 dB,则可认为激光火工品正常起爆.

2 试验结果

发火试验前后,分别利用光强计对7路激光火工品检测光通路衰减,以验证上述分析方法所得判据的正确性.根据实际安装需要,光纤连接器数目为5.试验结果如表8、表9所示.从表中数据可以看出,全部实测值均满足指标分析推导出的判据要求,证明了分析模型的合理性和判据的有效性.

表8 发火试验前光路实测值及判据满足情况

Tab.8 Test values of the optical path before ignition and the consistency with the criteria

序号	分析值/dB	实测值/dB	是否满足
1	[4, 7]	5.536.44	是
2	[4, 7]	5.075.86	是
3	[4, 7]	4.885.69	是
4	[4, 7]	5.35~5.93	是
5	[4, 7]	4.52~5.84	是
6	[4, 7]	4.41~5.03	是
7	[4, 7]	4.39~5.06	是

表9 发火试验后光路实测值及判据满足情况

Tab.9 Test values of the optical path after ignition and the consistency with the criteria

序号	实测值/dB	备注
1	14.64~15.55	
2	14.29~15.08	
3	14.90~15.37	各光路衰减实测值均同时大于判据上限和区分度指标,可认为火工品正常起爆。
4	14.41~15.43	
5	14.63~15.14	
6	14.56~15.03	
7	14.47~15.26	

3 结论

本文提出了一种基于单光路激光点火系统的光通路分析方法,从顶层设计的角度对影响光路判据的因素进行了详细分析,并给出了不同光路连接器数目对应的光通路判据和激光火工品正常工作判据.试验结果表明,本文给出的单光路激光点火系统指标分析方法是有效的.

参考文献

- [1] 王凯民,符绿化,杨志强.激光点火系统的设计[J].火工品,1996(2):31—37.
WANG K M, FU L H, YANG Z Q. Design of laser ignition system [J]. Initiators & Pyrotechnics, 1996(2):31—37. (In Chinese)
- [2] BOWDEN F P, YOFFE A D. Hot spots and the initiation of explosion [J]. Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena, 1948, 3(1):551—560.
- [3] SOLTZ B A. Laser diode apparatus for initiation of explosive devices: USA, 5204490[P]. 1993—12—14.
- [4] JACOBS R. Laser initiated ordnance system optical fiber continuity test: USA, 527053[P]. 1993—12—14.
- [5] BOUCHER C, SCHULZE N. Flight demonstration of laser diode initiated ordnance [C]// Proceedings of the 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Washington D C: AIAA, 1995:1—14.
- [6] FAHEY W D, CARVALHO J E. Optical built-in-test (BIT) for laser (Diode) initiation systems [C]// Proceedings of the 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Indiana: AIAA, 2002—3797.
- [7] ALEXANDER B D R. Criteria for explosive systems and devices used on space and launch vehicles: USA, AIAA S-113-2005 [P]. 2005—11—10.
- [8] 鲁建存.起爆药的激光反射率[J].激光技术,1987,11(1):51—54.
LU J C. Reflection rate of explosives [J]. Laser Technology, 1987, 11(1):51—54. (In Chinese)
- [9] 刘贵虹.激光起爆器[J].西北大学学报(自然科学版),1988,18(2):69—73.
LIU G H. Laser ignitors [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1988, 18(2):69—73. (In Chinese)
- [10] 崔卫东,朱升成,史红漫,等.光纤对激光起爆系统的影响[J].火工品,2000(3):34—37.
CUI W D, ZHU S C, SHI H M, et al. Effects of optical fiber on laser firing and initiating system [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2000(3):34—37. (In Chinese)

- [11] 张秋芳,黄强,梁月玫,等. 固体火箭发动机激光点火装置研究[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(2):16—18.
ZHANG Q F, HUANG Q, LIANG Y M, *et al.* Research of laser ignition device for solid rocket motors [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(2):16—18. (In Chinese)
- [12] 韦爱勇,郭学彬,张杰涛. 常用火工品药剂激光起爆试验研究[J]. 含能材料, 2004, 12(4):243—245.
WEI A Y, GUO X B, ZHANG J T. Experimental study on laser initiation of common explosive initiator composition [J]. Energetic Materials, 2004, 12(4):243—245. (In Chinese)
- [13] 张小兵,袁亚雄,杨均匀,等. 激光点火技术的实验研究和数值仿真[J]. 兵工学报, 2006, 27(3):533—536.
ZHANG X B, YUAN Y X, YANG J Y, *et al.* Experimental study and numerical simulation on laser ignition processes [J]. Acta Armentarii, 2006, 27(3):533—536. (In Chinese)
- [14] 李芳,张蕊,李庚,等. 激光起爆系统可靠性模拟计算[J]. 火工品, 2007(4):39—42.
LI F, ZHANG R, LI G, *et al.* Reliability simulation of multi-way semiconductor laser initiation system [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007(4):39—42. (In Chinese)
- [15] 贺爱锋,鲁建存,刘举鹏,等. 光纤轴偏离对激光能量传输的影响[J]. 火工品, 2008(6):42—44.
HE A F, LU J C, LIU J P, *et al.* Influence of axial offset in optical fiber connection on laser energy transmission [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(6):42—44. (In Chinese)
- [16] 魏继锋,严楠,华光,等. 激光点火系统温度效应及其控制技术研究[J]. 光学技术, 2008, 34(s1):254—256.
WEI J F, YAN N, HUA G, *et al.* Temperature effect of laser ignition system and control technology [J]. Optical Technique, 2008, 34(s1):254—256. (In Chinese)
- [17] 王悦勇,麻永平,程伟民,等. 激光点火多路起爆关键技术及发展[J]. 火工品, 2010(1):53—56.
WANG Y Y, MA Y P, CHENG W M, *et al.* Key technology and development of laser multi-initiation system [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(1):53—56. (In Chinese)
- [18] 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 J S. High-precision automatic test for laser initiators [J]. Applied Science and Technology, 2011, 38(12):1—4. (In Chinese)
- [19] 曾雅琴,严楠,许灿啟,等. 光路失效分析的检测方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(8):833—837.
ZENG Y Q, YAN N, XU C Q, *et al.* Failure analysis of optical path with the help of built-in-test system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(8):833—837. (In Chinese)
- [20] 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 M S, XING Z R, JIANG M, *et al.* Light path checking technology of laser ignited initiators with single optical fiber [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(4):525—528. (In Chinese)
- [21] 曹军胜. 集成化半导体激光点火系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6):54—58.
CAO J S. Integrated semiconductor laser ignition system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6):54—58. (In Chinese)
- [22] 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 J S. Experimental study on the initiation of semiconductor laser [J]. Lasernal, 2014, 35(10):29—32. (In Chinese)
- [23] 梅崴,徐宇新,邢朝洋,等. 激光点火系统用1×2MEMS光开关研究[J]. 导航与控制, 2017, 16(1):85—90.
MEI W, XU Y X, XING C Y, *et al.* Research of 1×2 MEMS optical switch for laser ignition system [J]. Navigation & Control, 2017, 16(1):85—90. (In Chinese)
- [24] 鄢铿,李力钧,李大生. Al₂O₃陶瓷对CO₂激光吸收率试验测定[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(1):41—44.
YAN C, LI L J, LI D S. Experimental measurement on the absorption coefficients of Al₂O₃ ceramics to CO₂ laser radiation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(1):41—44. (In Chinese)
- [25] 陈刚,黄宇,周明哲,等. 如硬质合金YG8与D6A异种金属CO₂激光焊接接头组织和性能的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(12):34—39.
CHEN G, HUANG Y, ZHOU M Z, *et al.* Study of the microstructure and properties of YG8/D6A dissimilar metal CO₂ laser welding joints [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(12):34—39. (In Chinese)