DOI：10.19789/j.1004-9398.2026.02.009　　**Open Access**
文献引用：熊森华，陈喜芳，易早，等．烟火药配方对连续烟火药泵浦Nd：YAG激光器输出性能的影响[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2026，47（2）：58-65. XIONG S H，CHEN X F，YI Z，et al. Influence of pyrotechnic mixture formula on the output performance of continuous pyrotechnic-pumped Nd：YAG lasers[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2026，47（2）：58-65.

烟火药配方对连续烟火药泵浦Nd：YAG激光器输出性能的影响

熊森华，陈喜芳，易　早，郑涪升*

（西南科技大学数学与物理学院，四川 绵阳　621010）

摘要：本文研究了烟火药配方对烟火药激光器输出能量的影响。研究表明，通过控制锆粉尺寸可以调控烟火药的燃烧时间和温度，当锆粉的尺寸为200目时，烟火药的燃烧时间和温度最优。在此基础上，在烟火药中加入酚醛树脂可以有效地抑制燃烧速度，实现长时间的稳定泵浦。燃烧800 mg锆粉粒径为200目并添加2%酚醛树脂的烟火药时，可有效泵浦Nd：YAG激光介质，产生734 mJ的激光能量输出，连续泵浦时间持续可长达2~3 s，质能转化效率为0.92 J/g，远超之前所报道的0.37 J/g。使用硅偏置探测器和高速摄像机对燃烧的动态过程分析表明，整体燃烧过程具有较高的稳定性，可以保证激光器输出的稳定性。本文成功地得到了烟火药最佳配比，将连续烟火药泵浦激光器的质能转化率提高了2.5倍，同时还能保证具有较高的输出稳定性，为连续烟火泵浦激光器的发展提供了新思路。

关键词：烟火泵浦激光器；能量；激光；Zr/$KClO_4$
中图分类号：O433.2　　**文献标志码**：A

Influence of pyrotechnic mixture formula on the output performance of continuous pyrotechnic-pumped Nd：YAG lasers

XIONG Senhua，CHEN Xifang，YI Zao，ZHENG Fusheng*

（School of Mathematics and Physics，Southwest University of Science and Technology，Mianyang Sichuan　621010）

Abstract：This paper investigates the influence of the formulation of pyrotechnic compositions on the output energy of pyrotechnic lasers. The study demonstrates that the combustion duration and temperature of pyrotechnic materials can be modulated by controlling the particle size of zirconium powder. Optimal combustion duration and temperature are achieved when the zirconium powder has a particle size of 200 mesh. Furthermore，the addition of phenolic resin to the pyrotechnic composition can effectively suppress the combustion rate and achieve prolonged and stable pumping. By combusting 800 mg of zirconium powder with a particle size of 200 mesh and a 2% addition of phenolic resin，a laser energy output of 734 mJ is achieved when pumping an Nd：YAG laser medium. The continuous

收稿日期：2024-12-20
*通信作者：woyoucaidao@hotmail.com

pumping duration can be sustained for 2 to 3 seconds, with a mass-to-energy conversion efficiency of 0.92 J/g, significantly surpassing the previously reported value of 0.37 J/g. The analysis of the combustion dynamic process using a silicon bias detector and high-speed camera reveals that the overall combustion process is relatively stable, ensuring consistent laser output stability. In this paper, the optimal pyrotechnic charge ratio is achieved, which improves the mass-energy conversion rate of the continuous pyrotechnic-pumped laser by 2.5 times while also ensuring high output stability. These findings provide a new approach for the development of continuous pyrotechnic-pumped lasers.

Keywords: pyrotechnic-pumped lasers; energy; laser; Zr/$KClO_4$

CLC: O433.2 **DC**: A

0 引 言

激光因其高亮度、优异的单色性、强方向性和相干性而在各个领域具有广泛应用。烟火药泵浦激光器不需要笨重的电源和冷却系统,质量非常轻,具有非常好的便携性,可作为便携式手持激光器。此外,由于其自带供氧系统,在外太空照明、通信、电磁干扰和防护等领域具有广阔的应用前景。由于烟火药泵浦激光器在便携式军事武器领域的应用潜力,自20世纪60年代被发明以来,美国和苏联等国家进行了大量的研究。

1963年,美国就提出采用烟火药作为固体激光器的泵浦源,研制高能激光器,用于武器系统,解决电光泵浦源(氙灯)电源系统庞大笨重的问题。Smith和Kisatsky[1]首次从理论和实验上研究了烟火药泵浦固体激光器,并获得激光能量输出。1970—1981年,以美国和苏联为主的研究者对烟火药泵浦固体激光器进行了大量研究,研究工作主要集中在激光介质、药剂体系和激光器结构等方面。Wing等[2]主要采用固-气体系的烟火药为泵浦源,有利于获得高能输出的激光器,但在器件的小型化方面有局限性;Bodretsova等[3]对烟火药泵浦激光器的激光介质的材料进行研究,显示Nd:YAG晶体很符合烟火药的燃烧特性;Makarov等[4]则使用化学闪光泡来泵浦Nd:YAG单晶,并成功地实现了1.2 J的激光输出,但其泵浦产生的激光稳定性不足;1983年,Chicklis和Mosto[5]采用Zr作为燃烧剂,氧气作为氧化剂,构建了Zr/O_2固-气体系的烟火药,通过使用50 mg该烟火药泵浦Nd:YAG激光介质,成功获得了0.055 J的激光能量输出;同年,Kaminskii等[6]在激光晶体研究领域开展了广泛而深入的研究,其工作涵盖了多种材料的烟火泵浦激光实验,研究表明,以$KClO_4$为基础的烟火药在燃烧过程中产生的光谱特性与亮温度约为5 000 K的黑体辐射光谱高度吻合,且对Nd^{3+}离子的主要吸收带具有显著的覆盖效果。1991年,Lee等[7]通过热重分析和差示扫描量热法研究了不同粒径的锆粉对Zr/$KClO_4$烟火药混合物热行为和发光特性的影响,结果表明,Zr粉的粒径越小,混合物的热分解温度越低,反应活性越高,纳米级Zr粉显著提高了混合物的燃烧速度和发光性能,通过调控锆粉粒径,可以优化烟火药的热行为和发光特性;1994年,Gonthier和Powers[8]建立了烟火药燃烧的数学模型,通过计算流体动力学和多体动力学的方法,模拟了烟火燃烧和机械运动过程,通过数值模拟,分析了关键设计参数对系统性能的影响,显示通过调整烟火药装药量和燃烧温度,可以显著缩短燃烧时间并提高输出效率;1997年,Walter[9]提出了一种基于枪械技术的“弹药式”泵浦激光枪设计,该设计的创新点主要体现在泵浦源药剂的装药方式及其燃烧产物的处理机制上,具体而言,泵浦源药剂被制造成与常规弹药外形及尺寸相似的“弹药”形式,并通过枪械系统中的弹药加载机制实现多次泵浦操作。此外,激光腔内配置的清洁构件能够有效维持聚光腔内壁及激光棒表面的洁净度,从而确保系统的长期稳定运行。

进入20世纪后,烟火泵浦激光技术经历了显著的进步与发展。2002年,Brousseau和Anderson[10]研究了纳米Al粉对燃烧性能的影响,表明将纳米Al作为添加剂或部分替代微米Al粉,可显著降低含能材料的点火温度并提升其燃烧速率,这一特性显著改善了Zr等传统高燃烧热金属燃料的点火性能不足及能量释放速率缓慢等问题,从而提升了以Zr为基础的烟火药的燃烧效率,使其能量释放潜力得到充分

体现;2005年,朱长星等[11-12]研究了数种烟火药剂的光辐射,获得了最大激光能量0.69 mJ;2006年,Kaminskii等[13]使用850 mg的$Zr/KClO_4/Sr(NO_3)_2$烟火剂泵浦Nd:YAG陶瓷,获得了能量为5.5 J、功率约1 100 W的脉冲激光,这也标志着烟火药泵浦激光器达到了应用的要求;2006—2009年,肖楠等[14-20]通过对烟火药的配方进行研究,主要针对烟火药剂发光性能及发光机理进行了研究,并且使用烟火药泵浦激光器获得1.02 J的激光能量输出,同时表明多元配方中不同组分比例的微小变化会对烟火药泵浦激光器的性能产生很大的影响,且固体药剂在激光介质周围的几何形状对泵浦效率也会产生较大影响;2012—2015年,康晓丽和张强等[21-23]基于$Zr/KClO_4$基材料对烟火药泵浦技术进行了研究,对不同粒径的燃烧剂Zr和氧化剂$KClO_4$所组成的烟火药进行了燃烧特性的分析,并对烟火药剂和激光器结构进行了优化,取得了0.56 J能量输出,并得出结论,即减小烟火药材料的粒径,可以显著地让烟火药的燃烧时间变短,且减少燃烧剂的粒径带来的影响,远大于减少氧化剂的粒径所带来的影响;2017年,Yang等[24-26]则通过在烟火药中加入纳米Al,成功实现了闪光点火,并且获得了702.5 mJ的激光输出能量。

烟火泵浦激光器因其轻便易携的特点而备受青睐,然而紧凑的设计也限制了其对高剂量脉冲泵浦药物的承受能力。若将泵浦源调整为持续运行模式,便可利用更高剂量的药物进行泵浦,实现激光的连续输出。虽然这种模式会降低泵浦的瞬时功率,但能够积累更多的总能量,特别适用于对激光功率需求不高的场景,如激光干扰等。此外,粉尘云烟火药的亮点在于其低浓度所带来的高发光效率,光辐射主要来源于反应过程中多种产物的化学反应所释放的热辐射和特征辐射[27]。传统的粉尘云烟火药泵浦操作步骤是先形成粉尘云后,再点火发光。若调整这一流程,先点火燃烧,再将发光中的燃烧产物转化为粉尘云,形成产物发光体,这一发光体若能维持高效发光特性,便可应用于连续烟火药泵浦技术中[27]。2024年,通过燃烧产物转化为粉尘云的方法,蒋炜[27]首次成功实现了连续烟火药泵浦激光器的出光,但其效率过低,使用1 500 mg烟火药获得了552 mJ的激光能量,质能转化效率仅为0.37 J/g。本文则提出了改进的连续泵浦烟火药激光器,期望能提高激光输出的质能转化率。

1 实验装置和方法

连续烟火药泵浦激光器示意如图1所示。激光介质选择长度为100 mm、半径为4 mm掺Ce的Nd:YAG晶体($Ce_{0.003}Nd_{0.033}Y_{2.964}Al_5O_{12}$),掺Ce是为了将Nd:YAG晶体弱吸收带(500 nm)内的光辐射转换至强吸收带(590±10 nm),提高吸收效率。激光介质被放置在燃烧室中心轴的石英管内,激光介质的前后表面分别涂覆有在1 064 nm波长下反射率为99%和95%的材料。载体石英管的长度为130 mm,半径为7 mm。燃烧室为两底面开口的圆柱形石英管,开口石英管的长度为200 mm,半径为28 mm,开口半径一侧为7 mm,另一侧为28 mm,表面涂有反射层,可有效反射泵浦光。在开口半径为28 mm的一侧放置一个装满烟火药的圆底不锈钢管,不锈钢管长37 mm,半径为2 mm,点火电极放置在不锈钢管开口前方约1 mm处。烟火药通过点火电极点燃,形成从不锈钢管中喷出的粉尘云。发射的光被聚光腔(燃烧室)聚集在激光介质上用于泵浦激光,整个过程持续约2~3 s。烟火药的燃烧利用了类似于固体火箭推进的原理,允许自发、连续地喷射用于泵浦激光的火焰。由于传统的烟火药燃烧一般情况下属于爆燃,几十毫秒燃烧就能完成,而为了增加燃烧时间去使用过多质量的烟火药是个非常危险的事情,容易导致爆轰的出现[28]。所以传统烟火药无法作为泵浦源直接应用在连续的烟火药泵浦激光器上,需要对其燃烧进行减速。通常减速的方法有改变压力和温度[29-30]、改变烟火药成分[31-32]和改变烟火药粒径大小[33]这3种。出于便携式和轻巧性的考虑,本文将使用后2种方法对其燃烧速度进行减速。

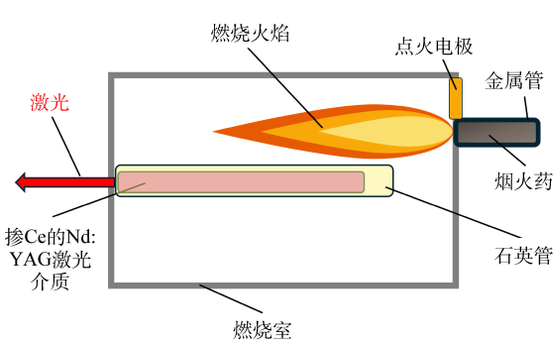


图1 连续烟火药泵浦激光示意

Figure 1 schematic diagram of continuous pyrotechnic-pumped laser

烟火药选择经典的Zr/$KClO_4$体系,该体系具有很高的亮温度和对Nd:YAG激光介质的吸收光谱较匹配的燃烧光谱。由于改变$KClO_4$的粒径对燃烧速度的改变并不会产生很大的影响,而燃烧剂粒径的改变会显著影响燃烧速度[15],所以本文采用改变Zr粒径的方法。需要注意的是,Zr的粒径也不能过大,因为Zr颗粒燃烧时会在表面生成一薄层ZrO_2,对氧化反应的继续进行形成一定阻碍,使得燃烧剂Zr不能完全燃烧,而颗粒越大则会使得燃烧越不充分,这对泵浦效率十分不利,且Zr粒径越大,理论上烟火药的燃烧温度也会更低,而较低的燃烧温度会使得烟火药的热辐射下降,从而导致泵浦的激光能量变低。所以在确定Zr粒径的同时,也需要同步考察燃烧温度,通过燃烧脉冲和燃烧温度这2点,来综合确定所选Zr的粒径。

接下来改变烟火药的成分,本次实验选择的是酚醛树脂作为减速剂。酚醛树脂中含有许多羟基和苯环的芳香族羰基基团,能够加强分子之间的相互作用力,可以对燃烧进行阻碍,降低燃烧速度。但是由于酚醛树脂也会与$KClO_4$进行反应,所以具体的添加量要通过实验确认。

本实验装置除了连续烟火药泵浦激光器装置外,还设置了高速摄像机和硅偏置探测器对燃烧情况进行记录。用一个红外测温仪来测量燃烧温度,部署了热电堆传感器来定量评估激光的能量。通过X射线衍射仪(X-ray diffraction,XRD)对燃烧产物进行分析,判断是否有新的燃烧产物生成。

2　结果与讨论

2.1　烟火药配方对燃烧性能的影响

示波器测到的不同粒径的100 mg零氧平衡Zr和分析纯$KClO_4$(粒径约为45目)制成的烟火药的燃烧脉冲如图2所示。当Zr的粒径为100目时,燃烧时间较长,约为440 ms;当Zr的粒径为200目时,燃烧时间有了显著的缩短,约为146 ms,缩短了约66.82%;300和400目的Zr在燃烧时间上非常相近,均约为100 ms,且和200目相比,燃烧时间缩短的趋势并没有之前那么显著,仅缩短了约为46%。Zr从100到200目的燃烧脉冲显著缩短是由于当Zr粒径过大时,Zr颗粒燃烧时会在表面生成一薄层ZrO_2,对氧化反应的继续进行形成一定阻碍,使得燃烧剂Zr不能完全燃烧,从而使燃烧脉冲变长,但同时也会使燃烧温度显著下降。根据图1的结果及所测得燃烧温度,表1列出了由100 mg不同粒径的Zr和分析纯$KClO_4$组成的烟火混合物的燃烧脉冲和温度。结果表明:Zr为100目时,燃烧脉冲较长,约为440 ms,但燃烧温度相对较低,仅为1 391.3 ℃;Zr为300和400目时,虽然具有较高的燃烧温度,但燃烧时间太短,仅为100 ms。所以,平衡燃烧时间和燃烧温度这2个因素,确定Zr的最佳目数为200目。

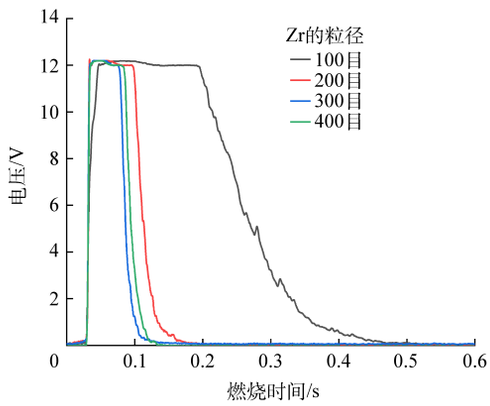


图2　由100 mg零氧平衡Zr和$KClO_4$制成的烟火药的燃烧脉冲

Figure 2　combustion pulse of pyrotechnics prepared from 100 mg oxygen-balanced Zr and $KClO_4$

表1　烟火药的燃烧温度和燃烧时间

Table 1　combustion temperature and combustion time of pyrotechnics

Zr的粒径/目	燃烧温度/℃	燃烧时间/ms
100	1 391.3	440
200	2 464.7	146
300	2 678.1	100
400	2 694.1	100

酚醛树脂的具体添加量根据烟火药和有机物燃烧的一般规律,即C、H、O对应生成CO_2和H_2O,$KClO_4$生成KCl所确定。酚醛树脂的化学式以单体计算,添加酚醛树脂的Zr/$KClO_4$体系发生的反应方程为:

$$2Zr+KClO_4=2ZrO_2+KCl, \quad (1)$$

$$4C_7H_6O_2+15KClO_4=15KCl+12H_2O+28CO_2\uparrow 。(2)$$

根据式(1和2)计算出酚醛树脂质量百分比为10%、8%、5%和2%时需要的Zr和$KClO_4$的用量。然后,分别测试不同酚醛树脂质量百分比下的烟火药燃烧光谱,结果如图3所示。随着质量百分比的增大,在500~700 nm的光相对变弱,在750 nm处的峰半峰宽明显变窄。这是由于酚醛树脂属于阻燃

剂,会导致燃烧温度下降,致使热辐射强度降低。而增益介质Nd:YAG在590和750 nm附近存在强的吸收峰,所以在保证连续泵浦的前提下,酚醛树脂的质量百分比应越低越好。但在实际实验中显示,当酚醛树脂的质量百分比过低时,对燃烧几乎不会起到阻碍的作用。所以综合实验和图3的结果,选取的酚醛树脂的质量百分比为2%。

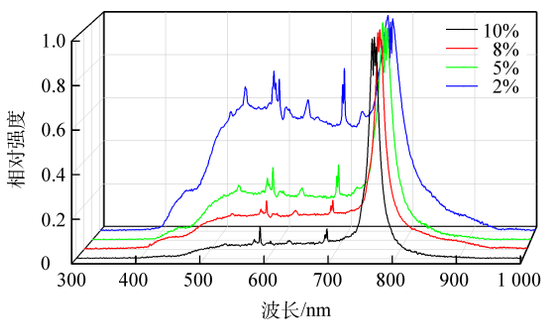


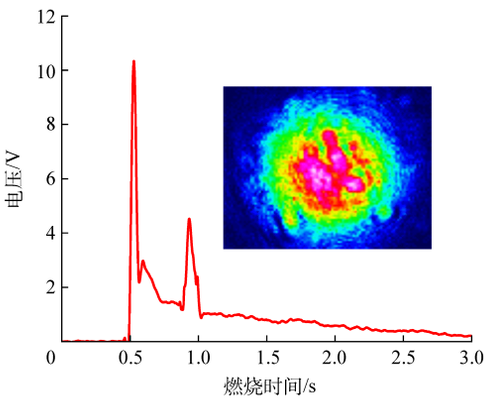
图3　不同酚醛树脂质量百分比下烟火药燃烧光谱

Figure 3　combustion spectra of pyrotechnics with different phenolic resin mass percentage

2.2　烟火药配方对激光输出性能的影响机理

使用800 mg、酚醛树脂质量百分比为2%的烟火药去泵浦Nd:YAG,成功实现了激光输出,获得了734 mJ的能量,连续泵浦时间持续2~3 s,质能转化效率为0.92 J/g,测得燃烧温度为1 810 ℃,激光能量在初始阶段最高,之后随时间降低。这是因为初始阶段燃烧产生的灰尘最少,激光介质可以最大程度地吸收泵浦光,随着燃烧的进行,聚光腔内灰尘逐渐增加,其对泵浦光的吸收起了一定的阻碍作用,从而降低了激光介质的吸收能力,使得激光输出随时间逐步降低。示波器测到的酚醛树脂质量百分比为2%的烟火药的燃烧光谱脉冲如图4所示。燃烧整体比较稳定,有3个小峰。第1个峰是点燃瞬间的产生峰,其他峰是燃烧时产生的爆发性燃烧峰。燃烧在1 s后整体趋近于稳定,稳定的燃烧对于泵浦稳定输出的激光有着至关重要的意义。图4的插图为所测到的激光光斑,其整体形状近似于直径为8.56 mm的圆形。能量分布集中在中心,并向边缘减小,功率密度为0.52 W/cm^2,能量密度为1.29 J/cm^2。

不含酚醛树脂的烟火药燃烧产物和酚醛树脂质量百分比为2%的烟火药燃烧产物的XRD如图5所示,图中PDF:37-1484为单斜晶系的ZrO_2;PDF:79-1767为四方晶系的ZrO_2;PDF:41-1476为立方晶



注:插图为激光光斑。

图4　烟火药的燃烧光谱脉冲

Figure 4　combustion spectral pulse of pyrotechnics

系的KCl。加入酚醛树脂后,并没有新的衍射峰出现,这意味着酚醛树脂的质量百分比为2%时,并不影响烟火药的充分燃烧,没有带来新的产物,而是和式(2)一样生成KCl、CO_2和H_2O,但有效延长了燃烧时间。

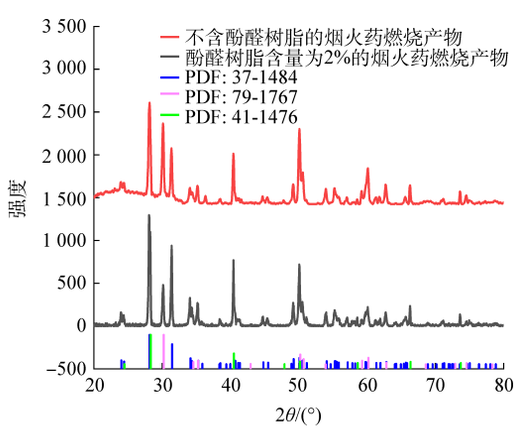


图5　不含酚醛树脂和酚醛树脂质量百分比为2%的烟火药燃烧产物的X射线衍射(XRD)

Figure 5　X-ray diffraction (XRD) patterns of combustion products of pyrotechnics without phenolic resin and with phenolic resin at a mass percentage of 2%

为了探究燃烧起始阶段不稳定的原因,利用高速摄像机记录下1次完整的燃烧过程,如图6所示(所用烟火药为酚醛树脂质量百分比为2%的烟火药,本段均不再重复叙述)。为了探究具体燃烧情况,没有使用聚光涂料,聚光腔呈透明状态。图6(a~c)是烟火药点燃阶段,烟火药经过很短的时间被点燃,发出耀眼的光。图6(d~f)是烟火药燃烧前中期阶段。整个燃烧阶段较稳定,光线分布于整个聚光腔,偶尔也会出现图6(f)这种爆发性燃烧,这是由

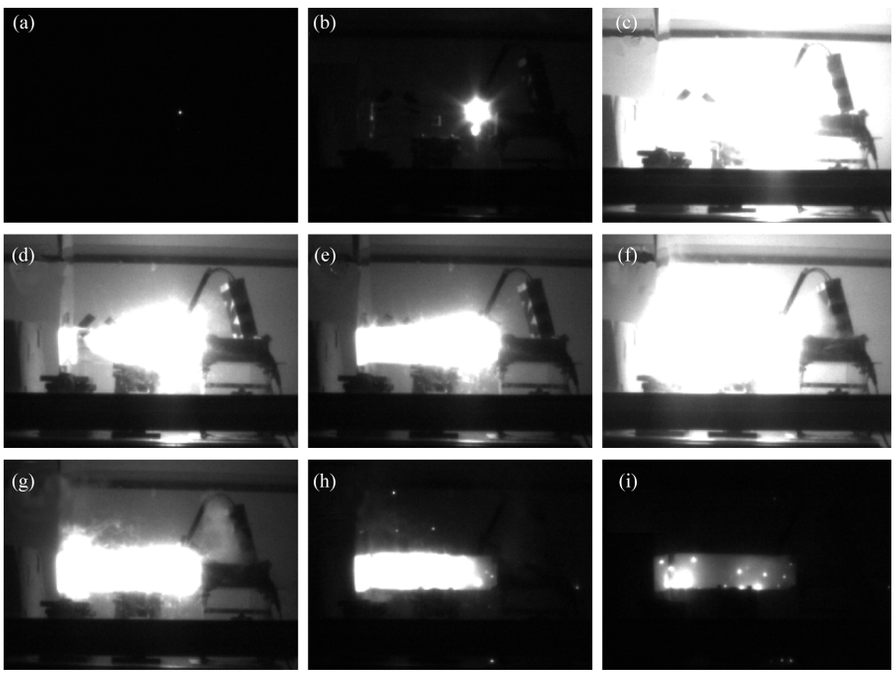


图6　高速摄像机记录的连续烟火药泵浦激光器的燃烧过程
(a~c)点燃阶段;(d~f)燃烧前中期阶段;
(g~i)燃烧中后期阶段

Figure 6　combustion process of continuous pyrotechnic-pumped laser recorded by a high-speed camera
(a~c) the ignition stage; (d~f) the early-middle stage;
(g~i) the middle-late stage

于烟火药在金属管内的分布不均匀所导致。图6(g~i)是烟火药燃烧的中后期阶段,基本维持稳定燃烧,光线分布于整个聚光腔,燃烧较稳定地结束。为了进一步提高烟火药燃烧的稳定性,从而实现激光输出的稳定性,需要尽量避免爆发性燃烧。在烟火药的装填过程中,为了使燃烧更为稳定,从而得到稳定的激光输出,应保证空隙的均匀性或加入流化剂增加粉尘的均匀性。需要注意的是,保证空隙的均匀性可采用压实的方法,但压实的程度不宜过高,否则容易引起爆轰,产生危险。

3　结　论

本文通过在Zr/$KClO_4$组成的烟火药体系中,将Zr粒径调整为200目,且加入2%酚醛树脂,同时保证烟火药整体零氧平衡,成功实现了连续烟火药泵浦Nd:YAG激光器的改进,800 mg烟火药泵浦了734 mJ激光能量,激光持续2 s以上时间,质能转化效率为0.92 J/g,远超之前报道的0.37 J/g。当前工作已基本实现了燃烧过程的整体稳定控制,这为系统的可靠运行奠定了良好基础。未来将进一步优化控制策略,实现在维持系统稳定性的同时,提升对瞬态工况的响应能力,从而实现更精准的燃烧调控。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] SMITH C L, KISATSKY P J. An investigation into the feasibility of a pyrotechnic laser pump [R]. U. S. Technical Report, 1963.

[2] WING W F, GRASSO R J, MOSTO J R. Pyrotechnically pumped laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17 (12): 2360. DOI: 10.1364/CLEO.1981. WA1.

[3] BODRETSOVA A I, BAGDASAROV K S, KAMINSKII A A, et al. High-power $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ laser with an explosion-type lamp [J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1972, 2 (2): 183-184. DOI: 10.1070/QE1972v002n02ABEH004415.

[4] MAKAROV E T, CHEREPOV N I, YAZEV I I. An expendable flashlamp as an optical pumping source for

lasers[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1976, 6 (10): 1256-1257. DOI: 10.1070/QE1976v006n10ABEH011971.

[5] CHICKLIS E P, MOSTO J R. Low cost laser: 4371969[P].1983-02-01.

[6] KAMINSKII A A, BODRETSOVA A I, PETROSYAN A G, et al. New quasi-CW pyrotechnically pumped crystal lasers[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1983, 13(7): 975-976. DOI: 10.1070/QE1983v013n07ABEH004542.

[7] LEE J S, LIN L K, HUANG P J, et al. Thermal behaviour and firing characteristics of Zr/$KClO_4$ primer mixture containing different particle sizes of zirconium [J]. Thermochimica Acta, 1991, 181: 329-336. DOI: 10.1016/0040-6031(91)80434-K.

[8] GONTHIER K A, POWERS J M. Formulation, predictions, and sensitivity analysis of a pyrotechnically actuated pin puller model[J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(4): 501-507. DOI: 10.2514/3.23800.

[9] WALTER H. Laser gun and cartridge: 5617444[P].1997-04-01.

[10] BROUSSEAU P, ANDERSON C J. Nanometric aluminum in explosives [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2002, 27 (5): 300-306. DOI: 10.1002/1521-4087(200211)27:53.0.CO;2-#.

[11] 朱长星.用于激光泵浦源的高能含能材料研究[D].南京:南京理工大学,2005.
ZHU C X. Study of high-octane material as laser pumping source [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.

[12] 朱长星,叶迎华,沈瑞琪,等.Zr、Mg系烟火剂发光光谱特性研究[J].含能材料,2005,13(2):118-120. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2005.02.013.
ZHU C X, YE Y H, SHEN R Q, et al. Characteristic emission spectra of zirconium base and magnesium base pyrotechnic composites [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(2): 118-120.

[13] KAMINSKII A A, BAGAYEV S N, UEDA K, et al.5.5 J pyrotechnically pumped Nd^{3+} : $Y_3Al_5O_{12}$ ceramic laser [J]. Laser Physics Letters, 2006 (3): 124-128. DOI: 10.1002/lapl.200510073.

[14] 肖楠,吴文健,姜宗福.烟火泵浦激光器泵浦材料发光光谱研究[J].火工品,2006(8):4-8. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2006.04.002.
XIAO N, WU W J, JIANG Z F. An investigation on pumping material's emission spectrum of pyrotechnic pumped laser[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2006(8): 4-8.

[15] 肖楠,姜宗福,袁圣付,等.烟火泵浦钕玻璃激光器出光实验研究[J].强激光与粒子束,2008,20(1):17-20. DOI:10.11884/HPLPB200820.01003.
XIAO N, JIANG Z F, YUAN S F, et al. Experimental study on output of pyrotechnically pumped Nd glass laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 17-20.

[16] 肖楠,姜宗福,华卫红,等.雾化Mg粉对烟火泵浦源性能的影响[J].强激光与粒子束,2008,20(8):1378-1382. DOI:10.11884/HPLPB200820.08004.
XIAO N, JIANG Z F, HUA W H, et al. Effects of pulverized Mg powders on pyrotechnic pumping source [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8): 1378-1382.

[17] 肖楠,姜宗福,华卫红,等.烟火抽运激光器研究进展[J].激光与光电子学进展,2009,46(3):32-43. DOI: 10.3788/LOP20084603.0032.
XIAO N, JIANG Z F, HUA W H, et al. Investigation development of pyrotechnically pumped laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(3): 32-43.

[18] 肖楠.烟火泵浦激光器原理与实验研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
XIAO N. Theoretical and experimental studies on the pyrotechnically pumped laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.

[19] XIAO N, JIANG Z F, HUA W H, et al. 372-mJ long pulse pyrotechnically pumped laser[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6 (8): 578-579. DOI: 10.3788/COL20080608.0578.

[20] 肖楠,姜宗福,袁圣付,等.火药剂量与排布对烟火抽运激光器出光能量的影响[J].中国激光,2009,36(2):294-296. DOI:10.3788/CJL20093602.0294.
XIAO N, JIANG Z F, YUAN S F, et al. Influence of powder mass and distribution on output energy of pyrotechnically pumped laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 294-296.

[21] KANG X L, YANG F, LUO J S, et al. Tuning laser output characteristics of a pyrotechnically pumped free-running Nd: YAG laser in terms of pumping kinetics [C]//CHUN T, SHU C, TANG X L. XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014. Chengdu: SPIE, 2014.

[22] KANG X L, ZHU G L, YANG F, et al. Effect of CNTs-assisted ball milling on morphology and oxidation behavior of Zr powders [J]. Rare Metal Materials and

Engineering, 2017, 46(9): 2389-2394. DOI: 10.1016/S1875-5372(17)30203-5.

[23] 张强，康晓丽，罗江山，等. Zr粉粒径对Zr/$KClO_4$烟火剂燃烧特性的影响[J].强激光与粒子束，2011，23(7)：1867-1872. DOI:10.3788/HPLPB20112307.1867.
ZHANG Q, KANG X L, LUO J S, et al. Effects of zirconium size on combustion characteristics of Zr/KP pyrotechnics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7): 1867-1872.

[24] YANG F, KANG X L, LUO J S, et al. Preparation of core-shell structure $KClO_4$@Al/CuO nanoenergetic material and enhancement of thermal behavior [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 3730. DOI: 10.1038/s41598-017-03683-z.

[25] YANG F, KANG X, LUO J S, et al. Laser emission from flash ignition of Zr/Al nanoparticles[J]. Optics Express, 2017, 25(20): 932-939. DOI: 10.1364/OE.25.00A932.

[26] YANG F, ZHANG Y J, YANG X, et al. Enhanced photothermal effect in ultralow-density carbon aerogels with microporous structures for facile optical ignition applications [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(7): 7250-7260. DOI: 10.1021/acsami.8b17803.

[27] 蒋炜.无电高效发光的粉尘云烟火药泵浦激光技术研究[D].绵阳：西南科技大学，2024.
JIANG W. Study on dust cloud pyrotechnic-pumped laser technology for efficient luminescence without electricity [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024.

[28] 段宝福，宋锦泉，汪旭光.炸药燃烧转爆轰(DDT)研究现状[J].有色金属(矿山部分)，2003，55(1)：31-35. DOI:10.3969/j.issn.1671-4172.2003.01.012.
DUAN B F, SONG J Q, WANG X G. The current state of study on deflagration-to-detonation transition (DDT) in explosives[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2003, 55(1): 31-35.

[29] BURKIN V, ISHCHENKO A, KASIMOV V, et al. Analysis of entry of additional energy to gunpowder in electrothermal chemical shot [C]//ANNA G, LIUDMYLA R. Proceedings of the XIV International Conference of Students and Young Scientists. Tomsk: AIP Publishing, 2017.

[30] ERMOLAEV B S, BELYAEV A A, VIKTOROV S B, et al. Nonideal regimes of deflagration and detonation of black powder [J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2010, 4(3): 428-439. DOI: 10.1134/S1990793110030103.

[31] LIU H G, TANG Y B, MA D J. Experimental investigation of spontaneous combustion of anthracite controlled by the chemical deposition of two-phase (hydroxide and CO_2) aerosols [J]. Fuel, 2022, 319: 123765. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123765.

[32] PENG F, LIU H C, CAI W W. Combustion diagnostics of metal particles: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(4): 042002. DOI: 10.1088/1361-6501/acb076.

[33] COLLETTI A, BOYER E, KUO K K, et al. Characterization of black-powder igniter jets into a granular bed through analysis of condensed-phase product deposition and regions of penetration [J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2010, 9(6): 505-522. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2011001422.

（责任编辑：兰丽丽）