

用于油井激光射孔的 10 kW 激光 19×1 空间非相干合束

查榕威¹,雷广智²,李建林^{1,2},陈浩伟¹,白 杨¹

- (1. 西北大学 光子学与光子技术研究所,陕西 西安 710069;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学应用研究室,陕西 西安 710069)

摘 要: 激光射孔是油井完井工程领域一项具有前瞻性的技术,对提高石油资源采收率具有重要的应用价值。为提高油井激光射孔所使用的激光功率和激光传输的安全性,利用 19 台光纤传输 972 nm 半导体激光器实现了 10 kW 级激光空间非相干合束。通过分析参与合束的准直激光束的半径、间距与合束激光的光斑重叠率之间的变化规律以及模拟合束激光横截面能量分布,完成激光空间非相干合束器的结构设计。在 300 mm 的合束长度内实现了具有单一光束形态且最大合束功率达到 10.441 kW、焦斑直径 21 mm、线宽 2.46 nm 的空间非相干合束激光输出,合束效率达到 98.2%。利用 10 kW 空间非相干合束激光完成了针对砂岩和钢板的地面激光射孔实验,射孔深度分别达到 570 mm 和 70 mm。

关键词: 空间非相干合束; 972 nm 半导体激光器; 光纤传输; 10 kW 合束激光; 激光射孔
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1005013

19×1 space incoherent beam combining for 10 kW laser perforation in oil well

Zha Rongwei¹, Lei Guangzhi², Li Jianlin^{1,2}, Chen Haowei¹, Bai Yang¹

- (1. Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China;
2. Space Optical Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710069, China)

Abstract: Laser perforation is a forward-looking technology in the oil well completion engineering, which has great application value for improving oil recovery. In order to improve the laser power and laser transmission safety used in oil well laser perforation, 10 kW -laser space incoherent combining was realized by using 19 fiber-transmitted 972 nm semiconductor lasers. By studying the effect of the radii, separation distances of collimated laser beams on the spot overlapping efficiency of combined laser beam, and simulating cross section energy distribution of combined laser beam, the structure design of a 19×1 space incoherent beam combiner was completed. A space incoherent combined laser beam with a single beam shape was achieved within the beam combining length of 300 mm, with a maximum combined power of 10.441 kW, a focal spot diameter of 21 mm, a line width of 2.46 nm and a combined efficiency of 98.2%. Ground laser perforation experiments for sandstone and steel plate were performed using the 10 kW spatial incoherent beam laser with perforation depths of 570 mm and 70 mm, respectively.

Key words: space incoherent beam combining; 972 nm semiconductor laser; fiber transmission; 10 kW combined laser; laser perforation

收稿日期:2019-06-07; 修订日期:2019-07-15

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0405102)

作者简介:查榕威(1994-),男,硕士生,主要从事高功率固体激光器技术方面的研究。Email:bys627@163.com

导师简介:白杨(1977-),男,副教授,博士,主要从事高功率固体激光器及非线性频率变化方面的研究。Email:by@nwu.edu.cn

0 引言

激光射孔是一种新型油井射孔完井技术,其无压实效、高孔隙度和高渗透性的优点有利于提高石油资源的采收率。光纤传输是一种保证激光束在油井中安全传输并减小功率损耗的有效方法。随着基于单光纤激光传输的光纤激光器和半导体激光器输出功率的大幅提升(>10 kW),光纤传输高功率激光的油井激光射孔逐渐成为油井勘探开发的研究热点之一^[1-3]。然而,10 kW 以上激光束在单根光纤中传输时易产生非线性效应、热效应、模式不稳定等因素,不仅限制了激光功率的进一步提升(多模激光功率约 20 kW),而且会给处于高温、高压、高腐蚀井下环境中的高功率激光传输带来安全隐患^[4]。采用多路激光的非相干合束是一种能够大幅提高激光总功率的同时降低单根光纤中激光功率和传输风险的有效方法。目前,高功率激光非相干合束技术包括光纤合束、偏振合束、光谱合束以及空间合束^[5-9]。空间合束使用的合束器主要由一系列准直透镜组和独立转向反射镜或棱镜构成,具有合束调节工艺简单、合束效率高、易于维护、环境适应性强、合束成本低等优点,已被广泛用于高能激光武器系统^[10]。但是,目前 10 kW 以上级激光空间合束器的光学孔径通常达到 300~600 mm,并且参与合束的激光束数量却仅为 2~6 路。这些因素导致 10 kW 以上级激光空间合束器不但难以被放置在直径通常小于 200 mm 的油井中^[11],而且参与合束的单路激光束的功率和井下传输风险也陡然增加。

为此,根据石油井激光射孔对高功率激光的需求特点,提出了一个仅采用系列光学球面透镜并按照“中心+内、外同心圆”阵列同轴排列的 19×1 激光空间非相干合束器。通过模拟分析参与合束的准直激光束的半径、准直激光束的间距与光斑重叠率之间的变化规律以及合束激光的横截面能量分布,优化设计了系列光学球面透镜的参数和合束器的结构。利用该型合束器和 19 台光纤传输 972 nm 半导体激光器,实验获得了在较长合束长度内具有单一光束形态、合束功率超过 10 kW 的空间非相干合束激光,并完成了针对砂岩和钢板的地面激光射孔实验。

1 合束器的设计与光束仿真

19×1 激光空间非相干合束原理如图 1 所示。该合束器由按照“中心+内、外同心圆”阵列式同轴排列的 19 个相同的激光准直单元和一个同轴共用的空间合束单元构成,并与 19 台同型号的 972 nm 光纤传输半导体激光器连接。每台 972 nm 半导体激光器均采用多模传输光纤(纤芯直径 $M_c=440 \mu\text{m}$,数值孔径 $\text{N.A.}=0.22$)和截面直径为 8 mm 的 SMA905 光纤输出接头。

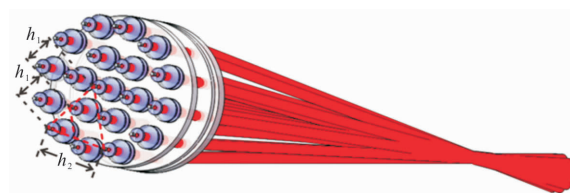


图 1 19×1 激光空间非相干合束原理图

Fig.1 Schematic of 19×1 laser space incoherent beam combining

通常将两束激光的光斑面积重叠率定义为光斑重叠率。沿光束传播方向,光斑重叠率等于 85% 的两点之间距离被定义为合束长度。从光纤同时射出的 19 束发散激光束在经过一一对应的激光准直单元后转换为彼此平行、间距相等的准直激光束。共用的空间合束单元对 19 束准直激光束实施会聚作用,使 19 束准直激光束实现光斑重叠并获得具有单一光束形态和较长合束长度的高功率合束激光。为获得较长的油井激光射孔深度,在尽可能长的合束长度内确保按照内圆、外圆排列的准直激光束与中心位置的准直激光束之间的光斑重叠率均大于 85%。

在空间合束单元的第一个入射面上,光斑半径均为 ω 的 19 路准直光斑的布置如图 1 所示。 h 表示在该入射面上两束激光束的光斑中心间距。而通过空间合束单元并传输一定距离 z 时,在垂直于光路的横截面上,两束激光的光斑位置变化关系如图 2 展示。其中中心位置的准直激光束与其他任意一路准直激光束的光斑半径分别表示为 R_0 和 R_i ($i=1,2,3,\dots,18$),光斑重叠面积和光束间距分别表示为 S 和 h_z 。

直角坐标系下,将中心位置的准直激光束在空间合束单元的第一个入射面上的光斑中心定义为坐

标原点,则 R_0, R_i, h_z 与 x, y, z 之间满足以下关系:

$$x^2+y^2=R_0^2 \quad (1)$$

$$(x-h_z)^2+y^2=R_i^2 \quad (2)$$

$$R_0=\tan(\theta_c)\times z+\omega \quad (3)$$

$$R_i=\tan(\theta_c)\times\sqrt{(h-h_z)^2+z^2}+\omega \quad (4)$$

$$h_z=h\times\left|\frac{F-z}{F}\right| \quad (5)$$

式中: θ_c 为穿过空间合束单元后每束准直激光束的发散角(半角); F 为空间合束单元的合束焦距。

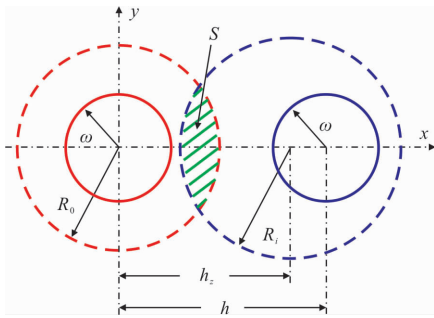


图 2 中心位置准直光束与其他任意一路准直激光束的光斑之间位置变化关系

Fig.2 Positional relationship between the spot of the collimated beam at the center position and the spot of any other collimated laser beam

联立公式(1)~(5),可以得到在位置 z 处两束激光的光斑重叠面积的表达式:

$$S=\int_{n_z-R_i}^{R_0} 2\sqrt{R_0^2-x^2} dx+\int_{n_z-R_i}^{n_z} 2\sqrt{R_i^2-(x-h_z)^2} dx=$$

$$\frac{\pi}{2}(R_0^2+R_i^2)+R_i\left[\arcsin\left(\frac{n_z-h_z}{R_i}\right)-\arcsin\left(\frac{n_z}{R_i}\right)\right]+$$

$$(n_z-h_z)\sqrt{R_i^2-(n_z-h_z)^2}-n_z\sqrt{R_i^2-n_z^2} \quad (6)$$

式中: $n_z=\frac{4R_0^2-h_z^2-4R_i^2}{2h_z}$ 表示两束激光光斑边缘的交点在水平 x 轴上的坐标。

中心位置的准直激光束与其他任意一路准直激光束的光斑重叠率表示为:

$$\eta=\frac{S}{\pi R_i^2} \quad (7)$$

由于只有确定每一路准直激光束的光斑半径 ω 、合束发散角 θ_c 、光斑间距 h 以及合束焦距 F ,才能得到准确的光斑重叠率 η 。在传统的油井子弹射孔

中,较大的射孔孔径有利于提高石油的渗透率,但孔径过大又会严重降低射孔孔道和钢制套管的支撑强度。故一般常规油井射孔孔径通常在 20~40mm 之间,对应最大射孔深度约为 1 m^[11]。考虑到油井直径和安全的激光射孔距离,将 F 值设定为 1.2 m。同时考虑到合束激光的直径在合束焦斑位置两侧会有一定的发散,故将合束激光的焦斑直径 Φ_F 设定为 20 mm。

首先在 $\omega=0$ 的傍轴近似下,当 $z=F=1.2$ m, $R_0=\Phi_F/2=10$ mm 时,根据公式(3)可计算得到 θ_c 值为 8.33 mrad。利用 MATLAB 软件并联立公式(1)~(7),可以获得在不同 h 值情况下的 η 与 z 之间的变化规律,如图 3(a)所示。当 $\eta>85\%$ 时,若要增大合束长度 Δz ,就必须尽可能地压缩 h 值。但是 SMA 905 光纤输出接头的 8 mm 直径会限制 h 值的无限减小。在确保 19 个 SMA 905 光纤输出接头按照“中心+内、外同心圆”阵列式同轴紧密排列的基础上, h 的两个最小值,即同轴的内圆半径和外圆半径分别被设定为 $h_1=12$ mm 和 $h_2=24$ mm,如图 3 所示。

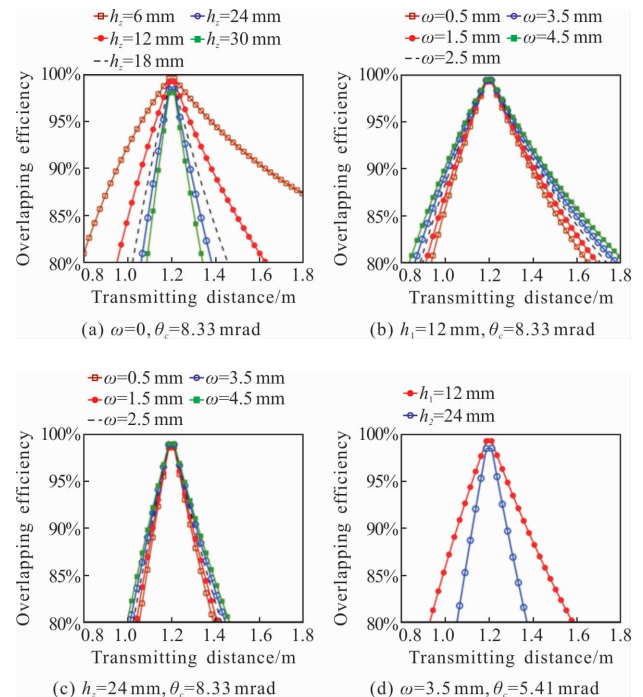


图 3 不同条件下光束传播距离与合束激光的光斑重叠率之间的变化规律

Fig.3 Variation between the beam propagation distance and the spot overlapping ratio of the beam combined laser under different conditions

由于合束焦距 F 仅为 1.2 m,故 ω 值的大小不

能被忽略。在 $F=1.2\text{ m}$ 、 $\theta_c=8.33\text{ mrad}$ 、 $h_1=12\text{ mm}$ 和 $h_2=24\text{ mm}$ 的初始条件下和不同 ω 值时, η 与 z 之间的变化规律分别如图 3(b)和 3(c)所示。可以看出, ω 值越大, 则在同一 h 值对应的合束长度 Δz 越长。由于 h_1 值已被设定为 12 mm , 故每一个激光准直单元使用的球面透镜直径(D_s)也不能无限增大。考虑到合束器加工精度和机械强度, D_s 的最大值被确定为 10 mm 。考虑到球面镜通光面镀制的激光增透膜的长期使用安全性, 通常将准直激光束直径 2ω 与 D_s 之间的最大比值设定为 70% , 则 ω 的最大值为 3.5 mm 。根据公式(3), 相应的 θ_c 值修正为 5.41 mrad 。

当初始参数最终被设定为 $F=1.2\text{ m}$ 、 $\omega=3.5\text{ mm}$ 、 $\theta_c=5.41\text{ mrad}$ 、 $h_1=12\text{ mm}$ 和 $h_2=24\text{ mm}$ 时, η 与 z 之间的变化规律如图 3(d)所示。 $h_1=12\text{ mm}$ 和 $h_2=24\text{ mm}$ 对应的合束长度 Δz_1 和 Δz_2 分别为 490 mm 和 240 mm 。显然, 仅由 Δz_1 和 Δz_2 值还无法给出合束长度的精确值。

因此, 根据以下经验公式给出的准直激光束的直径 ω 和发散半角 θ 之间的变化关系为:

$$\theta = \arctan(M_d/2f) \quad (8)$$

$$\omega = M_d/2 + f \times \arctan(\theta_0) \quad (9)$$

式中: f 为准直单元的总焦距, 当 $M_d=440\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\theta_0 = \arcsin(0.22)$ 、 $\omega=3.5\text{ mm}$ 时, 联立公式(8)和(9), 计算可得 θ 值为 14.75 mrad , f 值为 14.9 mm 。

基于初始光学参数 ($M_d=440\text{ }\mu\text{m}$, $\theta_0 = \arcsin(0.22)$, $f=14.9\text{ mm}$), 利用 ZEMAX 软件建立激光准直单元的结构模型, 如图 4 所示。每个激光准直单元均由 m_1 、 m_2 和 m_3 3 个球面透镜组成。通过调整 3 个球面镜的通光面曲率半径、厚度以及相邻两个球面镜间距的数值, 使准直激光束的半径 ω 和发散角 θ 分别接近 3.5 mm 和 14.75 mrad 的初始设定值。最终确定参数, m_1 、 m_2 和 m_3 镜的直径($\varphi_i, i=1, 2, 3$), 厚度(t_i)以及两个通光面的曲率半径(a_{i1}, a_{i2})分别为($\varphi_1=7.0\text{ mm}$, $z_1=2.0\text{ mm}$, $a_{11}=-75.0\text{ mm}$, $a_{12}=+5.3\text{ mm}$), ($\varphi_2=12.0\text{ mm}$, $t_2=1.5\text{ mm}$, $a_{21}=+20.0\text{ mm}$, $a_{22}=-11.7\text{ mm}$)和($\varphi_3=12.0\text{ mm}$, $t_3=3.5\text{ mm}$, $a_{31}=+30.0\text{ mm}$, $a_{32}=+15.7\text{ mm}$)。光纤输出端面、 m_1 、 m_2 和 m_3 镜相邻通光面之间的垂直距离 (p_0, p_1, p_2)依次设定为 5.4 、 9.6 和 4.1 mm 。

基于初始光学参数 ($h_1=12\text{ mm}$, $h_2=24\text{ mm}$, $\omega=3.5\text{ mm}$, $\theta_c=5.41\text{ mrad}$, $F=1.2\text{ m}$), 利用 ZEMAX 软件建立空间合束单元的结构模型, 如图 4 所示。空间合

束单元由 M_1 、 M_2 和 M_3 3 个球面透镜组成。通过调整 3 个球面镜的通光面曲率半径、厚度以及相邻两个球面镜间距的数值, 使合束激光的焦斑直径 Φ_F 模拟值接近其 20 mm 的初始设定值。将该结构模型嵌入至 TRACEPRO 软件, 对合束激光的横截面能量分布进行仿真, 通过调整 3 个球面镜的通光面曲率半径、厚度以及相邻两个球面镜间距, 确保获得尽可能长的合束长度 Δz 。最终确定参数, M_1 、 M_2 和 M_3 镜的直径 O_d 均为 85 mm (合束器的光学孔径)。 M_1 、 M_2 镜的厚度(T_i)以及两个通光面的曲率半径(b_{i1}, b_{i2})分别为 ($T_1=8.0\text{ mm}$, $b_{11}=+\infty$, $b_{12}=+510\text{ mm}$) 和 ($T_2=10.0\text{ mm}$, $b_{21}=-105.0\text{ mm}$, $b_{22}=+110.0\text{ mm}$)。 M_3 为厚度 3 mm 的平面窗口镜。 m_3 、 M_1 、 M_2 和 M_3 镜相邻通光面之间的垂直距离(q_0, q_1, q_2)依次为 65.0 、 22.0 和 28.0 mm 。

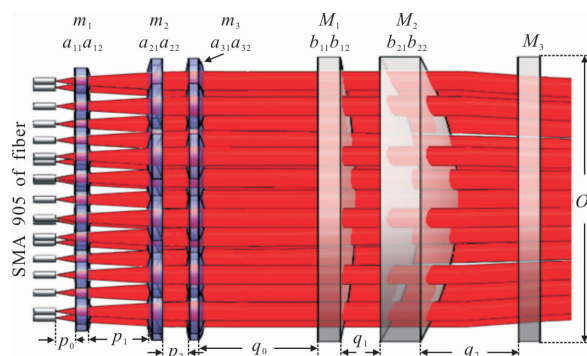


图 4 光束准直单元和光束合束单元的结构示意图

Fig.4 Schematics of beam collimating units and beam combining unit

基于仿真模拟确定的激光准直单元和空间合束单元的最终设计参数, 设定参与合束的激光数量为 19 路, 每路 972 nm 激光束的功率为 500 W , 则在光束传播 z 方向上不同位置处, 通过 TRACEPRO 软件仿真获得的合束激光的横截面能量分布依次如图 5(a)~(g)所示。图 5(d)展示出合束激光束的焦斑直径接近于 20 mm 的设定值。图 5(b)至图 5(f)所描述的合束激光的横截面能量分布与单根激光束的横截面能量分布相似, 图 5(b)与图 5(f)之间的相对距离为 300 mm 。而图 5(a)和图 5(g)所描述的合束激光的横截面能量分布均呈现出离散趋势。鉴于图 5(a)与图 5(b)之间、图 5(g)与图 5(f)之间的相对距离均仅为 5 mm , 故可认为合束激光的合束长度 Δz 是由 Δz_1 和 Δz_2 共同作用的结果, 其模拟值达到 300 mm 。

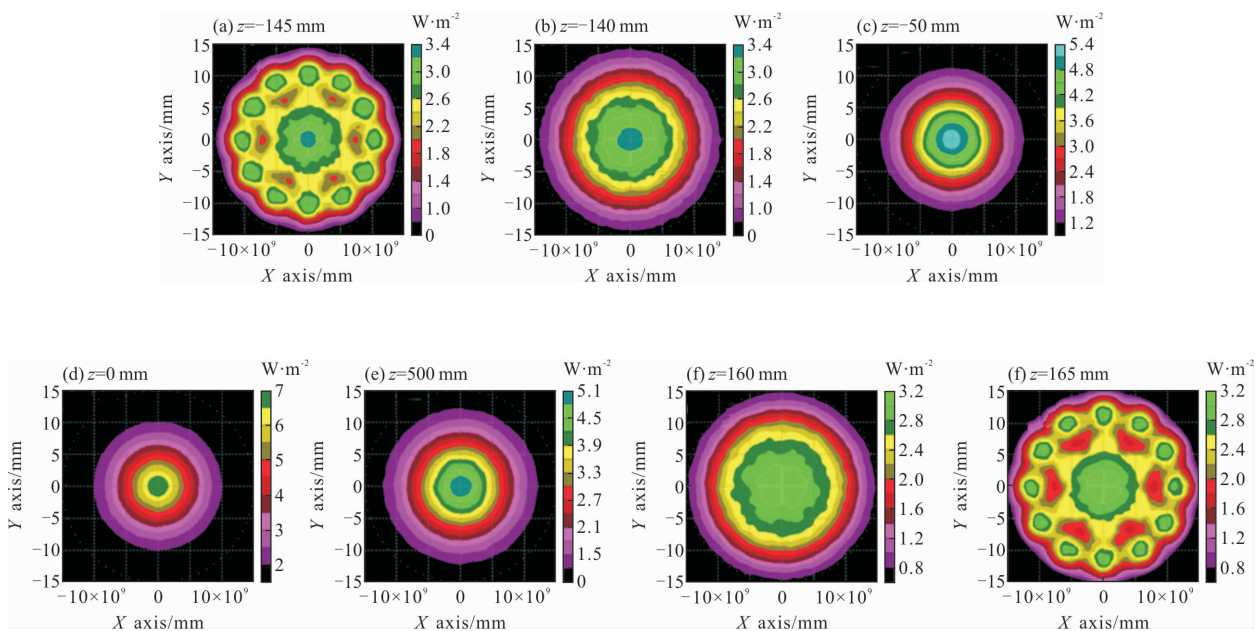


图 5 不同位置处合束激光的横截面能量模拟分布 (z 为横截面和焦斑的间距)

Fig.5 Cross-section energy analog distribution of the beam combined laser at different positions (z is the distance between the cross section and the focal spot)

2 实验装置

根据准直激光单元和空间合束单元的仿真数据,研制出以黄铜为基材、外径 130 mm、水冷却的 19×1 激光空间非相干合束器,如图 6 的插图所示。所有透镜的通光面均镀制 972 nm 波长的增透膜($R < 0.4\% @ 972 \text{ nm}$)。

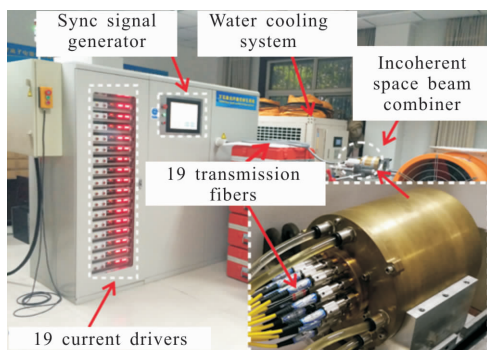


图 6 19×1 激光空间非相干合束系统照片(插图为合束器照片)

Fig.6 Photo of 19×1 laser space incoherent beam combining system (The inset is a photo of the combiner)

利用 19 台同型号的 972 nm 光纤传输半导体激光器开发出空间非相干合束的光纤传输激光系统,

如图 6 所示。每台半导体激光器的额定连续输出功率 550 W 左右,采用水冷却方式并由独立的直流电源驱动。一台自研的同步信号发生器同步控制 19 台半导体激光器的直流驱动电源。

采用透射率为 55.62%、反射率为 44.38%的分光镜对合束激光的输出功率进行测量。如图 7 所示,19 台 972 nm 半导体激光器处于同步工作状态,当每台直流驱动电源的最大泵浦电流为 36 A、对应泵浦

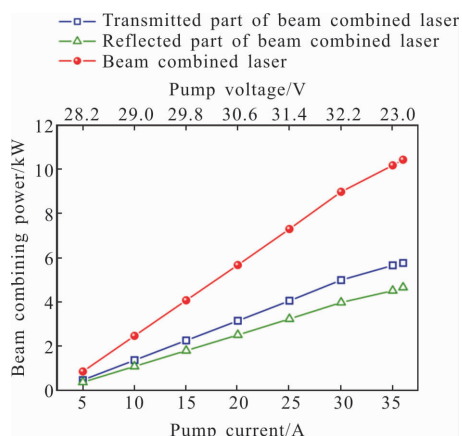


图 7 光束组合激光器的 CW 功率与泵浦电流、电压的关系

Fig.7 CW power of the beam combined laser as a function of pump current and pump voltage

电压为 33.2V 时,合束激光经过分光镜后透射和反射部分的最大连续功率分别为 5.772 kW 和 4.669 kW,合束激光总功率最大值为 10.441 kW,合束效率达到 98.2%。在 30 min 内,以 10 s 为时间间隔测得合束激光的功率不稳定性为 $\pm 1.24\%$ 。

当 19 台半导体激光器分别独立工作时,中心波长在 971.54~973.81 nm,如图 8 中插图所示,对应线宽为 1.87~2.15 nm。当 19 台半导体激光器同步工作时,如图 8 所示,测得合束激光的中心波长为 972.36 nm,线宽为 2.46 nm。结果表明:合束激光在继续保持较窄线宽的同时,其光谱均匀性得到了大幅改善。

如图 9 所示,利用 10 kW 合束激光对厚度为 2 mm 的钢板进行了激光射孔。在光束传播 z 方向上不同位置处获得的孔洞轮廓可用来标记合束激光的真实光斑轮廓, z 为横截面与焦斑的距离。图 9(d) 显示合束焦斑的直径约为 21 mm。在合束长度的边

缘处,如图 9(b)和 9(f)所示,对应的合束激光光斑直径均为 30 mm 左右。图 9 的实验结果与图 5 的仿真结果对比表明,文中仿真模拟具有很好的精度。

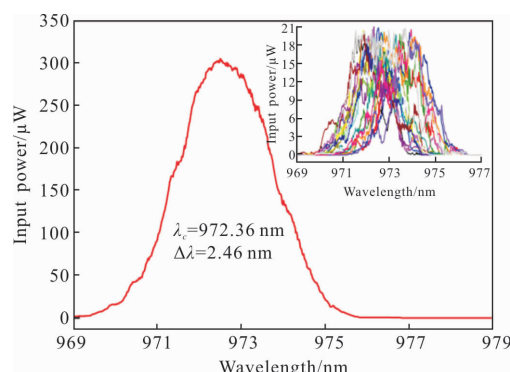


图 8 合束激光的光谱(插图为 19 台半导体激光器的光谱叠加)
Fig.8 Spectrum of the beam combined laser (The inset is the spectral superposition from 19 semiconductor lasers running separately)

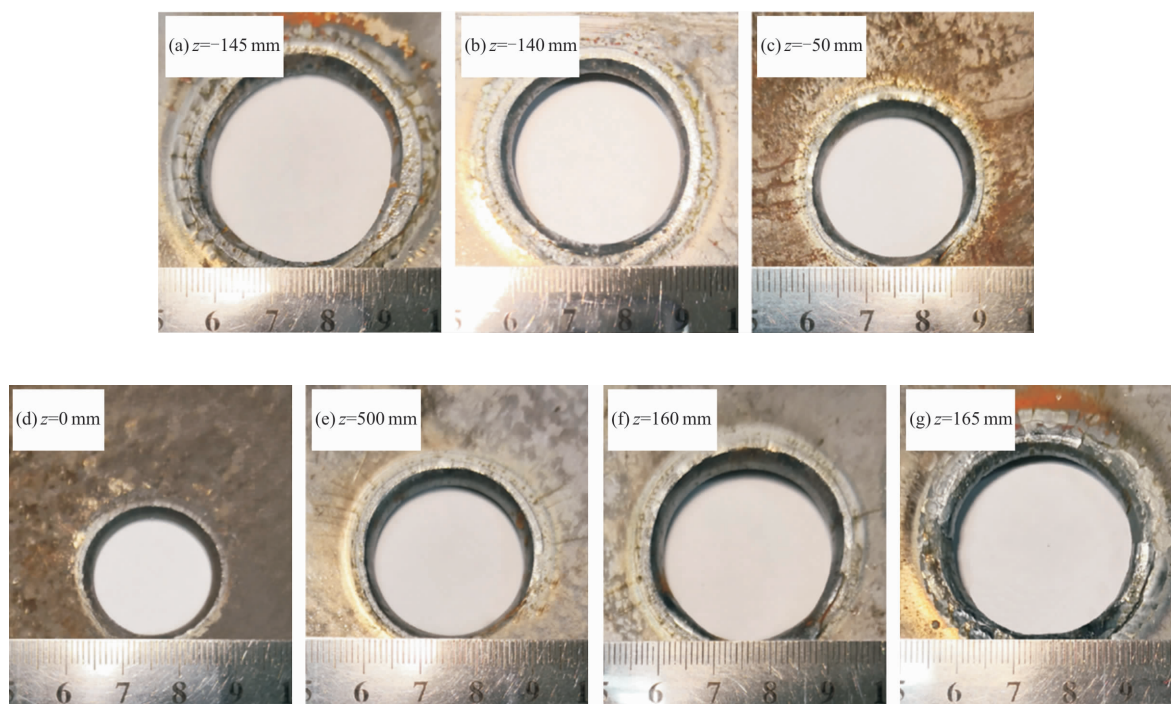


图 9 不同位置处合束激光的标记轮廓
Fig.9 Marked shape of the beam combined laser at different positions

3 激光射孔实验

利用 10 kW 空间非相干合束激光对油井地下 1 650 m 处的砂岩采样岩心(长度 570 mm,剖面直径

100 mm)和钢板(厚度 70 mm)进行了地面激光射孔实验,如图 10 所示。当激光照射时间为 180 s 时,砂岩样品被射穿,射孔速率为 3.17 mm/s。当激光照射时间为 16 s 时,钢板被射穿,射孔速率为 4.38 mm/s。



图 10 砂岩激光射孔的侧面(a)、入射面(b)及出射面(c)照片，钢板激光射孔的入射面(d)、出射面(e)及侧面(f)照片
Fig.10 Photographs of the side (a), incident surface (b) and exit surface (c) of the sandstone after laser perforation, photographs of the incident surface (d), exit surface (e) and side (f) of the steel sheet after laser perforation

在激光射孔过程中，射孔孔道内大量的粉尘和熔融态物质不但会散射大量的激光能量，而且将吸收的部分激光能量以热的形式向非照射区域传递。这些因素造成激光能量的有效使用率和激光射孔速率较低，而提高激光射孔速率的有效途径之一就是进一步增加合束激光功率。由于参数合束的激光束多达 19 路，因此，只需适当增加每路激光束功率，即可显著增加合束激光的功率，从而大幅提高激光射孔速率。

4 结 论

采用自行设计并制造的一款 19×1 激光空间非相干合束器和 19 台光纤传输 972 nm 半导体激光器，在实验上实现了最大连续合束功率 10.441 kW、合束效率 98.2% 的激光空间非相干合束。合束激光具有 300 mm 的合束长度、21 mm 的焦斑直径和 2.46 nm 的谱线宽度。使用 10 kW 空间非相干合束激光开展了对砂岩和钢板的地面激光射孔实验，激光射孔深度分别达到 570 mm 和 70 mm。130 mm 的外径确保该型合束器可以放置于大多数石油井中，多达 19 路的光纤传输激光束参与合束则有效地分散了单根光纤中激光的传输功率和传输风险，从而可提高超高功率激光在石油井中传输的安全性。此外，该型合束器具有制造工艺和装配工艺简单、结构稳定性高、成本低廉、环境适应性强等优点，能够被大规模制造并

快速应用于石油井激光射孔研究及应用领域。

参 考 文 献：

- [1] Keshavarzi R, Jahanbakhshi R, Bayesteh H, et al. Applying high power lasers in perforating oil and gas wells: Prediction of the laser power loss during laser beam-fluid interaction by using artificial neural networks [J]. *Lasers in Engineering*, 2011, 21(5): 329-340.
- [2] Kariminezhad H, Amani H, Moosapoor M. A laboratory study about laser perforation of concrete for application in oil and gas wells [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 32: 2016.
- [3] Li Meiyang, Han Bin, Zhang, Shiyi, et al. Experimental study on laser irradiation of rocks under different media conditions [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(5): 709-714. (in Chinese)
- [4] Smith A V, Smith J J. Influence of pump and seed modulation on the mode instability thresholds of fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24545-24558.
- [5] Chen Zilun, Zhou Xuanfeng, Wang Zefeng, et al. Review of all-fiber signal combiner for high power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103005. (in Chinese)
- [6] Cao Yuxuan, Shu Shili, Sun Fangyuan, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1003002. (in Chinese)
- [7] Chen Fan, Ma Jun, Wei Cong, et al. 10 kW-level spectral beam combination of two high power broad-linewidth fiber lasers by means of edge filters [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32783-32791.
- [8] Xu Dan, Huang Xuesong, Jiang Menghua, et al. 500 W fiber-coupled semiconductor laser module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606003. (in Chinese)
- [9] Guo Bao, Zhang Bing, Huang Wei, et al. A laser beam-combining method in space based on deflection mirror [J]. *Electronics Optics & Control*, 2018, 25(5): 96-99. (in Chinese)
- [10] Yi Weiwei, Qu Changhong, Ren Guoguang. Tactical airborne laser weapon [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(2): 131-139. (in Chinese)
- [11] Younes N, Meysam P, Saeid J, et al. Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oil field in southern Iran [J]. *Geothermics*, 2015, 55: 16-23.