

文章编号: 0258-7025(2005)04-0557-05

激光深熔焊接过程中小孔径向尺寸及其动特性

秦国梁¹, 林尚扬²

(¹哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)
²哈尔滨焊接研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 通过对小孔同轴视觉图像的处理提取出小孔径向尺寸,研究了小孔径向尺寸随焊接规范参量变化的动特性。研究表明,小孔径向尺寸在工件未焊透时随激光功率的增大而增大,在焊透时小孔径向尺寸随激光功率的变化较小;随着焊接速度的增加,小孔的径向宽度逐渐减小,而其长度有一个先减小后增大再减小的波动过程;离焦量在一定的范围内,在足够高的激光能量密度下,激光辐照范围的增大使得小孔径向尺寸与激光光斑同步变化。

关键词 激光技术; Nd:YAG 激光焊; 深熔焊; 同轴视觉传感; 小孔; 径向尺寸; 动特性

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Radial Dimension of Keyhole and its Dynamic Characteristics in Laser Deep Penetration Welding

QIN Guo-liang¹, LIN Shang-yang²

(¹ National Key Lab of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China
² Harbin Welding Institute, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract The radial keyhole size is acquired by processing the coaxial image of keyhole captured in Nd:YAG continuous wave (CW) laser deep penetration welding, and its dynamic characteristics are studied in this paper. The studied results show that the radial dimension of keyhole increases with laser power for partial penetration, while it is nearly unvaried when the workpiece is fully penetrated. With welding speed increasing, the radial width of keyhole monotonously decreases, but radial length of keyhole will be fluctuated. In certain range of defocusing distance, if laser intensity is high enough, the expansion of irradiated area by laser beam can make the radial keyhole size synchronously increase with laser spot.

Key words laser technique; Nd:YAG laser welding; deep penetration welding; coaxial visual sensing; keyhole; radial dimension; dynamic characteristics

1 引 言

小孔效应是激光深熔焊接模式的本质和核心,是近年来激光焊接研究的热点。国外的研究人员基于焊接过程中小孔所满足的能量和力学条件建立了很多小孔的数学模型^[1~4]。但是由于小孔只存在于熔融的液态金属中,随着焊缝金属的凝固,小孔也随之消失,所以很难测量出小孔的大小。因此以往所建立的小孔的各种数学模型并没有得到小孔实际尺寸的验证,也没有给出小孔尺寸随焊接规范参量的

变化规律。

同基于等离子体辐射光强的激光焊接过程监测相比^[5],激光焊接同轴视觉传感技术是从小孔的正上方对小孔进行视觉监测,通过采集到的小孔同轴视觉图像可以判断工件焊透与否,跟踪焊缝以及监测小孔稳定性等^[6,7]。

视觉传感技术在激光焊接过程中的应用使提取小孔尺寸成为可能。目前德国的一些研究人员基于激光致等离子体的同轴辐射光强同焊缝熔深的标定

收稿日期:2004-05-08; 收到修改稿日期:2004-08-11

作者简介:秦国梁(1975—),男,山东人,博士研究生,主要从事大功率激光加工及其过程监控技术的研究。

E-mail: laserpro@sohu.com

关系恢复出小孔的三维形状^[5],但是由于等离子体的辐射光受各种因素的影响而会影响监测结果。因此,基于等离子体的辐射光强来恢复小孔形状并提取小孔的尺寸的方法具有很大的误差。

本文通过对处理不同焊接规范下小孔的同轴视觉图像,提取小孔的径向尺寸并研究了小孔径向尺寸随焊接规范变化的动特性。

2 试验设备及方法

实验用的激光器是额定功率为 2 kW 的 Nd:YAG 固体激光器,输出波长为 1.06 μm 的连续波激光。激光束由内径为 0.6 mm 的光纤传输,经焦距为 200 mm 的透镜聚焦后的焦点直径为 0.6 mm。

实验采用 Nd:YAG 连续波激光平板堆焊,焊接规范参量离散变化。实验条件如表 1 所示。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Values
Laser power Q / W	900~1700
Welding speed V / (mm/s)	10~60
Defocusing distance Δz / mm	-4.5~5
Coaxial shielding gas	Ar
Flux of shielding gas U_f / (l/min)	20, 25
Experimental material	Q235 carbon steel
Dimension of workpiece ($L \times B \times h$)	300 mm \times 100 mm \times 2 mm

图像采集采用的是自主开发的激光焊接过程同轴视觉传感系统,其框图如图 1 所示。

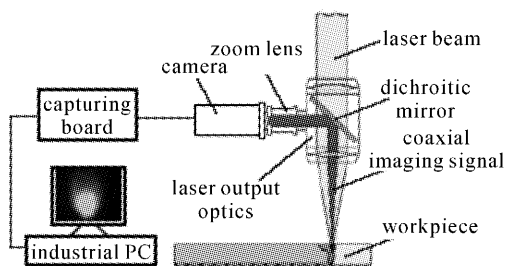


图 1 激光焊接过程同轴视觉传感系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of coaxial visual sensing system

3 小孔径向尺寸及其获取

激光焊接过程中,在高能密度激光束作用下的金属产生强烈蒸发而形成的小孔,是一个底部细,上部粗且深入工件的腔体。从其正上方看下去,小孔有内、外两个边缘,内边缘表明了小孔底部径向尺寸,而

外边缘则代表了小孔上部的径向大小。因此,可用小孔内外边缘的长度和宽度来描述小孔的径向大小。

通过对所采集的小孔的同轴视觉图像的处理可以提取出由一些离散的点组成的小孔的内外边缘^[8]。为了能够准确地提取出小孔的尺寸,利用霍夫变换对小孔边缘进行曲线拟合。

根据所提取出的小孔边缘的特点,假设小孔边缘关于焊接方向为轴对称,并设小孔边缘曲线的非线性拟合函数在以激光光斑中心为原点、焊接方向为 x 轴的坐标系 Oxy 中的统一表达式为

$$y_k = \pm a_k (x_k - x_{fk})^{b_k} [L_k - (x_k - x_{fk})]^{c_k}, \quad (1)$$

式中 a_k 为小孔边缘的宽长比, $a_k > 0$; b_k 为曲线头部形状参量, $0 < b_k \leq 1$; c_k 为曲线尾部形状参量, $0 < c_k \leq 1$; 当 $b_k = c_k$ 时,为椭圆,当 $a_k = 1$ 且 $b_k = c_k$ 时,为圆形; L_k 为长轴长度; x_{fk} 为小孔边缘尾部到激光光斑中心的距离; k 为区别小孔内外边缘的脚标。

通过对(1)式中 a_k, b_k, c_k 和 L_k 的拟合而分别得到小孔内外边缘的长度、宽长比及其曲线方程,并可求出小孔内外边缘的短轴长 B_k

$$B_k = a_k \cdot L_k. \quad (2)$$

图 2 为提取出的小孔的内外边缘及其拟合曲线。

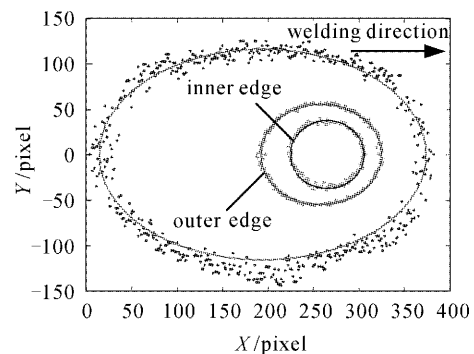


图 2 提取出的小孔内外边缘及其拟合结果

Fig. 2 Extracted inner and outer edges of keyhole and their fitted curves ($Q=1200$ W, $V=10$ mm/s, $\Delta z=0$ mm)

对同轴视觉图像采集系统标定后可根据小孔的图像尺寸计算出其实际尺寸,本文在 X 和 Y 方向分别为 0.00814206mm/pixel 和 0.010027 mm/pixel。根据所得的小孔的图像尺寸和图像采集系统尺寸标定结果可以得到小孔的实际尺寸。

4 小孔径向尺寸的动特性

4.1 小孔径向尺寸随激光功率的变化

图 3(a)为焊接速度 $V=30$ mm/s,离焦量 $\Delta z=$

0 mm 时小孔径向尺寸随激光功率的变化曲线。从图中看出,在工件未焊透时,小孔在径向上的长度和宽度随着激光功率的增大而增大。当激光功率超过 1200 W 后,工件焊透,小孔的径向尺寸随激光功率的变化很小。

小孔内外边缘的径向尺寸都大于辐照在工件表

面的激光光斑的直径 0.6 mm。这表明在激光功率变化过程中,激光直接辐照在小孔前沿和底部,而对小孔的侧壁及后壁没有直接的辐照加热作用。因此,可以推断激光功率的增加只是小孔径向尺寸变化的内因,而小孔径向尺寸的变化是小孔内的金属等离子体和金属蒸气对孔壁的热、压作用的直接结果。

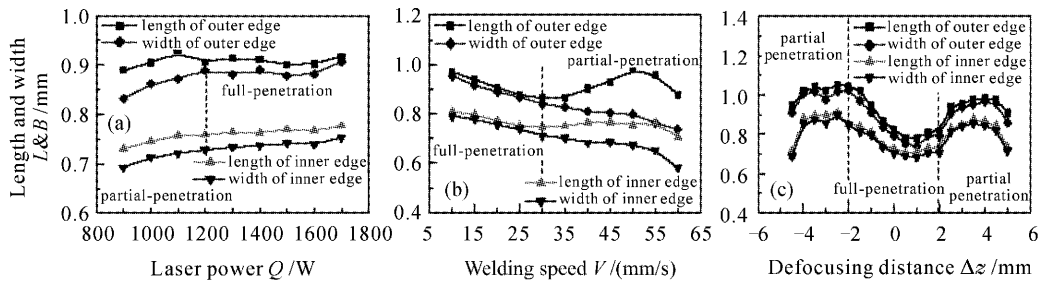


图 3 小孔径向尺寸随激光功率的变化(a), 随焊接速度的变化(b), 随离焦量的变化(c)

Fig. 3 Variation of radial dimension of keyhole with laser power (a) ($V=30$ mm/s, $\Delta z=0$ mm, $U_f=20$ l/min), (b) with welding speed ($Q=1250$ W, $\Delta Z=0$ mm, $U_f=20$ l/min), (c) with defocusing distance ($Q=1500$ W, $V=30$ mm/s, $U_f=25$ l/min)

在未焊透时,随着激光功率的增加,焊接热输入也随之增大。热输入的增加不仅使小孔深度增加,也使得小孔径向膨胀。当焊透后,小孔加深至几乎贯穿板厚(孔底仅有一层薄薄的液态金属层用于支撑小孔)。在金属等离子体居多的小孔上部,对激光的吸收已经接近饱和,其温度也基本达到稳定。因此焊透后的小孔外边缘的尺寸变化较小。

在小孔下部金属蒸气居多,对穿过其中的激光仍然具有较强的吸收作用,因此其温度也随着激光功率的增大而慢慢升高,对孔壁的加热作用也逐渐增强,因而小孔内边缘的尺寸仍然缓慢增加。

工件焊透后小孔内外边缘变化幅度很小的一个重要原因就是有一部分激光透过孔底的液态金属薄层而损耗在工件以外,并且随着功率的增大,损耗的这部分激光能量也越来越多。

4.2 小孔径向尺寸随焊接速度的变化

图 3(b)为激光功率 $Q=1250$ W, 离焦量 $\Delta z=0$ mm 条件下小孔径向尺寸随焊接速度的变化曲线。从图中可以看出,在低速和高速焊接时,小孔的径向尺寸随焊接速度的增加而减小;在中高速焊接时,小孔的径向长度随焊接速度的加快而拉长,其径向宽度减小的速度也变慢。

在焊接速度的变化过程中,线能量密度的减小使小孔具有减小的趋势,而焊接速度的增加使热滞后效应增强,从而促使小孔在焊接方向有被拉长的趋势,这两种作用此消彼长地共同影响着焊接速度

变化过程中小孔的尺寸。

在低速焊接 ($V < 30$ mm/s) 时,热滞后效应较弱,激光能量密度成为影响小孔径向尺寸的主要因素。在此阶段,线能量密度的减少造成的小孔径向尺寸的减小超过了焊接速度加快带来的在焊接方向上的拉长,所以小孔的径向长度也随着焊接速度的加快而减小。中高速 ($V > 30$ mm/s) 焊接时,随着焊接速度的加快,热滞后效应作用明显增强,对小孔的影响也明显了,使得在焊接方向上小孔的径向长度被拉长。而受热滞后效应影响很弱的垂直焊接方向的小孔径向宽度仍然随着焊接速度的加快而减小,但是其减小速度明显变缓。

足够快的焊接速度和小孔周围足够厚的液态金属层是热滞后效应影响小孔径向尺寸的两个必要条件。小孔上部拖后位置的液态金属比其下部拖后位置上液态金属的量要多,因而,热滞后效应对小孔上部影响较大,小孔外边缘的长度被拉长的幅度也要大于内边缘的拉长幅度。当焊接速度增大到一定程度 ($V \geq 50$ mm/s) 时,焊接线能量密度的减小以及很高的焊接速度使小孔向四周的热传导时间减少,从而使小孔周围的液态金属层变得很薄,导致热滞后效应作用大大减弱,由热滞后效应带来的小孔径向长度的拉长已经抵不住焊接线能量密度的降低造成的小孔径向收缩,小孔径向尺寸表现为随着焊接速度的增加而大幅度减小。

4.3 小孔径向尺寸随焦点位置的变化

图 3(c)为激光功率 $Q=1500\text{ W}$, 焊接速度 $V=30\text{ mm/s}$ 时小孔径向尺寸随离焦量的变化曲线。从图中可以看出小孔径向尺寸近似关于 $\Delta z=1\text{ mm}$ (焦点位置在工件上表面以下, 离焦量为正, 反之, 为负) 对称。在离焦量的变化过程中, 激光辐照区域的变化及其带来的激光功率密度的变化是小孔径向尺寸的两个主要影响因素。

当离焦量在一定的范围内 ($-2.5\sim 4.5\text{ mm}$) 时, 随着焦点远离工件上表面, 激光辐照区域也随着辐照在工件上表面的激光光斑的增大而增大, 在足够高的激光功率密度下, 小孔径向尺寸随着辐照区域的增大而增大, 其变化规律与激光光斑半径随离焦量的变化规律相似。但当离焦量增大到一定的程度 (低于小孔上表面 4.5 mm 以下和高于工件上表面 2.5 mm 以上), 随激光辐照区域增大而降低的激光能量密度不能为小孔的径向扩展提供足够的能量支持时, 小孔的径向尺寸将不再随离焦量的增大而增大, 而是随着激光能量密度的减小而减小。

从图 3(c)中还可以看出, 激光焦点在工件表面以上时的小孔径向尺寸要比焦点在工件表面以下时要大, 这是由于同轴保护气对小孔的影响不同造成的。焦点在工件表面以下时, 保护气喷嘴离工件距离近, 对小孔上部具有较强的冷却作用, 而焦点在工件表面以上时, 同轴保护气喷嘴距离工件较远, 冷却效果要弱得多。

小孔径向尺寸随离焦量变化曲线的对称轴向入焦方向偏离了 1 mm 左右, 主要是因为焊接过程中激光焦点在热透镜效应、等离子体二次聚焦等效应的影响下发生了偏移的缘故。

4.4 焊接规范参量对小孔特征参量影响的比较

用小孔特征参量的相对变化率来表征小孔径向尺寸的变化程度, 并比较各种焊接规范参量的变化对小孔特征参量的影响。表 2 为各焊接规范参量变化时对小孔径向尺寸相对变化率的比较。

从表中可以看出, 离焦量和焊接速度的变化影响最大, 激光功率的影响最弱。这是因为这三个参量变化过程中影响小孔的主要因素不同和强弱造成的。

离焦量变化过程中, 激光辐照区域的变化是影响小孔的主要因素, 其可以直接导致小孔径向尺寸的变化, 对小孔的径向尺寸的影响是最直接的。焊接速度变化过程中, 热滞后效应使小孔在焊接方向有被拉长的趋势, 在小孔周围的液态金属层较厚且焊接速度在中高速时的影响最大。而在激光功率变化过程中, 激光功率的变化带来的小孔内部压力和温度的变化是

小孔径向尺寸发生变化的直接原因, 而这种通过热传递来影响小孔尺寸与其他两种影响途径相比是很弱的。因此激光功率对小孔影响最弱。

表 2 焊接规范参量变化对小孔长度和宽度影响的比较

Table 2 Comparisons of variation of radical size of keyhole edges

Welding parameters	Keyhole edges	Relative variance ratio /%	
		Width	Length
Laser power	Inner edge	8.4	6.0
	Outer edge	8.6	4.1
Welding speed	Inner edge	29.8	13.3
	Outer edge	26.0	13.0
Defocusing distance	Inner edge	24.7	25.0
	Outer edge	31.4	29.1

5 结 论

1) 在激光功率的变化过程中, 未焊透时, 小孔径向尺寸随激光功率的增大而增大; 焊透后, 小孔上部径向尺寸基本不变, 而小孔下部的径向尺寸缓慢地增加, 且焊透后激光功率的变化对小孔径向尺寸的影响较弱。

2) 激光能量密度和热滞后效应是焊接速度变化过程中影响小孔径向尺寸的主要因素。在低速和高速焊接时, 小孔径向尺寸随焊接速度加快而减小; 在中高速焊接时, 小孔径向宽度随焊接速度的加快而缓慢减小, 而其长度则随焊接速度加快而拉长。

3) 离焦量在一定的范围内, 当焦点位置远离工件表面时, 小孔的径向尺寸随着激光辐照区域的增大而增大; 当焦点位置距离工件上表面较远时, 小孔的径向尺寸将随着离焦量的增加而减小。小孔径向尺寸随离焦量的变化曲线关于 $\Delta z=1\text{ mm}$ 近似对称。

4) 离焦量和焊接速度的变化对小孔径向尺寸的影响最大, 而激光功率的影响最弱。

参 考 文 献

- 1 J. Dowden, N. Postacioglu, M. Davis *et al.*. A keyhole model in penetration welding with a laser [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1987, **20**: 36~44
 - 2 J. Trappe, J. Kroos, C. Tix *et al.*. On the shape and location of the keyhole in penetration laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27**: 2152~2154
 - 3 V. V. Semak, W. D. Bragg, B. Damkroger *et al.*. Transient model for the keyhole during laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, **32**: L61~L64
 - 4 Zhang Yi, Li Lijun, Jin Xiangzhong *et al.*. Diathermancy study on keyhole effects in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1538~1542
- 张屹, 李力钧, 金湘中等. 激光深熔焊接小孔效应的传热性研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(12): 1538~1542

- 5 Zeng Hao, Zhou Zudu, Chen Yuping *et al.*. Real-time in process monitoring of laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 284~288
曾浩, 周祖德, 陈幼平等. 激光焊接过程实时监测[J]. 中国激光, 2001, **A28**(3): 284~285
- 6 J. Beersiek. A CMOS camera as a tool for process analysis not only for laser beam welding[C]. *Proc. ICALEO '2001*, 2001, Section F: 206~215

- 7 C. Kratzsch, P. Abels, S. Kaielerle *et al.*. Coaxial process control during laser beam welding of tailored blanks[C]. *Proc. AHPLA '99*, 1999, **3888**: 472~482
- 8 Qin Guoliang, Qi Xiubin, Yang Yongbo *et al.*. Acquisition and processing of coaxial image of molten pool and keyhole in Nd:YAG laser welding with high power[J]. *China Welding*, 2004, **13**(1): 51~55

激光二极管抽运 Na, Yb:CaF₂ 晶体实现低阈值激光输出*

与 Nd³⁺ 相比, Yb³⁺ 具有能级结构简单, 本征量子缺陷低 (<0.1), 辐射量子效率高, 而且吸收和发射光谱非常宽, 适合激光二极管(LD)抽运宽带调谐激光运转和超短脉冲的产生。特别是掺 Yb 晶体适合高亮度的 InGaAs 激光二极管抽运, 从而成为近年来激光二极管抽运全固态激光器中备受关注的增益介质。但是掺 Yb 激光晶体属三能级系统, 抽运阈值普遍较高。因此, 寻找低阈值、实用化掺 Yb 晶体介质是近年来激光晶体重要发展方向。

本文报道的 Na⁺, Yb³⁺:CaF₂ 新型激光晶体, 其关键思想是在 CaF₂ 基质晶体中同时引入 Yb³⁺ 和 Na⁺, Na⁺ 和 Yb³⁺ 在取代 Ca²⁺ 时形成电荷互补以达到系统的电荷平衡, 同时起到阻止 Yb³⁺ 团簇结构和 Yb²⁺ 形成的作用, 从而大大提高 Yb³⁺:CaF₂ 晶体的发光效率和降低激光抽运阈值。图 1 给出了 Yb³⁺:CaF₂ 晶体掺 Na⁺ 前后 940 nm 激光二极管抽运下的荧光光谱。图 1 中显示, 相对于 Yb³⁺:CaF₂ 晶体, Na⁺, Yb³⁺:CaF₂ 晶体的荧光强度大大地提高了。从而显示了 Na⁺, Yb³⁺:CaF₂ 晶体在全固态高功率、可调谐超快激光增益介质和放大介质方面具有潜在应用价值。

实验中抽运源是光纤耦合的激光二极管, 最大

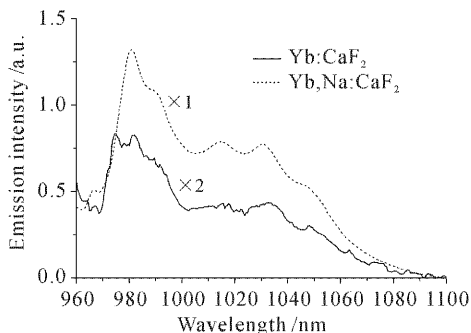


图 1 940 nm 激光二极管抽运条件下 Yb³⁺:CaF₂ 和 Na⁺, Yb³⁺:CaF₂ 晶体的室温荧光光谱

Fig. 1 Room temperature fluorescence spectra of Yb³⁺:CaF₂ and Na⁺, Yb³⁺:CaF₂ crystals under 940 nm LD pumping

发射功率为 4.9 W, 中心波长在 975 nm, 光纤的芯径为 50 μm, 数值孔径为 0.22。采用非球面镜对抽运光束整形和扩束后, 再聚焦到激光晶体上, 其光斑半径为 40 μm。为了得到稳定的 TEM₀₀ 模振荡, 谐振腔采用稳定的三镜折叠腔结构, 激光模式在晶体中的光斑半径约为 48 μm。所用晶体被垂直切割, 晶体长度为 6 mm, 两个抛光面未镀膜, 掺 Na 和 Yb 的原子数分数分别为 3% 和 2%。我们调节激光二极管的温度以使抽运光波长尽量与 Na, Yb:CaF₂ 晶体的最大吸收峰相匹配, 从而使晶体的最大吸收功率为 2.1 W, 为了防止晶体由于热效应被打坏, 将晶体通过铜片包裹固定于具有水冷循环系统的铜座上。为了得到不同的激光输出, 我们采用了激光透过率分别为 1%, 2% 和 7% 的三个耦合输出镜。发现该晶体仅以自调 Q 方式运转, 最小脉冲宽度小于 2 μs, 最高重复频率大于 25 kHz。这是由于 Na, Yb:CaF₂ 晶体的上能级寿命比较长 (1.94 ms), 而产生激光的阈值又比较低, 因此极易得到自调 Q 运转。利用 1% 的耦合输出镜得到的激光阈值仅为 70 mW, 激光输出的中心波长为 1.05 μm; 利用 2% 的输出镜得到最大输出功率为 390 mW, 此时最大激光斜效率达到 20.3%; 激光在各个功率抽运下始终保持 TEM₀₀ 模振荡, 并且激光光束不存在任何偏振; 采用 7% 的耦合输出镜激光输出功率有所下降。可见, 最佳输出镜的激光透过率应该在 2% 到 7% 之间。我们将在以后的实验中进行进一步验证。采用单棱镜进行光谱调谐实验, 获得了从 1036 nm 到 1059 nm 的调谐激光输出。

薛迎红¹, 王清月¹, 柴路¹, 苏良碧², 徐军²
¹天津大学精密仪器与光电子工程学院
 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072
²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

* 国家重点基础研究项目(G1999075201-2)和上海光科技专项和国家杰出青年基金(60425516)资助课题。