

文章编号: 0258-702X(2002)02-0185-04

# 两种大功率工业激光焊接特性的比较

陈 涛, 陈继民, 王智勇, 肖荣诗, 左铁钊

(国家产学研激光技术中心 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

**提要** 对目前两种主要工业加工用大功率 YAG 和 CO<sub>2</sub> 激光器的焊接特性进行了比较研究。理论上比较了用两种激光加工时的材料吸收率差异。实验上直接比较了两种激光的焊接效果, 并依据能效对两者进行定量比较分析。实验结果表明 YAG 激光的平均能效为 CO<sub>2</sub> 激光平均能效的 3.623 倍, 与理论的两种激光吸收率比值接近。而两者焊缝几何形状受焊接参数的影响规律相似。研究结果对薄板壳金属材料的焊接提供有价值的参考。

**关键词** CO<sub>2</sub> 激光, YAG 激光, 焊接, 能效

**中图分类号** TG 456.7 **文献标识码** A

## Welding Property Comparison Study between Two Major High Power Industrial Lasers

CHEN Tao, CHEN Ji-ming, WANG Zhi-yong, XIAO Rong-shi, ZUO Tie-chuan

(National Center of Laser Technology, College of Laser Engineering,  
Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

**Abstract** This paper comparatively studies the welding characteristics of two major high power industrial laser—CO<sub>2</sub> laser and YAG laser. By comparing the welding effect differences for the two kinds of lasers, it is shown that the energy efficiency of YAG laser welding is bigger than that of CO<sub>2</sub> laser.

**Key words** CO<sub>2</sub> laser, YAG laser, welding, energy efficiency

已有一些研究者对 CO<sub>2</sub> 激光和 YAG 激光在加工特性上进行了直接对比研究<sup>[1~4]</sup>。结果表明, 焊接 409 不锈钢, 用脉冲 Nd<sup>3+</sup>:YAG 可获得的焊速远高于同样功率级的 CO<sub>2</sub> 激光。在焊 AISI316 不锈钢时, CO<sub>2</sub> 激光焊缝横断面形状较细, 热裂纹倾向小, 而 YAG 激光形状较粗, 热裂纹倾向比 CO<sub>2</sub> 激光大, 熔化区明显大于相同脉冲能量的 CO<sub>2</sub> 激光。对 CO<sub>2</sub> 激光焊接, 较低的脉冲能量易得到无裂纹焊缝, 累积裂纹长度随脉冲能量的增加而增加。在保持定常脉冲能量下, 长、短脉宽对裂纹长度、裂纹总数、单位熔深的裂纹数没有明显的差异。在各种速度的两种激光焊接的比较试验中, CO<sub>2</sub> 激光熔深都显著大于 YAG 激光的熔深。F. O. Olsen 等<sup>[5]</sup>在焊接 AISI316 奥氏体不锈钢实验中, 两种激光均可获无裂纹的较好焊缝,

CO<sub>2</sub> 激光更倾向于无热裂纹敏感性。

但这些文献对两种激光焊接特性的比较所得结论似乎并不十分明确, 在焊缝深度、宽度、焊接速度、热裂纹倾向性等方面结论尚不统一。为此, 有必要进一步研究两种激光焊接的特性。

### 1 两种波长作用时吸收率的差异

吸收率随材料种类、物态、温度和表面状况决定。对金属及其合金而言, 一般随波长增加, 吸收率减小, 反射率增加。如 Fe-Cr-Ni 合金系, 在可见光区, 随波长的增加, 光谱反射率增加, 在 0.374 μm (3.32 eV) 处达到最大, 在长波区反射率出现一定程度的反复波动。

收稿日期 2000-08-15; 收到修改稿日期 2000-12-18

基金项目 国家自然科学基金(批准号: 59635170)资助项目。

作者简介 陈涛(1970—)男, 北京工业大学激光工程研究院讲师, 博士, 主要从事激光加工、激光微技术、激光生物学、激光医学等应用研究。E-mail: chentao@bjpu.edu.cn

同一种材料对不同波长的 YAG 激光和 CO<sub>2</sub> 激光的吸收率自然存在差异,两种波长吸收率的差异在理论上可由 Hagen-Ruben 关系式推出。在高温辐射研究中,可以用上述关系式表达高温吸收率

$$A = (8\varepsilon_0\omega\rho)^{1/2} \quad (1)$$

式中  $\omega = 2\pi c/\lambda$ ,  $\rho$  为材料电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )。

根据文献[6]提供的数据,一般材料对 YAG 激光的吸收率均高于 CO<sub>2</sub> 的吸收率,熔点时的吸收率高于室温时的吸收率,说明随温度的升高,吸收率增大。但从 YAG/CO<sub>2</sub> 吸收比来看,随温度升高反而减小,说明随温度升高两种波长激光吸收率差减小。

波长不同导致的吸收率的差异,最大程度上决定了在初始激光作用的瞬间板材吸收光功率的多少。此阶段并未有材料体内吸收状态出现,不存在由于光在材料内多次反射增强吸收、小孔隙内等离子体吸收后将能量传递给基材等作用。这影响到薄板、壳所采用的激光焊接模式。在一般情形下,对激光相对有较大吸收率的钢、钛等材料制成的薄壳激光焊接都使用热导焊模式,其吸收几乎就由初始吸收状态决定。大多数常用金属材料对 YAG 激光比 CO<sub>2</sub> 激光有较大的初始吸收率,因此 YAG 激光比较适合于薄壳的焊接。

## 2 两种激光焊接特性的对比

### 2.1 激光器参数

CO<sub>2</sub> 激光加工系统:

1.0 kW CO<sub>2</sub> 快速轴流激光器 Modell RS1000,导光系统为 45°折转铜镜,聚焦透镜口径  $\phi = 1.1''$ ,焦距  $f = 2.5''$  的 ZnSe,  $x 500 \text{ mm} \times y 500 \text{ mm} \times z 285 \text{ mm}$  工作台 (IBH CNC MicroMODUS);

Nd<sup>3+</sup>:YAG 加工系统:

550 W 脉冲自由振荡 Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光器 QY506P,导光系统为芯径  $\phi 600 \mu\text{m}$ ,长度 15 m 的石英光纤,聚焦镜为  $f = 100 \text{ mm}$  普通石英透镜,加工系统为 HITACHI MR6100 六轴弧焊机器人。

### 2.2 试验条件

为考察两种激光的焊接能力,设计直接堆焊试验进行比较。材料厚度为 5 mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢(常用工业用材中不锈钢激光的吸收率最大),表面为热轧处理状态。

焊接时,两种激光选取相同的脉冲功率、平均功率、脉宽、重复频率、离焦量、加工速度等工艺参数。具体参数如下:焊接速度 200 mm/min,600 mm/min,

1000 mm/min,频率 10 Hz,20 Hz,30 Hz,40 Hz,50 Hz;脉冲宽度 10 ms,6 mm,2 ms;离焦量 0 mm,-1.0 mm,-2.0 mm,-3.0 mm。

试验方法采用表面熔化焊接。

样品处理:将试样沿焊缝横断面切开(用剪板机剪切,并将剪断面沿焊缝方向继续铣削 2~3 mm 深度以去除剪切变形区),横断面用 SiC 水磨砂纸研磨至 1000# 粒度,配比腐蚀液:盐酸 5 ml,硝酸 10 ml,三氯化铁 10 g,水 100 ml。对研磨的不锈钢断面腐蚀后,在工具显微镜下测量其熔深、表面熔宽及半深熔宽的值,作为分析焊缝端面几何尺寸的数据。

## 3 结果分析

焊接试验完成后,选取有效试验样本对比研究。一组典型的焊缝横断面对比照片如图 1 所示。其对应的工艺参数为离焦量 -1.0 mm,频率 30 Hz,脉宽 6 ms,焊接速度 200 mm/min。

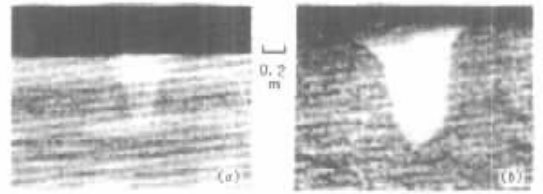


图 1 两种激光在相同工艺参数下的焊缝断面对比照片

Fig.1 Laser weld cross section profiles for two lasers at same processing parameters  
(a) CO<sub>2</sub> laser;(b) YAG laser

### 3.1 CO<sub>2</sub> 激光和 YAG 激光能效的比较

断面结果不直接反映两种激光吸收率,但可表示能量利用率。将能量利用率以能效的概念表示。已知吸收率定义为

$$A_w = P'/P \quad (2)$$

熔化效率定义为

$$\eta_m = \frac{\rho s V (CT_m + L)}{P'} \quad (3)$$

上两式中, $s$  为焊缝熔化区的断面积, $\rho$  为密度, $V$  为焊接速度, $C$  为比热, $T_m$  为熔点, $L$  为熔化热, $P'$  为焊件吸收的激光功率, $P$  为入射激光功率。从表达式可知,只有当吸收能量用于固-液界面扩展的部分越多,形成的熔化体积越大,熔化效率才越大。界面扩张能对界面传导损失能的比值越大,熔化效率越高。则将吸收率  $A_w$  和熔化效率  $\eta_m$  的乘积

$$\eta = A_w \eta_m = \frac{\rho s V (CT_m + L)}{P} \quad (4)$$

作为衡量输入激光能量利用率的指标,称为能效。用来估算给定焊接工作所需激光功率。由于比较时采用相同工艺与材料,即  $P, V, \rho, C, T_m, L$  相同,因此两种波长的能效比可用焊缝断面面积比表示。据此,对照相记录的试样横断面熔化区进行计算机图形处理。处理方法是通用软件 AutoCAD 的面积计量功能,点出焊缝图像边界后,对任意闭合边界图形自动计算得出任意形状的面积大小之比,并以此代表能效比的结果。

记录所有试验计量后的结果发现,激光焊接时的能效值可能相差很大。在某工艺时,最大可达 0.519,而在另外工艺时可小至 0.006。对  $CO_2$ 、YAG 激光而言,能效均受到离焦大小的影响,当离焦增大至  $-1.0$  mm,能效值明显下降。因此对焊接而言,应尽可能以 0 mm 离焦使用。同时,在大多数情形下,能效随速度而变化,当速度增加时能效提高,说明高速使用有利于能效利用。脉宽、频率对能效的影响则无明显规律。

根据能效比结果,作出两种激光的能效比在各区间值内的焊缝数直方图,如图 2 所示。由图可见,两种激光的能效比值分布在较宽的范围内,不是一固定比值。随焊接工艺参数而变化,能效比值不同。相对  $CO_2$  激光而言,YAG 激光的能效在小于 4 的区间内对应的焊缝较多,而大于 4 的焊缝数则较少。在 1~3 的区间焊缝数最多。所有焊缝能效比的平均值为 3.623,方差为 23.262。因此,从物理意义及统计平均而言,YAG 激光是  $CO_2$  激光能效的 3.623 倍。

在同离焦、脉宽、焊速条件下,随频率增加,输入能量增加,能效比增加(图 3)。说明随频率的增加,YAG 与  $CO_2$  激光焊接的结果差别增大。在同离焦、脉宽、焊速条件下,随离焦增大,能效比降低

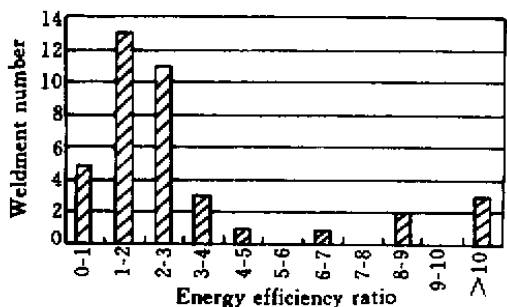


图 2 能效比直方图

Fig. 2 Energy efficiency histogram

(图 4),说明随离焦量的增大,两种焊接对焊缝结果的影响减小,即在大离焦下,两者的熔化与吸收的综合效果越来越接近。

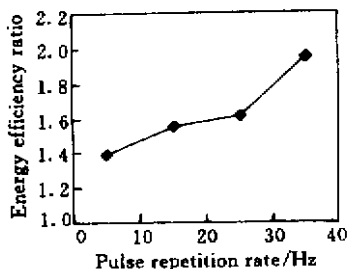


图 3 能效比-频率关系

Fig. 3 Energy efficiency ratio vs repetition rate (weld parameters : 0 mm , 10 ms , 200 mm/min)

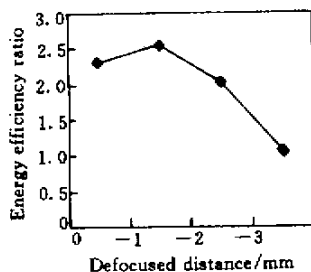


图 4 能效比-离焦关系

Fig. 4 Energy efficiency ratio vs defocused distance (weld parameters : 30 Hz , 10 ms , 200 mm/min)

### 3.2 $CO_2$ 激光与 YAG 激光焊缝断面几何尺寸的比较

用工具显微镜对照片记录的各种工艺下焊缝断面的表面宽度和断面深度进行测量后,可对端面几何尺寸与工艺的关系进行分析。

#### 3.2.1 最大熔深

$CO_2$  激光可达到的最大熔深为 1.53 mm ;YAG 激光可达到的最大熔深为 1.88 mm。YAG 激光的深度大于  $CO_2$  的原因是  $CO_2$  吸收率差。

#### 3.2.2 速度、脉宽、频率的影响

焊接速度、激光脉冲宽度、激光频率等焊接参数与焊缝几何尺寸的关系分别如图 5~7 所示。

从图 5 可见,随速度的增加,两种激光焊接熔池的深度、表面宽度几乎同步显著减小,说明两种激光焊接中速度的影响作用相同。而图 6 中脉宽减小,熔池宽度、深度减小的结果也较明显。对图 7 所示激光频率的影响,频率低时,两者的深、宽相差不大,频率加大时,深、宽显著加大。

#### 3.2.3 焊缝深宽比随离焦变化的对比

图 8 为深宽比与离焦变化的关系。说明,不管

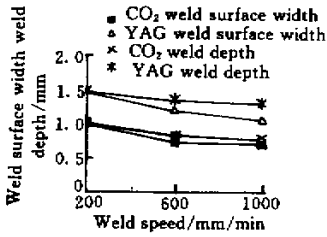


图 5 表面熔宽/溶深与焊接速度的关系

Fig.5 Weld surface width and weld depth vs weld speed

(weld parameters :  $d_f = 0$  mm ,  $f = 40$  Hz ,  $t_1 = 10$  ms ,  $t_0 = 15$  ms )

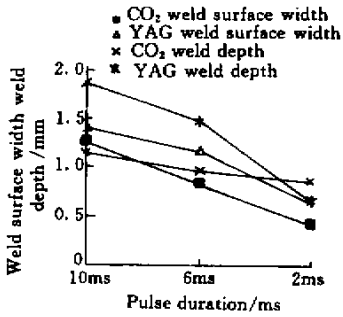


图 6 表面熔宽/溶深与激光脉宽的关系

Fig.6 Weld surface width and weld depth vs laser pulse duration

(weld parameters :  $f = 30$  Hz ,  $d_f = 0.0$  mm ,  $v = 600$  mm/min )

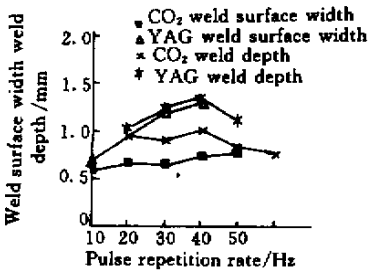


图 7 表面熔宽/溶深与激光频率的关系

Fig.7 Weld surface width and weld depth vs laser repetition frequency

(weld parameters :  $d_f = 0.0$  mm ,  $t_1 = 6$  ms ,  $v = 600$  cm/min )

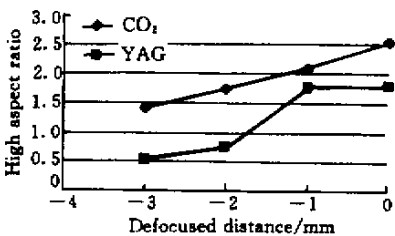


图 8 深宽比-离焦关系

(深宽比值为该离焦时的所有试验平均值)

Fig.8 High aspect ratio vs defocused distance

(ratio value are average value on all tests)

CO<sub>2</sub> 激光还是 YAG 激光 ,随离焦量增加 ,深宽比都减小。在相同的离焦时 ,CO<sub>2</sub> 激光平均深宽比大于 YAG 激光的平均深宽比。

### 4 结 论

根据以上对比 ,可以得出下列几点结论 :

1) 能效综合反映了材料对激光的吸收以及材料的熔化效果。不锈钢焊接时 YAG 激光的能效高于 CO<sub>2</sub> 激光 ,材料对 YAG 激光不仅吸收率大 ,而且熔化率高。

2) 随脉冲频率增加 ,输入线能量增加 ,能效比增加 ,频率在两种焊接中的作用表现为高频段相差加大。随离焦增大 ,能效比降低 ,离焦对两者的影响减弱。

3) YAG 与 CO<sub>2</sub> 激光焊接熔池的深度、宽度随速度、脉宽变化的规律基本相同。但就焊缝深度和宽度而言 ,YAG 激光大于 CO<sub>2</sub> 激光 ,这是由 YAG 激光的吸收率大于 CO<sub>2</sub> 激光的吸收率决定的。

4) 深宽比随离焦减小而增大。就平均深宽比而言 ,CO<sub>2</sub> 激光大于 YAG 激光 ,这是由于 CO<sub>2</sub> 激光的光束质量决定的。

### 参 考 文 献

- 1 Keng H. Leong , Donna J. Holdridge , Yi Liu *et al.* . Comparison of Nd : YAG and CO<sub>2</sub> Laser Welding of Stainless Steels [ C ] . Proc. of ICALEO ( Intenational Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ) : Laser Materials Processing , 1993. 704 ~ 711
- 2 Claus Bagger *et al.* . Comparison of a Pulsed CO<sub>2</sub> Laser and a Pulsed Nd : YAG Laser for Welding [ C ] . Proc. of ICALEO ( Intenational Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ) : Laser Materials Processing , 1992. 537 ~ 546
- 3 Dr. Claus Bagger , Kim Ageroe Nilsen , Dr. Flemming *et al.* . Hot Cracking of AISI 316 in Pulsed CO<sub>2</sub> and Pulsed Nd : YAG Laser Welding [ C ] . Proc. of ICALEO ( Intenational Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ) : Laser Materials Processing , 1993. 693 ~ 703
- 4 C. L. M. Ireland. The Role of High Power Nd:YAG Lasers in Materials Processing [ C ] . Laser 91 , Munich , Germany , October 1991. 202 ~ 221
- 5 F. O. Olsen. Pulsed laser materials processing , Nd-YAG versus CO<sub>2</sub> lasers [ J ] . *Annals of the CIRP* , 1995 , 44 ( 1 ) : 141 ~ 145
- 6 J. Xie , A. Kar , J. A. Rothenflue *et al.* . Temperature-dependent absorptivity and cutting capability of CO<sub>2</sub> , Nd:YAG and chemical oxygen-iodine lasers [ J ] . *Journal of Laser Applications* , 1997 , 9 ( 2 ) : 77 ~ 85