

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0273-03

# 高功率高光束质量五折腔 CO<sub>2</sub> 激光焊接机的 光学系统

胡昌奎<sup>1</sup>, 陈培锋<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1</sup>, 梁军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>华中科技大学激光技术与工程研究院, 湖北 武汉 430074; <sup>2</sup>武汉金石凯激光技术有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 介绍了一种高功率、高光束质量的五折腔 CO<sub>2</sub> 激光焊接机, 主要分析了激光器的五折谐振腔、三工位光路转换器, 反射聚焦的设计过程; 五折谐振腔的设计, 获得了 2.5 kW 稳定运行的低阶模激光束, 发散角 1.6 mrad, 模式结构 TEM<sub>00</sub>+TEM<sub>01</sub>, 激光器功率不稳定度小于 ±3%; 三工位光路转换器的使用, 合理地利用了激光器连续工作的能力, 提高了工作效率; 为克服热透镜效应和球差的影响, 采用金属抛物面镜反射聚焦; 同时, 对汽车变速箱用的 20CrMnTi 合金钢双联齿轮进行焊接, 用金相显微镜拍照、观察, 获得外观美观、深宽比大于 3:1 的焊缝, 且焊接热影响区小, 熔区致密、无缺陷, 取得良好的焊接效果。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 五折谐振腔; 三工位转换器; 反射聚焦; 抛物面镜

中图分类号 TN243

文献标识码

## Five-Fold Resonator CO<sub>2</sub> Laser Welding Equipment with High Beam Quality

HU Chang-kui<sup>1</sup>, CHEN Pei-feng<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, LIANG Jun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, Hubei 430074, China)  
(<sup>2</sup>Wuhan Goldensky Laser CO., LTD, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** This paper introduced a whole set of high-power CO<sub>2</sub> laser welding equipment with high beam quality, analyzed the optical system primarily, including the five-fold resonator of laser, three workspace light switched system, reflect focused system. The output power of the laser reached 2.5 kW and the output power fluctuation is ±4%. The TEM<sub>00</sub>+TEM<sub>01</sub> laser beam with 1.6 mrad divergent angle has been obtained by the design of five-folded resonator. The ability of laser has been used properly and the efficiency has been improved by the use of three-workspace switch. The metal paraboloid reflector has been used to focus the beam in order to overcome the influence of thermal lens and spherical difference. Meanwhile, the 20CrMnTi alloy gears in automobile gear-box have been welded, the welded seam with good appearance was obtained, the depth/width of the welded seam exceed 3:1, the thermal influenced zone is narrow and the melted zone has no shortcoming.

**Key words** laser technique; laser welding; five-folded resonator; three-workspace switch; reflected focusing; paraboloid reflector

## 1 引言

目前国内大多数企业使用的是价格昂贵的进口激光焊接设备, 使生产成本居高不下, 大大影响其市场竞争能力。武汉金石凯激光技术有限公司, 自主开发完成了一种实用型大功率高光束质量 CO<sub>2</sub> 激光焊接成套设备, 这套设备价格远远低于进口产品, 其性能不亚于国外同型产品, 该系统光束质量好, 稳定性高, 运行成本低, 而且三工位配合工作, 大大提高了生产效率, 值得广泛推广应用。本文主要介绍该系统的光学结构。

## 2 激光器五折谐振腔

激光器的光束质量对激光焊接质量有着至关重要

的影响。为实现稳定的高功率准基模输出, 设计了一种横流 CO<sub>2</sub> 激光器, 该激光器采用针板放电形式, 为充分利用激活介质, 增加高阶模的衍射损耗, 激光器采用五折光学谐振腔, 并运用小孔光阑进行选模。图 1 是其结构示意图。

由文献[1,2]可得上述五折谐振腔在光学上可以等效为平凹腔, 此时平面镜和凹面镜间的距离  $L$  等于谐振腔中两平面镜距离的五倍。由于针板放电区沿长度方向与两边光腔镜面距离为 1.5 m, 则  $L=5 \times 1.5 \text{ m}=7.5 \text{ m}$ 。根据平凹谐振腔中高斯光束的传播特性, 激光束的束腰位于平面镜窗口处, 且基模束腰半径

$$w_0 = \left[ \frac{\lambda^2 L (R-L)}{n^2 \pi^2} \right]^{1/4} \quad (1)$$

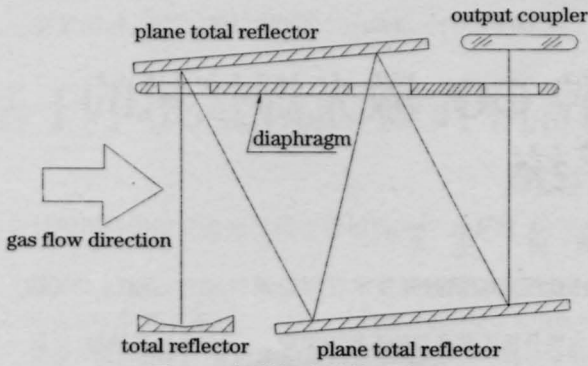


图1 五折谐振腔结构示意图

Fig.1 Schematic structure of the five-fold optical resonator

基模高斯光束的远场发散角全角

$$2\theta_0 = 2 \times 0.939 \left[ \frac{\lambda^2}{4L(R-L)} \right]^{1/4} \quad (2)$$

可见,当光腔尾镜的曲率半径  $R$  增大时,输出镜上基模束腰半径  $\omega_0$  随之增大,而基模光束的远场发散

角随之减小。激光束的束腰半径  $w_0$  大,则振荡模体积大,能充分利用增益空间,提高输出功率,同时也可以获得较小的光束发散角。但当  $R$  太大时,会增加谐振腔的调整难度,因此选取  $R=32\text{ m}$ ,根据上面的公式计算得基模束腰半径  $w_0=6.8\text{ mm}$ ,基模光束的远场发散角全角  $2\theta_0=1.2\text{ mrad}$ 。在这个谐振腔下,一阶模激光束的束腰半径  $w_1=w_0\sqrt{2+1}=11.78\text{ mm}$ ,二阶模束腰半径  $w_2=w_0\sqrt{4+1}=15.21\text{ mm}$ ,谐振腔中一般只有光斑尺寸小于 0.67 倍光阑半径的模式可以起振,在这个谐振腔中,由于小孔光阑的限制,二阶以上的模式是不可能起振的。此外,可以计算得一阶模远场发散角全角  $2\theta_{01}=1.2 \times \sqrt{2+1}=2.1\text{ mrad}$ 。

对于折叠腔,假设谐振腔内工作物质是均匀加宽的,单程长度为  $l$ ,且增益系数  $G$  是均匀时,则输出功率为<sup>[9]</sup>

$$P_{out} = \frac{1}{2} A I_s T \left[ \frac{2NG_0 l}{-(2N-1)\ln(1-\alpha) - \ln(1-T) - \ln(1-N\beta)} - 1 \right] = \frac{1}{2} A I_s T Q \quad (3)$$

$$Q = -2NG_0 l / [(2N-1)\ln(1-\alpha) + \ln(1-T) + \ln(1-N\beta)] - 1 \quad (4)$$

式中  $A$  为激光束有效横截面积,  $T$  是输出窗口的透过率,  $N$  是折叠腔的折数,  $\alpha$  是反射镜散射和吸收损耗之和,  $\beta$  是其他损耗之和,  $I_s$  饱和光强,  $G_0$  是腔内平均增益系数。可见,谐振腔输出窗口的透过率  $T$  直接影响到激光器的输出功率。为了得出最佳透过率,只要计算相对输出功率,即计算(3)式等号右端  $Q$  即(4)式的最大值,由于反射镜的反射率都在 99.5%以上,所以损耗  $\alpha$  不是很大。因此输出窗口最佳透过率对  $\beta$  的变化比较敏感<sup>[9]</sup>。综合考虑,选取输出窗口的透过率  $T=58\%$ 。

### 3 导光聚焦系统

导光系统将上述激光器输出的高质量激光束传送到加工工件表面,并尽可能地减少光束传输过程中的光束质量的降低。同时,导光系统还能够保护它本身和激光器免受从加工表面反射回来的激光损伤。另外,从激光器输出的光束,尽管具有高方向性、高功率密度,但在焊接中尚不能达到所需的功率密度,所以,必须通过聚焦在焦平面上或在焦平面附近,才能获得  $10^4 \sim 10^9\text{ W/cm}^2$  的功率密度。为合理利用机器连续工作的能力,提高焊接效率,采用“品”字型三工位光路转换器,通过三个光闸的配合使用,可以将激光束分别转换到三个不同的工位进行聚焦后焊接,提高工作效率。

对激光束进行聚焦,一般有透射聚焦和反射聚

焦两种方式。如果采用透射聚焦,当激光束通过时,透镜不断地被加热而发生膨胀,因此改变了透镜的曲率半径,并且使透镜曲率半径变小,即所谓的热透镜效应,如图 2 所示。这样相对于冷透镜和热透镜各有一个焦点,焊接时,如果把焦点取在工件表面,开始时透镜处于冷的状态,焦点刚好落在工件表面,但随着透镜被加热,焦点会向上移动而形成离焦状态,使得工件表面的光斑尺寸变大,从而影响焊接质

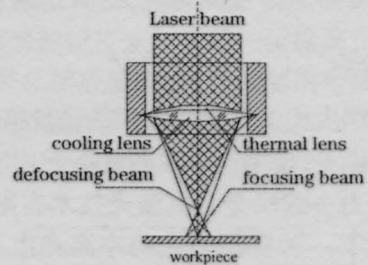


图2 热透镜效应

Fig.2 Effect of thermal lens

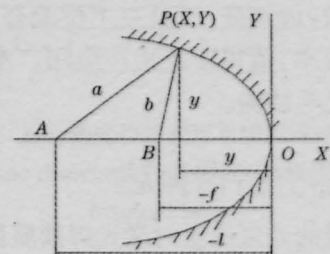


图3 无球差曲面原理图

Fig.3 Principle without aberration

量<sup>[4]</sup>。基于以上原因,通常在高功率激光加工中采用反射聚焦方式,其中金属球面镜反射聚焦比较简单,但金属球面镜的较大球差影响聚焦效果。为了减小球差,可以采用小角度(一般小于 5°)入射方式,即近轴入射,这种结构能减小但却不能消除球差,为消除球差对聚焦的影响,采用金属抛物面镜进行反射聚焦,离轴抛物面消除球差的原理图为 3 所示,轴上物点 A 入射到曲面上的反射点 P(x, y),经反射后成像于 B,曲面要求消除球差,根据费马原理,满足等光程的要求有:  $a+b=l+f$ , 即

$$\sqrt{(l-x)^2+y^2} + \sqrt{(f-x)^2+y^2} = l+f \quad (5)$$

展开后整理得

$$y^2 = \frac{4lf}{l+f}x - \frac{4f}{(l+f)^2}x^2 \quad (6)$$

可见消除球差的等光程面是二次曲面。当物在无限远时,曲面为抛物面  $y^2=4fx$ , f 为有效焦距(EFL)。

所以我们采用图 4 所示的金属抛物面镜作反射聚焦镜,同时兼顾焦深和焦点直径,选取聚焦系统的焦距  $F=127 \text{ mm}$ 。

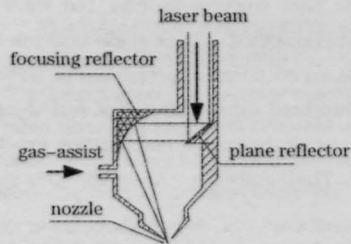


图 4 抛物面反射聚焦示意图

Fig.4 Schematic structure of the paraboloid reflect-focusing

## 4 实验研究

实验中,工作气体混合比为 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He=1:10:20。对激光器的输出功率、激光束模式和发散角进行了测试。实验测得激光器额定输出功率 2.5 kW,功率不稳定性  $\leq \pm 3\%$ 。采用烧有机玻璃的方法测得光束发散角全角约为 1.6 mrad,由此推断光束大约是 TEM<sub>00</sub> 与 TEM<sub>01</sub> 的混合模。

此外,运用该设备对 20CrMnTi 合金钢双联齿轮进行焊接实验,图 5 为激光器功率 2.5kW、焊接速度 1.5 m/min 时的齿轮外形,图 6 为焊缝形貌,图 7 为熔区显微组织结构,从图中可以看到,焊缝外观饱满、美观,且焊缝呈典型的小孔形貌,深宽比大于 3:1,焊接热影响过渡区很小,熔区很快过渡到基体,这是由于激光焊接时加热和冷却速度都很快缘故。而且焊缝区致密、无缺陷,形成细板条状马氏体,

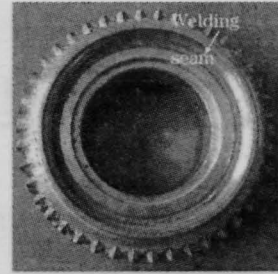


图 5 焊缝形貌

Fig.5 Figuration of welding seam

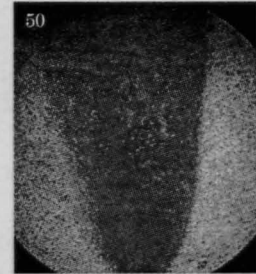


图 6 焊缝剖面图

Fig.6 Section of welding seam

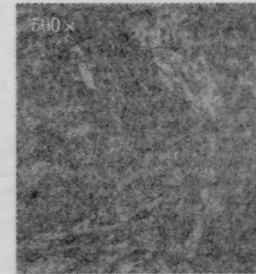


图 7 熔区显微组织

Fig.7 Microstructure of welded zone

这是因为焊区组织在激光焊热循环作用下经重结晶形成之故。可见,焊接取得了良好的效果。

## 参考文献

- 1 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tongrong. Laser Principle[M]. Beijing: The publishing company of Guofang, 2000. 65-67  
周炳琨,高以智,陈倜嵘等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2000. 65-67
- 2 Li Xiaoping, Zhou Fengqing, Lu Hong et al. A folded resonator for transversely excited CO<sub>2</sub> lasers of confined discharge type[J]. J. Huazhong University of Science and Technology, 1994, 18(2): 86-91  
李晓平,周凤晴,卢宏等.约束放电激励型高功率 CO<sub>2</sub> 激光器折叠腔研究[J].华中理工大学学报,1995, 23(8):60-64
- 3 Qiu Junling. The beam quality of high power lasers and its influences on the laser processing[J]. Laser Technology, 1994; 18(2):86-91  
丘军林.高功率激光器的光束质量及其对激光加工的影响[J].激光技术,1994, 18(2):86-91
- 4 Zhang Yimo. Applied Optical [M]. Beijing: The Publishing Company of Engine Industry,1982, 601-602  
张以谟编.应用光学[M].北京:机械工业出版社,1982. 601-60