

## 激光焊接专用气动喷嘴的研究

唐霞辉 朱海红 朱国富 李适民 李再光

(华中理工大学激光加工国家工程研究中心, 武汉, 430074)

**摘要:** 针对高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接, 作者试验研究出一种气动喷嘴, 用以保护导光聚焦系统, 防止焊接过程中金属飞溅造成的镜片污染。通过对飞溅粒子运动轨迹的理论分析, 设计出合理的喷嘴结构。采用气动喷嘴和普通同轴喷嘴, 比较试验出高功率激光焊接过程中导光系统污染对激光功率的衰减、焊缝气孔率及有效熔深等的影响以及聚焦镜片上飞溅粒子的分布。结果表明: 气动喷嘴从本质上减少了聚焦镜上飞溅粒子的数量, 使激光功率损失减少, 有效焊接长度增加, 并且横向气流没有对焊缝造成任何不利影响。

**关键词:** 激光焊接 飞溅污染 气动喷嘴 镜片保护

## Study on aerodynamic nozzle specialized for laser welding

*Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu, Li Shiming, Li Zaiguang*

(National Engineering Research Center for Laser Processing, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** In this paper, an aerodynamic nozzle was investigated for protecting the beam delivery system and preventing optics pollution from ejected particle vaporized on metallic surface during high power CO<sub>2</sub> laser welding. The suitable nozzle structure was designed on the basis of theoretical analysis on moving trajectory of the ejected particle. The comparing experiments between aerodynamic nozzle and ordinary nozzle were performed to examine the influence of optics pollution on loss of laser power, porosity percentage of weld section, and efficient penetration depth, and also to inspect the distribution of ejected particle on optics during laser welding. The studied results show that the aerodynamic nozzle substantially reduced the particle amount on the optics, so the loss of the laser power delivered to the workpiece was reduced, the effective weld length was increased. The examination of the weld structure ensured that there was no interference with the quality of the weld due to the cross-flow.

**Key words:** laser welding ejecta pollution aerodynamic nozzle optics protection

## 引 言

就几类典型的激光加工而言, 激光熔覆和热处理焦距长、飞溅小、镜片污染少; 激光切割喷嘴出口小, 气压大, 能有效防止飞溅; 而激光焊接焦距较短, 熔池反应剧烈, 飞溅大, 但保护气流量有限, 故极易造成镜片污染, 成为激光焊接产业化中一个非常棘手的问题。镜片污染导致激光束产生散射, 聚焦不良, 长时间工作会出现焦点漂移, 传输到工件的激光功率受到损失, 使激光焊接性能变差。镜片的频繁清洗和更换严重影响工作效率, 大量的飞溅使晶体镜片因热

\*

\*

\*

作者简介: 郑启光, 男, 1944 年 12 月出生。教授, 博士生导师。现从事激光与物质相互作用及大功率 CO<sub>2</sub> 激光导光、传输理论的研究。

畸变而破裂。有色金属(如Al, Cu)以及粉末冶金材料(如金刚石锯片)等的激光焊接,飞溅尤其严重,极易导致镜片毁坏。

传统的激光焊接喷嘴为圆锥状,分两路气体:一路同轴气体用于保护焊缝,一般采用惰性气体Ar气、He气;另一路为侧吹辅助气体,用于控制等离子体,减少等离子体激光的屏蔽,增加熔深<sup>[1]</sup>。传统喷嘴同轴保护气体流量有严格限制,喷嘴内径为 $f2.5\text{mm}$ 时,气流量为 $7\sim 9\text{L/min}$ ,气流量太大,熔池翻动厉害,焊缝凹凸不平,出现孔洞。

气动窗口已在本单位的 $10\text{kW CO}_2$ 激光器上得到应用,其目的是使激光谐振腔内工作气体与外界空气隔离。我们研究的气动喷嘴是在激光束垂直方向通以高速气流,在光学元件的下方形成气体隔离层,阻挡金属飞溅物的上冲。这种喷嘴的研制成功及推广应用,对于解决易飞溅金属(如粉末冶金材料)的高功率激光焊接,具有重要的理论意义和实用价值。

## 1 理论分析与结构设计

### 1.1 气体动力学分析

求解气动喷嘴内横向气动窗口的尺寸及所需的气体流量<sup>[2]</sup>的运动方程为:

$$F = \rho v^2 C_d A / 2 \quad (1)$$

$$F = m(-a) \quad (2)$$

式中, $F$ 为气体作用于飞溅粒子上的阻力, $C_d$ 为阻力系数, $A$ 为粒子在运动方向的正面面积, $\rho$ 为气流中空气密度, $v$ 为粒子相对气流的运动速度, $m$ 为飞溅粒子质量, $a$ 为粒子因阻力产生的加速度(负加速度)。

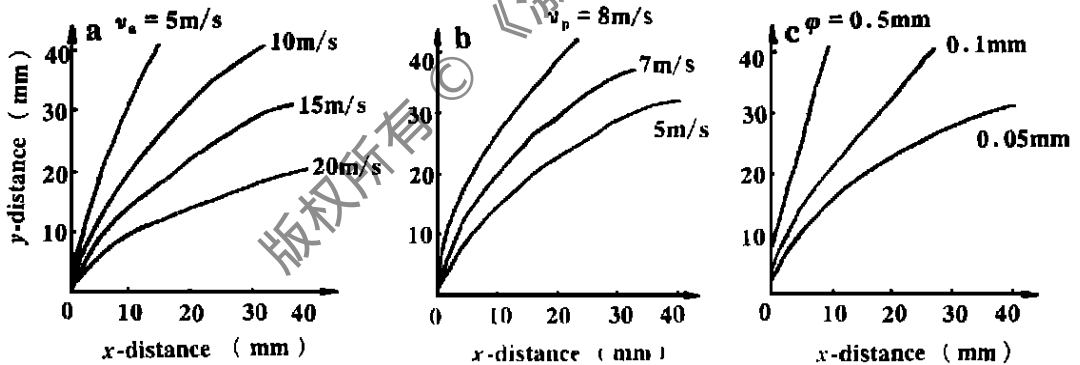


Fig. 1 Curves of ejected-particle trajectory in cross flow

a— $v_p = 7\text{m/s}$ ;  $v_a$  vary;  $\Phi = 0.1\text{mm}$  b— $v_p$  vary;  $v_a = 15\text{m/s}$ ;  $\Phi = 0.1\text{mm}$  c— $v_p = 7\text{m/s}$ ;  $v_a = 15\text{m/s}$ ;  $\Phi$  vary  
 $v_p$ —initial particle velocity in  $y$ -direction;  $v_a$ —aerodynamic cross-flow velocity in  $x$ -direction;  $\Phi$ —particle diameter

根据有关文献及相关假设来估算飞溅粒子进入气流层后的运动轨迹<sup>[3]</sup>,飞溅粒子近似为球形,直径 $\Phi$ 为 $0.1\text{mm}$ ,起始运动速度为 $8\text{m/s}$ ,阻力系数 $C_d$ 近似为无压缩、无粘性的流体中的阻力系数,根据文献[4]可以对粒子尺寸和初始运动速度在一定范围内进行理想分类,并在不同气体流速下解方程。图1为不同气流速度、粒子速度、粒子质量下求解的运动轨迹。根据现有的焦距 $f = 100\text{mm}$ 的圆锥喷嘴,一个粒子垂直向上运动 $30\text{mm}$ ,必须水平运动 $20\text{mm}$ 才不至于落到聚焦镜片上<sup>[4]</sup>,按此推算,图1中当横向气体流速为 $15\sim 20\text{m/s}$ 正好合适。

### 1.2 气动喷嘴的结构设计

喷嘴结构基于聚焦镜片焦距和空间条件限制,整体分成可拆卸的4个部分,以便安装及机

械加工,局部损坏后可进行更换。如图 2 所示,4 个部分分别为横流进气通道、横流出气通道、圆柱基体、圆锥尖端。进气通道设有一块方形金属丝网,以利气体均匀挺直、减少死点,通过调整不同的丝网来确定最佳气流面积及流速。

## 2 试验条件及方法

采用美国 Coherent 公司 1.25kW 轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,准基模输出。分别用 ZnSe 透射式聚焦镜和金属反射式聚焦镜,其 45° 反射镜为 Cu 镜镀 Mo; 反射式抛物聚焦镜为 Mo, 镜片便于擦洗。焊接试验材料为 45# 钢,表面抛光后,用等离子体热喷涂一层 0.2mm 的 200 目 Fe 粉,200mm × 200mm × 4mm 尺寸的方形试样位于数控工作台上,焊后沿焊缝横截面剖开,用美国 M400-H1 金相显微镜观察并测量焊缝形貌。主要焊接工艺参数为:激光功率  $P = 1.2\text{kW}$ , 焊速  $v = 20\text{mm/s}$ , 焦距  $f = 100\text{mm}$ , 离焦量  $\Delta f = -1.5\text{mm}$ , 焊缝保护气体流量 7L/min, Ar 气保护。

用手持式热量功率计测量激光经聚焦镜后照射到工件上的激光功率,以考察不同喷嘴保护时,聚焦系统对激光功率的损耗。对于不同的镜片保护试验,焊接完成后,将镜片取下,用干净胶带将镜片上沉积的飞溅粒子粘取下来,在低倍放大镜下观察并测量其尺寸,记录下特定区域内的粒子数分布。

## 3 试验结果及其分析

### 3.1 镜片破坏性试验

首先采用 ZnSe 透镜聚焦,普通喷嘴同轴保护,焊接 2800mm 后,镜片破裂,据观察,破裂镜片表面粘有一层细颗粒飞溅物,覆盖层阻挡激光束的传输,经激光功率测量,由飞溅污染而引起的透射激光能量损失高达 25%,过高的热量使镜片热畸变而损坏;另一片 ZnSe 镜片采用气动喷嘴保护,横向气流量 200L/min,焊接 7000mm 后,镜片完好无损。同时研究了横向气流对喷嘴尖端同轴气流关系,结果也表明,在横向气流关、开瞬间及正常工作时,同轴喷嘴尖端几乎

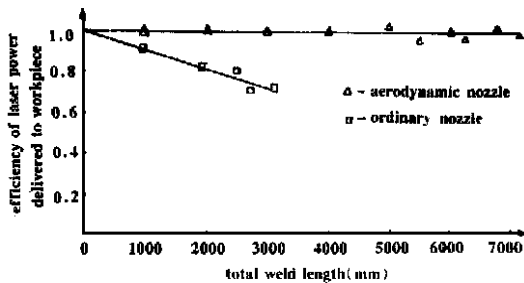


Fig. 3 Efficiency of laser power delivered to workpiece as a function of weld length

18000mm,是普通喷嘴的 6 倍多。

### 3.3 飞溅粒子分布

粒子分布如图 4 所示,与普通喷嘴相比,气动喷嘴几乎可去除 80% 的较小粒子(小于

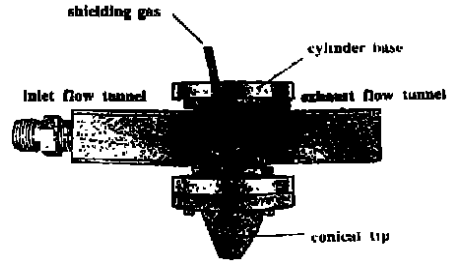


Fig. 2 Aerodynamic nozzle structure

测不出横向气流附加的影响,即对焊缝的保护效果无任何不利影响。

### 3.2 激光传输效率比较

通过聚焦系统后的被测激光功率与之前激光功率之比为传输效率,其比值随焊接长度增加而下降,如图 3 所示,在焊接相等长度 2800mm 后,普通喷嘴传输效率只有 71%,而气动喷嘴为 96%,提高了 25%。据此推测,当传输效率降至 71% 时,气动喷嘴可以焊接

0.2mm<sup>2</sup>) 和所有大于 0.2mm<sup>2</sup> 的粒子。

### 3.4 焊缝质量分析

焊接特征比较分析同样说明两种喷嘴之间的区别,普通喷嘴开始出现深熔焊,一定长度后变成有限深度的传热焊,镜片破裂时,深熔焊缝与传热焊缝的长度之比约为 1。据试验现象可看到,焊缝的变化是由于镜片污染使光束不稳定,激光功率下降。气动喷嘴焊缝检验结果表明,95%总长度的焊缝为深熔焊。

焊缝横截面的气孔分布面积如图 5 所示,据观察,气动喷嘴焊缝横截面有几个小气孔( $4 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3 \mu\text{m}^2$  数量级),焊缝平均气孔率约为 2%,普通喷嘴出现单一大气孔( $10^5 \mu\text{m}^2$  数量级),平均气孔率高达 17%,据分析,气孔率不同的原因是由于采用气动喷嘴保护镜片,焊缝保护气体流量可以降低,从而减少了对熔池的扰动,故气孔率低,而普通喷嘴为保护镜片,必须采用较大气流量,使焊缝气孔率增加<sup>[6]</sup>。

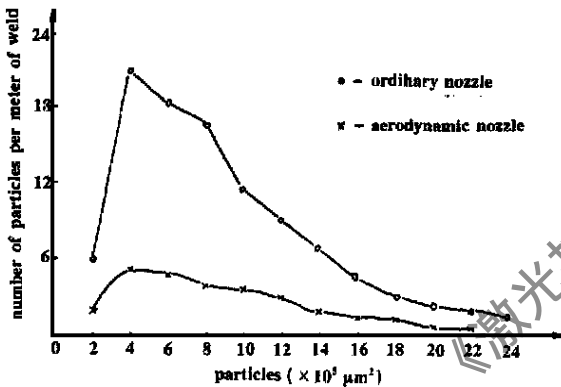


Fig. 4 Distribution of particles deposited on focus optics

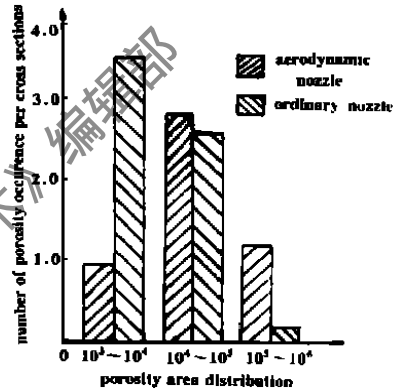


Fig. 5 Porosity of weld cross-section

## 4 结 论

在焊接喷嘴结构中,横向气动喷嘴在保护反射式和透射式光学元件方面非常有效,ZnSe 镜片在横向气流保护下,焊接 7000mm 后仍完好无损,而普通喷嘴焊接 2800mm 后即损坏,同样焊接长度,与普通喷嘴相比,气动喷嘴几乎能去除 80% 的飞溅粒子。研究表明,气动喷嘴的优势为:(1)激光束通过带气动保护的聚焦镜传到工件上的功率损耗可减少 25%;(2)稳定深熔焊缝可达总焊接长度的 90% 以上;(3)聚焦镜两次清洗之间的焊接长度为普通喷嘴的 6 倍;(4)焊缝气孔率低于 2%。(5)喷嘴尖端无横向气流的影响。

### 参 考 文 献

- 1 唐霞辉,朱海红,朱国富 *et al.* 中国激光,1997;24(2):174~178
- 2 李力钧,秦玉忠,赵仲. 中国激光,1990;17(1):35~37
- 3 程祖海,岳超瑜,李再光. 中国专利,85100856,1985:50
- 4 Carson K W. Welding J,1989;(3):49~57
- 5 Metzbowler E A. Welding J,1993;(8):403~407
- 6 Banas C M. Opt Engng,1988;18(3):200

作者简介:唐霞辉,男,1963年11月出生。副教授。主要从事高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接方面的科研及产业开发工作。