

文章编号: 1001-3806(2003)04-0276-03

## 粉末冶金材料激光深熔焊接工艺研究

唐霞辉 周 毅 何艳艳 朱国富

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 用 LSM 240 全自动 SLAB 激光焊机对 Fe 基、Ni 基、Co 基 3 种粉末材料进行焊接实验。研究了焦点位置、焊接速度、焊接线能量对粉末材料激光焊接焊缝质量的影响。结果表明, Ni 对离焦量最敏感。并得到了焊接熔深  $H$  与输入线能量  $W$  的数学表达式。

**关键词:** 激光深熔焊接; 粉末材料; 离焦量; 线能量

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A

## Study on technology of laser welding of powder materials

Tang Xiahui, Zhou Yi, He Yanyan, Zhu Guofu

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** LSM 240 fully automatic SLAB laser welding machine is used to weld Fe based, Ni based, Co based powder materials in order to study the important factors for welding quality, i. e. the defocus, welding speed and specific energy. Results show that Ni is the most sensitive to the defocus. The formula of the relation of penetration  $H$  and specific energy input  $W$  is gotten.

**Key words:** laser deep penetration welding; powder material; defocus; specific energy

### 引 言

随着激光深熔焊在粉末冶金材料加工中应用的日益广泛, 有关激光焊接粉末材料方面的研究也开始得到重视, 但目前还只处于发展阶段。激光焊接的最大优点是焊缝深宽比较大、热影响区小, 特别适合于粉末冶金材料的熔化焊接, 为满足熔深要求, 尤其是获得单面焊双面成形的焊缝, 这就要对焊接工艺参数进行严格控制, 使焊缝熔深刚好大于板厚, 以便在保证熔透的情况下不出现过热。对激光深熔焊来说, 若能量输入过高, 可能出现焊缝凹陷甚至焊穿。故为了获得变形小、热影响区窄的双面成形焊缝, 必须对一定板厚的熔接工艺条件进行研究。焊缝质量受到材料性质、光束质量、聚焦光路、焦斑直径、保护气体、等离子体控制效果等一系列因素的影响。本文中着重研究了与焊接能量有关的焦点位置、激光功率、焊接速度、焊接线能量等参数对焊缝的影响。

### 1 实验条件

实验用德国进口 LSM 240 全自动激光焊机, 激光发生器为 Rofin 公司 DC025 型扩散冷却 SLAB 激光器。最大功率 2500W, 激光模式为基模, 方形光斑,  $w_F = 0.2\text{mm}$ , 反射聚焦焦距 150mm。

Fe, Co, Ni 3 种试样表面扫描焊缝, 主吹 Ar 气保护, 侧向喷嘴角度为  $45^\circ$ 。为了提高烧结体的致密性, 在 Fe 粉中加入 15% 羰基 Fe 粉, Ni 粉中加入 15% 羰基 Ni 粉, 热压烧结(见表 1)。

Table 1 Technics parameters for sintering pressing powder materials

| composition         | temperature / °C | pressure / (MPa·cm <sup>-2</sup> ) | density / (g·cm <sup>-3</sup> ) | resistance rate / (Ω·cm) | gas        |
|---------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|
| 85% FFe+<br>15% TFe | 860              | 0.8                                | 7.3                             | $9.6 \times 10^{-6}$     | deoxidized |
| 100% FCo            | 820              | 0.68                               | 7.9                             | $8.6 \times 10^{-6}$     | deoxidized |
| 85% FNi+<br>15% TNi | 840              | 0.7                                | 8.1                             | $7.1 \times 10^{-6}$     | deoxidized |

焊后用日本 Akashi 公司 M-400H1 显微镜观察焊缝横截面、纵截面及测量熔深。

### 2 实验过程及结果分析

**作者简介:** 唐霞辉, 男, 1963 年 11 月出生。副教授, 工学博士。主要从事激光焊接技术方面的研究工作。

**收稿日期:** 2002-07-16; **收到修改稿日期:** 2002-10-15

## 2.1 焦点位置

导光聚焦系统一定时, 存在一最佳焦点位置范围, 使整个焊接过程处于稳定深熔焊, 在焊接速度  $v = 0.5 \text{ m/min}$  和激光功率  $P = 1.5 \text{ kW}$  一定时, 离焦量在  $\Delta f = -2 \text{ mm} \sim +2 \text{ mm}$  之间变化, 相对于工件焦点最佳位置的研究结果表明: 当焦点位于工件较深部位时会形成 V 形焊缝; 而焦点在工件以上较高距离时会形成“钉头”状焊缝, 且熔深减小。只有焦点位于工件表面下  $1 \text{ mm} \sim 1.5 \text{ mm}$  左右处 ( $\Delta f = -1 \text{ mm} \sim -1.5 \text{ mm}$ ), 所得焊缝几乎成平行断面并可获得最大熔深, 因此最为理想。

3种被焊材料中, 离焦量的变化对 Fe 影响较小; 对 Co 的影响也不很明显; 但对 Ni 的影响非常大, 当焦点已位于工件表面下  $1 \text{ mm}$  处, 再向下时, 等离子体不稳定, 无法获得稳定的深熔焊缝, 经分析认为, 纯 Ni 试样的表面反射很强, 焦点太下时, 材料表面的激光能量密度不足以使材料本身产生汽化, 形成小孔效应。故对于 Ni,  $\Delta f = -1 \text{ mm}$  最佳。当然, 焦点的正确位置也与板厚及所使用功率有关, 一般以表面下 ( $1 \sim 2$ )  $\text{mm}$  处为最佳。

焦点位置与焊缝熔深和熔宽的关系也表明, 熔深随焦点位置的改变有一定的变化, 尤其是在焦点位置距工件表面较远时, 而熔宽随焦点位置的变化并不明显。尤其是在焦点位置的绝对值较大时, 即焦点位置越接近于稳定深熔焊, 熔深的变化越明显, 即变得越小。因此, 焊接过程中使焦点位置的变化量控制在一定的范围内, 才能不仅保证焊接过程的稳定性, 而且保持焊缝熔深相对均匀。

此外, 焦点位置不同时, 熔透所需的最小激光功率也不一样, 可达到的焊接速度随焦点位置的不同相差很大, 这说明焦点位置在很大程度上影响着激光焊接过程中的能量有效利用率, 故选择合适的焦点位置并加以控制是激光深熔焊过程的重要前提。

## 2.2 焊接速度

激光深熔焊时, 焊接深度几乎与焊接速度成反比, 一定功率可以焊接一定厚度范围的材料, 其有效焊接速度范围随板厚增加而减少。在此范围以外, 不能进行深熔焊。过高速会导致焊不透, 而过低速则会使材料过度熔化、烧损和焊穿。所以, 确定焊速的上限是为了防止金属未熔透和自淬速度过快以致不能流动和融合, 否则, 熔化金属会趋向于仅沿被焊工件顶端形成焊珠。而焊速到达低限速度低至一定值, 穿透等离子体、到达小孔底部的激光功率密度过小, 不足以汽化材料, 蒸气压不足以维持小孔

使小孔崩溃, 焊接过程变为传导型。对于给定的激光功率, 存在一维持深熔焊接的最低焊接速度, 在此最低焊速下的熔深为给定焊接条件下的最大熔深。

在激光功率 ( $P = 2 \text{ kW}$ ) 一定时, 提高焊接速度, 线能量 (单位长度焊缝输入能量) 下降, 熔深减小。因而适当降低焊接速度可增大熔深。在维持小孔效应的最低临界焊速下, 可得到最大熔深。这个最大熔深是激光功率的函数, 等离子体的浓度增加, 对激光的吸收系数增加。图 1 为以不同速度在 3 种试验板上扫描所得的熔深-速度曲线, 可见熔深随焊速度的下降而增加, 但有极限。速度过低, 熔深不会再增加, 而焊缝变宽。说明因线能量增加, 熔化区加大, 同时小孔区的温度过高。在保证一定熔深时, 焊接速度  $v$  越快越好, 熔深随  $v$  减小而增大, 但并不是  $v$  越小越好, 有时  $v$  减小到一定程度会导致熔深下降, 这是因为  $v$  减小后, 小孔周围的熔化金属区域增加, 且其增加量与单位长度上沉积的能量的增加成正比, 最终因金属蒸气压力不足以抵制液态金属的流体动力, 深熔孔穴便坍塌, 这种情况会使熔深陡减, 在表面形成具有类似半球形熔化区的特征。故小孔坍塌的临界条件被用来确定最大的焊接穿透深度。

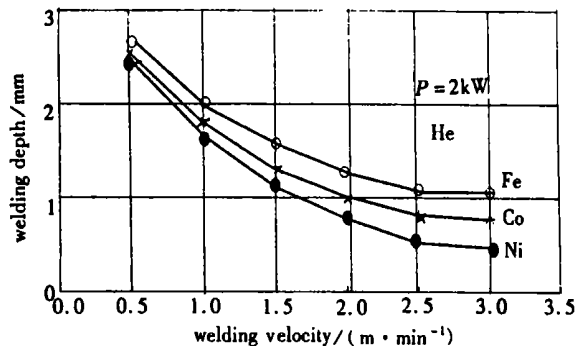


Fig. 1 Welding speed effects on welding depth

## 2.3 焊接线能量对熔深的影响

由于粉末冶金材料经烧结而成, 内部存在孔隙, 其结合强度远比熔炼材料要低, 在保证焊接熔深的条件下, 必须采用最低线能量输入, 以减小焊接热影响区。焊接线能量是激光作用于焊接方向单位长度的能量, 是能量是否有效利用的重要参数。激光深熔焊的全熔透工艺条件, 全熔透曲线和板厚有关, 对厚板来说, 稳定深熔焊曲线应当包含全熔透曲线。焊接线能量  $W$  ( $\text{kJ/cm}$ ) 定义为:

$$W = P/v \quad (1)$$

式中,  $P$  为工件表面的入射激光功率,  $v$  为焊接速度。

产生全穿透焊接的热输入与激光功率和焊接速

度均成函数关系,在激光功率一定时,可得到一个最小热输入的焊接速度。同理,在焊速一定时,也可得到一个最小的热输入功率。随着激光功率和焊速按一定比例增加,可以得到窄而深的焊缝且热输入减少,而随着焊速的减小和功率的进一步增大,焊缝熔深变浅。

调节焊接速度和离焦量,得出一系列条件下的线能量。结果表明,激光功率为2kW时,线能量 $W$ 有一最小值,此时 $v = 15\text{ mm/s}$ , $W = 0.8\text{ kJ/cm}$ ,焊缝的深宽比最大。取线能量为 $0.6\text{ kJ/cm}$ 的条件下进一步的实验发现,焊缝熔深随激光功率变化,在同样的线能量输入条件下,焊缝熔深随激光功率的提高而增加,而熔宽却几乎保持不变。因此,对基于小孔效应的焊接方法而言,提高激光功率密度对增加焊缝熔深的作用要比减小焊接速度的效果明显。

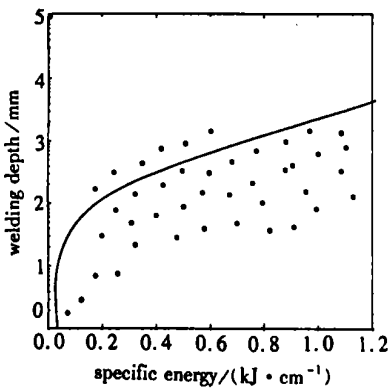


Fig. 2 The relation of penetration depth & specific energy with cobalt powder sample

在试样表面扫描焊缝,得出焊接熔深与线能量有若干对应的分散点,焊接线能量包络曲线,即最小线能量的曲线如图2所示,通过计算分析得出包络线的数学表述为: $H = -0.32 + 3.6W^{0.25}$  (2) 式中, $H$ 为焊接穿透深度(mm), $W$ 为线能量(kJ/cm)。

一个实际焊接中所给定的参数的数据落在这个曲线上都可认为是一种好的参数状态,若选定的数据处在图中包络曲线下,则可认为这个焊接系统的能量利用效率较低,这就要分析是否由激光传输系统或聚焦系统以及其它方面的因素引起。值得注意的是,在大部分实际的激光深穿透焊接中,所选定的数据均略在图中曲线之下,但这些焊接参数仍是可接受的。对激光深熔焊来说,高功率大速度可以提高激光的有效利用率,而且采用较高的激光功率能够得到更大的稳定深熔焊的焦点位置范围。当然,这种激光功率的提高有一定限度,因为过高的激光功率使等离子体对激光的吸收加强,反而降低熔深。实际上,当激光功率很小时,通过降低焊接速度可以获得较大的线能量。

### 3 结论

(1) 3种材料对离焦量敏感性依次排列为 $\text{Fe} < \text{Co} < \text{Ni}$ 。(2) 焊接速度降低虽然可以增加熔深,但有一极限值。低于此值只会使焊缝变宽而熔深不再增加。(3) 焊接熔深 $H$ 与输入线能量 $W$ 的关系可归纳为 $H = -0.32 + 3.6W^{0.25}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 李力钧. 现代激光加工及其装备. 北京: 北京理工大学出版社, 1989: 105~129.
- [2] Locke E V. IEEE J Q E, 1972, 8(2): 120~125.
- [3] Moon D W. Some factors affecting penetration in laser welding. ICALEO' 84, 1984: 53~58.
- [4] 郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996: 12.
- [5] 王家金主编. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992: 11.
- [6] 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学. 北京: 机械工业出版社, 1996: 87~136.

• 简 讯 •

### 金刚石/氮化铝发光器件

把金刚石和氮化铝这两种宽带隙半导体集成到同一器件中,将可能获得短波紫外发光二极管和激光二极管。只是集成这两种结构不相似的物质并不容易:氮化铝是纤锌矿结构,而金刚石是立方体组织。德国München科技大学的研究人员采用离子诱导分子束外延法做到了这一点。将掺硅氮化铝薄膜放置在自然生长的掺金刚石基底上,形成双极二极管,可以激发 $2.7\text{ eV} \sim 4.8\text{ eV}$ ( $442\text{ nm} \sim 250\text{ nm}$ )范围的激光。为了将该器件改进为发光器件,研究人员将蒸发态钛铝与样品两端电阻接触。该 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 器件显示了明显的修正特性:由于氮化铝/金刚石接口的结构缺陷而产生了反方向上的相对大的泄漏电流。采用双光栅单色仪和倍增管进行了室温电子发光测试。该样品激发了峰值在 $2.7\text{ eV}$ 的明亮蓝光,第2峰值在 $4.8\text{ eV}$ ,发光亮度为 $2.7\text{ eV}$ 的1%。两个峰值都是在正偏条件下获得的。

(蒋锐 叶大华 供稿)