

文章编号: 0258-7025(2004)02-0237-04

粉末冶金材料激光深熔焊接光致等离子体行为及控制

唐霞辉, 周 毅, 李适民, 李家镛, 何艳艳

(华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用 LSM240 型全自动 CO₂ 激光焊机焊接粉末材料, 研究不同粉末材料产生等离子体所需的临界激光功率。粉末配方为: Fe 粉+15% 羰基 Fe 粉, Co 粉, Ni 粉+15% 羰基 Ni 粉三种试样。研究结果表明, Fe, Co, Ni 三种试样在 CO₂ 激光作用下产生金属蒸气时的临界激光功率密度 I_c 为 $I_{cFe} > I_{cCo} > I_{cNi}$; 等离子体得以有效控制的下限临界气流量 Q_s 为 $Q_s^{Fe} < Q_s^{Co} < Q_s^{Ni}$ 。

关键词 粉末冶金; 激光深熔焊; 临界激光功率密度; 光致等离子体

中图分类号 TG 456.7 文献标识码 A

Study of Laser-Induced Plasma Behavior and Control During Laser Deep Penetration Welding of Powder Materials

TANG Xia-hui, ZHOU Yi, LI Shi-min, LI Jia-rong, HE Yan-yan

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

Abstract The critical laser power density to induce plasma for different powders is studied in this article by means of fully-automatic laser welding machine LSM240. The powder components are FFe+15% TFe, FCo and FNi+15% TNi. The results show that the critical laser power density (I_c) to create plasma under the radiation of CO₂ laser beam for the three kinds of PM materials is $I_{cFe} > I_{cCo} > I_{cNi}$, and the low critical gas flux Q_s is $Q_s^{Fe} < Q_s^{Co} < Q_s^{Ni}$ when the plasma has been efficiently controlled.

Key words powder metallurgy; laser deep penetration welding; critical laser power density; laser-induced plasma

1 引 言

近十几年来, 激光深熔焊接在粉末冶金材料加工领域中的应用日益增多^[1]。与熔炼材料的激光深熔焊类似, 在焊接速度较低、熔深超过 2 mm 时, 高熔点粉末冶金材料表面也会产生强烈等离子体屏蔽。等离子体不仅使熔深变浅^[2], 而且其强烈热作用使粉末冶金材料在焊接热影响区出现断裂, 因此必须对等离子体加以控制。而控制过程中由于气体的扰动, 容易使焊缝产生气孔^[3,4]。为了得到不含气孔、没有缺陷的焊缝, 需要对如何控制光致等离子体进行研究。

本文借鉴熔炼材料的激光焊接方法, 结合粉末冶金材料特点对高功率 CO₂ 激光焊接粉末冶金材料的等离子体行为及控制方法进行了实验研究。

2 实验研究条件

2.1 粉末材料试样制备

采用 Fe, Co, Ni 粉末材料, 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, 在热压条件下进行烧结。粉末主要理化参量如表 1 所示。焊接实验所需的标准试样的烧结工艺参量如表 2 所示。

收稿日期: 2002-07-17; 收到修改稿日期: 2002-09-12

作者简介: 唐霞辉(1963—), 男, 副教授, 华中科技大学激光加工国家工程研究中心副主任, 主要从事高功率 CO₂ 激光技术及应用方面的研究。E-mail: txh1116@mail. hust. edu. cn

表 1 粉末材料理化参量

Table 1 Technic parameters of powder materials

Sample	Trademark	Main ingredient	Impurity	Loose density /g · cm ⁻³	Granularity /μm
Fe	FFe	98%Fe	<2%	0.84	74
Co	FCo-1	≥99%Co	(Ni+C+Fe+Si)<1%	0.75	74
Ni	FNi-1	99.5%Ni	(Co+Cu+Fe+Si)<0.5%	0.95	74
TNi	FTN-2	99.5% Ni	(Fe+C+O)<0.5%	0.84	2.68
TFe	FTF-4	≥99% Fe	(C+O)<1%	2.55	5.95

表 2 试样烧结工艺参量

Table 2 Techniques of manufacturing PM sample

Sample	Sinter tem. /°C	Press /MPa · cm ⁻²	Density /g · cm ⁻³	Resistant rate /Ω · cm	Shielding gas
Fe	860	0.80	7.3	9.6 × 10 ⁻⁶	Deoxidized
Co	820	0.68	7.9	8.6 × 10 ⁻⁶	Deoxidized
Ni	840	0.70	8.1	7.1 × 10 ⁻⁶	Deoxidized

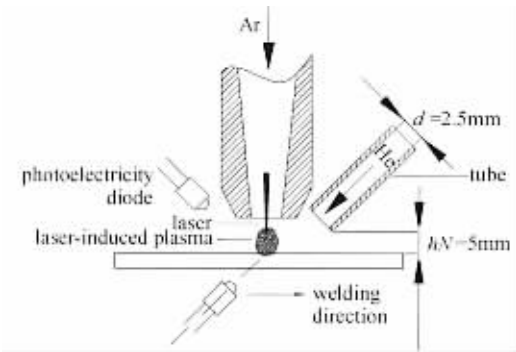


图 1 等离子体检测实验装置

Fig. 1 Experimental setup of plasma detection

2.2 实验条件及设备

等离子体检测实验装置如图 1 所示。采用 LSM240 型全自动激光焊接机，激光器为 DC025 型 SLAB CO₂ 激光器。最大功率 2500 W，激光模式为基模，方形光斑，反射聚焦镜焦距 $f = 150$ mm，光斑直径 $w_F = 0.2$ mm，离焦量 $\Delta f = -1$ mm。

3 光致等离子体产生机理及结果分析

3.1 光致等离子体产生的临界功率密度

基模高斯光束辐射半无限表面时，材料表面中心的升温为^[5,6]

$$T(0,0,0,t) = \frac{AI_0 w_F}{K \sqrt{2\pi}} \arctan \frac{\sqrt{8at}}{w_F} \quad (1)$$

式中， I_0 为光斑中心峰值功率密度(W/cm²)， w_F 为光斑直径(mm)， a 为材料的热扩散率(cm²/s)， K 为材料的导热系数(W · cm⁻¹ · K⁻¹)， A 为材料对

激光的吸收率。

用材料的气化温度 T_V 和初始温度 T_0 ($= 300$ K)之差代入(1)式可求得

$$\frac{(T_V - T_0)K \sqrt{2\pi}}{AI_V w_F} = \arctan \frac{\sqrt{8at}}{w_F} \quad (2)$$

即，材料蒸发的阈值功率密度 I_V 与辐射时间 t 的关系为

$$I_V = \frac{(T_V - T_0)K \sqrt{2\pi}}{A w_F \arctan \frac{\sqrt{8at}}{w_F}} \quad (3)$$

粉末冶金材料即使是同种材料，由于不同的烧结条件，具有不同密度和电阻率，对激光的吸收也存在较大差别^[7,8]。

CO₂ 激光器发出的是红外激光束，而金属对红外能量的吸收很大程度上取决于自由电子的传导吸收，其吸收率 A 与金属的电阻率 ρ_Ω 之间存在以下关系^[9,10]

$$A = 11.2 \sqrt{\rho_\Omega} \quad (4)$$

由(4)式可以计算出三种试样表面在常温下对激光的吸收率 A 分别为 Fe: 5.5%，Co: 4%，Ni: 3.7%。

材料的导热系数 K 也是温度的函数，三种粉末材料的导热系数随温度变化的通用函数 $K(T)$ 关系式为

$$K = \frac{1}{T_V - T_0} \int_{T_0}^{T_V} K(T) dT \quad (5)$$

根据三种材料的 $K(T)$ 函数及有关物理参数，由(5)式得到三种粉末材料的平均导热系数 K (W · cm⁻¹ · K⁻¹) 分别为: Fe: 0.46, Co: 0.745, Ni:

0.72。

此外,三种材料的气化温度分别为:Fe:3200 K,Co:2900 K,Ni:2805 K^[11]。

将以上所有参量代入(2)式,计算得三种粉末冶金烧结试样在CO₂激光辐照下,产生气化时的阈值激光功率密度与时间的关系如图2所示。

在高于临界激光功率密度时,材料气化。气化物聚集在材料表面附近并微弱电离形成等离子体,有助于材料对激光的吸收。在气化膨胀压力下,液态表面变形,形成凹坑。再进一步提高功率密度和加长辐照时间,材料表面强烈气化,形成较高电离度的等离子体,它阻隔了激光对材料的辐照。

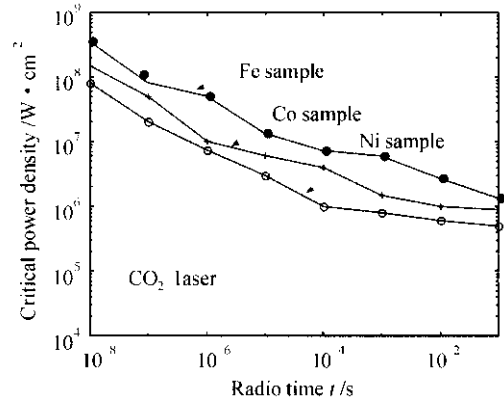


图2 临界激光功率密度与照射时间的关系
Fig. 2 Relationship between critical laser power density and time

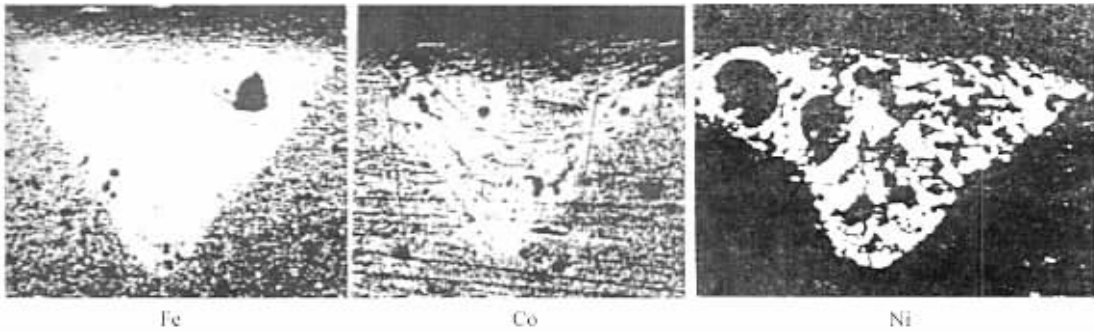


图3 Fe,Co,Ni 试样焊缝的宏观照片(16×)
Fig. 3 Macrophotos of welding line of sample (16×)

由传热焊向深熔焊转化的显著特征是小孔形成和等离子体蓝光的产生。三种粉末烧结材料深熔焊缝截面形貌如图3所示。

3.2 等离子体光强分析

在同样焊接条件下观察到三种材料的等离子体光强信号幅值有明显区别,Ni粉蓝光最强,检测信号的平均幅值最高,Co粉次之,Fe粉最弱。深熔焊过程中等离子体处于一种动态的平衡状态,金属蒸气不断地从小孔内喷出,并被激光电离,形成等离子体,然后由工件表面继续向上及周围扩散。由于等离子体是一种高温电离气体,电子密度与温度达到一种动态平衡,此时焊接过程保持稳定,等离子体光强也保持在一个相对稳定的水平上。相对而言,Fe粉的光致等离子体主要表现为红色,蓝光不太强烈,光强平均幅值较低。这是由于Fe粉烧结试样的临界激光功率密度较高,在试验所取的激光功率密度下,虽然Ni,Co能产生强烈等离子体,但Fe粉的光致等离子体浓度相对较低。

万方数据

3.3 临界气流量分析

吹辅助气体的作用是通过增加电子与离子和中性原子三体碰撞来增加电子的复合几率,以降低等离子体中的电子密度。中性原子越轻,碰撞频率越高,复合速率也越高。另一方面,气体本身的电离能应该高,不致因气体本身的电离而增加电子密度。用较小直径喷管将辅助气体以一定角度直接射入深熔焊接的小孔,侧吹气体不仅抑制了工件表面的等离子体云,而且也对小孔内的等离子体及小孔的形成施加影响,可以进一步增加熔深。但这种吹气方法的气流量要小,以免破坏熔池,对气流的调整精度和稳定性要求较高。

三种材料在侧吹氩气条件下的熔深-流量曲线如图4所示,由图可见,Fe,Co,Ni粉末烧结试样在最低临界流量 Q_s 分别为8 L/min,11 L/min,13 L/min时,等离子体得以控制,可以获得最大熔深,并且有 $Q_s^{Fe} < Q_s^{Co} < Q_s^{Ni}$ 。从前面的理论计算可知,在相同的焊接速度和激光功率条件下,由于Fe的阈值激光功率密度最高,故产生的等离子体最弱。同

理, Ni 最强, 即需要的最低临界气流量最大, 符合实验结果。

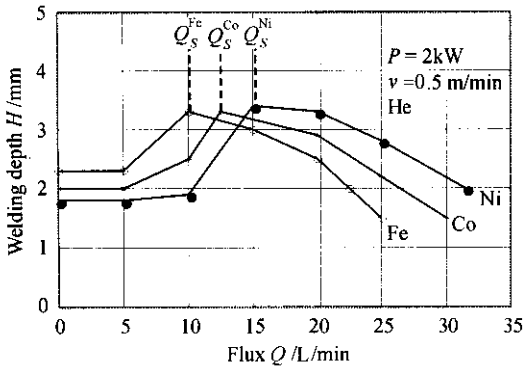


图 4 熔深与气流量曲线

Fig. 4 Curve of weld-depth (H) and flux (Q)

当等离子体被有效控制时, Fe 粉试样表面出现明显的凹陷, 焊缝较宽, 熔深最大。此时气流量所在区间称稳定焊缝区间; Co 粉试样焊缝表面出现明显的凸起, 焊缝很窄, 熔深比 Fe 粉浅; Ni 粉焊缝表面较平, 熔深相对最浅。

从侧吹气体压力流量对焊缝熔深的影响结果可见, 在侧吹压力较小时(此时流量较小), 侧吹气体对等离子体没有明显作用, 压力(流量)过大将导致等离子体和焊缝熔深的波动, 只有压力(流量)在略大于等离子体压力的一定范围内才能获得熔深增加且稳定的焊缝, 但此时仍可能造成焊缝中气孔的形成。原因在于侧吹气流直接作用于熔池, 引起焊缝熔池的搅动, 使气体被卷入熔池形成气孔。

4 结 论

1) Fe, Co, Ni 三种粉末冶金材料激光焊接时, 产生光致等离子体的临界激光功率密度 I_C 从高到低依次为 $I_{CFe} > I_{CCo} > I_{CNI}$ 。

2) 三种材料光致等离子体的光强有明显区别, Ni 粉蓝光最强, 检测信号的平均幅值最高, Co 粉次之, Fe 粉相对较弱。三种材料在侧吹氦气条件下的熔深-流量曲线表明, Fe, Co, Ni 粉末烧结试样在

最低临界流量 Q_S 分别为 8 L/min, 11 L/min, 13 L/min 时, 等离子体得以控制, 并且有 $Q_S^{Fe} < Q_S^{Co} < Q_S^{Ni}$ 。

3) 当等离子体被有效控制时, Fe 粉试样表面出现明显的凹陷, 焊缝较宽, 熔深最大; Co 粉试样焊缝表面出现明显的凸起, 焊缝很窄, 熔深比 Fe 粉浅; Ni 粉焊缝表面较平, 熔宽处于两者之间, 熔深相对最浅。

参 考 文 献

- 1 H. Stan. Nimbus laser lights the way ahead [J]. *Industrial Diamond Review*, 1988, 5:242~243
- 2 Zheng Qi-guang, Gu Jian-hui. The Interaction between Laser and Materials [M]. Wuhan: HUST Press, 1996
郑启光, 辜建辉 编著. 激光与物质相互作用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
- 3 Wang Jia-jin. Laser Processing Technology [M]. Beijing: China Measure Press, 1992
王家金 主编. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992
- 4 Tang Xia-hui, Zhu Hai-hong, Zhu Guo-fu *et al.*. The technology of laser welding diamond blade [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 1997, 8:110~113
唐霞辉, 朱海虹, 朱国富 等. 金刚石圆锯片激光焊接技术[J]. 中国机械工程, 1997, 8:110~113
- 5 Huang Pei-yun. The Principle of Powder Metallurgy [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1982
黄培云 主编. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982
- 6 Li Li-jun. Modern Laser Processing and the Equipments [M]. Beijing: Beijing University of Sci. & Tec. Press, 1989. 105~129
李力钧 编著. 现代激光加工及其装备[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989. 105~129
- 7 G. Herziger. The Influence of Laser-induced Plasma on Laser Materials Processing [M]. The Industrial Laser Annual Handbook, 1986. 108~109
- 8 J. S. Foley, C. M. Banas. Laser welding stability limits [C]. Proceedings of ICALEO'87, Laser Institute of America, 1988. 47
- 9 I. Miyamoto. Spital and temporal characteristics of laser-induced plasma in CO₂ laser welding [C]. LAMP'92, 1992. 311~316
- 10 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Interferometric measurement for the plasma produced by a Q-switched laser in air near the surface of an Al target [J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, B2(4): 327~332
- 11 Liu Dong-hua. Principle and equipments of laser processing [J]. *Laser Journal*, 1992, 13(2):85~89, 69
刘东华. 激光处理的原理与装置[J]. 激光杂志, 1992, 13(2): 85~89, 69