

# 激光熔覆 Fe<sub>p</sub>/Cu 复合涂层组织特征及其形成机理研究

王毛球 曾大文 宋武林 黄 为 谢长生  
(华中理工大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

**摘要:** 利用 2kW 的 CO<sub>2</sub> 气体激光器在 Q235 钢表面熔覆 Cu+5%Al 混合粉末, 获得了外观质量良好的熔覆层。SEM 观察发现, 熔覆层中有圆形颗粒存在, 且有规律分布。成分分析表明, 颗粒为富 Fe 相。提出一个激光熔覆模型对颗粒形成过程进行了解释。

**关键词:** 激光熔覆 Fe<sub>p</sub>/Cu 复合涂层 组织 模型

## Study on microstructure and its formation mechanism of Fe<sub>p</sub>/Cu composite coatings produced by laser cladding

Wang Maoqiu, Zeng Dawen, Song Wulin, Huang Wei, Xie Changsheng  
(Department of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Using a 2kW CO<sub>2</sub> laser to irradiate the mixture of Cu and Al (5% in weight fraction) powders on Q235 mild steel substrate the composite coatings of Fe/Cu has been successfully produced. The microstructure observations with SEM show that the spherical particles exist in the cladding layer and have regular distribution and are proved to be Fe-rich phase particles. These particles have the important effect on the mechanical and electrical-magnetic performances of the cladding layer. This paper points out that the formation procedure of the particles has the relation with the fogging process of metal and formulates an expression to calculate the diameter of the particles.

**Key words:** laser cladding Fe<sub>p</sub>/Cu composite coating microstructure model

## 引 言

激光熔覆技术自诞生以来,就在材料表面强化领域中受到高度重视。利用该项技术在一般结构材料表面熔覆 Ni 基、Co 基、Cu 基合金,可以获得具有耐磨、耐蚀以及隔热等优良性能的合金涂层。近年来,在以上合金中加入各类陶瓷相,制备得金属陶瓷复合涂层,其耐磨性能大大提高,显示出广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>。不过,激光熔覆金属陶瓷技术是通过外加陶瓷相的方法形成颗粒相,这给熔覆工艺带来了一定的难度。特别是当外加陶瓷相含量较高时,就很难获得理想的熔覆层。另外,外加颗粒相与熔覆合金在高温下很容易发生作用,从而导致陶瓷颗粒相的烧损。因此,有必要通过其它方法获得颗粒相。

激光熔覆时基体材料也会发生少量熔化,当选用基体材料与熔覆材料不相作用或作用较弱时,有可能利用基体材料的熔化获得颗粒相。为此选用 Cu 粉做熔覆材料,在 Q235 钢基体上进行熔覆试验,可望获得 Fe<sub>p</sub>/Cu 复合涂层,该复合涂层在耐腐蚀和导电领域有较好的应用。对所得熔覆层的组织特征进行观察和分析,在此基础上提出激光熔覆过程模型。

## 1 实验方法

实验所用的基体材料为 Q235 钢块状试样,尺寸为 40mm × 30mm × 8mm。采用纯度为

99.9%、粒度为-320目的Cu粉、Al粉做熔覆材料,其中,加入少量的Al可使激光熔覆工艺易于实施。采用横流式CO<sub>2</sub>气体激光器,最大输出功率为2.2kW,光束模式为多模输出。工作台是x-y两坐标精密机床,由单板机自动控制。粉末按Cu+5%Al重量含量混合均匀后,用有机粘结剂粘结并预涂覆在试样表面,厚度为1mm。激光处理前,将试样在80℃温度下烘烤30min,使粘结剂挥发。采用的激光工艺参数为:激光输出功率 $P_1$ 为2.0kW,光斑直径 $D$ 为3mm,扫描速度 $v_b$ 为5~13mm/s。激光处理时还采用向熔池中吹Ar气的方式进行保护。

将试样横截面做成金相试样。利用JSM-35C型扫描电镜观察不同工艺条件下所得熔覆层的组织形貌。熔覆层成分分析在JXA-8800R型电子探针分析仪上进行,选取微区做面扫描和定量分析。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 组织特征及成分分析

图1是熔覆层横截面宏观形貌。从中可见涂覆粉末在熔覆过程中完全熔化且与基体结合较好,熔覆层总体上是完整的,并且没有裂纹。气孔

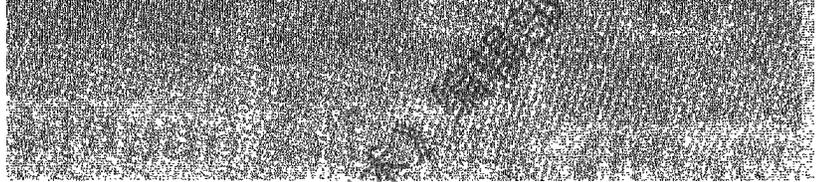


Fig. 1 Cladding intersections of different scanning speeds a—scanning speed  $v_b=5$ mm/s b—scanning speed  $v_b=9$ mm/s c—scanning speed  $v_b=13$ mm/s

是其中较为常见的一种冶金缺陷,不过,通过调整工艺参数,可以减轻甚至消除这种缺陷。图1a, b, c是在激光扫描速度分别为5mm/s, 9mm/s和13mm/s工艺条件下获得,可见低扫描速度下气孔较少,这是因为此时熔池寿命 $t(t \approx D/v_b)$ 较长,熔池温度较高,有利于粉末间气体的排出。

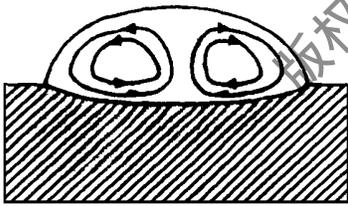


Fig. 2 Schematic diagram of fluid flow in the molten pool

Table 1 Thermophysical parameters of some pure metals

| elements   | Cu    | Co    | Ni    | Fe    |
|--|-------|-------|-------|-------|
| density $\rho$ ( $\times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> )       | 8.9   | 8.0   | 8.0   | 7.8   |
| thermal conductivity $k$<br>(W/m/K, 300K)                | 398   | 99.2  | 90.5  | 80.3  |
| surface tension<br>$\sigma$ (N/m, above T <sub>m</sub> ) | 1.280 | 1.886 | 1.934 | 1.788 |

熔覆层与基体界面形貌表明两者间的结合情况。从图1可见,熔覆层与基体结合良好,不过与Ni基和Co基自熔合金熔覆层不一样。后者界面光滑平整,前者界面虽然也光滑,但在中部有一凸起,并且在激光扫描速度较高时该凸起更为明显。表1给出了几种金属的几种物性参数,从中可见Cu的导热系数远大于其它几种金属,因此,熔覆Cu粉时,由于Cu的快速导热,基体温度升高较快,基体熔化较多,这为界面形貌的起伏提供了必要条件。另一方面,由于液态Cu的表面张力较小,密度较Fe大,在液态Cu和Fe接触时,界面较容易发生变形。熔池中的流动形式如图2所示<sup>[3]</sup>,在熔池的两边流速较大,从而界面变形更严重。激光扫描速度不同时,界面凸起程度也有所不同。低扫描速度时由于熔池中搅动充分,界面处流速差较小,因而较为平整;而高扫描速度时则相反。

从组织形貌中还可看出,熔覆层中有许多细小颗粒。图 3 是图 1a 左半侧的放大相,显示小颗粒的分布特征,从中可以看出较大的颗粒分布在熔覆层中轴线、表层以及左侧中部附近,形成环状分布。对照图 2 流动情况就会发现,流动较剧烈的地方,颗粒尺寸较大,颗粒分布较明显。由此可以得知,颗粒的形成与激光熔覆熔池中的流动有内在的联系。图 4 是图 1a 中部颗粒放大形貌,从

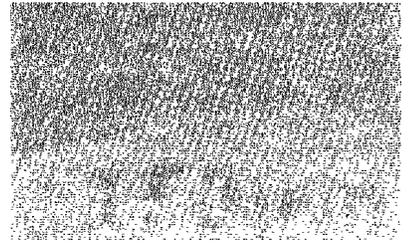


Fig. 3 Particle distribution in the clad

中看出这些颗粒都是圆球形的,说明这些很可能是由没有溶解到 Cu 中的液相凝固得来。测得颗粒的尺寸约为 10~25 μm。

对颗粒相附近区域进行电子探针面扫描结果如图 5 所示。小颗粒是富 Fe 相,其周围区域是富 Cu 相。对它们进行定量分析结果列在表 2,从而进一步证实小颗粒是以 Fe 为基的相。由于熔覆材料是 Cu+5% Al,其中并没有加 Fe,因此,可以断定 Fe 是来自 Q235 钢基材。可见,颗粒相是 Q235 钢基体熔化并被搅拌到熔池中去后

快速凝固形成的。从定量分析结果还可以看到,在颗粒相的形成过程中,还与熔池中液态金属

Table 2 Content of main elements in the clad (wt%)

| element             | Cu    | Fe    | Al   | Si   |
|---------------------|-------|-------|------|------|
| non-particle region | 90.60 | 5.02  | 4.39 |      |
| particle            | 12.65 | 84.49 | 2.46 | 0.41 |

之间发生了互溶和物质交换。

Munitz 利用快速凝固方法制备 Cu-Fe 合金,其组织形态为非磁性材料基体 (Cu) 中分布有磁性颗粒相 (Fe),该合金具有巨磁阻 (GMR) 性能,在电磁领域有着良好的应用前景<sup>[4]</sup>。利用激光熔覆方法制备的 Fe<sub>p</sub>/Cu 复合层,具有类似的组织形态,其性能有待进一步研究。

## 2.2 熔覆模型

对于有颗粒相存在预涂覆激光熔覆过程,有人提出烧结式和熔池搅拌式两种模型,王爱华给出 Cu/Al 粗糙界面的潜热释放模型<sup>[5]</sup>。本文中涉及的 Cu/Fe 界面及富 Fe 颗粒相的产生,显然与熔池中液态 Cu 的对流和界面处 Fe 的熔化有密切关系。因此,可以将其激光熔覆过程用图 6 示意表示,该图均为沿光斑中心的横截面。

图 6a 是激光束刚辐照瞬间,熔覆材料和基体材料都开始被加热。图 6b 是经过一段时间的辐照,熔覆材料和基体都被加热,其中,熔覆材料升温到熔点以上后熔化并形成熔池,熔池中的液态金属 Cu 由于表面张力的作用发生对流。图 6c 是继续加热,基体也开始发生少量熔化。图 6d 是基体进一步熔化,熔池流动剧烈,在界面处的液态 Fe 开始被搅拌到熔池中,形成液态颗粒。图 6e 是激光束离开前,以上过程进一步加剧,液态 Fe 颗粒在随熔池流动的同时,还与

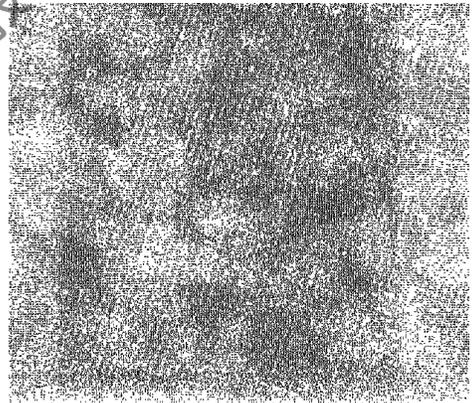


Fig. 5 Distribution of main elements in the region near particles

周围液态金属发生质量传输。图 6f 是激光束离开后, 熔池开始冷却, 当温度下降到一定程度时, 界面处液态 Fe 和熔池中的富 Fe 颗粒先发生凝固。图 6g 是温度继续下降, 液态金属 Cu 发生凝固, 熔池消失。图 6h 是冷却后的熔覆层。

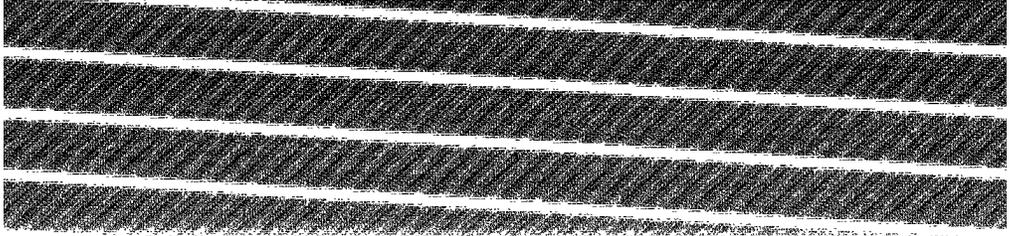


Fig. 6 Schematic diagram of Fe-rich particle formation procedure during laser cladding

a—before laser irradiation b—Cu melted c—Q235 substrate melted d—melted Q235 stirred and spherical liquid formed e—more Q235 stirred and spherical liquid formed f—Q235 stirred and spherical liquid formed solidified after laser moved away g—liquid Cu solidified h—after solidification

复合层中颗粒相的大小与分布对机械性能和电磁性能有重要影响, 有必要对其进行研究。Fe 颗粒的形成与熔池中的流动、基体材料的熔化以及界面处的作用等现象密切相关, 其过程十分复杂, 目前难以精确描述。不过, 该过程与液态金属的雾化过程有一定的相似性, 可以认为在液态 Cu 的作用下, 熔化的 Q235 钢先形成液态薄层, 进而断裂为液条, 最后破碎成液态 Fe 颗粒。借用以下雾化公式来估算颗粒的平均直径<sup>[6]</sup>:

$$d_p = (3\pi\sqrt{2})^{1/3} d_L [1 + 3\mu_L / (\rho_L d_L \sigma)]^{1/2}]^{1/6}$$

式中,  $d_L$  为破碎为液滴前液条的直径, 这里假设为激光光斑直径  $D$  的  $1/1000 \sim 1/100$  (熔覆层稀释率一般为 5%, 高宽比约为  $1/5$ , 而熔覆层宽与光斑直径相当, 故薄层最大为  $D/100$ ), 即  $d_L = (3.0 \sim 30) \times 10^{-6} \text{m}$ ; 粘度  $\mu_L$  取  $1600^\circ\text{C}$  铁水的粘度, 即  $\mu_L = 6.1 \times 10^{-3} \text{Ns/m}^2$ ;  $\rho_L$  和  $\sigma$  分别取  $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$  和  $1.788 \text{N/m}$ 。代入各值后计算得平均直径为  $5 \sim 50 \mu\text{m}$ , 与试验结果相吻合。

富 Fe 颗粒在熔池中随液态 Cu 做近似圆周的加速运动时, 受到液态 Cu 的作用力。该作用力大小与颗粒截面积有关, 一般而言, 大颗粒受到作用力也较大。另一方面, 运动速度大的颗粒所需的作用力也较大, 因此, 大的颗粒有分布在流速大的地方的趋势。

### 3 结 论

(1) 激光熔覆 Cu+5%Al 于 Q235 钢上, 能够获得较好的熔覆层, 熔覆层与基体界面在中部有一凸起, 其形成与界面处熔体流动有关。

# 磁约束放电等离子体电抗特性的研究

陈永洲 陈清明 赖建军 李 军

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 介绍了一种测量等离子体电抗的方法, 并对横向磁场影响下等离子体电抗特性进行了研究, 理论分析与实验曲线拟合得很好。

关键词: 磁约束放电 电抗特性

## Study on reactance characteristic of plasma confined by a transverse magnetic

*Chen Yongzhou, Chen Qingming, Lai Jianjun, Li Jun*

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

**Abstract:** Using of transverse magnetic can improve discharge stability and increase the output power of the metal vapor lasers. In order to obtain shorter rising period of the discharge pulse, it is important to decrease the reactance of the discharge circuits. The analysis and calculation of the discharge circuit fit the experiment results very well.

**Key words:** discharge confined by transverse magnetic reactance characteristic

## 引 言

横向磁场能够提高放电的稳定性, 从而提高激光输出功率<sup>[1]</sup>。理论分析表明<sup>[2, 3]</sup>: 横向磁场主要通过影响电子的自由行程, 增加电子的霍尔漂移, 减少电子沿管壁的扩散, 增加电子的碰撞次数(电子的能量分布向低能量方向移动), 提高电子的利用率, 提高电离度, 从而影响整

(2) 熔覆层中有圆形颗粒相存在, 成分分析结果表明颗粒为富 Fe 相, 是 Q235 钢基体熔化并被搅拌到熔池中后快速凝固所得。

(3) 利用所建激光熔覆模型能较好地解释熔覆层中颗粒的形成过程、分布特征及大小。

## 参 考 文 献

- 1 李 强, 欧阳家虎, 雷廷权 *et al.* 材料科学与工艺, 1996; 4(4): 22~ 35
- 2 Frenk A, Henchoz N, Kuz W. Zeitschrift für Metallkunde, 1993; 84(12): 886~ 892
- 3 Basu B, Date A W. Int J Heat & Mass Transfer, 1992; 35(5): 1049~ 1058
- 4 Munitz A. Metallurgical Transactions, 1987; 18B(9): 565~ 575
- 5 王爱华. 铝合金的激光熔覆及其过渡区行为的研究. 华中理工大学博士学位论文, 1997
- 6 舍克里 J 著. 彭一川 等译. 冶金中的流体流动现象. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 340~ 352

作者简介: 王毛球, 男, 1970 年 6 月出生。博士研究生。现主要从事材料表面激光强化方面的研究。  
谢长生, 男, 1955 年出生。教授, 博导。从事激光强化及计算机在材料科学中的应用研究。