

## 激光熔覆层热膨胀系数对其开裂敏感性的影响\*

宋武林 朱蓓蒂 张 杰 崔 昆

章桥新

(华中理工大学材料科学与工程系, 武汉, 430074) (武汉工业大学, 武汉, 430070)

**摘要:** 通过适当调整 Fe-Cr-Ni 合金的成分, 改变其热膨胀系数, 用以进行激光熔覆, 并研究熔覆层的开裂敏感性, 结果表明降低熔覆层热膨胀系数有利于明显减小激光熔覆层的开裂敏感性。对此进行了较详细的分析, 并为解决熔覆层开裂, 提出了熔覆合金与基材间热膨胀系数差值要有合理范围的观点。

**关键词:** 激光熔覆 热膨胀系数 开裂敏感性

### Effects of expansion coefficient of laser cladding layer on cracking sensitivity

Song Wulin, Zhu Beidi, Zhang Jie, Cui Kun

(Department of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Zhang Qiaoxin

(Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070)

**Abstract:** After adjusting components of the Fe-Cr-Ni alloy powder which is used to laser clad on 45 steel, we find that the expansion coefficient of clad layer and its cracking sensitivity have been changed, and the cracking sensitivity decrease with lowering of expansion coefficient of clad layer. In this paper we discuss these results and point out that proper selecting the range of the difference of expansion coefficient between clad layer and substrate is beneficial to reduce cracking sensitivity of clad layer.

**Key words:** laser cladding expansion coefficient cracking sensitivity

### 引 言

激光熔覆作为一种新型的材料表面处理工艺, 由于其有许多独特的优点, 目前国内外正进行广泛的研究和开发, 将在工业生产中具有很大的应用潜力。然而对于大尺寸零件和大面积熔覆, 由于熔覆层易开裂而严重阻碍了这一高新技术的推广应用。尽管已有一些材料工作者对此作了一些工作<sup>[1~3]</sup>, 但该问题并未得到很好解决。本文则从熔覆层热膨胀系数这一物理性能指标入手, 探讨其对熔覆层开裂敏感性的影响, 为解决激光熔覆层开裂和合理设计熔覆材料提供一些帮助。

### 一、试 验 方 法

**试验材料** 熔覆材料选用国产自熔 Fe-Cr-Ni 合金粉末; 基材为 45# 钢, 其尺寸为: 80mm × 35mm × 10mm。

**激光熔覆** a. 膨胀系数测量试样: 为达到热膨胀系数测量的试样尺寸要求, 采用同步送粉法进行单道三次重复熔覆。熔覆参数为: 送粉速率: 12g/min, 功率 2kW, 扫描速度 4mm/s, 光

\* 国家模具技术重点实验室资助。

斑尺寸 5mm, 在 2kW 连续 CO<sub>2</sub> 激光器上进行。b. 开裂敏感性检测试样: 采用预置粉末法进行多道搭接熔覆, 预置粉末厚度为 1mm, 搭接率 50%, 搭接道数为 6, 其余工艺参数同 a。

开裂敏感性检测 利用显像剂对渗透剂吸附的原理检测熔覆层表面的裂纹, 并在体视显微镜下测量裂纹长度。用单位熔覆面积上裂纹长度  $a$  来度量开裂敏感性。

热膨胀系数的测定 在前述单道熔覆试样中将熔覆层用线切割的方法剥离下来, 制成热膨胀系数测量试样。然后在 UNIX 热分析系统的 TMA-7 型热机械分析仪上测定各试样的热膨胀系数。考虑到激光熔覆层裂纹主要是热裂纹, 故热膨胀系数测量温度范围定为 300℃~900℃。

## 二、试验结果

### 1. 成分对熔覆层开裂敏感性的影响

在原始铁基金粉末成分的基础上分别添加 15% wt Ni, 15% wt Mo 和 15% wt Co, 并进行 24h 球磨处理, 使其成分均匀, 然后将其进行激光熔覆, 并对各试样进行裂纹检测, 其结果如图 1 所示。

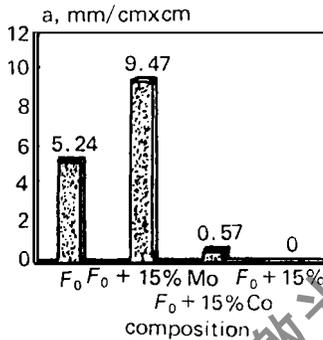


Fig. 1 The effect of composition on cracking susceptibility of clad layer

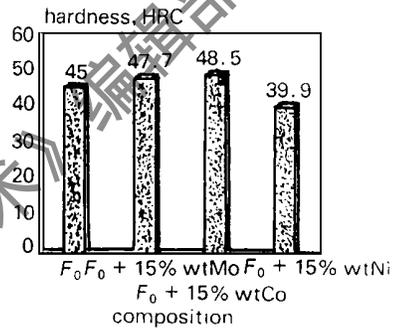


Fig. 2 The effect of different composition on hardness of clad layer

从图可知, 加 15% wt 的 Ni 和 Co 时可明显减小激光熔覆层的开裂敏感性, 其中 Ni 的影响更明显; 而加 15% wt 的 Mo 时, 熔覆层的开裂敏感性反而增强。

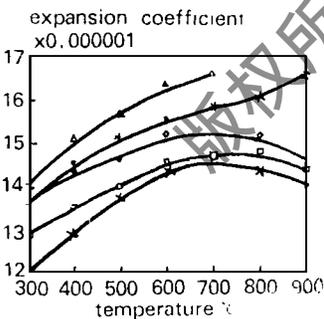


Fig. 3 The effect of composition on expansion coefficient of clad layer

\* - 15% wt Mo + F<sub>0</sub>    ◇ - 0% wt Ni + F<sub>0</sub>    □ - 15% wt Ni + F<sub>0</sub>    + - 15% wt Co + F<sub>0</sub>    △ - 45# steel

### 2. 成分对熔覆层硬度的影响

对不同成分熔覆层进行硬度检测, 结果如图 2 所示。从图可见, 加 15% Ni 时熔覆层硬度与原始合金熔覆层 (F<sub>0</sub>) 相比明显下降, 而加 15% Mo 和加 15% Co 时, 则熔覆层硬度得以提高, 其中加 15% Co 时硬度提高更为明显。

### 3. 成分对熔覆层热膨胀系数的影响

对基材和各成分的熔覆层测定其热膨胀系数 (300℃~900℃), 结果如图 3 所示。从图可知, 几种成分的熔覆层的热膨胀系数都是小于基材的。其中 F<sub>0</sub>+ 15% Mo 合金熔覆层的热膨胀系数最大 (F<sub>0</sub> 为原始 Fe-C-Ni 合金), 且大于原始合金熔覆层 F<sub>0</sub> 的热膨胀系数; F<sub>0</sub>+ Ni 合金的次之, F<sub>0</sub>+ 15% Co 合金熔覆层的最小, 且后两者的热膨胀系数都小于 F<sub>0</sub> 的。同时还看出这几种合金熔覆层热膨胀系数的差别在高温区间更明显。

### 三、分析与讨论

众所周知,涂层的开裂敏感性主要取决于两个方面,即涂层的抗开裂能力(韧性)及其与基材间物理性能的差别,主要是高温热膨胀系数之差(因为熔覆层裂纹是热裂纹)。因此熔覆层开裂敏感性的变化可从这两方面加以分析。从图1,图2和图3的试验结果可看出:当熔覆层的硬度相差不大时,激光熔覆层的开裂敏感性主要取决于本身热膨胀系数的大小,熔覆层热膨胀系数越小,开裂越不敏感,如 $F_0+15\%Co$ 合金熔覆层开裂敏感性明显小于 $F_0+15\%Mo$ 合金熔覆层的开裂敏感性;相反当熔覆层热膨胀系数相差不大时,熔覆层硬度对其开裂敏感性的影响就更为明了,硬度越小,熔覆层开裂就越不敏感,如 $F_0+15\%Ni$ 合金熔覆层比 $F_0+15\%Co$ 合金熔覆层的开裂敏感性小。但比较起来看,在激光熔覆中,熔覆层硬度对其开裂敏感性的影响没有热膨胀系数那么明显。

激光熔覆层的残余拉应力是其开裂的主要原因,而这种残余应力主要来自三个方面:热应力,相变应力和拘束应力。在激光熔覆中,由于急冷,急热的特点,热应力的影响就更为明显,而根据文献[4],熔覆层的热应力可由下式来衡量。
$$\sigma_{th} = E \times \Delta\alpha \times \Delta T / (1 - \nu) \quad (1)$$
式中, $E$ , $\nu$ 分别是熔覆层的扬氏模量和泊松比, $\Delta\alpha$ 是熔覆层与基材间热膨胀系数之差, $\Delta T$ 是熔覆温度与室温的差值。由此式可看出,当熔覆层热膨胀系数大于基材时, $\Delta\alpha > 0$ ,显然 $\sigma_{th} > 0$ ,即此时的热应力为拉应力,对控制熔覆层开裂不利。而当熔覆层热膨胀系数小于基材时, $\Delta\alpha < 0 \rightarrow \sigma_{th} < 0$ ,即此时热应力为压应力,将可以减小熔覆层开裂敏感性。 $\Delta\alpha$ 所引起的热应力状态的变化亦可由图4来加以说明。另外从(1)式还可以看出,熔覆层的热膨胀系数越小(小于基材的热膨胀系数时),由此产生的残余压应力就越大,也就越有益于减小熔覆层的开裂敏感性。这显然和文中的试验结果相符。可见减小熔覆层的热膨胀系数是减小熔覆层开裂敏感性的一有效途径。尽管如此,熔覆层的热膨胀系数也并非越小越好,它必须有一定的范围,超出此范围时,易在基材表面形成残余拉应力,甚至造成基材开裂。该范围可用如下方法来确定。假设激光熔覆层的应力主要来自于热应力 $\sigma_{th}$ ,那么对熔覆层而言,为防止其开裂,必须保证

$$\sigma_{th} < \sigma_1 \quad (2)$$

而对基材来说,考虑基材与熔覆层的应力平衡,为防止其开裂,必须保证

$$-\sigma_{th} < \sigma_2 \quad (3)$$

式中, $\sigma_1$ , $\sigma_2$ 分别为熔覆层和基材的抗拉强度,综合(1),(2)式可得

$$-\sigma_2 < \sigma_{th} < \sigma_1 \quad (4)$$

将(1)式代入(4)式即可得熔覆层与基材的热膨胀系数差值的合理范围

$$-\sigma_2 \times (1 - \nu) / (E \times \Delta T) < \Delta\alpha < \sigma_1 \times (1 - \nu) / (E \times \Delta T) \quad (5)$$

#### 参 考 文 献

- 1 Dekumbis R. Controlling residual stresses in laser clad coatings. LIM-6, Birmingham U. K. 1989: May
- 2 Powell J, Steen W M. Vibro laser cladding. In: K. M ukherjee(ed) laser in metallurgy, New York: The metallurgical society of AIM E. 1982: 92
- 3 宋武林,朱蓓蒂,甘翠华 *et al.* 中国激光, 1995; A22(4): 309
- 4 Bull S J. Surface and coatings technology, 1992; 54/ 55: 173

\* \* \*

作者简介:宋武林,男,1964年出生。博士。现从事材料激光表面强化和TEM材料显微分析。