

# 激光熔覆层中非晶组织对摩擦学的影响\*

梁工英<sup>1</sup> 黄俊达<sup>2</sup> 苏俊义<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西安交通大学机械工程学院 西安 710049; <sup>2</sup> 香港理工大学机械工程系 香港)

**提要** 使用 5 kW CO<sub>2</sub> 激光器对铝合金表面的 Ni-Cr-Al 涂层进行熔覆处理. 分析发现, 熔覆层中存在大量的非晶组织. 利用差热分析(DTA)方法半定量地确定非晶组织的含量, 并对不同非晶含量的试样与灰铸铁进行摩擦磨损试验. 结果表明, 激光熔覆试样的磨损量非常小, 非晶含量越高, 磨损量越小. 激光熔覆试样的摩擦系数在油润滑条件下相差不大, 灰铸铁的摩擦系数在磨程 2 km 后趋于稳定, 且均小于 0.1.

**关键词** 铝合金, 激光熔覆, 摩擦磨损

铝合金由于它高的比强度、导热性和耐蚀性, 在工业中使用非常广泛. 但是由于其表面硬度较低, 导致耐磨性较差. 激光表面合金化和激光熔覆是提高其耐磨性能的理想方法<sup>[1-3]</sup>.

在激光熔覆和激光合金化研究中, Ni 和 Cr 是经常使用的合金元素<sup>[4,5]</sup>, 在激光快速凝固条件下, 容易与类金属材料 B, Si 等形成非晶组织<sup>[6]</sup>. Al 元素具有与类金属 B, Si 等十分相近的特性, 与 Ni, Cr 等元素也可形成非晶组织. 但是, 这些非晶组织的存在, 对耐磨性和摩擦学的影响到底如何, 至今还没见报道. 对此, 文中作了一些探讨.

## 1 实验方法

激光熔覆试样的基底材料为 ZA1 111 铸造 Al-Si 合金, 其成分为(wt-%): Si8.23, Mg0.057, Cu1.35, 其余为 Al. 试样被加工成 10 mm 厚的矩形板, 在经 NaOH 热蚀及喷砂处理后, 试样表面被喷涂 Ni-Cr-Al 粉末. Ni-Cr-Al 粉末的化学成分为(wt-%): Cr16.5, Al8.0, 其余为 Ni. 喷涂层的厚度为 0.25 mm.

激光熔覆处理在 5 kW CO<sub>2</sub> 横流激光器上进行. 试验时, 光斑直径为 2.5 mm, 激光功率密度为 36 kW/cm<sup>2</sup>, 扫描速度为 8 mm/s. 激光扫描时, 试样表面用 Ar 气保护, 试样采用单道扫描, 扫描后, 激光熔化带宽度为 3.0~ 3.2 mm.

从垂直于试样扫描方向和表面制取横截面, 以观察熔覆层的显微组织. 从激光熔覆层上表面切取 0.5 mm 薄片, 从基底方向进行机械研磨, 当减薄到 0.1 mm 后用双喷法制取 TEM 试样. 显微组织观察及结构分析在 S-2700 型扫描电镜和 JEM-200CX 型透射电镜下进行.

将激光熔覆试样在 520℃ 大气环境中以不同时间退火, 退火处理的条件见表 1 所示. 从不同时间退火的激光熔覆试样表层制取 0.1 mm 厚的 DTA(差热分析)试样, 并在 DuPont 2000

\* 西北工业大学凝固技术国家重点实验室和香港理工大学基金资助项目.

收稿日期: 1999-04-20; 收到修改稿日期: 1999-06-09

型差热分析仪上进行 DTA 分析. 用单辊快淬装置制取 Ni-Cr-B-Si 全非晶试样薄带. 通过 DTA 曲线上试样的非晶放热面积, 与全非晶薄带 DTA 曲线上的非晶放热面积比较, 来半定量地确定各试样非晶含量, 其结果见表 1 所示.

表 1 试样处理条件及非晶含量

Table 1 Condition of samples treatment and content of amorphous structure

Samples No.	Power density /kW/cm <sup>2</sup>	Scanning velocity /mm/s	Treated condition	Amorphous content /%
A <sub>0</sub>	36	8	without	31.1
A <sub>2</sub>	36	8	520°C/2 h	13.8
A <sub>4</sub>	36	8	520°C/4 h	8.34
A <sub>6</sub>	36	8	520°C/6 h	2.18

滑动磨损试验时在 M200 环块磨损试验机上进行. 磨损上试样为激光熔覆块状试样(15 mm×3 mm×3 mm), 试样表面经 800<sup>#</sup> 砂纸磨平, 下试样为灰铸铁 HT200 圆环 ( $R_a = 0.8$ ). 试验时, 载荷为 100 N, 下试样转速为 200 r/min, 磨程为 5000 m, 用 10<sup>#</sup> 机械油为润滑剂以 20 s 一滴的速度润滑.

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 激光熔覆层中的非晶组织

图 1 为 A<sub>0</sub> 试样熔覆区横截面的两张 SEM 照片. 其中, 图 1(b) 为图 1(a) 中 A 处的高倍照片. 在图 1(a) 中, 上部为激光熔覆区, 下部为过渡区. 从图 1(b) 中可以看出, 熔覆区的组织是由一些粒状结构和它周围的网状结构组成.

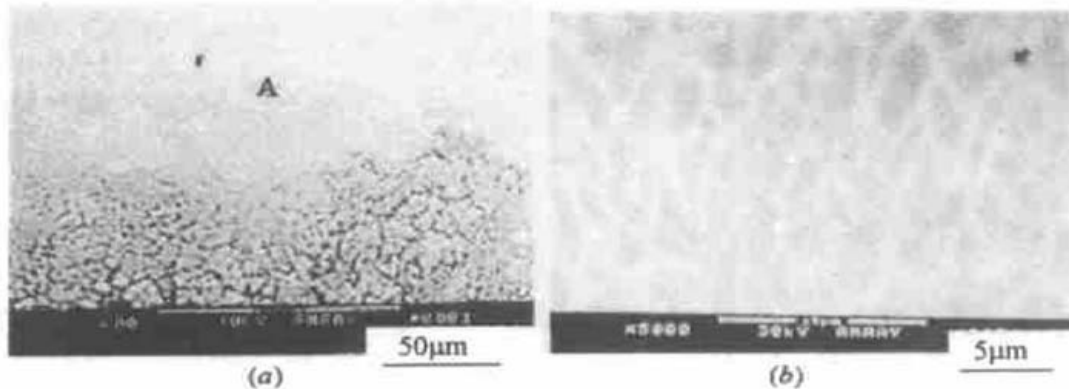


图 1 熔覆区的 SEM 照片

(a) 放大照片; (b) A 区的高倍放大照片

Fig. 1 SEM photo in clad region

(a) magnified photo; (b) higher magnification photo of "A" region

图 2(a) 为试样 A<sub>0</sub> 熔覆区中的一张 TEM 明场像照片, 图 2(b) 是它的衍射图. 从图中可以看出, 这种象树枝状的组织为非晶结构. 图 3(a) 是试样 A<sub>0</sub> 熔覆区中的另一张 TEM 照片, 图 3(b) 是图 3(a) 中 B 处的衍射图. 图 3(a) 中 A 处的衍射图与图 2(b) 一样. 经标定, 图 3(a) 中 B 处的组织为 Ni<sub>3</sub>Al 晶体. 这两张图的结果可以说明, 激光熔覆层中存在一些非晶组织, 这些

非晶组织与晶化相 Ni<sub>3</sub>Al 共生在一起.

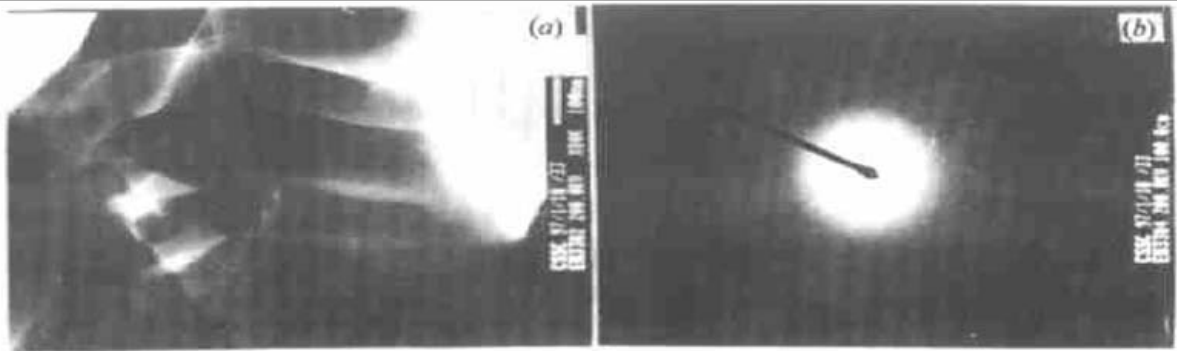


图 2 试样 A<sub>0</sub> 激光熔覆区中的 TEM 照片

(a) 明场像; (b) 衍射图

Fig. 2 TEM photo of sample A<sub>0</sub> in the laser clad zone

(a) bright field image; (b) electron diffraction pattern

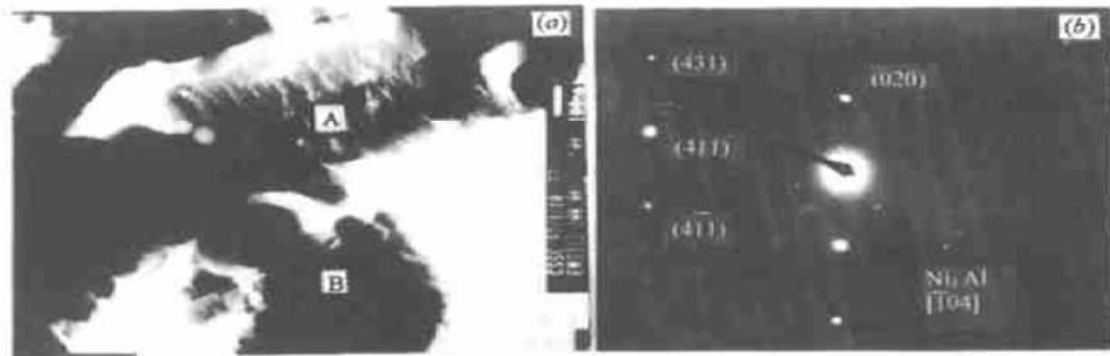


图 3 试样 A<sub>0</sub> 激光熔覆区中的 TEM 照片

(a) 明场像; (b) B 处的衍射图

Fig. 3 TEM photo of sample A<sub>0</sub> in the laser clad zone

(a) bright field image; (b) electron diffraction pattern of point B

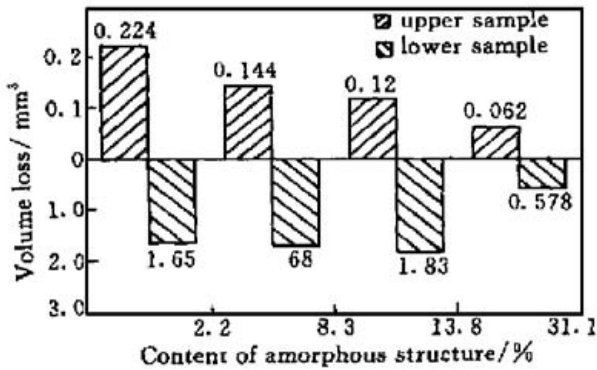


图 4 滑动磨损结果

Fig. 4 Results of sliding wear test

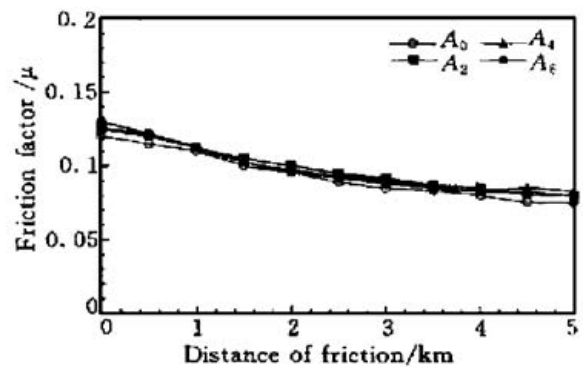


图 5 摩擦系数与里程的关系

Fig. 5 Relation of friction factor with sliding distance

### 2.2 含非晶试样的磨损特性

滑动摩擦磨损结果见图 4 所示. 图中, 上试样为激光熔覆试样, 下试样为灰铁试样. 从图

中可以看出,所有激光熔覆试样均有非常低的磨损量,而且随试样中非晶含量的增加,试样的磨损量大幅度下降.非晶含量较高的 $A_0$ 试样的磨损量仅为非晶含量较低的 $A_6$ 试样的 $1/4$ .图5为各试样摩擦系数随滑动距离的关系,可以看出,在油润滑的条件下,各试样摩擦系数相差很小,在滑动距离2 km以后,摩擦系数趋于一个恒定值,且其摩擦系数小于0.1.

图6是两张磨损面的SEM照片,可以看出,非晶含量高的 $A_0$ 试样磨损面非常光洁,仅有较浅的犁沟存在,而非晶含量较低的 $A_4$ 试样上存在较深的犁沟和较多的剥落现象.根据其他试样也可得知,非晶含量越少的试样,其磨面上的剥落现象越大.由此可见,激光熔覆层中的剥落是造成试样磨损量增大的主要原因.

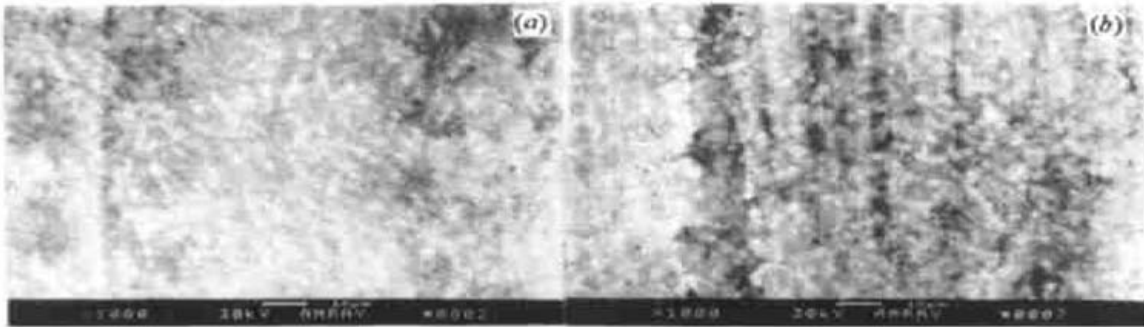


图6  $A_0(a)$  和  $A_4(b)$  试样磨损面的 SEM 照片

Fig. 6 SEM photos of wear surface of samples  $A_0(a)$  and  $A_4(b)$

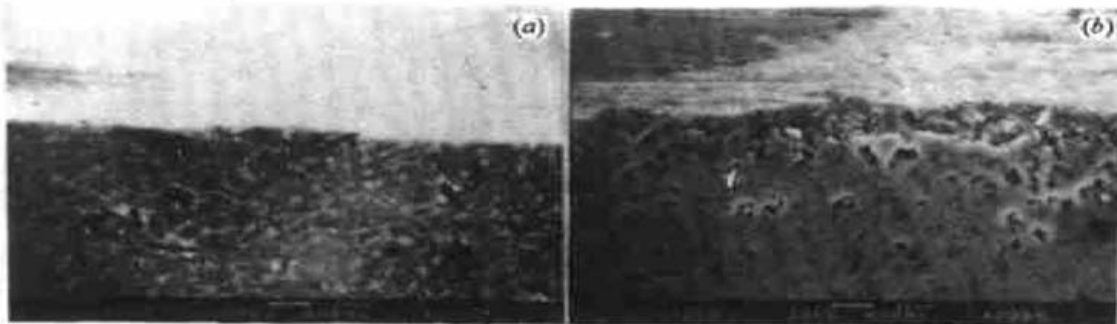


图7  $A_0$  试样(a) 和  $A_6$  试样(b) 的磨损试样正切面的 SEM 照片

Fig. 7 SEM photos of cross-section of wear samples  $A_0$  and  $A_6$

图7为 $A_0$ 试样(a)和 $A_6$ 试样(b)的磨损试样正切面的两张SEM照片.从照片中可以看出,非晶含量高的 $A_0$ 试样,其磨损面相当平整,虽然有少量剥落现象,但剥落现象仅限于表层,亚表层的组织都十分致密.而非晶含量很少的 $A_6$ 试样上,磨损面存在大量的剥落现象,从剥落坑中可以清楚地看出一些颗粒脱落后留下的痕迹.同时,在亚表层( $20\sim 30\ \mu\text{m}$ )中,一些颗粒已与基体脱离,并在制样时脱落而留下一些孔洞.

表2为各试样熔覆层在退火后平均显微硬度的变化,从中可以看出,熔覆层中显微硬度随着退火时间增加而逐渐升高,但到一定时间后又开始下降.这是因为,在试样退火的初期一些非晶晶化形成非常细小的微晶组织时会造成硬度的升高,而随着微晶组织的长大,其硬度又会下降.联系磨损试验的结果,可以发现,磨损量的减小并不随着试样的硬度增加而变化,而是随着试样中的非晶含量的增加而减小.图6和图7的现象说明,非晶组织的存在有利于减少颗粒相的剥落,从而减少了试样的磨损量,提高其耐磨性.

表 2 各试样熔覆层中的显微硬度

Table 2 Microhardness in the cladding zone of various samples

Samples No.	A <sub>0</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>6</sub>	HT 200
Microhardness HV	648	695	836	722	197

### 3 结 论

(1) 铝合金激光熔覆层中存在一些非晶组织, 这些非晶组织与晶化相颗粒 Ni<sub>3</sub>Al 生长在一起. 非晶组织的存在有利于提高熔覆层的耐磨性. 非晶含量越高, 试样的耐磨性越好.

(2) 在摩擦磨损过程中, 熔覆层中颗粒的剥落是造成磨损量增大的主要原因. 非晶组织的存在有利于减少颗粒相的剥落, 从而减少了试样的磨损量, 提高其耐磨性.

(3) 在油润滑条件下, 不同非晶含量试样的摩擦系数基本一致. 在磨程超过 2 km 后, 各试样的摩擦系数趋于恒定, 且均小于 0.1.

### 参 考 文 献

- 1 Y. Fu, A. W. Batchelor. Laser alloying of aluminium alloy AA6061 with Ni and Cr. Part Ⅱ. The effect of laser alloying on the fitting wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, 1998, **120**: 119~ 126
- 2 Liang Gongying, He Belin, Su Junyi *et al.*. Microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-WC coating on aluminium alloy. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(10): 950~ 954 (in Chinese)
- 3 M. Pierantoni, J. D. Wagniere, E. Blank. Improvement in the surface properties of Al-Si cast alloys by laser surface alloying. *Materials Science and Engineering*, 1989, **A110**: L17~ L21
- 4 D. K. Das, K. S. Prasad, A. G. Paradkar. Evolution of microstructure in laser surface alloying of aluminium with nickel. *Materials Science and Engineering*, 1994, **A174**: 75~ 84
- 5 A. Almeida, M. Anjos, R. Vilar *et al.*. Laser alloying of aluminum alloys with chromium. *Surface and Coatings Technology*, 1995, **70**: 221~ 229
- 6 G. Y. Liang, T. T. Wong. Microstructure and character of laser remelting of plasma sprayed coating (Ni-Cr-B-Si) on Al-Si alloy. *Surface and Coatings Technology*, 1997, **89**: 121~ 126

## Effect of Amorphous Structure in the Laser Clad Zone on Tribological Characteristics

Liang Gongying<sup>1</sup> Huang Junda<sup>2</sup> Su Junyi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049; <sup>2</sup>The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

**Abstract** Using a 5 kW CO<sub>2</sub> laser, a Ni-Cr-Al plasma coating on Al-Si alloy surface was remelted as a cladding layer. The microstructural analysis showed that there are some amorphous structures in the clad zone that co-exist with crystalline Ni<sub>3</sub>Al. A semi-quantitative method using DTA was used to determine the content of amorphous structure in the zone. Wear tests of laser clad samples using different amorphous contents paired with grey cast iron were carried out under oil lubricated condition. Experimental results show that the wear amount of laser clad samples was quite small. The higher the content of amorphous structure, the smaller the wear amount. All friction coefficients of the clad samples versus grey iron pairs tended to stability and they were less than 0.1 after the sliding distance exceeded 2 km.

**Key words** aluminium alloy, laser cladding, amorphous structure, friction