

[文章编号] 1004- 0609(2001)S2- 0195- 04

# 陶瓷相对锌铝基合金激光重熔区表面硬度的影响<sup>①</sup>

严彪<sup>1</sup>, 徐政<sup>1</sup>, 殷俊林<sup>2</sup>, 卢斌<sup>3</sup>

(1. 同济大学材料学院, 上海 200092; 2. 上海市金属功能材料重点实验室, 上海 200940;  
3. 中南大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

**[摘要]** 以 Zr-35% Al 合金为研究对象, 研究了陶瓷相对锌铝基合金激光重熔区表面硬度的影响。结果表明: 含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷表层经激光处理后的显微硬度高于表层不含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷直接激光处理的试样, 并在过渡区出现了第二个硬度峰值。采用 AES, TEM 分析发现, ε-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相的存在是造成这一结果的主要原因。

**[关键词]** 激光重熔; 金属基陶瓷复合; 锌铝基合金

**[中图分类号]** TG 174

**[文献标识码]** A

锌铝基合金是一种新型的耐磨合金材料, 并已得到了极其广泛的应用。

激光表面处理工艺已是一项非常成熟的工艺, 它可对 Fe, Cu, Al, Ni 基合金的表面进行激光硬化、激光表面合金化, 激光熔凝处理, 从而使材料表面获得优良的性能<sup>[1~7]</sup>。等离子喷涂氧化铝加激光重熔工艺已有学者在 W<sub>18</sub>Cr<sub>4</sub>V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷复合材料上应用成功<sup>[8]</sup>, 但尚未有上述工艺在锌铝基合金上使用的报道。作者主要研究了激光熔凝和等离子喷涂氧化铝加激光重熔过程中表层显微硬度的变化、陶瓷相对激光重熔区显微硬度的影响。

## 1 实验过程及方法

### 1.1 实验过程

基体材料制备 → 切割成直径为 49 mm, 高度为 20 mm 的试样 → 试样表面磨光(磨到 06<sup>#</sup> 金相砂纸) → 表面等离子喷涂 α 型 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷 → 表面激光重熔 → 分析取样 → 金相观察 → SEM 分析 → TEM 分析 → 标定 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相的结构。

### 1.2 实验设备

实验采用 Leica 金相显微镜、XL30 FEG 场发射电子显微镜(带 EDAX)和 H-700 型透射电镜进行重熔区的组织结构、相成分和相结构分析。激光重

熔采用上海光机所自制横流 5 kW 级 CO<sub>2</sub> 激光器。

### 1.3 实验参数

基材成分: Zr-35% Al-RE(铸态); 喷涂工艺参数: 工作气体为 Ar, 电弧电压为 65 V, 电弧电流为 600 A, 喷涂厚度为 0.30 mm, 喷涂距离为 120 mm; 激光工艺参数: 束斑直径为 3 mm, 激光功率为 2.5 kW, 扫描速度为 50 cm/min; TEM 制样工艺参数: 电解液为 10% 高氯酸酒精溶液, 电压 50 V, 电流 30 mA。

## 2 结果和讨论

### 2.1 重熔区的形貌

表面涂覆 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的锌铝合金试样经过激光处理后, 在激光扫描的轨迹上形成重熔区, 重熔区的形貌如图 1 所示。从图中可以看出: 经激光处理后, 试样上形成了近似半圆形的重熔区, 将重熔区置于金相显微镜下观察, 发现重熔区中根据晶粒尺寸的差异可以明显地分为两部分, 分别为细晶区和基体区, 从图 1 中可见, 在整个重熔区中细晶区处于靠近表面的位置, 而过渡区则处于细晶区和基体区域之间, 其晶粒大小介于该两者之间。细晶区和过渡区的形貌见图 2 和图 3。已有的研究表明<sup>[9, 10]</sup>: 细晶区中晶粒尺寸比基体中的晶粒尺寸明显细小。从图 3 可见: 在过渡区中同时存在胞状晶和细化的树枝状晶。这是由于 ε-β 相(边界相和近边界相)在

① [基金项目] 上海市金属功能材料研究、应用及开发重点实验室资助项目(200004316)

[收稿日期] 2001- 04- 02; [修订日期] 2001- 07- 03

[作者简介] 严彪(1961- ), 男, 高级工程师, 在职博士生。

激光重熔时瞬间高温加热和激冷所致<sup>[9]</sup>。基体区的SEM照片见图4。过渡区中的胞状晶和基体中的胞状晶相比有二个不同点：1) 过渡区中 $\alpha$ 相胞状晶的尺寸相对于基体中 $\alpha$ 相胞状晶尺寸较小；2) 基体区中的 $\alpha$ 相胞状晶与边界相 $\beta$ 、 $\epsilon$ 相十分明显，而过渡区中的 $\alpha$ 相胞状晶比较明显但边界相则为细化的树枝晶。

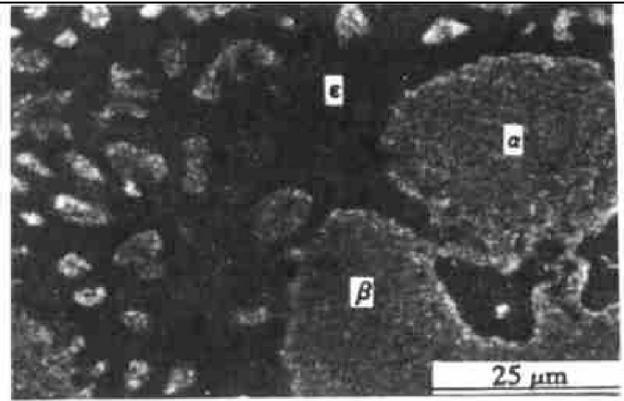


图4 基体区SEM照片

Fig. 4 SEM image of matrix

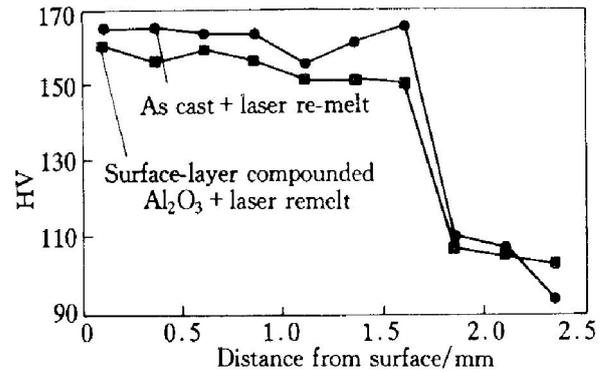


图5 不同工艺对重熔区显微硬度的影响

Fig. 5 Effects of different technics for microhardness on laser remelt pool

度值(Zr-35% AlRE 铸态的显微硬度在 HV90~ 110 之间)。但在等离子喷涂氧化铝加激光重熔过程中，重熔区的显微硬度值除了高于铸态加激光重熔工艺的显微硬度值外，在过渡区又出现了一个明显的硬度峰值(多次实验均证实这一点，但一般表面硬度值要高于第二个硬度峰值)。为了探索其原因，我们采用 AES 和 TEM 技术对等离子喷涂氧化铝加激光重熔试样的过渡区进行了研究。AES 的分析结果见图6。图中可明显发现有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相存在，由于 AES 只能分析出成分而不能确定其结构，于是，采用 TEM 技术对过渡区的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相的结构进行分析，结果见图7，图8。

图8中3个不同方向入射束的衍射斑点均证实了在过渡区中存在的陶瓷相为 $\delta$ 体心四方结构 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相，由于其具有很高的硬度，因此在离子喷涂氧化铝加激光重熔的显微硬度曲线上会出现第二个硬度峰值。同理，铸态加激光处理后试样的硬度曲线上不会出现第二个硬度峰值。文献[1~ 3, 8, 9]表明钢、铁中表层激光处理后也会出现第二个峰值，但其形成的原因是完全不同的。钢、铁中出现

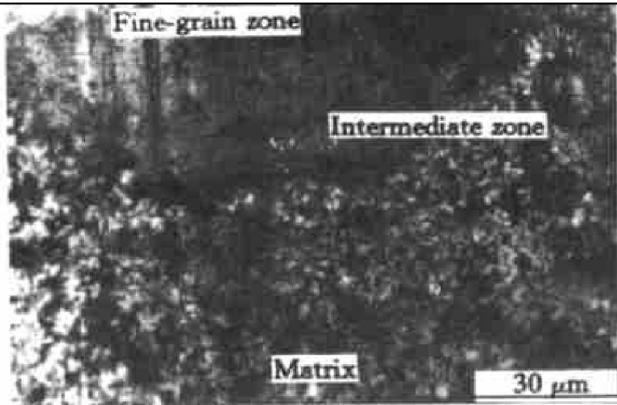


图1 重熔区金相形貌

Fig. 1 Morphology of laser remelt pool

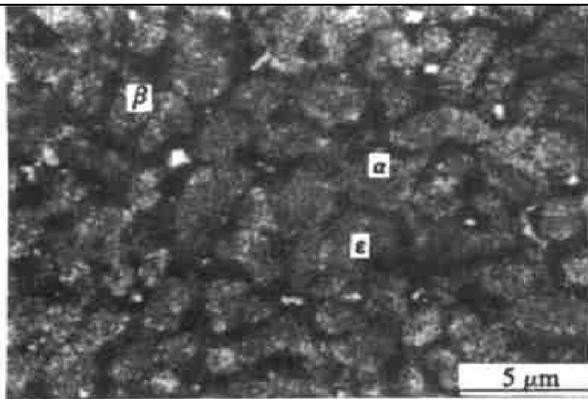


图2 细晶区SEM照片

Fig. 2 SEM image of fine-grain zone

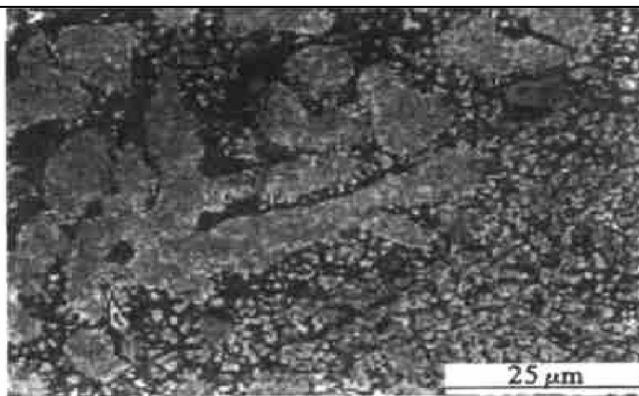


图3 过渡区金相组织形貌

Fig. 3 SEM image of transitional zone

### 2.2 激光重熔区的显微硬度

在图5中，我们看到经铸态加激光重熔工艺处理后，重熔区的显微硬度与文献[1~ 3, 6~ 8, 11]显示的曲线形状相同，由表及里，显微硬度逐渐下降。在过渡区后，显微硬度便急剧下降至基体的硬

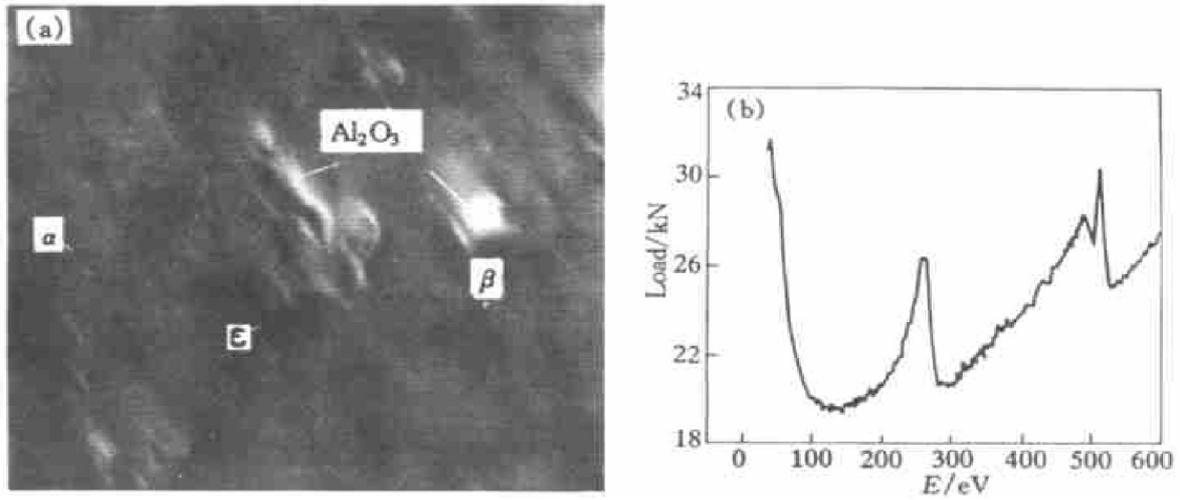


图 6 激光重熔后过渡区 AES 图

Fig. 6 AES image for transitional zone after laser remelting

(a) —AES image of intermediate zone; (b) — $\text{Al}_2\text{O}_3$  characteristic peak value

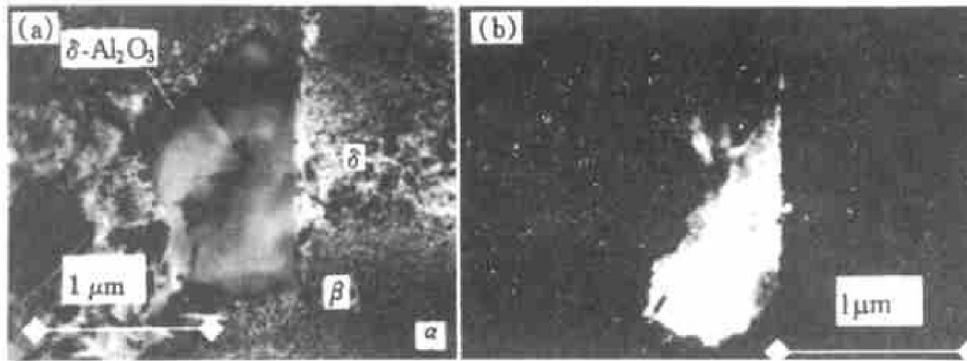


图 7 激光重熔区的 TEM 像

Fig. 7 TEM images of laser remelt pool

(a) — $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  bright field; (b) — $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  dark field

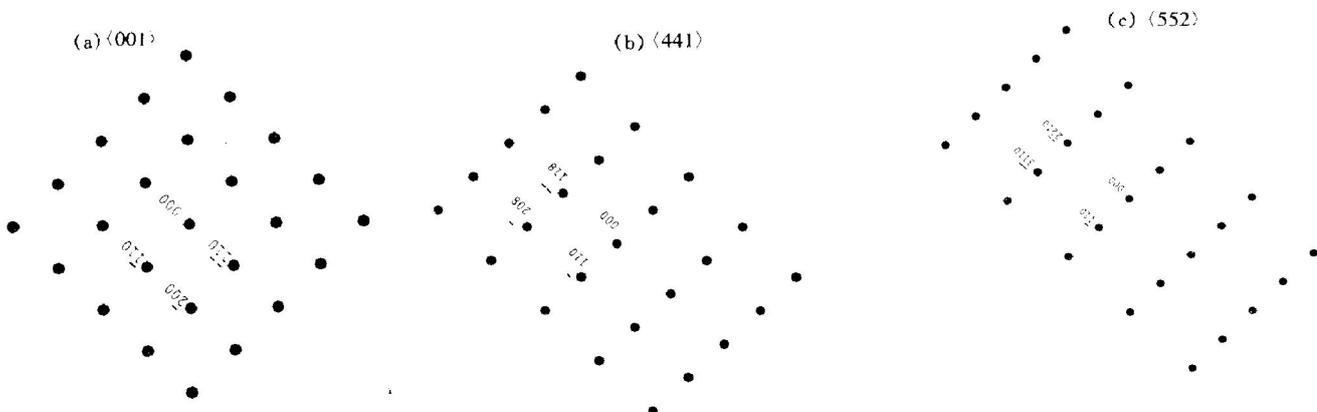


图 8  $\delta$  体心四方结构  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相不同方向的选区衍射点阵

Fig. 8 Selected area diffraction patterns observed with direct beam along  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 441 \rangle$ ,  $\langle 552 \rangle$  directions of  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  phase in intermediate zone

(a) — $\langle 001 \rangle$ ; (b) — $\langle 441 \rangle$ ; (c) — $\langle 552 \rangle$

第二个峰值是在激光处理后回火过程中出现的, 其原因是由于马氏体或残余奥氏体在回火过程中转变为回火组织所致。而且, 钢、铁材料经激光固态加

热处理后的 HV 增量达  $1666^{[3]}$ , 而氧化铝陶瓷的 HV 增量十分有限(本文中约为  $15 \sim 20$ ), 故其在过渡区中的作用将被基体的变化所掩盖。那么为何在

研究条件下, 过渡区中出现的是  $\delta$  体心四方结构  $Al_2O_3$  相的陶瓷相而非其它结构的氧化铝陶瓷相呢? 笔者以为这与激光重熔过程中熔池的温度场有关。笔者将以此为契机, 继续研讨温度场与  $\delta$  体心四方结构  $Al_2O_3$  相的关系。

### 3 结论

1) 含  $Al_2O_3$  陶瓷表层激光处理后的试样硬度高于未含  $Al_2O_3$  的试样, 且在过渡区出现了第二个峰值。

2)  $\delta$  体心四方结构  $Al_2O_3$  相的存在是造成显微硬度曲线中第二个峰值的主要原因, 与其它材料激光处理后出现第二硬度峰值的机理是不同的。

#### [ REFERENCES ]

[ 1 ] WANG Jia-jin(王家金). Laser Processing Technology(激光加工技术) [ M ]. Beijing: China Measurement Press, 1992. 186- 330.

[ 2 ] ZHOU Yao-he(周尧和), HU Zhuang-lin(胡壮麟), JIE Wan-qi(介万奇), et al. Solidification Technology(凝固技术) [ M ]. Beijing: China Machinery Industry Press, 1998. 294- 303.

[ 3 ] LIU Jiang-long(刘江龙), ZOU Zhi-rong(邹至荣), SU Bao-rong(苏宝荣), et al. Heat Treatment by High Energy Beam(高能束热处理) [ M ]. Beijing: China Machinery Industry Press, 1997. 87- 306.

[ 4 ] TAO Jir-song(陶劲松), TANG Qi(唐琦), YAN Biao(严彪), et al. 金属基复合陶瓷层的应用于研究 [ J ]. Shanghai Nonferrous Metals(上海有色金属), 1999, 20(3): 121- 126.

[ 5 ] WANG Jun(王军), YAN Biao(严彪), XU Zheng(徐政), et al. 金属基复合材料的发展和未来 [ J ]. Shanghai Nonferrous Metals(上海有色金属), 1999, 20(4): 48- 192.

[ 6 ] PAN Qing-yue(潘清跃), LI Yar-min(李延民). 不锈钢激光表面熔凝处理的组织特征 [ J ]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1996, 32(7): 718- 722.

[ 7 ] LI Yar-xiang(李言祥), MA Jian(马剑). 铝基体表面等离子喷涂后激光二次熔覆陶瓷层的研究 [ J ]. Applied Laser(应用激光), 1998, 18(6): 245- 248.

[ 8 ] CHEN Chuan-zhong(陈传忠), CAO Hua-hua(曹怀华), LEI Ting-quan(雷廷权), et al.  $Al_2O_3$ -CoCrAlY 复合陶瓷激光熔覆层的组织与性能 [ J ]. Journal of the Chinese Ceramic Society(硅酸盐学报), 1999, 27(4): 445- 451.

[ 9 ] WANG Jun(王军), YAN Biao(严彪), XU Zheng(徐政), et al. 激光重熔的锌铝基  $Al_2O_3$  陶瓷复合层形貌及成因 [ J ]. Journal of Building Materials(建筑材料学报), 2000, 3(4): 349- 354.

[ 10 ] YAN Biao(严彪), XU Zheng(徐政). 锌铝基  $Al_2O_3$  陶瓷复合层上激光重熔区的相组成及成因 [ J ]. Shanghai Nonferrous Metals(上海有色金属), 2000, 210(4): 188- 192.

[ 11 ] YAO Jian-hua(姚建华). 铝合金激光表面处理技术及其发展 [ J ]. New Technology and Process(新技术新工艺), 1994, 1: 39- 41.

## Effect of $Al_2O_3$ phase on microhardness of laser remelting area of Zr-Al based alloy

YAN biao<sup>1</sup>, XU zhen<sup>1</sup>, YIN Jun-ling<sup>2</sup>, LU Bin<sup>3</sup>

- (1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;
2. Shanghai Key Lab. for Research & Developing & Applications of Metallic Functional Materials, Shanghai 200940, P. R. China;
3. Department of Materials Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China)

**[ Abstract ]** The effect of  $Al_2O_3$  phase on the microhardness of laser re-melting area of Zr-Al based alloy was studied. The results show that the microhardness of sample contained  $Al_2O_3$  phase after laser re-melting has higher value than that of treated directly with laser beam. The reason for the occurrence of second hardness peak is the delta aluminum oxide(tetragonal) existing on the transitional area.

**[ Key words ]** laser remelting; metal matrix composites(MMC); Zr-Al based alloys

(编辑 朱忠国)