

文章编号: 1001-3806(2004)06-0565-04

铸造铝合金激光表面合金化的研究

周龙早, 刘顺洪, 黄安国, 李志远

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 将 Ni-Cr 合金粉末用有机粘接剂调成膏状涂在铸造铝合金 ZL108 基体上, 然后采用 CO₂ 激光进行激光表面合金化处理。通过选择合理的工艺参数, 在基体表面获得冶金结合性能良好的合金化层。利用光学显微镜、扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射仪对合金化层的显微组织结构进行详细的研究。结果表明, 合金化层由 Ni-Al 金属间化合物组成, 并且呈点状、弥散分布在 Al-Si 共晶基体上。合金化层的显微硬度可达到 230HV 左右, 比基体材料提高大约 3 倍; 耐磨性比基体提高 2 倍左右。

关键词: 激光表面合金化; Ni-Cr 合金粉; 铸造铝合金; Ni-Al 金属间化合物

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Laser surface alloying of cast aluminium alloy with Ni and Cr

ZHOU Long-zao, LIU Shun-hong, HUANG An-guo, LI Zhi-yuan

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

Abstract: Ni-Cr powder was mixed into paste with a organic binding agent and then painted onto the surface of cast aluminium alloy ZL108 for laser surface alloying using CO₂ laser. With optimum process parameters, the alloyed layer with good metallurgical bonding performance is formed. The microstructure characteristics of alloyed layer are investigated by using OM, SEM, EDAX and XRD. The results show that the alloyed layer is composed of inter-metallic compounds of Ni-Al, which is some particles dispersed on the substrate of Al-Si mutual crystal. The micro-hardness of alloyed layer can reach up to 230HV, which was three times higher than that of the substrate materials. The relative wear resistance is about two times higher than that of the substrate materials.

Key words: laser surface alloying; Ni-Cr powder; cast aluminium alloy; intermetallic compounds of Ni-Al

引 言

铸造铝合金由于具有低密度、高比强、热导率高、延展性能和耐腐蚀性能优异等优点, 在汽车、航空等工业部门中获得广泛的应用。但是, 由于传统的铝合金硬度低、耐磨性差等因素极大地限制了铸造铝合金的应用。铝不具有同素异形转变, 所以不能像铁碳合金一样通过固态相变来提高铝合金的硬度。为了提高铝合金的硬度, 除了从冶金方面添加合金元素的途径来达到之外, 还可以通过表面改性来实现。铝合金的表面改性(或者叫做表面处理)包括合金化、熔覆等工艺, 例如激光合金化、激光熔覆等。铝合金的激光表面合金化是指在激光光源的辐

照下将 Fe, Ni, Cr, B, Si 等合金元素熔入铝合金基体, 形成与基体具有优异冶金结合性能的合金化层。由于 Fe-Ni 等合金化元素与 Al 形成细小弥散分布的金属间化合物强化相, 达到提高铝合金表面硬度, 改善耐磨性能的目的。由于激光能量的可控性好, 合金化层与基体的结合性能好等优点, 因此, 激光表面合金化得到广泛的研究和应用^[1~4]。

作者采用 CO₂ 激光器对铸造铝合金 ZL108 进行 Ni-Cr 表面合金化处理。采用预置涂层法, 将 Ni-Cr 合金粉末用有机粘接剂调成膏状涂在铸造铝合金基体上, 然后采用 CO₂ 激光进行激光表面合金化。通过选择合理的工艺参数, 在基体表面获得冶金结合性能良好的合金化层。利用光学显微镜、扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射仪对合金化层的组织和性能进行了详细的研究。

1 试验方法

1.1 试验材料

作者简介: 周龙早(1973-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事材料激光加工、焊接工艺及机器人在焊接中的应用方面的教学和研究工作。

E-mail: hustzlj @163.com

收稿日期: 2003-11-11

试验的基体材料采用铸造铝合金 ZL108,其化学成分如表 1 所示。试样加工成 50mm × 50mm × 30mm 和 50mm × 50mm × 10mm 两种规格,用砂纸打磨干净,用丙酮清洗后待用。合金粉末选用 Ni 和 Cr 金属粉末,混合比例为 $m(\text{Ni})/m(\text{Cr}) = 4/1$ 。粘接剂采用有机粘接剂聚乙烯醇。Ni-Cr 合金以 4/1 的质量比充分混合均匀后,用有机粘接剂聚乙烯醇调成膏状,采用预置涂层法均匀地涂在用砂纸打磨干净并用丙酮清洗的 ZL108 基体上,经 180 °C 等温固化 2h 后待用。

Table 1 The chemical composition of ZL108

element	Al	Si	Mg	Cu	Ni	others
mass fraction / %	82.0~	11.0~	0.8~	0.5~	0.5~	<0.7
	86.8	13.0	1.3	1.5	1.5	

1.2 试验设备

试验设备包括:武汉华工激光工程有限公司生产的 5kW CO₂ 横流激光器, XJL-02A 型立式金相显微镜, Olympus 数码光学显微镜, 日本 JEOL 公司的 JSM-5510LV 型 SEM, Falcon-EDAX, D/max-rA 型 X 射线衍射仪和 SHIMADAZU 显微硬度计, 简易磨损试验机。

1.3 工艺参数

激光表面合金化工艺参数包括激光功率、扫描速

度、光斑直径、保护气体、涂层厚度等,如表 2 所示。

Table 2 The process parameters of laser surface alloying

alloy powder	thickness of coatings / mm	laser power / kW	scan velocity / (mm s ⁻¹)	scan numbers	shield	laser spot / mm
$m(\text{Ni}) : m(\text{Cr}) = 4/1$	0.2	3.5	5.0	single, multiple	Ar	3
	0.5	3.8	12.5	single, multiple		
	1.0	4.0	20.1	single, multiple		

2 试验结果及讨论

2.1 合金化层的显微组织结构

激光合金化层的平均厚度可以达到 1.0mm 左右,合金化区域的显微组织从合金化层表面到基体可以分为 3 层。第 1 层为熔凝合金化区,微观组织如图 1a 所示,为典型的胞状晶,其形成原因主要是由于激光加热和冷却的瞬时性,使得熔化区发生急速冷却,晶粒来不及长大而形成胞状晶结构。此时,加入的 Ni-Cr 等合金化元素与 Al 形成的金属间化合物由于熔点较高而优先形核结晶。因此,金属间化合物首先形核,然后在其周围形核长出 Al-Si 共晶。图 1a 所示的 Al-Si 共晶基体上呈点状弥散分布



Fig. 1 Microstructure of alloyed layer and substrate by OM

a — alloyed layer b — interface of alloyed layer/ substrate c — substrate

的颗粒物为 Ni-Al 金属间化合物强化相,通过硬度试验表明,这大大提高了合金化层的硬度。第 2 层为合金化区与基体的界面过渡区,微观组织为靠近熔化合合金化区一侧的枝状晶区和靠近基体材料的胞状晶区,如图 1b 所示。这种枝状晶加胞状晶组织结构的形成原因可分析如下:在接近基体材料的半熔化区内的未熔化质点首先形核,由于基体铝合金导热率大,传热最大,温度梯度大,冷速大,晶粒来不及生长,形成胞状晶结构;随着结晶向合金化区表面进行,在靠近熔化区一侧由于处在熔融区与基体材料之间,冷速变缓,枝晶生长得到发展,形成枝状晶结

构组织。第 3 层为基体组织,如图 1c 所示,组织为 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体加晶间分布的共晶 Si (灰色)。根据图 1 可以看出,合金化区域的组织具有如下特点:合金化层的组织细密,基体区的组织粗大。这主要是由于合金化区表层材料被激光快速加热和冷却,发生非平衡组织转变,即组织转变是在极大的过热度 and 过冷度的条件下完成的,此时晶粒的形核率大大提高,因此组织明显细化,呈微细针状,而且位错密度较大。这样的组织结构具有较好机械性能,例如,强度和硬度都有较显著地提高。同时,由于基体材料为铸造组织,其晶粒粗大,而且冶金结合性能差,空

隙率较大,甚至会形成孔洞,因此基体的机械性能较差。

2.2 合金化层 SEM 及 EDAX 分析

利用 SEM 对合金化层作进一步的相结构分析,同时利用 EDAX 能谱分析确定合金化层微区的化学成分。合金化层的 SEM 分析结果如图 2 所示,结合 EDAX 分析(见图 3 和表 3)可以确认,所有组织中均含有较平均的 Al 元素,白色相中富 Ni,以铝镍金属间化合物为主;灰色相中富 Cr 且晶粒中心有微小亮点,以 Al-Cr 固溶体为主;黑灰色相中富 Si,为 Al-Si 固溶体和铝硅金属间化合物。对图 2 所示的合金化

层 SEM 微观组织进行深入分析,可得如下现象和特点:首先,合金化层的组织较基体材料明显细化,从合金化层表面到基体晶粒大小呈增大趋势,组织结构形态的分布为胞状晶、枝状晶、胞状晶 3 种方式。其中,合金化区为明显的细小胞状晶,如图 2a~图 2d 所示;合金化层与基体的界面过渡区为较细枝状晶加胞状晶的组织结构,如图 2e 所示;基体材料区为较粗大的 Al-Si 共晶区,如图 2f 所示。其次,从合金化表层到过渡区的 Ni-Al 金属间化合物的分布逐渐减少,如图 2a~图 2e 中呈点状、弥散分布的白色亮点的分布所示。

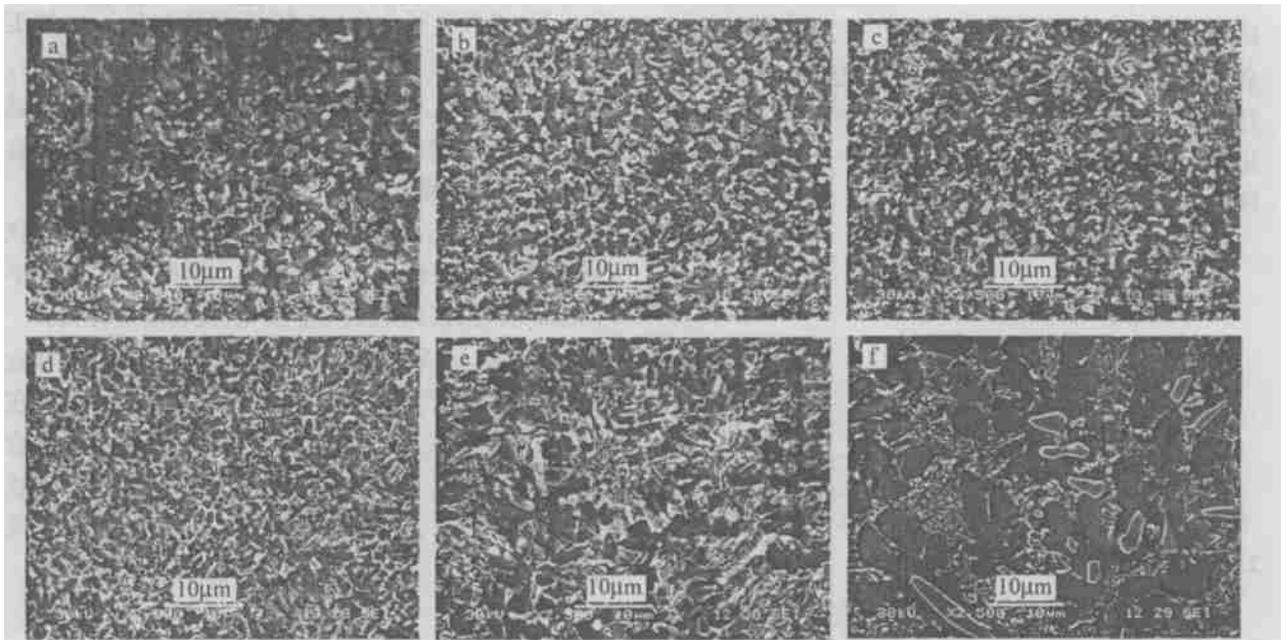


Fig. 2 Microstructure of alloyed layer and substrate by SEM

a—20µm from surface b—200µm from surface c—500µm from surface d—700µm from surface e—interface of alloyed layer/ substrate f—substrate

合金化层的 EDAX 分析结果如图 3 所示,合金化层主要由 Al, Si, Ni, Cr 等元素组成,各元素的相对含量如表 3 所示。结合图 2、图 3 和表 3 可知,铸

造铝合金激光表面 Ni-Cr 合金化后,在合金化层中形成了 Ni-Al 金属间化合物。具体形成哪些 Ni-Al 金属间化合物还需要通过 XRD 进一步分析确定。

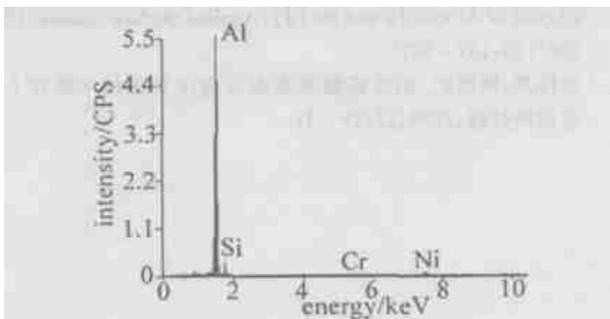


Fig. 3 EDS result of alloyed layer

Table 3 Composition of alloyed layer

element	Al	Si	Cr	Ni
mass fraction/ %	75.69	19.67	0.78	3.87

2.3 X 射线衍射分析

将试样表面磨平,用 X 射线衍射分析仪进行物相分析,实验条件为 Cu 靶 K α , Ni 滤波片,扫描速度 2($^{\circ}$)/min,扫描范围 20 $^{\circ}$ ~80 $^{\circ}$ 。衍射图谱如图 4 所

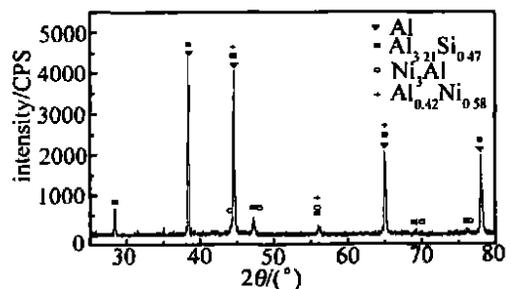


Fig. 4 X-ray diffraction result of alloyed layer

示,可知合金化层主要是由 Ni_3Al 和 $\text{Al}_{0.42}\text{Ni}_{0.58}$ 等相组成。

2.4 合金化层的显微硬度

合金化层的硬度测试采用 SHIMADAZU 显微硬度计,载荷为 0.98N,保荷时间为 10s。试验结果表明,铸造铝合金激光 Ni-Cr 表面合金化层的硬度比基体明显增大。图 5 所示为合金化层的显微硬度沿合金化层深度方向的分布规律。合金化层的显微硬度约为 230HV,基体的显微硬度值为 80HV,合金化层的硬度大约为基体硬度的 3 倍左右。合金化层的硬度分布较均匀,这可能与 Ni-Al 金属间化合物强化相呈点状均匀分布有关。随着深度的增加,Ni-Al 金属间化合物的形成减少,表现在硬度相应地减小。合金化层与基体界面的过渡区域,硬度相对于合金化区有明显的减小。随着进深度一步增加,硬度急剧减小,直至达到基体硬度。

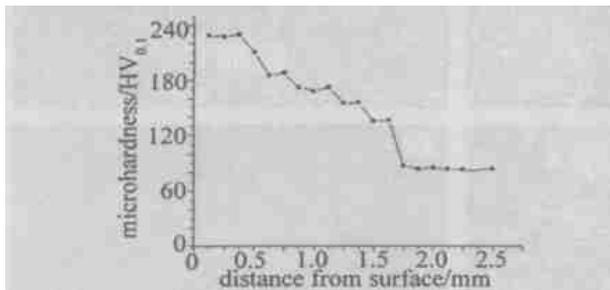


Fig. 5 Microhardness distribution along the depth of the alloyed layer

2.5 磨损试验

采用简易磨损试验机对基体材料和合金化处理 2 种材料作对比试验。磨损时间共 30min,每隔 5min 用分析天平测量磨损量。图 6 为两种试样的对比磨损试验曲线。材料的相对耐磨性能用磨损速率来表示。定义磨损速率 $S = W/t$ (g/min),即单位时间内的磨损消耗量来表示材料的磨损速率。由图可知,激光合金化后材料的耐磨性能大大提高。基体材料 ZL108 的平均磨损速率 $S_1 = 0.0376$ g/min,合金化试样的平均磨损速率 $S_2 = 0.0209$ g/min。合金化后材料的相对耐磨性比基体提高 2 倍左右。

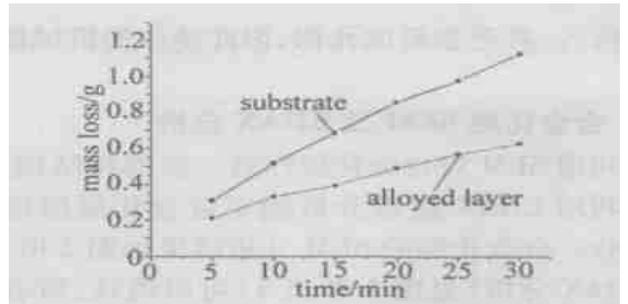


Fig. 6 Abrasive wear test curve

3 结论

(1) 采用激光表面 Ni-Cr 合金化,在激光功率为 3.5kW,光斑直径为 3mm,扫描速度为 6mm/s 的工艺参数下,合金化层的深度一般可达 1.5mm 左右。激光功率越大,扫描速度越小,合金化层的深度就越大。但是,激光功率一定的情况下,减小扫描速度会使合金化层的硬度降低。

(2) 激光合金化处理后,合金层组织多为胞状枝晶,而且由于激光加热和冷却的瞬时性,发生非平衡组织转变,因此组织明显细化,位错密度较大。

(3) 经 EDAX 和 X 射线衍射分析可以确定合金化层中主要是形成 Ni-Al 金属间化合物强化相,在 Al-Si 共晶基体上呈点状、弥散分布,有利于提高合金化层的硬度。结果表明,合金化层的显微硬度达到 230HV 左右,比基体硬度提高 3 倍左右,耐磨性提高大约 2 倍。

参考文献

- [1] 袁 斌,龚知本,沈书泊 *et al.* 铝硅钛合金表面激光合金化研究 [J]. 应用激光,1999,19(1):4~6.
- [2] FU YQ, BATCHLOR A W, GU YW *et al.* Laser alloying of aluminum alloy AA6061 with Ni and Cr (Part 1) — Optimization of processing parameters by X-ray imaging [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 99:287~294.
- [3] IBNATIVE M, DUPUY C, SOLA X *et al.* Laser and electron beam alloying of Al with Fe and Sn [J]. Applied Surface Science, 1997, 109/110:137~142.
- [4] 唐传芳,冯燕武. 铝活塞激光表面合金化关键技术研究 [J]. 金属热处理, 1999, 12:29~31.