

文章编号: 1005-3026(2002)10-0964-04

铸造铝合金表面激光熔凝合金化改性

胡芳友^{1,2}, 温景林¹, 王茂才²

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国科学院 金属研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 将 NiCrSiNbB 合金粉末用聚合物调和成糊状并涂于 Al₃₁₉ 铸造铝合金试样表面, 用 CO₂ 激光以不同功率、不同的光斑移动速度处理涂层, 使其快速熔凝形成耐磨的合金化层。实验结果表明, 工艺参数严重地影响熔凝后合金化层的性能; 可得到显微硬度达 1 400 HV 的高硬度层; 选用合适的功率、光斑运动速度及预涂层厚度可得到单个处理轨迹、多道搭接处理及整个试样表面处理的无明显气孔、裂纹缺陷的组织细密的合金化层; 层内主要强化相为 AlNi 和不同比例的 Al₃Ni 金属间化合物。最终得到的表面合金化层的硬度比基体高 60 HV~100 HV, 其耐磨性与基材相比提高 3~5 倍。

关 键 词: 铸造铝合金; 激光熔凝; 合金化; 显微组织; 耐磨性
中图分类号: TG 156.99 **文献标识码:** A

铝硅合金具有优良的铸造性能、耐腐蚀性能、热传导性能和较低的热膨胀系数, 但随着硅质量分数的增加其强度及可加工性能明显下降。加入合金元素 Cu 可明显改善强度及加工性能, 同时增加材料的时效强化效果, 但其耐磨性及耐腐蚀性明显下降。作为汽车发动机的主要结构材料, 铝硅合金 Al₃₁₉ 的耐磨性能将明显影响发动机的使用寿命。为提高铝合金的耐磨性能, 人们应用激光加工技术在激光表面熔覆、激光表面重熔与合金化等方面已取得了相当的研究成果。其中, 应用快速熔凝合金化技术可以按照需要在铝合金表面加入合金元素、在改性层内产生期望的强化相, 从而提高材料的硬度及耐磨性能^[1~3]。

资料表明, 应用激光使 Ni 基合金粉末在铝合金试样表面与基体适当熔合、快速凝固可得到极高硬度的合金化改性层^[1~5]。其中, Ni 元素经激光合金化于铝合金表面可产生 AlNi, Ni₃Al 等强化相^[2~8], 可提高材料的耐磨、耐蚀性能; Cr 与 Al 可生成金属间化合物^[2~4, 9], 并提高耐蚀性能; Si 可以细化晶粒并与 Al 生成金属间化合物, 提高耐磨性^[10]; 加入 B 元素可提高 Al-Ni 合金中 Ni 的质量分数。在 Ni 基合金粉末的基础之上, 适当加入 Nb 成分以期在熔凝过程中产生难溶金属间化合物, 在结晶时形成非自发晶核而达到细化晶粒、

提高硬度和耐磨性的目的。因此本试验以 NiCrNbSiB 为合金元素, 应用连续式 CO₂ 激光为热源进行了激光表面快速熔凝合金化改性实验, 应用 SEM, XRD, EDX 等分析方法, 对不同工艺条件下获得的合金化层进行微观组织与结构分析, 通过对硬度及硬度变化规律测试、耐磨性试验等方法验证合金化层的性能。

1 实验方法

1.1 材 料

试件基体材料为 Al₃₁₉, 其成分(质量分数, %)为 Cu 3.5, Si 6.3, 其余为 Al。
合金粉末为 Ni 基合金与 Nb 粉末的机械混合物。

1.2 试验工艺

- (1) 合金粉末的预涂
- ① 充分混合合金粉末, 并在 Ar 环境下充分干燥, 打磨并清洁试样表面;
 - ② 用乙基硅酸盐 TES40 调和粉末、涂在试样表面(厚度为 0.3~0.5 mm); 固化涂层。
- (2) 激光处理
- 用 6 kW Trumpf CO₂ 激光器为光源, 激光处理工艺参数为: 功率(0.6~3) kW、扫描速度(0.3~0.8) m/min; 光斑重叠率 50%, 光斑周围由环

状氩气保护。

1.3 分析与测试手段

用光学显微镜和 EPM-80Q 电子探针显微镜观察合金化层的显微组织,并用能谱仪对合金化层进行线扫描、面扫描以分析微区成分与变化;在 (Rigaku)D/max-rA 型 X 光衍射仪上进行微观结构分析;用 HVA-5 显微硬度仪检测合金化层的硬度;在 MPX-2000 型盘销式摩擦磨损试验机上进行耐磨性试验,对磨盘材料为 QT700-2,润滑剂为

SE10W-30,磨损失重在光电分析天平上检测(分度值 0.01 mg)。

2 实验结果及分析

2.1 熔凝后合金化层的组织结构

经过对 3 种涂层厚度的试样用不同的激光功率、不同的光斑扫描速度进行合金化处理得到了单道、多道搭接和全试样表面合金化层,如图 1,图 2a 所示。

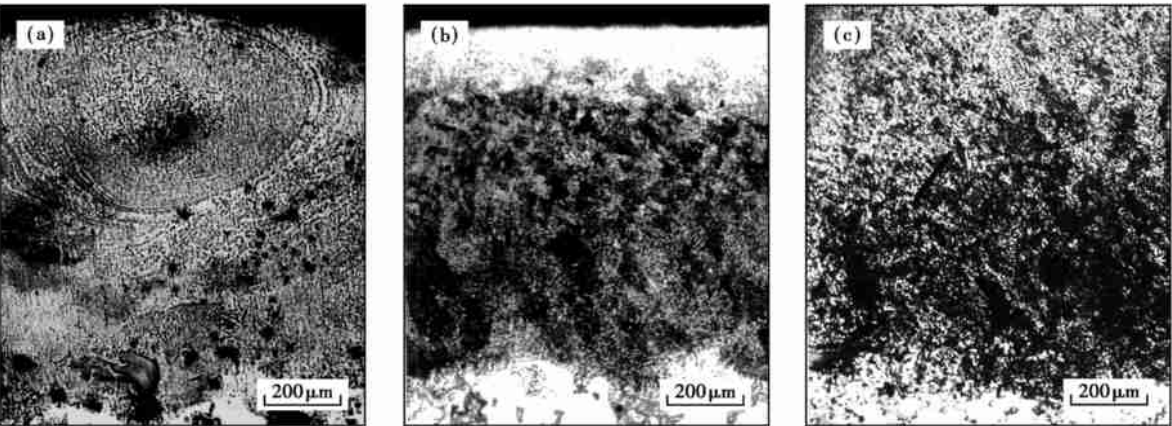


图 1 合金化层低倍显微组织
Fig. 1 Microstructure of alloying layer
(a) 一单道处理;(b) 一三道处理搭接区;(c) 一全表面处理。

由图 1 中可以看出,与基体材料相比合金化区域的晶粒已得到显著的细化,从图 2a 可以看出合金化层是由多相、晶粒尺寸为 3 μm 以下的组织组成。图 2 为最终合金化层元素面扫描图像,可以

看出,所有组织中均含有一定比例的 Al 元素,白色组织中富 Ni、富 Cu;灰色相中富 Cr 且晶粒中心有微小白点;黑灰色相含一定量的 Si。图 3 为合金化层 X 光衍射谱,从中可以看出合金化层中主

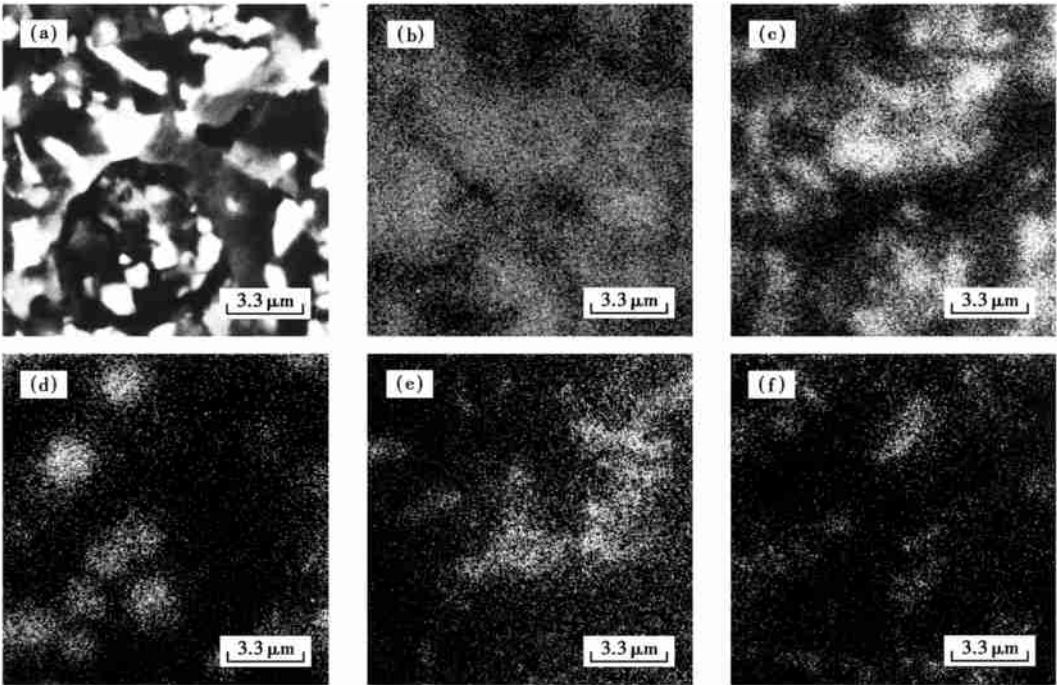


图 2 合金化层元素面分布
Fig. 2 Alloy element distribution in the alloyed layer
(a) -SEM;(b) -Al;(c) -Ni;(d) -Cr;(e) -Cu;(f) -Si。

要由 Al, AlNi 以及多种不同比例的 Al, Ni 金属间化合物和其他多种化合物组成,因此可推断白色相以 AlNi 及其他 Al, Ni 金属间化合物为主;灰色相为 Al-Cr 固溶体;黑灰色相为 Al, Al-Si 固溶体或 Al, Si 金属间化合物;Cu 以化合态存在于白色相和 Al 基体中;相间微小白点以及白、灰相中的点状物和其他极细粒状物可能是 Nb 与其他元素形成的金属间化合物。

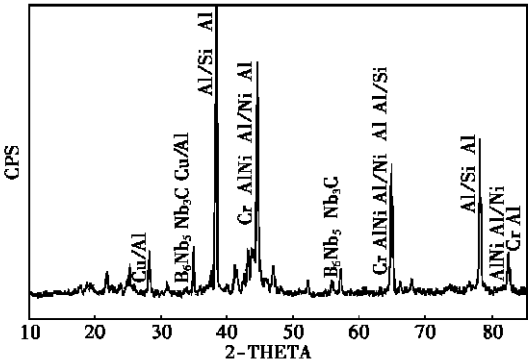


图 3 合金化层 X 光衍射图谱
Fig.3 X-ray diffraction of the alloying layer

综上,经激光熔凝处理,合金化层的组织主要是 Al 基体间存在 AlNi、不同比例的 Al、Ni 金属间化合物及其他多种反应物相,均匀分布的而且极细的反应物相对于表面改性层具有较好的强化作用。

2.2 合金化层的显微硬度与分布规律

根据检测结果可知,激光合金化工艺参数显著地影响合金化层的显微硬度。当预涂层厚度为 0.5 mm,激光功率为 1.53 kW,光斑运动速度为 0.762 m/min 时,合金化层表面硬度高达 1 400 HV;而随着激光功率的增加和光斑运动速度的降低,熔池中更多的来自基体的 Al 对硬化层起明显的稀释作用,硬化相比比例减少,硬度降低。图 4 为一个工艺条件下的合金化层硬度的分布规律,可以看出表层的硬度与基体相比有了较大的提高

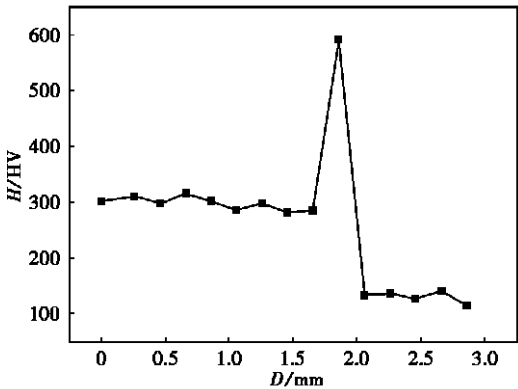


图 4 硬度分布规律
Fig.4 Hardness profile in the alloying layer

$p=1.96\text{ kW}, v=0.38\text{ m/min}$

(近 200 HV),最终全表面合金化层的硬度较基体提高 60~100 HV。

2.3 合金化层内的缺陷

在激光功率低、扫描速度小、预涂层厚度大的情况下,基体的金属没有被充分熔合,此时不能算作真正意义的合金化。低熔点金属蒸汽来不及逸出便被凝固在合金化层中,形成气孔。随着试样表面单位面积内所吸收能量的增加,基体充分熔合,熔池内金属液形成对流,使气泡有充分的时间逸出,气孔缺陷趋于减少。但是基体铝的过多熔入会使强化相数量减少,达不到提高表面耐磨性的最终目的。

2.4 合金化层的耐磨性

本试验采用盘销摩擦磨损对比试验验证合金化层的耐磨性。载荷为 50N,转数为 549 r/min,质量损耗在光电分析天平上进行。测试结果如图 5 所示。由试样质量损耗曲线可知,改性层的耐磨性与基体相比有了较大的提高。从对比试验前后试验件和对磨盘的表面形貌电镜分析结果也可以证明,相对滑动 2 500 m 后合金化层的表面凸峰均匀磨损,接触面积增加,对磨盘表面则被均匀犁平,出现均匀磨损,表现出合金化层良好的耐磨性;基体材料试样表面则可见明显的脱落颗粒,在其对磨盘上可见明显的 Al 基材料粘接,且对磨盘无明显磨损。

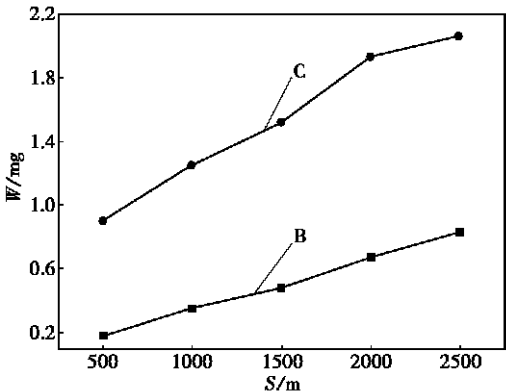


图 5 耐磨性试验曲线
Fig.5 Wear rate of the alloying layer and the substrate in oil lubrication

B—合金化层质量损耗;
C—基体材料质量损耗。

由试验结果可知合金化层的耐磨性与基材相比提高 3~5 倍。

3 结 论

(1) CO₂ 激光对 Al319 表面进行熔凝合金化处理,预涂粉末为 NiCrNbSiB,所得到的合金化层主要由 AlNi, 不同比例的 Al、Ni 金属间化合物及

其他多种反应相组成。

(2) 合金化层的显微硬度可高达 1 400 HV，无明显缺陷合金化层的显微硬度比基材高 60~100 HV，耐磨性提高 3~5 倍。

(3) 防止基材的过渡重溶，减少气孔缺陷，可采用加大重叠量或采用两次激光处理的方法。

致谢：本试验在美国 University of Michigan 完成，其间得到了 The Center for Laser Aided Intelligent Manufacturing (CLAIM) 成员的大力协助，在此深表谢意。

参考文献：

- [1] Steen W M. *Laser material processing (second edition)* [M]. London: Springer, 1998. 243—246.
- [2] Liang G Y, Li C L, Su J Y. Segregation phenomena of laser alloyed Ni-Cr-Al coating on Al-Si alloy[J]. *Materials Science Engineering*, 1997, 224A: 173—176.
- [3] Fu Y Q, Batchlor A W. Laser alloying of aluminum alloy AA 6061 with Ni and Cr Part II, The effect of laser alloying on the fretting wear resistance [J]. *Surface Coatings Technology*, 1998, (102): 119—126.
- [4] Fu Y Q, Batchlor A W, Gu Y W, *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.
- [5] Cai X, Yang X Y, Bu X M. Laser surface modification of Al-Si alloy-Laser surface alloying (LSA) [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1999, 33 (7): 36—40.
- [6] 梁工英, 贺柏龄, 苏俊义, 等. 铝合金熔覆 Ni-WC 涂层的组织与性能[J]. *中国激光*, 1998, 25A: 950—954.
(Liang G Y, He B L, Su J Y, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-WC coating on Aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25A: 950—954.)
- [7] 刘常升, 张滨, 李智, 等. 2024 铝合金涂敷 Ni、Fe 和 Cu 激光表面合金化[J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 1997, 18 (6): 610—612.
(Liu C S, Zhang B, Li Z, *et al.* Laser surface alloying of 2024 aluminum alloy with Ni, Fe and Cu [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1997, 18 (6): 610—612.)
- [8] 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.
(Tang C F, Feng Y W. Study on key technology of laser surface alloying of Al-piston [J]. *Heat Treating*, 1999, 12: 29—31.)
- [9] Almeida A, Anjos M, Vilar R, *et al.* Laser alloying of aluminum alloys with chromium [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1995, 70: 221—229.
- [10] Xu Z Y, Leong K H, Sanders P G. Laser surface alloying of silicon into aluminum casting alloys [J]. *Journal of Laser Applications*, 2000, 12: 166—170.

Laser Surface Alloying of Cast Aluminum Alloy with Ni-Cr-Si-Nb-B Powder Mixture

HU Fang-you^{1,2}, WEN Jing-lin¹, WANG Mao-cai²

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China. Correspondent: HU Fang-you, E-mail: fangyouhu@hotmail.com)

Abstract: A CW CO₂ laser is used to treat the sample surface for improving wear properties of Al³¹⁹. A two-step processing is employed. The results shown that alloying parameters affect the properties of the alloying layer greatly. In some case, the hardness of the layer can reach up to 1 400 HV. A perfect surface alloying layer can be achieved by choosing the appropriate laser power and traveling speed. The grains of the surface alloying layer are very fine. It consists of Al phase, AlNi and others Al/Ni intermetallic phases. The hardness of the alloying layer is generally 60~100 HV higher than substrate materials. The result of wear test indicates that wear resistance of the alloying layer is improved greatly.

Key words: cast aluminum alloy; laser; surface alloying; wear property; microstructure

(Received March 21, 2002)