

铝合金表面激光处理的三种工艺特点

赵文轸

(西安交通大学, 西安, 710049)

摘要: 表面重熔、表面合金化及表面熔覆是铝合金表面激光改质的三个主要方法, 各方法都有自己的特点, 但又有相关性。通过一系列实验可以对比性地了解这些工艺对铝合金表面组织的影响及强化效果, 这将对铝合金激光表面强化新工艺的研究和应用提供参考。

关键词: 铝合金 重熔 合金化 熔覆

Properties of three processes of laser surface treatment of aluminium alloy

Zhao Wenzhen

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

Abstract: Surface remelting, surface alloying and surface cladding are 3 essential processes in the surface modification of aluminium alloy by laser. They are distinctive, but there are some relations each other too. Through testing their microstructures and hardening effects are investigated and contrasted. The study can give guidance for the research and application of surface laser strengthening processes of aluminium alloy.

Key words: aluminium alloy remelting alloying cladding

一、引 言

为了提高铝合金表面的耐磨性, 近些年采用激光技术对其表面进行改性已有不少研究^[1-3]。众所周知, 铝合金不象钢铁那样可以通过固体相变来强化, 激光热处理对铝合金毫无效果。因此, 人们把注意力集中于激光重熔、合金化和表面熔覆。激光重熔是利用激光的高能率密度瞬间把表面薄层熔化, 由于处于低温基体有强的导热性, 造成大的过冷度, 使熔池瞬间凝固, 以得到超细晶粒而使表面强化。激光表面合金化是在重熔的过程中, 向熔池中加入适当的合金元素或陶瓷, 使凝固后富集于表面层中, 形成铝基高合金层以提高表面硬度。激光表面熔覆是把一层具有高硬度的合金或陶瓷用激光的能量熔覆到铝合金表面上, 即给原本软质的铝合金上焊覆一硬壳层。三种工艺都有其各自的特色。但若把这三种工艺综合起来研究, 了解其工艺特点、组织形貌, 评价其强化效果, 弄清其相关性, 对于铝合金激光表面改质技术的进一步研究开发和利用, 是很有意义的。

二、实 验 方 法

1. 实验用材

基体材料主要采用 ZL101, 这是一种中小型轻型发动机多用的铸造铝合金, 含 Si 质量分数 6%~8%, 含 Mg 0.2%~0.4%。加工成 $\phi 25.4\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的圆柱试样。端面为激光处理面。

Table 1 The powder components of Fe-Ni and Ni-Cr used for alloying

alloy name	alloy element (wt%)							
	Fe	Cr	Si	B	C	Al	Mo	Ni
Fe-Ni	remainder	5	35	35	0.6	0	5	30
Ni-Cr	3	20	3	3	0.1	1	0	remainder

2. 激光工艺

实验采用 2kW CO₂ 横流连续激光器。辐照时一般固定光斑直径 D 及输出功率 P , 通过变换扫描速度 v 来控制表面的熔化程度。激光重熔及表面合金化时取 $P = 1.5\text{ kW}$, $D = 3\text{ mm}$, 而在表面熔覆时取 $P = 1.4\text{ kW}$, $D = 1\text{ mm}$ 。

3. 组织和性能分析

组织分析是把激光熔化区纵剖制成金相试样后, 在光学显微镜和电子显微镜下进行观察。表面硬化效果采用显微硬度计进行测定。

三、试验结果及讨论

1. 铝合金表面激光重熔效果

激光重熔工艺很简单, 即用激光的能量把基体表面瞬间熔化, 然后自然凝固即可。不过这种急熔急凝现象是表面合金化和熔覆工艺中都不可避免的基本现象, 它对组织的影响和强化效果, 在这三种工艺中都有反映。

(1) 重熔对组织的影响 只要激光的功率密度和扫描速度高于某一值, 就可以在扫描的瞬间使铝合金表面熔化而基体内部不熔。显然不同的激光参数会得到不同的熔化程度, 但是, 熔池凝固结晶之后, 基本的组织形态是相似的, 如图 1 所示。图 1 中最下部是基体原来的等轴晶组织。紧接其上的是半熔化区或称过热区, 在此区域中平均温度达不到熔点但接近熔点, 但由于晶界处富集有低熔组元(例如 Mg), 局部被熔化。与过热区相接的就是熔化区。晶核首先在过热区未熔化的 $\alpha\text{-Al}$ 粒上形成, 由于该处有高的冷却梯度, 由结晶理论可知结晶只能以枝晶方式生长, 形成了柱状晶区。当枝晶发展到一定程度, 各方向的冷却速度趋于一致, 就出现了等轴晶区。但与通常的凝固所不同的是, 无论是枝晶区还是等轴晶区都是在非常高的过冷度下瞬间形成的, 因此, 晶粒都非常细小。图 2 是采用激光参数 $D = 3\text{ mm}$, $P = 1.5\text{ kW}$, $v = 10\text{ cm/s}$ 时得到的熔区组织。测量可知, 原晶粒约为 $50\mu\text{m}$, 重熔区为 5 mm , 重熔后的晶粒尺寸仅为原始晶粒的 10%。

实验发现, 激光参数的不同, 可以影响晶粒的粗细。在扫描速度一定时, 适当增大激光功率, 可使晶粒进一步细化, 但是若激光功率过大, 或者在功率一定的情况下, 扫描速度过小, 都会使晶粒尺寸增大。这是由于较多的能量向熔池的输入会使熔池温度过高, 导致其后的冷却速度减小所致。

表面合金化采用四种成分, 分别是 Si, Fe-Ni 合金(成分见表 1), WC 和 Al₂O₃ 粉末。

表面熔覆用合金粉末为 Ni-Cr 合金, 详细成分见表 1。

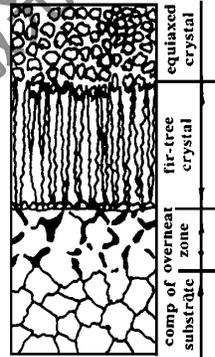


Fig. 1 The sketch of composition of aluminum alloy by laser remelting



Fig. 2 The surface composition of aluminum alloy by laser remelting
 $P = 1.5\text{ kW}$ $v = 10\text{ cm/s}$

用激光熔化铝合金表面产生的表层温度 T_s , 可通过下式来计算^[4]:

$$T_s = 0.848 P \eta / (\rho \cdot C_p \sqrt{D^3 v \alpha})$$

式中, P 为激光功率, η 为表面吸收率, ρ 为材料密度, D 为光斑直径, C_p 为材料的热容, v 为激光扫描速度, α 为材料的热扩散系数。该式定量地描述了表面温度和各工艺参数的关系。

(2) 重熔的强化效果 激光重熔区的硬度变化如图 3 所示。重熔后的表面使硬度较基体有了明显的提高, 对于含 6% Si 的 ZL101 提高了近 100%, 而对含 13% Si 的 ZL108 提高了约 130%, 整个重熔区硬度的分布是比较均匀的。

引起表面硬化的基本原因是晶粒的细化和固溶强化。其中固溶强化的效果尤其显著。实验中采用的铸铝合金, 影响固溶强化的主要元素是其中的 Si。对于纯铝, 重熔后

由于没有 Si 的固溶作用, 硬度仅能提高 30% 左右。由此可见, 重熔处理只有对含 Si 较高的铝合金才有较明显的效果。

2. 激光表面合金化效果

(1) 合金化对组织的影响 Si 的合金化是在激光扫描的铝合金表面熔池中加入 Si 粉。过多 Si 粉的加入使熔池中的 Si 含量大大超过了 Al-Si 合金的共晶成分, 因此, Si 不会再与 Al 形成共晶组织, 而是优先凝固孤立地分散于熔铝之中, 如图 4 所示, 形成过共晶 Al-Si 合金, Si 粒子大小尺寸与所加入的粉末尺度大致相当。大部分 Si 分布在等轴晶区, 但也有少数细小硅粒沉淀于柱状晶区的枝干上。

若在熔池中加入 Fe-Ni 多元合金粉, 这些合金元素与熔铝会发生化合反应, 形成一种新的 Fe-Ni-Al 多元合金。图 5 是其显微组织形貌。新型合金的生成使铝合金原来的重熔组织发生了重大变化, 柱状晶区变成了放射针状, 结晶方向已不完全与界面垂直, 呈现出针状马氏体的形态。分析发现, 灰针区含有 (wt) 36% Fe, 34% Ni, 27% Al, 2% Si 和 1% Cr, 白亮块区含有 61% Fe, 32% Ni, 2% Al, 1% Si 和 5% Cr。在这种急冷组织上分布有大量显微裂纹, 说明凝固时有较大的组织应力和热应力。

在熔池中加入金属化合物, 也是合金化的重要内容, 有人称此为复合化。图 6 是加入 WC 时的表面合金化组织形态。瞬时的激光扫描没能使这些粒子熔化, 因为如果调整激光能量使熔点 2867 °C 的 WC 熔化的话, 铝会因超过其 2400 °C 的气化温度而急剧蒸发。重熔时这些比重大的粒子会不断落入铝熔池, 机械性地嵌入铝的晶粒之间。由于落入的粒子量较少, 因此, 宏观上对铝合金的枝晶区和等轴晶区组织形貌都影响不明显。不过, 如果加入 Al_2O_3 粉末进行

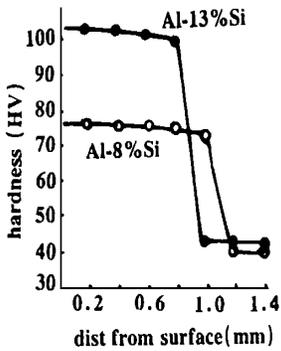


Fig. 3 The microhardness along depth at the zone of laser remelting of aluminium alloy



Fig. 4 The laser alloying with Si on the surface of aluminium alloy



Fig. 5 The laser alloying with Fe-Ni alloy on the surface of aluminium alloy



Fig. 6 The laser alloying with WC on the surface of aluminium alloy

合金化, Al_2O_3 熔点 $2000^\circ C$, 一般也不会熔化, 但是由较多的 Al_2O_3 粉粒落入并悬浮于(比重相近)熔池之中, 严重阻碍了枝晶的发展, 使枝晶区几乎消失, 整个合金化区都呈细小的等轴晶组织。用 $P = 1.5kW$, $D = 3mm$, $v = 10cm/s$ 的激光参数得到的 Al_2O_3 合金化晶粒, 尺寸约为 $1\mu m$, 大小仅相当原始晶粒的 2%。

上面介绍了实验过的几种合金化组织, 实际上即使对同一种合金化, 其精细组织还会受到激光参数, 添加方法和粉粒粗细等因素的影响而有所差异。

(2) 合金化的强化效果 表面合金化的强化是在激光表面重熔的基础上进行的, 一般情况下可以推定其强化效果会远远超过前者。

图 7 给出了几种合金化层硬度的测试值。由图中可以看出: (1) 合金化的强化效果可达铝合金基体的 6 倍以上, 比纯重熔强化作用大了 3 倍。如果进一步优化材料和工艺, 还可得到更高的强化效果。(2) 合金化对铝表面的强化不象纯重熔那样均匀, 硬度分布比较散乱。这是由于加入的合金粒子在瞬时不能达到均匀分布造成的。一般来说, 熔池的下部结晶较早, 因此粒子集聚也少, 硬度偏低。(3) WC 粒子本身虽有较高的硬度, 但其硬化作用反不及 Si 和 Al_2O_3 , 这是因为本实验中 WC 粒子加入量较少, 所测硬度值仅是其周围的铝合金的硬度, 但所嵌入的硬质 WC 颗粒本身对于抗磨性的提高作用是不能忽视的。

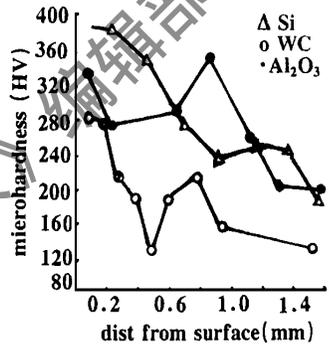


Fig. 7 Some hardness distribution of laser surface alloying of aluminium alloy

合金化的强化机理随所加入的物质不同而不尽相同。象 Si, WC, Al_2O_3 这些不能发生冶金化学反应的质点的加入其强化主要是固溶强化和弥散强化, 而象 Fe-Ni 合金的加入, 发生了冶金反应, 使生成高硬度的金属间化合物而达到强化, 强化程度较高, 可达 500HV 以上, 但金属化合物一般较脆, 易于开裂。

3. 激光表面熔覆效果

(1) 表面熔覆组织 激光表面熔覆所得到的组织和前两种情况有较大的差别。图 8 是在 ZL₁₀₁ 表面上熔覆 Ni+Cr 合金的组织形貌, 上部不再是铝的等轴晶组织, 而是熔化的 Ni+Cr 合金的等轴组织, 与其相邻的较黑部分是过渡区, 该区是部分涂层 Ni+Cr 元素与 Al 生成的合金层, 这一层由于冷速较大, 几乎都呈枝晶结构。试验发现该层的厚度受激光参数的影响较大, 当功率密度 q 较大, 扫描速度 v 较小时, 该层加宽, 极端的情况下, 可扩大到整个涂层, 即整个覆层都为熔铝所混合稀释, 形成新的铝合金, 覆层的意义已消失。但如果激光输入能量不足, 不能形成过渡层, 则 Ni+Cr 合金层不能与铝基体发生冶金结合, 也达不到熔覆的效果。激光熔覆与前二者的最大区别是强化层与基体有明显的分界面, 因此存在着结合强度的问题^[5]。当然, 也存在着表面层的均匀、密实及平整等问题。

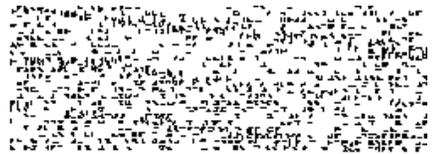


Fig. 8 The morphology clad by Ni-Cr alloy on the surface of aluminium alloy

(2) 熔覆的强化效果 激光熔覆可以把高硬度的耐磨合金层覆于铝合金表面上, 其硬度可以远高于铝合金自身的硬度。在高硬度覆层的次表层, 还存在着一个涂层合金化的枝晶过渡区, 该区的硬度往往介于表层和基体之间, 它对于覆层与基体的结合及防止表面硬壳层的破碎都是很重要的。

图 9 是 Ni+Cr 覆层的硬度分布的例子, 覆层硬度可高达 900HV, 是基体硬度的 15 倍以上。其中上部的一条曲线熔覆工艺参数选取较为合适, 表面层的高硬度分散不大, 仅到界面附近才开始下降。下面一条曲线减小了扫描速度, 结果使基体熔铝过深, 熔铝与涂层混合加剧, 使熔覆层的硬度迅速下降, 即硬层变薄。实验发现, 如果再进一步减小扫描速度, 或者双程扫描, 所得硬度分布会与合金化时相似, 高低起伏严重, 这是由于涂层元素在熔池中分布不均造成的。此外, 对于不同厚度的 Ni+Cr 涂层, 熔覆要求的激光参数不同, 只有正确地选择参数, 才能得到理想的熔覆层^[9]。

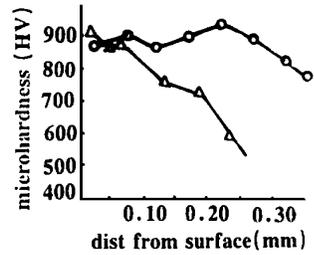


Fig. 9 The hardness on the surface of a aluminium alloy after cladding with Ni-Cr
 ○- $P=1.4\text{kW}$ $d=1\text{mm}$
 $v=10\text{cm/s}$ △- $P=1.4\text{kW}$
 $d=1\text{mm}$ $v=6\text{cm/s}$

四、结 论

(1) 激光表面重熔是合金化及熔覆工艺的基础。其显微组织构造一般都由过热区、柱状晶区及等轴晶区构成, 重熔后的晶粒可细化到基体组织的 5%。显微硬度可较基体有 30% ~ 130% 的提高。

(2) 激光表面合金化强化效果随加入合金的种类不同而异。对于无冶金反应的合金化, 起主要作用的是固溶强化和弥散强化。对于有冶金反应的合金化, 主要是金属间化合物的强化。合金化可使显微硬度较基体提高 6 倍以上。

(3) 激光表面熔覆效果随熔覆层种类不同而异。但熔覆层的组织形态都由表面层和过渡层构成。在工艺合适的条件下, 表面层具有等轴组织和自身的高硬度, 次表层是由涂层物质的铝合金化层组成的树枝晶组织, 硬度稍低。用 Ni+Cr 合金熔覆, 可得到硬度比铝基体高 15 倍以上的显微组织。

参 考 文 献

- 1 Sallamand, Pelletier J.M. Mat Sci and Engng, 1993; A171: 263~ 270
- 2 Folkes J.A. Surface and Coatings Technology, 1994; 63: 65~ 71
- 3 Das D.K. Surface and Coatings Technology, 1994; 64: 11~ 15
- 4 Molian P.A.J of Engng Mat and Tech, 1986; 108: 233~ 239
- 5 赵文轸, 苏勋加, 王汉功. 热加工工艺, 1996; (5): 5~ 7
- 6 赵文轸, 苏勋加, 王汉功. 西安交通大学学报, 1996; 30(8): 85~ 90

作者简介: 赵文轸, 男, 1945 年 12 月出生。副教授。从事金属表面新技术研究工作。

收稿日期: 1996-01-15 收到修改稿日期: 1996-05-03