

# 激光除锈的研究与试验

阮国强

(交通部长江航运管理局武汉分局)

**提要:** 本文简要介绍激光除锈的机理和利用 CO<sub>2</sub> 激光器对船用钢板进行的除锈试验。

利用激光去除钢铁材料表面的锈蚀,是一种新的除锈方法。采用这一方法不仅能有效地去除锈蚀,而且能使除锈后的表面强化并具有一定的防锈能力。

## Study and test of sweeping away rust by laser

Ruan Guoqiang

(Wuhan Branch, Changjiang Shipping Administration)

**Abstract:** This article introduces briefly the principle of sweeping away rust by laser and the test on the ship steel by CO<sub>2</sub> laser.

It is a new method that we can use to sweep away rust on the surface of steel and iron materials by laser. It not only can sweep efficiently away rust but also strengthen and harden the steel and iron surface, and preserve the surface from corrosion.

利用激光去除钢铁材料表面的锈蚀,这是激光技术在工业生产中一项新的应用。我们初步研究和试验的结果表明:“激光除锈”不仅能获得满意的除锈效果,而且还能使除锈后的钢铁材料表面强化并具有一定的防锈能力。

本文将简要介绍“激光除锈”的机理,并通过激光除锈后的船用低碳合金钢板表面及内部组织的分析来说明激光除锈的效能。

### 一、激光除锈的机理

激光除锈的基本手段就是利用激光的加热作用使钢铁材料表面的锈蚀物熔融、汽化

乃至去除,从而达到除锈的目的。但是,激光除锈不是简单的材料去除过程,它既要去除锈蚀物,还要避免激光的能量损伤锈蚀层下完好的基体,所以,如何利用激光的能量达到上述要求,这是实现激光除锈的关键。

在激光除锈时,采用连续激光束扫射钢铁材料表面的锈蚀层(扫射方式见图1)。由于扫射速度较快,除锈面的尺度相对激光照射光斑的面积以及加热深度来说,可以看作半无限大。

对于短时间连续激光束加热非透明半无限大固体的情况,如果不考虑材料的热物性(热传导系数,比热,反射系数等)随温度的变

收稿日期: 1979年11月12日。

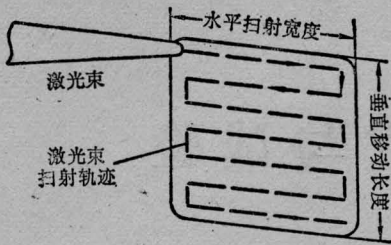


图1 激光束二维扫描示意图

化以及激光照射时材料表面的再辐射、对流等现象所引起的能量损失,那么,我们可以由一般的热传导方程得出下面在激光照射下材料表面温升的估算式:

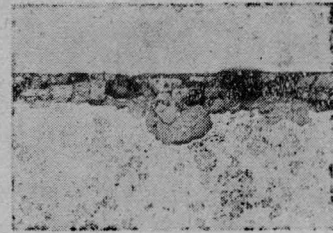
$$T \approx 2(1-r)F_0 \left( \frac{t}{K\rho C_p \pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中  $T$  是在激光照射下材料表面的温升;  $F_0$  是照射面上的激光功率密度;  $r$  是反射系数;  $K$  是热传导系数;  $C_p$  是比热;  $\rho$  是密度;  $t$  是激光照射时间。

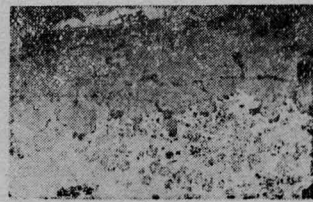
从上式的结果可以看出,激光引起材料表面的温升与材料的热物性有着非常直接的关系。

钢铁材料表面常见的锈蚀物主要由  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  和少量的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  组成,它是一层结构疏松、表面不平的物质(见图2),其热传导系数和平均反射系数都远比

基体材料低,而二者的沸点(汽化温度)又非常接近(见表1),因此,根据(1)式的结果,就可以通过控制激光束的功率密度和扫描速度(即照射时间),既能使锈蚀层汽化,获得满意的除锈效果,又不使其基体达到汽化温度而致破坏。例如,对于船用低碳合金钢板的除锈,只要将激光功率密度控制在图3所示的曲线1和曲线2之间即可达到激光除锈的要求。对于其它钢铁材料也可得到类似的曲线。



(a) 一般部位的锈蚀层



(b) 局部部位的锈蚀层

放大200×

图2 船体钢板表面锈蚀层断面结构

表1 船用低碳合金钢、普通低碳钢及其表面锈蚀物的主要热物性参数

数据参数	船用低碳合金钢 (15Mn)	普通低碳钢 (含碳0.5%以下)	锈蚀物
平均热传导系数 $K$	0.175 瓦/厘米·度	0.535 瓦/厘米·度	0.0432 瓦/厘米·度
平均比热 $C_p$	0.653 瓦·秒/克·度	0.653 瓦·秒/克·度	0.899 瓦·秒/克·度
密度 $\rho$	7.81 克/立方厘米	7.83 克/立方厘米	5.21 克/立方厘米
比热×密度 $C_p \times \rho$	5.099 瓦·秒/立方厘米·度	5.112 瓦·秒/立方厘米·度	4.684 瓦·秒/立方厘米·度
平均反射系数 (对 $10.6\mu\text{CO}_2$ 激光) $r$	0.4 以上	0.4 以上	0.1 左右
沸点	2750°C	2750°C	2700°C

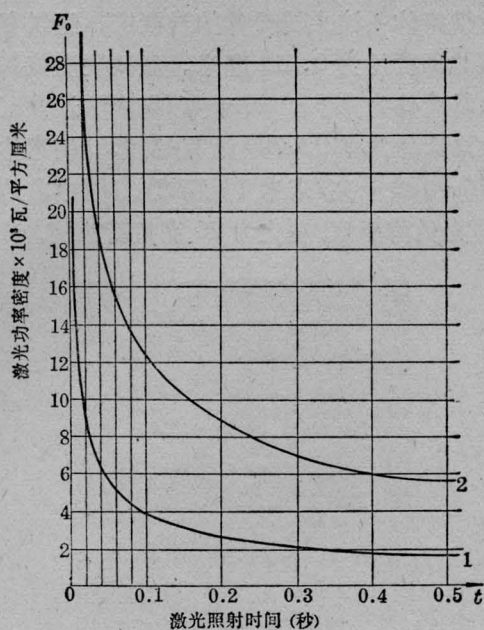


图3 船用低碳合金钢板及表面锈蚀层的表面达到汽化温度所需的激光功率密度  
曲线1—锈蚀层表面  
曲线2—钢板基体表面

## 二、船用低碳合金钢板的激光除锈试验

### 1. 激光除锈前待除锈钢板的情况

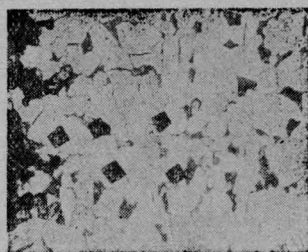
锈蚀船体钢板取自长江某船。钢板厚8毫米。钢板表面的锈蚀层深度约0.08~0.24毫米(见图2)。锈蚀层下面正常的钢板基体的化学成份: 0.16% C; 0.21% Si; 0.72% Mn; 0.12% P; 0.03% S;

钢板基体从表层至中心部位的显微组织均为铁素体+珠光体。表层与中心部位的显微硬度无明显差异; 铁素体的硬度为119~133 千克/毫米<sup>2</sup>(见图4)。

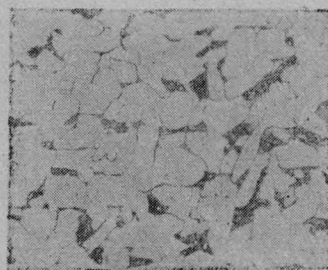
### 2. 激光除锈的试验设备和条件

用于进行除锈试验的激光器为输出功率约400瓦的连续输出二氧化碳激光器。

将待除锈钢板的锈蚀表面放在离激光束焦点距离不同的四个位置, 激光束均以10厘米/秒的速度扫描锈蚀层表面, 从而得到在



(a) 钢板基体表层的显微组织



(b) 钢板基体中心部位的显微组织  
腐蚀: 3% 硝酸酒精; 放大: 340×

图4 未除锈前钢板基体的金相组织

相同扫描速度下四种不同激光功率密度的除锈结果。这四种功率密度约为: 6000 瓦/厘米<sup>2</sup>; 10000 瓦/厘米<sup>2</sup>; 15000 瓦/厘米<sup>2</sup>; 20000 瓦/厘米<sup>2</sup>。

### 3. 激光除锈后钢板基体表面的情况

经激光除锈后的无锈蚀钢板表面, 一般呈灰黑色。这层灰黑色的物质厚度约10~20微米(见图5), 经X射线衍射分析确定, 其为FeO。它与钢板基体结合十分紧密, 不易剥脱; 而且非常致密, 具有一定的抗腐蚀介质渗透的能力, 因此, 能够比较有效地保护钢板基体免于继续受腐蚀介质的侵蚀。我们曾将经激光除锈的钢板和经手工除锈露出发亮



放大: 250×

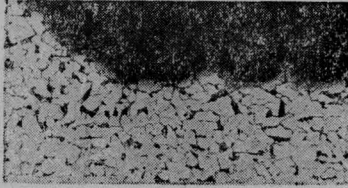
图5 激光除锈后在钢板表面形成的FeO薄层  
(图中均匀带状薄层既是)

基体的钢板同时放在淡水中, 经过半年后再进行比较, 后者明显比前者腐蚀程度严重。

#### 4. 激光除锈后钢板基体内部组织分析

(1) 激光功率密度为 6000 瓦/厘米<sup>2</sup> 的情形

钢板基体的显微组织、显微硬度从表层至中心部位与除锈前的情况一样, 无变化(见图 6)。



腐蚀: 3% 硝酸酒精; 放大: 160×

图 6 6000 瓦/厘米<sup>2</sup> 激光除锈后钢板表层的显微组织

(2) 激光功率密度为 10000 瓦/厘米<sup>2</sup> 的情形

钢板基体表层显微组织改变为铁素体+淬火马氏体。组织变化层深度约 0.05~0.105 毫米左右。显微硬度值: 铁素体为 174~181 千克/毫米<sup>2</sup>, 马氏体为 566~635 千克/毫米<sup>2</sup>。在这层组织之下有一个不太明显的混合组织的过渡区(见图 7)。



腐蚀: 3% 硝酸酒精; 放大: 340×

图 7 10000 瓦/厘米<sup>2</sup> 激光除锈后钢板表层的显微组织

(3) 激光功率密度为 15000 瓦/厘米<sup>2</sup> 的情形

钢板基体表层显微组织的改变除了产生一层厚度约为 0.035 毫米的针状回火马氏体组织外, 其下还有一层厚度约为 0.076 毫米

的铁素体+淬火马氏体的过渡区。组织变化层总深度约为 0.111 毫米。显微硬度值: 回火马氏体为 526~610 千克/毫米<sup>2</sup>; 过渡区淬火马氏体为 610~700 千克/毫米<sup>2</sup>; 铁素体为 174~192 千克/毫米<sup>2</sup>(见图 8)。图中右边为 50 克负荷压痕, 左边为 20 克负荷压痕。

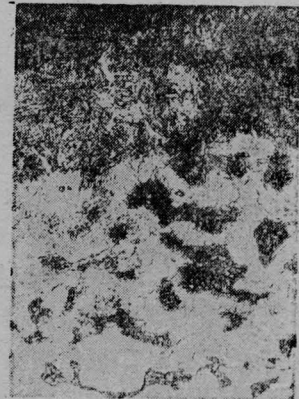


腐蚀: 3% 硝酸酒精; 放大: 250×

图 8 15000 瓦/厘米<sup>2</sup> 激光除锈后钢板表层的显微组织

(4) 激光功率密度为 20000 瓦/厘米<sup>2</sup> 的情形

钢板基体表层显微组织除有一厚度约 0.07 毫米的针状回火马氏体外, 其下还有一层厚度约 0.138 毫米的铁素体+屈氏体和针状回火马氏体的过渡区。组织变化层总深度约 0.208 毫米。显微硬度值: 回火马氏体为 500~610 千克/毫米<sup>2</sup>; 屈氏体和回火马氏体部位为 418~480 千克/毫米<sup>2</sup>; 铁素体为 158~174 千克/毫米<sup>2</sup>(见图 9)。



腐蚀: 3% 硝酸酒精; 放大: 400×

图 9 20000 瓦/厘米<sup>2</sup> 激光除锈后钢板表层的显微组织

从以上四种情况的组织分析可以看出:

(1) 激光除锈虽然是一种热加工,但是它在基体上产生热影响的深度很浅,受热发生组织变化的只是极薄的表层,不会使基体发生受热变形等不良影响。

由于基体表面层组织变化厚度很薄,在这层组织表面一般呈压应力状态,这种应力状态不仅可以提高钢板表面在复杂的应力应变下的强度,而且对防止“应力腐蚀”也具有一定作用。

(2) 随着激光功率密度的提高,钢板基体受激光除去锈蚀层后剩余能量的加热而发生“自淬火”,在表层逐渐产生了新的相——马氏体。马氏体的形成显著地提高了除锈后钢板表面的硬度,大大增加了其耐磨性能。

当激光功率密度提高到一定值时,钢板表层显微组织的部分晶界消失(如图9所示)。这种组织状态具有较强的抗腐蚀能力,它在钢板表层形成了有效的防锈层,对钢板的保护有着重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] J. F. Ready; Effects of High-Power Laser Radiation, Academic Press, 1971.
- [2] H. S. Carslow, J. C. Jaeger; Conduction of Heat in Solid, Clarendon Press, 1959.
- [3] 横田清义; 铁钢の急速加热变态の研究, 产报, 1971(日)。
- [4] 机械设计便览編集委员会; 机械设计便览(新版), 丸善书屋, 1971(日)
- [5] U. R. 艾万里; 金属的腐蚀与氧化(中译本, 千保定译), 机械工业出版社, 1975.

## 简 讯

### 6328 埃低噪声 He-Ne 激光管

重庆光学机械研究所研制成功了 6328 Å 低噪声 He-Ne 激光管, 其管型结构为内腔同轴式分段毛细管结构, 腔长 350 毫米。管内分段毛细管结构参数为: 放电毛细管长:  $3 \times 83$  毫米, 间距:  $2 \times 15$  毫米。此外, 为了尽量降低噪声, 在管子结构细节和制作工艺上, 还作了一些特殊考虑和处理。管子运转参数为: 着火电压: 5000~6500 伏, 工作电压: 1400~1600 伏, 工作电流: 4~6 毫安, 光斑模式: TEM<sub>00</sub>, 输出功率:  $\geq 2$  毫瓦。噪声测试实验证明: 该种管子的低噪

声特性良好。寿命测试实验证明: 管子寿命较长。如 1980 年 1 月作的管子, 至 1980 年 9 月寿命达 8 个月时, 输出功率仍基本不变, 预期管子寿命将达一年以上。这种管子还具有结构紧凑、操作使用方便等特点。

6328 Å 低噪声 He-Ne 激光管均可在激光通讯、信息存储、图象处理、精密测量等技术领域中得到广泛的应用。

(重庆光学机械研究所殷一贤)