

# 双光束激光湿洗除锈并同步实现均匀钝化

李 伟 杜 鹏 宋 峰

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

**摘要** 针对锈层疏松多孔结构的特点,采用脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器湿洗清除钢铁表面的锈蚀。通过预喷涂液膜,使液体渗透到锈层内部以改善锈层的热传导和提高材料的平均比热,同时液体自身的受热爆发性气化也会起到破碎锈层的作用,有效提高激光清洗的效率。但是,液体如果有残余会加剧铁的电化学腐蚀,因此必须及时地把残余的液膜去除。使用第二束声光调 Q Nd:YAG 激光加热铁基底表面,通过控制激光脉冲个数调控表面的温度,在表面残余的液膜得到有效去除之后,继续加热铁基底表面,以加快铁基底表面的氧化过程,生成致密的氧化铁薄膜,实现均匀钝化,可有效提高清洗后铁质材料的抗腐蚀性。设计了一种双光束激光湿洗装置,能够使清洗、钝化一步完成。

**关键词** 激光光学; 激光清洗; 液膜辅助; 均匀钝化; 双光束; 锈蚀

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.s103002

## Rust Removal and Uniform Passivation Simultaneously in Laser Wet Cleaning Using Dual Laser Beam

Li Wei Du Peng Song Feng

(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Pulsed CO<sub>2</sub> laser is used in the wet laser cleaning of rust from iron surface. By pre-spraying liquid film to the top surface, the liquid can penetrate into the rust layer due to the porous structure of the rust, so the thermal conductance and the mean specific heat of the rust layer can be improved. At the mean time, as the explosive evaporation of the liquid in the rust under laser irradiation has the effect of breaking down the rust layer, the cleaning efficiency can be efficiently increased. But it is disadvantageous that the electro-chemical corrosion of the iron will be intensified if the liquid film has some residue. Thus, the removal of the residual liquid film is a necessary operation after the first-step of cleaning. Acousto-optic Q-switched Nd:YAG laser is used to heat the iron surface. By adjusting the number of laser pulse, the surface temperature can be controlled. The residual liquid film is vaporized firstly, and then the oxidation process of the superficial iron layer can be accelerated. A dense film of iron oxide is formed above the iron surface. Uniform passivation is realized and the corrosion resistance of the iron is modified after laser cleaning. A device of laser wet cleaning adopting dual laser beam is designed, which can perform cleaning and passivating simultaneously.

**Key words** laser optics; laser cleaning; film assistant; uniform passivation; dual beam; corrosion

**OCIS codes** 140.3390; 140.3450; 140.3470; 140.3530

## 1 引 言

金属表面与其周围介质发生化学或电化学反应,使金属遭到腐蚀破坏,这种现象称为金属的腐蚀。腐蚀会使金属表面失去光泽,变得锈迹斑斑,会使仪器仪表丧失精度而报废。金属一旦发生腐蚀若不及时采取措施,腐蚀的范围越来越大,程度越来越深,使得金属构件或工件丧失机械性能而报废。同时,金属腐蚀也是一种资源浪费。各种金属的腐蚀

中,以铁的腐蚀最为严重,世界上每年因腐蚀造成的钢铁损失占钢铁总量的 1/5~1/4<sup>[1]</sup>。

传统的除锈方式多采用机械除锈(包括喷砂)、高压水射流除锈与化学方法除锈。但是机械方法强度大,固体废弃物污染严重,高压水射流方法易形成二次腐蚀,化学方法多使用酸液,需拆卸清洗对象,且不适用大型工件<sup>[2]</sup>。自激光器问世以来,激光清洗的方式随之被提出<sup>[3]</sup>,国内也相应开展了有关激

**收稿日期:** 2013-09-01; **收到修改稿日期:** 2013-10-01

**作者简介:** 李 伟(1984—),男,博士研究生,主要从事激光表面清洗技术方面的研究。E-mail: liwei\_cang@163.com

**导师简介:** 宋 峰(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事稀土材料发光、激光器热效应和激光应用等方面的研究。

E-mail: fsong@nankai.edu.cn

光除锈的工作<sup>[4]</sup>。干式激光清洗的清洗效率较低<sup>[5]</sup>,同时在高功率激光作用下,钢铁表面会出现黄化的损伤现象<sup>[6]</sup>,而湿式激光清洗需要涂覆液膜,液膜的引入如处理不当,会造成二次腐蚀<sup>[7]</sup>。与此同时在激光的表面改性领域,激光冲击强化改善合金的耐磨性、耐疲劳性等技术手段也陆续被提出<sup>[8-9]</sup>。针对以往激光清洗中存在的困难,本文提出了一种双光束湿洗除锈并同步实现均匀钝化的方法和装置,脉冲 CO<sub>2</sub> 激光用来湿洗除锈,可有效提高清洗

效率;准连续 Nd:YAG 激光用来除水、钝化,可提高清洗后基底的抗腐蚀性。

## 2 钢铁腐蚀

### 2.1 铁锈的化学成分与物理结构

铁锈的组成成分很复杂,是一种混合物,因外界的条件不同而成分不一。表 1 中列出了铁的各种腐蚀产物<sup>[10]</sup>。

表 1 铁的腐蚀产物

Table 1 Corrosion products of iron

Corrosion products	Chemical formula of compounds	Colour	Characteristics
Wuestite	FeO iron (II) oxide	Black	
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> iron (II, III) oxide	Black	Magnetic
Maghemite	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> iron (III) oxide	Dark brown	
Hematite	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> iron (III) oxide	Bright-red	Protective when heated above 200 °C
Goethite	α-FeOOH iron (III) oxyhydroxide	Red/brown/yellow	As bulky mass
Akaganeite	β-FeOOH iron (III) oxyhydroxide	Orange	Metal-rust interface, grows when chloride ions around
Lepidocrocite	γ-FeOOH iron (III) oxyhydroxide	Orange-red	
Limonite	FeOOH iron (III) oxyhydroxide		Amorphous
Siderite	FeCO <sub>3</sub> iron (II) carbonate	Grey/yellow/brown	In calcareous soil
Pyrite	FeS <sub>2</sub> iron (II) disulfide	Yellow	
Vivianite	Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O iron (II) orthophosphate	White/blue	Protective
Rozenite	FeSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O iron (II) sulfate	Green	
Jarosite	NaFe <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> iron (II) sulphate	Pale blue/yellow	Powdery
Taconite			Low-grade iron ore, contain about 25% Fe as magnetite

### 2.2 钢铁的腐蚀过程

钢铁在大气中的腐蚀,分为化学腐蚀和电化学腐蚀,其中电化学腐蚀为主,电化学腐蚀根据环境酸碱度(pH 值)的不同,分为析氢腐蚀和吸氧腐蚀两种。由于通常情况下环境是中性或弱碱性的,因此钢铁的主要腐蚀方式是吸氧腐蚀。

部,那么腐蚀就暂时停止了。

可是 α-FeOOH 会进一步缩水,生成 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,虽然 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 本身也是一种致密的结构,可是脱水的同时会在原来的保护层上形成缝隙或孔,并最终形成连接铁层和外面空气的通道,这样原来的保护性锈层将不再存在,新一轮的锈蚀将会开始。

缝隙腐蚀的阴极和阳极反应发生在不同的缝隙深处,产生的 Fe<sup>2+</sup> 和 OH<sup>-</sup> 不能直接发生接下来的氧化反应,而是在缝隙外的其他地方发生,于是这样的缝隙不能及时地被生成的 Fe(OH)<sub>3</sub> 凝胶体充满,也就不能进一步生成较致密的 FeOOH,于是腐蚀就会进一步加重<sup>[11]</sup>。

在大气中生成的铁锈,其主要成分为 FeOOH、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O、FeO·xH<sub>2</sub>O 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>·xH<sub>2</sub>O,钢铁的腐蚀过程属缝隙腐蚀,因此铁锈只能在铁的表面形成一层疏松多孔的氧化皮,不能起到封闭保护的作用,水和氧气及其他对铁具有腐蚀作用的气体(SO<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub> 等),可以通畅渗入,使铁不断被锈蚀。

铁吸氧腐蚀的一般过程为:  
首先发生初始腐蚀,电化学过程生成 Fe<sup>2+</sup> 和 OH<sup>-</sup> 离子,随后 Fe<sup>2+</sup> 被 O<sub>2</sub> 氧化成 Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup> 与 OH<sup>-</sup> 结合生成 Fe(OH)<sub>3</sub> 的凝胶体。水和氧气可以很容易地穿透这层凝胶层,使得电化学反应得以继续进行,凝胶层继续变厚。随着时间的推移,表层的 Fe(OH)<sub>3</sub> 凝胶体脱水(即使在水存在的情况下),生成 FeOOH。FeOOH 有两种结构,黄棕色的 α-FeOOH 和橙色的 γ-FeOOH,在最初形成的 FeOOH 中,γ-FeOOH 是主要的,可是 γ-FeOOH 会逐渐转化为 α-FeOOH。α-FeOOH 是一种致密的结构,会在初始腐蚀的末段暂时形成一层致密的保护层,阻止 O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 进入内

而正是因为铁锈具有这种疏松多孔的结构,使水或其他液体可以渗入,使得铁锈可以采用湿式激光清洗的方式去除。利用渗透到铁锈内部的水或其他液体对铁锈本身热学性质的改善以及自身的爆发性气化使锈层破碎,可有效提高激光清洗的效率。

### 3 双光束激光湿洗除锈并同步实现均匀钝化

对于多孔疏松结构的层状污染物,使用湿式激光清洗的效率要比使用干式激光清洗高得多。湿式清洗中常用的液膜溶液是水。可是在除锈过程中,水的引入如果处理不当,会造成钢铁的二次腐蚀,降低了这种清洗方式的有效性。在实验装置中,同时拥有两束激光,一束是用于除锈的清洗用激光,一束用于去除前面湿洗时的液体残余。在去除液体残余的同时也能够使清洗后的钢铁表面均匀受热,使钢铁表面生成致密且均匀的氧化层,实现钢铁的均匀钝化,提高钢铁材料的抗腐蚀性能。

清洗用激光使用重复频率为几十赫兹,高单脉冲能量的脉冲激光器,这样在保证清洗效率的前提下,不会由于热沉积造成基底的不可逆损伤。清洗激光以线扫描方式运行,往复多次,在最后一次清洗时(即这次清洗后锈层会被完全去除),同步开启钝化用激光器,这种激光器采用高重复频率激光器或连续激光器,在较低功率下运行,给基底表面均匀加热,去除液膜残余的同时,实现表面的均匀钝化。

#### 3.1 双光束清洗装置

图1所示为模块化的双光束湿洗装置,它由4个主要组成部分:1)双光束输出头,包含清洗用激光束和钝化用激光束;2)水膜预涂覆系统;3)三维(3D)电动平台;4)动力系统和控制单元。

##### 3.1.1 使用脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器作为清洗用激光器

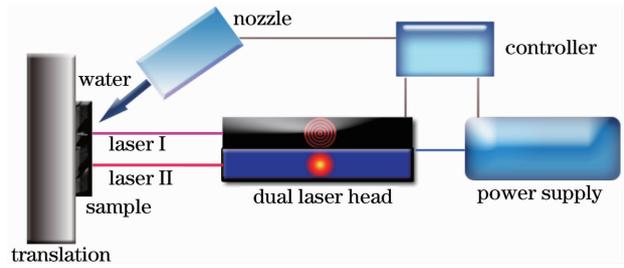


图1 双光束激光湿洗装置示意图

Fig.1 Schematic of wet cleaning devices using dual laser beams

使用这种激光器作为清洗光源的原因有:1) 相比于紫外、可见与近红外 YAG 激光,铁、钢基底对 10.6  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 激光的吸收较低,见图2,不易对基底造成黄化等损伤;2) 10.6  $\mu\text{m}$  是水的强吸收波段,有利于湿式激光除锈;3) 10.6  $\mu\text{m}$  光的穿透深度很大(穿透深度正比于波长),脉冲激光烧蚀机制下,一个脉冲能够烧蚀掉的污染层厚度与光穿透深度与热扩散深度的较大者的量级一致,因此清洗效率更高。

对于脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器的要求:1) 峰值功率高,能够达到清洗对象的烧蚀阈值;2) 平均功率也较高,能够实现较高效率的清洗作业。可以采用中国科学院电子学研究所研制的横向激励高压二氧化碳激光器(TEA CO<sub>2</sub> 激光器)。该激光器的谐振腔采用平凹腔结构,波长为 10.6  $\mu\text{m}$ ,最大单脉冲输出能量可达 15 J,激光脉冲的 10% 极大值处的全宽度约为 3  $\mu\text{s}$ ,半极大值处的全宽度小于 200 ns。

##### 3.1.2 使用高重复频率 Nd:YAG 激光器作为钝化激光器

使用这种激光器作为钝化激光器的原因恰恰与前面使用 CO<sub>2</sub> 激光器作为清洗激光器的原因相反:1) 1.06  $\mu\text{m}$  YAG 激光是 Fe 质材料的强吸收波长,如图2所示,这样激光加热时的使用效率较高;2) 1.06  $\mu\text{m}$  激光的穿透深度较浅,激光作为一种热

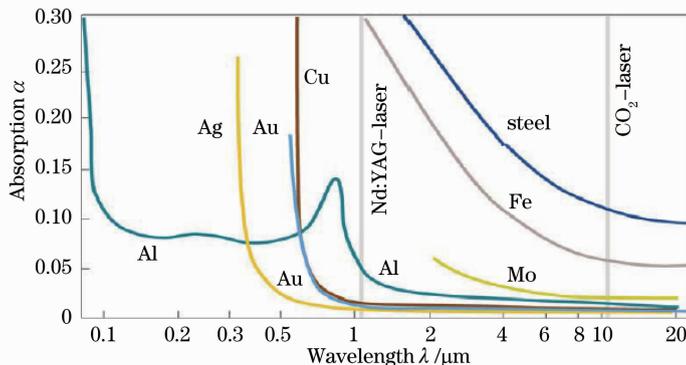


图2 各种金属吸收系数随波长的变化<sup>[10]</sup>

Fig.2 Dependence of absorption on laser wavelength for various metals

源,提供的热量主要存在于金属基底的表面及浅层区域,有利于气化表层液膜残余和实现表层金属氧化钝化。

对高重复频率 Nd:YAG 激光器的要求较为宽松,中小功率的机型就可以满足除水和钝化的能量需求。可以采用声光调 Q 的 Nd:YAG 激光器,如自组装的一台连续氙灯抽运声光调 Q 的激光器,采用单氙灯、 $\varphi 6$  Nd:YAG 棒、紧包裹水冷、镀金椭圆柱腔、电源最大电流为 22 A 的氙灯;声光 Q 开关是英国古奇公司生产的,声光晶体是熔融石英,重复频率范围为 0.5~50 kHz,声光 Q 驱动内控采用固定激光出光时间(5  $\mu$ s)的模式,激光脉冲宽度随重复频率小范围变化,100~250 ns。激光波长为 1.06  $\mu$ m,腔长为 600 mm,输出镜反射率为 80%。连续运转时,激光最大功率为 100 W,调 Q 运转时,输出平均功率随重复频率变化,平均值为 50 W。

### 3.1.3 双激光束的传输

石英光纤对 10.6  $\mu$ m 激光强烈吸收,因此脉冲 CO<sub>2</sub> 激光不能使用普通传能光纤传播,可以选择的传输方式是自由空间传播或使用导光臂传播。声光调 Q Nd:YAG 激光可使用传能光纤传播,也可以使用导光臂传播。

综合两种波长激光的传输特性,可以采用多关节双镜筒望远镜式导光臂,并行传输两路激光。这种导光臂的前端两个关节是分开独立的,分别将 CO<sub>2</sub> 激光器和 YAG 激光器产生的激光耦合到导光臂的两个分支镜筒里,后面的多个关节是合并在一起的,既可满足导光臂灵活性要求的同时,又可中短程闭路传输激光光束。

### 3.1.4 水膜预涂覆系统

水膜涂覆系统主要由储水箱、喷嘴和触发控制电路组成,如图 3 所示。触发控制电路包括触发器和方波信号发生器,这里使用 74hc123 芯片。每一个激光脉冲发出,激光器都会促使触发器向 74hc123 芯片发出一个高电平,这一触发信号作为芯片的输入信号。芯片的输出信号同样为一方波,其周期与脉冲激光周期相同,高电平持续时间为

$$t_w = K \cdot R \cdot C, \quad (1)$$

式中  $K$  为常数,对于 5 V 芯片供电电压, $K$  为 0.45, $R$  为电阻值, $C$  为电容值。通过调节芯片外接的电阻值  $R$  和电容值  $C$ ,使水膜预涂覆的持续时间略小于脉冲激光周期,实现对喷嘴开启与关闭的周期性控制。

喷嘴喷涂液膜,由于水在样品表面的激溅,不可避免地会在样品表面留下残余,当清洗激光结束之

时,这些残余仍有部分存在。

需要说明的是,实验装置中是通过激光脉冲控制水膜的预涂覆的,在第一个激光脉冲作用之前是没有水膜的,第一个激光脉冲作用之后,激光脉冲的下降沿向触发器输出信号,然后触发器向 74hc123 芯片发出触发信号,触发信号的上升沿使芯片输出高电平,开启水膜喷嘴的电控开关,在清洗样品表面喷涂上一层水膜,如此循环。

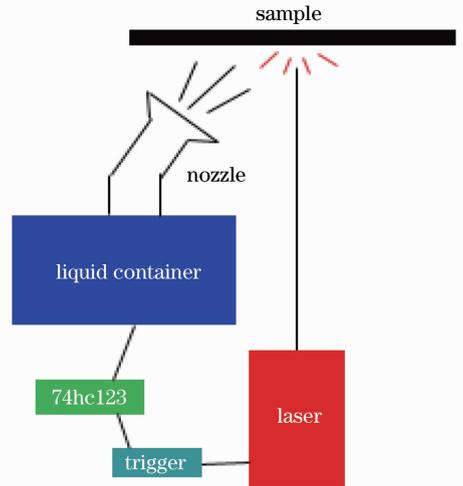


图 3 水膜预涂覆系统

Fig. 3 Pre-spraying system

当表面被清洗干净之后,停止激光照射,这时前一个激光脉冲仍向水膜预涂覆系统发出喷涂水膜的信号,额外的一次水膜喷涂就会发生。

基于以上两方面的原因,在清洗结束之后,样品表面会有一些水膜的残余。这些残余的水膜需及时处理。

## 3.2 激光湿洗除锈的清洗阈值和物理机制

CO<sub>2</sub> 激光湿洗除锈的有效性已经被 Koh 等<sup>[12]</sup>证实,以下介绍清洗相关的技术参数。

### 3.2.1 清洗阈值

假设清洗用激光是 TEM<sub>00</sub> 模输出,基模高斯光束能量密度的空间分布为

$$\Phi(r) = \Phi_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

式中  $\Phi_0$  为中心处的激光能量密度, $r_0$  为束腰半径。

激光清洗过程存在清洗阈值,只有能量密度高于阈值才能实现有效的清洗。高斯光束的特点就是中心能量密度最高,沿径向递减,因此清洗区域是一个圆,面积为

$$A = \pi \cdot r_{th}^2, \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可知,清洗面积与激光能量密度之间的关系为

$$A = \pi \cdot r_0^2 (\ln \Phi_0 - \ln \Phi_{th}). \quad (4)$$

使用激光能量计能够测量整个激光脉冲的能量,

$$E = \Phi_0 \int_0^{r_0} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) 2\pi \cdot r dr = \Phi_0 \pi \cdot r_0^2 \left(\frac{e-1}{e}\right) = \Phi_0 f(r_0). \quad (5)$$

通过刀口法可确定  $r_0$  的值,继而确定  $f(r_0)$  的值.由(4)式和(5)式可以得到清洗面积与激光单脉冲能量之间的关系为

$$A = \pi \cdot r_0^2 [\ln E - \ln \Phi_{th} - \ln f(r_0)]. \quad (6)$$

由(6)式可知,清洗面积  $A$  与激光单脉冲能量的对数成线性关系,而直线与横轴的截距减去一个已知常数就表征了激光湿洗的阈值.

### 3.2.2 激光湿洗除锈的物理机制

一般地,当固体材料表面吸收的激光功率密度足够大时,物质就会离开表面,被发射出去,其中有些物质还会变成气态.气态物质的主要成分是被激发、被电离的原子和电子.激光与物质的反应类型与反应过程由众多因素决定,如材料的天然性质,物理与化学特性,材料的表面状态;使用激光的波长、脉冲宽度、功率密度;环境的影响,例如周围大气的组分、湿度、气压等<sup>[13]</sup>.

激光与层状材料之间的相互作用为脉冲激光烧蚀作用,大体可以分成三大类:光热过程、光物理过程与光化学过程.光物理过程与光化学过程相似,都是将大块物质分解为小块物质的过程.其中光物理过程吸收光能破坏的是小块物质之间的物理结合力,如范德瓦尔斯力与静电力,而光化学过程是吸收光能,尤其是紫外激光,破坏大分子的化学键,使大分子分解为小分子的过程<sup>[14]</sup>.

而 10.6  $\mu\text{m}$  红外激光除锈属于光热过程.当没有预涂覆水膜时,这一过程是干式清洗过程,清洗阈值即为表层污染物的烧蚀阈值,饱和阈值即为表层污染物的光击穿阈值.当激光能量密度超过表层污染物的烧蚀阈值,但又低于光击穿阈值时,污染层物质会因吸收激光能量,快速地热膨胀,最终表现为污染物层中由于上层污物膨胀压缩下层污物而受到下层污物的反作用力,造成上下层污物之间爆发性的分离,使上层物质可被去除.当激光能量密度超过表层污染物的烧蚀阈值,并且超过污物的光击穿阈值时,污物被激光电离产生密集的等离子体,等离子体膨胀产生冲击波,强劲的冲击波压缩下层污物,同样的下层污物也会产生强劲的反冲作用力,使上层污物与下层污物脱离.

当在表面预涂覆液膜后,由于铁锈是疏松多孔的结构,液膜会渗透到铁锈的内部结构中去,注入的液体能够改善锈层的热传导和提高材料的平均比热.同时在激光照射下,除了原有的热膨胀引起的下层物质对上层物质的反冲作用力以外,铁锈孔间的液体会因吸收激光能量而产生爆发性的气化膨胀,对锈层起到破碎分解的作用,可以有效提高激光清洗的效率.

## 3.3 激光加热去除 Fe 基底表面残余水分同时实现均匀钝化

### 3.3.1 基底表面残余水分的去除

虽然使用湿洗除锈能够有效提高清洗的效率,但是如果 Fe 基底表面留有水分的残余,会造成已清洗好的 Fe 表面二次腐蚀.为解决这一问题,在原清洗用激光束旁并行地加入一钝化激光.钝化激光应选用准连续激光器或连续激光器.

1.06  $\mu\text{m}$  激光不易被水直接吸收,而是透过残余水膜被下层的 Fe 基底吸收.而 1.06  $\mu\text{m}$  激光的穿透深度与激光光斑的面积相比很小,因此这一激光加热过程可使用一维模型来描述.

为简单起见作定性分析,假设激光脉冲的时间形状是一个矩形,以下只计算 Fe 基底表面的温度.假定铁基底厚度足够大,采用一维前端导热无限长度矩形脉冲模型

$$\rho c \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (7)$$

式中  $\rho$  为铁的密度,为 7.86  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $c$  是铁的比热,为 460  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $k$  为铁的热导率,为 46.52  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $\tau$  为激光脉冲宽度,此处取 100 ns.  $z$  坐标轴的正向为表面的法向指向铁基底的内部.

边界条件为

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \alpha I_{\text{avg}}, \\ T \Big|_{z=\infty} &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为铁对 1.06  $\mu\text{m}$  激光的吸收系数,此处取 0.36,  $I_{\text{avg}} = \frac{E_{\text{pulse}}}{\tau \cdot S}$  为激光的平均峰值功率密度,约为  $10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ .

由(7)式和(8)式可得到温度分布的解析解:

$$T(z,t) = \frac{2\alpha I_{\text{avg}}}{k} \sqrt{a_t t} \cdot f\left(\frac{z}{2\sqrt{a_t t}}\right), \quad (9)$$

式中  $a_t = k/(\rho c)$ , 是铁材料的热扩散系数,为  $1.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $f(x) = \int_x^\infty \int_p^\infty \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-s^2) ds$ .

只考虑表面温度,即令  $z = 0$ ,可得

$$T(0,t) = \frac{2\alpha I_{avg}}{\sqrt{\pi k}} \sqrt{a_t t}. \quad (10)$$

代入以上数据,并令  $t = \tau = 100 \text{ ns}$ ,可得一个脉冲作用之后 Fe 基底的表面温升为

$$T(0,100\text{ns}) = \frac{2\alpha I_{avg}}{\sqrt{\pi k}} \sqrt{a_t t} = \frac{2 \times 0.36 \times 10^9 \times \sqrt{1.29 \times 10^{-5} \times 10^{-7}}}{\sqrt{\pi} \times 46.52} = 9.92 \text{ K}. \quad (11)$$

准连续激光的重复频率很高,0.5~50 kHz 之间,因此一个脉冲作用之后,热量来不及散失,第二个激光脉冲就又作用在了同一位置。因此可以通过控制作用在同一位置上的脉冲个数来控制 Fe 基底表面的温升。湿洗时残留在 Fe 基底表面的液膜很少,准连续激光器的重复频率很高,只需很短时间就可以通过基底加热液膜,使液膜气化从表面脱离。这样就消除了液膜残余引起的二次腐蚀的可能性。

### 3.3.2 均匀钝化的实现

针对 Fe 的腐蚀机制,人为地通过各种办法使铁表面生成一层致密的氧化物薄膜,保护内部的金属,这种工艺就是钢铁的钝化。传统的钝化工艺是使用酸化的办法<sup>[1]</sup>。激光照射钢铁表面同样能够实现钝化<sup>[15]</sup>,但是使用的激光器是 XeCl 准分子激光器,相比于实验中使用的固体激光器造价昂贵,不利于实用。

第二束激光在做完残余液膜清洗的同时,会加热金属基底。由于前一步激光湿洗的特点,清洗后的样品表面是比较光洁而均匀的,这时通过激光均匀的给表面加热,使表面在同一较高温度下加快氧化反应,生成透明氧化铁薄膜,同样是一种致密的结构,实现了激光致钝化,这种钝化的均匀性可以通过合理控制激光参数实现。

## 4 结 论

针对锈层多孔疏松结构的特点,采用脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器湿洗清除钢铁表面的锈蚀。通过喷涂液膜,使液体渗透到锈层内部去,能够改善锈层的热传导和提高材料的平均比热。同时液体自身的受热爆发性气化也会起到破碎锈层的作用,能够有效提高激光清洗的效率。但是液体如果有残余会加剧铁的电化学腐蚀,必须及时地把残余的液膜去除。

针对液膜的残余,使用第二束声光调 Q Nd:YAG 激光加热去除铁基底表面的残余,根据所选用激光器的特点,可以通过控制激光脉冲个数的方式控制表面

的温度,使得表面残余的液膜去除之后,加热铁基底表面,加快铁基底表面的氧化过程,生成致密的透明氧化铁薄膜,形成均匀钝化,有效提高清洗后铁质材料的抗腐蚀性。

根据上面的实验特点,设计了一种双光束激光湿洗装置,使清洗、钝化一步完成,适用于清洗后表面光洁度要求较高的钢铁制品。

## 参 考 文 献

- Huang Shuju. Corrosion and Protection of Metals[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988. 58-67.  
黄淑菊. 金属的腐蚀与防护[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1988. 58-67.
- Hou Mei, Zhang Chuanjun. A comparative research on several advanced way of removing rust in modern industry[J]. Mechanical Research & Application, 2007, 20(4): 19-20.  
侯 枚,张传俊. 现代工业中几种先进除锈方法的对比研究[J]. 机械研究与应用,2007, 20(4): 19-20.
- Boris Luk'yanchuk. Laser Cleaning [M]. New Jersey: World Scientific Publishing, 2002. 50-102, 229-254.
- Tong Yanqun, Zhang Yongkang, Yao Hongbing, et al.. Real-time monitoring system for laser derusting based on plasma intensity[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003009.  
佟艳群,张永康,姚红兵,等. 基于等离子体光强信号的激光除锈实时监测系统[J]. 中国激光,2011,38(10): 1003009.
- F Bloisi, A C Barone, L Vicari. Dry laser cleaning of mechanically thin films[J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1-4): 121-124.
- S Siano. Principles of Laser Cleaning in Conservation[OL]// . http://alpha1.infm.ro/cost/pagini/handbook/chapters/prin\_cl\_e.htm. [2014-2-21].
- Boris Luk'yanchuk. Laser Cleaning [M]. New Jersey: World Scientific Publishing, 2002. 229-254.
- Yan Hong, Hua Yinqun, Chen Ruifang, et al.. Study on the tribological and wear behavior of FeNi alloy treated by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s1): 364-367.  
颜 红,花银群,陈瑞芳,等. 激光冲击强化铁镍合金摩擦磨损性能的研究[J]. 中国激光,2010,37(s1): 364-367.
- Ren Xudong, Zhang Tian, Zhang Yongkang, et al.. Improving fatigue properties of 00Cr12 alloy by laser Shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2111-2115.  
任旭东,张 田,张永康,等. 激光冲击处理提高 00Cr12 合金的疲劳性能[J]. 中国激光,2010,37(8): 2111-2115.
- Yang Sook Koh. Laser Cleaning as a Conservation Technique for Corroded Metal Artifacts [D]. Sweden: Lulea University of Technology, 2006.
- Sei J Oh, D C Cook, H E Townsend. Characterization of iron oxides commonly formed as corrosion products on steel [J]. Hyperfine Interactions, 1998, 112(1-4): 59-66.
- Yangsook Koh, Istvan Sárady. Cleaning of corroded iron artefacts using pulsed TEA CO<sub>2</sub>- and Nd:YAG-lasers[J]. J Cultural Heritage, 2003, 4(s1):129-133.
- P E Lafargue, N Chaoui, E Millon, et al.. The laser ablation/desorption process used as a new method for cleaning treatment of low carbon steel sheets [J]. Surface and Coating Technology, 1998, 106(2): 268-276.
- Claude Phipps. Laser Ablation and Its Application[M]. New York: Springer Science+Business Media LLC, 2007. 215-229.
- A Pereira, A Cros, Ph Delaporte, et al.. XeCl laser treatment of steel surface[J]. Appl Sur Sci, 2002, 197-198: 845-850