

# 激光束辐照下镀铬层结构和性能的变化

李永欣<sup>①</sup>

李德玉

(水利与土木工程学院) (机械工程学院)

**摘要** 采用正交实验方法对镀铬轴套进行激光辐照处理,并对处理后的镀铬层进行显微硬度测试和X射线衍射(XRD)分析,考察镀铬层结构和性能的变化。结果发现,当激光辐照能量密度  $E$  小于  $12 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$  时,镀铬层硬度在  $\text{HV}800 \sim 1\,000$  的范围内,镀层耐磨性最好;一旦  $E$  超过  $12 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,镀层硬度陡降。

**关键词** 镀铬层;激光辐照;表面处理;硬度

**中图分类号** TG156.99

## Transformation of Chromium-plating's Structure and Properties After Irradiation by Laser Beam

Li Yongxin

Li Deyu

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU) (College of Machinery Engineering, CAU)

**Abstract** The chromium plating neck bushes are irradiated by the laser in orthogonal experiment. In order to inspect the transformation of the chromium-plating's structure and properties, the micro hardness testing and X-ray diffraction (XRD) testing are made after the laser treating. The influence of the laser surface treatment on the chromium-plating's structure and properties are studied. The results show that when radiation energy density of laser beam  $E$  is less than  $12 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ , the hardness of chromium-platings will be in the range of  $\text{HV}800 \sim 1\,000$ ; when  $E > 12 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ , the hardness of chromium-platings will decrease sharply.

**Key words** chromium-plating; laser radiation; surface treating

随着现代科学技术的发展,对零件表面性能的要求越来越高,零件服役的条件也越来越苛刻。在这种情况下,以往一些单一的表面处理技术已逐渐不能满足要求,而需要将2种或2种以上的表面处理技术综合起来对零件进行表面复合强化处理。镀铬+激光表面强化的复合处理技术即是一种行之有效的办法。在这种工艺条件下,镀铬层和基体在激光束的辐照下基本达到冶金结合,同时基体也得到一定强化,从而克服了镀铬层结合强度低,承载能力差的缺点,有效地提高了镀铬零件的使用寿命<sup>[1]</sup>。然而研究中发现,激光束辐照后镀铬层表面硬度有所下

收稿日期:1996-05-06

①李永欣,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)158信箱,100083

降,下降的幅度随激光辐照工艺条件的不同存在很大差异,在有些工艺条件下,甚至降至最佳硬度范围之外,使之耐磨性能反而下降<sup>[2]</sup>。为了探索激光表面处理对镀铬层结构和性能的影响规律,笔者采用正交实验方法,对经激光表面处理的镀铬层进行显微硬度测试和X射线衍射(XRD)分析,考察激光辐照工艺参数对镀铬层结构和性能的影响,并对其机理进行分析。

## 1 实验方法

试验材料为镀铬45钢轴套,轴套的电镀工艺参数为:电流密度 $J=10\text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ ,镀液温度 $t=49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,镀液成分为 $\text{CrO}_3:250\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{SrSO}_4:2.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。电镀后镀铬层厚度达到 $66\text{ }\mu\text{m}$ ,硬度为 $\text{HV}_{0.1}1080$ 。

采用 $2.5\text{ kW}$  HGL-81型横流电激励 $\text{CO}_2$ 气体激光器对轴套进行处理,轴套表面预先涂覆黑色吸光涂料。激光器配有数控机床,激光光束可在 $x$ 和 $y$ 方向上移动,移动速度可调。试样表面的激光光斑近似圆形,光斑大小可通过调节聚焦透镜到试样表面的距离而得到控制。实验中采用的激光输出功率为 $1200,900,700,500\text{ W}$ ,激光光束扫描速度为 $25,20,15\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,激光光斑直径为 $6,5,4\text{ mm}$ 。采用 $L_{12}(4^1\times 3^2)$ 正交设计表安排实验。

为了保护镀层不受破坏,将激光处理后的轴套在MOS线切割机床上切开,制成金相观察试样,对试样进行显微硬度测试及XRD分析。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 镀铬层的硬度变化

图1是镀铬层硬度随激光输出功率 $P$ 、光束扫描速度 $v$ 和光斑直径 $D$ 的变化趋势。可以看出:1)随着激光功率的增大,镀铬层的硬度逐渐下降;2)当激光光束扫描速度较慢,即激光与试样的相对作用时间较长时,镀铬层硬度下降的幅度很大,当激光光束扫描速度逐渐增加时镀层硬度有一定程度的回升;3)光斑直径由 $6\text{ mm}$ 缩小到 $4\text{ mm}$ 时,镀铬层硬度呈下降趋势。

为了更直接地表示出激光处理对镀铬层硬度的影响,绘出了激光束辐照能量密度 $E$ 与镀铬层硬度之间的关系(图2)。可以看出,随着能量密度的增大,镀铬层明显软化,硬度呈下降趋势。另外,在 $E<12\text{ J}\cdot$

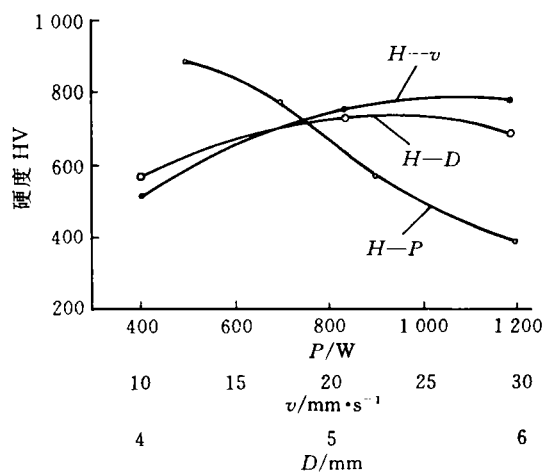


图1 镀铬层硬度的变化趋势

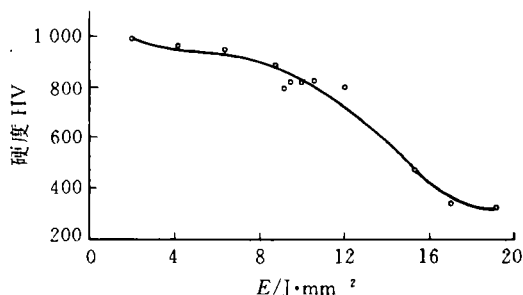


图2 激光能量密度与镀铬层硬度的关系

$\text{mm}^{-2}$ 时,镀铬层硬度维持在 HV1 000~800 的范围内;一旦  $E$  超过  $12 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$  这个阈值,镀铬层的硬度陡降;当  $E > 16 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$  时,镀铬层硬度基本保持在 HV300~500 范围内。

## 2.2 镀铬层的 XRD 谱变化

图 3 为试样的 XRD 谱,各试样的谱线上均有 2 个衍射峰。经测定知,这 2 个衍射峰的位置分别为  $2\theta_1 = 44.2^\circ$  和  $2\theta_2 = 81.74^\circ$ ,由此得到相应的晶面间距

$$l_1 = \lambda / 2\sin\theta_1 =$$

$$1.5406 \text{ nm} / 2\sin 22.21^\circ =$$

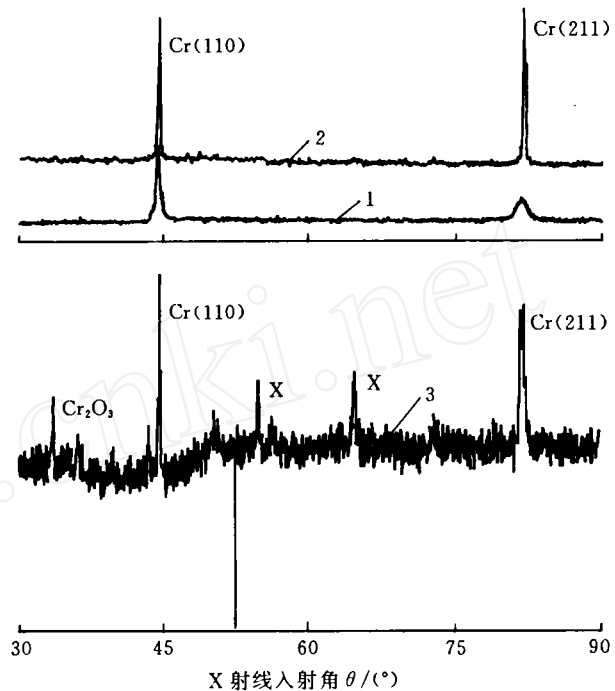
$$0.2038 \text{ nm}$$

$$l_2 = \lambda / 2\sin\theta_2 =$$

$$1.5406 \text{ nm} / 2\sin 40.87^\circ =$$

$$0.1177 \text{ nm}$$

查 Cr 的 ASTM 卡片证实,第 1 个衍射峰为 Cr 的 (110) 面,第 2 个衍射峰为 Cr 的 (211) 面,比较图 3 中曲线 1 和 2 可知,未经激光处理的试样,其镀层具有较为明显的 (110) 面择优取向,经过激光处理后的镀铬层的 (211) 面取向增强;未处理镀层衍射峰的半高宽均大于经过处理的。由曲线 3 可见,在较高能量密度下处理的镀层,其 X 射线谱上有多个非铬的衍射峰。



1—未经激光处理的试样  
2—激光处理试样 ( $P=700 \text{ W}$ ,  $v=20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D=5 \text{ mm}$ )  
3—激光处理试样 ( $P=1200 \text{ W}$ ,  $v=15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D=6 \text{ mm}$ )

图 3 试样的 XRD 谱

## 3 镀铬层结构变化分析

激光表面处理与常规热处理的不同之处在于,激光束具有高密度能量,当激光束照射到材料表面时,材料表面的升温速度可达  $10^5 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ;当光束离开时,材料表面冷却速度可达  $10^4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在这种作用条件下,镀铬层的组织和结构将发生变化。由 Fe-Cr 二元合金相图可知,常温下铬的结构类型为  $\alpha$  相,即体心立方的铬,其熔点为  $1875 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在从室温到  $1875 \text{ }^\circ\text{C}$  的范围内,铬始终保持  $\alpha$  相,直到转变为液相。

在激光束的辐照下,试样表面的温度受到激光工艺参数、材料的热特性参数及所处位置的影响,其各处的温度是不同的。采用三维准稳态温度场分布的公式,运动热源产生的三维准稳态温度分布可以表示为<sup>[3]</sup>:

$$t(x, y, z) = \frac{\beta P}{2c\rho\sqrt{4\pi\alpha}\cdot D^2} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha\tau}\right) \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+D/2}{\sqrt{4\alpha\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-D/2}{\sqrt{4\alpha\tau}}\right) \right] d\tau$$

$$\left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x+v\tau+D/2}{\sqrt{4a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x+v\tau-D/2}{\sqrt{4a\tau}}\right) \right] \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为涂层吸收率; $P$ 为激光输出功率, $W$ ;  $c$ 为材料比热容, $J(\text{kg}\cdot\text{C})^{-1}$ ;  $\rho$ 为材料密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $a$ 为热扩散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D$ 为光束直径, $\text{m}$ ;  $v$ 为激光光束扫描速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\tau$ 为激光束作用时间, $\text{s}$ 。

因式(1)包含了误差函数  $\operatorname{erf}(x)$  的积分,数值计算量较大,而且不能直接给出镀铬层表面在激光处理时所能达到的最高温度。对式(1)进行积分变换和归一化处理,得

$$t = \frac{\beta P}{2c\rho v\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{Z^2}{2S}\right) \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{Y+u/a^*}{\sqrt{2S}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{Y-u/a^*}{\sqrt{2S}}\right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{X+S+u}{\sqrt{2S}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{X+S-u}{\sqrt{2S}}\right) \right] \cdot \frac{dS}{\sqrt{S}} \quad (2)$$

式中: $X=xv/2a$ ,  $Y=yv/2a$ ,  $Z=zv/2a$ ,  $u=Dv/4a$ , 这4个参数的单位均为1;  $a^*$ 为形状因子,对于圆形激光束  $a^*=1$ ,对于矩形激光束  $a^*=b/L$  ( $b$ 为激光束宽度,  $L$ 为长度)。由式(2)可知,温度场关于  $Y$  轴对称,则最高温度在  $Y=0$  轴面上;因此令式(2)中  $Y=0$ ,并令

$$f(u, a^*, Z) = \max \left\{ \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{Z^2}{2S}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{u/a^*}{\sqrt{2S}}\right) \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{X+S+u}{\sqrt{2S}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{X+S-u}{\sqrt{2S}}\right) \right] \cdot \frac{dS}{S} \right\}$$

由此,可以得到任意深度处最高温度  $t_m(Z)$  的表达式

$$t_m(Z) = t_m(0) \cdot f(u, a^*, Z)$$

式中  $t_m(0)$  为用一维导热公式求得的表面最高温度,其表达式为

$$t_m(0) = \beta\rho / (D\lambda\sqrt{\pi u})$$

其中  $\lambda$  为导热系数,  $\lambda = \alpha c\rho$ ;  $f(u, a^*, 0)$  可由  $u$  和  $a^*$  的值从曲线上查得<sup>[3]</sup>。

由上述公式可计算出,在本实验条件下试样表面最高温度为  $375\sim 1\,246\text{ }^\circ\text{C}$ ,远未达到铬的熔点  $1\,875\text{ }^\circ\text{C}$ ;但随着激光能量密度的增大,镀铬层温度逐渐升高。从热力学和动力学观点来看,随着镀层温度的上升,镀层的晶粒有长大的趋势;同时,位错密度也将明显下降。这与XRD实验中经激光表面处理后镀铬层(110)晶面衍射峰的宽化效应消失的结果是一致的。事实上,镀层晶粒长大和内应力减小(即位错密度下降),都会使镀层衍射峰的宽化效应减弱甚至消失。镀层中的氧化物和其他杂质在激光束的作用下会发生聚结的趋势。从图3曲线3中可以看出,当激光能量密度较高时,镀铬层的XRD谱上出现多个铬的氧化物的衍射峰及其他的未知衍射峰,这也证明了这一结果。

Hoffer和Hintermann<sup>[4]</sup>指出,镀层晶粒尺寸、位错密度和外来杂质的吸附作用均影响镀层的显微硬度;因此,在进行激光表面处理后,镀铬层晶粒长大、位错密度降低和镀层中氧化物及其他杂质减小,均会造成镀层硬度的降低。

镀铬层硬度下降,将对其耐磨性产生一定影响。耐磨性好的零件,其硬度一般较高,然而,对于镀铬层而言,硬度越高,耐磨性不一定越好。据文献[4]报道,镀铬层的硬度为HV750~850时,其耐磨性最好;当镀铬层的硬度超过HV1000时,镀层的协同抗变形能力减弱,耐磨性反而下降。镀铬层的硬度在零件使用过程中不是一成不变的,其初始硬度一般均超过HV1

000。在镀铬零件工作的开始阶段,由于镀铬层的硬度高,镀层的协同抗变形能力弱,镀层磨损很快,其硬度也逐渐下降;当硬度下降到 HV750~850 时,镀层的协同抗变形能力增强,镀层进入正常磨损阶段,此时镀层的耐磨性最好。

通过以上对镀铬层耐磨性以及镀层硬度测试结果的分析可知,选取合适的激光工艺参数使激光能量密度  $E < 12 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,这样处理的镀铬层,其硬度处于最佳范围之内,镀层的耐磨性最好。

## 4 结 论

对经激光表面处理的镀铬轴套进行镀层显微硬度测试及 X 射线衍射分析,结果表明,在激光束的辐照下,镀铬层中的晶粒长大,镀铬层内的氧化物及其他杂质也发生聚结,并且向镀层的表面扩展。镀层的硬度有所下降,其下降的幅度与激光能量密度成正比。

在对试验数据进行分析的基础上对镀铬层在激光束辐照后硬度下降的原因进行了分析,并提出了选择激光工艺参数的依据和条件。

### 参 考 文 献

- 1 李德玉,李永欣,唐西南,等. 镀铬与激光表面强化复合处理. 北京农业工程大学学报. 1995,15(4):66~70
- 2 李永欣. 镀铬与激光表面强化复合处理技术的应用研究:[学位论文]. 北京:中国农业大学,1996. 21~27
- 3 Sandven O A. A Three dimensional heat flow model for medication focus depth in laser surface transformation. *Hardening L I A*,1983,138(5):533~535
- 4 章葆澄主编. 电镀工艺学. 北京:北京航空航天大学出版社,1993. 221