

# 低碳钢表层镀铬激光处理后组织及抗磨特性

黄勇

(武汉水利电力大学机械系, 武汉, 430072)

**摘要:** 采用 2.5kW CO<sub>2</sub> 连续激光波以改进低碳钢表面金相组织。激光处理后表面金相组织随激光处理参数变化。用扫描电镜观察磨损表面形貌后发现因激光辐射作用及快速凝固而改进低碳钢表面金相组织, 所以表面硬度和抗磨性较原材料提高。

**关键词:** 激光处理 耐磨特性

## Wear behaviour and microstructure of laser processed low carbon steel surface with chromium plating

Huang Yong

(Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering)

**Abstract:** To improve the surface performance, a 2.5kW CO<sub>2</sub> CW laser has been used to modify the surface microstructure of low carbon steel. The surface microstructure depends upon the processing parameters. By using a scanning microscope to observe the surface wear behaviour, it is found that laser radiation and rapid solidification can greatly improve the surface microstructure and increase surface hardness and anti-abrasion.

**Key words:** laser processing wearlessness

### 一、引言

因磨损而导致工程零件更换, 而更换易损件成本的主要消耗在各种加工处理。通常用不同激光束处理金属表面来提高零部件特殊部位抗磨性, 如表面熔化<sup>[1,2]</sup>、淬硬<sup>[3]</sup>、表面处理和合金化<sup>[4]</sup>。激光表面合金化所用的母材相对价廉, 且有一定的强度, 这种材料表面涂有适当金属合金化后, 用高能密度激光处理, 使涂料与下部基体熔化和混合而形成表面合金化层。这种表面合金化组织较母材组织细小、坚硬和抗腐蚀, 因此获得更坚固和耐久性, 从而降低维修及更换零件费用。

本文研究激光处理的熔化区域快速凝固后产生高抗磨性层。把等离子喷射和激光熔化涂料用于滑轮-气缸试验系统, 采用这种处理工艺可在金属和合金表面产生很薄激光表面层, 以

提高金属表面的抗磨性,可以改进低载荷磨损特性。

## 二、实验装置

实验中所用母材为低碳钢,试样加工成 45mm×25mm×5.4mm 的尺寸,标称成分如表 1 所示。用常规的电镀方法在试样表面进行镀铬合金化处理。初期的镀铬层厚度范围为 20~30 $\mu\text{m}$ 。铬沉积以后,试样在 210 $^{\circ}\text{C}$  下真空除气以消除夹持在涂层中的  $\text{H}_2$ 。最后经研磨加工的试样表面镀铬层厚度为 10 $\mu\text{m}$ 。

Table 1 Normal compositions of base material

element	C	S	Mn	P	Si
amount wt%	0.15	0.10	0.78	0.035	0.2

实验时,用旋转的 2.5kW  $\text{CO}_2$  连续激光波照射,激光束直径为 2.8mm。实验装置如图 1 所示。激光产生圆形光束呈高斯强度分布。所有试验中约 50% 熔化区之间相互重叠。由于激光辐射时金属有高达 10.6 $\mu\text{m}$  反射波长,故在试样表面喷涂很薄石墨层后,可促进吸热和增加激光合金化过程碳量,因而提高表面层硬度。如用不同的激光参数(如表 2 所示),则获得不同金相组织、合金化深度、表面不平度及硬度分布。

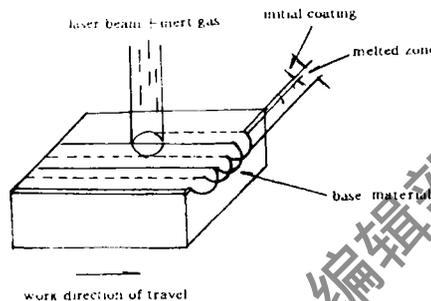


Fig. 1 Laser-processing configuration

Table 2 Laser-processing parameters and experimental results

specimen	chromium thickness ( $\mu\text{m}$ )	laser-processing conditions			melted depth (mm)	hardness of LAZ** (Hv-200kg)	roughness $K_a$ ( $10^{-6}\text{in}$ )
		power (W)	speed (mm/min)	energy density* ( $\text{J}/\text{mm}^2$ )			
A <sub>1</sub>	29~30	1200	270	121.2	0.399	503~539	395.4
A <sub>2</sub>	29~30	1200	360	90.9	0.283	516~564	271.4
A <sub>4</sub>	29~30	1200	600	54.5	0.170	451~467	180.7
B <sub>1</sub>	30~31	1600	360	121.2	0.423	516~558	346.2
B <sub>2</sub>	30~31	1600	480	90.9	0.366	524~567	208.5
B <sub>3</sub>	30~31	1600	600	72.2	0.223	464~500	192.7
C <sub>1</sub>	30~32	2000	450	121.2	0.430	523~557	271.4
C <sub>2</sub>	30~32	2000	600	90.9	0.368	527~564	246.5
C <sub>3</sub>	30~32	2000	750	72.7	0.334	500~534	173.0
C <sub>4</sub>	30~32	2000	1000	54.5	0.191	499~521	167.1

\* Energy density [ $4P/\pi Dv = \text{Power density}(4P/\pi D^2) \times \text{interaction time}(D/v)$ , where  $P$  is laser power,  $D$  is beam diameter(2.8mm) and  $v$  is working speed]

\*\* LAZ: laser-surface-alloying zone (fully alloyed depth)

用惰性气体屏蔽可使试样达到最小氧化,管子中以 25 l/min 流速输送氩气进行屏蔽。用

T20-D Hommel 试验仪测量试样不平度,然后测定不同的激光表面合金化层深的维氏硬度;用光学显微镜观察合金化层组织;用X射线衍射分析测定磨损前、后残留奥氏体量;用能谱扩散波长映象技术测量合金化范围中铬和碳量。按照标准要求精制透射电镜金属薄片,然后用EM300 菲利普进一步检测金属组织。

用滑动-涨圈机(如图2所示)进行磨损试验。240目SiC研磨纸环绕滑轮,滑轮宽度为12mm。在25N载荷下,试样往复运动速度为每分钟40周波;试样往复运动一次滑轮转动 $0.9^\circ$ ;试样相对磨损范围为 $32\text{mm} \times 12\text{mm}$ 。用称重精确到 $0.1\text{mg}$ 方法测量试样磨损重量损失,用扫描电镜观察磨损表面形貌以便分析金属磨损机理。

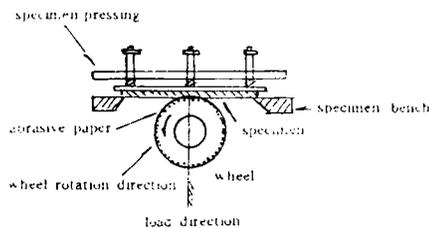


Fig. 2 Schematic diagram of wear test setup

### 三、结果和讨论

#### 1. 微观组织

经多次激光处理试样横断面呈现激光重熔后的合金化,同时明显看出相邻激光束通过重叠部分。通过研究激光表面合金化达到控制能量密度、激光束与母材的相互作用时间以获得不同微观组织。因金属材料激光表面合金化后不同的冷却速率产生不同的微观组织。在 $120\text{J}/\text{mm}^2$ 以上高能密度处理时(铬 $<15\%$ 和较低的冷却速率),则产生铁素体-马氏体和一些残留奥氏体的混合组织,这种组织的显微硬度为 $510\sim 550\text{Hv}$ 。在 $73\text{J}/\text{mm}^2$ 以下低能密度处理时,则产生铁素体-奥氏体及含铬的碳化物混合组织,这种组织显微硬度范围为 $460\sim 520\text{Hv}$ 。若能量密度改为 $90\text{J}/\text{mm}^2$ ,则形成除上述两种组织以外的混合组织,这种混合组织的硬度为 $520\sim 560\text{Hv}$ 。

从 $\text{C}_2$ 试样横断面的激光表面合金化层与激光处理表面 $20\mu\text{m}$ 深的距离内硬度分布,可看出两个相邻激光束通过重叠中央时,则硬度出现最小值。从不同移动速度获得完全合金化试样的硬度值,可看出相互作用时间越长(或能量密度越高),则硬度越高。

#### 2. 表面性质和磨损测量

试样用 $1200\text{W}$ , $1600\text{W}$ 和 $2000\text{W}$ 激光功率和不同的相互作用时间处理以获得不同的熔化深度、表面不平度、表面平均硬度及重量损失。实验表明,随相互作用时间增加,则熔化层深增加;若相互作用时间相同,则较高的功率产生较大的熔化深度。实验还表明,随激光能量密度增加则熔化层深度增加,这是由于较高的激光功率密度促进热能吸收,所以随激光功率密度增加则熔化层深度增加。此外,材料表面不平度增加亦增加了熔化深度,这是由于粗糙平面吸收有效的组合能量。从三种不同激光功率下处理金属所获得表面平均硬度和激光束-基底材料相互作用时间关系中看出,随相互作用时间增加则硬度首先增加达最大值,然后降低。这是由于高能密度(大约 $90\text{J}/\text{mm}^2$ )处理金属表面导致奥氏体向马氏体转变。同时亦可看出激光束能量密度在 $90.9\text{J}/\text{mm}^2$ 的冷却速率大于 $121.2\text{J}/\text{mm}^2$ 的冷却速率,这种较高的冷却速率将形成细小的枝晶组织和较高的硬度值。

由硬磨料引起钢的磨损表现出随金属材料的硬度增加则抗磨性增加,但在相同硬度时奥氏体组织优越于铁素体和马氏体组织<sup>[5]</sup>。由于残留奥氏体在抗磨损方面起重要作用,因此,在

磨损试验前、后测量奥氏体数量和表面合金化层显微硬度。奥氏体量和显微硬度数据如表3所示。在高能密度(120J/mm<sup>2</sup>以上)处理时产生铁素体-马氏体,且有一些残留奥氏体混合组织。这种马氏体组织有高的位错密度及在很小应变时有先存的裂纹。由于塑性变形受断裂约束及热影响引起表面耗损,所以进一步增加变形则使表面耗损较小。因此磨损试验后表面硬度降低(例如试样A<sub>1</sub>,B<sub>1</sub>和C<sub>1</sub>;见表3)。在低能密度处理(73J/mm<sup>2</sup>以下)过程中产生铁素体-奥氏体组织。在较高的应变-硬化下,接近于磨损表面的奥氏体转变为马氏体,因此可观察到磨损试验后,因磨损表面强化程度提高,而使表面硬度增加和残留奥氏体量减少(例如A<sub>4</sub>,B<sub>3</sub>,C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>;见表3)。试样经磨损试验后除了上述两种微观组织外,还有奥氏体转变为马氏体混合组织,因此硬度稍有增加。

在测量激光表面合金化试样重量损失相对于激光束-基底材料相互作用时间关系时得出,在相同激光功率下,随相互作用时间增加,则重量损失降低至最小

值,然后又增加。实验中普遍发现随激光表面平均硬度增加,则激光表面合金层抗磨性增加。抗磨性亦受表面平均不平度和表面硬度组合影响,可以看出当表面较平坦和表面硬度较高时,则抗磨性较高。换言之,研究经不同能量密度处理后试样所产生重量损失时,发现激光处理能量

密度为90.9J/mm<sup>2</sup>时获得重量损失最小。这由于在这种激光处理态获得细小铬碳化物均布于马氏体基体中,且有一些残留奥氏体,因而产生高硬度及光滑的合金化层表面,所以抗磨性最好。

由于滑轮-涨圈实验为低应力磨损试验,在25.6m磨损距离内重量损失小于0.03g。为了研究不同合金化层深的抗磨性,所以在磨损试验中把25.6m磨损距离延长到128m,测量其重量损失列于表4。在测定磨损距离内材料重量损失的同时,测量表面不平度和显微硬度。在相同能量

Table 3 Retained austenite content and microhardness of surface-alloyed layer before and after the wear test

specimen	retained austenite(%)		microhardness	
	before	after	before	after
A <sub>1</sub>	2.4	2.6	641	574
A <sub>2</sub>	6.0	1.5	666	675
A <sub>4</sub>	15.0	5.4	481	528
B <sub>1</sub>	2.3	2.9	672	611
B <sub>2</sub>	4.9	3.4	690	703
B <sub>3</sub>	12.0	4.8	492	545
C <sub>1</sub>	2.0	2.8	675	588
C <sub>2</sub>	2.3	2.0	683	691
C <sub>3</sub>	10.0	4.6	606	654
C <sub>4</sub>	13.2	4.2	500	566

Table 4 Weight loss as a function of abrasion distance

specimen	abrasion distance (m)				
	25.6	51.2	76.8	102.4	128
weight loss (mg)					
A <sub>1</sub>	31.7	61.7	93.8	128.6	163.5
A <sub>2</sub>	24.4	52.9	78.0	104.6	137.3
A <sub>4</sub>	30.5	63.9	102.7	135.6	169.8
B <sub>1</sub>	27.1	57.4	85.7	120.3	156.2
B <sub>2</sub>	16.4	38.8	62.5	87.8	115.8
B <sub>3</sub>	31.1	59.8	90.8	126.0	157.6
C <sub>1</sub>	25.7	54.9	83.1	114.9	148.8
C <sub>2</sub>	24.7	52.1	80.1	111.8	140.2
C <sub>3</sub>	30.0	61.0	91.8	123.1	155.5
C <sub>4</sub>	27.9	57.5	88.9	122.1	157.2

密度处理时,可获得相似硬度分布(见表3,大约520~560HV),而试样B<sub>2</sub>存在最小表面不平度时(见表2, B<sub>2</sub>=208<C<sub>2</sub>=247<A<sub>2</sub>=271),则在磨损第一阶段(25.6m 磨损距离内)表现出较其它试样有较高耐磨性。在磨损第二阶段产生相似的重量损失是因为相似的硬度分布。从上述实验结果可看出抗磨性主要受表面不平度和硬度分布的控制。当能量密度(121.2J/mm<sup>2</sup>)大于能量密度(90.9J/mm<sup>2</sup>)时,亦表现出相似结果。由于试样C<sub>1</sub>表面光滑和硬度较高,故表现出较好抗磨性。此外,当试样移动速度增加,恒定激光功率下亦同样改进抗磨性。最佳抗磨性试样A<sub>2</sub>具有最高硬度值和适当的表面不平度。虽然试样A<sub>1</sub>具有最低硬度,但由于磨损过程中在较高应变硬化能力下使奥氏体转变为马氏体,从而产生较高抗磨性。在实验中还得出在较高功率密度下表现出相似结果。在恒定移动速度下,激光功率(或激光能量密度)增加时,试样A<sub>1</sub>在磨损最初阶段的重量损失等于试样B<sub>3</sub>,但在25.6m 磨损距离以后,其抗磨性主要受硬度控制,且随激光功率增加而增加。

随激光处理能量密度升高,使金属表面硬度提高而导致金属磨损量减少。用扫描电镜观察磨损表面形貌表明,试样C<sub>2</sub>在磨损实验过程中,因磨料质点作用而产生犁沟。同时还看出高硬度试样较软试样产生浅的沟槽。对高能密度处理的试样与低能密度处理的试样的抗磨性比较后得出:高硬度金属材料在磨料质点作用下产生浅的犁沟。用扫描电镜观察激光表面合金化试样表面后,得出磨损机理包括反复磨损过程中金属表面沟槽形成及磨损后期沟槽消除。

### 参 考 文 献

- 1 Kusinski J. Metall Trans, 1988;A19:377~382
- 2 Beurs H De, Hovius J A, Hosson J Th M De. Acta Metall, 1988;36:3123~3130
- 3 Wilala U K, Sulonen M S, Korhonen A S. Surf Coat Technol, 1988;36:773~780
- 4 Eiholzer E, Cusano C, MaZumder J. Wear properties of laser alloyed and clad Fe-Cr-Mn-C alloy. In MaZumder(ed.). ICALEO, Laser Institute of America, Toledo, OH, 1984;159~167
- 5 Moore M A, In Rigney D A(ed.). Fundamentals of friction and wear of materials. ASM, Metals Park, OH, 1981;73~118

作者简介:黄 勇,男,1941年10月出生。副教授。现从事耐磨材料及其制造技术等教学和科研工作。

收稿日期:1993-06-25 收到修改稿日期:1993-11-03

· 产品简讯 ·

### 高功率 CO<sub>2</sub> 激光器

DIAMOND820 和 825 两种新型封离式 CO<sub>2</sub> 激光器分别提供至少 200W 和 225W 输出功率,每一种型号都可购买完整系统或用于系统整体化的标准组件单元。焦斑尺寸小,快速矩形波脉冲和高峰值功率电平兼备可用于微细工程机械制造应用。

译自 L F World, 1994;30(1):155 於祖兰 译 巩马理 校