

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0601-04

# 激光淬火和加碳熔凝处理对 40Cr 钢耐磨性的影响

龙晋明 陈庆华 樊则宾 魏 仑

(昆明理工大学材料与冶金工程学院材料系, 昆明 650093)

**摘要** 对 40Cr 钢分别进行激光表面淬火(相变硬化)和加碳熔凝(白口铁化)处理,分析检测了处理后试样的显微组织、硬度和耐磨性,并将其与普通淬火态试样进行比较。结果表明:(1)激光淬火试样在两种不同磨损条件下均具有比普通淬火更好的耐磨性。(2)经激光表面加碳熔凝处理后,40Cr 钢表面可获得抗磨粒磨损能力较高的白口铁薄层(厚约 0.15 mm),但白口铁层/相变硬化区之间的过渡带所存在的较多残余奥氏体将使钢的耐磨性在一定程度上受到削弱。

**关键词** 40Cr, 激光热处理, 磨损, 耐磨性, 表面白口化

**中图分类号** TG156.99 **文献标识码** A

## Influence of Laser Quench and Carbon Alloying Treatment on the Wear Resistance of 40Cr Steel

LONG Jin-ming CHEN Qing-hua FAN Ze-bin WEI Lun

(Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

**Abstract** Laser quench and carbon alloying of 40Cr steel (Chinese brand) is performed on the surface. Carbon alloying is accomplished with pre-deposited carbon layer on the surface and scanning with the laser afterwards. The microstructure, micro-hardness as well as the wear properties were tested and compared with those obtained from the ordinary quenched work piece. It shows that: (a) the wear resistance of the laser quenched pieces is always superior than that obtained with ordinary quenched work piece; (b) after the carbon alloying, a thin layer of white iron was obtained which is very hard, but due to the presence of the residual austenite between the white iron layer and substrate, the wear properties of white iron layer is weakened.

**Key words** laser heat treatment, wear, wear resistance, surface carbon alloying

## 1 引言

激光热处理是近年来发展起来的一种材料表面强化新技术。它可以迅速地钢铁零件表面进行淬火或合金化,使钢件获得较普通淬火硬度更高的表面硬化层,且变形很小。因此,对于许多要求内韧外硬、耐磨和变形小的机械零件来说,激光热处理具有一定的优越性。这项技术在某些方面已经得到成功应用<sup>[1]</sup>。

40Cr 钢是机械制造业中的常用钢种,通常在调质态或淬火(整体淬火或表面感应加热淬火)+低温回火等常规热处理状态下使用。然而,在某些需要承受较强磨损作用的工况中,经普通热处理的 40Cr 钢的耐磨性仍不够高,设法提高其耐磨性具有实际意义。为此,我们对 40Cr 钢进行了激光相变硬化和

激光表面加碳熔凝处理实验,本文主要报道有关材料的耐磨性能的研究结果。

## 2 实验方法

### 2.1 试样制备和激光热处理

退火态 40Cr 钢经机加工为 100 mm×20 mm×10 mm 的试样。分别进行激光相变硬化(简称为 LH 处理)和激光表面加碳熔凝(激光白口铁化,简称为 LW 处理)处理。处理前先在试样表面预涂氮化物(作为 LH 处理的吸收层)或石墨(作为 LW 处理的碳源兼吸收层)。激光设备包括千瓦级横流式 CO<sub>2</sub> 激光器和数控工作台两部分。激光功率为 1000 W,扫描速度为 3~6mm/s。每个试样的 100 mm×20 mm 面上沿长度方向扫 3 道。

对部分试样进行普通热处理(840 °C × 30 min 油淬 + 200 °C × 90 min 回火, 简称为 GH 处理)以作耐磨性对比用。

## 2.2 磨损试验

在自制的磨粒磨损和冲蚀磨损两种试验机上进行磨损试验。试样尺寸均为 20 mm × 16 mm × 10 mm。同一条件下采用三个平行试样, 以其重量损失的平均值  $\Delta w$  表示磨损量, 并用  $1/\Delta w$  来表示耐磨性的高低。冲蚀磨损实验条件为: 水砂比 2:1, 冲击角 45°, 试样线速度 15 m/s。磨粒磨损采用 180# 三氧化二铝水砂纸, 载荷为 0.05 MPa 和 0.15 MPa, 磨损过程中喷水冷却。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 LH 试样的组织与磨损性能

#### 3.1.1 组织与硬度

经 LH 处理后 40Cr 钢的硬化层截面呈典型的月牙形态[图 1(a)], 显微组织为细针状和隐晶马氏体, 在过渡区附近存在少量未溶铁素体[图 1(b)]。表面至 0.5 mm 深度范围的平均硬度约为 750 Hv。

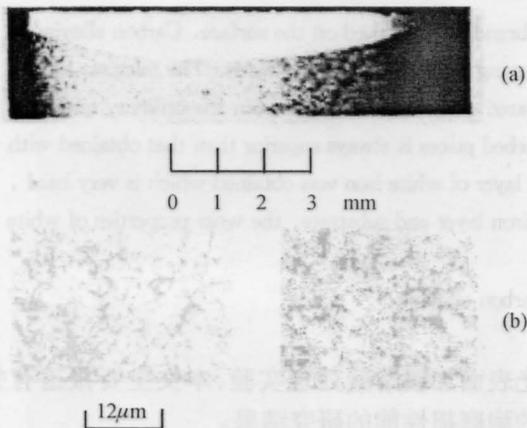


图 1 40Cr 钢样激光淬火区。(a) 宏观金相图;  
(b) 微观金相图(×800)

Fig. 1 Laser quenched zone of 40Cr steel. (a) macro structure; (b) microstructure (×800)

#### 3.1.2 磨损性能

##### 1) 冲蚀磨损

图 2 为 40Cr 钢经 LH 处理后的冲蚀磨损曲线。随磨损实验时间的延长, 两种试样的磨损量均增大。在相同时间条件下, LH 处理试样的磨损量明显低于普通淬火的试样, 即耐磨性优于后者(平均提高了 30%), 这与前者组织中马氏体和亚结构的细化和缺陷密度很高所致的表面硬度较高有关。

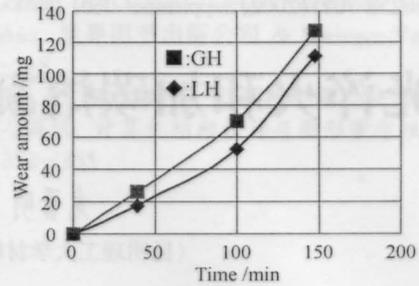


图 2 冲蚀磨损量-冲蚀时间关系图

Fig. 2 The relationship between wear amount and the wear testing time in erosion test

值得注意的是, 两种试样的磨损曲线均表现出前一段时间内( $t < 100$  min)较平缓而后一段时间( $t \geq 100$  min)变陡的现象, 即后期的磨损速度高于前期的磨损速度。此现象与通常磨损曲线前期较陡而后后期变得平缓的一般规律(因后期磨粒变钝而导致磨削作用减弱)有所不同, 其原因可能是: 冲蚀实验过程中, 料浆在转盘的高速搅拌作用下因摩擦升温, 开机 100 min 时温度已由室温升至 50 °C, 至实验结束停机时( $t = 150$  min), 砂料浆的温度达 70 ~ 80 °C。高温下导致试样表面氧化加剧, 而氧化产物易被磨去, 故磨损加快, 即后期因氧化作用增强而促进了材料的磨损。

##### 2) 磨粒磨损

图 3 为 40Cr 钢试样的磨粒磨损曲线。它表明, 40Cr 在两种处理条件下的磨损量均随时间的延长而增大, 但后期的磨损速度变低(曲线前期较陡, 后期平缓)。这是因为在磨损实验中, 磨盘上一直喷水冷却, 使试样的温度能保持在室温, 故介质(水、氧等)的腐蚀作用恒定。但磨粒( $Al_2O_3$ )对材料的磨损作用因其棱角逐渐变钝而变得较弱, 故后期的磨损速度减慢。在磨粒磨损条件下, 经 LH 处理的 40Cr 钢的耐磨性仍优于普通淬火态(耐磨性平均提高 75%), 与冲蚀磨损的结果(图 2)是一致的。

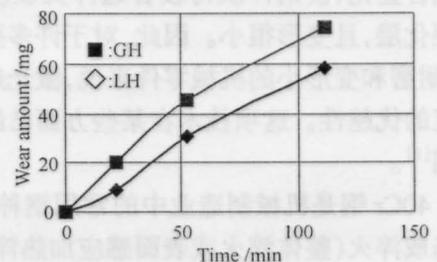


图 3 载荷为 0.05 MPa 时, 磨粒磨损量-磨蚀时间关系图

Fig. 3 The relationship between wear amount and the wear testing time in abrasion test under the load of 0.05 MPa

##### 3) 磨损形貌

显微观察表明, LH 处理和普通淬火两种 40Cr 钢试样表面均出现大量的冲蚀凹坑和部分显微切削沟槽, 一些凹坑边缘有隆起[见图 4(a)], 具有一般的冲蚀磨损表面形貌特征<sup>[2]</sup>。与普通淬火态相比, LH 处理的 40Cr 钢试样表面的冲蚀坑浅而小。

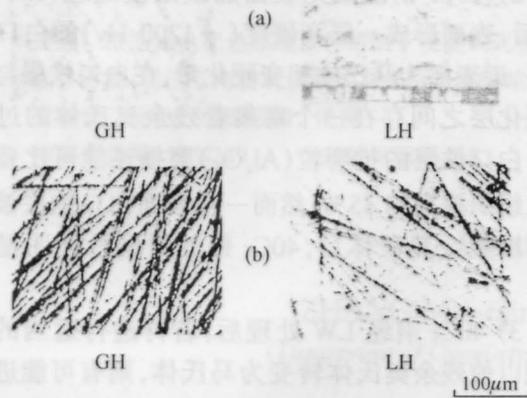


图 4 表面形貌. (a) 冲蚀磨损(扫描电镜); (b) 磨粒磨损(光学显微镜)

Fig. 4 Wore morphology of specimen surface: (a) after erosion(SEM photo); (b) after abrasion(OM photo)

由于磨粒( $Al_2O_3$ )对材料表面的显微切削和犁作用<sup>[3]</sup>, 在 40Cr 钢试样表面形成大量的磨痕[见图 4(b)]. 因 LH 处理试样的硬度比普通淬火态高, 其磨面上的磨沟窄而浅。然而普通淬火试样磨面上的磨沟较宽深。

尽管冲蚀磨损和磨粒磨损后的 40Cr 钢试样表面磨损形貌特征不同, 但无论哪种情况, 经 LH 处理的试样与普通淬火态试样相比, 均表现出较轻的表面损伤特征, 与磨损曲线所示的结果吻合, 这些结果都表明激光淬火试样的耐磨性优于普通淬火试样。

### 3.2 LW 试样的组织与磨损特性

#### 3.2.1 组织与硬度

图 5 为经 LW 处理后的 40Cr 钢试样表层的显微组织。可以明显看到其由三个区域组成。最外层为合金熔凝区, 主要为亚共晶白口铁; 里面为热影响区(相变硬化区), 由细针或隐晶马氏体构成; 在熔凝区与相变硬化区之间有一条宽约  $50 \mu m$  的白色过渡带, 主要由残余奥氏体所构成。

图 6 为 LW 处理试样截面上的硬度分布曲线, 可见靠近外表面因为是白口铁而使得其硬度很高 ( $1100 \sim 1200 \text{ Hv}$ ), 但该区很薄, 仅约为  $0.15 \text{ mm}$ 。在硬度较均匀的相变硬化区 ( $720 \sim 730 \text{ Hv}$ ) 与表面硬化区之间, 出现一个明显的硬度“凹陷”区, 此即是

由于残余奥氏体的存在所致。

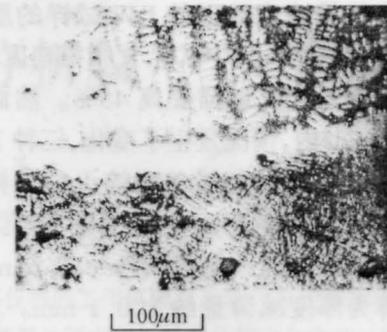
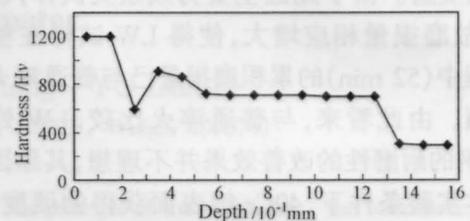


图 5 40Cr 钢表面加碳合金层显微组织  
Fig. 5 Microstructure of the laser carbon alloyed zone of 40Cr steel



40Cr 钢表面加碳合金层硬度-深度曲线  
(扫描速度 3 mm/s)

Fig. 6 Hardness versus depth of the LW specimen  
(scanning speed is 3 mm/s)

#### 3.2.2 磨粒磨损特性

图 7 为在一定的磨粒磨损条件下, 三种不同的激光扫描速度 LW 处理试样与普通淬火态试样磨损量的对比。在初始 22min 的磨损过程中, 激光扫描速度快的试样的磨损量比扫描速度慢的试样要大一些。这是因为激光扫描速度较快时, 外加的碳中有少部分来不及溶入熔体, 最后以单质碳(石墨)形式存留于基体中。由于石墨硬度低, 与基体结合不紧密, 在磨粒磨损时极易脱落, 从而造成磨损量增大。因此, 在进行 LW 处理时, 激光的扫描速度不能过快, 本实验中当扫描速度为  $3 \text{ mm/s}$  时, 试样的耐磨性较好。

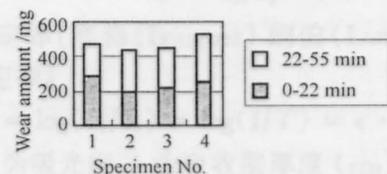


图 7 40Cr 钢表面加碳合金层在载荷为  $0.15 \text{ MPa}$  时的磨粒磨损量, 1 号为常规淬火, 2、3、4 号为表面加碳合金层, 激光扫描速度为  $3 \text{ mm/s}$ ,  $4 \text{ mm/s}$ ,  $6 \text{ mm/s}$   
Fig. 7 Wear amount of different LW condition in abrasive test under a load of  $0.15 \text{ MPa}$ , No. 1: GH, No. 2, 3, 4: LW with the scanning speed of  $3 \text{ mm/s}$ ,  $4 \text{ mm/s}$ ,  $6 \text{ mm/s}$  respectively

由图7可知,在前一段时间里(22 min)以三种不同的激光扫描速度处理的 LW 试样的磨损量均低于普通淬火试样。其中试样1(扫描速度3 mm/s)的耐磨性比普通淬火试样提高45%。然而在后一段时间(30 min)内,情况发生了变化,三种 LW 试样的磨损量均已明显地超过普通淬火的试样。这表明,LW 试样初期的耐磨性好,但后期变差。

将 LW 试样在前一段时间( $t = 22$  min)的平均磨损量换算为厚度减薄量约为0.1 mm。对照图6可知,此时硬度较高的白口铁层(厚度约为0.15 mm)差不多已磨耗掉2/3。在后一段时间里( $t = 30$  min),当剩余的白口铁层被完全磨去后,接着便是过渡区受磨。由于此区主要为残余奥氏体,较软不耐磨,故磨损量相应增大,使得 LW 试样在整个试验过程中(52 min)的累积磨损量已与普通淬火试样的相当。由此看来,与普通淬火比较,LW 处理对40Cr 钢的耐磨性的改善效果并不理想,其原因主要是在本实验条件下,40Cr 钢表面获得的硬度高、耐磨性好的白口铁层太薄( $\sim 0.15$  mm),而熔凝区/相变硬化区之间的过渡带又存在较多不耐磨的残余奥氏体。因此,设法增厚表面白口铁层,降低过渡带中的残余奥氏体含量是改善40Cr 钢激光加碳熔凝处理试样耐磨性的关键。

## 4 结 论

1) 与普通淬火相比,40Cr 钢经激光表面淬火处理后,在石英砂/水介质中的抗冲蚀磨损能力平均可提高30%,抗磨粒( $Al_2O_3$ )磨损能力平均提高75%。耐磨性提高的原因与淬火马氏体组织细化,高位错密度和高的表面硬度等因素有关。

2) 40Cr 钢经激光表面加碳熔凝处理(LW 处理)后,表面形成一层高硬度( $\sim 1200$  Hv)的白口铁薄层,近表面为马氏体相变硬化带,在白口铁层与相变硬化层之间存在一个富集着残余奥氏体的过渡区。白口铁层的抗磨粒( $Al_2O_3$ )磨损性能比普通淬火组织提高约45%,然而一旦表面白口铁层被磨去露出残余奥氏体后,40Cr 钢的耐磨性便明显下降。

3) 40Cr 钢经 LW 处理后,若再进行适当的后处理以使残余奥氏体转变为马氏体,则有可能进一步改善其耐磨性。

## 参 考 文 献

- 1 赵文珍. 金属材料表面新技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 236~242
- 2 磨损失效分析案例编委会. 磨损失效分析案例汇集. 北京: 机械工业出版社, 1985. 274~281
- 3 孙家枢. 金属的磨损. 北京: 冶金工业出版社, 1992. 344~386