

文章编号: 0258-7025(2003)06-0571-06

盐溶液中 20[#] 钢激光渗碳、渗硅的研究

沈曙明^{1,3}, 梁工英^{1,3*}, 袁森², 许德胜³

¹ 西安交通大学理学院, 陕西 西安 710049; ² 西安理工大学材料学院, 陕西 西安 710048
³ 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 在盐溶液中, 利用激光对 20[#] 钢表面进行渗碳、渗硅和相变硬化相结合, 实现了在对低碳钢表面化学渗碳、渗硅的同时, 完成激光表面淬火处理。研究表明, 20[#] 钢在盐溶液中激光渗碳、渗硅后, 可将材料表面的碳、硅含量增加 2 倍; 渗层具有一定厚度, 主要由马氏体和贝氏体组成, 试样表面的硬度提高到原试样的 2.5~3 倍, 耐磨性可达到处理前的 4~7.5 倍。在浓度为 10% 的 H₂SO₄ 溶液中, 静态腐蚀 240 h 后的实验表明, 20[#] 钢在经过激光渗硅化学热处理后, 抗腐蚀能力可提高 40% 左右。

关键词 激光技术; 低碳钢; 盐溶液; 激光化学热处理; 显微结构

中图分类号 TG 665 **文献标识码** A

Study on Laser Carburizing and Laser Siliconizing of Steel 20[#] in the Salt Solution

SHEN Shu-ming^{1,3}, LIANG Gong-ying^{1,3}, YUAN Sen², XU De-sheng³

¹ College of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

² College of Materials, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

³ The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A new heat treatment method that combines carburizing or siliconizing with laser hardening treatment in the salt solution was adopted. Using this method, the laser hardening treatment can be carried out, during surface carburizing and surface siliconizing. Experimental result shows that after laser carburizing and laser siliconizing, the carbon and silicon content in the low carbon steel 20[#] surface increases by twice as original steel. A hardening layer consisting mainly of martensite and bainite structure can be obtained, which surface hardness is 1.5~2 times harder than that of original sample. The wear resistance of laser carburizing and laser siliconizing samples is increased 4~7.5 times as original steel. The test of static corrosion in the 10% H₂SO₄ solution for 240 hours shows that the corrosion resistance of steel 20[#] after laser siliconizing is about 40% larger than original steel.

Key words laser technique; low carbon steel; salt solution; laser chemical heat treatment; microstructure

1 引言

化学热处理是一种常用的表面技术, 它是将工件置于某种化学介质中, 通过加热、保温和冷却使介质中某些元素渗入工件表层以改变工件表层的化学成分和组织, 从而达到改善和提高工件表层性能的目的^[1]。但是常规的化学热处理常需要将工件整体

加热, 长时间保温后进行淬火热处理, 不仅处理工期长, 工序复杂, 而且工件易变形。

激光表面淬火处理是近年来发展的一项新兴技术, 它是将高功率密度的激光束照射到工件表面, 使表面层快速加热到奥氏体区或熔化温度, 其后自行激冷发生马氏体转变, 而获得一定淬硬层或熔凝层。

收稿日期: 2002-03-11; 收到修改稿日期: 2002-05-13

基金项目: 华中科技大学激光技术国家重点实验室基金项目。

作者简介: 沈曙明(1957.12—), 男, 上海市人, 西安交通大学工程师, 硕士, 主要从事激光表面处理研究。

* 通讯联系人, 博士, 教授, 博士生导师, 西安交通大学理学院材料物理系。E-mail: gyliang@xjtu.edu.cn

激光表面淬火具有加热速度快、表层组织超细化、硬度高、工件变形小、无环境污染、生产效率高等一系列优点^[2~4]。已应用于汽车和拖拉机的汽缸、汽缸套、活塞环、凸轮轴等零件。

一般的激光淬火处理所针对的工件材料多为中碳素钢、高碳钢、铸铁或合金钢^[5,6]，材料在进行激光淬火时本身具有相变硬化能力及足够的激冷能力。而对低碳钢来说，它本身具有良好的塑性和韧性，但它的耐磨性与耐蚀性能很差，由于含碳量很低，用一般的激光淬火方法对其性能的提高甚微。对于较薄的零件，激光淬火处理时也容易发生较大的变形。

如果将激光表面处理与化学热处理结合起来，在一定的介质中进行激光表面化学热处理，在激光扫描的同时，完成化学元素的表层渗入及淬火硬化^[7,8]。这样不仅可以克服低碳钢难以淬火硬化的缺点，也可以防止零件的变形。为此，本文在不同的盐溶液中，利用激光对 20# 钢进行激光表面化学热处理试验，在对低碳钢表面化学渗碳、渗硅的同时，进行表面淬火硬化的研究。

2 实验方法

2.1 盐溶液中激光渗碳、渗硅工艺

图 1 为盐溶液中激光表面渗碳、渗硅示意图。试验用激光器为 5 kW CO₂ 横流激光器，试验时采用搭接扫描，搭接宽度为 1.5 mm，其中光斑直径 d 为 4 mm。激光扫描试样选用 80 mm × 50 mm × 5 mm 的 20# 碳素钢板。

试验时，试样置于盐溶液的容器中，容器随加工机床作二维运动。渗碳的盐溶液剂（渗碳剂）为 10% Na₂CO₃，40% NaCl，40% KCl 加 10% 碳粉和 1000 mL 的蒸馏水混合而成。渗硅的盐溶液剂（渗硅剂）为 45% BaCl₂，45% NaCl 加 10% 硅粉和 1000 mL 的蒸馏水混合而成。

渗碳剂和渗硅剂在激光条件下会发生一系列光热化学反应^[9]，产生活性碳原子和硅原子，并在激光能量的作用下，渗入试样表面。

2.2 磨损试验

摩擦磨损试样选用激光渗碳、渗硅后的 20# 钢，试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 6 mm，各试样每边尺寸误差在 ±0.1 mm 范围内，以保证所有磨损试样与下试样是在同一磨损截面上进行的。配磨下试样为圆盘试样，选用 860℃ 正火后的水平连铸球铁材

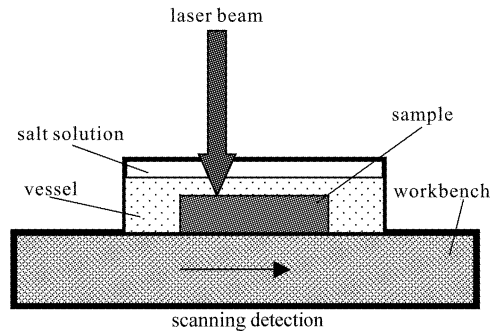


图 1 盐溶液中激光表面渗碳、渗硅工艺示意图

Fig. 1 Sketch of laser carburizing and laser silicizing process in the salt solution

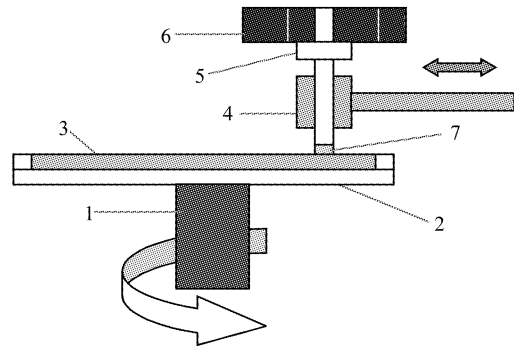


图 2 ML-10 型磨损试验机示意图

1: 轴; 2: 转盘; 3: 下试样; 4: 夹具;
5: 试样座; 6: 载荷; 7: 上试样

Fig. 2 Sketch of type ML-10 wear tester

1: shaft; 2: turnplate; 3: lower sample; 4: holder;
5: bearing socket; 6: loading; 7: upper sample

料，QT500，硬度 HB221。试样尺寸为 $\phi 250$ mm × 10 mm，其中磨面粗糙度 R_a 为 0.55 μ m，平行度在 ±0.1 mm 范围内。

耐磨性试验是在改造的 ML-10 型磨损试验机上进行的，工作原理如图 2 所示。试验时，载荷为 0.57 N/mm²，由 20 号机械油作为润滑剂，下试样的转动角速度为 $2\pi/s$ ，上试样在下试样上以螺旋线轨迹运动，每次试验的总行程为 343.6 m。磨损试验数据采用三块相同性质的试样或标样在同样磨损条件下所测数据的平均值。

磨损试样或标样的失重量由感量为 1/10000 g 的分析天平测量。

2.3 耐蚀性试验

耐蚀性试验采用激光渗硅试样，在常温下静态腐蚀，腐蚀剂选用浓度为 10% 的 H₂SO₄ 溶液，腐蚀时间为 240 h。全部试样和标样同时浸泡在 H₂SO₄ 溶液中，每 24 h 称重一次，称重前先用清水

将试样和标样清洗,然后用乙醇把试样在超声波清洗器中清洗干净并干燥后,用感量为 1/10000 g 的分析天平测量试样和标样在各腐蚀时间段的失重变化。

采用 Nepoht-21 光学显微镜和 JSM-35C 扫描电镜对渗层金相组织和表面磨损形貌进行观察,表面元素分析采用 WLD 光电直读光谱仪;试样的显微硬度由 NMT-3 硬度计测量。

3 实验结果及分析

3.1 渗层显微组织

图 3 为激光渗碳处理后横截面的低倍显微组织照片。从图中可以看出,激光化学热处理后,渗碳层呈现很明显的碳含量梯度,表层碳的含量最高,经分析其碳含量由原来的 0.23 wt.-% 增至 0.62 wt.-%,提高约 1.7 倍。随渗层深度的增加,含碳量逐渐降低,渗层深度为 0.6~0.7 mm(在激光功率 1.0 kW 时)。激光渗硅的渗层组织与渗碳层相似,表层的硅含量由原来的 0.37 wt.-% 增至 1.25 wt.-%,也提高 2.4 倍之多。

渗层的组织大致可分为三层,第一层为相变硬化区,由于含碳量高,且具有很高的冷却速度,故主要由高碳马氏体组成;第二层的含碳量和冷却速度都较第一层小,其组织主要由贝氏体、珠光体和铁素体组成;第三层为过渡层,其组织主要由珠光体和铁素体组成。

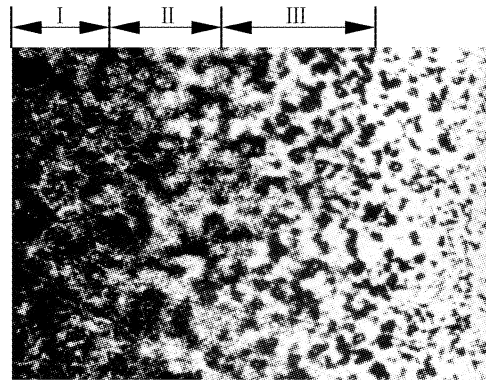


图 3 20# 钢激光渗碳处理后的金相组织(50×)
Fig. 3 Micrograph of steel 20# after laser carburizing
(laser power 1.0 kW)

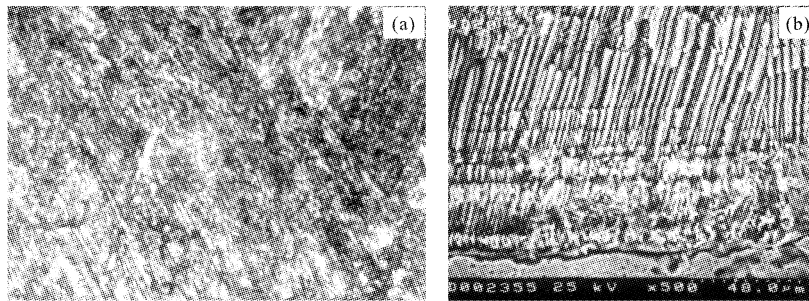


图 4 激光化学热处理后渗碳层的显微组织
Fig. 4 Microstructure of carburizing zone after laser treatment
(a) laser power 1.0 kW (1000×); (b) laser power 1.4 kW (500×)

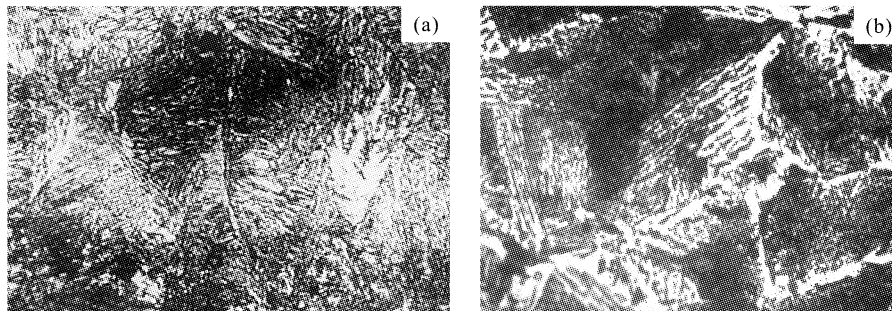


图 5 不同激光功率渗硅处理后的显微组织
Fig. 5 Microstructure of silicizing zone in different laser power
(a) laser power 0.5 kW (1000×); (b) laser power 0.7 kW (1000×)

图 4 为激光化学热处理后相变硬化区渗碳层的显微组织。从图 4(a)可以看出,激光渗碳层的显微组织主要由细小的隐针马氏体组成。而当激光功率大于 1.4 kW 时,试样表面出现微熔。

图 5 为不同激光功率渗硅处理后相变硬化区的显微组织。在激光渗硅层中,除了含有大量细小的隐针马氏体组织,还存在一些贝氏体组织。同时可以看出,当激光功率为 0.7 kW 时(图 5(b)),激光渗硅层组织明显比激光功率 0.5 kW 时渗硅层的组织要粗大些。与激光渗碳试样相似,当激光功率大于 0.8 kW 时,试样表面出现微熔。

3.2 激光工艺与渗层显微硬度的关系

图 6(a)为 20# 钢表面在扫描速度 10 mm/s,光斑直径 4 mm 的条件下,不同激光功率渗碳后的渗层显微硬度值与深度的关系。从图中可以看出当激光输出功率在 0.8~1.2 kW 时,试样表层的显微硬度均在 450~500 之间;当激光功率在 1.2 kW 时,由于材料表面的功率密度较高,吸收的热量较多,故

冷却转变速度较慢,其表层的显微硬度反而低于激光输出功率在 1.0 kW 时的试样。

20# 钢在盐溶液中通过激光表面化学渗硅后,渗层表面硬度同样可以发生明显变化。图 6(b)为 20# 钢表面在扫描速度 10 mm/s,光斑直径 4 mm 的条件下,不同渗层深度的显微硬度值。从图 6(b)可以看出,当激光输出功率为 0.2 kW 时,表面显微硬度一般在 Hv320 左右,这是由于激光功率密度较低,使得活性硅原子的渗入较少,其组织主要为珠光体和低碳马氏体。当激光功率在 0.5~0.7 kW 时,表层的显微硬度在 Hv400~450 范围内,这时的组织主要为板条状马氏体和贝氏体,其硬度值低于激光渗碳的试样。当激光功率达到 0.7 kW 时,由于激光功率密度较高,渗层表面组织也相对粗大些,使得表层的显微硬度低于激光功率 0.5 kW 渗硅的试样。比较这两张图可以看出,激光渗硅需要的激光功率小于激光渗碳,在激光功率为 0.7 kW 时,渗硅层深度已达 0.6 mm。

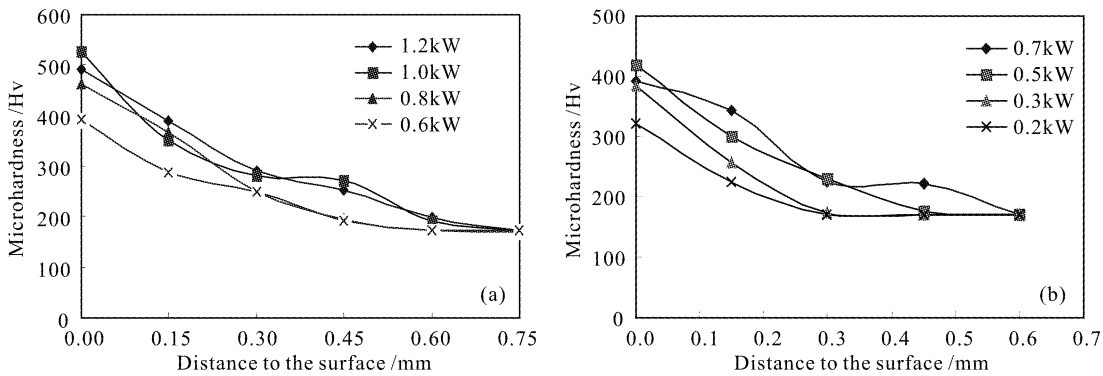


图 6 20# 钢激光渗碳(a)和渗硅(b)后的渗层显微硬度与深度的关系

Fig. 6 Relationship of microhardness with distance in the steel 20# laser carburizing zone (a) and laser silicizing zone (b)

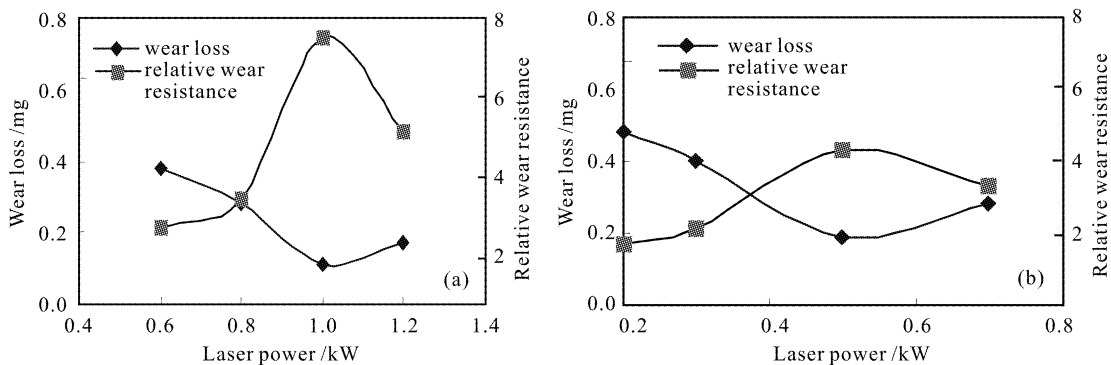


图 7 不同激光功率渗碳(a)和渗硅(b)试样的磨损和相对耐磨性

Fig. 7 Wear loss and relative wear resistance of carburizing samples (a) and silicizing samples (b) treated by various laser power

3.3 激光渗碳、渗硅对试样耐磨性的影响

图 7(a) 为 20# 钢表面在扫描速度 10 mm/s, 光斑直径 4 mm 条件下, 不同激光功率渗碳试样的磨耗和相对耐磨性。图中的相对耐磨性是未经激光化学热处理的 20# 钢试样的磨耗与激光渗碳试样磨耗的比值。从图中可以看出, 在激光功率较小 (0.6 kW) 时, 滑动摩擦磨损的磨耗较高, 其相对耐磨性仅为 2.1; 当激光输出功率为 1.0 kW 时滑动摩擦磨损的磨耗出现极小值, 其相对耐磨性达到 7.5; 当激光功率为 1.2 kW 时, 磨损量又稍微升高, 但相对耐磨性仍有 4.5。

图 7(b) 为 20# 钢表面在扫描速度 10 mm/s, 光斑直径 4 mm 条件下, 不同激光渗硅试样的磨耗和相对耐磨性。与图 7(a) 一样, 其相对耐磨性是 20# 钢试样的磨耗与激光渗硅试样磨耗的比值。从图中可以看出, 激光渗硅试样的磨损情况与激光渗碳试样十分相似, 滑动摩擦磨损的磨耗随着激光功率的提高而降低, 在激光功率为 0.5 kW 时达到最小值, 其相对耐磨性为 4.3, 随着激光功率的增加, 其耐磨性有所下降。

在通常的激光淬火过程中, 激光功率密度和扫描速度直接影响材料表面吸收能量的大小。但是, 在盐溶液中激光化学热处理的过程中, 激光功率密度和扫描速度不仅影响到试样吸收能量的程度, 而且还直接影响到渗层元素的扩散能力, 激光功率密度越大, 渗入的元素越多。当功率密度达到一定程度后, 元素的渗入速度将会变缓。由于盐溶液的冷却速率远大于空气, 故使试样表面仍具有非常高的冷速, 从而得到大量细小的马氏体组织, 并具有最高的硬度。但如果激光功率密度过高, 多余的能量来不及传走, 使试样表面的冷却速率降低, 从而造成表面硬度减小, 最终影响到试样的耐磨性能。

3.4 激光渗硅对试样耐腐蚀性能的影响

图 8 为 20# 钢表面在扫描速度 10 mm/s, 光斑直径 4 mm 条件下, 不同激光功率渗硅后, 在浓度为 10% 的 H_2SO_4 溶液中静态腐蚀 240 h 后腐蚀失重与激光功率值。从表中可以看出, 在 240 h 内静态腐蚀失重与时间基本上呈线性关系。未处理条件下, 失重最大。当激光功率较小时, 静态腐蚀失重较大, 随着激光功率的增加, 静态腐蚀失重在不断减少。当激光功率为 0.5 kW 时静态腐蚀失重出现极小值。当激光功率为 0.7 kW 时, 由于激光功率较高, 渗层表面组织变得比较粗大, 使得材料在 100 h 后, 腐蚀速度相对加快。在激光功率为 0.8 kW 时

材料表面出现微熔, 组织显著细, 从而使静态腐蚀失重量又进一步减少。可以看出, 20# 钢表面经盐溶液激光化学渗硅后, 可减缓 20# 钢表面的腐蚀速度, 使材料在 10% 的 H_2SO_4 溶液中抗腐蚀能力提高 40% 左右。

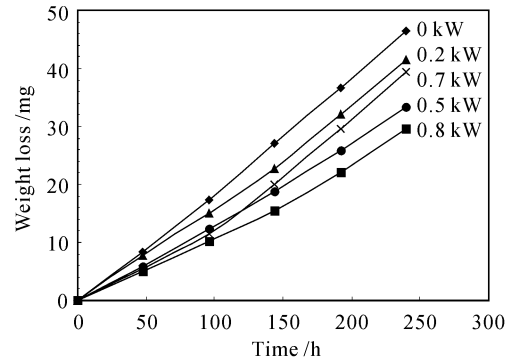


图 8 20# 钢静态腐蚀失重结果 (10% H_2SO_4)/mg
Fig. 8 Static corrosion loss data of steel 20#
(in 10% H_2SO_4)/mg

4 结 论

1) 20# 钢盐溶液中激光化学热处理, 在材料表面渗碳、渗硅的同时, 可以完成材料的表面淬火。处理后材料表面的含碳量由原来的 0.23% 增至 0.62%; 含硅量由原来的 0.37% 增至 1.25%, 具有明显的渗层效果。

2) 20# 钢激光渗碳、渗硅处理可以获得一定厚度、含有马氏体和贝氏体的硬化层。渗碳层硬度可达到 $Hv450 \sim 500$, 渗硅层硬度可达到 $Hv400 \sim 450$, 是原试样硬度的 2.5~3 倍。激光功率对试样表面硬化的影响有一最大值, 当小于该值时, 表面硬度随激光功率的增加而增加; 超过该值后, 激光功率的增加将使得表面硬度减小。

3) 滑动摩擦磨损的磨耗随着激光功率的提高也有一最小值, 激光渗碳在激光功率 1.0 kW 时达到最小, 其耐磨性为原始试样的 7.5 倍; 激光渗硅试样在激光功率 0.5 kW 时达到最小值, 其耐磨性为原始试样的 4.3 倍。

4) 在浓度为 10% 的 H_2SO_4 溶液中, 静态腐蚀 240 h 后的实验表明, 20# 钢在经过激光渗硅化学热处理后, 可以减缓 20# 钢表面的腐蚀速度, 使抗腐蚀能力提高 40% 左右。

参 考 文 献

- 1 Shen Lian. Materials of Mechanical Engineering [M].

- Beijing; Mechanical Industry Press, 1999. 83~85 (in Chinese)
- 2 R. Sagaro, H. Carvajal, J. S. Ceballos *et al.*. Nd:YAG laser surface hardening for steels and cast iron [J]. *Revista de Metalurgia*, 2001, **37**(5):607~615
 - 3 J. D. Kim, J. K. Jung, B. C. Jeon *et al.*. Wide band laser heat treatment using pyramid polygon mirror [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2001, **35**(5):285~297
 - 4 P. Deprez, J. F. Coutouly, J. Crampon *et al.*. Surface transformation hardening of steels with CW CO₂ laser [J]. *Lasers in Engineering*, 1999, **8**(2):105~117
 - 5 A. N. Safonov, S. I. Aleksenko. Effect of laser treatment on the wear resistance of steels [J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 1998, **40**(9~10):399~401
 - 6 S. K. Putatunda, L. Bartosiewicz, R. J. Hull *et al.*. Laser hardening of austempered ductile cast iron [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1997, **12**(1):137~151
 - 7 M. N. Kryanina, A. M. Bernshtein. Liquid phase carburizing of the surface of structural steels with the use of laser radiation [J]. *Soviet Surface Engineering and Applied Electrochemistry (USA)*, 1990, (2):41~47
 - 8 Wang Hongying, Guo Zuoxing, Guan Qingfeng *et al.*. Microstructure and properties of low carbon steel paste carburized by laser [J]. *Journal of Jilin University of Technology* (吉林理工大学学报), 1994, **24**(3):96~99 (in Chinese)
 - 9 Shen Shuming. Study of Laser Carburizing and Laser Siliconizing to Strengthen Low Carbon Steel Surface in the Salt Solution [D]. Master Thesis of Xi'an University of Technology, 2001. 23 (in Chinese)

(上接封四)

中没有出现的,但作为主要研究对象的事或物质的名称,如有需要,还可以列出作者认为有利于检索和文献利用的第五、第六个等关键词。

7. 图表 图要设计美观,大小适中,尺寸一般为 8cm×10cm 以内,线条均匀,主辅线分明,粗线一般为 0.25~0.5mm,细线一般为粗线的 1/2,图中主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。**图表文字:图题、表题须中英文对照,图面、表面一律用英文。**

8. 参考文献 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献请用英文表示,如原文献为其他文种,请在该文献最后用括号注明,如原为中文,则用(in Chinese),并给出该文献所属的专著或刊物中文名称。每条文献的顺序和标点如下:

专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名). 文献题名. 版本(专著用),出版地:出版者,出版年. 起止页码;

期刊[J]——作者(三名). 论文题目[J]. 刊名,出版年,卷(期):起止页码;

专利[P]——专利申请者. 专利题目[P]. 专利国别,专利文献种类,专利号,出版日期;

文集[C]——作者(三名). 论文题目[C]. 编者,论文集名,出版地:出版者,年. 起止页码。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》。

9. 基金资助 论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

10. 版面费 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

11. 版权 录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 2 册,抽印本 10 份。

12. 本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据库,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。

特别声明:凡在国内外正式出版的刊物上登载过的稿件,本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者,本刊三年内不接受其稿件,并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者,均视作接受上述各项规定,本刊不再特别声明。

《中国激光》编辑部
2003 年 6 月