

# 激光淬火技术在模具表面处理中的应用与展望

何柏林, 江明明

(华东交通大学 机电工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 简述了通过模具生产零件的优点及其在工业生产中的地位, 而且对模具使用寿命的影响因素进行了分析, 并对模具失效的主要形式做了简要说明。总结了以往人们对金属进行表面改性几种主要的工艺方法, 将激光淬火技术与传统的热处理工艺进行了对比, 并指出了激光淬火的优点。总体概括介绍了激光淬火技术的发展历史、激光淬火硬化机理, 指出了影响激光淬火工艺的参数和确定三种主要影响因素大小的试验方法, 并分析了激光淬火处理后工件不同深度的组织形成过程和相应的各项性能, 尤其是对第一层的相变硬化层形成过程中的原子扩散机理作了详细说明。针对提高材料表面吸收激光率而预处理的有效方法及优点进行了论述。简述了激光淬火过程中常用激光器有 CO<sub>2</sub> 激光和 YAG 激光及相应的用途。列举了热作模具、冷作模具、塑料模具各种不同钢经不同的激光淬火参数淬火后, 其硬化层的组织和相应的显微硬度, 指出了这三种模具钢利用激光淬火的主要目的。最后对激光淬火技术的优缺点作了总结, 并对模具表面激光改性的未来进行了展望。

**关键词:** 激光淬火; 硬化机理; 工艺参数; 硬化层; 扩散机体; 显微硬度; 模具

**中图分类号:** TG156.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0180-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.028

## Application and Prospect of Laser Quenching Technology in Mould Surface Treatment

HE Bo-lin, JIANG Ming-ming

(School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze factors affecting the service life of mould and summarize main forms of mould failure based on illustrating advantages of producing parts by utilizing a mould and its status in industrial production. Major techniques used to modify metallic surface previously were summarized. The advantages of laser quenching were pointed out by comparing laser quenching technology with traditional heat treatment process. The development history of laser quenching technology and the mechanism of laser quench hardening were introduced generally. Parameters influencing the laser quenching process and test methods for determining sizes of three major factors were put forward. In addition, formation and various properties of structure at different depths of workpieces subject to the laser quenching process were also analyzed with detailed instruction on atomic diffusion organism during the formation of the first layer of phase-change hardening layer. Moreover, effective methods and advantages of pretreatment were discussed to improve laser absorptivity of material surface. It was indicated that CO<sub>2</sub> laser and

收稿日期: 2016-01-19; 修订日期: 2016-05-23

Received: 2016-01-19; Revised: 2016-05-23

基金项目: 江西省自然科学基金 (20151BAB206007)

Fund: Natural Science Foundation of Jiangxi Province(20151BAB206007)

作者简介: 何柏林 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为材料表面改性及疲劳失效分析。

Biography: HE Bo-lin(1962—), Male, Ph.D., Professor, Doctoral supervisor, Research focus: surface modification and fatigue failure analysis.

YAG laser were commonly used in the laser quenching, their corresponding purposes were briefly discussed. Microstructure and corresponding micro hardness of hardened layers in hot working dies, cold working dies and plastic moulds steel subject to quenching under different laser quenching parameters were listed. The main purpose of applying laser quenching to the three kinds of die steel was pointed out. Finally, the advantages and disadvantages of the laser quenching technology as well as prospect of laser modification on mold surface were summarized.

**KEY WORDS:** laser quenching; hardening mechanism; process parameter; hardened layer; diffusion organism; microhardness; mould

模具行业作为当今工业制造的基础产业,其制造技术的高低直接影响着国家制造业的水平,通过模具生产产品,具有效率高、质量好、成本低、节省原材料等一系列优点,因此模具行业发展越来越受到人们的重视。在实际应用中,人们发现模具失效的主要形式是表面损伤,由于表面损伤而缩短了模具的使用寿命,在很大程度上影响着模具的经济效益,通常人们主要从模具材料和表面改性两个方面探索改善模具质量。国内外科研人员对模具表面的硬度、耐磨性、耐疲劳等性能的改善做了许多的研究,同时也获得了许多成就<sup>[1-9]</sup>。传统的表面处理工艺有渗碳、渗氮、氮碳共渗、喷丸与硬化膜沉淀等技术<sup>[10-11]</sup>。随着激光技术的发展,激光表面强化技术的应用越来越广<sup>[12-22]</sup>,特别是激光淬火硬化技术对提高模具的使用寿命起到了很大的作用<sup>[23-24]</sup>。激光硬化处理后的工件表面硬度高,比常规淬火高 15%~20%,可获得极细的硬化组织,耐磨性也得到很大的提高<sup>[25]</sup>,而且激光加热速度快,因而热影响区小、变形小、表面光洁度高,故可作为最后的加工工序<sup>[26]</sup>。激光主要的改性方式有:激光表面淬火、激光表面熔覆、激光表面合金化、激光熔凝。其中激光表面淬火技术开始于 20 世纪 70 年代中期<sup>[27]</sup>,与传统热处理激光淬火技术相比,具有加工时间短、操作灵活和精度高等优点<sup>[28]</sup>。如今激光相变技术在用于提高金属材料的表面硬度、耐磨性、疲劳寿命等方面已经基本成熟,在机械行业也得到日益广泛的应用<sup>[29]</sup>。

## 1 激光表面硬化机理

与传统淬火后马氏体形成的机理类似,都是通过加热和迅速冷却,但激光淬火的热循环过程有所不同,常规淬火后的组织是通过冷却介质(水或油)快速冷却,而激光淬火是铁基合金在激光停止照射后,利用金属本身的热传导发生“自淬火”而得到马

氏体组织<sup>[30]</sup>。激光表面硬化(激光淬火)主要有 CO<sub>2</sub> 激光和 YAG 激光<sup>[31]</sup>,前者多用于黑色金属大面积零件的表面改性,后者多用于有色金属或小面积零件的表面改性<sup>[32]</sup>。它是通过高能密度的激光束以非接触的方式扫描需要改性部位的金属表面上,使其吸收光能后温度以  $10^4 \sim 10^5$  °C/s 的速度瞬间升高到奥氏体相变温度以上,熔点温度以下。如此快的升温过程有益于奥氏体形核,得到细小的奥氏体晶粒,随后自身又以大于  $10^4$  °C/s 冷却速度进行热传递急速冷却,由于加热时间短,冷却速度过快使奥氏体来不及均匀化,导致碳和合金元素分布不均,晶粒细小的奥氏体和奥氏体组织成分的差异都有利于最终获得细小的马氏体。板条状马氏体和孪晶马氏体是在经激光淬火后常见的组织,其具有很高的位错密度,一般可达  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ <sup>[33]</sup>。研究表明晶粒细小、极大的位错密度是获得超高硬度马氏体的重要条件<sup>[34]</sup>。激光相变硬化是通过迅速升温与迅速冷却的加工方式,使工件表面产生极大的压应力,大小一般可达 750 MPa 以上,在很大程度上改善了材料的疲劳强度<sup>[35]</sup>,而且 C. Soriano 在研究激光淬火对球墨铸铁的影响时,发现淬火后的残余应力与组织的显微硬度、显微组织转变有很大关系<sup>[36]</sup>。

## 2 激光淬火区不同深度的组织类型

激光束照射在金属表面会形成较高的温度梯度,从而引起材料中的原子迁移现象,在一定深度范围内,不同结构的组织层的形成与温度有关,主要表现为随温度梯度分布的变化,组织的耐磨性、硬度以及其他性能也会发生相应的变化,激光淬火后,金属材料可按其组织层的不同可以分成三层。

第一层:相变硬化层。该层直接受到激光束的照射,温度升高和降低最快,过热度 and 过冷度最大,在非平衡状态下,基体组织以瞬间切变的形式转为

奥氏体组织,并伴随着碳及各种合金元素进行扩散和迁移。元素原子时刻进行着热振动,振动的能量与温度有密切关系,当温度较低时,原子所具有的能量不足以克服周围原子对其束缚;当温度升高到一定程度时,原子可跨越势垒,由原来的位置跃迁到其他位置,合金等元素由高浓度向低浓度扩散和迁移。为了探究合金元素的扩散情况,人们通常采用动力学计算程序 DICTRA 来模拟。上海交通大学何燕霖等<sup>[37]</sup>对 Fe、Al、Si 合金中的元素进行了不同温度下元素扩散和迁移实验,结果表明,计算结果和实验结果比较吻合。尽管有元素扩散和迁移,但是与常规的淬火相比,其扩散时间非常有限,使元素分布很不均匀,最终冷却后得到的组织非常细小,位错密度极高,而且在该层中的组织也不尽相同。例如,广东工业大学李风等<sup>[38]</sup>对 HT300 孕育铸铁进行了激光表面改性处理,实验结果表明,相变硬化层的表层奥氏体组织,在快速冷却过程中会形成残留奥氏体和高碳马氏体,而次表层组织常为马氏体和铁素体或马氏体和碳化物。通常表层的硬度更高,国外学者 Prokof'eva<sup>[39]</sup>已经证实这与马氏体尺寸密切关系。

第二层:过渡层。该层处于硬化层的边沿,通常也称为热影响区,其温度的升高是通过热传递实现的,一般在  $A_{c1} \sim A_{c3}$  之间。温度梯度相对较小,原子迁移和扩散的驱动力变弱,而且铁素体向奥氏体转变和碳化物的溶解都不彻底,即基体未能完成奥氏体化的全过程。因此该层冷却后的组织由马氏体和未转变的原始组织组成。例如上海交通大学张培磊等<sup>[40]</sup>对 10CrNiMo 钢进行了表面激光相变硬化研究,试验后在过渡层得到的组织为低碳板条状马氏体与未转变的索氏体。

第三层:基体层。该层温度最低,通常在奥氏体相变温度  $A_1$  以下,原子迁移和扩散现象几乎不会发生。激光淬火处理对该层的组织没有很大影响,其热处理效果类似于金属材料经过传统回火处理。例如吉林大学刘丽等<sup>[41]</sup>对 30CrMnSiA 钢进行了激光相变硬化处理,实验结果表明,经激光淬火后,受热影响区的第三层基体组织由回火索氏体组成。

### 3 材料表面预处理与影响相变硬化层性能的主要工艺参数

金属材料表面吸收光能的效率主要取决于材

料的表面状态,经过机械加工后的模具,其表面粗糙度很小,其反射率高达 80%~90%<sup>[42]</sup>。通常用磷化法、喷涂涂料法对金属表面进行预处理,以提高金属表面对激光的吸收效率。通过磷化法可以在材料表面生成均匀、细致的磷酸金属盐磷化膜,其对材料表面的影响较小<sup>[43]</sup>。喷涂涂料法是在金属表面涂上能够很好吸收激光的涂层,在高功率激光的照射下,涂层具有很好的热稳定性,且导热性高。喷涂法工艺在金属表面预处理中具有更大的优越性,主要是涂料价格低廉、容易清除,在涂敷及激光处理过程中,不会对环境产生污染<sup>[44]</sup>。例如纳米氧化物涂料,在温度达到 873 K 时仍能保持高而稳定的吸收率,通常纳米氧化物涂料对  $CO_2$  激光吸收率达 93.57%<sup>[45]</sup>。

模具表面的显微硬度、耐磨性与材料的显微结构、晶粒大小、表面状态等因素有关,而这些因素直接受到工艺参数的影响,吸收激光能量的程度最终决定淬火后的组织性能。主要工艺参数有:激光输出功率( $P$ )、扫描速度( $v$ )和作用在材料表面上的光斑尺寸( $D$ )。三个参数对激光淬火后的硬化层深度( $H$ )的影响关系式为:

$$H \propto P/(D \times v) \quad (1)$$

由式(1)可知,激光相变硬化层的深度与激光输出功率成正比,与扫描速度 and 作用在材料表面上的光斑尺寸成反比。而且材料对激光的吸收率随着温度的升高而增加,关系式为  $T_T = T_{20} \text{ } ^\circ\text{C} [1 + U(T - 20)]$ ,其中  $T_T$  为材料对激光的吸收率,  $T_{20} \text{ } ^\circ\text{C}$  为室温条件下材料的吸收率,  $U$  为常数,  $T$  为材料的温度。为了使激光淬火效果达到最佳,必须考虑  $P$ 、 $v$ 、 $D$  等因素影响,为了简化试验量,可以通过正交试验法分析各参数之间的相关性。江苏广播电视大学吴健<sup>[46]</sup>对 4Cr13 不锈钢进行了正交试验,结果见表 1。

表 1 激光淬火正交试验的因素水平  
Tab.1 The laser hardening factors orthogonal test level table

| 因素  | A<br>( $P/W$ ) | B<br>( $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ ) | C<br>( $D/\text{mm}$ ) |
|-----|----------------|--|------------------------|
| 水平1 | 320            | 980  | 3.0                    |
| 水平2 | 160            | 500  | 1.5                    |

由表 1 可知,激光淬火工艺参数中的影响效果依次为  $P \rightarrow D \rightarrow v \rightarrow PD \rightarrow Pv$ 。激光输出功率对硬化效果的影响是矛盾的,当其超过一定范围时,金属表面由于温度超过了熔化温度会形成熔池,影响金

属表面的几何形状，反之激光强化效果将会减弱。同样扫描速度也不能过快，虽然随着  $v$  的增加，激光淬火硬化效果增加，但是当  $v$  超过临界值后，由于加热时间过短，激光淬火只能起到退火软化作用。

4 激光淬火在模具表面处理中的应用

采用激光淬火技术对模具处理时，通常根据模具的形状特点和使用要求在指定区域内进行淬火。激光淬火后，模具表面的耐磨性较常规淬火、回火处理有显著提高，从而延长了模具的有效使用时间。例如福建农林大学徐洪烟等<sup>[47]</sup>研究了经激光淬火后模具材料的性能变化，结果表明，模具表面组织的改变使其耐磨性增强，淬火后的残余应力也使模具材料的抗疲劳性显著提高。樊湘芳等<sup>[48]</sup>对 GCr15 钢冲模的母模进行了激光表面淬火，试验

后，其表面硬度获得提高，增强了母模型腔的抗冲击能力，使模具寿命提高了 20% 以上。常见的模具 有冷作模、热作模及塑料模，对于不同材料的模具，经激光淬火后，组织性能有所不同。

用于加工的冷作模具材料都属于高碳钢，提高耐磨性和硬度是表面淬火的主要目的。经激光淬火后的组织和性能见表 2<sup>[49]</sup>。

用于加工的热作模具材料都属于中碳钢，表面淬火的目的是提高高温耐磨性、耐热疲劳性、抗氧化性，但是并不要求很高的表面硬度<sup>[50]</sup>。经激光淬火后的组织和性能见表 3<sup>[49]</sup>。

用于加工的塑料模具材料范围较广，从结构钢到工具钢，从碳素钢到合金钢。塑料模具对其表面的粗糙度要求很严格，但不要求很高的表面硬度，因此激光表面淬火处理多用于一些囊块，其目的是提高囊块的硬度。经激光加热表面淬火后的组织和性能见表 4<sup>[49]</sup>

表 2 常用冷作模具钢激光表面淬火工艺参数  
Tab.2 Process parameters of laser surface quenching for cold die steel

| 材料牌号       | 激光功率/kW   | 扫描速度/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 光斑尺寸/mm | 显微硬度(HV)    | 淬火组织（硬化层组织）                      |
|------------|-----------|----------------------------|---------|-------------|----------------------------------|
| T10        | 1.2       | 10.9                       | 5       | 926         | 针状马氏体 + 残余奥氏体                    |
| GCr15      | 1.2       | 19                         | 1.5     | 941         | 隐针马氏体+碳化物+少量残余奥氏体                |
| Cr12MoV    | 2.6       | 6                          | 4       | 912         | 隐晶马氏体+碳化物+少量残余奥氏体                |
| W6Mo5Cr4V2 | 0.6 ~ 1.2 | 20 ~ 60                    | 4 ~ 5   | 1000 ~ 1100 | 马氏体+MC、M <sub>6</sub> C碳化物+残余奥氏体 |
| W18Cr4V    | 1.5       | 6.5                        | 5       | 1000        | 马氏体+碳化物+残余奥氏体                    |
| CrWMn      | 1.5 ~ 1.6 | 15                         | 3       | 900 ~ 930   | 隐晶马氏体+碳化物+少量残余奥氏体                |

表 3 常用热作模具钢激光表面淬火工艺参数  
Tab.3 Process parameters of laser surface quenching for hot die steel

| 材料牌号      | 激光功率/kW   | 扫描速度/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 光斑尺寸/mm | 显微硬度(HV)   | 淬火组织(硬化层组织)                   |
|-----------|-----------|----------------------------|---------|------------|-------------------------------|
| 5CrMnMo   | 0.9 ~ 1.3 | 6 ~ 16                     | 5       | 830 ~ 850  | 马氏体+M <sub>6</sub> C碳化物+残余奥氏体 |
| 5CrNiMo   | 1.3       | 20 ~ 40                    | 5       | 710 ~ 780  | 细板条马氏体+残余奥氏体                  |
| 3Cr2W8V   | 3 ~ 5     | 2 ~ 18                     | 8 ~ 10  | 750 ~ 820  | 马氏体+少量残余奥氏体                   |
| 4Cr5W2VSi | 2.5       | 6.5                        | 5       | 950 ~ 1100 | 隐晶马氏体+碳化物+少量残余奥氏体             |
| 4CrMoSiV1 | 1.5       | 15                         | 3       | 570 ~ 770  | 细板条马氏体+孪晶马氏体+碳化物              |

表 4 常用塑料模具钢激光表面淬火工艺参数  
Tab.4 Process parameters of laser surface quenching for plastic die steel

| 材料牌号 | 激光功率/kW   | 扫描速度/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 光斑尺寸/mm | 显微硬度(HV)   | 淬火组织（硬化层组织）                      |
|------|-----------|----------------------------|---------|------------|----------------------------------|
| T8A  | 0.9       | 6 ~ 16                     | 6       | 790 ~ 1000 | 马氏体+ 未溶碳化物+残余奥氏体                 |
| T10  | 1.2       | 10.9                       | 5       | 926        | 针状马氏体 + 残余奥氏体                    |
| 40Cr | 0.9 ~ 1.3 | 6 ~ 16                     | 1.5     | 800 ~ 810  | 马氏体+ M <sub>6</sub> C碳化物+少量残余奥氏体 |
| 718  | 0.5       | 6.5                        | 3.6     | 1000       | 细小马氏体+碳化物+残余奥氏体                  |

由表 2—4 可以看出,经激光淬火后,模具的显微硬度均较高,激光淬火对模具表面的几何形状影响很小,可以将其作为最后一道加工工艺。由于影响激光淬火过程的影响因素较多,导致大部分科研结论不能直接用于工业生产加工,一般作为参考使用。对模具而言,激光淬火工艺参数的选择受到模具预定寿命、模具材料及模具厂房环境等因素左右,因此在利用激光淬火工艺时,需多次进行实际的实验并优化可变参数,以达到最合理的效果。

## 5 总结及展望

激光淬火技术从开始应用到现在,主要优缺点有:1)自身“自淬火”,不需要冷却介质,对环境无污染;2)处理后模具表面显微硬度、耐磨性等性能获得很大的改善;3)加热速度快,材料受热影响小,表面粗糙度好;4)影响因素较多,设备费高;5)温度测试装置的精确度不高,使激光淬火对模具表面硬化处理时的质量不易控制。

随着科技不断发展,计算机模拟和热处理的数学建模取得了很大的进步,这有利于激光淬火技术在材料表面处理过程中实现计算机自动化,再者激光功率检测自动化的发展也给激光淬火技术进一步应用提供了方便。继续优化激光淬火技术的工艺、改进激光的激发器和导光系统的微调装置仍是未来要做的工作,激光淬火技术和其他表面处理技术结合也是一个发展方向。总之,随着对激光淬火技术的理论和实践进行更加深入的研究,这门技术将会被人们熟练掌握,应用也会更加广泛。

## 参考文献

- [1] 邱国旺,赵向阳,吴浪武. 激光表面淬火在模具制造中的应用研究[J]. 装备制造技术, 2014(3): 150—152.  
QIU Guo-wang, ZHAO Xiang-yang, WU Lang-wu. Application of Laser Face-quench in Mould Manufacturing[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(3): 150—152.
- [2] 周健,温宗胤,李宝灵. 激光相变硬化在 Cr12 汽车模具材料表面强化中的应用研究[J]. 模具工业, 2007, 33(4): 67—70.  
ZHOU Jian, WEN Zong-yin, LI Xing-hua. Application of Laser Transformation Hardening in Surface Strengthening of Automotive Die Steel Cr12[J]. Mould Industry, 2007, 33(4): 67—70.
- [3] 周健,温宗胤,李宝灵. CrMo 铸铁汽车模具材料的激光表面处理[J]. 矿冶工程, 2007, 27(1): 85—87.  
ZHOU Jian, WEN Zong-yin, LI Bao-ling. Laser Surface Treatment of the Automobile Mould Material CrMo Casting Iron [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2007, 27(1): 85—87.
- [4] 温宗胤,冯树强,李宝灵,等. 汽车模具材料表面强化中的激光相变硬化技术的研究与应用[J]. 制造技术与机床, 2007(1): 118—121.  
WEN Zong-yin, FENG Shu-qiang, LI Bao-ling, et al. Study on Laser Phase Transformation Hardening in Automobile Mould Materials Strengthened Surface and Its Application[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007, 27(1): 118—121.
- [5] 薛滔. 激光表面淬火与常规表面淬火在模具应用上的研究分析[J]. 装备制造技术, 2012(4): 232—234.  
XUE Tao. Analysis of Laser Surface Hardening with Conventional Surface Hardening in Mold Applications[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(4): 232—234.
- [6] 王恒海,虞钢,党刚,等. 冲压模具激光表面强化的搭接工艺研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(6): 168—172.  
WANG Heng-hai, YU Gang, DANG Gang, et al. Study on Overlapping Process in Laser Transformation Hardening of Stamping Die[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(6): 168—172.
- [7] 蔡军,梁海峰,刘国林. 汽车大型覆盖件模具激光表面强化技术的应用[J]. 装备制造技术, 2008(7): 25—26.  
CAI Jun, LIANG Hai-feng, LIU Guo-lin. The Laser Surface Strengthening Technology Application of Automobile Large-scale Cover Mold[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(7): 25—26.
- [8] 林朝平. 激光表面淬火在模具制造中的应用[J]. 新技术新工艺, 2004(7): 38—39.  
LIN Zhao-ping. Application of Laser Face-quench in Die Manufacturing[J]. New Technology & New Process, 2004 (7): 38—39.
- [9] 冯荣元. 模具激光强化处理技术[J]. 模具制造, 2006(11): 76—79.  
FENG Rong-yuan. Mold Laser Intensifying Processing Technology[J]. Mould Manufacture, 2006(11): 76—79.
- [10] TORRES M A S, VOORWALD H J C. An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI4340 Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(8): 877—886.
- [11] NASCIMENTO M P, SOUZA R C, PIGATIN W L, et al. Effects of Surface Treatment on the Fatigue Strength of AISI 4340 Aeronautical Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(7): 607—618.
- [12] CHEN Z Y, ZHOU G J, CHEN Z H. Microstructure and Hardness Investigation of 17-4PH Stainless Steel by Laser Quenching[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 534(1): 536—541.
- [13] MCDANIELS R L, WHITE S A, LIAW K, et al. Effects of a Laser Surface Processing Induced Heat-affected Zone on the Fatigue Behavior of AISI 4340 Steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1/2): 500—507.
- [14] YANG B Q, CHEN G N, ZHANG K, et al. A Mechanical Model for the Quantification of the Effect of Laser Quenching on CTOD in Steels[J]. Journal of Materials

- Processing Technology, 2009, 209(4): 2180—2185.
- [15] 张德强, 张吉庆, 李金华, 等. 离焦量对 45<sup>#</sup>钢表面激光熔覆镍基碳化钨粉的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 92—97.  
ZHANG De-qiang, ZHANG Ji-qing, LI Jin-hua, et al. Effect of Defocusing Amount on Laser Cladding of Self-fluxing Ni-based WC on 45<sup>#</sup> Steel Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(12): 92—97.
- [16] 高霁, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77—81.  
GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77—81.
- [17] 张永忠, 金具涛, 黄灿, 等. 钛合金表面激光熔化沉积钛基复合材料涂层的组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(8): 1403—1406.  
ZHANG Yong-zhong, JIN Ju-tao, HUANG Can, et al. Microstructure and Proper Ties of Laser Melting Deposited Titanium Matrix Composite Coating on Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1403—1406.
- [18] 周思华, 晁明举, 刘奎立, 等. 原位生成 WC-B4C 增强镍基激光熔覆层及其性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 25—30.  
ZHOU Si-hua, CHAO Ming-ju, LIU Kui-li, et al. Research on In-situ Synthesis of WC-B4C Reinforced Ni-based Coatings by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 25—30.
- [19] GUO Chun, ZHOU Jian-song, CHEN Jian-min, et al. High Temperature Wears Resistance of Laser Cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni Composite Coatings[J]. Wear, 2011, 270(7/8): 492—498.
- [20] 宁智, 王元刚, 闫帅, 等. 激光重熔对 Fe-ZrO<sub>2</sub> 复合镀层形貌及性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(8): 101—105.  
NING Zhi, WANG Yuan-gang, YAN Shuai, et al. Effects of Laser Melting on Surface Morphology and Properties of Fe-ZrO<sub>2</sub> Composition Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(8): 101—105.
- [21] 叶四友, 刘建永, 杨伟. H13 钢表面激光熔覆 H13 合金涂层质量研究[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 81—85.  
YE Si-you, LIU Jian-yong, YANG Wei. Quality of H13 Alloy Coating on H13 Steel Prepared by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 81—85.
- [22] 李刚, 张明, 刘云婷, 等. SiO<sub>2</sub> 基激光淬火增吸收涂剂的应用效果[J]. 表面技术, 2015, 44(10): 58—62.  
LI Gang, ZHANG Ming, LIU Yun-ting, et al. Application Effect of SiO<sub>2</sub>-based Laser Quenching Absorption-enhancing Coating[J]. Surface Technology, 2015, 44(10): 58—62.
- [23] 温宗胤, 冯树强, 李宝灵. 大型汽车覆盖件拉深模具的激光表面强化处理[J]. 应用激光, 2006, 26(4): 230—232.  
WEN Zong-ying, FENG Shu-qiang, LI Bao-ling. Big Automobile Over-laying Pieces Deep Drawing Mold Strengthened by Laser Surface Treatment[J]. Applied Laser, 2006, 26(4): 230—232.
- [24] 陈希原, 沈长安. 激光表面硬化的特点及在齿轮和模具中的应用优势[J]. 热处理技术与装备, 2012, 33(2): 4—9.  
CHEN Xi-yuan, SHEN Chan-gan. Characteristic of Laser Case Hardening and Its Application Advantage in Gear and Mould[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2012, 33(2): 4—9.
- [25] 史晓强, 王大承, 刘劲松. 激光相变硬化处理的模拟[J]. 应用激光, 2001(3): 27—29.  
SHI Xiao-qiang, WANG Da-cheng, LIU Jin-song. Simulation of Laser Phase Transformation Hardening Process for [J]. Application of Laser, 2001(3): 27—29.
- [26] 邱星武, 李刚, 陈华, 等. 激光相变硬化技术发展现状及展望[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(1): 4—7.  
QIU Xing-wu, LI Gang, CHEN Hua, et al. Development Status and Prospect of Laser Phase Transformation Hardening[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2009, 30(1): 4—7.
- [27] 王加金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.  
WANG Jia-jin. Laser Processing Technology[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1992.
- [28] MAJUMDAR J D, GALUN R, MORDIKE B L, et al. Effect of Laser Surface Melting on Corrosion and Wear Resistance of a Commercial Magnesium Alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2003, 361: 119—29.
- [29] 肖红军, 彭云, 马成勇, 等. 激光表面改性[J]. 表面技术, 2005, 34(5): 10—12.  
XIAO Hong-jun, PENG Yun, MA Cheng-yong, et al. Laser Surface Modification[J]. Surface Technology, 2005, 34(5): 10—12.
- [30] 何柏林, 孙佳, 史建平. 工模具材料激光表面强化处理应用与发展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(18): 85—89.  
HE Bo-lin, SUN Jia, SHI Jian-ping. Application and Development of Laser Surface Hardening for Mold Material [J]. Hot Processing of the Process, 2009, 38(18): 85—89.
- [31] 吴华春, 李明尧. 激光相变硬化在模具表面处理中的应用现状[J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 145—147.  
WU Hua-chun, LI Ming-yao. Application of Laser Phase Transformation Hardening in Die Surface Treatment[J]. Hot Working Process, 2011, 40(2): 145—147.
- [32] 何柏林, 徐先锋, 赵龙志. 模具材料及表面强化技术[M]. 北京: 化工工业出版社, 2009.  
HE Bo-lin, XU Xian-feng, ZHAO Long-zhi. Mold Materials and Surface Strengthening Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [33] 杨柳青, 丁阳喜. 激光相变硬化技术的研究与进展[J]. 热加工工艺, 2006, 35(4): 68—70.  
YANG Liu-qing, DING Yang-xi. Research and Development of Laser Hardening Technology[J]. Hot Working Process, 2006, 35(4): 68—70.
- [34] 谢志余, 潘钰娴. 激光热处理相变机理及应用[J]. 机械制造与自动化, 2003(4): 38—42.  
XIE Zhi-yu, PAN Yu-xian. the Phase Change Mechanism and Application of Laser Heat Treatment[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2003(4): 38—42.
- [35] 丁阳喜, 杨柳青. 激光热处理技术的研究现状与发展[J]. 机械工程师, 2006(1): 19—21.  
DING Yang-xi, YANG Liu-qing. Research Status and Development of Laser Heat Treatment[J]. Mechanical Engi-

- neer, 2006(1): 19—21.
- [36] SORIANO C, LEUNDA J, LAMBARRI J, et al. Effect of Laser Surface Hardening on the Microstructure, Hardness and Residual Stresses of Austempered Ductile Iron Grades[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 101—106.
- [37] 何燕霖, 何忠平, 李麟. Fe-Al-Si 三元扩散偶中合金元素扩散行为的动力学研究[J]. *上海金属*, 2010, 32(6): 1—4.
- HE Yan-lin, HE Zhong-ping, LI Lin. Kinetic Study on Diffusion Behavior of Alloying Elements in Fe-Al-Si Three Diffusion Couples[J]. *Shanghai Metal*, 2010, 32(6): 1—4.
- [38] 李风, 王大承, 张永俊. HT300 孕育铸铁激光表面改性研究[J]. *应用激光*, 2005(5): 17—19.
- LI Feng, WANG Da-cheng, ZHANG Yong-jun. Study on Laser Surface Modification of HT300 Inoculated Cast Iron[J]. *Application of Laser*, 2005(5): 17—19.
- [39] PROKOF'EVA L L, TARATORINA M V, SHERMAZAN L V. Effect of Martensite Needle Size on the Mechanical Properties of Steel 45 after Induction Hardening[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012(10): 795—798.
- [40] 张培磊, 丁敏, 姚舜, 等. 低碳钢表面激光相变研究[J]. *激光技术*, 2009, 33(6): 586—589.
- ZHANG Pei-lei, DING Min, YAO Shun, et al. Study on Laser Phase Transformation of Low Carbon Steel[J]. *Laser Technique*, 2009, 33(6): 586—589.
- [41] 刘丽, 吴东江, 庄娟. 30CrMnSiA 钢激光相变硬化层组织[J]. *金属热处理*, 2002, 28(8): 17—19.
- LI Liu, WU Dong-jiang, ZHANG Juan. Microstructure of 30CrMnSiA Steel by Laser Transformation Hardening Layer Microstructure[J]. *Metal Heat Treatment*, 2002, 28(8): 17—19.
- [42] 关振中. *激光加工工艺手册*[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998: 143—150.
- GUAN Zhen-zhong. *Handbook of Laser Processing Technology*[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998: 143—150.
- [43] WU Run, XIE Chang-sheng, XIA Hui, et al. the Thermal Physical Formation of ZnO Nanoparticles and their Morphology[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 127(3): 274—80.
- [44] 骆有东, 张永康. CO<sub>2</sub> 激光处理光热转换层的应用分析[J]. *激光杂志*, 2005, 26(6): 79—80.
- LUO You-dong, ZHANG Yong-kang, et al. Application of CO<sub>2</sub> Laser in Treatment of Photo Thermal Conversion Layer[J]. *Laser Impurity*, 2005, 26(6): 79—80.
- [45] 张光均, 陈振耀. 激光热处理中的纳米氧化物吸收涂料[J]. *金属热处理*, 2004, 29(8): 40—43.
- ZHANG Guang-jun, CHEN Zhen-yao. Nanooxide Absorption Coatings in Laser Heat Treatment[J]. *Metal Heat*, 2004, 29(8): 40—43.
- [46] 吴健. 金属材料的激光相变硬化机理及其工艺参数优化[J]. *热加工工艺*, 2004(7): 57—59.
- WU Jian. Mechanism of Metal's Laser Transformation Hardening and Optimum of Laser Technical Parameters[J]. *Hot Working Process*, 2004(7): 57—59.
- [47] 徐洪烟, 周建忠, 袁国定, 等. 激光热处理提高材料寿命的机理[J]. *电加工与模具*, 2000(5): 28—30.
- XU Hong-yan, ZHOU Jian-zhong, YUAN Guo-ding, et al. Mechanism of Laser Heat Treatment to Improve the Life of Material[J]. *Electric Machining and Mould*, 2000(5): 28—30.
- [48] 樊湘芳, 邹军, 石世宏. 采用激光相变硬化工艺提高凹模寿命[J]. *模具工业*, 2002(5): 47—78.
- FAN Xiang-fang, ZOU Jun, SHI Shi-hong. Using Laser Phase Transformation Hardening Technology to Improve Die Life[J]. *Mould Industry*, 2002(5): 47—78.
- [49] 熊惟浩. *模具表面处理与表面加工*[M]. 北京: 化工工业出版社, 2006.
- XIONG Wei-hao. *Mold Surface Treatment and Surface Processing*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [50] 吴华春, 李名尧. 激光相变硬化在模具表面处理中的应用现状[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(2): 145—147.
- WU Hua-chun, LI Ming-yao. Application of Laser Phase Transformation Hardening in Mould Surface Treatment Process[J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(2): 145—147.