

# 金属表面的激光强化及强化类别的 BP 神经网络控制研究

符永宏<sup>1</sup>, 王大承<sup>2</sup>, 袁 润<sup>1</sup>, 蔡 兰<sup>1</sup>, 张永康<sup>1</sup>

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212301; 2. 五邑大学机电工程系, 广东江门 529020)

**摘 要:** 通过试验分析, 表明使用不同的激光工作参数, 对金属材料进行激光强化处理, 可使材料表面产生 4 种结果, 即: 未相变硬化、相变硬化、表面微熔及表面熔凝。建立了激光工艺参数与材料表面强化结果之间关系的 BP 神经网络模型, 并应用该模型, 对常用于制造农业机械和发动机齿轮、凸轮轴、链轮、曲轴等零件的材料 HT300 进行激光强化处理试验。结果表明, BP 神经网络模型可方便、准确地选择激光工艺参数, 控制材料表面强化类别及工作性能。

**关键词:** 激光表面强化处理; 表面强化类别; BP 神经网络; 控制

中图分类号: TG156.99; TP183

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0082-04

## 0 引 言

激光对金属表面强化处理的实质, 是通过快速加热和激冷两个过程, 达到改变表面材料金相组织和提高材料机械性能的目的。激光与表面材料相互作用, 其结果可分为以下 4 种情况<sup>[1-3]</sup>: 1) 当材料表层温度  $T_s < T_a$  (奥氏体相变温度) 时, 材料表面显微组织和硬度几乎没有变化, 不发生表面相变; 2) 当材料表层温度在  $T_a < T_s < T_m$  (熔点) 范围之内时, 激光可使钢铁材料相变成奥氏体, 奥氏体又转变为马氏体, 使材料表面相变硬化; 3) 当  $T_v$  (沸点)  $> T_s > T_m$  时, 激光可使材料熔化, 可进行激光熔凝处理; 4) 当  $T_s > T_v$  时, 激光使材料汽化蒸发。可进行激光打孔、激光切割和在材料表面进行激光打标、激光刻花等。

激光表面改性过程包含着一系列复杂而又相互影响的物理化学过程。因此, 通过理论计算激光与金属材料相互作用的结果, 一直相当困难。虽然一些国内外学者, 根据热传导理论, 建立热传导和温度场的理论数学模型, 并采用有限元及有限差分等数值计算方法, 进行定量数值计算和理论分析, 做了许多有益的探索和尝试<sup>[4-6]</sup>。但是, 这些工作都是建立在大量假设及简化基础上的。例如, 假设材料的导热系数及表面吸收系数不随温度的变化; 将激光光束假想为理想的基模高斯光束, 或方形和圆型的均匀光束; 将被处理材料视为热物性参数与温度无关的半无限大均匀介质。但由于激光表面改性过程的瞬时性和复杂性, 这些假设和简化与实际情况相差甚远, 基本不能对实际热处理工艺的制定起直接指导作用。为探明其规律, 国内外科技人员进行了大量试验, 来寻找激光工艺参数与材料表面强化处理后的性能之间关系。迄今为止, 材料表面激光热处理的应用

研究, 大体上还处在总结试验规律的阶段。

近年来, BP 神经网络在激光加工过程控制及智能领域的研究, 已引起人们的关注。人工神经网络具有强大的自适应、自组织、自学习及联想记忆能力, 可以对复杂的非线性过程, 高效、高精度地建立模型。本文基于 BP 网络模型, 对常用于制造农业机械和发动机齿轮、凸轮轴、链轮、曲轴等零件的材料 HT300 孕育铸铁表面激光强化类别及材料表面质量控制方法进行了研究。

## 1 HT300 金相组织分析及其激光表面强化分类

### 1.1 HT300 金相组织分析

孕育铸铁 HT300 含碳、硅较低, 而含锰较高, 基体组织中除较少铁素体外, 几乎全部都是弥散度较高的珠光体。经孕育处理后, 石墨也呈明显细小均匀分布的 A 型石墨 (图 1a), 且具有较好的抗拉强度 (300 MPa), 但表面强度仅为 HB217 左右。经激光相变硬化处理后, 其金相组织主要为针状马氏体、残余奥氏体和未熔的片状石墨, 但已明显变细变短 (图 1b), 其硬度范围为 620~766 HV0.1。激光熔凝处理后, 熔化层的显微组织为细枝晶莱氏体。莱氏体包围的细小白色块状为残余奥氏体, 枝晶内有位错及孪晶结构的马氏体, 在熔凝层内几乎看不到片状石墨的痕迹 (图 1c)。硬度明显提高, 为 750~1000 HV0.1。

### 1.2 激光表面强化分类

1) 非相变硬化处理 当材料表层温度小于相变温度时, 表面显微组织几乎无变化, 不发生相变。但由于温度上升, 可改变表面应力分布状况。本文将其归类为非相变硬化处理。

2) 激光相变硬化处理 材料表面显微组织中珠光体转化为针状马氏体, 硬度在 620~766 HV0.1, 表面精度一般不会降低。同时, 片状石墨块减小, 在磨粒磨损或粘着磨损中, 虽有石墨脱落, 但仍能起到贮油的作用。又由于表面不产生裂纹, 可以满足有一定硬度要求的内燃机缸套、凸轮轴及链轮、齿轮、机床导轨工作面的要求。

收稿日期: 2002-12-04 修订日期: 2004-07-05

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (32364); 江苏省高校自然科学基金计划重点项目 (03KJA460020)

作者简介: 符永宏, 副教授, 镇江市, 主要从事润滑理论和激光应用技术研究。江苏省镇江市学府路 301 号 江苏大学机械工程学院, 212301。Email: fyh@ujs.edu.cn

通讯作者: 王大承, 教授, 从事激光应用技术研究。广东省江门市五邑大学 134 信箱, 529020。Email: dcwang@wyu.edu.cn

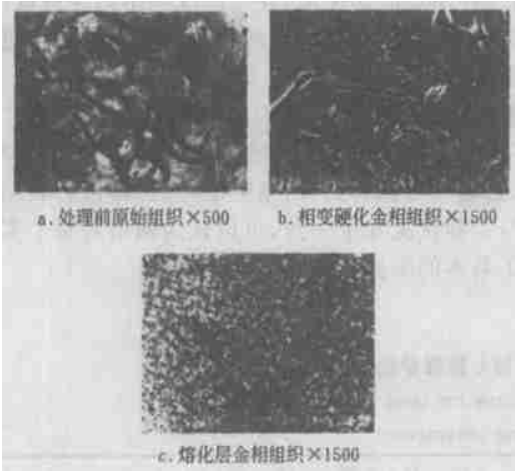


图 1 HT300 激光强化处理前后的金相组织  
Fig 1 Structure of HT300 unprocessed and processed by laser strengthening treatment

3) 激光微熔处理 材料表面呈微熔状, 其熔化层深度小于 0.1 mm, 组织中有高硬度、高耐磨性的细枝晶莱氏体, 使试件抗磨粒磨损能力增加, 即耐磨性增加。同时, 石墨部分溶解, 端部钝化, 由残余奥氏体包围。这种显微组织在磨损初期剩余石墨脱落, 起贮油润滑作用。形成的孔洞虽会产生应力集中, 但程度减轻, 周围奥氏体有较好塑性变形以缓解应力集中, 因而延长了疲劳裂纹的产生和扩展, 提高了疲劳寿命。微熔时表面粗糙度增加不大, 是值得推荐的一种激光强化方法。

4) 激光熔凝处理 材料表面组织为细枝晶莱氏体, 其硬度为 750~1000 HV0.1, 硬化层深度明显增加, 细小的碳化物所形成的硬质点具有极好的耐磨性, 硬化层深度可达 1 mm。但表面形貌呈波纹状, 粗糙度增加, 可能出现微裂纹, 一般应控制在 0.2 mm 范围内。激光熔凝处理后都要精加工才能满足零件的要求。

例如, 对于已经精加工、材料为 HT300 的零件某些局部表面(如齿轮、链轮的轮廓、机床导轨等), 进行硬化处理, 可根据相变硬化处理所对应的类别, 选取适当激光工艺参数: 激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、光斑直径  $D$  等的组合。然后, 用 BP 网络模型进行模拟控制, 检验激光强化处理后所得加工表面, 是否满足具体的技术要求。

2 人工神经网络神经网络模型的建立

神经网络是在研究生物神经系统的启示下, 发展起来的一种信息处理方法, 建立在学习过去的经验基础上。因而学习好的网络不需要建立其它任何数学模型, 便能处理模糊的、非线性的、含有噪声的数据, 可用于预测、分类、模式识别、非线性回归、过程控制等各种数据处理场合, 而且在大多数情况下, 应用效果优于传统统计分析方法<sup>[7]</sup>。

BP 网络同于多层感知机网络, BP 算法 (Back-Propagation Algorithm) 的主要思想是: 对于给定的学习样本, 使网络的输入等于样本的输入, 然后用网络的实际输出和学习样本的输出之间的误差来修改权值, 使网络的输出与样本的输出尽可能接近, 即: 使网络输出

层的总误差平方和达到最小。它是通过连续不断地在相对于误差函数斜率下降的方向上计算网络权值和偏差的变化而逐渐逼近目标的。每一次权值和偏差的变化都与网络误差的影响成正比, 并以反向传播的方式传递到每一层。由于网络的学习采用误差反向传播算法, 因此又称 BP 算法。标准的 BP 模型中有 3 个层次的神经元, 即输入层、隐含层和输出层。相邻两层的神经元之间形成全互连接, 每层内的神经元则没有连接。BP 网络采用的是监督的  $\delta$  学习规则, 其基本思想是: 两神经元间的连接强度的变化与教师  $d_i(k)$  和网络实际  $O_i$  输出信号之差成正比, 与其输入单元的激励成正比。BP 网络的学习算法是有导师的误差反向传播组成。在正向传播过程中, 输入信息由输入层经隐含层逐层传递, 并传向输出层。这时如果在输出层的网络输出与所期望的输出相差较大, 则转入反向传播, 根据误差信号从输出层开始, 反向逐层逐个节点计算各连接权值的修正量, 以修改各层神经元的权值, 是误差信号最小。训练网络的指标函数为:

$$E = \frac{1}{2p} \sum_k (t_{pk} - O_{pk})^2 \tag{1}$$

式中  $p$  —— 训练用标准样本数;  $t_{pk}$  —— 网络的实际输出;  $O_{pk}$  —— 网络的期望输出。

采用梯度下降法使式 (1) 最小, 即采用  $\delta$  广义规则算法, 权值修正式为:

$$\Delta W_{ji}(n+1) = \eta \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} + \alpha \cdot \Delta W_{ji}(n) \tag{2}$$

式中  $\Delta W_{ji}(n+1)$  —— 该次的权值修正量;  $\Delta W_{ji}(n)$  —— 上一次的权值修正量;  $\alpha$  —— 惯性因子, 取值 (0, 1) 之间;  $\eta$  —— 学习因子, 取值 (0, 1) 之间。

本文采用上述算法, 用来建立神经网络分类预测控制模型。在激光器、表面涂层等工艺条件一定的前提下, 激光处理区表面强化类别与所选择的激光工作参数: 激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、光斑直径  $D$  等相关。因此, 本文选用了 3 层 BP 型神经网络模型(如图 2 所示), 以 HT300 合金结构钢为例进行研究。网络的输入节点有 3 个, 即激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、光斑直径  $D$ 。以激光表面强化类别作为输出节点。输出单元为 1 个, 输出单元输出的编码分别为 1、2、3、4, 表示激光处理强化类别的 4 个区域。其中: “1”表示非相变硬化处理区; “2”表示激光相变硬化处理区; “3”表示激光表面为微熔处理区; “4”则表示表面为激光熔凝处理区。隐含层选择是决定

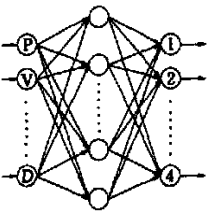


图 2 神经网络模型结构图  
Fig 2 Architecture of BP neural network

模型好坏的关键, 可以先选择 15 个隐含层单元进行试验, 在训练好的网络上, 在保持预测精度相同的情况下, 逐渐减少隐含层单元数, 可以减小网络规模, 缩短网络训练和运算时间。同时由于减少了单元间的连接数, 网络更容易学习到训练数据的一般规律。

2 1 神经网络的训练

网络的训练是以前馈方式进行的。先从输入层开始正向计算各层神经元(节点)的输入和输出。当输出层节点的实际输出与事先给定的信号不一致或误差不能满足

时, 则执行误差前馈传播, 逐层修改网络的连接权值, 直至误差信号满足要求为止。网络的训练数据必须包括强化类别及材料表面质量。本文选用了 70 样本数据(如表 1)的激光参数和表面强化类型训练网络。在经过 5000 次学习循环后, 网络误差达到了规定的误差  $6.30449 \times 10^{-5}$ 。由表 2 可以看到, 网络经学习后, 输出的表面分类等级与实际状况几乎一致, 可以认为网络对每个实例样本有了基本的掌握。

表 1 激光表面强化分类方法控制试验部分数据参数及结果

Table 1 Experimental results of different classifications for laser surface strengthening process by different laser working parameters

样本序号No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
激光功率 $P/\text{kW}$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
扫描速度 $v/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	6	6	6	6	8	8	8	10	10	10	10	12	12	12	6	6	6	6
光斑直径 $D/\text{mm}$	3	4	5	6	3	4	6	3	4	5	6	3	5	6	3	4	5	6
试验结果	4	3	2	2	4	2	1	2	2	1	1	2	1	1	4	4	3	2
样本序号No.	19	20	21	22	23	24	25	26	.....	.....	.....	66	67	68	69	70		
激光功率 $P/\text{kW}$	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	.....	.....	.....	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2		
扫描速度 $v/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	8	8	8	10	10	10	12	12	.....	.....	.....	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2		
光斑直径 $D/\text{mm}$	4	5	6	3	4	6	3	4	.....	.....	.....	5	6	4	5	6		
试验结果	3	2	2	3	2	1	2	2	.....	.....	.....	2	2	2	2	1		

2 2 神经网络的训练与检测

网络只有在用经验数据对其性能进行检验, 结果满足要求后才能投入使用。检测数据与训练数据的选择方式应相同, 并且不曾被作为网络训练学习的数据, 同时应包含网络设计要求的全部模式, 才能保证全面检查网络性能。表 2 选择了 10 组样本作为检验数据并与实际

测的值进行比较, 可以看到预测值基本和实际值一阵子。这说明网络用自学习得到的各组输入参数与表面分类等级的关系可以作为预测和控制表面强化类别和样本质量的知识。网络利用这个知识进行推理, 进而预测出了未经网络学习过的样本的表面强化类型和质量。

表 2 试验结果及BP 网络模型分类检验对比

Table 2 Experimental results and BP neural network output of classification of laser surface strengthening treatment

样本序号No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
激光功率 $P/\text{kW}$	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
扫描速度 $v/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	8	12	8	10	8	12	8	12	6	12
光斑直径 $D/\text{mm}$	5	4	3	4	3	5	4	3	5	3
BP 网络输出	1.999	0.9952	4	2	4	1.085	3.9981	3.0834	4	4.0418
试验结果	2	1	4	2	4	1	4	3	4	4

3 分类网络控制的几个实例

神经网络模型的效果, 需经实际检验。本文用几个实例对BP 网络模型进行验证。

1) 链轮齿表激光强化

本例是对小节距( $P=12.7\text{ mm}$ )链轮进行强化处理。根据零件工艺要求, 表面硬化处理后不再作精加工。链轮齿廓的淬火过去都是采用表面淬火, 工艺复杂, 沿齿廓硬度分布并不理想。采用激光进行相变硬化处理, 选用激光加工工艺参数为:  $P=1.1\text{ kW}$ 、 $v=10\text{ mm/s}$ 、 $D=6\text{ mm}$ 。将  $P$ 、 $v$ 、 $D$  值输入BP 网络模型, 输出单元的输出值应为“2”, 即为相变硬化处理。实际检测表明, 相变硬化处理后链轮齿廓表面硬度达  $664\text{ HV}0.1$ 。表面金相组织中珠光体转化为针状马氏体, 硬

度增高, 表面精度无明显降低。同时, 片状石墨块减小, 在磨粒磨损或粘着磨损中, 虽石墨脱落, 但仍能起到贮油的作用, 又由于表面不产生裂纹, 所以耐磨性较感应淬火处理的表面要好, 可满足有一定硬度要求的链轮、齿轮齿廓和机床导轨工作面的要求<sup>[8]</sup>。

2) 凸轮表面激光熔凝处理

摩托车凸轮轴表面硬度要求为  $48\sim 54\text{ HRC}$ , 热处理后需精加工。根据上述要求, 选用工艺参数为  $P=1.2\text{ kW}$ 、 $v=6\text{ mm/s}$ 、 $D=5\text{ mm}$ 。输入BP 网络模型, 其输出单元的输出值应为“4”, 即激光加工控制在激光熔凝区处理。HT300 摩托车凸轮轴表面激光熔凝处理后, 材料表面组织为细枝晶莱氏体。硬度为  $959\text{ HV}0.1$  和硬化层深度明显增加, 细小的碳化物所形成的硬质点



的极好的耐磨性, 硬化层深度可达 1 mm。但表面形貌呈波纹状, 粗糙度增加, 需精加工后能满足零件的工作要求<sup>[9]</sup>。

#### 4 结 论

1) 金相组织研究和分析表明, 对 HT300 孕育铸铁的表面激光强化可分为: 未相变硬化、相变硬化、表面微熔和表面熔凝 4 种类别, 应用 BP 神经网络模型对使这 4 种类别的激光表面强化进行控制和预测得以实现。

2) 神经网络模型应用于激光强化处理零件时, 可以合理地选择激光加工工艺参数, 迅速而准确地控制激光强化处理材料表面强化类别和强化质量, 确保零件最终能获得要求的工作质量和性能。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王大承 激光表面改性技术及其在发动机中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2001, (8): 8- 11.
- [2] 王大承 孕育铸铁激光表面强化处理[J]. 金属热处理, 2001, 26(11): 23- 25.
- [3] Mazumder J, Steen W M. Heat transfer model for Cw laser material processing[J]. Appl Phys, 1980, 51(2): 941 - 947.
- [4] Ichiko O, Hamada N, Soga H. Development of the simulation model for 15 kW CO<sub>2</sub> laser materials processing [A]. Laser Advanced Material Processing-Science and Application (LAM P'87) [C]. Osaka Japan, 1987: 31- 36.
- [5] Basu B, Date A W. Numerical study of steady state and transient laser melting problem-1: characteristics of flow field and heat transfer[J]. Heat Mass Transfer, 1990, 33 (6): 1149- 1163.
- [6] Chan C H, et al Laser in metal surface modification[J]. Metallurgical Transactions A, April 1984, 15: 719- 728.
- [7] 张际先, 宓 露 神经网络及其在工程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [8] 王大承 HT300 链轮齿表激光强化技术研究[J]. 应用激光, 2001, 21(6): 403- 406.
- [9] 王大承 HT300 摩托车凸轮轴激光表面强化处理研究[J]. 激光技术, 2002, 26(6).

## Research on controlling method for different classifications of laser surface strengthening process by using artificial neural network

Fu Yonghong<sup>1</sup>, Wang Dacheng<sup>2</sup>, Yuan Run<sup>1</sup>, Cai Lan<sup>1</sup>, Zhang Yongkang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 210013, China;

2. Department of Mechanical & Electronic Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

**Abstract** Experiments show that metal surface properties can be more or less modified by laser surface strengthening treatment. In this paper four different strengthening classifications of structure and characteristic of phase layer: non-transformation hardening, transformation hardening, shallow melting and melting were analyzed and the relationship between the four strengthening classifications and laser processing parameters: laser power ( $P$ ), laser processing beam diameter ( $D$ ), laser scanning velocity ( $v$ ) were established by using BP neural network. HT300, as a kind of main high strength cast iron, was widely used for making gears, cam shafts, chain wheel, etc. The study results, using HT300 as experimental material, show that laser processing parameters can be chosen conveniently and material surface quality is controlled effectively.

**Key words:** laser surface strengthening treatment; surface strengthening classification; BP neural network; control