

文章编号: 1001-3806(2003)04-0317-04

## 人工神经网络在激光表面强化控制上的应用<sup>\*</sup>

王大承

(五邑大学, 江门, 529020)

**摘要:** 通过大量试验, 分析了使用不同的激光工作参数对材料进行激光强化处理时, 所得材料表面可归为 4 种类别, 即: 未相变硬化, 相变硬化, 表面微熔及表面熔凝。并建立了激光工作参数与材料表面强化类别之间关系的人工神经网络模型。实验表明, 运用该模型可以方便、准确的选择激光工艺参数, 控制材料表面强化类别及工作性能。

**关键词:** 人工神经网络; 激光处理; 表面强化分类; 控制

**中图分类号:** TN249; TH132.47 **文献标识码:** A

### Controlling laser surface strengthening process based on artificial neural network

Wang Dacheng

(Wuyi University, Jiangmen, 529020)

**Abstract:** Experiments show that metal surface properties may produce four results through laser strengthening treatment, i. e. non-transformation hardening, transformation hardening, shallow melt and melt. After analysis, the relationships between the four classifications and laser processing parameters, such as laser power, laser processing beam diameter, laser scanning velocity, have been established based on artificial neural network. HT300 experiments show that laser processing parameters can be chosen conveniently and material surface quality can be controlled effectively.

**Key words:** artificial neural network (ANN); laser strengthening treatment; surface strengthening classification; control

### 引 言

激光强化处理实质是控制加热和冷却两个过程。由于激光接热过程和冷却速度极快 ( $10^4 \text{ K/s} \sim 10^6 \text{ K/s}$ ), 通常激光强化处理仅考虑激光加热过程中的激光工作参数与材料性质, 即考虑激光与材料表面相互作用情况, 作用情况可分为<sup>[1,2]</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不变化, 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, 随着材料自身硬化迅速冷却, 奥氏体转变为马氏体, 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, 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; (5) 当激光使材料汽化, 形成等离子体。利用等离子体反冲效应, 可以对材料进行激光冲击强化。

由此可见, 激光表面改性过程包含了一系列复杂而又相互影响的物理化学过程。激光强化的应用研究中, 计算激光与材料相互热作用是一个较繁杂的课题。虽然根据严格的热传导理论, 利用有限元及有限差分等纯数值计算方法可以获得较好的结果。但是对于一个实际给定的工件, 及时划分计算单元和及时知道相关参数 (如材料的导热系数及表面吸收系数随温度的变化关系, 作用在材料表面激光的功率密度等) 比较困难。为简化热作用的研究, 人们往往忽略了许多因素, 普遍将作用光束假设为理想的基模高斯光束、方形或圆型的均匀光束。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, 利用热传导方程的解析结果来估算作用<sup>[3~5]</sup>。但由于激光表面改性过程的瞬时性和复杂性, 简化研究作了许多与实际情况相差甚远的假

\* 广东省高教厅基金资助项目。

作者简介: 王大承, 男, 1949 年 3 月出生。副教授, 硕士。从事激光加工方面的研究。

收稿日期: 2002-11-17; 收到修改稿日期: 2003-03-18

设(如实际大功率激光光束通常不是人们设想的理想分布),仅围绕温度、相变等简单计算,对相变后的组织分布、温度场和材料性能之间的关系难以考虑,基本不能对实际热处理工艺的制定起直接指导作用。因此,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实验规律的阶段。为搞清其规律,国内外科技人员进行了大量试验来寻求激光工艺参数与材料表面强化处理后的性能之间关系<sup>[6~9]</sup>。然而这种方法试验成本高、工作量大,往往造成一定程度的浪费。

近年来,人工神经网络(ANN)在激光加工过程控制及智能领域的研究已成为人们关注的课题。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。本文中基于ANN模型,对HT300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<sup>[10~13]</sup>

孕育铸铁 HT300 由于含碳、硅较低,而锰较高,因此,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(见图 1a),且具有较好的抗拉强度(300MPa),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组成,但已明显变细变短(见图 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(见图 1c)。硬度明显提高,为(750~1000)HV0.1。



Fig. 1 The structure of HT300 unprocessed and processed by laser strength treatment

a—original structure 500 × b—structure of phase transformation hardened layer 1500 × c—structure of melting layer 1500 ×

### 1.2 激光表面强化分类<sup>[15]</sup>

(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。笔者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链轮、齿轮、凸轮轴及机床导轨工作面的要求。

(3) 激光微熔处理 材料表面呈微熔状,其熔化层深度小于 0.1mm,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 1mm,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 0.2mm 范围内。激光熔凝处理后都要精加工才能满足零件的要求。

例如对于已作精加工、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选取适当激光工作参数:激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、光斑直径  $D$  等的组合。然后,用 ANN 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<sup>[14~16]</sup>

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,是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。

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,笔者选用了 3 层前馈(feed forward)型神经网络模型(如图 2 所示),以 HT300 孕育铸铁为例进行研究。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”是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

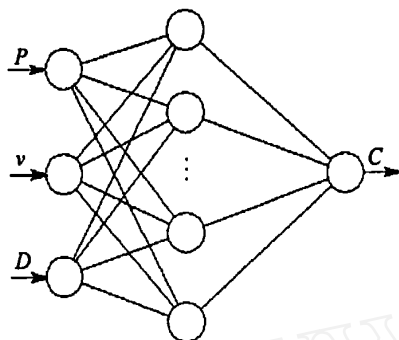


Fig.2 Model of the neural network architecture

激光熔凝处理区。隐含层选择是决定模型好坏的关键,可以先选择 15 个隐含层单元进行试验,在训练好的网络上,在保持预测的精度相同的情况下,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。本文中选用了 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  $6.30449E-05$ 。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。

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

specimen No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
laser power $P$ /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
scanning velocity $v$ /(mm $s^{-1}$ )	6	6	6	6	8	8	8	10	10	10	10	12	12	12	6	6	6	6
diameter $D$ /mm	3	4	5	6	3	4	6	3	4	5	6	3	5	6	3	4	5	6
experiment result	4	3	2	2	4	2	1	2	2	1	1	2	1	1	4	4	3	2
specimen No.	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
laser power $P$ /kW	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
scanning velocity $v$ /(mm $s^{-1}$ )	8	8	8	10	10	10	12	12	12	12	6	6	6	6	8	8	8	10
diameter $D$ /mm	4	5	6	3	4	6	3	4	5	6	3	4	5	6	4	5	6	3
experiment result	3	2	2	3	2	1	2	2	1	4	4	2	2	2	2	2	4	2
specimen No.	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
laser power $P$ /kW	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
scanning velocity $v$ /(mm $s^{-1}$ )	10	10	10	12	12	12	6	6	6	6	8	8	8	10	10	10	10	12
diameter $D$ /mm	4	5	6	3	4	6	3	4	5	6	3	5	6	3	4	5	6	4
experiment result	2	2	1	2	2	1	4	4	4	3	4	2	2	4	3	2	2	2
specimen No.	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70		
laser power $P$ /kW	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2		
scanning velocity $v$ /(mm $s^{-1}$ )	12	12	6	6	6	8	8	8	8	10	10	10	10	12	12	12		
diameter $D$ /mm	5	6	3	4	6	3	4	5	6	3	4	5	6	4	5	6		
experiment result	2	2	4	4	3	4	4	3	2	4	3	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中选择了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样。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。

Table 2 Experimental result and ANN output of classification of laser surface strength treatment

specimen No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
laser power $P$ /kW	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
scanning velocity $v$ /(mm $s^{-1}$ )	8	12	8	10	8	12	8	12	6	12
diameter $D$ /mm	5	4	3	4	3	5	4	3	5	3
ANN output	1.999	0.9952	4	2	4	1.085	3.9981	3.0834	4	4.0418
experiment result	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。本文中用几个实例对ANN模型进行验证。

(1) 链轮齿表激光强化<sup>[17]</sup> 本例是对小节距( $P=12.7$ 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: $P=1.1$  kW,  $v=10$  mm/s,  $D=6$  mm。将 $P, v, D$ 值输入ANN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664HV0.1。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,又因表面不产生裂纹,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。

(2) 凸轮表面激光熔凝处理<sup>[18]</sup> 摩托车凸轮轴表面硬度要求为(48~54)HRC,热处理后需精加工。根据上述要求,选用工艺参数为 $P=1.2$  kW,  $v=6$  mm/s,  $D=5$  mm。输入ANN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摩托车凸轮轴激光相变硬化处理和激光熔凝处理时工艺参数凸轮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959HV0.1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1mm。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。

### 4 结 语

(1) 应用研究结果表明,神经网络在学习训练过程中,能将以往的经验有效地归纳和推理,而且具有自适应能力和在实践中不断地积累、提高和完善的自学习特点。(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,保证强化质量,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,史晓强,张永康 *et al.* 电加工与模具,2001(2):9~13.
- [2] 关振中. 激光加工工艺手册. 北京:中国计量出版社,1998:211~231.
- [3] 李俊昌. 激光热处理优化控制研究. 北京:冶金工业出版社,1995:13~45.
- [4] Mazumder J, Steen W M. *Appl Phys*, 1980, 51(2):941~947.
- [5] Basu B, Date A W. *Heat Mass Transfer*, 1990, 33(6):1149~1163.
- [6] 徐佐仁,许国桢. 上海交通大学学报,1991(2):57~64.
- [7] 李俊昌,谢瓦利埃 R,兰热 J M. 中国激光,1997(7):665~672.
- [8] 虞 钢,安永强,胡幼娟. 中国激光,2000(10):934~936.
- [9] 吴 钢,石 娟,戴忠森. 应用激光,1999(3):112~114.
- [10] Chan C H. *Metallurgical Transactions A*, 1984, 15:719~728.
- [11] Mazumder J. *Journal of Metals*, 1983, 35(5):18~26.
- [12] 陈君才,曹建春. 昆明理工大学学报,1997(4):27~32.
- [13] 刘江龙,邹至荣,苏宝蓉. 高能束热处理. 北京:机械工业出版社,1997:88~215.
- [14] 王大承. 金属热处理,2001(11):23~25.
- [15] 张际先,宓 霞. 神经网络及其在工程中的应用. 北京:机械工业出版社,1996:68~120.
- [16] 闻 新,周 霞,王丹力 *et al.* MATLAB神经网络应用设计. 北京:科学出版社,2000:88~266.
- [17] 王大承. 应用激光,2001(6):403~406.
- [18] 王大承. 激光技术,2002(6):474~477.