



先进的激光淬火技术在机床零件上的应用

■ 金荣植

随着高精密加工中心、数控机床、柔性加工单元的日益应用，对机床零件的加工精度、尺寸精度保持性及使用寿命要求进一步提高，先进的激光淬火等技术的应用，可使机床零件的质量得到很大提高。

一、激光淬火技术

(1) 激光淬火 (LHT) 及其特点 随着20世纪70年代中期大功率激光器的问世并投入工业生产，激光加工技术得到迅速发展。激光淬火是其中研究最早、应用面最广、技术最为成熟的激光表面改性技术。图1为激光热处理示意图。

激光淬火又称激光相变硬化，其是以功率密度 $<10^4\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光束辐照经预处理的工件，从而使工件表面以 $10^5\sim10^6\text{℃}/\text{s}$ 加热温度迅速上升至相变点以上，在组织奥氏体化、奥氏体晶粒未来得及长大的情况下，一旦激光停止照射，通过基体的自身热传导作用迅速冷却（冷却速度可达 $10^4\sim10^6\text{℃}/\text{s}$ ），实现自激淬火，形成表面相变硬化层。

与普通淬火相比，激光淬火后淬硬层组织细化，硬度普遍提高15%~20%，耐磨性能提

高1~10倍；淬火后表面产生约4000MPa的残余压应力，使表层强度及抗疲劳性能得到明显改善；由于激光加热、淬火速度极快，硬化层薄（0.3~0.5mm），热影响区小，故淬火畸变微小；因自冷淬火，无淬火冷却介质的污染。

(2) 激光淬火适用范围 激光淬火通常是对一些不要求整体淬火，尺寸精度要求较高，或采用其他方法难以处理，以及形状复杂或需进一步提高硬度、耐磨性等性能的工件表面硬化处理。

(3) 激光淬火设备 通常包括产生激光束的激光器（CO₂激光器、YAG激光器），引导光束传输的导光聚焦系统（光闸、可见光同轴瞄准、光束传输及转向、聚焦等装置），承载工件并使其运动的激光加工机（二维、多维的自动或数控加工机床

等），以及其他辅助装置（屏蔽装置、对准装置等）。

(4) 激光淬火材料 激光淬火常用材料见表1。

(5) 表面预处理 为增强工件对激光辐射能量的吸收，在激光淬火前需在其表面形成一层对激光有较高吸收能力的覆层，一般采用磷化处理或涂覆含有各种吸光物质的涂料（如粒度 $<1\mu\text{m}$ 细石墨粉+丙烯酸树脂+云母粉+丙酮；磷酸锰或磷酸锌+磷酸；碳素墨水+磷酸锰）。

(6) 激光淬火工艺参数（见表2）。



图1 激光热处理示意

表1 激光淬火常用材料

材料	牌号
碳素结构钢	20、30、35、40、45、50、55、60
合金结构钢	20CrMnTi、30CrMnTi、40Cr、50Cr、35CrMo、42CrMo、40CrMnMo、50CrNi
轴承钢	GCr15、GCr15SiMn
碳素工具钢	T7、T8、T9、T10、T11、T12、T13
合金工具钢	9SiCr、CrWMn、Cr12MoV
灰铸铁	HT200、HT250、HT300、HT350
球墨铸铁	QT400-18、QT450-10、QT500-7、QT600-3、QT700-2、QT800-2、QT900-2

(7) 几种材料激光淬火工艺参数及效果(见表3)。

(8) 几种材料的激光淬火层组织(见表4)。

(9) 激光淬火质量要求及检测 按GB/T 18683—2002《钢铁件激光表面淬火》标准执行。

二、激光淬火技术在机床零件上的应用

1. 数控机床电主轴激光淬火技术应用

实例 数控机床电主轴(见图2), 转速 $(8\sim 10)\times 10^5\text{r/min}$, 材料为40Cr钢, 先进行调质处理, 激光淬火后的安装轴承处及主要表面硬度为52~56HRC。

(1) 主轴及随机附带4个试样, 试样直径80mm, 壁厚20mm, 两端磨平。在采用CO₂激光器进行激光硬化前, 分别在主轴和试样表面上涂覆一层特别涂料, 以增加对激光的吸收。

(2) 用5kW的CO₂横流式激光器对主轴及试样激光淬火, 其输出功率1800~2000W, 扫描速度5mm/s, 机床转速30r/min, 扫描宽度2~3.5mm。采用微机控制淬火机床(工作台), 配备灵活通用的工装夹具, 固定淬火工件作平行移动、转动或合成运动。图3为机床主轴激光淬火示意。

(3) 激光淬火化后的主轴及试样检验 淬硬层深度0.5~1.2mm; 表面淬火硬度60~66HRC; 组织为最外层极细马氏体+少量残留奥氏体, 过渡层马氏体+铁素体+渗碳体, 内层为原始组织, 即回火索氏体。

表5为40Cr钢激光淬火与常规热处理后相对耐磨性比较。图4为40Cr钢激光淬火与调质处理耐磨性比较。通过结果可知, 机床主轴经激光淬火后, 主轴磨损量比普通的40Cr钢调质处理的磨量少77%~79%。

2. 数控机床镶钢导轨的激光淬火技术应用

实例 数控机床镶钢导轨, 材料为45钢, 要求激光淬火。

(1) 预备热处理 导轨经锻造后, 进行常规的正火及调质处理, 以细化晶粒, 改善组织结构, 降低内应力, 并为后续激光淬火做好组织准备。

(2) 激光淬火设备及工艺参数 采用31.5kW国产CO₂激光器及激光加工机床, 激光输出功率900W, 光斑直径为4mm, 离

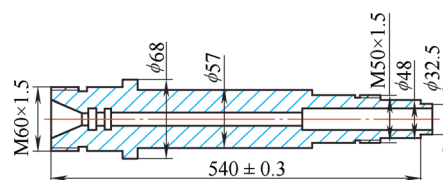


图2 数控机床主轴

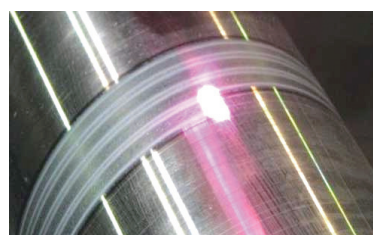


图3 机床主轴激光淬火示意

表2 激光淬火工艺参数

项目	要求
激光器功率/kW	0.1~10
光斑功率密度/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	1000~10000, 常用1000~6000
扫描速度/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	300~750
光束摆动宽度/mm	5~20
光束射入角度/ $^{\circ}$	<45
搭接系数(%)	5~20

表3 几种材料激光淬火工艺参数及效果

牌号	功率密度/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	激光功率/W	扫描速度/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	硬化层深度/mm	硬度HV
20	4.4	700	19	0.3	476.8
45	2	1000	14.7	0.45	770.8
40Cr	3.2	1000	18	0.28~0.6	770~776
40CrNiMoA	2	1000	14.7	0.29	617.5
20CrMnTi	4.5	1000	25	0.32~0.39	462~535

表4 几种材料的激光淬火层组织

材料	硬化区	过渡区	基体
20	板条马氏体	马氏体+细化珠光体	珠光体+铁素体
45	细小板条马氏体	马氏体+托氏体(调质态) 隐针马氏体+托氏体+铁素体(退火态)	珠光体+铁素体
T10	针状马氏体+残留奥氏体	马氏体+托氏体+渗碳体	珠光体+渗碳体
42CrMo	隐针马氏体	马氏体+回火索氏体+珠光体	珠光体+渗碳体
HT200	马氏体+残留奥氏体+未溶石墨带	马氏体+珠光体+片状石墨	珠光体+片状石墨+少量磷共晶

焦量240mm，扫描速度10mm/s。

经上述工艺处理后的导轨，淬火区淬硬层深度为0.58mm，硬化带宽为4.47mm，硬化层组织为细针状马氏体+部分残留奥氏体，表面硬度为724~797HV0.1（相当于61~64HRC）。

（3）磨损试验 磨损试验结果表明，当激光扫描淬火花纹为45°斜线（与导轨棱边呈45°斜线，见图5），（棱形）硬化面积为40%时，导轨耐磨性高。

（4）导轨畸变 导轨采用上述激光淬火花纹、硬化面积及激光淬火工艺参数，在如图6所示的机床导轨的四个面均进行相同条件的激光淬火处理。激光淬火最大畸变（中间位置）—0.11mm（经低温时效），而整体淬火最大畸变（中间位置）0.20mm。结果表明，导轨经激光淬火后的畸变远小于整体淬火或感应淬火。

3. 机床其他零部件的激光淬火技术应用

机床离合器联结爪、花键套、磁轭和齿环等经激光淬火后，其质量明显优于普通盐浴或感应淬火，解决了联结爪部工作面硬度低，卡爪内侧畸变大，花键套键侧面硬度低，内孔畸变超差，小孔处开裂，以及磁轭和齿环渗碳淬火畸变大、断齿、啮合不良、传递力矩不足及发生打滑等缺陷。

实例1 电磁离合器联结爪（见图7），材料为45钢，技术要求：硬度 $\geq 55\text{HRC}$ ，淬硬层深度 $\geq 0.3\text{mm}$ ，爪部直径畸变

$\leq 0.1\text{mm}$ ，硬化面积 $\geq 80\%$ 。

（1）工艺流程 全部机械加工后，在数控激光热处理机上自动进行6个爪的12个侧面激光扫描淬火。

（2）激光淬火工艺 激光输出功率1000W，透镜焦距350mm，离焦量59mm，扫描速度1000mm/min，生产节拍45s/件。

（3）检验结果 硬度为57~60HRC，淬硬层深度0.3~0.6mm，直径畸变 $\leq \pm 0.03\text{mm}$ ，爪侧面100%淬硬。

实例2 花键套（见图8），材料为45钢，技术要求：硬度 $\geq 55\text{HRC}$ ，个别点允许 $\geq 50\text{HRC}$ ，淬硬层深度 $\geq 0.3\text{mm}$ ，内径畸变 $\leq 0.05\text{mm}$ ，硬化面积 $\geq 80\%$ 。

（1）工艺流程 全部机械加工后，在数控激光热处理机上自动进行所有花键的侧面激光扫描淬火。

（2）激光淬火工艺 激光输出功率1000W，透镜焦距350mm，离焦量59mm，扫描速度1200mm/min。

（3）检验结果 硬度为55~63HRC，淬硬层深度0.3~0.5mm，直径畸变为0~0.03mm。

实例3 机床牙嵌电磁离合器上磁轭及齿环（见图9），材料为20、45、20CrMnTi、42CrMo钢，要求激光淬火。

（1）设备 使用激光淬火设备是由数控激光热处理机和

CO₂激光器组成。数控激光热处理机使用日本数控系统，淬火全过程均由微机控制完成。淬火车床最高运动速度为100m/min。

激光器采用横流连续CO₂激光器。输出模式为高阶模，输出额定功率1500W，最大输出

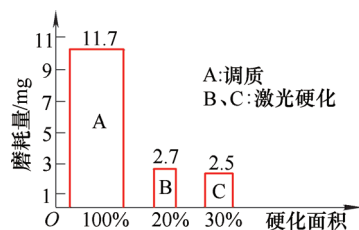


图4 40Cr钢激光淬火与调质处理

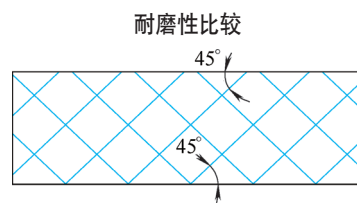


图5 激光扫描淬火花纹示意

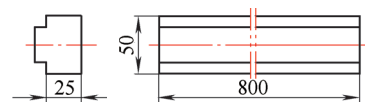


图6 数控机床导轨示意

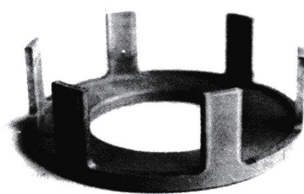


图7 电磁离合器联结爪



图8 花键套

表5 40Cr钢激光淬火与常规热处理后相对耐磨性比较

处理方法	硬度HRC	相对耐磨性	对磨材料
调质	54~60	0.98	铸铁
调质+激光淬火	60~66	1.78	铸铁

功率2000W，输出光斑直径为25mm。

(2) 工装夹具 设计牙嵌电磁离合器上磁轭和齿环工装夹具。

1) 数控分度转台。由定位控制板、速度控制单元、直流伺服电动机与立卧式回转工作台组成。整个加工过程实现了程序化、自动化。

2) 永磁式卡盘及胎具的设计。为了便于磁轭及齿环的装夹，设计并制造永磁式卡盘。

(3) 齿环的激光淬火 齿环齿高0.6mm，齿顶宽0.8mm，齿底宽0.4mm。为保证齿顶与齿底吸收激光光束效率保持一致性，采用加热喷涂工艺，使齿部激光淬火专用涂料的涂层厚度保持一致。

采用激光圆环形光束技术，圆环形光斑额定直径为8mm，环带额定宽度为2mm，以获得均匀的圆环层深度。

针对齿部设计一套环形光斑淬火通道，避免工件表面熔化，缩小齿部两侧加热的不均匀性，保证齿间齿根部淬硬带连贯性。

表6为几种材料的激光淬火工艺参数与结果。

(4) 典型应用 牙嵌的电磁离合器，基体厚度7mm，外径116mm，齿高0.45mm，整个齿宽为8mm，在齿部中间有铜材。原采用高频感应淬火方法，因工件较薄（厚度7mm），工件畸变较大，最大畸变量达0.5mm，齿部啮合面积仅达到30%，且齿部脆性高、打滑等现象严重，扭矩达不到技术要求。

改用激光淬火，排除了因铜材与42CrMo钢两种材料吸光率不同造成对淬火效果的影响，激

光淬火后的金相组织为针状马氏体和部分板条状马氏体，解决了淬硬层差、齿顶熔化、畸变大等问题，获得了良好的淬火效果。

4. 齿轮激光淬火技术应用

我国从20世纪80年代就开始齿轮激光淬火的研究，研制出了多种激光淬火设备，通过多年的发展和成功实践，克服了传统热处理的一些缺点，达到齿轮成本与表面高性能、微畸变的最佳组合，现已成为一项实用并极有发展前景的新型表面强化技术。

(1) 齿轮激光设备 横流CO₂激光器1台，专用配套冷水机组1套，数控加工机床1台，光路系统1套。图10为齿轮激光淬火。

(2) 齿轮的激光淬火技术应用实例。

实例：材料为30CrMnTi钢的齿轮，齿面激光淬火后要求齿面畸变小，表面光洁，不需磨齿。

1) 齿面激光淬火工艺参数（见表7）。

2) 检验。齿面激光淬火后，表层组织由索氏体转变为细密的针状马氏体，硬度在870HV左右。硬化层深0.6~0.7mm。齿面接触疲劳极限由淬火前的1024MPa提高至1323MPa，强化效果明显。



图9 牙嵌式电磁离合器的磁轭和齿环



图10 齿轮激光淬火

表6 几种材料的激光淬火工艺参数与结果

材料	输出功率 /W	扫描速度 / (mm/min)	离焦量 /mm	倾角 / (°)	淬硬层深度 /mm	淬硬层硬度 HV
20	1200	500	15	7	0.90	420
45					0.94	560
20CrMnTi					1.00	520
2CrMo					1.05	720

表7 齿面激光淬火工艺参数

工艺参数	强化齿顶部	强化齿根部
激光输出功率/W	1000	1020
光斑直径/mm	4.2	4.2
光斑移动速度/mm·s ⁻¹	20	20
入射角/ (°)	80	62
透镜焦距/mm	112	112
齿面离焦量/mm	8	8
激光器真空度/kPa	13.33	13.33

作者简介：金荣植，高级工程师，副总工程师，哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司。

MW 20160719