

小模数齿条分光束激光淬火工艺研究

莫衡阳 熊大辉 杨志翔 叶兵 祁小勇

(武汉华工激光工程有限责任公司, 激光先进制造技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430223)

摘要 采用3 kW 半导体激光器对40Cr 高精度导轨齿条模数为2.5 的齿面进行激光淬火, 研究了单光束激光淬火与分光束小模数齿条的激光淬火工艺。结果表明, 采用单光束激光淬火反射的能量对齿面硬度产生的影响不大, 吸收的能量通过热传导会使淬火的齿面产生回火; 与单光束激光淬火相比, 分光束激光淬火所需的功率更低、效率更高、硬度均匀性与一致性更好。

关键词 小模数齿条 分光束 半导体激光淬火

Research of the Process of Dual Beam Laser Hardening of Small Module Rack

Mo Hengyang Xiong Dahui Yang Zhixiang Ye Bing Qi Xiaoyong

(Hubei Key Lab of Laser Advanced Manufacture Technology, Wuhan Huagong Laser Engineering Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract The laser hardening process is carried out on the tooth surface of 40Cr rack with module of 2.5 in high precision linear guide by utilizing a 3 kW diode laser. The single beam laser and dual beam laser hardening process are researched separately. The results show that, when using the single beam laser, the reflected energy have little effect on the microhardness of tooth surface, but the hardened surface will be tempered by the heat conducted from the other side. Compared with the single beam laser, the dual beam laser has many advantages such as lower laser power, more efficiency and more uniform distribution of microhardness.

Key words Small module rack Double beam Semiconductor Laser quenching

0 引言

在机械制造行业中, 齿轮、齿条的应用极为广泛, 这些关键零部件的使用寿命直接影响了产品质量与生产周期。随着我国制造业的飞速发展, 齿轮、齿条的使用要求也越来越高; 齿轮、齿条的承载能力不足、齿面沿齿廓的硬度分布不均匀、淬火后变形量大、需要进行磨齿等问题逐渐受到了人们的广泛关注^[1-4]。

传统的渗碳、氮化、感应淬火和火焰淬火等对长度长的小模数齿条的热处理都存在一定的缺点。如应用最广泛的齿面渗碳淬火, 齿面具有较高的硬度以及良好的耐磨性与抗疲劳性能, 但齿条易产生较大形变, 还需要进行磨齿加工才能满足使用要求; 氮化具有硬度高、形变小的特点, 但硬化层深度浅, 齿面的承载能力较差; 感应淬火与火焰淬火不易获得沿齿廓均匀分布的硬化层。而激光作为20世纪的一门新兴技术, 具有能量密度高、加工精度高、柔性化好易实现自动化等优势。采用激光淬火齿面,

由于加热、冷却速度很高, 不需要外部介质进行冷却; 工艺周期短、工件形变量极小、无污染, 处理后不需要进行磨齿等精加工工艺, 因此齿面的激光淬火受到了国内外学者的广泛关注^[5-8]。

朱玲梅^[9]等人研究了背面回火对齿轮激光淬火的影响, 结果显示当齿轮模数大于4时, 激光淬火不易产生背面回火, 模数小于4时, 背面回火现象较明显。张宏^[10]等人研究了齿轮激光淬火的两种工艺方法, 介绍了分光束齿面淬火方法。但目前少有人研究模数小于4的齿轮、齿条激光淬火工艺及应用。本文中针对1500 mm(长)×30 mm(宽)×30 mm(高)的高精度机床直线导轨小模数齿条(模数2.5), 研究了小模数齿条齿面激光淬火产生回火的原因, 并通过分光束齿面激光淬火的方法解决了回火的问题, 得出分光束激光淬火能够获得更均匀的硬化层齿面分布。

1 试验材料及方法

1.1 试验设备及材料

试样材料选用40Cr, 经正火处理, 基材硬度为

220HV 左右, 基材金相组织为铁素体+片状珠光体, 如图 1 所示。齿条齿面尺寸示意图如图 2 所示。

采用武汉华工激光工程有限责任公司生产的 DL30 型机器人半导体激光表面强化与再制造设备, 聚焦镜片焦距为 390 mm, 光斑尺寸为 6 mm×4 mm 的矩形光斑。

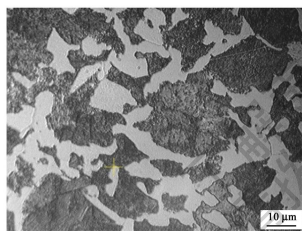


图 1 40Cr 基材组织

采用 5% 硝酸酒精溶液进行断面腐蚀观察组织, 采用 XJL-03 型显微镜进行观察显微组织。采用型号 HVS-1000A 的显微硬度计测定显微硬度, 测量载荷为 0.2 kg, 加载时间为 10 s, 熔覆层不同深度部位测量 5 点值进行平均, 绘制成断面硬度分布图。

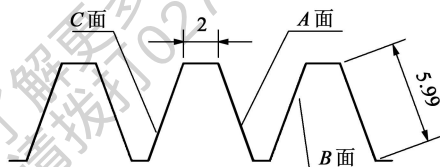


图 2 齿条齿面尺寸

1.2 试验方法

根据图 2 所示, 采用 3 种工艺方法对小模数齿条齿面进行激光淬火处理: 方法 1 是先淬火 A 面, 后淬火 B 面, 分析反射能量对齿面硬化层分布的影响; 方法 2

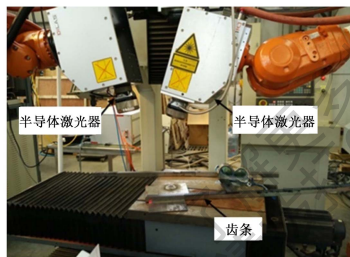


图 3 分光束齿面淬火设备

是先淬火 A 面, 后淬火 C 面, 分析吸收的能量通过热传导对齿面硬化层分布的影响; 方法 3 是 A、C 两面同时同步进行激光淬火, 分析吸收能量对齿面硬化层分布的影响。图 3 为分光束齿面淬火设备, 两台激光器激光分别照射在 1 个齿的两面, 约与照射的齿面呈 45° 夹角, 采用机床摆动、激光器不动的方式进行扫描, 对试验结果进行分析。

2 试验结果及分析

2.1 齿面激光淬火工艺参数分析

为了使几种淬火方式达到对比的效果, 根据齿面的宽度, 固定激光光斑 6 mm×4 mm, 选用 600 mm/min、900 mm/min、1 200 mm/min 共 3 组扫描速度进行分析。通过改变激光功率, 找到每组扫描速度下对应的齿面淬火的临界功率。根据测试结果, 最终获得每组扫描速度对应的临界功率和功率

密度如表 1 所示。

表 1 不同扫描速度对应的临界功率和功率密度

编号	$v/(mm/min)$	D/mm	P/kW	$E/(J/mm^2)$
单光束	600	6×4	1.0	16.7
	900	6×4	1.5	16.7
	1200	6×4	2.0	16.7
分光束	600	6×4	0.7	11.7
	900	6×4	1.0	11.1
	1 200	6×4	1.3	10.8

通常采用激光能量密度来衡量激光输入能量的大小, 其计算公式为

$$E = P / (Dv) \quad (1)$$

式中, E 为激光能量密度; P 为激光功率; v 为激光扫描速度; D 为光斑直径。

由表 1 中可以看出, 采用单光束对齿面进行激光淬火, 随着扫描速度的增加, 激光功率也随着增加, 但总的能量密度基本上保持不变。采用分光束对齿面进行激光淬火, 所需的激光功率要远远低于单光束。其所需功率随着扫描速度的增加, 激光功率也随着增加, 总的能量密度呈下降趋势。出现这种现象的原因可能是齿的尺寸较小, 激光能量导致齿的整体温度在极短时间内升温, 材料对激光的吸收率随温度升高而增加, 导致所需的激光能量逐渐减少^[11]。

2.2 反射能量对齿面硬化层分布的影响

激光照射在工件表面, 一部分能量被材料反射, 一部分能量被材料吸收, 反射能量大部分可能作用到了相邻的齿条齿面表面, 为了确定反射能量对齿面的影响, 首先检测了齿面硬度, 如表 2 所示, A 面为先淬火齿面, B 面为后淬火齿面, 检测位置为距齿面表面 0.05 mm 处硬度分布, 结果显示激光参数分别为 $P=1.0 kW$ 、 $P=1.5 kW$ 、 $P=2.0 kW$ 时, A、B 两个面的硬度差值分别为 $30HV_{0.2}$ 、 $3HV_{0.2}$ 、 $12HV_{0.2}$, 说明反射光基本上没有对齿面硬度产生影响; 图 4 为其中一种参数激光淬火齿面组织, 从图 4 中可以看到, A、B 两个面的组织均为针状马氏体和板条马氏体的混合组织, 且没有出现明显差异性; 由上述试验数据可以说明激光的反射能量不会对模数为 2.5 的小模数齿条齿面产生回火影响。

表 2 单光束反射能量齿面硬度检测

激光功率/kW	1.0		1.5		2.0	
	A	B	A	B	A	B
距表面 0.05 mm 硬度 $HV_{0.2}$	712	742	761	758	789	777

2.3 热传导对齿面硬化层分布的影响

材料吸收激光能量由齿面向芯部传导, 图 5 为

不同工艺参数下, A、C 两个面距齿顶 2 mm 处横向硬度分布情况, A 面为激光先淬火面, C 面为后淬火面。可以看出 3 种参数下 A 面硬度均低于 C 面硬度, 说明 C 面激光淬火后对 A 面产生了一定影响, 且激光扫描速度越快, A 面硬度略有提升; 为了分析硬度下降的原因, 切样对 3 种参数下组织进行分析, 结果显示 3 种参数下激光淬火组织基本相同, 图 6 为其中一种参数下组织, 可以看出 A 面组织为回火马氏体, C 面组织为马氏体; 综上检测结果, 说明后淬火的一面会对先淬火的一面产生回火。

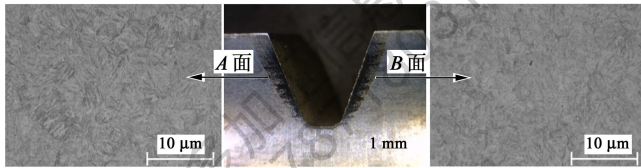


图 4 单光束反射能量齿面组织

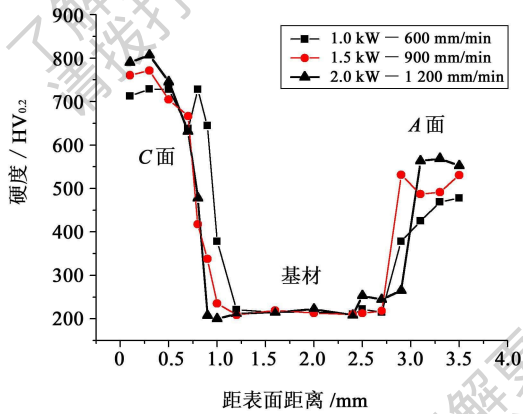


图 5 单光束吸收能量横向硬度与层深

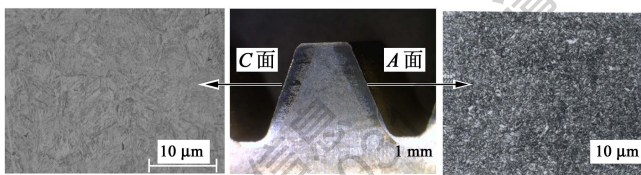


图 6 单光束吸收能量齿面组织

2.4 吸收能量对齿面硬化层分布的影响

为了解决齿面回火的问题, 采用分光束同时对齿的两个面进行激光淬火, 图 7 为距齿顶面 2 mm 处, 3 种参数下分光束齿面激光淬火硬度与层深分布。可以看出 A 面与 C 面表面硬度基本上相同, 工艺参数为 $P=1.0 \text{ kW}$, $v=600 \text{ mm/min}$, 齿的芯部硬度与齿的表面硬度接近, 说明距齿顶 2 mm 得到全部激光硬化, 随着扫描速度增加, 齿的芯部硬度逐渐下降; 图 8 为 3 种参数下齿面的硬化层分布形貌, 扫描参数为 $P=0.7 \text{ kW}$, $v=600 \text{ mm/min}$ 、 $P=1.0 \text{ kW}$, $v=900 \text{ mm/min}$ 、 $P=1.3 \text{ kW}$, $v=1200 \text{ mm/min}$, 白亮层距齿顶的距离为 2.58 mm、

2.37 mm、2.0 mm, 白亮层为激光主要影响区域, 可以看出, 随着扫描速度增加, 激光主要的影响区域逐渐减小; 图 9 为分光束激光淬火齿面两边的组织, 可以看出分光束齿面淬火组织均为针状马氏体和板条马氏体混合组织, 均匀性与晶粒度大小非常接近; 综上检测结果, 采用分光束对小模数齿条齿面进行淬火不会产生回火问题, 在相同扫描速度下, 分光束相比单光束齿面淬火所需的激光能量更低, 激光影响的硬化层更深, 激光硬化层的组织均匀性更好。

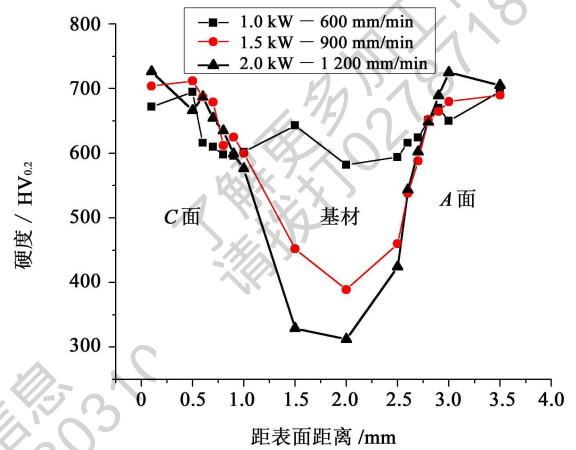


图 7 分光束齿面横向硬度与层深

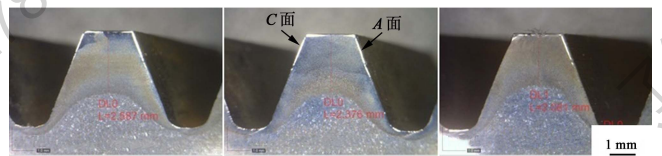


图 8 分光束齿面激光截面形貌

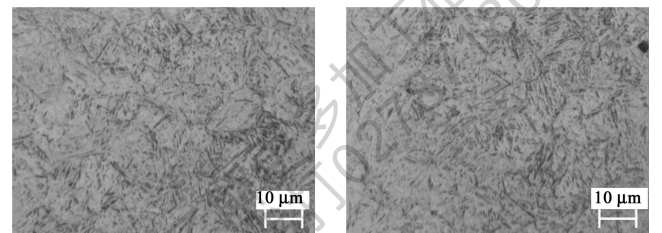


图 9 分光束齿面激光淬火组织

2.5 小齿面双光束激光淬火工艺浅析

由以上试验数据可以断定, 双光束激光淬火齿面效果远远优于单光束齿面淬火。分别选取距齿面 0.1 mm、2 mm、4 mm、5.9 mm 处进行横向硬度检测, 通过硬度分布情况, 推论出硬化层轮廓随扫描速度变化的趋向。图 10 为激光淬火硬化层轮廓随扫描速度变化趋向, 可以得知, 随着扫描速度的增加,

激光淬火硬化层会随着齿底逐渐向齿顶变浅。当扫描速度增大到某个值 n 时, 最终硬化层会在齿顶分开, 这个扫描速度的值可能很大, 还需要进一步研究。

齿轮、齿条的形变也是制约其热处理方法的重要因素, 本文中研究的高精度机床直线导轨齿条选用传统的高频淬火工艺, 形变量大, 采用液压机进行校正后到 0.01 mm 以内才能使用, 工艺过程复杂。选取 3 组工艺参数的双光束激光淬火齿条进行形变量检测, 选取齿条的 4 个边角分别标记为 a 、 b 、 c 、 d , 检测 4 个角的形变量, 表 3 为齿条形变量检测结果。可以看出, 随着扫描速度的增加, 齿条的形变量逐渐减小, 由此可见, 采用 20 mm/s 以上的速度, 对齿条进行激光淬火能够控制形变在 0.01 mm 以下, 不需要进行磨齿与校正等过程就能够使用, 工艺过程更简洁与稳定。图 11 为采用此工艺参数进行激光淬火的齿条。

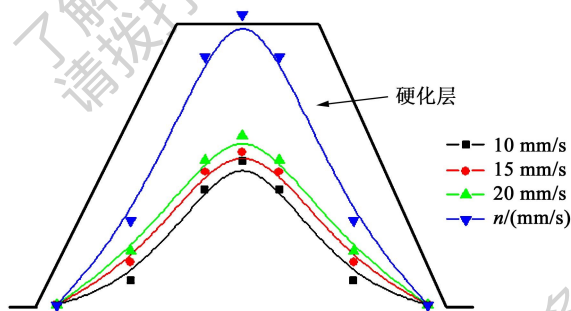


图 10 激光淬火硬化层轮廓随扫描速度变化趋向

表 3 齿条形变量检测

工艺参数	形变量/mm			
	a	b	c	d
0.7	0.15	0.17	0.15	0.16
1.0	0.12	0.11	0.11	0.13
1.3	0.08	0.07	0.07	0.07



图 11 激光淬火高精度导轨齿条

3 结论

(1) 小齿面单光束激光淬火的反射光能量不会对齿面硬度产生影响, 而齿面吸收的能量通过热传导会使淬火面产生回火, 使两个齿面的硬度产生较大差距。随着扫描速度的增加, 两个齿面的硬度差距逐渐减小, 硬化层深逐渐变浅, 无法满足小齿面的使用要求。

(2) 与小齿面单光束激光淬火工艺相比, 采用双光束激光淬火在相同扫描速度下, 所需的激光功率更

低, 激光淬火的硬化层更深, 且不会受到回火问题的影响, 两个齿面的硬度一致性与均匀性极好。随着扫描速度的增加, 激光淬火的硬化层深由齿底中部逐渐向齿顶中部变浅, 硬化层轮廓呈抛物线分布。

(3) 相比于常规的高频淬火工艺, 激光淬火的高精度机床直线导轨齿条, 不需要进行校正与磨齿便可使用。随着扫描速度的增加, 齿条的形变量逐渐减小, 当扫描速度 20 mm/s 时, 能够控制齿条形变量到 0.01 mm 以内, 齿面平均硬度约为 700 HV_{0.2}, 距齿顶 2 mm 处的硬化层深约为 1 mm, 为最佳淬火工艺。

参 考 文 献

- [1] HUA G P, LIU R S, CHEN D Y, et al. Technique about the Carburized Gear Quenching in Salt Bath[J]. Heat Treatment Technology & Equipment, 2010, 31(5):29-34.
- [2] LI Liyuan, LI Yinong, FU Junsheng, et al. Test and application of same tooth positioning unit with gear quenching submerged in oil[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(10):100-102.
- [3] SU Xingwu, GU Min, CHEN Y, et al. Effects of quenchant flow in quenching tank on quenching distortion of gear[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(12):195-198.
- [4] DING Yi, QIN Ming, AN Jinmin. Quenching distortion induced by ingot segregation in gear steel[J]. Baosteel Technical Research, 2013, 7(1):44-48.
- [5] WANG Y L, XU S R, HUI Y L. Research on laser quenching process of 20CrMnMo gears by finite element method and experiment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1):1-9.
- [6] KOMANDURI R, HOU Z B. Thermal analysis of laser surface transformation hardening—optimization of process parameters[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(9):991-1008.
- [7] 王玉玲, 惠英龙, 姚翠翠. 齿轮激光淬火研究进展[J]. 表面技术, 2014(5):109-117.
- [8] LIU F, GAO Q, GAO D, et al. Study on laser quenching of 3Cr13 stainless steel counter gear[J]. Applied Laser, 2002, 22(3):297-299.
- [9] 朱玲梅. 背面回火对齿轮激光淬火的影响[J]. 上海海事大学学报, 1990(2):78-83.
- [10] 张宏, 邓琦林, 唐亚新, 等. 齿轮激光淬火的两种工艺方法[J]. 航空制造技术, 1996(4):12-15.
- [11] ZHOU Shengfeng, HUANG Yongjun, ZENG Xiaoyan, et al. Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 480(1):564-572.

收稿日期: 2017-11-15 收修改稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2016YFB1102700)

作者简介: 莫衡阳(1963—), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 主要从事激光熔覆及表面强化工艺研究。