

综述·专论

齿轮激光淬火研究进展

王玉玲, 惠英龙, 姚翠翠

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 综述了齿轮激光淬火加工理论及方法的研究进展, 分析了淬火硬化层形成机理以及与传统齿轮淬火硬化层形成机理的差异。通过对激光淬火加工的扫描方式、偏置量、扫描速度、入射角以及辅助冷却方式等工艺的分析, 提出了相应的优化方案。对激光淬火和常规淬火后齿面的硬度、耐磨性、变形量、金相组织以及晶粒形状和分布进行了分析, 认为齿轮激光淬火比常规淬火具备更优的机械性能。

关键词: 齿轮; 激光淬火; 工艺方法

中图分类号: TG156.33

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)05-0109-09

Research Progress of Gear Laser Quenching

WANG Yu-ling, HUI Ying-long, YAO Cui-cui

(School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

ABSTRACT: This article summarized the research progress on the theories of laser quenching, and meanwhile analyzed the formation mechanism of hardening layer, as well as its difference from the formation mechanism of the traditional gear quenching methods. Through the analysis of scanning way, offset, scanning speed, angle of incidence and auxiliary cooling technology in the process of laser quenching, corresponding optimization schemes were put forward. By comparing the hardness of tooth surface, wear resistance, deformation, the microstructure and grain shape and distribution of the gears treated by laser quenching and normal quenching, it was concluded that the gear product of laser quenching had better mechanical performance than those prepared by the conventional quenching.

KEY WORDS: gear; laser quenching; technique

齿轮作为绝大多数机械的核心零件, 其性能好坏直接决定着机械的精良程度。在加工过程中, 最大的加工难题是热处理变形问题。在淬火处理时工件畸变过大, 精磨仍然难以消除变形, 导致齿轮生产中材

料的有效利用率只有 30% ~ 50%^[1], 不仅增加了生产成本, 还造成了资源的巨大浪费。激光淬火是针对齿轮这一缺陷发展的新技术, 激光束的能量密度高达 $10^3 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$, 扫描后的零件表面硬化层瞬间吸收

收稿日期: 2014-04-10; 修订日期: 2014-08-27

Received: 2014-04-10; Revised: 2014-08-27

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2009FM066); 山东省高等学校科技计划项目(J12LB07)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province of China(ZR2009FM066) and the Science and Technology Plan Projects of Colleges and Universities of Shandong Province(J12LB07)

作者简介: 王玉玲(1967—), 女, 山东人, 博士, 教授, 主要从事机械产品绿色设计与制造研究。

Biography: WANG Yu-ling(1967—), Female, from Shandong, Ph. D., Professor, Research focus: design and manufacturing of green mechanical products.

光能而立即转化为热能,温度急剧升高并超过材料的相变点而形成奥氏体;由于热传递的热量还未到达基体,使得低温基体和高温热处理部位形成极高的温度梯度。由于激光淬火扫描时间极短,热处理区因瞬冷而发生淬火,表面的奥氏体转变为马氏体,且含量极高,从而达到了对零件表面淬火的目的。齿轮激光淬火已被国内外广泛的关注和研究^[2-12]。

1 齿轮淬火工艺对比

常规的齿轮淬火工艺包括渗碳淬火、感应淬火、

火焰淬火、盐浴淬火等。在常规热处理过程中,不可避免地会产生多种组织应力和热应力,直接影响齿轮的表面粗糙度和加工精度,因热处理质量不稳定极易引起齿轮定位基面及齿面变形过大、翘曲变形等问题,导致齿轮大批报废^[13]。

激光淬火对齿轮进行热处理有十分显著的优点,如硬度高、耐磨性好、变形小、硬化层深度和面积精密可控、生产周期短、清洁环保^[14-17]等。另外,有研究人员^[18]对齿轮经各种工艺方法处理后的硬度进行了对比,结果见表 1,更可看出激光淬火的优势。

表 1 不同硬化工艺对比齿轮硬度的影响

Tab.1 The effects of different hardening technology on the hardness of the gear

	火焰淬火	感应淬火	渗碳淬火	氮化	激光淬火
淬硬层深度	2.0 ~ 3.0 mm	3.0 ~ 8.0 mm	0.1 ~ 0.8 mm	0.2 ~ 0.5 mm	0.3 ~ 1.0 mm
自冷淬硬能力	差	差	差	无	良好
变形量	大	大	中等	小	小
品质	差	中等	中等	好	良好
表面氧化程度	大	较大	大	无	无
单件处理水平	中等	差	一般	好	好
大批生产水平	差	好	一般	好	较好
加工成本	低	较低	较高	高	高
优点	方便灵活	硬化层深、应用广	低碳钢、中硬齿面、高精度齿轮	硬度均匀	组织细化、硬度高、灵活
缺点	硬度不均、易产生裂纹	大模数、内齿欠佳,不适合单件小批量生产	渗碳时间长、淬硬层薄,淬火后需磨齿	硬化层薄、成本高 化学键结合,易脱落	存在搭接软带、硬化层薄,对基体硬度要求严格

2 齿轮激光淬火机理及条件分析

2.1 硬化层形成机理

激光淬火过程中存在热传导、热对流和热辐射过程。齿轮的激光淬火过程,加热区可以分为上、中、下三层,上层为高温表层,中层为过渡层,下层为冷基体。显然,冷却从下层向上层逐级进行,且冷却速度越来越慢,随着此温度梯度分布的马氏体含量也不同,这和常规淬火方式的冷却方向恰恰相反^[19-21]。

2.2 扫描方式

目前,激光淬火扫描方式主要有两种:周向连续扫描和轴向分齿扫描^[15]。周向连续扫描又分为单光束螺旋扫描和分光束螺旋扫描^[22]。周向连续扫描会

导致齿顶部分的表面硬度和硬化层深度均大于齿根部分,同时齿顶容易发生烧熔。轴向分齿扫描可以克服这一缺点,通过跳齿扫描可使齿轮受热较为均匀,热变形较小。跳齿扫描又分为全部等间隔分齿扫描和非全部等间隔分齿扫描^[23]。

2.2.1 单光束螺旋扫描

单光束螺旋扫描示意如图 1 所示。加工时激光

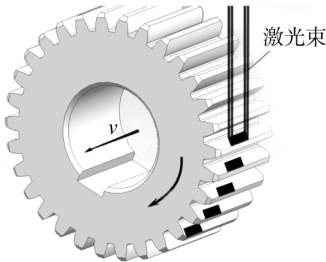


图 1 单光束螺旋扫描示意
Fig.1 Single-beam spiral scan

光斑照射在齿面齿宽方向的一端并保持位置不变,齿轮安装在主轴上作回转运动,同时工作台带动齿轮作轴向进给运动(提供沿齿宽方向的激光淬火带搭接宽度),最后得到的扫描轨迹就是带有搭接的螺旋带^[16]。

2.2.2 分光束螺旋扫描

激光输出后经分光镜分成两束,再通过反射镜反射后,聚焦于一个轮齿的两侧,如图 2 所示。主轴带动齿轮旋转,同时工作台作轴向进给运动,转动一周可以获得两条螺旋带轨迹。

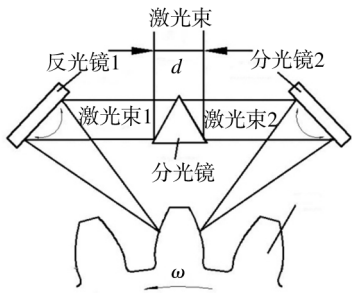


图 2 分光束螺旋扫描示意
Fig. 2 Divided-beam spiral scan

上述两种扫描方式各有优劣,单光束扫描操作简单,设备费用较低;分光束扫描可以提高加工效率并且可以保证一个轮齿的两个齿面受热均匀,减小变形。两种扫描方式扫描精度均不高,最后的扫描曲线都是螺旋线。

2.2.3 轴向分齿扫描

轴向分齿扫描是在激光光束有一定偏置之后对正一个齿面进行扫描,齿轮在工作台带动下作轴向往复运动。若是窄带搭接扫描则需每次往返改变偏置量;若是宽带扫描则可一次性扫描一个齿面,无需改变偏置量。当扫描完一个齿面后,转台带动齿轮做分齿运动,扫描下一齿面。当一侧齿面完全扫描完成后重复上述运动完成另一侧齿面的加工。如图 3 和图 4 所示,窄光束搭接扫描,激光束自上而下按先 1 后 2 的顺序扫描,并设置一定的搭接区;宽光束则一次性

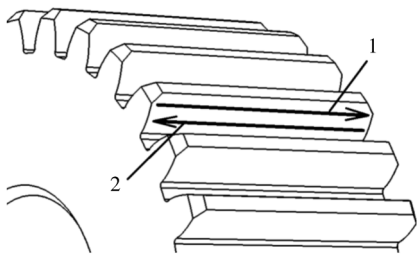


图 3 轴向窄光束扫描路径

Fig. 3 Narrow-beam scanning path along the axial direction

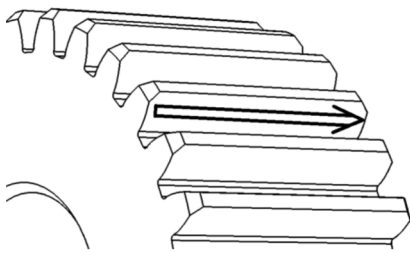


图 4 轴向宽光束扫描路径

Fig. 4 Wide-beam scanning path along the axial direction

扫描全齿面。

对于窄带搭接扫描方式,搭接区经历两次扫描,会发生一定程度的回火^[16](如图 5 所示)。文献[24]指出,标准直齿轮的接触疲劳位置大都在节圆以下 0.3 mm 处,因而激光淬火要避免此区域。采用先扫描齿顶,后扫描齿根的工序,可使回火区控制在相对次要的节线以上部位^[25]。

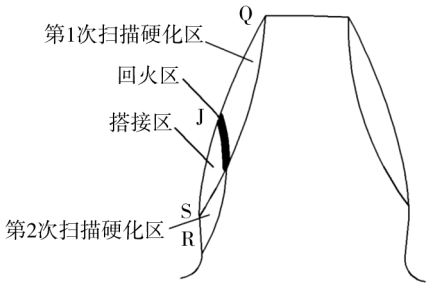


图 5 激光淬火搭接方式

Fig. 5 The lap way of laser quenching

综合分析,分光束扫描的方式可以同时加工一个齿的两个侧面,降低了变形影响,提高了加工效率;轴向扫描的优点是可以得到沿轴向均匀分布的硬化层。如果两种方法结合到一起,即分光束轴向分齿扫描均匀跳齿,每次分齿都间隔一个齿加工,更可降低温度升高对基体的影响。如果批量生产,可以将齿轮顺序对齐,固定在主轴的外加长轴上,便可一次加工多个齿轮,从而得到更好的效果。

2.3 偏置问题

相邻轮齿受激光扫描时会发生干涉,必须使激光束与齿轮的轴线保持一定的距离,即偏置量 a 。目前的研究,存在两种理论。

1) 第一种理论^[16]:根据图 5 所示,齿廓 RSJQ 中的 RS 段和 SQ 段因形成机理不同而应分别扫描,则可以得到两个偏置量 a_1 和 a_2 。

根据几何知识和渐开线方程可以得到:

$$a_1 = r_b \tan \left[\arccos \left(\frac{r_b}{r_a} \right) \right] + \frac{d_{\text{光}}}{2} \quad (1)$$

$$a_2 = r_b \tan \alpha + \frac{d_{\text{光}}}{2} \quad (2)$$

式中: r_b 为基圆半径, r_a 为齿顶圆半径, α 为分度圆压力角, $d_{\text{光}}$ 为光斑直径。

2) 第二种理论^[26-27]得出的偏置量计算公式为:

$$a = \frac{mZ \cos \alpha}{2} \tan \arccos \left(\frac{Z \cos \alpha}{Z + 2h_a^*} \right) + \frac{d_0}{2} - v(t_1)t_1 \quad (3)$$

式中: m 为模数, Z 为齿数, h_a^* 为齿顶高, d_0 为光斑直径, α 为分度圆压力角, $v(t_1)$ 为水平工作台的运动速度, t_1 为设定的水平工作台运动时间。几何图如图6所示。

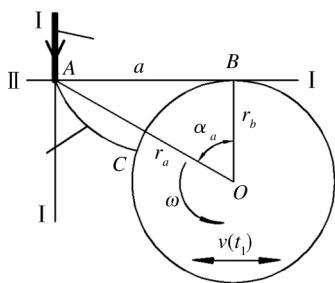


图6 齿轮偏置分析

Fig.6 Bias analysis of the gear

根据齿轮参数公式可得,两个公式中的 \tan 和 $\tan \arccos$ 本质上是一样的,不同的是式(3)进一步考虑了水平移动对偏置量的影响;考虑到不同的位置扫描机理不同,其偏置量也不同而分别计算。结合两者优点,得到优化公式:

$$a_1 = r_b \tan \left[\arccos \left(\frac{r_b}{r_a} \right) \right] + \frac{d_{\text{光}}}{2} - v(t_1)t_1 \quad (4)$$

$$a_2 = r_b \tan \alpha + \frac{d_{\text{光}}}{2} - v(t_1)t_1 \quad (5)$$

2.4 扫描速度

扫描速度^[28]即工件与激光束的相对运动速度(如图7所示)。因为齿廓的特殊结构,故扫描速度必然是变速的^[29]。

1) 第一种理论^[16]: 齿轮渐开线上任意一点 K 的速度:

$$v_K = r_K \omega \sin \left[\arccos \left(\frac{a}{r_K} \right) \right] \quad (6)$$

式中: r_K 渐开线上 K 点的极径, ω 为齿轮转动角速度。

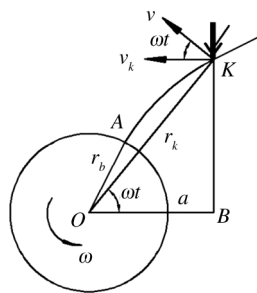


图7 扫描速度分析

Fig.7 Scanning speed analysis

2) 第二种理论^[19]得到的计算公式如下:

$$v_x = a\omega(t_2) \tan[\omega(t_2)t_2] - v(t_1) \quad (7)$$

式中: $\omega(t_2)$ 为设定的齿轮的旋转角速度, t_2 为设定的齿轮旋转时间, a 为偏置量。

两种理论得出的结果本质上是一致的,不同的是式(7)与偏置量有关,并考虑了轴向运动对速度的影响,更加精准。两种扫描速度公式都可以得出随着激光束从齿顶到齿根移动,速度不断减小,这就可能发生齿顶与齿根温差巨大的现象。故此,应该使扫描速度变化,使得齿顶齿根处的实际扫描速度基本保持恒定,通过编程对其参数进行改变即可。

2.5 激光入射角

激光入射角是指激光束中心线与其所照射到的齿轮齿面的法线的夹角。在齿轮激光淬火过程中,激光入射角和扫描速度对齿面能量有综合性影响,两者如能相辅相成则有利于获得沿齿廓均匀分布的硬化层。入射角可以用下式计算^[16,30],式中 β 为激光入射角:

$$\left(\tan \alpha_a + \frac{d_{\text{光}}}{2r_b} \right) \cos \beta + \sqrt{\sec^2 \alpha_k - \left(\tan \alpha_a + \frac{d_{\text{光}}}{2r_b} \right)^2} \sin \beta = 1 \quad (8)$$

经分析,上述公式基本符合要求。在编程时,对于给定的齿轮,各项参数均已知,可以直接带入公式求出入射角写进程序。

2.6 辅助冷却技术

对于小尺寸齿轮,基体与激光热处理部位的温度梯度可能达不到基体自淬火要求。因此应增加辅助冷却措施,加速轮齿冷却速度,使其迅速达到临界值。同时,辅助冷却也能减弱二次回火现象,确保获得良好的硬化效果。水冷系统示意如图8所示。

这种方法经济易行,可以达到一定的辅助效果,但也存在一定的风险。由于激光束带有高能量,如果

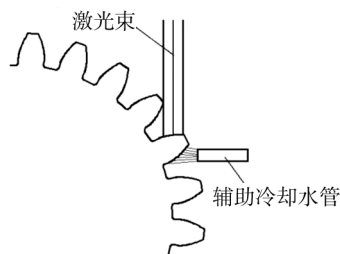


图 8 辅助冷却方式示意

Fig. 8 Schematic diagram of auxiliary cooling way

喷射的水珠不慎被激光照射,很可能瞬间气化,对周围零件、设备和实验人员将造成严重伤害。所以,如换用液氮代替水冷,可以克服这个缺点,也能更好的满足工艺要求和环境保护。

3 激光淬火后的机械性能分析

目前,国内对齿轮激光淬火后的组织结构以及机械性能的研究很多,大致都是从淬火后的硬化层分布、金相组织结构、变形量(精度)等方面进行^[31—34]。

3.1 硬化层分布

激光淬火后齿轮的硬化层分布情况^[14,35]如图 9—图 11 所示。

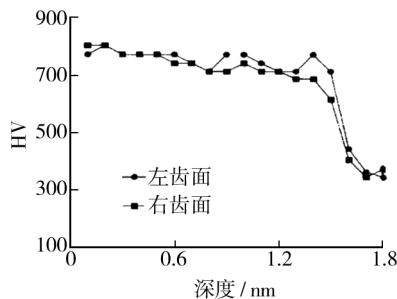


图 9 不同齿面硬化层硬度

Fig. 9 The hardness of the hardened layer

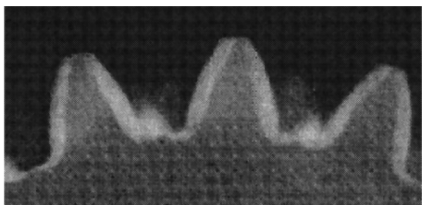


图 10 齿轮激光热处理的硬化层分布

Fig. 10 The distribution of hardened layer of gear treated by laser

经激光淬火后的齿轮,硬化层基本沿着齿廓均匀分布,厚度达到齿轮热处理表面硬度要求^[36]。

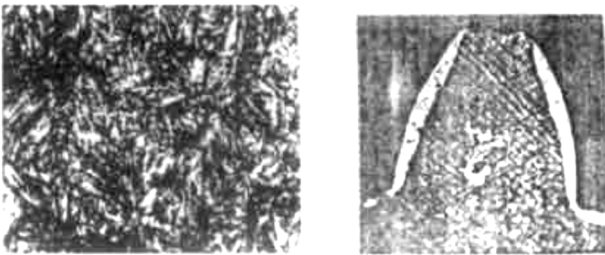


图 11 激光淬火后齿面金相组织和硬化层轮廓

Fig. 11 The microstructure and hardened layer outline of gear treated by laser

3.2 金相组织分析

分析金相组织可以准确确定齿轮的激光淬火后的表面晶粒类型和分布,是评价激光淬火结果好坏的重要指标^[37—40]。

1) 对 40CrNiMoA 钢激光淬火齿轮淬火区的组织进行分析得出^[41]:组织包括淬硬层(由板条状和片状马氏体混合组成)、过渡区(由马氏体和索氏体混合组成,且沿深度方向马氏体逐渐减少)和基体(回火索氏体)。晶粒平均面积为 0.000 13 mm²,晶粒度数为 10 级;碳化物为 1 级,数量较少,呈细小粒状分布。

2) 对激光淬火齿轮的组织结构进行测定并与渗碳淬火齿轮淬硬层残余奥氏体与马氏体含量、微晶尺寸以及位错密度进行对比^[23],见表 2—表 4。

表 2 残余奥氏体和马氏体含量

Tab. 2 The content of residual austenite and martensite

项目	残余奥氏体含量/%	马氏体含量/%
渗碳淬火齿轮	14. 97	85. 03
激光淬火齿轮	24. 14	75. 86

表 3 激光淬火齿轮和渗碳淬火齿轮淬硬层晶粒尺寸比较

Tab. 3 Grain size comparison of hardened layers of gears treated by laser and carburizing

项目	残余奥氏体平均尺寸/nm	马氏体平均尺寸/nm
渗碳淬火齿轮	17. 8	21. 8
激光淬火齿轮	13. 7	15. 3

表 4 激光淬火和渗碳淬火齿轮淬硬层的位错密度

Tab. 4 The dislocation density of hardened layer of gears treated by laser and carburizing

项目	残余奥氏体位错密度/(1 · cm ⁻¹)	马氏体位错密度/(1 · cm ⁻¹)
渗碳淬火齿轮	8. 4795×10 ¹²	6. 2653×10 ¹²
激光淬火齿轮	2. 3023×10 ¹³	1. 2252×10 ¹³

可见,激光淬火齿轮淬硬层中的残余奥氏体含量较大,淬硬层的微晶尺寸明显小于渗碳淬火齿轮,晶粒细化、亚晶界增多,位错密度比渗碳淬火齿轮高一个数量级。以上分析结果可以推断出激光淬火的齿轮具有更高的强度、硬度滑移变形抗力和接触疲劳强度。

3.3 精度分析

常规淬火后齿轮极易发生变形,对其精度产生重要的影响。加工精度很高的齿轮经过淬火处理后精度明显下降,无法满足要求而报废。激光淬火齿轮一般能保持较好的精度^[42—43];

与常规齿轮相比,齿轮激光淬火变形很小,不影响齿轮的精度等级。常规齿轮淬火后一般需要经过磨齿等精加工。

3.4 激光淬火后抗磨性

激光淬火后齿面抗磨性显著提高^[44—47],齿面硬度最高达 950HV 以上,平均大于 600HV。对其线切割试块进行磨损试验,并与常规淬火进行比较,结果见表 5。

表 5 磨损后质量损失情况

Tab.5 Weight loss of gear after wear

	激光淬火	常规淬火
40CrNiMo	0.044 g	0.232 g

激光相变硬化处理后的试样平均质量损失为常规淬火试样的 19%。这也进一步证明了激光淬火的齿轮具有更高的耐磨性^[48]。

3.5 疲劳试验

疲劳寿命对齿轮机械性能影响很大,对激光淬火后的 20CrMnTi 齿轮进行疲劳试验研究^[49—50]发现,经过 1 634 040 转循环的过重加载试验,通过数字显微镜放大得到了激光强化和常规热处理后齿轮的齿面点蚀图。分析得出齿轮疲劳磨损后,未经过激光强化后的齿面点蚀面积是强化后齿轮的 2.1 倍,从而提高齿轮的疲劳寿命。

4 结论

1) 目前的齿轮激光淬火扫描方式基本都没有达

到使轮齿表面均匀受热的要求。

2) 由于齿轮材料多样,不同材料的齿轮对应的最佳激光淬火参数差别较大,导致现有很多研究结论失去指导意义。故应对各种常用材料齿轮对应的最佳激光淬火参数进行研究梳理,得出可供参考的统一标准。

3) 齿轮激光淬火工艺过程复杂,必须改进工艺方法,实现加工自动化和数控化。

参考文献

[1] 杨志强. 渗碳圆柱齿轮淬火过程的数值模拟[D]. 秦皇岛:燕山大学,2010.
YANG Zhi-qiang. Quenching Process Simulation of Carburized Cylindrical Gear[D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2010.

[2] MOSON P J. Comparison of Laser Hard Facing with Conventional Process[J]. Surface Engineering, 1990, 6(3): 185.

[3] HOWES M A. Surface Hardening Considerations for Relation to Total Gear Manufacturing System[J]. Industrial Heating, 1990(4): 36—38.

[4] 李文学,张风云,陈宏杰. 9Cr₂ 钢激光淬火组织和硬度[J]. 包头钢铁学院报, 2005, 24(3): 251—253.
LI Wen-xue, ZHANG Feng-yun, CHEN Hong-jie. Microstructure and Hardness of Laser Quenching 9Cr₂ Steel[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2005, 24(3): 251—253.

[5] PUTATUNDA S K, NAMBIAR M, CLARK N. Influence of Laser Hardening on Mechanical Properties of Low Alloy Steel[J]. Surface Engineering, 1997, 13(5): 407.

[6] 梁二军,梁会琴. 激光淬火及熔覆层性能与物相变化的拉曼光谱研究[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 120—123.
LIANG Er-jun, LIANG Hui-qin. Study on the Properties and Phase Transition in Laser Quenching and Cladding Layers by Raman Spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(1): 120—123.

[7] 韩莉,姜伟. 1Cr18Ni9Ti 激光表面强化工艺的研究[J]. 表面技术, 2008, 37(1): 62—63.
HAN Li, JIANG Wei. Study on the Laser Surface Strengthen Process of 1Cr18Ni9Ti[J]. Surface Technology, 2008, 37(1): 62—63.

[8] 周建忠,张永康,杨继昌. 齿轮激光淬火技术替代常规渗碳工艺[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2000, 21(2): 39—42.
ZHOU Jian-zhong, ZHANG Yong-kang, YANG Ji-chang. A

- New Technology of Laser Transformation Hardening Replacing the Present Method of Gear Case Hardening[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2000, 21(2):39—42.
- [9] 冯荣元. 齿轮激光淬火强化技术[J]. 现代制造工程, 2005(2):132—133.
- FENG Rong-yuan. The Gear Technology of Laser Hardening Processing[J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2005(2):132—133.
- [10] 王雁涛, 杨钿. 铝合金结构件应力腐蚀裂纹机理分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1):61—65.
- WANG Yan-tao, YANG Dian. Analysis on Stress Corrosion Crack Mechanisms of Aluminum Alloy Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1):61—65.
- [11] 昆明举. 金属材料表面激光淬火和激光熔覆若干关键技术研究[D]. 郑州:郑州大学, 2003.
- CHAO Ming-ju. Studies of Key Technologies on Modification of Metal Surface by Laser Hardening and Laser Cladding[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2003.
- [12] 杨志勤. 浅谈激光淬火的发展趋势[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2010, 10(5):10—11.
- YANG Zhi-qin. On Research Progress of Laser Quenching[J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2010, 10(5):10—11.
- [13] 张永胜. 直齿圆柱齿轮耐磨性和疲劳寿命的仿生研究[D]. 长春:吉林大学, 2012.
- ZHANG Yong-sheng. Bionic Research on Wear Resistance and Fatigue Life of Spur Gears[D]. Changchun:Jinlin University, 2012.
- [14] 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—14.
- CHEN Xi-yuan, SHEN Chang-an. Characteristic of Laser Case Hardening and Its Application Advantage in Gear and Mould[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2012, 33(2):4—14.
- [15] 罗玉梅. 激光淬火工艺的现状及应用[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2004, 1(3):49—51.
- LUO Yu-mei. Reality and Application of Laser Quenching[J]. Technique Journal of Shaoyang University(Natural Science), 2004, 1(3):49—51.
- [16] 柳铭, 宋瑞宏, 孔德军. 用X射线应力仪测量凸轮轴表面激光淬火相变层的残余应力[J]. 机械工程材料, 2007, 31(7):28—30.
- LIU Ming, SONG Rui-hon, KONG De-jun. Measurement of Residual Stress in Camshaft Phase Transformation Layer by CO₂ Laser Quenching with X-ray Diffraction Stress Tester[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(7):28—30.
- [17] 管一弘, 樊刚, 陈铁力. 激光淬火热致残余应力的数值分析[J]. 激光技术, 1998, 22(5):313—317.
- GUAN Yi-hong, FAN Gang, CHEN Tie-li. Numerical Analysis of Thermal Residual Stresses during Laser Quenching[J]. Laser Technology, 1998, 22(5):313—317.
- [18] 郎娟, 邢志华. 齿面激光淬火试验及其应用[J]. 现代制造工程, 2003(12):65—66.
- LANG Juan, XING Zhi-hua. Laser Heat Treatment and Hardening of Gear Surface[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2003(12):65—66.
- [19] 石娟. 齿轮激光表面处理的若干关键技术研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- SHI Juan. The Study of Key Technologies of Gear Laser Surface Treatment[D]. Shanghai:Tongji University, 2006.
- [20] 葛俊. 激光相变硬化最大硬化层深的研究[D]. 上海:上海海事大学, 2007.
- GE Jun. The Research on the Deepest Depth of the Laser Transformation Hardening Layer[D]. Shanghai:Shanghai Maritime University, 2007.
- [21] 戴忠森, 吴钢, 石娟. 激光淬火硬化层的硬度分布与冷却速度[J]. 上海海运学院学报, 1998, 19(3):34—38.
- DAI Zhong-seng, WU Gang, SHI Juan. The Hardness Distribution and Cooling Velocity of Hardened Layer of Laser Quenching[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 1998, 19(3):34—38.
- [22] 张宏, 邓琦林, 陆博良. 齿轮激光淬火的两种工艺方法[J]. 航空工艺技术, 1996, 19(4):12—15.
- ZHANG Hong, DENG Qi-lin, LU Bo-liang. Two Methods of Gear Hardening by Laser[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1996, 19(4):12—15.
- [23] 吴钢, 石娟, 戴忠森. 齿轮激光淬火的扫描方法及工艺[J]. 应用激光, 1998, 18(4):151—154.
- WU Gang, SHI Juan, DAI Zhong-sen. The Scanning Techniques and Technology for Gear Laser Harden[J]. Applied Laser, 1998, 18(4):151—154.
- [24] 黄华梁, 张秀林. 齿面电刷镀铜提高齿轮接触疲劳强度的研究[J]. 齿轮, 1989, 13(3):52—56.
- HUANG Hua-liang, ZHANG Xiu-lin. The Researcher the Gear's Contact Fatigue Strength Increased Though Brush Plating Copper[J]. Gears, 1989, 13(3):52—56.
- [25] 姜兆华, 欧阳家虎, 吕祖舜. 回火工艺对4Cr13钢激光淬火组织及耐蚀性的影响[J]. 材料科学与工艺, 1994, 2(2):41—44.
- JIANG Zhao-hua, OUYANG Jia-hu, LU Zu-shun. Effects of Temper Parameters on Microstructure and Corrosion-resistance of Laser Quenched 4Cr13 Steel[J]. Material Science And Technology, 1994, 2(2):41—44.

- [26] 李占国,张宏,石岩. 齿轮激光热处理工艺研究[J]. 兵工学报,2003,24(2):226—229.
LI Zhan-guo,ZHANG Hong,SHI Yan. Laser Surface Hardening of Spur Gear[J]. Acta Armamentarii,2003,24(2):226—229.
- [27] 石岩,张宏,杨英. 齿轮宽带激光淬火工艺研究[J]. 中国机械工程,2003,14(6):523—525.
SHI Yan,ZHANG Hong,YANG Ying. The Process Research of Gear Broadband Laser Quenching[J]. China Mechanical Engineering,2003,14(6):523—525.
- [28] 孙凯,赵琳,张莹莹. 激光扫描速度对镁合金改性层组织的影响[J]. 表面技术,2012,41(2):53—54.
SUN Kai,ZHAO Lin,ZHANG Ying-ying. Influence of Laser Scanning Speed on Modified Layer Organization of Magnesium Alloy[J]. Surface Technology,2012,41(2):53—54.
- [29] 燕展,宋光明,吴钢. 激光淬火硬化层的不均匀性及其控制[J]. 热处理,2006,21(1):10—14.
YAN Zhan,SONG Guang-ming,WU Gang. Inhomogeneous Laser Hardened Layer and Its Control[J]. Heat Treatment,2006,21(1):10—14.
- [30] 石娟,吴钢,戴忠森. 齿轮激光淬火轴向扫描工艺参数对硬化带的影响及预测[J]. 上海海运学院学报,2000,12(1):46—52.
SHI Juan,WU Gang,DAI Zhong-sen. The Impact and Prediction of the Hardened Layer of Gear Laser Quenching Using Axial Scanning[J]. Journal of Shanghai Maritime University,2000,12(1):46—52.
- [31] 曹艳,李涌泉,褚芳芳. 45 钢表面 Ni20 合金激光熔覆层的组织及抗高温氧化性能[J]. 表面技术,2012,41(3):54—55.
CAO Yan,LI Yong-quan,CHU Fang-fang. Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Laser Cladding Ni20 Alloy on 45 Steel[J]. Surface Technology,2012,41(3):54—55.
- [32] 邹逢,徐均琪,苏俊宏. 激光预处理对 BaF₂ 薄膜损伤性能的影响[J]. 表面技术,2012,41(5):4—5.
ZOU Feng,XU Jun-qi,SU Jun-hong. Influence of Laser-conditioning on Laser Induced Damage Capability of BaF₂ Thin Films[J]. Surface Technology,2012,41(5):4—5.
- [33] 童昊. 液压油缸激光表面强化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
TONG Hao. The Research on the Laser Surface Strengthening of Hydraulic Cylinder[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2012.
- [34] 马奎,杨蕴林,王长生. 激光淬火工艺参数对 40Cr 钢淬硬层深的影响[J]. 激光技术,2002,26(2):262—263.
MA Kui,YANG Yun-lin,WANG Chang-shen. Effect of Laser Hardening Technical Parameters on Hardened Depth of 40Cr Steel[J]. Laser Technology,2002,26(2):262—263.
- [35] 杨慧香,王晖,董辉跃. 激光淬火齿轮和渗碳淬火齿轮 X 射线衍射分析[J]. 长春工业大学学报(自然科学版),2007,28(2):187—190.
YANG Hui-xiang,WANG Hui,DONG Hui-yue. X-ray Diffraction Comparison Studies between the Laser Hardened Gear and Carburized Gear[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition),2007,28(2):187—190.
- [36] 石娟,戴忠森. 齿轮激光淬火“当量硬化层深度”的计算方法[J]. 金属热处理,2005,30(12):88—90.
SHI Juan,DAI Zhong-sen. Calculating of Equivalent Hardened Layer Depth of Laser Hardened Gears[J]. Heat Treatment of Metals,2005,30(12):88—90.
- [37] 关庆丰,张宏,王红颖. 40CrNiMoA 齿轮激光表面强化及抗疲劳性分析[J]. 应用激光,2002,22(5):469—472.
GUAN Qing-feng,ZHANG Hong,WANG Hong-ying. Laser Surface Hardening and Fatigue Resistance Ability Analysis of 40CrNiMoA Gear[J]. Applied Laser,2002,22(5):469—472.
- [38] 李刚,相珺,况军. GCr15 钢表面激光淬火的组织与性能[J]. 材料热处理学报,2010,31(4):129—132.
LI Gang, XIANG Jun, KUANG Jun. Microstructure and Properties of GCr15 Steel Treated by Laser Quenching[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2010,31(4):129—132.
- [39] 邹湘军,姜燕,欧阳八生. GCr15 钢激光淬火及其应用[J]. 金属热处理,2004,29(5):15—17.
ZOU Xiang-jun, LOU Yan, OUYANG Ba-sheng. Laser-beam Hardening of Steel GCr15 and Its Application[J]. Heat Treatment of Metals,2004,29(5):15—17.
- [40] 徐铭,苏华礼. 齿轮激光淬火工艺研究[J]. 热加工工艺,2008,37(14):70—71.
XU Ming, SU Hua-li. Study on Laser Heat-treatment of Gears[J]. Hot Working Technology,2008,37(14):70—71.
- [41] 徐春鹰,石岩,张宏. 激光淬火齿轮组织分析[J]. 长春理工大学学报,2002,25(4):15—16.
XU Chun-ying,SHI Yan,ZHANG Hong. The Microstructure of Laser Hardened Gear[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,2002,25(4):15—16.
- [42] 石岩,徐春鹰,张宏. 内齿轮激光表面强化技术研究[J]. 应用激光,2011,21(4):254—256.
SHI Yan, XU Chun-ying, ZHANG Hong. Laser Surface Hardening of Internal Gear[J]. Applied Laser,2011,21(4):254—256.
- [43] 彭跃湘. 齿轮激光表面强化技术研究[J]. 新技术新工艺,2002(1):39—40.

- PENG Yue-xiang. Study on Laser Surface Hardening of Gear [J]. New Technology & New Process, 2002(1):39—40.
- [44] 花银群,陈瑞芳,杨继昌. 激光淬火和冲击复合强化处理 40Cr 钢的耐磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(5): 448—450.
- HUA Yin-qun, CHEN Rui-fang, YANG Ji-chang. Study on Wear-resistance of Laser Quenched and Shocked 40Cr Steel [J]. Tribology, 2003, 23(5): 448—450.
- [45] 马星国,赵国珊. 齿面激光淬火性能试验研究[J]. 北京理工大学学报, 1991, 11(1): 60—67.
- MA Xing-guo, ZHAO Guo-shan. The Performance Test Research of Tooth Surface Laser Quenching [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1991, 11(1): 60—67.
- [46] 王文健,刘吉华,郭俊. 激光淬火对重载轮轨磨损与损伤性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(2): 69—80.
- WANG Wen-jian, LIU Ji-hua, GUO Jun. Effect of Laser Quenching on Wear and Damage Behaviors of Heavy-haul Wheel/Rail [J]. Materials Science & Technology, 2012, 20(2): 69—80.
- [47] 李家汉,杜永春,熊建钢. 汽车用齿轮激光淬火工艺研究[J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2003, 17(3): 56—59.
- LI Jia-han, DU Yong-chun, XIONG Jian-gang. A Study on Laser Quenching Technology of Automobile Gear [J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Natural Science), 2003, 17(3): 56—59.
- [48] 孔德军,华同曙,丁建宁. 激光淬火处理对灰铸铁残余应力与耐磨性能的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(4): 51—54.
- KONG De-jun, HUA Tong-shu, DING Jian-ning. Effects of Laser Quenching on Residual Stresses and Wear Resistance of Grey Cast Iron [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(4): 51—54.
- [49] 张兴权,何广德,戚晓利. 激光冲击强化对齿轮接触疲劳的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3187—3192.
- ZHANG Xing-quan, HE Guang-de, QI Xiao-li. Investigation on Contact Fatigue Strength of Gear Affected by Laser Shock Processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3187—3192.
- [50] 孔德军,张垒,宋仁国,等. 激光淬火对 40CrNiMo 高强度钢疲劳性能与断口形貌的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1—7.
- KONG De-jun, ZHANG Lei, SONG Ren-guo, et al. Effect of Laser Quenching on Fatigue Properties and Fracture Morphologies of 40CrNiMo High Strength Steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1—7.
- ~~~~~
- (上接第 94 页)
- [10] WILLIS P E, WELHAMA N J, KERR B A. Ambient Temperature Formation of Alumina-Titanium Carbide-Metal Ceramic [J]. European Ceramic Society, 1998(18): 701—708.
- [11] MONDIN G, WISSER F M, LEIFERT A, et al. Metal Deposition by Electroless Plating on Polydopamine Functionalized Micro- and Nanoparticles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 411(1): 187—193.
- [12] TAO Y, HU A, HANG T, et al. Effect of W Addition on the Electroless Deposited NiP(W) Barrier Layer [J]. Applied Surface Science, 2013, 282(1): 632—637.
- [13] HSU C S, CHEN S T, TANG Y S, et al. Strengthening Electroless Co-based Barrier Layers by Minor Refractory-metal Doping [J]. Thin Solid Films, 2008, 517(3): 1274—1278.
- [14] LUO Lai-ma, LU Ze-long, TAN Xiao-yu, et al. A Specific Chemical Activation Pretreatment for Electroless Nickel Plating on SiC Ceramic Powders [J]. Powder Technol, 2013, 249: 431—435.
- [15] NIAZI A R, LI Shu-kui, WANG Ying-chun, et al. Parameters Optimization of Electroless Deposition of Cu on Cr-coated Diamond [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(1): 136—145.
- [16] 张桂敏,谭月华,张安富,等. ZrO₂ 陶瓷表面化学镀镍 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 30(1): 51—55.
- ZHANG Gui-min, TAN Yue-hua, ZHANG An-fu, et al. On the Mechanism of Electroless Ni Plating on ZrO₂ Ceramic [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 30(1): 51—55.
- [17] ZHAO Yan, ZHANG Tong, ZHANG Run, et al. Hollow Ceramic Microsphere Coated with Co by Electroless Plating and Its Electromagnetic Properties [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(4): 0587—0592.
- [18] 杨建桥,刘宁,曾华平. 陶瓷表面化学镀工艺研究[J]. 西北轻工业学院学报, 2000, 18(4): 11—14.
- YANG Jian-qiao, LIU Ning, ZENG Hua-ping. The Technique of the Chemical-plating Ceramics Surface [J]. Journal of Northwest Institute of Light Industry, 2000, 18(4): 11—14.