

# 重载汽车 20CrMnMo 齿轮激光淬火热处理工艺<sup>\*</sup>

惠英龙, 王玉玲, 姚翠翠

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘 要:** 为研究 20CrMnMo 齿轮经激光淬火后的硬度值和微观组织以及与其他热处理方式相比的差异, 采用“渗碳淬火”和“渗碳后不同参数的激光淬火”等工艺方法处理了一批齿轮; 测定其齿面硬度值并对数据进行 Matlab 软件分析; 采用扫描电子显微镜(SEM)对典型试样进行显微组织观察; 测定和分析部分试样的晶粒度。结果表明:“渗碳后激光淬火”齿面的硬度值最高可达 61.4 HRC, 比渗碳淬火齿轮高 2.3 HRC 左右; 渗碳后激光淬火的高硬度值试样的微观组织为致密的针状马氏体与板条状马氏体的混合, 晶粒度为 9 级左右, 有熔融现象的试样微观组织为回火索氏体, 且不同激光参数处理的试样其微观组织类型和尺寸差别较大。因此 20CrMnMo 齿轮可以通过渗碳后的激光淬火工艺获得较高的硬度值、较好的微观组织和晶粒度。

**关键词:** 20CrMnMo 齿轮; 激光淬火; 硬度; 微观组织; 晶粒度

**中图分类号:** TG174.44; TG156.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)06-0089-07

## Heating Processing of Laser Quenching on 20CrMnMo Gears Used in Heavy-load Automobiles

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

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

**Abstract:** To research the hardness and microstructure of 20CrMnMo gears that were treated by laser quenching, a batch of gears were treated by the process of “carburizing and quenching”, and “laser quenching after carburizing with different parameters”; the hardness of tooth surface was measured and the date was analyzed though Matlab software; the microstructure of typical samples were observed by scanning electron microscope (SEM); the grain sizes of some samples were measured and analyzed. Results show that the highest hardness of tooth surface treated by “laser quenching after carburizing” can achieve 61.4 HRC, 2.3 HRC around higher than the carburizing and quenching gear. The microstructure of some samples with high hardness is the mixture of pyknoticneedle-shapedmartensite and lath martensite, whose grain size is about 9, the microstructure of the sample that appears a phenomenon of fusion is tempered sorbite, and the types and sizes of microstructure for the samples treated by different laser processing parameters are quite different. 20CrMnMo gear can obtain higher hardness, better microstructure and grain size through the process of “laser quenching after carburizing”.

**Key words:** 20CrMnMo gear; laser quenching; hardness; microstructure; grain size

## 0 引 言

大型重载汽车对于其变速箱齿轮的机械性能有着严格要求, 国内多数汽车齿轮钢所用最多

的是 20CrMnTi 和 20CrMnMo 等, 其热处理工艺为渗碳处理, 该类低碳低合金钢可以保证齿轮芯部良好的韧性, 保证其具有良好的抗冲击性能;

**收稿日期:** 2014-07-28; **修回日期:** 2014-11-17; **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(J12LB07)

**作者简介:** 惠英龙(1988-), 男(汉), 河北秦皇岛人, 硕士生; **研究方向:** 激光加工

**网络出版日期:** 2014-11-25 15:06; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20141205.1508.034.html>

**引文格式:** 惠英龙, 王玉玲, 姚翠翠. 重载汽车 20CrMnMo 齿轮激光淬火热处理工艺 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 89-95.

渗碳处理可使齿面获得高硬度,保证其耐磨损性能。但常规渗碳淬火处理时齿轮会产生较大变形和精度下降等问题<sup>[1-2]</sup>。激光淬火是通过高能量密度的激光束快速照射在工件表面上,使其瞬间吸收光能并立刻转化为热能而达到淬火所需相变温度,光斑扫描后的基体和表面之间产生巨大温差而产生自淬火现象,表面的奥氏体大量转化为马氏体,从而获得淬火硬化层的齿面<sup>[3-4]</sup>。激光淬火齿轮具有硬度高、耐磨性好、变形小以及精度保证性好等诸多优点。

文中采用含碳量较低的 20CrMnMo 合金钢作为试验对象,研究了表面渗碳处理后,常规淬火与激光淬火的组织及性能特点。

表 1 20CrMnMo 钢的成分

Table 1 Composition of the 20CrMnMo steel

(w/%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	S, P, Ni, Cu
Content	0.17-0.23	0.17-0.37	0.90-1.20	1.10-1.40	0.20-0.30	≤0.035

## 1.2 过程和方法

### 1.2.1 激光淬火试验过程

试验前对齿轮齿面进行黑化处理以减少激光的反射,增加吸光率。激光输出为圆形光斑,扫描方式为分齿搭接扫描,扫描部位为齿面分度圆线及其周围<sup>[5-6]</sup>,如图 1 所示。激光功率、扫描速度和光斑大小是试验的主要变量,选取原则如下:



图 1 激光扫描路径及黑化处理残留

Fig. 1 Scanning path of laser and the residues of blackening processing

根据有限元模拟结果取适当光斑大小  $d$  为 10 mm,功率  $P$  在 1 700~2 700 W 之间变化(间隔为 200 W),速度  $v$  分别取 390、630、750、870 和 1 110 mm/min,并与功率各参数组成正交试验;通过硬度测量获得最佳的速度值为 750 mm/min,

## 1 材料及方法

### 1.1 材料和设备

试验所用齿轮材料为 20CrMnMo 钢,主要成分见表 1;直齿圆柱齿轮加工方式为滚齿加工,齿轮主要参数为:齿数  $Z$  为 14、模数  $m$  为 8、压力角  $\alpha$  为  $20^\circ$ 。激光淬火处理前先进行渗碳并随炉冷却处理,处理后表面含碳量在 1.8% 左右,硬度平均值为 37 HRC。

激光淬火试验设备为 HAN \* SGS TFL-H10000 CO<sub>2</sub> 激光器(最大输出功率 10 kW);硬度测定采用 HLN200 便携式里氏硬度计;微观组织观察采用 S-3500N 型扫描电镜。

然后再做光斑直径和功率之间的正交试验,其中功率取值不变,光斑直径取值为 8~14 mm(间隔为 2 mm)。

### 1.2.2 硬度测定方法和方案

齿轮齿面为渐开线曲面,且测量时相邻轮齿之间会干涉,所以一般硬度计无法完成齿轮齿面的硬度测量。比较方便的是使用便携式硬度计进行齿面测量,再通过测量同样硬度的平面硬度值进行补偿修正得到正确的齿面硬度。见表 2,渗碳淬火热处理的齿轮,齿面硬度应该和基体平面硬度一致,比较可得便携式硬度计的偏差值在 8.8 HRC 左右。

表 2 平面与齿面硬度的偏差值比较

Table 2 Comparison of the D-value hardness between plane and tooth surface (HRC)

Carburizing and quenching gears	Plane surface	Tooth surface	Deviation
Point 1	60.0	51.9	
Point 2	60.1	50.0	
Point 3	57.5	49.0	
Point 4	59.0	48.7	
Point 5	59.1	52.1	
Average	59.1	50.3	8.8

硬度测定点选取方法:沿激光扫描方向顺次选择 5 个点(点选取在淬火带中间位置,便于准确测量硬度值;偏离分度圆的其他位置硬度值与中间位置没有太大区别且由于曲度和临齿干涉等原因,测量较困难,故暂不考虑)进行硬度测定,再取平均值,取点示意图见图 2。

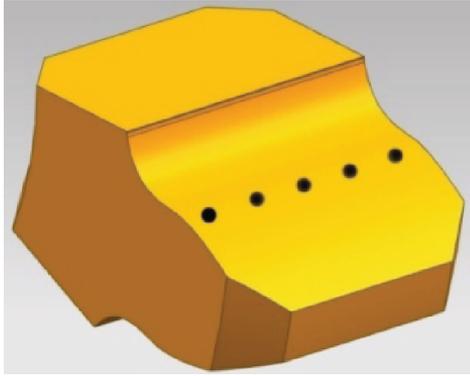


图 2 齿面硬度测定取点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the selecting points of tooth surface hardness

1.2.3 微观组织试样的制备方法

选择 5 种不同加工类型和加工参数的轮齿制备试样。步骤如下:

(1) 采用线切割从齿轮上切割 10 mm × 10 mm 左右的试样块,切割方法如图 3。

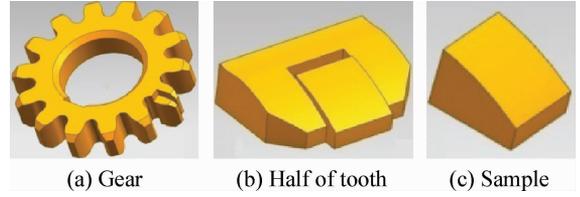


图 3 试样切割示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the sample made by wire-electrode cutting

(2) 由于齿轮表面是一个渐开线曲面,在进行微光组织观察时必须做成平面,所以需要把试样齿面的主要淬火区域用砂纸磨出一个小平面并进行抛光。

(3) 将试样放入 4% 硝酸酒精溶液中腐蚀,腐蚀时间 20 s 左右,清洗之后立即烘干并送入 SEM 试验机中进行微观组织观察。

表 3 为 5 种试样的处理方式和硬度值,其中 A 组为渗碳后直接淬火,采用油冷(温度在 110 ℃ 左右),表面含碳量在 1.8% 左右;B~E 组为不同参数下渗碳后激光淬火处理的齿轮,参数见表 4 和表 5。

表 3 5 个不同加工类型和参数试样的基本情况

Table 3 Basic condition of the five samples with different processes and parameters

No.	Method	Parameter	Hardness/HRC
A	Carburizing and quenching	Oil cooling at 110 ℃	59.1
B	Laser quenching after carburizing	$P=2\ 300\ \text{W}; v=750\ \text{mm/min}; d=14\ \text{mm}$	61.4
C	Laser quenching after carburizing	$P=1\ 900\ \text{W}; v=750\ \text{mm/min}; d=10\ \text{mm}$	58.4
D	Laser quenching after carburizing	$P=2\ 500\ \text{W}; v=390\ \text{mm/min}; d=10\ \text{mm}$	52.2
E	Laser quenching after carburizing	$P=2\ 700\ \text{W}; v=750\ \text{mm/min}; d=8\ \text{mm}$	39.3

表 4 不同功率与速度激光淬火后齿面硬度平均值

Table 4 Average hardness of tooth surface treated by laser quenching of different powers and velocities (HRC)

$v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$P/\text{W}$					
	1 700	1 900	2 100	2 300	2 500	2 700
390	37.8 (No. 1)	38.4 (No. 6)	42.1 (No. 11)	45.1 (No. 16)	52.2 (No. 21)	35.4 (No. 26)
630	51.6 (No. 2)	46.5 (No. 7)	41.5 (No. 12)	45.8 (No. 17)	38.6 (No. 22)	38.5 (No. 27)
750	56.2 (No. 3)	58.4 (No. 8)	44.0 (No. 13)	49.3 (No. 18)	39.4 (No. 23)	41.0 (No. 28)
870	49.2 (No. 4)	56.6 (No. 9)	49.2 (No. 14)	51.7 (No. 19)	38.4 (No. 24)	43.7 (No. 29)
1 110	40.9 (No. 5)	44.3 (No. 10)	51.7 (No. 15)	58.3 (No. 20)	48.5 (No. 25)	48.4 (No. 30)

表5 不同功率与光斑直径激光淬火后齿面硬度平均值

Table 5 Average hardness of tooth surface treated by laser quenching of different powers and spot diameters (HRC)

Spot diameter, $d/(\text{mm})$	$P/W$					
	1 700	1 900	2 100	2 300	2 500	2 700
8	40.3 (No. 31)	40.9 (No. 32)	42.2 (No. 33)	50.5 (No. 34)	47.6 (No. 35)	39.3 (No. 36)
10	57.1 (No. 37)	52.8 (No. 38)	42.0 (No. 39)	37.7 (No. 40)	42.5 (No. 41)	40.8 (No. 42)
12	54.9 (No. 43)	61.0 (No. 44)	54.3 (No. 45)	43.7 (No. 46)	45.5 (No. 47)	50.9 (No. 48)
14	40.6 (No. 49)	47.1 (No. 50)	59.9 (No. 51)	61.4 (No. 52)	49.5 (No. 53)	43.1 (No. 54)

## 2 硬度测定结果与讨论

### 2.1 硬度值分布表

根据修正值测得两组试验的硬度值如表4(对应的光斑直径为定值: $d=10\text{ mm}$ )和表5(对应的扫描速度为定值: $v=750\text{ mm/min}$ )。

### 2.2 数据处理和讨论

根据查阅资料和国家标准(GB/T 8539-2000),对于20CrMnMo钢材料的重载汽车大模数齿轮的硬度要求在58~64 HRC,则表3中满

足要求的试验组有8、20、44、51和52号轮齿。选用Matlab软件对数据做进一步的处理,由表4得到功率和速度对齿面硬度影响的三维曲面图和等高线(如图4);由表5得到功率和光斑直径对齿面硬度影响的三维曲面图和等高线(见图5)。

由图4和图5分析可得,在齿轮的激光淬火试验中,激光功率、扫描速度和激光光斑直径对齿面硬度有着直接的影响,不同的参数配合会造成齿面硬度的极大变化,并且三者对其影响的变化趋势都有着自己独特的规律。

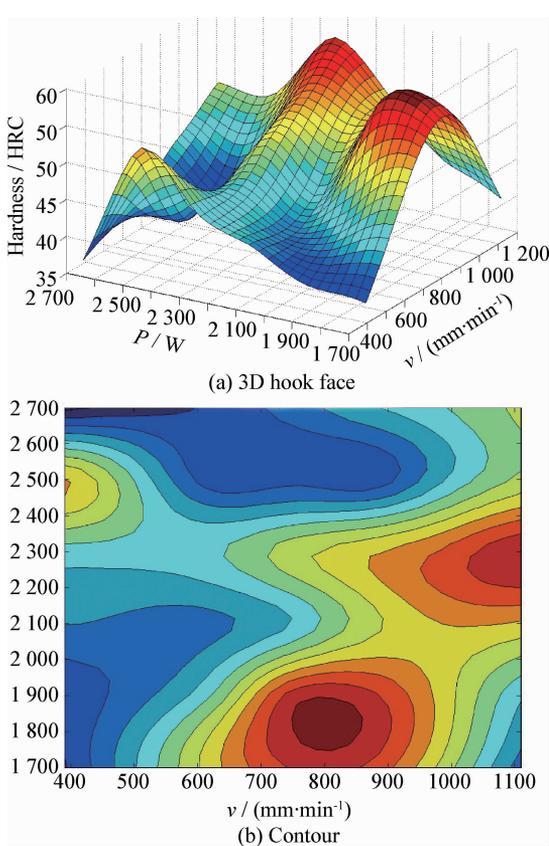


图4 功率和速度对齿面硬度影响的三维图和等高线  
Fig. 4 3D hook face and contour of tooth surface hardness impacted by powers and velocities

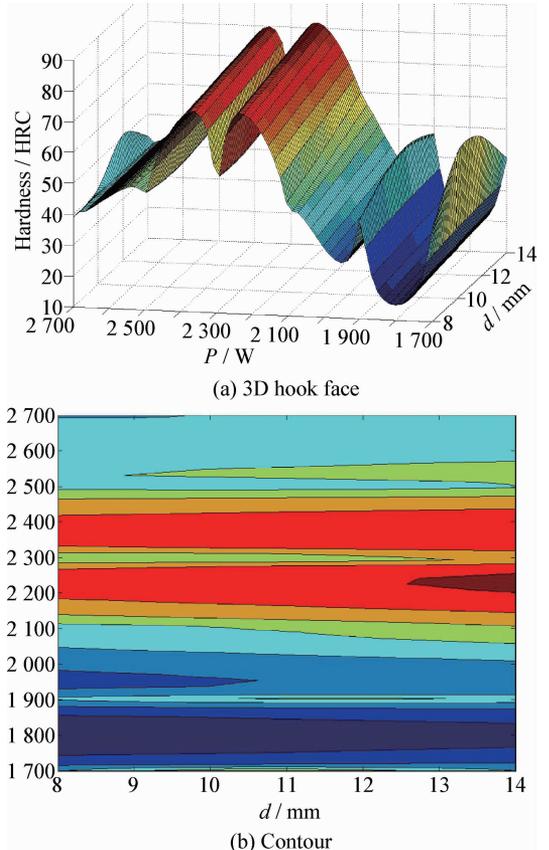


图5 功率和光斑直径对齿面硬度影响的三维图和等高线  
Fig. 5 3D hook face and contour of tooth surface hardness impacted by powers and spot diameters

(1) 激光功率

根据热处理国家标准,20CrMnMo 钢的淬火温度需保证在 850 ℃左右,即要求激光输出功率在一定范围内,偏小则达不到淬火温度要求;偏大则会使齿面发生较大变形甚至熔融。根据齿面硬度变化曲面图可得出激光功率对齿面硬度的影响是先促进后减弱的。

(2) 扫描速度

扫描速度过慢会产生热流积累效应,即淬火区域温度过高且持续时间很长,导致淬火区又经历了高温的回火,硬度大幅降低;反之,速度过快则温度达不到淬火要求。根据图 4 可以看出速度对硬度的影响要比功率更加明显,必须在适当的速度下才能获得较高的硬度值。

(3) 光斑直径

从图 5 可以看出,光斑大小对齿面硬度的影响并不像速度那么明显,但光斑大小会影响搭接的次数进一步影响加工的质量和效率。如果光斑太小,一方面会使得同样面积的加工区域扫描次数增加;另一方面会因过于聚焦导致齿面烧熔。因此,光斑直径应尽量选择较大值,但过大的直径就要求更大的激光功率输出,增加加工成本,故也不可取。

综合可知,激光淬火中的 3 大影响参数均需要进行选择,并通过试验反复配合比较而确定<sup>[7]</sup>。通过试验,初步获得对 20CrMnMo 钢齿轮渗碳后激光淬火的最佳加工参数为:激光功率为 2 300 W,扫描速度为 750 mm/min,光斑直径为 14 mm。

3 齿面显微组织形貌与分析

3.1 齿面显微组织形貌

表 3 中 A~E 组试样的扫描电镜组织形貌分别如图 6~7 所示。

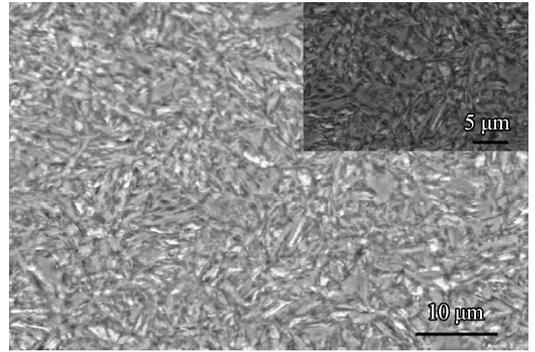
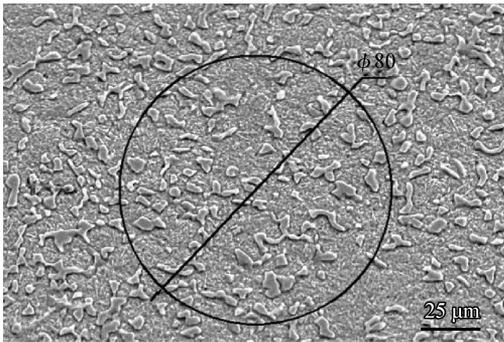
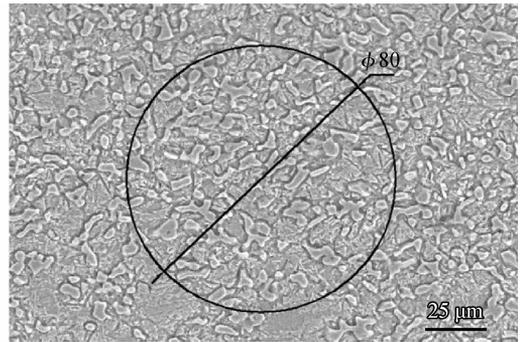


图 6 渗碳淬火齿轮齿面的形貌

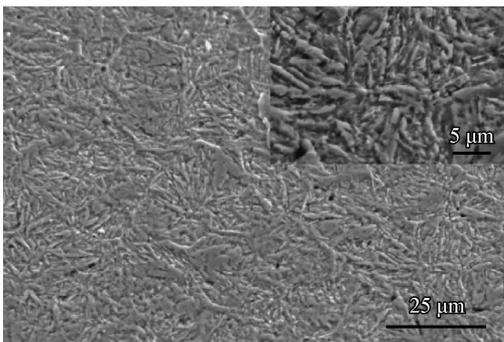
Fig. 6 Morphologies of the tooth surface treated by carburizing and quenching of sample A (59.1 HRC)



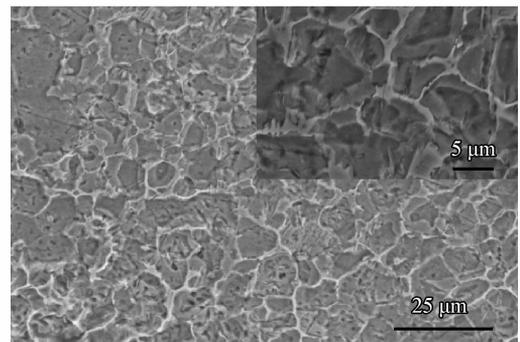
(a) Quenching after carburizing of sample B



(b) Quenching after carburizing of sample C



(c) Quenching after laser quenching after carburizing of sample D



(d) Quenching after laser quenching after carburizing of sample E

图 7 渗碳后激光淬火齿面的形貌

Fig. 7 Morphologies of the tooth surface treated by laser quenching after carburizing

由图6分析可知:经渗碳后直接淬火的齿面组织,成分为针状马氏体,分布较稠密,但组织过于杂乱,没有明显的界限和清晰的形状。

由图7分析可得:B组参数淬火后组织为较大形状的板条状马氏体,其间夹杂十分致密的针状马氏体;C组的微观组织与B组是一致的,不同的是针状马氏体没有前者致密,反而板条状马氏体较多。这也是该试验组齿面硬度并不是很高的原因;D组齿面有微熔的现象,微观组织为粗大的并带有牵连的针状马氏体。这是由于功率较大和扫描速度较慢造成回火温度较高,使生成的针状马氏体晶粒进一步长大和依附,最终粗大的晶粒降低了齿面的硬度以及齿面的精度;E组齿面有严重烧熔现象。根据分析,此试验组齿面微观组织为回火索氏体,它也是马氏体的一种回火组织,是铁素体和粒状碳化物的混合物。形成原因应该是激光功率过高且光斑直径过小,导致温度过高。

### 3.2 B组齿面马氏体晶粒度测定

选择马氏体较清晰、硬度值较高的B组试样的微观组织进行马氏体晶粒度测定。由于针状马氏体密度很大,无法测量其晶粒度,但板条状马氏体较清晰,可以借鉴“晶粒度面积算法”

或者“弦算法”对其进行晶粒度测定<sup>[8-9]</sup>。

“面积法”原则为:将试样SEM图导入CAD中,划出约5 000 mm<sup>2</sup>的圆(也可小些,但要保证圆内晶粒数不少于50个),然后数出圆内晶粒数 $z$ 和与圆周交截的晶粒度 $n$ ,按下式计算出一个晶粒的平均面积 $a$ (mm<sup>2</sup>)。

$$a = \frac{F_k}{(z + 0.67n)V^2}$$

式中: $F_k$ 为圆的面积,mm<sup>2</sup>;  $V$ 为放大倍数。根据图7中(a)图计算可得:

$$a = \frac{5\,024}{(60 + 0.67 \times 5) \times 600^2} = 0.000\,22$$

根据 $a$ 值查表6—“钢的晶粒度测定标准(参考YB27-77)”,确定晶粒度约为9级左右。再通过直接计算方法,测得单个晶粒的平均弦长为0.01 mm左右,在表6中查得的晶粒度也在9级左右。故此可以确定,经上述加工参数处理的齿面,板条状马氏体晶粒度在9级左右。另外,根据图7中(b)图用同样方法测得该组板条状马氏体晶粒度在9~10级之间,比B组稍低。根据晶粒度等级和硬度值对比分析可知,B组试样的淬火效果最好,其加工参数是最优的。

表6 钢的晶粒度测定标准

Table 6 Determination standard of the steel grain size

Grain size number	Average diameter of grain/mm	Average length of chord/mm	Average area of one grain/mm <sup>2</sup>	Average amount of grains/mm <sup>-2</sup>
-3	1.000	0.875	1	1
-2	0.713	0.650	0.5	2.8
-1	0.500	0.444	0.25	8
0	0.353	0.313	0.125	22.6
1	0.250	0.222	0.0625	64
2	0.177	0.157	0.0312	181
3	0.125	0.111	0.0156	512
4	0.088	0.078 3	0.007 81	1 448
5	0.062	0.055 3	0.003 90	4 096
6	0.044	0.039 1	0.001 95	11 585
7	0.030	0.026 7	0.000 98	32 381
8	0.022	0.019 6	0.000 49	92 682
9	0.015 6	0.013 8	0.000 24	262 144
10	0.011 0	0.009 8	0.000 122	741 458
11	0.007 8	0.006 8	0.000 061	2 107 263
12	0.005 5	0.004 8	0.000 131	6 010 518

## 4 结 论

通过对 20CrMnMo 材料的齿轮进行渗碳淬火、观察微观组织以及测定部分试样晶粒度,得出了该材料齿轮激光淬火的相关工艺规律。

(1) 齿轮激光淬火中,激光器的 3 大主要参数为激光功率、光斑直径和扫描速度。三者对齿面硬度都有决定性影响,但权重不同。其中影响最大是激光功率,其次是扫描速度,最后是光斑直径。

(2) 通过 Matlab 软件对各组试验进行后期数据处理可得,20CrMnMo 钢齿轮渗碳后激光淬火的最佳工艺参数为:激光功率  $P=2\ 300\ \text{W}$ ,扫描速度  $v=750\ \text{mm/min}$ ,光斑直径  $d=14\ \text{mm}$ 。

(3) 齿轮激光淬火后齿面硬度能够达到或高于常规渗碳淬火硬度。

(4) 激光淬火后,最佳硬度的齿面微观组织良好,针状马氏体十分致密,板条状马氏体尺寸也较小,晶粒度满足要求。

## 参考文献

- [1] 罗成. 汽车齿轮钢的研究进展 [J]. 炼钢, 2006, 22(5): 56-59.  
Luo C. The research progress of automobile gear steel [J]. Chinese Journal Steel Making, 2006, 22(5): 56-59 (in Chinese).
- [2] Martins R. Austempered ductile iron (ADI) gears: power loss, pitting and micropitting [J]. Wear, 2008, 264: 838-849.
- [3] 李文学, 张风云, 陈宏杰, 等. 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 W X, Zhang F Y, Chen H J, et al. Microstructure and hardness of laser quenching on 9Cr2 steel [J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2005, 24

(3): 251-253 (in Chinese).

- [4] 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 E J, Liang H Q. 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 (in Chinese).
- [5] 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 J. The study of key technologies of gear laser surface treatment [D]. Shanghai: Tongji University, 2006 (in Chinese).
- [6] 张宏, 邓琦林, 陆博良, 等. 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 H, Deng Q L, Lu B L, et al. Two methods of gear hardening by laser [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1996, 19(4): 12-15 (in Chinese).
- [7] 吴钢. 激光相变硬化工艺及参数优化研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.  
Wu G. Study on the optimization of techniques and parameters of laser transformation hardening [D]. Shanghai: Tongji University, 2006 (in Chinese).
- [8] 陈步龙. 金属平均晶粒度测定法 GB6394-86 与 YB27-77 [J]. 冶金科技, 1995(1): 69-72.  
Chen B L. The measurement of metal average grain size between GB6394-86 and YB27-77 [J]. Metallurgical Science and Technology, 1995(1): 69-72 (in Chinese).
- [9] 卢文海, 马海全, 殷亮. 合金结构钢晶粒度测定方法研究 [J]. 失效分析与预防, 2012, 7(3): 184-187.  
Lu H W, Ma H Q, Yin L. Research on test method for grain size of alloyed steel [J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 184-187 (in Chinese).

作者地址: 山东青岛市市北区抚顺路 11 号 266033  
青岛理工大学机械工程学院  
Tel: 150 2008 4896  
E-mail: huiyinglong@126.com

(责任编辑: 陈茜)