

文章编号: 1001-3806(2004)04-0445-04

## 汽车变速箱双联齿轮的激光焊接

周运义<sup>1</sup>, 胡昌奎<sup>2</sup>, 陈培锋<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 机电学院, 武汉 430063; 2. 华中科技大学 激光技术与工程研究院, 武汉 430074)

**摘要:** 采用高功率 CO<sub>2</sub> 激光器对汽车变速箱用双联齿轮进行焊接实验; 分析了几个主要的工艺参数对焊接的影响; 并对激光功率 3kW、焊接速度 1.5m/min、离焦量 -0.5mm 时的焊接产品进行了分析检验。结果得到外观饱满、美观、无焊珠和凹陷且深宽比大于 2:1 的焊缝; 焊接热影响过渡区很小, 熔区很快过渡到基体, 熔区组织致密、无缺陷, 呈细板条马氏体, 而且熔区显微硬度达到 450HV, 较基体有显著的提高; 通过力学性能测试发现, 热变形在允许的 0.05mm 范围内, 在 15kNm 的作用下进行扭矩试验未发现开裂和变形超差现象。选择合理的焊接工艺参数, 激光焊接变速箱双联齿轮可以得到理想的焊接效果。

**关键词:** 激光焊接; 双联齿轮; 工艺参数; 结果检验

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A

### The laser welding of the double-linked gear in automobile gear-box

ZHOU Yun-yi<sup>1</sup>, HU Chang-kui<sup>2</sup>, CHEN Pei-feng<sup>2</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The double-linked gears in automobile gear-box have been welded with high power CO<sub>2</sub> laser; several primary parameters affected welding quality have been analyzed; the welded products were analyzed and tested. The appearance of welding seam was perfect without hollow and welding bead. The ratio between depth and width exceeded 2:1; the hot influenced zone is narrow, the molten zone is compact without bug and the micro-hard reaches 450HV which is higher than raw materials. The gears didn't craze by 15kNm tortile test.

**Key words:** laser welding; double-gear; technics parameter; result-checkup

## 引 言

齿轮是传动机械不可缺少的零部件, 为了减少重量和体积, 降低加工难度, 节省原材料, 一般将整体加工的齿轮组或齿轮轴改为分体加工, 再焊接组成整体。焊接后要求强度高、变形小, 且不破坏原材料性能。传统焊接很难达到这个要求, 如钎焊加热温度较高 (1100℃)、时间较长, 易导致齿轮材料的晶粒粗大, 对齿轮的尺寸精度及性能有不利影响<sup>[1]</sup>; 电子束焊接虽然有焊缝窄、热影响区小、深宽比高等优点, 但它需要在真空中进行, 这无疑就增加了设备的复杂性, 而且抽真空时间较长, 影响生产效率。而激光焊接由于具有能量密度高, 焊缝深宽比大, 变形和热影响区小, 焊缝致密, 焊接质量好, 容易自动化, 可

以在大气中进行等众多优点, 国外著名的汽车集团纷纷采用激光焊接汽车齿轮, 美国福特汽车公司采用 6kW CO<sub>2</sub> 激光加工系统将 6 根轴与锻出来的齿轮焊在一起, 成为轿车自动变速箱的齿轮架部件, 生产效率为 200 件/h; 意大利菲亚特公司用激光焊接汽车同步齿轮, 费用比老设备高 1 倍, 而生产效率提高 5 倍~7 倍<sup>[2]</sup>。在国内, 大多数汽车齿轮厂家现在仍然采用的是电子束焊接, 因此, 研究齿轮的激光焊接对于我国齿轮生产厂家进行生产工艺改造有一定参考价值。

## 1 实验条件和过程

待焊接的是用于汽车变速箱的 20CrMnTi 合金钢双联齿轮, 其主要成分如表 1 所示。

实验中采用武汉金石凯激光技术有限公司生产的 GS-TEL-5KA 型三折腔横流 CO<sub>2</sub> 激光器, 激光功率 0kW~5kW 连续可调, 功率不稳定  $\leq \pm 4\%$ , 激光模式为 TEM<sub>00</sub> + TEM<sub>01</sub>。焊接装置如图 1 所示, 为克

作者简介: 周运义 (1975-), 男, 硕士研究生, 主要从事机械电子方面的研究。

E-mail: zhou-yunyi @163.com

收稿日期: 2003-06-30; 收到修改稿日期: 2003-10-08

Table 1 The ingredient of the gear's material

model	the primary chemic ingredient ×100			
	$W_C$	$W_{Mn}$	$W_{Si}$	$W_{Cr}$
20CrMnTi	0.17~0.24	0.80~1.10	0.20~0.40	1.00~1.30

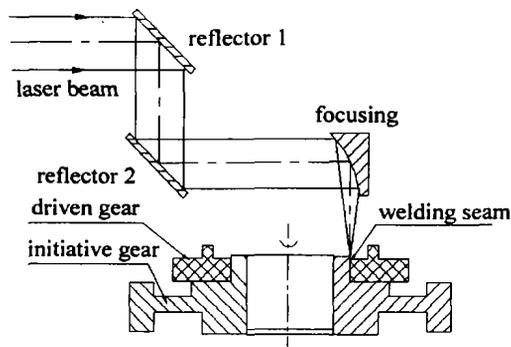


Fig. 1 The sketch map of welding equipment

服透镜的热畸变和金属球面镜带来的较大球差,采用离轴抛物面镜对激光束进行反射聚焦,焦距127mm,平面反射镜2和聚焦镜用支架连接,通过改变两平面镜间的距离可实现焦点位置连续可调。齿轮经专用夹具安装在旋转工作台上,速度为0.1m/min~5m/min可调。同时侧吹Ar气以保护镜头和抑制光致等离子体。

在实验过程中研究了激光功率、焊接速度、离焦量以及侧吹气流量等主要焊接工艺参数对焊接深度和焊缝宽度的影响,同时对熔区用金相显微镜进行观察和照相,并进行显微硬度分析。

## 2 焊接工艺研究

影响激光深熔焊接质量的主要工艺参数有激光模式、激光功率密度、焊接速度、焦点位置、等离子体的抑制等,其中光束模式对焊缝质量影响较大,因此,焊接时应采用准基模或低阶模。

### 2.1 激光功率

功率密度是激光焊接中最关键的参数之一,它与激光器输出功率成正比,与有效光斑直径的平方成反比。激光焊接与激光功率密度密切相关,一般当激光功率密度不高于 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 时,激光焊接属于热传导焊接的范畴,只有当激光功率密度达到 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 时,才能形成深熔焊接,产生“小孔效应”。小孔是一个温度特别高的吸收源,热量从小孔向周围传递,从而在小孔周围形成一个称之为熔池的熔化区。随着光束相对工件的移动,熔化的金属充填小孔、固化而形成焊缝。“小孔效应”与激光功率密度密切相关,功率密度越低,“小孔效应”越不稳定,

甚至无法形成,熔池也小。为了使焊接后的双联齿轮能传递较大的扭矩,就必须进行深熔焊接。

### 2.2 焊接速度

焊接速度同激光功率一起影响着焊接区域的热输入,因而对焊缝的形状和尺寸有较大的影响。深熔焊接时,在一定的激光功率下,焊接熔深几乎与焊接速度成反比。焊接速度过快,难以形成“小孔效应”,以致金属未熔化和自淬速度过快,焊缝强度降低,而且焊缝中的有害气体如 $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ 及 $\text{CO}$ 来不及逸出,使焊缝气孔增多,影响抗弯强度和焊缝外观。所以,确定焊接速度的上限是为了防止金属未熔透和自淬速度过快以致不能流动和融合,否则,熔化金属会趋向与仅沿着被焊工件顶端形成焊珠;而焊接速度过慢时,过量的热传导引起的焊道向侧向扩展,热影响区过热,扩大,焊缝金相组织晶粒粗大,有时还会产生裂纹,严重影响了焊接质量,而焊速到达低限时,过多的功率吸收还会引起局部蒸发损失,出现凹陷<sup>[3,4]</sup>。

### 2.3 焦点位置

作用于工件表面的激光功率密度除了和激光束的焦斑功率密度有关外,还取决于工件表面与焦斑的相对位置(离焦量)。当焦平面位于工件表面之上时称为正离焦,反之为负离焦。激光束的离焦量对熔深有很大的影响,激光束腰处的功率密度最大,束腰位于工件上时(正离焦)工件获得的功率密度相应降低,会形成“钉头”状焊缝,熔深减小;当束腰处于工件内时(负离焦)可增加熔深,形成V形焊缝,所以焊接时常采取负离焦<sup>[4]</sup>。而最佳离焦量与聚焦镜的焦距有关,短焦距镜相应的离焦量要比长焦距镜的离焦量小,且焦点位置的调节余量较小,稍有变化就会引起显著的熔深损失,但它可获得大的熔深<sup>[3]</sup>。

### 2.4 等离子体的抑制

在激光深熔焊接过程中,当激光功率密度达到 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 时,工件表面温度随加热时间的延长而达到材料的汽化温度,使工件表面蒸发形成金属蒸气,金属蒸气中有一定的自由电子通过逆韧致辐射吸收激光能量而被加速,直至有足够的能量来碰撞金属材料蒸气和周围气体。电子密度从而雪崩式增长而达到饱和状态,形成致密的等离子体云。致密的光致等离子体对激光进行吸收、散射和折射,影响激光的能量传输效率,大大减小了到达工件的激光能量密度,导致熔深变浅。同时由于等离子体的折射,使得激光束聚焦斑点扩大,焦点向下移动,即所谓的等离子体的负透镜效应,影响激光束的聚焦状态,从而

影响焊接效果。所以对等离子体进行控制非常必要。在实际应用中通常采用侧吹气体来抑制等离子体,但这种方法对气流量要求较为严格,气流量太小,不能有效吹散等离子体;气流量太大,熔池扩大并且搅拌厉害,影响焊缝成型<sup>[5]</sup>。

表 2 中的数据为运用不同的工艺参数对 20CrMnTi 合金钢双联齿轮进行焊接,通过线切割、硝酸腐蚀后测量焊缝的深度和宽度值,其中,试样 2 为最佳焊接参数。

Table 2 The data of the gear's welding

sample	laser power / kW	welding speed / (m min <sup>-1</sup> )	defocusing / mm	depth/ width / (mm/ mm)
1	3	1.5	0	4.72/2.1
2	3	1.5	-0.5	4.81/2.1
3	3	1.5	-1	4.65/2.2
4	3	1.5	0.5	4.67/2.1
5	3	1.5	1	4.50/2.2
6	3	1	-0.5	4.96/2.4
7	3	1.25	-0.5	4.91/2.4
8	3	1.75	-0.5	4.76/2.1
9	3	2	-0.5	4.61/2.1
10	3	2.25	-0.5	4.58/2.0
11	3	2.5	-0.5	4.50/2.0
12	2.5	1.5	-0.5	4.48/2.0
13	3.5	1.5	-0.5	4.97/2.3
14	4	1.5	-0.5	5.12/2.4

图 2 中为激光功率与焊缝深度的关系曲线,可见焊缝深度随激光功率的增加而增加,但两者并不是简单的线性关系。

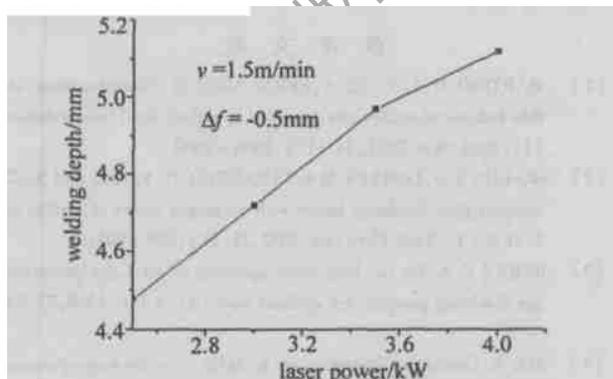


Fig. 2 Welding power vs. welding depth

### 3 焊接结果检验

#### 3.1 外观检验

图 3 为焊接后的双联齿轮的外形,从图中可以看出焊缝饱满、美观,无焊珠和凹陷。图 4 为焊接后的齿轮剖面图。

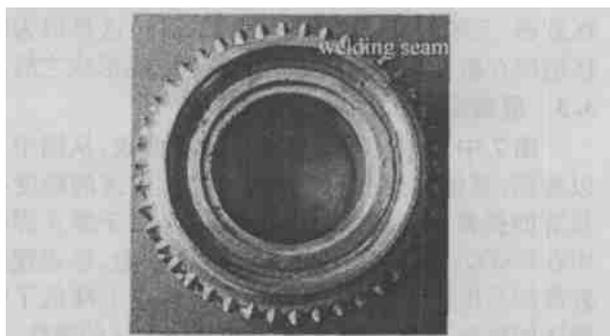


Fig. 3 The figuration of welding seam



Fig. 4 The section of welded gear

#### 3.2 金相组织分析

运用金相显微镜对熔区进行观察、照相,图 5 为放大后熔区形貌,图 6 为熔区的组织结构,可见焊缝

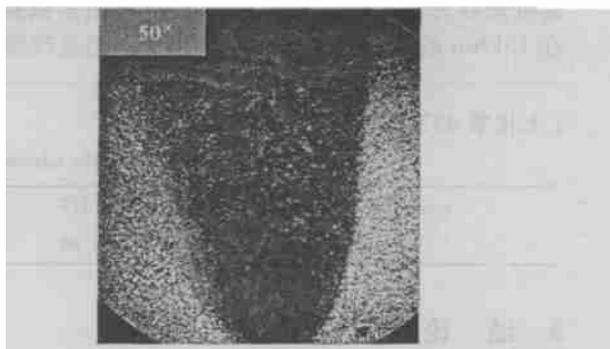


Fig. 5 The section of welding seam

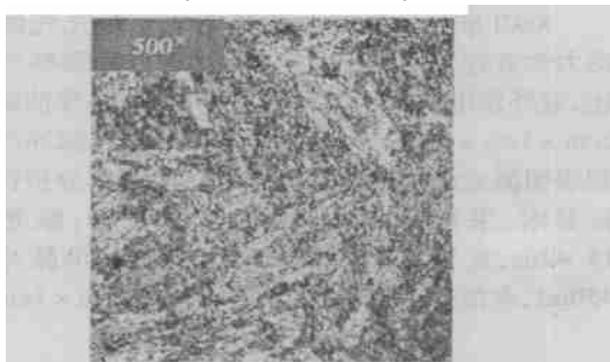


Fig. 6 The microstructure of welding zone

成典型的“小孔”形状,焊缝深宽比大于 21;焊接热影响过渡区很小,熔区很快过渡到基体,这是由于激光焊接时加热和冷却速度都很快缘故。而且焊缝区

致密、无缺陷,形成细板条状马氏体,这是因为焊区组织在激光焊热循环作用下经重结晶形成之故。

### 3.3 显微硬度分析

图7中为熔区的显微硬度分布曲线,从图中可以看到,基体的硬度在200HV左右,熔区的硬度有显著的提高,达到450HV左右,这是由于激光焊接中在800℃~500℃区域的冷却时间很短,形成硬度较高的马氏体组织,但这也可能在某种程度上降低了焊缝区的韧性,通过回火处理可改善焊缝区的韧性。

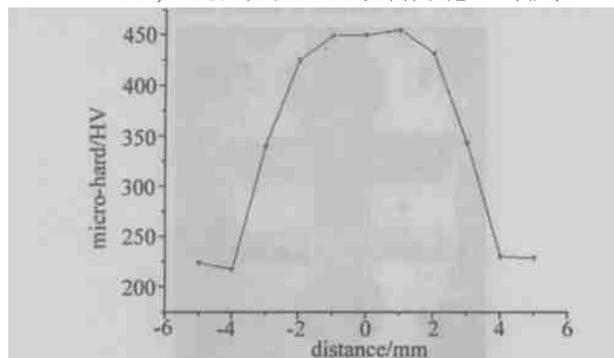


Fig.7 The micro-hard distribution of welding zone

### 3.4 力学性能测试

此外,焊接好的双联齿轮在长春汽车齿轮厂进行扭矩实验和热变形测量,结果发现,热影响区造成的变形在允许的0.05mm范围内,进行扭矩试验时,在15kNm的作用下未发现开裂和变形超差现象,焊

接产品符合生产要求。

## 4 结束语

通过焊接工艺参数的分析和焊接结果的检验发现,变速箱双联齿轮可以用激光焊接工艺替代电子束焊或纤焊;激光功率、焊接速度、离焦量以及等离子体等工艺参数都对焊接质量有着显著的影响,合理选择工艺参数是焊接的关键之一;在本实验中,激光功率为3kW、焊接速度为1.5m/min、离焦量为-0.5mm时,焊接20CrMnTi合金钢双联齿轮能得到理想的焊接效果:焊缝饱满、美观;深宽比大于2;热影响区小,熔区很快过渡到基体,熔区组织致密、无缺陷且显微硬度有显著的提高;焊接热变形小,具有较高的力学性能。总之,激光焊接变速箱双联齿轮,各项指标均能达到实际要求。

### 参考文献

- [1] 王建中,马麟. 变速箱齿轮总成激光焊接工艺研究[J]. 热加工工艺,2002(6):62~63.
- [2] 唐霞辉,朱海红,朱国富 et al. 厚钢板激光焊接技术[J]. 焊接技术,1996(4):32~34.
- [3] 王家金. 激光加工技术[M]. 北京:计量出版社,1992. 403~404.
- [4] 李小平,汤漾平,冯清秀. 汽车变速箱齿轮与齿圈激光焊接工艺研究[J]. 汽车技术,2000(4):22~24.
- [5] 唐霞辉. 高功率CO<sub>2</sub>激光焊接光致等离子体控制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2000. 34~36.

(上接第437页)

Table II The relation of pressure and the pluse duration time

pressure of power/ 10 <sup>5</sup> Pa	0.517	1.013	1.530	2.016	2.533	3.029	3.546	4.062
width of pulse/ ns	33.89	30.17	26.83	24.26	22.13	20.70	19.79	19.50

## 3 结论

XeCl准分子激光器实验完成了激光气体反应动力学方程及模型的建立,按速率方程调整气体配比,紫外预电离自动与辉光放电同步,实现抽运体积2cm×1cm×90cm,辉光放电均匀。激光脉冲产生机理表明激光结构正确,动力学方程、速率分析符合指标要求,采用脉冲放电抽运方式工作,激光脉宽15.42ns,重复频率0.5Hz~5Hz可调,单脉冲能量450mJ,束散角3mrad,矩形光斑大小2cm×1cm。

### 参考文献

- [1] MARTINO M, LUCHES A, FERNANDEZ M. Characterization of thin indium tin oxide films deposited by pulsed XeCl laser ablation[J]. Appl Phys, 2001, 34(17):2606~2609.
- [2] SKAKUN V S, LOMAEV M I, TARASENKO V F. KrCl and XeCl excimer glow discharge lamps with an output power of similar to 1.5kW[J]. Tech Phys Lett, 2002, 28(11):899~801.
- [3] BERRY G A. On the long pulse operation of an X-ray preionized gas discharge pumped ArF excimer laser[J]. A P L, 1999, 75:23~24.
- [4] ITO S. Continuous operation up to 3kHz in a discharge-pumped XeCl excimer laser[J]. Appl Phys, 1996, 63(1):1~7.