

基于齿面缺陷激光修复几何数学模型的齿轮修复

李向波^{1,2}, 李涛¹, 石博文¹, 王东¹, 张元良¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024; 2. 三一石油智能装备有限公司, 北京 102202)

摘要: 激光熔覆作为一种再制造技术被广泛应用在机械零部件的修复。在采用激光熔覆技术对齿轮齿面缺陷进行修复时,为减小后续机械加工的难度,应使轮齿齿面上的熔覆层轮廓接近齿轮的原始齿廓。基于齿廓加工原理建立了齿面缺陷激光修复几何数学模型。通过此修复几何数学模型可计算得到修复齿廓不同部位时,轮齿需要偏转的角度以及偏转后齿廓待修复区域的倾斜角度。实验结果表明,利用该几何数学模型对齿轮齿面缺陷采用激光熔覆技术进行修复,可以使轮齿齿面上熔覆层的轮廓与齿轮原始齿廓较为接近,并且熔覆层轮廓与齿轮原始齿廓的距离不超过0.7 mm;此外,轮齿齿面在熔覆过程中虽然倾斜角度最大达到51.84°,但熔覆层轮廓与齿轮原始齿廓的最小距离不小于0.1 mm。

关键词: 激光熔覆;齿面缺陷;齿轮修复;几何数学模型;熔覆层轮廓

中图分类号: TN249

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2020)03-0129-08

Gear Repairing Based on Geometric Mathematical Model of Tooth Surface Defects by Laser

LI Xiangbo^{1,2}, LI Tao¹, SHI Bowen¹, WANG Dong¹, ZHANG Yuanliang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. SANY Petroleum Intelligent Equipment Co. Ltd., Beijing 102202, China)

Abstract: As a remanufacturing technology, laser cladding is widely used in the repair of mechanical parts. In order to reduce the difficulty of machining after defects of tooth surface are repaired by the laser cladding technology, the profile of coating should be made similar to the original tooth profile. Geometric mathematical model of tooth surface defects by laser repair is established based on the processing principle of tooth profile. When different parts of tooth profile are repaired, deflection angles of tooth and inclination angles of tooth can be given by the geometric mathematical model. The experimental results show that the profile of coating is very similar to the original tooth profile when laser cladding has been performed to repair the defects of tooth surface by the geometric mathematical model. And the distance is less than 0.7 mm between the profile of coating and the original tooth profile. In addition, although the maximum inclination angle of tooth is 51.84° in the laser cladding process, the minimum distance is greater than 0.1 mm between the profile of coating and the original tooth profile.

Keywords: laser cladding; defects of tooth surface; gear repair; geometric mathematical model; profile of coating

收稿日期: 2020-02-22 修回日期: 2020-05-31

通信作者: 李涛(1977—),女(汉),副教授,博士;研究方向:激光增材再制造;E-mail: litao@dlut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51975099);宁夏回族自治区重点研发计划(2018BDE02045)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51975099) and Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region of China (2018BDE02045)

引用格式: 李向波,李涛,石博文,等. 基于齿面缺陷激光修复几何数学模型的齿轮修复[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 129-136.

LI X B, LI T, SHI B W, et al. Gear repairing based on geometric mathematical model of tooth surface by laser [J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 129-136.

0 引言

为了减小资源的消耗,全球各国开始大力发展再制造技术^[1-5]。相对其他国家再制造技术的发展历程,我国的再制造技术是在维修工程和表面工程技术上发展起来的,所以我国的再制造技术主要用于机械零部件的表面修复^[6-7]。而在众多再制造技术中,激光熔覆技术由于其具有结合强度高、热影响区小、能量密度高、冷却速度快和稀释率低等优点,所以被广泛的应用在汽车、航天、生物医药等领域^[8-9]。

在这些领域中,齿轮是必不可少的一个零件^[10]。但由于齿轮的工作条件相对恶劣,所以服役过程中的齿轮经常会出现多种失效形式^[11-12],从而影响其使用寿命。为了延长失效齿轮的使用寿命,一般常采用机械法、涂渡法、堆焊法和激光熔覆法等四类修复技术对齿轮失效部分进行修复^[13]。其中激光熔覆法相对其他修复技术,具有机械性能好、热影响区小、效率高等优点^[14]。因此,在对齿轮的局部损伤进行修复时多采用激光熔覆技术。成凯华采用激光熔覆技术对齿轮推力面进行了修复,并且修复后的工作面机械性能要优于基材^[15]。张智等人采用激光熔覆技术对船用减速齿轮箱齿轮轴的磨损齿面进行了尺寸修复^[16]。赵宁等人采用激光熔覆技术对采煤机行走齿轮的齿面磨损失效部位进行了修复^[17]。陈宗浩等人采用激光熔覆技术对重载车辆侧减速器主动齿轮进行了修复^[18]。以上研究虽然都对齿轮受损部位采用激光熔覆技术进行了修复,但轮齿齿面上的熔覆层轮廓与齿轮原始齿廓相差较大,同时由于熔覆层的硬度一般等于或者高于齿轮的表面硬度,所以为后续的机械加工增加了一定难度。

由于齿轮对齿面硬度要求较高,所以为了减小后续机械加工的难度,应使轮齿齿面上的熔覆层轮廓尽可能的接近齿轮原始齿廓,同时应使轮齿齿面上的加工余量减小并均匀分布。而使熔覆层轮廓接近齿轮原始齿廓的难点主要有以下两个方面:一是在修复的过程中,为了避免激光束和轮齿发生干涉,轮齿齿面待修复部位需要倾斜放置,而倾斜放置后可能会对熔覆层的形貌产生影响^[19],进而可能导致熔覆层轮廓和齿轮原

始齿廓不相似;二是齿轮齿廓与齿轮偏转角度无法形成统一的映射关系,所以使齿轮规律旋转,也无法达到熔覆层轮廓接近齿轮原始齿廓的目的。针对以上两大难点,基于齿轮齿廓的加工原理,将齿廓分为五个部分,然后根据每个部分的结构特点,建立了齿廓偏转角度和齿面倾斜角度的几何数学模型。根据所建立的模型可以得到齿轮齿廓与齿轮偏转角度的分段映射关系。由于倾斜角度对熔覆层形貌的影响随倾角的减小而减小^[20],所以基于建立的几何数学模型,可以在激光束和轮齿不发生干涉的前提下,使齿轮倾斜角度对熔覆层形貌的影响最小。

1 建模

1.1 齿廓修复区域的分析

采用激光熔覆技术对齿面缺陷进行修复时,一般会将齿面失效部位去除,然后对去除失效部位的齿面进行激光熔覆即可。但为了提高齿面缺陷激光修复几何数学模型的适用性,故假设缺陷均匀的分布在轮齿齿面的各个部位,并对失效部位采用负变位技术去除,然后在去除了齿面缺陷的负变位轮齿上进行齿面缺陷激光修复几何数学建模。

由于齿轮的结构特点,所以每个齿的修复区域基本相同,均为齿轮的 $1/z$ 份(z 为齿轮齿数),如图 1(a)所示。假设待修复轮齿坚直向上,则单个齿待修复区域如图 1(b)所示。由于去除齿面缺陷的负变位齿依然关于中心线对称,所以只研究其中的 A 区域, B 区域的修复只需将偏转方向关于齿中心线对称即可。

根据齿轮齿廓的特点,可将单个齿待修复 A 区域的齿廓分为五个部分,如图 2 所示。图中 CD 段为齿根圆部分、 DE 段为齿根过渡圆角部分、 EF 段为过渡曲线部分、 FG 为渐开线齿廓部分、 GH 为齿顶圆部分。

由于齿根圆部分 CD 段和齿顶圆部分 GH 段相对较短且曲率半径相对较大,故将这两部分的弧线近似等效为直线。过渡曲线 EF 段由于成形过程较为复杂且曲率半径较大,所以将弧线 EF 简化为直线。而齿根过渡圆角的半径远远小于熔覆层宽度^[21],为了简化齿面缺陷激光修复几何数学模型,故将齿根过渡圆角 DE 部分近似等效

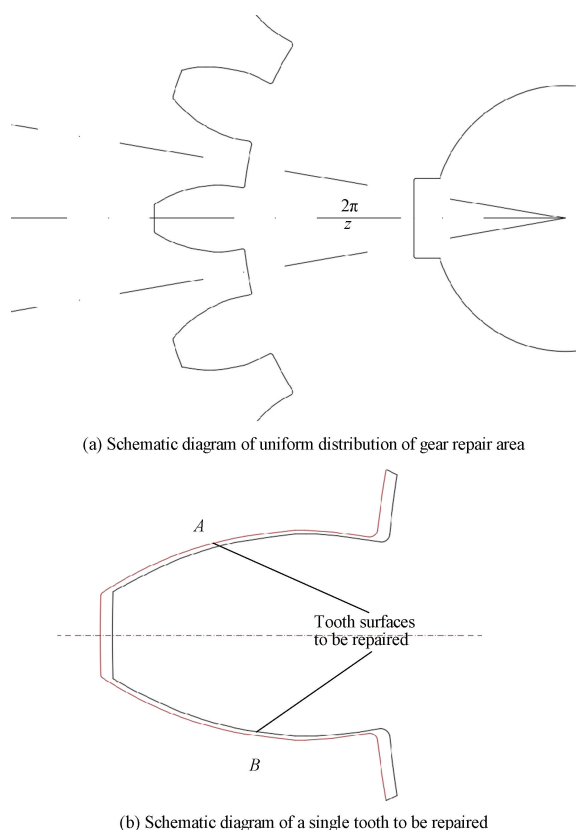


图1 齿面待修复区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tooth surface to be repaired

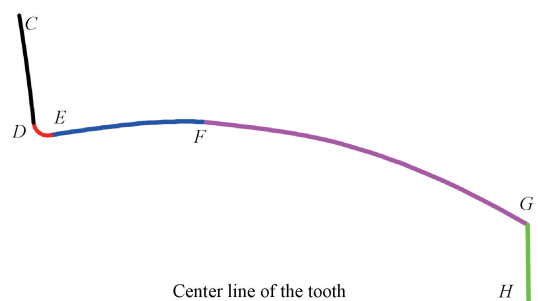


图2 待修复A区域齿廓的五部分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tooth profile five-part in area A to be repaired

为一点。然而渐开线齿廓 FG 部分与该齿中心线的夹角,从 F 点到 G 点逐渐增大,并在 G 点达到最大值。所以渐开线齿廓 FG 部分需要根据熔覆层宽度分成若干小段,由于每一小段的距离相对较短,故将每一小段的弧线近似为直线。因此,对齿轮单齿待修复 A 区域建立几何数学模型,如图3所示。其中点 O 为齿轮圆心,点 D 和点 E 合为一点。

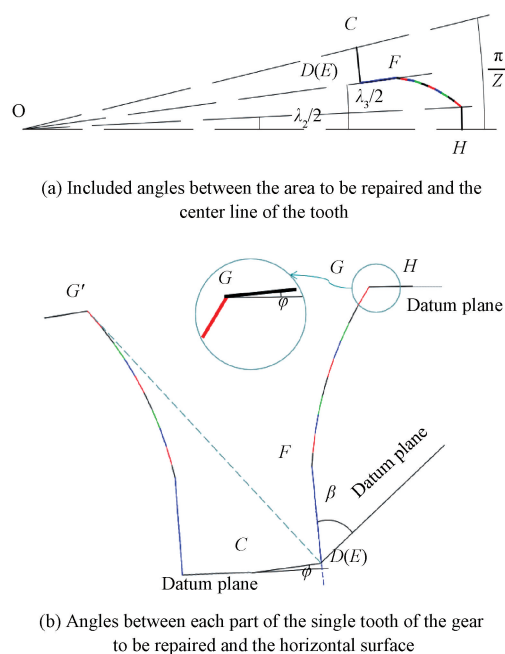


图3 齿轮单齿待修复A区域的几何数学模型

Fig. 3 Geometric mathematical model of gear single tooth in area A to be repaired

由图3可知,对齿轮单齿待修复 A 区域进行修复时,需要将 A 区域的齿廓分成齿根圆 CD 段、过渡曲线 EF 段、渐开线 FG 段和齿顶圆部分 GH 段4个部分。

修复齿根圆 CD 段,需要确定齿中心线的偏转角度 φ' 和不发生干涉时 CD 段的倾斜角度 φ ;修复过渡曲线 EF 段,需要确定齿中心线的偏转角度 β' 和不发生干涉时 EF 段的倾斜角度 β ;修复渐开线 FG 段,需要确定齿中心线每一次的偏转角度 ξ' 和不发生干涉时每一小段的倾斜角度 ξ ;修复齿顶圆 GH 段,需要确定齿中心线的偏转角度 φ' 和不发生干涉时 GH 段的倾斜角度 φ ,如表1所示。

表1 齿廓修复时的偏转角度和倾斜角度

Table 1 Angle of deflection and angle of inclination when the tooth profile is repaired

Name	Location	Angle of deflection	Angle of inclination
Dedendum circle	CD	φ'	φ
Knuckle of dedendum bottom	DE		
Transition curve	EF	β'	β
Involute	FG	ξ'	ξ
Addendum circle	GH	Φ'	Φ

1.2 齿廓各部分几何数学模型的建立

在对齿根圆部分 CD 段进行激光熔覆修复时,为保证在不发干涉的前提下能使 CD 段的齿面倾斜角度最小,所以需要知道当 EF 段处于竖直状态时,齿中心线的偏转角度 φ' ,如图 3(b) 所示。

$$\varphi' = \frac{\lambda_3}{2} \quad (1)$$

式中: $\lambda_3/2$ 为 OF 直线与该齿中心线的夹角。

根据图 3 和图 4(a) 中的几何关系可知,当 EF 段处于竖直状态时,齿根圆部分 CD 段与水平基面的夹角 φ 为:

$$\varphi = \frac{180^\circ}{z} - \frac{\lambda_3}{2} \quad (2)$$

式中: z 为待修复齿轮的齿数。

对过渡曲线部分 EF 段进行激光熔覆修复时,在激光束与齿轮轮齿不发生干涉的前提下,当 EG' 段处于竖直状态时,齿中心线的偏转角度 β' ,如图 3(b) 所示。

$$\beta' = \varepsilon \quad (3)$$

式中: ε 为 EG' 直线与该齿中心线的夹角。

根据图 3 中的几何关系可知,当 EG' 段处于竖直状态时,过渡曲线部分 EF 段与水平基面的夹角 β 为:

$$\beta = \frac{180^\circ}{2} - \varepsilon + \frac{\lambda_3}{2} \quad (4)$$

在对渐开线部分 FG 段进行激光熔覆修复时,为了在避免发生干涉的前提下使渐开线部分的每一小段的齿面倾斜角度最小,需要知道当齿廓上任意一点 K 与点 G' 的连线处于竖直状态时,水平基面与齿中心线的夹角 ω 和渐开线齿廓上每一小段与齿中心线的夹角 δ_k 。然后将这两个角度进行比较,从而得知是否会发生干涉。为了便于求得这两个角度,所以需要对渐开线部分 FG 段建立直角坐标系。此外,由于渐开线上每一小段在直角坐标系 X 轴和 Y 轴上的投影并不均等,同时激光熔覆过程为保证熔覆层质量,所以需要根据熔覆宽度和搭接率来确定每一小段端点的坐标,然后根据每一小段的端点坐标计算渐开线上每一小段与该齿中心线的夹角,进而得

到该齿中心线的偏转角度。根据图 4(b) 中的几何关系可知,当渐开线齿廓的点 F 为原点, X 轴平行于齿中心线, Y 轴垂直于齿中心线建立直角坐标系,如图 4(c) 所示,则渐开线齿廓 FG 段上任意一点的坐标为:

$$x = r_k \cos\left(\frac{\lambda_3}{2} - \theta_k\right) - r_b \cos \frac{\lambda_3}{2} \quad (5)$$

$$y = r_k \sin\left(\frac{\lambda_3}{2} - \theta_k\right) - r_b \sin \frac{\lambda_3}{2} \quad (6)$$

式中: r_b 为齿轮基圆半径; r_k 为渐开线齿廓上任意一点 K 到齿轮圆心 O 的距离; θ_k 为渐开线上点 K 的展角。并且 r_b 、 r_k 和 θ_k 满足以下的关系式^[22]:

$$r_k = \frac{r_b}{\cos \alpha_k} \quad (7)$$

$$\theta_k = \tan \alpha_k - \alpha_k \quad (8)$$

式中: α_k 为渐开线齿廓上任意一点 K 的压力角。

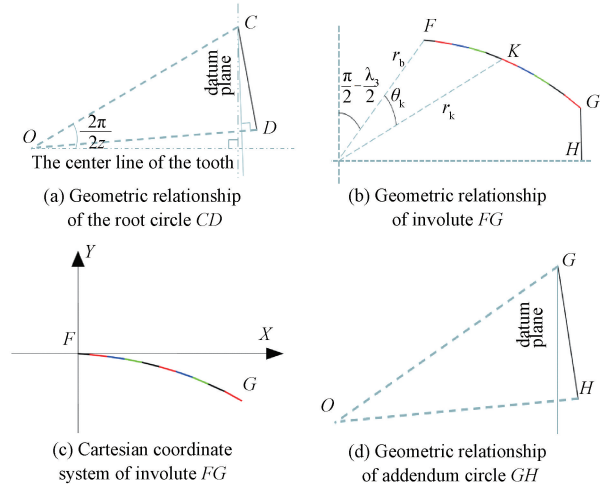


图 4 齿轮单齿待修复 A 区域模型讲解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of A region model of gear single tooth to be repaired

若熔覆层的宽度为 W ,搭接率为 μ ,则渐开线齿廓上每一小段的有效距离为 $l = (1 - \mu) * W$ 。因此,渐开线齿廓上每一小段两个端点的坐标 (x_k, y_k) 和 (x_{k+1}, y_{k+1}) 满足如下关系:

$$l = \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2} \quad (9)$$

$$\tan \delta_k = \frac{|y_{k+1} - y_k|}{|x_{k+1} - x_k|} \quad (10)$$

式中: δ_k 为渐开线上每一小段与齿中心线的夹角。

所以当激光束不与待修复齿轮轮齿发生干涉时,即水平基面与齿中心线的夹角小于渐开线齿廓上每一小段与齿中心线的夹角($\omega < \delta_k$),该齿中心线的偏转角度 ξ' 为:

$$\xi' = 90^\circ - \delta_k \quad (11)$$

此时的渐开线齿廓上每一小段的倾角 ξ 为 0° 。但当激光束与待修复齿轮发生干涉时,即水平基面与齿中心线的夹角大于渐开线齿廓上每一小段与齿中心线的夹角($\omega > \delta_k$),该齿中心线的偏转角度 ξ' 为:

$$\xi' = 90^\circ - \omega \quad (12)$$

式中: ω 为水平基面与齿中心线的夹角。

此时,渐开线齿廓上每一小段的倾角 ξ 为 $\omega - \delta_k$ 。

在对齿顶圆部分 GH 段进行激光熔覆修复时,由于不存在干涉问题,所以只需要将 GH 段水平放置即可,如图 3(b) 所示。根据图 4(d) 中的几何关系可知,当齿中心线竖直放置时,齿中心线的偏转角度 φ' 。

$$\varphi' = \frac{\lambda_2}{2} \quad (13)$$

式中: $\lambda_2/2$ 为 OG 直线与该齿中心线的夹角。

此时,齿顶圆部分 GH 段与水平基面的夹角 φ 为 0° 。

倾斜基体上的单道熔覆层宽度和高度可分别表示为^[23]:

$$W = R \left(\frac{\cos\beta}{\cos(\varphi - \beta)} + \frac{\cos\beta}{\cos(\varphi + \beta)} \right) \quad (14)$$

$$h = \frac{4\mu v_f}{\pi W v_s \rho} \quad (15)$$

式中: W 为熔覆层宽度; R 为光斑半径; β 为激光分散角的一半; φ 为基体的倾斜角度; h 为熔覆层高度; μ 为粉末利用率; v_f 为喷嘴口的粉末初速度; v_s 为扫描速度; ρ 为粉末颗粒的密度。

由式(14)和式(15)可以看出,倾斜基体上的熔覆层宽度主要受基体的倾斜角度影响,且随基

体倾斜角度的增大而增大。熔覆层高度主要受扫描速度和熔覆层宽度的影响,且随二者的增大而减小。因此,在对齿轮轮廓各部分的修复过程中,可适当调整各段的倾斜角度,确保熔覆后的齿面轮廓接近齿面的原始轮廓。

2 试验方案及结果

2.1 试验设备及材料

采用的试验装置为半导体激光熔覆系统,系统主要由半导体激光器、工业机械臂、激光熔覆头、气载式送粉系统组成,如图 5 所示。试验中使用的齿轮材料为 17CrNiMo6,粉末材料为 Ni60。

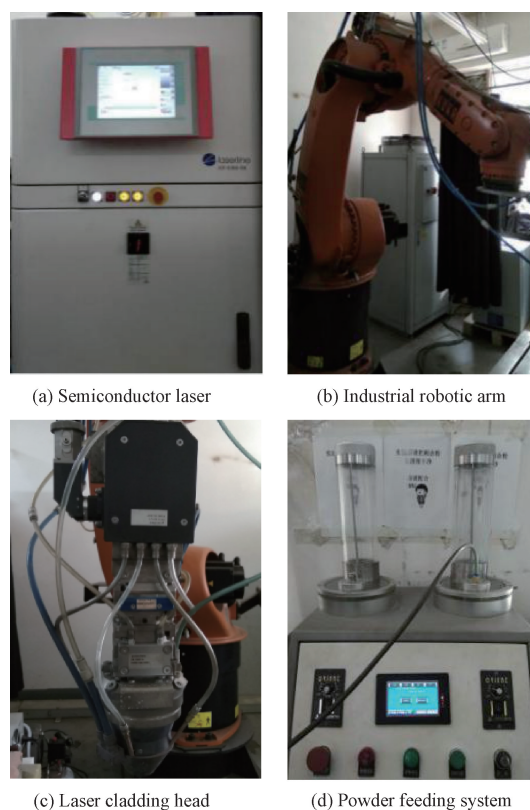


图 5 半导体激光熔覆系统
Fig. 5 Semiconductor laser cladding system

2.2 试验参数及结果

对齿轮受损部位采取负变位技术切除,得到的负变位齿轮相关参数如表 2 所示。修复过程使用的激光熔覆工艺参数如表 3 所示。

所以根据式(1)和式(2)可知修复齿根圆部分 CD 段时的偏转角 φ' 为 5.62° ,此时 CD 段的倾角 φ 为 4.38° 。根据式(3)和式(4)可知修复过渡曲线 EF 段时的偏转角 β' 为 43.78° ,此时 EF

表 2 负变位齿轮相关参数

Table 2 Related parameters of negative displacement gear				
Modulus/ m	Number of teeth/ z	Addendum height coefficient/ ha^*	Head clearance coefficient/ c^*	Modification coefficient/ x
6	18	1	0.25	-0.1

表 3 激光熔覆工艺参数

Table 3 Laser cladding process parameters			
Laser power	Scanning speed	Powder feed rate	Overlap rate
1600 W	0.005 m/s	10 r/min	70%

段的倾角 β 为 51.84° 。根据公式(13)可知修复齿顶圆部分GH段时的偏转角 φ' 为 2.07° 。

其中OG直线与该齿中心线的夹角 $\lambda_2/2$ 和OF直线与该齿轴线的夹角 $\lambda_3/2$ 通过齿轮分度圆半径和公式(7)、(8)求得,即 λ_2 和 λ_3 为分别为 4.14° 和 11.24° 。根据公式(5)~(12)可知修复渐开线上每一小段时,齿中心线的偏转角度以及每一小段的倾斜角度,如表4所示。

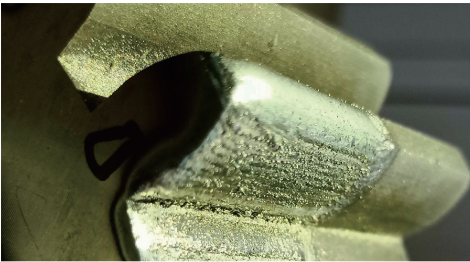
表 4 渐开线上每一小段与该齿中心线的夹角

Table 4 Angle between each segment of the involute and the center line of the tooth				
(x, y)	δ_k	ω	ξ'	ξ
(0.9, -0.07)	4°	24°	66°	20°
(1.79, -0.18)	7°	21°	69°	14°
(2.68, -0.34)	10°	17°	73°	7°
(3.55, -0.54)	13°	14°	76°	1°
(4.42, -0.78)	16°	10°	74°	0°
(5.27, -1.08)	19°	6°	71°	0°
(6.11, -1.41)	21°	3°	69°	0°
(6.92, -1.78)	25°	0°	65°	0°
(7.72, -2.2)	28°	4°	62°	0°
(8.5, -2.66)	31°	6°	59°	0°
(8.87, -2.9)	33°	9°	57°	0°

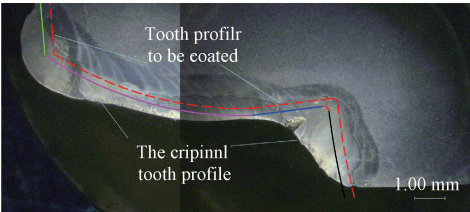
3 分析与讨论

激光熔覆后的齿如图6所示。其中图6(a)为齿轮单齿利用激光熔覆法修复实物图,图6(b)为激光熔覆后齿轮单齿横截面图。

当轮齿倾斜放置进行激光熔覆修复齿面缺陷时,由于轮齿齿面的倾斜导致四路粉末流在齿



(a) Diagram of a single tooth after repair



(b) Cross section of gear single tooth after repair

图 6 齿轮利用激光熔覆法修复后的齿

Fig. 6 Tooth of the gear repaired by laser cladding

面汇聚的区域范围变大,同时该区域范围内的粉末流浓度又满足高斯分布,所以造成粉末流浓度的峰值降低,进而使熔覆层的高度降低^[24]。并且轮齿齿面的倾斜角度越大,齿面上熔覆层的高度越低。

根据所建立的齿面缺陷激光修复几何数学模型可知修复过渡曲线EF段时的齿面倾斜角度最大,所以对图6(b)进行测量可发现过渡曲线EF段的熔覆层轮廓到齿轮原始齿廓的距离最小,为0.1 mm;从点F位置到点G位置修复渐开线FG段时,由于渐开线上每一小段的齿面倾斜角度不同,并逐步减小至零度,所以对图6(b)中渐开线FG段进行测量可以发现熔覆层轮廓到齿轮原始齿廓的距离在逐步增大至0.7 mm后不再继续增大;通过对图6(b)中齿面倾斜角度为零的部位进行测量可知,熔覆层轮廓与齿轮原始齿廓的距离为0.7 mm。

所以从图6(a)可以看出利用所建立的齿面缺陷激光修复几何数学模型对齿轮的齿面缺陷修复时,可以使熔覆层轮廓与齿轮原始齿廓较为接近。同时从图6(b)也可以看出,齿根、齿顶及齿廓渐开线上部在熔覆后的轮廓相比于原始轮廓存在一定的偏差。由上文的分析可知,该部分在熔覆时的倾斜角度较小,在工艺参数相同的前提下,单道熔覆层的宽度随之减小,从而使熔覆层的高度增大。在实际修复的过程中,熔覆后的齿面还需后续的精加工处理,采用齿面缺陷激光

修复几何数学模型进行熔覆可以得到近似的齿面轮廓,并为后续的加工保留一定的加工余量。

4 结 论

(1) 基于齿轮齿廓的加工原理,可将齿廓分为齿根圆、齿根过渡圆角、过渡曲线、渐开线齿廓和齿顶圆等五个部分,并且每个部分的弧线可以近似等效为直线。其中渐开线齿廓部分的弧线由若干小段直线近似等效,齿根过渡圆角的弧线近似等效为点。

(2) 为了使齿轮齿面的熔覆层轮廓接近齿轮齿面的原始齿廓,可以根据齿轮齿廓每个部分的结构特点,建立齿面缺陷激光修复几何数学模型。利用该模型可以计算修复齿廓不同受损部位时,轮齿的偏转角度以及相对应的齿面倾斜角度。

(3) 为了使轮齿在利用激光熔覆技术进行修复后齿廓上各个部位的加工余量较为均匀,应在激光束与待修复齿轮轮齿不发生干涉的前提下,使待修复轮齿齿面的倾斜角度均为最小。

参考文献

- [1] 徐滨士. 再制造工程的现状与前沿[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(1): 10-14.
XU B S. State of the art and future development in remanufacturing engineering[J]. Transactions of Metals and Heat Treatment, 2010, 31(1): 10-14 (in Chinese).
- [2] WAHAB D A, BLANCO D E, ARIFFIN A K, et al. A review on the applicability of remanufacturing in extending the life cycle of marine or offshore components and structures[J]. Ocean Engineering, 2018, 169: 125-133.
- [3] 张可兴对话人中国工程院院士徐滨士采访人. 积极推进再制造产业发展[N]. 中国环境报, 2015-10-12(2).
XU B S Academician of Chinese Academy of Engineering, was interviewed by ZHANG K X. Actively promote the development of the remanufacturing industry[N]. China Environment News, 2015-10-12(2) (in Chinese).
- [4] 王佳, 黎宇科, 潘伟. 我国汽车零部件再制造产品消费市场分析[J]. 汽车工业研究, 2018(10): 49-51.
WANG J, LI Y K, PAN W. Analysis of China's auto parts remanufacturing product consumption market[J]. Automotive Industry Research, 2018(10): 49-51 (in Chinese).
- [5] 李恩重, 张伟, 郑汉东, 等. 我国再制造标准化发展现状及对策研究[J]. 标准科学, 2017(8): 29-34.
LI E Z, ZHANG W, ZHENG H D, et al. Study on the present situation and development strategy of re-manufacturing standardization in China[J]. Standard Science, 2017(8): 29-34 (in Chinese).
- [6] 徐滨士中国工程院院士. 再制造: 循环经济的重要支撑[N]. 中国建材报, 2014-11-26(8).
XU B S Academician of Chinese Academy of Engineering. Remanufacturing: the important support of circular economy [N]. China Building Materials News, 2014-11-26(8) (in Chinese).
- [7] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
XU B S. Remanufacture engineering and its development in China[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6 (in Chinese).
- [8] LIU J, YU H, CHEN C, et al. Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: A review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 195-210.
- [9] VAITHILINGAM J, GOODRIDGE R D, HAGUE R J M, et al. The effect of laser re-melting on the surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2016, 232.
- [10] 刘建刚. 齿轮用钢大面积激光熔覆镍基合金工艺的研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
LIU J G. Study on process of large area nickel matrix composite coatings on gear steel produced by laser cladding[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2014 (in Chinese).
- [11] 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. Study of key technologies of gear laser surface treatment[D]. Shanghai: Tongji University, 2006 (in Chinese).
- [12] 康聚生. 齿轮激光熔覆再制造研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
KANG J S. Research on laser cladding remanufacturing of gears[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016 (in Chinese).
- [13] 陈曦. 采煤机大齿轮的激光熔覆再制造关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
CHEN X. Research on laser cladding remanufacturing critical technology of the bull gear in coal cutter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [14] 周阳. 齿轮轮齿激光再制造技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
ZHOU Y. Study of gear laser remanufacturing technology[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012 (in Chinese).
- [15] 成凯华. 采用激光熔覆修复齿轮推力面[J]. 石油化工设备技术, 2012, 33(3): 49-52.
CHENG K H. Laser cladding to repair thrust surface of gear[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2012, 33(3): 49-52 (in Chinese).
- [16] 张智, 谢沛霖. 激光熔覆修复齿轮轴工艺研究[J]. 电加工与模具, 2007(6): 40-43.
ZHANG Z, XIE P L. Laser cladding technic study in gear shaft repair[J]. Electrical Processing and Mold, 2007(6): 40-43 (in Chinese).
- [17] 赵宁, 陶礼, 郭辉, 等. 某采煤机重载齿轮磨损表面激光熔覆及磨损性能研究[J]. 机械传动, 2018, 42(6): 94-96.
ZHAO N, TAO L, GUO H, et al. Research of the laser cladding and wear resistance of worn surface of heavy load

- gear of mining machine[J]. Mechanical Drive, 2018, 42(6): 94-96 (in Chinese).
- [18] 陈宗浩, 马运哲, 韩文政. 适用于渗碳齿轮齿面修复的激光熔覆铁基自强化合金及其性能研究[J]. 中国表面工程, 2007(2): 17-20.
- CHEN Z H, MA Y Z, HAN W Z. Microstructure and performance of laser cladding Fe-based self-strengthening alloy coatings on cemented gear teeth[J]. China Surface Engineering, 2007(2): 17-20 (in Chinese).
- [19] 李海波, 李涛, 王鑫林, 等. 倾斜基体对激光熔覆能量分布的影响研究[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 333-339.
- LI H B, LI T, WANG X L, et al. Study on the influence of the inclined substrate to the energy distribution of laser cladding[J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 333-339 (in Chinese).
- [20] HAO J B, MENG Q D, LI C C, et al. Effects of tilt angle between laser nozzle and substrate on bead morphology in multi-axis laser cladding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 311-322.
- [21] 万国新, 唐进元, 李国文, 等. 齿根过渡圆角半径对齿根裂纹扩展的影响规律研究[J]. 机械传动, 2017, 41(4): 101-105.
- WAN G X, TANG J Y, LI G W, et al. An investigation of influence of transition arc radius on the tooth root crack propagation[J]. Mechanical Drive, 2017, 41(4): 101-105 (in Chinese).
- [22] 王德伦, 高媛. 机械原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- WANG D L, GAO Y. Mechanical principles [M]. Beijing: China Machine Press, 2011 (in Chinese).
- [23] Li X B, Li T, Shi B W, et al. The influence of substrate tilt angle on the morphology of laser cladding layer[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 391: 1-11.
- [24] LIN J, HWANG B. Coaxial laser cladding on an inclined substrate[J]. Optics and Laser Technology, 1999, 31(8): 571-578.