

文章编号: 0258-7025(2009)01-0244-05

复杂盘形凸轮表面激光熔覆工艺

沈斌¹ 闫广超^{2*} 吴钢³

(¹ 同济大学中德学院, 上海, 200092 ² 同济大学机械学院, 上海, 200092;)
³ 上海海事大学激光应用研究室, 上海, 200135

摘要 为对失效凸轮进行修复和增强凸轮表面的耐磨、耐蚀、抗压等力学性能, 采用激光熔覆的方法在凸轮表面预涂层。研究了在复杂盘形凸轮表面进行单道激光熔覆的工艺, 提出了在凸轮表面获得均匀熔覆层应满足的基本条件, 并以这些条件为约束推导出复杂盘形凸轮表面激光熔覆运动控制方程。实验试样的宏微观形貌分析表明, 熔覆层宽度和厚度均匀, 熔覆层与基体结合良好。试样的显微硬度明显提高, 凸轮表面的硬度高出基体的 2~3 倍。

关键词 激光技术; 表面修复及强化; 单道激光熔覆; 复杂盘形凸轮

中图分类号 TG162.83; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093601.0244

Laser Cladding on Complex Disc Cam

Shen Bin¹ Yan Guangchao^{2*} Wu Gang³

¹CDHK of Tongji University, Shanghai 200092, China;
²College of Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China
³Laboratory of Laser Application, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China

Abstract In order to repair broken disc cam and improve the mechanical properties of its surface, such as wear resistance, corrosion resistance, anti-compression, laser cladding coating was made on the surface of disc cam. The laser cladding on complex disc cam was studied. For acquiring the uniform cladding on the surface of disc cam, some basal conditions which must be followed during the laser cladding on the complex disc cam was put forward. As to meet these conditions, formulas which were used in the moving control of laser cladding on the surface of disc cam were deduced. At last, cladding of disc cam was analyzed by the microscope, scanning electron microscope (SEM) and other equipments, and the experimental results show that the process method provides cladding with uniform width and thickness and solid combination. The hardness of disc cam surface is increased by two-three times.

Key words laser technique; surface repairing and strengthening; single laser cladding, complex disc cam

1 引言

目前机械行业中凸轮机构的应用非常广泛, 特别是在航空、航天、军事等领域。而作为凸轮机构中重要组成部分的凸轮, 在使用过程中由于过载或冲击载荷、磨损等缘故而容易失效。更重要的是很多凸轮都和轴连在了一起构成凸轮轴, 一旦凸轮失效, 整根凸轮轴将完全报废。因此对凸轮轴和凸轮的修复课题也就被提出了。与传统的零件修复工艺相比, 激光熔覆技术更显得优越^[1~6]。首先它易于实

现精确控制, 对整个工件的热影响小; 对于有着复杂曲线轮廓且轮廓面较窄的凸轮, 传统修复工艺很难对其局部进行修复。其次, 激光熔覆技术可将另一种高性能的材料涂敷在凸轮的表面, 从而使凸轮的使用性得到进一步提高^[7,8], 延长凸轮或凸轮轴的使用寿命。

虽然, 在样块上已经做了大量的关于激光熔覆方面的研究工作^[9~11], 但对于凸轮表面激光熔覆方面的研究并不多。这是因为凸轮具有复杂的轮廓表

收稿日期: 2008-04-14; 收到修改稿日期: 2008-05-16

基金项目: 上海市教委科技发展基金(03ik10)资助课题。

作者简介: 沈斌(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代集成制造、网络化设计与制造和数字化制造工程的教学和科学研究。E-mail: bshen@mail.tongji.edu.cn

* 通信联系人: E-mail: ygchao321@163.com

面,导致了凸轮表面激光熔覆运动控制难度的增加。

2 理论模型

2.1 基本思路

理论研究分析表明^[11],要在凸轮表面激光熔覆时获得均匀熔覆层,就要保证激光在凸轮表面扫描时的热效应时时相等。可以通过多种途径来实现:如改变功率,改变扫描速度,通过运动控制。

本文通过运动控制的方法进行凸轮表面激光熔覆,提出了盘形凸轮表面获得均匀熔覆层的运动控制所必需满足的三个基本条件:保证离焦量不变,或保证激光聚焦镜中心到凸轮表面的距离不变;激光束需始终沿凸轮轮廓面的法线入射;激光光斑在凸轮表面的相对扫描速度要保持恒定。

2.2 扫描位置设计

实验采用连续周向扫描的扫描工艺^[7,8]来完成凸轮全轮廓面扫描,在这种情况下凸轮在工作台上的摆放位置对研究至关重要。凸轮扫描起始位置、激光头、喷嘴以及工作台的摆放位置均如图 1 所示。

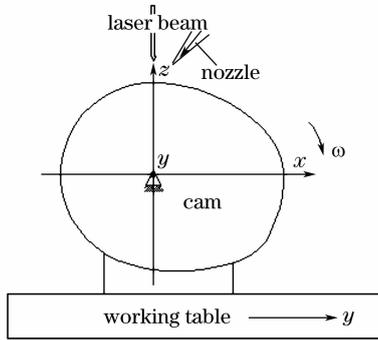


图 1 凸轮扫描起始位置

Fig. 1 Start scanning position of the cam

2.3 技术方案结构体系

采用 SINUMERIK802C 四轴三联动数控机床,可以实现 x, y, z, ω 四根轴中任意三轴的同时运动。离焦量不变,可以通过 z 轴的运动来实现;而要使激光束沿凸轮的轮廓线的法线入射,则在其他轴运动的情况下使 x, ω 轴也要做适当的运动;凸轮绕转动中心的转动实现了凸轮全轮廓面熔覆,技术路线框如图 2 所示。

2.4 运动控制

凸轮轮廓线通常是由若干具有变化曲率半径的弧线及圆弧、直线等联接而成的复杂曲线。盘形凸轮表面激光熔覆运动控制方法,首先是将凸轮轮廓线离散化,即在凸轮轮廓线上取一系列的点,再将满足一定条件的点用直线相连,以有限段直线逼近原

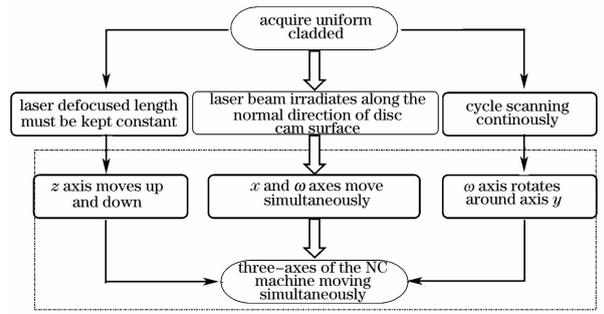


图 2 凸轮表面激光熔覆技术指标体系

Fig. 2 Technical route of laser cladding process of cam surface

有的凸轮轮廓曲线。显然,只要选择的 n 个点足够大,即可满足拟合精度。这样可以将激光光斑在凸轮曲线轮廓上的连续运动变化为在每段直线型表面上的运动,以便于运动控制数学模型的建立。

选取的直线段应取光斑在轮廓面上形成的熔池在扫描方向上的尺寸 l 作为划分每段直线段长度的参考值。根据理论和实验研究可得光斑在轮廓面上形成的熔池在扫描方向上的尺寸 l 等于光斑在扫描方向上的尺寸 D , 即 $l = D$ 。从而选择每段线段长度 $L = l$, 选择这个参考值的出发点首先是考虑其满足计算精度要求,另外兼顾减少计算工作量。

根据运动控制分析的基本思路,推导建立相应数学模型。在凸轮轮廓面上取得一系列的点 $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ (如图 3(a)), 各点的坐标为 $(x_1, z_1), (x_2, z_2), (x_3, z_3) \dots (x_n, z_n)$, 起始位置时光斑处于直线段 $\overline{A_1 A_2}$ 的端点 A_1 。实验用数控机床工作台只能在 xoy 平面内运动,工作台上配备有转台可以实现凸轮的转动。激光聚焦镜可以沿 z 轴运动不能绕 y 轴转动(如图 1 所示)。

1) x 轴运动控制计算公式

当 $k_{A_{n-1}A_n} \neq 0$ 且存在时, o 点到直线段 $\overline{A_n B_n}$ 的距离为

$$oB_n = \frac{|k_{A_n B_n} \cdot x_n - y_n|}{\sqrt{k_{A_n B_n}^2 + 1}}, \quad (1)$$

则每句程序语句中的 x 轴的运动量为

$$\Delta x_n = oB_n - oB_{n-1}; \quad (2)$$

当 $k_{A_{n-1}A_n} = 0$ 时, $k_{A_n B_n}$ 不存在, 直线段 $\overline{A_n B_n}$ 与 x 轴的夹角为 90° , 此时 o 点到 $\overline{A_n B_n}$ 的距离为 $|x_n|$ 。则每句程序语句中的 x 轴的运动量为

$$\Delta x_n = |x_n| - |x_{n-1}|; \quad (3)$$

当 $k_{A_{n-1}A_n}$ 不存在时, $k_{A_n B_n} = 0$, 直线段 $\overline{A_n B_n}$ 与 x 轴的夹角为 0° , 此时 o 点到 $\overline{A_n B_n}$ 的距离为 0。则

每句程序语句中的 x 轴的运动量为

$$\Delta x_n = 0. \quad (4)$$

由此说明,在公式(2)~(4)中,当 $\Delta x > 0$ 时机床向 x 轴负向运动,当 $\Delta x < 0$ 时机床向 x 轴正向运动。

2) z 轴运动控制计算公式

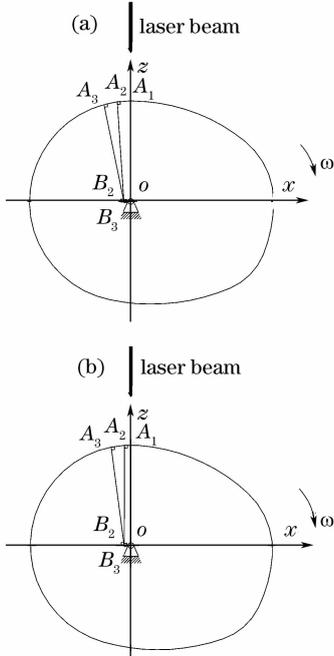


图 3 凸轮扫描示意图。(a) 凸轮表面激光熔覆起始位置; b) 凸轮表面激光熔覆第一段直线段加工示意图

Fig. 3 Sketch of the laser beam scanning. (a) start point of laser cladding on the disc cam surface; (b) the first line on disc cam surface processing during laser cladding

当 $k_{A_{n-1}A_n}$ 存在时

$$\overline{A_n B_n} = \frac{|k_{oB_n} \cdot x_n - y_n|}{\sqrt{k_{oB_n}^2 + 1}}, \quad (5)$$

每句程序语句中的 z 轴的运动量为

$$\Delta z_n = \overline{A_n B_n} - \overline{A_{n-1} B_{n-1}}; \quad (6)$$

当 $k_{A_{n-1}A_n}$ 不存在时,点 $A_1, A_2 \dots A_n$ 到直线 $\overline{oB_2}, \overline{oB_3} \dots \overline{oB_n}$ 的距离为 $|y_n|$,每句程序语句中的 z 轴的运动量为

$$\Delta z_n = |y_n| - |y_{n-1}|. \quad (7)$$

由此说明,在公式(6),(7)中,当 $\Delta z > 0$ 时机床向 z 轴正向运动,当 $\Delta z < 0$ 时机床向 z 轴负向运动。

3) ω 轴运动控制计算公式

要使直线段 $\overline{A_1 A_2}, \overline{A_2 A_3} \dots \overline{A_{n-1} A_n}$ 与激光束垂直, $\overline{A_1 A_2}$ 转过的角度为其与 x 轴的夹角, $\overline{A_2 A_3}$ 在 $\overline{A_1 A_2}$ 与激光束垂直的基础上转至于激光束垂直其转动的角度为 $\overline{A_2 A_3}$ 同 $\overline{A_1 A_2}$ 的夹角,同理可推

得,每句程序语句中机床的转动量即为相邻两直线段的夹角。

当 $k_{A_{n-1}A_n}$ 存在时

$$\Delta \omega_n = \left| \frac{k_{A_{n-1}A_n} - k_{A_{n-2}A_{n-1}}}{1 + k_{A_{n-1}A_n} \cdot k_{A_{n-2}A_{n-1}}} \right|; \quad (8)$$

当 $k_{A_{n-1}A_n}$ 不存在时

$$\Delta \omega_n = \frac{\pi}{2} - \arctan |k_{A_{n-1}A_n}|. \quad (9)$$

4) 扫描速度计算公式

为了保证在整个扫描过程中光斑的相对扫描速度恒定,可以将光斑看作定点,让凸轮上的各个点依次通过光斑。若使选取的直线段通过光斑所用时间相等,则选取点时使各直线的长度 L 尽可能地相等,并小于光斑溶池的宽度 l ,保证了要求的相对扫描速度恒定。这样情况下,光斑扫过每段直线段的时间为 $t = \frac{L}{v_s}$,其中 v_s 为光斑的扫描速度。当

$|\Delta x_n| \neq 0$ 或 $|\Delta z_n| \neq 0$ 时,机床的进给速度为

$$F_n = \sqrt{(V_{x_n})^2 + (V_{z_n})^2} \quad \text{unit: mm/min}; \quad (10)$$

当 $\Delta x_n = 0, \Delta z_n = 0$ 时

$$F_{\omega_n} = \frac{\Delta \omega_n}{t}, \text{unit: } (^\circ)/\text{min}/. \quad (11)$$

3 实验设备及方法

3.1 实验设备

实验用激光器为 2 kW CO₂ 横流激光器,输入激光功率范围为 0~2 kW。实验用数控机床为 SINUMERIK802C 四轴三联动数控机床。实验基体材料为 45# 钢,调质处理,凸轮示意图如图 4 所示,凸轮的基本参数为推程角 $\varphi = 80^\circ$,回程角 $\varphi' = 90^\circ$,远休止角 $\varphi_s = 22^\circ$,近休止角 $\varphi'_s = 168^\circ$,基圆半

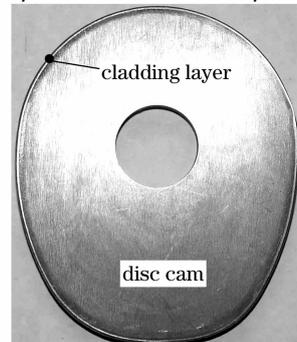


图 4 凸轮上的熔覆层

Fig. 4 Laser clad layer on the surface of the cam

径 $R_b = 34$ mm, 升程 $h = 14$ mm; 轮廓线等分份数 $n = 106$ 。实验用粉末为 Ni45 自熔性合金粉末, 其粉末粒度范围为 $-150 \sim +320$ 目, 粉末成分见表 1 所示。

表 1 Ni45 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni45 alloy powder

Composition	Cr	Fe	C	B	Si	Ni
Mass fraction/%	10~15	≤ 5.0	0.3~0.6	2~3.5	3~4.5	bal

表 2 实验用工艺参数

Table 2 Laser cladding process parameters

Parameters	P	V_s	V_f	$A \times B$
Values	920 W	2.5 mm/s	3 g/min	4.3 mm \times 4.3 mm

3.2 实验方法

凸轮摆放位置如图 1 所示, 便于粉末流的供给, 实验设备中喷嘴与激光宽带扫描仪一起安装在同一平面 xoz 内。因此, 要在凸轮表面接受到粉末流, 就必须使凸轮的平面和喷嘴及激光束都在 xoz 平面内。实验采用的扫描工艺为单向送粉单向扫描^[12]。

3.3 实验结果

实验中采用运动控制的目的是在凸轮表面获得均匀的熔覆层。凸轮熔覆后将侧壁经打磨后(磨至单道激光熔覆层宽度的二分之一)进行腐蚀(腐蚀剂为体积分数 96% 的乙醇和 4% 的浓硝酸)。从图 4 可以看出, 凸轮表面的熔覆层非常均匀。

3.4 讨论

为了进一步从宏观形貌上证明凸轮表面熔覆层的均匀性, 在凸轮表面均匀地取一系列点(12 个等分点), 用千分尺分别测量这些点处熔覆层的厚度和宽度, 测量结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 可知, 这些点处厚度值的均值为 0.52 mm, 各点的厚度值与该均值的误差率范围为 0.1%~0.6%, 这个误差率范围满足加工精度的要求; 由表 4 可知, 均值为 4.39 mm, 各点的熔覆层宽度值与均值的误差率范围为 0.2%~1.2%, 这个误差率范围满足加工精度的要求。从宏观形貌分析可知, 熔覆层宏观形貌是均匀的。

表 3 凸轮上 12 个等分点的熔覆层厚度值

Table 3 Thickness of twelve divide points on the cladding layer on the disc cam

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Height/mm	0.49	0.49	0.50	0.50	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	0.54	0.54	0.55

表 4 凸轮上 12 个等分点的熔覆层宽度值

Table 4 Width of twelve divide points on the cladding layer on the disc cam

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Width/mm	4.35	4.41	4.33	4.42	4.42	4.37	4.36	4.38	4.39	4.40	4.41	4.45

图 5 为熔覆层与凸轮基体交界上的一点在 S-360 电镜扫描仪上放大 5000 倍后拍摄的照片, 试样拍摄前经金相砂纸打磨, 在抛光机上抛光后再用腐蚀剂进行腐蚀。可以看到, 凸轮基体与熔覆层有着明显的交界线, 有一定的过渡区。凸轮基体与熔覆

层是明显的冶金结合, 没有裂缝和气孔, 图片中白亮的熔合线表明两界面结合较好。

选取基体 C 点、熔覆层与基体交界处 B 点、熔覆层 A 点三处进行硬度测量, 硬度值如表 5 所示, 其硬度压痕如图 6 所示。

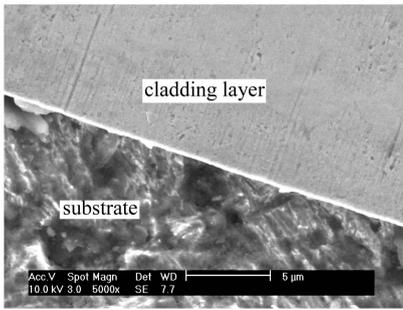


图 5 熔覆层交界处取点放大 5000×

Fig. 5 Points on the boundary line of the coating and the substrate amplified by 5000×

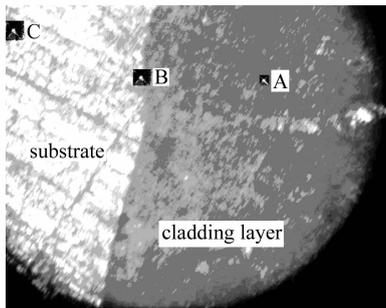


图 6 熔覆层与基体压痕位置

Fig. 6 Position of hardness marks on the boundary of the coating and the substrate

表 5 硬度值

Table 5 Values of hardness

No.	A	B	C
Value/HRC	44.5	37.9	29.3

可以看出, A 点的硬度最高, 该处为熔覆层, 其组织性能体现的是 Ni45 的性能, 具有高的硬度, 高的耐磨、耐蚀与抗压等特性。B 点是熔覆层与基体的交界线, 这里的基体经高温淬火, 其硬度有明显提高, 越靠基体心部其硬度逐渐降低, 如 C 点硬度低于 B 点硬度。

4 结 论

1) 采用四轴三联动数控机床, 通过直线拟合的方式推导出了复杂盘形凸轮表面激光熔覆运动控制方程。

2) 通过实验对运动控制方程进行了验证, 实验结果表明, 研究所采用的运动控制方法是正确的、可行的, 能够达到获得均匀熔覆层的预期目标。

3) 显微硬度分析表明, 凸轮表面的硬度具有显著的提高, 通过在凸轮表面预覆其他合金材料不但达到了修复凸轮的目的, 同样提高了其耐磨、耐蚀和

抗压性能。

参 考 文 献

- Zhang Zhi, Xie Peilin. Laser cladding technic study in gear shaft repair[J]. *Electromachining & Mould*, 2007, **6**:40~43
张智, 谢沛霖. 激光修复齿轮轴工艺研究[J]. 电加工与模具, 2007, **6**:40~43
- Wu Gang, Yan Guangchao. Moving control in laser cladding of disc cam[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(6):426~428
吴钢, 闫广超. 盘形凸轮表面激光熔覆运动控制研究[J]. 应用激光, 2006, **26**(6):426~428
- Li Baoling, Wen Zongyin, Liu Xuhong et al. . An experimental study of laser cladding technology applied for axle surface repair [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(4): 290~293
李宝灵, 温宗胤, 刘旭红等. 激光熔覆技术应用于轴类零件表面修复的实验研究[J]. 应用激光, 2007, **27**(4): 290~293
- Lu Changliang, Hu Fangyou, Cui Aiyong et al. . Research on laser cladding of deformed aluminum alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2007, **20**(6):44~47
鲁长亮, 胡芳友, 崔爱永等. 变形铝合金激光熔覆工艺研究[J]. 中国表面工程, 2007, **20**(6):44~47
- Niu Xin, Chao Mingju, Wang Wenli et al. . In situ synthesized NbC particulate reinforced Ni-based composite coating by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):987~991
牛薪, 晁明举, 王文丽等. 原位生成 NbC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):987~991
- Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li. Microstructure and wear-resisting property of (Ti + Al/Ni)/(Cr₂O₃ + CeO₂) laser cladding on titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 438~441
崔爱永, 胡芳友, 回丽. 钛合金表面激光熔覆 (Ti + Al/Ni)/(Cr₂O₃ + CeO₂) 复合涂层组织与耐磨性能[J]. 中国激光, 2007, **34**(3):438~441
- Wang Weifu, Sun Fengjiu, Wang Maocai. Laser cladding Ni-based tribaloy 700 coatings on TA2 titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1710~1715
王维夫, 孙凤久, 王茂才. TA2 钛合金表面激光熔覆 Ni 基 Tribaloy 700 涂层[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1710~1715
- Zhang Weiping, Liu Shuo, Ma Yutao. Strengthening mechanism of particle reinforced metal matrix composite coating by laser cladding[J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*, 2005, **26**(1):70~73
张维平, 刘硕, 马玉涛. 激光熔覆颗粒增强金属基复合材料涂层强化机制[J]. 材料热处理学报, 2005, **26**(1):70~73
- P. Kaul, P. Ganesh, S. K. Albert et al. . Laser cladding of austenitic stainless steel with nickel base hardfacing alloy[J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(4):268~270
- S. Niederhauser, B. Karlsson. Mechanical properties of laser cladded steel[J]. *Material Science and Technology*, 2003, **19**: 1611~1677
- Liu Zhenfeng, Qiu Xiaolin, Yao Yuecheng et al. . Research on energy redistribution of laser power in process of powder feeding laser cladding[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(3):75~76
刘珍峰, 邱小林, 姚育成等. 送粉式激光熔覆过程中的激光能量控制[J]. 激光杂志, 2007, **28**(3):73~76
- Song Guangming, Wu Gang, Huang Wanjuan et al. . Cracking control in laser cladding process with unidirectional powder feeding and double scanning[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2005, **30**(5):26~28
宋光明, 吴钢, 黄婉娟等. 单向送粉双向扫描激光熔覆工艺防止裂纹的试验研究[J]. 金属热处理, 2005, **30**(5):26~28