# 汽车覆盖件模具激光表面强化中 环带区域的测量及轨迹规划

## 王建伦 虞

钢

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

提要 在模具表面激光强化中,测量及轨迹规划是工艺实现的关键环节。本文针对汽车覆盖件模具表面较为常见的侧 壁结构,从中抽取出更为基本的一类型面——环带,提出了一种基于特征线的环带测量及轨迹规划的方法。并且在建立环带 数学模型的基础上对误差进行了分析,证明了这种方法不仅简单、高效,而且满足相应的加工工艺要求。

关键词 激光强化 汽车覆盖件模具 环带 轨迹规划

Measurement And Path Planning of Ring Zone on Automobile Covering Dies for Laser Hardening

Wang Jianlun Yu Gang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Measurement and path planning are key steps in laser hardening. Ring zone is a common surface type on automobiles covering dies. A method of measurement and path planning based on feature lines was introduced. Error analysis was done on a mathematical model of ring zone. Which indicates that the method is not only simple and effective, but also meet to the requirements of manufacturing.

Key words Laser hardening Automobile covering dies Ring zone Path planning

汽车覆盖件模具的表面状态直接影响产品质量 和模具使用寿命。传统的一些处理手段存在相当大 的局限性<sup>[1]</sup>。大功率激光器的出现及激光加工技 术在工业上的应用日趋广泛、成熟,给模具表面的强 化提供了一种新的技术途径。

目前关于模具激光强化的工艺研究已具有相当 的基础,但真正实用的激光模具表面强化设备还很 少。造成这种现象的原因有很多,除工艺方面的原 因外<sup>[2]</sup>,其中很重要的一点是因为模具表面形貌的 复杂性(如大型汽车覆盖件模具),从而给模具表面 的测量、重构及轨迹规划造成比较大的困难<sup>[3]</sup>。

中科院力学所与上海大众合作研制的集成化激 光智能加工系统<sup>[4,5]</sup>,为模具表面的激光强化提供 了软硬件支持。在相关的 CAD/ CAM 模块中,对模 具表面的重构及轨迹规划进行了较深入的研究,取 得了一定的研究成果<sup>[6,7]</sup>,相应的算法已集成到软 件当中并用于实际加工。针对大型汽车覆盖件模具 表面形貌复杂的特点,从中抽取出一些有共同几何 特征的典型型面,并在此基础上实现分区测量、分区 重构及分区轨迹规划。环带是从中抽取出的一种典 型型面,下面将给出它的定义及其基于特征线的测 量、重构及轨迹规划算法。

#### 环带的定义和数学模型

在大型汽车覆盖件模具表面,侧壁是一种常见的结构<sup>[8]</sup>。侧壁又可分为直壁,斜面侧壁和台阶侧壁,如图1所示。

从侧壁结构中可以抽取出一种更为基本的结构——环带。环带可以定义为模具表面两平行平面 (或近似平行平面)的过渡区域,这一区域通常呈环 带状,故称为环带区域。如图2所示两平行平面S<sup>1</sup> 与S2之间的过渡区域R即为一环带。上面的三种侧



2005年6月25日收稿

壁结构中都有环带存在(台阶侧壁中含有多个环带 结构)。

由环带定义,环带与上下平面的界线自然构成 环带的两条特征线,在特征线上的任一点做相应法 平面,可得环带的一条横截线。环带横截线具有如 图 3 所示的典型结构。



由图 2 可以看出,环带横截线一般由三段构成, 上面和下面各为一段圆弧,中间为一斜线段。可用 以表征环带的参数很多,h 为环带高度,L 为环带宽 度,1 2 分别为上下弧段对应的圆心角,r1r2 则分别 是上下弧段对应的半径,h1 为斜线段的长度。因为 环带是两平行平面的过渡部分,所以一般是具有对 称性的。故这里假定 r1 = r2 = r, 1 = 2 = ,这样用 以表征环带的参数可以压缩为三个:h1,,r。通过 测量,A,B 两点的坐标是可以知道的,从而 L,h 均 可计算得到。这样可以得到关于 h1,,r 的方程组:

$$2r(1 - \cos ) + h_1 \sin = h$$

$$2r \sin + h_1 \cos = I \qquad (1)$$

方程组(1)含有三个未知量,但却只有两个方程,故有无穷解。方程组(1)的任意一组有意义的解都可构成实际环带的近似模型。另外,表征参数的取值范围如下:

r:(1mm,6mm); h<sub>1</sub>:(5mm,15mm) 由此可以看出,环带相对于棱脊、棱边<sup>[7]</sup>具有 228 较小的尺度,且具有更复杂的结构,所以其测量、重 构及轨迹规划也将不同于棱脊、棱边。另外有一点 需要指出的是,环带并不能涵盖所有侧壁结构,它实 际是一种小尺度的侧壁结构。但这种结构在复杂的 汽车覆盖件模具表面是广泛存在的,而且是在冲压 过程中磨损较严重,特别需要强化的区域之一,因而 有其研究的价值。

### 环带的测量与重构

由前面环带的定义及数学模型,如果能够测得 环带的上下两条特征线,则由方程组(1)即可得到环 带的近似模型。故测量可采取基于 CMM(三坐标 测量机)的接触式测量,并且可采用自适应测量的方 式<sup>[7]</sup>。在得到特征线的数据之后,需进一步确定特 征线上任意一点处的横截线形式,即确定环带模型 中的三个表征参数。在包含上述三个未知参数的方 程组(1)中,根据环带的结构特点,可以确定圆心角 的取值范围如下:

当h L 时, [arc tg (h/L),90°] 当h <L 时, [arc tg ( $\frac{h}{L}$ ), arc cos ( $\frac{L^2 - H^2}{L^2 + h^2}$ )]

在取值范围内服从近似正态分布。所以,当 h L 时,可以取 =  $\frac{1}{2} [ arc tg (\frac{h}{L}) + 90 ]; \exists h < L$ 时,取 =  $\frac{1}{2} [ arc tg (\frac{h}{L}) + arc cos (\frac{L^2 - H^2}{L^2 + h^2}) ]$ 。

将 h L 值代入方程组(1),可以解得另外两个 表征参数。从而可得环带的一个近似模型。这一近 似模型与实际环带是存在误差的,关键是这一误差 是否控制在加工工艺允许的范围之内。下面进行相 关的误差分析。

根据激光强化工艺的要求,曲面重构必须保证 离焦量及法向偏离控制在一定范围之内。利用 YAG激光器在球墨铸铁的基体上进行工艺实验,可 得允许的最大离焦量为 ± 3mm,而允许的最大法 向偏离则为 20 %

由环带的数学模型,r,h均具有较小的尺度(相 对于最大离焦量),所以针对上面的近似模型,可分 析得到其最大离焦误差可以控制在最大离焦量范围 之内。下面主要针对法向偏离误差进行分析。考虑 h > L的情形,此时近似模型中取 = $\frac{1}{2}[arctg(\frac{h}{L})$ +90 °]。将其代入方程组(1)中,求解得到对应r, h<sub>1</sub>的。进而来考察这一近似模型的误差。考虑所 谓的最大误差情形。

显然当实际的 = arc tg (h/L) 或 90 时这种误 差为最大,但从实际考虑, 接近 90 的可能性更大 些。所以可只考察当 = 90 时的误差。另一方面, 因为 h > L,所以 arc tg (h/L)的最小值为 45°,所以 我们进行最大误差分析的情形可确定为如下情形: 实际的 = 90 °, arc tg (h/L) = 45 °。则由方程组 (1)可分析得出实际的  $h_1 = 0$ ,  $r = \frac{h}{2} = \frac{L}{2}$ 。此时的实 际环带如图 4 所示:

将 =  $\frac{1}{2}$  [ arc tg (h/L) + 90 °] = 67.5 °

代入(1)式,可得近似模型的另外两个表征参数:



图 4 最大误差情形对应的实际环带



图 5 实际环带与近似模型的法向比较 (AC 为实际环带对应弧段,A1C1 为近似模型对应弧段)

从图 5 可看到,在对应弧度范围内,两者的法 向偏离逐渐增大,但最大也不会超过 1 = arc tg $\left(\frac{0.064h}{0.5h}\right) = arc tg \ 0.128 = 0.127 \times 57.3^{\circ} = 7.27^{\circ}$ 在实际圆弧超过近似圆弧的那段,最大法向偏离不 超过 2 = 22.5 °- 7.27 °= 15.23 °。所以近似模型 所造成的最大法向偏离没有超过工艺允许的范围。

类似的对 h < L 的情形进行分析,可以得出相同 的结论。所以上面得到的近似模型可以用来替代实 际环带,所造成的误差在允许的范围之内,仍可保证 加工的效果。

环带的轨迹规划 在建立了环带的近似模型之后,可以进一步进 行轨迹规划。在采用脉冲式激光器和五轴机器人的 加工系统中,加工轨迹点的数据格式有两种:(x,y)z,ax,ay,az),(X,Y,Z,A,C)。分别对应空间加工 点的坐标和法向以及相应的机器人的关节值。两种 数据格式可以相互转换。综合前面的测量与重构. 完整的轨迹规划流程如下:

(1) 上下两条特征线的测量及拟合:

(2) 由特征线数据计算环带特征尺度,建立环 带表征参数的方程组(1):

(3) 根据 h 与 L 的关系,当 h L 时,选取 = [arc tg (h/L) + 90 °] / 2,代入方程组(1),解得两 外两个表征参数  $r_{h_1}$ ,建立环带近似模型;当 h < L时,则对应选取 =  $\frac{1}{2} [arc tg(\frac{h}{L}) + arc cos$  $\begin{pmatrix} L^2 - H^2 \\ I^2 + h^2 \end{pmatrix}$ ],并建立相应近似模型;

(4) 根据光斑尺寸确定近似模型中上下弧段及 中间斜线段对应的光斑数;

(5) 由光斑尺寸确定上下特征线对应的加工轨 迹点,并在对应轨迹点之间(即环带横截线)分别确 定上下弧段及斜线段的轨迹点及加工法向:

(6) 以上特征线轨迹点为第一排加工轨迹,顺 次首尾连接中间各排轨迹点及下特征线轨迹点,即 可得到环带最终的加丁轨迹。

图 6 是一个实际环带的加丁轨迹图。



图 6 环带轨迹图

## 结束语

环带是大型汽车覆盖件模具表面较常见的一种 曲面类型。实际环带的复杂性决定了完全通过测量 来确定环带精确模型并进行轨迹规划有很大难度。 结合工艺要求,在环带特征线测量及环带数学模型 分析的基础上得到环带的近似模型。(下转第 226 页)



图 8 不同材料的激光焊接阈值

通过上述各种铝合金 Nd: YAG 激光焊系统实验,得出板厚 1mm 铝合金激光焊接的优化参数为: 激光功率 Pw = 2250W、离焦量 f = 0、焊接速度 V = 5~6m/min、送粉量 5~8g/min、送粉枪与光轴成  $40~60^{\circ}$ ;而 2mm 厚的试板最佳速度范围为 3m~ 4m/min。

5. 焊接接头的强度

采用填充粉末的激光焊接技术,有效地控制了 铝合金的焊接性问题,提高了焊缝的质量。

对于一般熔焊方法,铝合金的焊接除了焊缝强 度降低之外,热影响区也会出现软化现象。对于冷 作硬化处理的不可热处理强化铝合金,热影响区的 软化是再结晶所致,而对于时效处理的铝合金,热影 响区的软化则主要是由于过时效。这些都是熔焊条 件下不可避免的现象。但是,对于激光焊接来说,由 于其焊接速度高,一方面热影响区极小,另一方面热 作用时间很短,所以,热影响区的软化对拉伸强度的 影响不大。

铝合金焊接接头拉伸强度实验结果显示,2219

的抗拉强度为 145.1~147.7 Mpa、2024 的抗拉强度 为 162.5~164.2 Mpa、LF3 的抗拉强度为 226.5~ 229.2 Mpa、6061 的抗拉强度为 117.2~118.7 Mpa。 上述 4 种铝合金拉伸试样断裂全部发生在母材;而 对于一般认为无法采用熔焊的 7075 铝合金,采用填 充粉末的激光焊接,焊后不经热处理,填粉试样抗拉 强度为:366 Mpa - 377 Mpa,不填粉试样抗拉强度 平均值为 315 MPa。填粉试样比不填粉增加强度约 15%,平均强度达到母材的 78%。

#### 结论

1) 采用 He: Ar = 4:1 左右的混合气作为焊接
 时的保护气取得了最佳的保护效果;

2)试板背面保护气对铝合金激光焊接是重要
 的,采用 He 气或 Ar 气均可;

 高速摄像显示,采用填充粉末的激光焊接过 程比没有填充粉末的稳定,含有 AlSi12 合金粉末的 焊缝没有发现热裂纹;

4)采用填充粉末、激光焊接优化工艺参数获得
 的 2219、2024、LF3、6061 等铝合金试件拉伸强度实
 验时断裂都发生在母材一侧;

5) 采用填充粉末的 7075 铝合金激光焊接,其 焊缝成型良好,焊后不经热处理,接头抗拉强度达到 了母材的 78 %。

#### 参考文献

- [1]Arata, A. et al, Transactions of JWRI Osaka University, Japan 11, 1987
- [2] A Matsunawa et al,  $CO_2$  laser weldability of aluminium alloys:effect of welding conditions on melting charicristics. 1998,  $12(7): 7 \sim 10$
- [3]陈铠等,激光杂志. 2000,21:45-48.
- [4]李力钧,现代激光加工及其设备,北京理工大学出版社, 1993
- [5]肖荣诗,博士学位论文,北京工业大学,1997

(上接第 229 页)

这样一方面可以简化测量工作,另一方面可以通过 误差分析将误差控制在工艺允许范围之内。根据上 述方法进行环带的轨迹规划及加工,取得了良好的 效果,相应的测量及轨迹规划算法已集成到激光智 能加工系统中。

#### 参考文献

[1]周建忠 等,模具工业,2000,230(4):52

- [2] 王秀彦 等, 锻压机械, 2000, (4): 3~6
- [3]金涛 等,逆向工程技术.北京,机械工业出版社,2003
- [4] 虞钢 等, 中国专利: ZL 98101217.5, 1998
- [5] 虞钢 等,集成化激光智能加工工程.北京:冶金工业出版 社,2001
- [6]涂孟夫等中国激光,2003,.30(4):364
- [7]刘荷辉等,中国机械工程,14(17):1444
- [8]涂光祺,冲模技术.北京,机械工业出版社,2003

226

2