

了基于 Kriging 模型的机构优化方法。通过分析激光拼焊装备定位、夹紧机构性能要求,提出了激光拼焊定位、夹紧机构性能评价模型,为评价和分析激光拼焊定位、夹紧机构提供了支撑工具。在激光拼焊定位、夹紧机构性能评价模型中重点介绍了激光拼焊误差建模基本理论,研究了基于改进的多体系统误差建模方法,提高了建模精度。

第3章 激光拼焊定位、夹紧机构研究

3.1 引言

激光拼焊装备是一个复杂的系统,其中定位、夹紧机构是激光拼焊系统的核心,其结构决定整个拼焊系统的性能。按照机构学和激光焊接的观点,激光拼焊系统可以分为连续型和非连续型。连续型激光拼焊要求激光头一直处于焊接状态,而一般的激光拼焊设备激光头不是一直出光。目前激光拼焊装备大多数是非连续激光拼焊系统,它基于传统定位、夹紧机构技术进行设计具有可靠性高等优点,本章主要以中科院沈阳自动化所研制的全自动激光拼焊生产线为例,详细分析激光拼焊生产线定位、夹紧机构原理及关键技术。

本章所研究的激光拼焊系统主要由以下几部分构成:控制系统、定位压紧机构、焊接机构、上、下料机构和侧向出料机构。

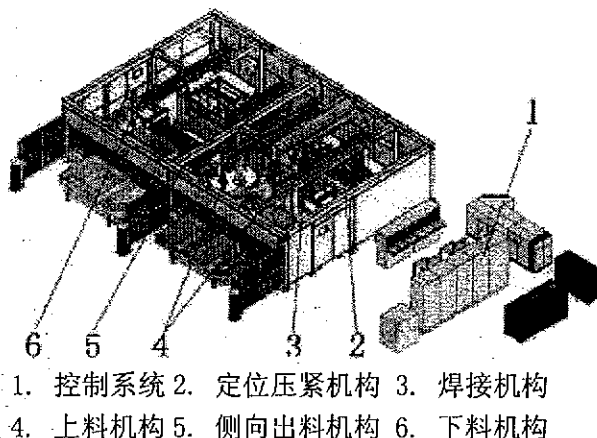


图3-1 全自动激光拼焊机构简图

Fig 3-1 Schematic diagram of automatic tailored blank laser welding machine

3.2 上下料机构

上下料机构主要由二自由度直线机器人、上、下料架和吸盘等组成。直线机器人机构自由度少,抓取板材时是悬臂结构,刚度较低,稳定性差,影响上料精度,因此其可靠性和适应性比较差,并且在运行时噪声比较大(90 分贝)。

3.3 激光拼焊定位机构

3.3.1 激光拼焊定位机构原理

定位驱动装置采用了吸盘进行,如图 2-4 所示,吸盘具有两个自由度,驱动板

材完成前定位和侧定位。定位时,吸盘通过板材表面施加驱动力使板材完成定位,因此对板材形状和大小没有限制,只要合理设计吸盘间距就可以,吸盘与板材之间是柔性连接,在受到较大阻力时可以相对滑动,这种结构可以降低在定位过程中板材弯曲变形,对定位机构运动精度要求也降低,因此这种定位驱动方式柔性较大。

翻转式定位机构,被焊接两块板分别通过两组翻转式定位销定位,定位完成后,定位销翻下,两块板同时向焊缝中心方向运动进行对中。前面分析过了这种定位方式定位精度较低,因为定位精度是板材自身直线度误差、定位销误差、两组定位销位置关系误差以及对中误差等的和,定位步骤过多,积累误差较大。

定位机构设计的关键因素是:适应性,定位精度。

由于激光光斑小,激光光斑与焊缝的相对位置精度要求比较高,如何将对接焊板材进行精确定位并将间隙控制在 0.08mm 以下是激光拼焊的一个难点^[156]。激光拼焊中定位机构精度对提高焊接质量有重要意义。

激光拼焊定位系统包含被焊板材、定位销、支撑单元和压紧单元。定位系统主要功能之保证薄、厚板材位置关系,这里最关注的是 x 向与 z 向定位精度。

3.3.2 激光拼焊定位机构适应性评价

定位机构适应性从两个角度来考虑,一个是对板材形状的适应性,一个是对板材焊缝长度适应性。

由于采用吸盘进行定位驱动,因此原理上是可以适应任何形状的异形料片,但是由于吸盘位置和机构尺寸的影响,要求板材面积大于吸盘面积保证吸附,另一个是板材最小宽度大于 300mm。

由于定位机构对板材焊缝长度上的适应性受到龙门架宽度影响,因此最大焊缝长度为 1650mm。

从以上分析可知此定位机构对于短焊缝异形料片适应性比较好,适合小规格板材激光拼焊。但是对于大尺寸板材适应性比较差。

3.3.3 激光拼焊定位机构精度

定位机构精度是评价定位机构性能最主要的因素。激光拼焊中,最关心的是 x 向和 z 向定位精度, z 向定位精度一般用错边量来评价。定位精度受到板材自身物理特性、定位过程中板材变形、夹紧机构以及夹紧力、焊接热变形等的影响。

3.3.3.1 板材自身物理特性以及定位销定位精度

板材自身物理变形、直线度误差和定位销自身精度是产生定位误差的直接原因。

定位销自身直线度误差为 Δa 是系统误差, 板材焊接边直线度误差为 Δb 是随机误差, 它跟板材厚度和剪板机精度有关。我们抽取一定数量的板材样本进行测量, 得出通过同一剪板机落料的相同板厚板材的 Δb 近似服从 $\Delta b \sim (\mu'_1, \sigma_1')$ 高斯分布(图 3-2)。因此 $\Delta E_{\text{定位销}}(n)$ 近似服从 $\Delta E_{\text{定位销}} \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 高斯分布。测得板材直线度样本为 $\Delta b_1, \Delta b_2, \Delta b_3, \dots, \Delta b_m$, 则

$$\mu_1 = \Delta a + \frac{\Delta b_1 + \Delta b_2 + \dots + \Delta b_m}{m} = \Delta a + \frac{\sum_{r=1}^m \Delta b_r}{m} \quad (3-1)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_r (\Delta b_r - \mu_1')^2}{m}} \quad (3-2)$$

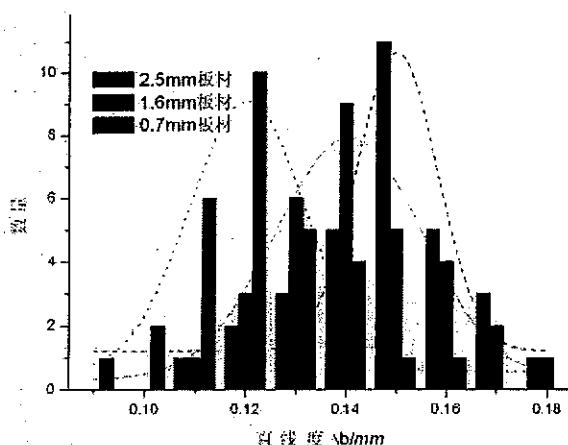


图3-2 长度为 500mm 不同板厚板材直线度分布直方图

Fig 3-2 Straightness of different thickness sheets

板材自身物理变形主要对 z 向定位误差产生影响。板材变形主要表现为两种形式: 一种是绕 x 轴(焊缝方向)的变形, 第二种是绕 y 轴板材的变形, 板材的变形主要是这两种形式或者这两种变形的综合。

由板材变形引起的错边可以表示为

$$M_{bd} = M_{bdx} + M_{bdy} = M_{bdx} + R_y - \sqrt{R_y^2 - l^2} \quad (3-3)$$

式中: M_{bd} 为板材变形引起的错边; M_{bdx} 为绕 x 轴变形引起的错边, 通过有限元方法确定; M_{bdy} 为绕 y 轴变形引起的错边, 通过几何方法确定。

3.3.3.2 定位过程中板材变形引起的定位误差

定位时, 吸盘驱动板材进行定位, 由于板材具有易变形的特点, 当板材前端有微小变形(向上或向下)时, 板材在吸盘驱动力的作用下变形增大, 随后压紧机构压紧, 定位销翻下后由于板材变形有恢复的趋势, 由于压紧机构作用板材不能向后运动所以板材会向前延展导致定位误差产生。板材变形引起的定位误差与板材厚度有关, 随着板厚衰减, 同一厚度板材所产生的误差 $\Delta E_{h_j \text{ 变形}}(n)$ 服从高斯分布

分布 $\Delta E_{h_j \text{ 变形}} \sim N(\mu_{2j}, \sigma_{2j})$, μ_{2j}, σ_{2j} 通过统计学方法确定, 因此不同厚度板材误差为

$$\Delta E_{\text{变形}}(h_j) = \Delta E_{h_j \text{ 变形}} \quad (3-4)$$

3.3.3.3 夹紧机构以及夹紧力对定位精度的影响

由于压紧力由气缸产生, 通过杠杆方式传递给弹簧, 弹簧通过压块进行压紧, 但板厚不同时杠杆施加力的方向也随之发生变化, 同时压紧力跟板厚成正比, 所以不同厚度板材压紧时作用在板材和支撑底板上的作用力大小和方向不同 (如下图所示), 引起的支撑底板在 x 和 z 向发生变形也不同, (如表 3-1 所示), 因此, 压紧变形引起的定位误差是一个随板厚变化的函数 $\Delta E_{\text{压紧}} = g(h)$ 。下面确定 $g(h)$ 具体表达式。

设板厚为 h_a 时 F_a 垂直作用于支撑底板, 当板厚为 h_j 时, F_j 与垂直方向夹角为

$$\theta_j = \frac{h_j - h_a}{l} \quad (3-5)$$

沿水平方向和垂直方向的分力分别为:

$$F_{jx} = F_j \frac{h_j - h_a}{l} \quad (3-6)$$

$$F_{jz} = F_j \frac{\sqrt{l^2 - (h_j - h_a)^2}}{l} \quad (3-7)$$

其中, $j=1, 2, \dots$

$$F_j = F_a + k(h_j - h_a) \quad (3-8)$$

其中, k 为压紧弹簧倔强系数

研究 x 向定位精度, 可知

$$F_{jx} = F_j \frac{h_j - h_a}{l} = (F_a + k(h_j - h_a)) \frac{h_j - h_a}{l} \quad (3-9)$$

可以通过理论计算和有限元分析的方法, 确定不同厚度板材下, 压紧变形引起的误差, 由于支撑底板的结构特点, 理论计算比较复杂, 这里采用有限元分法确定。设厚度为 h_j 的板材, 支撑底板在沿 y 轴方向变形为 $g_{jx}(y)$, 取

$$g_{jx} = \max(g_{jx}(y)) \quad (3-10)$$

因此

$$\Delta E_{\text{压紧}} = g(h_j) = g_{jx} = \max(g_{jx}(y)) \quad (3-11)$$

研究在 z 向定位精度, 在压紧时, 垂直作用在支撑底板上的力为

$$F_{jz} = F_j \frac{\sqrt{l^2 - (h_j - h_a)^2}}{l}$$

$$= (F_o + k(h_j - h_a) \frac{\sqrt{l^2 - (h_j - h_a)^2}}{l}) \quad (3-12)$$

其中, $j=1, 2, \dots$

在作用力 F_{jz} 作用下支撑底板在 z 向变形为 $M_{F_{jz}}(y)$ 。

设前、后侧板材厚度分别为 h_j 与 h_k , 在压紧状态下, 支撑底板平面度为

$$\begin{aligned} M_p &= M_{p\text{静}} + (M_{F_{jz}}(y) - M_{F_{kz}}(y)) \\ &= p(y) + (M_{F_{jz}}(y) - M_{F_{kz}}(y)) \end{aligned} \quad (3-13)$$

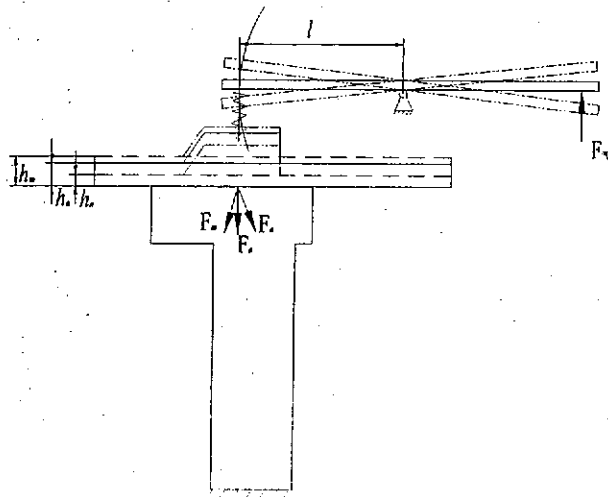


图3-3 压紧变形示意图

Fig 3-3 Schematic diagram of the deformation during clamping

表 3-1 夹紧力引起支撑底板变形

Table 3-1 Plate deformation caused by clamping force

位置 板厚 (mm)	前侧支撑板 z 向变形(0.01mm)			前侧支撑板 x 向变形(0.01mm)			气压 (0.1MPa)
	起始端	中间	末尾端	起始端	中间	末尾端	
0	-7	-8	-6	-1	-3.5	-2	5.52
0.8	-8	-10	-7	1.5	3	0.5	
1.6	-10	-12	-9	4.5	7	4	
3	-13	-15	-10.5	7	9	6.5	
0	-4	-5	-3.5	-1	-2.5	-1.5	3.25
0.8	-5	-8.5	-4	0	1	0.5	
1.6	-7	-9	-6	2.5	5	2.5	
3	-7.5	-12	-8.5	5	7	3.5	

压紧力大小和均匀性是影响错边的一个重要因素。压紧力过小不能有效控制板材变形, 容易发生错边; 压紧力过大对系统的结构刚度要求比较高, 同时导致其它未知情况产生。因此选择合理的压紧力范围对有效控制错边非常重要。压紧力

均匀性主要包括压板之间压紧力均匀性和单个压板压紧力均匀性。这里引入不均匀因子 $e(y)$ 来修正不同位置的压紧力。

3.3.3.4 对中精度

前、后定位销的平行度误差以及对中运动过程引起的误差在对中过程中将会反映到焊缝的位置精度上。对中运动方向是沿 x 方向，并且前后对中装置均有运动过程，因此将在六个自由度方向产生误差，这里主要分析沿 x 向误差，对中误差可以表示成如下形式

$$\Delta E_{\text{对中}} = \Delta c + \Delta d \quad (3-14)$$

$\Delta E_{\text{对中}}$ 是系统误差。其中， Δc 为前、后定位销平行度， Δd 为对中运动在 x 向引起的误差，由挡块位置精度决定。下面介绍 Δc 确定方法。

首先测量前、后定位销在 $t_1, t_2, \dots$ 处 x 方向的位置分别为 $(o_1, o_2, \dots)$ 和 $(p_1, p_2, \dots)$ 。然后根据最小二乘法确定设前、后定位销直线方程，设前、后定位销直线方程分别为 $y_1 = a_1 t + b_1$ 和 $y_2 = a_2 t + b_2$ ，且满足 $M = \sum_{i=1}^n [y_i - (at_i + b)]^2$ 最小，得到 a_1, b_1, a_2 和 b_2 的表达式^[157]

$$a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i o_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n o_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2}, \quad b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n o_i \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n t_i o_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (3-15)$$

$$a_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i p_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n p_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2}, \quad b_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n p_i \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n t_i p_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (3-16)$$

由(3-15)和(3-16)确定 $y_1 = a_1 t + b_1$ 和 $y_2 = a_2 t + b_2$ 的具体表达式，从而求得 Δc 为

$$\begin{aligned} \Delta c &= (t_n - t_1) \frac{1}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \left[\left(n \sum_{i=1}^n t_i o_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n o_i \right) - \left(n \sum_{i=1}^n t_i p_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n p_i \right) \right] \\ &= (t_n - t_1) \frac{1}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \left[n \left(\sum_{i=1}^n t_i o_i - \sum_{i=1}^n t_i p_i \right) - \sum_{i=1}^n t_i \left(\sum_{i=1}^n o_i - \sum_{i=1}^n p_i \right) \right] \end{aligned} \quad (3-17)$$

根据公式(3-17)，进行测量，得到前、后定位销直线度如下图 3-4 所示。

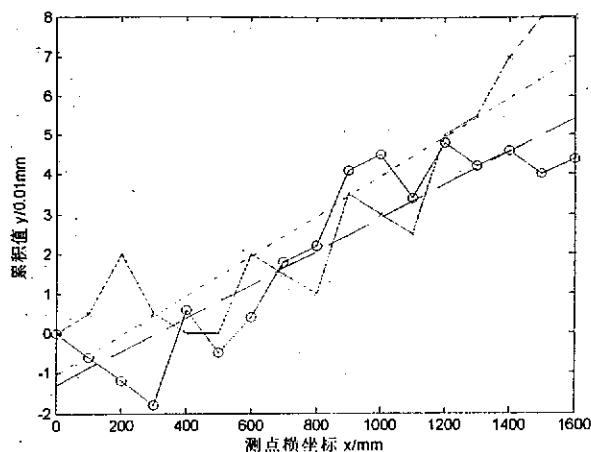


图3-4 定位销直线度测量结果

Fig 3-4 Straightness of positioning pins

3.3.3.5 焊接变形

焊接变形也是影响错边的一个重要因素,通过对焊接前后错边曲线的分析(图3-5),可以看出焊接后错边量增大。近几年随着计算机的发展,人们提出了数值模拟技术对焊接变形进行研究,但是在高温时对材料性能认识不足,计算过程过于复杂并且累积误差较大难以保证精度^[158]。这里采用经验公式对焊接变形引起的错边进行估计

$$M_{after} = k(h_j, h_k, F)M_{before} \quad (3-18)$$

式中: M_{after} 为焊接后错边; M_{before} 为焊接前错边; $k(h_1, h_2, F)$ 为焊接错边放大函数; h_j 和 h_k 分别表示薄板和厚板厚度; F 表示压紧力。

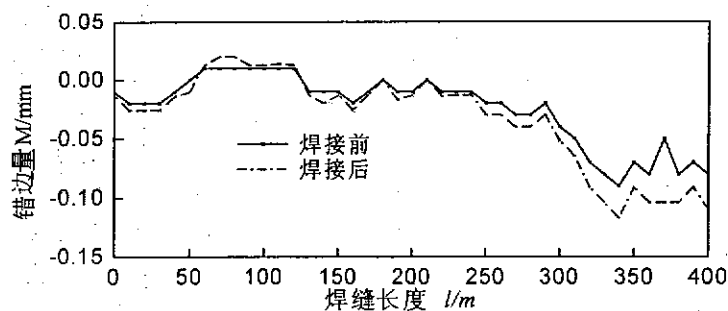


图3-5 焊接前后错边

Fig 3-5 Mismatch before and after welding

3.3.3.6 误差模型

对于 x 向误差模型,由上分析可以得出 x 向定位误差即包含了随机误差也包含了系统误差,由于各个随机误差之间关系是相互独立的,根据误差合成公式(2-10)确定定位误差表达式如下

$$\Delta E_{\text{定位}} = \left(\sum |\Delta E_{\text{随机}}|^2 \right)^{1/2} + \Delta E_{\text{系统}}$$

$$= \sqrt{\Delta \bar{E}_{\text{定位销}}^2 + \Delta \bar{E}_{\text{变形}}^2} + \Delta E_{\text{压紧}} + \Delta E_{\text{对中}} \quad (3-19)$$

定位误差是板材厚度的函数，因此

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{定位}}(h_j) &= \left(\sum |\Delta E_{\text{随机}}|^2 \right)^{1/2} + \Delta E_{\text{系统}} \\ &= \sqrt{\Delta \bar{E}_{\text{定位销}}^2 + \Delta \bar{E}_{\text{变形}}^2(h_j)} + \Delta E_{\text{压紧}}(h_j) + \Delta E_{\text{对中}} \end{aligned} \quad (3-20)$$

也可写成

$$\Delta E_{\text{定位}}(h_j) = \Delta E_{\text{压紧}}(h_j) + \Delta E_{\text{对中}} + \mu_1 + \mu_2(h_j) \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^1(h_j)} \quad (3-21)$$

对于 z 向误差即错边，建立其数学模型为

$$M = k(h_j, h_k, F)(M_{\text{bdr}} + e(x)M_F + M_p) \quad (3-22)$$

3.4 激光拼焊夹紧机构

3.4.1 激光拼焊夹紧机构原理

夹紧机构采用了传统的压块压紧机构（如图 3-6 所示），它主要由施力源、中间传输机构、弹簧和压板构成。采用了杠杆增力原理。压紧力由气缸产生通过杠杆传递给弹簧，弹簧通过压块进行压紧，它的优点是可以通过杠杆可以增加压紧力，缺点是翻转式压紧机构不能保证压紧力垂直作用在板材上，由于压紧力比较大，随着板厚不同杠杆施加力的方向也随之发生变化，支撑底板在 x 和 z 向发生不确定的变形使得系统刚度降低，同时，压紧横梁是两端简支机构横梁变形大，影响压紧力的均匀性，从而使得系统变形具有不确定性。

夹紧机构作用是保证定位精度以及矫正板材变形，因此夹紧机构对机构精度的影响以及夹紧力的大小是夹紧机构设计的关键因素。

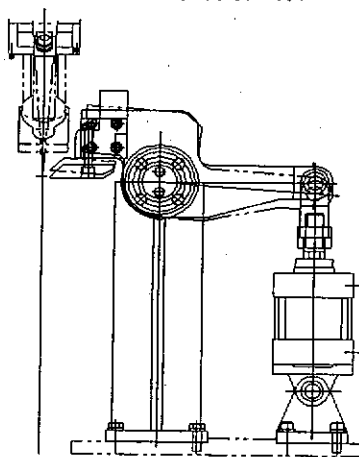


图3-6 夹紧机构示意图

Fig 3-6 Diagram of the clamping mechanism

3.4.2 夹紧力确定

在激光拼焊生产线中,压紧力的作用主要有两个:一是保证定位精度,二是控制板材变形。 $F_{\text{薄板}}$ 与 $F_{\text{厚板}}$ 是在焊接装配时,为了保证安装精度,消除它们自身物理变形的最小力。板材自身物理变形主要为波浪变形和圆形(椭圆形)鼓包,对于板材的圆形鼓包(半径为 r),可以看成周边固定的板材在均布载荷 q 作用下形成的弯曲板,由圆形薄板弹性曲面微分方程^[131, 159]

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right) \right) = \frac{q}{D} \quad (3-23)$$

得到均布载荷 q 作用下,方程的解为

$$w = A_0 + B_0 r^2 + C_0 \ln r + D_0 r' \ln r + \frac{qr^4}{64D} \quad (3-24)$$

因为在 $r=0$ 处,挠度和内力为有限值,所以公式(3-24)中 $C_0 = D_0 = 0$,根据边界条件

$$(w)_{r=r_a} = 0, \quad \left(\frac{dw}{dr} \right)_{r=r_a} = 0 \quad (3-25)$$

得到

$$A_0 = \frac{qr_a^4}{64D}, \quad B_0 = -\frac{qr_a^4}{32D} \quad (3-26)$$

将(3-26)代入(3-24)得到圆心处最大变形为

$$f = \frac{qr_a^4}{64D} \quad (3-27)$$

式中 w ——薄板变形

q ——均布载荷,且 $q = \frac{F_{\text{鼓包}}}{\pi r_a^2}$

$F_{\text{鼓包}}$ ——作用在板材上的压力

D ——板材的圆柱刚度,且 $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)}$

E ——板材的弹性模量

δ ——板材厚度

ν ——板材的泊松比,这里取 $\nu = 0.3$

将 q 和 D 代入(3-27),可得

$$F_{\text{鼓包}} = \frac{18fE\delta^3}{r_a^2} \quad (3-28)$$

通过试验可以测得 f, r_a 值, 即可利用(3-27)式得到 $F_{鼓包}$ 值。

对于波浪变形可以认为是两边固定的矩形板在均布载荷 q 作用下产生的变形。设定矩形板边长分别为 a 和 b , 长度为 b 的两对边固定, 由薄板的弹性曲面微分方程^[159-165]

$$\frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)} \nabla^4 w = q \quad (3-29)$$

可以求解出板材上任一点的变形 w

式中 w ——薄板变形

q ——均布载荷

E ——板材的弹性模量

δ ——板材厚度

ν ——板材的泊松比, 这里取 $\nu = 0.3$

根据边界条件, 解得板任意点变形

$$f = \sum_{m=1}^{\infty} \left[A_m ch \frac{m\pi y}{a} + B_m \frac{m\pi y}{a} sh \frac{m\pi y}{a} + C_m sh \frac{m\pi y}{a} + D_m \frac{m\pi y}{a} ch \frac{m\pi y}{a} + f_m(y) \right] \sin \frac{m\pi y}{a} \quad (3-30)$$

式中: 系数 A_m, B_m, C_m, D_m 由边界条件确定。 $f_m(y)$ 是任意特解。

根据边界条件

$$(w)_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{x=0} = 0$$

$$(w)_{x=a} = 0, \quad \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{x=a} = 0$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0, \quad V_y = -D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right) = 0 \quad (y=0)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0, \quad V_y = -D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right) = 0 \quad (y=b)$$

得到板任意点变形

$$w = \frac{q\nu}{4(2\nu-1)D} \left((x^2 - ax)(y^2 - 2by) - \frac{1}{6\nu} (x^4 - 2ax^3 + a^3x) \right)$$

板材最大变形为

$$f = \frac{qv}{4(2\nu-1)D} \left(\frac{3a^2b^2}{16} - \frac{5a^4}{96\nu} \right) \quad (3-31)$$

根据实际板材变形可以得到板材的挠度 f ，从而可以确定 q 的大小，从而确定作用在板材上的压力

$$F_{\text{波浪}} = qab \quad (3-32)$$

因为(3-28)和(3-32)所计算出来的力是在弹性力学基础上得出的，若载后的应力超过屈服点，此两式的应用就失去了意义。为此，还要验算板材变形最大点的应力

$$\sigma = \frac{3}{8} \frac{qr^2}{\delta^2} (1+\nu) \quad (3-33)$$

将 $q = \frac{F_{\text{鼓包}}}{\pi r_a^2}$ 、公式(3-28)代入(3-33)得

$$\sigma_{\text{鼓包}} = \frac{3}{8} \frac{F_{\text{鼓包}} r_a^2}{\pi r_a^2 \delta^2} (1+\nu) = \frac{27}{4} \frac{F_{\text{鼓包}} f E \delta}{\pi r_a^2} (1+\nu) \quad (3-34)$$

由(3-34)可以计算出鼓包中心应力值 $\sigma_{\text{鼓包}}$ ，若该应力值超过屈服极限 σ_s ，则此时的 $F_{\text{鼓包}}$ 表示成

$$F_{\text{鼓包}} = \frac{8\pi\sigma_s\delta^2}{3r_a^2(1+\nu)} \quad (3-35)$$

同理，波浪变形最大应力确定 $F_{\text{波浪}}$ 。

取 $F_{\text{鼓包}}$ 和 $F_{\text{波浪}}$ 的最大值确定 $F_{\text{薄板}}$ 与 $F_{\text{厚板}}$ ，即

$$F_{\text{薄板}} = \max(F_{\text{薄鼓包}}, F_{\text{薄波浪}}); F_{\text{厚板}} = \max(F_{\text{厚鼓包}}, F_{\text{厚波浪}}) \quad (3-36)$$

3.5 激光拼焊焊接机构

3.5.1 机构原理

全自动激光拼焊系统采用了三自由度直角运动机构，如下图 3-7 所示，其中 y 向运动机构是主要运动机构，完成激光焊接任务， z 向运动主要完成离焦量的调节， x 向运动机构调节光斑偏移量。此外激光头上安装焊缝跟踪系统，具有一个小范围的 x 向运动机构，焊接中，根据实际焊缝位置实时调节激光头运动轨迹。可以看出，激光头运动对焊接质量影响比较大，机构运动精度受到结构刚度、运动轴之间垂直度、温度等影响造成离焦量和偏移量不准确。

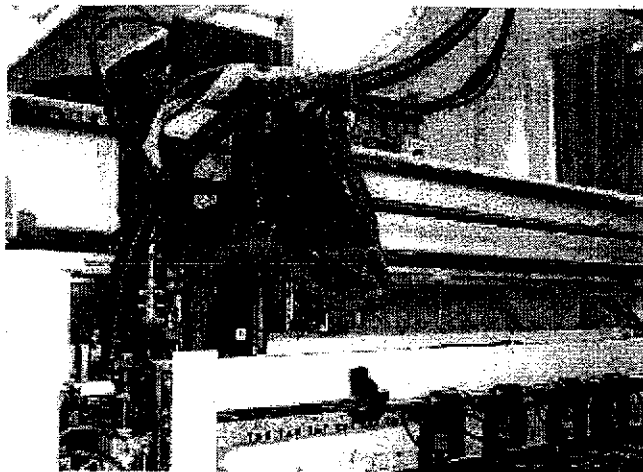


图3-7 激光焊接机构

Fig 3-7 Laser welding mechanism

3.5.2 焊接机构精度建模

这里在基于多体系统误差建模基础上引入了位置误差传递函数概念,将主要误差用误差传递函数进行描述;根据误差建模方法对激光拼焊生产线运动误差进行了建模;采用激光跟踪仪对系统的误差进行检测,并将测量结果与仿真结果进行对比。

3.5.2.1 焊接机构运动误差建模

根据第二章里介绍的多提系统理论对激光拼焊运动机构进行误差分析和建模。激光拼焊生产线由4个运动轴组成,其结构示意图如图3-8所示,拓扑结构及广义坐标系如图3-9所示,低序体阵列如表3-2所示,自由度码如表3-3所示。

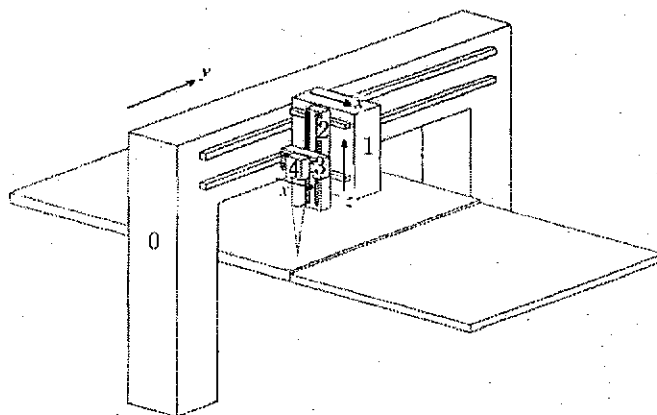


图3-8 激光拼焊生产线运动机构原理图

Fig 3-8 Schematic diagram tailored blank laser welding mechanism

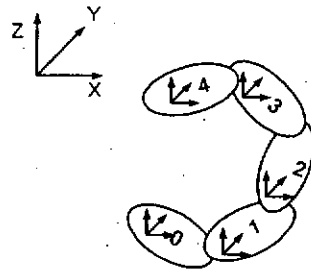


图3-9 拓扑结构及广义坐标

Fig 3-9 The topological structure and the generalized coordinate

表 3-2 低序体阵列

Table 3-2 The number arrays of low-order body

典型体 j	1	2	3	4
$L^0(j)$	1	2	3	4
$L^1(j)$	0	1	2	3
$L^2(j)$	0	0	1	2
$L^3(j)$	0	0	0	1
$L^4(j)$	0	0	0	0

表 3-3 自由度码

Table 3-3 The Dof of each body

相邻单元	x	y	z	α	β	γ
0-1	0	1	0	0	0	0
1-2	1	0	0	0	0	0
2-3	0	0	1	0	0	0
3-4	1	0	0	0	0	0

*其中“0”表示不能自由运动，“1”表示能自由运动

相邻单元 0 和 1 之间的实际运动征矩阵为

$$T_{01real} = T_{01p} \Delta T_{01pe}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{01} & \Delta\beta_{01} & \Delta x_{x1} \\ \Delta\gamma_{01} & 1 & -\Delta\alpha_{01} & \Delta y_{y1} \\ -\Delta\beta_{01} & \Delta\alpha_{01} & 1 & \Delta z_{变形1} + \Delta z_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

相邻单元 1 与单元 2 之间的实际运动特征矩阵。

$$T_{12real} = T_{12p} \Delta T_{12pe}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{12} & \Delta\beta_{12} & \Delta x_{x2} \\ \Delta\gamma_{12} & 1 & -\Delta\alpha_{12} & \Delta y_{y2} + x \cdot k_{xy} \\ -\Delta\beta_{12} & \Delta\alpha_{12} & 1 & \Delta z_{z2} + x \cdot k_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-38)$$

单元2和单元3之间的实际运动征矩阵为

$$T_{23real} = T_{23p} \Delta T_{23pe}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{23} & \Delta\beta_{23} & \Delta x_{x3} + z \cdot k_{zx} \\ \Delta\gamma_{23} & 1 & -\Delta\alpha_{23} & \Delta y_{y3} + z \cdot k_{zy} \\ -\Delta\beta_{23} & \Delta\alpha_{23} & 1 & \Delta z_{z3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

单元3与单元4之间的实际运动特征矩阵。

$$T_{34real} = T_{34p} \Delta T_{34pe}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x' \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{34} & \Delta\beta_{34} & \Delta x_{x4} \\ \Delta\gamma_{34} & 1 & -\Delta\alpha_{34} & \Delta y_{y4} + x' \cdot k_{xy} \\ -\Delta\beta_{34} & \Delta\alpha_{34} & 1 & \Delta z_{z4} + x' \cdot k_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-40)$$

假设激光焦点在坐标系4中的位置向量为 $P = (P_x, P_y, P_z)^T$, 根据以上分析得到激光焦点实际运动方程为

$$P_{real} = \left[\prod_{i=n, L^i(4)=0}^{i=1} T_{L^{i-1}(4)L^i(4)real} \right] P$$

$$= T_{01real} T_{12real} T_{23real} T_{34real} P \quad (3-41)$$

同时, 激光焦点理想运动方程为

$$P_{ideal} = \left[\prod_{j=n, L^j(4)=0}^{j=1} T_{L^{j-1}(4)L^j(4)p} \right] P$$

$$= T_{01p} T_{12p} T_{23p} T_{34p} P \quad (3-42)$$

因此, 激光拼焊生产线运动的空间误差模型为

$$E = P_{ideal} - P_{real} \quad (3-43)$$

3.5.2.2 仿真与试验

为了验证误差模型的准确性, 采用了 Leica 激光跟踪仪对激光拼焊生产线的运动精度进行测量 (图 3-10); 根据(3-43), 利用 Matlab 进行仿真, 将测量结果与仿

真的结果进行对比。

表 3-4 是各个轴的测量范围, 测量结果如图 2-9 所示。从图中可以看出, 除了个别跳点, 仿真结果与测量结果非常接近。

表 3-4 每个运动轴测量范围

Table 3-4 Motion parameters of each axis

坐标轴	x (mm)		y (mm)		z (mm)		x'(mm)	
测量范围	起始位置	终点	起始位置	终点	起始位置	终点	起始位置	终点
	3	47	320	650	2	19.4	0	9



图3-10 激光跟踪仪测量各个运动轴误差

Fig 3-10 Error measuring using laser tracker

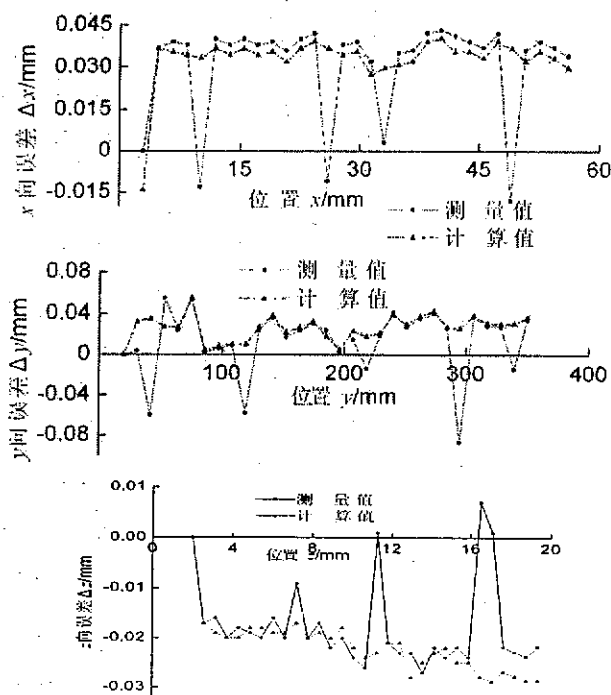


图3-11 测量结果对比

Fig 3-11 Error comparison between measurement and simulation

3.6 激光拼焊时序及效率分析

激光拼焊主要分为七个主要部分：上料、定位、夹紧、对中、焊接、出料和下料。其激光焊接效率主要由焊接部分工作时间决定。而 $t_{\text{焊接}}$ 和 $t_{\text{非焊接}}$ 受到定位、夹紧、对中和下料等时间约束，激光拼焊时序图如图 3-12，由于上料时间较其它时间短，所以对焊接效率不产生影响。定位、夹紧和对中时间与焊接时间之间的关系决定了焊接的连续性。

定位销定位总时间

$$t_p = \sum_{i=1}^2 t_{pi} \quad (3-44)$$

吸盘定位时间

$$t_s = \sum_{i=1}^2 t_{si} \quad (3-45)$$

夹紧时间

$$t_c = \sum_{i=1}^2 t_{ci} \quad (3-46)$$

对中时间

$$t_a = \sum_{i=1}^2 t_{ai} \quad (3-47)$$

焊接总时间

$$t_w = \sum_{i=1}^2 t_{wi}$$

激光焊接最大效率的条件是

$$t_{wg} \leq 0 \quad (3-48)$$

选取时序图上的一条时间闭链

$$t_{c2} + t_{e2} + t_{a2} + t_{p1} + t_{s1} + t_{c1} + t_{p2} + t_{a1} = t_{wg} + t_{w2} \quad (3-49)$$

联立(3-48)和(3-49)可得激光焊接最大效率条件为

$$t_{e2} + t_c + t_p + t_a + t_{s1} \leq t_{w2} \quad (3-50)$$

此时，激光焊接效率为

$$r = \frac{t_{w1}}{t_w} \quad (3-51)$$

否则, 激光焊接效率为

$$r = \frac{t_{w1}}{t_{e2} + t_c + t_p + t_a + t_{s1} + t_{w1}} \quad (t_{wg} > 0) \quad (3-52)$$

从以上分析可以看出, 焊接效率随着焊缝长度增加而增加, 效率曲线曲率受到公式(3-48)影响。一般对于短焊缝曲线采用公式(3-52), 当焊缝长度增加到一定程度后 $t_{e2} + t_c + t_p + t_a + t_{s1} < t_{w2}$, 此时焊接效率公式为(3-51)。 t_{w1} 和 t_{w2} 均与焊缝长度相关, 设 $kv_1=v_2$, 由于焊接速度小于激光头复位速度, 所以 $k>1$, 此时式(3-51)变为

$$r = \frac{t_{w1}}{t_w} = \frac{L/v_1}{L/v_2} = \frac{1}{1+k} \quad (3-53)$$

效率曲线如下图 3-12 所示

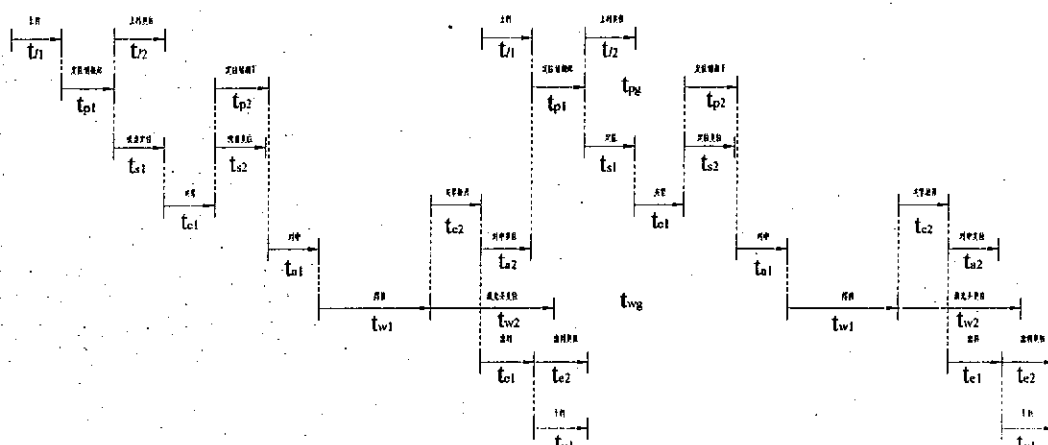


图3-12 时序图

Fig 3-12 Time chart

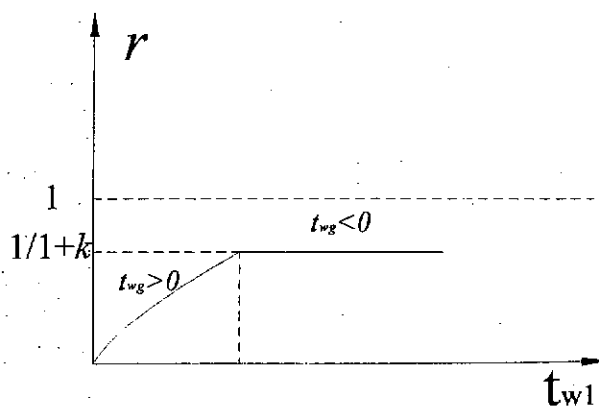


图3-13 焊接效率曲线

Fig 3-13 Welding efficiency curve

3.6.1 算例分析

激光拼焊的夹紧总时间为 $t_c=1.1s$, 定位总时间为 $t_p=2.0s$, 对中总时间为 $t_a=1.6s$, 吸盘驱动定位时间为 $t_{s1}=2s$ 。首先计算如下两组不同长度焊缝的焊接效率。

(1) 焊接材料为 2.5mm 与 1.6mm 厚度板材, 长度 500mm, 宽 500mm, 焊接速度 6.0m/min, 激光头复位速度为 $v=12m/min$, 出料时间为 $t_{e1}=0.3s$ 。
所以

$$t_{e2} + t_c + t_p + t_a + t_{s1} = 7s$$

因为 $t_{w2}=0.5m/12m/min=2.5s$, 所以激光焊接效率为

$$r = \frac{t_{w1}}{t_{e2} + t_c + t_p + t_a + t_{s1} + t_{w1}} = 41.7\%$$

(2) 焊接材料为 2.5mm 与 1.6mm 厚度板材, 长 1600mm, 宽 1000mm, 焊接速度 6.0m/min, 激光头复位速度为 $v=12m/min$, 出料时间为 $t_{e1}=0.5s$ 。

所以

$$t_{e2} + t_c + t_p + t_a + t_{s1} = 7.2s$$

因为 $t_{w2}=1.6m/12m/min=8s$, 所以激光焊接效率为

$$r = \frac{t_{w1}}{t_w} = 67\%$$

根据以上分析可知, 当板材宽度固定为 1m, 激光头复位速度为 $v=12m/min$ 时, 焊接效率转折点为焊缝长度为 1440mm, 此时, 当焊缝长度大于 1440mm 时, 效率为 67%, 当焊缝长度低于 1440mm, 焊接速度为 $v=6m/min$ 时, 焊接效率低于 67%, 选取几个典型焊缝长度得到其焊接效率如下表

表 3-5 不同长度焊缝下焊接效率

Table 3-5 Welding efficiency of different seam length

焊缝长度 $L(mm)$	200	300	400	500	800	1000	1500	1600
焊接效率 r	21.7%	29.4%	35.7%	41%	52.6%	58.1%	67%	67%

3.6.2 结论

从上表可以看出在当前状态下能达到的最大焊接效率为 67%, 并且焊接效率随着焊缝长度增加效率增高。因此本设备在进行较长焊缝焊接时设备利用率最好。对于短焊缝的板材焊接, 为了提高焊接效率采取多组焊, 变相增加焊缝长度从而提高生产效率。

3.7 线性误差补偿方法

为了减小线性定位误差提出了采用薄厚板压紧力差方法减小线性定位误差。其原理如图 3-14 所示,在定位过程中由于定位误差的存在导致焊缝存在间隙和偏移,对中过程设置一定的过盈量,在对中力的作用下薄板向后滑移将间隙消除。线性定位误差补偿方法包括两个主要参数:对中过盈量 I , 和压紧力差值 ΔF 。

前、后侧压紧力差值是实现过盈量作用机制的保证。在采用线性定位误差补偿方法时,由于前、后侧压紧力差的存在,当薄板和厚板近点接触时,薄板向后滑移,厚板位置不变。消除间隙。 F_1 和 F_2 是取得较好的定位精度的重要因素。



初始位置

近点接触

薄板向后滑移

图3-14 线性定位误差补偿方法原理

Fig 3-14 Principle of interference in alignment

在激光拼焊生产线中,压紧力的作用主要有两个:一是保证定位精度,二是控制板材变形。采用线性定位误差补偿方法,压紧力大小不仅要满足以上两个条件,还要保证对中时薄板能滑动,而厚板位置保持不变。求解前、后侧压紧力和对中力问题是一个简单的多目标最优化问题。

根据以上条件确定前、后侧的压紧力大小。

$$\text{目标函数: } F_1, F_2, F_{\text{对中}} \quad (3-54)$$

约束条件:

$$\begin{aligned} F_1 &\geq F_{\text{薄板}} \\ F_2 &\geq F_{\text{厚板}} \\ F_1 \cdot \mu &< F_{\text{对中}} \\ F_2 \cdot \mu &> F_{\text{对中}} \end{aligned} \quad (3-55)$$

$F_{\text{薄板}}$ 与 $F_{\text{厚板}}$ 是在焊接装配时,为了保证安装精度,消除它们自身物理变形的最小力。

过盈量的作用是弥补定位误差,因此定位误差决定了过盈量的具体数值,根据上面的分析结果,容易得到在采用线性定位误差补偿方法时过盈量的如下

$$I = \max(\Delta E_{\text{定位}}(h_j)) \quad (3-56)$$

根据上式得到不同板厚组合时所采用的过盈量,例如对于板厚为 0.7mm 和 1.6mm 的板材(Q235)采用过盈量为 0.32mm。

为了检验线性定位误差补偿方法在激光拼焊中的作用,进行如下对比试验。

进行两组试验,一组采用线性定位误差补偿方法,另一组不采用。试验设备为全自动激光拼焊生产线。试验材料为0.7mm和1.6mm厚的钢板(Q235),平面尺寸为400mm×500mm,焊缝长度为400mm。焊接参数为:速度:6.8m/min,功率:4kW,偏移量:0.08mm,离焦量:0.6mm。采用过盈量机制时薄板侧压紧力为 $0.58 \times 10^4 \text{N/m}$,厚板侧压紧力为 $1.2 \times 10^4 \text{N/m}$,过盈量为0.23mm。不采用过盈量时,前、后压紧力为 $1.2 \times 10^4 \text{N/m}$ 。焊后对焊缝切断面形状进行对比。

采用线性定位误差补偿方法,得到的焊接结果如图3-15a所示,焊缝平滑整齐,比较饱满。不采用线性定位误差补偿方法的一组焊接结果如图3-15b所示,由于存在间隙,在激光照射下熔融的金属量不足以填满间隙,焊缝高度不足。而且由于熔融金属由间隙两侧母材向间隙中心流动,在焊接速度过高时,容易在焊缝中心位置形成明显的结晶边界,该处容易发生裂纹和断裂等焊接缺陷。

综上所述,线性定位误差补偿方法的引入在一定程度上消除了定位误差,有效的提高了焊接质量。



a) 采用线性定位误差补偿方法焊接结果 b) 不采用线性定位误差补偿方法焊接结果

图3-15 焊接结果对比

Fig 3-15 Comparison of the welding result

线性定位误差补偿方法的提出能降低激光拼焊线性定位误差,消除焊缝间隙。非线性定位误差有多种原因引起,其中刚度是一个主要因素,要想减小非线性误差主要是提高结构以及合理施加载荷等措施。

3.8 本章小结

本章以所研制的全自动激光拼焊生产线为背景,详细介绍了激光拼焊定位、夹紧机构的设计原理及关键技术。阐述了定位、夹紧机构组成及其工作原理;从弹性力学角度并考虑板材的两种典型变形形式提出了夹紧力确定方法;建立了定位、夹紧机构误差模型;针对定位、夹紧机构特点提出线性定位误差补偿方法,有效地消除了线性定位误差;建立了激光拼焊时序图,分析了所研制的激光拼焊生产效率,提出了提高效率的方法。通过对定位、夹紧机构整体性能的评价得到

如下结论:

(1) 翻转式整体压紧机构对系统定位精度影响较大, 通过提高刚度和优化施力可以在一定程度上减低其影响。

(2) 激光拼焊定位、夹紧机构效率随着焊缝长度增加而提高, 但是最高只能达到 67%, 可以通过多组焊提高焊接效率。

(3) 激光拼焊系统定位、夹紧机构与上下料、焊接机构等位置重合是影响效率的主要因素。

(4) 此系统适合短焊缝异形板材的多组焊接。

4.1 引言

第三
拼焊, 但
效率和焊
新型高性
机构创新

定位
确定位才
于不同的
定位机构
和定位板
点, 美国
前定位机
长度。

本章
紧机构与
的激光拼

4.2 定

对于
没有间隙
厚度小、
同时, 外
拼焊。对
光拼焊
激光拼
并不能

这
准连续
其基本
序完成
传送装

第4章 新型激光拼焊定位、夹紧机构研究

4.1 引言

第三章介绍了所研制的激光拼焊生产线,它能很好实现尺寸较小的板材的激光拼焊,但是随着客户需求不断增加以及汽车技术的发展,人们对激光拼焊的焊接效率和焊缝长度提出了更高的要求,目前激光拼焊装备不能满足工业要求,研制新型高性能激光拼焊装备迫在眉睫。本章主要围绕新型激光拼焊装备定位、夹紧机构创新设计展开深入研究。

定位、夹紧机构是构成激光拼焊设备的重要组成部分,被焊接板材必须经过精确定位才能进行激光拼焊,定位机构的性能直接关系到激光拼焊的焊接质量。基于不同的原理和性能侧重点,国外提出并应用了多种结构类型的定位机构。根据定位机构的特点,基本可以分为双边定位销+双边对中式、单边定位销+单边对中和定位板连续定位式。其中单边定位销+单边对中具有结构简单、定位精度高等优点,美国、日本欧洲等很多国家研制的激光拼焊设备很多采用了这种机构,是目前定位机构的主流,但是这种结构自身的限制,影响了激光拼焊的效率以及焊缝长度。

本章结合国外先进激光拼焊定位、夹紧机构,依据空间分离的原理将定位、夹紧机构与焊接机构工作区域分开,互不影响从而实现了高效率的长焊缝异形板材的激光拼焊。

4.2 定位、夹紧机构原理

对于长焊缝板材的激光拼焊,被焊板材必须精确定位,才能保证它们的焊接边没有间隙的紧密贴合,从而焊接在一起。被焊板尤其是焊缝较长的板材,由于其厚度小、容易变形等特点,很难精确保证其在正确的位置没有间隙的定位和夹紧。同时,焊接中必须保证焊接机构或者被焊板材至少有一个是运动的才能完成激光拼焊。如果采用焊接机构运动板材固定形式,很难实现准连续激光拼焊、同时激光拼焊能实现的最大焊缝长度受到焊接机构行程的限制。目前尚没有很好的连续激光拼焊设备很好的实现长焊缝激光拼焊,虽然 Thyssen 能够实现连续焊接,但是并不能解决非线性定位误差引起的间隙。

这里根据第二章中对定位、夹紧机构构型分析,依据空间分离原理,提出的准连续型激光拼焊方案能够有效解决以上难题,实现超长焊缝的准连续激光拼焊。其基本思想是将上下料机构、定位、夹紧机构、焊接机构等在空间上分离开,顺序完成各自功能而互不影响。其机构原理是:被焊接的两块板材分别放置在两个传送装置上,两个传送装置的平面夹角为精确的 α ,每块板材被焊的边分别与相对

应的定位装置的定位面紧密贴合，两个定位面在竖直方向共面，在水平方向分别与各自的传送装置平行。板材在传输过程中完成定位，并在两个传输机构达到同一平面的时候完成对中，两个板材焊接边缘紧密贴合在一起，在板材传输、定位和对中过程中压紧轮一直对板材进压紧，保证板材位置精度。这样两块板材经过定位装置后就能紧密贴合在一起，同时，在定位装置后激光焊接装置前，增加碾压装置消除定位误差带来的间隙，这样板材就能紧密地贴合在一起完成激光拼焊。焊接机构固定在碾压轮后方，焊接机构具有焊缝跟踪和检测装置保证焊接质量。

采用焊接机构固定，板材通过传输带和辊子完成传送方式保证了准连续焊接并且可以焊接任意长度焊缝。由于定位装置不在同一高度内，所以为定位提供了足够空间。两个定位面在同一竖直平面内，并且定位步骤少，所以降低了定位误差。

按照其功能可以将此激光拼焊(图 4-1)分为以下几个主要组成机构

1. 定位、夹紧机构：

主要完成被焊板材在焊缝方向(x 向)与垂直焊缝方向(y 向)的定位。通过两个在水平方向成 α 角，竖直方向共面的定位机构完成板材在 y 向定位，通过板材传送带上的侧定位销完成对板材的侧向定位(x 向)。支撑辊和压紧辊完成对板材的压紧。

2. 准连续传输机构：

主要完成板材的传输运动。支撑辊具有主动转动功能驱动板材运动，由于其与传输方向成一定夹角，使得板材在传输时与定位装置紧密贴合保证了传输时 y 向定位精度；传输带的侧定位销保证传输过程位置侧向位置精度。

3. 碾压、焊接机构：

通过定位装置定位后，被焊接的两块板材的被焊接边已经紧密贴合在一起。由于板材自身直线度误差的存在，焊缝不可避免的存在间隙，激光拼焊对间隙的要求非常严格，要获得好的焊接质量，焊缝间隙必须控制在 0.08mm 以下。这就意味着，每块被焊接板材的直线度最大为 0.04mm ，要达到这个要求，尤其对焊缝比较长的板材，实现起来比较困难。对于 2.5m 长的板材，采用精剪板机可以达到要求，但是成本太高。因此这里增加了碾压机构，在焊接前对焊缝进行预加工，通过碾压加工，板材边缘发生塑性变形，减小间隙的宽度甚至消除间隙。这样对板材的直线度的要求就降低了。碾压后进行激光焊接，焊接头具有焊缝跟踪和质量检测装置保证焊接质量。

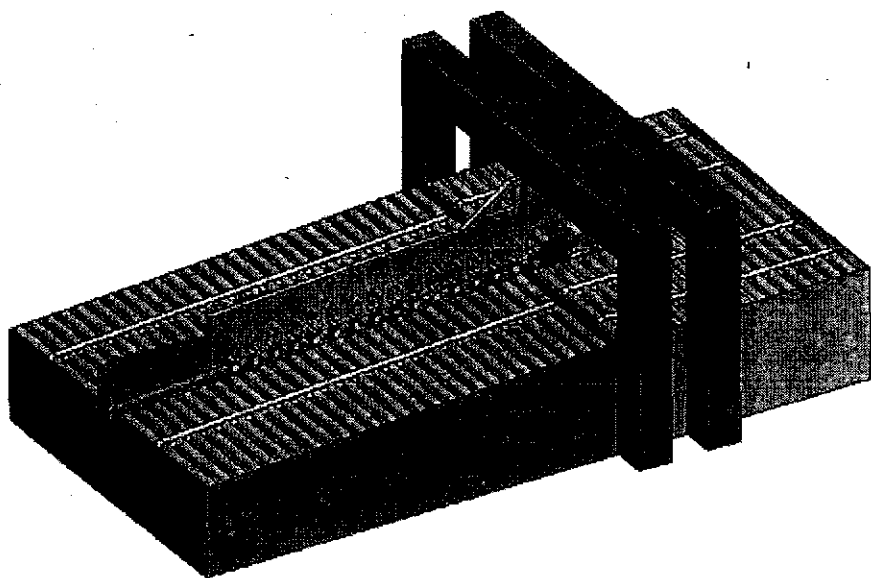


图4-1 整体结构图

Fig 4-1 General design structure

4.3 定位、夹紧机构

新型激光拼焊系统的定位、夹紧机构主要由定位装置、夹紧机构、传送带等组成。如图 4-2 所示,定位装置主要由两个不在同一平面的定位板构成,定位板的定位面可以是经过精密加工并且热处理的耐磨的平面结构,也可以是由一排可转动的圆柱体构成。平面结构容易加工但是由于定位时板材边缘与定位板滑动容易磨损从而降低定位精度。这里介绍第二种结构,如图 4-3 所示,它由可转动的圆柱体、轴以及轴孔组成。圆柱体垂直安装,轴孔为长孔,可以调节圆柱体的位置,保证所有圆柱体的在统一直线上。定位时板材通过可转动的圆柱体定位,由于圆柱体可转动,降低了摩擦,提高了定位机构的寿命。圆柱体间距不能太大,防止板材尖角卡在两个圆柱体中间。

传送带如图 4-4 所示,传送带布置在支撑辊之间,其上布置有侧定位销,并保证板材在传送过程中板材侧向位置精度以及运动速度恒定。它主要由传送带、驱动轮和侧定位销构成。侧定位销为圆柱销,安装在传送带上,可以绕自身轴线旋转,侧定位销在传送带上的位置可调,适应不同尺寸板材定位。薄板和厚板侧根据被焊接料片尺寸可以设置不同数目的传送带,所有传送带依靠同一个驱动轮驱动,保证同步性,传输带可以采用同步齿形带。

为了保证板材的传输以及传输过程中的位置精度,在板材上、下方增加了压紧轮,压紧轮位于定位装置两侧,沿焊缝方向布置,并且每个压紧轮与焊缝方向成一个夹角 β (图 4-5),这样既保证了板材向前传输也保证了在传输过程中板材受

到对中的力。如图 4-6 位于板材下方的压紧轮固定，位于板材上方的压紧轮通过气缸连接，可以上下运动完成对不同厚度板材的压紧。

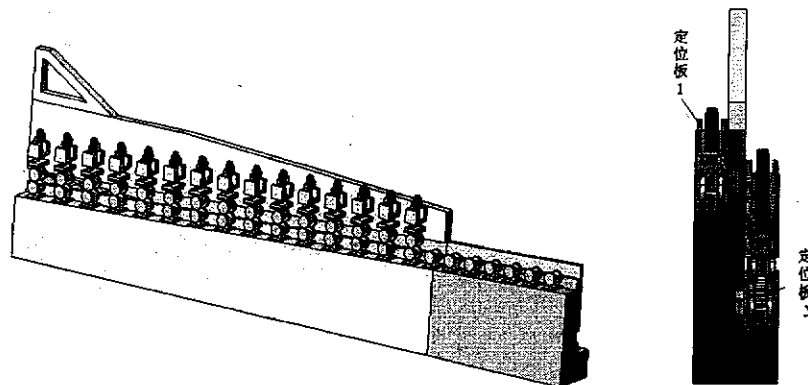


图4-2 定位机构

Fig 4-2 Quasi-continuous positioning mechanism

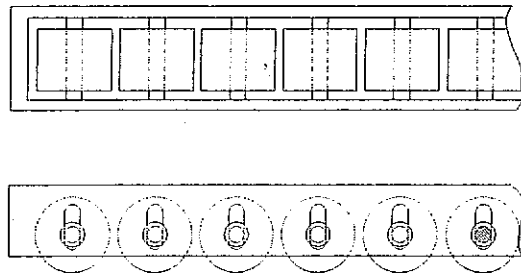


图4-3 定位板机构

Fig 4-3 Positioning mechanism

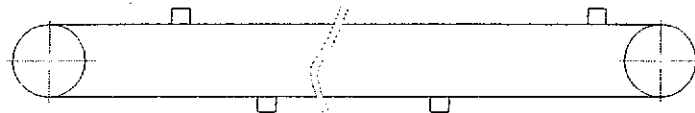


图4-4 板材传输带原理图

Fig 4-4 Schematic diagram of transmission belt

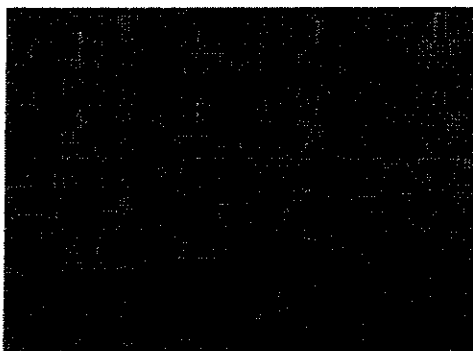


图4-5 压紧机构

Fig 4-5 Clamping mechanism

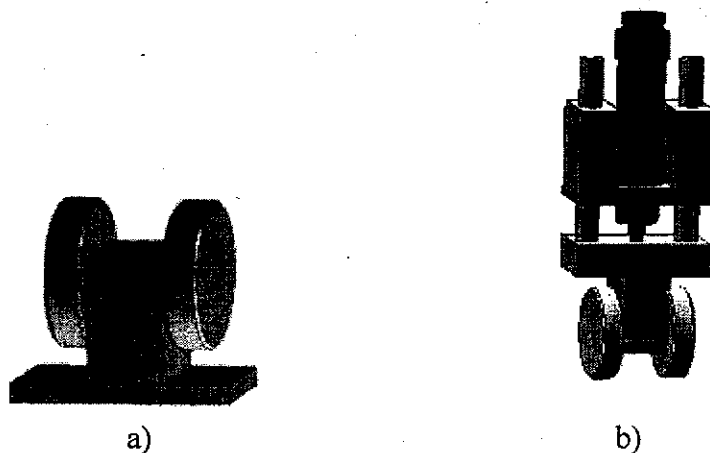


图4-6 压紧轮机构

Fig 4-6 Pressing roller

4.4 准连续传输机构

板材传输机构完成定位、焊接时板材的运动，它主要由传输工作台、压紧轮、传输带等驱动机构组成。如图 4-7 所示，传送装置由两个传送工作台构成，每个工作台主要由支撑辊构成，每个支撑辊的高度不同，两个支撑台面之间形成一个与其自身定位机构相对应的精确夹角 α ，在碾压区域两个传输工作台面达到同一高度，在传输过程中，焊缝处沿焊缝方向布置两排压紧轮，对板材进行压紧，压紧轮组成的平面与传输工作台面共面，压紧轮轴线与焊缝方向成一个夹角 β ，这样在保证板材传输过程中压紧轮给板材一个对中力。

板材传送带布置在支撑辊之间，其上有侧定位销完成对板材的侧向定位，并起到驱动板材前进的作用。如图 4-4 所示它主要由传送带、驱动轮和侧定位销构成。侧定位销为圆柱销，安装在传送带上，可以绕自身轴线旋转，侧定位销在传送带上的位置可调，适应不同尺寸板材定位。薄板和厚板侧根据被焊接料片尺寸可以设置不同数目的传送带，所有传送带依靠同一个驱动轮驱动，保证同步性，传输带可以采用同步齿形带。传送带速度等于或略大于支撑辊速度，保证侧定位销能起到定位作用。

焊接完成的板材通过出料传输机构完成焊接好板材的运输，出料传输机构同样由支撑辊构成，出料支撑辊平面与水平面成 γ 夹角。

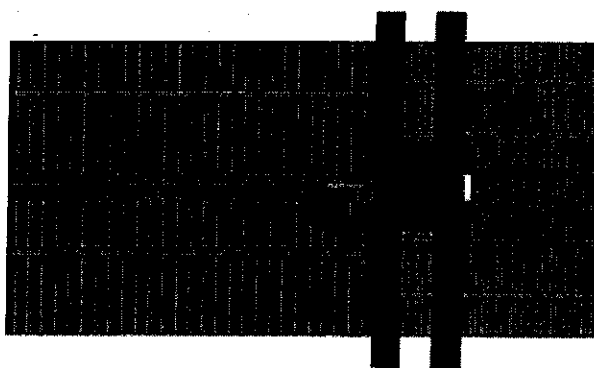


图4-7 传输机构

Fig 4-7 Transmission table

4.5 碾压、焊接机构

碾压焊接机构主要由碾压轮机构、压紧轮机构和焊接机构等组成(图 4-8)。在对中区完成对中的板材进入该区域, 由于板材自身直线度以及定位误差等原因, 焊缝不可避免的存在间隙, 为了将间隙减小到不影响焊接的范围甚至消除间隙, 采用碾压轮对焊缝进行预加工, 通过碾压轮碾压使厚板边缘发生微小的塑性变形, 使得厚板材料填补焊缝间隙从而满足焊接要求。碾压过程在板材平面内垂直焊缝方向会产生较大的分离力, 因此增加压紧机构保证碾压过程中板材的位置。由于板材的实际焊缝和理想的焊缝位置有偏差, 因此在碾压轮与激光头之间增加焊缝跟踪系统, 焊缝跟踪系统对焊缝的实际位置进行检测, 并将检测结果传给激光头 x 向伺服电机, 控制电机实时调整激光头在 x 向的位置按照实际焊缝位置进行焊接。激光头能在 z 向上下运动调节焦点位置。激光头后有质量检测传感器对焊接板材进行质量检测。在焊接处有小压紧轮对两块被焊板材进行压紧, 保证焊接处板材位置精度, 提高焊接质量。

碾压机构是焊缝精密预成型技术的关键, 为了获得较好的焊接质量, 必须将焊缝间隙消除或者控制在 0.08mm 以下, 焊缝精密预成型原理的主要思想就是采用碾压轮将厚板(或者两块板材)焊接区的部分材料发生塑性变形, 使材料沿 y 轴向沿着焊缝中心位置流动, 将间隙减小或者消除。它主要由厚板碾压轮、薄板压紧轮、托轮、支撑机构等组成(图 4-8)。通过对厚板边缘的塑性变形, 减小焊缝间隙, 从而提高焊接质量。托轮固定于板材下端, 其外圆面与板材下表面相切。拖轮固定, 厚板碾压轮、薄板压紧轮高度分别可调, 以适应不同厚度板材焊接时的碾压。下一章将对焊缝碾压预成型进行进一步深入研究。

碾压轮材料必须具有较高的强度、硬度和抗磨损性能, 一般要求表面热处理硬度 HRC62~65, 与工件材料不能粘着, 对润滑液有较好的适应性。碾压轮工作表

面不允许有划伤、刻痕、裂纹等缺陷。碾压轮可用以下材料：碳素工具钢，如 T10A，T12A 等；CrWMn，CrW5 或 GCr15 轴承钢及其它合金钢。

碾压过程中薄板与厚板之间会产生较大分离力，这要求有压紧机构保证板材位置不变，可以设计合理的厚板碾压轮界面形状，减小板材分离力，同时薄板压紧轮也能起到消除分离力的作用，单纯依靠这些措施不能完全解决这个问题，因此在碾压轮两侧增加如图 4-9 所示的压紧机构，压紧机构由四个小轮构成，并通过气缸或者油缸施加压紧力。

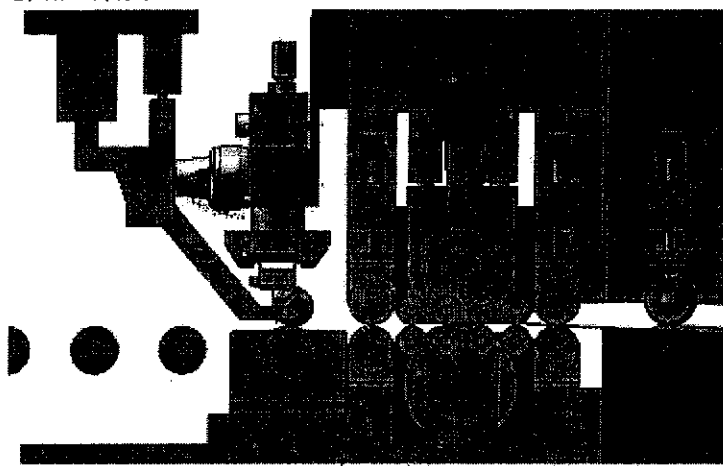


图4-8 碾压、焊接机构组成

Fig 4-8 Roller-preform and welding mechanism

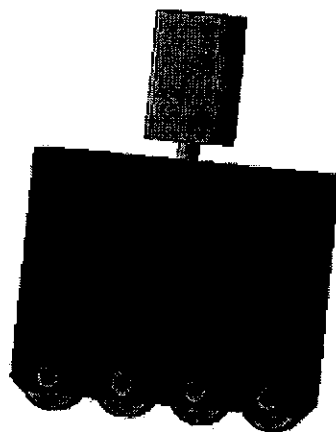


图4-9 压紧机构

Fig 4-9 Clamping mechanism

板材经过碾压后进入焊接区进行焊接，为了保证焊接质量在焊接处对称安装如图 4-10 所示的两个小压紧轮，保证焊接过程中板材的位置精度。如图所示，小压紧轮机构是一个杠杆机构，一端固定，一段通过气缸施力，小压紧轮与竖直方向成一定夹角，并可在 1 度到 10 度之间调整，保证不与激光光路干涉。小压紧轮轮缘为圆弧以适合不同厚度板材。小压轮与激光焦点位置非常接近，保证焊接点

位置精度。

焊接机构主要由激光头、焊缝跟踪及检测装置构成。采用碾压轮对焊缝进行预加工后,焊缝一般不再平直,因此需要增加焊缝跟踪系统确定实际焊缝的位置。这里在激光头前方安装与激光连接的视觉跟踪系统,视觉跟踪系统实时取焊缝图像,通过图像处理,提取偏差,将信号反馈到激光头控制系统,调整激光头位置完成焊接,激光头后方安装质量检测传感器对焊接质量进行检查。

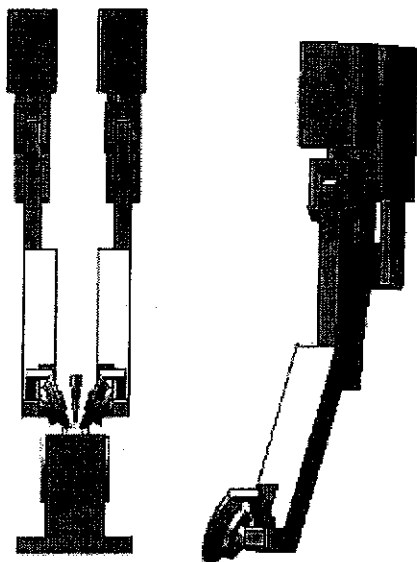


图4-10 小压紧轮机构

Fig 4-10 Small pressing roller mechanism

4.6 新型激光拼焊定位、夹紧机构与现有机构对比

普遍认为,定位销加压紧块的定位、夹紧机构是一种比较经典的结构,现有的激光拼焊装备大多采用了这种机构,虽然具体机构不同但是机构原理基本一致。主要原因有两个方面:一是定位销加压紧块这种机构具有结构简单可靠、容易实现等优点;二是很多传统制造装备很多采用了类似结构,这种机构应用上有丰富的成果可以参考。

这里依据第二章提出的激光拼焊定位、夹紧机构性能评价体系对所提出的新型激光拼焊定位、夹紧机构与现有机构进行分析与比较。

定位、夹紧机构适应性反映了激光拼焊装备的应用范围,依据所提出的激光拼焊定位、夹紧机构适应性评价方法,从焊缝长度和对异形料片适应性进行对比分析。现有激光拼焊一般采用定位销和压紧块方式,随着焊缝长度增加所需定位销和夹紧块数量和尺寸增加,结构刚度降低很快,所以焊缝长度不能太长,而新型激光拼焊定位、夹紧机构是循环结构,能够不间断的对将要焊接的板材进行定

位、夹紧,因此可以实现任意长度板材的定位和夹紧。在对异形板材适应性上,新型定位、夹紧机构适应性与 SIA 和 Soudronic 吸盘式相差不多,但是效果明显好于定位销驱动定位机构(IHI 等)。

定位精度决定焊接质量,主要取决于定位、夹紧机构精度和板材自身物理特性。在板材直线度一定的情况下影响定位精度的因素就主要是定位、夹紧机构。新型定位、夹紧机构与现有机构一样,同样存在定位机构自身误差以及压紧变形对精度的影响,但是,从新型机构具有焊缝碾压精密预成型机构,能消除非线性定位误差,同时在焊接处增加了压紧轮保证焊接质量。虽然 Thyssen 也采用了准连续传输机构和压紧轮,也声称能实现任意长度焊缝焊接,但是他并没有解决长焊缝非线性定位误差问题,因此也无法实现长焊缝激光拼焊。

定位、夹紧机构效率反映了最终的生产效率。现有机构除了 Thyssen 以外,其它定位、夹紧机构均为间歇性工作,最高效率只能达到 70%左右,新型激光拼焊定位、夹紧机构,能连续不断地进行板材的定位、夹紧,因此设备的焊接效率接近 100%。

4.7 本章小结

以新型激光拼焊定位、夹紧机构为研究对象,通过对长焊缝激光拼焊的需求进行分析,提出了一种新型激光拼焊定位、夹紧机构,对其结构和原理进行介绍,并建立了其参数化三维模型。其定位机构采用水平方向成 α 角,竖直方向共面的两个定位机构组成,板材在传输过程中完成定位和对中。为了保证板材的传输以及传输过程中的位置精度,在板材上、下方增加了压紧轮,压紧轮紧靠定位机构,位于定位装置两侧,沿焊缝方向布置,每个压紧轮与焊缝方向成一个夹角 β ,这样既保证了板材向前传输也保证了在传输过程中板材受到对中的力。位于板材下方的压紧轮固定,位于板材上方的压紧轮通过气缸连接,可以上下运动完成对不同厚度板材的压紧。采用传输带和辊子实现板材的准连续传输。通过对新型激光拼焊定位、夹紧机构的详细分析以及与现有激光拼焊定位、夹紧机构对比得到如下结论:

- (1) 所提出的新型激光拼焊定位、夹紧机构是一种原理创新、设计机构可行的新型激光拼焊定位、夹紧机构。
- (2) 该机构适应性好、焊接效率高,能够完成任意焊缝长度的异形板材的准连续激光拼焊。
- (3) 碾压预成型机构能够消除非线性定位误差带来的焊缝间隙,解决了超长焊缝激光拼焊的主要难题。

第5章 焊缝碾压精密预成型原理与实现技术

5.1 引言

焊缝碾压精密预成型是长焊缝激光拼焊最关键的技术之一,碾压过程是一个复杂的非线性弹塑性变形过程,设计碾压机构必须有相应的理论作为指导,本章主要对焊缝碾压精密预成型原理与实现技术展开研究。

激光拼焊定位误差可以分为线性定位误差和非线性定位误差两种。在短焊缝激光拼焊中,通过过盈量作用机制将线性定位误差消除后,非线性定位误差表现的不足以影响焊接质量,定位误差基本控制在要求范围之内。但是在随着焊缝长度的增加,非线性定位误差逐渐增大,对定位误差影响也越来越明显。碾压预成型技术主要是针对长焊缝中非线性定位误差提出来的,非线性定位误差是制约长焊缝激光拼焊的瓶颈,在长焊缝激光拼焊中非线性定位误差引起的间隙非常大,如果不将其消除将无法实现激光拼焊。因此提出了焊缝碾压精密预成型技术,它的基本原理是通过对焊缝处钢板施加较大压力使厚板或薄板发生塑性变形,塑性流动金属将焊缝间隙填补,从而达到消除间隙的目的。金属塑性变形需要的较大压力,因此采用连续局部塑性成型方法,即连续碾压。连续局部碾压所需碾压力较整体碾压力小对系统刚度要求低。

焊缝碾压精密预成型是一种新型加工手段,与其他精密加工技术原理不同,它是金属在外界力的作用下,表面产生连续局部塑性变形来消除长焊缝激光拼焊中定位误差。本章主要从理论和工艺两个方面对焊缝碾压精密预成型原理和实现技术进行系统研究,为焊缝碾压实现奠定理论基础。

5.2 碾压预成型数学模型

焊缝碾压精密预成型过程是在板材牵引力作用下进入碾压轮,被压缩并产生塑性变形的过程。碾压的目的是使板材边缘处断面减小而向着焊缝中心方向宽度增大,从而将焊缝间隙消除或减小。焊缝精密预成型理论就是研究和阐明碾压过程中所发生的各种现象,探明这些现象的基本规律并利用这些规律去解决碾压过程中的存在的实际问题。

正确的建立碾压过程数学模型、确定碾压力、宽展等碾压参数是设计碾压机构制定碾压工艺的依据,在生产实践中有着重要意义。

为了简化焊缝精密预成型理论的研究,首先对碾压过程附加一些假设条件:

1) 对于碾压轮:碾压轮与托轮直径相等,厚板碾压轮实际轮缘为曲线,在研究时假定轮缘为直线,用平均半径代替碾压轮的实际半径。薄板侧碾压轮和托轮轮缘为直线。三个轮轴线平行且在统一垂直平面内,碾压过程考虑轮的弹性变形。

2) 对于板材: 板材发生塑性变形时符合体积不变定律与最小阻力定律, 板材内部各部分组织和性能相同, 表面状况相同, 塑性变形发生在碾压轮与板材接触区, 托轮宽度大, 所以板材下表面不发生塑性变形。

当符合这些条件时, 碾压轮与板材接触面上的摩擦系数自然相同。但是, 上述理想的条件在实际预成型中很难同时具备, 一般仅有部分条件存在或者近似, 因为变形不可能是完全均匀的, 碾压力与摩擦力沿接触弧长度分布不可能完全均匀, 碾压轮和其它零件也不可能是完全刚性的, 都要产生变形。但是为了研究问题方便起见, 有这些假设条件是必须的。当然也会因此与实际情况有差异而产生一定的误差, 因而在使用在理想条件下建立起来的计算公式时, 要做一些必要的修正, 或者在计算过程中采用一些等效值。

在碾压过程中塑性变形并非在整个焊缝处进行, 在任一瞬间, 变形仅产生在与碾压轮接触及附近的局部区域内。为了研究方便, 采用平均高度法, 将圆弧等效成直线, 用碾压轮的平均半径代替实际半径。板材处于变形阶段的区域称为变形区。变形区的基本组成部分是碾压轮与板材接触弧入口、出口断面所限定的区域 (图 5-1 中 $ABB'A'$), 该区域称为几何变形区, 在几何变形区前后不大的区域内多少也有塑性变形产生, 成为非接触变形区。这里主要研究几何变形区, 其主要参数为: 咬入角 α , 变形区长度 l , 入口断面高度 H , 出口断面高度 h 。

碾压轮与板材的接触弧 AB 称为咬入弧, 可近似以其所对应的弦长 AB 表示。由图 5-1 所示的几何关系可知

$$\triangle ABD \sim \triangle EBA$$

$$\overline{AB}^2 = \overline{BE} \cdot \overline{BD}$$

$$\text{而 } \overline{BE} = 2R, \quad \overline{BD} = H - h = \Delta h$$

$$\text{所以 } l' = \overline{AB} = \sqrt{2R\Delta h} \quad (5-1)$$

在计算中采用接触弧的水平投影, 即变形区的长度 l 。由图 5-1 可知

$$\overline{AD}^2 = l^2 = R^2 - \overline{CD}^2$$

而 $\overline{CD} = R - \Delta h$, 所以

$$l^2 = R^2 - (R - \Delta h)^2 = 2R\Delta h - \Delta h^2$$

$$\text{故 } l = \sqrt{2R\Delta h - \Delta h^2} \quad (5-2)$$

为了简化计算, 忽略根号下第二项, 可得

$$l \approx l' = \sqrt{2R\Delta h} \quad (5-3)$$

接触弧所对应的圆心角为咬入角, 由图 5-1 可得

$$\overline{BD} = R - \overline{CD}$$

即 $\Delta h = R - R \cos \alpha$

$$\Delta h = R(1 - \cos \alpha) \quad (5-4)$$

由于 α 较小, $1 - \cos \alpha = \frac{\alpha^2}{2}$

这样公式(5-4)可以简化得到 α 的近似公式:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\Delta h}{R}} \quad (5-5)$$

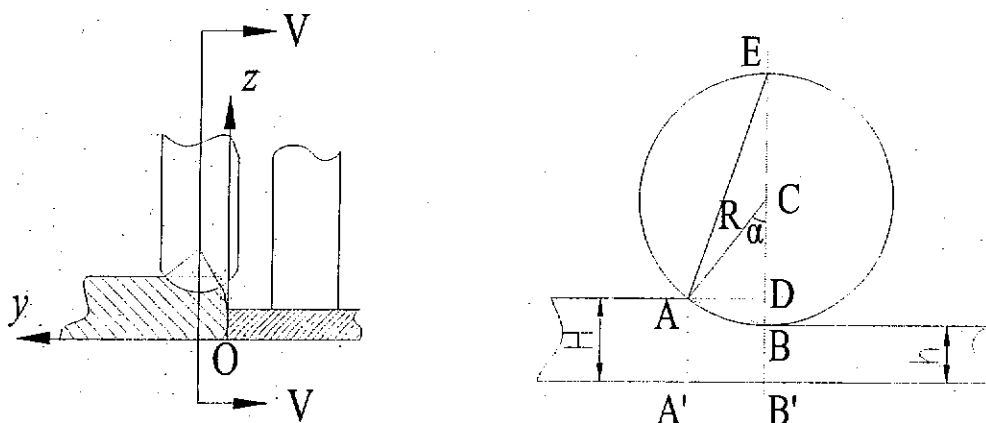


图 5-1 碾压时变形区

Fig 5-1 Diagram of the deformation

首先确定碾压轮碾压进入板材进行碾压的前提条件。因为碾压要使上表面发生塑性变形, 下表面保持不变, 板材底面与托轮最高点在同一平面上, 因此板材上表面的最高点先与碾压轮接触, 在力的作用下板材前端会发生轻微弯曲, 使得板材下表面与托轮接触, 随着碾压的进行下表面接触点 A' 沿着托轮外径逐渐上升最终到达托轮最高点, 而上表面接触点 A 开始上升直至板材弯曲回复到原来形状, 板材上表面发生塑性变形。下面从板材上下表面都刚刚与轮缘接触时开始分析, 如图 5-2 所示, 板材与碾压轮在 A 点接触, 板材在接触点受到径向压力 N 以及与 N 垂直的摩擦力 T , 方向如图所示。径向力 N 以及切向摩擦力 T 有阻止板材进入碾压轮的作用, 牵引力 F 作用促使板材被拉入碾压轮。

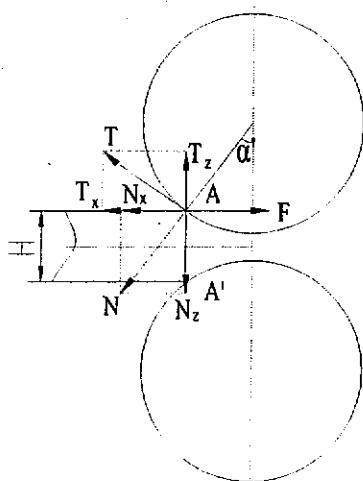


图 5-2 碾压轮对板材的作用力

Fig 5-2 Force analysis of the roller-preform

在碾压过程中, 碾压量不能太大, 否则板材不能被咬入, 而只有实现咬入并使板材继续顺利通过碾压轮才能完成碾压过程。

要判断碾压时板材能否进入碾压轮, 应将碾压轮对板材的作用力、摩擦力和牵引力进行分析。如图 5-2 所示, 作用力 N 与摩擦力 T 分解为垂直分力 N_z 、 T_z 和水平分力 N_x 、 T_x 。垂直分力 N_z 对板材起到压缩作用, 使板材发生塑性变形, 有利于板材被咬入; T_z 方向向上阻止板材受压, 不利于板材进入碾压轮。 N_x 、 T_x 与板材运动方向相反, 阻止板材被咬入。这里驱动板材运动的外力为 F , 设上表面牵引力为 F_1 下表面为 F_2 由于开始时上下受力均匀因此 $F_1 = 0.5F$ 。 N 与 T 的合力为 Q , 三个力的总合力为 P 。显然, F' 与 N_x 、 T_x 之间的关系是板材能否被碾压咬入的关键, 两者之间有如下三种情况 (图 5-3)

若 $F_1 < N_x + T_x$, $F' - T_x - N_x = -P_x$, 不能咬入;

若 $F_1 > N_x + T_x$, $F' - T_x - N_x = P_x$, 能咬入;

若 $F_1 = N_x + T_x$, 板材处于平衡状态, 是碾压轮进入的临界条件, 若原来板材水平速度为零, 则不能进入, 若原来处于运动状态, 在惯性力作用下, 可以进入。

由于 N_x 与 T_x 难以计算或者测量, 故常采用变形区的已知参数表示碾压咬入条件。由图 5-2 知

$$T_x = T \cos \alpha' = fN \cos \alpha'$$

$$N_x = N \sin \alpha'$$

将求得关系式代入, 可得

(1) $F_1 < N_x + T_x$,

$$F_1 < N \sin \alpha' + fN \cos \alpha'$$

由公式(5-4)可以看出, 碾压量 Δh 与碾压轮半径 R 、咬入角有关:

(1) 当碾压轮半径确定时, 若增加咬入角 α , 碾压量 Δh 便可增加。由于 α 受到牵引力和摩擦系数 f 限制, 所以欲增大碾压量, 必须增加牵引力或者减小摩擦系数。

(2) 当咬入角为常数时, 碾压量与碾压轮半径成正比, 故在相同摩擦系数和牵引力情况下, 增加碾压轮的直径, 是增大碾压量或者改善咬入的好办法。

(3) 若下压量不变, 增加碾压轮半径, 咬入角减小, 即可以减小牵引力或者增大摩擦系数。

板材开始碾压后, 金属与碾压轮接触表面不断增加, 假设作用在板材上的正压力和摩擦力都是均匀分布, 其合力作用在接触弧的中点, 如图 5-4 所示。随着碾压过程的逐渐进行, 碾压轮对板材作用力的作用点所对应的碾压轮的圆心角由开始咬入的 α' 变为 $(\alpha' - \delta)$, 在进入稳定碾压后, 减小为 $\alpha/2$, 而托轮与板材下表面接触点逐渐上上到托轮的最高点咬入角由 α' 变为 0。

为了便于比较, 暂且假定碾压在临界条件下进行, 在开始阶段, 合力 P 的作用方向是垂直的, 随着碾压过程的进行, $(\alpha - \delta)$ 逐渐减小, 摩擦力水平分量 $T \cos(\alpha - \delta)$ 逐渐增大, 正压力水平分量 $N \sin(\alpha - \delta)$ 逐渐减小, 合力 Q 水平分量减小

$$\begin{aligned} Q_x &= T_x + N_x = fN \cos(\alpha' - \delta) + N \sin(\alpha' - \delta) \\ &= N \frac{\sin(\alpha' - \delta + \beta)}{\cos \beta} \end{aligned} \quad (5-7)$$

合力 Q 垂直分量逐渐增大

$$\begin{aligned} Q_z &= T_z + N_z = N \cos(\alpha' - \delta) - fN \sin(\alpha' - \delta) \\ &= N \frac{\cos(\alpha' - \delta - \beta)}{\cos \beta} \end{aligned} \quad (5-8)$$

说明牵引力 F_1 降低, 同理, 作用在托轮上的合力 Q' 的分量也发生变化, Q' 水平分量减小

$$\begin{aligned} Q'_x &= T'_x + N'_x = fN' \cos(\alpha' - \delta') + N' \sin(\alpha' - \delta') \\ &= N' \frac{\sin(\alpha' - \delta' + \beta)}{\cos \beta} \end{aligned} \quad (5-9)$$

合力 Q' 垂直分量逐渐增大

$$\begin{aligned} Q'_z &= T'_z + N'_z = N' \cos(\alpha' - \delta') - fN' \sin(\alpha' - \delta') \\ &= N' \frac{\cos(\alpha' - \delta' - \beta)}{\cos \beta} \end{aligned} \quad (5-10)$$

由于垂直压力增加导致托轮支撑力 N' 增加,

随着碾压过程的进行, 碾压轮对板材作用力的作用点所对应的碾压轮的圆心角由开始咬入角 α' 变为 $(\alpha' - \delta)$, 最后变为 $\alpha/2$ 。

为了便于比较, 暂定假设碾压在临界条件下进行, 开始阶段牵引力等于 Q 和 Q' 在水平方向的分力之和, 随着 $(\alpha' - \delta)$ 逐渐减小, 正压力逐渐增大, 水平分力 Q_x 和 Q'_x 逐渐减小, 总和力 P 在水平方向出现剩余, 其水平分量为

$$\begin{aligned} P_x &= F - Q_x - Q'_x \\ &= 2(N \sin \alpha' + fN \cos \alpha') - (fN \cos(\alpha' - \delta) + N \sin(\alpha' - \delta)) - (N' \sin(\alpha' - \delta') + fN' \cos(\alpha' - \delta')) \\ &= 2N \frac{\sin(\alpha' + \beta)}{\cos \beta} - N \frac{\sin(\alpha' - \delta + \beta)}{\cos \beta} - N' \frac{\sin(\alpha' - \delta' + \beta)}{\cos \beta} \end{aligned} \quad (5-11)$$

由开始时的零而逐渐增大, 到稳定碾压阶段时

$$P_x = 2N \frac{\sin(\alpha' + \beta)}{\cos \beta} - N \frac{\sin(\alpha/2 + \beta)}{\cos \beta} - N' \frac{\sin(\alpha/2 + \beta)}{\cos \beta} \quad (5-12)$$

这说明随着碾压的进行, 水平方向的牵引力除了克服推出力外, 还出现剩余。称用于克服推出力外还剩余的牵引力称为剩余牵引力。

随着碾压过程的进行, 剩余牵引力逐渐增大, 只要板材一经咬入, 继续碾压就变得更容易。

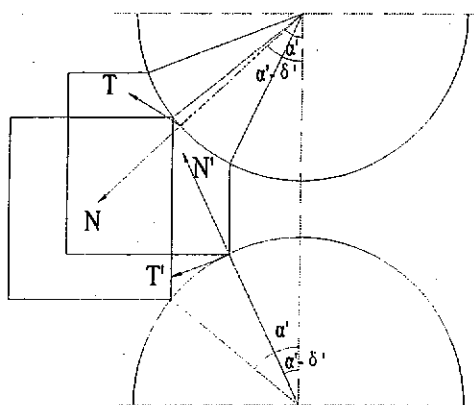


图 5-4 板材在 $\alpha = \beta$ 条件下被碾压过程

Fig 5-4 Inducting progress under the condition of $\alpha = \beta$

板材完全进入碾压轮后进入稳定碾压状态, 如图 5-5 所示, 此时径向力的作用点位于整个咬入弧的中心, 剩余牵引力达到最大值。继续碾压的条件为 $F > Q_x + Q'_x$, 此时托轮处正压力方向垂直向上, 摩擦力为水平方向, 所以继续碾压的条件为