

超声波焊接聚乙烯接头温度场的计算及检测*

杨士勤 董庆刚 田修波 王小峰 魏 强

(哈尔滨工业大学)

摘 要 利用波在粘弹性体中能量的转换机理,给出了超声波焊接聚乙烯时在接头处能量的转换形式,同时计算了接头处的温度分布.试验结果表明,所建立的能量模型及温度计算结果是合理的,这有助于建立合理的焊接工艺规范。

关键词 超声波焊接; 聚乙烯; 有限差分

0 序 言

在超声波焊接过程中,接头处能量的转换,主要是指由超声波的机械能转换成使塑料熔合的热能,这种能量的变化直接影响到接合面处温度的变化,影响到接头的质量。而对接头温度场的计算主要基于对各种焊接机理的认识,目前,关于超声波塑料焊接熔合机理有两种主要观点:(1)类似于金属的摩擦振动机理:认为两塑料件的表面被紧密压合,当超声波被引向待焊的塑料表面时,塑料质点就会被超声波激发而快速振动,从而产生机械功,其振动的频率就是超声波的频率。机械功的表现方式是塑料质点因振动而引起的连续交替的受压和解压,以致焊件接触表面之间因振动而后产生摩擦,此时,机械功再转化为热,使被焊面的温度升高,直至熔融连接。非焊接表面因无法摩擦,温度不会升高,并不受到破坏^[1]; (2)应力应变的储能及转换机理认为,对于塑料这类粘弹性体来讲,超声波在塑料体中传播,在结合面处,其高频交变正弦应力压缩,导致其发热,最终形成接头^[2]。

由于塑料性能、结构、分子组成的特殊性,本文同意应力应变的储能转换机理的观点,并基于这种观点利用粘弹性动力学理论,对超声波焊接聚乙烯的接头处能量转换过程做理论上的计算,本文还进一步推算了接头温度的分布及完成部分的试验验证,这可为建立合理的焊接工艺规范提供理论依据。

1 超声波塑料焊接能量形式转换的计算

由弹性动力学知道^[3],一般在求解振动等随时间变化的动态过程中,主要采用两种方式:(1)求物体在交变应力作用下所产生的应变;(2)求物体在交变应力作用下所产生的应力响应。本计算中认为超声波焊接聚乙烯表现为(2)的方式。

图1为焊接示意图和简化模型。

为计算焊接过程中动态性能参数方便起见,取应力和应变均为复变量。则有:

* 本文是国家重点攻关项目。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t} = \varepsilon_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t)$$

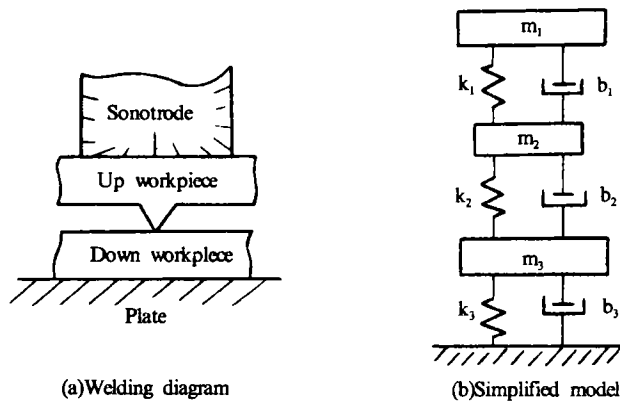


图 1 焊接示意图 (a) 和简化模型 (b)

Fig.1 Welding diagram (a) and simplified model (b)

计入滞后关系, 则应力振幅为:

$$\sigma(t) = \sigma^* e^{i\omega t} = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)}$$

式中 σ^* —— 复应力振幅

ε_0 —— 振幅

ω —— 波的频率

把 $\varepsilon(t)$ 及 $\sigma(t)$ 代入 Kelvin 本构方程:

$$P\sigma = Q\varepsilon$$

$$\text{即: } \sum P_K(i\omega)^K \sigma^* e^{i\omega t} = \sum q_K(i\omega)^K \varepsilon_0 e^{i\omega t}$$

$$\sigma^* = \varepsilon_0 \frac{\sum P_K(i\omega)^K}{\sum q_K(i\omega)^K} = \varepsilon_0 Q(i\omega) / P(i\omega)$$

$$\text{设定: } \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma^*}{\varepsilon_0} = \frac{Q(i\omega)}{P(i\omega)} = Y^*(i\omega) = Y_1 + iY_2$$

其中 $Y^*(i\omega)$ 为动态模量, 即为复模量, 是频率的函数。

由弹性动力学知道, 在超声波作用下的变形功为: (单位体积、单位时间)

$$dw = \sigma d\varepsilon$$

$$W = \int \sigma d\varepsilon = \int \sigma \varepsilon dt$$

假设外界为等温条件, 在振荡作用下的粘弹性体内的能量有弹性势能和耗散两部分。对于 $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$ 的作用, 有:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 i\omega e^{i\omega t}$$

则其应力响应为:

$$\sigma(t) = Y^*(i\omega)\varepsilon(t) = Y_1(\omega)\varepsilon(t) + \frac{Y_2}{\omega}\varepsilon(t)$$

应力分为两部分: 弹性相 $Y_1(\omega)\varepsilon(t)$, 粘滞相 $\frac{Y_2}{\omega}\varepsilon(t)$

超声波在塑料中所作的功为:

$$\begin{aligned} W &= \oint dw \\ &= \oint Y_1(\omega) \varepsilon(t) d\varepsilon(t) + \oint \frac{Y_2}{\omega} \varepsilon(t) d\dot{\varepsilon}(t) \\ &= 0.5[Y_1(\omega) \varepsilon^2(t)]_0^T + \int_0^T \frac{Y_2}{\omega} \varepsilon^2(t) dt \end{aligned}$$

后一项为损耗能量,即用于超声波焊接的能量, $2\pi/\omega$ 为周期。

若超声波的实际波形为 $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos \omega t$, 单位体积损耗能量为:

$$W_d = \frac{Y_2}{\varepsilon} \int_0^{2\pi/\omega} \omega^2 \varepsilon_0^2 \sin^2 \omega t dt$$

单位时间内用于焊接的能量为:

$$W = 0.5 V Y_2 \omega \varepsilon_0^2$$

v 为超声波施加的体积。

2 接头温度场的计算

数值计算方法在焊接温度场计算中应用越来越广泛,对于温度场的动态变化可采用有限差分方式来描述。

2.1 塑料的热传导

在塑料的热加工过程中,一般将塑料加热到高弹态或粘流态,对于焊接这种二次加工,传统观点认为接合面应处于高弹态向粘流态过渡阶段^[4]。本文认为其仍处于固态或近似固态,仅仅是个别热物性参数随温度的变化而变化。

由传热学知道,三维物体温度场随时间变化的数学表达式为:

$$T = f(x, y, z, t)$$

式中 T ——该物体温度

x, y, z ——物体在直角坐标系中坐标

t ——时间

非稳态热传导的偏微分方程具有如下形式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

式中 k_1 ——塑料的导温系数 (m^2/s) $k_1 = \lambda/c\rho$

λ ——塑料的导热系数

c ——塑料的定压比热 ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

ρ ——密度 (kg/m^3)

2.2 焊件的网格划分

本文对于接头温度场的计算,采用差分的方法,因此对接头需要进行网格划分。对 $4\text{mm} \times 12\text{mm} \times 65\text{mm}$ 的焊件,划分后的节点数分别为 5、7、23,则距离步距分别为 1mm、2mm、3mm,如图 2 所示。

2.3 热源的处理

由前面的计算可以知道,热源表现为一种线性变化规律,与超声波作用在工件上的时间成正比。对于超声波到达工件结合处产生的热量,本文做如下假设:对于每半片被焊件来讲,有一个线性的热流作用在焊件 $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 2 平面上,如图 3,这样就把热源转化为边界条件。

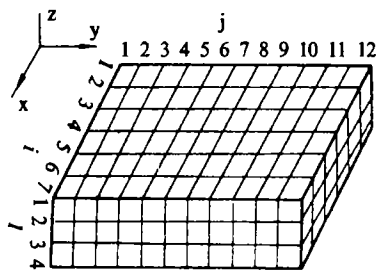


图2 焊件的网格划分示意图

Fig.2 Grid diagram of welding workpiece

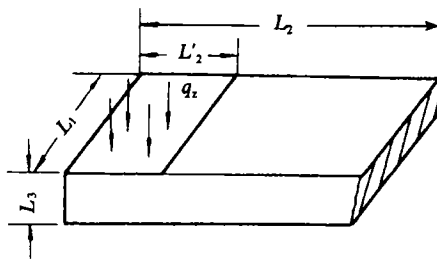


图3 热流作用示意图

Fig.3 Diagram of heat flow function

2.4 初始条件和边界条件的处理

不能否认,在实际焊接中,不同节点的初始温度有些差异,为计算方便,本文统一为:

$$T(i, j, 1, 0) = T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

对于边界条件,仅下表面与铝制底座相接触,上表面有 $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 的面积受到热流 q_z 的作用,其余各面直接与空气接触。由于超声波塑料焊接一般均在 1s 内完成,焊接时间较短,工件与空气的对流换热可忽略,则与空气相接触的外表面就可看成是一种绝热边界条件,下表面与铝制底座之间为换热边界条件,但塑料工件与铝制底座之间空隙处的热阻 β 值在目前的所能查寻到热物性数据中是很难确定的。

利用文献[5]提出的一种较合理的方法,即对边界处间隙中的 β 值用调合平均数的方法进行处理。这种处理方式与文献[6]中对毕奥数在有限差分方程中物理意义的解释也是相符的:即大的毕奥数可看成是一种等温边界条件,而小的毕奥数则给出接近于绝热边界条件的结果。

2.5 差分方程的确定

在实际计算中,选用有限差分方程,对于边界点采用中心差商的方法处理,时间步距选取 0.0002s 。具体过程从略。

3 计算结果分析

利用上述的计算结果,分别做出 0.3s 、 0.6s 、 0.7s 时刻的横截面、纵横面的温度分布图。当焊接时间小于 0.3s 时,由于接头发热量不足,在焊件的各个截面上,其温度均不能达到使聚乙烯软化的程度,从理论上讲是不能完成焊接的。实际上在所完成的试验中,也可以看到,在焊接时间小于 0.3s 时,无论怎样调整各个相关参数,都不能完成焊接。在这 0.3s 中,其温升率基本不超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,这说明决定焊件能否顺利完成焊接,其产热过程在前 0.3s 内的作用相对弱一些。

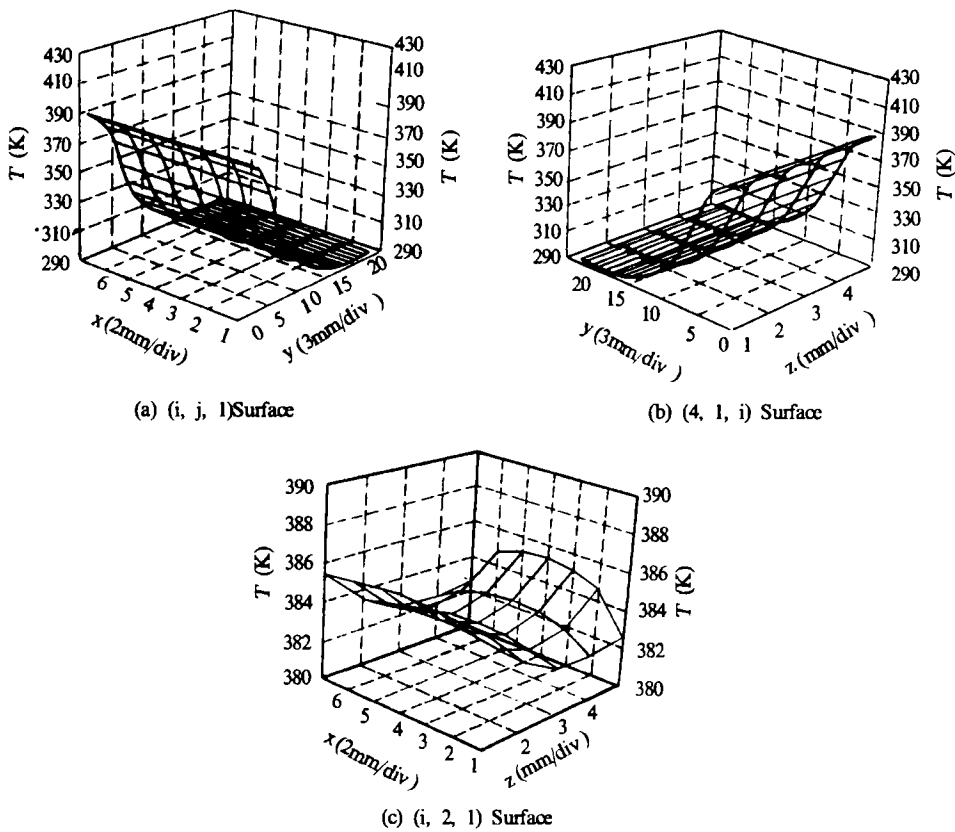


图 4 温度分布
Fig.4 Temperature distribution

如图 4 为 0.8s 的各个截面的温度图,此时被焊两工件的接触面上的温度已有少数点达到了甚至超过熔点温度,从理论讲这种情况有利于形成良好的接头。由于整个接触面上有足够的热量作用,不仅使得接触面表层出现软化,同时也使得表面内的分子链排列方式由于热的作用更易于改变。这时只需较低的外部压力作用,即可使得已充分软化甚至部分熔融的表层连接在一起。当然这种连接的可靠程度,主要依靠软化的程度,也就是说取决于温度的高低。超过熔融温度时表明分子链已可充分重新排列,这时只用较小的压力作用即可完成分子间的重新渗透缠绕,这种情况是比较理想。但从纵截面的温度分布来看,此时在接头处整体的温度也进一步上升,即外表面的温度也上升到较高的水平。如果进一步增加焊接时间,其外面也势必达到软化的程度。这样尽管有利于两接合面的连接,但难以保证外表面的焊后外观形态,也就是说难以保证整个接头的焊接质量,从这个意义上说,控制合适的焊接时间至关重要

如图 5 为接合面上的一点在整个焊接过程中的温度变化。由图中可以看到,在整个焊接过程中,呈现一种陡升—陡降到缓降的整体变化特性。这种特性与聚乙烯的热物理特性有极大的关系。文献[7]给出,聚乙烯的导热系数与温度成反比关系,也就是说,随着温度的上升,其不像金属类材料导热系数增大,而是有所降低,尽管降低的程度很小,但对于接合面的温度影响是显著的。如图中显示,在前 0.3s 时间内,其升温率仅为 80 ℃ /s,而在 0.3s ~ 0.6s 时间内,温

升率增加到 $240\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 在最后的 0.2 s 内, 温升率达到了 $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 当然为便于计算做出的一些假设使得计算值同实际温度相比存在一定误差, 但是这种温升率随时间增加的趋势是存在的。这种趋势可以理解为: 由于热量的线性增长, 温度亦上升, 如果导热系数恒定, 其温升率亦将保持一个定值, 但由于导热系数的降低, 热量更多的聚集在内表面, 这种情况无疑会造成温度的快速增长, 即温升率的上升。

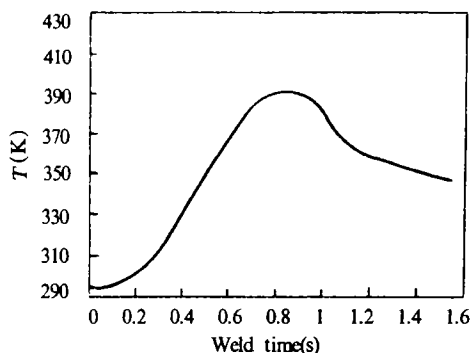


图5 (1, 2, 2)点温度变化

Fig.5 Temperature change of point (1, 2, 2)

在整个升温过程中, 存在着结晶潜热, 但聚合物结晶形态与金属的差异, 决定了结晶潜热的差异。聚合物的熔融特性表现为: 在一段范围内逐渐融化, 没有确切的熔点; 熔化特性与聚合物曾经受过的热过程有关, 尤其表现在结晶温度上; 熔融情况还与样品的加热速度有关。这种熔融特性决定了加热速度对熔化过程是有影响的^[7], 快速的熔化过程, 对于在结晶温度附近所造成的退火效果要相对低一些, 这直接表现在升温曲线上, 即没有明显的温度平台或者温升率的降低。

当时间超过 0.8 s 时, 超声波停止作用, 热源消失, 开始降温过程。这个过程是在已有的散热条件下进行的, 因此主要取决于聚合物本身的热物理特性。在这个过程中, 存在着保压时间和焊接压力两个焊接参数, 其结晶过程将受此二者的影响。从聚合物加工角度看, 结晶时压力的大小, 对于结晶的最终结果的影响是较大的。聚合物加工流变学认为, 加大结晶压力, 将使熔点温度提高, 这意味着结晶时过冷度的增加^[8], 过冷度越大, 结晶的成核率将得到提高, 相同的条件下将得到较多的晶核核心, 且由于压力的作用, 使得本来就较大的分子链难以在较大范围内移动, 形成在短时间内完成结晶过程; 但另一方面由于工件内部温度在升温的 0.8 s 时间内, 很难达到一致, 各处的温差较大, 此时温度继续扩散, 这两者综合的结果: 在 $0.8\text{ s} \sim 1.1\text{ s}$ 降温过程中, 内部温差的影响要大一些, 在温度曲线上表现为陡降特性。而过了 1.1 s 时间, 内部温差趋向于平衡, 且由于二次结晶的存在, 降温过程表现为比较平缓。

4 接头温度实际检测及分析

由于超声波塑料焊接时, 被焊工件所处环境的特殊及升温速度的特点, 使得实际检测变得比较困难。

经过多次试验, 本文选择在尺寸工作效果及响应速度等方面综合性能比较好的光敏三极管 (3DU-44) 作为传感元件, 利用其受热作用存在一线性度较好的温度暗电流作为检测值。其匹配的放大电路如图 6。图 7 为检测到的一组聚乙烯温度的数据及处理后的数据。在实际的采样信号中可以看到, 结合面处的温度在几十个毫秒内迅速升到最高温, 其实际的升温速度明显大于计算所得到的升温速度。快速的升温降低了在相变点处产生的退火效应, 这反到更加促成了温度上升速度的进一步加剧。

虽然光敏三极管可以很好的检测温度的快速变化, 但试验中发现, 由于光敏三极管与温度变化部位是面接触, 只能测到接头部位的最高温度变化, 难以完成温度场的逐点检测, 这是在

