

# 焊接热源有效利用率的测试计算法

关 桥 彭文秀 刘纪达 邵亦陈 何万玲

(北京航空工艺研究所)

## 摘要

给出实际热输入值是正确求解焊接热弹塑性问题和焊接残余应力与变形问题的前提；因而，准确地确定热源有效利用率  $\eta$ ，在焊接力学的发展中是一个急待解决的命题。本文推荐采用的“测试计算法”提供了一个能够准确、简捷地求得  $\eta$  值的新途径。引入被焊材料的熔化潜热系数后，给出了线热源加热焊缝金属至熔化温度(处于液态)时的实际热有效利用率  $\eta_1$  的表达式。在四种不同类型的薄板材料上进行了钨极氩弧焊试验，测试计算结果与理论值相符合。理论推导与试验结果均证明，形成焊缝所需要的线能量的无量纲数值等于焊缝金属熔化热有效利用率  $\eta_1$  的倒数。文中给出的焊接规范参数选择原则也适用于符合线热源条件的其它熔焊热源。 $\eta$  值不但与焊接工艺方法、规范参数有关，而且也随被焊材料的热物理特性不同而异。

## 一、问题的提出

焊接时，金属在热源周围的热弹塑性运动是由热源对被焊材料的热输入所引起的。因此，准确地确定热输入值是求得焊接瞬态和残余应力与变形问题可靠解答的前提。

N.N. Рыкалин 在对金属熔化过程效率的分析基础上，论述了热源有效利用率  $\eta$  和焊缝金属熔化热有效利用率  $\eta_1$  的关系<sup>[1-2]</sup>，当热源的理论计算模型确定后， $\eta_1$  即可求出。或者说，当热源有效功率  $q$  已知时， $\eta_1$  值亦可以由实验结果求得。在理论计算  $\eta_1$  值时，把材料熔化潜热计入导温系数的某平均值内 ( $a = \bar{\lambda} / \bar{c} \gamma$ ) 的办法<sup>[3]</sup>，与实际情况不尽相符。为了求得热源有效利用率  $\eta$  值，可采用量热法，但并非在每一具体施焊条件下均能适用。L.Tall 指出<sup>[4]</sup>，不能精确地确定在给定的焊接条件下的热源有效利用率，妨碍着焊接力学的进一步发展。由于缺少可靠的数据，R.H.Leggatt 等人<sup>[5]</sup>在其研究工作中不得不用试凑法选择  $\eta$  值 ( $\eta = 0.7, 0.8, 0.9$ )，最后确定当  $\eta = 0.8$  时，理论计算和试验结果才有较好的吻合。在大多数情况下，往往选择文献中给出的在相近条件下的  $\eta$  值，但是不同的作者给出的数值差别较大。例如，M.X.Порошков<sup>[6]</sup>对钨极

氩弧焊选用了  $\eta = 0.55$ ；而 A.A. Ерохин<sup>[7]</sup> 则推荐选用  $\eta = 0.65 \sim 0.75$ 。近年来，在把有限元法和电子计算机引入焊接力学研究和其它要求能给出精确定量结果的研究领域后，许多学者更加感到热源有效利用率的确定是具有现实意义的急待解决的问题。

本文推荐采用的“测试计算法”，试图提供一个能准确、简捷地确定  $\eta$  值的新途径。在引入材料熔化潜热系数后，所求得的线热源  $\eta_1$  值与薄板钨极氩弧焊实验结果相符。当给定焊接参数、已知材料热物理特性、测得焊缝几何尺寸后，即可准确地得到热源有效利用率。

## 二、线热源——薄板钨极氩弧 焊电弧的热有效利用率

本文以熔焊方法中最典型的线热源为依据，针对不同材料薄板钨极氩弧焊时的特点，对焊缝金属熔化的热有效利用率  $\eta_1$  和热源有效利用率  $\eta$  进行分析计算，以求把焊接工艺参数、焊缝几何尺寸测试与理论计算相结合，正确地给出每一施焊条件下相应的  $\eta_1$  和  $\eta$  值。

根据定义，热源加热工件的热有效利用率  $\eta$  是热源在单位时间内输入到工件内部的热量  $q$  与电弧总功率热当量  $q_0$  的比值，即：

$$\eta = \frac{q}{q_0} \quad (1)$$

或  $\eta = \frac{q_1 + q_2}{q_0} \quad (2)$

$$q = q_1 + q_2 \quad (3)$$

式中  $q_1$  —— 单位时间内熔化焊缝金属（处于液态， $T = T_m$  时）所需的热量（包括熔化潜热）；

$q_2$  —— 单位时间内使焊缝金属处于过热状态 ( $T > T_m$ ) 的热焓和向焊缝四周传导热量的总和；

$$q_0 = 0.24UI \quad (4)$$

又  $q_1 = VF\gamma S_m \quad (5)$

式中  $V$  —— 焊接速度；  $F$  —— 焊缝横截面积；  $F = B \cdot \delta$ ；  
 $B = 2y_0$  (图 1)；  $B$  —— 焊缝宽；  $y_0$  —— 焊缝半宽；  
 $\delta$  —— 板厚；  $\gamma$  —— 被焊材料比重；  
 $S_m$  —— 液态金属的重量热焓；

$$S_m = CT_m + \Delta S_m \quad (6)$$

式中  $C$  —— 材料比热；  $T_m$  —— 材料熔点；

$\Delta S_m$  —— 材料熔化潜热；  $CT_m$  —— 材料在  $T_m$  时 (仍处于固态) 的重量热焓。

由焊缝金属熔化的热有效利用率  $\eta_1$  的定义可知， $\eta_1$  为单位时间内被熔化的基体金属在  $T_m$  时 (处于液态) 的热焓与电弧有效热功率的比值：

$$\eta_t = \frac{q_1}{q_1 + q_2} \quad (7)$$

或

$$\eta_t = \frac{VF\gamma S_m}{q} \quad (8)$$

从以上诸式可知求得  $\eta$  值的步骤是：在已知  $q_1$ （由（5）式求出）和  $\eta_t$  的情况下，可从（7）式求出  $q_2$ 。当给定  $q_0$ （由（4）式得）后，即可由（1）式求得  $\eta$ 。其中的关键在于由（8）式求出  $\eta_t$ ， $\eta_t$  值应符合被焊材料和相应的焊接工艺方法与条件。

将（6）式代入（8）式有：

$$\eta_t = \frac{VF\gamma(CT_m + \Delta S_m)}{q} \quad (9)$$

引入材料熔化潜热系数  $P$ ：

$$P = \frac{\Delta S_m}{CT_m}$$

则有

$$\eta_t = \eta'_t (1 + P) \quad (10)$$

式中

$$\eta'_t = \frac{VF\gamma CT_m}{q} \quad (11)$$

$\eta'_t$  —— 焊缝被加热至熔化温度（仍处于固态）时的热有效利用率。

为了求得  $\eta'_t$  值与焊接参数之间的函数关系，首先应根据移动线热源传热过程的极限状态方程<sup>[2]</sup>：

$$T(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right) \quad (12)$$

求得（11）式中  $T_m$ （熔池边界等温线）的表达式。为此，令  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ； $b = 0$ ； $\frac{vr}{2a} = \omega$ ；

考虑到： $\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r}$ ；又  $\frac{\partial K_0(\omega)}{\partial \omega} = -K_1(\omega)$ ，则可得各等温线最宽点轨迹的方程式为：

$$x_{max} = -r \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \quad (13)$$

由图 1 可知： $\cos\varphi = -\frac{x_{max}}{r}$ ；由（13）式得：

$$\cos\varphi = \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \quad (14)$$

将（13）式代入（12）式得熔池边界等温线：

$$T_m = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left[\omega \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)}\right] K_0(\omega) \quad (15)$$

将（15）式代入（11）式后得：

$$\eta'_t = \frac{2}{\pi} \frac{vy_0}{2a} \exp\left[\omega \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)}\right] K_0(\omega) \quad (16)$$

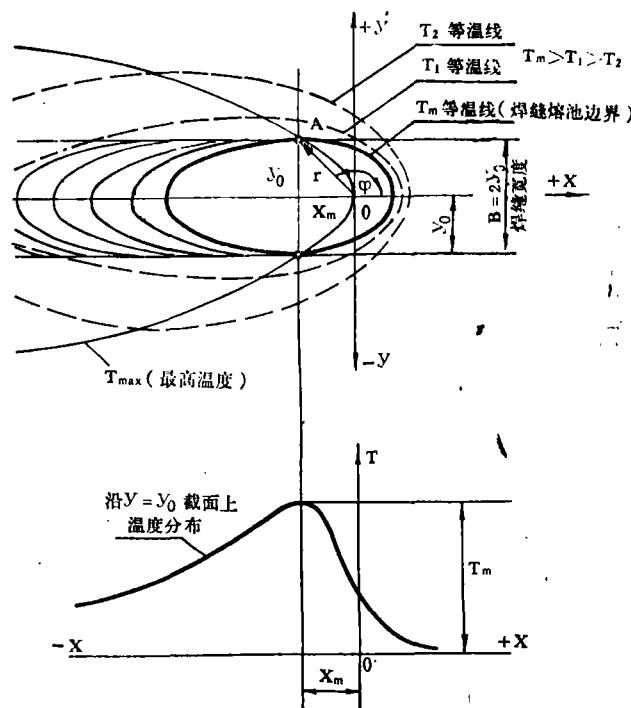


图1 移动线热源加热薄板时的准定常状态

由图1可见：

$$y_0 = r \cdot \sin \varphi, \quad \sin \varphi = \frac{[K_1^2(\omega) - K_0^2(\omega)]^{1/2}}{K_1(\omega)}$$

(16) 式可写成：

$$\eta' = \frac{2}{\pi} \omega \left[ 1 - \left( \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right)^2 \right]^{1/2} \exp \left[ \omega \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right] K_0(\omega) \quad (17)$$

若令  $\omega' = \frac{\omega y_0}{2a}$ , 则：

$$\omega' = \omega \left[ 1 - \left( \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

(17) 式也可改写成：

$$\eta'_t = \frac{2}{\pi} \omega' \exp \left[ \omega \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right] K_0(\omega) \quad (19)$$

由(17)式和(10)式可得实际  $\eta_t$  的表达式为：

$$\eta_t = (1+P) \frac{2}{\pi} \omega \left[ 1 - \left( \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right)^2 \right]^{1/2} \exp \left[ \omega \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right] K_0(\omega) \quad (20)$$

(17) 式所表达的线热源加热焊缝金属的热有效利用率  $\eta'$  与无量纲焊接参数

$\omega = \frac{vr}{2a}$  的函数关系以数值形式列于表 1 , 并以曲线形式示于图 2 。当  $\omega \rightarrow \infty$  时,  $\eta'_t$  值趋近于 0.484。对于每一个具体焊接条件来说, (20) 式所给出的熔化焊缝金属的热有效利用率  $\eta_t$  则因材料的熔化潜热系数不同而异,  $\eta_t$  与  $\eta'_t$  值的关系亦示意于图 2 。显而易见, 实际的  $\eta_t$  值在  $\omega$  值较大时有可能大于 0.484。在得知  $\eta'_t$  值后即可求得  $\eta_t$  值。

表 1 线热源的有效利用率计算(未考虑焊缝金属熔化潜热)

$\omega = \frac{vr}{2a}$	$K_0(\omega)$	$K_1(\omega)$	$\exp \left[ \omega \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right]$	$\left[ \frac{K_1^2(\omega) - K_0^2(\omega)}{K_1(\omega)} \right]^{\frac{1}{2}}$	$\omega' = \omega \frac{[K_1^2(\omega) - K_0^2(\omega)]^{\frac{1}{2}}}{K_1(\omega)}$	$\omega' = \frac{vy_0}{2a}$	$\eta'_t$	$\frac{1}{\eta'_t}$
0.1	2.4271	9.8538	1.0249	0.9692	0.0969	0.0969	0.1519	6.59
0.5	0.9244	1.6564	1.3218	0.8298	0.415	0.415	0.3226	3.11
1.0	0.4210	0.6019	2.010	0.7146	0.715	0.715	0.3859	2.60
1.6	0.1880	0.2406	3.490	0.6240	0.998	0.998	0.4168	2.40
2.0	0.1139	0.1399	5.050	0.5806	1.161	1.161	0.4273	2.34
2.5	0.0623	0.07389	8.240	0.5360	1.340	1.340	0.4397	2.28
3.0	0.0347	0.04016	13.358	0.5034	1.510	1.510	0.4450	2.25
4.0	0.0116	0.01248	35.760	0.4476	1.790	1.790	0.4549	2.20
6.0	0.00124	0.00134	257.80	0.3790	2.274	2.274	0.4628	2.16
100	0.0000178	0.0000186	13575.20	0.3072	3.072	3.072	0.4699	2.06

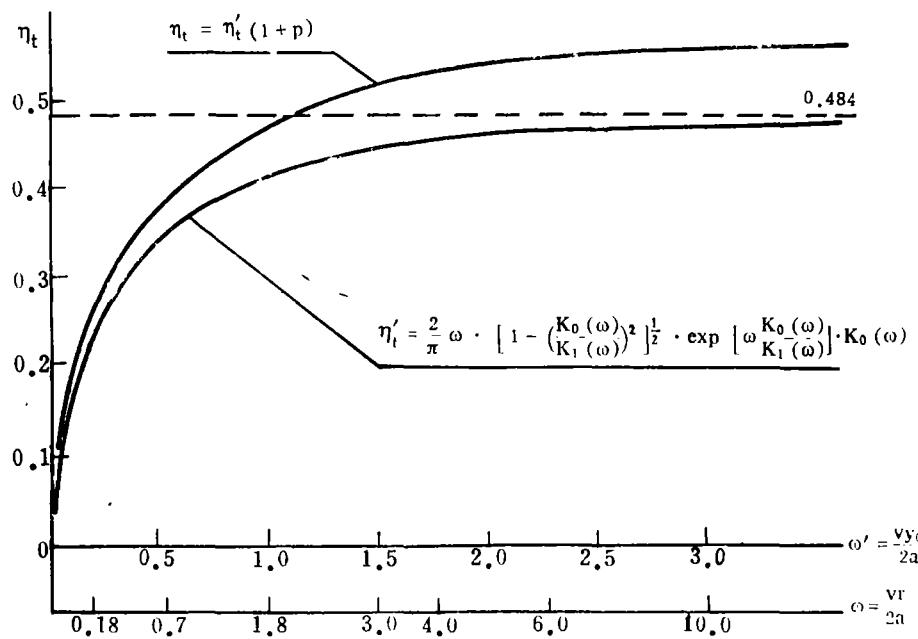


图 2 在无量纲坐标系中  $\eta'_t$ 、 $\eta_t$  与  $\frac{vy_0}{2a}$  和  $\frac{vr}{2a}$  的函数关系

### 三、试验结果讨论与焊接规范参数选择的一般原则

为了验证线热源模型对于薄板钨极氩弧焊的适用性，在四种不同类型的材料上进行了 $\eta_t$ 值测定试验。试验用材料为LF6铝合金、1Cr18Ni9Ti不锈钢、TA2工业纯钛和TC4(Ti-6Al-4V)钛合金以及A3低碳钢。板材厚度为1.5或2.0mm，采用钨极自动氩弧焊，不加填充焊丝，氩气流量为15 l/min，焊接钛合金时试件背面氩气流量为5 l/min；为了减少夹具传热的影响，在试件下面垫以石棉板，试件尺寸足以保证得到准定常状态的温度场。试验时在较大的范围内改变焊接速度，相应地调节焊接电流；电弧间隙保持为1 mm。焊后用读数显微镜测定焊缝正反面宽度。在表2中仅以LF6铝合金为例列出试验结果和计算求得 $\eta_t$ 值的具体步骤和方法。在表2中计算热源有效热功率q时， $\eta_t$ 值是实际测试计算结果。图3上给出了LF6铝合金和1Cr18Ni9Ti不锈钢的试验结果与相应的理论曲线的对比。

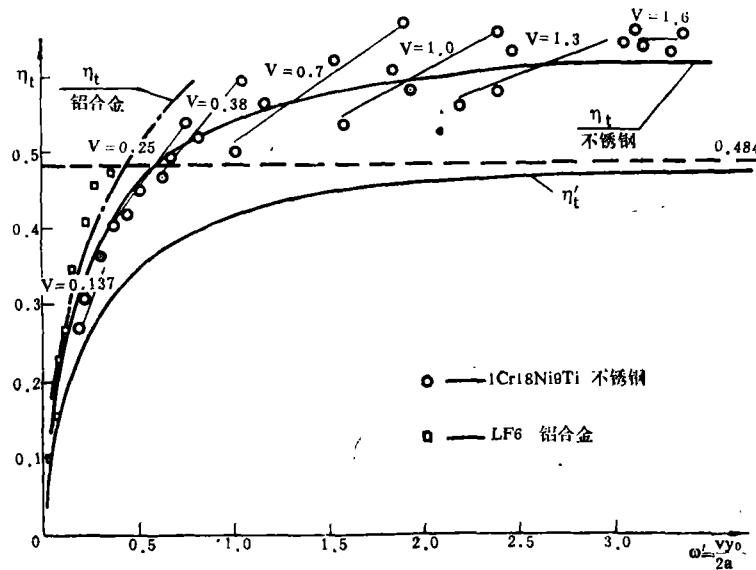


图3 铝合金和不锈钢的试验结果与理论曲线对比

图中一些数据之间的联线线段表示在同一焊速下用不同的焊接电流得到的不锈钢的结果。在同一焊速下，增大焊接电流，焊缝加宽， $\eta_t$ 值也相应地增大。在低焊速时，线段的斜率较大，随着焊速的增大，斜率减小。这表明，增大电流使焊缝加宽的效果( $\eta_t$ 增大)，在低速时更为显著。在不同材料上的试验结果汇总于图4上，其中 $\eta_t = \eta_t' (1 + P)$ 曲线仅为一示意曲线（每一种材料应有一条相对应的 $\eta_t$ 曲线）。试验结果与理论数值符合情况表明，薄板钨极氩弧焊电弧属于线热源类型，其 $\eta_t$ 值可以根据线热源理论公式计算求得。

表 2 钛极氩弧焊 $\eta_1$ 值的测定 ( $\delta=2.0\text{mm}$ 的LF6铝合金焊接试件测试与计算结果)

焊速 V cm/s	电弧 电压 U V	焊接 电流 I A	电功 率 $q_0 = UI$	电弧有效热 功率 $q = 0.24q_0UI$	焊缝宽度		焊缝横截面 F = $\frac{B+B'}{2} \cdot \delta$	$v y_0$	$\frac{v y_0}{2a}$	单位时间 内熔化金属 体积 $V_F$	用于熔化金 属的热量 $q_1 = VF \cdot S_m'$	熔化焊缝金 属的热有效 利用率 $\eta_1 = q_1/q$	$\frac{1}{\eta_1}$	
					正面B	反面B'								
0.137	15	57	855	84.1	0.08	0.28	0.075	0.188	0.0258	0.0103	7.19	0.086	11.64	
0.25	15.5	63	976.5	96.1	0.47	0.38	0.085	0.212	0.0530	0.0603	14.88	0.155	6.45	
0.38	13.5	80	1080	106.2	0.57	0.50	0.107	0.268	0.1018	0.116	0.0407	28.46	0.267	3.72
0.38	14	75	1050	103.3	0.52	0.37	0.089	0.223	0.0847	0.0964	0.0338	23.67	0.228	4.37
0.7	13	90	1170	115.1	0.48	0.32	0.090	0.20	0.1400	0.159	0.0560	39.20	0.340	2.95
1.0	13.7	105	1438.5	141.5	0.49	0.31	0.080	0.20	0.2000	0.227	0.0800	56.00	0.402	2.46
1.3	13	115	1495	147.1	0.46	0.28	0.074	0.185	0.2405	0.273	0.0962	67.34	0.457	2.18
1.6	13.8	135	1863	183.3	0.46	0.32	0.078	0.195	0.3120	0.354	0.1248	87.36	0.476	2.07

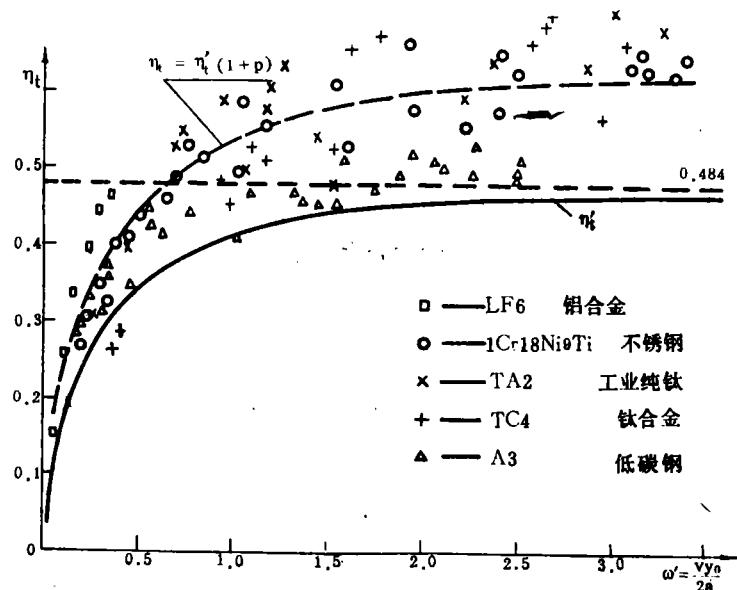


图4 属于线热源类型的薄板钨极氩弧焊试验结果

在焊接力学研究中有时是在给定的条件下（如给定焊缝尺寸、焊速等）选择焊接规范。当热源的 $\eta_t$ 值可按上述原则确定时，焊接参数选择的一般原则如下：

- 1) 给出材料的热物理常数( $\lambda$ 、 $c$ 、 $\gamma$ 、 $a$ 和 $\Delta S_m$ 等)；
- 2) 根据所要求的焊缝半宽 $y_0$ ，求出当焊速为 $V$ 时的相应无量纲参量 $\omega' = \frac{vy_0}{2a}$ ；
- 3) 根据图2求出对应于 $\omega' = \frac{vy_0}{2a}$ 的 $\eta_t$ 值；
- 4) 求出热源的有效热功率： $q = \frac{VF\gamma S_m}{\eta_t}$ ；

5) 当 $\eta$ 值为已知时，可求出所需要的焊接电流（薄板钨极氩弧焊时电弧电压变化范围很窄，可预先给定）：

$$I = \frac{VF\gamma S_m}{\eta_t \cdot \eta \cdot 0.24 U} \quad (21)$$

#### 四、焊接线能量与热源有效利用率的关系

在熔焊时，采用线热源模型可以求得形成焊缝所需要的线能量与热源有效利用率的关系为：

$$\frac{q_0}{V} = \frac{1}{\eta_t} \cdot \frac{F \cdot \gamma \cdot S_m}{0.24 \eta} \quad (22)$$

令：

$$N = \frac{F\gamma S_m}{0.24} \quad (23)$$

则有：

$$\frac{\eta}{N} \cdot \frac{q_0}{V} = \frac{1}{\eta_t} \quad (24)$$

由此可得焊缝金属熔化的有效线能量：

$$N = \eta \cdot \eta_t \cdot \frac{q_0}{V}$$

由(24)式可知，式的左侧为形成焊缝所需线能量的无量纲数值，右侧为焊缝金属熔化热有效利用率的倒数。在无量纲坐标系中，(24)式可表示为图5所示曲线，其中 $1/\eta_t$ 数值见表1。

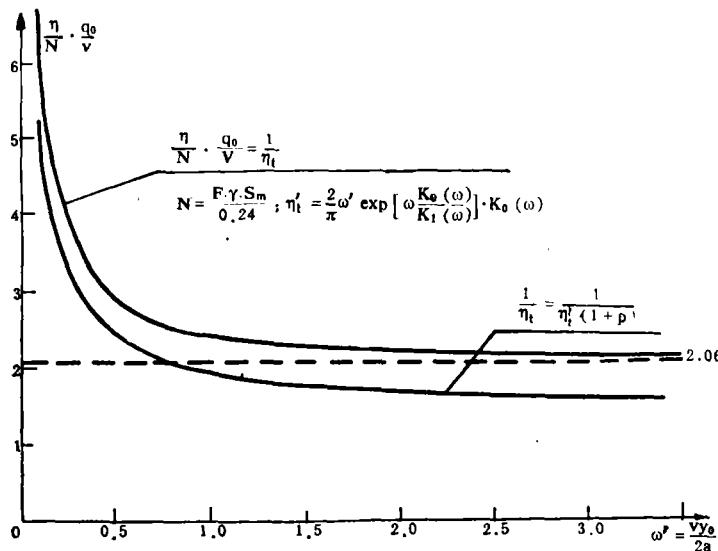
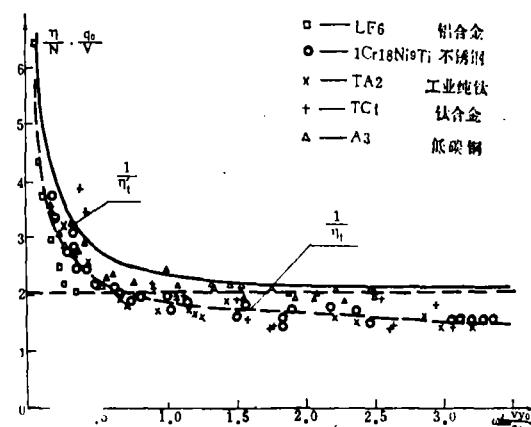


图5 焊接线能量与焊接参数的关系

在图6上，试验结果与理论曲线之间符合情况良好。这也就是说，不同材料的薄板钨极氩弧焊所需的线能量可以按照图6上的相应曲线来选取：当给定 $\omega' = \frac{vy_0}{2a}$ 时，可以直接按 $\frac{1}{\eta_t}$ 曲线求出相应的 $\frac{\eta}{N} \cdot \frac{q_0}{V}$ 值，从而得到焊缝成形所需要的线能量 $\frac{q_0}{V}$ 。（不同材料的 $\frac{1}{\eta_t}$ 曲线不同）。

理论分析与试验结果表明，对于



6 焊接线能量试验结果与理论计算对比

所有符合线热源加热条件的熔焊热源来说（如薄板电弧焊、等离子弧焊、电子束焊、激光焊等），在不同材料上形成焊缝所需要的线能量 $\frac{\eta}{N} \cdot \frac{q_0}{V}$ 与焊接参数 $\frac{vy_0}{2a}$ 的关系均可 $\eta_i$ 用无量纲坐标系中的 $\frac{1}{\eta_i}$ 曲线来表示。

## 五、热源有效利用率的测试计算法

“测试计算法”是把测定焊接规范参数、测量焊缝几何尺寸与理论计算 $\eta_i$ 值相结合，以求能正确地给出热源有效利用率 $\eta$ 值的一种准确而简便的方法。这里所说的计算，主要是指根据 $\eta_i = f\left(\frac{vy_0}{2a}\right)$ 和 $\frac{\eta}{N} \cdot \frac{q_0}{V} = \frac{1}{\eta_i}$ 函数关系，求出相应的 $\eta_i$ 和焊接线能量。

显而易见，这样作的前提必须是确认所采用的焊接热源属于线热源类型。

如前所述，确认钨极氩弧焊电弧为线热源类型后，即可按(20)式或图2曲线求出相应的 $\eta_i$ 值。而热源有效利用率则可由(24)式求得：

$$\eta = \frac{1}{\eta_i} \cdot \frac{N}{\frac{q_0}{V}} \quad (25)$$

采用“测试计算法”求线热源 $\eta$ 值的具体步骤如下：

- 1) 选取被焊材料热物理常数（一般取其由室温至高温区间的平均值）；
- 2) 根据要求选择焊接规范（线能量 $\frac{q_0}{V}$ ），焊接时应能保证得到准定常状态温度场；
- 3) 测定焊缝正反面宽度，算得 $F$ 和 $y_0$ ；
- 4) 根据(23)式，求出 $N$ 值（焊缝熔化实际有效线能量）；
- 5) 算出实际无量纲参量 $\omega' = \frac{vy_0}{2a}$ ；
- 6) 根据(20)式或图2求得相应的 $\eta_i$ （即 $\eta'_i(1+P)$ 值）；
- 7) 将得到的 $\frac{q_0}{V}$ 、 $N$ 和 $\eta_i$ 各值代入(25)式，或根据图5曲线，求得热源有效利用率 $\eta$ 值。

在表3上以不锈钢薄板钨极氩弧焊为例，按上述推荐的“测试计算法”程序步骤，给出了求得 $\eta$ 值的实际测试计算结果及其平均值 $\eta_{av}$ 。对于不同类型的材料得到的 $\eta$ 值分别为：

LF6铝合金： $\eta = 0.41$

1Cr18Ni9Ti 不锈钢： $\eta = 0.61$

TA2工业纯钛： $\eta = 0.58$

TC4钛合金： $\eta = 0.62$

A3低碳钢： $\eta = 0.67$

在图 7 上给出了铝合金和不锈钢的试验结果，按照虚线表示的平均值更易于观察  $\eta$  值与焊接参数  $\frac{vy_0}{2a}$  之间的关系。

### 钨极氩弧焊 $\eta$ 值的测定

表 3 ( $\delta=1.5\text{mm}$  的  $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$  不锈钢焊接试件测试与计算结果)

V cm/s	q <sub>0</sub> W	q <sub>0</sub> /V J/cm	F cm <sup>2</sup>	y <sub>0</sub> cm	$\frac{vy_0}{2a}$	$N = \frac{FyS_m}{0.24}$ J/cm	理论值 $\eta'_t$	$\eta_t = \eta'_t(1+P)$	$\eta = \frac{1}{\eta_t} \cdot \frac{N}{q_0/V}$	平均值 $\eta_{av}$
0.137	320	2330	0.0428	0.14	0.18	380	0.215	0.282	0.578	
0.25	520	2080	0.0638	0.21	0.50	568	0.34	0.446	0.612	
0.38	634	1670	0.0563	0.19	0.67	500	0.375	0.492	0.609	
0.70	950	1357	0.0518	0.17	1.14	460	0.425	0.558	0.607	0.613
1.00	1390	1390	0.0578	0.19	1.82	514	0.453	0.594	0.623	
1.30	2195	1690	0.743	0.25	3.04	660	0.47	0.617	0.633	
1.60	2420	1513	0.0653	0.22	3.28	581	0.47	0.617	0.622	

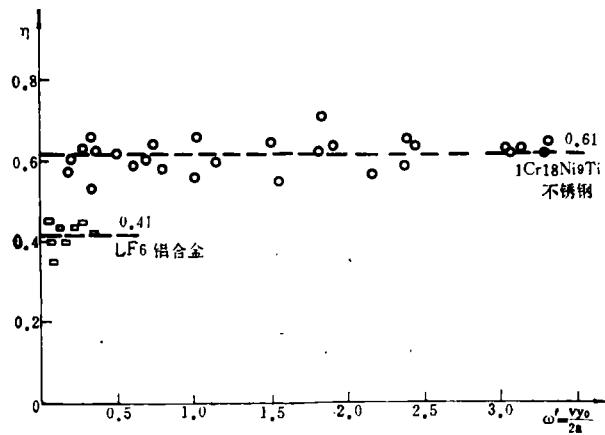


图 7 铝合金和不锈钢采用测试计算法求得的  $\eta$  值

## 六、其它熔焊方法的热源有效利用率

一般说来，对于不同类型的热源（点热源、线热源、面热源等）都可以建立相应的“测试计算法”以求得相应的  $\eta$  值。在前阐述的方法是以线热源为模型而建立的。因此，凡是热源的能量密度分布接近于线热源模型的其它熔焊热源均能根据已给出

的公式和曲线求得  $\eta$  值。在常用的熔焊热源中，氧—乙炔火焰的热量分布偏离线热源模型较远，在计算时宜采用正态分布热源模型。氩弧焊和等离子弧焊电弧与线热源模型比较接近，当焊接薄板时更是如此，这已为前述的实验分析所证实。具有更高能量密度的电子束焊接和激光焊接热源与线热源模型最相近，当焊接薄板时，直接采用前面给出的公式和曲线可以方便、准确地求出在给定的具体施焊条件下的  $\eta$  值。

为了论证“测试计算法”对其它熔焊方法的适用性，按照前述计算步骤对电子束焊接薄板的试验结果<sup>[8]</sup>进行了计算分析。在图 8 上示出了电子束焊接四种材料得到的结果经“测试计算法”换算后的  $\eta$  值。可以看出，实际  $\eta$  值远低于一般文献中给出的焊接厚板时的数值。

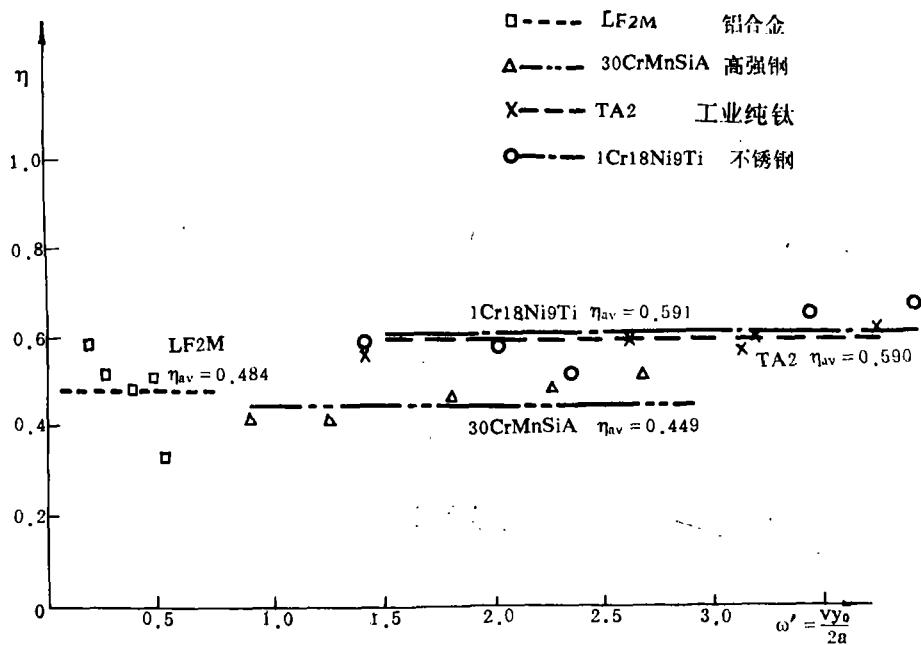


图 8 电子束焊接薄板<sup>[8]</sup>时的  $\eta$  值

根据求得的  $\eta$  平均值可算出相应的  $\frac{1}{\eta_i} = \frac{\eta}{N} \cdot \frac{q_0}{V}$  值。在图 9 上将所得到的结果与理论曲线相比较，二者之间的符合情况良好。这表明，作为焊接热源，电子束与线热源模型很相近。尤其在薄板电子束焊接时，理论曲线  $\frac{1}{\eta_i} = f\left(\frac{vy_0}{2a}\right)$  可以作为选择焊接线能量的依据（也即 [8] 中的“下限线能量”的理论表达式）。

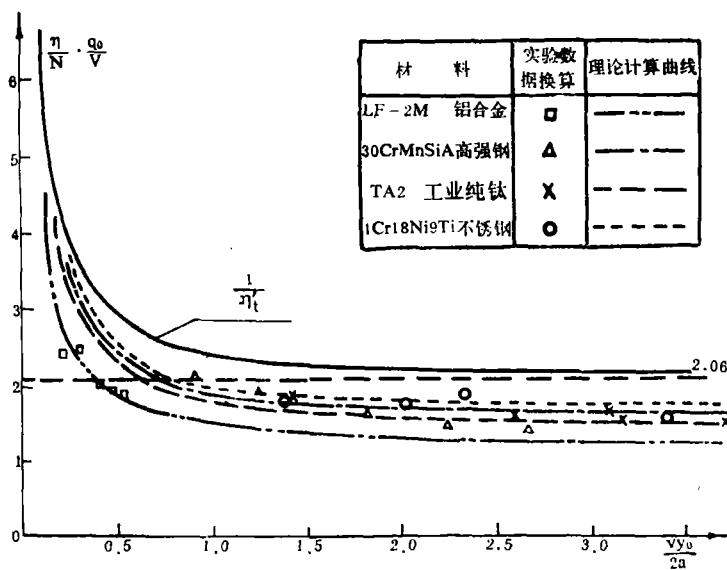


图9 电子束焊<sup>[8]</sup>线能量试验结果与理论曲线比较

## 七、结 论

1. 理论分析和试验结果表明，在确定热源有效利用率时，可以把薄板钨极氩弧焊电弧看作线热源，当引入材料熔化潜热系数后，焊缝金属熔化的实际热有效利用率为：

$$\eta_t = (1+P) \frac{2}{\pi} \omega \left[ 1 - \left( \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[ \omega \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} \right] K_0(\omega)$$

2. 对于符合线热源条件的各种熔焊热源来说，焊接线能量的无量纲数值也就是该焊缝金属熔化热有效利用率的倒数，即  $\frac{\eta}{N} \cdot \frac{q_0}{V} = \frac{1}{\eta_t}$ 。借助于无量纲坐标系中

$\frac{\eta}{N} \cdot \frac{q_0}{V} = f\left(\frac{vy_0}{2a}\right)$  曲线，可以很简便地求得所需要的焊接线能量。

3. 推荐采用的“测试计算法”提供了一个在每一具体施焊条件下求得  $\eta$  值的简捷、准确的新途径。该方法不仅适用于薄板钨极氩弧焊，也可应用于电子束焊等符合线热源模型的其它熔焊热源。

4.  $\eta$  值不但与焊接工艺方法、规范参数有关，而且随被焊材料的热物理特性不同而异。例如，对于薄板钨极氩弧焊，1Cr18Ni9Ti 不锈钢的  $\eta = 0.61$ ；而 LF6 铝合金的  $\eta = 0.41$ 。

(1981年1月29日收到)

### 参 考 文 献

- (1) Н.Н.Рыкалин, Тепловые основы сварки, (1947).
- (2) Н.Н.Рыкалин, Расчёты тепловых процессов при сварке, (1951).
- (3) Н. Н. Рыкалин и др., Основы электроннолучевой сварки материалов, Машиностроение, (1978) .
- (4) L.Tall, An International Conference Proceeding, Residual Stresses in Welded Construction and their Effects, (1977), London, The Welding Institute.
- (5) R.H.Leggatt and J.D.White, So.
- (6) М.Х.Шорошоров, Сварка титана и его сплавов, (1954).
- (7) А.А.Ерохин, Основы сварки плавлением, (1973).
- (8) 王虎、戴修嘉, 焊接学报 (1980) № 3。

## DETERMINATION OF WELDING HEAT SOURCE EFFICIENCY

BY MEASURING-CALCULATING METHOD

Guan Qiao, Peng Wenxiu, Liu Jida,  
Shao Yichen, He Wanling

(Beijing Aeronautical Manufacturing  
Technology Research Institute)

**Abstract**

To know the actual welding heat input is the prerequisite for solving in a precise manner the thermal elasto-plastic problems and for evaluating residual stresses and distortions when more accurate results are expected. For this reason, the determination of the heat source efficiency  $\eta$  is a pressing subject in the course of developing welding mechanics.

In this paper, the authors present a "measuring-calculating method" which provides a new and accurate shortcut to determine the heat source efficiency  $\eta$ . By introducing the proper melting latent heat coefficient  $p$  the actual efficiency  $\eta$ , for linear heat source was given in a modified formula. The experimental data on four different thin plates by using TIG welding agreed well with the theoretical results of calculation. It is proved by theoretical deduction and confirmed by experiment that the dimensionless value of linear heat input for forming weld bead is the reciprocal of coefficient  $\eta$ . The principle for selecting welding parameters given in this paper could also be used for other fusion welding heat sources, if their conditions are in compliance with those of the linear heat source. The coefficient  $\eta$  is not only related to the welding technology and parameters but also varies with the thermo-physiological characteristics of the materials to be welded.