

文章编号 1000-5013(2001) 03-0247-06

激光焊接温度场解析计算

庄其仁

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362011)

摘要 提出一种激光焊接温度场的解析计算方法. 将激光作用下形成的小孔区域作为均匀吸收介质, 导出介质热源的功率分布三维解析式, 以及由该热源引起的无限大薄板的温度场分布解析式. 计算和实验验证该解析式的正确性, 理论计算和实验结果符合较好. 当小孔深度为零时, 介质热源即为表面热源, 所得到的解析式与其它热传导理论解析式一致.

关键词 激光深熔焊, 温度场, 解析式

中图分类号 TG 456.7; TG 402

文献标识码 A

激光焊接分为热传导焊和深熔焊两种方式. 由于激光热传导焊和激光深熔焊的机理不同, 因此它们的温度场理论模型也有差异. 激光热传导型温度场理论模型把激光辐射金属表面当成面热源处理^[1-3]. 这种模型是基于激光束对金属表面的直接穿透, 深度只有激光波长量级的原理而建立的. 对于激光深熔焊, 由于小孔的形成, 激光可通过小孔而进入金属内部, 面热源模型不再适用. 然而, 激光深熔焊是一个复杂的过程且伴随着多种效应, 要给出准确的解析式是相当困难的, 只能对模型进行简化. 为此, 本文介绍一种激光深熔焊三维温度场解析计算方法. 本方法将激光作用下形成的小孔区域作为均匀吸收介质, 导出了介质热源的功率分布三维解析式. 同时, 推导了由该热源引起的无限大薄板的温度场分布三维解析式.

1 解析式推导

在厚度为 δ 的无限大平板上, 设 $t=0$ 时刻, 激光辐射作用在点 (x', y', z') 上的一瞬间点热源为 q . 而在 t 时刻, 由于热扩散, 平板上某点 (x, y, z) 由该点热源引起的温升可表示为^[4]

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{q}{4\pi\alpha\delta t} \cdot e^{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\alpha t}} \cdot [1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{a n^2 \pi^2 t}{\delta^2}} \cdot \cos \frac{n\pi x}{\delta} \cdot \cos \frac{n\pi z'}{\delta}], \quad (1)$$

式中 a 为导温系数 ($a = \sigma / \rho C$, σ 为导热系数, ρ 为材料密度, C 为材料的比热容), b 为平板表面的散热系数.

收稿日期 2001-01-21 作者简介 庄其仁(1960-), 男, 副研究员

基金项目 福建省自然科学基金资助项目

以 $t=0$ 时刻为坐标原点, 光束移动方向为 X 轴正方向, 建立定坐标系 X, Y, Z . 以光束中心为动坐标原点, 建立随热源移动的动坐标系 X', Y', Z' , 则 X' 轴与 X 轴重合. 图 1 所示为理论研究的坐标定义图.

通常激光深熔焊使用低阶模激光光束, 如 TEM_{00} , 因此可以假定激光作用于金属表面的热源呈高斯分布. 若激光有效功率为 P , 聚焦光斑半径为 w_0 , 则光斑上的功率分布为

$$p(x', y') = \frac{2P}{\pi w_0^2} e^{-\frac{2(x'^2 + y'^2)}{w_0^2}}. \quad (2)$$

令 $k = 2/w_0^2$, 则式(2)可写为

$$p(x', y') = \frac{kP}{\pi} e^{-k(x'^2 + y'^2)}. \quad (3)$$

在深度 Z 方向上, 激光深熔焊形成的小孔充满金属蒸气等离子体, 等离子体可以很好地吸收激光成为热源. 为简化模型, 我们假设激光作用区的金属蒸气是均匀的吸收介质, 吸收系数为 K_s , 并设表面入射激光功率密度为 $p(x', y', 0)$, 穿透小孔深度为 z 的等离子体区域后的功率密度为 $p(x', y', z')$. 那么有⁶⁾

$$p(x', y', z') = e^{-d_0} p(x', y', 0) = e^{-K_s z} p(x', y'), \quad (4)$$

式中 $d_0 = K_s \cdot z$ 称为光学厚度, 表征激光穿透蒸气等离子体被吸收的情况. 于是由式(3), (4)可得单位体积点热源高斯分布三维表示式, 即

$$q(x', y', z') = \frac{kK_s P}{\pi} e^{-K_s z} \cdot e^{-k(x'^2 + y'^2)}. \quad (5)$$

若光束相对工件的移动速度为 v , 则在时刻 $0 \sim t$ 之间的任一时刻 t' , 高斯分布热源在动坐标系 A 点 (x', y', z') 处的 $dx' dy' dz'$ 体积元, 对定坐标系中任一点 $B(x, y, z)$. 其热传导引起的温升, 可由式(1), (5)求得. 即

$$d\theta = \frac{kK_s P}{4\pi^2 \sigma \delta (t - t')} e^{-K_s z} \cdot e^{-k(x'^2 + y'^2)} \cdot e^{-\frac{(x - vt' - x')^2 + (y - y')^2}{4a(t-t')}} k(t-t') \cdot \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{an^2\pi^2(t-t')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi x}{\delta} \cdot \cos \frac{n\pi y}{\delta} \right\} dx' dy' dz' dt. \quad (6)$$

根据叠加原理, 动坐标热源作用于 B 点引起的温升等于整个无限空间的积分, 即

$$d\theta = \frac{kK_s P}{4\pi^2 \sigma \delta (t - t')} \cdot e^{-b(t-t')} \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x - vt' - x')^2}{4a(t-t')}} kx'^2 dx' \right\} \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(y - y')^2}{4a(t-t')}} ky'^2 dy' \right\} \cdot \left\{ \int_0^{\delta} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{an^2\pi^2(t-t')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi x}{\delta} \cdot \cos \frac{n\pi y}{\delta} \right] dz' \right\} dt'. \quad (7)$$

令 $A = 4a(t - t')$, $B = x - vt'$, $k + (1/A) = \xi$, $2B/A = \eta$. 则积分项

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x - vt' - x')^2}{4a(t-t')}} kx'^2 dx' = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\xi x'^2} \cdot \frac{(B - x')^2}{A} dx'$$

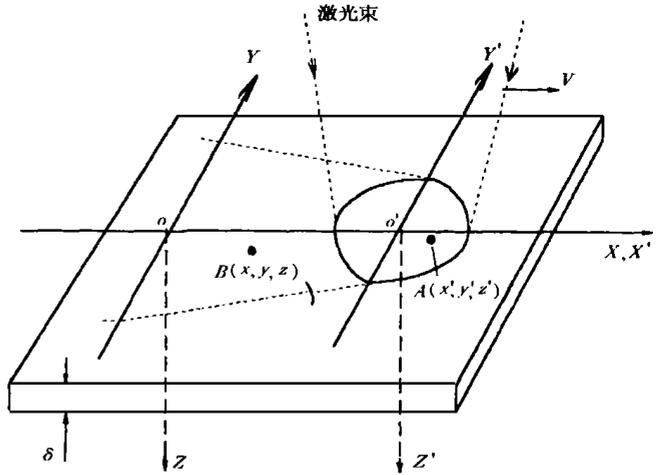


图 1 坐标定义图

$$e^{-\frac{B^2}{A}} \cdot e^{-\xi x^2 + \eta'} dx' = \frac{\pi}{\xi} \cdot e^{-\frac{B^2}{A} + \frac{\eta^2}{4\xi}} = \frac{\pi}{k + \frac{1}{4a(t-t')}} \cdot e^{-\frac{(x-t')^2}{4a(t-t')} + \frac{1}{k}} \quad (8)$$

同理可得

$$e^{-\frac{(y-y')^2}{4a(t-t')}} dy' = \frac{\pi}{k + \frac{1}{4a(t-t')}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4a(t-t')} + \frac{1}{k}} \quad (9)$$

式(7)的最后一个积分项

$$e^{-K_s z'} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{an^2\pi^2(t-t')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi z}{\delta} \cdot \cos \frac{n\pi z'}{\delta} \right] dz' = e^{-K_s z'} dx' + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{an^2\pi^2(t-t')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi z}{\delta} \cdot e^{-K_s z'} \cdot \cos \frac{n\pi z'}{\delta} dz' = \frac{1 - e^{-K_s z}}{K_s} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{an^2\pi^2(t-t')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi z}{\delta} \beta \quad (10)$$

其中

$$\beta = \int_0^{\delta} e^{-K_s z'} \cdot \cos \frac{n\pi z'}{\delta} dz' = \frac{\delta^2 K_s [1 - (-1)^n e^{-K_s \delta}]}{K_s^2 + n^2 \pi^2} \quad (11)$$

将式(8)~(10)代入式(7), 可得

$$d\theta = \frac{p}{4\pi\omega\delta(t-t' + \frac{1}{4ak})} \cdot e^{-\frac{(x-t')^2 + y^2}{4a[(t-t') + \frac{1}{4ak}] - b(t-t')}} \cdot \left\{ (1 - e^{-K_s \delta}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta^2 K_s^2 (1 - (-1)^n e^{-K_s \delta})}{\delta^2 K_s^2 + n^2 \pi^2} \cdot e^{-\frac{an^2\pi^2(t-t')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi z}{\delta} \right\} dt' \quad (12)$$

激光辐射热源的作用结果, 等于各个时刻热源从 $t = 0$ 到 t 的作用结果的叠加, 即

$$\theta(x, y, z, t) - \theta_0 = \int_0^t \frac{p}{4\pi\omega\delta(t-t') + \frac{1}{4ak}} \cdot e^{-\frac{(x-t')^2 + y^2}{4a[(t-t') + \frac{1}{4ak}] - b(t-t')}} \cdot \left\{ (1 - e^{-K_s \delta}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta^2 K_s^2 (1 - (-1)^n e^{-K_s \delta})}{\delta^2 K_s^2 + n^2 \pi^2} \cdot e^{-\frac{an^2\pi^2(t-t')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi z}{\delta} \right\} dt'$$

令 $\frac{1}{4ak} = t_0, x - v(t + t_0) = X, t - t' + t_0 = t'', dt' = -dt''$. 则

$$\theta(X, y, z, t) - \theta_0 = \frac{P}{4\pi\omega\delta} \cdot e^{-\frac{vX}{2a} + bt_0} \cdot \int_{t_0}^{t+t_0} \frac{1}{t''} e^{-\frac{X^2 + y^2}{4at''} - (\frac{z^2}{4a} + b)t''} \cdot \left\{ (1 - e^{-K_s \delta}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta^2 K_s^2 [1 - (-1)^n e^{-K_s \delta}]}{(\delta^2 K_s^2 + n^2 \pi^2)} \cdot e^{-\frac{an^2\pi^2(t'' - t_0')}{\delta}} \cdot \cos \frac{n\pi z}{\delta} \right\} dt'' \quad (13)$$

再令 $X^2 + y^2 = r^2, \frac{vX}{4a} + b = \delta_1, \frac{\delta_1 r^2}{4a} = G, \delta_1 t'' = s, dt'' = \frac{ds}{\delta_1}$. 代入式(13)并整理后, 得

$$\theta(X, y, z, t) - \theta_0 = \frac{p}{4\pi\omega\delta} e^{-\frac{vX}{2a} + bt_0} \cdot \int_{\delta_1 t_0}^{\delta_1(t+t_0)} \frac{1}{s} e^{-s - \frac{G}{s}} \cdot$$

$$\left[1 - e^{-K_s \delta} + 2\delta^2 K_s^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n e^{K_s \delta}}{\delta^2 K_s^2 + n^2 \pi^2} \cdot e^{-\frac{an^2 \pi^2 (s - \delta, t_0)}{\delta^2}} \cdot \cos \frac{n\pi E}{\delta} \right] ds. \quad (14)$$

式(14)即为激光深熔焊高斯分布移动热源,是其作用在有限板厚无限大平板上的三维温度场解析式.

2 公式应用与计算实例

式(5)和式(14)中的 P 是激光转化为热量的有效功率,它取决于金属材料及小孔中金属蒸气(金属等离子体)对激光的吸收比.金属材料在室温时的吸收比很小,当温度升高到接近熔点时,吸收比达到40%~50%;当温度接近沸点时,吸收比高达90%.由于激光深熔焊采用高的激光功率密度,在激光聚焦处金属很快达到沸点,激光吸收比在90%以上.因此,可以认为 P 就是激光器的输出功率.公式中的另一个参数 K_s 是激光束作用区的平均吸收率,主要包括金属蒸气和小孔底部熔融液体的吸收率.由于激光深熔焊是一个复杂的过程,很难在实验中直接测得较为准确的吸收率 K_s .因此,我们可以先估算出一个 K_s 的预测值,按式(14)计算出结果后,再把它与实验结果进行对比.然后对该预测值进行逼近修正.一旦经修正后, K_s 也就被确定.

吸收率 K_s 的预测值可以这样求得.用实验测出对应于一定功率 P_0 的小孔深度 z_0 .由式(4)可知,在小孔底部的激光功率已减小为 $p_0' = p_0 e^{-K_s z_0}$, p_0' 可以看成是使金属达到熔化温度的最低激光功率.在接近汽化温度时,由于金属对激光的吸收比比在接近熔化温度时约大一倍.因此, p_0' 约为使金属表面达到熔化温度所需激光功率的一半.例如,若金属表面达到熔化温度所需激光功率为320 W,则 p_0' 约为160 W.于是,可估算出 $K_s = \frac{1}{z_0} \ln \frac{P_0}{p_0'}$.

根据式(5)计算了CO₂的激光功率 P 为650 W,聚焦光斑半径 w 为0.2 mm的激光焊接45#钢辐射热源功率密度 $q(x', y', z')$ 分布曲线,如图2所示(经修正后 $K_s = 1.5 \text{ mm}^{-1}$).用该热源焊接厚度为2 mm的45#钢板,光斑移动速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.由式(14)计算的温度分布曲线,如图3所示.正反面焊缝宽度的计算结果和实验结果的比较,如图4所示.由图可见,这

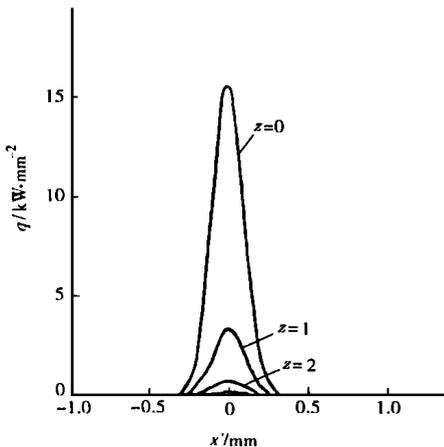


图2 不同深度的激光功率密度分布

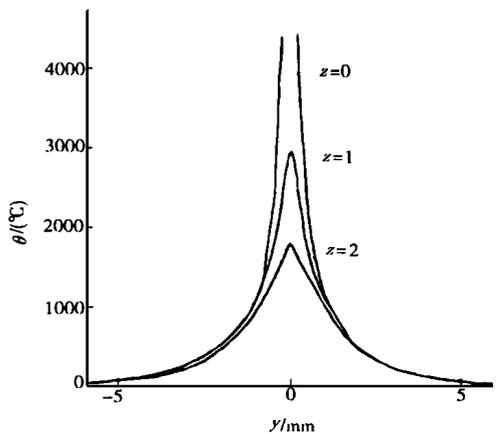


图3 不同深度的温度分布

两个结果符合较好。值得注意的是，铁蒸气的吸收系数 K_s 值约为 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}^{-1}$ 。这里，取 $K_s = 1.5 \text{ mm}^{-1}$ ，说明吸收介质包含金属液体的吸收系数。从图 3 可以看出，达到气化温度的小孔深度小于 1 mm 。因此金属蒸气吸收激光只是小部分，大部分激光能量由金属熔融体吸收。

对于薄板焊接，要避免激光穿透而形成焊缝空洞。一般可通过改变激光功率和光斑移动速度来减小激光穿透深度。激光穿透深度为厚度方向温度高于气化温度的深度，而实验通常测量熔深。图 5 是根据文献 [6] 的实验曲线，计算出 304 不锈钢的激光功率与熔深的关系曲线。由此可见，该计算曲线与实验曲线吻合较好。

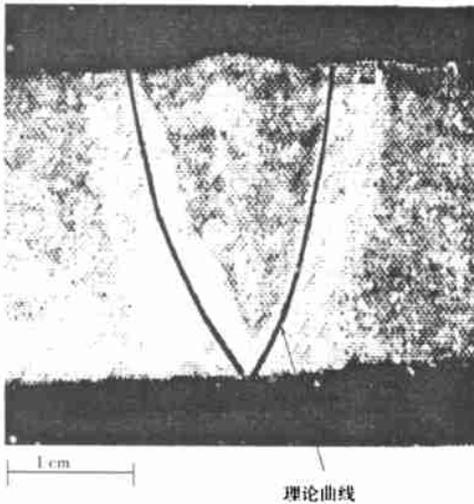


图 4 焊缝宽度的计算结果与实验结果比较

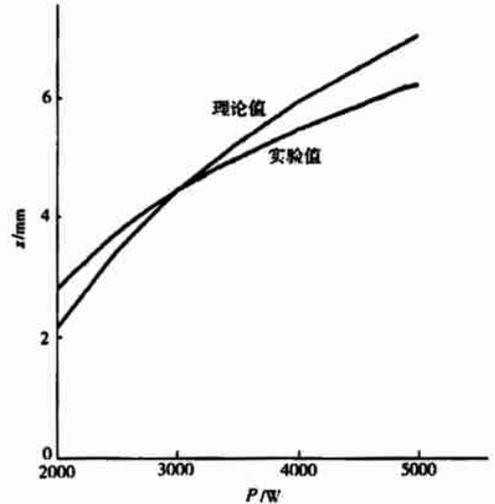


图 5 304 不锈钢的功率与熔深关系曲线

3 讨论

在理论上定量给出激光深熔焊的分析计算结果是很困难的。本文提出的三维温度场解析计算公式是理论上的一个尝试。根据该公式得到的计算结果，能较好地与实验结果相吻合。本文所建立的模型是准静态有源热传导模型，不考虑流体力学和气液界面的各种平衡关系。而是把激光作用区看作是能透光的热源。这样处理的理由是吸收系数可以取平均值。因此，式 (5) 和式 (14) 也适合于计算热传导激光焊。此时，式 (5) 中的吸收系数 K_s 是很大的值 ($10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-1}$)。于是，式 (5) 表示的即是一个面热源。当 $K_s \gg 1$ 时，式 (14) 变为

$$\theta(X, y, z, t) - \theta_0 = \frac{p}{4\pi\sigma\delta} e^{-\frac{rX}{2z} + bt_0} \cdot \frac{\dot{q}_1(t_0)}{\dot{q}_1} \frac{1}{s} e^{-s-\frac{c}{s}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{an^2\pi^2(s-\delta_1 t_0)}{\delta_1^2 \delta^2}} \cdot \cos \frac{n\pi z}{\delta} \right] ds.$$

此结果与直流 TIG 焊温度场解析式一致^[4]。

4 结论

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
 (1) 在激光焊接的理论模型中，可将激光作用下形成的小孔区域作为均匀吸收介质。由此

导出了的介质热源的功率分布三维解析式, 以及由该热源引起的无限大薄板的温度场分布解析式. 该理论计算, 与实验结果符合较好. (2) 当小孔深度为零时, 介质热源即为表面热源, 所得到的解析式与直流 TIG 热传导焊理论解析式一致.

参 考 文 献

- 1 Li Junchang, Yuan Lixia. Mathematical method for optimizing the process of heat treatment with powerful laser[J]. Chinese Journal of Laser, 1992, B1(3): 277 ~ 280
- 2 Duley W W. CO₂ laser: Effects and applications[M]. New York: Academic Press, 1976. 82 ~ 85
- 3 Von A M. Laser-beam interactions with materials[M]. New York: Springer-Verlay Berlin Heidelberg, 1987. 232 ~ 236
- 4 Li Yidan, Xin Guochun, Li Zenguo. Three-dimensional jousian oistributed heat flow calculation[J]. J. Welding, 1997, 18(4): 251 ~ 255
- 5 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics of laser-beam interactions with materials[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1996. 69 ~ 71
- 6 Chao Mingcui, Zheng Qiguang, Chen Zhutao. Laser leat process[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995. 244 ~ 245

Analytic Calculation of Temperature Field Induced by Laser Welding

Zhuang Qiren

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract An analytic method is proposed for calculating temperature field of laser welding. Taking orifice zone formed under laser action as evenly absorbing medium, the author derives a 3D analysis formula to power distribution of heat source in medium; and also an analysis formula to temperature field distribution over infinitely great sheet induced by this heat source. These solutions are verified by calculation and experiment to be correct. Theoretical calculation and experimental results are well-coincided. In case the depth of orifice equals to zero, heat source in medium is just the heat source on surface, the analysis formulae so obtained are consistent with other theoretical ones of heat conducting welding.

Keywords laser deep welding, temperature field, analysis formula