

# 钢-铝异种金属激光-电弧复合焊接数值模拟

孙建华, 谢扬, 侯忠霖, 乔军

先进激光制造中心, 材料与冶金学院, 辽宁科技大学, 辽宁, 鞍山

**简介:** 由于异种金属的热物理性能存在较大差异, 在焊接过程中极易形成金属间化合物, 这给两种材料的焊接造成了一定的困难。因此, 针对钢/铝异种金属焊接存在的难点, 建立了基于COMSOL软件的激光-TIG复合热源焊三维瞬态熔池数值分析模型。利用所建模型对不同焊接条件下的激光-TIG复合热源焊熔池形貌和温度场进行模拟计算, 分别探讨了激光功率、电弧电流及焊接速度对复合焊焊接温度场的影响规律。

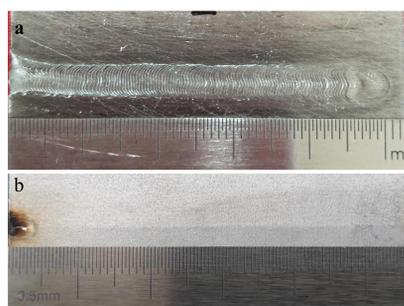


图 1. 钢/铝激光-TIG复合焊接宏观形貌  
a) 正面; b) 反面

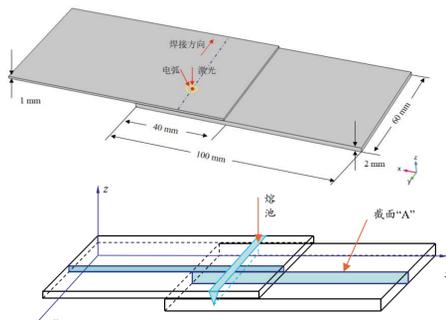


图 2. 激光-TIG复合焊接几何示意图

**计算方法:** 基于COMSOL Multiphysics传热模块建立钢/铝异种金属搭接激光-TIG复合焊模型。复合焊接时, 焊件在空间和时间上的物化性能不断的变化, 其三维瞬态导热微分方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q$$

激光与电弧组成的复合热源并不是两种单一热源的能相加, 应考虑电弧预热焊件提高激光吸收率和激光与电弧作用压缩电弧作用半径两个重要因素, 其中激光热源和电弧热源分别采用高斯体热源模型和高斯面热源, 得到能量方程为:

- Gaussian Volumetric Heat Source

$$q(x, y, z) = q(0,0) \exp \left[ \frac{-3c_s}{\log \left( \frac{H}{z} \right)} (x^2 + y^2) \right]$$

- Gaussian surface heat source

$$q(x, y) = \frac{3P_{arc}}{\pi r_0^2} \cdot \exp \left[ \frac{-3(x^2 + y^2)}{r_0^2} \right]$$

边界条件

- 初始边界条件  $T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$

- 自然边界条件  $k_n \frac{\partial T}{\partial n} - q + h(T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = 0$

$k_n$ : 表面导热率  $q$ : 热通量  $h$ : 对流换热系数

变量	数值	单位
激光峰值电流	90~120	A
焊接速度	5~20	mm·min <sup>-1</sup>
TIG 电流	80~110	A

表 1. 焊接工艺优化表

网格划分

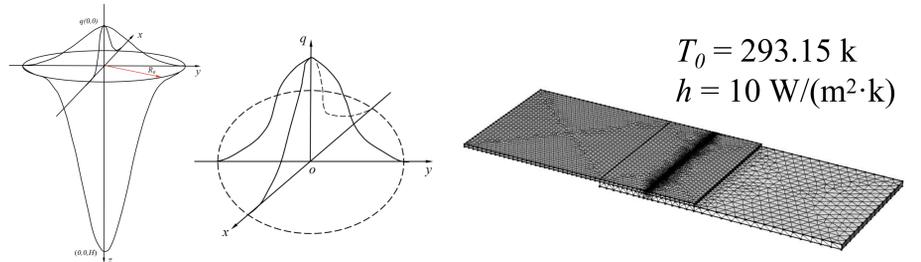


图 3. 高斯体热源模型和高斯面热源模型图示

图 4. 几何形状及网格划分

**结果:** 钢和铝焊接温度场云图及热循环曲线。

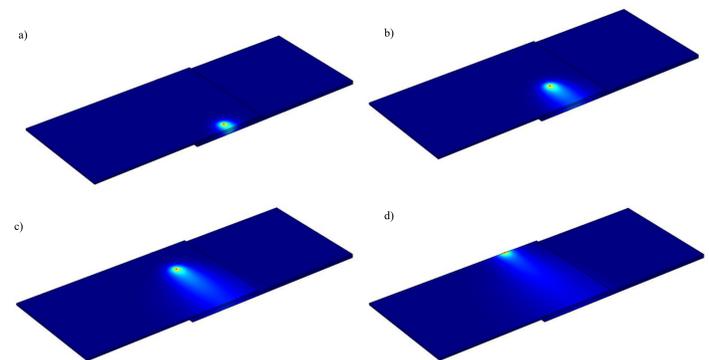


图 5. 钢/铝焊接表面温度分布云图  
a)  $t=0.5$  s; b)  $t=2$  s; c)  $t=4$  s; d)  $t=6$  s

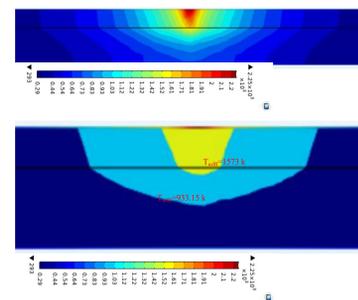


图 6. 接头纵截面温度分布

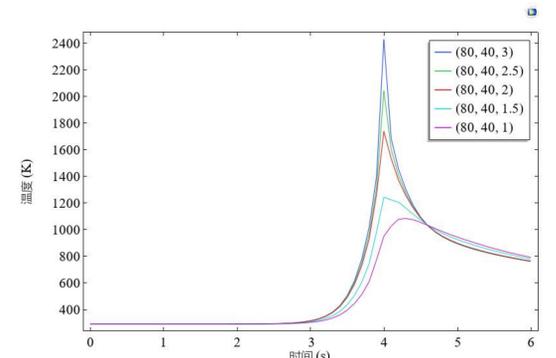


图 7.  $t=4$  s 时厚度方向热循环曲线

**结论:** 钢、铝两种材料的热传导情况是不同的, 以焊缝为分界线, 两侧材料的温度场不是对称分布的, 钢材一侧的温度梯度较高, 等温线更密集。热源中心附近温度梯度较大, 等值线密集分布, 热影响区温度梯度较小, 等值线比较稀疏。增大激光功率, 熔池峰值温度增高, 熔深、熔宽都呈增大趋势; TIG电弧电流对焊接熔宽影响显著, 随着电流增大, 熔宽随之增大; 增大焊接速度, 熔池峰值温度会随之降低, 熔深、熔宽呈降低趋势。

**参考文献:**

- Kong F, Kovacevic R. 3D finite element modeling of the thermally induced residual stress in the hybrid laser/arc welding of lap joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 210,941-950(2010).
- Nezamdoost M R, Esfahani M R N, Hashemi S, et al. Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87,615-624(2016).