

不同焊接条件下 TIG 焊接紫铜厚板的热效应研究

李光民¹, 韩仁通¹, 刘殿宝¹, 闫久春², 李一楠², 赵维巍², 于汉臣², 杨士勤²

(1. 渤海船舶重工集团有限公司工艺研究所, 辽宁 葫芦岛 125004;

2. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001, E-mail: leegm1952@sina.com.cn)

摘要: 为改善紫铜厚板的焊接性, 采用商业有限元软件 Marc 对钨极气体保护焊接紫铜厚板的温度场进行模拟, 并详细讨论了焊接电流以及预热温度对熔池和热影响区的影响. 结果表明, 熔池和热影响区均随着预热温度和焊接电流的增加而增加, 因此, 在采用不同的预热温度和焊接电流的组合可以得到相同尺寸的熔池, 但热影响区尺寸差别很大; 在 20 ℃ 时采用 He 或 N₂ 气保护焊得到的熔池尺寸与 Ar 气保护预热 400 ℃ 时得到的熔池尺寸基本一致, 但热影响区的尺寸窄于 Ar 气保护预热 400 ℃ 时得到的热影响区尺寸.

关键词: 紫铜厚板; 钨极气体保护焊; 熔池; 热影响区; 氦弧焊; 氮弧焊

中图分类号: TG444.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0299(2009)01-0013-04

Thermal effects of gas tungsten arc welding for thick copper plates at different welding condition

LI Guang-min¹, HAN Ren-tong¹, LIU Dian-bao¹, YAN Jiu-chun²,

LI Yi-nan², ZHAO Wei-wei², YU Han-chen², YANG Shi-qin²

(1. Technology Institute, Bohai Shipbuilding Heavy Industry Co. Ltd, Huludao 125004, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, E-mail: leegm1952@sina.com.cn)

Abstract: To improve the weldability of thick copper plates, the welding temperature patterns of gas tungsten arc welding for thick copper plates were simulated by the commercial finite element software Marc, and the effects of different welding currents and different preheating temperatures on the size of weld pools and heat-affected zones were discussed. Results show that both the weld pools and the heat-affected zones increase with the increasing preheating temperatures or welding currents. Weld pools with the same size can be obtained by combining different welding currents and preheating temperatures, while the sizes of their heat-affected zones are different very much. The sizes of weld pools obtained by He or N₂ arc welding at 20 ℃ come up to those obtained by Ar arc welding at the preheating temperature of 400 ℃, and the heat-affected zones are narrower than those obtained by Ar arc welding at the preheating temperature of 400 ℃.

Key words: thick copper plates; gas tungsten arc welding (GTAW); weld pool; heat-affected zone; helium arc welding; nitrogen arc welding

紫铜厚板以其优秀的高塑性, 高导电性以及优良的抗腐蚀性能广泛用于容器和管道上. 钨极氦弧焊以及熔化极氦弧焊易实现、成本低, 是用于焊接紫铜厚板最常用的方法, 但是, 钨极氦弧焊采用 Ar 保护焊接紫铜时, 厚度超过 4 mm 则需要预

热^[1]. 采用 400 ℃ 预热 Ar 气保护焊接 6 mm 紫铜厚板可以得到合适的熔深, 采用 He 气保护不预热焊接也能得到相近的熔深^[2]. 氮弧焊不预热时也可以用于焊接紫铜厚板^[3-6]. 但是, He 弧焊和 N₂ 弧焊焊件受热影响的规律还不系统和完整, 因此, 预测采用不同保护气 Ar、He 以及 N₂ 气保护时的钨极气体保护焊下温度场就很重要.

用于实际焊接的热源的数学模型通常基于高斯、半球、椭球或者双椭球能量密度分布的模型,

收稿日期: 2007-03-28.

作者简介: 李光民(1952-), 男, 教授级高级工程师;

闫久春(1964-), 男, 教授, 博士生导师;

杨士勤(1939-), 男, 教授, 博士生导师.

双椭球热源模型不但能够考虑电弧压力的作用,而且能够处理穿透力高的情况.因此,本文采用双椭球热源分布以确保模拟的精度.在模拟过程中,热源模型的尺寸被定义为一些可变的参数,通常可以简单选择参数尽可能适应试验结果即可,也可以通过测量金相照片得到实际尺寸来确定参数.

本文中,热源模型的建立是基于有限元方法和熔池的实际尺寸.模型用于讨论在不同预热温度下钨极氩弧焊接紫铜厚板时的熔池和热影响区,并分析了在室温下采用不同保护气焊接时的熔池和热影响区.

1 模型建立

Marc 软件被用于构建几何模型和模拟焊接温度场.模型的尺寸为 $240\text{ mm} \times 96\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,与用于验证试验的紫铜厚板的尺寸一致.为了简化模拟过程,做以下假设.

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_z Q}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{a_1^2}\right] \exp\left[-\frac{3z^2}{c^2}\right] \exp\left\{-\frac{3[y + v(\tau - t)]^2}{b^2}\right\}, \quad (1)$$

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_2 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{a_2^2}\right] \exp\left[-\frac{3z^2}{c^2}\right] \exp\left\{-\frac{3[y + v(\tau - t)]^2}{b^2}\right\}. \quad (2)$$

式中: v 为焊接速度; τ 为初始时刻的滞后因子(这里采用 2 s); a_1, a_2, b, c 是熔池形状参数(见图 1), 本文通过测量焊缝的横截面的金相照片得到该值; f_z 和 f_r 为输入热源的前后分布指数($f_z + f_r = 2$), 其值分别可以选择 0.6 和 1.4 , 或者 0.8 和 1.2 , 然而测试结果表明熔池前后尺寸的比例接近 1.5 , 所以, 选用 0.8 和 1.2 ; Q 为热输入量, 其值 $Q = \eta \times U \times I$, 其中, U 为焊接电压, I 为焊接电流, η 为热效率. Ar 弧焊、He 弧焊和 N_2 弧焊的 η 分别采用 $0.7, 0.85$ 和 0.9 (多次试算所得).

图 2 为模拟过程的流程图. 首先, 通过测试得到 U, I, v 等电弧参数, A_1, A_2, B, C 熔池的实际尺寸. 其次, 熔池形状参数(a_1, a_2, b, c) 采用真实尺寸(A_1, A_2, B, C). 再次, 通过多次试算确定 f_z, f_r, η . 最后, 用 Fortran 语言编程, 将热输入方程和各参数编入子程序, 当再用 Marc 软件调用 Fortran 子程序后, 则建立焊接温度场模型. 温度场图形中超过熔点 $1083\text{ }^\circ\text{C}$ 的区域被认为是熔池部分, 同时温度场中 $800 \sim 1083\text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间的部分被认为是热影响区($800\text{ }^\circ\text{C}$ 超过了紫铜的再结晶温

度).

1) 紫铜为各向同性. 焊接过程不发生相变.

2) 由于熔池内部流动能增加热传导率, 所以将熔池内部的热传导系数增加到原来的 1.1 倍.

3) 考虑辐射和对流共同的热影响, 对流换热系数被适当的增加到 $1.3 \times 10^{-4}\text{ W/mm}^2$.

本文中, 焊接热源采用双椭球能量密度分布的模型. 图 1 为焊接熔池的立体形状参数示意图.

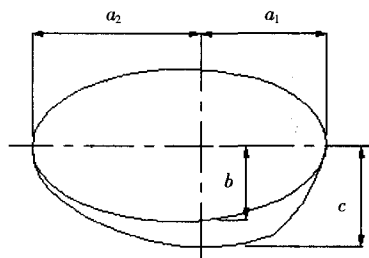


图 1 焊接熔池的立体形状参数示意图

热源的能量密度如下, 方程(1)和(2)分别为前后能量密度.

度).

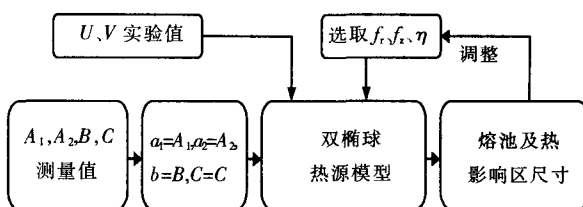


图 2 模拟过程流程图

2 结果与讨论

表 1 中的模拟结果是通过测量模拟的几何模型的网格得到的, 从表 1 可知, 不同条件下熔池宽度和深度的模拟与测试的差值比均小于 25% , 这意味着上述模型可用于以下模拟.

图 3 为不同预热温度下氩弧焊温度场图形. 在室温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 进行焊接时熔池没有形成, 也就是说, 铜板没有熔化, 这也得到试验的证实. 预热到 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时熔池的宽度为 1 mm , 并随着预热温度的提高而增大(见表 2). 当预热温度高于 $300\text{ }^\circ\text{C}$, 熔池宽度可超过 3.5 mm , 此时熔池尺寸足够大可填充进焊材. 因此, 采用钨极氩弧焊预热温度必须高于 $300\text{ }^\circ\text{C}$. 从图 3 和表 2 可知, 预热温度高于

200 ℃ 时,800 ℃ 以上区域的宽度随着预热温度的增加而增加. 因为 800 ℃ 已经超过了紫铜的再结晶温度,所以本文认为热影响区的尺寸必然也随着预热温度的提高而增加. 预热温度高于 500 ℃ 热影响区的尺寸过宽,因此,用 Ar 弧焊接紫铜厚板预热温度应控制在 300 ~ 500 ℃.

表 1 计算和试验熔池尺寸对比

焊接条件	氩弧/(400 ℃)			氩弧 (20 ℃)			氩弧 (20 ℃)		
	模拟值	实验值	$\mu / \%$	模拟值	实验值	$\mu / \%$	模拟值	实验值	$\mu / \%$
宽度/mm	5.0	6.6	24.5	5.2	5.8	10.3	4.8	5.4	11.1
深度/mm	2.0	1.8	11.1	2.0	1.6	25.0	1.8	1.5	20.0

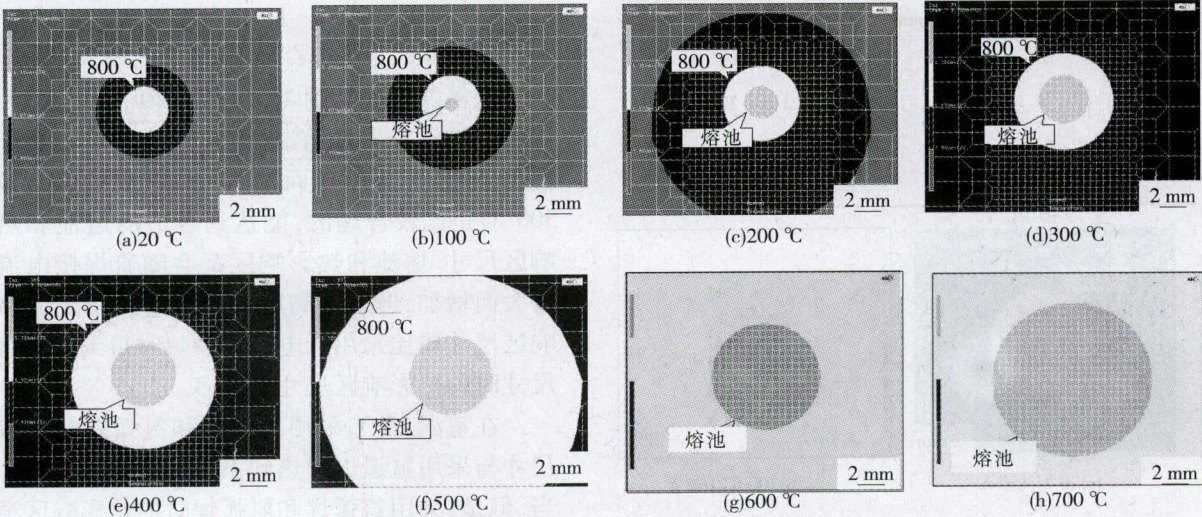


图 3 氩弧焊不同预热温度下焊接接头温度场(焊接电流:280 A)

表 2 氩弧焊不同预热温度下熔池和 800 ℃ 以上区域的宽度

预热温度/℃	20	100	200	300	400	500	600	700
熔池尺寸/mm	0	1.0	2.5	3.8	5.0	6.2	8.2	12.2
800 ℃ 以上区域尺寸/mm	1.7	1.7	1.5 ~ 1.8	1.8 ~ 2.2	2.7 ~ 3.4	5.2 ~ 8.8	12.5 ~ 30.5	32 ~ 87

图 4 为采用 Ar 弧焊 20 ℃ 时不同焊接电流下的温度场图形. 表 3 为不同电流下的熔池和 800 ℃ 以上区域的宽度,可以发现熔池和 800 ℃ 以上的区域都随着焊接电流的增大而增加,并且在采用 380、480 A 和 580 A 时的熔池宽度分别超过了采用 280 A 电流焊接时预热 300、400 ℃ 和 500 ℃ 时的熔池宽度. 然而,800 ℃ 以上区域的宽度相比在

采用 280 A 电流比预热到 400 ℃ 时的宽度要窄. 那么可以推断采用 380、480 A 和 580 A 时的热影响区的尺寸要窄于采用 280 A 电流和预热 400 ℃ 时的尺寸. 当焊接电流超过 380 A 时焊接熔池的宽度超过 3.5 mm,焊接时足够填充焊材,因此,室温下焊接紫铜焊接电流应高于 380 A 以确保合适的熔池尺寸.

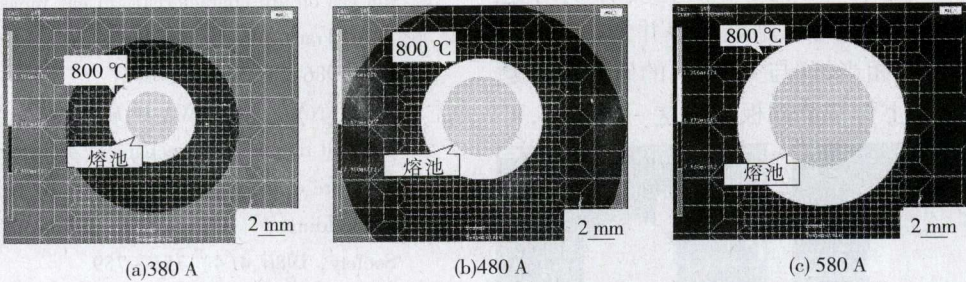


图 4 室温 20 ℃ 氩弧焊采用不同焊接电流时温度场

通过分析熔池能随着预热温度和焊接电流的增加而增加的规律,可知采用不同电流和预热温度的组合可得到相同尺寸的熔池. 图 5 为两种电流和

预热温度组合的熔池图形. 这两种组合下的熔池及 800 ℃ 以上区域的宽度见表 4. 通过多次的试算,得到与采用 280 A 焊接电流和预热 400 ℃ 时具有相

同尺寸熔池的两种工艺:1)室温下采用 450 A 焊接电流;2)采用 160 A 焊接电流并预热到 700 ℃(见表 4)。但是,热影响区的尺寸差异很大,室温下采用 450 A 焊接电流的 800 ℃ 以上区域的宽度只有 1.5 mm,而采用 160 A 焊接电流并预热到 700 ℃ 时进行焊接的 800 ℃ 以上区域的宽度超过了 18 mm,也就是说,此时热影响区会过大。

表 3 室温 20 ℃ 下氩弧焊采用不同的焊接电流时熔池和 800 ℃ 以上区域的宽度

焊接电流/A	熔池尺寸/mm	800 ℃ 以上区域尺寸/mm
280	0	1.7
380	3.8	1.1~1.2
480	5.8	1.2~1.7
580	7.4	1.8~2.7

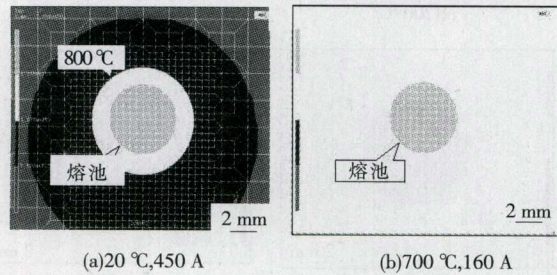


图 5 采用两种可能的焊接电流与预热温度组合时的温度场图形

表 4 采用两种可能的焊接电流与预热温度组合时的熔池和 800 ℃ 以上区域的宽度

焊接电流 /A	预热温度 /℃	熔池尺寸 /mm	800 ℃ 以上区域尺寸/mm
450	20	5.0	1.2~1.5
280	400	5.0	2.7~3.4
160	700	5.0	18.0~43.0

图 6 为室温下采用不同的保护气进行钨极气体保护焊的温度场图形。从图 3(a)可知,室温下采用氩弧焊没有熔池。然而,由表 5 可见,室温下采用 He 弧焊和 N₂ 弧焊的熔池宽度分别可达 5.2 mm 和 4.8 mm,这与采用氩弧焊并预热到 400 ℃ 时的熔池尺寸相当,这与 Dawson 的研究结果是一致的。在室温下焊接紫铜板达到这一尺寸时,可

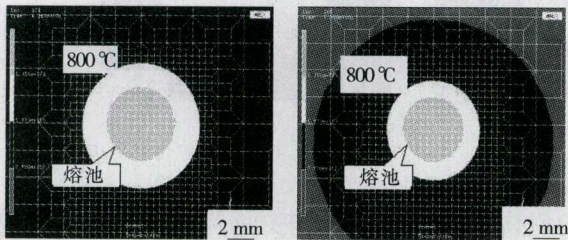


图 6 室温 20 ℃ 采用不同保护气进行钨极气体保护焊的温度场模型(焊接电流: 280A)

以达到填充焊材的尺寸要求。同时,采用氩弧焊和氮弧焊时的热影响区要窄于采用氩弧焊并预热到 400 ℃ 时的热影响区。

表 5 室温 20 ℃ 采用不同保护气时熔池和 800 ℃ 以上区域的宽度 (mm)

保护气	Ar	Ar (400 ℃)	He	N ₂
熔池尺寸	0	5.0	5.2	4.8
800 ℃ 以上区域尺寸	1.7	2.7~3.4	1.7~2.0	1.2~1.3

3 结 论

在氩弧焊接紫铜时,在室温 20 ℃ 采用 280 A 焊接电流没有出现熔池,而且熔池和热影响区都随预热温度的提高而增大。预热温度在 300 ~ 500 ℃ 是比较合理的,能达到合适的熔池和热影响区尺寸。熔池和热影响区都会随着焊接电流的增大而增加,但采用高电流焊接时所得到的热影响区尺寸要比采用低电流并预热时得到相同熔池尺寸时的热影响区尺寸窄很多。

在室温 20 ℃ 采用氩弧焊和氮弧焊时的熔池尺寸与采用氩弧焊预热到 400 ℃ 时的熔池尺寸相当。但是,采用氩弧焊和氮弧焊时的热影响区窄于采用氩弧焊预热到 400 ℃ 时的热影响区。

参考文献:

[1] SALÂHADDIN A, LUTZ D. Metallo-physical processes in the welding of copper and copper alloys-welding methods [J]. Welding and Cutting, 1988,9:E139-E143.

[2] DAWSON R J. Selection of shielding gases for the gas shielding arc welding of copper and its alloys[J]. Welding in the World, 1973,11(3-4):50-55.

[3] SPILLER K R. Welding copper by the gas shielding arc process[J]. Metal construction and British welding journal, 1970,2:45-53.

[4] HIRAOKA K, OKADA A, INAGAKI M. Effects of Helium gas on arc characteristic in gas tungsten arc welding [J]. Transaction of National Research Institute for Metals, 1986,28(2):139-145.

[5] KUWANA T, KOKAWA H, HONDA A. Effects of nitrogen and titanium on mechanical properties and annealed structure of the copper weld metal by Ar-N₂ gas metal arc welding[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1986,4(4):753-759.

[6] KUWANA T, KOKAWA H, HONDA A. Effects of nitrogen and titanium on porosity and microstructure in Ar-N₂ gas metal arc welding copper[J]. Transaction of the Japan Welding Society, 1987,18(2):69-76.

(编辑 吕雪梅)