

# 厚板双 TIG 打底焊缝根部熔合的数值模拟

杨东青, 李大用, 张广军

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:**建立了厚板双面双 TIG 打底焊有限元模型,并通过焊接试验验证该模型的合理性及准确性。在此基础上分别对不同错边及钝边的坡口形式下厚板打底焊温度场进行了模拟。结果表明,随着预留间隙的增大,双弧打底焊可熔化的钝边量增大,可允许的错边范围先增大后减小;在厚板打底焊时,当钝边及错边之和不超过 4 mm 时预留 2~4 mm 的间隙能够得到根部熔合良好的焊缝;存在的错边及钝边量之和超过 6 mm 将产生未焊透缺陷;当钝边及错边之和在 4~6 mm 之间时打底焊缝根部熔合情况随着间隙改变而变化。

**关键词:**双面双 TIG 打底焊; 根部熔合; 温度场数值模拟

中图分类号: TG 444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)04-0013-04

## 0 序 言

随着工业技术的不断发展,高强钢厚板结构的应用越来越广<sup>[1]</sup>。传统的厚板焊接工艺生产效率低,焊缝质量差<sup>[2]</sup>,不能满足工业化生产对高强钢厚板结构的需求。为本文中提出了厚板高效化焊接方法——双面双弧焊接工艺<sup>[3,4]</sup>,焊接时厚板开对称的双 V 形坡口,采用双面双 TIG 焊打底、双面双 MAG 焊填充盖面,在预留 2~4 mm 间隙时,可以得到根部熔合良好的打底焊缝,从而免去了传统厚板焊接工艺的清根工序,提高了厚板焊接效率及焊缝接头质量<sup>[5]</sup>。但是,在实际厚板焊接时,由于装配精度难以控制产生厚板间的错边、坡口加工时残留的钝边等使得厚板打底焊时产生未熔合未焊透等缺陷,阻碍了双面双弧焊接工艺在实际焊接生产时的应用。因此本文主要对高强钢厚板双 TIG 打底焊时厚板间错边、坡口处钝边对打底焊缝成形的影响进行研究。由于高强钢厚板焊接成本较高,而所要研究的参数多试验量较大,因此本文中采用数值模拟的方法从温度场角度来研究错边、钝边量对打底焊缝根部熔合的影响,最终得到厚板双弧焊所能允许的错边、钝边量的范围,为实际厚板双弧焊提供理论依据。

## 1 厚板双 TIG 打底焊接试验

文中采用错位的双面双 TIG 填丝焊进行厚板打

底焊,如图 1 所示,焊接时两焊枪采用独立的焊接电源,焊枪之间有 30~50 mm 的距离,坡口尖端处预留间隙 2~4 mm。在打底焊过程中保持各焊接工艺参数基本一致,如表 1 所示,焊接热输入约 20 kJ/cm 为该高强钢所允许的最大热输入。所使用的高强度钢成分如表 2 所示。

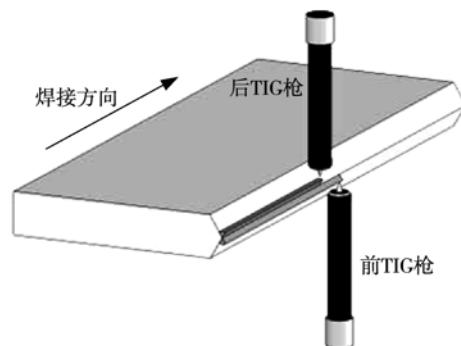


图 1 厚板双面双 TIG 打底焊示意图

Fig. 1 Double-sided double TIG arc welding of thick plate

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

峰值电流 $I_p/A$	基值电流 $I_b/A$	频率 $f/Hz$	电弧电压 $U_a/V$	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	双弧间距 $l/mm$
190~240	95~120	0.8~1.0	12~20	5~10	30~50

## 2 厚板打底焊有限元模型的建立

### 2.1 几何模型

模拟采用的厚板尺寸如图 2 所示,开 X 形的对

表2 低合金高强度钢化学成分(质量分数, %)  
Table 2 Chemical constitutions of low alloy high strength steel

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
0.09 ~ 0.13	0.18 ~ 0.31	0.54 ~ 0.59	4.40 ~ 4.54	0.53 ~ 0.68	0.36 ~ 0.44	余量

称坡口,坡口角度60°。文中主要研究坡口处钝边及错边对打底焊缝根部熔合的影响,因此在建立模型时如图3所示将原对称的X形坡口改变为有一定钝边及错边的坡口形式,坡口处钝边量和错边量为0~5 mm,预留间隙为2~4 mm。

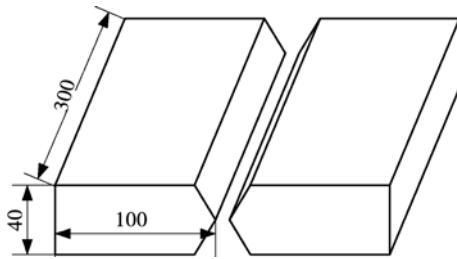


图2 厚板模型尺寸(mm)

Fig. 2 Dimensions of thick plate model

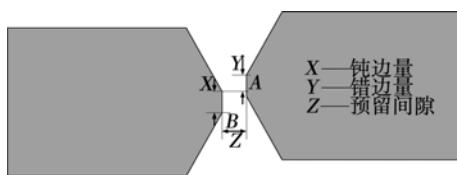


图3 厚板模型坡口形式

Fig. 3 Groove forms of thick plate model

## 2.2 材料参数及相变潜热的处理

文中采用的厚板材料是低合金高强钢,参考文献[3]中材料热物理参数比热和热导率如表3所示,材料密度取常数为7.8 g/cm<sup>3</sup>,熔点为1450 °C。文中采用热焓法处理熔化潜热<sup>[6]</sup>,在MSC. Marc软件中,通过直接输入固、液相变温度和潜热值来计算固液相变的作用。固相线温度为1450 °C,液相线温度为1550 °C,相变潜热为150 kJ/kg。

## 2.3 热源模型选择

由于厚板预留间隙2~4 mm,焊接时有较多的电弧穿过坡口间隙,因此采用双椭球+锥形复合热源模型。如图3所示,为典型的同时存在错边和钝边的坡口形式,当前弧热源加载时,在A处以上均采用双椭球热源,A处以下则采用三维锥体热源模型。当后弧热源加载时,B处以下采用双椭球热源,而B处以上则采用锥体热源模型。复合热源的能量分配按照其实际需要熔化金属的横截面积比例进行

表3 低合金高强度钢热物理参数

Table 3 High-strength low-alloy steel thermophysical parameters

温度 <i>T</i> /°C	热导率 <i>k</i> /(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	温度 <i>T</i> /°C	比热容 <i>c</i> /(J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
20	31 330.00	20	442.00
120	33 397.15	100	539.24
400	35 089.60	250	601.12
600	31 695.93	500	760.24
700	27 831.07	750	981.24
800	24 352.18	800	1 021.02
1 000	25 047.96	1 500	1 021.02
1 200	25 743.74	3 500	1 021.02
2 000	27 543.12		
3 500	31 079.36		

分配。假设总的热源功率为 $Q = I \times U_a$ (其中*I*为平均电流,*U<sub>a</sub>*为电弧电压),而 $Q = Q_1 + Q_2$ ,*Q<sub>1</sub>*为双椭球热源功率,*Q<sub>2</sub>*为三维锥体热源功率。双椭球热源热流密度公式<sup>[7]</sup>为

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f\eta Q_1}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} \times \exp\left(\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_f^2}\right) \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r\eta Q_1}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} \times \exp\left(\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_r^2}\right) \quad (2)$$

式中:*a*,*b*,*c<sub>f</sub>*,*c<sub>r</sub>*为双椭球热源形状参数,其值根据实际焊缝来确定;*f<sub>f</sub>*,*f<sub>r</sub>*为热源在前后部分的分布系数,*f<sub>r</sub>*+*f<sub>f</sub>*=2;η为焊接热效率,文中TIG填丝焊取0.75;如图4所示三维锥形热源模型<sup>[6]</sup>,热流密度公式<sup>[7]</sup>为

$$q(r, z) = \frac{9\eta Q_2 e^3}{\pi(e^3 - 1)} \times \frac{1}{(z_e - z_i)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \times \exp\left(\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

$$r_0 = r_e - (r_e - r_i) \times \frac{z_e - z}{z_e - z_i} \quad (5)$$

式中:*z<sub>e</sub>*,*z<sub>i</sub>*,*r<sub>e</sub>*,*r<sub>i</sub>*为三维锥形热源模型的形状参数如图4所示,其中*z<sub>e</sub>-z<sub>i</sub>*为锥体热源的厚度,*r<sub>e</sub>*和*r<sub>i</sub>*为热源上下表面的热流分布半径,热流分布半径*r<sub>0</sub>*沿厚度方向呈线性衰减。它们的值可根据所建立的焊道尺寸来确定。

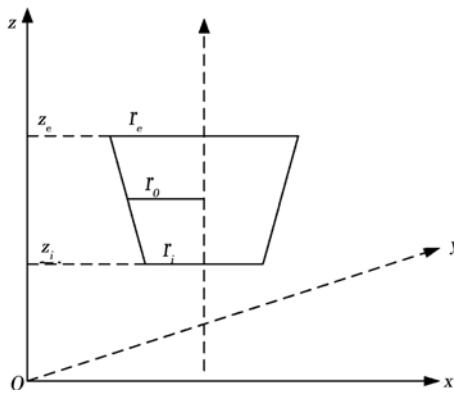


图4 三维锥形热源模型

Fig. 4 Three-dimensional conical heat source model

在 MSC. Marc 有限元软件中,锥体热源需要通过子程序模块才能实现热源的加载。在模拟时将采用焊接功率和焊接速度来体现不同的焊接工艺。

#### 2.4 模型的验证

对上述模型进行试验验证,图 5a 为钝边 2 mm 时试验打底焊缝横截面,图 5b 为模拟当前热源作用中心位置的横截面温度场,其中灰色区域表示温度在熔点(1 450 ℃)以上的金属,可看作是熔池。由图 5 中可知两者熔池边界形状相似,说明该模型较为准确。图 6 中为错边 3 mm 时得到的打底焊缝横截面,模拟结果与试验相比也接近。采用热电偶测量单 TIG 焊接时的焊接热循环曲线。如图 7 所示模拟与试验结果基本一致,说明了所建立的有限元模型的合理性。

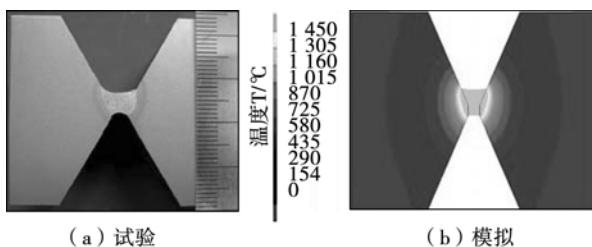


图5 钝边 2 mm 时打底焊缝横截面

Fig. 5 Backing weld cross-section with 2 mm root face

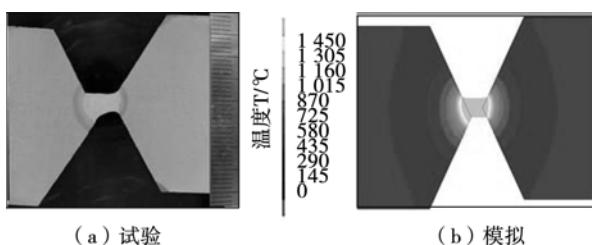


图6 错边 3 mm 时打底焊缝横截面

Fig. 6 Backing weld cross-section with 3 mm misalignment

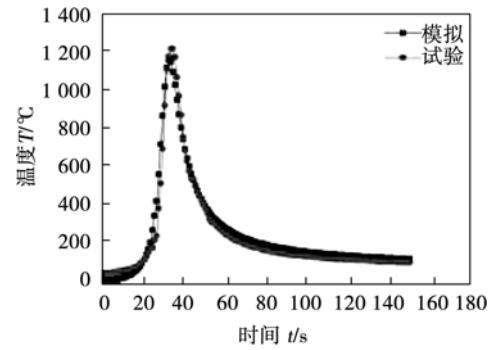


图7 单 TIG 焊接 HAZ 热循环曲线

Fig. 7 HAZ thermal cycle of single TIG welding

### 3 模拟结果分析

文中主要从温度场角度来研究坡口钝边及错边对打底焊缝根部熔合的影响。在上述有限元模型的基础上分别对不同坡口形式下厚板打底焊接温度场进行计算,采用的热输入均为 20 kJ/cm,焊接速度 1 mm/s,两弧间距 30 mm。观察其熔池形态,根据模拟结果的不同可分为以下三种情况:A)单 TIG 焊时能将坡口处的钝边及错边全部熔化,单面焊双面成形,如图 5b,图 6b 所示;B)通过双弧共同作用使坡口处钝边及错边全部熔化,焊缝根部熔透,如图 8 所示;C)即使在双弧作用下也不能将坡口处钝边及错边全部熔化,焊缝根部未焊透或未熔合缺陷,如图 9 所示。因此对于 A, B 两类情况厚板打底焊时即可得到根部熔透的焊缝,实现厚板不清根高效化焊接,而对于 C 类情况则可以认为在焊接时无法得到根部熔合良好的焊缝,双弧焊工艺不宜采用。

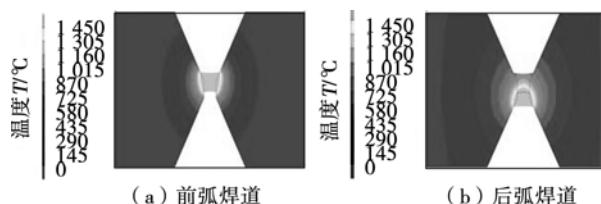


图8 双弧打底焊缝根部熔透

Fig. 8 Penetrated weld with double arc backing weld

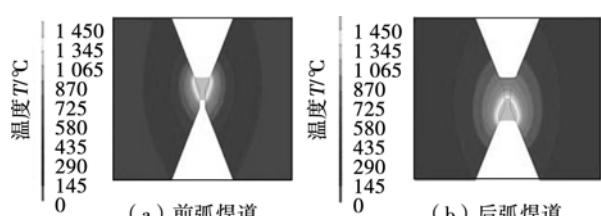


图9 双弧打底焊缝根部未焊透

Fig. 9 Nonpenetrated weld with double arc backing weld

在预留间隙2~4 mm时,各种坡口形式下焊缝根部熔合情况如表4~表6中所示。表中X和Y分别代表图3中所列出的钝边量和错边量,单位均为mm。其中可以看出,在2~4 mm的预留间隙下,当 $X+Y\leq 4$  mm时均可以在正常的热输入下获得根部熔透的打底焊缝;当 $X+Y>6$  mm时,在正常的焊接参数下坡口中间金属多数未能熔化,易产生根部未焊透的焊缝;当 $4 \text{ mm} < X+Y \leq 6$  mm时,打底焊缝成形较为复杂:当预留间隙2 mm时,可以看出只有在错边3~4 mm时并且钝边小于3 mm时才会获得根部熔透的焊缝;预留间隙3 mm时,则是在错边2~5 mm时将根部熔透;预留间隙4 mm时则在钝边2~5 mm时能将焊缝根部熔透,因而间隙越大,其所

表4 预留2 mm间隙打底焊缝根部熔合情况  
Table 4 Backing weld root fusion case of reserved 2 mm groove gap

钝边量 X/mm	错边量 Y/mm					
	0	1	2	3	4	5
0	A	A	B	B	B	C
1	A	B	B	B	B	C
2	A	B	B	B	B	C
3	B	B	C	C	C	C
4	B	C	C	C	C	C
5	C	C	C	C	C	C

表5 预留3 mm间隙打底焊缝根部熔合情况  
Table 5 Backing weld root fusion case of reserved 3 mm groove gap

钝边量 X/mm	错边量 Y/mm					
	0	1	2	3	4	5
0	A	A	A	B	B	B
1	A	A	B	B	B	B
2	A	B	B	B	B	C
3	B	B	B	B	C	C
4	B	C	B	C	C	C
5	C	C	C	C	C	C

表6 预留4 mm间隙打底焊缝根部熔合情况  
Table 6 Backing weld root fusion case of reserved 4 mm groove gap

钝边量 X/mm	错边量 Y/mm					
	0	1	2	3	4	5
0	A	A	B	B	B	C
1	A	A	B	B	C	C
2	A	A	B	B	C	C
3	A	B	B	B	C	C
4	B	B	B	C	C	C
5	B	B	C	C	C	C

能熔化的钝边量范围增大,错边量范围则减小。从整体来看,随着坡口预留间隙的增大,在热输入相同时,厚板打底焊缝根部熔合的情况增多,可允许的坡口钝边量不断增大,错边量范围先增大后减小。

## 4 结 论

(1) 建立了厚板打底焊有限元模型,并通过试验对其进行验证,采用双椭球+三维锥体复合热源模型得到的熔池尺寸与实际焊缝相近。

(2) 模拟结果说明随着预留间隙增大,可熔化的钝边量增大,可允许的错边量先增大后减小。

(3) 在厚板打底焊时,预留间隙2~4 mm时,可允许存在的错边及钝边量之和不能超过6 mm,否则产生未焊透缺陷;钝边及错边量之和在6 mm以内厚板双TIG打底焊缝根部是可以焊透熔透的。

## 参考文献:

- [1] Pocock G. High strength use in australia, japan and the US[J]. Journal of The Structural Engineer, 2006, 84(21): 27~30.
- [2] 邹增大, 李亚江, 尹士科. 低合金调质高强钢焊接及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 张华军, 张广军, 王俊恒, 等. 低合金高强钢双面双弧焊热循环对组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 81~84. Zhang Huajun, Zhang Guangjun, Wang Junheng, *et al.* Effect of thermal cycles of DSAW on microstructure in low alloy high strength steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 81~84.
- [4] 刘殿宝, 李福泉, 谭财旺, 等. EH36钢厚板双面双弧打底焊缝组织及性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 81~84. Liu Dianbao, Li Fuquan, Tan Caiwang, *et al.* Microstructure and performance of backing weld joint of EH36 steel thick plate by double-side arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 81~84.
- [5] 刘殿宝, 张广军, 吴林. 大厚板双面双TIG打底焊熔池成形特性[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 37~40. Liu Dianbao, Zhang Guangjun, Wu Lin. Characteristics of pool formation in backing weld for large and thick plates using double-sided double TIG arc welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(3): 37~40.
- [6] Chin H L, Kyong H C. Finite element simulation of the residual stresses in high strength carbon steel butt weld incorporating solid-state phase transformation[J]. Computational Materials Science, 2009, 46: 1014~1022.
- [7] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

**作者简介:** 杨东青,男,1990年出生,博士研究生。主要从事高强钢厚板焊接及电弧增材制造研究。Email: 13B909089@hit.edu.cn

**通讯作者:** 张广军,男,教授,博士研究生导师。Email: zhanggj@hit.edu.cn