

# 基于厚板窄间隙双丝焊机理研究的 焊枪优化设计

吴 灿<sup>1</sup>, 刘 强<sup>1</sup>, 陈福兰<sup>2</sup>

(1. 江苏航运职业技术学院 船舶与海洋工程学院, 江苏 南通 226010;

2. 江苏航运职业技术学院 智能制造与信息学院, 江苏 南通 226010)

**摘 要:**通过对双丝窄间隙焊接过程中的三种双熔池组合进行温度场有限元分析,结合有限元温度场云图分析,设计了具有并列偏心焊丝电极的窄间隙焊枪。通过焊接测试证实,该焊枪在焊接过程中不堵枪、不断弧,电极头部的弧形导电嘴设计既有利于熔池在有限空间内实现偏向侧壁,又能保证焊丝在电极出丝口电接触良好;通过对实际焊接试件的焊道取样分析,侧壁熔合状态良好、焊道无缺陷。新型焊枪在厚板窄间隙焊接效率提升方面有一定的应用价值。

**关键词:**窄间隙;双丝;焊枪;机理研究

**中图分类号:**TG44

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0358(2022)4-0049-05

## 0 引言

厚板窄间隙焊接技术相比传统大坡口多层多道焊接技术具有焊接坡口横截面积显著减小、热输入量小、残余应力小等优点,因此许多研究机构对其展开了研究。传统焊接方法的缺点在于焊接电弧和能量多集中在窄间隙中部,厚板焊接时因板厚侧壁温度梯度大,导热速度快,因此焊接过程中会由于能量不足而产生未熔合的现象<sup>[1]</sup>。针对厚板窄间隙焊接技术的不断研究,相继也出现了多种新型焊接方法,如窄间隙摆丝焊法<sup>[2]</sup>、窄间隙缆绳旋转熔池焊法<sup>[3]</sup>、窄间隙双丝焊法<sup>[4]</sup>、窄间隙药芯焊丝焊法<sup>[5]</sup>、窄间隙复合激光焊法<sup>[6-7]</sup>等。

窄间隙摆丝焊法利用摆丝机构使焊丝在焊道中横向摆动,电弧对熔池进行搅动的同时,可增大熔池的熔敷范围,以达到促进侧壁熔合的目的,这种方法采用单焊丝,焊接线能量不足,焊接机构相对较复杂。窄间隙缆绳旋转熔池焊接技术利用旋转电焊的搅动作用来增加熔池熔敷范围,由于焊丝原配套的焊机与送丝机构异于通用焊机,且焊丝易锈难以维护,因此焊机的优化结构是目前研究的热点。考虑到双丝焊有双熔池可控,在熔池控制与温度场控制方面比单焊丝有更大的优势,本文基于双丝焊进行了窄间隙焊接技术的模拟研究。

## 1 窄间隙双丝焊接的仿真分析

双丝焊接技术按电弧数量分为双丝双弧焊和双丝三弧焊;按熔池数量分为双丝共熔池焊和双丝不共熔池焊;按熔池相对位置分为平行排列共熔池双丝焊、前后排列共熔池双丝焊和前后排列非共熔池双丝焊,如图 1 所示。窄间隙焊接过程中,需保持较高的侧壁根部温度以帮助侧壁融合,并减少产生焊道侧壁未熔合缺陷的概率,从而有效提高窄间隙焊缝质量<sup>[8]46-47</sup>。为了对比三种焊接方案的热能量分布及温度随时间变化的差别,本文利用有限元软件 SimufactWelding 对三种方案进行了仿真分析。

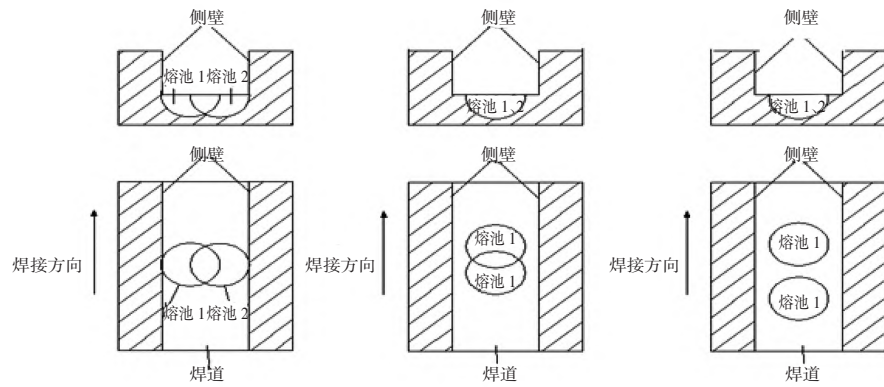
### 1.1 双丝窄间隙焊道有限元模型的建立

根据实际焊接试件的焊道断面形状确定焊道有限元模型尺寸,利用 Hypermesh 软件进行建模与网格划分,并对焊道局部与填充材料进行网格细化,以达到较好的计算效果。将模型导入 SimufactWelding 软件,添加温度边界条件与自由度约束。模型主要由 1 个窄间隙试件、2 个压块、1 块支撑板和焊道填充物组成,如图 2 所示。本文窄间隙模型中试件板厚为 50 mm,长为 100 mm,宽为 100 mm,窄间隙间距为 10 mm,窄间隙处深度为 30 mm。窄间隙模型与焊道填充材料均采用低合金钢 S355J2G3,材料初始温度为 20 ℃,环境温度为 20 ℃。焊道热源模型采用双椭球模型<sup>[9-10]</sup>。双椭圆热源模型前半部分 1/4 的椭球模型的分布表达式为:

收稿日期:2022-11-29

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB460017)

作者简介:吴灿(1985—),女,江苏南通人,江苏航运职业技术学院船舶与海洋工程学院讲师,硕士。



(a) 平行排列共熔池双丝焊 (b) 前后排列共熔池双丝焊 (c) 前后排列非共熔池双丝焊

图 1 厚板窄间隙双丝焊接熔池的三种方案

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi^{3/2}a_rbc} \exp\{-3[(\frac{x}{a_r})^2 + (\frac{y}{b})^2 + (\frac{z}{c})^2]\} \quad (1)$$

后半部分 1/4 椭球模型分布表达式为:

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi^{3/2}a_fb c} \exp\{-3[(\frac{x}{a_f})^2 + (\frac{y}{b})^2 + (\frac{z}{c})^2]\} \quad (2)$$

其中,  $f_1$  和  $f_2$  分别为热流密度分布函数,  $f_1 + f_2 = 2$ ;  $Q$  为输入热源功率,  $Q = \eta UI$ ;  $a_r$ 、 $a_f$ 、 $b$ 、 $c$  为定义椭圆的参数, 互不影响, 可取不同的值。三个方案单丝热源模型参数设置为  $a_r = 3 \text{ mm}$ ,  $a_f = 6 \text{ mm}$ ,  $b = 4 \text{ mm}$ ,  $c = 6 \text{ mm}$ 。设定的焊接热输入能量相同, 均为焊接电流 400 A、焊接电压 28 V, 热效率 85%、高斯参数 3、热源前端比例因子 0.75。求解器采用 Sparse Direct Solver<sup>[1]</sup>, 热源模型如图 3 所示。

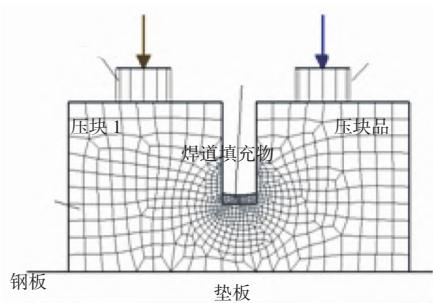


图 2 厚板窄间隙焊接有限元模型

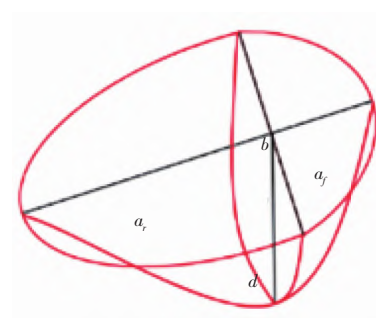
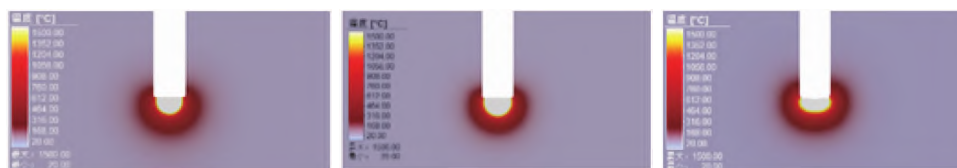


图 3 焊接热源模型

## 1.2 双丝窄间隙焊道温度场有限元分析

通过对厚板窄间隙焊接有限元模型进行温度场计算, 得到三种方案的温度场分布分别如图 4、图 5 所示。从温度场分布云图可以看出, 在能量输入相当的情况下, 方案 1 温度场分布呈椭圆形, 能量中心点分别靠近两侧壁, 熔池横截面分布较宽、熔深较小、温度场在焊道内分布比较均匀。而方案 2、3 的温度场分布以焊道中心为圆心呈圆形分布, 能量的中心点在焊道中部, 焊道熔池边界尚未能完全到达侧壁, 即熔宽小、熔深大。显然, 方案 1 更有利于提高侧壁熔合概率。



(a) 方案 1

(b) 方案 2

(c) 方案 3

图 4 焊道断面温度场图

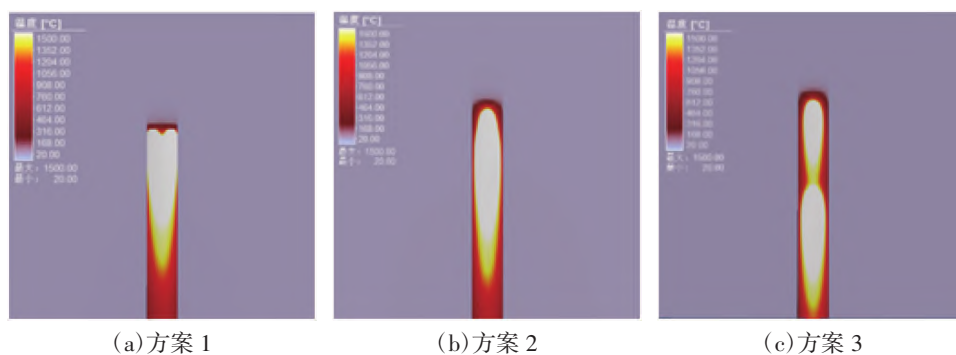


图5 焊道温度场俯视图

通过软件对每个方案分别在焊道侧壁处设定跟踪点,如图6所示,并分别对比了三种方案的侧壁跟踪点温度随时间的变化关系,结果如图7所示。方案1中侧壁处跟踪点的最高温度为1548℃,能够满足侧壁熔合要求,而方案2、3跟踪点的最高温度分别为1032℃、892℃,保温效果不好,导致温度下降较多,因此难以满足侧壁熔合的温度要求。综上所述,本文在方案1的基础上进行双丝焊窄间隙焊枪的设计。

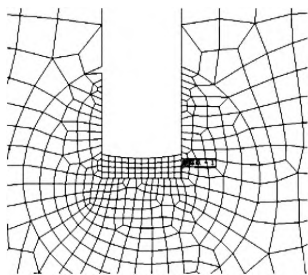


图6 焊道附近跟踪点分布图

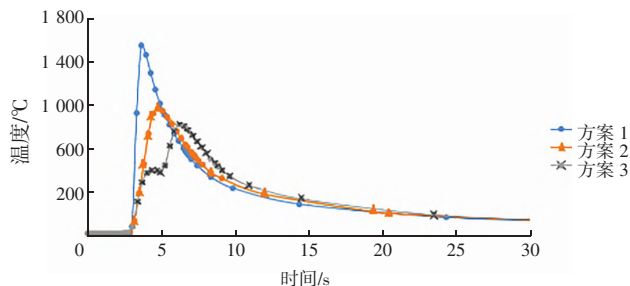


图7 三种方案跟踪点温度与时间的变化关系

## 2 双丝窄间隙焊枪的定型设计与制作

结合方案1的熔池分布特点,双丝共熔池窄间隙焊枪两熔池在焊接时应尽量并列且可形成共熔池,以便于在线能量输入值不变的前提下集中能量分布,提高局部升温速度及温度;两焊丝头部尽可能靠近侧壁以减小间隙。

由于窄间隙的焊道较窄,为避免在焊接过程中因偶然原因导致的焊接电极与焊道侧壁接触造成电流短路,焊接电极与其两侧侧壁应保留有适当的间隙,因此焊接电极位于焊道中间位置,使焊丝端部在焊接过程中更接近焊道侧壁根部。结合对窄间隙现有空间、焊丝干伸长长度、熔池侧偏、导电嘴电接触等因素进行综合考虑,本文设计了具有偏心送丝电极、弧形导电嘴的双丝窄间隙焊枪。窄间隙焊枪头部结构如图8所示。焊接电极上的焊丝送丝通孔1、2均不在电极的中心线上,而是各偏向电极断面长边一侧。

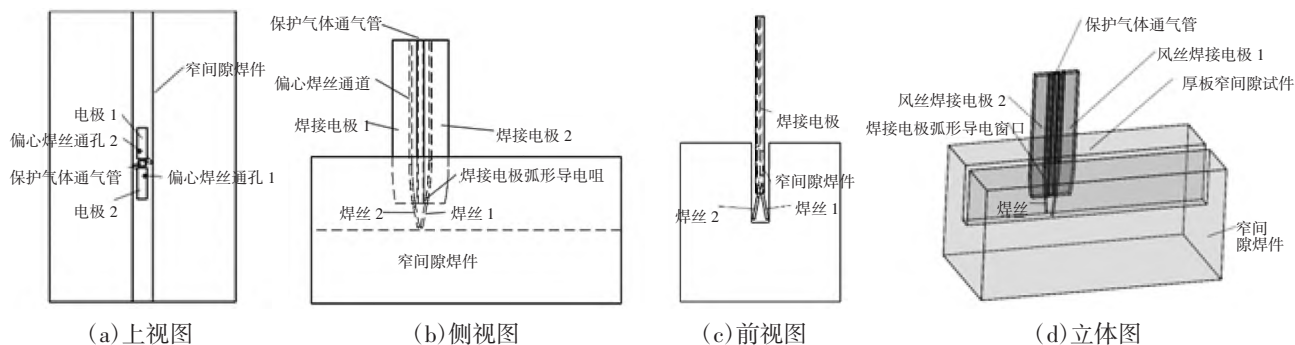


图8 窄间隙焊枪头部结构

为了说明偏心送丝通孔的设计原理,以下通过偏心与不偏心设计两方案对比进行说明。如图9所示,焊接电极厚度为5mm。粗实线表示偏心距为1mm的偏心送丝通孔中心线;粗虚线表示不偏心送丝通孔中心



线。两通孔中心线均在距电极头部 10 mm 处开始向侧壁偏转,在焊丝干伸长同为 15 mm 时,偏心送丝焊丝端部偏离中心线距离为 5 mm,而不偏心送丝焊丝端部偏离中心线距离仅为 3 mm。经对比,在焊丝干伸长、转弯曲率一定的情况下,偏心送丝通道焊丝端部能够更接近焊道侧壁。

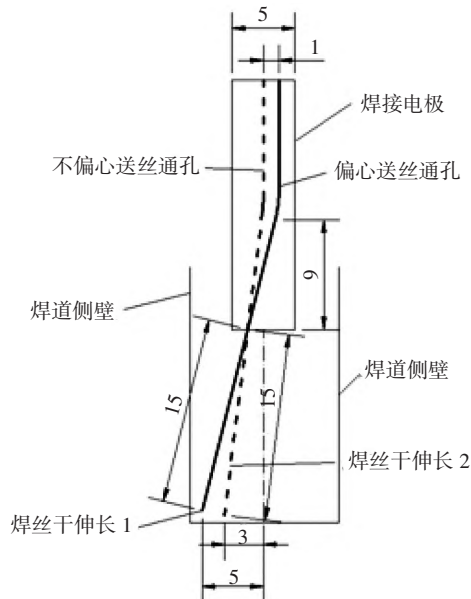


图 9 焊接电极头部偏心送丝与不偏心送丝对照图

渐开线弧形导电嘴结构如图 8(b)所示。此种设计可使前后电极的焊丝通过弧形导电嘴后在焊道中形成并列排布,便于形成共熔池,且由于渐开线弧形导电嘴出口处是整个弧形段曲率最大位置,焊丝在此处弹性弯曲变形最大,受电极的接触反作用力也最大。焊丝在导电嘴出口处形成可靠电接触,有助于焊接电流的稳定。当焊丝伸出焊接电极导电嘴后因不再受接触反作用力而恢复伸直。为了满足焊枪电极大电流作用下的自身散热与良导电性,焊枪采用长 400 mm × 宽 20 mm × 厚 5 mm 紫铜作为电极材料,导丝孔直径为 1.5 mm,焊丝直径为 1.2 mm。电极头部约 50 mm 用专用模具压弯,弧度半径为 200 mm。焊枪电极与导电嘴采用一体式设计,输出能力有所提升。

### 3 厚板窄间隙试件焊接与分析

选取两块板厚为 40 mm、材质为 Q345 的低碳钢组成窄间隙为 10 mm 的试件,用新设计焊枪进行焊接,焊接电流为 400 A,焊接电压为 28 V,焊接过程中采用 CO<sub>2</sub> 气体保护。焊后对焊缝取断面进行理化分析,采用 4%硝酸酒精溶液进行表面腐蚀处理。窄间隙焊接试件共三组,通过正交试验可以发现三组试件成形差异不大,从表面成形和焊道断面图中选出的典型结果如图 10 所示,焊道侧壁熔合状况良好,侧壁未熔合现象,焊缝截面符合厚板窄间隙截面成形要求。利用极差分析法对试验中的各焊接参数及其影响程度进行分析,本文选取的评价标准为侧壁熔深,从计算结果得知对于侧壁熔深的影响程度,电弧摆动角度>焊接速度>时间停顿>送丝速度>电弧摆动角度,说明就各焊接参数而言,电弧摆动角度对于侧壁熔深的影响最大。



图 10 窄间隙焊接试件焊道断面图

#### 4 结束语

针对窄间隙焊接现有的技术瓶颈, 本文采用偏心焊道与渐开线弧形导电嘴组合, 保证了焊接过程中的焊丝与导电嘴之间的良好的电接触问题, 综合考虑温度-应力场、保护气体流场, 优化各项工艺参数控制热输入, 从电弧摆动角度出发进行了焊接实验验证, 结果显示可以有效抑制晶粒生长幅度, 实现侧壁全融合, 并避免了焊接过程中由于电接触不良而引起的焊丝堵枪问题。在今后的研究过程中, 考虑到双丝焊接线输入能量大, 随着焊道高温保持时间也会随之变化, 因此保护气体出气孔分布的优化设计是将来的研究方向。

#### 参考文献:

- [1]刘正文. 高速无缝线路钢轨窄间隙自动化电弧焊接关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [2]左振龙. 电弧摆动式窄间隙 GMAW 焊枪设计及研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [3]冬壮. 缆式焊丝 TIG-MIG 复合焊电弧行为及熔滴过渡研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [4]胡奉雅. EH40 大热输入钢双丝窄间隙 MAG 焊接接头组织与性能[J]. 焊接, 2019(9): 39-43.
- [5]张富巨. 非均匀压缩药芯焊丝电弧窄间隙焊接[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997(4): 70-73.
- [6]沈言锦. 窄间隙磁控-激光复合式焊缝跟踪方法[J]. 电焊机, 2019(12): 70-73.
- [7]李俐群, 陶汪, 朱先亮. 厚板高强度钢激光填丝多层焊工艺[J]. 中国激光, 2009(5): 1251-1255.
- [8]张文钺. 焊接传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [9]JOHN GOLDAK. A new finite model for welding heat source[J]. Metallurgical Transactions, 1984(2): 299-305.
- [10]莫春立, 钱百年, 国旭明, 等. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. 焊接学报, 2001(3): 93-96.
- [11]赵博, 范成磊, 杨春利, 等. 双丝窄间隙焊接工艺参数对焊缝成形的影响[J]. 2009(6): 81-84.

(责任编辑: 张 利)

## Optimal Design of Welding Gun Based on the Study of Narrow Gap Double Filament Welding Mechanism for Thick Plates

WU Can<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, CHEN Fu-lan<sup>2</sup>

(1. School of Ship and Ocean Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China;

2. School of Intelligent Manufacturing and Information, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China)

**Abstract:** Through the temperature field finite element analysis of three double melt pool combinations in the double filament narrow gap welding process, combined with the finite element temperature field cloud analysis, a narrow gap welding gun with parallel eccentric wire electrodes is designed. The welding test confirms that the gun does not block and does not break the arc during the welding process, and the design of the arc guide nozzle on the electrode head not only facilitates the bias of the melt pool to the sidewall in the limited space, but also ensures good electrical contact of the wire at the electrode outlet. Through the analysis of the weld channel samples of the actual welded samples, the sidewall fusion state is good and the weld channel is free of defect. The new welding gun has certain application value in improving the efficiency of narrow gap welding of thick plates.

**Key words:** narrow gap; double filament; welding gun; mechanism study