

# 基于 Fluent 的窄间隙 TIG 焊枪结构优化设计

杨宽, 高辉, 周灿丰

(北京石油化工学院, 能源工程先进连接技术北京市高等学校工程研究中心, 北京 102617)

**摘要:** 针对大型工程项目当中的大口径、大厚壁、深窄间隙坡口的管道对接需求, 设计了一款窄间隙 TIG (NG-TIG) 焊枪, 并实现高效率焊接。该枪体为非对称的一体化扁平式结构, 在间隙宽度为 10 mm、深度 15 mm 的 U 形坡口内进行焊接试验, 发现在窄间隙焊接过程中出现了焊缝成形不连续、焊缝出现气孔及电弧不稳等问题。为了达到理想的焊接工艺效果, 文中通过 Fluent 软件进行了数值模拟仿真分析, 对窄间隙 TIG 焊枪的保护气输送通道及其出口布局进行了结构优化, 并且在与传统 TIG 焊枪的保护气体流量及运动轨迹等方面进行对比后, 发现保护气体在钨极周围均匀向外扩散, 且速度与传统 TIG 焊枪的气体保护状态接近, 从而确定了窄间隙 TIG 焊枪的气体保护结构。结果表明, 焊枪在焊接电流为 120 A, 焊接速度为 100 mm/min, 气体流量在 25 L/min 的焊接工艺参数下电弧稳定、无飞溅, 焊缝成形美观无缺陷。

**创新点:** (1) 通过 Fluent 软件对传统 TIG 焊枪的保护气体状态进行了仿真, 并作为参照对窄间隙 TIG 焊枪的送气结构进行了优化设计。  
(2) 窄间隙 TIG 焊枪既继承了传统 TIG 的优势, 又解决了窄间隙焊接过程中电弧不稳、焊缝出现气孔等常见的问题。  
(3) 通过非填丝和填丝, 在坡口内和管壁盖面 2 种工况下进行了焊接试验, 确定了窄间隙 TIG 焊枪的良好适用性。

**关键词:** 窄间隙 TIG; 焊枪优化; 气体保护; 焊接试验

中图分类号: TG434.5 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20211231001

## Optimization design of narrow gap TIG welding torch's structure based on Fluent

Yang Kuan, Gao Hui, Zhou Canfeng

(Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing Engineering Research Center of Advanced Connection Technology in Energy Engineering, Beijing 102617, China)

**Abstract:** In view of pipe butt requirements of large diameter, thick wall and deep narrow gap groove in large engineering projects, a narrow gap TIG (NG-TIG) welding gun was designed to achieve high efficiency welding. The gun body was an asymmetrical integrated flat structure. The welding experiment was carried out in U groove with gap width of 10 mm and depth of 15 mm. It was found that there appeared some problems such as discontinuous weld forming, porosity and arc instability in narrow gap welding process. In order to achieve ideal effect of welding process, numerical simulation analysis was carried out by Fluent software in this paper to optimize structure of protective gas transport channel and outlet layout of narrow gap TIG welding gun. After being compared with traditional TIG welding gun in terms of protective gas speed and movement track, it was found that protective gas evenly diffused outward around tungsten electrode and its velocity was close to the gas protection state of traditional TIG welding gun, so as to determine gas protection structure of narrow gap TIG welding gun. The welding experiment showed that welding gun had characteristics of stable arc and no splash in the welding process under welding parameters of 120 A welding current, 100 mm/min welding speed and 25 L/min gas flow, and weld was well formed without defects.

**Highlights:** (1) Fluent software was used to simulate protection gas state of traditional TIG welding gun, which was used as a reference to optimize air supply structure of narrow gap TIG welding gun.

收稿日期: 2021-12-31 修改日期: 2022-02-10 录用日期: 2022-02-20

基金项目: 北京石油化工学院重要科研成果培育项目(PCF-011)

- (2) Narrow gap TIG welding gun not only inherited advantages of traditional TIG, but also solved common technological problems in narrow gap welding process such as arc instability and weld porosity.
- (3) Through non-wire filling and wire filling, welding experiments were carried out under two working conditions of groove and pipe wall cover, and good applicability of narrow gap TIG welding gun was confirmed.

**Key words:** narrow gap TIG, optimization of welding gun, gas protection, welding test

## 0 前言

近年来在盾构、核电、海洋石油等工业领域中,大壁厚钢结构的使用量逐渐增加。相对于传统 V 形坡口,采用窄间隙 U 形坡口可在大壁厚钢结构焊接中极大的减少焊材消耗、提高焊接效率。窄间隙焊枪作为窄间隙焊接中的重要装备之一,其结构设计的合理性对于保证焊接电弧稳定、改善表面成形、减少焊接缺陷具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

常见的窄间隙焊接方法主要包括:窄间隙埋弧焊(NG-SAW)、窄间隙熔化极气体保护焊(NG-GMAW)及窄间隙钨极氩弧焊(NG-TIG)<sup>[4-6]</sup>。其中,NG-TIG 因其继承了传统 TIG 焊接所具有的热输入低、电弧稳定性高、焊接缺陷少、焊缝成形美观及可实现全位置自动焊的特点<sup>[7-8]</sup>,特别适合用于核电主管路、随钻测井工具等对焊接质量要求较高的零部件制造。然而,相对于其它 2 种窄间隙焊接方法,目前国内在 NG-TIG 焊接装备及焊接工艺的研究相对较少<sup>[9]</sup>。

文中在对 NG-TIG 焊枪机械结构开展初步设计和试验分析的基础上,采用 Fluent 流体力学有限元仿真计算软件,以传统 TIG 焊枪的保护气流场为依据,针对焊枪保护气通道及其出口布局进行了优化设计,有效的提高了焊接电弧稳定性,获得了成形美观、无缺陷的窄间隙填充及盖面焊缝。

## 1 NG-TIG 焊枪整体机械结构设计

针对图 1 所示的坡口形式初步开展了 NG-TIG 焊枪的机械结构设计。坡口深度 15 mm,宽度 10 mm,侧壁倾角 3°。焊枪本体总长 120 mm,高度 100 mm,枪体探进坡口部分的厚度为 8 mm。焊枪结构如图 2 所示,主要包括电机、机架、左右送气管路、冷却管路、送丝装置、气罩等部分组成。

整个窄间隙焊接过程主要包括打底焊、填充焊及盖面焊 3 个阶段<sup>[10-11]</sup>。为了验证焊枪结构的合理性,文中主要针对打底焊和盖面焊这 2 种极限工况开展了焊接试验研究。

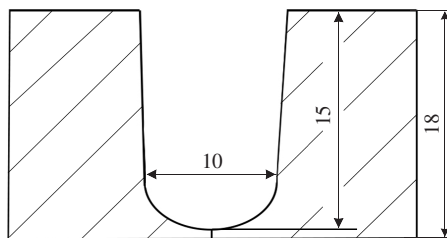


图 1 窄间隙坡口截面

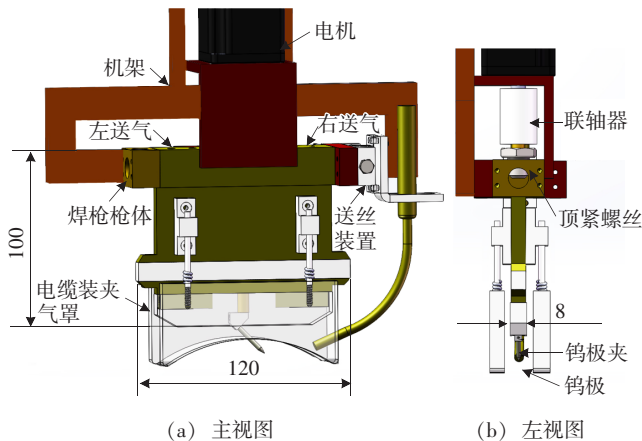


图 2 NG-TIG 焊枪初步设计

## 2 初步焊接试验与结果分析

在焊接电流分别为 80 A, 100 A, 120 A, 保护气流量分别为 15 L/min, 25 L/min, 焊接速度 100 mm/min 的条件下,分别在窄间隙坡口内和管道表面进行无填充焊接试验,试验结果存在的问题如图 3 所示。

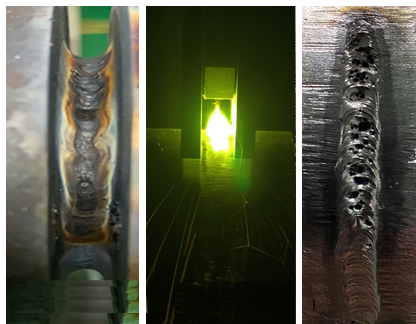


图 3 焊枪初步设计试验缺陷

试验结果表明,在坡口内部焊接时,虽然存在电弧不稳定现象,但无明显飞溅。在坡口外部焊接时,飞溅较大且焊缝有大量气孔存在。究其原因,应为焊接保护气通道及其出口布局不合理导致的气罩内部气流紊乱。尤其是在坡口外部焊接时,气罩保护效果变差,罩内紊乱气流产生的涡流引起外部空气的卷入,进而形成飞溅和气孔。

### 3 保护气通道及其出口布局的优化设计

针对坡口外部焊接试验过程中表现出的保护气罩保护效果欠佳问题,采用 Fluent 流体力学有限元计算软件开展了建模、数值计算与分析研究。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: $k$ 为湍流动能; $\varepsilon$ 为耗散率; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为湍流动能 $k$ 和耗散率 $\varepsilon$ 对应的普朗特数,分别为1.0,1.3; $\mu$ 为动力黏度; $\mu_t$ 为湍流黏度; $G_k$ 为由平均速度梯度产生的湍流动能; $G_b$ 为由浮力影响产生的湍流动能; $Y_M$ 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为经验常数,分别取1.44,1.92,0.99; $S_k$ 和 $S_\varepsilon$ 为用户自定义源项。

根据初始方案中的焊枪结构建立保护气部分的流体域并进行网格划分;采用速度入口作为入口边界条件,根据保护气流量计算并设置气体的入口速度为13 m/s;将焊枪的前后左右4个方向设置为自由出口边界条件;其余边界设置为无滑移的壁面边界,网格模型如图4所示。

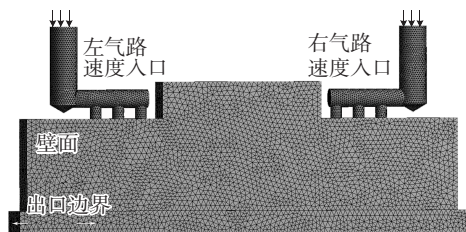


图4 网格模型及边界设置

#### 3.1.2 计算结果与分析

图5为计算获得的保护气罩内部的气体速度矢量图。在钨极尖端部位,有大量矢量箭头指向保护气罩内部,从而证明了焊接过程中在电弧附近存在反向气

### 3.1 原方案的有限元建模与分析

#### 3.1.1 有限元建模

焊接试验中采用纯度为99.99%的氩气作为保护气体。其相关的物性参数见表1。

表1 氩气物性参数

| 密度                                       | 黏度                                    | 导热率                                                            |
|------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $\mu / (\mu\text{Pa} \cdot \text{s})$ | $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ |
| 0.535                                    | 22.44                                 | 0.017 95                                                       |

气体在保护气罩的内的流动状态较为复杂,采用 $k-\varepsilon$ 湍流计算模型,对其运动轨迹进行预测<sup>[12-13]</sup>。其输运方程为:

流,容易导致外部空气卷入,进而产生飞溅与气孔缺陷。

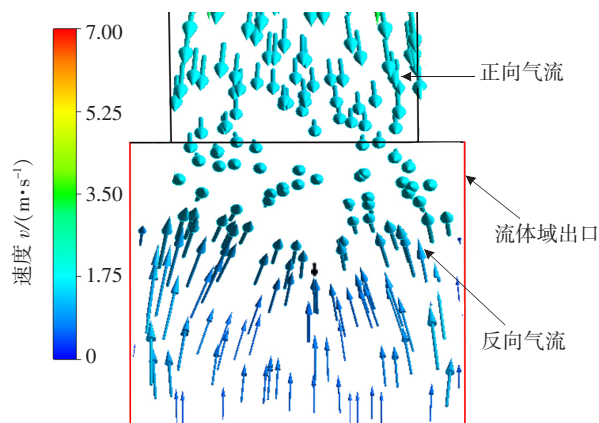


图5 气室横向截面保护气状态

### 3.2 优化设计及验证试验

为了提高焊接电弧的稳定性,减少焊接缺陷,文中以传统TIG焊枪的保护气场为参照,通过调整气罩内的保护气通道及其出口布局,对NG-TIG焊枪结构进行了优化设计,并开展了相关验证试验。

#### 3.2.1 传统TIG焊枪保护气场的仿真计算

采用Fluent软件对WP12型传统TIG焊枪的保护气状态进行了数值模拟,在钨极伸出长度为7 mm,钨极尖端距离母材垂直高度为5 mm,钨极轴线与母材平面的夹角为45°,保护气体流量为15 L/min 参数条件

下的仿真结果如图 6 所示。计算结果表明:传统 WP12 焊枪钨极处保护气的运动方向几乎和钨极轴线方向一致且分布均匀。

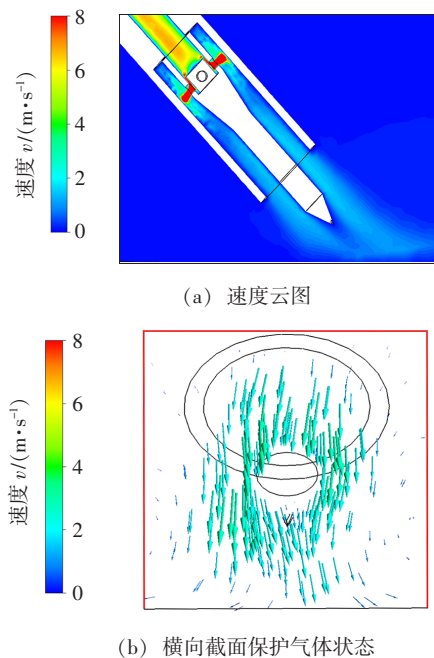


图 6 WP12 钨极焊枪保护气体状态

### 3.2.2 NG-TIG 焊枪的送气结构优化与试验验证

基于传统 TIG 焊枪的保护气流动状态,文中针对多种送气通道及其出口布局结构进行了仿真分析,最终确定的优化后 NG-TIG 焊枪送气结构及其流场的仿真计算结果分别如图 7、图 8 所示。

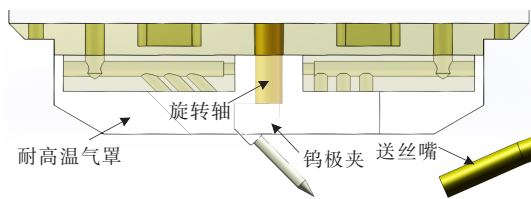


图 7 NG-TIG 焊枪送气优化结构

仿真计算结果表明,优化后保护气罩内气体的整体流向呈现由上向下的状态,气室内大部分气体流向一致,仅在靠近壁面边界的位置出现小范围的局部湍流,不会对电弧稳定性造成明显影响。另外,文中提取了优化后 NG-TIG 保护气罩内部垂直于母材表面以钨极尖端为端点的 5mm 范围内的保护气速度并与传统 TIG 焊枪进行了对比分析,如图 9、图 10 所示。对比结果表明,2 种焊枪在电弧附近的保护气流速基本一致,进一步确定了优化焊枪结构的合理性。

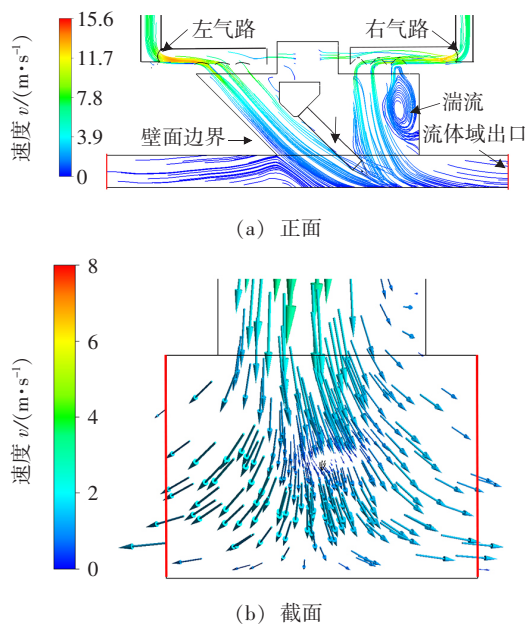


图 8 结构优化后保护气体状态

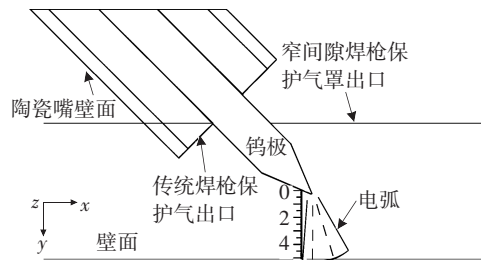


图 9 提取焊枪保护气体速度

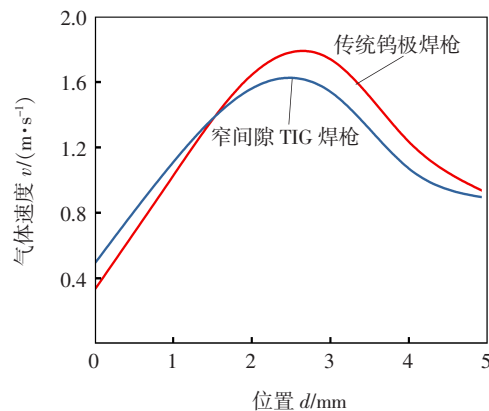


图 10 2 种焊枪保护气体速度对比

### 3.2.3 优化焊枪的试验验证

针对优化后的 NG-TIG 焊枪分别开展了坡口内、坡口外、无填丝和有填丝条件下的焊接试验验证。试验结果表明:对管道窄间隙坡口内无填丝与填丝焊接的试验过程中,在焊接电流 120 A,气体流量 25 L/min,焊接速度 100 mm/min,送丝速度 50 cm/min 焊接工艺参

数下的焊缝效果美观无缺陷,如图 11 所示。

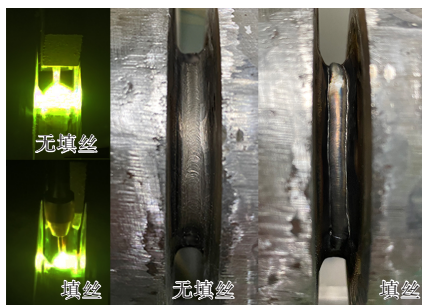


图 11 坡口内焊接试验

对管道表面在焊接电流为 120 A, 气体流量为 25 L/min, 焊接速度为 100 cm/min, 送丝速度为 100 mm/min 的焊接工艺参数下进行盖面无填丝与填丝焊接试验过程中, 同样得到了外观较为理想的焊缝其试验结果如图 12 所示。

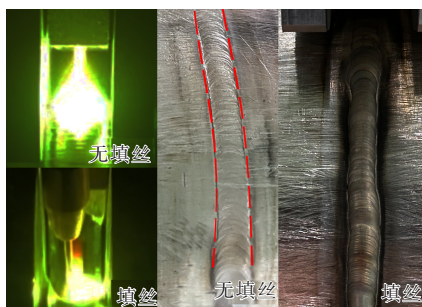


图 12 坡口外焊接试验

#### 4 结论

为解决 NG-TIG 焊枪在焊接测试过程中出现的电弧不稳定等工艺问题, 笔者结合经验及理论采用 Fluent 软件对传统 TIG 焊枪的保护气状态进行仿真, 并作为参照对 NG-TIG 焊枪的送气结构进行优化设计。通过对比两焊枪保护气的速度及运动轨迹可知, 优化后的 NG-TIG 焊枪保护气状态与传统 TIG 焊枪的效果接近。最后对 NG-TIG 焊枪进行参数化处理, 通过大量试验, 分析不同焊接工艺参数对电弧稳定性及焊缝形貌的影响, 并在窄间隙坡口内外焊接中都得到了美观无缺陷的焊缝。

#### 参考文献

- [1] 付魁军, 倪志达, 林三宝, 等. EH40 钢摆动电弧窄间隙 MAG 焊接头粗晶区微观组织与性能[J]. 焊接, 2020 (5): 1-5, 37.
- [2] Gao Fuyang, Mu Zhuangzhuang, Ma Zhaowei, et al. Fine

microstructure characterization of titanium alloy laser narrow gap welded joint [J]. China Welding, 2021, 30(3): 31-38.

- [3] 袁帅, 刘文吉, 李亮玉, 等. 考虑侧壁熔合的摆动电弧窄间隙 MAG 焊温度场热源模型[J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 95-99.
- [4] 张磊, 柳长青, 于静伟, 等. 通过温度场数值模拟分析窄间隙埋弧焊过热区组织演化[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 103-106.
- [5] 徐起, 唐新华, 刘国强, 等. 电弧摆动对窄间隙 GMAW 横焊打底焊道成形的影响[J]. 焊接, 2020(1): 13-20.
- [6] 王猛, 吕晓春, 梁晓梅, 等. 窄间隙 TIG 横焊侧壁熔合行为[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 118-123.
- [7] 李双, 徐望辉, 李锋, 等. 30 mm 厚钛合金 TC4 磁控电弧窄间隙 TIG 焊接接头组织及力学性能研究[J]. 焊接, 2018(1): 41-45.
- [8] 薛松柏, 王博, 张亮, 等. 中国近十年绿色焊接技术研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(17): 2813-2830.
- [9] 刘政军, 李宇航, 苏允海. Ar 与 H<sub>2</sub> 混合气体保护下 GTAW 电弧特性数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 67-71.
- [10] 冯允宣, 张兆栋, 祝美丽, 等. 双丝焊接工艺参数对中厚板打底焊缝形貌的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50(2): 21-25.
- [11] 肖磊, 高党寻, 石冠忠, 等. 窄间隙 MAG 环缝焊工艺在 45 钢油缸焊接中的研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 199-202.
- [12] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [13] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

第一作者: 杨宽, 硕士研究生; 主要从事窄间隙焊接设备的研发; yangkuan\_up@163.com。

通信作者: 高辉, 博士, 副教授, 博士生导师; 主要从事水下作业装备、焊接自动化技术研究; gaohui@bupt.edu.cn。

(编辑: 曲畅)