# 外加轴向磁场 K-TIG 横焊电弧形态及焊缝成形

# 赵建强,石永华,詹家通,徐涛,董士玮

(华南理工大学,广州 510640)

摘要: 深熔 K-TIG 焊是一种单面焊双面成形的高效焊接技术,在中厚板材制造中得到广泛的应用。为探究磁场影响电弧形态的机理,采用数字图像处理技术对不同磁场强度下的电弧形态进行了研究。结果表明,轴向磁场对电弧上部和电弧下部呈现不同的作用效果,电弧上部的挺度大于电弧下部的,在相同焊接工艺参数下,电弧上部受磁场影响的波动幅度比电弧下部小,磁场强度对电弧的影响呈现非线性关系,深熔 K-TIG 焊电弧属于自由电弧,形成的熔池面积较大,在横焊工艺中,熔池因重力效应而出现下淌,进而影响焊缝成形。文中提出了一种通过磁场辅助抑制熔池下淌的方法,通过轴向磁场与熔池的电流相互作用,产生与重力方向相反的电磁力,进而抑制熔池下淌,轴向磁场适用于改善 K-TIG 横焊焊缝成形。

关键词: K-TIG 焊; 横焊; 轴向磁场; 电弧形态

中图分类号: TG444<sup>+</sup>.4 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220603001

# Transverse welding arc shape and joint formation in K-TIG welding under axial magnetic field

Zhao Jianqiang, Shi Yonghua, Zhan Jiatong, Xu Tao, Dong Shiwei (South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract**: Deep penetration K-TIG welding is an efficient welding technology widely used in the manufacturing of medium and thick plates. To investigate the mechanism of magnetic field affecting the arc shape, digital image processing technology was used to study the arc shape under different magnetic field strengths. The results showed that the axial magnetic field had different effects on the upper and lower parts of the arc, with the upper part exhibiting greater stiffness than the lower part. Under the same welding parameters, the fluctuation amplitude of the upper arc affected by the magnetic field was smaller than that of the lower arc, and the effect of magnetic field strength on the arc exhibited a nonlinear relationship. The K-TIG welding arc belongs to a free arc, and the formed molten pool area is relatively large. In the transverse welding process, the molten pool flows downward due to the effect of gravity, which affects the formation of the weld. To solve this problem, a method of using magnetic field to assist in suppressing the downward flow of the molten pool was proposed. By the interaction between the axial magnetic field and the current of the molten pool, an electromagnetic force opposite to the direction of gravity was generated to suppress the downward flow of the molten pool. Therefore, the axial magnetic field is suitable for improving the formation of K-TIG transverse welds.

Key words: K-TIG welding, transverse welding, axial magnetic field, arc shape

# 0 前言

钨极惰性气体保护焊(TIG)因其焊接设备简单, 焊缝成形良好,在工业领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>,然 而其是自由电弧作为焊接热源,熔透能力有限。为 了克服中厚板焊接效率低的不足,国外学者提出了 一种通过增强焊接电流以增强电弧熔透能力的锁孔 效应钨极氩弧焊(K-TIG)方法<sup>[3]</sup>。该方法在焊接低导 热系数的材料时,实现了稳定的小孔焊接工艺<sup>[4-5]</sup>,当 工件导热系数增加时,焊接工艺窗口变窄,焊接球形 罐时,需要进行不同倾斜角度的横焊,存在焊缝质量 差的问题。因此如何抑制熔池下淌,以改善横焊焊 缝成形并提高焊缝质量成为亟待解决的问题。

国内外学者主要从能量场和力场两个方面研究 了熔池下淌的问题<sup>[6-9]</sup>。深熔 K-TIG 焊作为一种大电 流焊接工艺,在焊接过程中会产生大量的热量,熔化 金属比传统焊接方法多,更容易出现熔池下淌的现 象。磁控焊接技术易于实现,且磁场与熔池中流过 的电流相互作用产生与重力方向相反的洛伦兹力, 从而抑制熔池下淌的趋势,因此磁控技术适用于 K- TIG 横焊。

# 1 试验方法

焊接系统主要由 KUKA KR16-2 机器人、磁场发 生装置、励磁电源、高动态相机和 HTIG-1000 型 K-TIG 焊接电源组成,如图 1 所示。试验材料为 Q345R 钢,尺寸为 300 mm×100 mm×8 mm,采用浓度为 99.9% 的氩气作为保护气体,试验过程中采用直流正接,钨 针作为负极,工件倾斜 60°,实施横焊。磁场装置内 部放置铁芯,外部由漆包线缠绕而成的线圈、冷却管 以及外壳组成,并保持与焊枪同轴,尽量减少磁场横 向分量。



图1 试验系统示意图

焊接前使用特斯拉计对励磁线圈磁感应强度进 行测量,如图2和图3所示。以线圈中心为中心测量



图 2 磁感应强度测量点示意图



图 3 励磁电流与磁感应强度的关系

点,向外侧间隔为10mm依次取第一、第二、第三测量点,并以上述测量点求得的平均值作为当前励磁电流下的磁感应强度,随着励磁电流的增大,磁感应强度随之增大(图3)。

为探究磁场强度对电弧形态的影响,在焊接同一 工件时,分别施加0,3和6A的磁场电流(对应磁场 强度为0,26和49mT),记录电弧形态的变化,并对 电弧形态进行图像处理。表1为主要的焊接工艺参数。

表 1	焊接工艺参数
1. 1	1+14-69-56

焊接电流	焊接速度	钨针高度	保护气体流速	磁场强度
I/A	$v/(\mathrm{mm}\cdot\mathrm{min}^{-1})$	<i>h</i> /mm	$Q/(\mathrm{L}\cdot\mathrm{min}^{-1})$	<i>B</i> /mT
440	216	2	20	0, 26, 49

经过多次试验,发现当磁场强度为26 mT时,电 弧的状态较为稳定,确定选择磁场强度为26 mT探 究 K-TIG的横焊工艺。通过改变焊接行走方向和磁 场方向,从而改变熔池电流与磁场作用产生的洛伦 兹力方向,分析其对熔池的影响,设计了表2中4组 试验进行对照。

试验序号	焊接方向	磁场方向	磁场电流	磁场强度
			I/A	<i>B</i> /mT
1	y轴正方向			0
2	y 轴正方向	N级在上	3	26
3	y 轴负方向	N级在下	-3	26
4	y 轴正方向	N级在下	-3	26

表 2 横焊工艺参数

#### 2 基于图像的电弧形态特征参数设计及识别

电弧形态在一定程度上可以反映焊接稳定性<sup>[10]</sup>。 为了探究磁场对电弧形态的影响,先定义电弧形态 的特征参数。

2.1 电弧形态特征参数的定义

由于上部电弧和下部电弧在不同磁场强度下呈现不同的形态,因此以电弧顶部和底部的中间位置BC作为分界线,将电弧分为上下两部分,如图4所示。电弧顶部定义为钨针尖端A点,电弧底部定义为电弧最宽位置所在的水平线DE。图4中BC段代表上部电弧的宽度,DE段为下部电弧的宽度。上部电弧面积为ABC所围区域的面积,下部电弧面积为BCDE所围区域的面积。宽度比定义为下部电弧宽度与上



图 4 电弧形态表征与参数定义

部电弧宽度的比值,面积比定义为下部电弧面积与 上部电弧面积的比值。

2.2 电弧形态特征参数的识别

通过采用如图 5 所示的处理流程对电弧区域进行处理,最终获得电弧区域的特征参数。



图 5 电弧图像处理流程示意图

电弧图像处理过程如图 6 所示。为了获得电弧的特征参数,首先需要对预处理后的图像进行形态 学运算,平滑电弧边缘,如图 6a 所示,使用 Canny边 缘检测算法进行电弧图像边缘的提取,得到电弧边 缘,如图 6b 所示。对电弧图像边缘的上半部分进行 椭圆拟合,即

$$Ax^{2} + Bxy + Cy^{2} + Dx + Ey + F = 0$$
 (1)

式中: A 和 C 决定椭圆的大小; B 决定椭圆倾斜角度; D 和 E 决定椭圆位置; F 为常数项, <math>(x, y)为点的坐标。  $W = [A, B, C, D, E, F]^T$ ,  $X = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]^T$ 则优化目标将变为

 $\min \| W^T X \|^2 = W^T X X^T W, \quad s.t. \ W^T H W > 0 \tag{2}$ 

W<sup>T</sup>HW > 0是椭圆参数约束条件,进而可以通过 椭圆一般方程求解椭圆相关参数。椭圆几何中心 (X<sub>c</sub>, Y<sub>c</sub>)、长半轴A与短半轴B、长轴倾角θ分别为

$$X_{\rm c} = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}, \quad Y_c = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2}$$
 (4)

$$A^{2} = \frac{2(AX_{c}^{2} + CY_{c}^{2} + BX_{c}Y_{c} - F)}{A + C - \sqrt{(A - C)^{2} + B^{2}}}$$

$$2(AX^{2} + CY^{2} + BX_{c}Y_{c} - F)$$

$$B^{2} = \frac{2(AX_{c}^{2} + CY_{c}^{2} + BX_{c}Y_{c} - F)}{A + C + \sqrt{(A - C)^{2} + B^{2}}}$$
(5)

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B}{A-C} \qquad (6)$$

#### 图 6 电弧图像处理过程

将拟合得到的二次项曲线的顶点作为电弧顶部, 如图 6c 所示;对电弧边缘求外接圆,为避免上部电弧 的干扰,截取下部电弧边缘进行计算;将提取到的下 部边缘点加入拟合点集,选择最大外接圆的圆心所 在的水平线作为电弧的底部,如图 6d 所示;电弧顶部 和底部的中间位置作为分割线,对电弧图像进行分 割,如图 6e, 6f 所示;对分割后的图像分别进行电弧 宽度和电弧面积的计算。

#### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 轴向磁场对电弧形态的影响

如图 7 所示,不同磁场强度对电弧上部和电弧下 部形态的影响不同,电弧上部宽度和面积的波动幅 度比电弧下部小,这是由于电弧上部的挺度大于电



图 7 磁场强度对电弧的影响

弧下部的挺度。在磁场强度为26mT时,电弧下部面 积比无磁场时减小,而电弧下部宽度增加,这说明了 电弧下部局部区域发生了扩张,电弧整体呈现压缩 效果。

当磁场强度增加到49mT时,电弧区域面积变大, 这表明随着磁场强度的加大,电弧出现了扩张趋势 且变得不稳定。其原因为随着磁场强度的增加,轴 向磁场的横向分量增加,磁场轴向性变差,电弧变得 不稳定;随着磁场强度的增加,旋转电弧运动速度增 加,产生了自感磁场,抵消了轴向磁场的部分作用<sup>[11]</sup>。

当外加磁场强度为26mT时,电弧上下区域面积

比并无明显变化,但宽度比有着较为明显的变化。 这是由于电弧上部的宽度减小,电弧下部的宽度增加。在外加磁场强度为49mT时,宽度比和面积比都 出现了较大的波动。

综上所述,轴向磁场对电弧上部和电弧下部有着 不同的作用效果。轴向磁场对 K-TIG 自由电弧有压 缩效果<sup>[12]</sup>,但存在一定的限度;压缩电弧会提高电弧 密度,从而降低焊接电流阈值;当磁场强度过大时, 会出现电弧不稳定的情况,因此外加轴向磁场值存 在最佳工艺参数,以保证焊接过程中电弧的稳定。

3.2 轴向磁场对横焊焊缝成形的影响

图 8 为外加轴向磁场时横焊熔池受力示意图。 由于阳极接入点固定不变,且焊接电流是熔池中电 流密度的主要来源<sup>[13]</sup>,熔池头部有较少的焊接电流流 过,导致了熔池头部的电流密度小于熔池尾部,如图 8a 所示。选取熔池表面与焊接方向平行的电流*I*,和*I*<sub>2</sub>进 行分析,*I*,和*I*<sub>2</sub>分别位于熔池头部和尾部,方向相反, 在熔池头部和熔池尾部受到的洛伦兹力*F*<sub>1</sub>和*F*<sub>2</sub>的方 向也将相反。*F*<sub>2</sub>在数值上大于*F*<sub>1</sub>,可以抵消熔池重力 *G*和洛伦兹力*F*<sub>1</sub>的部分影响,降低熔池的下淌趋势。 如图 8b 所示,当焊接方向沿y轴负方向时,位于熔池 头部的洛伦兹力*F*<sub>1</sub>与重力方向相反,但由于其数值较 小,不足以抵消熔池重力*G*和洛伦兹力*F*<sub>2</sub>对熔池下淌 造成的影响。此外,熔池中存在的径向电流与轴向 磁场相互作用产生的洛伦兹力对熔池有搅拌作用,



图 8 倾斜 60°横焊时熔池的受力情况分析

使得熔池下淌更为严重。

图 9 为横焊焊缝形貌,在无外加磁场作用的情况 下,熔融金属由于受到重力的影响,造成焊缝两侧成 形不均匀(图 9a);当施加轴向向上的磁场时,熔池中 熔融金属受力方向与重力方向相同,进而加剧了熔 池的下淌趋势,因此焊缝成形最差(图 9b);如图 9c 所 示,当施加轴向向下的磁场且焊接方向沿y轴负方向 时,洛伦兹力抵消重力的作用较小,不利于抑制熔池 下淌,因此焊缝成形依旧很差(图 9c);当施加轴向向 下的磁场且焊接方向沿y轴正方向时,熔池中熔融金 属由于受到向上的力,抵消了重力的影响,因此焊缝 成形良好,熔池下淌现象得到了明显的抑制(图 9d)。



图 9 横焊焊缝成形

定义焊缝咬边深度*d*<sub>1</sub>,下淌高度*d*<sub>2</sub>,焊缝上侧宽 度*L*<sub>1</sub>,焊缝下侧宽度*L*<sub>2</sub>。如图 10 所示,施加适当的轴 向磁场能抑制熔池下淌的趋势,减少焊缝上侧的咬 边程度。在合适的轴向磁场参数和焊接电流参数下, 焊缝的咬边深度*d*<sub>1</sub>由原来的 0.76 mm 下降为 0.51 mm, 下降了 32.89%,明显地改善了焊缝成形;并且焊缝上 侧宽度*L*<sub>1</sub>为 8.35 mm,大于焊缝下侧宽度*L*<sub>2</sub>(6.73 mm), 抑制了熔池的下淌趋势。



图 10 焊缝截面成形

# 4 结论

(1)轴向磁场与熔池的电流相互作用产生向上的 电磁力可以抵消重力作用的影响,有利于抑制熔池 下淌,获得良好的横焊焊缝成形。

(2)轴向磁场对电弧上部和下部的作用效果不同, 电弧上部的挺度大于下部电弧。

(3)在一定范围内,轴向磁场对电弧具有整体压 缩效果,但是当磁场强度增加到一定程度的时候,电 弧反而扩张且不稳定,不利于焊缝成形稳定。

#### 参考文献

- [1] 杨宽,高辉,周灿丰.基于Fluent的窄间隙TIG焊枪结构 优化设计[J].焊接,2022(8):39-43.
- [2] 张佳, 郭超, 邵沛泽, 等. 双TIG活性电弧焊接工艺[J]. 焊接, 2022(7):1-5.
- [3] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Comparison of keyhole

and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium[J]. Materials Science and Engineering:A, 2001, 299(1-2): 81 – 93.

- [4] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Keyhole gas tungsten arc welding of commercially pure zirconium[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2008, 13(6): 573 - 581.
- [5] 黄武东. 5083 铝合金外加纵向磁场 P-GMAW 焊接技术 研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [6] Shoichi M, Yukio M, Koki T, et al. Study on the application for electromagnetic controlled molten pool welding process in overhead and flat position welding[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2013, 18(1): 38 – 44.
- [7] 高延峰, 吴东, 黄林然. 局部干法环境下 GMAW 横向焊接 熔滴过渡特性[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 82 - 86.
- [8] Cui S, Shi Y, Cui Y, et al. The influence of microstructure and chromium nitride precipitations on the mechanical and intergranular corrosion properties of K-TIG weld metals[J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 71 – 77.
- [9] 房玉超,杨子酉,丁睿,等.电子束扫描横焊薄铌板的熔池 动力学行为[J].焊接学报,2020,41(2):68-74.
- [10] Yc A, Yk B, Ys A, et al. Investigation into the arc profiles and penetration ability of axial magnetic field-enhanced K-TIG welding by means of a specially designed sandwich[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 32 – 41.
- [11] 母中彦, 胡仁志, 庞盛永. 磁场辅助电弧焊接旋转等离子 体行为的数值模拟[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 123-129.
- Wu H, Chang Y L, Babkin A, et al. The behavior of TIG welding arc in a high-frequency axial magnetic field[J].
   Welding in the World, 2021, 65: 95 104.
- [13] Li Y, Wu C S, Wang L, et al. Analysis of additional electromagnetic force for mitigating the humping bead in high-speed gas metal arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 207 – 215.
- **第一作者:** 赵建强,硕士研究生;主要研究方向为自动化焊 接技术;zjq3187420457@163.com。
- **通信作者:** 石永华,博士,教授,博士研究生导师; yhuashi@ scut.edu.cn。

(编辑:郑红)

#### 本文引用格式:

赵建强, 石永华, 詹家通, 等. 外加轴向磁场 K-TIG 横焊电弧形态及焊缝成形[J]. 焊接, 2023(4): 1-6. Zhao Jianqiang, Shi Yonghua, Zhan Jiatong, et al. Transverse welding arc shape and joint formation in K-TIG welding under axial magnetic field[J]. Welding & Joining, 2023(4): 1-6.