

片状偏钨极氩弧载流区的静电探针分析

李渊博¹, 芦甜¹, 朱亮², 孙喆¹

(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065;

2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 为保证窄间隙焊接钨极的载流能力, 采用截面为矩形的片状偏钨极, 并通过低扰动静电探针片状偏钨极氩弧载流区形态及电流密度分布进行分析。结果表明, 偏钨极前端斜边倾角在 $3^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 时, 能够对电流产生有效的导向作用, 并造成电流密度分布更加集中; 相同焊接工艺参数下与圆柱钨极氩弧相比, 片状偏钨极氩弧具有更大的载流区截面积及更小的电流密度; 随着焊接电流的增加, 载流区将获得更大的电流密度, 且在靠近电弧截面中心的区域内电弧能量更加集中。

关键词: 片状偏钨极氩弧; 电弧载流区; 电流密度; 静电探针

中图分类号: TG 403 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)12-0022-05

0 序 言

窄间隙 TIG 焊接方法兼具 TIG 焊和窄间隙焊接技术的优点, 焊接效率高, 接头力学性能优良, 且间隙宽度越小, 该方法优势越明显^[1-3]。然而当间隙宽度较小时, 受到钨极和坡口侧壁间距的限制, 很难使用能够承载更大电流的大直径钨极进行焊接, 从而导致电弧熔化能力减弱, 无法获得较大的熔深^[1-4]。

采用一种截面为矩形的片状偏钨极, 能够在宽度较小的间隙中承载更大的焊接电流, 有利于增强电弧的熔化能力^[5,6]。焊接过程中片状偏钨极氩弧载流区形态及电流密度分布的变化, 将影响焊缝成形及接头性能, 因此有必要对片状偏钨极氩弧载流区形态及其电流密度分布进行认识。

静电探针是一种最早用来诊断等离子体特性的试验工具。对于大气压下局部热平衡的 TIG 焊电弧, 可利用静电探针获得弧柱中带电粒子分布范围及空间密度分布等物理参量^[7,8], 并通过分析其分布特征对弧柱空间载流区形态及电流密度分布进行研究。文中采用一种低扰动静电探针, 在片状偏钨极氩弧截面内测定饱和离子电流, 通过分析探针电流

波形, 对不同焊接工艺参数下片状偏钨极氩弧载流区形态及其电流密度分布进行认识。

1 试验方法

图1为试验方法示意图。图1a给出了低扰动静电探针试验装置, 可以看出, 电弧在水冷铜板与片状偏钨极间引燃。片状偏钨极厚度方向中心线在水冷铜板表面的投影为 x 轴, 电弧沿该方向运动。作为探针的铝丝平行于水冷铜板表面放置, 并在金属绕丝轮的驱动下沿垂直于 x 轴的 y 方向运动进入电弧; 铝丝表面经阳极氧化处理形成 Al_2O_3 绝缘膜, 局部去除绝缘膜后可获得若干间距相等的导电探测点, 当电弧运动时, 如图1b所示, 导电探测点可在 x 方向不同位置穿过电弧截面采集电流信号。同时通过调整铝丝与水冷铜板表面间距 l , 可将探针置于不同高度电弧截面内进行测量。片状偏钨极截面尺寸为 $6\text{ mm} \times 1.34\text{ mm}$, 最大许用电流为 250 A 。钨极前端采用如图1c所示的单斜边形状, 斜边倾角为 θ , 钨极顶角则为 45° 。

导电探测点测量的信号由金属绕丝轮和碳刷导入采样回路, 并使用 Tektronix 的 TDS3P52B 型数字示波器记录。采样回路如图1a所示, 当探针施加足够大的负偏置电压 U_b 时, 电阻 R_b 流过的电流为饱和离子电流^[7,8], 通过分析饱和离子电流波形特征, 对片状偏钨极氩弧载流区形态及电流密度分布进行认识。试验采用直流正接, 纯氩气保护, 气体流量 5 L/min 。

收稿日期: 2014-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51264026); 陕西省教育厅专项科研计划项目资助项目(15JK1575); 国家级大学生创新创业项目资助项目(201410705029); 西安石油大学博士科研启动项目资助项目(2015BS19); 西安石油大学大学生科研训练计划资助项目

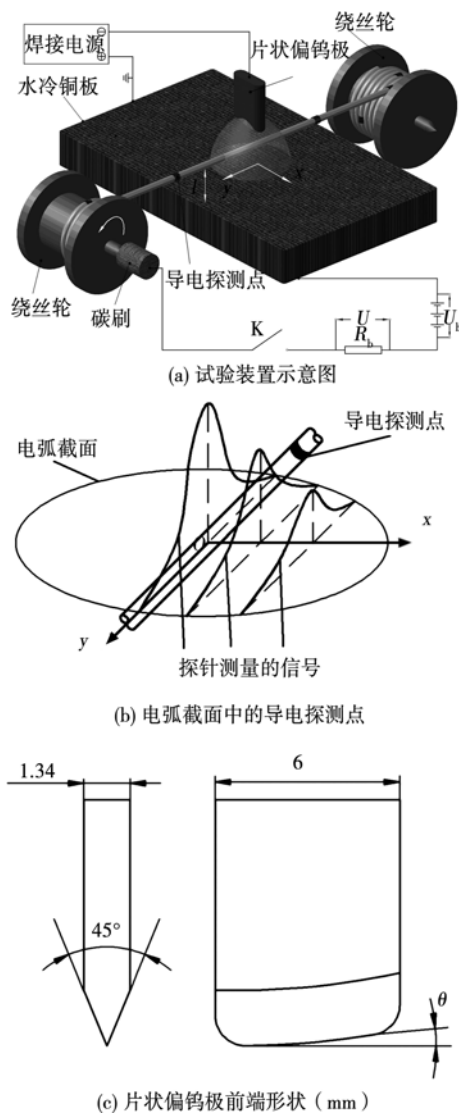


图 1 试验方法示意图

Fig. 1 Schematic of experiment

2 试验结果与分析

2.1 饱和离子电流

图 2 为距离铜板阳极表面 1 mm 电弧截面内的片状偏钨极饱和离子电流,焊接电流 120 A,弧长 5 mm,片状偏钨极斜边倾角 5° . 可以看出饱和离子电流均相对于 x 轴对称,且在 $y = 0$ mm 附近的区域内电流值变化不大, y 方向的饱和离子电流波形均呈现特殊的“平台状”分布特征,而在“平台”边缘,饱和离子电流值迅速下降. 同时通过图 2a 的电流波形可进一步得到 x 方向($y = 0$ mm)饱和离子电流分布,如图 2b 所示,该方向饱和离子电流呈现“尖顶状”分布特征.

一般认为当探针施加足够大的负偏置电压时,仅收集正离子并形成饱和离子电流^[7]. 那么通过饱和离子电流分布宽度可以确定载流区宽度^[7-9]. 由

此可见,图 2a 中的饱和离子电流分布宽度可以代表 y 方向载流区截面宽度,由图 2b 中饱和离子电流分布宽度则可近似获得 x 方向载流区截面宽度. 那么从图 2a 可知, y 方向载流区宽度在 $x = 10.1$ mm 处最大,并向 x 轴两端减小,载流区截面近似呈椭圆形.

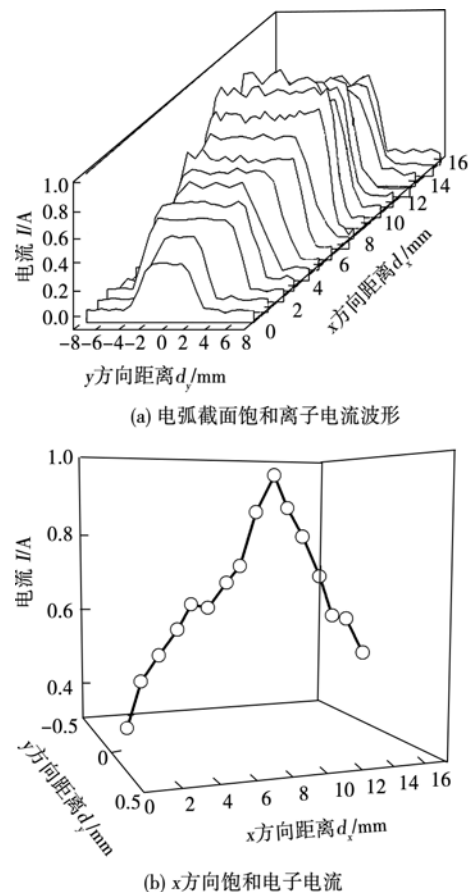


图 2 片状偏钨极氩弧饱和离子电流

Fig. 2 Ion saturation current of sheet slanted tungsten electrode arc

使用静电探针继续测量与片状偏钨极横截面积相同的圆柱钨极所引燃电弧的饱和离子电流,探针距离阳极表面 1 mm,焊接电流 120 A,弧长 5 mm. 根据圆柱钨极氩弧轴对称特性,可令导电探测点沿 x 方向($y = 0$ mm)的载流区截面直径穿过电弧,获得饱和离子电流的径向分布. 图 3 为圆柱钨极氩弧饱和离子电流,从图 3 中可知饱和离子电流分布具有“平台状”特征,分布宽度约为 13 mm.

对比观察图 2 和图 3 可知,片状偏钨极氩弧 y 方向饱和离子电流与圆柱钨极氩弧相似,均为“平台状”分布,而 x 方向则表现为“尖顶状”分布;且片状偏钨极氩弧具有较大的载流区截面积和较小的饱和离子电流幅值.

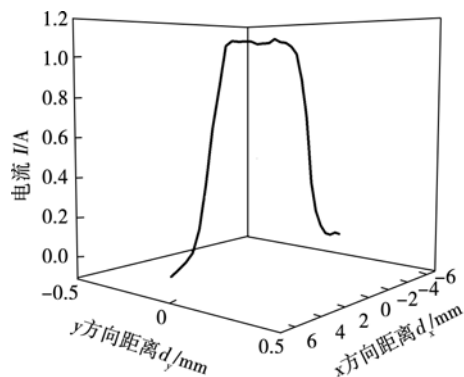


图3 圆柱钨极氩弧饱和离子电流

Fig. 3 Ion saturation current of cylinder tungsten electrode arc

调整探针高度,在距离铜板阳极表面 2.5 mm ($l=2.5$ mm) 和 4 mm ($l=4$ mm) 电弧截面内,测量片状偏钨极氩弧与圆柱钨极氩弧饱和离子电流. 结果发现片状偏钨极氩弧 y 方向饱和离子电流同样具有与圆柱钨极氩弧相似的“平台状”分布特征, x 方向则为“尖顶状”分布,且片状偏钨极氩弧载流区宽

度更大,饱和离子电流幅值较小.

2.2 片状偏钨极斜边倾角对饱和离子电流的影响

焊接过程中电弧会沿焊接反方向发生惯性后拖,并造成弧根在片状偏钨极前端不连续移动. 采用图 1c 中的单斜边设计,目的在于引导电流集中分布,避免弧根移动,并借助于后拖作用使弧根能够沿钨极宽度方向均匀扩展. 可见偏钨极斜边倾角的选择对控制电弧燃烧形态起着关键作用.

改变片状偏钨极斜边倾角 θ ,分别在距离阳极表面 1, 2.5 和 4 mm 电弧截面内测定饱和离子电流,焊接电流为 120 A,弧长为 5 mm. 图 4 为不同片状偏钨极斜边倾角对饱和离子电流的影响,可以看到倾角分别为 $3^\circ, 5^\circ, 8^\circ$, x 方向 ($y=0$ mm) 及 y 方向饱和离子电流分布宽度与波形特征没有明显变化. 当倾角增加至 11° 时, x 方向 ($y=0$ mm) 与 y 方向饱和离子电流波形分布宽度显著减少,饱和离子电流幅值则大幅增加;当倾角减小至 1° 时, x 方向 ($y=0$ mm) 与 y 方向饱和离子电流同样表现为分布宽度减小,幅值增大.

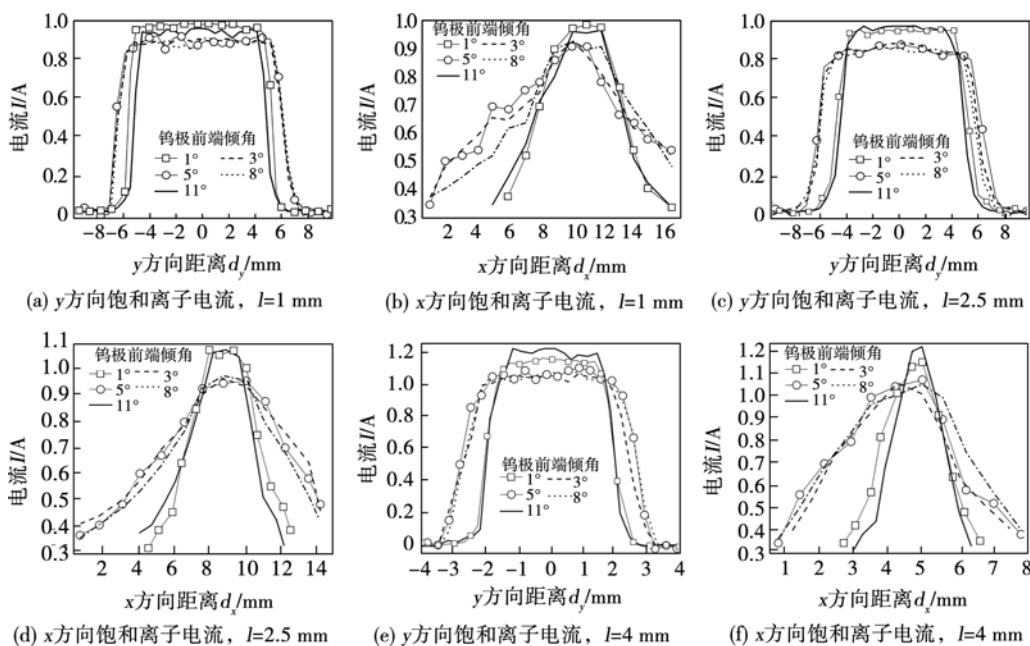


图4 不同片状偏钨极斜边倾角对饱和离子电流的影响

Fig. 4 Ion saturation current of probe with different tilt angle of sheet slanting tungsten electrode hypotenuse

2.3 焊接电流对饱和离子电流的影响

改变焊接电流,分别在距离铜板阳极表面 1, 2.5 和 4 mm 的电弧截面内测定饱和离子电流,弧长为 5 mm,片状偏钨极斜边倾角为 5° . 图 5 为不同焊接电流对饱和离子电流的影响,可以看到当焊接电流由 40 A 增加至 160 A 时,饱和离子电流分布宽度及其幅值均随之增大,且如图 5b, d, f 所示,越靠近

载流区截面中心,饱和离子电流幅值增幅越大.

3 讨 论

根据静电探针理论,饱和离子电流能够直接反映探针附近区域正离子空间密度^[9,10],饱和离子电流幅值增大说明探针附近区域正离子空间密度提高.

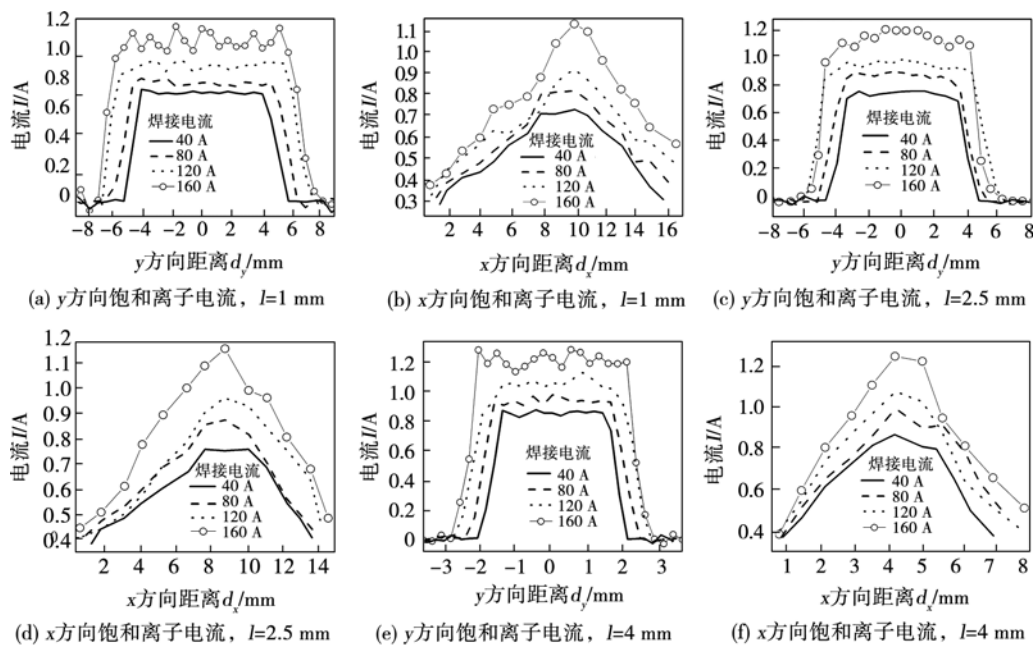


图5 不同焊接电流对饱和离子电流的影响

Fig. 5 Ion saturation current of probe with different welding currents

对于可看作是局部热平衡等离子体的电弧载流区来说,正离子空间密度增加表明带电粒子空间密度增大,意味着探针附近区域电流密度增加. 因此饱和离子电流幅值的变化趋势应该能够定性反映载流区电流密度变化趋势.

综合上述分析,从图2的片状偏钨极饱和离子电流可看出,y方向即偏钨极厚度方向,载流区饱和离子电流呈“平台状”分布;这与图3的圆柱钨极氩弧载流区饱和离子电流相近,意味着该方向二者具有相似的电流密度分布特征. x方向即片状偏钨极宽度方向,饱和离子电流表现出不同于圆柱钨极氩弧的“尖顶状”分布特征,说明该方向电流密度也呈现近似的“尖顶状”分布. 同时相同焊接工艺参数下,片状偏钨极氩弧饱和离子电流幅值小于圆柱钨极氩弧,表明片状偏钨极氩弧具有较小的电流密度.

图6为片状偏钨极氩弧和圆柱钨极氩弧形态,两种钨电极横截面积相同,焊接电流均为120 A,弧长同为5 mm,片状偏钨极斜边倾角为 5° . 结合图6对以上分布特征深入分析可知,当采用片状偏钨极时,一方面在后拖作用下弧根能够沿钨极宽度方向产生均匀扩展,如图6a所示,进而导致该方向片状偏钨极氩弧载流区截面积大幅增加,造成电流密度减小;另一方面,由于片状偏钨极厚度方向弧根扩展范围较小,故该方向载流区宽度仍然与圆柱钨极氩弧相近,如图6b,c所示,电流密度则具有与圆柱钨极氩弧相似的“平台状”特征. 同时片状偏钨极的斜边能够引导电流集中分布,从而造成x方向电流密

度由“平台状”转变为“尖顶状”分布.

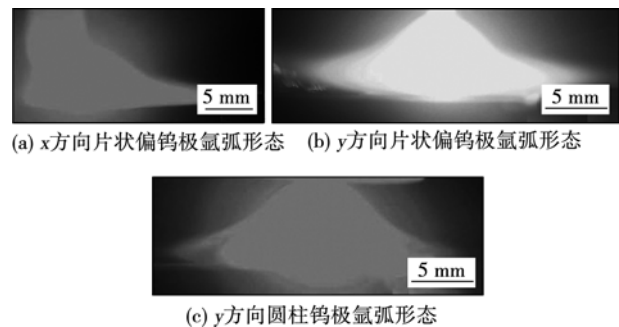


图6 片状偏钨极氩弧与圆柱钨极氩弧形态

Fig. 6 Shapes of sheet slanting tungsten electrode arc and cylinder tungsten electrode arc

通过进一步对比观察图4中斜边倾角不同时的饱和离子电流,分析片状偏钨极氩弧载流区形态及电流密度的变化. 倾角在 $3^\circ \sim 8^\circ$ 之间,饱和离子电流变化不大,意味着载流区形态及电流密度分布未发生明显改变;此时电弧形态均与图6a,b所示相同,表明偏钨极斜边能够有效控制电弧形态. 当倾角减小至 1° 时,过小的倾角将削弱对电流的引导作用,从而无法避免弧根的不连续移动,且弧根极易集中于钨极前端局部燃烧,使载流区收缩,电流密度增加,表现为饱和离子电流分布宽度大幅减小,电流幅值显著增加. 当倾角增加至 11° 时,过大的倾角会阻碍电弧在片状偏钨极宽度方向的扩展,同样会引起弧根集中燃烧,载流区收缩,电流密度增加,此时饱

和离子电流分布宽度减少,电流幅值明显增大。

改变焊接电流,分析片状偏钨极氩弧载流区形态及电流密度的变化。由图 5 可知,当焊接电流由 40 A 增加至 160 A 时,饱和离子电流分布宽度及电流幅值均增大,表明载流区宽度和电流密度均随焊接电流增加而增大,这一规律与圆柱钨极氩弧相同。进一步从图 5b, d, f 可发现,随着焊接电流的增加,越靠近载流区截面中心,饱和离子电流幅值增幅越大,这意味着对于片状偏钨极氩弧来说,增加焊接电流能够使载流区截面中心附近的电流密度大幅提升,电弧能量密度将更加集中。

4 结 论

(1) 片状偏钨极氩弧载流区形态及电流密度分布均脱离了轴对称分布形式,且当偏钨极前端斜边倾角在 $3^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 时,斜边对电流产生的导向作用,使电流密度分布更为集中。

(2) 相同焊接工艺参数下与圆柱钨极氩弧相比,片状偏钨极氩弧电流密度更小。

(3) 采用较大的焊接电流时,片状偏钨极氩弧载流区截面中心附近电流密度将显著增大,电弧能量密度更加集中。

参考文献:

- [1] Egelhard G, Pellkofer D. Erfahrungen beim orbitalschweißen in kraftwerks-anlagen[C] // Conference on Orbital GTAW Methods, Erding, Germany, 1995: 88 – 100.
- [2] Engelhard G, Habip L M, Pellkofer D, *et al.* Optimization of residual welding stresses in austenitic steel piping: proof testing and numerical simulation of welding and post welding processes [J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 198 (1): 141 – 151.
- [3] 益本宫, 妹岛五彦, 牛尾诚夫, 等. 窄间隙焊接[M]. 尹士科, 王振家, 张伟昌, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [4] 吴启东. 钨极焊接电弧在窄间隙中的电场分布[J]. 焊接学报, 1983, 4 (1): 39 – 54.
Wu Qidong. The electric field intensity of TIG arc in narrow gap [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1983, 4 (1): 39 – 54.
- [5] 李渊博, 朱 亮. 绝缘片约束 TIG 电弧在窄间隙中的加热特性[J]. 焊接学报, 2013, 34 (7): 51 – 55.
Li Yuanbo, Zhu Liang. Heating characteristic of constricting TIG arc with insulating plate in narrow gap welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34 (7): 51 – 55.
- [6] 李渊博, 朱 亮. 绝缘片约束 TIG 电弧载流区的静电探针分析[J]. 焊接学报, 2014, 35 (7): 55 – 59.
Li Yuanbo, Zhu Liang. Electrostatic probe analysis of current-carrying region in constricting TIG arc with insulating plate [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35 (7): 55 – 59.
- [7] Fanara C, Richardson I M. A langmuir multi-probe system for the characterization of atmospheric pressure arc plasmas[J]. European Physical Journal D, 2001, 34 (9): 2715 – 2725.
- [8] Leandro P, Hector K, Beatriz M. An interpretation of langmuir probe floating voltage signals in a cutting arc[J]. Transactions on Plasma Science, 2009, 37 (6): 1092 – 1098.
- [9] Fanara C. Sweeping electrostatic probes in atmospheric pressure arc plasmas part-I: general observations and characteristic curves [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33 (3): 1072 – 1081.
- [10] 项志遴, 俞昌旋. 高温等离子体诊断技术[M]. 上海: 科学技术出版社, 1982.

作者简介: 李渊博,男,1984 年出生,博士,讲师. 主要研究方向为先进连接方法及焊接电弧物理. 发表论文 9 篇. Email: liyuanbo1027@163.com