

中心通气对窄间隙 TIG 焊缝成形的影响

徐望辉¹, 贾兴华², 赵荣泽³, 余陈⁴, 郭春富³, 杨晨³

(1. 广州航海学院, 智能制造学院, 广州, 510700; 2. 广东美的电器有限公司, 高端重载机器人全国重点实验室, 佛山, 528311;
3. 沈阳工业大学, 材料科学与工程学院, 沈阳, 110870; 4. 广东省科学院中乌焊接研究所,
广东省现代焊接技术重点实验, 广州, 510650)

摘要: 针对窄间隙非熔化极惰性气体保护焊 (tungsten inert gas, TIG) 侧壁熔合不良的问题, 文中采用钨极中心通气的方式扩展焊接电弧, 将电弧热量传导至坡口侧壁, 以保证窄间隙坡口侧壁的充分熔合。在搭建空心钨极中心通气窄间隙焊接系统的基础上, 研究了中心气流量等参数对焊缝成形尺寸和电弧形态的影响。结果表明, 与实心钨极和空心钨极相比, 空心钨极中心通气方法获得的窄间隙焊缝熔宽及侧壁熔深增大, 在同样参数下实心钨极焊缝熔宽为 9.32 mm, 空心钨极不通气时获得的熔宽为 9.91 mm, 而中心通气后其熔宽增加到 11.02 mm; 随着空心钨极中心气流量的增大, 窄间隙焊缝熔宽和侧壁熔深增大, 当气流量增大到临界值后 (≥ 0.8 L/min), 产生侧壁熔合不良缺陷。中心通入惰性气体造成电子通道转移至空心钨极外围区域, 从而改善了窄间隙 TIG 中的侧壁熔合不良问题。

创新点: (1) 提出了中心通气空心钨极焊接方法, 通过钨极中心通气的方式来扩展电弧形态, 提高电弧外围能量分布, 增加电弧的有效加热区域, 进一步改善侧壁熔合质量。

(2) 分析了中心通气对电弧形态和窄间隙焊缝成形的影响规律。

关键词: 空心钨极; 中心通气; 窄间隙焊接; 侧壁熔合

中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231106001

Influence of central ventilation on the formation of narrow gap TIG welds

XU Wanghui¹, JIA Xinghua², ZHAO Rongze³, YU Chen⁴, GUO Chunfu³, YANG Chen³

(1. School of intelligent manufacturing, Guangzhou Maritime University, Guangzhou, 510700, China; 2. State Key Laboratory of High-end Heavy-load Robots, GD Midea Holding Co., Ltd, Foshan, 528311, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870, China; 4. Key Laboratory of Modern Welding Technology in Guangdong Province: China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, China)

Abstract: In response to the problem of poor side wall fusion of narrow gap tungsten inert gas(TIG), this article adopts the method of tungsten electrode center ventilation to expand the welding arc and transfer the arc heat to the groove side wall to ensure sufficient fusion of the narrow gap groove side wall. On the basis of building a hollow tungsten electrode center ventilation narrow gap welding system, the influence of parameters such as center gas flow rate on the weld forming size and arc shape is studied. The results show that compared with solid tungsten electrodes and hollow tungsten electrodes, the narrow gap welds melting width and side wall melting depth obtained by the hollow tungsten electrode center ventilation method are increased. Under the same parameters, the solid tungsten electrode welds melting width is 9.32 mm, the hollow tungsten electrode without ventilation obtains a melting width of 9.91 mm, and the melting width increases to 11.02 mm after the center ventilation; As the gas flow rate at the center of the hollow tungsten electrode increases, the width of the narrow gap weld and the depth of the side wall melt also increase. When the gas flow rate reaches the critical value (≥ 0.8 L/min), a side wall incomplete fusion defect occurs. The introduction of inert gas into the center causes the electron channel to transfer to the peripheral area of the hollow tungsten electrode, thereby

收稿日期: 2023 - 11 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005112); 广东省重点领域研发计划项目 (2021B0101250001); 广州市对外科技合作项目 (201807010035); 广州市科技计划项目 (201604046026); 高端重载机器人全国重点实验室开放课题 (HHR2024010430)

improving the problem of poor side wall fusion of narrow gap TIG.

Highlights: (1) A central ventilation hollow tungsten electrode welding method is proposed to extend the arc shape by means of central ventilation tungsten electrode, improve the peripheral energy distribution of the arc, increase the effective heating area of the arc, and further improve the quality of the side wall fusions.

(2) The influence rules of central ventilation on arc shape and narrow gap weld shaping are analysed.

Key words: hollow tungsten electrode; central ventilation; narrow gap welding; side wall fusion

0 序言

随着核电、压力容器和石油管道等重型行业的飞速发展,厚板焊接开始广泛的应用在上述行业中^[1-2]。然而,现在厚板焊接不成熟导致生产效率低,焊接成本高;较大填充量产生焊后变形;热输入量大对焊接接头造成破坏等问题^[3-4]。

窄间隙焊接技术相比其他焊接方法,坡口形式大多数为 U 形或 I 形,比角度坡口的填充量减小了数倍,提升了焊接效率,降低了焊接成本,在厚板焊接方面具有广阔的应用前景^[5-6]。窄间隙 TIG 因无焊接飞溅、焊接过程稳定,易于实现焊接热输入精确控制和无氧气氛,有利于获得高质量焊接接头以及全位置焊接,而被广泛应用^[7-9]。然而,窄间隙 TIG 过程中容易产生侧壁未熔合的缺陷,侧壁未熔合是影响窄间隙 TIG 质量的首要因素^[10-11]。

对于解决窄间隙 TIG 焊接中侧壁未熔合的问题,已有许多学者提出了多种焊接方法。例如双电弧技术、旋转电弧技术、摆动电弧技术和磁控电弧技术^[12-15]等,这些技术提高了对侧壁的热输入,对于促进侧壁熔合都起到了一定效果。然而,要进一步提高侧壁熔合质量,需要进一步减小旋转电弧技术、摆动电弧技术和磁控电弧技术电弧中心与侧壁的距离,电弧中心与侧壁距离过小容易导致侧壁起弧和焊枪损坏等问题;双电弧技术直接增大了能量

输入,在大幅度提高焊接成本的同时,会使焊缝产生热裂纹等焊接缺陷。因此不能一味靠增大能量输入、减小电弧中心与侧壁的距离来解决侧壁未熔合问题。

基于近些年来对于空心钨极的研究^[16-17],文中通过空心钨极中心通气的方式来扩展电弧,提高电弧外围能量分布,增加电弧的有效加热区域,进一步改善侧壁熔合质量。为解决窄间隙 TIG 过程中侧壁未熔合的难题提供了新思路。

1 试验方法

选择牌号为 Q235 的低碳钢为母材进行试验,选择常用于碳钢焊接的 ER50-6 为焊材,焊材直径为 1.2 mm。母材化学成分,如表 1 所示。焊材化学成分,如表 2 所示。钨极选用实心钨极和 1 mm 的空心钨极,钨极结构如图 1 所示。坡口尺寸如图 2 所示。设计了空心钨极中心通气窄间隙焊枪,从空心钨极内孔送入气流至电弧中心,强化电弧等离子体径向扩展行为,增加电弧有效加热区域,从而达到侧壁熔合良好的目的。

表 1 Q235 化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of Q235

C	Mn	Si	S	P	Fe
≤0.22	≤1.4	≤0.35	≤0.050	≤0.045	余量

表 2 ER50-6 化学成分 (质量分数, %)
Table 2 Chemical compositions of ER50-6

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Fe
0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.025	≤0.025	≤0.15	≤0.15	≤0.15	余量

空心钨极中心通气窄间隙焊接系统示意图,如图 3 所示。焊接系统主要由 TIG 电源、焊接平台、空心钨极窄间隙焊枪、通气控制装置、焊接工件、送丝机构和高速摄像系统构成。其中通气控制装置由中心通气氩气瓶、减压阀、精密流量计、气动接头和

空心钨极组成,通过调节精密流量计来实现对钨极中心气流量的精确控制;高速摄像机、微距镜头、滤光片和计算机构成高速摄像系统,使用该高速摄像系统可实现对焊接过程的高质量拍摄,能清晰观测到中心通气窄间隙 TIG 电弧。焊接时使用填丝机构

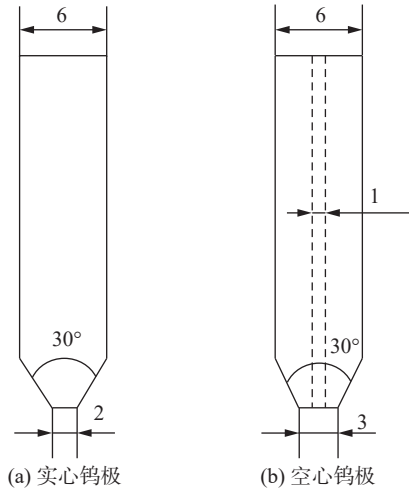


图 1 钨极结构示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic structure of tungsten electrode. (a) solid tungsten electrode; (b) hollow tungsten electrode

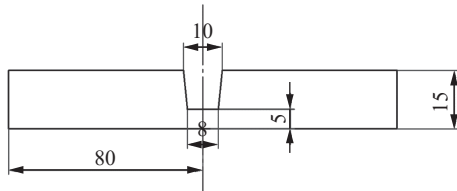


图 2 焊接试样坡口尺寸示意图 (mm)

Fig. 2 Schematic diagram of welded specimen beveling dimensions

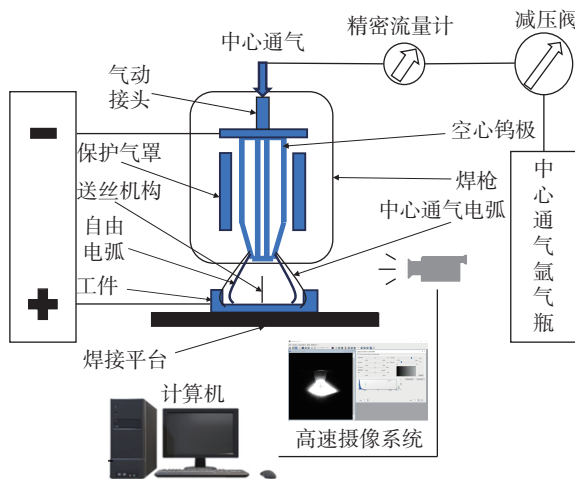


图 3 空心钨极中心通气窄间隙焊接系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hollow tungsten electrode centre vent narrow gap welding system

来稳定送丝, 焊丝与基板形成 15° , 焊丝抵到熔池前端. 保护气及空心钨极中心气体使用纯氩气, 外部保护气气体流量为 30 L/min , 送丝速度为 150 mm/min , 焊接速度为 190 mm/min , 焊接电流为 380 A , 电弧高度为 4 mm . 采用的焊接工艺参数, 如表 3 所示. 焊接试验完成后, 采用线切割在焊接试件上截取金

相试样, 经镶嵌、研磨和抛光后, 选用 $4\% \text{ HNO}_3$ 酒精进行腐蚀, 使用体式显微镜观察试件焊缝的宏观形貌.

表 3 焊接工艺参数
Table 3 Parameters of welding process

钨极结构	焊接电流 I/A	电弧高度 H_0/mm	中心气流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
实心钨极	380	4	—
空心钨极	380	4	—
空心钨极中心通气	380	4	0.2
空心钨极中心通气	380	4	0.4
空心钨极中心通气	380	4	0.8

2 试验结果与分析

2.1 不同钨极结构下的焊缝成形

实心钨极、空心钨极及空心钨极中心通气获得的焊缝成形及焊缝截面形貌, 如图 4 所示. 其中图 4(c) 的中心通气量为 0.4 L/min . 从图 4 中看出实心钨极和空心钨极获得的焊缝易于偏向一侧, 出现侧壁未熔合缺陷; 空心钨极中心通气获得的焊缝均匀, 两侧熔深明显. 通过对 3 种结构下的熔宽、熔深进行测量, 得出不同钨极结构下的焊缝熔宽、熔深.

不同钨极结构下的焊缝熔宽和熔深, 如图 5 所示. 图 5 中实心钨极焊缝熔宽为 9.32 mm , 焊缝熔深为 2.75 mm ; 空心钨极不通气时获得的熔宽和熔深分别为 9.91 mm 和 2.36 mm , 中心通气后其熔宽增加到 11.02 mm , 而熔深则减小至 2.34 mm . 可以得出, 空心钨极中心通气结构的焊缝熔宽较大, 两侧熔深明显, 焊缝成形最好, 但是其焊缝熔深相对较小.

2.2 中心气流量对焊缝成形的影响

不同中心气流量下的焊缝截面形貌, 如图 6 所示. 不同气流量下的焊缝熔宽、焊缝熔深和侧壁熔深, 如图 7 所示. 当中心气流量为 0.2 L/min 时, 焊缝侧壁熔合但出现略微不均匀的情况, 焊缝熔宽为 10.73 mm , 焊缝熔深为 2.52 mm ; 当气流量为 0.4 L/min 时, 电弧扩展最大并且较为稳定, 焊缝形貌美观、侧壁熔合良好, 焊缝熔宽为 11.25 mm , 焊缝熔深为 2.38 mm ; 当气流量为 0.8 L/min 时, 电弧趋于不稳定状态偏转严重, 焊缝分布不均匀且出现

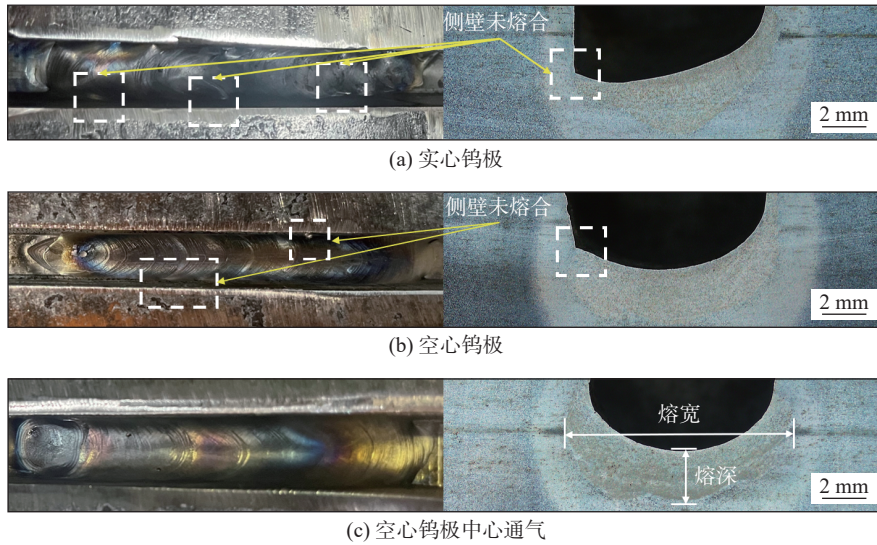


图4 不同钨极结构下的焊缝表面成形及焊缝截面形貌

Fig. 4 Morphology of welds surface forming and welds cross-section with different tungsten electrode structures. (a) solid tungsten electrode; (b) hollow tungsten electrode; (c) hollow tungsten electrode central ventilation

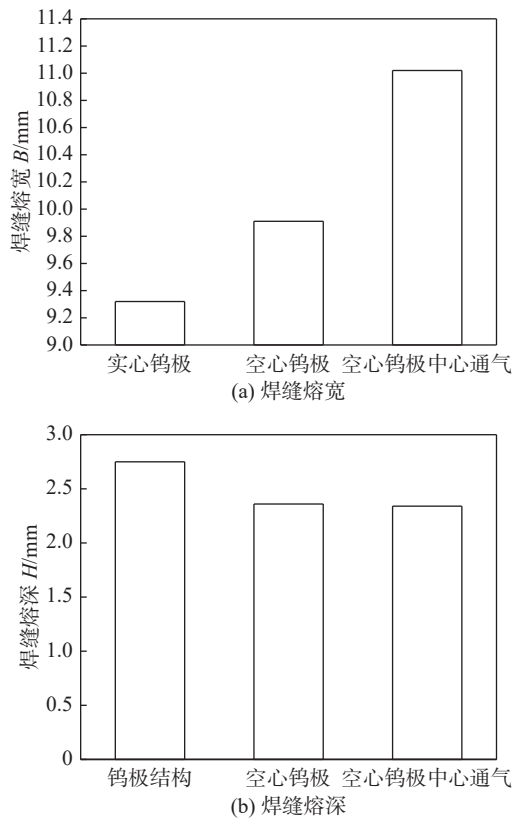


图5 不同钨极结构下的焊缝熔宽和熔深

Fig. 5 Melt width and melt depth of welds with different tungsten electrode structures. (a) weld width (b) weld depth

了侧壁未熔合缺陷,焊缝熔宽为 9.99 mm,焊缝熔深为 3.56 mm. 可以得出,当中心气流量为 0.4 L/min 时,焊缝熔宽较大.

2.3 结果分析

基于上文建立的空心钨极中心通气窄间隙焊

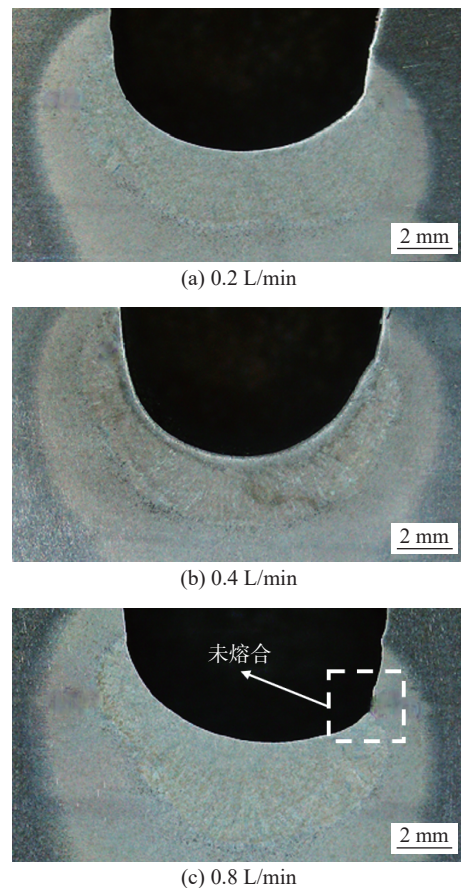


图6 不同中心气流量下的焊缝截面形貌

Fig. 6 Morphology of welds cross-sectional with different central gas flow rates. (a) 0.2 L/min; (b) 0.4 L/min; (c) 0.8 L/min

接系统,进行了空心钨极中心通气窄间隙焊接试验,在窄间隙送丝焊时利用高速摄像机拍摄了不同中心气流量下空心钨极电弧的宏观形态,并与实心

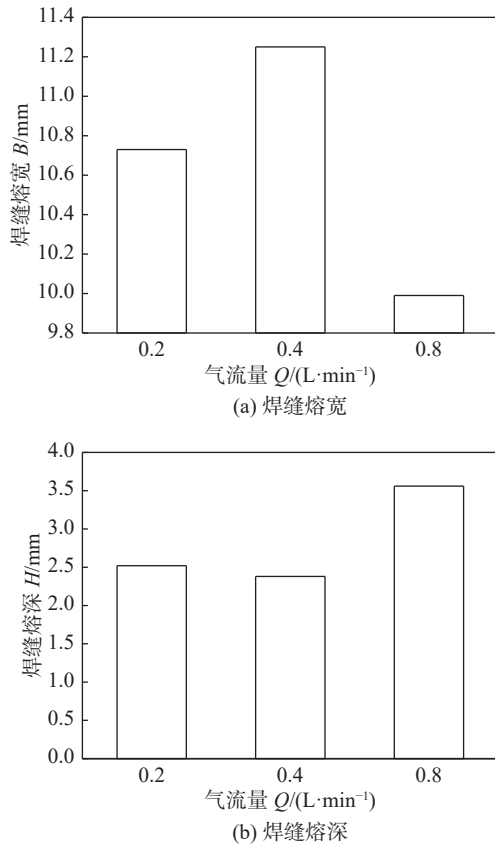


图 7 不同气流量下的焊缝熔宽和焊缝熔深

Fig. 7 Weld width and weld depth at different gas flow rates. (a) weld width; (b) weld depth

钨极、空心钨极电弧形态进行了比较. 不同钨极结构下电弧的宏观形态, 如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 传统实心钨极电弧的作用范围较小, 在窄间隙坡口加工精度存在误差的情况下, 电弧会寻找最小路径, 明显往一侧发生偏转, 稳定性较差; 与实心钨极电弧相比, 空心钨极电弧作用范围略大, 有向外扩展的趋势, 稳定性略微提升, 但是还是会出现一侧电弧略大一侧电弧略小的情况; 空心钨极中心通气电弧作用范围较大, 扩展较为明显, 稳定性强.

这主要是因为当空心钨极中心通气时, 中心处的中性气体粒子密度增大, 更多的中性粒子会往四周扩散, 将热量带向四周. 并且送入的中心气体温度低于电弧温度, 导致电弧及钨极中心温度下降, 无法使中性粒子电离, 中间的电阻增大, 电弧的电子通道由内向外转移, 电弧向外扩展. 所以中心通气后空心钨极电弧外部向侧壁的作用增大, 电弧内部向坡口底部的作用变小, 焊缝的熔宽增大, 熔深减小. 因此空心钨极中心通气电弧较其他两种电弧作用面积更大, 在焊接过程中产生的焊缝熔宽大于实心钨极、空心钨极电弧产生的焊缝熔宽, 产生的焊缝熔深小于实心钨极、空心钨极电弧产生的焊缝

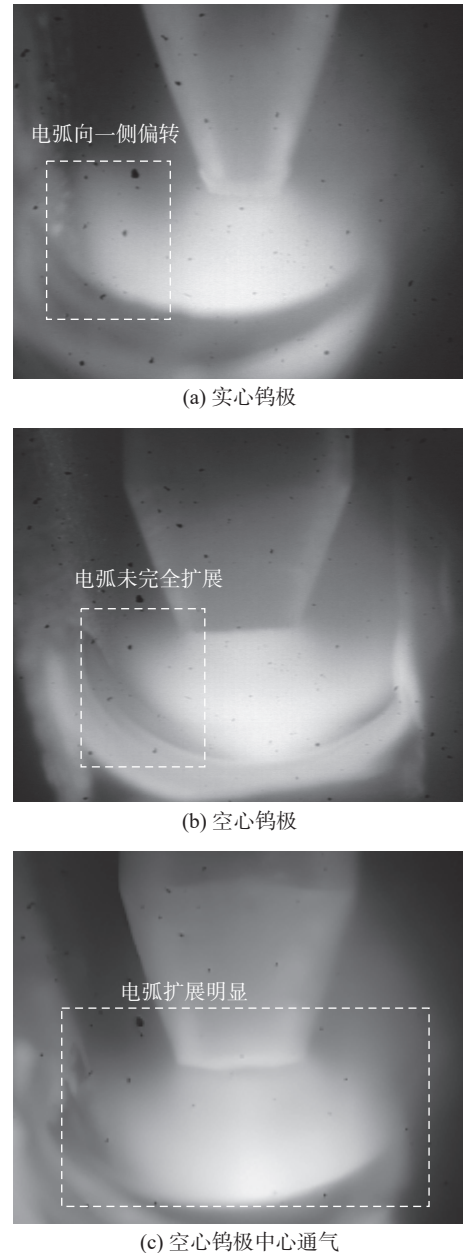


图 8 不同钨极结构下电弧的宏观形态

Fig. 8 Macroscopic morphology of arcs with different tungsten electrode structures. (a) solid tungsten electrode; (b) hollow tungsten electrode; (c) hollow tungsten electrode central ventilation

熔深. 不同气流量下空心钨极电弧的宏观形态, 如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 当中心气流量为 0.2 L/min 时, 空心钨极电弧有一侧略微偏转未能完全展开, 电弧较为稳定; 中心气流量由 0.2 L/min 增大到 0.4 L/min 时, 空心钨极电弧完全展开并且形态良好, 电弧稳定性强; 当中心气流量增大到 0.8 L/min 时, 空心钨极电弧发生严重偏转, 电弧稳定性差. 随着气流量的增大, 中心处中性气体的密度越来越大, 使得电弧中心的温度逐渐降低, 电弧外部的温度逐渐升高, 使得电弧扩展明显, 对侧壁的作用提

升明显,对坡口底部作用减小.当中心气流量过大时,气流与钨极形成一定的偏转角,气流进入电弧时的区域不固定,易发生电离的区域不固定在某处,各个位置都有可能得到较大的电流密度,使得电弧中的热量分布不均,导致电弧不断发生偏转且侧壁熔合不良的效果明显.因此空心钨极中心通气电弧随着气流量的增大,电弧作用范围逐渐增大,稳定性增强,焊接过程中能够产生较大的焊缝熔宽;当气流量增大超过临界值时,电弧稳定性差,作用到坡口侧壁的能量较小,焊接过程中产生的焊缝熔宽较小.

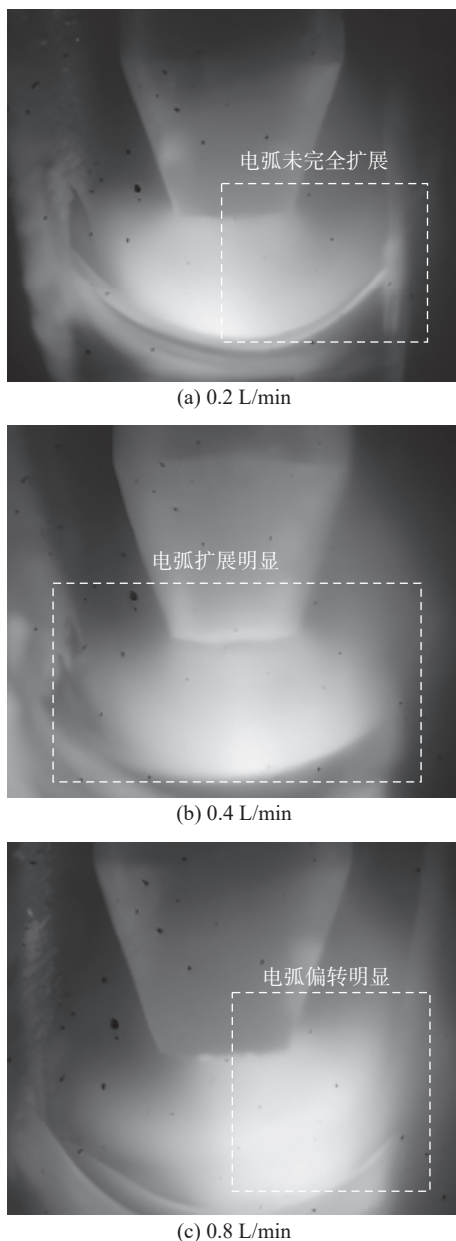


图 9 不同气流量下空心钨极电弧的宏观形态

Fig. 9 Macroscopic morphology of hollow tungsten electrode arcs under different gas flow rates. (a) 0.2 L/min; (b) 0.4 L/min; (c) 0.8 L/min

3 结论

(1) 为了改善窄间隙 TIG 焊接中侧壁熔合不良的问题,文中提出向空心钨极中心通气来扩展电弧的方法,并阐述了其电弧作用原理.搭建了空心钨极中心通气窄间隙焊接系统,并对系统的构成进行了说明.

(2) 在空心钨极中心通气窄间隙焊接系统下进行了不同参数的对比试验,对焊接接头的焊缝形貌进行了分析,与实心钨极、空心钨极相比,在焊缝形貌上,空心钨极中心通气结构下所对应焊接接头的焊缝熔宽大、焊缝熔深略小,焊缝成形美观,侧壁熔合良好.

(3) 利用高速摄像机拍摄的电弧形态解释了不同钨极结构、中心气流量对焊缝成形的影响.与实心钨极、空心钨极电弧相比,空心钨极中心通气电弧有着更大的作用范围,对侧壁的作用增大,促进了侧壁的熔合;随着中心气流量的增大,电弧的稳定性增强,作用范围逐渐增大,对侧壁的作用明显,促进了侧壁的熔合,当气流量增大超过临界值时,电弧稳定性变差,无法促进侧壁的熔合,降低了焊接质量.

参考文献

- [1] 李渊博,麻帅川.窄间隙焊接变形研究现状及进展[J].热加工工艺,2024,53(21):9-15+21.
Li Yuanbo, Ma Shuaichuan. Research status and progress of narrow gap welding deformation[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(21): 9-15+21.
- [2] 滕彬,范成磊,徐锴,等.厚板窄间隙焊接技术研究现状与应用进展[J].焊接学报,2024,45(1):116-128.
Teng Bin, Fan Chenglei, Xu Kai, et al. Research status and application progress of narrow gap welding technology for thick plates[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2024, 45(1): 116-128.
- [3] 郭洋,董志伟,李代龙,等.大壁厚 NiCrMoV 钢的窄间隙焊接工艺与接头性能[J].焊管,2024,47(2):57-62.
Guo Yang, Dong Zhiwei, Li Daiong, et al. Narrow gap welding process and joint performance of NiCrMoV steel with large wall thickness[J]. Welded Pipe and Tube, 2024, 47(2): 57-62.
- [4] Agostini P, Coppola R, Hofmann M, et al. Stress distribution in a 316L(N) steel narrow gap TIG model weld for Gen IV nuclear applications[J]. Nuclear Materials and Energy, 2022, 32: 101203.

- [5] 杨义成, 陈健, 黄瑞生, 等. 空心钨极焊接关键技术问题及发展现状 [J]. 焊接, 2021(5): 1 – 8.
Yang Yicheng, Chen Jian, Huang Ruisheng, *et al.* Key technical problems and development status of hollow tungsten arc welding[J]. *Welding & Joining*, 2021(5): 1 – 8.
- [6] 祝宇, 陈辉, 王佰昱. 大壁厚窄间隙焊缝根部侧壁未熔合缺陷有效检出方法研究 [J]. 机械, 2021, 48(S1): 36 – 39.
Zhu Yu, Chen Hui, Wang Baiyu. Research on effective detection method of the defect of poor side wall fusion on the Large wall thickness narrow gap weld root[J]. *Machinery*, 2021, 48(S1): 36 – 39.
- [7] Cai C, Yu J, Chen Z L, *et al.* Welding process stability in narrow-gap oscillating laser-MIG hybrid welding of titanium alloys with various oscillating patterns[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 133: 151 – 162.
- [8] 刘先森, 岳建锋, 黄云龙, 等. 窄间隙 P-GMAW 多信息融合侧壁熔合状态识别研究 [J]. 材料科学与工艺, 2023, 31(4): 9 – 17.
Liu Xianmiao, Yue Jianfeng, Huang Yunlong, *et al.* Sidewall fusion state recognition of narrow gap P-GMAW based on multi-information fusion[J]. *Materials Science and Technology*, 2023, 31(4): 9 – 17.
- [9] 董曼淑, 孙清洁, 刘进德, 等. 中部槽构件摆动电弧窄间隙 GMAW 焊接接头组织及性能研究 [J]. 电焊机, 2024, 54(3): 54 – 59.
Dong Manshu, Sun Qingjie, Liu Jinde, *et al.* Microstructure and properties of middle trough components for swing arc GMAW narrow gap welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(3): 54 – 59.
- [10] Lei Z, Cao H, Cui X F, *et al.* A novel high efficiency narrow-gap laser welding technology of 120 mm high-strength steel[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 178: 108232.
- [11] Ni Zhida, Dong Bolun, Li Yunhe, *et al.* Effects of processing parameters on molten behavior, arc stability, and defect forming in swing-arc narrow gap GMA vertical up welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 321: 118155.
- [12] Wang J X, Li C K, Yang B H, *et al.* Melting pool visualization and penetration prediction study of TIG bottoming welding with narrow gap hot wire[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 133: 226 – 237.
- [13] Liang G D, Qin G L, Cao P Z, *et al.* Evolutions of temperature field and stress field in narrow gap oscillating laser welding process based on equivalent heat source[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28: 154 – 167.
- [14] 刘文吉, 肖宇, 杨嘉昇, 等. 窄间隙 P-GMAW 仰焊位置熔滴过渡影响因素及控制方法 [J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 58 – 63.
Liu Wenji, Xiao Yu, Yang Jiasheng, *et al.* Influence factors and control methods of droplet transfer in narrow gap P-GMAW overhead welding position[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2024, 45(1): 58 – 63.
- [15] Li K, Jia C B, Fang C, *et al.* Numerical simulation of the unique rotating arc behaviors during narrow-groove GTAW[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131: 1611 – 1623.
- [16] Jing H, Chao F, Jin L, *et al.* Study on molten pool flow and hot cracking of narrow gap laser welding of 316LN stainless steel for fusion reactor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111633.
- [17] Fang C, Wei J, Liu J. Solidification cracking sensibility of narrow gap laser welding on ITER-grade austenitic stainless steel[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 162: 112068.

第一作者: 徐望辉, 博士, 高级工程师; 主要从事高效焊接与增材的科研和教学工作. Email: xuwanghui@126.com.

(编辑: 汤明日)