

四钨极 TIG 电弧耦合物理特性及高效稳定燃烧机制分析

梁晓梅^{1,2}, 杜兵¹, 周鑫^{1,2}, 滕彬², 黄瑞生², 张彦东², 陈晓宇²

(1. 中国机械总院集团有限公司, 北京, 100044; 2. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 哈尔滨, 150028)

摘要: 借助高速摄像采集四钨极 TIG 电弧引燃放电、稳定燃烧过程中电弧的图像信号, 并将特征参数进行定量化转变, 分析钨极间距、电弧弧长、沉积电流对四 TIG 电弧耦合过程及其稳定性的影响, 获得了四 TIG 电弧稳定燃烧作用机理及影响多电弧热效应的关键影响因素。结果表明, 单一钨极沉积电流 ≤ 160 A、电弧弧长 ≤ 5 mm、钨极间距 ≤ 6 mm 时电弧稳定性较好, 且与钨极间距的作用相比, 电弧弧长、沉积电流对电弧形态的影响相对较小, 钨极间距可以显著影响四钨极 TIG 电弧稳定性; 当钨极间距为 2 mm 时, 四钨极 TIG 电弧在自磁收缩和安培力的作用下相互吸引, 四钨极 TIG 电弧形成公共导电通道, 此时四钨极 TIG 电弧稳定性最好、电弧热源有效利用率最高, 当钨极间距为 8、10 mm 时电弧稳定性和热源有效利用效率均显著降低, 钨极间距为 2 mm 时, 熔化能约为钨极间距为 10 mm 时熔化能的 9.2 倍。

创新点: (1) 从四钨极 TIG 电弧引燃放电和稳定燃烧过程揭示了多电弧耦合过程物理特性。

(2) 从电弧等离子形态变化过程获得了关键热源参数对四钨极 TIG 电弧稳定燃烧的作用规律。

(3) 从电子迁移角度阐明了四钨极 TIG 电弧稳定燃烧及有效利用机制。

关键词: 四钨极 TIG 电弧; 诱导放电; 公共导电通道; 物理机制

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20241115002

Physical characteristics and efficient and stable combustion mechanism of coupled four-tungsten-electrode TIG arc

LIANG Xiaomei^{1,2}, DU Bing¹, ZHOU Xin^{1,2}, TENG Bin², HUANG Ruisheng²,
ZHANG Yandong², CHEN Xiaoyu²

(1. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing, 100044, China; 2. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin, 150028, China)

Abstract: With the help of a high-speed camera, the image signals of the four-tungsten-electrode TIG arc during the ignition discharge process and stable combustion process were collected, and the characteristic parameters of the arc were quantitatively changed. The influence of the tungsten electrode spacing, arc length, and deposition current on the coupling process and stability of the four-tungsten-electrode TIG arc were analyzed, thus obtaining the stable combustion mechanism of the four-tungsten-electrode TIG arc and the key factors affecting the multi-arc thermal effect. The results show that for a certain range, the stability of the single-tungsten-electrode arc is better with the deposition current of ≤ 160 A, the arc length of ≤ 5 mm, and the tungsten electrode spacing of ≤ 6 mm. Compared with that of tungsten electrode spacing, the influence of arc length and deposition current on the shape of the arc is relatively small. Tungsten electrode spacing can significantly affect the stability of the four-tungsten-electrode TIG arc. When the tungsten electrode spacing is 2 mm, the four-tungsten-electrode TIG arc attracts each other under the action of self-magnetic contraction and Ampere's force; the four-tungsten-electrode TIG arc forms a common conductive channel. In this case, the stability of the four-tungsten-electrode TIG arc is the best, and the effective utilization rate of the heat source is the highest. When the tungsten electrode spacing is 8 and 10 mm, both the arc stability and the effective utilization rate of the heat source are

收稿日期: 2024-11-15

基金项目: 山东省重点研发计划 (重大科技创新工程) 项目 (2023CXGC010406); 黑龙江省重点研发计划项目 (2022ZX01A09); 黑龙江省自然科学基金项目 (ZD2022E004); 中国机械科学研究总院集团有限公司技术发展基金项目

significantly reduced. When the tungsten electrode spacing is 2 mm, the melting energy is approximately 9.2 times that when the tungsten electrode spacing is 10 mm.

Highlights: (1) The physical characteristics of the four-tungsten-electrode TIG arc during the ignition discharge process and stable combustion process were revealed.

(2) The effect of key heat source parameters on the stable combustion of the four-tungsten-electrode TIG arc was obtained according to the process of arc plasma morphology change.

(3) From the perspective of electron migration, the mechanism of stable combustion and effective utilization of the four-tungsten-electrode TIG arc was clarified.

Key words: four-tungsten-electrode TIG arc; induced discharge; common conductive channel; physical mechanism

0 序言

增材制造技术是 20 世纪 80 年代提出的一种互联网 + 传统工艺相结合发展起来的, 基于离散—堆积原理的新型制造技术^[1], 随着机器人和计算机的不断发展, 更容易实现工业智能制造, 已经成为工业 4.0 的核心技术之一^[2], 相比于减材制造和等材制造具有生产效率高、加工成本低、材料利用率高、用途广泛等优点^[3]. 在航空航天、医疗器械、汽车制造和消费电子等行业应用较多, 用于高精度、复杂模具成批制造^[4], 而受热源本身的局限性, 难以实现大型复杂构件的一次精密成形, 因此, 增材制造技术在大型 3D 部件整体制造面临不少挑战^[5], 在重大装备制造业领域应用较少.

电弧熔丝增材制造作为最有可能实现大型复杂金属制件批量工业制造的一种增材制造技术^[6], 具有材料利用率高、无需密闭真空腔和设备制造成本低等特点. 相比于 MIG 电弧, TIG 电弧以其焊接过程稳定、飞溅小、空气污染小的特点深受研究学者们的青睐, 但是效率低制约了其在大型尺寸构件制造中的应用^[7-9].

为了提高单电弧制造效率, 围绕 TIG 电弧衍生出来多种新型 TIG 复合热源制造方法, 包括双钨极 TIG、三 TIG 电弧、空心钨极 TIG、GPCA-TIG 焊、A-TIG、激光—双 TIG 电弧复合等^[10-15] 焊接方法, 研究表明利用复合电弧相互作用, 降低了电弧压力, 提高了电弧的稳定性, 解决了在大熔覆电流条件下因电弧压力过大导致咬边、凹坑等问题^[16], 但现有技术仍难以实现大型复杂构件大电流、高焊速、高质量增材制造. 多热源增材制造过程是一个复杂多物理场耦合过程, 涉及到多热源耦合能量吸收与转化、热量/质量传输、热源与溶体交互作用等复杂的冶金过程, 其中多电弧耦合物理特性及高效稳定燃烧机制是影响热源耦合能量吸收与转化的

关键因素, 而关于这方面的研究未见报道. 特别是, 对于大型复杂金属制件大多采用单电弧增材制造, 金属熔敷效率低、生产制造周期长, 极大限制了电弧增材制造技术在大型构件的应用推广, 而多电弧复合焊接方法为其提供了思路.

文中针对大尺寸复杂构件高效优质制造提出了一种四钨极 TIG 电弧增材制造方法, 借助高速摄像采集了四钨极 TIG 电弧形态图像, 通过提取电弧引燃放电、稳定燃烧过程中电弧等离子体面积及波动等特征参数, 掌握关键工艺参数对焊道成形的影响规律, 分析四钨极 TIG 电弧耦合物理特性及稳定燃烧机制, 为获得适合于大尺寸复杂构件增材制造的熔宽大、熔深浅、尺寸规则的焊道成形提供理论依据.

1 试验方法

试验以 30 mm 厚的 304 不锈钢作为基板, 尺寸为 300 mm × 200 mm × 30 mm, 金属丝材选用哈尔滨焊接研究所(威尔公司)自研的 HS13/5 焊丝, 焊丝直径为 1.2 mm, 基板和焊丝的化学成分见表 1. 设计了一套四钨极 TIG 电弧双丝增材制造系统, 如图 1 所示, 主要由焊接电源、送丝装置、四钨极焊接电源控制系统、三维行走试验台及自主研发的四钨极焊枪组成. 四钨极焊枪中四钨极热源空间排布, 如图 2 所示.

通过观察四钨极 TIG 电弧引燃阶段、稳定燃烧阶段电弧等离子体变化过程, 采用单一变量法, 定量表征不同钨极间距、沉积电流、电弧弧长下四钨极 TIG 电弧的变化规律, 提取四钨极 TIG 电弧等离子体面积特征参数, 如图 3 所示, 其中 S 为电弧等离子体面积 (单位: mm^2 、pixel); h 为电弧高度 (单位: mm、pixel); l 为电弧弧长 (单位: mm、pixel).

表 1 304 不锈钢与 HS13/5 焊丝成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel and HS13/5 welding wire

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
304不锈钢	0.040	0.43	1.17	0.0014	0.0280	18.05	8.08	0.054
HS13/5焊丝	0.016	0.46	0.54	0.0083	0.0019	12.30	4.51	0.480

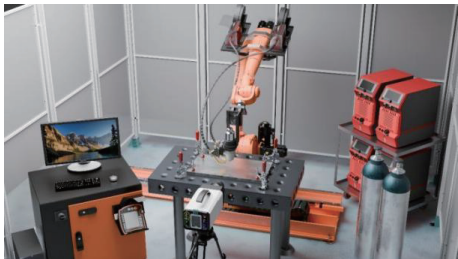


图 1 增材制造设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the additive manufacturing device

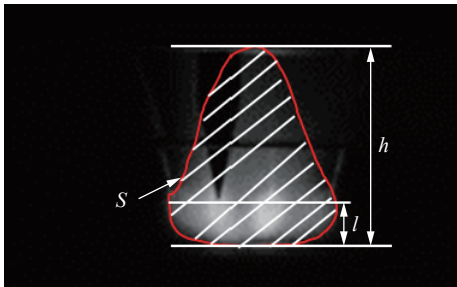


图 3 四钨极 TIG 电弧图像特征采集示意图

Fig. 3 Schematic diagram of image feature acquisition of tetra-tungsten arc

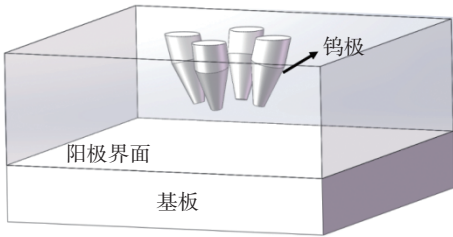


图 2 四钨极 TIG 电弧空间排布图

Fig. 2 Space layout diagram of tetra-tungsten arc

2 试验结果与分析

2.1 四 TIG 电弧引燃放电过程

图 4 为四钨极间距为 2 mm 时, 多 TIG 电弧引燃放电过程及稳定燃烧过程电弧等离子体变化图像, 可以看出, 每个电弧燃烧过程都包括引燃放电、稳定燃烧两个阶段, 且稳定燃烧过程随着脉冲电流

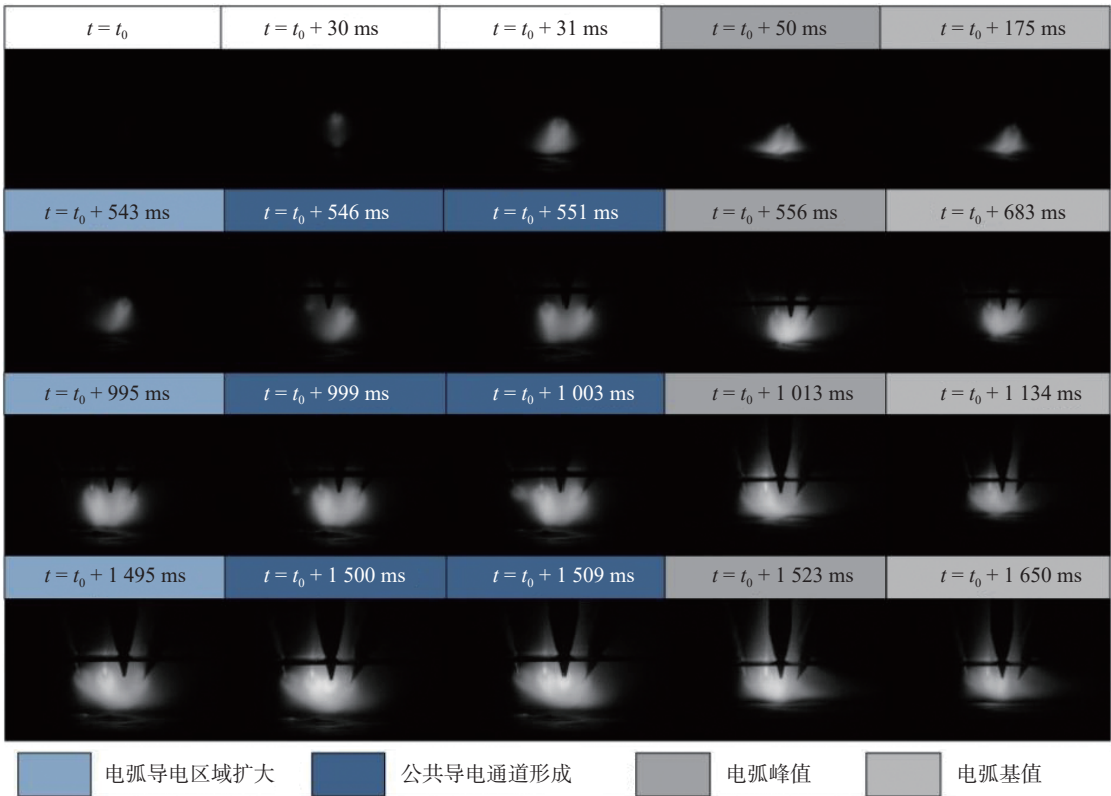


图 4 四钨极 TIG 电弧引燃过程 (焊接电流 $I = 120\text{ A}$, 钨极间距 $d = 4\text{ mm}$, 弧长 $L = 5\text{ mm}$)

Fig. 4 Tetra-tungsten arc ignition process

峰值、基值交替形成峰值稳定燃烧、基值稳定燃烧两种电弧形态. 第 1 个电弧起弧以基板为触发点以高频起弧方式引燃, 并沿着钨极中心延长线方向稳定燃烧, 后面的第 2、3、4 个电弧起弧并没有以基板为触发点起弧, 均是沿着已燃烧电弧的边缘起弧, 起弧均伴随着电弧等离子体的扩大和电弧公共导电区域的形成两个阶段, 另外, 随着不同电弧的陆续燃烧, 多电弧弧柱区偏离了钨极中心延长线均有向着四钨极 TIG 电弧中心相互吸引的趋势, 且随着电弧的增多, 偏离角度也逐渐增大, 具体表现为多电弧向中心汇聚.

为了清晰描述多电弧耦合作用机制, 选取了第一电弧及第二电弧起弧过程典型图像并通过 Image J 图像处理软件对其进行二值化处理, 如图 5 所示. 图 5(a)~图 5(d) 分别为第一电弧稳定、第二电弧起弧瞬间电弧等离子体的扩大、第一电弧与第二电弧公共导电通道形成前、第一电弧与第二电弧公共

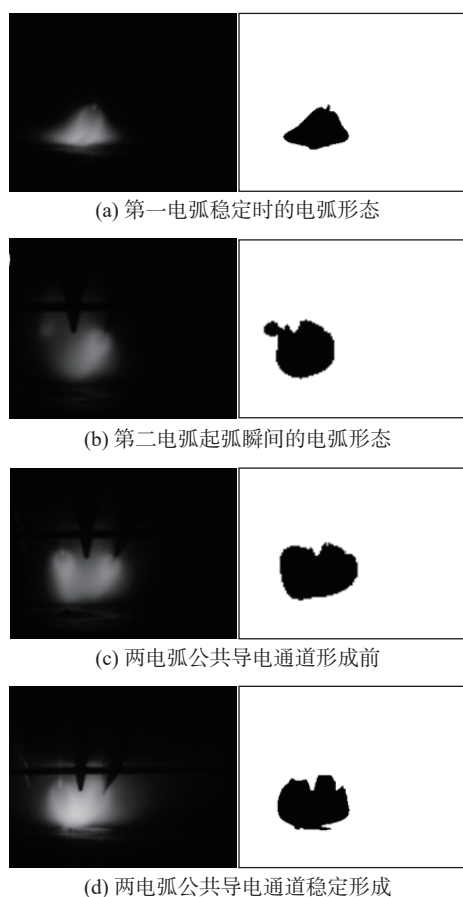


图 5 第一电弧到第二电弧引燃过程

Fig. 5 Process of the first arc to second arc ignition. (a) arc morphology when the first arc is stable; (b) arc morphology at the moment of the second arc's ignition; (c) arc morphology before the formation of the common conductive channel between the two arcs; (d) arc morphology when the common conductive channel of the two arcs is stable

电通道形成且两电弧处于稳定状态时的电弧形态及二值化处理后的图片. 此外, 对 4 个阶段电弧等离子体面积 (黑色部分) 进行数据统计, 其结果如图 6 所示, 当电弧状态由 a 至 b 时, 第一电弧稳定燃烧、第二电弧开始引燃的瞬间, 首先发生的是电弧等离子体面积的扩大; 随后由 b 至 c 时, 第二电弧弧柱区形成, 电弧等离子体面积瞬间扩张; 最后由 c 至 d, 两个电弧间形成了稳定的公共导电区域, 提高了弧柱区的能量密度, 四钨极 TIG 电弧的自磁收缩效应增强, 电弧等离子体面积减小^[17], 因此, 由 b 至 d 阶段, 电弧等离子体面积先增加后减小.

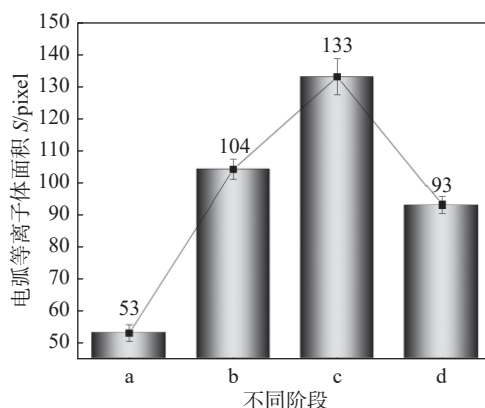


图 6 第一电弧到第二电弧引燃过程电弧等离子体面积
Fig. 6 Arc plasma area during first arc to second arc ignition process

如图 7 所示, 随引燃时序, 四钨极 TIG 电弧的引燃时间逐渐缩短. 这是因为电弧 1 在引燃前没有导电通道提供“便利”, 只能在基板处起弧, 而当后续电弧起弧时, 按照最小电压原理, 电弧总是在最有利于电弧引燃的位置起弧, 前一个已经存在的电弧为其提供了公共导电通道, 使其跳过基板在已存在电弧处直接引燃, 且能量密度的增加也为电弧引燃提供了“便利”, 缩短了后续电弧的引燃时间.

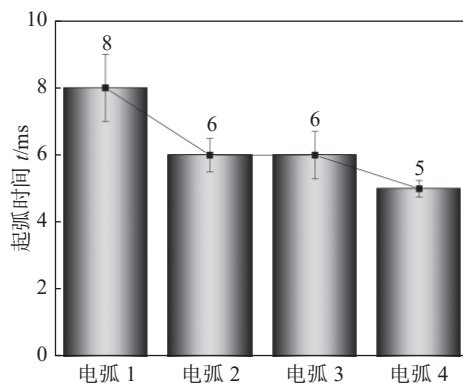


图 7 四钨极 TIG 电弧引燃时间
Fig. 7 Ignition time of tetra-tungsten arc

2.2 钨极间距对四 TIG 电弧形态的影响

如图 8 所示, 当钨极间距为 2、4 mm 时, 四钨

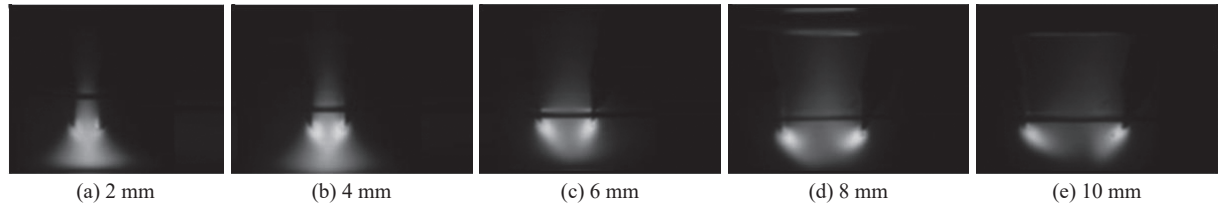
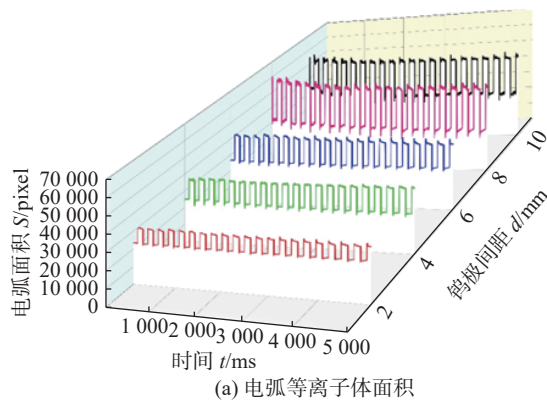


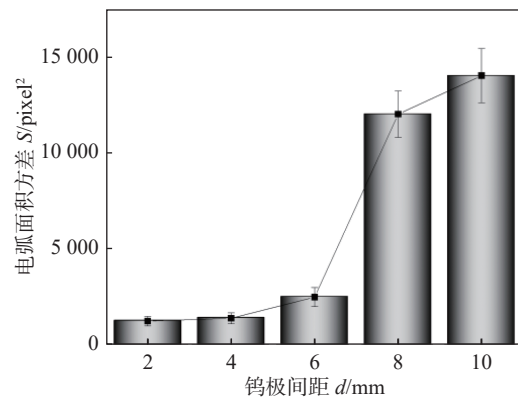
图 8 不同钨极间距下四钨极 TIG 电弧形态 (焊接电流 $I = 120$ A, 弧长 $L = 5$ mm)

Fig. 8 Tetra-tungsten arc shape with different distance between tungsten electrodes. (a) 2 mm; (b) 4 mm; (c) 6 mm; (d) 8 mm; (e) 10 mm

极 TIG 电弧呈现出类曲边三角形的电弧等离子体形态,而不是传统单钨极电弧等离子体的钟罩形,当钨极间距增加到为 2、4 mm 时,四钨极 TIG 电弧在钨极上方仍存在电弧等离子体,并且可以明显观察到随钨极间距的增加,电弧沿钨极中心线方向的偏转角度逐渐增加.如图 9 可知,随钨极间距增加,四钨极 TIG 电弧面积及波动均增加,当钨极间距 ≤ 6 mm 时,电弧面积及波动变化较小,当钨极间距增加至 8、10 mm 时,电弧面积及波动骤增,说明电弧稳定性下降,结合电弧形态图像可知,虽然电弧面积整体增加,但电弧间公用导电通道的亮度显著降低,说明此处能量密度减小.



(a) 电弧等离子体面积



(b) 电弧等离子体面积方差

图 9 不同钨极间距下四钨极 TIG 电弧等离子体面积及方差

Fig. 9 Plasma morphology with different Distance between tungsten electrodes. (a) arc plasma area; (b) variance of arc plasma area

2.3 沉积电流对四 TIG 电弧形态的影响

如图 10 所示,同一钨极间距下,沉积电流对四钨极 TIG 电弧形态影响不大,同一钨极间距下沉积电流增加时,四钨极 TIG 电弧高亮区面积略有增加,电弧间的相互吸引增强,公共导电区域增加,多电弧更容易耦合成一个大电弧,且多电弧沿四钨极几何中心向上汇聚的等离子高亮区亦增加,但与钨极间距相比,沉积电流对多电弧耦合作用效果相对较小.

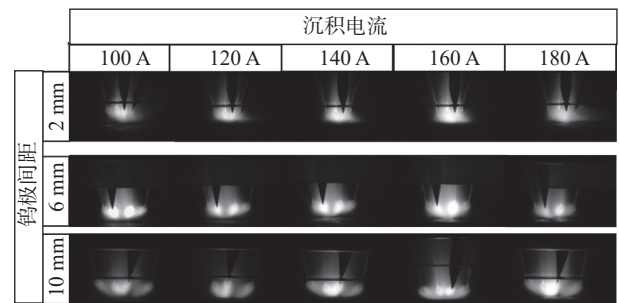


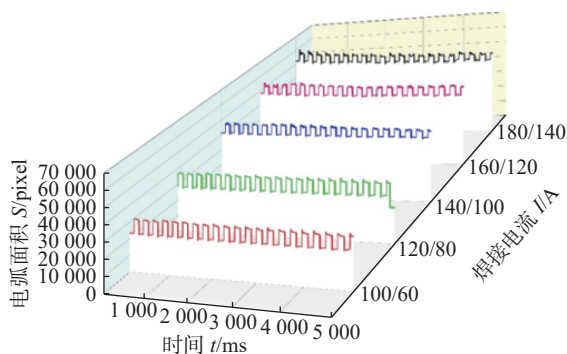
图 10 不同焊接电流下四钨极 TIG 电弧形态 (钨极间距 $d = 4$ mm, 弧长 $L = 5$ mm)

Fig. 10 Tetra-tungsten arc morphology under different deposition currents

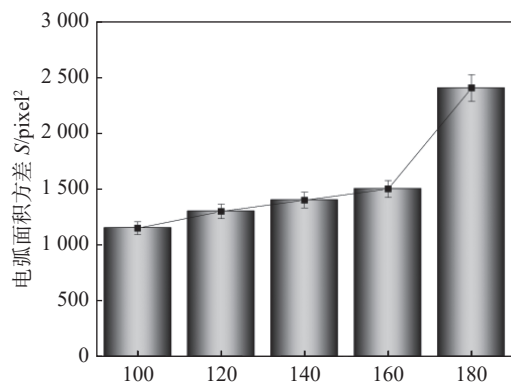
如图 11 所示,随沉积电流增加,四钨极 TIG 电弧面积及波动略有增加,与钨极间距作用相比较小,且当沉积电流峰值达到 180 A 时,电弧面积方差显著增加,说明电弧稳定性下降.分析认为,当沉积电流增加时,四钨极 TIG 电弧间耦合作用力增加,特别是四钨极 TIG 电弧沿几何中心向上汇聚的等离子聚集区域扩大,电子碰撞几率增加引起电弧稳定性下降,四钨极 TIG 电弧稳定机制中电子迁移现象解释.

2.4 电弧弧长对四 TIG 电弧形态的影响

如图 12 所示,随电弧弧长增加,四钨极 TIG 电弧等离子体面积明显增加,当电弧亮度下降,代表电弧能量密度降低,当钨极间距为 2 mm 时,随电弧弧长变化,四钨极 TIG 电弧形态由类“陀螺”形转变为类曲边三角形,而当钨极间距为 10 mm 时,随



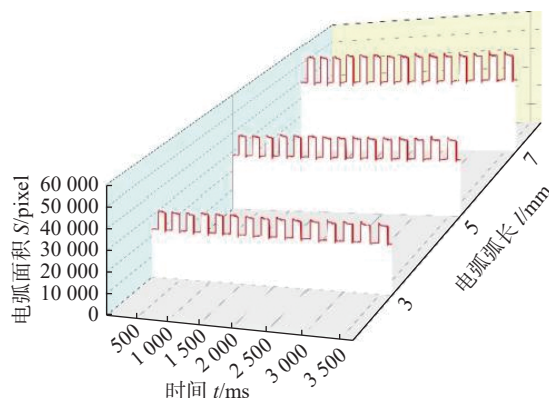
(a) 电弧等离子体面积



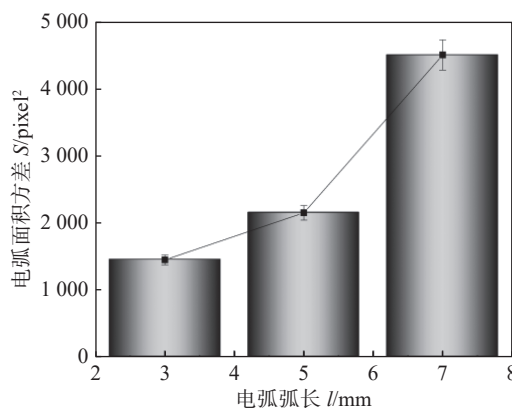
(b) 电弧等离子体面积方差

图 11 不同沉积电流下四钨极 TIG 电弧等离子体面积及方差

Fig. 11 Area and variance of tetra-tungsten arc plasma under different deposition currents. (a) arc plasma area; (b) arc plasma area variance



(a) 电弧等离子体面积



(b) 电弧等离子体面积方差

图 13 不同电弧弧长下电弧等离子体面积及方差

Fig. 13 Plasma area and variance of tetra-tungsten arc under different Arc lengths. (a) arc plasma area; (b) arc plasma area variance

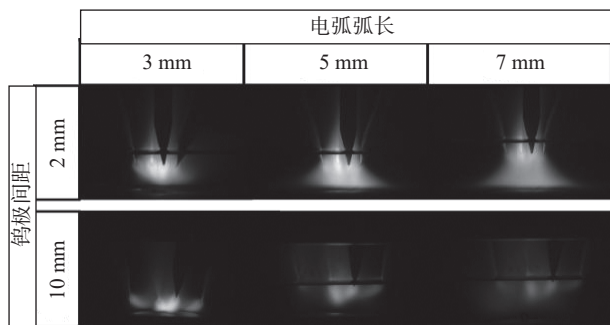
图 12 不同电弧弧长对四钨极 TIG 电弧形态的影响 (焊接电流 $I = 120$ A, 钨极间距 $d = 4$ mm)

Fig. 12 Tetra-tungsten arc shape under different arc lengths

电弧弧长增加, 四钨极 TIG 电弧形态变化不明显. 如图 13 所示, 随电弧弧长增加, 四钨极 TIG 电弧面积及波动显著增加, 特别是, 当电弧弧长达到 7 mm 时, 电弧面积方差显著增加, 说明电弧稳定性下降.

2.5 四钨极 TIG 电弧热源有效利用率分析

为了更好的表征四钨极 TIG 电弧有效利用率, 引入熔化能的概念, 并以此作为四钨极 TIG 电弧有

效利用率的表征方式, 其中熔化能^[11] 如下

$$E_m = (vS)\rho \left(\int_{T_0}^{T_m} CdT + Y \right) \quad (1)$$

式中: E_m 为熔化能; v 为扫描速度; S 为横截面熔化面积; ρ 为材料密度; T 为温度; T_0 为室温; T_m 为熔点; C 为比热容; Y 为熔化潜热.

由该公式可知, 熔化能的大小与横截面熔化面积密切相关, 即当横截面面积较大时, 可认为此时四钨极 TIG 电弧有效利用率较高, 因此试验条件相同时, 以自熔的方式对不同钨极间距下四钨极 TIG 电弧有效利用率进行了焊接试验, 以此确定最佳的耦合距离, 试验及测量结果, 如图 14 和图 15 所示.

如图 14 所示, 四钨极间距为 2 mm 时, 焊缝熔宽与接头横截面面积均最大, 而间距为 10 mm 时两者均最小, 且随着钨极间距的增大, 熔宽没有明显增加, 且熔化面积逐渐减小, 这是因为焊道尺寸不仅与作用在基体的热源能量面积有关, 还与能量密度有关, 即热源能量有效利用率, 当钨极间距较小

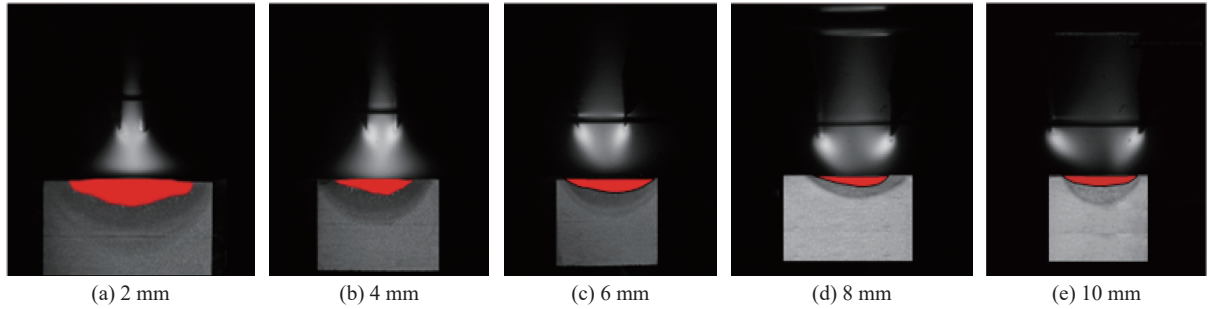


图 14 不同钨极间距下四钨极 TIG 电弧形态及接头横截面

Fig. 14 Cross-sectional area of four tungsten electrode heat source fusion joint for different tungsten electrode spacing). (a) 2 mm; (b) 4 mm; (c) 6 mm; (d) 8 mm; (e) 10 mm

时,四钨极 TIG 电弧能量面积虽然较小,但能量密度较大,此时能量有效利用率较高,而当钨极间距较大时,虽然四钨极 TIG 电弧能量面积较大,但能量密度较小,而能量有效利用率较低.因此,钨极间距为 2 mm 时,焊道熔化面积最大,钨极间距为 10 mm 时,熔化面积最小,这是由不同钨极间距时四钨极 TIG 电弧热源有效利用率的不同造成的.利用熔化能公式计算得出,钨极间距为 2 mm 的熔化能约为钨极间距为 10 mm 时熔化能的 9.2 倍.

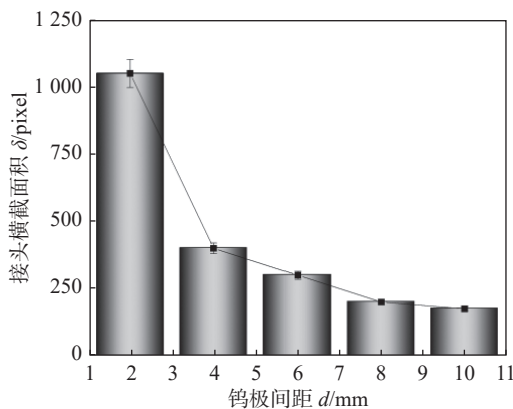


图 15 不同状态电弧等离子体电子迁移情况示意图

Fig. 15 Electron migration of arc plasma in different states

2.6 四钨极 TIG 电弧稳定机制

从电子迁移角度解释了上述关键参数对四钨极 TIG 电弧形态的影响结果,从而揭示四钨极 TIG 电弧稳定燃烧机制.如图 16 所示,单钨极时,电子运动方向基本是沿着钨极中心线延长线运动的,没有发生偏转,而当 4 个钨极共同放电时,每个钨极的电子运动方向发生偏转并向四钨极几何中心汇聚,钨极间距增大,偏转现象更加明显.分析认为,钨极间距为 2~6 mm 时,四钨极 TIG 电弧在安培力的作用下形成公共导电通道^[17],显著提高四钨极 TIG 电弧能量密度,增强自磁收缩效应,大部分

电子沿钨极延长线方向迁移,最终到达基板位置,只有少部分电子在电弧之间安培力的作用下向上运动^[18],最终形成高度较小的弧峰,此时四钨极 TIG 电弧能量利用率和稳定性均下降;当钨极间距为 8~10 mm 时,由于距离较远不能形成公共导电通道,但仍然在安培力的作用下发生偏转,因此多电弧向钨极几何中心处汇聚,相互撞击,并最终向钨极上方迁移形成弧峰,此时四钨极 TIG 电弧能量利用率和稳定性均下降,此外,沉积电流与电弧弧长都会影响电子密度与电子运动方向,因此,两者对电弧形态的影响也可利用该理论进行解释.

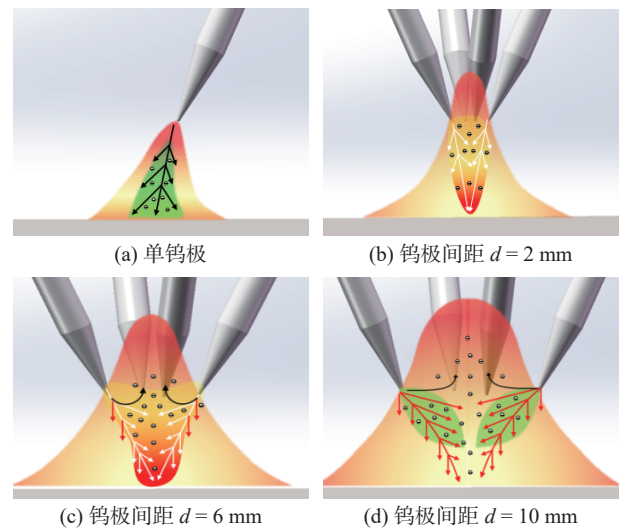


图 16 不同钨极间距下横截面熔化面积

Fig. 16 Cross-sectional area of welded joint under different tungsten electrode spacing. (a) a single tungsten electrode; (b) $d = 2$ mm; (c) $d = 6$ mm; (d) $d = 10$ mm

3 结论

(1) 通过对多电弧耦合关键参数对四钨极 TIG 电弧形态及稳定性的研究表明,钨极间距、电弧弧

长可以显著的影响四钨极 TIG 电弧形态, 沉积电流对四钨极 TIG 电弧形态影响相对较小; 其中, 钨极间距对四钨极 TIG 电弧稳定性的影响最为明显, 当钨极间距为 2 mm 时, 四钨极 TIG 电弧稳定性最好。

(2) 对不同钨极间距下四钨极 TIG 电弧热源有效利用率进行研究, 结果表明, 当钨极间距为 2 mm 时, 四钨极 TIG 电弧热源有效利用效率最高, 相较于钨极间距为 10 mm 时提高近 9.2 倍。

(3) 四钨极 TIG 电弧在自磁收缩和安培力的作用下相互吸引, 当钨极间距较小时 (2 ~ 6 mm), 四钨极 TIG 电弧弧柱区相互重叠形成公共导电通道, 此时四钨极 TIG 电弧稳定性最好, 热源利用效最高; 当钨极间距较大时 (8 ~ 10 mm), 四钨极 TIG 电弧不能形成稳定的导电通道, 大部分电子在安培力的作用下相互碰撞, 最终向钨极上方运动, 造成四钨极 TIG 电弧稳定性下降、热源有效利用效下降, 并且对焊枪的烧损降低了其使用寿命。

参考文献

- [1] TOMAR B, SHIVA S, NATH T. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31(6): 103739.
- [2] EVANS S I, WANG J, QIN J, *et al.* A review of WAAM for steel construction—Manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions[J]. *Structures*, 2022, 10(44): 1506 – 1522.
- [3] CHEN L, HE Y, YANG Y X, *et al.* The research status and development trend of additive manufacturing technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(9/10/11/12): 3651 – 3660.
- [4] 韩庆璘. 双丝双钨极氩弧增材制造成形机理及熔敷金属成分梯度调节 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
HAN Qinglin. Forming mechanism and composition gradient regulating of deposited metal in double-wire twin -electrode gas tungsten arc additive manufacturing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [5] 雍绍禹. 大型 3D 部件焊接增材制造的优势、挑战及策略探析 [J]. *数字农业与智能农机*, 2024(6): 124 – 126.
YONG Shaoyu. Analysis of the advantages, challenges and strategies of additive manufacturing for welding large 3D components[J]. *Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery*, 2024(6): 124 – 126.
- [6] 孟美情, 韩俭, 朱瀚钊, 等. 基于多丝电弧增材制造研究现状 [J]. *材料工程*, 2025, 53(10): 46 – 92.
MENG Meiqing, HAN Jian, ZHU Hanzhao, *et al.* Research status of arc additive manufacturing based on multi-wire[J]. *Materials Engineering*, 2025, 53(10): 46 – 92.
- [7] 黄佳蕾, 陈菊芳, 姜宇杰, 等. TIG 电弧增材制造 308L 不锈钢的显微组织与力学性能分析 [J]. *热加工工艺*, 2023, 52(1): 38 – 42.
HUANG Jialei, CHEN Jufang, JIANG Yujie, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 308L stainless steel made by TIG arc additive manufacturing[J]. *Heat Processing Technology*, 2023, 52(1): 38 – 42.
- [8] 刘黎明, 贺雅净, 李宗玉, 等. 不同路径下 316 不锈钢电弧增材组织和性能 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(12): 13 – 19.
LIU Liming, HE Yajing, LI Zongyu, *et al.* Microstructure and properties of 316 stainless steel fabricated by arc additive manufacturing under different paths[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(12): 13 – 19.
- [9] 杜兵, 孙凤莲, 徐玉君, 等. 焊接方法对超低碳马氏体不锈钢焊丝熔敷金属冲击韧性的影响 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(8): 1 – 4.
DU Bing, SUN Fenglian, XU Yujun, *et al.* The influence of welding methods on the impact toughness of the deposited metal of ultra-low carbon martensitic stainless steel wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(8): 1 – 4.
- [10] KOBAYASHI K, NISHIMURA Y, IJIMA T, *et al.* Practical application of high efficiency twin-arc TIG welding method (Sedar-TIG) for pching storage tank[J]. *Welding in the World*, 2004, 48(7): 35 – 39.
- [11] 肖天骄. 焊接 TIG 电弧的导电机构及其能量分布的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
XIAO Tianjiao. Research on the conductive mechanism of TIG welding arc and its energy distribution[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [12] 杨义成, 杜兵, 黄继华, 等. 空心钨极同轴填丝焊接丝弧交互作用机制 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(4): 94 – 99.
YANG Yicheng, DU Bing, HUANG Jihua, *et al.* Mechanism of wire and arc interaction in hollow tungsten arc welding with coaxial filler wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(4): 94 – 99.
- [13] 黄勇, 郝延召, 瞿怀宇, 等. 耦合电弧钨极 TIG 焊电弧压力的测量与分析 [J]. *焊接学报*, 2013, 34(12): 33 – 36.
HUANG Yong, HAO Yanzhao, QU Huaiyu, *et al.* Test and analysis of arc pressure measurement in coupling arc electrode TIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(12): 33 – 36.

- Research on fiber laser docking welding process of high strength steel for vehicles [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [11] CHEN S A, WU Y F, LI Y, *et al.* Study on 2219 Al-Cu alloy T-joint used dual laser beam bilateral synchronous welding: Parameters optimization based on the simulation of temperature field and residual stress[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106481 – 106498.
- [12] 韩立军. 汽车车身激光焊接技术发展与应用 [J]. 电焊机, 2020, 50(7): 64 – 73.
- HAN Lijun. Development and application of laser welding technology for automobile body[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(7): 64 – 73.
- [13] 杨兴亚. 基于近似能量衰减匙孔模型的激光焊熔池形貌专家系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2023.
- YANG Xingya. Research on laser welding pool morphology expert system based on approximate energy attenuation keyhole model [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2023.
- [14] PIEKARSKA W, KUBIAK M. Theoretical investigations into heat transfer in laser-welded steel sheets[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012, 110(1): 159 – 166.
- 第一作者: 胡广旭, 博士, 讲师, 硕士研究生导师; 主要研究方向焊接结构数值模拟与智能焊接技术; Email: hgxu_2020@126.com.

(编辑: 刘启明)

(上接第 88 页)

- [14] AMAN Singh, VIVEK Singh, AJAY Pratap Singh, *et al.* Experiment analysis of A-TIG welding and comparison between TIG, Double-TIG, and A-TIG of Hastelloy C-276[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 100: 102 – 107.
- [15] LIU L M, XU X K, ZHU Y L. Study on synchronous induction of arc plasma by laser in laser-double TIG hybrid welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 133(10): 106130.1 – 106130.10.
- [16] SCHWEDERSKY M B, SILVA R, DUTRA J C, *et al.* Two-dimensional arc stagnation pressure measurements for the double-electrode GTAW process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(4): 275 – 80.
- [17] 徐信坤. 小功率脉冲激光诱导增强双电弧物理机制及焊接工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- XU Xinkun. Physical mechanism and welding process of low power pulsed laser induced enhanced twin arc[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [18] WANG B, ZHANG H, SANG J. Study on arc characteristics and weld appearance of laser-twin-arc-GTAW hybrid welding[J]. China Welding, 2025, 34(1): 12 – 27.
- 第一作者: 梁晓梅, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为激光电弧复合焊接及增材制造; Email: lxmeihwi@126.com.
- 通信作者: 黄瑞生, 博士, 正高级工程师; Email: huangrs8@163.com.

(编辑: 刘启明)