DOI: 10.3901/JME.2018.02.055

低电流 TIG 电弧辅助 MIG 高速焊咬边缺陷抑制机理及措施的研究*

陈 姬¹ 魏建华¹ 周 倩² 武传松¹

(1. 山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 济南 250061;

2. 山东劳动职业技术学院 济南 250022)

摘要: 基于温度场、流场、熔滴过渡以及电弧形态检测,开展低电流钨极氩弧焊(Tungsten inert gas welding, TIG)辅助熔化极惰性气体保护(Metal inert gas welding, MIG)高速焊工艺试验。从传热、传质以及受力等角度分析低电流 TIG 辅助电弧对高速 MIG 咬边缺陷的抑制机理,并分析各工艺参数对最终焊缝成形的影响。相比常规 MIG 高速焊,低电流 TIG 辅助电弧能有效降低 MIG 高速焊前部熔池边缘的温度梯度,延长熔池存在时间,促进液态金属向焊缝边缘填充。电弧力和熔滴冲击力是影响高速焊咬边缺陷的主要作用力,低电流 TIG 辅助电弧对 MIG 熔滴冲击力改变较小,但两电弧耦合后,电弧静、动压力明显降低,可有效地抑制 MIG 高速焊中咬边缺陷的产生。此外,正交工艺试验显示,丝-极间距和焊枪倾角是影响复合焊工艺的重要参数,而钨极距工件距离和 TIG 焊接电流则对咬边缺陷的影响较小,通过对丝-极间距和焊枪倾角的调节能快速实现该复合焊工艺参数的优化,抑制咬边缺陷。

关键词: TIG-MIG; 咬边缺陷; 抑制机理; 工艺优化

中图分类号: TG444

Suppression Mechanism of Low Current Auxiliary TIG Arc on High Speed TIG-MIG Hybrid Welding and Process Optimization

CHEN Ji¹ WEI Jianhua¹ ZHOU Qian² WU Chuansong¹

(1. Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution & Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061;

2. Shandong Labor Vocational and Technical College, Jinan 250022)

Abstract: The low current auxiliary TIG arc assisted high speed MIG process is carried out to analyze the suppression mechanism of undercut defect from the aspects of heat transfer, mass transfer and force field. The influence of the welding parameters on undercut defect is also analyzed. The low current auxiliary TIG arc can effectively reduce the temperature gradient around the edge of the weld pool during high speed MIG, which prolongs the existence time of the molten pool and promotes the filler metal to the edge of the weld to prevent undercut defect. The arc force and the droplet impact play major roles in the formation of the undercut defect. The auxiliary of low current TIG presents slight influence on MIG droplet, however, it can reduce the arc static and dynamic pressure obviously to mitigate or even inhibit undercut defect during the high-speed welding process. The orthogonal test shows that the inclination angle of welding torch, and the spacing of wire-pole are the important parameters affecting the formation of undercut defect compared with TIG current and tungsten distance workpiece distance. Optimizing torch angle and wire-pole spacing is a fast and economical way to improve low current auxiliary TIG-MIG hybrid welding to suppress undercut defect.

Key words: TIG-MIG; undercut defect; suppression mechanism; process optimization

0 前言

熔化极惰性气体保护焊(Metal inert gas welding,

MIG)具有效率高、适应性强、易于实现自动化等优点,广泛应用于工业生产中^[1]。提高焊接速度,是提高焊接生产率的重要途径。但实践表明, MIG 焊接速度一旦超过某一临界值,会出现焊道咬边缺陷。咬边缺陷不仅严重影响接头承受动载荷的能力,也是产生驼峰焊道的诱发源,限制了 MIG 焊接工艺在

* 国家自然科学基金资助项目(51305235)。20170527 收到初稿, 20170719 收到修改稿

高速焊中的应用^[2]。如何抑制 MIG 高速焊咬边缺陷,成为提高其生产效率的突破口。近年来,惰性气体钨极保护-熔化极惰性气体保护(Tungsten inert gas-metal inert gas welding, TIG-MIG)复合高速焊技术因其电源匹配简单、焊接效率高、焊缝成形好等优点,受到越来越多学者的重视。MENG 等^[3]通过分析大电流 TIG-MIG 复合焊电弧的稳定性,发现 TIG 焊接电流高于 MIG 焊接电流后,复合焊电弧稳定。娄小飞等^[4]通过开展 TIG-MIG 复合高速焊工艺试验,提出两电弧的相互作用减小了电弧压力,有效避免高速焊接时咬边等缺陷的产生,焊接速度可达 2.5 m/min。杨涛等^[5]通过研究 TIG-MIG 复合电弧特性、熔滴过渡形式及不同极性接法,发现 TIG 电弧对 MIG 电弧具有良好维弧作用,且 TIG 电弧遵循电压最小原理而作用于 MIG 熔滴,起到了加热熔滴的作用,有效降低焊接飞溅,促进焊缝铺展及成形。KANEMARU 等^[6]发现当 TIG 电流在 200 A 以上时, TIG-MIG 复合焊热效率可达 70% 左右。综上,目前多采用大电流 TIG 电弧优化 MIG 高速焊工艺,焊接总功率高,母材热输入大,一定程度限制了此工艺在工业中的推广。因此,如何降低 TIG-MIG 高速焊热输入,深度优化 TIG-MIG 焊接工艺,成为发展 TIG-MIG 复合高速焊工艺的关键。

基于以上现状,本文提出采用低电流 TIG 电弧辅助 MIG 高速焊工艺。通过对比分析,研究 TIG 辅助电弧对熔池温度分布和温度参量的影响,并借助熔池流动行为,从传热和传质的角度分析低电流 TIG 对咬边缺陷的抑制机理。在理论研究的基础上,针对性地开展正交工艺试验,实现该工艺生产效率的最优化。

1 工艺试验

低电流 TIG 电弧辅助 MIG 复合焊接试验系统如图 1 所示,主要包括焊接系统(含 TIG 和 MIG 焊接电源、MIG 送丝系统、焊枪夹具和焊接试验平台等)、图像采集系统(熔滴过渡高速采集系统、熔池流场采集系统、背景光源等)、温度测量系统(Optris PI 红外成像仪)、霍尔电流、电压双路电参数采集系统等组成。

其中熔池流场采集系统由激光器聚焦系统、激光扫描平台、示踪粒子添加装置、高速相机(采集窗口 1 200 像素×300 像素,曝光时间 2 ms,采集频率 100 帧/s)及复合滤光系统(635 nm±25 nm 窄带滤光片及中性减光片)等组成,如图 2 所示。选取 SiC 颗

粒作为示踪粒子,一部分焊前置于工件 1.5 mm 深× $\phi 1$ mm 的孔内(焊接过程中 SiC 颗粒随母材熔化进入熔池),表征熔池前部液态金属流动;另一部分 SiC 颗粒在焊接过程中通过示踪粒子添加装置进入熔池后方,表征熔池尾部液态金属流动。激光扫描平台驱动激光点在熔池表面上按设定路径高速移动,以辅助恢复示踪粒子世界坐标。

图 1 工艺试验系统

图 2 熔池流场采集系统

焊丝采用 1.2 mm 直径的实芯焊丝 H08Mn2Si, 焊接母材为 Q235 低碳钢板, 其规格为 250 mm×70 mm×5 mm, 化学成分及熔点见表 1。

表 1 Q235 化学成分(质量分数)和熔点

碳(%)	锰(%)	硫(%)	磷(%)	硅(%)	熔点/K
0.140	0.300	0.050	0.045	0.300	1 770

咬边深度及宽度取值如图 3 所示。实际测量中,选取 100 mm 长焊缝,统计计算焊缝两侧咬边深度和宽度的平均值作为本文的咬边深度和宽度值。

图 3 焊缝咬边缺陷

研究表明大电流 TIG-MIG 复合焊能一定程度避免高速焊焊缝成形缺陷,但低热输入下的低电流 TIG 电弧辅助 MIG 高速焊对咬边缺陷的抑制作用仍需要试验验证。在 MIG 平板堆焊和 TIG-MIG 复合焊接时均保持 MIG 直流反接且焊接参数不变, TIG

直流正接, 使用 5 L/min 的纯 Ar 保护气, 焊接参数如表 2、3 所示。

表 2 单 MIG 及 TIG-MIG 复合焊时 MIG 焊接参数

电弧电压/ V	焊接电流/ A	焊枪倾角/ (°)	Ar 气流量/ (L/min)	焊接速度/ (m/min)
29	260	90	18	1.0

表 3 TIG-MIG 复合焊时 TIG 焊接参数

丝-极间距/ mm	TIG 电流/ A	TIG 焊枪倾角 (°)	钨极尖端到 工件的距离/mm
5	70	50	3

图 4 为焊接速度 1.0 m/min 时 MIG 和 TIG-MIG 焊缝宏观形貌以及焊缝横截面图。通过对比可以看出, 低电流 TIG 辅助电弧改善了高速 MIG 焊缝宏观形貌。虽然焊缝余高增大, 但咬边深度和焊缝熔深都减小。即在该焊接速度下, 低电流 TIG 辅助电弧对 MIG 宏观形貌的改善和咬边缺陷的抑制都有一定的促进作用。

图 4 MIG 和 TIG-MIG 焊缝宏观形貌及焊缝横截面图
(焊接速度 1.0 m/min)

图 5 为 MIG 与 TIG-MIG 咬边缺陷深度随焊接速度的变化曲线。在 0.6 m/min 较低的焊接速度下, 低电流 TIG 辅助电弧对咬边缺陷并没有明显的抑制作用; 随着焊接速度增大, TIG 辅助电弧对 MIG 咬边缺陷的抑制作用增强。但在 1 m/min 时, 尽管 TIG 辅助电弧能够有效减轻 MIG 高速焊咬边程度, 但其咬边缺陷的深度仍达 0.22 mm, 复合焊工艺参数需要进一步优化。

图 5 咬边缺陷深度与焊接速度的关系

2 焊接温度场-流场分析

焊接温度场是影响焊接质量和焊接生产率的重要因素, 也是反馈调节焊接参数、控制焊接质量的主要手段之一。

图 6 是采用红外成像仪所拍摄的焊接速度为 1.0 m/min 时, MIG 及 TIG-MIG 温度场整体分布情况。相对于单 MIG, 复合焊接时 TIG 与 MIG 电弧相互排斥^[7], 导致其 MIG 电弧出现更加明显的后托, 增强了电弧在熔池纵向的加热作用, 其熔池长度增长, 拓宽了液态金属纵向流动范围, 延长了其向各区域流动的时间, 促进液态金属向焊缝边缘的流动和填充, 有利于抑制咬边缺陷。

图 6 MIG 及 TIG-MIG 温度场整体分布
(焊接速度为 1.0 m/min)

为快速、准确地评估不同焊接工艺参数对焊接热过程的影响, 分别在熔池前部咬边缺陷产生的主作用区(焊丝中心线后方 9 mm 处, 离电弧较近, 能准确反映熔池前部温度情况)、熔池中部咬边缺陷产生的次作用区(焊丝中心线后方 15 mm 处)以及焊缝中心线处选取 a、b、c 三条线, 作为温度分析参考线, 以反映熔池上表面温度场的分布特点。根据文献[8], 忽略熔池尾部对咬边缺陷的影响。此外, 熔池表面的熔渣会导致较大的温度偏差, 采用多次采集以避开熔渣对熔池不同区域的干扰。

对比图 7 中 MIG 焊和 TIG-MIG 复合焊的熔池各区域宽度变化可以看出电弧正下方的熔池宽度最大。MIG 焊时, a 线处熔池宽度相比电弧下方的减小量在 0.6 mm 左右, b 线处熔池宽度相对 a 线处减小 1.0 mm 左右, 其咬边宽度为 1.2 mm。可见, 当液态金属流动到 a 线处(刚脱离电弧作用), 其焊缝

边缘凝固宽度已达到咬边缺陷宽度的一半,该区域熔池宽度的变化受到电弧力、熔滴冲击力和流动和传热的综合影响,属于咬边缺陷产生的主作用区。而熔池前部到熔池中部的区域(即 a - b 线间区域),咬边缺陷最终成形。该区域已脱离了电弧和熔滴的作用,主要受液态金属流动和传热的影响,属于咬边缺陷产生的次作用区。此外, TIG-MIG 复合焊时,低电流 TIG 电弧对熔池宽度影响较大。TIG-MIG 复合焊下熔池前部 a 线处宽度相对于电弧下方熔池最宽处仅减小 0.2 mm 左右,小于单 MIG 焊接下的 0.6 mm。即在咬边缺陷产生的主作用区,低电流 TIG 电弧辅助有效地促进了液体金属对该区域焊缝边缘的填充,在该区域抑制了咬边缺陷的产生。同时, TIG-MIG 复合焊熔池中部 b 线处的宽度减小幅度也比单 MIG 小。通过上述分析可知,焊接过程中低电流 TIG 的辅助降低了咬边缺陷产生的主作用区和次作用区熔池宽度的减小幅度,理论上促进了液态金属对焊缝边缘的填充,也有利于咬边缺陷的抑制。

图7 MIG和TIG-MIG熔池各区域宽度变化图

由图8熔池纵向温度场分布可以看出,低电流TIG辅助电弧使熔池表面纵向温度变化更加平缓,温度梯度减小。在较小的温度梯度下,纵向表面张力梯度也相应较小,有利于抑制液体向熔池后方的流动,液态金属有更多时间向熔池边缘填充,进而有效抑制咬边缺陷。

图8 MIG及TIG-MIG复合焊中纵向温度分布图

此外,图9和图10显示,低电流TIG辅助电

弧使熔池前部 a 线和中部 b 线处熔池边缘的温度梯度发生了明显的变化。在 1.0 m/min 的焊接速度下, MIG 焊接过程中熔池边缘温度梯度可达 400 K/mm 左右,而低电流 TIG 辅助电弧使熔池边缘温度梯度降为 350 K/mm 左右,即低电流 TIG 电弧明显降低了熔池边缘区域横向温度梯度。依据单 MIG 温度场分析得出的咬边缺陷与熔池边缘温度梯度的关系,可以得出低电流 TIG 辅助电弧促使液态金属有效铺展到焊缝边缘,有效地抑制了咬边缺陷的产生。

(a) 设定MIG焊接电流260 A,电弧电压29 V, TIG焊接电流70 A,丝-极间距5 mm

(b) 设定MIG焊接电流260 A,电弧电压29 V, TIG焊接电流70 A,丝-极间距5 mm

图9 MIG及TIG-MIG复合焊中熔池前部和中部温度分布

图10 熔池前部9 mm处边缘温度梯度随焊接速度的变化

图11为焊接速度 1.0 m/min 时获得的示踪粒子流动迹线图。结果显示, MIG 咬边缺陷主作用区内示踪粒子向后流动的速度高于横向流动的速度,导致该区域示踪粒子流动轨迹与焊缝边缘仍存在一定距离;在咬边缺陷产生的次作用区虽然存在少量沿焊缝边缘流动的示踪粒子,但此时咬边缺陷已经初

步形成。复合焊接过程中, 示踪粒子不仅在咬边缺陷主作用区和次作用区沿焊缝边缘流动, 并且相比单 MIG, 示踪粒子在咬边缺陷主作用区横向流速加快, 对焊缝边缘更有效地铺展和填充, 进而减轻了咬边缺陷的产生。

图 11 焊接速度为 1.0 m/min 时 MIG 和 TIG-MIG 焊接过程中示踪粒子流动轨迹

3 熔池受力分析

电弧压力主要由电弧静压力和电弧动压力组成, 电弧静压力是由电磁收缩效应引起的, 电弧动压力是由电弧中粒子对工件的撞击引起的。其中, 电弧静压力直接作用于熔池表面, 也是电弧动压力的力源。

常规 MIG 电弧静压力和 TIG-MIG 耦合电弧的电弧静压力可分别表示为^[9]

$$P_M = KI_M^2 \lg \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (1)$$

$$P_{T-M} = KI_{T-M}^2 \lg \left(\frac{d_4}{d_3} \right) \quad (2)$$

式中, K 为常数; I_M 和 I_{T-M} 分别 MIG 焊和 TIG-MIG 复合焊时, 流经工件的电流; d 为锥形弧柱上底或下底直径。由式(1)、(2)可以看出, 相较流经工件的电流, 锥形弧柱上底和下底直径的比值对电弧静压力的影响很小, 电弧静压力主要受电流的影响。

在稳定的 MIG 焊接过程中, I_M 为通过母材的电流, 该数值接近设定的电流值。而在丝极间距为 5 mm 的 TIG-MIG 复合焊中, MIG 正极流向 TIG 负极之间的电流近乎为零, 由于 TIG 极性与 MIG 极性相反, 流经母材电流 I_{T-M} 等于 MIG 电流和 TIG 电流之差, 即

$$I_{T-M} = I_M - I_T \quad (3)$$

如果忽略电弧上下底面直径的影响, 仅考虑焊接电流值的变化, TIG-MIG 复合焊的电弧压力会明显小于 MIG 焊。除此之外, 由拍摄到的 MIG 与 TIG-MIG 电弧形态可知, d_4/d_3 小于 d_2/d_1 , 即低电流 TIG 辅助电弧不仅减小了流经母材的电流值, 而且减小了锥形弧柱上底和下底直径的比值, 进一步减小了复合电弧静压力。

电弧动压力受电弧形态影响较大, 电弧直径变化梯度与电弧动压力呈正相关关系^[10]。焊接过程瞬时电弧边缘的变化如图 12 所示, 耦合电弧横截面积变化梯度较单 MIG 电弧小, 电弧耦合后, 电弧截面积梯度的减小, 高温粒子加速效果减弱, 到达工件表面时的速度减小, 相应的电弧动压力也减小。

图 12 MIG 和 TIG-MIG 原始电弧形态以及边缘提取轮廓图

由上述分析可知, 通过低电流 TIG 电弧与 MIG 电弧的耦合, 电弧静压力和电弧动压力都有不同程度的减小, 对熔池液态金属的挖掘作用减弱, 液态金属向电弧后方聚集趋势减轻, 有效促进了液态金属向焊趾部位的填充, 进而减轻咬边缺陷的产生。

高速焊时, 熔滴冲击力促进液态金属后向流动, 是影响焊缝成形的重要因素。熔滴冲击力受到熔滴质量、熔滴冲击速度和过渡频率的综合作用, 其计算公式为

$$F = \frac{\rho \pi d^3 v f}{6} \quad (4)$$

式中, F 为熔滴冲击力; v 为熔滴到达工件的速度; f 为熔滴过渡频率; ρ 为熔滴密度; d 为熔滴平均直径。

表 4 为 MIG 和 TIG-MIG 复合焊接下熔滴过渡过程以及低电流 TIG 辅助对熔滴质量、速度、过渡频率及熔滴冲击力的影响。结果显示, 低电流 TIG 辅助电弧对 MIG 熔滴过渡形式影响较小, 以射流过渡为主, 但熔滴质量稍有增大, 熔滴过渡频率相应减小。虽然 TIG 设定电流值仅为 MIG 电流值的四分之一左右, 热输入相对较小, 但仍存在 TIG 电弧的热输入作用于

熔滴,对熔滴起到一定的加热作用,促进了其生长,而熔滴直径增大的过程也导致熔滴的过渡时间的延长,使过渡频率减小。此外,熔滴直径的增大,作用在熔滴上的电弧力和电磁收缩力相应减小,减小了熔滴进入熔池的速度^[11]。但从得到的熔滴冲击力的大小可以看出,低电流 TIG 电弧辅助对 MIG 熔滴冲击力影响不大,两焊接工艺下熔滴冲击力数值变化量仅在 2% 左右,说明在该试验条件下,低电流 TIG 辅助电弧对高速 MIG 熔滴冲击力影响不大。

表 4 低电流 TIG 辅助电弧对熔滴的影响

焊接工艺	熔滴直径/ mm	熔滴速度/ (m/s)	过渡频率/ Hz	冲击力/ mN
MIG	0.99	1.26	345	1.73
TIG-MIG	1.03	1.23	323	1.77

纯 Ar 加入质量分数为 0.6% 左右的 CO₂ 以提高熔池中的氧含量,研究熔池表面张力对咬边缺陷的影响时发现:保护气中加入 0.6% 左右 CO₂ 时熔滴冲击力几乎未发生变化,但文献[12]指出,此时熔池表面张力已发生较大改变。试验结果显示熔池表面张力变化时咬边缺陷未发生明显的变化,表明表面张力对咬边缺陷的影响较小。在研究重力对咬边缺陷的影响时发现,上坡焊和下坡焊下咬边缺陷严重程度有所不同。文献[13]指出的焊接电流较大时重力作用会使熔池坍塌或失稳下淌,而在平板堆焊过程中,低电流 TIG 电弧的辅助对焊缝熔深影响并不大,也未发生熔池坍塌或失稳下淌现象,表明在上述焊接参数下,单 MIG 和 TIG-MIG 熔池所受重力相差不大。

4 复合焊工艺优化试验

根据分析,低电流 TIG 电弧辅助主要通过改变电弧力、以及熔池传热-传质过程来抑制咬边缺陷的产生。TIG-MIG 复合焊中,TIG 焊接电流、TIG 焊枪倾角 θ 、丝-极间距 d_1 以及钨极尖端距工件距离 d_2 影响两电弧之间的耦合作用,是影响复合电弧力以及焊接热过程的重要参数。为快速有效的得出以上四种因素对咬边缺陷的影响大小及规律,选用 L16(4⁵) 的正交试验表。试验中选取复合焊焊接参数分别为 MIG: 焊接电流 260 A,电弧电压 32 V,喷嘴到工件距离 19 mm,18 L/min 纯 Ar 保护气;TIG 选取气流量为 5 L/min 的纯 Ar 保护气,选取的因素和水平如正交效应曲线图 13 所示。

结果显示,丝-极间距 d_1 极差最大,即对咬边缺陷的影响最大,并且从正交试验效应曲线图看出,在

一定的间距范围内随着丝-极间距的增大,抑制咬边缺陷抑制效果越好;TIG 焊枪倾角 θ 对咬边缺陷的影响次之,随着倾角的增大咬边缺陷整体呈现加重的趋势;钨极距工件距离 d_2 以及 TIG 焊接电流对咬边缺陷的影响相对较小。因此通过对丝-极间距及焊枪倾角的调节能快速地实现该复合焊工艺参数的优化,降低试验工作量,实现更好的咬边缺陷抑制效果。

图 13 效应曲线图(MIG 电流 260 A, L16)

图 14 为最优参数,即 TIG 焊接电流 100 A,焊枪倾角 45°,钨极距工件 3 mm,丝-极间距 6 mm 时不同焊接速度下的焊缝横截面图,从图可见,在最优参数下高速焊焊缝没有产生咬边缺陷。

图 14 最优复合焊参数下焊缝横截面图

为了验证结论的正确性,在 MIG 焊接电流 300 A,电弧电压 33 V 时进一步开展正交工艺试验。基于图 13 的结果,选定钨极距工件距离 3 mm,TIG 焊接电流 100 A 时,采用 L9(3³) 的正交试验表,仅优化丝-极间距和 TIG 焊枪倾角,减小工艺优化试验量。丝-极间距选取 5 mm、6 mm 和 7 mm,TIG 焊枪倾角选取 40°、50°和 60°。试验结果显示,最优参数为 TIG 焊枪倾角 40°,丝-极间距 5 mm。同时,选取如图 11 所示的因素水平,开展 L16(4⁵) 的正交试验,其最优焊接工艺参数为:TIG 焊接电流 100 A,焊枪倾角 45°,钨极距工件 3 mm,丝-极间距 5 mm。表 5 所示为 1.0 m/min 和 1.5 m/min 时 L16 和 L9 正交试验得出的最优焊接参数下的咬边深度。可以看出,在两组最优参数下,咬边缺陷抑制效果接近,咬边缺陷均得到了有效抑制,即在低电流 TIG 电弧辅助 MIG 焊工艺优化时,可以适当忽略钨极距工件距离和 TIG 焊接电流的影响,实现减小工艺优化试验量的目的。

表 5 不同正交试验最优参数下咬边深度与单 MIG 对比

焊接速度/(m/min)	咬边深度/mm		
	MIG	TIG-MIG(L16)	TIG-MIG(L9)
1.0	0.30	0	0.02
1.5	0.22	0.04	0.02

5 结论

(1) 熔池前部近熔池边缘处的温度梯度是产生咬边缺陷的主要因素。咬边缺陷程度随熔池边缘温度梯度的增大而增加。低电流 TIG 辅助电弧可以有效降低高速 MIG 焊熔池前部边缘温度梯度, 有效抑制高速焊咬边缺陷。

(2) 相比单 MIG 电弧, 复合电弧的锥形弧柱上底和下底直径比变小, 减小了电弧静压力; 此外, 其电弧截面积梯度的减小, 电弧动压力也随之减小。电弧动、静压力的降低, 减轻了其对熔融金属的挖掘作用, 降低了液态金属向电弧后方聚集的趋势, 进而有效促进了液态金属向焊趾部位的填充, 抑制咬边缺陷。

(3) 钨极距工件距离和 TIG 焊接电流则对咬边缺陷影响较小。通过对丝-极间距和焊枪倾角的调节能快速实现该复合焊工艺参数的优化, 抑制咬边缺陷。

参 考 文 献

- [1] 林尚扬, 关桥. 我国制造业焊接生产现状与发展战略研究[J]. 金属加工(热加工), 2004(5): 10-15.
LIN Shangyang, GUAN Qiao. Manufacturing welding of research and development strategy[J]. Metal Working, 2004(5): 10-15.
- [2] NGUYEN T C, WECKMAN D C, JOHNSON D A, et al. The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(4): 447-459.
- [3] MENG X, QIN G, ZHANG Y, et al. High speed TIG-MAG hybrid arc welding of mild steel plate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2417-2424.
- [4] 娄小飞, 陈茂爱, 武传松, 等. 高速 TIG-MIG 复合焊焊缝驼峰及咬边消除机理[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 87-90.
LOU Xiaofei, CHEN Maoai, WU Chuansong, et al. Suppression mechanism of humps and undercuts of high-speed TIG-MIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 87-90.
- [5] 杨涛, 张生虎, 高洪明, 等. TIG-MIG 复合焊电弧特性机理分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 25-28.
YANG Tao, ZHANG Shenghu, GAO Hongming, et al. Analysis of arc mechanism of TIG-MIG composite welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 25-28.
- [6] KANEMARU S, SASAKI T, SATO T, et al. Study for the mechanism of TIG-MIG hybrid welding process[J]. Welding in the World, 2015, 59(2): 261-268.
- [7] 陈姬, 宗然, 武传松, 等. TIG-MIG 复合焊电弧间相互作用对焊接过程的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 59-64.
CHEN Ji, ZONG Ran, WU Chuansong, et al. Influence of arcs interaction on TIG-MIG hybrid welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 59-64.
- [8] ZONG R, CHEN J, WU C S, et al. Influence of molten metal flow on undercutting formation in GMAW[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(3): 198-207.
- [9] 徐向方, 苗玉刚, 韩端锋, 等. 旁路分流双面电弧焊耦合电弧形态及电弧压力测量[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 101-104.
XU Xiangfang, MIAO Yugang, HAN Duanfeng, et al. Coupled arc shape and arc pressure measurement of bypass shunt double-sided arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 101-104.
- [10] WANG Y, TSAI H L. Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(11): 2067-2080.
- [11] 黄健康, 韩日宏, 石珂, 等. 双旁路耦合电弧 MIG 焊熔滴过渡受力分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 44-48.
HUANG Jiankang, HAN Rihong, SHI Yu, et al. Force analysis of metal transfer in dual bypass MIG welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 44-48.
- [12] LU S, FUJII H, NOGI K. Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ shielded GTA welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 380(1-2): 290-297.
- [13] 岳建锋, 李亮玉, 刘文吉, 等. 基于外加高频交变磁场下向 MAG 焊熔池成形控制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 65-70.
YUE Jianfeng, LI Liangyu, LIU Wenji, et al. Welding pool shape control based on exterior high frequency alternative magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 65-70.

作者简介: 陈姬(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为焊接过程检测及数值模拟。
E-mail: chenji@sdu.edu.cn