

高效多丝熔化极气体保护焊(GMAW)工艺的研究现状及进展

向婷¹, 方振龙¹, 李桓², 张明瑞¹, 王浩¹, 高莹¹

(1. 天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 随着全球制造业竞争的日益激烈,我国提出了“中国制造2025”制造强国战略,其重点发展的十大领域中,与焊接技术密切相关的就高达八个,不仅极大地推动了焊接技术的革新,而且对焊接效率和质量均提出了更高的要求。由于熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)易于实现自动化焊接,具有生产效率高、焊接质量好及位置适应性好等优点,所以广泛应用于机械制造业中。实现高效GMAW的主要途径有提高焊接速度以及焊接熔敷率。针对以上两种途径,国内外焊接工作者在双丝GMAW的基础上,引入了第三根甚至多根焊丝,研发了各种多丝GMAW工艺。本文针对国内外研发的各类多丝GMAW工艺进行了分析,重点介绍了多丝GMAW工艺的焊接原理、工艺特点及其应用,通过上述分析对各类多丝GMAW工艺进行归纳总结,并进一步展望了多丝焊接的发展方向,即多丝GMAW工艺亟需在电弧物理理论、设备开发和新焊材研发等方面展开深入的研究工作。

关键词: 高效焊接; 多丝气体保护焊工艺; 焊接速度; 焊接熔敷率

中图分类号: TG444.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2024)05-0001-13

Research status and prospect of high efficiency multi-wire GMAW process

XIANG Ting¹, FANG Zhen-long¹, LI Huan², ZHANG Ming-rui¹, WANG Hao¹, GAO Ying¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: With the increasingly fierce competition in the global manufacturing industry, China has proposed the "Made in China 2025" manufacturing power strategy. Among its ten priority development areas, as many as eight are closely related to welding technology. This not only greatly promotes the innovative development of welding technology, but also puts forward higher requirements for welding efficiency and quality. Gas metal arc welding (GMAW) is widely used in the mechanical manufacturing industry due to its easy implementation of automated welding, high production efficiency, good welding quality and good positional adaptability. The two main ways to achieve efficient GMAW are to improve welding speed and welding deposition rate. In response to the above two approaches, domestic and foreign welding workers have introduced a third or even multiple welding wires on the basis of double wire GMAW, and developed various multi-wire GMAW processes. This article analyzes various types of multi-wire GMAW processes developed domestically and internationally, focusing on the welding principles, process characteristics, and applications of multi-wire GMAW processes. Through the above analysis, various types of multi-wire GMAW processes are summarized, and the development direction of multi-wire welding is further prospected. That is, the multi-wire GMAW process urgently needs in-depth research work in arc physics theory, equipment development, and new welding material research and development.

Keywords: high efficient welding; multi-wire gas metal arc welding (GMAW) process; welding speed; welding deposition rate

收稿日期: 2023-09-03 **修订日期:** 2023-10-13

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2021KJ025)

作者简介: 向婷(1990—),女,硕士生导师,博士,主要从事高效多丝焊、多电弧增材等研究,发表SCI/EI论文10余篇,已授权专利5项,主持及参与国家自然科学基金项目3项,省部级项目2项,E-mail: xiangting123@tju.edu.cn。

通信作者: 李桓(1955—),男,教授,博士,主要从事熔焊工艺及设备、电弧等离子体等研究,发表SCI/EI论文120余篇,学术专著3篇,已授权专利20余项,主持及参与国家基金项目7项、省部级项目6项,获得国家教委科技进步奖两项,天津市科技进步奖两项,E-mail: lihuan@tju.edu.cn。

引用格式: 向婷,方振龙,李桓,等.高效多丝熔化极气体保护焊(GMAW)工艺的研究现状及进展[J].材料热处理学报,2024,45(5):1-13.

XIANG Ting, FANG Zhen-long, LI Huan, et al. Research status and prospect of high efficiency multi-wire GMAW process[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(5):1-13.

随着全球制造业竞争日益激烈,德国提出了“工业 4.0”的国家战略,给中国制造业带来了巨大的挑战^[1-2]。为了迎接挑战,我国提出了“中国制造 2025”的制造强国战略,而“中国制造 2025”提出的重点发展领域石油化工、航空航天、海洋工程及能源工程均与焊接技术密切相关,如输油管道、“天宫”飞行器、船舶建造及核电装备的成形均依赖于焊接技术,这极大地推动了我国焊接技术的迅猛发展^[3-6]。因此,随着我国焊接工程量的逐年递增,对焊接质量及效率也提出了更高的要求。

基于 GMAW 具有工艺适应性强、操作简便、易于实现机械化及自动化等优点,已成为焊接加工的首选工艺^[7-9]。因此开发新型优质、高效焊接工艺已成为焊接工作者研究的热门课题^[10-13]。而实现优质、高效 GMAW 工艺的主要方法有 3 种:一是通过改变焊接设备,如增大焊接电流或控制电流波形以实现高效焊接^[14-15],其中表面张力过渡(Surface tension transfer, STT)技术就是通过控制电流、电压波形实现高质量的焊接技术^[16];二是改变焊接材料,如 T. I. M. E. (Transferred ionized molten energy) 焊工艺,即高效熔化极活性气体保护(Metal active gas, MAG)焊,该工艺是通过大干伸长和四元保护气体来实现高熔敷率焊接,四元保护气体既提高了电弧功率还优化了焊缝成形^[17-18],但改进焊接材料会使得焊接成本增加,且焊接效率提升有限^[19];三是增加焊丝数量,即多丝焊工艺。该工艺是在双丝 GMAW 基础上,通过继续引入焊丝来实现高效焊接^[20],如高速三丝 GMAW 工艺的焊接速度达到 1.8 m/min^[21]。此外,采用多根焊丝既可以显著提高焊接效率,又可以分散作用在熔池上的电弧力,有效避免了焊接缺陷的产生,如咬边、驼峰焊道,是目前实现高效 GMAW 焊接最有效的手段之一。

本文综述了国内外多丝 GMAW 工艺的研究现状,针对高效多丝 GMAW 工艺的基本原理、工艺特点展开对比分析,基于对现有多丝焊工艺研究成果的归纳总结,展望了高效多丝 GMAW 工艺的未来重点研究方向。

1 多丝焊接中焊丝的排布情况

双丝焊接在进一步提高焊速时易出现驼峰焊道、咬边、断弧等问题,因此焊接工作者在此基础上继续增加焊丝数量进而提出了多丝焊接,其中多根焊丝既可以均是燃弧焊丝,也可以是燃弧焊丝加冷丝。焊接

时,多个电弧共同作用于熔池,熔池尺寸大且存在时间长,液体金属流动充分,因此,多丝焊接可以在一定程度上降低高速焊时出现驼峰焊道、咬边的概率,同时使焊接效率得到了极大地提高。多丝焊接中几种常见的焊丝排布方式如图 1 所示,图中箭头所指方向为焊接方向^[22]。焊丝的排布方式主要根据实际焊接需求而灵活设计。

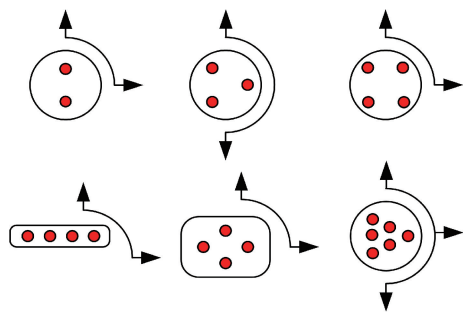


图 1 常见多根焊丝的排布方式^[22]

Fig. 1 Common arrangements of multiple welding wires^[22]

2 分体式多丝 GMAW 工艺

2.1 双明弧加热填丝的三丝焊工艺

日本神户制钢造船厂开发了双明弧加热填丝的三丝焊接工艺^[23],在引导丝和跟随丝中间加入填充丝,三根焊丝分布在同一直线上,三根焊丝可以绕各自的转动轴作偏移微调,如图 2 所示。填充焊丝由直流电加热至接近熔化状态,由送丝机送入电弧区后,利用熔池的热量熔化,为了减小引导焊丝和跟随焊丝电弧间的干扰,因此,引导焊丝和跟随焊丝上的电流极性相同,且与填充焊丝上的电流极性相反,这样有助于焊接熔池的稳定。此外,填充焊丝可以冷却熔池,从而增加熔池的粘度,也有利于焊接过程的稳定性。该工艺主要用于水平角焊缝焊接,对焊接位置的选择有一定的限制,当焊接速度达到 2.0 m/min 时,可实现良好的焊缝成形^[24],如图 3 所示。

与双丝焊接相比,该焊接工艺有效地提升了焊接效率,且出现的电弧干扰和断弧几率大大减少,并具有良好的抗气孔性,该工艺已应用于实际造船中。

2.2 MAG 三丝焊工艺

李坤等^[25]提出了一种 MAG 三丝焊工艺,焊枪布置如图 4 所示。MAG 三丝焊是基于分体式双丝焊枪,并在其正中间加入第三根焊丝,利用双丝焊的热量来熔化第三根焊丝。

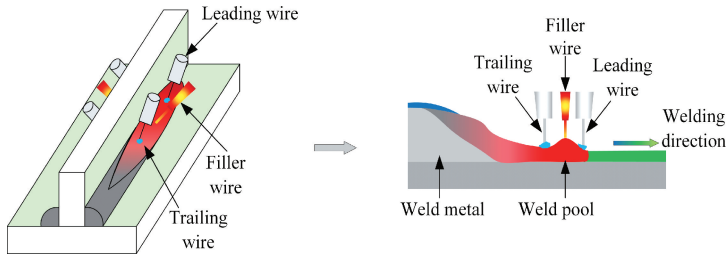


图 2 三电极 GMAW 工艺的原理图^[23]

Fig. 2 Schematic diagram of three electrodes GMAW process^[23]

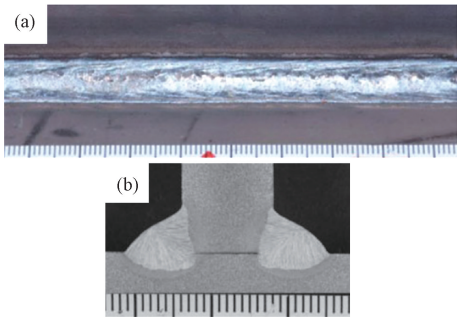


图 3 焊缝成形^[24] (a) 焊缝宏观形貌; (b) 焊缝横截面形貌

Fig. 3 Weld formation^[24] (a) macro morphology of weld;

(b) cross section morphology of weld

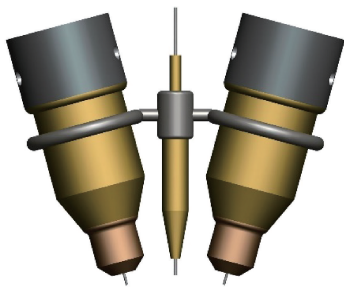


图 4 MAG 三丝焊枪示意图

Fig. 4 Schematic diagram of MAG triple-wire welding torch

李坤等^[25]针对 7 mm 焊脚的水平角焊展开了工艺试验研究,结果表明:MAG 三丝焊工艺比双丝焊的熔敷效率提高了 20%,焊缝晶粒更细小。该方法突破了双丝焊 7 mm 焊脚的最快焊接速度,其焊速可达到 1.6 m/min,且焊缝质量良好。同时,焊接工艺参数匹配较灵活,可通过热丝电流和送丝速度的匹配以实现更高的熔敷效率。

2.3 高速三丝 GMAW 工艺

针对造船企业平面分段生产流水线上,纵骨双丝角焊接最大焊接速度小于 1.0 m/min 的问题,华学明等^[26]开发了高速三丝 GMAW 新工艺,如图 5 所示。三根焊丝分别为引导焊丝 L、中间焊丝 M 和跟随焊丝

T,呈纵向排列,每根焊丝各接一套送丝系统、焊接电源和保护气,构成独立的电弧—电源系统,其焊接工艺参数、焊丝间距以及焊枪夹角都分别可调,以满足焊接要求^[27],实际焊接时三把焊枪装配在同一套焊接夹具上。

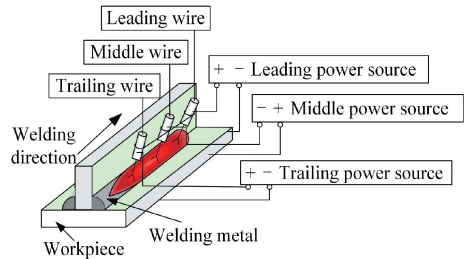


图 5 高速三丝 GMAW 示意图^[26]

Fig. 5 Schematic diagram of high-speed triple wires GMAW^[26]

该团队研究了极性组合、焊接速度及焊接电流对角焊缝成形的影响,结果表明:极性组合为直流反接/直流正接/直流反接时,角焊缝焊接过程稳定,焊缝成形良好,角焊缝上脚长 V 、下脚长 H 及熔深 P 均随着焊接速度的增大而减小,随着焊接电流规范组合的增大而增大^[28-29],如图 6 所示;其中当焊接速度大于 1.5 m/min,电流采用 I_2 组合以上线能量时,基本可实现 6 mm 以上的焊缝脚长。通过对比 E36 高强钢单丝、双丝及三丝焊时的焊接效率发现:当获得相同的焊缝宽度时,三丝焊的焊接效率比单丝焊、双丝焊分别提高了近 3~4 倍和 1.6 倍^[30]。

此外,该工艺高速焊时对驼峰焊道形成有抑制作用,试验结果表明:后向流动的液态金属动量大、毛细压力失稳(即表面张力失稳)以及表面张力法向分量致使熔池在焊接方向上的收缩是导致驼峰焊道形成的三个重要原因。而该工艺焊接时,中间焊丝和跟随焊丝产生的阻拦力会抑制大量液态金属向后流动,焊接方向上表面张力法向分量得到平衡,克服了液体通道收缩及熔池提前凝固,因而获得良好的焊缝

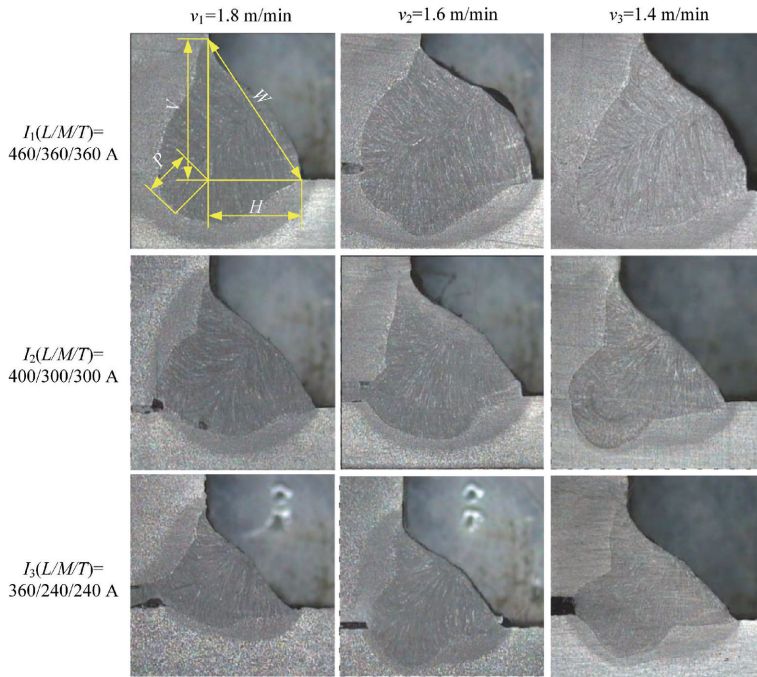


图6 三丝 GMAW 角焊缝脚长及熔深随焊接参数的变化^[29]

Fig. 6 Changes of the leg length and penetration depth of the three-wire GMAW fillet weld with the welding parameters^[29]

成形^[31-32]。

2.4 分体式多丝 GMAW 工艺特点分析

分体式多丝 GMAW 工艺均是针对角焊缝的高速焊接场合开发的,其中双明弧加热填丝三丝焊工艺和高速三丝 GMAW 工艺是针对船舶建造,其焊接速度可达 1.8 m/min,而 MAG 三丝焊的水平角焊缝(7 mm)焊速可达 1.6 m/min。三种工艺均通过工装夹具集成三把独立焊枪沿焊接方向纵向排列,实现了焊接时电弧的独立纵向分布。上述三种工艺中,三根焊丝间的夹角、焊丝与工件夹角均可灵活调节,这是在高焊速时获得良好焊缝成形的关键,更重要的是三根焊丝既可以采用药芯焊丝,也可以采用实心焊丝,以便灵活调节焊缝成分。其中双明弧加热填丝三丝焊工艺和 MAG 三丝焊工艺中的中间填充丝为冷丝,直接插入熔池中,利用电弧及熔池热加热熔化,冷丝的加入可以冷却熔池,增加其粘度,有利于保持焊接过程的稳定性。综上所述,三把焊枪均具有独立的电弧—电源系统,参数可独立调节,满足各种焊接要求。

3 集成式多丝 GMAW 工艺

3.1 多熔化极 GMAW 工艺

日本藤村浩史^[33]开发了一种多熔化极 GMAW 方法,如图 7 所示。该方法采用同一把焊枪同时输送

多根焊丝,各焊丝之间相互绝缘,既可以采用药芯焊丝和 100% CO₂ 气体保护,也可以采用实心焊丝和 80%Ar+20%CO₂ 气体保护。该焊接方法通过控制脉冲电流相位进行焊接,使电弧在三根焊丝上轮流燃烧,通过调节各焊丝之间的位置关系以及与焊接方向的夹角来改变能量分布。

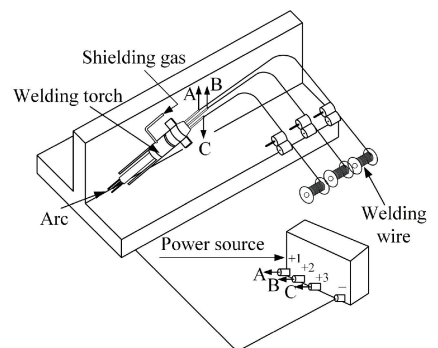


图7 多熔化极 GMAW 示意图^[33]

Fig. 7 Schematic diagram of multi-electrode GMAW^[33]

当多根焊丝同时焊接时,作用于熔池的电弧力比较分散,这有利于高速焊接时保持熔池稳定,减少咬边及驼峰焊道等成形缺陷。但是由于该焊接技术发展于上世纪 90 年代初期,弧焊电源数字化、信息化技术水平受到制约,因此,三个电弧间采用的脉冲相位控制方法是一种开环控制,控制精度差。

3.2 集成环列三熔化极 GMAW 工艺

Xiang 等^[34]开发了集成环列三熔化极 GMAW 工艺,如图 8 所示。三根焊丝呈等边三角形排布且集成于同一把焊枪中,为获得更加集中的焊接电弧,得到单一熔池,每根焊丝的轴线分别与焊枪主

体轴线呈 7°的夹角,且每根焊丝各连接独立的送丝机构和焊接电源,其焊接工艺参数可分别调节以满足焊接要求。此外,针对三根焊丝燃弧时的干扰问题,可以通过对三个电弧的脉冲协同控制来实现稳定的焊接过程。

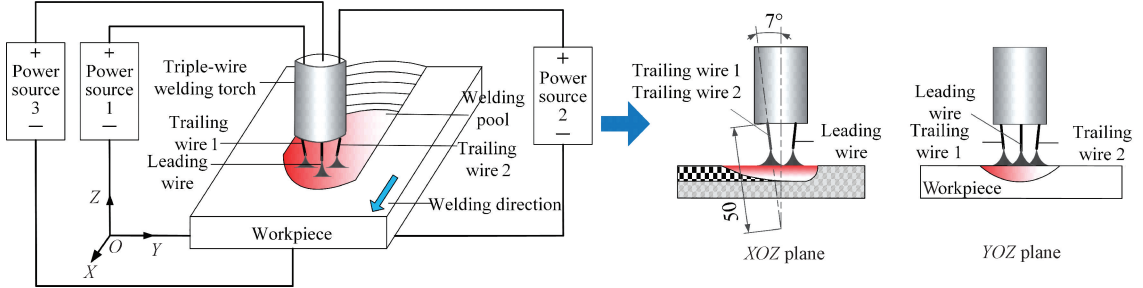


图 8 集成环列三熔化极 GMAW 焊接系统示意图^[34]

Fig. 8 Schematic diagram of integrated circular triple electrodes GMAW system^[34]

该团队研究分析了三电极间脉冲相位差对熔滴过渡及焊缝成形的影响,研究发现^[35]:0°相位差时熔滴过渡主要呈多脉一滴,有时出现大颗粒飞溅;180°相位差时易实现一脉一滴过渡,120°相位差时三个电

弧间干扰最小,一脉一滴过渡所占比例最高,且上述两种相位差的焊缝成形均较好;180°时的熔深最大,120°时的熔深次之,0°时的熔深最小,且 120°时焊缝横截面呈“双峰状”,如图 9 所示。

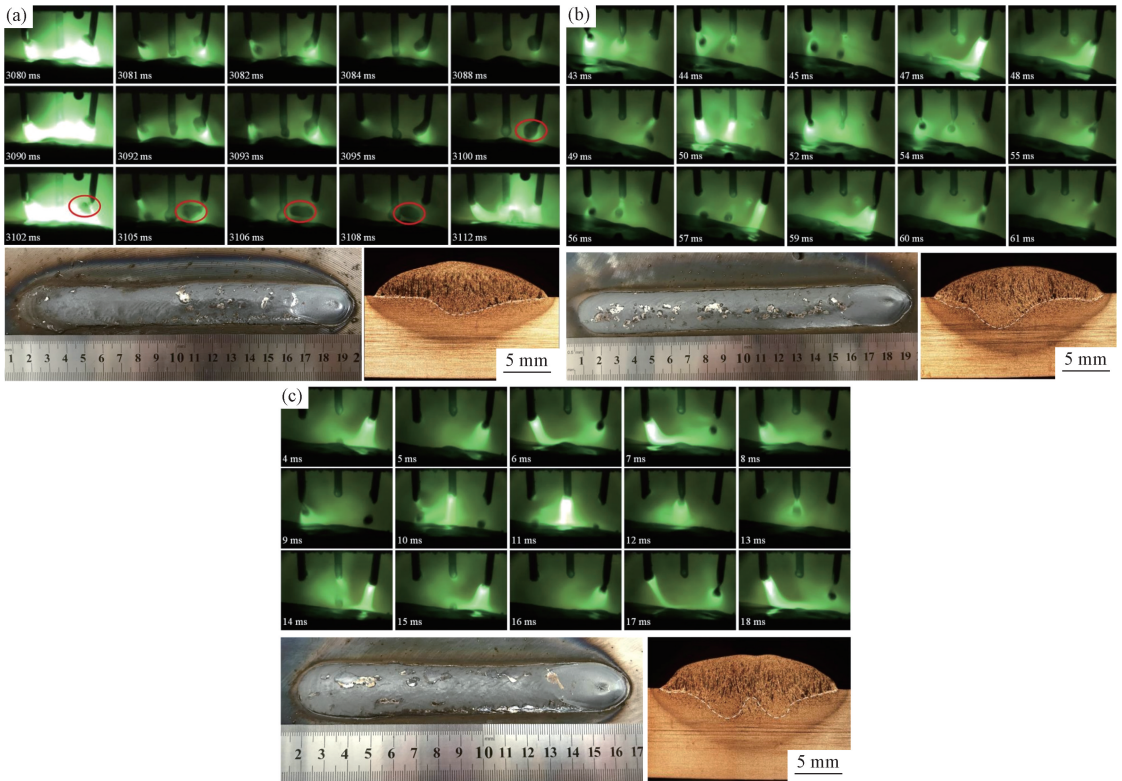


图 9 三种脉冲相位差时的熔滴过渡、焊缝宏观成形及横截面面貌^[35] (a) 0°相位差; (b) 180°相位差; (c) 120°相位差

Fig. 9 The metal transfer, weld appearances and cross section appearances under three pulse phase differences^[35]

(a) phase difference of 0°; (b) phase difference of 180°; (c) phase difference of 120°

针对 Q960E 高强钢三丝对接焊工艺展开研

究,发现^[36-37]:当预热温度为 100~120 °C,焊接热

输入在 1.26~1.56 kJ/mm 时,焊接接头抗拉强度达到母材的 85%,冲击韧性达到 62 J 以上,具备良好的力学性能。此外,对比分析了三丝单、双脉冲铝合金焊接时的稳定性,研究发现^[38-39]:单脉冲焊

时焊缝存在气孔,而 3 Hz 脉冲频率的双脉冲焊时,焊缝呈疏密均匀的鱼鳞纹,气孔得到有效改善,且焊缝熔深及熔宽均大于单脉冲,如图 10 所示。

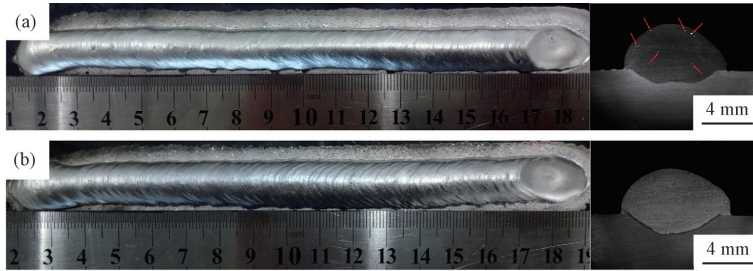


图 10 铝合金三丝单、双脉冲焊缝宏观成形及横截面形貌^[39] (a) 单脉冲; (b) 双脉冲

Fig. 10 The weld appearances and cross section appearances of aluminum alloy three-wire normal and double pulse welding^[39]

(a) normal pulse; (b) double pulse

该工艺使用特制焊枪,焊接操作灵活,不易受焊接位置的限制,且焊接母材适应性好,可焊接低碳钢、低合金高强钢甚至铝合金。

3.3 缆式焊丝 CO₂ 气体保护焊工艺

Yang 等^[40-41]研发了一种缆式焊丝 CO₂ 气体保护焊工艺,缆式焊丝采用 7 根药芯或实心焊丝旋转绞合而成,其中一根焊丝位于中间,即中心丝,其余 6 根焊丝围绕中心丝绞合,即外围丝,缆式焊丝实物图和结构图如图 11 所示,缆式焊丝气体保护焊工艺是用一台弧焊电源、一台送丝机、一把焊枪形成一个自主旋转的电弧,利用电弧熔化 7 根焊丝的优质高效弧焊技术^[42],如图 12 所示。

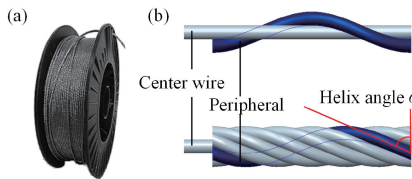


图 11 缆式焊丝^[40] (a) 实物图; (b) 结构图

Fig. 11 Cable-type welding wire^[40] (a) physical picture;

(b) schematic of construction

通过研究发现缆式焊丝气保焊中电弧旋转力对熔滴过渡及熔池稳定性有积极的作用,缆式焊丝在熔化过程中会形成电弧旋转力,该力会促使熔滴较小时便脱落而进入熔池中,增加熔滴的过渡频率,因此,电弧旋转力不仅能够促使熔滴稳定过渡,而且使熔池产生稳定流动^[43-44],如图 13 所示。此外,电弧旋转力对熔池产生的搅动作用,可以细化晶粒,提高焊接接头

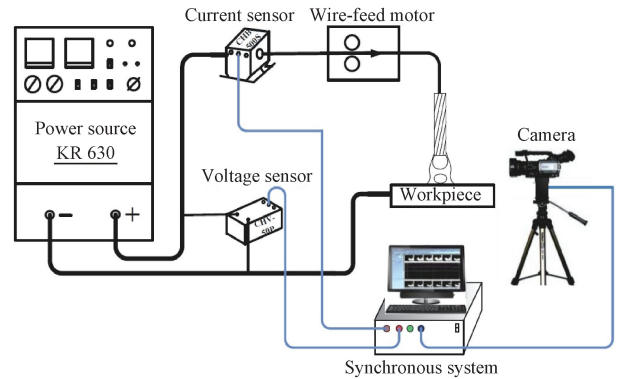


图 12 缆式焊丝 CO₂ 气体保护焊焊接系统示意图^[42]

Fig. 12 Schematic diagram of cable-type welding wire CO₂ gas metal arc welding system^[42]

质量,促使熔池中气体溢出^[45-46]。当焊接电流为 400~500 A 时,随着电流的不断增大,熔滴的过渡方式逐渐由排斥过渡转变为颗粒过渡,进而向射滴过渡转变,且焊接电流每增加 50 A,熔滴直径分别下降 9% 和 41%,过渡频率也显著增加,分别达到 47 和 70 Hz^[47]。

3.4 集成式多丝 GMAW 工艺特点分析

集成式多丝 GMAW 工艺主要是针对中厚板焊接,三种工艺均是将多根焊丝(实心或药芯焊丝)通过不同方式集成于同一把焊枪中,通过同时熔化多根焊丝实现大熔敷率焊接;多根焊丝可以采用不同的组合方式,如三角形排布或多股旋转绞合。其中多熔化极 GMAW 工艺和集成环列三熔化极 GMAW 工艺是将三根焊丝以三角形形式排布,通过对脉冲电流协同控制实现三根焊丝交替轮流燃弧,解决了多电弧燃

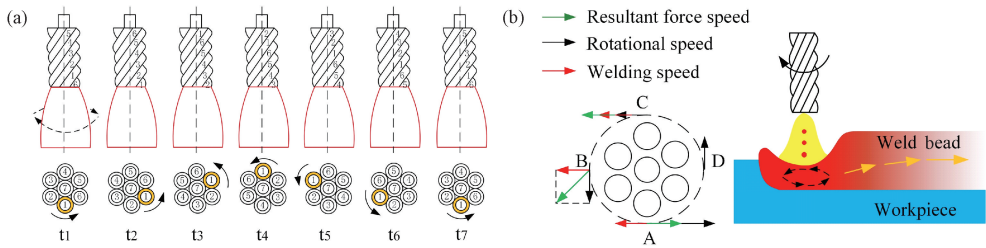


图 13 缆式焊丝中旋转电弧对焊接过程的影响^[44] (a) 电弧旋转示意图; (b) 液态金属流动示意图
 Fig. 13 Effects of rotating arc on welding process in cable-type welding wire^[44]
 (a) arc rotation diagram; (b) diagram of liquid metal flow

烧时的干扰问题。此外,脉冲电流对熔池产生的搅拌作用有助于细化晶粒,改善焊缝成形。而缆式焊丝气保焊是通过电弧旋转力搅拌熔池,进而细化晶粒,提高焊接接头质量。

4 分流式多丝 GMAW 工艺

4.1 新型三丝间接电弧焊工艺

针对双丝间接电弧焊热输入不足的问题, Fang 等^[48]提出了一种新型三丝间接电弧焊工艺,如图 14 所示。该焊接系统主要包括两台焊接电源及三根焊丝,其中三根焊丝分别为中间的主焊丝以及两侧的旁焊丝,主焊丝连接电源的负极,旁焊丝连接电源的正极,间接电弧在主焊丝与两个旁焊丝之间产生,用来加热熔化母材,而母材不连接电源^[49-50]。该工艺实际上是主焊丝与两个旁焊丝间产生的双电弧的融合。

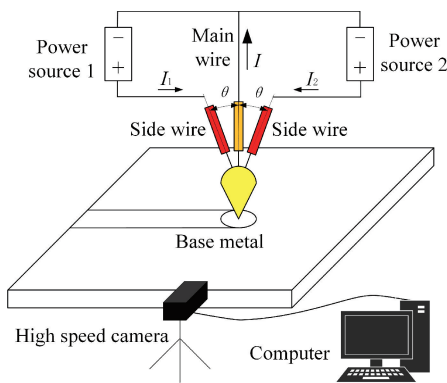


图 14 三丝间接电弧焊示意图^[48]

Fig. 14 Schematic diagram of triple-wire gas indirect arc welding^[48]

该团队研究了窄间隙多层多道焊工艺参数和焊丝排布对侧壁熔合的影响规律,研究发现^[51-52]:焊丝的排布方式是影响侧壁熔合情况的关键,试验采用了四种焊丝排布方式,如图 15 所示,当采用 I 型分布时

(两边丝对称分布在主丝左右两侧),边丝对称分布在主丝左右两侧,电弧方向与工件侧壁平行导致电弧热量主要集中在焊缝中心,弧柱区热量不能充分传递到工件两侧,造成焊缝两侧壁未能熔合;采用 II 型分布时(主丝在一侧而两边丝在另一侧),主丝在一侧,两边丝偏向另一侧,因此电弧热主要集中于单侧导致一侧熔合较大而另一侧未熔合量主要集中作用于该侧,侧壁熔合较大,而另一侧壁电弧热量作用较少而未熔合;采用 III 型分布时(主丝倾角为 45°,两边丝以不同倾角分布在主丝前后两侧),电弧热分散到焊缝两侧壁,虽能够实现两侧壁熔合,但两间接电弧未重合且形态发散、加热不均,导致焊缝侧壁熔合不均;采用 IV 型分布时(主丝倾角不变,两边丝倾角相同重合分布在主丝前后两侧),两间接电弧重合且形态集中、加热均匀,焊缝两侧壁熔透均匀。此外,侧壁熔合随着焊接电流的增大、焊接速度的降低和对接间隙宽度的减小而增强,而熔化侧壁的热量主要来自间接电弧弧柱区以及熔滴过渡^[53]。

由于通过调整焊接参数无法改善焊缝表面凸起,不利于焊道层间熔合,故在三丝间接电弧之后放置一个钨极电弧,该工艺不仅可以利用脉冲电流提高大电流焊接时熔滴过渡的稳定性,更重要的是在钨极电弧作用下其焊缝表面呈凹陷状,这就促进了窄间隙多道焊时的焊缝根部和焊道层间充分熔合^[54-55],如图 16、图 17 所示。

4.2 双旁路耦合电弧 GMAW 工艺

为实现薄板高速焊接,则需要增大通过焊丝的焊接电流,但又要控制对母材的热输入及电弧压力,针对这一矛盾, Xue 等^[56]开发了双旁路耦合电弧 GMAW 工艺,如图 18 所示。双旁路耦合电弧焊是由一把熔化极惰性气体保护焊(Metal inert-gas, MIG)焊枪和两把钨极惰性气体保护焊(Tungsten inert gas,

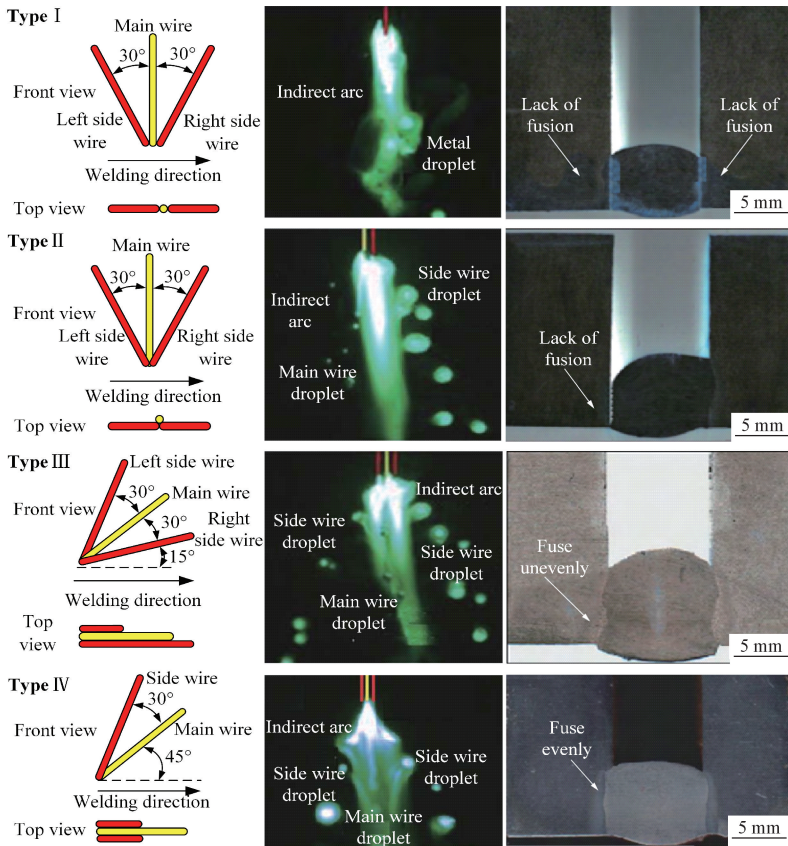


图 15 四种焊丝排布方式对应的电弧形态及焊缝成形^[52]

Fig. 15 Arc morphology and formation of weld corresponding to four welding wire arrangements^[52]

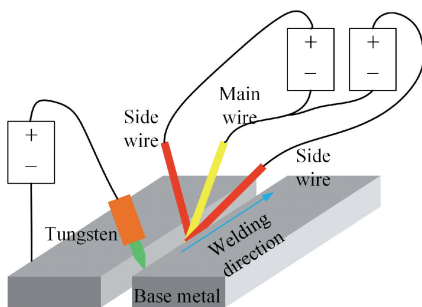


图 16 后置钨极电弧示意图^[54]

Fig. 16 Schematic diagram of placing gas tungsten arc after triple-wire gas indirect arc welding^[54]

TIG) 焊枪组成, 两把 TIG 焊枪对称分布于 MIG 焊枪两侧, 焊接电源供给的电流通过两旁路电极产生的旁路电弧和旁路电流, 分流一部分通过母材的电流, 这样降低了大电流焊接时的电弧压力, 并且通过调节旁路电弧参数可以实现焊丝和母材之间热量的合理分配, 避免高速焊接时咬边、驼峰焊道等缺陷的产生^[57]。该焊接方法较好地解决了上述高速焊的这一矛盾。

双旁路耦合电弧焊工艺中旁路电流对熔滴过渡有一定的影响, 试验结果表明: 由于旁路电流和电弧的引入, 使得熔滴受到左、右旁路电流产生的电磁力作用, 左、右旁路的电磁力沿电极轴向的分力平衡了一部分表面张力, 垂直电极轴向的电磁分力加速熔滴颈缩, 使熔滴更快地与焊丝分离^[58-59], 如图 19 所示。此外, 旁路电弧可以增加主路电弧阳极区范围, 使弧根扩展并覆盖熔滴的大部分甚至全部, 电磁力均会促使熔滴过渡, 因此, 与传统 GMAW 工艺相比, 该方法的熔滴过渡更加容易, 可以在低于传统 GMAW 临界电流的条件下实现稳定的熔滴喷射过渡^[60]。

此外, 针对旁路电流对旁路耦合 MIG 焊的热输入影响展开研究, 试验发现^[61]: 在相同总电流条件下, 随着旁路电流的增加, 其母材热输入随之降低; 通过旁路的分流作用, 可以实现大熔敷电流下小的母材热输入, 有利于薄板的焊缝成形。

4.3 分流式多丝 GMAW 工艺特点分析

分流式多丝 GMAW 工艺中的三丝间接电弧焊工

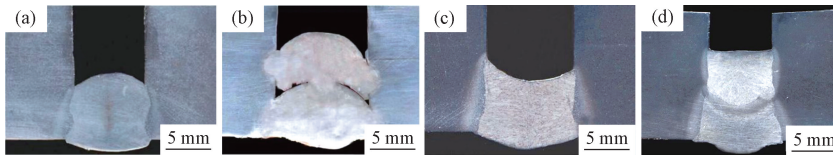


图 17 钨极电弧置放前后窄间隙熔合情况对比^[55] (a,b) 未后置钨极单道焊和多层焊; (c,d) 后置钨极单道焊和多层焊

Fig. 17 Comparison of narrow gap fusion before and after tungsten arc placement^[55] (a,b) single layer and multiple-layer welding without tungsten electrode; (c,d) single layer and multiple-layer welding of post tungsten electrode

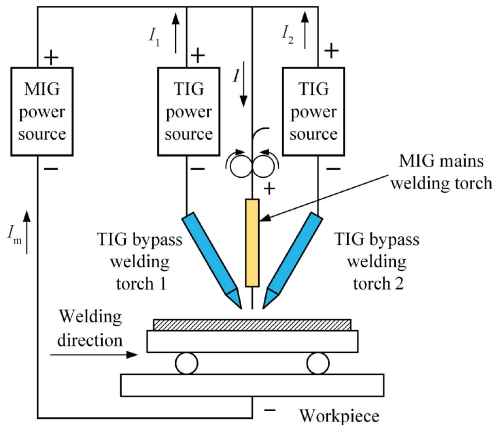


图 18 双旁路耦合电弧 MIG 焊原理图^[56]

Fig. 18 Schematic diagram of double-bypass coupled arc MIG welding^[56]

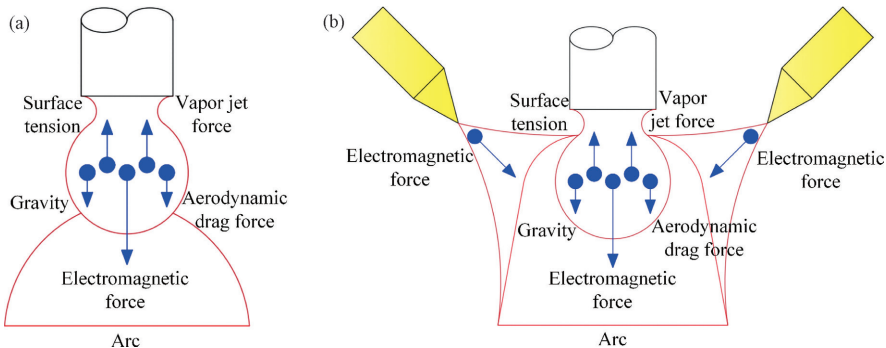


图 19 熔滴上作用力对比^[59] (a) 传统 GMAW 熔滴上作用力; (b) 双旁路耦合电弧 GMAW 熔滴上作用力

Fig. 19 Comparison of forces on droplets^[59] (a) forces on traditional GMAW droplets; (b) double-bypass coupling arc GMAW forces on droplets

性能,影响多电弧耦合的稳定机制。如何兼顾焊接效率、稳定性及质量是多丝焊技术领域的关键研究点,为了突破这一关键研究点,多丝焊工艺亟需以下几方面的深入探究:

1) 多丝电弧物理研究方面。多丝 GMAW 工艺中多电弧耦合机制与焊缝成形的调控机制息息相关,多丝耦合机制的揭示是亟需解决的核心问题,这将为多丝焊工艺研发提供强有力的理论支撑,此外,现有电弧耦合机制研究方法主要是数值模拟技术,电

艺是将两把旁焊枪对称分布于主焊枪两侧,旁焊枪和主焊枪之间形成两个电弧用于加热熔化母材,母材不通过电流。而双旁路耦合电弧焊工艺是将两把 TIG 焊枪置于主焊枪两侧,通过两旁路电极的分流作用,降低了电弧力和对母材的热输入,适合于薄板焊接。上述两种工艺均是通过减小母材热输入,降低电弧力,避免焊接缺陷的产生,其中前者针对窄间隙焊接,其中三根焊丝采用特定角度组合,可实现窄间隙侧壁均匀熔透,而后者通过双旁路对母材的分流实现了高速焊接。

5 总结与展望

多丝 GMAW 工艺中焊接热输入是决定焊接效率的关键,而过高的焊接热输入会恶化焊后接头的组织

弧物理的研究手段仍有待创新;

2) 多电弧协同控制研究方面。大电流焊接时,多丝焊接过程更易产生异常电弧干扰行为,如电弧中断、异常起弧问题,这会造成焊后焊道成形不佳,难以保证焊接质量,因此,需要深入研究对多电弧的协同控制机制,实现多电弧的有序燃弧,从而提高焊接过程的稳定性;

3) 焊丝成分-工艺-性能的调控机制研究方面。多丝焊焊材的选用是实现焊缝成分合理化调控的

关键,通过多丝焊材的合理匹配,可有效抑制焊接缺陷的产生,从而获得优质焊接接头,而焊接工艺参数匹配策略是调控焊接过程及焊缝成形的关键,因此,揭示焊丝成分-工艺-性能的调控机制是多丝

焊工艺研发的技术关键点;此外,目前多丝焊工艺研究主要用于焊接低碳钢及合金钢,后续可持续推进多丝焊在有色金属及异种材料焊接中的应用研究。

参 考 文 献

- [1] 蒋桂平,赖显渺,凌维生. 中国制造 2025 与工业 4.0 的必然性分析[J]. 装备制造技术,2021(10):185-187.
JIANG Gui-ping, LAI Xian-miao, LING Wei-sheng. The necessity analysis of made in China 2025 and 4.0 in industry [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(10):185-187.
- [2] 王莉. 德国工业 4.0 对《中国制造 2025》的创新驱动研究[J]. 科学管理研究,2017,35(5):100-103.
WANG Li. German industry 4.0 “China made 2025” innovation driven research [J]. Scientific Management Research, 2017, 35(5):100-103.
- [3] 陈健,苏金花,张毅梅.《中国制造 2025》与先进焊接工艺及装备发展[J]. 焊接,2016(3):1-5.
CHEN Jian, SU Jin-hua, ZHANG Yi-mei. Development of advanced welding procedure and equipment with “Made in China 2025” [J]. Welding & Joining, 2016(3):1-5.
- [4] 陈力,郭锐. 低温环境下输油管线钢焊接性能试验研究[J]. 石油天然气学报,2008,30(6):158-160.
CHEN Li, GUO Rui. Performance test on pipeline steel welding under low temperature [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(6):158-160.
- [5] 陈家本,郑惠锦,朱若凡,等. 中国船舶焊接技术进展[J]. 焊接,2007(5):1-6.
CHEN Jia-ben, ZHENG Hui-jin, ZHU Ruo-fan, et al. Development of China shipbuilding welding technology [J]. Welding & Joining, 2007(5):1-6.
- [6] 张仁堂. 核电发展给焊接装备制造带来的机遇[J]. 电焊机,2010,40(8):19-20.
ZHANG Ren-tang. Nuclear power development for manufacture opportunity of welding equipment [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(8):19-20.
- [7] 向婷,张明瑞,李桓,等. 双电弧集成冷丝复合焊中冷丝位置对焊接过程的影响[J]. 工程科学学报,2021,43(11):1474-1481.
XIANG Ting, ZHANG Ming-rui, LI Huan, et al. Effect of cold wire position on the welding process in twin-arc integrated cold wire hybrid welding [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(11):1474-1481.
- [8] Kah P, Suoranta R, Martikainen J. Advanced gas metal arc welding processes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1/4):655-674.
- [9] Ogbemhe J, Mpofu K. Towards achieving a fully intelligent robotic arc welding: A review [J]. Industrial Robot, 2015, 42(5):475-484.
- [10] 薛松柏,王博,张亮,等. 中国近十年绿色焊接技术研究进展[J]. 材料导报,2019,33(17):2813-2830.
XUE Song-bai, WANG Bo, ZHANG Liang, et al. Development of green welding technology in China during the past decade [J]. Materials Reports, 2019, 33(17):2813-2830.
- [11] Tusek J. Raising arc welding productivity [J]. Welding Review International, 1996, 15(3):102-105.
- [12] Bengtsson P, Ballingall I, Ollson R. High productivity MIG/MAG welding process [J]. Welding and Metal Fabrication, 1992, 60(6):226-228.
- [13] 马晓丽,华学明,吴毅雄. 高效焊接技术研究现状及进展[J]. 焊接,2007(7):27-31.
MA Xiao-li, HUA Xue-ming, WU Yi-xiong. Research status and development of high efficient welding [J]. Welding & Joining, 2007(7):27-31.
- [14] 陈涛,薛松柏,孙子建,等. CO₂ 气体保护焊短路过渡控制技术的研究现状与展望[J]. 材料导报,2019,33(9):1431-1442.
CHEN Tao, XUE Song-bai, SUN Zi-jian, et al. Short-circuit transition control technology for CO₂ gas shielded welding: Research

- status and prospect[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(9): 1431-1442.
- [15] 邹文凤,李逸文,梅强,等.外加同步磁场对短路过渡 CO₂ 焊接过程的影响[J]. *焊接学报*, 2020, 41(9): 16-21.
ZOU Wen-feng, LI Yi-wen, MEI Qiang, et al. Influence of synchronous magnetic pulse on short circuit transfer CO₂ arc welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(9): 16-21.
- [16] Stava E K. The surface-tension-transfer power source: A new low-spatter arc welding mechine[J]. *Welding Journal*, 1993, 72(1): 25-29.
- [17] Carpenter K R, Monaghan B J, Cuiuri D, et al. Optimising the welding conditions to determine the influence of shielding gas on fume formation rate and particle size distribution for gas metal arc welding[J]. *Welding in the Word*, 2017, 61(3): 473-481.
- [18] Lahnsteiner R. The T. I. M. E. process—an innovative MAG welding process [J]. *Welding Review International*, 1992, 11(1): 17-20.
- [19] Zappa S, Zalazar M, Surian E. Effect of the chemical composition of the filler metal and the heat input on the microstructure and the mechanical properties of duplex stainless steel welded joints[J]. *Soldagem & Inspecao*, 2017, 22(2): 116-128.
- [20] Xu C, Hua X M, Ye D J, et al. An improved simulation model for three-wire gas metal arc welding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5/8): 1447-1456.
- [21] 张瑞英,蒋凡,陈树君.多电极电弧焊接技术的研究现状及展望[J]. *电焊机*, 2017, 47(9): 6-11.
ZHANG Rui-ying, JIANG Fan, CHEN Shu-jun. Current research status and prospect of multi-electrode arc welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(9): 6-11.
- [22] Tušek J, Suban M. High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 133(1/2): 207-213.
- [23] Arita H, Morimoto T, Nagaoka S, et al. Development of advanced 3-electrode MAG high-speed horizontal fillet welding process[J]. *Welding in the World*, 2009, 53(5/6): 35-43.
- [24] Yokota Y, Shimizu H, Nagaoka S, et al. Development and application of the 3-electrode MAG high-speed horizontal fillet welding process[J]. *Welding in the World*, 2012, 56(1/2): 43-47.
- [25] 李坤,夏学仓,孙潇,等. MAG 三丝焊工艺试验[J]. *焊接技术*, 2016, 45(7): 37-40.
LI Kun, XIA Xue-cang, SUN Xiao, et al. Study of MAG triple wire welding process[J]. *Welding Technology*, 2016, 45(7): 37-40.
- [26] 华学明,马晓丽,林航,等.高速三丝熔化极气保护焊接工艺[J]. *焊接学报*, 2008, 29(12): 109-112.
HUA Xue-ming, MA Xiao-li, LIN Hang, et al. Three-wire MAG high speed welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(12): 109-112.
- [27] 华学明,王飞,马晓丽,等.三丝 GMAW 焊接过程电弧中断现象分析[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(4): 442-446.
HUA Xue-ming, WANG Fei, MA Xiao-li, et al. Research on arc interruption of triple-wire GMAW[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2010, 44(4): 442-446.
- [28] 林航,华学明,马晓丽,等.三电极高速 CO₂ 焊焊接速度和焊接电流对焊缝成形影响[J]. *热加工工艺*, 2008, 37(23): 86-88.
LIN Hang, HUA Xue-ming, MA Xiao-li, et al. Effect of welding speed and current on weld geometry in triple electrode high-speed CO₂-shielded welding process[J]. *Hot Working Technology*, 2008, 37(23): 86-88.
- [29] 林航.船用钢三丝高速 GMAW 焊焊接工艺研究[D].上海:上海交通大学,2009.
LIN Hang. Research of triple-wire high speed GMAW welding technology on ship plates[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [30] 吕艳丽.船用 E 级钢三丝 GMAW 对接焊工艺研究[D].上海:上海交通大学,2012.
LÜ Yan-li. Triple-wire high speed GMAW butt joint welding process of marine E grade steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [31] Ye D J, Wu D S, Hua X M, et al. Using the multi-wire GMAW processes for controlling the formation of humping[J]. *Welding in the World*, 2017, 61(4): 649-658.
- [32] Gu Y, Hua X M, Ye D J, et al. Numerical simulation of hump suppression in high-speed triple-wire GMAW[J]. *The International*

Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1/4): 727-734.

- [33] 藤村浩史. 高速アーク溶接法の開発[J]. 溶接技術, 1990, 38(3): 108-114.
- [34] Xiang T, Li H, Gao Y, et al. Effects of pulse phase difference on metal transfer process and weld formation in the integrated circular triple-electrode GMAW[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102: 857-866.
- [35] 向婷. 集成环列三熔化极气体保护焊中电弧协同控制及熔滴过渡特征研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
XIANG Ting. Study on arc cooperative control and metal transfer characteristics in integrated circular triple-electrode gas metal arc welding[J]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [36] Yang K, Wang F, Duan D S, et al. Experimental investigation of integrated circular triple-wire pulse GMAW of Q960E high-strength steel for construction machinery[J]. Materials, 2021, 14(2): 375-393.
- [37] 段丁珊. 工程机械用高强钢 Q960E 三丝 GMAW 熔滴过渡与焊接工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
DUAN Ding-shan. The droplet transfer and welding process research in triple-wire GMAW of high strength steel Q960E for construction machinery[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [38] Yang K, Wang F, Liu H B, et al. Double-pulse triple-wire MIG welding of 6082-T6 aluminum alloy: Process characteristics and joint performances[J]. Metals, 2021, 11(9): 1388-1400.
- [39] 王鹏. 6082-T6 铝合金三丝双脉冲 MIG 焊工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
WANG Peng. Research on welding process of triple-wire double-pulse MIG of 6082-T6 aluminum alloy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [40] Yang Z D, Fang C F, Wu M F, et al. The mechanisms of arc coupling and rotation in cable-type welding wire CO₂ welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 443-450.
- [41] Chen Y, Fang C F, Yang Z D, et al. Arc properties and droplet transfer characteristics in cable-type welding wire electrogas welding[J]. Journal of Materials Processing, 2018, 32: 506-512.
- [42] Yang Z D, Fang C F, Chen Y, et al. Arc ignition of CWW CO₂ welding in A36 steel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33(7): 743-748.
- [43] Yang Z D, Fang C F, Chen Y, et al. Effect of forces on dynamic metal transfer behavior of cable-type welding wire gas metal arc welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1/4): 81-90.
- [44] 杨志东. 缆式焊丝气保焊电弧旋转及熔滴过渡行为研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
YANG Zhi-dong. Study on arc rotation and droplet transfer behavior of cable-type welding wire GMAW[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- [45] Chen Y, Fang C F, Yang Z D, et al. Cable-type welding wire arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1/4): 835-844.
- [46] Fang C F, He B, Zhao Z C, et al. Comparative study on processing property between CWW CO₂ gas shielded welding and SAW[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20(4): 81-86.
- [47] 朱蔡琛. 缆式焊丝气保焊电弧行为及熔滴过渡机理研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
ZHU Cai-chen. Study on arc behavior and droplet transfer mechanism of cable-type welding wire gas shielded welding[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [48] Fang D S, Song G, Liu L M. A novel method of triple-wire gas indirect arc welding[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(3): 352-358.
- [49] Liu L M, Hu C H, Yu S B, et al. A triple-wire indirect arc welding method with high melting efficiency of base metal[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 252-260.
- [50] Liu L M, Yu S B, Song G, et al. Analysis of arc stability and bead forming with high-speed TW-GIA welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 46: 67-76.
- [51] Liu L M, Fang D S, Song G. Experimental investigation of wire arrangements for narrow-gap triple-wire gas indirect arc welding[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(16): 2136-2142.
- [52] 刘黎明, 于世宝, 胡成辉. 三丝间接电弧焊电弧形态及焊缝成形分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 1-6.

- LIU Li-ming, YU Shi-bao, HU Cheng-hui. Analysis of arc shape and weld forming in triple-wire indirect arc welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 1-6.
- [53] 刘黎明, 胡成辉, 方迪生. 窄间隙气体保护三丝间接电弧焊缝成形特征[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 66-70.
LIU Li-ming, HU Cheng-hui, FANG Di-sheng. Weld bead formation in narrow-gap triple-wire gas indirect arc welding process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 66-70.
- [54] 方迪生. 气体保护三丝间接电弧特性及其厚壁窄间隙焊接工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
FANG Di-sheng. Study of triple-wire gas indirect arc and its narrow-gap welding process for thick plates [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [55] Fang D S, Liu L M. Analysis of process parameter effects during narrow-gap triple-wire gas indirect arc welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9/12): 2717-2725.
- [56] Xue C, Shi Y, Fan D, et al. High speed weld control system of dual-bypass MIG based on LabVIEW [J]. Advanced Materials Research, 2010, 139-141: 1852-1855.
- [57] 石珏, 陈作雁, 薛诚, 等. 双旁路耦合电弧铝合金 MIG 焊熔滴过渡形态研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 76-79.
SHI Yu, CHEN Zuo-yan, XUE Cheng, et al. Research on metal transfer in dual bypass MIG welding of aluminum [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 76-79.
- [58] 薛诚. 旁路耦合电弧 GMAW 工艺及机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
XUE Cheng. The research on technology and mechanism of double electrode GMAW [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [59] Shi Y, Liu X P, Zhang Y M, et al. Analysis of metal transfer and correlated influences in dual-bypass GMAW of aluminum [J]. Welding Journal, 2008, 87(9): 229-236.
- [60] Huang J K, Pan W, Yang W T, et al. The influence of bypass current on metal transfer in dual-bypass gas metal arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 179-186.
- [61] 钟浩. 旁路耦合电弧 MIG 焊熔滴过渡、热输入及残余应力分布研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
ZHONG Hao. The research on metal transfer heat input and the distribution of residual stress of double electrode GMAW [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.