

A-TIG 焊研究进展及前景展望*

黄本生¹, 杨江¹, 尹文锋², 陈鹏¹, 朱瑶¹, 李佳宸¹

(1 西南石油大学材料科学与工程学院, 成都 610500; 2 西南石油大学工程训练中心, 成都 610500)

摘要 对活性化钨极氩弧焊(A-TIG)焊接工艺、活性剂的研发及其在增加焊缝熔深机理等方面的研究做了比较详尽的综述, 并指出活性化 TIG 焊研究过程中存在的问题、发展前景及今后研究方向。认为对活性焊剂增加熔深的机理还有待深入研究, 可以利用数值模拟过程结合活性化 TIG 焊试验深入研究活性焊剂增加焊缝熔深的机理。可以基于 A-TIG 焊基本思想结合其他方法研发新的活性焊方法。总之, A-TIG 焊具有巨大的发展潜力和良好的应用前景。

关键词 A-TIG 焊 活性焊剂 焊缝熔深 电弧收缩 表面张力梯度

中图分类号: TG444 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11896/j.issn.1005-023X.2016.03.014

Research Progress and Prospect of A-TIG Welding

HUANG Bensheng¹, YANG Jiang¹, YIN Wenfeng², CHEN Peng¹, ZHU Yao¹, LI Jiachen¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500; 2 Engineering Training Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500)

Abstract The activating tungsten inert gas welding (A-TIG) technology, the researches on activating fluxes and the relevant principle of increasing weld penetration are summarized in detail. In addition, the problems of A-TIG research, the prospect and the future development are pointed out. The mechanism of the activating fluxes which could increase weld penetration need further studies. There will be a good idea for A-TIG can combine with numerical simulation technology of further studies on the mechanism of activating fluxes on the increase of the weld penetration. Research and development of new active welding method by A-TIG can combine with other welding method. In a word, A-TIG will have a great development potential and a good application future.

Key words A-TIG welding, activating fluxes, weld penetration, arc contraction, surface tension gradient

0 引言

活性焊剂钨极氩弧焊也称为活性剂钨极氩弧焊(Activating flux TIG welding, A-TIG),它主要是在被焊工件表层涂敷一层特殊研制的很薄的活性焊剂,再进行 TIG 焊接。因其在具有常规 TIG 焊电弧稳定、焊接质量好、无飞溅、焊缝成形美观等优点的同时,能显著增加熔深,使得焊缝正反两面熔化成形更趋合理,大幅度地提高了焊接效率,降低焊接成本。随着不同材料的活性焊剂相继研制成功, A-TIG 焊可以用于不锈钢、碳钢、低合金钢、钛合金、镍基合金和铜镍合金等的焊接,并在航空航天、造船、汽车、化工、压力容器等重要工业领域得到了广泛应用^[1-4]。A-TIG 焊最初由乌克兰巴顿焊接研究所(PWI)在 20 世纪 60 年代中期焊接钛合金过程中发现^[5]。到 20 世纪 90 年代,该项技术已发展成为一种全新的焊接方法,并引起了人们的广泛关注^[6]。本文主要对活性钨极氩弧焊焊接工艺、活性剂的研发及其在增加焊缝熔深机理等方面的研究做了比较详尽的综述,并指出活性钨极氩弧焊

研究过程中存在的主要问题、发展前景及其未来的研究方向。

1 活性剂钨极氩弧焊工艺试验研究

自 20 世纪 60 年代中期乌克兰巴顿焊接研究所在焊接钛合金过程中发现焊件表面涂敷卤化物可以增加焊缝熔深以来,世界各国科研机构、焊接学者相继对 A-TIG 焊进行了大量试验研究,包括美国爱迪生焊接研究所(EWI)、日本大阪熔接研究所(JWRI)和英国焊接研究所(TWI)等著名焊接研究机构对此也给予了高度的重视,并取得了很多突破性的研究成果^[6]。

熊同亮等^[7]从焊缝成形、焊缝气孔、接头力学性能、微观组织、接头抗腐蚀性能等方面对 TA15 钛合金 A-TIG 焊和常规 TIG 焊进行了对比研究。试验选用直径为 1.6 mm 的 TA1 焊丝,并根据活性焊剂选择原则选用 CaF_2 、 MgF_2 及其混合物 $\text{CaF}_2 + \text{MgF}_2$,涂敷层为 0.1~0.2 mm。相比于常规 TIG 焊, A-TIG 焊可有效减小熔宽、焊缝气孔数,显著增

* 四川省教育厅重点项目(15ZA0057);石油天然气装备教育部重点实验室开放基金(OGE201402-02)

黄本生:男,1969 年生,博士,教授,硕士生导师,研究方向为油气管杆材料焊接、腐蚀与防护 Tel:028-83037227 E-mail:hbslxp@163.com 杨江:男,1992 年生,硕士,研究方向为管线钢焊接及焊接数值模拟 Tel:028-83037227 E-mail:yj19116zq@163.com

加熔深,提高接头的抗拉和抗弯性能,且没有因为活性剂的加入而降低 A-TIG 焊接接头的抗腐蚀性能。同时,为了研究活性焊剂对钛合金焊接过程及接头组织与性能的影响,刘凤尧等^[8]研究了 A-TIG 焊接钛合金微观组织对接头性能的影响,发现 A-TIG 显著提高熔深是由于阳极斑点和表面张力梯度收缩;对采用 NaF、CaF₂、AlF₃、NaCl 和 CaCl₂ 这 5 种单一活性剂获得的接头进行拉伸试验,测试结果表明使用 NaF 活性剂的焊缝抗拉强度最好,而采用 CaF₂ 活性剂的焊缝屈服强度最好,这对于钛合金 A-TIG 焊活性剂的选用具有很大帮助。此外,他们^[9]还通过试验分析了 A-TIG 焊电弧光谱的构成,发现 Ar 和活性粒子分布在电弧空间,其中活性剂元素谱线在电弧中部最强,其次是钨极前方,熔池上方最弱。相比于常规 TIG 焊,电弧中的 Fe 谱线明显增多,主要分布在熔池上方和电弧中部,电弧中心 Ar 谱线强度提高说明电弧中心温度有所提高。

对于低碳钢和不锈钢的中厚板,由于采用 TIG 焊接时存在热输入小,焊缝熔深浅,难以获得良好的焊接接头。为解决这一问题,张瑞华等^[10]研究了低碳钢管子全位置 A-TIG 焊接法,在分析涂敷活性剂后管子全位置焊接过程中熔池受力状态的基础上,制定相关焊接工艺,选用 6 mm 厚的低碳钢管,在焊接时不开坡口,将活性剂涂刷在待焊工件表面,使用管道全位置焊机进行焊接,一次焊透,单面焊双面成形,得出活性剂对熔池受力和熔池流体流动方向产生影响以及不同位置上的焊接采用不同的焊接参数可获得良好的焊缝成形。

潘武等^[11]研究了不同工艺参数对低碳钢 A-TIG 焊缝成形的影响。结果发现随着焊接电流的增大,焊缝熔深、熔宽都增大,对比常规 TIG 焊, A-TIG 焊缝熔深、熔宽增大效果更为明显;此外,HAZ 的形貌也发生明显的变化。樊丁等^[12]也对低碳钢 A-TIG 焊接方法进行了研究,通过在焊件表面涂敷活性焊剂进行堆焊试验,发现在相同焊接参数下,涂敷活性焊剂后电弧有明显收缩,焊缝熔深也显著增加。

在铝合金的 A-TIG 焊中,为了消除未焊透缺陷,保证焊缝成形良好,黄勇等^[13]针对 A-TIG 焊接铝合金提出一种气体输送活性钨极氩弧焊,即 GTFA-TIG 焊。通过改变活性元素的引入方式,利用自动送粉机将活性剂输送到保护气体中,再由保护气体将活性元素引入电弧-熔池系统进行焊接。结果发现 GTFA-TIG 焊能更好地使得电弧收缩,改变熔池金属的流态,显著增加熔池深度,同时还省去了涂敷活性剂的工序,实现焊接过程的自动化。此外法国学者 Sire 等^[14]也在对铝合金焊接时提出 FB-TIG 焊,并发现用 SiO₂ 作活性剂时,电弧明显收缩;而用 AlF₃ 作活性剂时,焊渣成片分布在焊缝表面,熔深增加。

2 活性钨极氩弧焊活性剂方面的研究

A-TIG 焊所采用的活性剂大多数为细粉末状,且为了便于涂敷以及防止焊接时被保护气体吹散,一般采用易挥发的酒精、丙酮等溶剂制成浆糊状,焊前均匀涂敷在焊道两侧。活性剂是 A-TIG 焊的核心部分,对焊缝的成形和接头质量具有重要的影响,主要分为单质型、氧化物型、卤化物型和复

合型。活性剂可以改善焊缝的表面成形及焊缝的熔深,最早是巴顿焊接研究所的学者们在研究活性焊剂改善钛合金焊缝成形和控制气孔等缺陷时发现的,之后各国研究者相继进行了熔深增加机理、不同材料的活性剂的研发以及活性剂成分改进等方面的研究。

张兆栋等^[15]研究了金属单质活性剂对镁合金 A-TIG 焊焊接过程的影响,分别选用 4 种金属单质镭、锌、钛和铬作为活性剂,分析其对镁合金 A-TIG 焊焊缝形貌、电弧形态及电弧电压的影响。结果发现,与常规 TIG 焊相比,镭、锌活性剂均可以增加镁合金交流 A-TIG 焊接熔深,钛单质活性剂对焊接熔深不起作用,而铬单质活性剂反而减少了焊接熔深;涂敷镭和锌时,电弧形态收缩,电弧电压增加,而涂敷钛和铬对电弧电压和电弧形态几乎没有影响。研究者分析镭和锌活性剂增加镁合金 A-TIG 焊熔深的机理主要可能是活性剂使得在交流正半波期间电弧导电通道收缩。

黄勇等^[16,17]分别研究了单质碲、锑和硅对镁合金交流 A-TIG 焊和直流正接 A-TIG 焊熔深的影响。结果表明,无论是在交流 A-TIG 焊还是在直流 A-TIG 焊中碲粉均可使焊缝熔深、熔宽较传统 TIG 焊显著增加,而锑粉和硅粉对焊缝熔深、熔宽几乎没有影响,分析认为碲粉活性剂增加镁合金活性 TIG 焊熔深的机理主要是活性剂粒子收缩电弧导致热输入的增加。但是,由于单质的成本较高,且不易获得,加之其作为活性剂增加熔深的效果不甚明显,不太适合作 A-TIG 焊活性剂的主要组成部分,因而单质活性剂的相关研究较少。

在后续关于活性剂的研究中,人们发现氧化物型活性剂在增加焊缝熔深方面的作用远远高于单质型活性剂,主要研究的氧化物活性剂有 TiO₂、SiO₂、Cr₂O₃、MgO、CaO、MnO₂、Al₂O₃ 等。为了探究氧化物型活性剂对焊接过程的影响,Zhang 等^[18]研究了氧化物活性剂对镁合金 TIG 焊接电弧形态和电弧电压的影响,发现 Cr₂O₃ 使电弧电压增加,而 TiO₂ 使电弧电压下降,氧化物活性剂对电弧形态的影响较小。Sire 等^[14]研究了活性剂 Al₂O₃、TiO₂、SiO₂、LiF 和 AlF₃ 对铝合金 TIG 焊接时的影响,结果发现采用活性剂 FB-TIG 焊时, SiO₂、AlF₃ 可以增大焊缝熔深和面积,而 LiF 作用不明显, Al₂O₃、TiO₂ 则减小了焊缝熔深,而对焊缝面积无影响。

张瑞华和樊丁等^[19,20]利用正交试验法自行研制低碳钢活性剂,其主要成分为 SiO₂、Cr₂O₃、NaCl、CaF₂、TiO₂ 等,研究了表面活性剂对低碳钢 A-TIG 焊的影响;结果表明 SiO₂ 含量为 40% 时对焊缝熔深影响最为明显,卤化物含量较小时对焊缝熔深的增加作用明显;还发现由 SiO₂ + Cr₂O₃ + MnO + NaF + TiO₂ 组成的活性剂可使焊缝熔深比常规 TIG 焊增加 3 倍,焊缝成形良好,而焊接电流、弧长、焊接速度等对熔深增加有一定的影响。黄勇等^[21]则分别采用卤化物、氧化物和碲单质作为表面活性剂,研究其对钛合金 A-TIG 焊熔深的影响,认为通过引起电弧收缩而导致焊缝熔深增加的机理适用于卤化物但不适用于单质碲。

周泽杰等^[22,23]选用 SiO₂、TiO₂ 和 NaCl、CaF₂、MnCl₂ 作为 3003 铝合金 A-TIG 焊表面活性剂,研究了单一成分表面

活性剂对焊接熔深的影响,发现氧化物增加焊缝熔深的作用比卤化物要大,NaCl 活性剂增加熔深有限;并发现多元组分活性剂增加熔深的效果要好于单组元活性剂。黄勇等^[13]在其提出的 GTFA-AIG 焊的基础上研究了不同活性剂对焊缝成形、拉伸性能以及焊缝缺陷的影响。结果表明,大多数卤化物和氧化物活性剂都能使熔深增加到传统 TIG 焊的 2.5~3 倍以上,单质碲的熔深增加效果相对较差。采用 V_2O_5 的焊缝抗拉强度接近母材金属,而采用 $MnCl_2$ 和 AlF_3 的焊缝有一定程度的降低。关于氧化物型活性剂,主要以微量的氧元素对焊缝熔深增加以及显著影响表面张力和温度梯度的研究较多,但对不同的材料氧元素的作用机理不同,还需深入研究。

卤化物作为最早提出的活性剂,关于其对 A-TIG 焊熔深影响的研究最多,由于卤化物的熔点、沸点和分解温度较低,可使焊接电弧特性发生改变,增加焊缝熔深;也正是因为其较低的沸点,在高温焊接时易挥发形成有毒气体,对操作人员的身体造成伤害,这就限制了卤化物活性剂的推广使用。

Sire^[24]在研究镁合金 A-TIG 焊 $LiCl$ 、 $CaCl_2$ 、 $CdCl_2$ 、 $PbCl_2$ 等活性剂时发现,这些氯化物活性剂均可以有效增加焊缝的熔深和深宽比,并且焊缝成形良好。Marya^[25]研究了单一氯化物活性剂对 AZ21 镁合金焊接后熔深、熔宽、深宽比以及焊缝显微组织的影响,发现 $LiCl$ 、 $CaCl_2$ 、 $CdCl_2$ 、 $PbCl_2$ 等氯化物可以增加熔深,并分析其主要原因是活性剂导致了焊接电压和电弧温度的升高。

周泽杰等^[23]在研究单一成分表面活性剂对铝合金 A-TIG 焊熔深的影响时,选用卤化物型活性剂 $NaCl$ 、 CaF_2 、 $MnCl_2$,发现这几种活性剂增加熔深作用不是很明显,大约增加 15%。刘凤尧等^[26]研究了不锈钢和钛合金在 A-TIG 焊中单一成分的活性剂和涂敷量对焊缝成形的影响,结果发现活性剂 CaF_2 和 NaF 都可有效增加焊缝熔深,且随着涂敷量的增加,焊缝熔深也相应增加。但是涂敷 CaF_2 活性剂的不锈钢焊缝成形不好,而在钛合金焊接中 CaF_2 的作用效果最好。他们认为活性剂增加熔深的主要原因在于电弧收缩和熔池表面张力的变化。

由于单一活性剂容易导致焊缝组织晶粒的粗大,增加熔深的效果也不是很理想,焊缝力学性能不能得到明显的改善,为了解决这一问题,活性剂的研究热点逐渐从单一成分活性剂转变成成为多组分复合型活性剂^[27]。马翔等^[28]研究了 5 种单一组分氧化物 MgO 、 Cr_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 、 MnO_2 进行混合配制得到的复合型活性剂,对比分析了 AZ31B 镁合金 A-TIG 焊无活性剂、单一 TiO_2 活性剂和复合型活性剂焊缝熔深、金相组织等,发现复合型活性剂比单一活性剂的熔深增加效果明显,且焊缝晶粒也更为细小,抗拉强度较单一 TiO_2 活性剂时要高,此外,复合型活性剂的活性元素改善了焊缝相的组成,降低了有害脆性相的形成。

3 活性钨极氩弧焊熔深增加机理

目前,A-TIG 焊活性剂增加焊缝熔深的机理尚未有定

论,自提出 A-TIG 焊以来,人们就不断对活性剂增加焊缝熔深机理进行探索和研究,这也是现今 A-TIG 焊领域的一个研究热点,其中主要存在电弧收缩^[29]和熔池表面张力温度梯度改变^[30]等理论。

3.1 电弧收缩理论

电弧收缩理论是由 A. G. Simonik^[31]在研究钛合金 A-TIG 焊接时所提出的。该理论认为活性剂在焊接电弧高温作用下蒸发而以原子形态出现在电弧周围,由于电弧周边区域温度和电子能量较低,蒸发的活性剂分子通过捕捉电弧外围的电子而使得电弧自动收缩,收缩的电弧导致电弧的导电面积减小,电流密度增大,最终使得电弧力和熔池内的电磁力(Lorentz)增加,电弧变窄,焊缝熔深增加。

刘黎明等^[32]研究了 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 $CdCl_2$ 和 $ZnCl_2$ 活性剂对镁合金交流 TIG 焊熔深的影响,发现这 4 种活性剂均可以增加焊缝熔深,但每种活性剂的涂敷都有一个饱和值;涂敷 TiO_2 、 Cr_2O_3 后可在焊缝中观察到 Ti、Cr、O 元素,而涂敷 $CdCl_2$ 和 $ZnCl_2$ 则没有在焊缝中观察到活性剂元素。分析氯化物活性剂增加熔深的机理主要是活性剂和电弧的相互作用,氧化物增加熔深的机理主要是活性剂与熔池金属的作用。Modenesi 等^[33]研究了单一组分的氟化物和氧化物活性剂对奥氏体不锈钢 TIG 焊焊缝成形及焊缝熔深的影响,认为造成焊缝熔深增加的主要原因是电弧收缩以及活性剂对金属蒸发的影响。

Sire^[14,19]在研究用 SiO_2 作活性剂进行铝合金交流 FB-TIG 焊时也发现电弧明显收缩,电压升高,熔深增加;并且在研究氯化物对镁合金 A-TIG 焊的影响时发现,在焊缝熔深增加的同时焊缝面积也增大,焊接电压升高,热输入增加,分析认为这可能与活性剂中金属元素的第一电离能有关。

黄勇等^[34]在研究单组元活性剂对铝合金交流 A-TIG 焊时发现, SiO_2 增加熔深最为明显,并进一步对其增加熔深机理进行了研究。结果表明, SiO_2 对焊缝成形没有影响;在直流 A-TIG 焊接试验中, SiO_2 使得氧化膜厚度增加,电弧极性区收缩,弧柱区扩展,电弧电压升高;在交流 A-TIG 焊接试验时, SiO_2 使活性剂或金属蒸发的区域变窄且蒸发量变小,熔池表面凹陷,在整个焊接过程中 SiO_2 始终存在于熔池表面,蒸气主要集中于电弧中下部,认为 SiO_2 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深的主要机理是电弧的收缩和热输入的增加。此外他们^[35]自行提出了新型活性 TIG 焊,即分区活性 TIG (FZ-TIG)焊,通过焊缝表面焊渣 X 射线衍射分析、热力学计算以及焊缝偏移试验分析活性剂对导电通道电阻的影响,研究了铝合金交流 FZ-TIG 焊中活性剂熔深增加机理,认为活性剂强烈收缩电弧弧根和弧柱是 SiO_2 + FZ108 活性剂增加铝合金交流 FZ-TIG 焊熔深的主要原因。

3.2 表面张力理论

表面张力温度梯度改变理论是由 C. R. Heiple^[36,37]在添加微量活性元素研究不锈钢 GTAW 焊、激光焊、电子束焊时,为解释活性剂对焊缝成形和熔深的影响而提出的。该理论认为活性剂中的微量活性元素或因其产生的活性气氛在接触到焊缝熔池金属时,可能使得熔池液态金属表面张力

减小,表面张力温度梯度变为正,即表面张力随温度的升高而增大,从而使得熔池周边的 Marangoni 流方向变为从周边向中心流动,熔池中心区域的电弧热量通过液流直接传向熔池底部,使熔池底部的加热效率更高,从而得到窄而深的焊缝^[38-41]。

张瑞华等^[42,43]利用自行研制的不锈钢活性剂 FS12 研究了 A-TIG 焊熔深增加的机理,并通过 PHOENICS 软件模拟了有、无活性剂时氧元素质量分数、电磁收缩效应等对熔池速度场和温度场的影响。结果发现,无活性剂时,熔池液态金属从中心流向四周,再从四周流向熔池底部,形成宽而浅的熔池形状;有活性剂时,熔池液态金属从熔池边缘流向中心,引起向内的两个涡流在熔池上表面中心相遇,汇合后流向熔池中心底部,形成窄而深的熔池形状。他们认为不锈钢 A-TIG 焊熔深增加的主要原因是表面张力梯度变化,电弧收缩对熔深也有一定影响,但不是主要的原因,数值模拟结果与试验结果吻合良好。

Katayama 等^[44]用 W 粒子作为示踪原子,采用微焦 X 射线实时成像系统对 S 含量不同的两种不锈钢进行研究,发现 S 含量较低时在熔池中心的液态金属从熔池底部流向熔池表面,而 S 含量较高时液态金属从熔池表面流向熔池底部。Tanaka 等^[30]对利用 TiO₂ 作活性剂的不锈钢 A-TIG 焊进行了研究,通过对电弧等离子体的光谱测量,发现电弧中不存在活性剂原子,说明活性剂的蒸发对电弧收缩没有影响,再对熔池表面温度进行测量,发现无活性剂时,表面张力梯度为负,引起 Marangoni 流向外流,有活性剂时,表面张力梯度转变为正值,引起 Marangoni 流向内流。故而他们认为引起焊缝熔深增加的主要原因是表面张力。

刘凤尧等^[45]以 0Cr18Ni9 不锈钢涂敷含 Bi 的 SiO₂ 和 TiO₂ 活性剂,研究了活性化 TIG 焊熔深增加的机理,发现活性剂 SiO₂ 和 TiO₂ 都改变了熔池的流动方向,但没有使电弧整体发生收缩,相反使得电弧整体发生了膨胀;SiO₂ 使等离子体发生了收缩,提高了电弧电压。所以,他们认为 SiO₂ 增加熔深主要是等离子体收缩、阳极斑点收缩和表面张力温度梯度由负变正共同作用的结果,而 TiO₂ 增加熔深主要原因是表面张力温度梯度由负变正。魏艳红等^[46]通过数值模拟和试验验证研究了 A-TIG 焊熔深增加的机理,通过分析熔池内流体的流动方式,发现熔池中心液体的流速明显高于熔池边缘,中心由外向内的环流是熔池内液体流动的主导方向,其将高温液体带至熔池底部,使熔池底部的熔化速度高于边缘区域,从而导致熔深增加。

总之,活性剂对 A-TIG 焊的作用机理是相当复杂的,至今在整个学术界都还没有统一的定论来表明是活性剂引起的电弧收缩还是表面张力温度梯度的改变起主要作用,亦或是其他一些理论:热输入增加理论、阳极斑点收缩理论、电弧收缩与表面张力共同作用等,这些都还有待于进一步的研究。

4 活性 TIG 焊数值模拟研究

近些年,随着计算机技术的快速发展和相关数值理论的

逐步完善,数值模拟已成为现代工程研究一种重要的手段。对焊接过程引入数值模拟进行研究,有助于人们从更深层次了解焊接过程的本质;此外,还可节约大量的人力、物力和时间,减少了实验工作量和实验的盲目性。目前,关于活性焊焊接数值模拟的研究还较少,且主要集中在 A-TIG 焊熔深增加机理方面。

赵玉珍^[47]通过建立三维移动热源作用下 TIG 焊焊接熔池的数学模型,研究了在不同质量分数表面活性元素 S 作用下熔池的速度场和温度场。结果表明,S 元素能显著影响熔池的流动方式;随着 S 含量的增加,焊缝熔池的深宽比值快速增大直到趋于一稳定值,熔池中出现数目、大小、方向和位置不同的涡流,涡流可将电弧带入熔池底部,产生较大的熔深;此外,在熔池表面上,温度梯度最大出现在表面张力最大处。

兰州理工大学张瑞华^[48]采用 PHOENICS 软件研究了活性焊接法熔深增加的机理。结果表明,在没有活性剂和氧元素作用时,熔池表面主要为负的表面张力温度系数,焊接时驱动液态金属从熔池中心流向边缘,导致焊缝熔池的深宽比较小;在有活性剂时,活性剂中的氧元素显著影响熔池中液态金属的流动方式,当氧元素含量达到一定值时,熔池表面以正的表面张力温度系数为主,驱动液态金属从熔池边缘流向中心,形成窄而深的熔池形状;同时试验测试结果和模拟计算结果吻合良好。他认为表面张力温度系数是影响熔深的主要原因,电弧收缩虽能影响焊缝熔宽,但对熔池熔深的影响较小。

董文超^[49]基于 FLUENT 软件的二次开发,通过建立 TIG 焊接电弧和熔池模型,研究了不同活性组元 O 元素含量下焊接熔池的形貌变化。结果表明,活性组元中 O 元素含量的变化将引起熔池内 Marangoni 效应,导致熔深增加,且相比于氩弧,氦弧可得到更深的熔深,模拟结果与实测值吻合良好。

黄勇^[50]针对气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧的传质传热过程进行了数值分析。通过计算得出的活性 TIG 焊电弧等离子体的温度、流速、氧气分布和电流密度等参数与常规 TIG 焊电弧对比,发现氧气主要分布在电弧外围,仅少数进入电弧内部。对于活性 TIG 焊显著增加熔深的机理,根据模拟结果和实际测量结果来看,焊缝熔池表面张力系数的改变是导致活性 TIG 焊熔池熔深增加的主要原因。

5 结语

综上所述,活性焊剂 TIG 焊作为一种在 TIG 焊基础上改进的焊接技术,拥有巨大的潜在应用前景,但其也存在许多问题有待深入研究,如 A-TIG 焊焊缝成形质量、实际生产效率、活性剂改变焊缝成分及其增加熔深机理等。当这些方面的研究得到进一步完善,A-TIG 焊接技术将得到更加广泛的应用。根据目前 A-TIG 焊的发展现状,今后关于 A-TIG 焊的发展方向主要有以下几个方面:(1)开发研制适合不同材料的活性焊剂以及对现有的活性焊剂进行改进;(2)利用计算机强大的计算能力,通过数值模拟和试验相结合的

方法,深入研究活性焊剂对焊缝熔深增加的机理;(3)基于 A-TIG 焊的基本思想开发研究活性焊的新方法;(4)将 A-TIG 焊与其他传统焊接技术相结合等。总之,A-TIG 焊作为一种新型的焊接技术,具有巨大的发展潜力和良好的应用前景。

参考文献

- 1 张瑞华,尹燕. 活性焊接法研究现状[J]. 现代焊接,2010,89(5):1
- 2 彭小洋,凌泽民,廖娟,等. 活性 TIG 焊的研究进展[J]. 机械工程材料,2013,37(8):1
- 3 Kazakov Yu V, Koryagin K B. The efficiency of activating fluxes in manual argon-arc welding[J]. Welding Int,2002,16(11):886
- 4 Rodrigues A, Loureiro A. Effect of shielding gas and activating flux on weld bead geometry in tungsten inert gas welding of austenitic stainless steels[J]. Sci Technol Welding Joining,2005,10(6):760
- 5 Gurevich S M, Zamokov V N, Kushirenko N A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by tungsten arc process[J]. Automatic Welding,1965,18(9):1
- 6 吴小俊,袁苗达. 镁合金活性 TIG 焊发展与研究现状[J]. 热加工工艺,2013,42(21):9
- 7 熊同亮,周志刚,董占贵. TA15 钛合金 A-TIG 焊试验分析[J]. 焊接学报,2006,27(4):49
- 8 Liu Fengyao, Yang Chunli, Lin Sanbao, et al. Effect of weld micro-structure on weld properties in A-TIG welding of titanium alloy[J]. Trans Nonferrous Metals Soc China,2003,13(4):876
- 9 刘凤尧,杨春利,林三宝,等. 活性化 TIG 电弧光谱分布的特征[J]. 金属学报,2003,39(8):875
- 10 张瑞华,王海涛,王荣,等. 低碳钢管子全位置焊 A-TIG 焊接法[J]. 焊接学报,2010,31(6):13
- 11 潘武,石凯. 工艺参数对低碳钢 A-TIG 焊缝成型的影响[J]. 焊管,2012,35(4):24
- 12 樊丁,顾玉芬,石珏,等. 低碳钢 A-TIG 焊接方法的研究[J]. 焊接,2002(2):16
- 13 黄勇,李涛,王艳磊. 铝合金气体输送活性钨极氩弧焊方法[J]. 焊接学报,2014,35(1):101
- 14 Sire S, Marya S. New perspectives in TIG welding of aluminum through flux application FBTIG process[C]//Proceeding of the 7th International Welding Symposium. Kobe, Japan,2001
- 15 张兆栋,曹全金. 金属单质活性剂对镁合金 A-TIG 焊的影响[J]. 焊接学报,2011,32(9):37
- 16 黄勇,樊丁,杨鹏,等. 活性剂对镁合金交流 A-TIG 焊的影响[J]. 焊接学报,2007,28(6):41
- 17 黄勇,樊丁,林涛,等. 活性剂对镁合金直流正接 A-TIG 焊熔深的影响[J]. 焊接学报,2007,28(10):21
- 18 Zhang Zhaodong, Li Liming. AC-TIG welding with single-component oxide activating flux for AZ31B magnesium alloys[J]. J Mater Sci,2008,43(4):1382
- 19 张瑞华,樊丁. 低碳钢 A-TIG 焊活性剂的焊接性[J]. 焊接学报,2003,24(1):85
- 20 张瑞华,樊丁,余淑荣. 低碳钢 A-TIG 焊的活性剂研制[J]. 焊接学报,2003,24(2):16
- 21 Huang Yong, Fan Ding, Zhang Han. Effect of surface activating flux on weld penetration of A-TIG welding for titanium alloy[J]. Rare Metal Mater Eng,2006,35(10):1586
- 22 周泽杰,黄志超. 活性剂对 3003 铝合金直流 A-TIG 焊的影响[J]. 热加工工艺,2013,42(11):168
- 23 周泽杰,黄志超,曹高浩. 3003 铝合金 A-TIG 焊表面活性剂实验[J]. 华东交通大学学报,2012,29(1):20
- 24 Sire S G Ruckert, Marya S. Contribution to A-TIG and FBTIG welding-processes flux optimization for enhanced weld penetrations in aluminum 5086[C]//. IIW Doc. XII-1715-02,2002
- 25 Marya M E, Dwardz G R. Chloride contributions in flux-assisted GTA welding of magnesium alloys[J]. Welding J,2002,81(12):291
- 26 刘凤尧,林三宝,杨春利,等. TIG 焊活性剂对焊缝成型的影响[J]. 焊接学报,2002,23(1):1
- 27 杨绍斌,郭建靖,沈丁,等. 镁合金钨极氩弧焊活性剂的研究进展[J]. 材料导报:综述篇,2013,27(9):131
- 28 马翔,张兆栋,刘黎明,等. 单一及复合氧化物活性剂对镁合金 A-TIG 焊的影响[J]. 焊接学报,2007,28(9):39
- 29 Howse D S, Lucas W. Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding[J]. Welding Res,2002,11:291
- 30 Tanaka M, Shimizu T, Terasaki H, et al. Effects of activating flux on arc phenomenon in gas tungsten arc welding[J]. Sci Technol Welding Joining, 2000,5(6):397
- 31 Simonik A G. Effect of contraction of the arc-discharge upon the introduction of electro-negative elements[J]. Welding Production, 1976,23(3):68
- 32 刘黎明,张兆栋,沈勇,等. 活性剂对镁合金 TIG 焊接熔深的影响[J]. 金属学报,2006,42(4):399
- 33 Modenesi P J, Apolinario E R, Pereira I M. TIG welding with single-component fluxes[J]. J Mater Processing Technol,2000,99:260
- 34 黄勇,樊丁. SiO₂ 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深的机理[J]. 焊接学报,2008,29(1):45
- 35 黄勇,樊丁,邵锋. 活性剂增加铝合金交流 FZ-TIG 焊熔深机理[J]. 机械工程学,2010,46(16):113
- 36 Heiple C R, Roper J R. Mechanism for minor element effect on TIG fusion zone geometry[J]. Welding J,1982,61(4):97
- 37 Heiple C R, Roper J R, Stange R T. Surface active element effects on the shape of GTA, laser and electron beam welds[J]. Welding J, 1983,10(3):72
- 38 刘顺洪,权雯雯,王任飞. A-TIG 焊的研究现状和发展趋势[J]. 航空航天焊接技术,2010(9):48
- 39 马壮,张莉,王义伟. 有色合金 A-TIG 焊研究现状[J]. 材料导报:综述篇,2014,28(1):91
- 40 张仲国,张宇鹏,罗子艺,等. A-TIG 焊技术的研究进展与应用[J]. 热加工工艺,2013,42(5):191
- 41 马壮,周鹏,田琳,等. A-TIG 增加熔深机理研究现状[J]. 热加工工艺,2012,41(21):177
- 42 Zhang Ruihua, Fan Ding. Numerical simulation of effects of activating flux on flow patterns and weld penetration in A-TIG welding[J]. Sci Technol Welding Joining, 2007, 12(1):15
- 43 张瑞华,尹燕,樊丁,等. A-TIG 焊熔深增加机理的数值模拟[J]. 机械工程学,2008,44(5):175
- 44 Katayama S, Mizutani M, Matsunawa A. Liquid flow inside molten pool during TIG welding and formation mechanism of bubble and porosity[C]//Proceeding of the 7th International Welding Symposium. Kobe, Japan,2001
- 45 刘凤尧,杨春利,林三宝,等. 活性化 TIG 焊熔深增加机理的研究[J]. 金属学报,2003,39(6):661
- 46 魏艳红,徐艳利,孙燕洁,等. A-TIG 焊接熔深增加机理[J]. 焊接学报,2009,30(2):37
- 47 赵玉珍,雷永平,史耀武. 表面活性元素硫对焊接熔池流动方式和深宽比的影响[J]. 机械工程学,2004,40(9):138
- 48 张瑞华. 活性焊接法及熔深增加机理的数值模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2005
- 49 董文超,陆善平,李殿中,等. 焊接电弧与活性组元对 TIG 焊熔池形貌影响的数值模拟[J]. 焊接学报,2009,30(11):49
- 50 黄勇,陆肃中,王新鑫,等. 气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧传热过程的数值分析[J]. 兰州理工大学学报,2015,41(4):15

(责任编辑 余波)