

A-TIG 焊的研究现状 和发展趋势

Present Situation and Trend of Research on A-TIG Welding

华中科技大学材料科学与工程学院 刘顺洪 权雯雯 王任飞



刘顺洪

华中科技大学材料学院教授,现任材料学院材料工程系副主任。湖北省机械工程学会理事,湖北省焊接学会副理事长,湖北省汽车工程学会常务理事,电焊机杂志编委。长期从事激光材料加工和焊接力学行为的科研和教学工作。多年来,完成了五十余项科研项目,获得湖北省科技进步奖一等奖一项(排名第二,2000J-197-1-015-007-R02),发表论文 70 余篇,其中多篇被 SCI、EI 收录。主要研究方向为先进材料焊接及焊接结构力学行为、激光加工及焊接、焊接成套装备及工艺和基于焊接机器人的快速制造系统等。

活性焊接技术还需要从焊接的前处理工艺、焊接规范、焊后的热处理以及焊接接头的性能等方面与常规 TIG 焊接进行详尽的对比,得到常用不同材料 A-TIG 焊接的稳定的工艺参数,并在实际工程应用的研究方面进行进一步系统研究。

TIG 焊的单道焊缝熔深浅、熔敷率低,对于厚度较大的板材或管材焊接,需开坡口并采用多层焊接。A-TIG 焊是在传统 TIG 焊接前将很薄的一层表面活性剂涂敷在施焊板材表面,焊接时活性剂引起焊接电弧收缩或熔池内金属流态发生变化,在相同的焊接规范下使焊接熔深显著增加。

从 20 世纪 60 年代中期乌克兰巴顿焊接研究所提出卤化物组成的活性剂针对钛合金的氩弧焊接技术至今,各国研究者在活性剂的熔深增加机理、不同材料的活性剂研发、活性剂成分的改进、活性焊接技术与

激光焊接技术结合等方面做了大量试验研究工作,并达到了一定的实用化、商品化水平。

机理研究现状

对该技术活性剂增加焊接熔深机理的研究目前形成了两种主流观点。A.G.Simonok 用 CaF_2 和 AlF_3 作为活性剂研究钛合金的熔深增加机理时提出了“电弧收缩理论”。

“电弧收缩理论”认为:在电弧高温作用下蒸发了的活性剂以原子形态包围在电弧周边区域,由于电弧周边区域温度和电子能量较低,蒸发的活性剂分子与电子结合形成

负离子并散失到周围空间,使电弧中的电子数呈现减少趋势,电弧导电性能减弱,这样就使电流束缚在中心,电弧自动产生收缩。收缩的电流束提高了电流密度,电弧变窄,熔深增加^[1]。

“表面张力温度梯度改变”理论认为:当熔池金属加入某种微量元素或接触到活性气氛时,能使熔池液态金属的表面张力数值降低并且转变为正的温度系数,从而使熔池金属形成从熔池周边向着熔池中心区的表面张力流,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提高,从而形成窄而深的熔池^[2]。

1 活性焊增加熔深机理的试验研究

通常对电弧收缩现象的观察只是直接观察电弧形态和观察熔池中阳极斑点的运动,并未考虑到电弧中负离子存在问题及其他可能存在的机制。杨春利等与日本大阪大学合作以电弧电压对变动焊接电流的瞬时变化量反映电弧收缩情况,证实了电弧收缩与熔深变化存在一定关联。另外他们利用熔池振荡及熔池谐振信号的检测,以熔池自身固有振荡频率与熔池尺寸的内在关系测定熔池金属表面张力,研究了薄板 304 不锈钢 TIG 焊不同熔池尺寸的表面张力变化以及活性剂对熔池表面张力的影响,这也是试验方法在焊接熔池表面张力测定中的最初应用^[3-4]。熔池表面和内部流体流动情况复杂,直接用试验的方法来观察测量很困难。尤其是涂敷活性剂后熔池中存在多个涡流,流体流动变得异常复杂,研究起来更加困难,只能通过试验间接的验证活性剂对熔池流体流动的影响。

刘凤尧等在不锈钢板上涂敷含有 Bi 的活性剂,通过薄钨板挡住熔池流动的方法,对钨板两侧 Bi 颗粒分布的测量分析出涂敷 SiO₂ 和 TiO₂ 后熔池流动方向的变化,同时采集了电弧电压,结果表明活性剂改变了熔

池的流动方向,但是不同活性剂对电弧电压影响不同^[5]。张瑞华等考虑到熔池中流体流动的对称性及中心线附近流体的实际情况,采用高熔点双薄钨板挡住熔池流动的方法进行试验,对比焊缝中钨板周围钨颗粒的分布。结果表明有活性剂时熔池流体流动的方向从熔池边缘流向熔池中心,即活性剂改变了熔池的流体流动方向^[6]。

2 活性焊增加熔深机理的数值模拟

大量研究还通过数值分析来模拟 A-TIG 焊接过程中的熔池流动行为和温度场变化,借以阐述活性剂增加熔深的机理。

Zhao 建立了三维移动 TIG 热源作用下焊接熔池的数学模型,模拟了 304 不锈钢板添加不同氧化物活性剂时的熔池流动和温度场变化,结果表明表面活性元素氧通过改变表面张力系数,形成表面张力驱动流的涡流现象,使熔池的流动方式发生改变来影响焊缝形状^[7]。兰州理工大学在该基础上做了进一步的研究,利用 PHOENICS 软件同时模拟了活性剂氧元素质量分数、电弧收缩效应等对熔池速度场和温度场的影响;并通过改变高斯热源的电弧热流分布参数和电磁力项中电流密度模拟了弧压升高、电弧收缩对焊缝熔深增加的影响,结果表明温度场和流场流速几乎没有变化,熔深和熔宽也未发生改变,这一点不仅再次证明了 Zhao 的结论,也说明了洛伦兹力对流体流动的影响很小^[8]。Xu 模拟了 Nimonic263 的 A-TIG 焊接流场和温度场在不同焊接电流下熔池内液体的流动情况,随着焊接电流的增加,熔池内的液体流速增大,导致熔深明显增大,与试验的焊缝形状对比结果吻合。模拟了氧元素含量的持续增加对熔深的影响,分析了与试验结果偏差的原因主要是活性剂的一味增加并不能确保熔池中氧元素的充分溶解并发挥作用^[9]。

活性焊在实际应用领域研究

A-TIG 焊的关键因素在于活性剂成分的选配。依据“电弧收缩”理论,选择电负性较大即电子亲和能较大的元素(如 Cr、Si、卤化物和氧化物等)。依据“表面张力”理论,选择使熔池具有正表面张力温度梯度的含有表面活性元素的化合物,主要为氧化物(如 O、Si 等)。此外,还要考虑弥补焊缝合金元素的烧损以及脱渣性、焊缝成形、焊缝机械性能、无毒副作用等因素。常用的活性剂成分主要有氧化物、氯化物和氟化物,不同材料适用的活性剂成分不同。目前主要以低碳钢、不锈钢、镁合金及铝合金等为研究对象,研究单组元活性剂对焊缝成形、熔深、熔宽变化和焊接电弧的影响规律。以此为基础利用试验优化设计方法对不同材料的 A-TIG 焊活性剂配方进行研究和改进,弄清活性剂组成体系、浓度、涂敷量等对电弧特性及熔深的影响规律,建立研究活性焊接法的有效方法。此外,研究者还针对不同材料使用活性剂后,焊缝的表面成形、焊接接头微观组织、焊缝的化学成分、焊接接头的综合性能等进行研究。

张瑞华等针对 304 不锈钢研制了由 B₂O₃、Fe₂O₃、Al₂O₃、SiO₂、TiO₂、Cr₂O₃ 和 NaF 等组成的活性剂,分析了各单一活性剂对焊接熔深的影响规律。结合不锈钢的合金元素系统,确定了活性剂的基本组成利用正交试验法对多组元配方进行了研究得出了各组元质量分数变化对焊接熔深的影响规律,最优配方使焊接熔深增加 2 倍以上,可将 8mm 厚的不锈钢钢板对接一次焊透^[10]。

焊接镁合金需要采用交流氩弧焊,电弧时刻存在周期性变化;镁合金具有较高的导热率、低熔点、低沸点、低的表面张力和高蒸汽压,这些特点使得镁合金活性焊中与电弧和熔池之间的相互作用存在更加复

杂的物理、化学现象。张兆栋等以 AZ31B 镁合金为主要研究对象,均匀设计方法设计了以氧化物为主要成分的活性剂复合配方。研究了活性剂对镁合金交流 TIG 焊接接头力学性能和微观组织的影响。焊接接头的拉伸强度相当;焊缝内的相组成仍为基体 Mg 相和 β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂ 相;焊接接头的断口形貌仍然为典型韧窝断裂和解理断裂的混合形貌。不同类型的活性剂对熔深增加机理不同,采用 CPL-MS25K 高速同步摄像机观察焊接过程中活性剂与电弧交互作用下电弧的形态,氯化物活性剂 (CdCl₂) 加入增加了交流焊接正负半波的电弧电压,电弧形态变化较大出现收缩和拖尾。采用光谱分析分析出只有部分活性剂在电弧高温作用下蒸发、分解为自由原子激发跃迁辐射产生原子谱线。采用单激光作用的方法研究在没有电弧影响的条件下涂敷活性剂后熔池金属的流动状态,经过试验验证 TiO₂ 活性剂改变了熔池的流动方式,说明氧化物活性剂主要影响了焊接熔池^[11]。

黄勇等在铝合金活性焊接时改变活性剂涂敷方式提出了分区活性 TIG 焊接法 (Fz-TIG 焊),该方法是在待焊焊道表面中心区域涂敷低熔沸点低电阻率活性剂,两侧区域分别涂敷高熔沸点高电阻率的绝缘层再进行正常焊接。该方法兼具熔深显著增加和焊缝表面成形良好的优点,采用均匀设计法开发了适用于铝合金交流和直流活性 TIG 焊的中间涂层活性剂材料。通过研究增加熔深机理,结合铝合金材料表面张力小、粘度低的特点,认为电弧收缩是导致表面张力温度梯度变化非熔深增加的主要原因和主要机理。活性剂的熔沸点、电阻率、功函数和解离能以及活性剂中所含元素的电离能和电子亲和能等物化特性的不同,导致不同活性剂在电弧中所经历的物理过程影响不同,从而使活性剂收缩方式不

同:电弧弧根整体收缩而弧柱发散,电弧弧根和弧柱都收缩,电弧斑点离散收缩而弧柱发散。该研究对加深人们对活性剂材料影响 TIG 焊电弧-熔池耦合系统的认识具有重要的理论意义^[12]。

此外, Z.Sun 等将活性 TIG 焊应用在 Ti 合金材料上,数据采集系统监控得到的数据显示,使用活性剂后在电弧稳定情况下电弧电压和焊缝熔深有着显著关联,而且活性剂涂敷层厚度对活性焊效果有至关重要的影响^[13]。还有一些研究针对保护气体和焊接参数展开,认为 He 气保护下的活性焊熔深优于 Ar 气,因为 He 的高电离电位和导热系数会加强电弧作用^[14]。Huang 在氩气中加入适量的氮气使电弧传递给工件更多的热量,随着氮气含量的上升,熔深增加,焊件角变形、力学性能也同时得到改善,但是 δ 铁素体会有所减小^[15]。

活性焊的发展趋势

1 活性焊新方法

随着国内外对活性剂增加焊接熔深的机理和工艺研究的逐渐成熟,活性剂在其他焊接方法中的应用逐渐得到人们的关注,已经形成活性电子束焊、活性激光焊等新的焊接方法。文献 [2] 研究活性元素对电子束焊的影响时,发现活性元素对电子束焊的熔深影响很小。而 S.W.Pierce 等人研究活性元素对电子束焊的影响时发现,在一定条件下活性元素对电子束焊的熔深影响很大^[16]。二者结论相反,产生了矛盾。张瑞华等人通过试验证实活性电子束法可使焊接熔深增加,不仅因为活性剂改变了熔池金属的表面张力梯度使熔池金属的流动方向发生了改变,而且因为高熔点涂层物质的存在减小了电子束熔化母材的区域使得熔宽减小^[17]。

Heiple 等人发现在不锈钢激光焊的熔池里添加百万分之六十六的表面活性元素硒能够使焊缝深宽比

增加 200%^[2]。R.Kaul 和 M.Kuo 等人的研究发现在激光深熔焊时活性剂对熔深增加不显著,但会使熔宽有一定程度的减小^[18-19]。Ding 等人对 YAG 激光焊的活性焊做了研究,结果表明表面活性剂和表面活性元素 S 能显著增加焊缝的熔透和深宽比,对焊缝形状产生影响^[20]。Su 等人的研究表明在 304 不锈钢的 CO₂ 激光焊中添加活性剂,减少了等离子体的电子密度导致熔深增加,但活性剂对 Nd:YAG 激光焊的熔深没有影响^[21]。

2 研究趋势

据以上介绍可知,到目前为止,对于活性焊熔深增加机理做了大量定性研究工作,数值模型也对表面张力理论进行了验证。由于试验过程中活性剂颗粒度大小、活性剂涂敷量、涂覆的均匀程度和涂覆方式等对熔深变化起着重要作用的因素并没有达到统一的量化规范标准,熔池内部复杂的物理化学现象并不能简单地通过简化的数学模型就完整地阐述。种种原因导致了关于熔深增加机理的研究有时得出了不同的结论,机理的研究还有待进一步完善和成熟。

目前,活性焊技术的工艺研究还只局限于理论试验研究阶段,实际应用也只是在军工、航天航空和核电设备等小范围领域。而活性焊技术作为一种新型先进连接制造技术,在提高焊接能效和产品质量方面的巨大优势更值得各方面研究的深入。活性焊接技术还需要从焊接的前处理工艺、焊接规范、焊后的热处理以及焊接接头的性能等方面与常规 TIG 焊接进行详尽的对比,得到常用不同材料 A-TIG 焊接的稳定的工艺参数,并在实际工程应用的研究方面进行进一步系统研究。

本文有参考文献 21 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 淡蓝)