

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.11.06

数值模拟在活性焊接技术研究中的应用现状及展望

李潇航¹, 任昌敬², 倪昱^{1,3}, 黄勇^{1,3}, 黄健康^{1,3}

1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

2. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100

3. 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

摘要: 高效率生产是焊接工作者持续追求的目标之一, 而实现深熔深焊接是重要途径之一, 尤其是能获得优异焊接质量但熔深较浅的TIG焊。活性焊接方法起源于AF-TIG焊(Activating Flux TIG welding), 通过在普通TIG焊接前在待焊母材表面涂敷活性剂材料, 可使得熔深显著增加, 达到TIG焊熔深的2倍及以上。为了推动活性焊接方法的应用与发展, 通过介绍活性焊熔深增加的两种机理, 数值模拟在熔池流动、应力应变、活性剂过渡方面的应用, 深入理解活性元素对熔深增加和焊缝性能的影响。并认为活性剂增加熔深机理有待厘清, 加强研究活性元素在低温凝固阶段中的冶金行为及其对熔池金属相变过程和焊缝性能的影响规律, 将会促进活性元素引入精细控制技术和新型活性焊接方法的开发。

关键词: A-TIG焊接; 数值模拟; 表面张力温度梯度系数; 应力应变; 活性剂过渡

中图分类号: TG456.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2023)11-0035-09

Status and Prospects of Numerical Simulation of Activating Welding Technology

LI Xiaohang¹, REN Changjing², NI Yu^{1,3}, HUANG Yong^{1,3}, HUANG Jiankang^{1,3}

1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China

3. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, Lanzhou 730050, China

Abstract: Deep weld penetration is the main way to achieve high welding productivity pursued by welding workers, especially for the TIG welding process with perfect weld quality but lower weld penetration. Activating welding method originates from the AF-TIG (Activating Flux TIG) welding, in which a thin layer of activating flux is applied onto the surface of work-piece before common TIG welding and results in dramatic increase of weld penetration, more than two times of TIG welding. In order to promote the application and development of active welding methods, this paper introduces two mechanisms of increasing welding depth in activating welding, and the application of numerical simulation in molten pool flow, stress-strain, and active flux transition. It is easy to deeply understand the influence of active elements on the increase of weld penetration and weld properties. It is suggested that the mechanism of increasing weld penetration by active fluxes needs to be clarified, and research on the metallurgical behavior of active elements in the low-temperature solidification stage and their influence on the phase transformation process of the molten pool and welding seam properties should be strengthened. This will promote the introduction of active elements into fine control technology and the development of new activating welding methods.

Keywords: A-TIG welding; numerical simulation; temperature gradient coefficient of surface tension; stress strain; active flux transition

引用格式: 李潇航, 任昌敬, 倪昱, 等. 数值模拟在活性焊接技术研究中的应用现状及展望[J]. 电焊机, 2023, 53(11): 35-43.

Citation: LI Xiaohang, REN Changjing, NI Yu, et al. Status and prospects of numerical simulation of activating welding technology[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 35-43.

收稿日期: 2023-04-12 修回日期: 2023-09-14

基金项目: 液体火箭发动机常用材料厚壁结构件A-TIG焊接工艺研究

作者简介: 李潇航(1997—), 男, 在读硕士, 主要从事活性焊接方法及其理论的研究。E-mail: niyu2008@163.com。

0 引言

随着装备制造技术的不断发展,焊接技术已经成为现代工业的基础技术之一,其发展趋势日趋明朗,即追求高质量、高效率、低成本、低污染与智能化。近年来,活性焊接(A-TIG焊)作为一种高效绿色焊接技术,受到了越来越多的关注。它是通过在焊接过程中将活性元素引入电弧-熔池耦合系统中,以引起电弧收缩和改变熔池表面张力的方式使得焊缝熔深增加。该方法最早由乌克兰巴顿焊接研究所(PWI)于20世纪60年代在焊接钛合金过程中发现,焊件表面涂敷的卤化物可以大幅增加焊缝熔深。但是,直到20世纪90年代后期,欧美的研究机构(如英国焊接研究所和爱迪生焊接研究所等)才开始对其进行广泛研究^[1]。目前,A-TIG焊已在碳钢、不锈钢、镍基合金及铝合金等材料中得到了应用,它具有生产效率高、成本低、焊接变形小的优势,应用前景十分广阔。然而,针对A-TIG焊熔深增加及焊缝形貌变化机理一直存在争议。

得益于计算机技术的飞速发展以及数值模拟理论不断完善,数值模拟作为重要的研究手段参与到活性焊熔深增加机理的讨论中,这使得人们对活性焊接的理解不断深入。在以往的科学试验中,很难通过试验手段直接观察熔池内部的流体流动,实时测量熔池中的流体流速也是特别困难的。这是因为焊接过程不仅涉及高温、不透明金属、短持续时间、烟雾和小焊道,而且焊接电弧的存在可能会干扰测量仪器。而数值模拟技术则可以通过模拟表面张力、电磁力、重力等其他力引起的复杂对流运动来定量描述焊接熔池中的流体流动及传热过程。因此,本文将围绕活性焊熔深增加机理,数值模拟在熔池流动、应力应变预测、活性剂过渡方面的应用,着重讨论数值模拟技术对于研究活性焊的重要作用,并针对现有的实验研究提出一些看法。

1 A-TIG焊接熔深增加机理

在对活性焊的研究过程中,研究者对活性剂如何增加熔深的机理产生了极大的兴趣,并展开了大

量研究。最早由PWI的研究人员根据实验观察提出了电弧收缩理论,此后美国学者又提出了表面张力梯度改变理论。这两个理论分别从活性剂影响焊接电弧和熔池流动两个角度探讨了熔深增加的原因,然而焊接过程并非电弧与熔池的简单叠加。目前为止,活性剂对电弧-熔池耦合系统的影响研究者们尚未形成统一而全面的认识。

1.1 电弧收缩理论

电弧收缩理论最早由A.G. Simonik^[2]提出。如图1所示,该理论认为在焊接电弧的高温作用下,活性剂会被蒸发分解为原子形态,蒸发的活性剂分子与电弧外围的电子相结合,使得电弧外围带电离子数量减少,电流密度随之增大,结果导致电弧力和熔池内的电磁力增强,影响焊缝熔深。

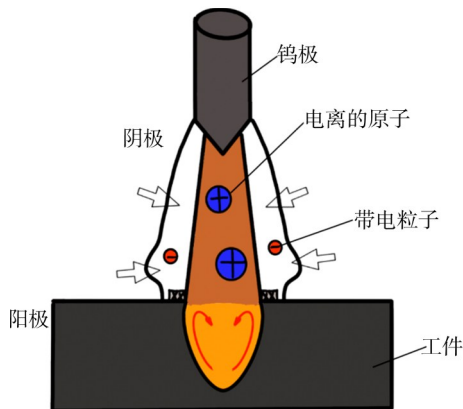


图1 电弧收缩原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of arc shrinkage principle

1.2 表面张力温度梯度改变理论

该理论由美国学者Heiple和Roper^[3]提出。如图2所示,O、S作为表面活性元素对铁合金等金属材料的表面张力有很大影响,而表面张力则对熔池表面的Marangoni对流产生影响,继而影响到焊缝熔深。在常规焊接情况下,熔池表面的表面张力温度系数为负值,即 $d\sigma/dT < 0$,Marangoni对流从中心向周边扩散,进而形成宽而浅的焊缝形状。在A-TIG焊接过程中,由于熔池表面有O、S等表面活性元素存在,表面张力温度系数变为正值,即 $d\sigma/dT > 0$,Marangoni对流从周边向中心汇聚,从而形成窄而深的焊缝。该理论自提出以来,受到众多研究者的关注,并分别采用试验和数值模拟方法两种手段进行了广泛研究。

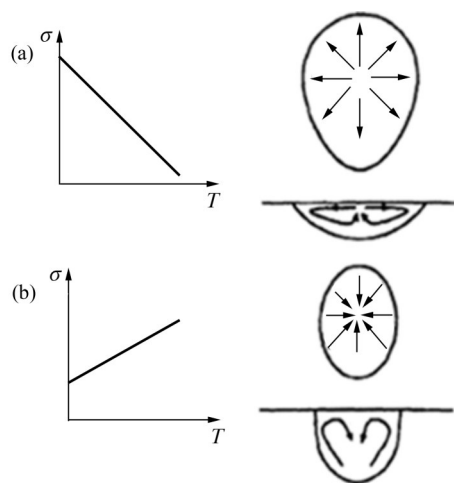
图2 表面张力梯度与熔深的关系^[3]

Fig. 2 Relationship between surface tension gradient and melting depth

2 数值模拟在活性焊接熔池流动及变形方面的应用

在熔池内部,液态金属流动受到各种驱动力的影响,其中主要包括表面张力、电磁力和浮力等。熔池的流动同时伴随有热量与质量的传输,这意味着熔池内部一系列物理化学反应的环境将会被改变,熔池流动的过程又难以直接在实验观测。1983年,麻省理工学院的G.M.Oreper^[4]率先利用数值模拟方法对熔池中流体流动及传热传质过程进行模拟。

不锈钢A-TIG焊历来是A-TIG焊接研究的热点领域。自20世纪80年代中期开始,Zacharia^[5],Wang^[6]等人通过模拟和实验手段对304不锈钢在不同活性组元S含量下的焊接熔池瞬态发展规律进行了研究。他们认为熔池内会产生一个存在最低S浓度阈值的顺时针涡流,当两种S含量不同的金属进行焊接时,熔池形状会向S含量较低的一侧倾斜,且不同S含量也可能导致熔池内出现1个、2个或3个涡流。这些研究成果对于揭示焊缝成形规律具有重要意义。David和Debroy等^[7]分别采用轴对称模型计算了不锈钢表面张力温度系数对定点TIG焊接熔池内金属流动和熔池形状的影响。然而,这些计算结果与实际情况存在一定的差异,原因是研究人员将Fe-Cr-Ni-S系合金简单地替换成Fe-S系合金,忽略了Ni、Cr对S元素的偏聚及活度的影响。

通过David和其他科研人员的数值模拟实验,发现当表面张力温度梯度发生变化时,Marangoni的湍流也将随之调整,最终形成深浅不同的熔池形状。赵玉珍^[8]通过对三维移动热源条件下焊接熔池数学模型的研究,模拟了影响熔池形态的表面活性元素S在不同质量分数下的速度场和温度场。结果发现,S元素的存在会极大改变熔池的流动状态。随着S含量的增加,焊缝熔池深宽比值迅速增加,直至趋向一个稳定值。随着S元素质量分数的不断增加,活性元素S通过影响熔池内部的Marangoni对流,在熔池内部引发数目、大小、方向和位置各异的涡流,当这些涡流的方向从熔池边缘指向熔池中心时,会产生较大的熔深。

以上是研究者们对于表面活性元素S在活性焊接中所起作用的认识。值得注意的是,S作为焊接熔池冶金中的有害杂质元素,比例过高将会对焊缝性能产生负面影响。O在铁系合金中同样起到活性组元的作用,并由此展开了一系列研究。

董文超^[9]针对SUS304不锈钢定点GTAW焊工艺,建立了三维瞬态定点热源作用下的焊接熔池数学模型,深入探讨不同氧含量条件下Marangoni的流动特性,以及它们如何改变焊缝的外观。如图3所示,在相同温度下,表面张力的温度梯度系数随着氧含量的增加而增大;随着温度升高,表面张力温度梯度系数呈现出从正值逐渐减小的趋势,并且随着氧气浓度的提高,这种趋势愈发明显。而氧含量越高,发生变化的临界温度也相应上升。因此,分别以氧含量为30 ppm,100 ppm,200 ppm进行模拟研究,结果发现:当氧含量较低时(30 ppm),熔池表面的Marangoni对流由中心流向四周,这种对流模式有助于阳极斑点将热量传递至周边区域,形成宽且浅的熔池;当氧含量较高时(200 ppm),熔池内Marangoni对流则由四周流向中心,同时阳极斑点的热量随着熔池流动传递到熔池中心底部,形成深且窄的熔池。而在低氧含量与高氧含量之间,熔池内部既有内对流也有外对流,且随着氧含量的增加,内对流作用不断加强,此时的焊缝形状为“勺”形。不同氧含量条件下实验与模拟的熔池形貌如图4所示。

在GTAW过程中,焊缝熔池流动及变形在很大

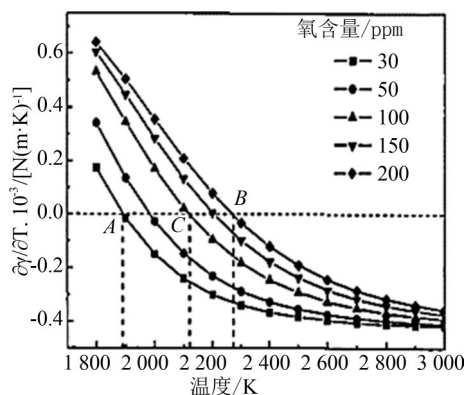
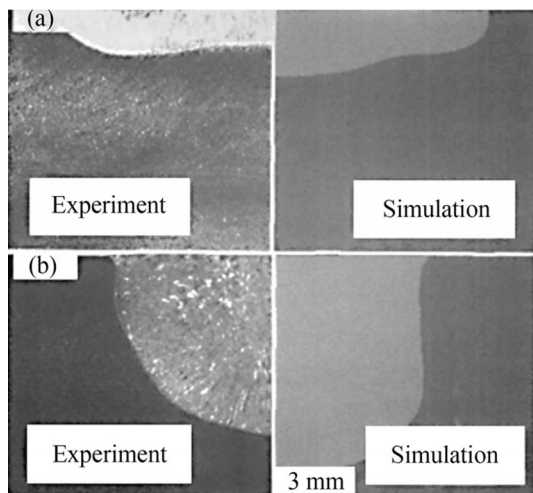


图3 Fe-O系统中表面张力温度梯度系数随氧含量和温度的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of surface tension temperature gradient coefficient with oxygen content and temperature in Fe-O system



(a) 氧含量 40 ppm; (b) 氧含量 212.9 ppm

图4 实验与计算的熔池形貌

Fig. 4 Weld pool profiles with oxygen contents

程度上取决于Marangoni对流模式及强度,而活性元素O含量的浓度及熔池表面的温度分布会对Marangoni对流模式及强度产生影响。同时,焊接参数的变化也会影响熔池表面的温度分布及温度梯度的形成。S. P. Lu^[10]采用FLUENT软件,构建了移动氩弧焊电弧和熔池的数值模型,系统研究活性元素O和焊接参数对Marangoni对流和焊缝形状的影响。实验分为低氧含量(≤ 40 ppm)和高氧含量(≥ 150 ppm),探究电流强度、焊接速度和电弧间隙对熔池流动的影响,如图5~图7所示。认为在高含氧量条件下,焊接参数对焊缝深宽比值有显著影响。当焊接速度或电极间隙增加时,熔池表面的温度梯度减小,向内的Marangoni对流减弱,使得焊缝的深

宽比值降低。在相对较大的焊接电流下,熔池中心区域的等离子体阻力产生更强的向外液体对流将削弱熔池外围区域的向内Marangoni对流。因此,焊缝深宽比值最初会增加,到达一个恒定值以后,电流强度继续增加,但深宽比值保持不变。当氧含量较低时,焊缝深宽比值随着焊接电流的增加而降低。然而,焊缝深宽比值对焊接速度或电极间隙并不敏感。

以上仅是从熔池表面张力梯度变化这一机理展开对熔池流动及熔池形貌形成的讨论。兰州理工大学张瑞华^[11]则对两种增深机理都进行了仿真模拟,他运用PHOENICS软件模拟了O元素质量分数、电弧收缩效应等因素对熔池温度场和速度场的影响。在不添加活性剂的情况下,焊缝中O元素的质量分数较低时(32 ppm),负的表面张力温度系数起主导作用,在熔池中心引发向外的两个涡流,而远离中心的区域温度逐渐降低,表面张力逐渐增大,引起向内的涡流,两股相反的涡流相遇后改变方向,流向熔池底部。添加活性剂后,熔池表面富集大量的活性组元O,使得正的表面张力温度系数起主导作用,在熔池中心形成两个向内的涡流,流向熔池中心底部,大幅提升了熔池深度。此外,研究团队还对电弧收缩进行了数值模拟,通过调节高斯热源的电弧分布参数以及电流密度来实现。尽管流场流速加快,温度提高了150℃,但熔深并未增加,观察熔池流动发现熔池表面的大部分流体依然是从中心流向边缘。当焊接电弧由无活性剂区向有活性剂区移动时,仅仅电压略有升高1.5 V,此时焊接热输入有所增加,但同时表面张力温度系数会相应减小,因此,焊缝熔深并未出现明显增加。作者通过对比模拟结果与实验数据,发现电弧收缩对熔宽有一定的影响,但对熔深的增长作用并不明显,表面张力梯度变化才是不锈钢熔深增加的主要原因。

Bo Qin等人^[12]在异种镁合金活性焊数值模拟中观察到熔池流动呈锭状,在熔池中心的上表面形成从熔池中心向周围流动,而后沿着熔池边界向下流动,靠近焊缝中心线时又向中心汇集,在两侧形成了两个从中心向四周流向的小涡流。外观表现为熔深大,焊缝窄,焊缝边缘出现两个类似咬边的

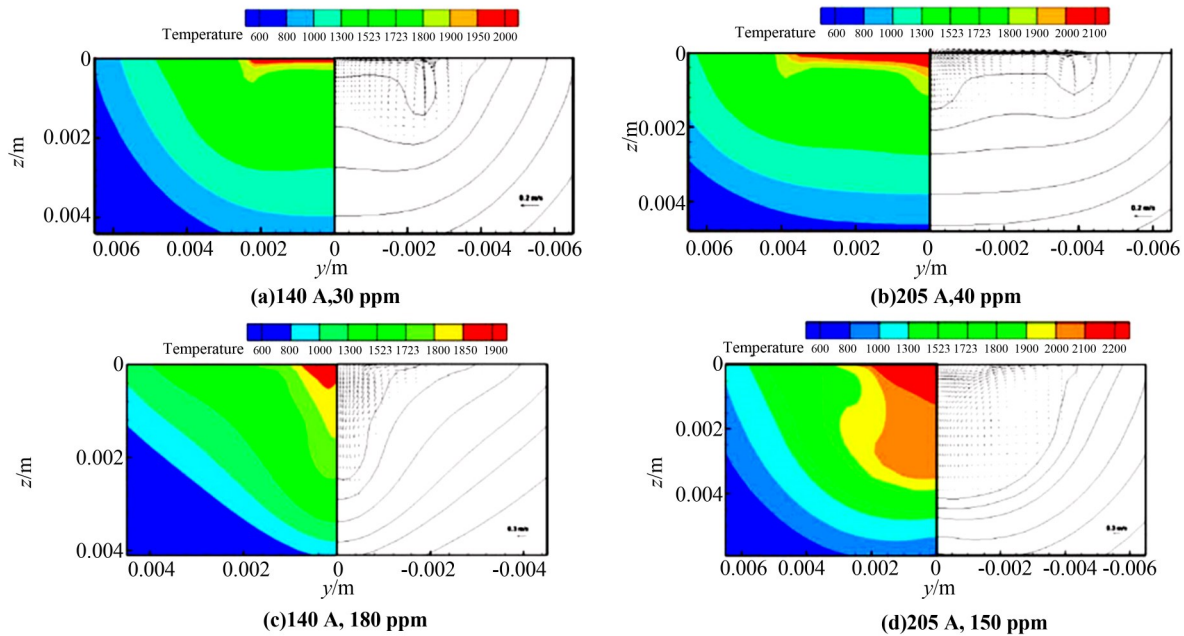


图 5 低氧含量和高氧含量下不同焊接电流下的温度场和速度场

Fig. 5 Temperature and velocity fields at different welding currents for low and high oxygen contents

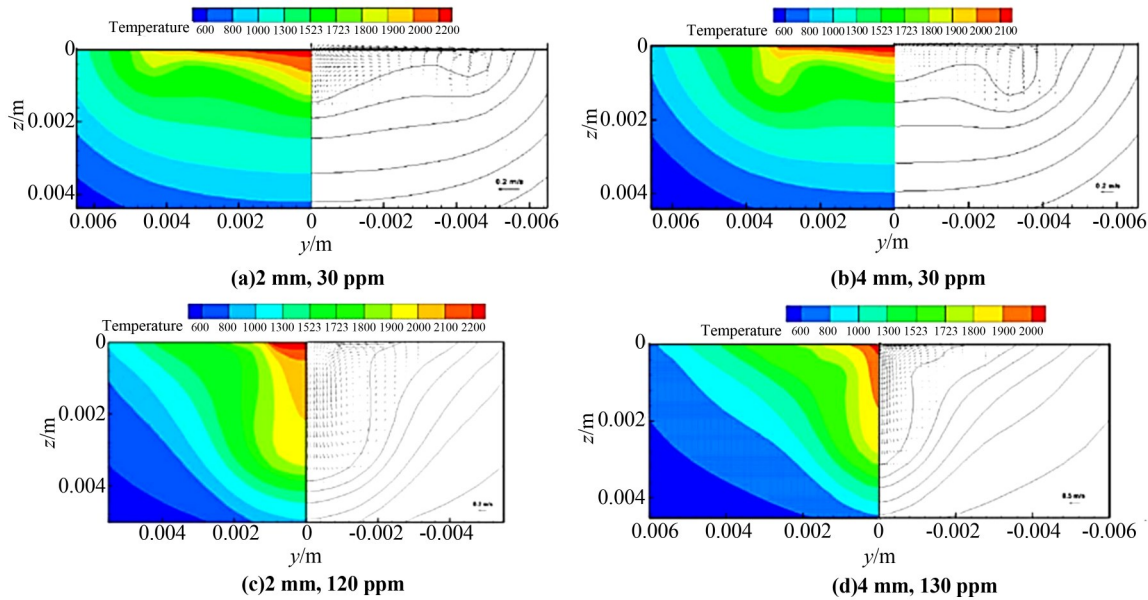


图 6 低氧含量和高氧含量下不同电弧间隙下的温度场和速度场

Fig. 6 Temperature and velocity fields under different electrode gaps for low and high oxygen contents

凹槽。作者认为表面张力梯度的改变是形成这种流动方式的原因,但模拟结果及试验结果都未就电弧收缩进行表征。

Sahoo 等人^[13]根据热力学基本关系和吸附等温式,提出表面张力为温度与活度的二元函数,该函数已用于众多的模拟仿真中并得到与实验相符的结果。然而,这些模拟研究均忽略了熔池内活性元

素分布不均产生的影响。樊丁^[14]在其提出的 AA-TIG 焊方法中,因电弧热分布不均导致熔池表面温度梯度发现非均匀变化,熔池表面 O 元素分布同样表现出不均匀性。为此,建议将焊接熔池表面 O 元素的分布模式分别与熔池表面温度和位置建立关联。运用 FLUENT 软件进行模拟,结果表明,两种情况的模拟结果均与实验数据较为符合,其中 O 元

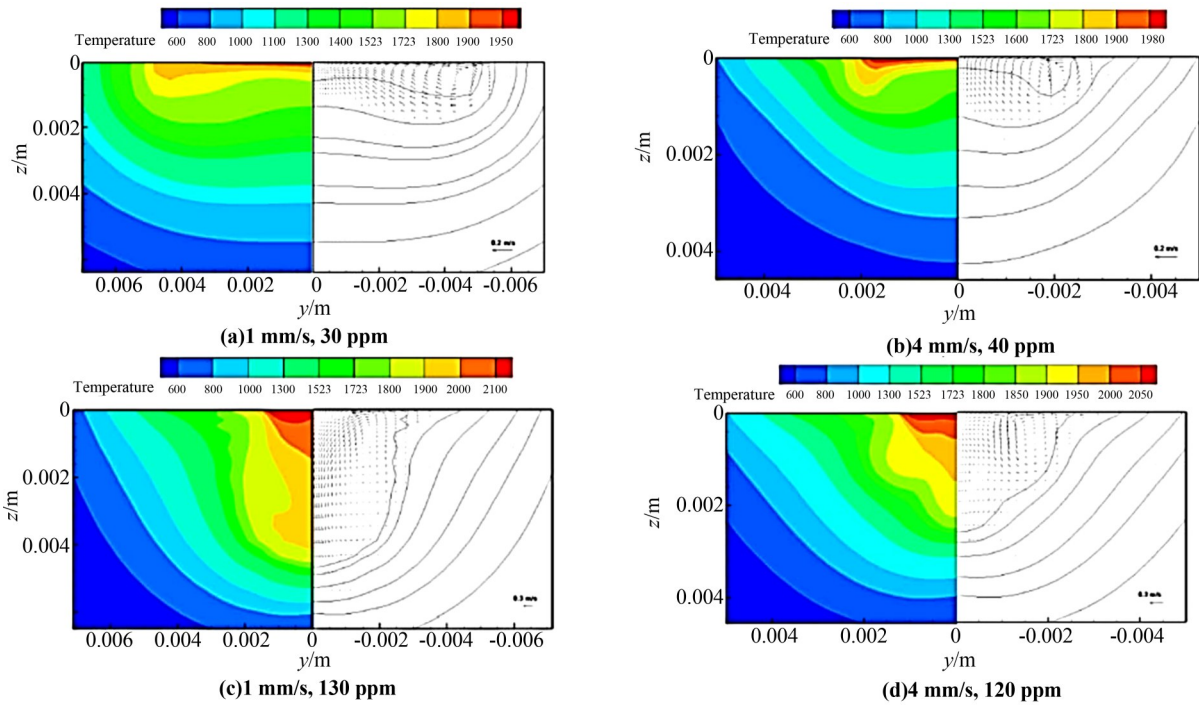


图7 低氧含量和高氧含量下不同焊接速度下的温度场和速度场

Fig. 7 Temperature and velocity fields at different welding speeds for low and high oxygen contents

素与熔池表面温度有关的这一假设更符合实验结果。研究中发现,熔池表面的O元素改变表面张力是AA-TIG焊熔池形貌窄且深的本质原因,熔池内部氧的含量及分布对表面张力无显著影响。

Pourmand等^[15]借助开发的三维CFD模型深入探讨了304不锈钢活性焊接过程中的传热、流体流动、凝固、等离子弧效应、Marangoni对流、磁流体力学以及氧化物颗粒轨迹。预测了304L不锈钢A-TIG焊熔池形状、温度分布、氧化物颗粒浸入熔池后的流动形态和运动路径。Marangoni对流和洛伦兹力被认为是对A-TIG焊接流场和熔池形状形成至关重要的因素,尤其Marangoni对流的影响更为明显,是电磁力的2倍。氧化物颗粒轨迹的数值结果表明,大多数颗粒会被滞留在焊缝熔池中。在熔池表面不同位置释放的许多颗粒当中,约有70%的颗粒最终沉积在焊缝横截面的下半部分。

黄勇^[16]对铝合金交流A-TIG焊熔深增加机理的研究认为,活性剂改变熔池表面张力梯度不是其熔深增加的主要原因。他通过构建移动热源作用下的交流熔池三维数学模型,分析活性剂涂层对模型边界条件和源项的影响。认为,铝合金材料表面

张力很小且易氧化,粘度不高,因此熔池表面的Marangoni对流受到表面张力梯度变化的影响相对较弱;此外,熔池表面的Marangoni对流与熔池内部由电磁力驱动的对流之间的相互作用也弱,难以通过引入活性元素来改变熔池表面张力梯度,使其流动反向,从四周向中心流动。

3 数值模拟在活性焊接残余应力及变形方面的应用

由于焊接过程中温度分布的不均,导致材料在不同温度下的膨胀率和收缩率的差异,从而形成了复杂的三维残余应力。对这类复杂的三维残余应力进行计算是相当困难的,以往凭借焊接应力-应变的经验公式处理一些简单问题,得益于计算机技术的高速发展,如今,关于焊接变形和应力数值分析的研究已经发展为一门新的学科——“计算机焊接力学”。日本的上田幸雄等人^[17]首次在有限元法的基础上,提出了一种热弹塑性分析理论,该理论综合考虑材料的机械性能与温度的相关性,使得复杂的动态焊接应力应变过程的分析成为可能。

Pavan 等^[18]利用有限元模型(FEM)估算了 A-TIG 焊接 316LN 不锈钢焊接接头的残余应力分布,其目的是评估焊接热循环和各种硬化模型对焊接残余应力分布的影响。根据预测结果可知,焊缝金属体积对焊接残余应力的分布有显著影响,同时,各种硬化模型的结果与通过 A-TIG 工艺焊接接头的 X 射线衍射和基于超声 LCR 测量获得的实验测

量数据吻合良好,证明了残余应力的预测精度主要取决于硬化模型。图 8 为不同模型预测单程 A-TIG 焊接接头的纵向和横向残余应力的分布。由图可知,熔合区的拉伸残余应力相对低于热影响区(HAZ)。究其原因,可能是熔化区相成分之间的温度梯度、热膨胀系数不匹配的相对差异,也可能是 HAZ 中明显的局部应变硬化差异造成的。

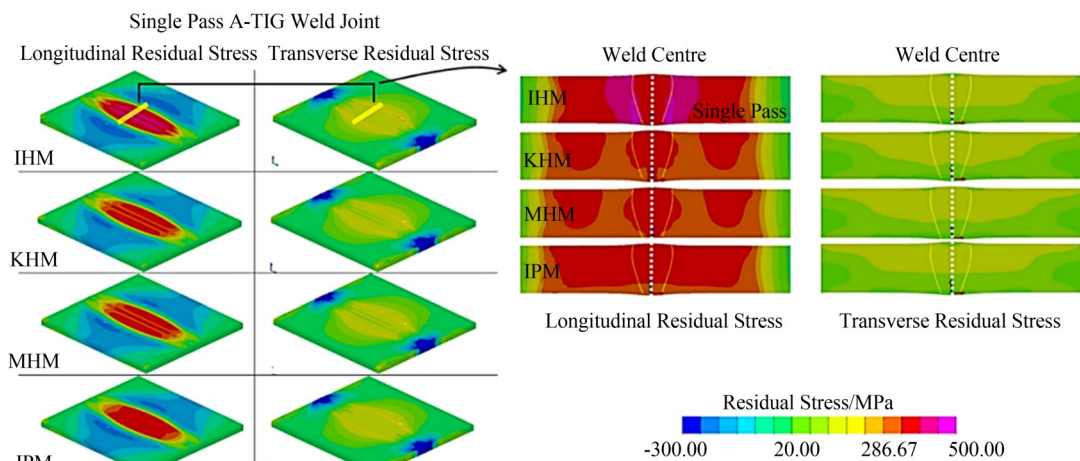


图 8 不同模型预测单程 A-TIG 焊接接头的纵向和横向残余应力分布

Fig. 8 Longitudinal and transverse residual stress distribution in single-pass A-TIG weld joint predicted by various models

目前,活性焊接中应用数值分析进行焊接残余应力和应变预测的研究鲜有报道,但数值分析在预测焊接变形和应力的预测已有了一整套成熟的理论。A Bachorski 等人提出了收缩体积法的焊接变形有限元预测理论^[19],该方法对焊接变形的主要驱动力做了另一番假设,以金属受热膨胀为主驱动力并对大型复杂结构的变形问题进行预测,预测结果较为精确,证明该理论有一定的可行性,但它对焊接残余应力的预测不够准确。从 20 世纪 90 年代起,连续统力学理论进入焊接研究人员的视野,它被用来解决一些线性、对称和确定的问题^[20]。在实际应用过程中,材料的非线性往往不可忽略,这就要求在对焊接过程进行热力模拟时需结合有限差分或有限单元法。

此外,在焊接数值模拟中,如何提高焊接数值模拟精度及效率一直是学者们关注的重点问题之一。焊接热源、网格的划分以及并行有限元计算技术被认为是焊接力学模拟中的关键问题。关于焊接变形可采用粗网格和短热源两种方法进行计算,

应力问题采用细网格和短热源计算。

4 数值模拟在活性焊接中活性剂过渡方面的应用

阴极斑点常见于铝镁合金交流 TIG 焊的熔池表面,因其具有电流密度大、温度高、寻找氧化膜的特点,正离子会在阴极电场作用下高速撞击氧化膜,使得氧化膜破碎、分解而被清理掉,具有清除氧化膜的作用。因此研究阴极斑点在熔池表面的产生及衍化情况有利于表征熔池表面电流密度分布和温度场变化过程,对不同活性元素在熔池进表面的过渡行为,进而控制活性元素进入熔池及阴极清理作用具有重要意义^[21]。

兰州理工大学^[22]研究发现,分别使用氧化物活性剂(TiO_2 、 SiO_2 、 MnO_2)和卤化物活性剂(MnCl_2 、 CaF_2)对熔池表面阴极斑点数量、大小及速度都会产生不同影响。当使用氧化物活性剂时阴极斑点的速度和数量都增加,而卤化物活性剂正好相反,除

TiO_2 外,阴极斑点数量不再随电弧呈线性变化。图9为不同活性剂一周期内阴极斑点衍化的过程,横坐标代表阴极斑点远离熔池中心的距离,纵坐标为阴极斑点在阴极表面特定位置上的数量占比。不同于普通的TIG焊,活性剂粉末在熔池表面沉积并在电弧的热作用下形成焊渣,使得阴极斑点更易依附焊渣产生、运动。 SiO_2 与锰化物活性剂条件下熔池表面沉积的焊渣就是导致阴极斑点数量和速度产生变化的主要原因。而氧化物活性剂则容易在熔池表面形成氧化膜进而导致阴极斑点变化。

此外,活性元素经过电弧高温作用容易发生电离,进入熔池影响焊接性能。以 TiO_2 为例,通过对电弧轴线上熔池表面上方1 mm处光谱分析, TiO_2 在熔池表面存在原子态。在低于1350℃时,铝原子和钛原子发生反应产生金属间化合物 Al_3Ti 。这种金属间化合物会增强熔池粘度,同时对焊缝起到弥散强化作用,使得焊缝抗拉强度提高。另一方面,使用 TiO_2 活性剂时,作用在熔池上的电弧力和电磁力更强,熔池流动加剧,更多热量随着熔池流动被带到熔池边缘和底部,导致在这些区域形核困难。

目前活性焊接对于焊缝组织、力学性能的研究不少但多集中于实验测量,应用数值模拟探究活性焊接过程中活性元素的过渡方式及化学反应的深层原因才是未来的发展方向。

5 发展趋势与展望

尽管活性焊接技术出现得较早,但其快速发展只出现在近30年,活性剂增加焊缝熔深的机理一直为人们所困扰。与此同时,计算机技术的飞速发展使得数值模拟手段不断完善,为深入了解焊接过程中发生的现象提供了一种有效的工具。

(1)关于活性元素引入增加熔深的机理,目前主要集中在活性元素对熔池表面张力温度系数以及熔池流动的影响规律的试验研究和数值分析上,而关于活性元素在电弧-熔池耦合系统中的过渡行为及其影响的定量分析还很缺乏,这尤其表现在活性元素在电弧中的过渡行为和熔池表面的吸附行为上。即使关于活性元素如何影响熔池金属表面张力和流动行为的机理,当前的研究也主要集中在活性元素O或S对不锈钢熔池金属的影响上,很少有针对其他母材金属和活性剂的深入讨论。因此,针对实际焊接工艺过程构建活性元素在电弧-熔池耦合系统中的完整过渡模型,定量分析基于熔池表面实际形貌的熔池流动行为,这是深入理解活性元素引入增加熔深的关键,也是开发新型活性焊接方法以控制焊缝成形和质量的基础。

(2)目前,关于活性元素引入如何影响焊缝性能和焊缝表面成形机理的研究还不够深入。加强

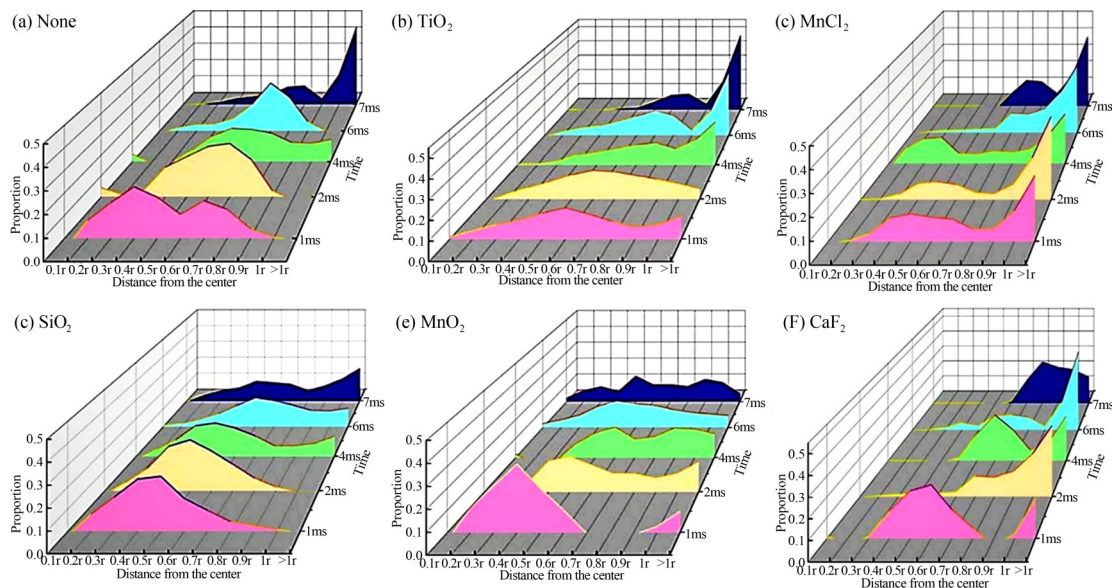


图9 使用不同活性剂时同一周期内阴极斑点衍化行为

Fig. 9 Cathode speckle evolution behavior in the same period with different active fluxes

探究活性元素在低温凝固阶段中的冶金行为及其对熔池金属相变过程、熔渣行为和焊缝性能的影响规律和机理,将促进活性元素引入精细控制技术和新型活性焊接方法的创新发展,推动活性焊接方法的工业应用。

参考文献:

- [1] 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(08):1-4+58.
PENG X Y, LING Z M, LIAO J, et al. Research Progress of A-TIG Welding [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(08): 1-4+58.
- [2] Simonik A G. The Effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of the electronegative elements[J]. Welding Production, 1976(3): 49-51
- [3] Heiple C R. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry[J]. Welding J., 1982, 61.
- [4] Oreper G M, Szekely J. The effect of an externally imposed magnetic field on buoyancy driven flow in a rectangular cavity [J]. J. Crystal Growth, 1983, 64(3): 505-515.
- [5] Zacharia T, David S A, Vitek J M, et al. Modeling the effect of surface active elements on weld pool fluid flow, heat transfer and geometry[C]//International conference on trends in welding research, Gatlinburg, TN, USA, 1989.
- [6] Wang Y, Shi Q, Tsai H. L. Modeling of the effects of surface-active elements on flow patterns and weld penetration [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2001, 32(1): 55-57.
- [7] David S A, DebRoy T, Vitek J M. Phenomenological Modeling of Fusion Welding Processes[J]. MRS Bulletin, 1994, 19(1): 29-35.
- [8] 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].机械工程学报,2004(09):138-143.
ZHAO Y Z, LEI Y P, SHI Y W. Effects of surface-active elements sulfur on flow patterns and depth/width ratio of welding pool [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004(09): 138-143.
- [9] 董文超,陆善平,李殿中,等.微量活性组元氧对焊接熔池Marangoni对流和熔池形貌影响的数值模拟[J].金属学报,2008(02):249-256.
DONG W C, LU S P, LI D Z, et al. Numerical Simulation of effects of the Minoractive-Element Oxygen on the Marangoni convection and the weld shape [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008(02): 249-256.
- [10] Lu S P, Dong W C, Li D Z, et al. Numerical simulation for welding pool and welding arc with variable active element and welding parameters [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(6): 509-516.
- [11] 张瑞华,尹燕,樊丁,等.A-TIG焊熔深增加机理的数值模拟[J].机械工程学报,2008(05):175-180.
ZHANG R H, YIN Y, FAN D, et al. Numerical Simulation of the Mechanism for Penetration Increasing of A-TIG Welding [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008(05): 175-180.
- [12] Qin B, Qu R, Xie Y F, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the TIG (A-TIG) Welding of Dissimilar Magnesium Alloys [J]. Materials, 2022, 15(14): 55-57.
- [13] Sahoo R, Debroy T, McNallan M J. Surface tension of binary metal surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy [J]. Metallurgical Transactions B, 1988, 19: 483-491.
- [14] 樊丁,黄自成,黄健康,等.活性元素氧对AA-TIG焊熔池传输行为影响的数值模拟[J].焊接学报,2016,37(03):62-66+131-132.
FAN D, HUANG Z C, HUANG J K, et al. Numerical Simulation of the effect of active- elemental oxygen on the transport behaviour of the AA-TIG welding pool [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2016, 37(03): 62-66+131-132.
- [15] Pourmand S, Jafari A R, Ebrahimi A. Numerical investigation of heat, flow and particle trajectory in A-TIG welding pool of 304L-SS [J]. Welding in the World: Journal of the International Institute of Welding, 2020(12): 64.
- [16] 黄勇.铝合金活性TIG焊接法及其熔深增加机理的研究[D].甘肃:兰州理工大学,2007.
HUANG Y. Study on Activating TIG Welding and Mechanism of Fluxes Increasing Weld Penetration for Aluminum Alloys [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2007.
- [17] 汪建华,陆皓.焊接预测理论和数值模拟技术的发展[J].造船技术,2001(04):23-26.
WANG J H, LU H. Development of Welding Prediction theory and Numerical Simulation Techniques [J]. Marine Technology, 2001(04): 23-26.
- [18] Pavan A R, Arivazhagan B, Sharma G K, et al. Influ