

# 焊接电弧行为特征 和稳定性评价研究 与进展



朱志明 程世佳 符平坡 于英飞

清华大学机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室,北京 100084)

**摘要** 电弧是最常用的焊接热源,对焊接电流和电弧电压的动态变化规律、电弧形态及其动态行为和特征参数等进行研究和分析,可实现对焊接过程稳定性的评价和有效控制,有助于提高焊接制造的智能化水平、焊缝成形和焊接接头质量。归纳总结了国内外学者在分析处理焊接电流和电弧电压信号以对焊接工艺稳定性进行评价、基于视觉传感和图像处理的电弧燃烧和熔滴过渡行为表征和定量分析、焊接电弧数值模拟等方面的研究和发展,以期对焊接电弧及其动态行为特征的研究方法、现状有一个全面和充分的认识,促进研究工作的深入开展和在工程实际的广泛应用。

**关键词:** 电弧动态行为 稳定性评价 视觉传感 图像处理 数值模拟

**中图分类号:** TG403

## 0 前言

焊接电弧是在一定的电压、电流参数和环境条件下、在具有适当距离的两电极之间产生的强烈持久的气体放电现象。焊接电流和电弧电压等工艺参数的调整 and 变化会实时地反映在电弧形态及其动态行为中,直接影响电弧燃烧稳定性和熔滴过渡行为;反过来,受

外界环境影响,电弧燃烧行为和形态变化、熔滴过渡模式和行为会直接导致焊接电流和电弧电压的动态改变。进一步,焊接电流和电弧电压、电弧形态及其动态行为决定了焊接过程的电弧热、力幅值和分布,进而影响焊缝成形及焊接接头质量。因此,对焊接电流和电弧电压的动态变化、电弧形态及其动态行为和特征参数进行深入研究和分析,可以实现对焊接过程稳定性进行评价和有效控制,具有重要理论意义和工程应用价值。

对焊接电弧燃烧行为和稳定性的研究和评价,起

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51775301)

步于对焊接电流和电弧电压信号的监测、处理和分析。视觉传感技术在焊接中的应用使得对焊接过程稳定性的分析和研究取得了重要进展。利用视觉技术对焊接过程进行监测,可以更直观地实时了解焊接过程的电弧燃烧和熔滴过渡行为。进一步,基于对视觉传感图像的处理,可以对焊接电弧燃烧和熔滴过渡行为等进行深入的量化分析和研究。高速摄像技术的发展,使得所获得视觉图像的时间分辨率得到了极大提升,可以实现对熔滴过渡、高频电弧等电弧形态的高速变化过程以及对电弧某一时刻的特定形态的观察和记录,从而可以获得常规观测手段难以捕捉到的电弧微观行为变化。

此外,由于焊接电弧传热、传质过程的复杂性,许多问题难以用试验研究的方法一一确定,随着计算机技术的发展,数值模拟方法成为研究焊接电弧及其动态行为的有力手段,有助于更深入地理解焊接电弧的物理特性和本质。

归纳总结了国内外学者对电弧行为特征和焊接工艺稳定性评价的研究和发展,涉及基于焊接电流和电弧电压信号分析处理的焊接工艺稳定性评价、基于视觉传感和图像处理的电弧燃烧及其动态行为表征和定量分析、焊接电弧数值模拟等,以期对焊接电弧及其动态行为的研究方法、现状有一个全面和充分的认识,促进研究工作的深入开展和在工程实际的广泛应用,进一步提高焊接制造的智能化水平、焊缝成形和焊接接头质量。

## 1 基于电流和电压信号的焊接工艺稳定性评价

焊接电流和电弧电压包含有大量反映电弧燃烧稳定性和熔滴过渡行为等焊接工艺性能、甚至焊缝成形及焊接接头质量的客观信息。有效处理和深入分析焊接电流和电弧电压信号,可客观评价焊接工艺性能,探究电弧燃烧过程和机理、熔滴过渡模式和行为,也可为进一步提高电弧燃烧和熔滴过渡稳定性、改善焊缝成形和焊接接头质量提供依据。

Mita 等人<sup>[1]</sup>在 1987 年最先提出了一种基于焊接电流和电弧电压波形的电弧稳定性评价体系。Suban 等人<sup>[2]</sup>将数学统计方法应用于焊接电弧的稳定性评价,通过焊接电流和电弧电压的动态变化波形和特征参数概率分布、工作点电流和电压的耦合分布,分析了不同保护气体下的电弧稳定性。高理文等人<sup>[3]</sup>提出了基于自相关分析的定量评价方法,从焊接电流和电弧电压信号中提取自相关函数峰值间距的变异系数,作

为电弧熔滴过渡过程稳定性评价的量化指标。谢煌生等人<sup>[4]</sup>提出了一种基于电流样本熵的焊接稳定性评定方法,选用样本熵的均值与标准差的乘积来量化评价焊接过程的稳定性。石永华等人<sup>[5]</sup>利用焊接电弧电压信号的标准差和差异系数的倒数作为评价电弧稳定性的指标,通过试验研究了不同工艺条件下水下湿法药芯焊丝焊接的电弧稳定性。

上述研究借助对焊接电流和电弧电压的处理,通过分析基于电流电压概率密度分布和时间频数分布,提取样本熵、标准差和差异系数的倒数等特征参数来衡量和评价焊接工艺和电弧燃烧稳定性,简单方便,但直观性较差。

## 2 基于视觉传感和图像处理的电弧行为表征

电弧图像是电弧形态的视觉表现,是焊接电流和电弧电压等工艺参数变化和焊接过程稳定性的最直接体现,除了能够体现焊接过程、电弧形态等定性变化过程,电弧图像还包含有大量与焊接过程稳定性直接相关的量化信息和电弧形态特征参数。

随着视觉传感技术的发展,成像设备所能捕捉和识别的波谱可覆盖几乎全部电磁波范围,从  $\gamma$  射线到无线电波,可对非人类习惯的图像源进行深度加工。借助视觉传感技术对焊接电弧进行实时观测,通过图像采集和处理,提取其特征参数并研究特征参数与焊接过程稳定性之间的相互关系,可实现对焊接工艺过程稳定性的量化分析和评价,具有很强的直观性,并可实现非接触测量。

早在 1960 年, Yoshida 等人<sup>[6]</sup>就引入极限弧长的概念来衡量电弧的稳定性,但是,因缺少视觉传感和图像处理技术的辅助,极限弧长只能够在特定的情况下进行测量。Yamada 等人<sup>[7]</sup>2007 年开发了图像处理系统来获得 MAG 焊中电极摆动、熔滴尺寸、电弧长度、电极角度、焊接飞溅路径和数量等量化数值,其分析图像如图 1 所示。

Wang 等人<sup>[8]</sup>采用基于高速摄像的视觉检测系统研究了旁路电弧耦合焊接工艺中的电弧特征、主路和旁路电弧间的相互作用以及金属过渡的形式,如图 2 所示。研究发现:旁路电弧电压对焊接工艺的稳定性影响较大;熔化电流的大小和焊丝与工件的间距(图 2a 中的  $d_2$ )决定了金属过渡的具体形式;不同焊接方向下的金属过渡形式不同(图 2a 和图 2d)。当熔化电流较大且焊丝与工件的间距  $d_2$  较小时,可以形成熔化金属的桥接过渡形式(图 2b),能够显著提高电弧稳定性、

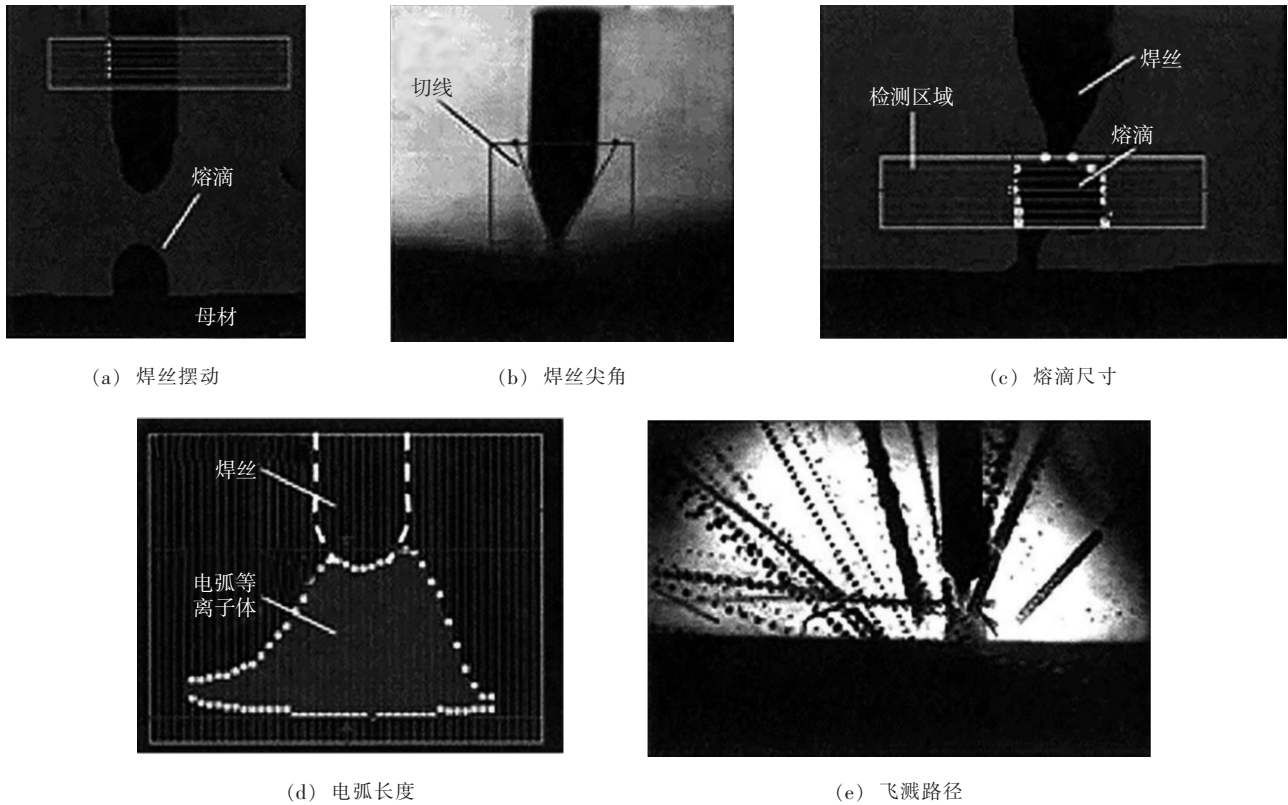


图1 基于图像处理的MAG焊相关参数量化分析

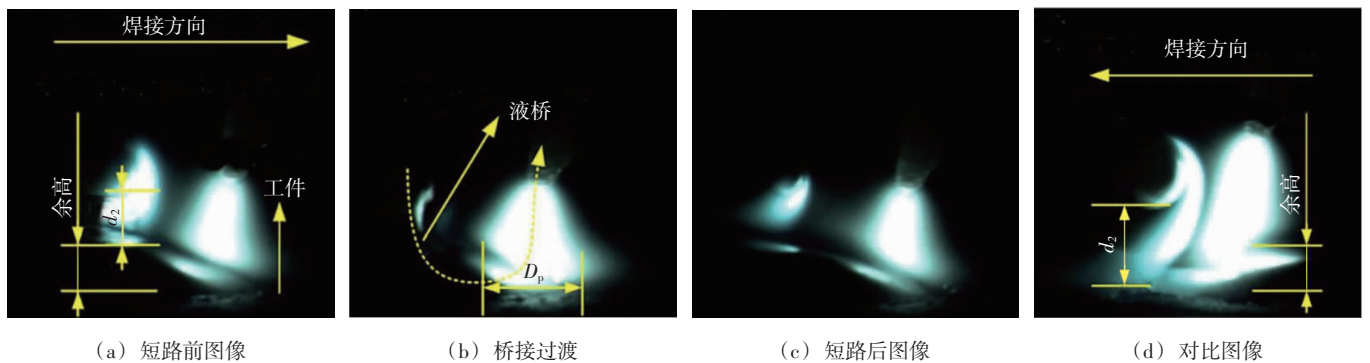


图2 不同焊接方向下的金属过渡形态

焊丝熔敷率和焊接效率。

Yang 等人<sup>[9]</sup>采用高速摄像摄取了不同脉冲频率下的电弧形貌,并同步采集了电弧的纵向压力,发现电弧纵向压力的变化与电弧图像90%灰度强度以上区域面积的变化趋势一致,并验证了高频脉冲焊产生的电弧收缩现象,图3所示是不同脉冲频率下的电弧形貌与区域面积。

2016年,Shigeta 等人<sup>[10]</sup>研发了量化评定焊接稳定性的系统,基于高速摄像和图像处理对与电弧稳定性相关的电弧波动、焊接飞溅的数量和尺寸等进行了分析,如图4所示。将量化分析结果与人工感官评定

进行对比发现,对电弧中心波动的均方根和标准差的量化分析结果、通过计算二值化图像边界上白色像素点获得的焊接飞溅的数量和尺寸的量化分析结果与人工感官评定均具有良好的一致性。

Cho 等人<sup>[11]</sup>用CCD相机拍摄GTAW电弧的正面图像,采用Abel逆变换算法将电弧图像的灰度分布转换成沿电弧半径的辐照度分布,然后结合GTAW的电弧辐照度、温度和电流密度的物理关系,提出了电弧高斯热流模型,并根据电弧等离子体的强度分布,确定了电弧的有效半径;采用该模型对不同气体流量下的空心钨极气体保护焊的焊接过程进行模拟,获得了与实

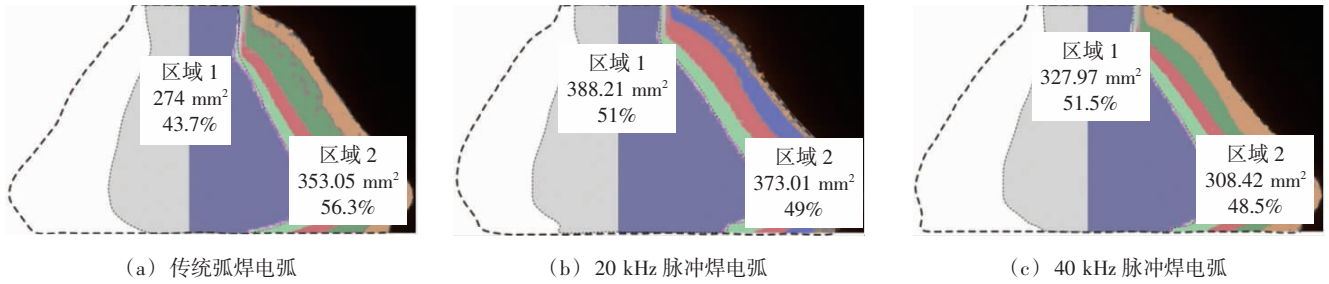


图3 不同脉冲频率下的电弧形貌与区域面积

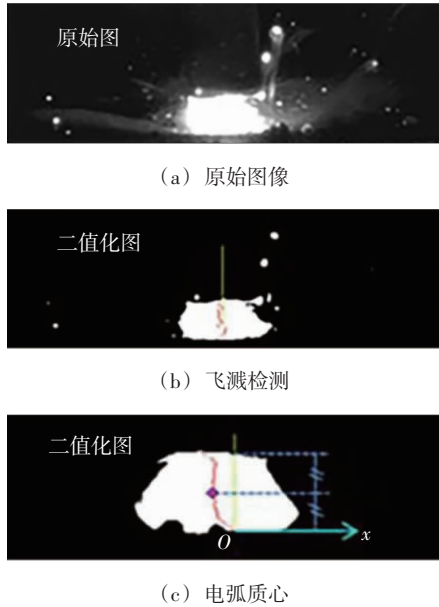


图4 基于电弧图像的焊接飞溅检测与电弧质心标定

实际情况一致的预期结果,其处理过程如图5所示。该研究创造性地在电弧图像的灰度与电弧的热、力分布之间建立了有机联系。闫思博<sup>[12]</sup>利用高速摄像机拍摄了TIG焊接高频脉冲电弧的彩色图像,研究了频率高达20 kHz时高频电弧在脉冲周期内的变化过程,如图6所示。韩永全等人<sup>[13]</sup>利用高速摄像机和汉诺威分析仪分别对铝合金变极性TIG焊接过程中的变极性电弧形态及电信号进行采集和分析,证实了较小焊接参数下的方波变极性优于正弦波变极性的电弧稳定性。王聪<sup>[14]</sup>在定性研究DE-GMAW电弧图像的基础上,进一步采用图像处理及匹配算法对电弧的边缘进行识别,并对传统处理方法与形态学处理方法进行了对比。

董文亮<sup>[15]</sup>对短间隙大电流真空开关电弧形态特性进行了量化分析,结合电弧面积和周长的变化速度,分析了电弧在燃烧过程中的受力情况。郭波等人<sup>[16]</sup>则在

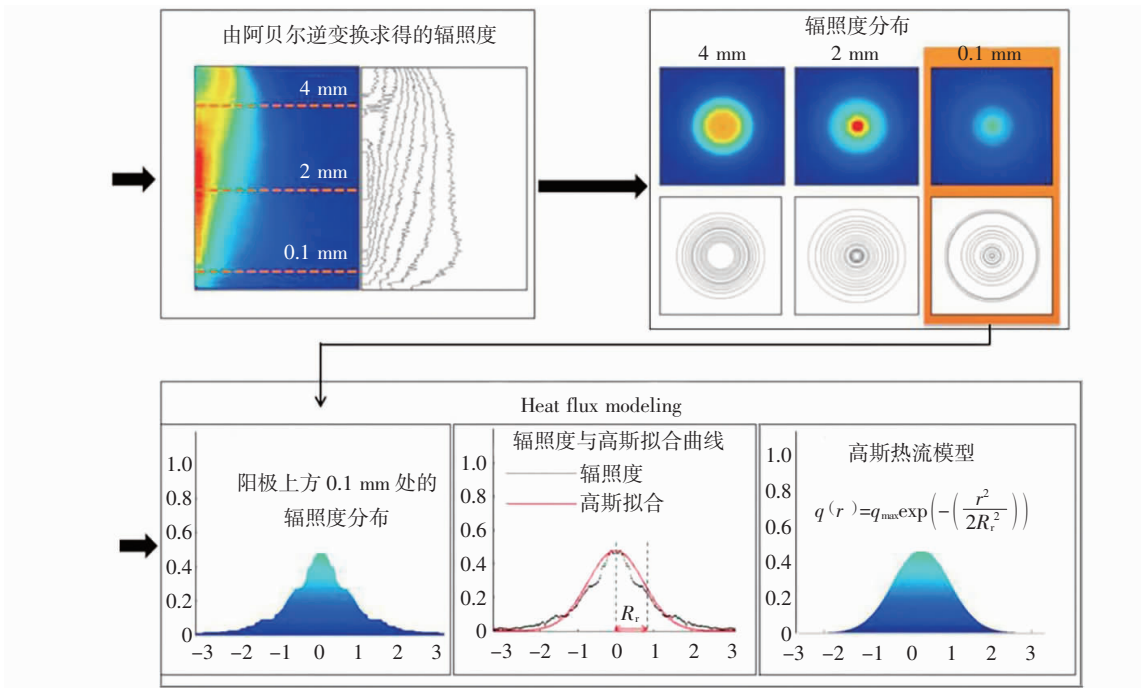


图5 Abel变换过程和高斯热流模型

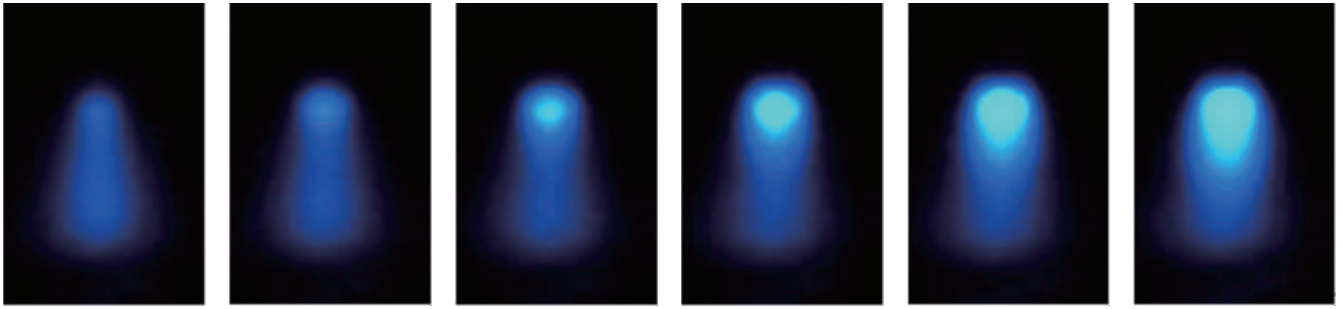
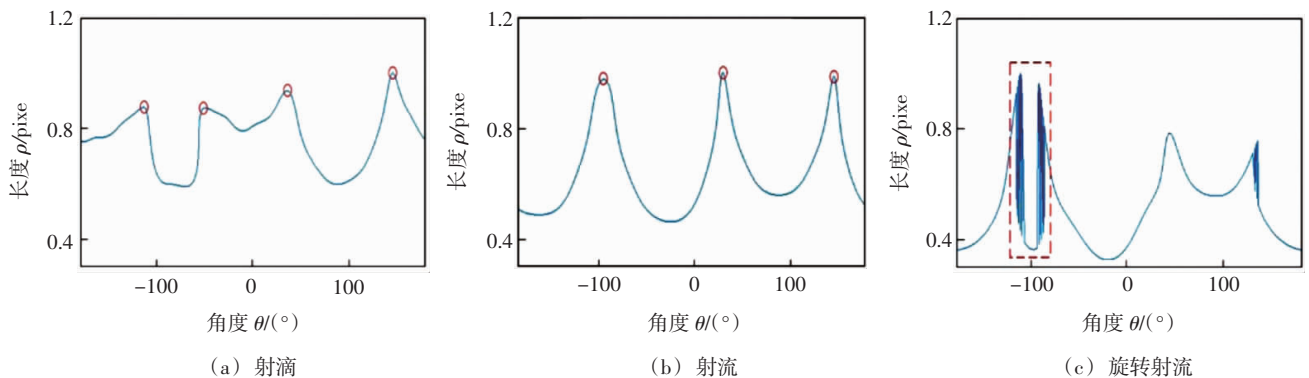


图6 20 kHz 电弧的高速摄像图像

对电弧边缘进行识别的基础上,建立了以电弧质心为极点,以电弧边缘至质心的距离为极长的极坐标系。在电弧极坐标系下通过统计  $\theta - \rho$  曲线的波峰点个数实现对射滴过渡、射流过渡和旋转射流过渡的有效识别,如图7所示。

视觉传感和图像处理技术在研究焊接电弧特征中的应用,使得对焊接过程稳定性的量化分析和研究取得了重要进展,人们能够利用视觉技术对焊接过程进行监测,实时了解焊接过程信息,进而可望实现基于视觉传感的焊接过程控制。

图7 电弧边缘的极坐标系  $\theta - \rho$  曲线及不同熔滴过渡形态识别

### 3 焊接电弧数值模拟

电弧作为焊接热源,存在着传导、对流和辐射等传热过程,也伴随着层流和紊流这两种类型的流体运动<sup>[17]</sup>。数值模拟也是研究焊接电弧的有力手段。目前,对于焊接电弧的数值模拟研究大多是将电弧的磁流体力学模型(MHD)和金属过渡的流体体积模型(VOF)相结合,并假设电弧区域处于完全的氩气保护状态,而忽略了金属汽化的影响。

Schnick 等人<sup>[18]</sup>提出的 GMAW 电弧模型如图8所示。首次考虑了金属汽化影响,实现了对电弧径向温度和径向电流密度分布的预测,获得了完全不同于传统 TIG 电弧的热辐射分布,发现 2 000 ~ 5 000 K 温度下的汽化金属会在弧心和电弧边缘积累。

张晓鸿等人<sup>[19]</sup>对自由状态下的 TIG 焊电弧行为进行了数值模拟,获得了不同电流下的 TIG 焊电弧热

场和流场分布规律,同时验证了 TIG 焊电弧的热场呈现典型钟罩形态,如图9所示。殷凤良<sup>[20]</sup>对等离子弧焊进行数值模拟,研究了焊接电流、离子气流量、弧长等工艺参数以及钨极形状和喷枪结构对电弧的影响。朱胜等人<sup>[21]</sup>通过数值模拟研究发现,在纵向磁场作用下,MIG 电弧的物理特性发生了较大变化。王新鑫等人<sup>[22]</sup>建立了双钨极耦合电弧的三维准静态数学模型,通过数值模拟得到了不同弧长和钨极间距下耦合电弧的温度场、流场、电流密度和电弧压力分布等。肖磊等人<sup>[23]</sup>对交变磁场作用下的 GTAW 非稳态电弧进行数值模拟,获得了外加交变轴向磁场作用下 GTAW 焊接电弧的温度场、速度场和压力场等,揭示了等离子体最高温度、阳极表面压力分布、阳极表面电流密度分布与时间的关系。

利用数值模拟技术对焊接电弧特征进行研究,替代大量焊接试验工作,可以显著地降低成本,已成为对焊接电弧特征研究的不可或缺的重要方法。

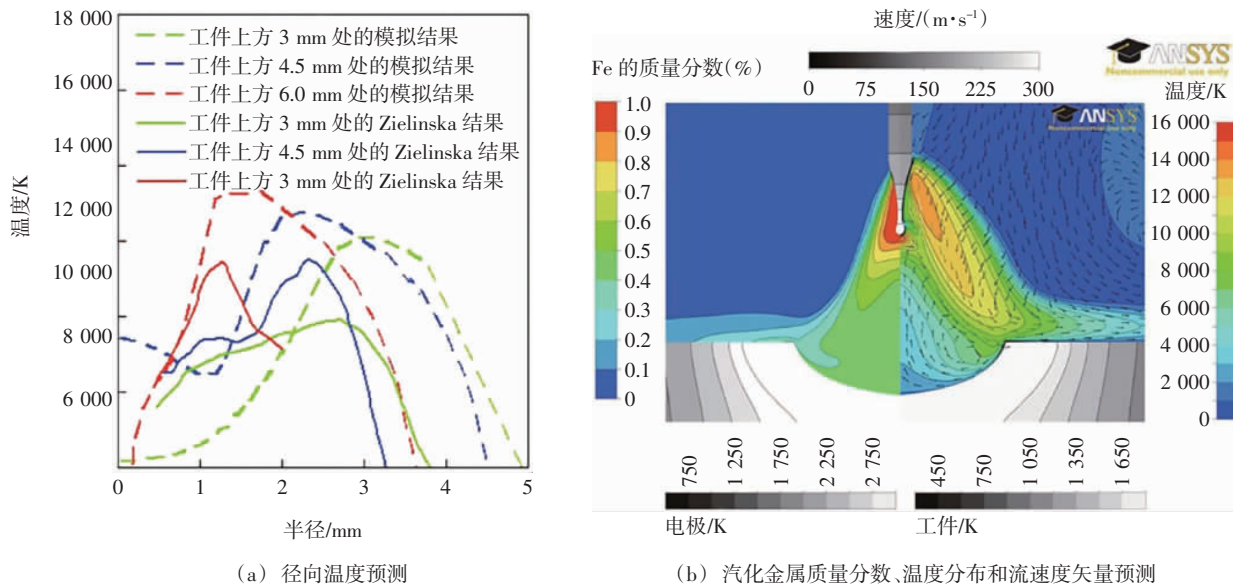


图8 考虑金属汽化影响的焊接电弧数值模拟

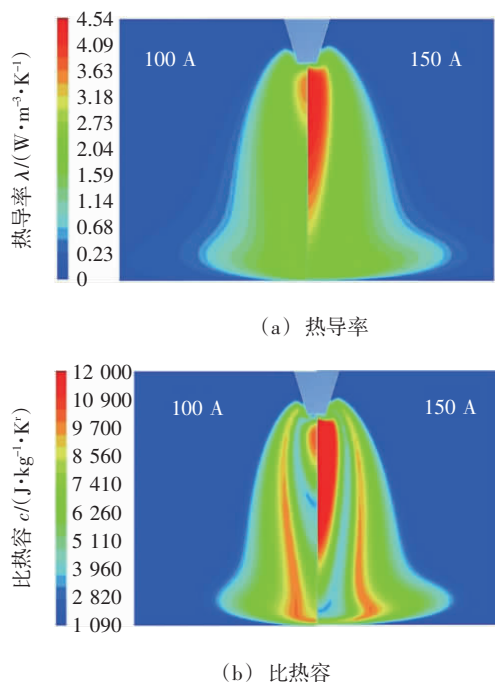


图9 TIG电弧中的氩气热物性参数变化

#### 4 结论

(1)对电弧焊接过程中采集的电流和电压波形进行有针对性的数学处理、特征参数提取和分析,不仅可用于对焊接工艺过程和电弧燃烧的稳定性进行评价,而且在有效提高数学处理实时性的基础上,可用于焊接工艺过程的反馈控制,进一步提高焊接过程的稳定性,改善和提高焊缝成形和焊接接头质量,值得进一步研究完善和在工业生产中推广应用。

(2)伴随着视觉传感和图像处理技术的进步和发展,其在焊接电弧形态、动态行为特征的研究中将发挥越来越重要的作用。并将逐渐从早期的观测和定性分析,向特征参数提取和量化参数的变化规律研究方向发展。高速摄像技术的发展更是为获得常规观测手段难以捕捉到的电弧微观行为变化提供了强有力的手段,为电弧燃烧机理的深入研究提供了基础条件,相关研究值得不断深化和拓宽。

(3)随着焊接电弧数值模拟方法的不断完善和计算速度及精度的提高,数值模拟将能够解决更多有关焊接电弧的复杂深入的问题,极大地提高人们对焊接电弧特征的认知水平,更好地指导生产实践。

#### 参考文献

- [1] Mita T, Sakabe A. Quantitative estimates of arc stability for CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding[J]. Japan Welding Society, 1987, 5(1): 75-80.
- [2] Suban M, Tušek J. Methods for the determination of arc stability[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003(143-144): 430-437.
- [3] 高理文, 薛家祥, 陈辉, 等. 基于自相关分析的电弧焊熔滴过渡过程稳定性的定量评价[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 29-32.
- [4] 谢煌生, 傅智河, 王悦新, 等. 基于电流样本熵的脉冲MIG焊稳定性评定[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 95-99.
- [5] 石永华, 郑泽培, 黄晋. 水下湿法药芯焊丝焊接电弧稳定性[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 49-53.

[下转第 10 页]

考虑两个层级人员课程内容的连续性和合理性,课程设计以模块化的方式构成,即保证了课程的科学性,又增强了学员学习的灵活性,满足了学员的个性化要求。

国际焊接结构设计师(TWSD)课程已形成独特的、现代的、完整的课程体系,在中国首次形成针对焊接工程技术人员的国际化焊接结构设计人员培训体系。WTI 中德国际集团已在今年获得了国际焊接学会的授权,并在上海成功地举办了中国第一期国际焊接结构设计师培训班,取得了很好的效果。可以相信,随着 IWSD 培训的不断推广,可以更好满足国内目前焊接企业在国际市场竞争中对此类国际焊接人才的需求,为中国焊接企业走向国际市场提供人才保障。

作者简介:

钱强,1962年生,教授级高级工程师,国际焊接工程师;机械工业哈尔滨焊接技术培训中心副主任,IIW 授权(中国)焊接培训与资格认证委员会(CANB)培委会主任;中国机械工业教育协会职教分会副理事长。

[上接第 6 页]

[6] Yoshida T, Abe T, Onoue H. A proposal to easily find out on arc stability of welding electrode[J]. Japan Welding Society, 1960, 29(4): 344-351.

[7] Yamada R, Uenaka A, Kato T. Analysis of welding arc phenomenon with image processing[J]. Electr Furnace Steel, 2007, 78(2): 115-121.

[8] Wang H, Hu S, Wang Z, et al. Arc characteristics and metal transfer modes in arcing-wire gas tungsten arc welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1-4): 925-933.

[9] Yang Mingxuan, Zhen Hao, Qi Bojin, et al. Effect of arc behavior on Ti-6Al-4V welds during high frequency pulsed arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 9-15.

[10] Shigeta M, Takahiro I, Manabu T, et al. Qualitative and quantitative analyses of arc characteristics in SMAW[J]. Welding in the World, 2016, 60(2): 355-361.

[11] Cho D W, Lee S H, Na S J. Characterization of welding arc and weld pool formation in vacuum gas hollow tungsten arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(2): 143-152.

[12] 闫思博. 高频耦合电弧热源特性及工艺性研究[D]. 北京: 北京工业大学博士学位论文, 2012.

[13] 韩永全, 张世全, 庞世刚, 等. 铝合金变极性 TIG 焊接电弧行为[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 51-54, 59.

[14] 王聪. DE-GMAW 电弧图像处理及匹配算法研究[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2013.

[15] 董文亮. 短间隙大电流真空开关电弧形态特性量化研究[D]. 辽宁大连: 大连交通大学硕士学位论文, 2013.

[16] 郭波, 石永华, 易耀勇. 基于电弧形态的熔滴过渡形式识别[J]. 焊接学报, 2017, 38(11): 27-31.

[17] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.

[18] Schnick M, Fuessel U, Hertel M, et al. Numerical investigations of arc behaviour in gas metal arc welding using ANSYS CFX[J]. Frontiers of Materials Science, 2011, 5(2): 98-108.

[19] 张晓鸿, 陈静青, 张康, 等. 不同电流密度下的 TIG 焊电弧行为分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 77-80.

[20] 殷凤良. 等离子弧焊接过程的数值模拟[D]. 天津: 天津大学博士学位论文, 2007.

[21] 朱胜, 王启伟, 殷凤良, 等. 纵向磁场作用下 MIG 焊电弧数值模拟[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(3): 263-267.

[22] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. 双钨极耦合电弧数值模拟[J]. 物理学报, 2013, 62(22): 412-421.

[23] 肖磊, 樊丁, 黄健康. 交变磁场作用下的 GTAW 非稳态电弧数值模拟[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 79-85.

作者简介:

朱志明, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 清华大学焊接研究中心副主任。主要研究方向为: 材料加工(焊接)过程控制及自动化、现代电能变换技术与先进材料加工装备、人工智能与焊接工程应用软件。承担国家、省(部)、企业合作等项目 30 余项, 发表学术论文 100 余篇, 申报国家发明专利 6 项, 获国家教委科技进步二等奖、三等奖各 1 次, 多项成果通过省部级鉴定, 并列入国家级科技成果重点推广计划。