

引用格式: 崔新颖, 李逸文, 董志海, 等. K-TIG 焊接的电弧及匙孔研究现状[J]. 热加工工艺, 2026, 55(15): 14-20. CUI Xinying, LI Yiwen, DONG Zhihai, et al. Research Status of Arc and Keyhole of K-TIG Welding[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(15): 14-20.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232226

K-TIG 焊接的电弧及匙孔研究现状

崔新颖^{1,2}, 李逸文¹, 董志海³, 常宸赫⁴, 常云龙¹

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 中车山东机车车辆有限公司, 山东 济南 250022;
3. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315040; 4. 辽宁新远特种焊接技术有限公司, 辽宁 沈阳 110011)

摘 要: K-TIG 焊接方法具有熔深大、成本低、效率高等优点, 被应用于中厚板焊接中。然而, 在其焊接过程中, 电弧能量和匙孔稳定性难以控制, 容易造成熔深不足、熔池坍塌等缺陷。本文整理了国内外 K-TIG 焊接的最新研究进展, 总结了改善电弧形态和能量的方法, 如外加磁场、外加激光、改变气体成分等, 以及提高匙孔稳定性的工艺方法, 如背部外加焊剂和保护气、改变电流波形, 并展望了 K-TIG 焊接的研究方向。

关键词: K-TIG 焊; 磁场; 激光; 电弧; 匙孔; 电流波形

中图分类号: TG444⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)15-0014-07

Research Status of Arc and Keyhole of K-TIG Welding

CUI Xinying^{1,2}, LI Yiwen¹, DONG Zhihai³, CHANG Chenhe⁴, CHANG Yunlong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. CRRC Shandong Rolling Stock Co., Ltd., Jinan 250022, China; 3. Ningbo Branch, China Ordnance Science Research Institute, Ningbo 315040, China; 4. Liaoning Xinyuan Special Welding Technology Co., Ltd., Shenyang 110011, China)

Abstract: K-TIG welding method has the advantages of deep weld penetration, low cost and high efficiency, which is used in the welding of medium plate. However, in the welding process, it is difficult to control the arc energy and keyhole stability, which is easy to cause defects such as insufficient penetration, collapse of molten pool. The latest research progress in K-TIG welding field in China and foreign countries was summarized. The technological methods for improving arc shape and energy such as applying magnetic field, laser, changing gas composition. The methods for enhancing keyhole stability such as applying flux and protective gas to the back and changing the current waveform were summarized. The future development of K-TIG welding was prospected.

Key words: K-TIG welding; magnetic field; laser; electric arc; keyhole; current waveform

中厚板材被广泛应用于制造业, 是汽车零部件、发动机^[1]、船体结构件生产的核心原材料, 市场需求量巨大^[2]。在中厚板材应用过程中, 急需可靠、高效的焊接。目前, 中厚板多采用多层多道焊的方法^[3], 但是存在工序繁琐、效率低下的弊端^[4], 需要改进。因此, 锁孔型氩弧焊 (keyhole tungsten inert gas, K-TIG) 被提出, 其工艺方法简单, 可节省成本^[5], 具有广阔的应用前景。

K-TIG 的高能量电弧可以实现对中厚板材的单面焊双面成型^[6]。其原理是在传统 TIG 焊接基础上

增大电流, 产生高热量电弧与大电弧压力, 形成贯穿整个板材的匙孔, 完成中厚板材的焊接。与活性剂 TIG (activated TIG, A-TIG) 相比, K-TIG 无需在焊材表面涂覆活性剂, 更易于实现焊接过程的自动化^[7]。与脉冲 TIG (P-TIG) 相比, K-TIG 热输入和熔深更大、焊接速度更快^[8]。与热丝 TIG (H-TIG) 相比, K-TIG 不需要预先加热焊丝, 焊接工序简单, 更适合工业生产^[9]。基于上述优势, 该方法得到广泛关注, 但存在两个重要问题, 一是 K-TIG 电弧的能量不够稳定, 无法实现中厚板材的高效率焊接, 二是匙孔稳定性较差, 影响 K-TIG 的焊接质量。经查阅文献发现, 上述缺陷是由于焊接过程中能量分配不合理导致的。本文将着重讨论 K-TIG 焊的热、力等各种场的耦合, 从电弧特征、熔池流动等角度出发, 深入分析改进该工艺的作用机理。

收稿日期: 2023-09-11 修回日期: 2026-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4602202)

作者简介: 崔新颖, 男, 硕士, 主要研究方向为焊接技术

通讯作者: 常云龙, 男, 教授, 主要从事焊接自动化、磁控焊接技术等方面教学与科研工作; E-mail: sychyl@126.com

1 电弧行为及改善方法

1.1 电弧形态

K-TIG 焊接的电弧行为是复杂的物理化学过程,因电弧强烈的弧光和强对流的电场、磁场^[10],对其进行实时监测和传感控制变得困难。随着科学技术的发展,电弧的观察手段也愈来愈多样化。高速摄像作为一款直观了解电弧形态的设备,被广泛应用。唐君才等^[11]通过高速摄像观察研究了在不同工艺参数下 K-TIG 焊接不锈钢的电弧形态,如图 1 所示。当电流从 300 A 增大到 500 A 时,电弧由扁平状变为钟罩状,电弧得到压缩。但 K-TIG 中增大电流不仅可以压缩电弧,还可通过电流调整增大电弧压力。此外,电流增加导致电弧的收缩不明显,K-TIG 主要采用水冷喷嘴对电弧起压缩作用,水冷降低电弧周围温度,使电弧发生收缩。

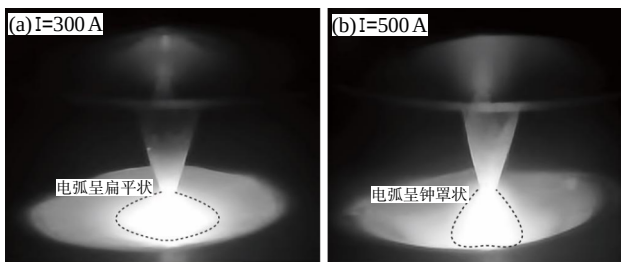


图 1 不同电流下的 K-TIG 电弧形态^[11]

Fig.1 K-TIG arc shape under different currents^[11]

石永华等^[12]将高速摄像与采集到 K-TIG 焊接状态的图像序列进行融合,开发了一种适用于 K-TIG 超强弧光场景的图像融合方法,可以获取熔池、匙孔、电弧及焊缝信息的高动态图像。除直接拍摄以外,石永华等^[13]还通过电弧声信号采集,进行频率特征的提取,以声信号与焊接电流分别为检测与控制变量,实现对 K-TIG 焊接过程板材是否熔透的实时监控。

除硬件设备外,图像分析系统也被开发出来。张昱等^[14]以 Lab View 开发环境为基础,开发出电弧图像与焊接电信号采集与分析系统,实现了复合电弧图像与多路信号的采集与分析。采用此方法可以对电弧形态进行研究但无法就电弧能量问题展开具体分析。肖天骄^[15]利用电弧能量部分以热辐射形式散失这一特性,开发了基于光谱诊断的电弧外轮廓识别系统。根据电弧物理学,建立热辐射与电弧能量的数学模型,获得电弧能量分布与其外轮廓的几何形貌。

随着计算机技术的发展,Ansys Fluent 等模拟软

件得到广泛使用,其中黄勇等^[16]建立了 TIG 电弧等离子体数学模型,得到了 TIG 电弧等离子体的温度场、流场和电势场等,比较了等离子体温度的分布规律。张瑞华等^[17]以 K-TIG 焊枪为研究对象,利用 Fluent 软件对 K-TIG 电弧进行模拟,获得大电流焊接的温度分布、电势分布、电弧压力及等离子体速度场。

高速摄像、相关图像系统及模拟软件各有优缺点,高速摄像能对电弧形态进行最直观的观察,但价格昂贵并且无法对电弧的能量分布进行较仔细的分析。而数值模拟恰好可以弥补了此缺点,并且模拟一般会采用相关试验来验证其准确性。因此,在 K-TIG 电弧的观察方面,高速摄像及其相应图像处理系统和模拟软件相结合的方法将成为今后主要的发展方向。

1.2 提高电弧能量

1.2.1 外加磁场

K-TIG 作为一种匙孔型焊接工艺,主要通过大电流产生的具有穿透性的电弧来实现穿孔焊接^[18],其最大优势为电弧能量集中、热密度高。因此改进方法也多着眼于进一步提升电弧能量密度,其中包括外加磁场法,磁场在微观上可以改变电弧等离子体的运动,在宏观上电弧表现出压缩或扩张的趋势,以此来改变电弧能量。外加磁场主要包括横向磁场、纵向磁场、尖角磁场、旋转磁场四种。

陈金荣等^[19]将纵向磁场引入到焊接过程中,发现直流纵向磁场下电弧受到了压缩,上述现象随着磁场强度增加而趋于明显。而在交流磁场下,磁场强度越高,电弧压缩现象越明显;频率越高,电弧越稳定。Cui 等^[20]采用纵向磁场装置进行实验,建立了单粒子描述模型,分析了纵向磁场下的电弧形状,发现在微观下其形态更为集中,反映在宏观层面即电弧压力与穿透力的增强。

尖角磁场已被证明可以改变电弧形态并提高电弧穿透能力。Nomura 等^[21]用尖角磁场优化 TIG 焊接的焊接速度。Baskoro 等^[22]发现在 TIG 焊接中施加尖角磁场可以降低能耗并提高熔深。Liu 等^[23]研究了尖角磁场对 K-TIG 的影响,通过施加尖角磁场可以改变电弧形状,并降低完全焊透的临界电流。Liu 等^[24]将尖角磁场引入 K-TIG 电弧,改变磁场参数,发现当弧柱与磁场方向垂直时,约束效果大于与其平行时的磁场;极角越小的磁场,熔化深度越高、电弧压力峰值越大,对电弧束缚能力就越大,有效提高了电弧能量及穿透效果。

钟少涛等^[25]针对旋转磁场下的 K-TIG 电弧形态进行分析。发现焊接电弧在焊件同一侧的扫描半径的最大值、最小值及其两者的差值发生改变,在 0~50 Hz 之间,电弧扫描半径的最大值随磁场频率增大而增大。

外加磁场有磁场种类多、低成本高效率等优势,经过多年探索,工艺成熟,作用效果明显。但在磁场的加入过程中,磁场强度及频率无法得到准确控制,无法实现精确焊接。且磁场的引入仍需特殊的设备,不易获取,因此其进一步应用受到了一定限制。

1.2.2 外加激光

外加激光是一种提高 K-TIG 电弧能量的工艺手段。激光-TIG 耦合焊接由 Steen^[26]在 1970 年首先提出,是将物理性质与能量传输机制完全不同的热源作用在同一位置,该方法发挥了激光的高能量优势,弥补了 TIG 熔深浅的缺点,是一种高效稳定的热源。众多学者对其机理进行了研究,其中美国学者 C. E. Albright 发现压缩电弧的原因是电弧从激光束形成的通道中通过,限制了电弧能量的运输通道,提高了能量输入^[27]。

李京洋等^[28]将激光引入到焊接过程中,发现能量配比是影响电弧的关键,当电弧电流值与激光配比恰当,且激光 K-TIG 复合热源间距在 0~3 mm,离焦量为 0 mm 时可以得到稳定的电弧。李伟^[29]通过图像采集系统和图像处理手段,研究高速焊接过程中不同焊接参数下激光 K-TIG 电弧的特性,得出了与上述类似的结论,进一步证明了激光对电弧的影响。Zhang 等^[30]发现在 K-TIG 焊产生小孔后,如果激光束作用在小孔底部,可以增加焊接深度;热源间距离是影响激光-电弧耦合状态的主要因素,但当热源之间的距离 <3 mm 或 >5 mm 时,激光和电弧会解耦,导致焊接过程不稳定。

激光 K-TIG 耦合在 K-TIG 电弧高能量的基础上进一步提高了电弧能量,使 K-TIG 优势得到放大,是一种非常重要的中厚板材焊接方法。但是激光设备非常昂贵且在生产中容易产生电网波动,从而影响企业生产制造。目前激光-TIG 耦合仅在高校科研院所以及尖端企业具有较大使用量,而在企业生产使用很少。

1.2.3 改变气体成分

针对激光 TIG 耦合昂贵的缺点,K-TIG 也可以采用改变外加保护气体成分尽可能降低成本并提高

电弧能量。目前采用的方法包括在纯氩气中加入氦、氮等惰性气体或氢、氧等活性气体^[31]。与单加氩气相比,氢气、氧气、氮气等气体具有更大的比热容和更强的导热性,使电弧温度与冷却效果都得到提高,从而收缩电弧,提高电弧能量^[32]。Traidia 等^[33]针对氦气、氩气不同配比下的电弧形态进行模拟,结果表明:纯氩保护气下的电弧发散,纯氦保护气下的电弧底部收缩,氩氦混合保护气随氦气含量的增加电弧底部逐渐收缩,电弧能量得到提升。

刘政军等^[34]研究 Ar 与 H₂ 混合气体保护下氩弧焊接的电弧特性,并与一般的氩弧焊电弧做了对比。如图 2 所示,发现加入 10% 氢气后电弧轮廓较传统氩弧有收缩的趋势,电磁力变为传统电弧的两倍。电势、温度、电流密度、等离子流速等都明显增大,一定程度上提高了电弧能量,提高了焊接效率。

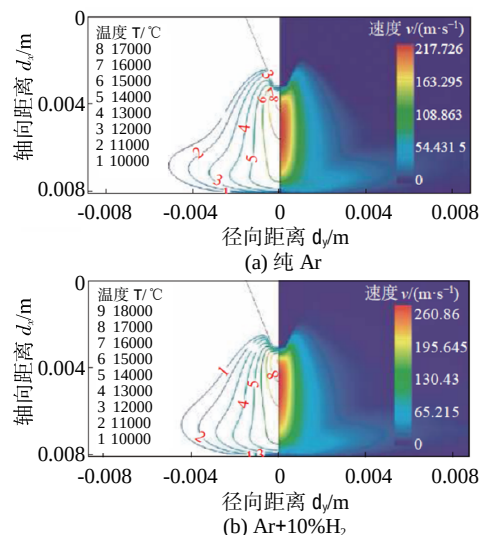


图 2 10% 氢气加入前后电弧温度与流场模拟云图^[34]
Fig.2 Simulation nephogram of arc temperature and flow field before and after addition of 10% hydrogen^[34]

改变保护气体成分的成本相较于激光-TIG 耦合下降,并且电弧能量得到提高,但是制备混合气体的工艺比较复杂,特别是氢气较为活泼,在焊接过程中容易产生爆炸等安全问题。总体上,改变气体成分依旧是改变电弧能量的较好手段。

2 匙孔行为及平衡匙孔的工艺

2.1 匙孔行为

与电流较小,通过机械和气流压缩提高电弧温度,形成匙孔的等离子焊接不同^[9],K-TIG 匙孔主要依赖大电流具有的强电弧热量及电弧吹力。大电流的高热量将板材变成熔融态金属^[35],同时,熔融态金属受

到电弧吹力与重力的作用向下形成匙孔^[36],而金属本身的表面张力使匙孔不至于塌陷,形成稳定的匙孔。在焊接过程中,匙孔要始终保持开放稳定状态^[37]。相关研究表明,K-TIG 匙孔在整个焊接过程各种力的作用下保持动态平衡状态^[38]。随着高速摄像与特殊照相设备的设计及计算机技术的发展,匙孔的观察愈加多

样化。

高速摄像是观察匙孔形态的一个重要工具,徐良等^[39]采用高速摄像对电流为 520 A 时 K-TIG 焊接下的匙孔行为进行了拍摄。如图 3 所示,匙孔在焊接过程中的一定体积内呈现“长大-缩小-长大”的循环过程。

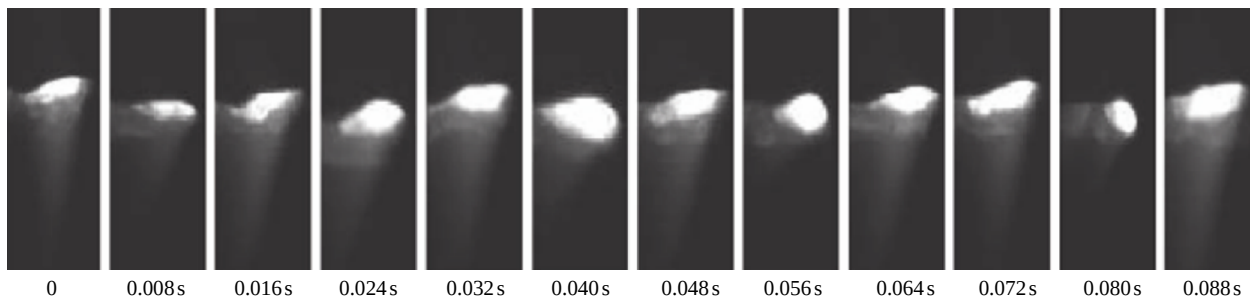


图 3 520 A 时 K-TIG 焊接 Q235 钢背部匙孔变化图^[40]

Fig.3 Keyhole change images of the back during K-TIG welding Q235 steel at 520 A^[40]

González 等^[40]采用摄像装备进行拍摄,发现随着焊接速度的提高,匙孔的几何形状发生了变化,特别是匙孔底部,随着焊接速度的增加,匙孔沿与焊枪前进方向相反的方向移动。Cai 等^[41]采用高速摄像对匙孔正反两面进行拍摄来研究匙孔行为及其稳定性,发现对于 3 mm 厚 10MnNiCr 钢材,稳定的小孔出口直径一般在 5~7 mm。

K-TIG 匙孔观察除了直接拍摄外,还可使用特殊装备进行观察。Liu 等^[42]利用视觉系统对小孔动态行为进行成像。发现小孔对焊接速度和焊接电流变化响应的机理不同,前者主要是靠热平衡变化来进行驱动,后者是由热场和力场变化耦合进行驱动。Cui 等^[43]进行了电弧电压频率特征分析,并将其用于 K-TIG 焊熔深识别中,建立一个多传感器采集系统。结果表明,电弧压力信号的变化间接反映了熔池的震荡,部分焊透与完全焊透的熔池震动状态不同,可以通过传感器来实现对熔池状态的时刻监控。罗震等^[44]选用 Ti 元素作为示踪元素,采用三维重构技术将 K-TIG 匙孔附近未稳定区域液态金属的流动进行了三维建模。其结果印证了焊缝上部的马兰戈尼对流圈,下部表面张力与洛伦兹力导致的对流圈的存在。

除了硬件设备之外,模拟算法也被应用到匙孔的观测中。占爱文等^[45]对匙孔采用 Canny、RANSAC 算法进行了更好的处理,使匙孔的形态得到了更直观、更形象的展示。Chen 等^[46]针对 K-TIG 的对接焊,采用基于霍夫线拟合的图像处理算法,识别了焊接

图像中焊缝中心线,实现了 K-TIG 焊缝的跟踪。陈时雨^[47]采用 Fluent 软件探索了 K-TIG 热力耦合数值模型。将小孔形状参数在定点焊模拟结果中提取出来,探究了小孔形状对小孔表面电弧压力和电弧能量分布的影响。发现当小孔深宽比大于 1 时,小孔对电弧有明显压缩作用。

K-TIG 区别于其他 TIG 焊接方法的是匙孔的形成与稳定^[48],焊接参数把握不合理容易造成无法形成匙孔或者熔池塌陷。采用高速摄像的方法可以对匙孔进行直接观测,但是目前大多观测方法都是以观测匙孔背部为主,不能就匙孔内部进行观察,并且装配困难,也无法就能量问题研究 K-TIG 匙孔的稳定性。相应设备的开发弥补了高速摄像无法观测匙孔内部的缺点,模拟软件的出现可以就匙孔能量(包括受力、温度)进行更深刻的分析。所以要更层次地了解匙孔,高速摄像、特殊设备及模拟软件的共同使用将会是未来的主要研究手段。

2.2 平衡匙孔的工艺

2.2.1 改善匙孔受力

由于 K-TIG 小孔在焊接过程中表现得极为敏感,工艺方法及参数的获取比较困难,除采用以上办法来对熔池的稳定性进行观测外,采用合理的工艺手段来平衡焊接过程中的能量也是近些年来 K-TIG 焊较为热门的话题。除磁场、激光等较传统的方法,背部加焊剂、背部水冷等新型平衡匙孔的方法逐渐被提出并应用,主要是对 K-TIG 熔池添加一个向上的推力。

王泰等^[49]为了获得更大的焊接工艺窗口,提出了板材背后加焊剂的工艺方法,如图4所示。其主要原理为焊剂吸热减少板材背部热积累,并形成一层保护空腔,此时熔池会受到一股向上的推力,减缓熔池坍塌速度,使 K-TIG 焊的电流工艺窗口得到拓宽。

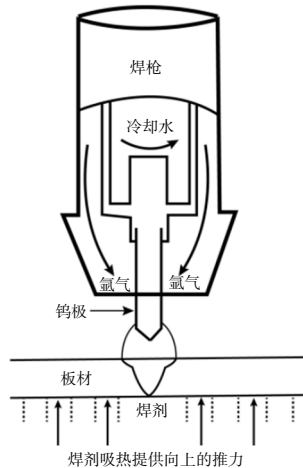


图4 背部外加焊剂原理图
Fig.4 Principle diagram of applied flux on the back

Liu 等^[50]采用在 K-TIG 焊中采用背面充 Ar 气体的保护方式(图5),研究发现当背部没有气体时,匙孔不稳定,焊接难以进行;当背面充满静态 Ar 后,在焊接电流为 410~450 A 时可实现稳定焊接。为进一步提高焊接过程的稳定性,改变保护气体为射流,电流范围扩大到 420~560 A。

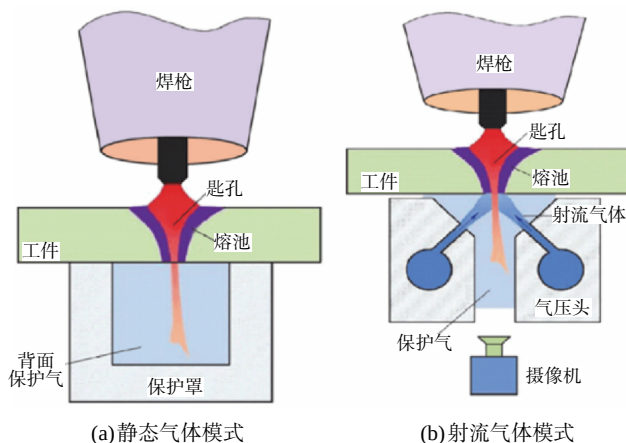


图5 背部外加保护气原理图^[51]

Fig.5 Principle diagram of applied protective gas on the back^[51]

针对背部外加推力装配复杂的问题,黄逸飞等^[51]采用 ANSYS 有限元软件,建立了 K-TIG 焊接温度场有限元模型。发现当水冷加入时,根部液态金属散热速度加快,表面张力就能够在极短的时间

内迅速增大,起到托住整个液态熔池的作用,加强了匙孔的稳定性。

在 K-TIG 匙孔工艺研究中,无论是背部加焊剂还是外加保护气体,其本质都是对匙孔施加一个向上的力,通过表面张力与外加外力的共同作用维持匙孔在焊接过程中的稳定,但是其设备装配比较困难,不适于大规模生产。

2.2.2 改变电流波形

除了改变熔体的受力之外,改变电流波形也是维持 K-TIG 熔池稳定的一种方法。Cui 等^[52]发现 K-TIG 获得稳定的小孔工艺的参数窗口非常窄,为改善 K-TIG 焊接的工艺窗口,采用方波脉冲焊接电流实现了“一脉冲一开孔”的 K-TIG 焊接工艺(图6(a)),使平均电流值得到降低。

Liu 等^[50]针对 K-TIG 电流过大这一问题,在电流波形中引入下降的边缘(图6(b))。与方型电流工艺相比,由于热输入的减小,匙孔出口随着电流的逐渐减小而缓慢关闭,但焊接电流远低于阈值点,小孔出口仍然打开,在较低热输入下匙孔仍稳定。

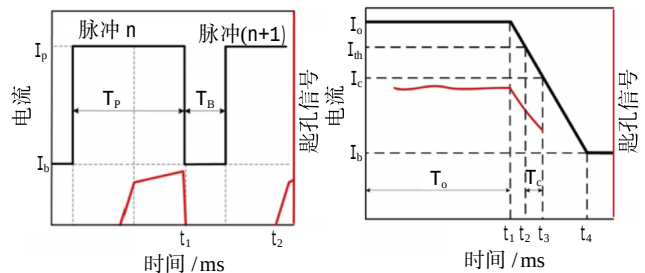


图6 新型 K-TIG 焊接的电流波形

Fig.6 Current waveforms of new K-TIG welding

改变电流可以降低 K-TIG 焊接过程中的平均电流,对匙孔稳定产生一定影响,并进一步降低 K-TIG 的焊接成本,但波形控制对 K-TIG 匙孔行为的控制需要进一步探索。未来改变电流波形的设备与提供外力的工艺这两类方法将是 K-TIG 匙孔稳定性研究的主要方向。

3 结语与展望

K-TIG 焊因其低成本、高效率、不开坡口单面焊双面成型具有广阔的应用前景,但在焊接过程中焊接能量分配不合理易造成焊接工艺窗口窄,接头性能严重下降等问题。通过选择焊接参数可适当控制焊缝的晶粒尺寸。通过外加磁场、电弧激光耦合、改变保护气成分等提高电弧能量,可改善焊缝的力学

性能;背部加焊剂、背部水冷、改变电流波形平衡匙孔的方法可明显拓展 K-TIG 焊接的工艺窗口。

相对于传统 TIG,K-TIG 焊设备简单、熔深大,在中厚板焊接有着明显的优势,但 K-TIG 应用仍然存在较大困难。除 K-TIG 固有的问题之外,各种外加工艺手段存在装配复杂等问题,其中板材背部外加向上的推力以平衡匙孔这一类方法对焊接平台等提出较高的要求,不利于企业的大规模生产,因此做到焊接工艺与焊接设备的一体化,减少操作过程中的困难,提高生产效率将会是 K-TIG 焊接在目前生产中的主要方法。

参考文献:

- [1] 张鹏,解洪,戴勇强,等. 汽车中厚板零件的冲模结构设计要点[J]. 模具制造,2020,20(9):21-23.
- [2] 白冰,王蕾,金潮,等. 高强度船板钢 DH36 的研制[C]// 中国金属学会. 第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 北京,2011: 2225-2229.
- [3] 房元斌,蹇雪梅,张华清,等. 中厚板多层多道焊优化技术研究[J]. 焊接技术,2016,45(3):5-8.
- [4] 李连胜. 中国焊接材料行业发展概述及未来发展思考[J]. 机械制造文摘,2019(4):1-8.
- [5] 曾凡勇,肖志威,柯联邦,等. K-TIG 焊接技术研究进展及在核电中的应用前景[J]. 金属加工(热加工),2021(4):40-46.
- [6] 肖明颖,王琪晨,陈增铎,等. K-TIG 焊接单面焊双面成型工艺及其在海洋工程装备制造领域的应用 [J]. 电焊机,2020,50(8):22-26.
- [7] 刘自刚,周晓静,朱婷婷,等. A-TIG 焊接方法研究现状及展望[J]. 材料导报,2021,35(S2):353-357.
- [8] 石玗,王开飞,张刚,等. 中厚板低频脉冲 TIG 打底焊的电弧形态及熔池行为 [J]. 华南理工大学学报,2019,47(4): 107-113.
- [9] 陈旭芳,王康,王雄. 热丝 TIG 自动焊在核电站钢衬里施工中的研究与应用[J]. 施工技术(中英文),2022,51(23):57-60.
- [10] Wu H, Chang Y L, Guan Z Q, et al. Arc shape and microstructural analysis of TIG welding with an alternating cusp-shaped magnetic field [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021,289:26.
- [11] 唐君才,陈和,魏占静. 304 不锈钢 K-TIG 焊接工艺[J]. 机械制造文摘,2022(3):37-40.
- [12] 石永华,王子顺,陈熙引,等. 一种适用于 K-TIG 焊超强弧光场景的高动态图像融合方法:CN113240614A[P]. 2021.
- [13] 石永华,朱焱,刘炜聪,等. 基于声音传感与电流控制的 K-TIG 焊熔透监控系统与方法:CN109290664A[P]. 2019.
- [14] 张昱,汪殿龙. 基于高速摄像的焊接复合电弧与电信号同步采集分析系统[J]. 热加工工艺,2016,45(17):182-185.
- [15] 肖天骄. 焊接 TIG 电弧的导电机构及其能量分布的研究[D]. 北京:北京工业大学,2013.
- [16] 黄勇,刘林,王新鑫,等. TIG 电弧等离子体双温度数值模拟[J]. 焊接学报,2018,39(10):6-10.
- [17] 张瑞华,栗海霞,李明,等. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[J]. 电焊机,2012,42(12):7-11.
- [18] 熊剑. 304 不锈钢 K-TIG 焊电弧特性及接头性能研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2019.
- [19] 陈金荣,石永华,占爱文. 纵向磁场对 K-TIG 焊接电弧形态及焊缝成形的影响[J]. 热加工工艺,2023,52(5):25-29.
- [20] Cui Y X, Kang Y P, Shi Y H, et al. Investigation into the arc profiles and penetration ability of axial magnetic field-enhanced K-TIG welding by means of a specially designed sandwich [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021,68:32-41.
- [21] Nomura K, Ogino Y, Hirata Y. Shape control of TIG arc plasma by cusp-type magnetic field with permanent magnet[J]. Welding International, 2012,26(10):759-764.
- [22] Baskoro A S, Tuparjono T, Erwanto E, et al. Improvement of tungsten inert gas (TIG) welding penetration using the effect of electromagnetic field [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,493:558-563.
- [23] Liu Z M, Chen S Y, Yuan X, et al. Magnetic-enhanced keyhole TIG welding process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018,99:275-285.
- [24] Liu S, Liu Z, Zhao X C, et al. Influence of cusp magnetic field configuration on K-TIG welding arc penetration behavior [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020,53:229-237.
- [25] 钟少涛,宁强. 机器人 K-TIG 焊接旋转电弧磁场控制器及焊接质量研究[J]. 自动化与仪器仪表,2019(7):137-140.
- [26] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. Journal of Applied Physics, 1980,51(11):53-56.
- [27] 曹运明. 中厚板钛合金激光-TIG 电弧复合热源焊接研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [28] 李京洋,李伟,焦向东,等. 304 不锈钢激光 K-TIG 复合焊接电弧特性的研究[J]. 电焊机,2020,50(4):30-35.
- [29] 李伟. 薄板不锈钢激光 K-TIG 复合高速焊接工艺的研究[D]. 北京:北京化工大学,2019.
- [30] Zhang H, Yu J, Zhang Z, et al. Arc characteristics and welding process of laser K-TIG hybrid welding [J]. Metals, 2022,12(7):1139.
- [31] Shahid H, Kumar A P. Experimental evaluation of longitudinal tensile properties of ferritic stainless-steel weldment joined by metal inert gas,pulse metal inert gas,and tungsten inert gas welding[J]. Welding International, 2022,36(12):67.
- [32] Durgutlu A. Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel [J]. Materials & Design, 2004,25(1): 19-23.
- [33] Traidia A, Roger F. A computational investigation of different helium supplying methods for the improvement of GTA welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011,211(9): 1553-1562.

- [34] 刘政军,李宇航,苏允海. Ar 与 H₂ 混合气体保护下 GTAW 电弧特性数值模拟[J]. 焊接学报,2019,40(7):67-71.
- [35] Rosellini C, Jarvis L. The keyhole TIG welding process;a valid alternative for valuable metal joints [J]. Welding International,2009,23(8):616-621.
- [36] 崔书婉. K-TIG 焊接小孔行为及接头组织与性能的研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [37] Wang Y, Qi B, Cong B, et al. Keyhole welding of AA2219 aluminum alloy with double-pulsed variable polarity gas tungsten arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018,34:179-186.
- [38] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium [J]. Materials Science and Engineering A,2001,299 (1):81-93.
- [39] 徐良,欧阳凯,杨海峰. K-TIG 焊接动态过程及组织和性能分析[J]. 焊接学报,2020,41(8):68-72.
- [40] González O E A, Gonçalves e Silva R H, Dutra J C. Study of keyhole TIG welding by comparative analysis of two high-productivity torches for joining medium-thickness carbon steel plates[J]. Welding International,2017,31(5):337-347.
- [41] Cai X Y, Dong B L, Lin S B, et al. Keyhole TIG welding of 3-mm-thick 10MnNiCr steel plates [J]. Welding in the World, 2022,66(7):1349-56.
- [42] Liu Z M, Fang Y X, Cui S L, et al. Stable keyhole welding process with K-TIG [J]. Journal of Materials Processing Technology,2016,238:65-72.
- [43] Cui Y X, Shi Y H, Hong X B. Analysis of the frequency features of arc voltage and its application to the recognition of welding penetration in K-TIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes,2019,46:225.
- [44] 罗震,解龔,崔霜林. 基于三维重构技术的 K-TIG 熔池流动表征[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(5): 517-521.
- [45] 占爱文,石永华,陈金荣. 对接间隙对 K-TIG 焊接 304 不锈钢熔池和锁孔的影响[J]. 热加工工艺,2021,50(23):139-145.
- [46] Chen Y K, Shi Y H, Cui Y X, et al. Narrow gap deviation detection in Keyhole TIG welding using image processing method based on Mask-RCNN model [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,112 (7/8):2015-2025.
- [47] 陈时雨. K-TIG 焊电弧与熔池热-力耦合行为的数值模拟研究 [D]. 天津:天津大学,2019.
- [48] 段士华. 3mm 厚高强度钢 K-TIG 焊接工艺及电弧特性研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [49] 王泰,敖三三,魏祺,等. K-TIG 焊接中厚板的工艺窗口改进 [J]. 工程科学学报,2020,42(6):763-768.
- [50] Liu Z M, Fang Y X, Cui S L, et al. Sustaining the open keyhole in slow-falling current edge during K-TIG process: principle and parameters [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,112:255-266.
- [51] 黄逸飞,罗震,敖三三,等. 基于非对称热源的非对称深熔 TIG 焊接数值模拟[J]. 机械工程学报,2018,54(2):41-47.
- [52] Cui S L, Liu Z M, Fang Y X, et al. Keyhole process in K-TIG welding on 4mm thick 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology,2017,243:217-228. 

(上接第 7 页)

- [33] Xie G, Wang S, Zhang Y, et al. An efficient method for laser welding depth determination using optical coherence tomography[J]. Sensors,2023,23(11):5223.
- [34] 谢冠明,王三宏,张跃强,等. 基于光学相干层析的激光焊接熔深监测方法[J]. 光学学报,2023,43(11):1114002-1114011.
- [35] He G, Gao X, Li L, et al. OCT monitoring data processing method of laser deep penetration welding based on HDBSCAN [J]. Optics and Laser Technology,2024,179:111303.
- [36] Boley M, Webster P, Heider A, et al. Investigating the keyhole behavior by using x-ray and optical depth measurement techniques[C]//International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. San Diego,USA:Laser Institute of America,2014:426-430.
- [37] 殷大卫,蔡元学,舒顺林,等. 基于 LabVIEW 的扫频 OCT 成像控制系统[J]. 实验技术与管理,2022,39(5):118-122.
- [38] 李金健. 融合光学相干成像和高速相机成像的激光叠焊特征监测[D]. 成都:电子科技大学,2024. 

(上接第 13 页)

- [34] Ma B, Lian F. Study on the use of CuSnTi brazing alloy for induction brazing of diamond grits surface-treated by direct current plasma chemical vapor deposition[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials,2013,41:339-344.
- [35] 卢金斌,贺亚勋,张旺玺,等. CuSnTiNi 钎料真空钎焊金刚石 [J]. 焊接学报,2017,38(6):125-128.
- [36] 崔冰,江涛,赵卫星,等. Ti₃AlC₂ 构建梯度界面对于 Cu-20Sn-10Ti 合金钎料钎焊金刚石磨粒磨削性能的影响[J]. 机械工程学报,2025,61(4):156-166.
- [37] Shi C, Liu P, Yan D F, et al. Effect of the particle size of cladding materials on the morphology and corrosion resistance of Fe-based laser cladding layers [J]. International Journal of Electrochemical Science,2020,15(2):1788-1795.
- [38] Zhou H, Zhang H, Qin H. 35CrMo steel surface by laser cladding Fe-based WC composite coating performance analysis [C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014:Laser Materials Processing and Micro/Nano Technologies. SPIE,2014,9295:67-74.
- [39] Qian L, Long Y Z, Liang Z, et al. Effect of boron on the microstructural evolution and wear resistance of high-hardness Fe-based alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology,2023,458:129342.
- [40] 夏进启,闫龙,詹华,等. 旋耕刀表面铁基涂层摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术,2025,54(7):86-97. 