

# 深熔 TIG 焊研究现状与展望

刘自刚<sup>1</sup>, 梅亚泽<sup>1</sup>, 张建峰<sup>2</sup>, 唐海鸿<sup>1</sup>, 陈亮<sup>1</sup>

(1. 诺力智能装备股份有限公司 浙江省智能物流装备工程技术研究中心, 浙江 湖州 313100; 2. 长兴瓊晟环保科技有限公司, 浙江 湖州 313100)

**摘要:** TIG 焊具有焊接过程稳定、焊缝质量优良、焊接无飞溅、适于全位置焊接等诸多优点, 但同时也存在熔深浅、焊接速度慢、熔覆速率低等缺点。为了克服 TIG 焊熔深浅的缺点, 提出了多种增大熔深的新型深熔 TIG 焊接方法。总结了活性 TIG 焊、K-TIG 焊、DP-TIG 焊、磁控深熔 TIG 焊等几种深熔 TIG 焊接方法的最新研究进展, 归纳了深熔 TIG 焊接方法存在的问题, 并展望了未来深熔 TIG 焊接方法的几个研究方向。

**关键词:** 深熔 TIG 焊; 活性 TIG 焊; K-TIG 焊; DP-TIG 焊

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212210

中图分类号: TG444+.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)01-0006-06

## Research Status and Prospect of Deep Penetration TIG Welding

LIU Zigang<sup>1</sup>, MEI Yaze<sup>1</sup>, ZHANG Jianfeng<sup>2</sup>, TANG Haihong<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Intelligent Logistics Equipment of Zhejiang Province, Noblelift Intelligent Equipment Co. Ltd., Huzhou 313100, China; 2. Changxing Aisheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Huzhou 313100, China)

**Abstract:** TIG welding has many advantages such as stable welding process, good weld quality, no spatter and suitable for all-position welding, but it also has disadvantages such as small welding penetration, slow welding speed and low cladding rate. In order to overcome the shortcomings of small TIG welding penetration, a variety of new deep penetration TIG welding methods were proposed to increase the welding penetration. The latest research progress of active TIG welding, K-TIG welding, DP-TIG welding and magnetic controlled deep penetration TIG welding were summarized, the existing problems of deep penetration TIG welding were summarized, and the future research directions of deep penetration TIG welding were prospected.

**Key words:** deep penetration TIG welding; activating TIG welding; K-TIG welding; DP-TIG welding

TIG 焊因具有焊接过程稳定、焊缝质量优良, 适用于所有金属的焊接, 可以进行全位置焊接等优点, 从而在石油化工装备、航空航天、轨道客车等行业获得广泛应用。但常规 TIG 焊由于钨极载流能力低、电弧能量密度小, 致使其焊接熔深浅、焊接速度慢、熔覆速率低等, 严重限制了 TIG 焊的应用范围。为了克服 TIG 焊存在的焊接熔深浅的问题, 各国焊接学者针对深熔 TIG 焊进行了大量研究, 开发出活性 TIG 焊、K-TIG 焊、DP-TIG 焊、磁控 TIG 焊等方法。本文针对几种深熔 TIG 焊接方法的最新研究成果进行总结和讨论, 并展望了未来的发展方向。

## 1 活性 TIG 焊研究现状

活性 TIG 焊是 20 世纪 60 年代由乌克兰巴顿焊接研究所提出的, 该焊接方法是通过向焊接熔池引入活性元素, 实现增大焊接熔深的目的。经过几十年的发展, 通过改变活性元素引入的方法已经形成了 A-TIG 焊、FZ-TIG 焊、FB-TIG 焊、AA-TIG 焊、GPCA-TIG 焊、GTFA-TIG 焊等多种活性 TIG 焊接方法。

### 1.1 A-TIG 焊

A-TIG 焊(activating TIG welding)是通过在待焊焊道表面涂覆一层活性剂, 然后再进行常规 TIG 焊的焊接方法。该焊接方法可以显著增大 TIG 焊的单道焊接熔深, 焊接生产效率提高 1~3 倍, 已经成功应用于航空航天、汽车制造、石油化工等领域, 并且针对不锈钢、碳素钢、铝合金、钛合金、镍合金等, 已开发出合适的活性焊剂<sup>[1]</sup>。近几年针对 A-TIG 的研

收稿日期: 2021-08-19

作者简介: 刘自刚(1985-), 男, 河南夏邑人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 新型高效焊接方法、自动化焊接工艺与装备等;  
电话: 18205723334; E-mail: xuezhiwu125@163.com

究,焊接母材从常用的 304 不锈钢、低碳钢、铝合金、钛合金等材料,扩展到 430 不锈钢、P265GH 碳钢、625 不锈钢以及异种镁合金、异种不锈钢、铜钨等异种金属的焊接<sup>[2-7]</sup>。在活性剂研制方面,活性剂的主要成分仍以卤化物和氧化物为主。张勇等<sup>[8]</sup>则采用煤粉灰作为活性剂对低碳钢 Q235 进行 A-TIG 焊,结果表明引入煤粉灰后电弧电压增大,电弧能量密度增大,焊缝熔深增大 2.11 倍。Balos<sup>[9]</sup>、Afolalu 等<sup>[10]</sup>还采用金属氧化物的纳米颗粒作为活性剂进行 A-TIG 焊,结果表明引入的纳米颗粒不仅可以提高 TIG 焊的焊接熔深,同时还可以提高焊缝的力学性能。有些学者还针对 A-TIG 进行了改进。苏允海等<sup>[11]</sup>通过在 A-TIG 中引入纵向交流磁场,通过磁场参数和活性剂配比的良好匹配,可以增大电弧挺度、提高电弧能量密度,并且通过电弧和磁场的搅拌作用细化焊缝组织,提高接头力学性能。Surinder 等<sup>[12-13]</sup>向 A-TIG 焊的保护气中引入 H<sub>2</sub>,可以进一步压缩电弧,提高电弧的能量密度,增大焊缝熔深。

## 1.2 FBTIG 焊

FBTIG 焊 (flux bounded TIG welding) 是由法国学者 S Sire 等<sup>[14-15]</sup>提出的一种改进的活性 TIG 焊接方法。该焊接方法是在待焊焊道中间预留一定宽度的间隙,在间隙的两侧涂覆活性剂,电弧在间隙处裸露的金属上进行焊接。前期该焊接方法主要用于铝合金的焊接,可以实现稳定电弧,增大焊接熔深的目的。近几年 Neelima 等<sup>[16-18]</sup>将该焊接方法成功应用于铬镍铁高温合金 600、不锈钢、P91 钢等材料上。通过优化预留间隙和活性剂配比参数,可以将焊缝熔深增大 3 倍,同时焊缝的抗拉强度可以达到常规 TIG 焊的水平,焊缝质量达到航空航天的质量要求。

## 1.3 AA-TIG 焊

张建晓等<sup>[19]</sup>通过改变活性元素的引入方式,提出一种新型活性 TIG 焊接方法——电弧辅助活性 TIG 焊 (arc assisted activating TIG welding, 简称 AA-TIG 焊)。该焊接方法首先采用活性混合气体作为保护气,在待焊焊道表面预熔一道氧化层,然后再进行普通 TIG 焊。相对于常规 TIG 焊,AA-TIG 焊可以显著增大焊缝熔深,提高焊接生产效率。相对于 A-TIG 焊,AA-TIG 焊避免了活性剂的涂覆过程,有利于实现焊接过程自动化,具有工艺可重复性好的优点。针对该焊接方法,兰州理工大学团队进行了大量的基础性研究,包括用于 AA-TIG 焊的焊枪设计、

氧元素的过渡行为、氧元素对焊缝组织性能的影响等。前期研究采用的母材以奥氏体不锈钢为主<sup>[20]</sup>。随着对该焊接方法研究的深入,Zhang 等<sup>[21]</sup>将该焊接方法应用于异种金属(12Cr2Mo1R 合金钢和 304 不锈钢)的焊接,实现了该异种金属的良好焊接,且焊缝具有良好的力学性能和耐腐蚀性能。Sasikumar 等<sup>[22]</sup>还针对双相不锈钢进行了 AA-TIG 焊的研究。

## 1.4 其它活性 TIG 焊

兰州理工大学的黄勇等还提出了另外三种活性 TIG 焊接方法。第一种是 FZ-TIG 焊<sup>[23]</sup>(flux zoned TIG welding),该焊接方法首先在待焊焊道中心位置涂覆低熔点、低沸点、低电阻率的活性剂,在焊道侧区域涂敷高熔点、高沸点、高电阻率活性剂,然后再进行常规 TIG 焊,不仅可以显著增大焊缝熔深,同时焊缝表面成形也较好。目前该焊接方法主要用于镁合金、铝合金金属的焊接,但最近十多年针对该焊接方法的研究比较少。

第二种是气体熔池耦合活性 TIG 焊 (gas pool coupled activating TIG welding, 简称 GPCA-TIG 焊),该焊接方法采用专门设计的双层保护气体氩弧焊枪(图 1),焊枪内层通入惰性气体,外层通入 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 或者三者的混合气体。外层气体在电弧的作用下,与熔池的低温区域发生耦合,改变熔池的流动方式,影响熔池的组织。通过调节内外喷嘴的相对高度,可以调节外层气体与熔池的耦合程度。试验结果表明该焊接方法可以显著增大焊缝的深,改善焊缝组织,焊缝组织得到细化,焊缝综合力学性能得到提高<sup>[24-25]</sup>。

第三种是气体输送活性 TIG 焊 (gas transfer flux activating TIG welding)。该方法利用自动送粉装置,

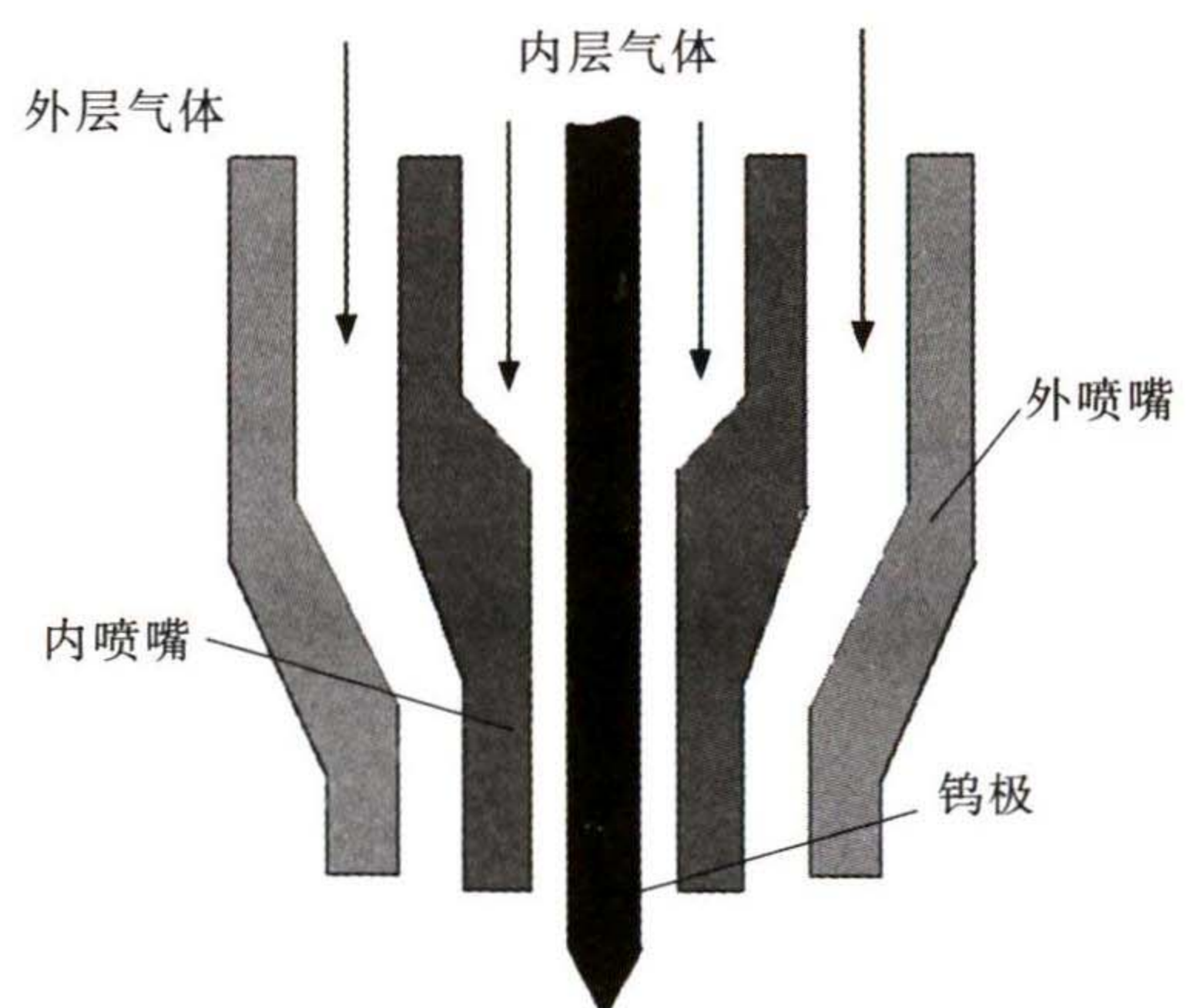


图 1 GPCA 焊枪结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of GPCA welding torch

通过保护气将粉末状活性剂送入到电弧-熔池系统内,引起电弧收缩和熔池表面张力改变,从而增大电弧的能量密度,改变熔池的流动方式,实现增大焊接熔深的目的。该焊接方法不需要活性剂的涂覆过程,更有利于实现焊接过程的自动化,有利于提高焊接生产效率。目前该焊接方法还处于初步研究阶段,在精密送粉机构设计制作、适用的焊接材料、活性剂成分等方面还需要进一步研究<sup>[26-28]</sup>。

## 2 K-TIG 焊研究现状

为了提高 TIG 焊的焊接熔深,20 世纪初澳大利亚有关学者提出了 K-TIG 焊(keyhole TIG welding)。该焊接方法使用较大的焊接电流,获得能量密度大、电弧挺度高、电弧穿透力强的焊接电弧,在熔池内形成锁孔效应,实现穿孔形式的焊接。针对 12mm 厚的不锈钢对接焊,不开坡口,采用该焊接方法可以实现稳定的单面焊双面成形。K-TIG 焊在保留了 TIG 的优点外,还具有单道焊接熔深大、焊接速度快、生产效率高、节省填充材料等优点,在中厚板焊接领域具有良好的应用前景<sup>[29-30]</sup>。同时,K-TIG 还存在以下几个方面的缺点<sup>[30-32]</sup>:①在低碳钢焊接时存在工艺窗口较窄,焊接可重复性差的问题,严重限制了该焊接方法在生产中的应用;②由于使用的焊接电流较大,焊接热输入量大,焊缝组织粗大,接头冲击韧性下降较严重;③焊接过程的稳定性有待提高。由于 K-TIG 焊是穿孔形式的焊接,在焊接过程中熔池在电弧力、自身重力作用下需要与表面张力建立动态平衡,但这种动态平衡很容易被外界的各种影响因素打破,例如焊枪的抖动、焊接电流的波动、焊接速度的波动、熔池表面张力的变化等。

为了克服 K-TIG 焊存在的缺点,焊接工作者做了大量研究。对于锁孔焊接过程的稳定性,Lathabai 等<sup>[33]</sup>提出稳定焊接需要满足式(1):

$$wh < \frac{\lambda}{\rho g} \quad (1)$$

式中: $w$  为焊缝背面小孔的宽度,mm; $h$  为母材的厚度,mm; $\lambda$  为表面张力系数; $\rho$  为熔池金属的密度,kg/m<sup>3</sup>; $g$  为重力加速度。根据式(1)可以看出,在焊缝背面小孔宽度基本一致的前提下,由于不同的焊接母材具有不同的表面张力系数,可以实现稳定焊接的最大板材厚度也不同。表面张力系数越大,可以稳定焊接的最大板材厚度也越大。对于低碳钢,其

表面张力约为不锈钢的三分之一,因此不锈钢可以稳定焊接的最大厚度更大。

为了提高 K-TIG 焊的稳定性、扩大工艺窗口、提高焊接工艺的可重复性,王泰等<sup>[31]</sup>进行低碳钢焊接时,在焊缝背面铺垫一层保护焊剂,有效地扩大焊接工艺窗口,提高了焊接过程的稳定性。但是该方法需要考虑到焊剂的铺设和回收,在工业生产中具有一定局限性。徐良等<sup>[34]</sup>采用在工装平台上增加一宽度小于热影响区的槽,改变母材的散热条件,使得熔池体积稳定在一定的范围,成功实现了 10mm 厚 Q235 钢的稳定焊接,并且还拓宽了工艺窗口。Liu 等<sup>[35]</sup>采用在焊缝背面充满静态的 Ar 气,实现了 16Mn 低合金钢的稳定焊接。当焊缝背面充入射流状态的 Ar 气后,进一步扩大了焊接工艺窗口的宽度。为了改善 K-TIG 焊焊缝冲击韧性低的问题,石永华等<sup>[36]</sup>将外加纵向磁场引入到 K-TIG 焊中,用于 Q345R 钢的对接焊试验。试验采用的励磁波形分为半波、全波和普通正弦波三种。试验结果表明:采用半波励磁时,焊缝中的铁素体含量较高,焊缝的组织更细小,焊缝的冲击韧性较好。钟少涛等<sup>[37]</sup>通过自行设计的旋转电弧磁场控制器将旋转磁场引入到 K-TIG 焊中,进行 Q345R 钢的焊接,结果表明磁场旋转频率对焊缝抗拉强度的影响不大,但明显提高焊缝的冲击韧性。

## 3 DP-TIG 焊研究现状

DP-TIG 焊是由刘自刚等<sup>[38]</sup>提出的,通过对焊接钨极进行强制高效冷却,将焊接电弧压缩至钨极的最尖端,减小电弧的横截面积,获得能量密度大、电弧挺度高的焊接电弧,如图 2 所示。试验表明该焊接方法可以实现穿孔形式的焊接,并可以实现稳定的

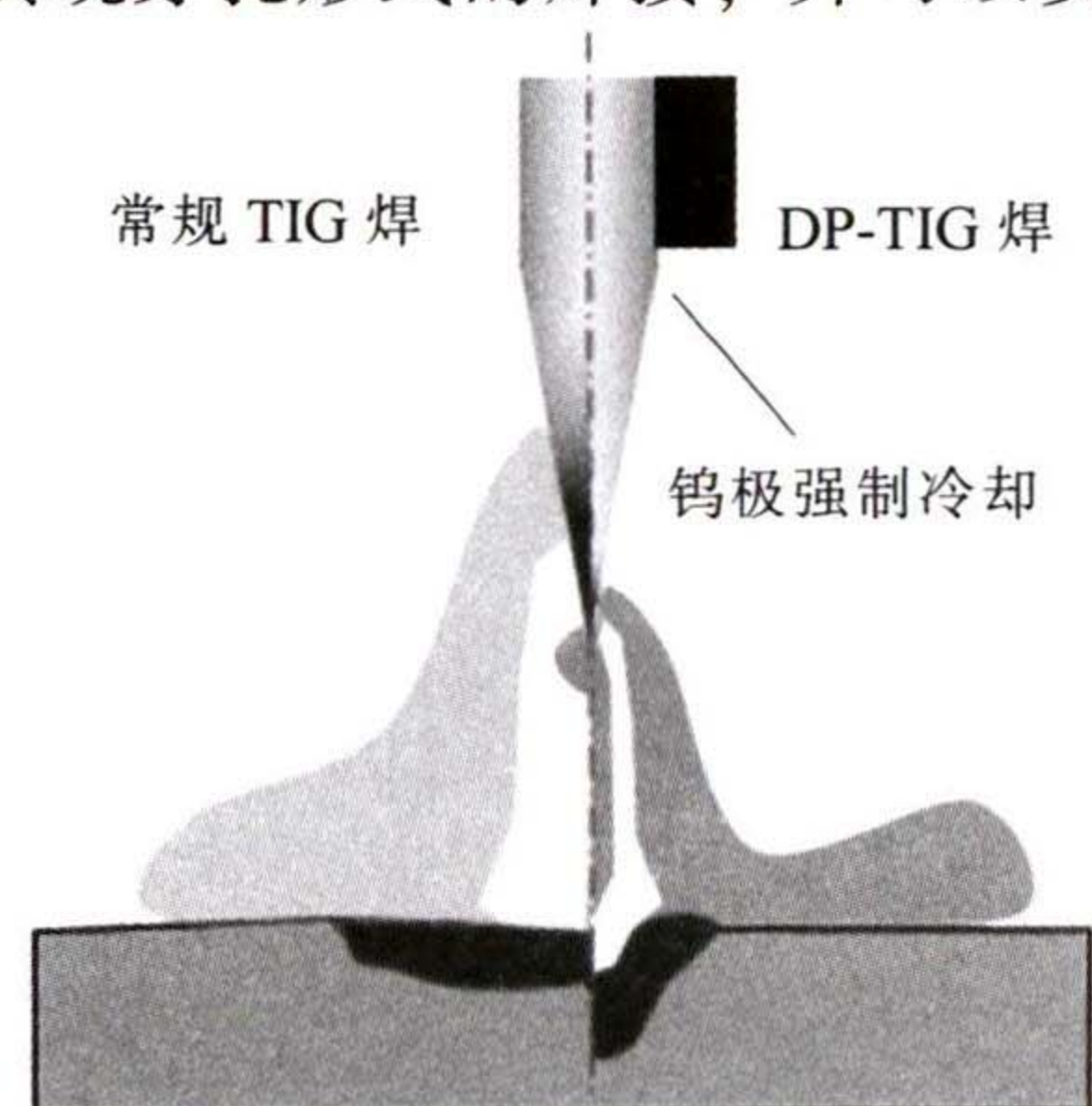


图 2 常规 TIG 焊与 DP-TIG 焊原理对比  
Fig.2 Principle comparison of conventional TIG welding and DP-TIG welding

单面焊双面成形。在 I 形坡口的对接焊中,可以实现 10 mm 厚低碳钢板材以及 12 mm 厚不锈钢板材的单面焊双面成形。DP-TIG 焊由于具有较高的电弧挺度,还可以用于薄板高速焊领域。试验表明:对于 3 mm 厚不锈钢板材的对接焊,在实现单面焊双面成形的前提下,DP-TIG 焊的焊接速度相对常规 TIG 焊的提高了 2 倍多,达到 1000 mm/min<sup>[39]</sup>。在工程应用方面,闫兴贵等<sup>[40]</sup>将 DP-TIG 焊和常规 TIG 焊组合成功用于不锈钢储罐的焊接。对于 DP-TIG 焊缝的力学性能,仅有学者针对奥氏体不锈钢和双相不锈钢进行了研究,结果表明焊缝的抗拉强度和冲击韧性均满足要求<sup>[41]</sup>。DP-TIG 在中厚板焊接领域具有光明的应用前景,但目前对于 DP-TIG 焊的研究还处于起步阶段,焊接稳定性、工艺可重复性、适用的焊接材料及最大焊接厚度等问题还需深入研究。

#### 4 磁控大熔深 TIG 焊研究现状

20 世纪 90 年代,赵彭生等<sup>[42]</sup>在利用等离子弧焊接不锈钢时引入了双尖角磁场,试验证明引入的磁场可以压缩电弧,增强等离子弧的穿透能力,提高最大焊接厚度。为了提高 TIG 焊的熔深,很多学者将磁场引入到 TIG 焊中。电弧是由等离子体构成的,电弧中的带电体在磁场中会受到洛伦兹力的作用,从而改变电弧形态。磁场可以压缩电弧,提高电弧的能量密度,从而增大焊缝熔深。目前可以实现电弧压缩的磁场主要有两种<sup>[43]</sup>:一种是纵向磁场,一种是尖角磁场。肖磊等<sup>[44]</sup>通过数值模拟形式,验证了在高频纵向磁场的作用下 TIG 电弧的带电粒子受到径向洛伦兹力的作用,沿着磁场线方向做螺旋运动,焊接电弧受到压缩。张恒洋<sup>[45]</sup>通过向 TIG 电弧中引入外加高频纵向磁场进行试验,结果表明:自由状态下和外加低频磁场下,TIG 电弧均为钟罩形,在低频磁场的作用下,电弧有扩张的趋势。当施加了高频磁场后,电弧呈圆柱形,电弧受到明显压缩,如图 3 所示。当磁场交变频率为 1 kHz 时电弧压缩效果最明

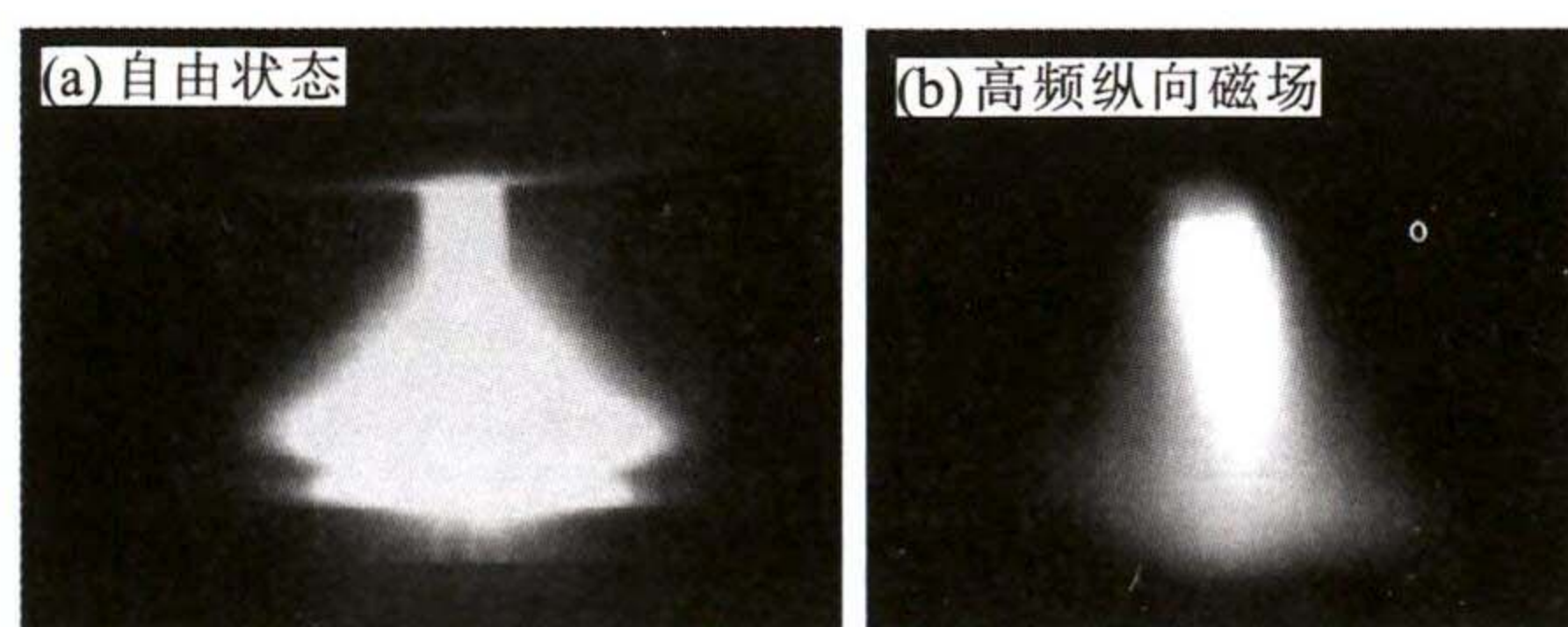


图 3 不同状态下电弧的形态<sup>[45]</sup>  
Fig.3 The shape of arc in different states<sup>[45]</sup>

显,对焊接熔深的增加最为明显,超过 1 kHz 后,电弧的压缩效果逐渐减弱。常云龙等<sup>[46]</sup>通过外加不同频率的尖角磁场进行 TIG 焊试验。试验表明:当尖角磁场的频率为 600~1000 Hz 时,焊接电弧受到明显压缩,焊缝熔深增大了 1 倍多。

#### 5 总结与展望

熔深浅是 TIG 焊的一大缺点,严重降低了 TIG 焊的生产效率,限制了其在中厚板焊接领域的应用。以上的深熔 TIG 焊接方法都可以不同程度地增大焊接熔深,其中以 K-TIG 焊和 DP-TIG 焊最为明显。在工业生产应用方面,活性 TIG 焊、K-TIG 焊和 DP-TIG 焊已经获得大量应用,而磁控深熔 TIG 焊还处于实验室研究阶段。

深熔 TIG 焊接方法在增大焊接熔深的同时也存在以下问题:①焊接过程稳定性不够、焊接工艺可重复性差等,严重影响其在工业生产上的应用。例如活性 TIG 焊活性剂成分混合的均匀程度、活性剂涂覆的均匀程度等都会对焊接熔深产生一定的影响。对于 K-TIG 焊和 DP-TIG 焊,母材的表面状态、保护气体纯度等都会影响熔池的表面张力,从而影响影响小孔焊接过程的稳定性。对于磁控 TIG 焊,外加磁场会受到工业现场磁场的影响,也会影响焊接熔深。②对于所有活性 TIG 焊,由于都需要引入活性元素,而活性元素多为氧化物、卤化物,会对焊缝的组织性能产生不良的影响。另外,对于 A-TIG 焊还需要增加活性剂涂覆过程,不利于焊接过程的自动化。③对于 K-TIG 焊和 DP-TIG 焊,都需要专门设计的焊枪,焊枪体积大,对焊接的可达性影响较大,限制了其在工业生产上的应用范围。另外,这两种焊接方法只适用于穿孔形式的焊接,且焊接位置比较受限,只能用于平焊位置的焊接,横焊、立焊、仰焊等焊接位置无法实现良好焊接。④对于磁控 TIG 焊,由于需要增加磁场发生装置,且多为高频磁场。高频磁场的引入对工业生产现场设备会产生不利影响,而且高频磁场装置会大大影响焊枪的可达性。

未来深熔 TIG 焊的研究方向主要在以下几方面:

(1) 对焊接过程稳定性的控制,提高焊接工艺的可重复性。结合当前人工智能、视觉识别、机器学习等技术,对焊接电弧、熔池状态进行动态监控,实现焊接过程的动态调整,保证焊接过程的稳定性和

工艺的可重复性。

(2) 随着现代科技的进步和智能制造的发展,焊接自动化、智能化、柔性化已成必然趋势。因此,进一步提高深熔 TIG 焊的自动化水平是未来一个重要的研究课题,如机器人深熔 TIG 焊等。

(3) 充分利用计算机模拟技术,实现深熔 TIG 焊接电弧、焊接熔池的模拟计算,在改进深熔 TIG 焊接方法方面将具有更高效快捷的途径。

(4) 通过复合其它热源的方式,如与激光、等离子弧、超声波等热源复合开发新型焊接方法,满足工业生产需求。

### 参考文献:

- [1] 石玦,王文楷. 中厚板高效焊接技术的研究进展 [J]. 电焊机, 2020, 50(9): 69-77.
- [2] 张攀,王湘江. 核用 A-TIG 焊活性剂配比及对焊缝性能影响 [J]. 南华大学学报(自然科学版), 2018, 32(5): 76-80.
- [3] Sivakumar J, Vasudevan M, Korra N N. Effect of activated flux tungsten inert gas (A-TIG) welding on the mechanical properties and the metallurgical and corrosion assessment of Inconel 625 [J]. *Welding in the World*, 2021, 65 (6): 1061-1077.
- [4] Qin B, Yin F C, Zeng X Z, et al. Microstructure and mechanical properties of TIG/A-TIG welded AZ61/ZK60 magnesium alloy joints [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(9): 1864-1872.
- [5] Kulkarni Anup, Dwivedi D K, Vasudevan M. Microstructure and mechanical properties of A-TIG welded AISI 316L SS-Alloy 800 dissimilar metal joint [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2020, 790:139685.
- [6] Kulkarni Anup, Dwivedi D K, Vasudevan M. Dissimilar metal welding of P91 steel-AISI 316L SS with Incoloy 800 and Inconel 600 interlayers by using activated TIG welding process and its effect on the microstructure and mechanical properties [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2019, 274: 116280.
- [7] 顾玉芬,邓志然,石玦,等. 铜/钨异种金属 A-TIG 电弧点焊工艺及性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(3): 947-952.
- [8] 张勇,唐家成,葛泽龙,等. 高铝粉煤灰活性剂影响 TIG 电弧行为研究[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(5): 90-96.
- [9] Balos Sebastian, Dramicanin Miroslav, Janjatovic Petar, et al. Influence of metallic oxide nanoparticles on the mechanical properties of an A-TIG welded 304L austenitic stainless steel [J]. *Materials*, 2020, 13(20): 4513-4513.
- [10] Afolalu S A, Ikumapayi O M, Emetere M E, et al. Investigation of mechanical properties and characterization of a joint using nano flux powder for a-tig welding [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44(P1): 2879-2883.
- [11] 苏允海,艾星宇,宋碧倩. AZ91 磁控 A-TIG 焊电弧形态及焊接接头组织性能 [J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(5): 505-510.
- [12] Surinder Tathgir, Anirban Bhattacharya. Activated-TIG welding of different steels: Influence of various flux and shielding gas [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(3): 335-342.
- [13] Surinder Tathgir, Dinesh W Rathod, Ajay Batish. Process enhancement using hydrogen-induced shielding: H<sub>2</sub>-induced A-TIG welding process [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 35(10): 1084-1095.
- [14] Santhana Babu A V, Giridharan P K, Venugopal A, et al. Stress corrosion cracking behaviour of flux bounded TIG welded AA2219 T87 aluminum alloy in 3.5 weight percent NaCl solution [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 3996: 733-738.
- [15] Jayakrishnan S, Chakravarthy P, Muhammed Rijas A. Effect of flux gap and particle size on the depth of penetration in FBTIG welding of aluminium [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, 70(5): 1329-1335.
- [16] Neelima P, Agilan M, Saravanan K, et al. Optimisation of flux and weld parameters during flux bounded tungsten inert gas welding (FBTIG) of nickel based superalloy inconel 600 [J]. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 2021, 6:123-131.
- [17] Skariya P D, Satheesh M, Edwin Raja Dhas J, et al. Analysis on mechanical and metallurgical characterisation of FBTIG weldments using 15CDV6 steel [J]. *International Journal of Nano and Biomaterials*, 2020, 8(3/4): 277.
- [18] Venkatesan G, Muthupandi V, Fathaha Abdul Bari. Effect of oxide fluxes on depth of penetration in flux bounded tungsten inert gas welding of AISI 304L Sstainless steel [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, 70(6): 1455-1462.
- [19] 张建晓,樊丁,黄勇. 单枪耦合电弧 AA-TIG 焊[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 47-50.
- [20] 樊丁,刘自刚,黄勇,等. 电弧辅助活性 TIG 焊焊缝组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 1-5.
- [21] Zhang J X, Huang Y Q, Fan D, et al. Microstructure and performances of dissimilar joints between 12Cr2Mo1R steel and 06Cr18Ni11Ti austenitic stainless steel joined by AA-TIG welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60: 96-106.
- [22] Sasikumar C, Sundaresan R, Merlin Medona C, et al. Corrosion study on AA-TIG welding of duplex stainless steel[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45(P2): 3383-3385.

- [23] Huang Y, Fan D, Shao F. Alternative current flux zoned tungsten inert gas welding process for aluminium alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(2): 122-127.
- [24] Huang Y, Ren C, Ren Q L. The element transfer behavior of gas pool coupled activating TIG welding [J]. China Welding, 2018, 27(4): 1-9.
- [25] 刘瑞琳, 黄勇. GPCA-TIG 焊缝组织和性能分析[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(6): 17-21.
- [26] 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): 101-104.
- [27] 赵文强. 不锈钢粉末熔池耦合活性 TIG 焊方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [28] 李慧, 时令, 姚宇航, 等. GTFA-TIG 焊送粉器内部气体流动的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2020, 49(3): 146-149.
- [29] 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.
- [30] 吴健文, 陈浩宇, 高阳, 等. 锁孔 TIG 焊接技术的研究进展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 1-9.
- [31] 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.
- [32] 石永华, 宁强, 崔延鑫. Q345R 钢纵向磁场辅助 K-TIG 焊接接头组织和性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 87-91.
- [33] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium [J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 299(1/2): 81-93.
- [34] 徐良, 欧阳凯, 杨海锋. 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.
- [35] Liu Z M, Fang Y X, Qiu J Y, et al. Stabilization of weld pool through jet flow argon gas backing in C-Mn steel keyhole TIG welding[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2017, 250: 132-143.
- [36] 石永华, 宁强, 崔延鑫. Q345R 钢纵向磁场辅助 K-TIG 焊接接头组织和性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 87-91.
- [37] 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.
- [38] 刘自刚, 瞿怀宇, 曹瑞昌, 等. DP-TIG 焊接方法工艺研究[J]. 焊接, 2017(3): 61-65.
- [39] 刘自刚, 陈飞, 唐海鸿, 等. DP-TIG 高速焊接工艺研究[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(6): 33-37.
- [40] 闫兴贵, 赵国英. DP-TIG 与 TIG 组合焊在储罐上的应用[J]. 焊接, 2018(5): 45-47.
- [41] 刘自刚, 唐海鸿, 刘云华, 等. 不锈钢 DP-TIG 焊接接头组织与性能[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1462-1464.
- [42] 赵彭生, 祝树燕, 王耀文, 等. 双尖角磁场再压缩等离子弧中板焊接[J]. 焊接学报, 1989(3): 148-155.
- [43] 孙雅杰, 常云龙. 磁控电弧焊接过程及新技术研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(21): 21155-21165.
- [44] 肖磊, 樊丁, 黄健康, 等. 外加高频纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧数值模拟[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 66-70.
- [45] 张恒洋. 高频磁场对 TIG 焊电弧行为影响的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [46] 常云龙, 张洪旭, 关子奇, 等. 尖角磁场对 TIG 电弧及焊缝成形的影响[J/OL]. 沈阳工业大学学报: 1-6[2021-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20191126.1350.004.html>. 

(上接第 5 页)

- [15] Park J T, Szpunar J A. Evolution of recrystallization texture in non-oriented electrical steels[J]. Acta Materialia, 2003, 51(11): 3037.
- [16] Park J, Szpunar J A, Han K. Effect of initial grain size prior to cold rolling on annealing texture in non-oriented electrical steel [J]. Materials Science Forum, 2002, 408-412(II): 1257-1262.
- [17] 易群. 冷轧压下量对无取向硅钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23): 160-161.
- [18] 杨琨. 冷轧及退火工艺对冷轧无取向硅钢组织和性能的影响 [D]. 唐山: 河北理工大学, 2009.
- [19] 赵楠. 加热速率对电工钢初次再结晶组织影响的研究进展 [N]. 世界金属导报, 2016-12-20(B04).
- [20] 于雷, 罗海文. 部分再结晶退火对无取向硅钢的磁性能与力学性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(3): 291-300. 