

热丝 TIG 焊方法最新研究进展

赵福海^{1,2}, 华学明^{1,2}, 叶欣^{1,2}, 吴毅雄^{1,2,3}

(1.上海交通大学材料科学与工程学院焊接工程技术研究所,上海 200240;2.上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室,上海 200240;3.上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室,上海 200240)

摘要: 综述了各类热丝 TIG 焊方法的特点及其技术与工艺难点,并着重阐述了近些年来研究较多的脉冲加热热丝 TIG 焊、窄间隙热丝 TIG 焊、超高速热丝 TIG 焊的研究进展。

关键词: 热丝 TIG 焊; 脉冲加热热丝 TIG 焊; 窄间隙热丝 TIG 焊; 超高速热丝 TIG 焊

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2011)03-0151-05

Research on Development of Hot-wire TIG Welding Process

ZHAO Fuhai^{1,2}, HUA Xueming^{1,2}, YE Xin^{1,2}, WU Yixiong^{1,2,3}

(1. Welding Engineering Institute of Material Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. State Key Laboratory of Metal Matrix Composite, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The characteristics of hot-wire welding process and the principles and technical difficulties of many kinds of hot-wire welding process were briefly introduced. The research progress of several advanced hot-wire welding processes in recent years, including pulse-heated hot-wire TIG welding process, narrow gap hot-wire TIG welding process and ultra-high-speed hot-wire welding process was introduced.

Key words: hot-wire TIG welding process; pulse-heated hot-wire TIG welding process; narrow gap hot-wire TIG welding process; ultra-high-speed hot-wire welding process

传统 TIG 焊由于其电极的载流能力有限,电弧功率受到一定限制,使得焊缝熔深浅、焊接速度小,尤其是用于中等厚度的焊接结构时需要开坡口并要进行多层焊,因此其使用受到一定限制^[1]。热丝 TIG 焊是于 1956 年在传统 TIG 焊基础上发展起来的一种优质、高效、节能的焊接工艺,其基本原理就是在焊丝送进熔池之前,对焊丝进行加热使其达到一定的预热温度,最终实现高速高效焊接的目的。而对焊丝的加热不仅可以提高焊接速度,而且可以明显改善熔敷率^[2-3],并且调整了焊接熔池的热输入量,加快了填充丝的熔化速度,降低了母材的稀释率,扩大了传统 TIG 焊焊接工艺方法的适应性和应用范围,具有较高的经济价值。目前,在国内外热丝 TIG 焊已经在压力容器、锅炉、高温阀门、高压管道、石化装置、海洋采油设备、军械制造和航空航天工程高端工业部门用于碳钢、低合金钢、高合金钢、不锈钢和镍基合金等重要焊接部件的焊接^[4-7]。也适用于钛合金^[8]、铝及其合金等材料的焊接。

过去,围绕着焊丝的加热方法及进一步提高其

熔敷效率和扩大其适用范围,已开发出许多具体的热丝 TIG 焊方法,主要分类如图 1 所示。热丝 TIG 焊按照焊丝的数量可分为单丝和双丝两种;单丝时按照加热方法的不同分为电阻加热、电弧加热、高频感应加热三种;而且还开发出主要用于大厚板焊接的窄间隙热丝 TIG 焊、用于薄板堆焊和表面熔敷的超高速热丝 TIG 焊及新型热丝 TIG 焊。其中窄间隙热丝 TIG 焊根据钨极的运动形式又分为每层钨极单道不摆动焊、每层单道钨极摆动焊、每层双道钨极摆动焊、旋转电弧式焊等四种。

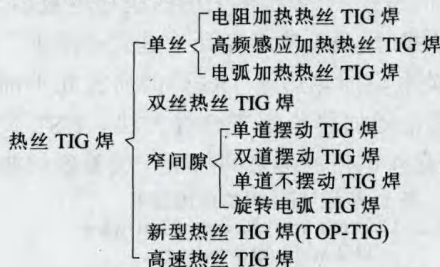


图 1 热丝 TIG 焊方法的主要分类

Fig.1 The main classification of hot-wire TIG welding process

1 单丝热丝 TIG 焊

1.1 电阻加热单丝热丝 TIG 焊

日本 Hori 等^[9]提出的热丝 TIG 焊装置中热丝的加热方式就是电阻加热,将热丝电源的两极分别接

收稿日期: 2010-08-09

作者简介: 赵福海(1986-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向: 高速高效焊接方法的理论与应用研究; 电话: 15216714565; E-mail: zfhelite@sjtu.edu.cn

在焊丝和工件上,利用电流流过焊丝所产生的电阻热来加热焊丝。电阻加热方式如图2所示。

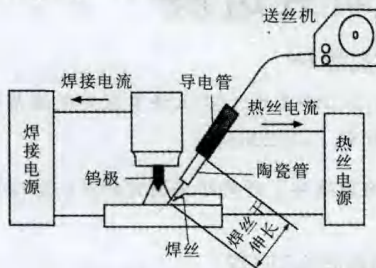


图2 电阻加热热丝 TIG 焊原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of resistance-heated hot wire TIG welding

设焊丝的伸出长度为 e , 焊丝的横截面积为 S , 焊丝材料的电阻率为 ρ , 焊丝的加热电流为 I_w , 则在焊丝上产生的电阻热功率 P_R 为

$$P_R = (I_w^2 \rho e) / S$$

可看出,当焊丝的直径很大、焊丝材料的电阻率很低时,电阻加热的功率将达不到焊丝加热的预热温度,故此方法只适用于大电阻率、较细焊丝加热的情形。

焊接电流与热丝电流波形匹配主要分为如表1所示的四种类型^[9]。相应的电阻加热热丝 TIG 焊可以分为 DC 式、AC 式、PH 式、HST 式等四种。而 DC 式电阻加热热丝 TIG 焊存在五大工艺问题,分别是磁偏吹、焊丝电弧现象、最优热丝电源参数调节困难、热丝送进位置波动以及熔化母材金属的能力受限制^[10]。而其中磁偏吹是 DC 式电阻加热热丝 TIG 焊工艺中最典型的问题。这个磁偏吹现象的发生主要是由于热丝电流所产生的自感应磁场而造成的。PH 和 HST 式电阻加热热丝 TIG 焊均能有效地抑制磁偏吹现象的发生,其中当用 PH 式时,热丝电流处于峰值时才会出现磁偏吹,调小脉冲的占空比,磁偏吹发生的时间减少,对焊接工艺的影响相应减小。而当采用 HST 式时,磁偏吹现象几乎是完全消失。因此,目前有关电阻加热热丝 TIG 焊的研究几乎都集中于 HST 式电阻加热热丝 TIG 焊方法。HST 式对焊接电流与热丝电流波形之间的匹配关系要求非常

表1 热丝 TIG 焊的电流波形
Tab.1 Current waveforms of hot wire TIG welding process

焊丝 电弧	连续加热		脉冲加热	
	连续电弧	连续电弧	连续电弧	脉冲电弧
电弧	DC	AC	PH	HST
焊丝		50~60Hz	50~150Hz	50~150Hz

严格。因此,HST 式电阻加热热丝 TIG 焊焊接电源与热丝电源的设计显得尤为重要。

之前电阻加热热丝 TIG 焊是采用双电源形式,即焊接电源和热丝加热电源二者是分开的、相互独立、分别控制的。双电源式电阻加热热丝 TIG 焊焊接过程中焊接参数与热丝参数是分别调节,焊接过程的不稳定性会使焊接参数实时变化,而热丝参数并未发生相应的变化,必将对焊缝成型产生不利影响。之后,国内外学者均提出了单电源式电阻加热热丝 TIG 焊,即焊接电源与热丝电源共用一个电源,是将 TIG 焊焊接电流的一部分分流作为焊丝加热电源。采用单电源式能很好地适应 HST 式的发展。日本学者对单电源电路的结构进行了设计,如表2所示。

表2 三种不同输出匹配波形的单电源电路结构原理图
Tab.2 Schematic diagram of three different kinds of single power source and corresponding current waveforms

序号	电流波形	电路结构图
①	arc wire work	arc wire work la primary circuit (inverter)
②	arc wire work	arc wire work GT01 GT02
③	arc wire work	arc wire work primary circuit (inverter)

肖笑等^[11]也对单电源脉冲加热热丝 TIG 焊焊接电源的主电路、脉冲控制子程序进行了设计,主电路采用的是可切换的开关管,使弧焊电源在满足焊接要求的同时满足热丝电源的要求,而弧焊电源采用较为常用的 AC-DC-AC-DC 逆变模式。与日本学者设计的电源相比,此电源具有高效节能、体积小、重量轻、有良好的动特性和弧焊工艺性能等优点。

1.2 高频感应加热单丝热丝 TIG 焊

范成磊等^[12]提出高频感应加热热丝 TIG 焊新方法,其原理如图3所示。采用高频感应加热设备,借助高频交变的磁场,在焊丝上形成高密度的涡流,从而达到加热焊丝的目的。与传统热丝 TIG 焊接相比,其特点是^[11]:①加热速度快,热丝效率高,低耗环保;②通过对高频输出电流的控制可以精确地控制焊丝温度;③没有焊丝电流磁场的干扰,消除了磁偏吹现象,可以确保焊接质量;④通过改变输出振荡频率,

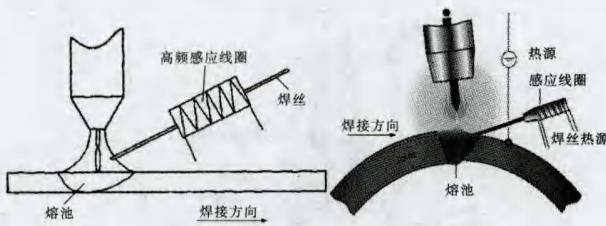


图3 高频感应热丝 TIG 焊原理图^[12]
Fig.3 Schematic diagram of high frequency induction heating hot wire TIG welding process

利用高频感应集肤效应,可以控制感应加热的深度;⑤高频感应加热更好地消除焊丝表面所吸附水分对焊缝的不利影响;⑥适用于各种金属材质的焊丝,特别是低电阻率焊丝的加热。但其缺点是长时间接触高频对人体健康不利,还有就是高频感应加热的设备比较昂贵。高频感应加热热丝 TIG 焊在铝、镁及其合金等低电阻率材料的热丝 TIG 焊接中发挥着巨大优势。

1.3 电弧加热单丝热丝 TIG 焊

吕世雄等^[3]提出电弧加热热丝 TIG 焊方法,其原理如图 4 所示。此方法的优点是:热丝效率很高;设备简单、成本低;不存在磁偏吹和高频;适用于所有材质的焊丝,特别是有色金属。不足之处就在于施焊过程中电弧加热焊丝部分有微弱的弧光。

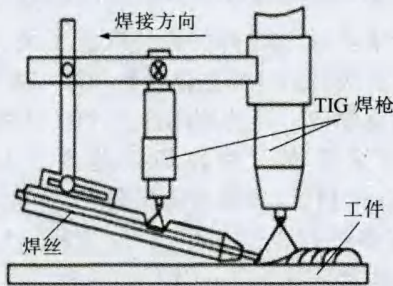


图4 电弧加热热丝 TIG 焊原理图^[12]
Fig.4 Schematic diagram of arc heating hot wire TIG welding process

2 双丝热丝 TIG 焊^[14]

为进一步提高热丝 TIG 焊的熔敷效率,开发了双热丝 TIG 焊方法,其原理如图 5 所示。其最高熔敷效率可达 27kg/h,适于大型零部件大面积堆焊。

3 窄间隙热丝 TIG 焊

窄间隙焊焊接技术是 1963 年美国 Battelle 研究所开发的一种利用现有弧焊方法,采用窄间隙的 I 型或 U 型坡口,进行每层 1~2 道的多层焊接方法^[15-16]。热丝 TIG 焊与窄间隙焊接技术的结合产生了窄间隙热丝 TIG 焊。此方法可以很好地解决制约 TIG 窄间隙焊广泛应用的一大难题——熔敷速度低、焊接

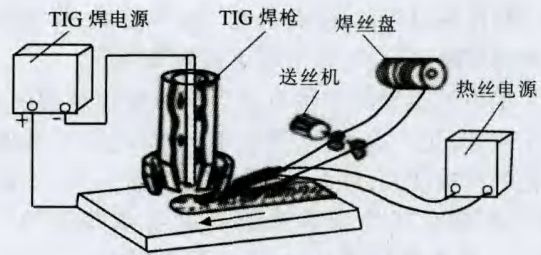


图5 双热丝 TIG 焊原理示意图^[4]
Fig.5 Schematic diagram of twin-hot-wire TIG welding process

生产效率低,并且与窄间隙 SAW 相比,它可以实现全位置、不停弧连续焊接,焊接效率也大大提高,而与窄间隙 GMAW 相比,它具有无飞溅、侧壁熔合性好等优点。窄间隙热丝 TIG 焊在大厚板焊接方面的应用前景广阔。

许江晓等^[7]的研究表明,窄间隙坡口的设计对焊接质量的影响起到至关重要的作用,而为保证焊接质量,坡口设计过程中应充分考虑到焊缝收缩和焊缝底部宽度对质量控制的影响,以及根部是否熔透、侧壁是否能熔合等问题。

热丝 TIG 窄间隙焊的研究主要集中在设备研发、窄间隙坡口设计、专用焊枪的设计、在特定领域的应用研发。目前国外根据焊枪类型及加热电流的不同,热丝 TIG 窄间隙焊分为三种方式,其结构图、原理及特点见表 3。而根据钨极是否摆动可将其分为单道不摆动、单道摆动、双道摆动三种类型^[18-19]。

表3 热丝 TIG 窄间隙焊的三种方式^[6]
Tab.3 Three modes of ultra-narrow gap hot wire tig welding process

方式	普通式	HST 式	旋转+HST 式
结构图			
原理	通过对焊丝通以电流使得熔敷率增加	焊接电流与热丝电流的匹配可提高焊接速度	电极的倾斜与旋转使得坡口侧壁全部熔合,保证焊接质量
特点	磁偏吹现象严重;热丝电流值受限。	磁偏吹减少;焊接效率有所提高。	焊接效率大大提高;设备复杂。

单道摆动焊^[18-19]的优点是坡口精度的要求不高,可获得较好的侧壁熔合效果;缺点是焊炬结构比较复杂,焊炬设计困难,焊接过程控制较复杂,效率比较低,侧壁熔深较浅。而由于窄间隙焊接要保证侧壁熔合性以及较大的焊缝底部熔深,需要采用较大的焊接电流,从而熔池较深,焊接时钨极摆动易造成焊接过程不稳定,从而出现未熔缺陷。

双道摆动焊^[18-19]的优点是坡口范围较宽,坡口的

加工精度相对较低;缺点是生产效率较低,并且因钨极与侧壁距离较小,自动电压控制较困难。

单道不摆动焊的优点是焊接过程控制较简单,易于操作,生产效率高,侧壁熔合较好;缺点是焊接工艺调节难度大,坡口加工精度要求高。如若焊缝侧壁和底部有凹坑则焊缝铺展容易出现不良,而且前一层焊缝铺展不良对后面各层影响大^[18-19]。日本 Watanabe 等^[20]针对板厚为 100mm 的大厚板材开发了一套的窄间隙热丝 TIG 焊的水冷焊枪。此设计是将热丝焊枪与 TIG 焊枪制成一体的,此焊枪(其外观如图 6 所示)只适用于 3.2mm 的钨极和 1.2mm 的焊丝。此焊枪设计中有个陶瓷管,主要是用来让软化的加热焊丝变直,并固定其送进位置。与普通的热丝 TIG 焊焊枪相比,此焊枪的下半段更长、更细,这是因为要保证其能伸入到窄间隙坡口的底部。

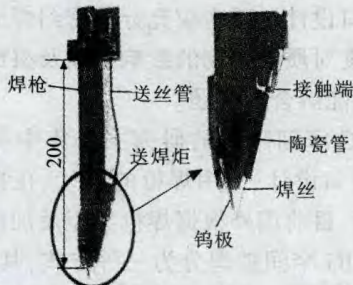


图 6 单道不摆动窄间隙热丝 TIG 焊焊枪^[20]
Fig.6 Schematic diagram of the welding torch used for single-channel ultra-narrow gap hot wire TIG welding process without swinging

旋转电弧式窄间隙热丝 TIG 焊的旋转电弧不仅可以起到电弧摆动的作用,还可以保证侧壁的熔合,提高熔化效率及焊接质量。旋转电弧式窄间隙热丝 TIG 焊对焊枪的设计、焊缝的对中控制等方面提出了更高的要求。日本 Hori 等^[21]设计了旋转式热丝 TIG 焊焊枪,其外观结构如图 7 所示。倾斜的电极端部旋转是由步进电机来驱动的,常用旋转频率为 7~10Hz,最大旋转频率可达 20Hz。采用摇动式的焊枪不但可以减少焊接缺陷、保证焊接质量,而且还可以提高焊接速度。

4 新型热丝 TIG 焊(TOP-TIG)

TOP-TIG 焊接工艺是由法国 SAF 公司率先开发的,实属 TIG 焊接领域的一项重要创新,其原理如图 8 所示。SAF 公司开发此工艺的主要目标是:提高机器人焊接速度;研制出适合焊接机器人的紧凑焊枪;不抑制机器人焊接性能发挥;自动更换电极,方便操作^[22]。

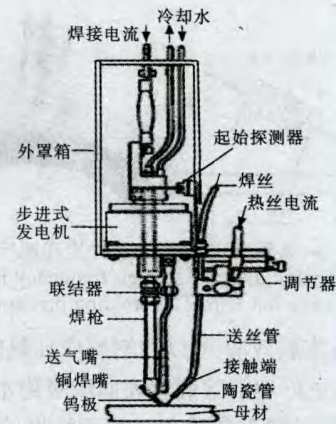


图 7 旋转式窄间隙热丝 TIG 焊焊枪外观结构^[21]
Fig.7 Schematic diagram of the welding torch used for rotary ultra-narrow gap hot wire TIG welding process

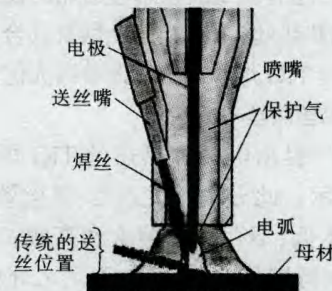


图 8 TOP-TIG 焊的原理示意图^[22]
Fig.8 Schematic diagram of TOP-TIG welding process

与传统热丝 TIG 焊的设计理念不同, TOP-TIG 焊方法是直接利用电弧柱辐射热和等离子区的高温熔化填充焊丝。与传统的冷丝 TIG 焊相比,可成倍地提高熔敷率,加快焊接速度。与常规的 MIG/MAG 焊相比,焊接速度提高了,并且焊缝质量更优,焊接过程也不产生飞溅,经济性能良好。TOP-TIG 焊接方法除了上述优点之外,还大大简化了焊接附属设备,无需添加单独的热丝电源,而需对焊枪进行重新设计,使焊丝在送进熔池之前通过焊接电弧区。所以 TOP-TIG 焊工艺的关键部件就是与送丝系统一体化的焊枪的设计^[22]。而这种焊枪的构造使得 TOP-TIG 焊接过程中出现了类似 MAG 焊短路过渡和颗粒过渡的过渡模式。TOP-TIG 焊主要用于厚度为 3mm 以下薄板件的装配。

5 超高速热丝 TIG 焊

Shi Ueguri 等^[23]对电源系统进行了重新设计,整个系统只有一个电源,并利用电弧电流的一部分作为焊丝加热电流。采用此电源系统,焊速可以提高到普通冷丝 TIG 焊的两倍以上。Shinozaki 等基于脉冲加热热丝 TIG 焊系统开发出超高速热丝 TIG 焊。首先,他们利用超高速热丝 TIG 焊装置在板厚为 2

mm 的 S304 不锈钢板上进行堆焊,研究焊丝的熔化现象及焊丝温度分布情况。焊丝的熔化现象是用高速摄影拍摄得到的,而焊丝的温度分布则是通过辐射测温装置测得的。研究表明,主要受热丝电流影响的焊丝温度分布和焊丝熔化位置是影响该焊接工艺获得优良焊接质量的重要因素,并得到了保证焊缝成形与焊接质量的适宜的焊接工艺参数范围^[24-29]。日本巴布日立工业公司与 Shinozaki 教授进行共同研究,利用超高速热丝 TIG 焊,已实现平板堆焊的最大速度为 7m/min,角焊缝的焊接速度最大可达到 5m/min。这与传统的焊接方法相比,焊接速度可提高 10 倍左右。随后,Shinozaki 等人利用相同的研究方法与手段对普通碳钢和钛合金的超高速热丝 TIG 焊焊接工艺进行了研究,并提出热丝温度分布简化估算方法。并证明了热丝 TIG 焊可用于具有不同电阻率材料的焊接^[30]。

6 结论

不同的热丝 TIG 焊方法具有不同的特点,也具有不同的适用范围。这些从热丝 TIG 焊基本原理而发展起来的方法扩大了热丝 TIG 焊在工业领域中的应用范围,尤其是在大厚板结构与薄板结构焊接中发挥了其优质、高效、节能等优点。而对于 HST 式电阻加热热丝 TIG 焊、窄间隙热丝 TIG 焊、超高速热丝 TIG 焊来说,它们仍存在些技术与工艺难点,也存在许多理论研究热点。这三种热丝 TIG 焊的研究具有很大的理论与现实应用意义,从而得到了广泛的重视。并且随着微型机、数字化控制理论、质量控制等技术的发展,热丝 TIG 焊方法将向着多元化、数字化、自动化和智能化方向发展,其在高端工业领域的应用也将进一步扩大。

参考文献:

- [1] 杨春利,林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.
- [2] Saenger J F, Manz A F. High deposition Gas Tungsten Arc Welding[J]. Weld, 1986, 47(5):386-393.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第三版)[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 赖寿祝. 核电站主回路大厚度不锈钢管道的焊接[J]. 焊接, 2004, (4):27-29.
- [5] 赵喆敏. 高温阀门密封面的堆焊修复[J]. 山西机械, 2002, 9(3):57-58.
- [6] 汤建锋. 热丝 TIG 焊在转炉汽化冷却烟道制造中的应用[J]. 电焊机, 2009, 39(4):141-143.
- [7] 李磊. 石油钻采阀门内壁热丝 TIG 堆焊[J]. 石油化工建设, 2005, 27(6):52-54.
- [8] Crement D J. Narrow groove welding of titanium using the hot-wire gas tungsten arc process[J]. Weld, 1993, 72(4):71-76.
- [9] Hori K, Myoga T, Kawahara M, et al. A development of the hot-wire switching (HST) TIG welding process [Z], IJW Doc. XII-956-86, Japan, 1986.
- [10] Hori K, Watanabe H, Myoga T, et al. Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire-research on pulse heated hot wire TIG welding processes [J]. Welding International, 2004, 18(6):456-468.
- [11] 肖笑, 陈克选, 宋聚海. 单电源脉冲热丝 TIG 焊的研究[J]. 电焊机, 2009, 39(6):38-41.
- [12] 范成磊, 梁迎春, 杨春利, 等. 铝合金高频感应热丝 TIG 焊接方法[J]. 焊接学报, 2006, 27(7):49-52.
- [13] Lv S X, Tian X B, Wang H T, et al. Arc heating hot wire assisted arc welding technique for low resistance welding wire[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(5):431-435.
- [14] 陈裕川. 热丝 TIG 焊技术的新进展 (一)[J]. 现代焊接, 2008, 66(6):9-14.
- [15] Malin V Y. The state-of-the art of narrow gap welding[J]. Welding Journal, 1983, 62(4):22-30.
- [16] Katsuyosi H, Mitsuaki H. Narrow gap arc welding[J]. Journal of the Japan Welding Society, 1999, 68(3):41-59.
- [17] 许江晓, 李世涛. 热丝 TIG 全位置自动焊厚壁管道窄间隙坡口的设计[J]. 热加工工艺, 2009, 38(13):137-138.
- [18] 刘自军, 潘乾刚. 窄间隙脉冲热丝 TIG 焊在集箱环缝焊接中的应用[J]. 东方电气论, 2007, 21(1):35-40.
- [19] 刘希林, 高佩钦, 王岗, 等. 钛合金厚板自动窄间隙 TIG 焊接工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(3):177-180.
- [20] Watanabe H, Hori K, Nakazawa N, et al. Development of Ultra-Narrow Gap Hot-Wire TIG welding process-study of hot wire welding processes (report 20) [J]. Japan Weld Soc, 2001, 68(4):209-210.
- [21] Hori K, Takuwa T, Nagashima T, et al. Development of oscillating TIG hot-wire equipment for narrow gap welding--study of hot wire welding process (report 11) [J]. Japan Weld Soc, 1995, 57(10):115-116.
- [22] Oederbecke T, Guiheux S, 张世龙. 用于焊接机器人的 TOPTIG 工艺[J]. 电焊机, 2006, 36(3):11-15.
- [23] Shi Ueguri, Yoichiro Tabata, Takao Shimizu, et al. A study on control of deposition rate in Hot-Wire TIG welding [J]. Japan Weld Soc, 1986, 4(4):678-684.
- [24] Arashin H, Butsusaki T, Nagashima T, et al. Study on high-speed-welding with hot-wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire (report 1)[J]. Japan Weld Soc, 2006, (4):61-62.
- [25] Nagashima T, Arashin H, Kanazawa T, et al. Study on high-speed-welding with hot-wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire (report 2)[J]. Japan Weld Soc, 2006, (9):64-65.
- [26] Yamamoto M, Shinozaki K, Myoga T, et al. Development of Ultra-High-speed GTA welding process[Z]. IJW Doc XII, Croatia, 2007.
- [27] Shinozaki K, Yamamoto M, Mitsuata K, et al. Study on high-speed-welding with hot-wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire(report 3)[J]. Japan Weld Soc, 2007, (9):288-289.
- [28] Shinozaki K, Yamamoto M, Uchida T, et al. Development of Ultra-High-Speed GTA welding process using pulse-heated hot-wire[J]. Japan Weld Soc, 2008, (4):228-229.
- [29] Shinozaki K, Yamamoto M, Nagamitsu Y, et al. Melting phenomenon during Ultra-High-Speed GTA welding method using pulse-heated hot-wire[J]. Quar. J. JWS, 2009, 27(2):22-26.
- [30] Shinozaki K, Yamamoto M, Mitsuata K, et al. Bead formation and wire temperature distribution during Ultra-High-Speed GTA welding method using pulse-heated hot-wire[Z]. IJW Doc XII, Singapore, 2009. [2]