核电站TIG全位置自动焊打底工艺分析

冯英超
(核工业工程技术研究设计院,北京 101601)

摘要:TIG全位置自动焊工艺是一种先进的焊接生产技术,受人为因素影响较小,且自动化程度较高,实用性强。对于此工艺而言,打底焊接是其中的关键技术难题。结合国防科工委核能开发科研项目《核岛辅助管道自动化焊接应用技术研究》中核心子课题——TIG全自动焊工艺,对其打底焊接工艺进行较为详细的分析和研究。介绍了TIG全自动焊中打底焊接工艺的影响因素——先决因素和工艺因素,针对先决因素提出解决途径,针对工艺因素找出其内在规律。

关键词:核电站;TIG;全位置;打底
中图分类号:TG444+.74　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001-2303(2012)02-0057-05

Analysis of back welding procedure for TIG all-positional automatic welding in nuclear power plant

FENG Ying-chao
(Nuclear Engineering Research and Design Institute, Beijing 101601, China)

Abstract: TIG all-positional automatic welding is an advanced welding technology, which is affected less man-made factor and has high level of automation and wide use, back welding is the key technology of this process. This article makes a particular study and research about back welding procedure, which is based on TIG all- positional automatic welding that is the key sub-project of "Research on automatic welding applying science for nuclear island assistant pipes" project which is established by COSTIND. First, this article makes an analysis about the influencing factors: precondition factors and procedure factors, second, this article gives some solving suggestions about the precondition factors and finds out the inner disciplines about procedure factors.

Key words: nuclear power plant; TIG; all-position; back welding

0 前言

TIG全位置自动焊是指在管道的焊接过程中,管道固定、机头(或焊接小车)转动的焊接工艺,具有焊缝成形好、焊接效率高、节省焊材成本、焊缝合格率高的特点。目前主要应用于电站、船厂、化工等行业的管道焊接。

核工业工程技术研究设计院作为整个核电站焊接施工的技术研发和支持中心,近年来承担了多项国家级科研项目,如《核电站自动化焊接应用技术研究》《核岛辅助管道自动化焊接技术应用分析》等。目前,已相继完成了核电站主回路自动焊、辅助管道自动焊等相关技术的研究,在自动焊工艺的研究过程中,科研组发现打底工艺参数的确定(尤其是薄壁管道)存在着较大的难度。

收稿日期:2010-07-02
作者简介:冯英超(1982—),男,河北石家庄人,学士,工程师,主要从事核电站安装焊接工艺及自动化焊接的研究工作。

1 问题概述

对于TIG全位置自动焊工艺而言,采用的坡口形式主要是Y型坡口,且坡口组对无间隙,如图1所示。基于此,采用TIG全位置自动焊焊接此类管道时,由于熔敷金属的重力作用,仰脸焊位置(一般指5~7点钟位置)往往会出现一定程度的内凹。

核电站建造标准(目前CPR1000为主要堆型,采用标准为RCC-M 2000+2002遗补)对焊缝的内凹做出了明确规定:若焊口为水平对接(5GT),则在仰脸位置允许有小于等于0.5mm的内凹,而其他任何情况都不允许存在内凹。但是,就核电工程而言,对焊缝质量要求较高,内凹的评定主要是射线检验底片的判定,且存在着内凹程度不易判定的特点,所以

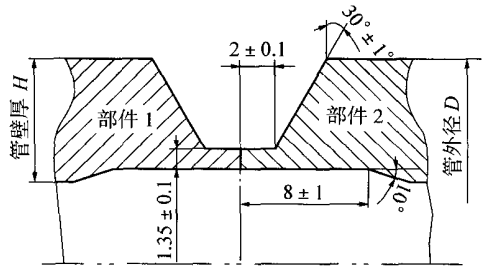

图1 TIG全位置自动焊坡口准备

在焊缝的内凹判定上一贯采用零忍耐，即一旦底片上显现出内凹的迹象(黑影线)，则判定为不合格。

2 影响因素分析

通过对TIG全位置自动焊工艺特点的分析以及在实验室开展工艺实验过程中的经验总结，确定在自动焊打底工艺中主要有两类影响因素：先决因素和工艺因素。先决因素是指自动焊实施中先决条件的影响，工艺因素主要指工艺参数的影响。

2.1 先决因素

先决因素主要包括：坡口加工精度、钨极。

2.1.1 坡口加工精度

坡口加工精度是打底焊接工艺最重要的先决因素，如果坡口加工精度(主要是钝边厚度和长度)存在较大误差，那么将会出现未焊透、内凹等严重缺陷。

2.1.2 钨极

钨极是保证电弧电压持久稳定的重要条件。钨极的影响因素主要体现在钨极直径、锥度、平台大小，针对不同的焊接电流应选择恰当的数值，否则容易产生过烧、快速磨损等现象，从而使电弧发散，最终影响焊缝成形和质量。

2.2 工艺因素

影响TIG全位置自动焊焊接工艺的主要因素有：氩气流量、焊接速度、焊接电流、送丝速度、电弧电压。

2.2.1 氩气流量

氩气流量分为正面保护气体流量和背面气体保护流量。两者对焊缝成形都有着重要作用。

正面保护气体的作用：

(1)保护熔池，使得正面焊缝良好成形；

(2)通过气体的吹力，对熔敷金属形成一定的压力，从而在仰脸焊位置对焊缝金属的内凹起到一定的缓解作用。

但是正面保护气体也不易过大，如果气体流量过大，则容易变成紊流，卷入空气，降低保护效果。

背面保护气体的主要作用是：保护背面焊缝不被氧化、发渣。但是背面气体流量不宜太大，否则容易形成较大的压力，使得背面焊缝内凹。

2.2.2 焊接速度

焊接速度是决定焊接效率的主导因素。较快的焊接速度会缩短焊接时间，提高焊接效率。在自动焊中，使用者都会倾向于较快的焊接速度。同时焊接速度也是影响焊接热输入量的关键参数。焊接速度小，热输入大；反之，热输入小。

通常在打底焊接中，焊接速度要大一些，主要考虑两点：

(1)提高焊接效率。

(2)较大的焊接速度将使熔敷金属快速冷却，从而降低焊缝熔敷金属重力作用时间，进而降低内凹倾向。

2.2.3 焊接电流

焊接电流和焊接速度是一组相对的参数，两者直接控制着焊接热输入的大小。若电流大、速度小，热输入就大；反之则小。两者之间必须配合良好，才能实现打底焊透，且焊缝内外成形美观、无内凹。

由于通常设置的焊接速度比较大，所以需要的焊接电流也要大一些，大的焊接电流能保证焊丝(较大送丝量状态)实现良好的熔合。

2.2.4 送丝速度

送丝速度是指在焊接过程中填入焊接填充材料的速度，其大小与打底焊缝的成形直接相关：

(1)若填充材料较多，单位金属的热量比较少，降低重力自身的影响。

(2)熔敷金属之间存在一个挤压力，使得背面熔敷金属受到正面熔敷金属的挤压而向背面方向扩张，这也在一定程度上降低了焊缝金属内凹倾向。

(3)送丝速度不能过大，否则会与焊接电流、焊接速度不匹配，出现未焊透或未熔合缺陷。

2.2.5 电弧电压

电弧电压主要体现为电弧的热量集中和穿透能力。弧压过大或过低都会使电弧过于分散，使电弧的热量不集中，且穿透能力下降，焊缝成形变差，且出现未焊透现象。

3 解决途径

现结合 ϕ88.9 mm×3.05 mm 的 Z2CN18.10 不锈钢管道的工艺试验来分析上述技术难点的解决

途径。

首先验证坡口的加工尺寸，然后确定钨极的相关参数。解决先决条件后，再开发打底焊接工艺参数，其中首先确定充氩流量，然后是焊接速度、焊接电流、送丝速度、电弧电压。

ϕ88.9 mm×3.05 mm 的 Z2CN18.10 不锈钢管道 TIG 自动焊打底焊接工艺参数如表 1 所示。

3.1 先决因素

3.1.1 坡口加工精度

保证控制坡口加工精度的主要措施：

表 1 ϕ88.9 mm×3.05 mm 不锈钢管道的 TIG 自动焊打底工艺参数

母材规格	母材牌号	焊接方法	焊接设备	机头	焊接位置	焊缝编号	焊接操作工
ϕ88.9×3.05	Z2CN18.10	TIG	PS406	MUIV 128	5GT	—	—

保护气体种类		保护气体流量 Q/L·min^{-1}		预前送气	滞后送气	Osc	焊丝	焊丝
正面	背面	正面	背面	时间 t_{10}/s	时间 t_{11}/s	摆动滞后时间 T_{60}/s	钢号	直径/mm
Ar,99.99%	Ar,99.99%	15	4	3.0	8	NA	316L	ϕ0.8

送丝停止角度 N_{40}/(°)	送丝延迟时间 T_{40}/s	焊丝回抽延迟时间 t_{41}/s	起弧时间 T_{20}/s	起弧电流 I_{20}/A	熄弧时间 T_{25}/s	熄弧电流 I_{25}/A	起弧位置 /(°)	熄弧角度 N_{20}/(°)	预熔时间 T_{21}/s
361	4	2	0.1	40	15	10	0	370	3

AVC 种类	AVC 直径/mm	AVC 锥度/(°)	AVC 极性	AVC 平台直径/mm	AVC 控制滞后时间 t_{50}/s	焊炬起弧高度 H_{50}/mm	AVC 停止角度 N_{50}/(°)	焊炬提升高度 H_{52}/mm	电弧灵敏度等级 S_{50}	反应速度 v_{50}/mm·min^{-1}
—	ϕ1.6	30	正接	0.6	5	2.1	362	4.0	3	800

焊道	区间	位置 /(°)	预熔电流 /A	峰值电流 /A	峰值时间 /ms	基值电流 /A	基值时间 /ms	转动速度 /mm·min^{-1}	送丝速度 /mm·min^{-1}	电弧电压 /V
1	S01	0~100	130	134	100	62	300	75	550	9.1
1	S02	100~180	130	132	100	61	300	75	550	9.3
1	S03	180~270	130	130	100	60	300	75	550	9.3
1	S04	270~370	130	128	100	59	300	75	550	9.1

(1)对于存在椭圆度的管道要尽量给予矫正。

(2)要求从事坡口加工的技术人员素质高、技能好。

(3)严格检查加工完成的坡口，超出加工误差的要返工。

3.1.2 钨极的选择、控制

根据焊接电流选择钨极直径、锥度和平台大小，如表 2 所示。

表 2 钨极参数选择[1]

序号	焊接电流 I/A	钨极直径 d/mm	钨极平台 /mm^2	钨极锥度 /(°)
1	2~20	0.5	0.125	12
2	10~75	1.0	0.250	20
3	60~150	1.6	0.500	30
4	100~200	2.0	0.800	35

对于 ϕ88.9 mm×3.05 mm 的管道，打底电流为 100~150 A，根据表 2 选择的钨极直径为 ϕ1.6 mm，锥度 30°，平台大小 0.5 mm^2。尽量采用钨极磨削机等加工钨极锥度、平台大小，一般不考虑用砂轮机等粗糙工具。

3.2 工艺因素

3.2.1 保护气体流量

Z2CN18.10 不锈钢管道焊接时需要进行正面和背面保护，从焊接质量要求和成本方面考虑，选择纯度为 99.99%的 Ar 作为保护气体。

正面和背面保护气体均应设定一范围值，正面保护气体流量根据喷嘴直径进行选择；背面保护气体根据管道的规格尺寸、排气口直径大小进行选择。

(1)正面保护气体流量。

首先确定喷嘴尺寸。根据管道和机头的实际情况，选择喷嘴尺寸为 ϕ26 mm×13 mm，从 7 L/min 气体流量递增进行测试，得出结果如下：

①气体流量 7~9 L/min 时，保护效果不太理想，焊缝表面发黑。

②气体流量 10~15 L/min，保护效果较好，无明显不足，在 14~15 L/min 时，呈金黄色。

③气体流量 16 L/min 时，焊缝外观成形呈现不匀称、且局部稍微发黑。

所以从保护效果和成本等方面考虑，打底焊缝时选择较大的充氩流量 15 L/min，而在填充、盖面时可选择 10 L/min，以达到节约成本的目的。

气体流量和喷嘴直径有一个最佳范围，此时气体保护效果最佳，有效保护区域最大。如果气体流量过低，则气流挺度差，排除周围空气的能力弱，保护效果差；如果气体流量过大，则容易变成紊流，卷入空气，降低保护效果。

(2)背面保护气体流量。

背面保护气体流量选择的主要依据是：在不影响背面焊缝成形的条件下，流量越小越好，从而实现避免内凹并降低生产成本的目的。排气口直径 φ3.0 mm，气体流量从 2 L/min 递增进行测试，得出结果如下：

①气体流量 2~3 L/min，保护效果不太理想，焊缝背面发黑，局部还可能发渣。

②气体流量 4~6 L/min 时保护效果较好，无明显不足。

③气体流量 7 L/min 时，仰焊位置开始出现不太明显的内凹。

所以从保护效果和成本等方面进行考虑，选择的保护气体流量为 4 L/min。

管道壁厚、排气口直径一定时，如果背面保护气体流量过小，焊缝则容易氧化而发渣；若气体流量过大，则焊缝会由于背面保护气体压力过大而在管道仰脸位置形成明显的内凹。

3.2.2 焊接速度

试验采用法国 POLYSOUDE 公司的 TIG 全位置自动焊设备(根据设备厂家提供的应用经验，较小的焊接速度为 50 mm/min，较大的焊接速度可以达到 85 mm/min)。根据所焊接的管道特点——管径较小，且壁厚较薄，与大厚壁管道相比，管道本身不会吸收更多的热量，同时考虑到焊接速度越高，与之匹配的电流范围就越小，所以确定焊接速度为 75 mm/min。

3.2.3 焊接电流

对于自动焊设备而言，输出的为脉冲电流，焊接电流包括四个关键数值：峰值电流、基值电流、峰值时间、基值时间。上述四个参数也要实现最佳匹配，才能保证焊缝的完美成形。

(1)预先设定峰值时间、基值时间的比例，然后设定峰值电流、基值电流。

(2)为了使熔敷金属快速冷却而不形成内凹，一般基值时间要比峰值时间长一些。

(3)峰值电流是核心参数，是熔化母材、焊材的主要指标。

(4)基值电流不易过大，否则容易使得熔敷金属热量过大而造成内凹。

工艺试验：根据经验，峰值时间设为 100 ms，基值时间则为峰值的 2~3 倍，在此设置为 300 ms。根据母材特点，设置峰值电流为 130 A；基值电流是维弧电流，不易过大，一般比峰值电流的 1/2 小 10 A，所以设置为 60 A。上述电流均为第一区间电流，后续区间的电流峰值以 2 A 递减，基值以 1 A 递减。在上述基础上进行焊接，通过调节背面焊缝金属的熔敷情况和正面熔池情况，发现初步设置的电流略微偏小，随即对电流进行调节(峰值电流增加 4 A，基值电流增加 2 A)，焊缝成形转好。

3.2.4 送丝速度

根据设备厂家提供的应用经验，小的送丝速度为 200 mm/min，较大的焊接速度为 1 300 mm/min。在送丝速度的选择上应考虑到过大或过小两方面。

(1)送丝速度过小，会造成三方面的影响：

①熔敷金属的厚度薄，在第二层的焊接时容易产生严重的二次熔。

②较少的熔敷金属吸收的焊接热量过多，本身熔敷状态、温度就高，所以需要更多的时间去冷却，使得焊缝出现内凹。

③熔敷金属少，金属之间的挤压力就小，这也使得焊缝容易产生内凹。

(2)送丝速度过大，可造成两方面的影响：

①焊接速度较快，使得焊接热输入不够，出现未焊透。

②焊接速度较快，对焊接电流的要求就比较高，不利于参数的调节。

综上所述，送丝速度的选择要适中。工艺试验中，选择了 300、400、500、600、700 mm/min 的送丝速度进行试验，焊接速度、焊接电流采用 3.2.2、3.2.3 中的实验结果，得出结论如下：

①送丝速度为 300、400 mm/min，焊缝成形欠佳，内凹比较明显。

②送丝速度为 500、600 mm/min，焊缝成形比较理想，无明显的缺陷和不足。

③送丝速度为 700 mm/min，出现了部分区域的未焊透。

根据上述实验数值，确定送丝速度为 550 mm/min。

3.2.5　电弧电压

电弧电压是电弧稳定燃烧的保证,在钨极的相关参数设置完成后,可以确定电弧电压的准确范围:

(1)弧压的选择不易过低,一般应在 8.5 V 以上,否则容易发生粘钨。

(2)通过观察熔池成形判断电弧电压。

工艺试验:以 2GT 管道为实验对象,主要考虑 2GT 位置的弧压具有统一性,从而便于调节弧压。首先将弧压设定为一个较大的数值(10 V),然后起弧焊接,在焊接过程中一边焊接,一边观察熔池,最终确定恰当的电弧电压(9.1 V)。把 9.1 V 作为 5GT 的第一区间电压,然后在第二、三区间增加,均为 9.3 V,主要考虑的是避免在仰脸焊位置熔敷金属因重力作用而发生粘钨,在第四区间电弧电压恢复到 9.1 V。

从而得出 5GT、2GT 管道焊接适当的电弧电压。

4　结论

(1)推进了《核岛辅助管道自动化焊接技术应用分析》科研项目的工作进展,进而扩大了研究成果。

(2)对 TIG 全位置自动焊打底技术有了较深的理解,明确认识其影响因素和解决措施,为此项工艺的实际应用积累了宝贵的技术经验。

(3)解决了 TIG 全位置自动焊工艺开发中重要的技术难题,为其在核电项目的应用扫清了技术障碍。

(4)验证了 TIG 全位置自动焊在核电站应用的技术可行性,实用性强,如果能够顺利应用于核电,将会发挥出其焊接效率高、焊接质量好的特点,进而产生可观的经济效益。

参考文献:

[1] 冯英超.钨极对不添丝自动化焊接工艺的影响[J].电焊机,2009,39(4):151-152.

Page 56 提供了向下的作用力,进而使变形材料填充搅拌针后端的空隙,因此当轴肩的高温端旋转至搅拌头后端时,峰值温度会由于变形金属的沉积导致摩擦热减小而降低,而在下一个循环周期中,轴肩的高温端会继续搬运变形金属,重复上述过程。在整个搅拌摩擦焊接过程中,正是轴肩高温端对变形金属材料周期性的搬运、沉积造成了轴肩温度场的不均匀性以及轴肩峰值温度的波峰式波动现象。

3　结论

(1)利用特别设计的搅拌摩擦焊接模拟装置成功获得了轴肩的实时温度场;在纯铅的搅拌摩擦焊接过程中,轴肩最高温度为 304 ℃,接近母材熔点的 93%。

(2)搅拌头一端的温度始终高于另一端,因此轴肩被分为高温端和低温端;而峰值温度始终处于轴肩高温端并随着搅拌头的旋转而旋转,在每个旋转周期中其值呈现由低到高再降低的波峰式波动。

(3)轴肩温度场这种周期性现象的产生是因为轴肩高温端周期性搬运变形金属造成的。

参考文献:

[1] R S Mishra, Z Y Ma. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 50(1-2): 1-78.

[2] Y J Kwon, N Saito, I Shigematsu. Friction stir process as a new manufacturing technique of ultrafine grained aluminum alloy[J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(19): 1473-1476.

[3] Yeong Maw Hwang, Zong wei Kang, Yuang Cherng Chiou, *et al*. Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(7-8): 778-787.

[4] A Arora, T DebRoy, H K D H Bhadeshiab. Back-of-the-envelope calculations in friction stir welding-Velocities, peak temperature, torque, and hardness[J]. Acta materialia, 2011, 59(5): 2020-2028.

[5] R Nandan, G G Roy, T J Lienert, *et al*. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel[J]. Acta Materialia, 2007, 55(3): 883-895.

[6] M Song, R Kovacevic. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(6): 605-615.

[7] Frank P Incropera, David P DeWitt, Theodore L Bergman, *et al*. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed[M]. John Wiley & Sons Inc, 2007: 580-581.