

DOI:10.7672/sgjs2013210032

窄间隙 TIG 焊在 AP1000 核电站主管道焊接中的应用

朱金胜

(国核工程有限公司,上海 200233)

[摘要] 介绍了 AP1000 核电站主管道系统的结构特点和母材的焊接特性。通过采用窄间隙 TIG 自动焊工艺,不仅大幅度减少了主管道焊缝坡口横截面积和焊接金属的填充量,还可以通过调节焊接工艺和技术措施,控制焊接热输入和焊接变形,提高焊接效率和质量。根据实际安装经验,给出了 AP1000 主管道焊口焊接顺序和焊接工艺参数的可选择范围。通过窄间隙 TIG 自动焊在 AP1000 核电站主管道焊接上的成功应用,验证了窄间隙 TIG 自动焊在主管道上的可行性和有效性,为窄间隙 TIG 自动焊工艺在后续 AP1000 主管道焊接上的应用和推广提供指导。

[关键词] 核电站;主管道;焊接;施工技术

[中图分类号] TU74;TG47

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8498(2013)21-0032-03

Application of Narrow Gap TIG Welding in RCL Piping Welding of AP1000 Nuclear Power Plant

Zhu Jinsheng

(State Nuclear Power Engineering Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: This paper introduces structural characteristics and base metal welding characteristics of RCL piping system in AP1000 nuclear power plant. Using narrow gap TIG welding process not only can significantly reduces the RCL piping weld groove cross-section area and welding metal's filler amount, but also can adjust the welding process and technical measures to control the welding heat input and welding distortion and improve the welding efficiency and quality. The AP1000 RCL piping welding sequence and welding parameters selectable ranges are given based on the actual installation experience. The successful application of the narrow gap TIG automatic welding process in the AP1000 RCL piping welding verifies the feasibility and effectiveness of narrow gap TIG welding for RCL piping, and provides guidance for the application and promotion of the narrow gap TIG automatic welding process in subsequent AP1000 RCL piping welding.

Key words: nuclear power plants; RCL piping; welding; construction

目前我国已运行和大部分在建的核电站主管道在焊接施工中基本上采用传统的焊条电弧焊工艺,一个对接焊口需要 2 名优秀焊工维持 1 个月的高强度焊接作业才能完成,劳动强度大、施工周期长、焊接效率低。同时,焊条电弧焊也容易受到工作环境和焊工状态等诸多不确定因素的影响,焊缝质量难以控制和保证。随着中国核电站的批量建设和焊接技术的快速发展,窄间隙 TIG 自动焊技术在主管道中的应用引起越来越多人的重视,并作为一种高效、优质、经济和节能的先进焊接方法,已成功应用于我国从美国西屋公司引进、消化、吸收的

第三代核电非能动先进压水堆 AP1000 核电主管道焊接中。

1 AP1000 主管道简介

AP1000 核电站主管道为闭式循环回路,为核电站反应堆压力容器、蒸汽发生器和主泵提供流动通道和压力边界,它是压水堆核电站最关键的核安全 I 级设备。主管道内流动介质为直接流过堆芯的放射性冷却剂含硼水,一旦发生泄漏,后果不堪设想。因此,对主管道的焊接质量和工艺要求非常严格,是核岛管道安装焊接中最重要的部分,直接关系到机组的安全运行。

AP1000 核电站主管道由 2 个环路构成,每个环路包括 1 个热段管段和 2 个冷段管段,系统连接如

图 1 所示。现场安装焊口共 12 个,每个环路 6 个,其中冷段焊口 8 个,热段焊口 4 个,焊口规格和焊接位置如表 1 所示。

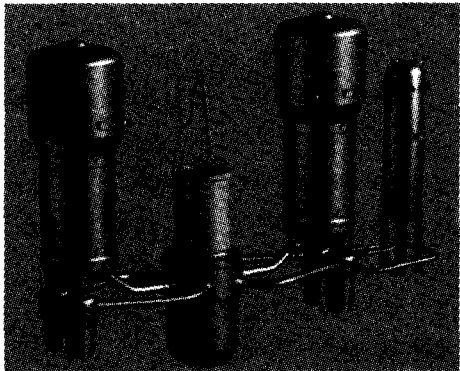


图 1 AP1000 主管道系统示意
Fig.1 RCL piping system for AP1000 nuclear power plant

表 1 AP1000 主管道焊口规格参数
Table 1 Welding points parameters for RCL piping system

管道属性	连接设备	焊口规格/mm	焊接位置	焊口数
冷段	压力容器	$\phi 688.85 \times 65$	5G	4
冷段	主泵	$\phi 688.85 \times 65$	5G	4
热段	压力容器	$\phi 952.5 \times 82.55$	5G	2
热段	蒸汽发生器	$\phi 952.5 \times 82.55$	6G	2

AP1000 主管道母材采用 ASME SA-376 TP316LN 超低碳控氮不锈钢整体锻造加工而成^[1],属于 18Cr-12Ni-2.5Mo-N 低碳系列奥氏体不锈钢,具有优良的焊接性和抗晶间腐蚀能力^[2]。但由于奥氏体不锈钢的导热系数小,线膨胀系数较大^[3],导致在焊接过程中会产生较大的焊接应力,如果焊接材料或焊接工艺选择不当,会产生热裂纹等缺陷,影响焊缝质量。

2 焊接工艺

焊接工艺对焊缝及热影响区的组织有很大影响,合适的焊接工艺参数和一定的技术措施相结合能保证焊缝及热影响区的性能和质量。窄间隙 TIG 自动焊接技术是在应用已发明的 TIG 焊接方法和工艺的基础上,加上特殊的焊丝、保护气、狭窄坡口内的导入技术以及焊缝自动跟踪等特别技术而形成的一种专门焊接技术^[4]。它不仅大幅度减小了焊缝坡口横截面积,使焊接金属的填充量减少 80% 左右,还可以通过调节脉冲波形、脉冲电流幅值、基值电流大小、脉冲电流维持时间和基值电流持续时间来控制焊接热输入^[5],实现高效率焊接,既提高焊接质量和效率,降低劳动强度,又缩短焊接周期。

2.1 焊接材料选择

由于主管道材料 ASME SA-376 TP316LN 属于超低碳不锈钢,因此在选择焊接材料时,也选用超低碳系列的焊材,以保证焊接接头的使用性能,确保焊缝的综合性能与母材相匹配。AP1000 主管道窄间隙 TIG 自动焊选用直径为 1.0mm 的 ER316L 焊丝,焊丝化学成分要求如表 2,3 所示。在使用之前,需要根据 ASME II^[6] 材料 C 篇 SFA-5.9 的规定进行复验且结果合格。

表 2 焊丝化学成分要求
Table 2 Chemical composition requirements of welding wires

元素	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P
熔敷金属	≤ 0.03	18.0 ~ 20.0	11.0 ~ 14.0	2.0 ~ 3.0	1.0 ~ 2.50	0.30 ~ 0.65	≤ 0.025
元素	S	Cu	Co	V, Ti, N, Cb + Ta			铁素体
熔敷金属	≤ 0.01	≤ 0.75	≤ 0.05	提供实测数据			5FN ~ 16FN

注:表中数值为质量分数

表 3 焊丝全焊缝金属拉伸性能
Table 3 Tensile properties of all weld metal wire

试验温度	抗拉强度 R_m /MPa	规定强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A /%	断面收缩率 Z_A /%
室温	≥ 550	≥ 345	≥ 30	提供实测数据

2.2 焊接坡口加工

AP1000 主管道窄间隙 TIG 自动焊接的突出特点就是在确保焊接工艺可以实现的情况下,采用尺寸较小的坡口,减少焊缝熔敷金属的填充量和焊接收缩量,最大限度提高工作效率。用坡口加工机加工坡口之前,根据激光测量和 3D 建模技术确定切割量数据和坡口加工的切割线,在切割的同时,使用激光跟踪仪对坡口加工面进行检测,加工完成后,形成满足粗糙度、圆弧半径和带钝边的坡口角度要求的坡口。具体的焊接坡口形式和尺寸如图 2 所示。图 2 中各参数尺寸为: $\beta = 5^\circ \pm 0.5^\circ$, $S = (2.29 \sim 2.54) \text{ mm}$, $R = (1.59 \pm 0.13) \text{ mm}$, $P = (1.91 \pm 0.13) \text{ mm}$, $b = (0 \sim 2) \text{ mm}$, $z \leq 0.8 \text{ mm}$, $\phi = 952.5 \text{ mm}$, $h = 82.6 \text{ mm}$ 。

2.3 焊接工艺参数筛选

窄间隙 TIG 自动焊接脉冲电流、电弧电压、送丝速度、焊机头行走速度等参数之间的匹配关系将直接影响焊缝外观成型和焊缝内在质量。在开始 AP1000 主管道窄间隙 TIG 自动焊接之前,通过大量的窄间隙模拟试验,筛选出比较合理的工艺参数范围,其中打底焊对焊接工艺参数比较敏感,既要求

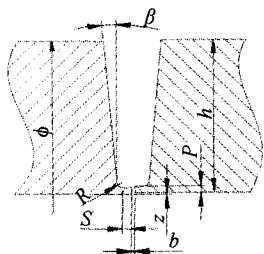


图2 主管道系统焊接坡口示意

Fig. 2 Welding groove for RCL piping system

焊透同时又要求不能烧穿,应严格控制,填充和盖面焊接时的工艺参数可选择范围比较宽。

焊接电流打底焊时最小,一般峰值 150 ~ 180A,基值 50 ~ 80A;次层焊接时可以适当调高电流;填充焊接时,一般峰值 260 ~ 290A,基值 125 ~ 145A;盖面焊接时,电流值调低,一般峰值 220A 左右,基值 120A 左右。送丝速度也是打底焊时最低,一般峰值 22 ~ 25in/min (1in = 25.4mm),基值 18 ~ 20in/min;正常焊接时,一般峰值 40 ~ 50in/min,基值 30 ~ 40in/min;次层焊接和盖面焊接时,适当降低。最大热输入控制不超过 49.45kJ/in (19.46kJ/cm)。一般情况下,焊缝宽度不超过 8mm 时,可采用单道焊接;当焊缝宽度 8 ~ 10mm 时,可采用单道摆动焊接;当焊缝宽度超过 10mm 时,应采用多道焊接。

2.4 焊缝背面充氩保护

为保证主管道焊缝背面成型和焊缝质量,所有主管道焊接背面必须充氩保护,氩气纯度 ≥ 99.99%。根据主管道的规格和坡口形式自行设计冷段、热段单面焊接两种规格的背面充氩保护装置,并在焊口组对完成后准备焊接之前,把该保护装置安装在主管道内部,形成一个氩气室。打底焊接前 10 ~ 20min 送气,保证气室内的空气被排除干净,利用测氧仪测量焊接区域氧气含量 < 1%。打底焊时背面氩气流量 40 ~ 50L/min,打底完成后流量降低至 10 ~ 20 L/min。焊缝熔敷金属厚度 > 15mm 后可以停止背部充氩。

2.5 焊接变形控制措施

在主管道焊接之前,通过窄间隙 TIG 自动焊接模拟试验、焊接工艺评定试验等,动态跟踪测量变形量,得出焊接收缩变形的数据,掌握变形规律,从而制定合理的安装顺序来最大限度减小焊接应力,同时为掌握焊接过程中的焊接变形趋势,提前采取反变形措施,防止产生挠曲变形,需要利用激光测量仪、百分表对焊接中的主管道进行实时精确检测,找出控制焊接变形的办法。主管道焊接变形主要与焊接热输入和焊道分布有关,焊接变形应在焊

缝厚度达到管壁厚度的 20% 之前基本控制,可在焊接工艺参数允许的前提下通过局部位置增加焊道或调节焊接热输入来进行调整。

3 主管道焊接顺序

AP1000 主管道只有热段和冷段,没有过渡段,其几何尺寸是确定的,焊缝的收缩变形只能通过合理安排主管道的 12 道焊口先后顺序来达到相对平衡,让焊缝在整个焊接过程中得到相对自由收缩,控制焊接残余应力。根据模拟试验和现场实际安装经验,AP1000 主管道焊口焊接顺序如下:压力容器吊装就位→压力容器管嘴激光测量,3D 建模→压力容器侧主管道冷、热段坡口加工→主管道冷、热段吊入→压力容器侧主管道冷、热段组对→压力容器侧主管道冷、热段 3 个焊口同时焊接至 50% 壁厚→蒸汽发生器管嘴激光测量,3D 建模→蒸汽发生器侧主管道冷、热段坡口加工→蒸汽发生器吊装就位→蒸汽发生器侧主管道冷、热段坡口组对→蒸汽发生器侧主管道冷、热段 3 个焊口同时焊接至 50% 壁厚→焊接压力容器侧主管道冷、热段 3 个焊口剩余 50% 壁厚→焊接蒸汽发生器侧主管道冷、热段 3 个焊口剩余 50% 壁厚→按上述工序完成另一回路主管道焊接。

4 结语

1) 窄间隙 TIG 自动焊接技术大幅度减小了焊缝坡口横截面积,精确控制焊接工艺参数,降低焊接热输入,排除了人为因素的影响,实现了高效率焊接,不仅提高了焊接质量、降低劳动强度,而且缩短焊接周期。

2) 窄间隙 TIG 自动焊接技术已经成功应用于我国从美国西屋公司引进、消化、吸收的第三代核电非能动先进压水堆核电站 AP1000 主管道焊接中,应用结果完全满足设计要求,推广应用前景广泛。

3) 合理选用焊接工艺参数和安装操作顺序,同时辅助利用激光测量和 3D 建模技术,能有效控制焊接残余应力和收缩变形。

参考文献:

- [1] 林诚格. 非能动安全先进核电站 AP1000 [M]. 北京: 原子能出版社, 2008.
- [2] John C Lippold, Damian J Kotecki. Welding metallurgy and weldability of stainless steels [M]. 陈剑虹译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 邹增大. 焊接手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 张富巨, 罗传红. 窄间隙焊接技术中焊接方法特性的遗传 [J]. 焊接技术, 2002, 31(4): 8-11.
- [5] 王海东, 任伟, 裴月梅, 等. 压水堆核电站主回路管道窄间隙自动焊工艺研究 [J]. 电焊机, 2010, 40(8): 21-27.
- [6] ASME. Boiler and pressure vessel code II materials [S]. 1998.