

文章编号：0258-0926(2018)03-0128-06; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0128

熔化极气体保护自动焊工艺在核电站钢制安全壳中的应用

刘非, 唐识

国核示范电站有限责任公司, 山东荣成, 264312

摘要: 简要介绍了熔化极气体保护自动焊(GMAW)的工艺应用现状、国家核安全法规对工艺应用要求; 从钢制安全壳设计单位支持、焊接坡口形式及尺寸确定、焊接工艺参数匹配、坡口组对和背面清根等方面分析了 GMAW 自动焊工艺应用的难点; 并从焊接方法、设备、材料选择和焊接工艺匹配性试验以及焊接工艺评定等方面介绍了工艺应用前的准备工作; 最后介绍了 GMAW 自动焊工艺应用的要求和实施结果。应用结果表明: GMAW 自动焊工艺在核电站钢制安全壳焊接是可行的。

关键词: 核电站; 钢制安全壳; 熔化极气体保护焊; 自动焊

中图分类号: TG457.1 **文献标志码:** A

Application of GMAW Automatic Welding Process in Nuclear Power Plants with Steel Containment Vessel

Liu Fei, Tang Shi

State Nuclear Power Demonstration Plant Co. Ltd., Rongcheng, Shandong, 264312, China

Abstract: This paper briefly introduces the status of the application of GMAW process, and the requirements of national nuclear safety regulation for process applications. This paper analyzes the difficulties of GMAW welding process application from the aspects of the support from the design organizations for steel containment vessel, the determination of welding groove form and size, welding parameters matching, groove on the back and clear root and other automatic GMAW welding process. This paper introduces the preparation before technology application from the aspects such as welding methods, equipment, material selection, welding process matching test and welding procedure qualification. Finally, this paper introduces the automatic GMAW welding application requirements and implementation results. The application results show that the GMAW welding process in the plant steel containment vessel welding is feasible.

Key words: Nuclear power plant, Steel containment vessel, GMAW, Automatic welding

0 引言

国内某大型先进压水堆核电站钢制安全壳直径为 43 m, 高度为 73.6 m, 壳体材料为低合金高强度 SA738 Gr.B 调质钢板, 壁厚为 43~55 mm, 钢制安全壳由上下封头和筒体组成, 筒体由 12 圈板 144 块弧板现场拼装焊接而成, 涉及 144 条纵焊缝和 13 条环焊缝, 焊缝总长度约为 2300 m。

国内在建的 AP1000 核电站钢制安全壳焊接采用的手工焊条电弧焊工艺^[1-3]。传统采用手工焊条电弧焊方法制造钢制安全壳受外在因素影响较大, 其质量可靠性保证难度增加。为了提高核电站钢制安全壳焊接质量, 减少人为因素的影响, 压缩核电站钢制安全壳的焊接工期, 采用先进、高效的自动焊接技术, 是未来核电建设发展的趋势。

收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2017-06-20

作者简介: 刘非(1976—), 男, 高级工程师, 现主要从事管理生产准备、技术设计、计划投资等工作

1 GMAW 自动焊工艺特点及应用现状

相比传统的手工焊条电弧焊,熔化极气体保护自动焊具有焊接生产效率高、焊接变形小、可以获得含氢量较焊条低的焊缝金属,可以连续化焊接、不过分依赖焊接人员技能水平、焊接质量稳定等,但是焊接过程需要防风,且灵活性差、可达性差等。随着熔化极气体保护自动焊设备和焊接材料的发展,熔化极气体保护自动焊工艺已广泛应用于锅炉、压力容器制造等行业^[4-6]。为了适应核电发展,国内某些单位已开展了钢制安全壳(钢衬里)非熔化极惰性气体钨极保护自动焊(TIG 自动焊)工艺^[7-8]和熔化极气体保护自动焊工艺^[9-10]的研究和应用。核电站钢衬里多选用优质的低合金钢和碳素钢,如我国的 20HR、法国的 A42、欧洲标准的 P265GH 等^[11],钢衬里的钢板厚为 6 mm,采用 TIG 自动焊工艺相比手工焊条电弧焊工艺,能满足工程建设效率和质量建设需要,但是对于三代非能动的 AP1000 和 CAP1400 核电站钢制安全壳筒体(壁厚为 52 mm 和 55 mm 两种规格)焊接,应选用更加高效的熔化极气体保护自动焊工艺焊接。

2 核安全法规对工艺应用要求

核电站钢制安全壳属于抗震 I 类的民用核安全设备,属于国家核安全监管部监管范畴,为了确保民用核安全设备制造质量,《民用核安全设备监督管理条例》(国务院令 500 号)第三十一条规定:在核安全设备的设计、制造、安装、焊接和无损检验等活动中必须采用成熟的且经过验证的技术或工艺;《民用核安全设备设计制造安装和无损检测监督管理规定》(HAF601-2008)第二十三条规定:民用核安全设备制造、安装单位在活动开始前,应当组织相关人员对设计提出的技术要求进行消化、分析,编制制造、安装过程执行文件,并严格执行;应当根据确定的特种工艺,完成必要的工艺试验和工艺评定。按照上述法规要求,核电站钢制安全壳焊接活动必须采用成熟的且经过验证的焊接工艺,焊接属于钢制安全壳制造过程中的特种工艺,应在焊接活动前完成必要的焊接工艺试验和工艺评定。

3 GMAW 工艺应用难点

GMAW 自动焊工艺虽然已在桥梁、汽车、压

力容器等行业广泛应用,但是在国内核电站钢制安全壳筒体焊接还是首次,按照国家核安全法律法规要求,一项新工艺要应用于民用核安全设备必须证明该工艺是成熟可靠的。

3.1 工艺应用前提

核电站钢制安全壳属于民用核安全设备,因此承担钢制安全壳设计、制造的单位必须是民用核安全设备设计、制造持证单位。熔化极气体保护焊自动焊工艺要在核电站钢制安全壳焊接中应用前提是钢制安全壳的设计单位支持(为支持其设计工作,设计单位在开展设计之前通常会开展相关的试验,其试验成果将成为支持其设计的关键输入),并在钢制安全壳设计相关文件中明确可以采用熔化极气体保护焊工艺,如 CAP1400 示范工程钢制安全壳设计单位在《钢安全壳设备规格书》中进行了明确,并配套发布了《钢安全壳用 ER90S-G 气体保护焊焊丝技术条件》、《钢安全壳用药芯焊丝技术条件》、《安全级设备焊接工艺评定技术条件》等设计文件。

钢制安全壳制造单位必须按照设计单位要求,完成 GMAW 自动焊工艺试验和焊接工艺评定,向设计单位提交成果,证明本单位已经掌握了熔化极气体保护焊工艺,且已有实施该工艺的设备 and 人员。所以,钢制安全壳设计单位的支持是工艺应用的前提。

3.2 焊接坡口形式及尺寸确定

选择合理的坡口形式和通过大量的工艺试验确定坡口尺寸是焊接工艺顺利实施的基础和确保焊接质量的关键要素之一,焊接坡口形式的选择通常与焊接方法、产品结构形式、焊件材质与厚度、技术要求以及焊件的焊接工况等有关,在保证焊件质量(保证根部焊透、坡口侧壁熔合)的前提下,应尽可能考虑减少坡口熔敷金属的填充量,提高焊接效率、减小焊件变形以及坡口形状容易加工等因素。

由于 GMAW 自动焊工艺是首次应用到核电站钢制安全壳筒体焊接,为了确保钢制安全壳筒体焊接的质量和顺利实施,不影响工程建造周期,钢制安全壳焊接单位必须充分考虑 GMAW 自动焊工艺首次应用的困难,制定相应的应对措施。为此,承担国内某核电站钢制安全壳焊接单位准备了 2 种焊接工艺:手工焊条电弧焊工艺和

GMAW 自动焊工艺,当钢制安全壳筒体拼装焊接条件满足自动焊工艺焊接(打底、填充和盖面)时,则完全采用自动焊工艺;反之,则根据现场实际情况合理选择采用手工焊条电弧焊工艺或两种混合工艺。

由于钢制安全壳筒体壁板重量和厚度,壁板滚压成弧板,坡口加工精度和条件等方面要求和限制,壁板焊接坡口需要在壁板滚压成弧板前采用机械加工方法加工成需要的坡口形式和尺寸。基于上述原因,选择的坡口形式和尺寸必须满足两种焊接工艺要求。为此,需要开展大量的工艺试验才能确定出适合 2 种工艺的焊接坡口形式和尺寸。选择合适的坡口形式和确定最终的焊接坡口尺寸是 GMAW 自动焊工艺一个难点。

3.3 焊接工艺参数的匹配

在确定的母材和焊材匹配以及焊接设备选定的情况下,根据已经确定的坡口型式和焊接坡口的装配要求,保证焊接质量是非常关键的。GMAW 自动焊工艺参数较多,包括焊接电流、焊接电压、保护气体流量、焊丝干伸长度、焊丝角度、焊接小车行走速度、摆动宽度等工艺参数。为了保证根部焊透、侧壁和层间良好熔合,针对不同的工况确定出最佳焊接工艺参数是非常难的,因为各种焊接参数不是孤立的,而是相互影响的,另外现场坡口组的质量也将影响到焊接参数的设置。因此,合理的焊接参数是确保焊接质量的关键,通过熔化极气体保护自动焊的电流、电压、摆动宽度、保护气体流量等参数最佳匹配,实现根部打底焊透,填充过程层间熔合和侧壁熔合,满足无损检测、理化试验对焊接接头质量的要求。

3.4 坡口组对和背面清根

现场焊口的组对质量(坡口间隙和错边量),将影响到 GMAW 自动焊工艺能否顺利实施(尤其是打底焊接),由于现场条件限制和筒体壁板滚压卷制过程圆弧的不均匀性、变形等因素影响,现场焊口组对难以达到均匀一致的高精度,这就要求自动焊设备能根据坡口尺寸及偏差自动调整有关工艺参数,以降低或消除不均匀参数对焊接质量的影响。在现场如果出现了不能满足自动焊组对要求时,无法实现自动焊打底焊接时,可以采用手工焊条电弧焊打底,完成打底焊接后,再使用自动焊进行填充和盖面。另外筒体正面焊接

完成后背面清根质量也将影响是采用手工焊条电弧焊填充还是自动焊工艺填充的问题。因此,确保坡口组对和背面清根质量是确保自动焊工艺能否顺利实施应用的关键。

4 焊接工艺试验及评定

开展工艺试验目的是通过大量的工艺试验,达到焊接相关人员能够熟练掌握各种工况条件下的焊接工艺参数的匹配和焊工熟练操作焊接设备,为焊接工艺评定和现场工艺应用做好充分的技术准备工作,开展焊接工艺试验前应解决如下问题:

4.1 焊接方法选择

熔化极气体保护焊包括熔化极惰性气体保护焊(MIG)、熔化极氧化性混合气体保护焊(MAG)、二氧化碳气体保护焊(CO₂)、药芯焊丝气体保护焊(FCAW)等四类,根据上述四类焊接方法的特点、产品材质和厚度、焊接质量要求、现场可达性方面以及上述焊接方法的实际应用领域和情况等多方面综合考虑,某核电站钢制安全壳筒体焊接选用脉冲熔化极氧化性混合气体自动焊工艺方法,该方法是一种高效、优质的焊接方法,主要利用脉冲电流来控制熔滴过渡,减小飞溅,改善焊缝成形,提高焊接质量,该种焊接方法可在平均电流小于喷射过渡电流情况下实现稳定的喷射过渡,可实现厚板全位置焊接。

4.2 焊接设备选择

选择焊接设备时,应考虑到产品的焊接工艺以及焊接技术所提出的要求,根据焊件材料种类、焊件厚度、焊接位置、现场工况等提出具体焊接设备性能,如焊接设备的输出功率范围、电源的空载电压、电源的动特性和静特性、输出电流类型、焊接参数的调节范围和送丝速度等因素。新购置的焊接设备除了上述特性要求外,还要考虑工作环境、焊接位置(焊接小车和机头)可达性、焊接操作人员素质以及焊接设备的可靠性和经济性等要求。综合上述考虑,某核电站钢制安全壳筒体焊接设备选用的国外某焊接设备公司生产的 R350 型脉冲熔化极气体保护焊机,该套焊接系统由焊接电源、焊接轨道、焊接小车、焊接机头和遥控面板等组成,焊接电源为全数字化控制,熔滴过渡为“一脉一滴”直流脉冲过渡,该种熔滴过渡方式能有效的控制焊接线能量和焊缝成形;

表 1 推荐焊接工艺参数
Table 1 Recommended Welding Process Parameters

焊层	焊接方法	填充金属		焊接电流类型	焊接电流/A	电压/V	行走速度/mm·min ⁻¹	气体流量/L·min ⁻¹
		牌号	直径/mm					
打底	GMAW	ER90S-G	1.2	DC/EP	90~120	22~26	33~64	16-24
填充	GMAW	ER90S-G	1.2	DC/EP	110~140	20~25	55-76	20-36
盖面	GMAW	ER90S-G	1.2	DC/EP	100~135	20~28	51-66	30-36

注：最小预热温度为 120 ，最大层间温度为 190 ；导电嘴距离工件距离为 10~18 mm ；喷嘴尺寸为 18~35 mm ；后热温度为 200~350 ，保温时间不少于 30 min ；热处理温度为 595~620

焊接小车带有自动反馈系统，能有效控制焊丝干伸长度与焊接电流的大小，系统能够通过自动调节焊丝干伸长度保证焊接电流的恒定输出。

4.3 焊接材料选择

熔化极气体保护自动焊采用的焊接材料包括焊丝和保护气体，母材、焊丝和保护气体的化学成分决定了焊缝金属的性能和化学成分。焊丝的选择包括焊丝尺寸和化学成分的选择，焊丝尺寸的选择主要考虑到被焊工件厚度和焊接位置等因素，按照某核电站钢制安全壳设计单位对焊丝选用要求（《钢安全壳用 ER90S-G 气体保护焊焊丝技术条件》）并结合现场焊接位置（立焊和横焊），GMAW 自动焊工艺试验选用与 SA738Gr.B 钢性能匹配的国内某焊材厂生产的 ER90S-G 焊丝，焊丝直径为 1.2 mm。保护气体特性对焊接过程会产生重要影响，进而影响到焊接质量^[12]，保护气体选用二元氧化性混合气体 80%Ar+20%CO₂，该种混合气体具有焊接速度快，熔深较大，容易控制熔池，可用于喷射过渡、脉冲射滴过渡，适用于全位置焊接，飞溅小，冲击韧性好，焊缝成形美观等特点^[13]。

4.4 焊接坡口设计

合理的坡口设计是保证质量、提高劳动效率的重要环节，坡口设计中的坡口形式选择和尺寸与相应的焊接工艺相匹配，钢制安全壳筒体焊缝位置有立焊和横焊两个位置，考虑到坡口组对和背面清根质量对自动焊工艺应用的影响，结合手工焊条电弧焊坡口设计要求，通过大量的工艺试验确定了适合手工焊条电弧焊和 GMAW 自动焊工艺的坡口尺寸和组对要求，图 1 为 GMAW 自动焊工艺立焊和横焊坡口形式及尺寸。

4.5 焊接工艺参数匹配试验

GMAW 自动焊工艺的焊接电流、极性、电弧电压、焊接速度、焊丝伸长长度、焊枪倾角、焊

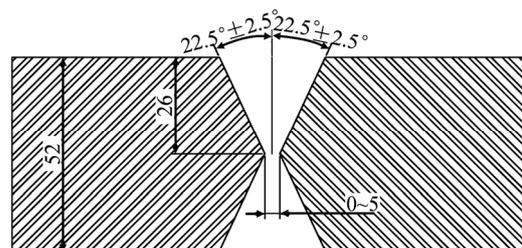


图 1 焊接坡口形式及尺寸

Fig. 1 Welding Groove Form and Size

丝直径、保护气体成分和流量以及焊接位置等都将影响焊缝熔深、焊道几何形状和焊接质量。对上述焊接参数的影响与控制的目的是为了获得质量良好的焊缝，这些焊接参数不是完全独立的，改变某一个焊接参数就要求同时改变另一个或另一些焊接参数以便获得所要求的结果。最佳的焊接工艺参数受母材和焊材成分、焊接位置和质量要求等因素影响，需要焊接人员较高的技能和丰富的经验。因此，对于每一种情况，为获得最佳结果，焊接工艺参数的搭配可能有几种方案，而不是唯一的一种。

为了获得最佳的焊接工艺参数，在焊接坡口形式确定以后，需要根据坡口型式进行大量的焊接工艺参数的匹配试验，如在焊接过程中焊接小车的行走速度和摆动速度以及摆动到坡口两侧的停留时间等，都决定焊缝质量。通过大量试验获得最佳的匹配参数设置，最终通过对工艺评定和产品见证件的无损检测和理化试验，验证所用焊接工艺参数是能够焊接出合格的产品，表 1 为立焊位置推荐 GMAW 自动焊工艺参数。

4.6 焊接工艺评定

按照某核电站钢制安全壳设计单位编制的《安全级设备焊接工艺评定技术条件》要求，钢制安全壳筒体焊接单位在熟练掌握 GMAW 自动焊工艺后，进行了手工焊条电弧焊和 GMAW 自动焊工艺的立焊和横焊 2 个位置的焊接工艺评

定,各项试验结果满足设计单位《安全级设备焊接工艺评定技术条件》要求,证明了拟定的焊接工艺参数能够焊接出合格产品,其工艺是可行的。

5 工艺应用

5.1 坡口组对、预热、焊接、后热

某核电站钢制安全壳设计单位设计文件要求,钢制安全壳筒体纵焊缝和环焊缝的坡口组对间隙为 0~10 mm,纵焊缝错边量小于等于 3.25 mm,环焊缝错边量小于等于 6.5 mm;通过前期大量的工艺试验和焊接工艺评定确定的坡口形式为双 X 型坡口,组对间隙为 0~5 mm 时,可直接采用 GMAW 自动焊工艺打底焊接,对于组对间隙为 5~10 mm 的焊缝,则采用陶瓷衬垫后,再使用 GMAW 自动焊工艺打底焊接。

坡口组对点焊和定位焊接使用评定合格的采用手工焊条电弧焊工艺,纵焊定位焊缝长度为 60~80 mm,间隔长度为 200~300 mm;环焊缝定位焊长度为 100~150 mm,间隔距离为 300~500 mm;点焊和定位焊时的预热温度大于等于 120 。

熔化极气体保护自动焊轨道采用铝合金轨道,单根轨道长度为 3 mm,轨道固定采用耐高温的磁铁,轨道安装时要保证连接处圆滑过渡,以满足焊接小车顺利通过。焊接纵焊缝的方向为从下到上,焊接前应按工艺规程要求,增加引弧和收弧板,无法增加引弧板时,在环焊缝坡口上起弧,焊接完成后,对起弧位置熔敷金属打磨去除。环焊缝焊接时根据焊机数量(至少 4 台)分段对称焊接。正面打底、部分填充焊接后,根据背面清根质量情况,可选用手工焊条电弧焊工艺进行坡口填充焊接,满足自动焊工艺条件时则使用自动焊工艺焊接。

为了保证钢制安全壳筒体焊接质量,防止产生冷裂纹,在每段焊缝终止焊接时(焊接不再进行预热或焊接时),温度降低到最低预热温度以前应立即铺设加热板继续加热,加热温度到 200 ~ 350 后进行保温,保温时间不得低于 30 min。

5.2 效益分析

时效性对比分析:熔化极气体保护焊自动焊工艺具有焊接速度快,可以连续施焊,焊接速度

通常是手工电弧焊焊接速度的 2~4 倍。根据现场已完成大的环焊缝和纵焊缝完成情况,综合考虑 2 种工艺的准备时间、焊缝层间清理、背面清根以及焊缝出现质量的返修等因素,采用 GMAW 自动焊工艺的效率约是手工电弧焊工艺的 2 倍。

质量对比分析:由于焊接设备自动化焊接减少了对手工技能的依赖,降低人为因素的影响,从而提高了焊接工程的质量,焊缝的一次合格率通常都在 95%以上,从现场统计 2 种焊接工艺一次合格可知,采用自动焊工艺的焊接一次合格率要高于手工焊,且焊缝表面成形明显好于手工焊。

成本分析:于海涛、王海东等人论文^[14],从人员工资、焊缝返修、焊材消耗量以及焊工培训费用等方面进行了成本分析,熔化极气体保护自动焊工艺能够在核电站钢制安全壳现场拼装全面推广应用,将具有更大的经济效益。

5.3 应用结果

GMAW 自动焊工艺已在国内某核电站 2 号机组钢制安全壳一环和二环 24 条纵焊缝焊接应用,现场坡口组对尺寸满足了 GMAW 自动焊工艺要求,其整条焊缝的打底、填充和盖面按照评定合格的工艺已完成了焊接,焊接完成后经按照设计要求完成了 100%VT 和 RT 检验,焊缝一次合格率都在 95%以上,出现的缺陷主要为大量焊接飞溅、层间未熔合。经现场工程师分析,缺陷产生的主要原因是因为前期焊工经验不足,焊接过程中对于局部坡口组对间隙不一致的情况,需要焊工根据焊缝熔合情况通过遥控面板适当调节焊接小行走速度和摆动弧度以及摆动到坡口边缘两端的停留时间。

按照设计文件要求,在纵焊缝设置了产品焊接见证件,焊接产品见证件进行了拉伸、弯曲、冲击试验等试验,试验结果满足设计文件要求。通过现场纵焊缝、产品见证件、环焊缝等焊接质量结果显示:核电站钢制安全壳形成拼装焊接采用熔化极气体保护自动焊工艺是可行的。

6 结 论

通过大量的工艺试验,掌握了 GMAW 自动焊工艺,通过现场实施和产品见证件力学性能试验结果表明:GMAW 自动焊工艺应用于核电站钢制安全壳筒体现场拼装焊接是可行性。

参考文献：

- [1] 李会永, 王军涛. AP1000 核电站钢制安全壳底封头组装焊接质量控制[J]. 广东化工, 2012, 39(8): 183-184.
- [2] 于立学, 宋聚海. SA738 Gr.B 焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2014, 44(3): 1-4.
- [3] 唐识, 张俊宝, 朱跃德, 等. 核电站钢制安全壳 SA-738Gr.B 的焊接工艺[J]. 电焊机, 2016, 46(7): 72-78.
- [4] 陈松. 药芯焊丝自动焊技术在球罐焊接上的应用[J]. 化工装备技术, 2002, 23(6): 32-35.
- [5] 陈永峰. 药芯焊丝熔化极气体保护自动焊接技术在低温液化石油气储罐焊接中的应用[J]. 机电工程技术, 2012(9): 105-109.
- [6] 周柏生. 全位置药芯焊丝自动焊在大型储罐焊接中的应用[J]. 现代焊接, 2015, 7: 58-59.
- [7] 李予卫. 自动焊技术在核电站建造中应用与研究[C]// 深圳: 核电站新技术交流研讨会. 2010.
- [8] 别刚刚, 程小华, 许红梅. 核电站钢衬里壁板安装脉冲 TIG 自动焊试验[J]. 焊接技术, 2016, 8: 36-39.
- [9] 王晓光, 张伟栋, 郭彦辉, 等. SA738Gr.B 钢自动焊接工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(9): 20-24.
- [10] 蒋善玉. 核电站安全壳用 SA738Gr.B 钢板焊接性能研究[J]. 山东冶金, 2015, 5: 42-44.
- [11] 唐识, 张俊宝, 朱跃德. 核电站钢制安全壳用 SA738Gr.B 钢的焊接工艺评定[J]. 热加工工艺, 2016, 23: 245-247.
- [12] 杨新华. 熔化极气体保护焊电流与电压调节[J]. 电焊机, 2016, 46(9): 118-120.
- [13] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(焊接方法及设备)[M]. (第三版)北京: 机械工业出版社, 2010.
- [14] 于海涛, 王海东, 王世杰. CAP1400 核电站钢制安全壳 CV 自动焊技术研究及应用[J]. 金属加工, 2017, 6: 7-11.

(责任编辑: 张祚豪)