

核电设备蒸汽发生器四种管板镍基合金自动堆焊技术比较

李双燕

【摘要】介绍了四种核电蒸汽发生器管板镍基合金自动堆焊技术，对四种不同自动堆焊工艺进行了对比分析，从生产效率、堆焊层质量、堆焊层纯净度、减少管子与管板焊缝返修率等方面综合考虑，在管板镍基合金自动堆焊方式的选择上，双热丝等离子弧自动堆焊更具有优势。经四种堆焊技术比较，双热丝等离子弧自动堆焊技术用于Inconel 690镍基合金堆焊是可行的，可以进行开发应用于核电设备的产品堆焊。

关键词：核电设备；镍基合金；堆焊

1. 概述

核电站设备蒸汽发生器是压水堆核电站一回路核岛主要设备之一，管板一回路侧长期接触带有放射性和腐蚀性的载热剂介质，按产品技术要求，其侧面需要大面积堆焊镍基合金。该堆焊工艺是蒸汽发生器制造过程中要求最高、难度最大的关键工序之一。堆焊质量将影响蒸汽发生器管板一次侧的耐腐蚀性及管子与管板间焊缝的综合性能，对于设备的使用性能及安全运行至关重要。因此，管板堆焊工艺的选择一方面需要考虑管板堆焊的生产效率及堆焊层质量，另一方面需要考虑堆焊层的纯净度，以便于后面工序中减少管子与管板焊缝的返修率。

第三代核电技术发展的核岛主设备蒸汽发生器管板堆焊均采用INCONEL690镍基合金，INCONEL690镍基合金材料焊接

性比较差，热裂纹敏感性高、堆焊金属润湿性差，对氧化、高温失塑裂纹（DDC）敏感。目前国内外在蒸汽发生器管板的大面积镍基合金堆焊过程中，常采用的堆焊工艺为双热丝惰性气体钨极保护堆焊（TIG堆焊）、电渣带极自动堆焊、埋弧带极自动堆焊，但镍基合金热丝等离子弧自动堆焊的研究较少。

2. 热丝TIG自动堆焊

热丝TIG焊技术是在普通TIG

焊的基础上对焊丝进行预热，以提高热输入量，加快焊丝和母材的熔化速度，提高熔敷率，调整焊接熔池的热输入量，降低母材的稀释率，同时仍具有TIG焊高品质焊缝的特点。热丝TIG焊的基本原理如图1所示，其生产效率可达常规TIG焊的3倍以上。

热丝TIG自动堆焊的焊丝熔敷系数高、熔合比小、母材稀释率低，焊缝成形美观、焊缝金属杂质含量少、可显著减少焊缝咬

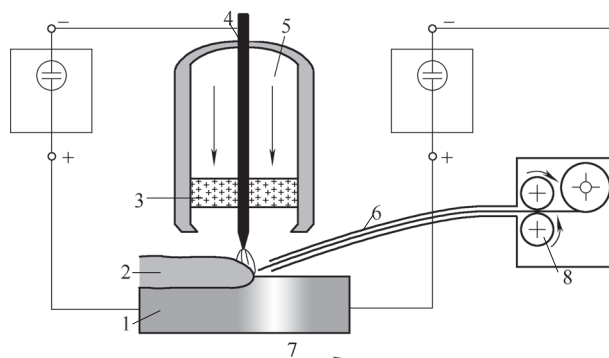


图1 热丝TIG自动堆焊基本原理

1.母材 2.焊缝 3.气体透镜 4.钨电极 5.氩气 6.焊丝 7.焊接方向 8.送丝机

边几率。选用合理的热丝TIG焊接参数,可将焊缝的母材稀释率控制在较低的水平,适用于不锈钢、镍基合金的表面堆焊。

热丝TIG自动堆焊的焊接设备可采用法国Air Liquid Welding France公司提供的SAF-FRO热丝TIG自动堆焊专机,包括机头、焊枪、焊机电源、焊接系统和控制系统。堆焊材料采用ERNiCrFe-7A、牌号为INCONEL Filler Metal 52M的钨极氩弧焊丝,焊丝直径通常选用1.2mm,焊丝由美国SMC公司提供。

针对INCONEL690镍基合金特点,在热丝TIG自动堆焊时需选择合适的保护方式和保护气体成分,以及严格控制焊接电流、焊接速度、热丝电流、送丝速度、焊道间搭接量等工艺参数,才能够达到宏微观金相检测、无损探伤和弯曲试验要求,保证各项力学性能的指标。热丝TIG自动堆焊层的金相组织靠近熔合线的热影响区宽度很小,堆焊层组织非常细小,结构致密。堆焊层熔合良好,未发现气孔等缺陷。

热丝TIG自动堆焊时,每条焊道之间的搭接量非常重要。搭接量过小,会造成焊缝表面不平整,出现咬边等缺陷;搭接量过大,会造成堆焊层过厚,熔合线附近容易出现夹渣、气孔等缺陷。根据工程经验,每条焊道之间的搭接量至少为焊道宽度的50%最为合适。图2为产品的双热丝TIG自动堆焊照片。

3. 热丝等离子弧自动堆焊

等离子弧堆焊是利用联合型等离子弧或转移型等离子弧作为热源,以焊丝或合金粉末作为填

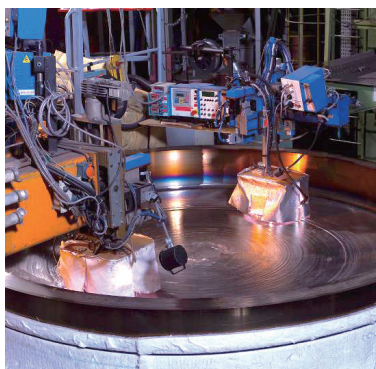


图2 产品热丝TIG自动堆焊

充金属的一种堆焊工艺。与其他常规堆焊热源相比,等离子弧温度高、能量集中、燃烧稳定,能迅速而顺利地堆焊难熔材料。由于堆焊材料的送进和等离子弧参数的调节是独立的,所以稀释率和表面形状较容易控制,稀释率最低可达5%左右,堆焊层厚度

为0.5~8.0mm。

热丝等离子弧自动堆焊时,采用单独预热电源,利用电流通过焊丝所产生的电阻热预热焊丝,再将其送入等离子弧区进行堆焊,可用单丝或双丝自动送进。由于焊丝预热,使熔覆率的提高和稀释率的降低非常明显,并且可去除焊丝表面的水分,故减少了堆焊层的气孔。双热丝等离子弧自动堆焊适用于大面积自动堆焊,常用于压力容器内壁的堆焊,常堆焊不锈钢、镍基合金等材料,而用于核电设备中大面积镍基合金堆焊较少,堆焊原理如图3所示。国外双热丝等离子弧自动堆焊产品如图4所示。

热丝等离子弧自动堆焊设备

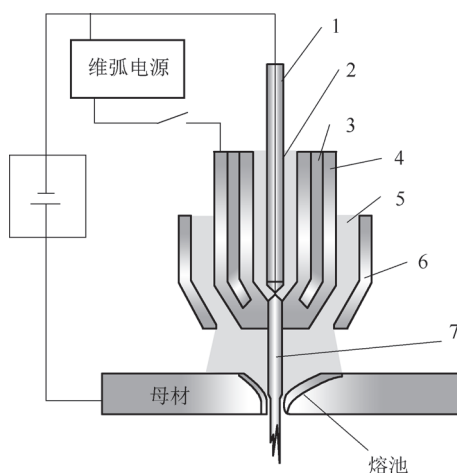


图3 等离子弧堆焊原理示意

1.钨电极 2.辅助气体 3.冷却水 4.冷却水喷嘴 5.保护气 6.保护罩 7.等离子弧

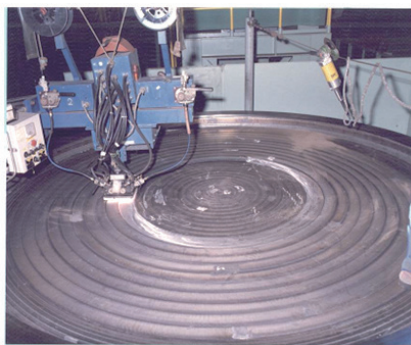


图4 产品双热丝等离子弧自动堆焊照片

包括两套电源，即热丝电源和等离子弧电源。热丝等离子弧自动堆焊时，需控制的工艺参数包括等离子弧的电流、电压、保护气体等，热丝的工艺参数包括热丝电流、热丝电压、热丝送丝速度等。堆焊材料可选择型号为ERNiCrFe—7A的焊丝，直径为1.2mm或1.6mm。在低合金钢锻件SA508 Gr3 C12上，选用美国SMC公司生产的牌号为INCONEL Filler Metal 52M的焊丝，进行双热丝等离子弧自动堆焊工艺试验，试验结果显示堆焊层PT检查、UT检查、弯曲试验、宏微观金相检测、化学成分分析等各项性能指标均满足设计要求。采用焊丝摆动焊接时，焊接熔敷速率非常高，可达每小时熔敷15kg，其熔敷速率达到了带极堆焊的熔敷速率。

由于等离子堆焊技术具有熔敷率高、稀释率低、焊材消耗少的特点，因此双热丝等离子弧自动堆焊技术可以进行开发，用于核电设备INCONEL 690镍基合金堆焊，得到稀释率低、熔深浅、成形良好的堆焊层。

4. 埋弧带极自动堆焊

埋弧焊是电极与工件之间产生的电弧由焊剂覆盖的一种焊接技术，埋弧焊焊接熔池由焊剂形成的渣保护，不受大气侵入。埋弧带极自动堆焊是指采用埋弧焊接技术将钢带以及母材熔化形成焊缝。其主要特点有：熔敷效率高，生产效率高；焊接质量好，焊缝表面质量好；较高的热输入；焊接工艺成熟；无辐射和噪声，是一种安全、绿色的焊接方

法。图5为埋弧带极自动堆焊的原理示意。

埋弧带极自动堆焊的焊接设备包括焊接操作机、焊接电源、行走机构、送带机构、工作台、带极堆焊机头、焊接控制器、控制系统及焊剂输送回收系统等。埋弧带极自动堆焊的焊接材料采用EQNiCrFe—7A类型与配套烧结型焊剂组合，常采用美国SMC公司的INCONEL Weldstrip 52M焊带及配套INCOFLUX SAS2焊剂，进行INCONEL 690材料镍基合金焊接。埋弧带极自动堆焊层的金相组织为典型柱状晶结构，靠近熔合线的低合金钢母材热影

响区为粗晶区，粗晶区宽度很小，在热影响区的大部分区域的组织已细化。

埋弧带极自动堆焊时需控制的焊接参数包括堆焊电流、堆焊电压、堆焊速度，为保证焊接质量，每条焊道之间的搭边量以及每层焊道之间的错边量需严格控制。为提高生产效率，埋弧焊焊带尺寸通常选择60mm宽度，图6为埋弧带极自动堆焊照片。

5. 电渣带极自动堆焊

电渣带极自动堆焊采用的是电渣熔焊方法，它是在埋弧带极自动堆焊和电渣焊的技术基础上发展起来的。它的熔化原理与

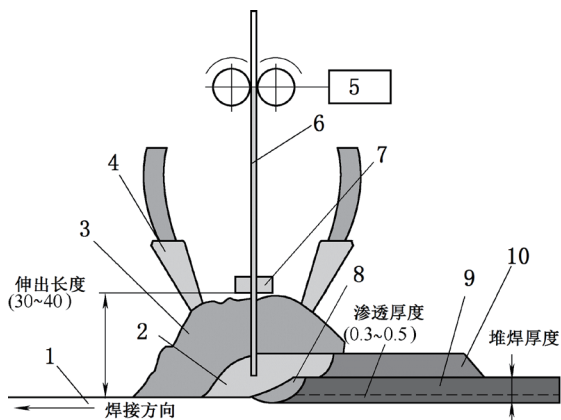


图5 埋弧带极自动堆焊原理示意

1.母材 2.熔渣 3.焊剂 4.焊剂器 5.送带系统 6.焊带 7.电源 8.熔融金属
9.堆焊金属 10.焊渣



图6 产品埋弧带极自动堆焊照片

电渣焊相同，即焊剂因电弧热而熔化形成熔渣，熔渣的导电率较高且大于电弧的导电率，电流将直接流过熔渣进入工件，起焊时引燃的电弧则随之被熄灭。电流流过熔渣产生电阻热用于熔化带材、母材和新加入的焊剂以及维持渣池的熔化状态，金属熔池位于渣池下面从而得到保护。与埋弧带极自动堆焊不同，焊剂粉末只在带极的前方送入。图7 是电渣带极自动堆焊的原理，与埋弧带极自动堆焊相比，电渣带极自动堆焊的特点：熔敷效率和生产效率更高；熔深浅，母材稀释率低；焊接电流大，热输入量较埋弧焊更大；需要使用磁控装置；单侧焊剂供给，相对埋弧焊，更少的焊剂消耗。

电渣带极自动堆焊的焊接设备与埋弧带极自动堆焊基本相同，采用60mm宽度焊带进行电渣带极自动堆焊时，电流高于1000A，由焊接电流感应磁场而产生的电磁力产生的磁收缩效应十分明显，因此必须采用外加辅助磁场，使用专用的磁控装置来尽量抵消堆焊行进过程中自动产生的电磁场，从而克服咬边和改善焊道外观成形。电渣带极自动堆焊时需控制的焊接参数与埋弧带极自动堆焊基本相同，由于增加了磁控装置，堆焊时还需调节磁极参数。一般南北两磁极分别置于带极两侧，横向距焊带边缘10~20mm，纵向略靠焊带后（沿焊接方向）3~8mm，垂直方向磁极离焊件表面10~20mm。同时，必须选择合理的磁控电流大小，外加磁场太强或太弱均会影响堆焊焊道的成形，实际焊接时

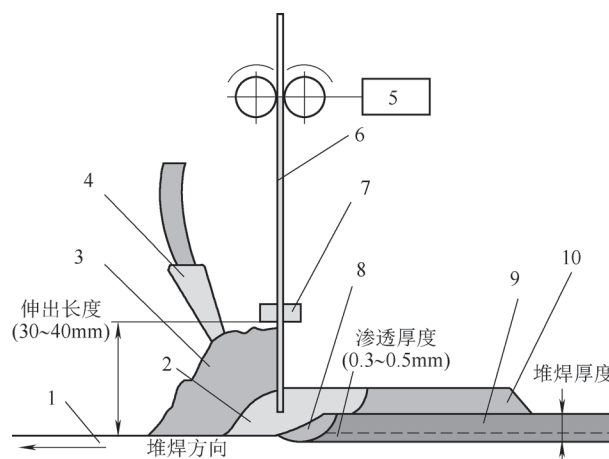


图7 电渣带极自动堆焊的原理示意

1.母材 2.熔渣 3.焊剂 4.焊剂器 5.送带系统 6.焊带 7.电源 8.熔池 9.堆焊金属 10.焊渣

N极电流应大于S极电流。

电渣带极自动堆焊采用的焊接材料型号为EQNiCrFe—7A与配套烧结型焊剂组合，常采用美国SMC公司的INCONEL Weldstrip 52M焊带及配套焊剂INCOFLUX ESS2，进行INCONEL 690材料镍基合金焊接。电渣带极自动堆焊层的金相组织为典型的柱状晶结构，主要组织为奥氏体。低合金钢母材热影响区分为粗晶区和细晶区，在靠近熔合线的区域，晶粒比较粗大，其他区域由于后续层堆焊时会对第一层堆焊时产生的热影响区粗大晶粒有细化作用，堆焊试件经历了焊后热处理之后热影响区的其他大部分区域的晶粒和组织大大细化。为提高生产效率，埋弧焊焊带尺寸通常选择60mm宽度，图8为产品的电渣带极自动堆焊照片。

6. 分析

四种自动堆焊技术中热丝TIG自动堆焊技术和双热丝等离子弧自动堆焊技术属于焊丝堆焊，埋弧带极自动堆焊技术和电渣带极自动堆焊技术属于焊带堆焊。根据附表中的对比结果，从焊接热输入量来看，焊丝堆焊的焊接热输入量比焊带堆焊的小；从熔敷速率来看，带极堆焊比焊丝堆焊的高，但双热丝等离子弧自动堆焊的熔敷速率已经达到了带极堆焊的熔敷速率；从母材稀释率来看，双热丝等离子弧自动



图8 产品电渣带极自动堆焊照片

四种自动堆焊技术对比

项目	带极埋弧堆焊	带极电渣堆焊	热丝TIG堆焊	双热丝等离子堆焊
最大热输入量/ $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$	9.00	11.90	5.40	7.80
熔敷速率/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	14	22	2	15
母材稀释率 (%)	18	10	50	8
焊道厚度/mm	2.5~3.5	3~4	1.5~2.5	5~6

真空电弧炉水冷导电法兰焊接工艺研究

温斌

【摘要】 针对大规格水冷铜制品密集焊缝的焊接技术难点和易出现的焊接缺陷，分析在焊接过程中焊缝出现裂纹的机理。通过合理的选择材料、焊接方法、加工方案等措施保证焊缝的质量，并提出对焊缝表面缺陷点不预热冷补焊的工艺措施。

关键词： 焊接；裂纹

1. 概述

集团公司是以有色金属钛的熔炼以及更深层次冷热加工的大型企业，本次我单位承担了对10t真空熔炼炉上炉帽导电法兰进行改造加工，来改善其冷却效果和冷却效率，保障了导电性能，保护了坩埚法兰导电面，防止因导电面之间放电而出现麻点，影响其导电性能；同时也

防止了因导电法兰受热变形而导致的密封失效，有效延长了坩埚密封圈的使用寿命，降低生产成本。

2. 改造加工问题的提出

原真空熔炼炉上炉帽导电法兰冷却方式如图1所示。采用在导电法兰外圆围绕一圈冷却水管的形式冷却导电法兰，其冷却接触面积小，冷却效果不理想，

使用过程中导电法兰易于受热变形，造成真空密封失效，致使在生产过程中存在安全隐患。

经使用单位提出、设计导电法兰心部水冷形式，最终经过我们多次优化冷却水道，加工出如图2所示的心部水冷导电法兰，经过近一年的使用，得到用户的高度认可，取得良好的使用效果。改造后的水冷导电法兰，不

堆焊最小；从单个焊道的厚度尺寸来看，双热丝等离子弧自动堆焊最大；从换热管与管板焊缝的焊接质量考虑，焊丝堆焊层的纯净度高于焊带堆焊层的纯净度。

通过选取合适的堆焊参数，采用四种不同自动堆焊技术进行INCONEL690镍基合金堆焊，堆焊层的无损检测 results 和理化试验结果，均能满足管板堆焊的技术要求，且均能获得性能良好的焊缝。四种自动堆焊技术综合对比

后，从生产效率、堆焊层质量、堆焊层纯净度、减少管子与管板焊缝返修率等方面综合考虑，在管板镍基合金自动堆焊技术的选择上，双热丝等离子弧自动堆焊技术比其他三种更具有优势。

7. 结语

从生产效率、堆焊层质量、堆焊层纯净度、减少管子与管板焊缝返修率等方面综合考虑，在管板大面积INCONEL 690镍基合金自动堆焊技术的选择上，双热

丝等离子弧自动堆焊技术更具有优势。选择合适的工艺规范，双热丝等离子弧自动堆焊技术可得稀释率低、熔深浅、成形良好的堆焊层。双热丝等离子弧自动堆焊技术可以进行开发、应用于核电设备的产品堆焊。

作者简介：李双燕，上海电气核电设备有限公司。

MW 20171115