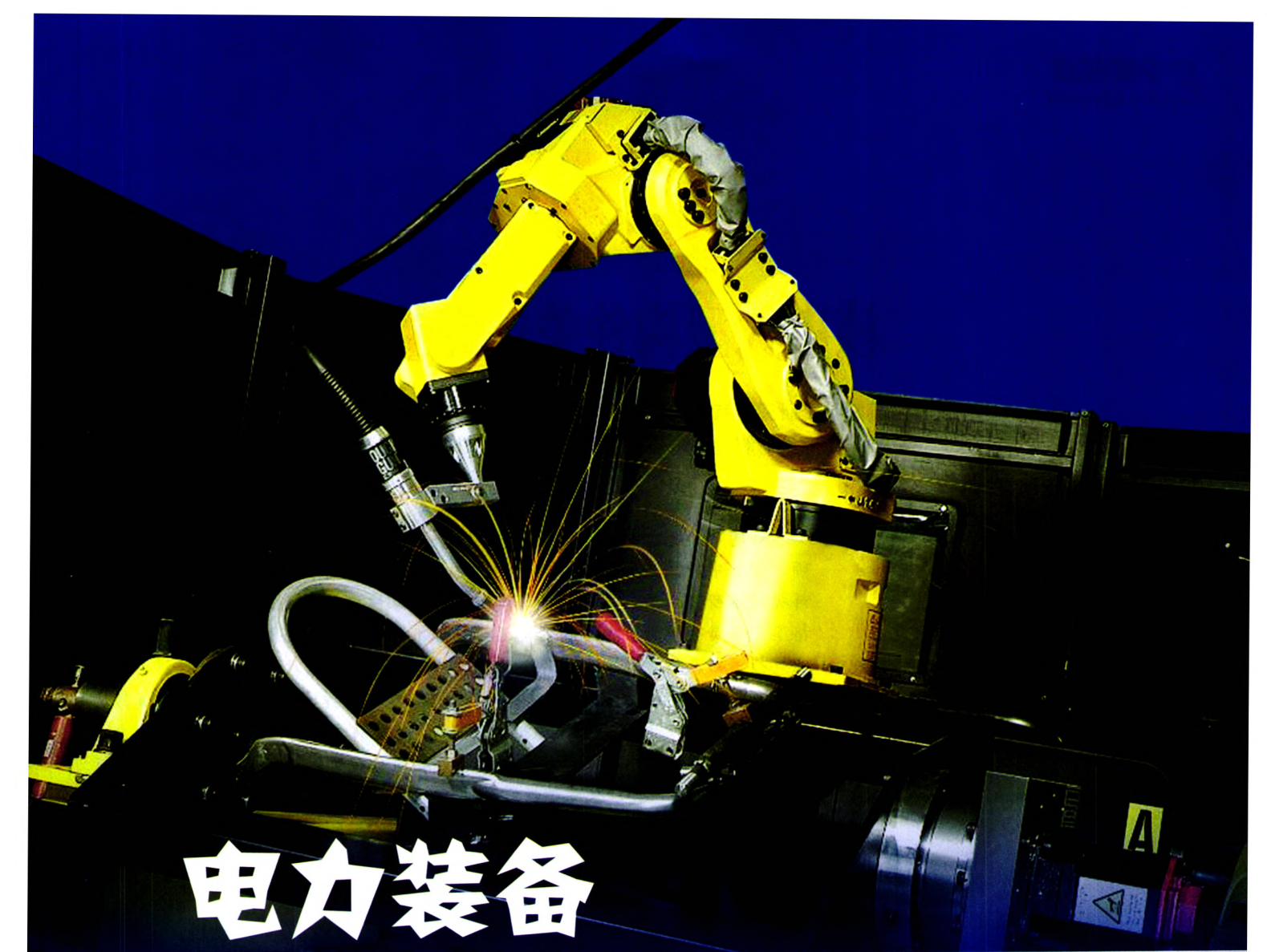




电力装备 焊接自动化

随着电力工业的发展，我国已经开始形成了以火力发电机组为主，以加速发展的水力和核发电机组为辅，风电、太阳能等可再生能源区域性发展的发电设备总格局。随着机组容量的增大、参数的提高，所使用的钢材和焊接材料品种及规格日趋复杂，工程量加大，焊口数量增多，异种钢焊口增多，管壁厚度增大，安全性的要求也越来越高，促使电站焊接必须提高质量、提高效率、提高焊缝的寿命及安全性，以适应现代先进电站焊接技术发展的需要，因此，焊接自动化技术的发展开始得到越来越广泛的关注。

本期产业论坛以“电力装备焊接自动化”为主题，分为两部分内容。首先，邀请了苏州热工研究院有限公司赵建仓高工针对“核电大型构件关键焊接技术”作了专题论述；同时，分别邀请了核电、火电、水电、风电等领域的焊接专家、工程师针对各自领域产品的焊接特点，共同讨论了电力装备焊接自动化的应用现状和未来发展要求；期望能为广大读者和电站焊接工作者的实际工作提供一些参考。

策划人：张 兰

核电大型构件关键焊接技术

苏州热工研究院有限公司 (江苏 215004) 赵建仓 朱 平
山东核电设备制造有限公司 (海阳 265118) 李清海



赵建仓, 男, 1961年生, 陕西蒲城人, 大学本科学历, 教授级高级工程师, 现任中广核集团苏州热工研究院电站寿命管理技术研究中心副主任兼电站焊接技术研究所所长, 并兼任环境保护部国家核安全局民用核安全设备焊工资格鉴定委员会委员、电力行业电站焊接标准化技术委员会副主任委员、电力行业焊接技术人员考委会副主任委员、电力行业核电焊接技术培训中心副主任等职务。共发表学术论文30余篇, 编写技术专著6本, 作为负责人组织参与编写核电焊接标准10余份, 获省部级科技成果5项。目前主要从事核电及常规电力关键设备的焊接新技术开发及应用研究、焊接失效分析及焊接修复技术开发及应用、焊接材料开发、焊接基础性研究。

【摘要】在对核电主要设备介绍的基础上, 以核电反应堆压力容器筒体内壁带极堆焊、一回路主管道自动焊和汽轮机转子窄间隙埋弧焊为例, 介绍了核电大型构件的结构特点、焊接设备及焊接工艺特点, 简要总结了核电大型构件焊接技术的发展现状, 提出了高效率、高质量、劳动强度低的自动化焊接将作为核电关键设备焊接技术发展趋势的观点, 给出了多种先进焊接技术在核电设备焊接的应用预测。

一、概述

有别于常规电力和石化设备, 核电设备特别是核岛关键设备工作条件十分苛刻, 服役环境除高温高压汽水环境外, 还受中子辐照等。核电一直奉行“安全第一、质量第一”的核安全文化, 对设备部件提出了严格的质量要求。焊接作为核电建造的关键工序, 对核电关键设备质量可靠性具有重要影响。随着核电建设的推进, 对焊接效率、焊接质量提出了更高需求, 近年焊接技术的不断发展也使得部分先进焊接技术成熟度不断提升, 具备工程应用条件。本文结合核电设备的特点简要介绍核电主要大型构件的焊接特点及核电焊接技术的发展现状及趋势。

二、核电站主要设备构成

核电站的组成包括核岛、常规岛和辅助系统三

部分, 核岛设备主要有反应堆压力容器、蒸汽发生器、主冷却泵、一回路冷却剂主管道、稳压器、硼注箱、安注箱、核岛部分主蒸汽管道、核安全级阀门及安全壳等。常规岛设备主要包括半转速的汽轮机、发电机、汽水分离器、蒸汽转换器、凝汽器、除氧器、高低压加热器、常规岛汽水管、泵及阀等, 如图1所示。

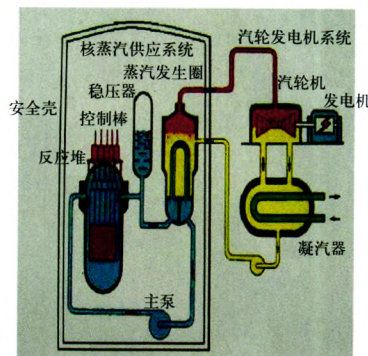


图1 核电站系统流程

三、核电大型构件的焊接特点

核电大型构件按结构形式总体分为三类：压力容器筒体、大厚壁管道和大型转动部件。核电特殊的服役环境决定了其制造质量及性能要求很高，大量成熟先进的焊接技术得到应用，以核岛反应堆压力容器筒体内壁堆焊、主管道TIG自动焊和汽轮机焊接转子窄间隙TIG+SAW为例，介绍核电大型构件的焊接特点。

1.反应堆压力容器筒体堆焊特点

(1) 结构及材料特点 反应堆压力容器(RPV)属核岛主设备，是核电最重要、最典型、制造难度最大的核承压设备之一。筒体为直立式容器，由上封头、下封头和筒体组焊而成，最大壁厚超过200mm，最大外径超过4m，高度超过12m，材质为16MnD5或ASME SA508—Ⅲ，如图2所示。

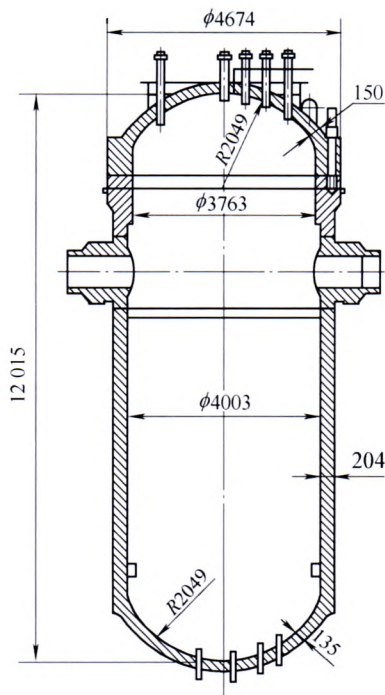


图2 RPV结构示意图

RPV 内壁接触介质为带有腐蚀性的一回路高温含硼水，故整个筒体内壁均需堆焊不锈钢焊接材料（首层堆焊EQ309L焊带，次层堆焊EQ308L焊带）防腐蚀。大面积的堆焊如何保证堆焊质量，避免堆焊缺陷是关键。顶盖及下底圆内壁为内球面，这也给堆焊时的预热和后热及焊道排布带来较大难度。性能方面由于多道焊接，先焊焊道受多次热循环作

用，成分组织易出现不均匀（如晶粒粗化、相脆化等），易导致化学成分、铁素体含量及抗腐蚀性不达标，热影响区韧性降低和堆焊层强度下降等问题。为此，需要通过焊接工艺评定和严格的焊接过程质量控制来获得满足性能的堆焊层。

(2) 焊接装备特点 大面积高质量堆焊需要先进的堆焊专用设备，由于涉及球面堆焊，需配备专用大型变位器以实现规定的偏转和旋转，保证堆焊位置始终保持在平焊位置。大型构件的堆焊需要进行预热和焊后热处理，因此需设计制作现场预热装置和配备大型热处理炉。

(3) 焊接工艺特点 RPV筒体内壁堆焊目前主要采用两种方法：带极埋弧堆焊和带极电渣堆焊，如图3、图4所示。相比较，带极电渣堆焊具有采用单侧焊剂供给、没有电弧及紫外线产生、敞开式焊接熔池允许焊道排出杂质和气体、更低的焊道熔深及稀释率和几乎两倍的熔敷效率等优势，因此应用范围不断扩大。

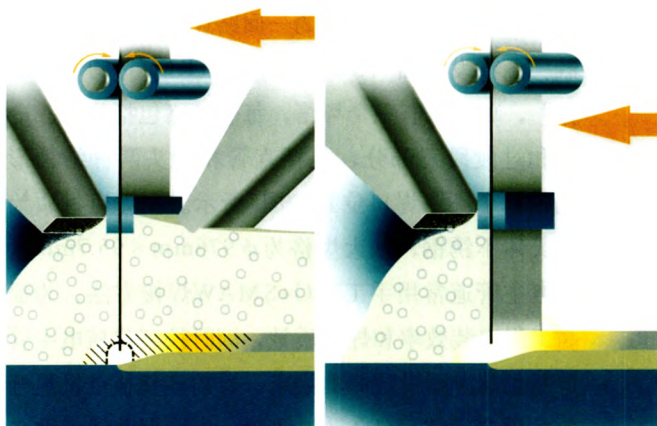


图3 带极埋弧堆焊

图4 带极电渣堆焊

埋弧带极堆焊的标准电流（单个焊带单位的电流量）可为20~25A/mm²，电渣带极堆焊的标准电流可升高至40~45 A/mm²。

焊接电压过高将导致飞溅及熔池不稳，过低将增加短路概率并导致焊带与母材的粘连，因此电压最大波动不超过1V。

单层的堆焊厚度也需控制，对电渣带极堆焊，当堆焊层厚度低于3mm时，稀释率将显著增加，焊道成形变差，而当堆焊层厚度大于5.5 mm时，将影响搭接质量及脱渣效果。筒体内壁及顶盖曲面堆焊如图5、图6所示。

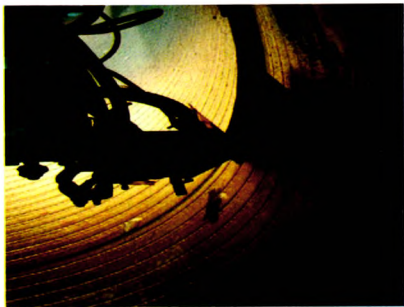


图5 筒体内壁堆焊

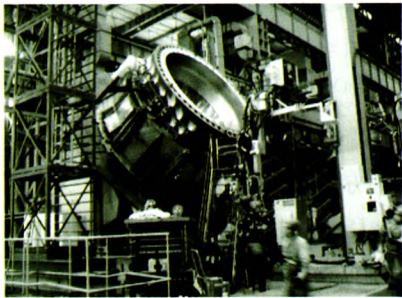


图6 顶盖曲面堆焊

2. 一回路主管道焊接特点

(1) 结构及材料特点 以二代改进型核电机组 CPR1000为例，主管道为一回路连接反应堆压力容器、蒸汽发生器（SG）和主泵（RCP）的“大动脉”，单机组有三个环路，每个环路包括热段、冷段和过渡段三部分，包括直管和弯头两种结构形式，单个环路焊口位置如图7所示。主管道材质为奥氏体不锈钢，最大规格为 $\phi 976\text{mm} \times 95.7\text{mm}$ 。核电主管道常用手工TIG+SMAW焊接方法，为提高工程安装效率和焊接质量，同时按三代核电主管道断裂前泄露设计原则约束，目前在建核电机组开始采用窄间隙TIG自动焊技术，应特别关注：坡口精确测量计算加工技术，焊接时应避免产生裂纹、未熔合、密集气孔等缺陷。

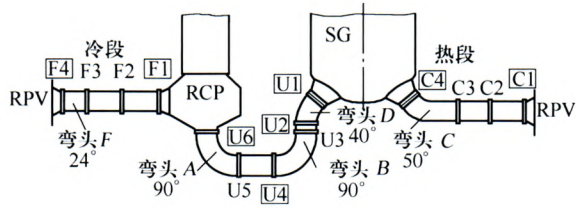


图7 单个环路焊口位置

(2) 焊接装备特点 核电安装焊接用窄间隙自动焊设备除满足良好的操控性、稳定性，还必须充分考虑设备的布置和具体空间需求。设备主要包括窄间隙TIG焊枪、焊接电源、轨道式行走机构、控

制器、焊缝跟踪及监控系统（见图8），专用坡口切割加工装备（见图9）。

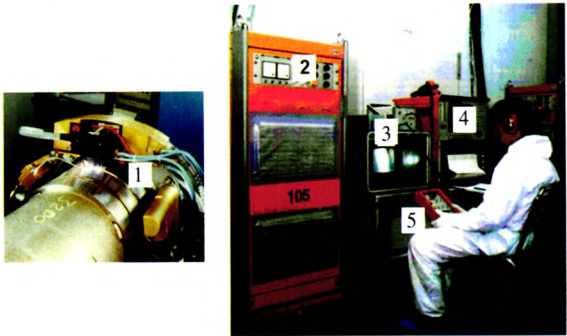


图8 TIG自动焊系统

1.窄间隙自动焊 2.焊接电源 3.监控器（摄像系统）
4.带有纪录仪的控制单元 5.远程控制盒

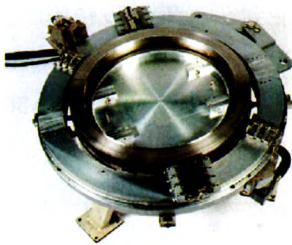


图9 坡口切割加工设备

(3) 焊接工艺特点 窄间隙冷丝TIG自动焊焊道布置如附表所示，以第一种布置方式较常用，坡口单边角度在 10° 左右。

不同焊道分布方式的差异

	窄间隙冷丝TIG自动焊		
示意			
焊道分布	单层单道	单层多道	单层摆动焊
生产效率	1.0	0.7	0.7
焊枪设计	容易实现	焊枪位置调整难度高	设计难度高
焊接位置适用性	适用	适用	适用

由于坡口加工、现场对口（间隙 $\leq 1\text{mm}$ ）及对焊接变形量的高精度要求，且部分坡口需在现场加工，传统的测量技术已无法满足安装精度要求，需用3D激光测量技术（精度 0.1mm ）及软件对单个环路中已完工主设备进行尺寸测量及数据处理，精确测量坡口实际尺寸，如图10所示。

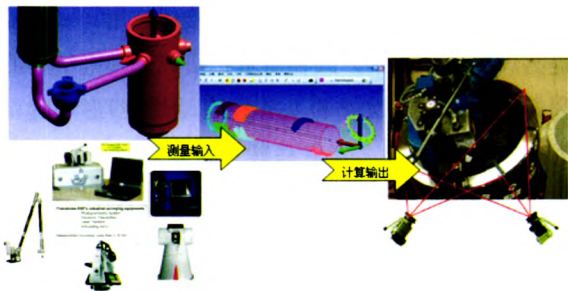


图10 坡口加工精确测量流程

窄间隙TIG焊如图11所示，窄间隙焊缝的焊道可分为根部焊道、过渡层和填充焊道和盖面焊道四部分，关键是根部焊道焊接，要保证熔透、良好的背面成形，避免烧穿，可通过优化根部坡口形式、优化保护气种类及配比、特定时段局部填充等综合试验来实现，三类缺陷如图12所示。



图11 窄间隙TIG焊

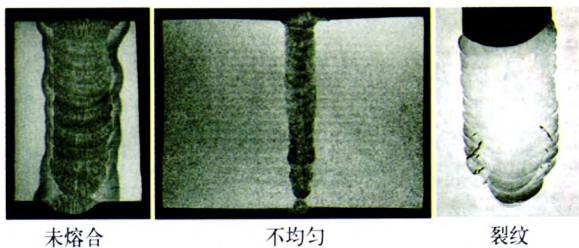


图12 三类缺陷

3. 核电焊接转子焊接特点

(1) 结构及材料特点 汽轮机转动部件组合体称为转子，工作条件复杂，处在高温工作介质中，并高速旋转，承受离心力引起的巨大应力及热应力。以低压转子为例，采用10节9道焊缝组焊而成，中部为空腔，类似管道结构，如图13所示。最大焊接壁厚超过180mm，材料一般为30Cr2Ni4MoV、25Cr2NiMoV、Cr2Ni2MoV等。

转子焊接关键技术包括：避免焊接裂纹、避免粗晶区晶粒过度长大、避免应力集中，严格控制焊接变形及各分段轴线同轴度。

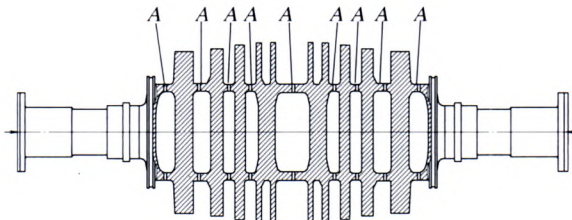


图13 焊接转子结构

注：A代表焊缝

(2) 设备特点 成品约250t的转子焊接对设备的支撑提出了特殊的要求，主要设备包括：足够支撑力的立焊台，含立转台、操作升降台、氩弧焊炬及其配套调整及送丝机构；感应加热设备；窄间隙埋弧焊接设备，包含横焊台、工件支托滚轮、轴向定位装置等；热处理设备，与转子焊接配套有井式热处理炉。

(3) 焊接工艺特点 窄间隙埋弧焊是应用到窄间隙技术中最成熟、最可靠、应用比例最高的焊接方法。焊接转子采用根部TIG焊打底（见图14）+窄间隙埋弧焊填充盖面（见图15）的组合焊接方式。主要焊接工艺流程：转子的分段加工及装配→焊前预热→封底焊→TIG重熔→TIG加丝填充焊→深窄坡口埋弧焊→消除应力热处理→外观及无损检测。TIG打底采用垂直固定（2G）位置焊接，埋弧焊采用水平转动（1G）位置焊接。



图14 TIG打底焊

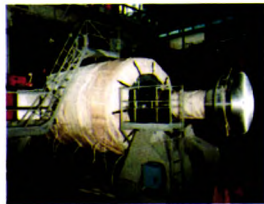


图15 埋弧焊填充盖面

根部焊接质量最关键，坡口形式对其影响较大，转子坡口根部采用了锁底形式（见图16），

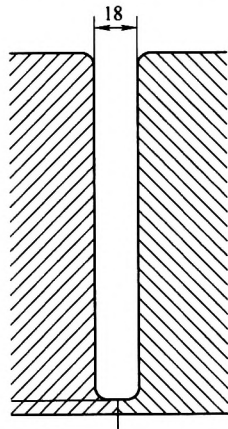


图16 转子焊接的坡口

解决了转子各分段装配时的定位，同时锁底部分厚度刚好为TIG封底焊所熔透，焊缝背面光滑。采用深窄坡口，最深可达250~300mm，宽度为18~22mm。尽管坡口很深，但由于坡口角度小，完工焊缝表面宽度也小，不仅有利于减少焊接工作量，而且焊缝的热影响区容易避开转子高应力区，对结构设计有利。

四、核电关键设备焊接技术现状及发展趋势

1. 核电关键设备焊接技术现状

近年来，核电关键设备制造中自动化焊接技术和窄间隙技术获得广泛应用，可显著提高焊接效率和焊接质量，如核岛主设备大型筒体对接、焊接转子制造、大壁厚管道工厂化配管、大直径接管与筒体马鞍形焊缝等已大量采用常规坡口或窄间隙单丝直流埋弧焊，但使用的焊接设备仍以进口为主。

精密堆焊及高效堆焊技术应用广泛且成熟，如管板焊接、阀门内壁堆焊、管嘴与安全端焊缝等已采用先进的冷/热丝TIG自动焊及等离子堆焊等焊接技术，带极埋弧焊、带极电渣堆焊等被大量应用于核岛关键设备内壁筒体表面不锈钢焊接材料堆焊。

设备安装阶段因空间位置限制、部件结构和成本因素，仍以手工焊居多，半自动焊接方法，如CO₂气体保护焊等也得到了-定的使用，但由于方法自身限制，如熔化极气体保护焊GMAW对过程要求严格，仅用于设备支撑。大型构件如核岛安全壳钢衬里等仍以手工焊为主，高效的半自动化、自动化焊接方法的研究和应用逐渐增多，窄间隙焊接技术也在不断拓展应用，如窄间隙TIG冷丝全位置自动焊技术，已在宁德等核电厂主管道安装中推广应用。

2. 核电关键设备焊接技术发展趋势

随着焊接设备控制技术及自动化水平的不断提高，先进、高效的焊接方法应用范围不断扩大，已成为核电关键设备焊接技术发展的必然趋势。大型构件高效焊接方法的应用，如对钢衬里等研究采用药芯焊丝气体保护焊、脉冲MIG/MAG焊等，焊接效率可成倍增加；单丝和双丝脉冲MIG焊、多丝埋弧焊、药芯焊丝埋弧焊、单层带极堆焊、双热丝等

离子堆焊等在堆焊、大型筒体对接焊应用，可大幅提高焊接生产效率，改善质量；研究非规则结构的程控自动焊接，如多机头程控自动焊在J形焊缝、管子-管板焊接、管道马鞍型接管焊接、非规则表面堆焊等方面工程应用；研究热丝TIG代替冷丝TIG、多机头同步焊接等应用到管道窄间隙焊接，并优化窄间隙坡口，提高焊接效率、改善应力状态。

五、结语

焊接质量的保证和控制是核电建造质量保证体系中的重要一环，焊接技术的发展和新技术的应用将提高核电关键设备整体制造技术水平，进一步提高核电设备的焊接质量和焊接效率，也为设计技术条件完善优化提供坚实的基础。

随着科学技术的发展，第三代和第四代核电技术的开发应用，对核安全要求的不断提高，核电焊接工艺技术必将得到不断发展，但核电质量至上的原则不会改变，核电设备焊接工艺技术发展必须以质量至上的原则为前提，从而不断提高核电设备的可靠性。MW

(20120520)

第三届焊接设备用户有奖调查

“十二五”时期是我国制造业转型升级的关键时期，作为连接金属功能的“缝纫机”，焊接设备新技术的应用越来越受到用户的青睐，为深入地了解近几年来我国焊接设备应用及市场需求情况，《金属加工（热加工）》在2003年和2007年两次调查的基础上，专门针对焊接设备的应用开展“第三届焊接设备用户”有奖调查活动，将有丰厚的奖品期待您的参与！

参与方式：通过金属加工在线（www.mw1950.com）进行网上提交

联系方式：张维官（010-88379795转625）或RB1950@126.com

截止日期：2012年12月31日