

# 核电站主管道窄间隙TIG-激光电弧复合焊工艺探讨

冯英超<sup>1</sup>, 张伟栋<sup>1</sup>, 李晓延<sup>2</sup>

(1.核工业工程技术研究设计院,北京 101601;2.北京工业大学,北京 100124)

**摘要:**阐述了主回路管道窄间隙自动焊的特点及需要改进的地方,并分析了TIG-激光复合焊工艺的技术特点;详细论述了TIG-激光复合焊工艺在核电站主回路管道的可行性,在研究内容和关键技术方面做了重点的分析;并对此项工艺在核电站主回路管道的应用前景进行了说明。窄间隙TIG-激光电弧复合焊工艺适合于核电站主回路管道的焊接,对核电站主回路管道的质量控制及保障、焊接效率的提高等方面有很大的帮助。

**关键词:**核电站;主管道;TIG-激光复合焊;工艺

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2010)11-0091-03

## Discussion of narrow gap TIG-Laser welding procedure for main primary system pipes in nuclear power plant

FENG Ying-chao<sup>1</sup>, ZAHNG Wei-dong<sup>1</sup>, LI Xiao-yan<sup>2</sup>

(1.Nuclear Engineering Research and Design Institute, Beijing 101601; 2.Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Installation of main primary system pipes plays an important part in nuclear power plant construction, narrow gap TIG automatic welding procedure will be used in main primary system pipes installation. Firstly, this article introduces the factor and shortage of this procedure, and makes an analysis about TIG-Laser welding hybrid welding procedure. Secondly, this article makes a brief discussion about the feasibility of TIG-Laser welding hybrid welding procedure using in main primary system pipes installation, the key points are research contents and key procedure analysis. Lastly, this article makes an analysis about the prospect of this TIG-Laser hybrid welding procedure used in main primary system pipes installation. From what have mentioned above, this article makes sure that TIG-Laser hybrid welding procedure is good at main primary system pipes welding and will have good future in quality control and insurance, improvement of welding efficiency.

**Key words:** nuclear power plant; main primary system pipes; TIG-Laser welding hybrid welding; procedure

## 0 前言

核电站主回路管道是规格(管径、壁厚等,以U、I形焊口为例,其规格为 $\phi 976 \times 95.7$  mm)最大、级别最高(RCC-M 1级)、质量要求最为严格的管道,在核电站中具有举足轻重的地位。从2005年开始,核工业工程技术研究设计院焊接研究所就开展了窄间隙TIG全位置自动焊的研究并取得了较为理

想的效果,试验证明:采用此项工艺,可以在一定程度上保障焊接质量。但是在保证焊接质量的同时,如何提高效率、促进质量生成及控制体系成为了一个急需解决的问题,针对核电站主回路管道开展激光-电弧复合焊的研究具有重要意义。

## 1 研究背景

核工业工程技术研究设计院焊接研究所开展的“核电站主回路管道窄间隙自动焊”技术已经在宁德、福清两个项目进行模拟试验,并陆续应用于

收稿日期: 2010-09-21

作者简介: 冯英超(1982—),男,河北石家庄人,工程师,学士,主要从事核电站安装焊接工艺的工作。



方家山、红沿河、阳江以及后续开工的核电站项目。通过在实验室及项目车间的试验可以看出:

(1)焊接过程的调节需深入研究。由于管道坡口加工、坡口组对、导轨安装等因素的影响,有时焊枪与焊缝中心不在一个平面,需要根据视频进行调节,而调节往往具有滞后性,所以对焊接质量的控制及保障存在一定的不足,需要开展深入研究。

(2)焊接效率有待进一步提高。目前,TIG窄间隙自动焊采用的为冷丝TIG,焊接效率较低(送丝速度约为1600 mm/min)。与手工焊相比,主管道窄间隙自动焊技术能有效的提高焊接效率,但是在核电大发展及核电站安装施工周期压缩的大环境下,焊接效率还需要进一步提高。

(3)质量控制体系需要进一步加强。焊接质量问题在窄间隙自动焊中主要是指两壁未熔合,究其原因是在焊接过程中焊枪未摆动,而管道的壁厚较大,若施工条件较差或操作不合理,则容易产生未熔合缺陷。

TIG-激光电弧复合焊是激光与电弧共同作用于熔池,焊接过程中,激光与电弧之间存在相互作用和能量的耦合,也就是通常所说的激光电弧复合热源焊接——激光与电弧相互作用形成的一种增强适应性的焊接方法,它避免了单一焊接的缺点和不足,具有提高能量、增大熔深、稳定焊接过程、降低装配条件、改善融化金属与母材润湿性、消除焊缝咬边现象、提高焊接生产效率等优点。

## 2 研究内容

### 2.1 主管道激光电弧复合焊侧壁熔合机理及工艺优化

在主管道窄间隙焊接时,坡口一般窄而深,焊接电弧几乎与坡口侧面平行,导致侧壁加热不良,焊接填充材料与侧壁母材的均匀熔合不易保证,这一问题在低线能量焊接时尤为突出。采用激光-电弧复合热源焊接,激光作用于工件时将产生金属蒸气,易于电离形成带电粒子,可降低电弧经过该路径时的电阻,使得电弧被吸引到激光与工件的作用点处。利用激光的这种诱导效应,首先将激光投射到待焊坡口间隙的侧壁边缘,使其诱导电弧在侧壁和焊炬电极间燃烧,有望消除常规窄间隙焊接时的侧壁不良熔合问题。可以研究如下方面:

(1)激光与电弧的交互作用及其对电弧稳定性的影响。主要研究内容包括:**a.** 激光-电弧复合热源

的电弧形态;**b.** 激光诱导对电弧形态影响的规律;**c.** 工艺参数对激光-电弧复合窄间隙焊接电弧形态的影响规律;**d.** 通过激光诱导调整电弧形态的工艺方法。

(2)激光-电弧复合热源模型及主管道窄间隙焊接温度场分布。主要研究内容包括:**a.** 窄间隙焊接条件下电弧移动热源与激光移动热源的叠加热源模型构造理论和方法;**b.** 激光-电弧多层多道窄间隙焊接三维温度场数值模拟;**c.** 工艺参数对激光电弧多层多道窄间隙焊接三维温度场分布的影响规律;**d.** 激光-电弧多层多道窄间隙焊接三维温度场的预测方法。

(3)激光-电弧复合熔池流体流动规律。

主要通过数值模拟研究,包括:**a.** 激光-电弧复合热源对窄间隙焊接熔池流体流动行为的影响;**b.** 工艺参数对激光-电弧复合窄间隙焊接熔池流动行为的影响规律;**c.** 激光-电弧复合道窄间隙焊接熔池形状与尺寸的预测方法。

(4)激光电弧参数对主管道窄间隙焊接侧壁熔合行为的影响规律。主要包括:**a.** 激光诱导对窄间隙焊接侧壁熔化区流体流动方向和流动速率的影响;**b.** 工艺参数对激光-电弧复合窄间隙焊接侧壁熔化区流动行为的影响规律;**c.** 激光-电弧复合道窄间隙焊接侧壁熔合区形状与尺寸的预测方法。

### 2.2 主管道激光-电弧复合焊变形预测及控制

(1)激光-电弧复合焊变形数值模拟方法。

拟通过热弹性有限元数值模拟方法,研究激光-电弧复合热源作用下主管道窄间隙多层多道焊试件轴向、径向和周向变形的演变和残余变形。

(2)激光-电弧复合焊接工艺参数对厚壁核试件窄间隙焊接变形的影响规律。

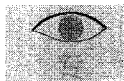
**a.** 研究激光-电弧复合焊工艺参数变化对试件轴向、径向和周向变形的演变和残余变形的影响规律。

**b.** 研究试件坡口形状与尺寸变化对试件轴向、径向和周向变形的演变和残余变形的影响规律。

(3)控制主管道激光-电弧复合焊接变形的研究方法通过调整激光-电弧复合焊接工艺参数、试件坡口形状与尺寸等减小残余变形的的方法。

### 2.3 主管道激光-电弧复合焊残余应力形成机理及调整

(1)主管道激光-电弧复合焊残余应力分布的测量及数值模拟方法。研究内容包括:**a.** 试件焊缝及热影响区三维残余应力分布的测量方法;**b.** 激光-电弧复合焊接时环焊缝及热影响区三维残余应力分布的数值模拟方法。



(2)激光-电弧复合焊接工艺参数对主管道窄间隙焊接残余应力分布的影响规律。包括:a. 研究激光-电弧复合焊工艺参数变化对三维残余应力分布的影响规律;b. 研究试件坡口形状与尺寸变化对三维残余应力分布的影响规律;c. 控制主管道激光-电弧复合焊接残余应力分布的方法。

(3)研究通过调整激光-电弧复合焊接工艺参数、试件坡口形状与尺寸等减小残余变形的办法。

## 2.4 主管道激光-电弧复合焊工艺优化及评价

通过研究激光-电弧复合焊工艺参数与接头性能和缺陷生成的相关性,提出评价焊接工艺的科学方法。研究内容主要包括:(1)激光-电弧复合焊工艺参数与接头性能的相关性;(2)主管道激光-电弧复合焊接头缺陷检测方法;(3)主管道激光-电弧复合焊工艺评定方法;(4)接头焊接质量鉴定试验件。

## 3 关键技术分析

针对主管道激光-电弧复合焊接工艺,首先是要确定应用对象特点和焊接基本状况,同时对激光-电弧复合焊接工艺进行科学、有效的分析(主要包括:激光对电弧的诱导及控制技术、激光功率与电弧能量的匹配及调控技术、激光-电弧复合热源的系统集成技术),针对应用目标,开展窄间隙自动焊以及激光-电弧复合焊接工艺,对结果进行分析并确定评价体系(激光-电弧复合焊工艺评价技术),并对激光-电弧复合焊接工艺进行进一步分析、优化,最后确定应用的激光-电弧复合焊接工艺体系。

### 3.1 激光对电弧的诱导及控制技术

(1)主管道窄间隙焊接的主要问题之一是侧壁熔合不良。为解决这一问题,采用激光诱导电弧,为此,应首先确保激光诱导的有效性,并同时确保其可控性。

(2)为确保激光对电弧诱导的有效性,必须确保激光在电弧气氛中能够激发出足够的易于电离的金属蒸气,以便在电弧电极与激光投射点之间形成新的电弧通路。为此,在研究激光-电弧复合窄间隙焊接机理的基础上,通过优化激光束与电弧电极的距离与角度来实现激光对电弧的有效诱导。

(3)在主管道窄间隙激光-电弧复合焊接中,除了要解决侧壁熔合问题外,还要利用激光与电弧复合的优势提高熔深和焊接效率,这就要求对激光诱导电弧可调控。通过对焊接路径规划的研究来实现激光诱导电弧的可控调节。

### 3.2 激光功率与电弧能量的匹配及调控技术

在主管道窄间隙焊接中采用激光-电弧复合技术的目的在于改善侧壁熔合、提高焊接效率、改善热影响区组织和接头性能,这些均依赖于激光功率和电弧能量的合理匹配。

(1)在熔池形态数值模拟的基础上,确定获得理想焊缝形状的激光功率与电弧能量的匹配比值。

(2)在焊接温度场数值模拟的基础上确定获得力学热影响区组织的激光功率与电弧能量的匹配比值。

(3)根据上述研究,确定获得最优焊缝形状和热影响区组织的激光功率与电弧能量的匹配。

(4)依据不同壁厚、不同坡口形式和尺寸的试件焊接时所确定的最佳激光功率和电弧能量的匹配,实现对激光功率和电弧能量匹配的调控。

### 3.3 激光-电弧复合热源的系统集成技术

在主管道窄间隙焊接中,对激光-电弧复合热源的要求是:激光功率和电弧能量分别可调,焊炬姿态可调,焊炬小型化。为此,设计小型化的旁轴复合系统、能量控制系统、姿态条件系统是本项研究的关键之一。

### 3.4 激光-电弧复合焊工艺评价技术

评价激光-电弧复合焊工艺的依据主要是:焊缝及热影响区无不良组织,焊缝及热影响区无焊接缺陷,接头力学性能(强度、韧性)满足要求,试件焊接变形小,残余应力小等。这些指标的综合评价是本项研究的关键之一。

## 4 结论

将 TIG-激光电弧复合焊工艺应用于核电站主管道的焊接,将会取得一系列成果:

(1)为核电站的推广应用打下了基础,使得窄间隙自动焊技术更为成熟、有效。

(2)解决了一定的技术难题,如焊接调节的滞后性对焊接质量的影响。

(3)激光与焊接电弧的作用体系中,双热源的空间配置和焊接工艺规范参数的良好匹配、优化使得复合热源焊缝成形和接头质量很高,从而大幅度提高焊接质量;同时也能有效的预防及消除两壁未融合的缺陷,也使得焊接质量进一步得到保障。

(4)大幅度提高焊接生产效率,主要体现为对缺陷的有效预测、控制及消除,以及焊接层数的减少。

(5)具有一定的经济效益,主要体现为施工周期压缩所带来的间接收益。

