

压水堆核电站主蒸汽管道安装焊接优化

邓峰, 王恒, 于坚

中国核电工程有限公司 北京 100840

摘要: 通过对华龙一号压水堆主蒸汽管道现有安装焊接技术的分析, 发现存在使用大量弯头造成焊缝数量过多, TIG自动焊组对间隙要求严格, 预热和后热时间长, 焊后射线检测对可能产生的未熔合缺陷存在漏检且焊缝射线检测堵塞运行有泄漏的风险等四个方面的问题。针对这些问题进行设计改进, 提出了对应的设计优化措施, 即使用弯管代替弯头、宽钝边间隙组对、取消预热和后热、超声波检测代替射线检测。最后对设计优化后的安全水平和经济效益进行了分析, 对设计改进后的应用前景进行了展望。

关键词: 华龙一号; 主蒸汽管道; 焊接; 设计优化研究

1 序言

压水堆主蒸汽管道的安装一直被视为压水堆建造的重要节点。作为核电站的主要高能动力管道, 它的作用是将高温高压蒸汽不断地从核岛输送到常规岛, 然后供应给主蒸汽轮机及其他用汽设备和系统。以国内最新压水堆华龙一号为例, 每台机组包括三个主蒸汽管道环路, 每个环路都是从蒸发器顶部引出主蒸汽管道, 穿过反应堆厂房后, 以贯穿件作为在安全壳上的锚固点, 然后进入电气厂房, 最后进入汽轮机厂房。主蒸汽管道设计压力8.5MPa, 设计温度316℃, 设计寿命60年, 属于规范2级物项, 材质为P280GH, 外径812.8mm (32in), 管道壁厚32mm (弯头34~38mm, 超级管道46mm)。

压水堆主蒸汽管道安装由若干个直管、弯头、阀门等相互焊接而成, 一台机组三个主蒸汽管道环路目前设计共有70余道焊缝, 其中50余道现场焊接, 焊缝数量多。由于主蒸汽管道运行工况复杂, 安全等级高, 因此必须对焊缝质量进行严格要求。主蒸汽管道布置及焊缝分布如图1所示, 反应堆厂房内主蒸汽管道布置三维模型如图2所示。

传统的压水堆核电站主蒸汽管道焊接主要采用焊条电弧焊工艺, 焊接方法为TIG焊打底+焊条电弧焊填充和盖面。国内辽宁红沿河5号、6号机组主蒸汽管道部分焊缝率先实现了窄间隙TIG自动焊, 田

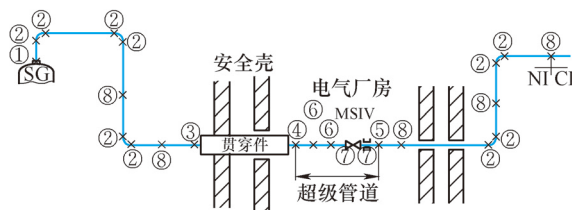


图1 核岛内一个主蒸汽管道环路布置和焊缝分布

注: ①~⑧为焊缝布置。

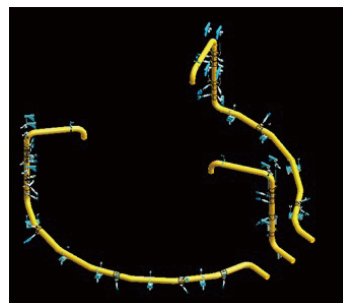


图2 反应堆厂房主蒸汽管道布置三维模型

湾5号机组现场M1焊缝实现了窄间隙TIG自动焊, 近期巴基斯坦K3机组以及漳州核电机组也在计划实施窄间隙TIG自动焊。众所周知, 相对焊条电弧焊, TIG自动焊在焊接质量稳定性方面效果显著, 进而会提升主蒸汽管道的安全性。但是, 每道主蒸汽管道焊缝焊条电弧焊需要7天, 目前TIG自动焊需要6天时间, 在提升施工效率方面优势并不明显。目前, 以福清5号核电机组为例, 主蒸汽管道的安装工期是181天, 安装工期较长。而主蒸汽管道安装完成

基金项目: 龙华一号主蒸汽管道设计与安装技术研究 (Ky19050)。

才是蒸发器二次侧水压试验开始的前提；蒸发器二次侧水压试验是核电机组冷试的关键路径之一。

目前，按操作路径，无论是焊条电弧焊还是TIG自动焊，主蒸汽管道焊接都进行了焊前预热、焊后后热和消除应力热处理。焊接完成后，对最终焊缝进行液体渗透检测和射线检测。

2 主蒸汽管道安装焊接现有问题分析

2.1 焊缝数量过多

华龙一号福清5号、6号机组及巴基斯坦K2、K3机组参考M310堆型，主蒸汽管道布置了大量的弯头，单台机组三个环路仅反应堆厂房内就有近90°大半径弯头10个，小角度弯头12个，焊缝44道，焊接和检测工作量大，安装周期长。

2.2 组对间隙要求严格

窄间隙TIG自动焊作为一项先进的焊接技术，具有焊缝成形良好、质量稳定、生产效率高等优点，能够显著提升焊接质量。但是，窄间隙TIG自动焊对焊缝的坡口组对间隙要求严格，通常认为只有当组对间隙为0~1mm时，才能确保窄间隙坡口的根部质量，才能应用窄间隙TIG自动焊技术。在主蒸汽管道现场安装过程中，由于土建和安装积累偏差的影响，往往需要现场精确测量和加工坡口，这样造成了安装效率降低，同时也对测量系统提出了较高的要求。

2.3 预热和后热时间长

以华龙一号主蒸汽管道为例，焊前要先125℃以上预热，并且在焊接过程中要一直维持在这个温度以上，焊接完成以后还要250℃以上后热，对于焊条电弧焊方法，焊工或焊接操作工存在被烫伤的风险。而在TIG自动焊每道焊缝需要6天时间中，预热准备工作（包括铺设加热片、埋置热电偶、捆扎保温棉等）需要提前1天时间来完成，并且每天焊前都需要1h的预热升温 and 保温，当天焊接完成后还要保温1h。每道焊缝焊前预热和焊后后热累计要花费约2天，占每道焊缝安装时间的33%。由此可见，主蒸汽管道的焊前预热和焊后后热，会造成施焊条件恶劣，焊接效率降低。

2.4 射线检测存在先天不足

根据RCC-M^[1] S7720的规定，压水堆主蒸汽管道焊接完成后，需要对最终焊缝进行液体渗透检测

和射线检测。射线检测对检测体积性缺陷，例如气孔、夹渣非常有效，但对检测平面性缺陷，例如未熔合、裂纹存在漏检、错判的风险。从窄间隙TIG自动焊在一回路主管道上实施的经验反馈上来看，窄间隙TIG自动焊就有可能产生层间未熔合和侧壁未熔合缺陷。另外，为了提高效率，采用射线检测周向曝光，在主蒸汽管道上设置了很多的射线检查插塞，核电运行反馈射线检查插塞往往会存在质量风险，国内一些机组就曾出现过由于射线检查插塞存在质量问题而发生泄漏事件。

针对华龙一号主蒸汽管道安装焊接中存在的上述问题，笔者提出了4个方面的设计优化预案。

3 设计优化

3.1 设计优化预案

（1）使用弯管代替弯头 随着弯管技术的发展，大口径弯管已在火电行业中广泛应用。同时，新型压水堆华龙一号的核岛空间较M310有所增加，这也为主蒸汽管道中弯管的使用提供了有利条件。

如果使用弯管来代替弯头，原直管和弯头之间的焊缝将取消，会有效地减少焊缝的数量，提高结构的完整性，这样有利于减少焊接及无损检测的工作量，也有利于减少在役检查的工作量，缩短安装周期，降低建造成本和运行成本。同时，由于焊缝往往是缺陷易发区，焊缝数量的减少还有利于保证主蒸汽管道的质量和安全，提高核电站的安全性。

但由于弯管组对焊接时坡口调整的范围和角度不如弯头灵活，弯管的制造公差如何控制才能确保组对焊接成功，是需要我们关注的问题，可以通过弯管后预装来解决，弯管代替弯头后，还需要关注造成的房间引入和施工顺序上的变化。

目前仅考虑将小角度弯头改成弯管，90°弯头暂不作更改。理由是，相对于小角度弯管，90°弯管制造难度大，直管段短，弯曲半径大，支架设置空间不够，并且弯管占用空间大，穿墙部分不宜设置弯管，因此暂不对90°弯头进行替代。

（2）宽间隙组对技术 目前，主蒸汽管道的TIG自动焊技术均采用窄间隙坡口，坡口的形状和尺寸如图3所示。坡口的组对钝边间隙要求为0~1mm，这势必要求管件安装前经过弯管预装工艺，如果发生组对间隙过大时（>1mm），根部宽度过

大, 电弧热量集中在根部钝边上, 会使钝边因热输入量过大而烧穿。TIG自动焊技术如此严格的坡口组对间隙, 对管道的加工尺寸、组对精度都提出了较高的要求, 有可能成为制约主蒸汽管道现场安装焊接效率提高的关键因素。如果能在坡口组对间隙较大 (1~4mm) 的情况下仍能够实施TIG自动焊, 那么就可以在管件厂或预制厂加工好坡口, 到现场组对后即可实施TIG自动焊, 这样加工和组对简便易行, 节省现场重新加工坡口的时间。

若要在宽间隙组对的情况下仍能够实施TIG自动焊, 需要解决好坡口根部打底问题, 根部打底成功后就可以使用常规的TIG自动焊工艺来填充和盖面。本文提出以下两种切实可行的根部打底焊方法。

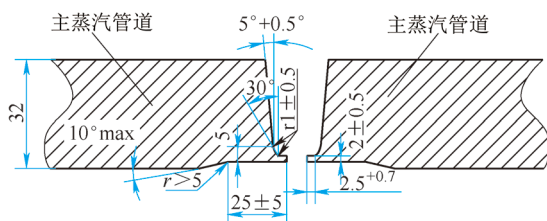


图3 窄间隙坡口的形状和尺寸

1) 手工TIG焊打底。在焊缝背面不可达的情况下, 采用手工TIG焊完成坡口根部打底, 再使用常规TIG自动焊工艺来填充和盖面。

2) 使用陶瓷衬垫打底。在焊缝背面可达的情况下, 在焊缝背面使用陶瓷衬垫打底。陶瓷是焊接中广泛使用的一种衬垫材料, 它可以确保焊缝根部焊透和背面成形良好。陶瓷衬垫一般由衬垫块、透气孔、防粘纸和铝箔胶带等组成, 如图4所示。

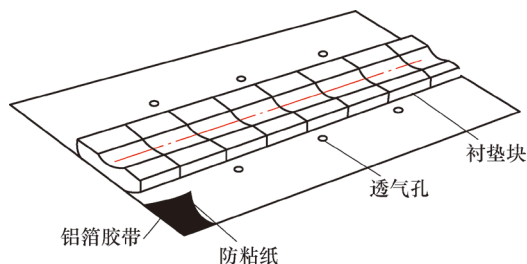


图4 陶瓷衬垫的结构

衬垫安装时, 先去除铝箔上的胶带, 使衬垫的中心线对准坡口组对间隙的中心, 然后把衬垫贴紧接头的背面, 固定好衬垫后, 在铝箔上打开透气孔, 以便在焊接过程中将气体排出, 衬垫安装示意如图5所示。衬垫安装好后, 就可以使用TIG自动焊技术在焊缝的正面进行焊接。

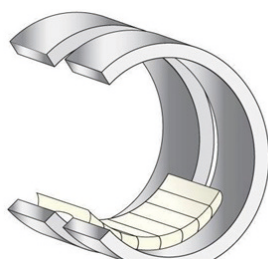


图5 陶瓷衬垫的安装

3.2 取消主蒸汽管道焊接预热和后热

(1) 规范分析 RCC-M S1321规定, 当焊接接头等效厚度 $\geq 20\text{mm}$ 时, 对于在未做消除应力热处理状态下最小抗拉强度 $\geq 440\text{MPa}$ 的碳素钢, 推荐的最低预热温度为 125°C 。主蒸汽管道的壁厚和抗拉强度均符合此规定。同时, RCC-M C4440也明确规定, 主蒸汽管道要进行焊前预热。从上述两处规定来看, RCC-M是要求主蒸汽管道进行焊前预热的, 按照RCC-M去执行是保守和安全的, 能够保证主蒸汽管道的焊接质量。但是, 这个规定是基于传统使用的焊条电弧焊工艺的, 并不是基于先进的TIG自动焊技术。

另外, RCC-M S1321还规定, 最低预热温度可以根据试验来确定, 包括首道焊缝裂纹敏感性试验等。这实际一直是一个开口的要求, 因此可以根据RCC-M这个规定以及试验方法来研究主蒸汽管道TIG自动焊取消预热是否可行。

对于后热, RCC-M S1330规定, 除非在最低预热温度降低之前立即进行消除应力热处理, 否则当要求预热时, 就需要后热。

(2) 理论分析 预热和后热是防止工件在焊接时产生冷裂纹的有效手段。焊接接头的淬硬组织、扩散氢含量、拘束应力等三个基本条件是形成焊接冷裂纹的主要原因, 焊接冷裂纹多发生在焊接接头的热影响区^[2]。预热和后热的作用主要有^[3]:

第一, 预热和后热能够减缓焊接接头的冷却速度, 适当延长 $800\sim 500^\circ\text{C}$ 的冷却时间, 可以减少或避免淬硬组织——马氏体的形成。

第二, 预热和后热能够加速氢的扩散逸出, 减少热影响区中的氢含量, 防止氢致冷裂纹的产生。

第三, 预热和后热可以减少母材与焊缝之间的温度差, 使较宽范围内的温度分布比较均匀, 进而可以减少焊接接头的残余应力, 并且有利于提高焊

接接头的塑性及韧性。

相对于焊条电弧焊工艺，TIG自动焊技术具有如下特点：

第一，TIG自动焊使用的热输入量较低，焊接接头的晶粒长大不明显，对焊接接头的抗裂性能有利。

第二，TIG自动焊使用的焊材是焊丝，不同于焊条电弧焊使用的焊条药皮那样容易吸潮，这样会减少氢的来源；同时，焊接过程中采用氩气保护，可避免水汽中的氢进入熔池。

第三，TIG自动焊采用窄间隙坡口，这样可大幅度减少焊缝的横截面积和焊材的填充量，进而可以减少焊接接头的残余应力。

从以上的分析可以看出，TIG自动焊的这些特点正好对应了预热和后热对焊缝所产生的作用，使得TIG自动焊不预热和后热成为了可能。

3.3 取消主管道焊接预热和后热的技术方案

(1) 碳当量法 钢材的淬硬及冷裂倾向与钢材的化学成分有着直接的关系，因此可以用钢材的化学成分来评价其冷裂敏感性。由于碳是各种常见元素中对冷裂影响最为显著的元素，所以把各种元素按照相当于碳含量折合并叠加起来计算碳当量，用它来估计钢材焊接冷裂倾向的大小。应用较为广泛的碳当量公式是国际焊接学会(IIW)推荐的^[4]：

$$Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

经验认为，当 $Ceq \leq 0.40\%$ 时，钢材的冷裂倾向不大，焊接性良好，不需要预热和后热；当 $Ceq > 0.40\%$ 时，特别是 $> 0.50\%$ 时，钢材易于产生冷裂纹，需要预热和后热。实践上可在母材采购时专门提出碳当量要求。

(2) 裂纹敏感性试验 试验目的：本试验是针对焊接冷裂纹产生因素之一拘束应力，在拘束度很大的情况下，直接比较不预热和不同预热温度下焊缝的开裂情况。RCC-M S1321规定最低预热温度可以根据试验来确定，包括首道焊缝裂纹敏感性试验等。很多文献和研究报告中常采用斜Y形坡口试验来确定是否预热或最低预热温度。

试验设计：试验按照GB/T 32260.2—2015《金属材料焊缝的破坏性试验 焊件的冷裂纹试验 弧焊方法 第2部分：自拘束试验》^[5]中的斜Y形坡口试验进行，根据焊接接头的开裂情况评价其冷裂纹的敏感性。试件尽量从项目管道产品同炉批产品制取，主

蒸汽管道做一组3个试件。焊前试件不预热。试板形状如图6所示，两侧为拘束焊缝，中间为试验焊缝，先焊拘束焊缝，再焊试验焊缝，拘束焊缝采用双面焊条电弧焊焊接，试验焊缝采用单面TIG自动焊焊接。焊后热处理后48h对试板进行检测和解剖，测量焊缝表面和剖面的裂纹长度，计算表面裂纹率和剖面裂纹率。

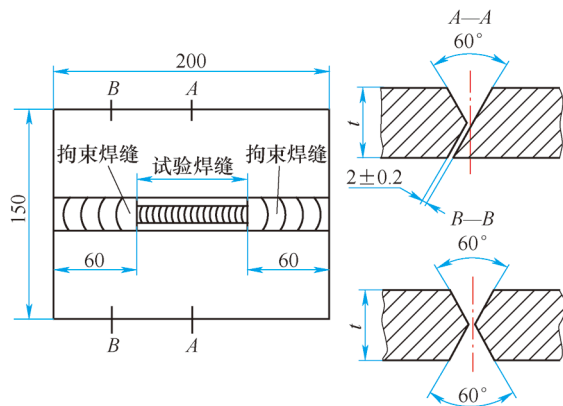


图6 斜Y形坡口试验用试板

焊接参数：TIG自动焊实际采用偏下限焊接参数，计算热输入值。

由于斜Y形坡口试验的拘束度很大，根部尖角又有应力集中，所以试验条件比较苛刻，经验认为，当裂纹率 $< 20\%$ 时，在正式施工条件下焊接就不会出现冷裂纹^[6]。

(3) 不预热后热的焊接工艺评定设计 不预热斜Y形坡口试验通过后，根据RCC-M进行窄间隙TIG自动焊焊接工艺评定试验，母材为主蒸汽管道材料P280GH，规格为 $\phi 812.8\text{mm} \times 32\text{mm}$ ，焊前不预热，焊后不后热，焊接位置为5GT，焊接操作如图7所示。试件完成后放置48h对焊接接头进行液体渗透检测、射线检测、超声波检测、熔敷金属化学成分测定、拉伸试验、弯曲试验、硬度测定、冲击试验和金相检查等各项试验。同时进行正常预热后热的工艺评定作为对比。如试验结果均满足标准要求且不低于预热后热的对比评定数据，则工艺评定试验成功。

(4) 小结 以上按照理论分析→试验研究→评定验证的研究思路来研究主蒸汽管道TIG自动焊取消预热和后热的可行性。

在理论分析中首先分析了TIG自动焊的特点正好可以对应预热和后热对焊缝所产生的作用，使得



图7 TIG自动焊不预热后热的焊接工艺评定试验

TIG自动焊不预热和后热成为了可能。然后使用比较常用的碳当量经验法,初步评价淬硬倾向。

在试验设计中采用裂纹敏感性试验,如裂纹率 $<20\%$,则可确认不预热后热工艺的焊接接头不会产生淬硬和裂纹。

最后进行焊接工艺评定试验验证,如结果表明,不预热后热工艺的焊接接头各项无损检测和理化性能均满足标准且不低于对照数据,则评定通过。

如以上验证试验满足要求,则可证明主蒸汽管道TIG自动焊取消预热和后热的条件已经成熟。

3.4 超声波检测技术代替射线检测

压水堆主蒸汽管道焊接完成后,对最终焊缝要进行液体渗透检测和射线检测。射线对检测焊缝内部的体积性缺陷,例如气孔和夹渣类缺陷是非常有效的,但对平面状缺陷或有某种方向性的缺陷,以及短小的线性缺陷,例如裂纹、未熔合等,由于缺陷自身特点检出困难。窄间隙TIG自动焊有可能产生层间未熔合和侧壁未熔合,对于这类缺陷采用超声波检测、相控阵超声波检测技术和超声波衍射时差检测技术可以更有效地检出,仅采用射线检测易造成漏检、错判。

射线检测时采用的 γ 射线源在射线检测作业时,射线剂量在不安全范围内不允许他人作业,需要专门的射线检测时间窗口,因此夜间作业较多,辐射安全风险和工业安全风险均较大。这不仅导致检测时间延长和检测成本上升,同时增加了辐射安全风险。另外,核电安装多工种交叉施工,时间窗口困难,特别是压水堆主要管道厚壁焊缝,焊接施工多处于施工的关键路径,对工期影响较大。UT检测可与其他工种作业并行,无环境污染。

在大厚壁管道体积检测场景以相控阵超声波检测技术和超声波衍射时差检测技术为代表的数字化

超声波成像检测技术代替射线检测是大势所趋。目前,超声波检测代替射线检测的工作主要集中在锅炉压力容器行业、石油化工行业、电力行业以及核电站常规岛设施的检测。应用于核电华龙一号核岛碳素钢管道焊缝相控阵超声波检测替代射线检测的试验研究目前进展顺利,可期望在福清6号机组中在已研究验证的材质、规格焊缝上应用超声波检测技术部分替代射线检测。2017版RCC-M S7700已明确了可以采用先进的超声波检测来代替射线检测。随着超声波检测代替射线检测工作的开展,主蒸汽管道焊缝将会实现超声波检测代替射线检测。

国内核电站多次发生过主蒸汽管道和主给水管道上预留射线检测插塞由于存在质量问题而发生泄漏事件,给核电站的安全运行带来了很大的风险。如果在主蒸汽管道焊缝上实现超声波检测代替射线检测,主蒸汽管道上的射线检测插塞将取消,这无疑会提升核电站的安全水平。

4 安装水平的提升

1) 使用弯管代替弯头,可以减少焊缝的数量,提高结构的完整性,减少管道的压力损失,提高核电站的安全性。

2) 在宽间隙组对的情况下仍能够实施TIG自动焊,降低安装难度提高安装效率。

3) 主蒸汽管道窄间隙TIG自动焊不预热和后热,可大幅提高施工效率。

4) 超声波检测代替射线检测,避免射线检测对窄间隙TIG自动焊可能产生的未熔合缺陷漏检的风险,提高检测质量;同时超声波检测代替射线检测后,射线检测插塞将取消,可提高结构的完整性。

5 经济效益分析

本文对主蒸汽管道安装焊接的设计如实现,将在提升主蒸汽管道安全水平的同时,还会取得显著的经济效益。

1) 使用弯管代替弯头。一个弯管可减少一道焊缝,相应地减少焊接和无损检测的工作量,也减少在役检查的工作量。对于使用一个弯管,材料、人工和检测费用预计可节省2万元,一台机组按照使用12个弯管考虑,总共可节省24余万元。

2) 如果宽间隙组对的情况下仍能够实施TIG自动焊,可以减少坡口现场测量和加工的工作量,

坡口组对简便易行。另外，一道焊缝焊条电弧焊需要两名高级焊工对称施焊7天，若能够实施TIG自动焊，一人操作焊机即可，并且完成一道焊缝仅需要6天，也不需要打磨工，焊接时间的减少提高了安装效率，焊工和打磨工的减少降低了人工费用。另外，主蒸汽管道安装工期预计缩短至少20天。

3) 目前，主蒸汽管道采用窄间隙TIG自动焊后，与焊条电弧焊相比，提升施工效率还不明显，但是取消预热和后热后，施工效率会大大提升。目前，每道焊缝TIG自动焊需要4天，其中焊前预热和焊后后热总共约2天，取消预热和后热后，每道焊缝安装时间可节省33%。一台机组3个主蒸汽管道环路总共70余道焊接，其中50余道现场焊接，取消预热和后热后，可减少70余道焊缝预热和后热的工作量，主蒸汽管道安装工期预计缩短至少40天。

4) 超声波检测代替射线检测。射线检测插塞的取消，可减少插塞加工、安装和检测的工作量。另外，超声波检测时间窗口不受限制，可以和焊接交叉作业，有利于缩短安装周期。对于一个射线检测插塞，材料、人工和检测费用预计0.5万元，一台机组按照50个射线检查插塞计算，加上检测时间不受限制的获益，总共可节省30余万元。

综上所述，设计优化后的主蒸汽管道安装工期预计缩短至少60天，使“蒸汽发生器二次侧水压试验开始”节点时间提前至少60天，进而可以为冷试目标提前20天奠定基础，为机组提前实现商运目标创造有利条件。

6 结束语

压水堆主蒸汽管道的安装焊接设计是核岛安装设计的重要组成部分。在华龙一号主蒸汽管道现有的安装焊接设计中，使用大量弯头造成焊缝数量过多，TIG自动焊组对间隙要求严格，存在着预热和后热时间长，焊后射线检测对可能产生的未熔合缺陷存在漏检风险等问题。

针对目前华龙一号主蒸汽管道安装焊接存在的问题，建议研究以下4个方面的设计改进。

1) 使用弯管代替弯头。大口径弯管在火电行业中的应用经验可以充分借鉴。为确保弯管焊接组对成功，需要关注弯管的后预装以保证坡口组对。使

用弯管代替小角度弯头，能够减少焊缝的数量。

2) 宽间隙组对。宽间隙组对需解决好坡口根部打底问题。本文提出了两种切实可行的根部打底方法：手工TIG焊打底、使用陶瓷衬垫打底。宽间隙组对能够减少现场测量加工和组对的工作量。

3) 取消预热和后热。通过理论分析（预热和后热的作用、碳当量法）、试验研究（裂纹敏感性和对照焊接工艺评定），验证主蒸汽管道TIG自动焊取消预热和后热可行性，从而在保证焊接质量的同时，还能明显缩短安装工期。

4) 超声波检测代替射线检测。随着超声波检测代替射线检测研究的开展，主蒸汽管道焊缝将会实现超声波检测代替射线检测，检测质量更加可靠。另外，主蒸汽管道上的射线检测插塞将取消，能够提升核电站的安全水平。

压水堆主蒸汽管道安装焊接的设计优化实施后，在提高主蒸汽管道安全水平的同时，还会取得显著的经济效益，有利于提升压水堆核电机组的市场竞争力。

参考文献：

- [1] AFCEN.RCC-M design and construction rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S]. French: French Association for Design, Construction and in-service Inspection Rules for Nuclear island Components, 2007.
- [2] 胡中其, 郑政.焊前预热对高强度钢焊接冷裂纹的影响[J].石油化工设备技术, 1993 (3): 14-22.
- [3] 曹良裕.用预热方法防止低合金高强度钢焊接接头冷裂纹的研究[J].材料开发与应用, 1991 (4): 34-38.
- [4] 计遥遥, 国礼杰, 包忠峰.550MPa级热轧H型钢冷裂纹敏感性研究[J].金属加工(热加工), 2020 (12): 30-33.
- [5] 全国焊接标准化技术委员会.金属材料焊缝的破坏性试验 焊件的冷裂纹试验 弧焊方法 第2部分: 自拘束试验: GB/T 32260.2 [S].北京: 中国标准出版社, 2015.
- [6] 孙丹丹.SA302Gr.C材料焊接性能研究[J].一重技术, 2010 (3): 33-35.

MW 20210302