

在役期间焊接修补要求与建造期间的差异性和特点

邓峰, 李哲, 郭利峰

中国核电工程有限公司 北京 100840

摘要: 通过对比ASME 2010版中在役期间与建造期间修补要求, 研究核电站容器在役期间的焊接修补要求的差异性和特点。包括遵循规范版本、业主焊接工艺评定转移、焊工资格转移、缺陷去除及检测回火焊道5方面特点, 分析其技术背景和内在产生原因, 以便于更详细了解在役期间焊接修补规范要求, 为国内更好了解使用在役期间焊接修补要求具有实际指导意义。

关键词: ASME规范; 焊接工艺评定转移; 焊接修补; 回火焊道; 容器

1 序言

近年来, 随着我国浙江、山东、福建、海南等省数台核电机组装料运行, 截止2019年12月底, 我国共有47台商业核电机组在运行, 因此在役期间焊接修补的问题变得更加迫切起来。

核电站投运后, 受复杂工况和环境的影响(机械疲劳、热老化、流体加速腐蚀等), 在运行期间可能产生缺陷, 或导致制造期间原有缺陷扩展为缺陷, 因而在役检查与维修处理是电站在役期间及时发现、处置各类缺陷, 保证核电站安全水平必不可少的手段, 而焊接修补是在役期间一种非常重要的缺陷处理方法。在役期间的焊接修补具有其特殊性, 不能简单照搬电站建造期间的要求。目前, 我国关于核电在役期间焊接修补的标准规范要求还是空白, 一些重要在役焊接修补技术方面严重依赖国外。

对于回火焊道技术及不锈钢同质堆焊返修技术应用, 国内已有初步研究应用, 在运行和退役的标准体系研究中, 核电在役期间焊接修补的研究是其不可或缺的一环。国内对于在役期间焊接修补规范尚无系统、完整的研究。本文以ASME第XI卷相关条款为指引, 研究核电站在役期间的焊接修补要求, 从而形成完整、系统的核电在役期间焊接修补规范要求, 为在役期间相关标准制定提供坚实支撑。

2 对比构建

作为研究目标, 我们对ASME 2010版中建造期间要求的NB-4400^[1]、NX-4453.4、NX-4622.9内容和以在役期间要求的ASME第XI卷IWA^[2]和非强制性附录Q进行了对比。

2.1 建造期间的要求

建造期间^[3]缺陷的去除和焊接按照NB 4400的要求进行, 包括对缺陷的去除方法、缺陷去除后的无损检测要求, 以及焊接补修后的要求。

建造期间修补的检测按照NX 4453.4要求进行, 包括磁粉检测、液体渗透检测、超声波检测和射线检测等要求。

建造期间回火焊道返修技术要求在ASME第III卷NX 4622.9中规定, 包括一般要求、母材和焊缝的返修、堆焊层返修, 以及带有隔离层的异种钢焊缝的回火焊道返修等内容。

水下焊接技术要求和Overlay返修要求在ASME第III卷未做出规定。

2.2 在役期间的要求

在役期间焊接、钎焊、金属去除和安装、检测和试验要求、回火焊道返修技术, 以及水下焊接技术、非强制性附录Q(Overlay返修要求), 分别在ASME第XI卷IWA-4400、IWA-4500、IWA-4600和非强制性附录Q中规定, 见表1。

表1 ASME第XI卷IWA在役部分框架结构

章节号	标题	备注
IWA-4400	焊接、钎焊、金属去除和安装	对焊接、钎焊、缺陷去除、用热加工法金属去除和安装进行要求
IWA-4500	检测与试验	对检测的人员资质和检测要求进行了规定
IWA-4610	回火焊道的通用要求	对预热范围和温度、道间温度、焊接工艺评定、缺陷去除等总体性要求
IWA-4620	同种材料的回火焊道	包括通用要求、焊接工艺评定、焊接工艺(SMAW和GTAW)及检测等内容
IWA-4630	异种材料的回火焊道	包括通用要求、焊接工艺评定、焊接工艺(SMAW和GTAW)及检测等内容
IWA-4640	堆焊层的回火焊道	包括通用要求、焊接工艺评定、焊接工艺(SMAW和GTAW)及检测等内容
IWA-4650	对MC级和CC级金属焊缝的堆焊焊道——回火焊道焊接	包括通用要求、焊接工艺评定、焊接工艺、检测、不适当回火焊道或堆焊焊道以及咬边的纠正方法等内容
IWA-4660	水下焊接技术	包括通用要求、焊接工艺评定、焊接技能评定、填充金属评定、夏比V型缺口试验、表面及体积无损检测等内容
非强制性附录Q	核1、2、3级不锈钢管道焊缝的Overlay堆焊修补	对Overlay堆焊修补前的条件、Overlay工艺设计、检测以及水压试验做出了要求

3 对比分析

通过从缺陷去除、缺陷评价、去除后的检测、焊工资质要求、修补方法等几个方面对比异同，发现总体上在役期间规范与建造规范的关系是：在役标准的缺陷去除、修补、修补后检查等活动是在建造规范基础上的修订或补充，在役标准内容不足以支撑单个标准，独特的焊接修补方法、回火焊道、Overlay等，整体可形成一份在役期间的焊接标准。

除了IWA-4600、附录Q这些特殊的在役焊接技术要求外，IWA-4400与IWA-4500涉及的焊接、钎焊、缺陷去除、焊后检测和试验只是建造期间制造及检测内容(NX-4000/NX-5000)的一部分。因此，在役期间的焊接修补规范必须以建造规范为基础，而不是一个独立的规范。

在役期间规范其基础在于，通常认为原建造规

范是合理的，可以获得满足要求的质量和安全水平（否则电站本身的质量水平就存在问题）。此外，对于已建成的电站，将已有设备和系统升级到新的建造规范是耗资巨大且非常困难的。因此，在役期间使用原建造规范进行的焊接、缺陷去除和检测等也在逻辑上可获得同样满足要求的质量和安全水平。

同时，考虑到在役期间的特点，某些适用于建造阶段的建造规范要求可能并不适用于在役期间的要求，因而针对这些情况进行了修订和补充。

总体来说，在役期间的焊接参数对于建造期间的焊接参数既有继承，又有补充和修正。补充和修正的差异性和特点主要体现在以下几点。

(1) 遵循的规范版本 在役期间规范需要考虑在电站服役寿命期内采用不同规范版本的问题，在役标准IWA-4411中专门给出了使用规范以及版本的要求，按原建造规范和版本开展活动无疑是允许的。同时与建造阶段相比，电站服役寿命长达为40年甚至60年，在整个在役期间进行的焊接等活动，存在难以完全按建造时规定的标准规范版本执行的情况，例如，难以采购按早期的标准规范供货的设备或者调用其他电厂按早期的标准规范生产的库存设备等，需要考虑执行与建造时不同的规范和版本，以及需要遵循的条件。使用不同规范，或者第III卷的不同版本需要考虑它们之间差异的影响，这一过程被称为协调。其中IWA-4222明确只对影响材料、设计、制造、检测，以及影响压力边界、堆内构件、设备支撑件功能的技术要求进行协调。管理要求无需协调，可以使用被更换件的原建造规范的管理要求，也可以使用更换件的管理要求。IWA-4223中规定，对于部件（容器、热交换器、泵、阀门等），如果使用更新的标准规范，无需进行规范的协调。

(2) 焊接工艺评定和焊工资格 在建造规范中，制造商或安装公司应评定其使用的焊接工艺，不允许使用其他单位的焊接工艺评定。对于在役期间，可能存在下面这种情况，即修理/更换时间窗口短，而修理/更换单位没有工作所需的焊接工艺评定，重新评定所需要的时间较长，可能难以满足电厂的计划，而其他单位具有所需的焊接工艺评定。这种需求是由于在役期间返修往往对于时间具有严

格要求所产生的。

在役期间规范允许在满足一定条件的前提下，业主可使用由其他业主转移的焊接工艺评定。这些条件，包括使用转移的焊接工艺评定的业主为了证明其具有实施能力，要使用该焊接工艺评定支持的焊接工艺规程完成一个演示试件。总的来说，在役期间的特点，使得建造期间的有些规定无法或难以实施。然而它又并非简单地放松，为了保证质量，又增加了一些条款，提供了另外的途径，使得其达到类似的作用。

对于焊工也存在类似问题。规定允许在满足一定条件（包括接受焊工的业主要对焊工进行资格更新试验）的前提下，业主使用其他业主考核的焊工。

（3）缺陷去除 缺陷去除要求内容与建造规范存在巨大的差异，这一部分在IWA-4412中被明确为按IWA-4420执行，而不是在建造规范的基础上进行修正、补充。

第一个明显的差异就是IWA-4421中规定了缺陷去除方法。在建造规范中，缺陷应通过机加工或热加工方式去除，如果去除的厚度不满足要求，还要求进行补焊。而在役期间，采用机加工方式或热加工方式去除缺陷后，可以保留一定尺寸的缺陷（部分去除缺陷），在焊接时可以采用缺陷缓解（Mitigation）的方式（如Overlay），还可以通过IWA-4340改造（Modification）的方式，对于缺陷缓解和改造的情况，原缺陷可以仍然保留。这些方式为在役期间的缺陷处理提供了更多选项，有利于在保证安全的前提下以更方便快捷的方式处理缺陷。实际上，“缺陷去除”（Defect Removal）改为“缺陷处理”（Defect Treatment）可能更为合适。

第二个差异是关于缺陷的评价。IWA-4422.1a规定允许缺陷减小到可接受的尺寸，对于一定深度的表面缺陷，可以将缺陷完全去除（假设此时不满足最小壁厚）再焊接（这是建造规范中的做法），也允许去除部分缺陷，使得剩余缺陷满足在役检查的验收标准，且剩余厚度满足最小壁厚要求，这样就给了业主更多的处理选项。另外是使用Overlay，通过在外壁增加承压边界厚度的方式，使得原来不满足要求的缺陷变成符合在役检查的验收标准。此外，对于剩余壁厚小于最小壁厚的情形，IWA-

4422.1b规定可以采用评价的方式，判断其是否可以接受。

第三个差异是缺陷去除后的检测要求。对于缺陷去除后无需后续焊接的操作，缺陷去除后的状态就是最终状态，此时要求采用最初发现缺陷的检测方法进行重新检测。由于最终允许采用建造规范的验收标准或在役的验收标准，所以不要求缺陷完全去除，可以是部分去除。除此之外，还要进行IWA-4530要求的役前检查。

对于缺陷去除后进行后续焊接的操作，IWA-4422.2.2规定了缺陷去除后、焊接前的检查要求是表面检测，并允许在3种情况下可免除。第1种情况是去除缺陷处全部壁厚，这一要求同建造规范。第2种情况是去除后的表面检测不可行或不能提供有意义的结果，例如，管道存在穿透性漏孔，而维修后仅去除部分壁厚（此时漏孔仍存在，表面检测总有显示，不能提供有意义的结果），后续的补焊厚度能保证足够的承压边界。第3种情况是补焊后的检测与发现缺陷的方法相同。

需要注意的是，此处仅规定的是缺陷去除后、焊接前的检测要求，且规定验收标准可以满足建造规范或在役规范要求。由于焊接后的检测要求还需要按IWA-4520进行，IWA-4520通常要求验收标准满足建造规范的要求（规定了例外情况除外），所以缺陷去除后的验收要求与焊接后的检测要求存在不一致的情况。对于缺陷去除后、焊接前的检测要求，除了IWA-4520规定的特殊情况（以及附录Q）外，验收标准应按建造规范执行为宜。

（4）检测 IWA-4520规定了在役期间制造、安装、修理、更换等涉及的焊接，应按建造规范的要求进行检测。同时，并针对在役期间的特点增加以下差异。

首先，如果在同样部位的全焊透对接焊缝无体积检测要求时，可以免除3级设备母材补焊后的检测要求。这个条款是合理的，但是涉及面很小，可以不用保留。其次，对于IWA-4600的特殊焊接方法（回火焊道、水下焊接等），使用其相应的专门要求，而不是使用这里的通用要求。最后，在IWA-4520b和IWA-4521中规定了一定条件下可以使用其他检测方法和验收标准代替建造规范中的要求，例如使用UT代替RT（源于Code Case N-587）。需要

注意的是, IWA-4520b和IWA-4521的这些规定, NRC在10CFR50.55a中并未认可。

总体看来, 除了个别特殊情况外, 焊接后的检测项目和验收标准要满足建造规范的要求。

IWA-4530规定, 对于在役期间的修理/更换活动(包括仅去除缺陷、无后续焊接的情况), 如果涉及需要在役检查的部位, 那么需要在投入使用前, 重新进行役前检查, 从而为后续的在役检查提供一个比较的基准, 显然这是在役期间特有的。规范允许焊接后检测与役前检查同时进行, 例如焊接后要求进行PT检测, 而役前检查也要求进行PT检测, 那么可以进行一次PT检测而不要求重复进行两次。注意此时, PT检测要同时满足建造和役前检查的要求(例如, 检测区域)。

(5) 回火焊道 回火焊道的差异不能被理解为因在役实施的条件而产生的差异, 建造阶段的回火焊道(ASME III)和在役期间的回火操作(ASME XI)目的都是通过精确控制焊接的能量和位置, 使用焊缝金属来对于母材热影响区的粗晶区进行回火处理, 使得其冲击性能满足要求。由于在役期间的回火焊接具有非常广泛的应用经验, 如前所述, 1973版的XI补遗就引入了焊条电弧焊的半焊道回火返修条文。后期也在电站在役中不断研究应用, ASME XI卷 1991年补遗按规范案例N-432引入了GTAW方法, 2015版的XI卷增加了室温下的回火返修技术, 从而可以在设备不排空水的条件下开展返修等, 而建造期间的应用相对较少(且建造规范中有限制性条款), 所以来自现实的应用需求和反馈, 使得第XI卷的回火返修技术内容较建造规范更加细致、完善。对比标准表中内容也体现了这一点。

需要注意的是, 与缺陷去除类似, 挖除缺陷后的无损检测验收标准是ASME XI, 而回火焊道返修后的无损检测验收标准是建造规范, 存在不协调。

后续标准草案中的处理方式: 回火焊道的总体要求应符合ASME第XI卷, 对于缺陷去除后、焊接前的检测要求, 除了IWA-4520规定的特殊情况外, 验收标准应按建造规范执行。

4 结束语

通过ASME对比在役期间规范和建造期间规

范, 可以得到以下结论。

1) 在役期间的焊接参数不是独立成篇的, 而是在建造规范的基础上, 进行的补充和修订。

2) 这些补充和修订是考虑到在役期间的特点而确定的, 主要包括: ①允许采用不同于建造期间的要求。这是由于电站运行寿命期很长, 所以在整个在役期间进行的焊接等活动, 存在难以完全按建造时规定的标准规范版本执行的情况。②焊接工艺评定和焊工资格允许在满足一定条件下, 从一个业主转移到另一个业主。这种需求是因在役期间返修往往对于时间具有严格要求而产生的。③在役阶段缺陷去除包含更丰富的方法, 甚至允许保留原缺陷。实际上, “缺陷去除”(Defect Removal)改为“缺陷处理”(Defect Treatment)可能更为合适。缺陷处理后的验收标准可以使用建造的标准, 也可以使用在役的标准。需要注意的是目前ASME XI中使用机加工或热加工方法去除缺陷后、补焊前的无损检测验收标准与补焊后的验收标准存在不协调的地方。④除了个别特殊情况外, 焊接后的检测项目和验收标准要满足建造规范的要求。另外, 需要注意的是, IWA-4520b和IWA-4521规定了一定条件下可以使用其他检测方法和验收标准代替建造规范中的要求, 这并未被NRC认可。⑤在役阶段的回火焊道返修内容更为丰富、细致, 这可能是由于在役期间丰富的应用反馈和需求造成的。例如, 室温下的GTAW回火返修技术, 使得在设备不排空水的情况下也可以进行。需要注意, 挖除缺陷后的无损检测验收标准是ASME XI, 而回火焊道返修后的无损检测验收标准是建造规范, 存在不协调。

参考文献:

- [1] ASME.ASME BPVC III-NB Division 1-Subsection NB Class 1 Components[S].USA: ASME, 2017.
- [2] ASME.ASME BPVC-XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components[S]. USA: ASME, 2019.
- [3] ASME.ASME BPVC III-2 Division 2 Code for Concrete Containments[S].USA: ASME, 2019.

MW 20210315