

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2013.11.005

AP1000 核电站钢制安全壳涂装质量控制

林金平 黄 娜

(国核工程有限公司, 上海 200240)

摘要: AP1000 核电站钢制安全壳是核岛关键设备, 其涂层不仅仅为了防腐, 更多的是为了核电站的安全运行。主要介绍了 AP1000 钢制安全壳及其附件涂层服役分级和涂层技术要求。对现场钢制安全壳涂层施工重点技术要求和不符合项进行了总结分析, 提出在钢制安全壳相关涂层施工时, 需着重注意贯穿件涂层的施工问题, 以及技术规格书要求的“不可达区域”严格的许可。通过分析总结, 为后续项目 AP1000 核电站钢制安全壳的防腐和防辐射涂层的施工提供参考。

关键词: 钢制安全壳; 涂层; 服役等级; 技术要求; 质量控制

中图分类号: TG174.461

文献标识码: B

Discussion on Coating Quality Control in AP1000 Containment Vessel Construction

LIN Jin-ping, HUANG Na

(State Nuclear Power Engineering Company, Shanghai 200240, China)

Abstract: AP1000 containment vessel is key equipment of nuclear island, coating on the vessel is not only for anti-corrosion, but also for safe operation of the nuclear power plant. This paper introduced coating service level and coating technical requirements of the AP1000 Steel Containment Vessel and its attachments. At the same time, key technical requirements and non-conformities of coating construction issues were analyzed. It was also pointed out that the coating quality control needed to focus on penetration assemblies and strict "unreachable area" definition in technical requirements. Through the analysis and summary in this paper, it try to provide a reference to anti-corrosion and anti-radiation coating operation for the AP1000 containment vessel in follow-up projects.

Keywords: steel containment vessel; coating; coating service level (CSL); technical requirements; quality control

引言

AP1000 依托项目是我国引进、消化 AP1000 第三代先进核电技术的首批项目。通过依托 4 台 AP1000 机组的建设, 逐步吸收、转化国外先进的核电技术及管理模式, 最终达到将美国西屋公司研发将 AP1000 的设计、制造等各方面技术设备全部国产化的目的^[1]。本文主要介绍了 AP1000 钢制安全壳及其附件涂层服役分级和涂层技术要求, 并对现

场涂层施工中遇到的问题进行分析, 为后续项目 AP1000 钢制安全壳的防腐和防辐射涂层的施工提供参考。

1 AP1000 钢制安全壳及涂层服役等级

1.1 AP1000 钢制安全壳结构简介

钢制安全壳是第三代核电 AP1000 核电站中重要的核级模块, 是非能动主要功能实现的主要途径。钢制安全壳包容着反应堆、蒸汽发生器等主工

收稿日期: 2013-06-05

修回日期: 2013-08-01

艺系统设备,在事故工况下能有效防止放射性物质外泄。AP1000 的安全壳与通常压水堆的预应力混凝土安全壳不同,由两层组成,其内层为圆柱形钢制容器,外层为钢筋混凝土屏蔽构筑物。钢制安全壳容器是独立式的带上下椭球封头的圆柱形钢制容器,按照 ASME III NE 分卷-MC 级设备(金属安全壳材料)的要求设计制造。西屋设计方设计的钢制安全壳容器(Containment Vessel, CV)由五个主要结构模块组装建造而成,即底封头、第一环、第二环、第三环和顶封头组成。每个模块都由预先成型的、喷好涂层的钢板(SA738)制成。同时钢制安全壳中还包含环形加强圈、环吊梁、设备闸门、人员闸门、贯穿件和其他附件。这些大量的模块都通过现场的焊接组装而成^[2]。安全壳结构如图 1 所示。

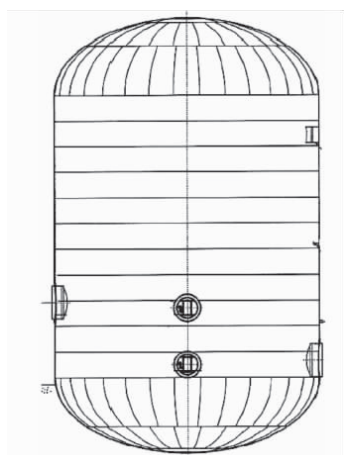


图 1 AP1000 钢制安全壳结构示意图

AP1000 核电厂共有四个区域使用了保护涂层。这四个区域为:安全壳内部、安全壳外表面、安全壳外辐照控制区以及核电厂的其他部分。

1.2 AP1000 钢制安全壳及附件涂层服役等级

涂层为安全壳压力边界处和安全壳内其他系统与设备提供了持续的腐蚀防护能力。AP1000 设计方根据 RG1.54《关于核电厂用 I、II、III 服役级涂层》中对设施设备的防护涂层要求,将涂层服役分区的定义为^[3]:

1) 服役 I 区。服役 I 区位于反应堆安全壳内,此区域内的涂层失效可能会对失水事故后流体系统的正常运行不利,从而影响安全停堆,此服役区的涂层为安全相关涂层。

2) 服役 II 区。服役 II 区位于辐射控制区,其失效不会对安全相关系统、构筑物或部件造成有害影响,此服役区的涂层为非安全相关涂层。

3) 服役 III 区。服役 III 区位于反应堆安全壳外,此区域内的涂层失效可能会对安全相关系统、构筑物或部件的安全功能造成有害影响,此服役区的涂层为安全相关涂层。

I 级和 III 级涂层的质量特性符合 ASME NQA-1-1983 的要求(该要求已被 RG1.28 认可)。安全相关的涂层须满足 10 CFR50 附录 B 的相关条款。涂层的分级须与 RG1.54“核电厂用 I、II 和 III 级保护涂层”(修订版 1)中的分级一致,对于 AP1000 使用的 I 级和 III 级涂层要经过辐照试验和设计基准事故下性能试验。用于需要去污区域的涂层要进行去污能力评估。同时,在现场施工时,为了便于对表面预处理、涂层的涂装和涂层的检验进行有效的控制,涂装施工人员应严格遵循合格的程序。油漆施工人员及涂装检验人员都要具备合格资质。安全壳壳体内表面使用的无机锌涂层(IOZ)(I 级涂层)和外表面使用的无机锌涂层(III 级涂层)要采用无损干膜厚度试验和丁酮(MEK)摩擦试验进行检验。表 1 列出了 AP1000 钢制安全壳及其附件区域的涂层服役等级及使用的涂层材料类型。

表 1 AP1000 钢制安全壳及其附件区域的涂层服役等级

涂层等级	区 域	安全特性	涂层类型
服役 III 区	钢制安全壳外表面	安全相关	IOZ
服役 I 区	钢制安全壳内表面 (内部操作平台区域)	安全相关	IOZ + Epoxy
服役 II 区	其他区域	非安全相关	IOZ

在安全壳外所使用的涂层,具有的清洁和去污等功能不属于安全相关的功能,但是,由于安全壳外表面的涂层为非能动安全壳冷却系统(PCS)的运行条件,从而使其具有安全相关的作用。除了安全壳外壳表面上的涂层,其他都与核电厂安全无关。安全壳标高 3.429 m 以上的外表面涂层要支持非能动安全壳冷却系统(PCS)。在 PCS 系统投入使用时,外表面涂层能够支持系统在安全壳表面建立能够充分覆盖安全壳表面的水膜,以强化其热传导功能,因此该表面涂层被划分为使用 III 级涂层。

在安全壳内表面且高于内部操作平台以上的涂层要支持事故后热量从安全壳内的大气传导至安全壳壳体。对于此涂层要进行 PCS 系统的试验和分析。此区域涂层服役等级为 I 级。

除钢制安全壳外表面和内表面(内部操作平台区域)之外,安全壳表面其他区域所使用的涂层都

归为服役等级 II 级,因为这些涂层的失效并不会妨碍专设安全设施的功能执行。如果这些服役等级 II 级的涂层发生脱落,所形成的固体碎片并不会对事故后安全相关冷却系统的性能造成负面影响。对于服役等级 II 级的涂层,一般都应用在特定的核电站设计特征下,如具有较低水流速的情况下。

2 AP1000 钢制安全壳涂层要求及选择

在 AP1000 的设计中,对于不同的服役等级所选择的涂层有不同的考虑,包括涂层的功能、潜在的失效模式以及维修时的要求等^[4]。钢制安全壳为完整的密闭碳钢容器,在正常运行期间,为保证碳钢的耐腐蚀,需对其内外表面进行涂层防护,故 CV 用涂层应具有较好的耐蚀性。在发生 DBA 事故时, CV 内温度和压力迅速升高,布置于混凝土安全壳结构顶部的非能动安全壳冷却水箱将冷却水喷淋到 CV 顶部,水流沿着 CV 容器上半部的外壁而下,故外壁上的涂层应具有较好的润湿性和导热性,以利于水流带走 CV 内的热量,使 CV 温度和压力得到缓解而不损害容器,避免核素释放到安全壳

外环境。安全壳壳体内外表面使用无机锌涂层,能够提供较好的导热性。在钢制安全壳外面设置该涂层(IOZ) 的主要目的在于,通过 PCS 系统的运行建立安全壳外的冷却水水膜,使安全壳外表面的表面浸润面积最大,通过水分蒸发吸收从安全壳内部排出的热量,从而增强涂层的热传导性能。AP1000 核电站钢制安全壳用涂层在需保证较好导热能力的区域内均要求使用无机锌涂层,对于以防腐蚀和去放射性玷污为主的区域,则应在其上加涂一层环氧面漆(Epoxy)。表 2 列出了 AP1000 钢制安全壳使用的无机富锌涂层(IOZ) 和环氧树脂(Epoxy) 的技术要求。

现场施工使用的是经过设计方鉴定、能满足 AP1000 核电站 CV 内外表面用涂层要求的涂层系统。无机富锌涂层包括 Carboline 公司的 Carbozinc 11HSN 和 PPG 公司的 Dimetacote D9N,以及 Sherwin Williams 公司的 Zinc Clad II N,它们的颜色均为灰色。环氧涂层包括 Carboline 公司的 Carboguard 890N 和 PPG 公司的 Amercoat 90HSN,以及 Sherwin Williams 公司的 Macropoxy 646N。

表 2 AP1000 钢制安全壳涂层性能要求

涂层	$\lambda /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\rho_{\text{干膜}} /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c /$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	干膜发射率	耐腐蚀性	DBA 评定
IOZ	≥ 0.3200	≥ 207	≥ 0.13	≥ 0.60	盐雾试验 $t \geq 3500 \text{ h}$, 依据 ASTM B117	根据 ASTM D5144 附录 B
Epoxy	≥ 0.1875	≥ 100	≥ 0.25	≥ 0.81	盐雾试验 $t \geq 3500 \text{ h}$, 依据 ASTM B117	根据 ASTM D5144 附录 B

3 AP1000 钢制安全壳涂层质量控制要点

为了提高涂层的质量,除了采用设计方推荐的涂层产品外,现场严格的施工控制手段和高标准的施工规格也是必须的。涂层防护的好坏与施工过程的质量控制密切相关,对于核电体系所要达到的长期防腐要求而言,高标准的表面处理等级、严格的施工控制条件,都是达到良好涂装品质的必要条件。

3.1 涂层施工过程质量控制要点

在现场进行油漆施工时按照以下施工环节进行:先决条件检查→表面处理→表面处理和环境条件检查→底漆涂装→底漆干燥→底漆修补(如需要)→底漆检查→面漆涂装→面漆干燥→面漆修补(如需要)→面漆检查。在这些步骤中,要严格注意先决条件检查、表面准备和涂层修补(如需要)几个方面工作。

1) 先决条件检查质量控制要点。先决条件的检查,包括在施工前应进行技术交底;油漆施工人员应持证上岗;油漆在保质期内;油漆施工器具合格以及施工环境的合格。一般情况下,金属基材 θ 应高于 3°C ,当环境 $\theta < 10^\circ\text{C}$,环境 RH 大于 80% 以及在雨、雪、雹等气候条件下,不允许施工。面漆施工的具体环境条件要求如表 3。

表 3 AP1000 钢制安全壳涂层施工环境要求

条件	θ (涂装材料) $^\circ\text{C}$	θ (表面) $^\circ\text{C}$	θ (大气) $^\circ\text{C}$	RH/%
正常	16 ~ 29	16 ~ 29	16 ~ 32	0 ~ 80
最低	10	10	10	0
最高	32	52	43	80

2) 表面处理质量控制要点。喷砂材料应选用钢砂 d 为 $0.7 \sim 1.2 \text{ mm}$,不得使用石英砂和钢丸。对涂装区域按照 SSPC-SP10 进行喷砂处理,清除表面的铁锈、焊渣、毛刺及飞溅物等,露出金属光泽,表面

处理要作成直线,被清理表面的 R_a 应达到 $37 \sim 63 \mu\text{m}$,并清除表面处理过程中产生的灰尘,被清理表面保持清洁、干燥。当粗糙度小于规定值时,应对不合格区域所在的 1 m^2 范围内进行二次喷砂处理,直到符合要求为止;当粗糙度大于规定值时,应采用手工或动力工具进行打磨处理,直到粗糙度的测量值符合设计要求。当喷砂除锈难以实现时,可以使用动力或手动工具尽最大努力进行表面处理,此区域的处理应有记录,并经上游单位认可。动力除锈应达到 SSPC-SP11 的相应要求。

3) 涂层修补质量控制要点。IOZ 底漆修补后的干膜 δ 为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,底漆调配应用 $d = 600 \mu\text{m}$ 的滤网过滤,并充分搅拌。IOZ 底漆之间不能搭接,IOZ 底漆的修补应为直线。若 IOZ 底漆厚度不足,不可以复涂,必须重新喷砂处理后再进行底漆处理。同样,IOZ 底漆厚度过厚,不能用手工或动力工具进行打磨,必须采用重新喷砂处理方可进行底漆处理。面漆修补时,应对工件表面进行“雾涂”,加入 30% 的稀释剂进行喷涂,之后在进行常规的喷涂涂装。进行油漆涂装作业时,需要采取遮盖措施以避免油漆滴落和污染其周围不需涂漆的表面。环氧面漆的最大复涂 t 为 30 d,如果超出了最大复涂时间,先须复涂部分进行手工打磨处理,新旧面漆之间的搭接不得超过 25 mm,在新旧面漆之间要形成平滑过渡。

3.2 贯穿件油漆施工的技术要求

贯穿件是钢制安全壳上非常重要的部件,某些贯穿件还包括套筒、保护管、套筒延长管、射流转向器和附件环等结构。在依托项目施工过程中,关于钢制安全壳油漆施工的不符合项较少。目前产生的不符合项主要集中在贯穿件涂层施工上。由于其结构部件复杂,在施工时,贯穿件施工区域很容易受限,如不能合理的安排施工工序,很容易造成涂层施工操作受限,造成不符合项,在现场进行油漆施工时,需要重点控制。

1) 技术要求油漆施工中的“不可达”定义及执行。在现场施工环境下,设计允许存在由于施工环境、施工机械受限,造成涂层的施工“不可达”,即不能完成设计要求的涂层施工。在施工过程中,产生了一些关于涂层施工过程的“不可达”定义理解造成的不符合项。施工时对于正常要求的表面施工区域如果是不可达的话,应定义在“尽最大努力”的基础上,同时对这些区域的处理应满足如下要求:

a. 这些区域在检测时予以注明且应得到采购方或者设计方的通过;

b. 这些区域应在最终检查报告中予以注明;

c. 这些区域的记录应被生产者作为系统、设备或者部件的一部分做永久记录,且保存。

现场在执行工作时,必须严格按照设计方的要求,尽最大的努力进行涂层施工,切勿未经努力便随意定义成不可达区域,同时,要避免由于施工逻辑顺序而造成的不可达。因此,在后续项目涂层施工时,需对贯穿件组件的涂层施工进行严格控制,在施工之前,应对结构和现场安装情况对有可能出现的“不可达”区域做出预判,避免“不可达”的产生。

2) 贯穿件涂层施工细节明确。现场施工时,发现贯穿件封头管喉部的涂层要求不明确。技术要求没有被保温材料覆盖的地方必须进行涂层处理。封头管喉部区域相关涂层工作由于没有被保温材料覆盖,必须进行涂层处理,见图 2。

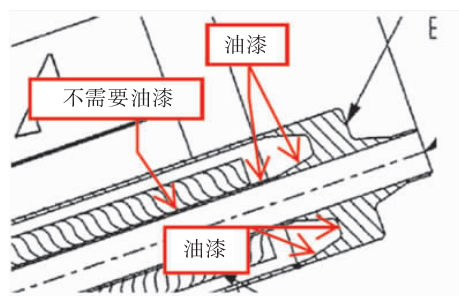


图 2 AP1000 钢制安全壳贯穿件封头管涂层区域

4 结 论

AP1000 核电站钢制安全壳及其附件的涂层不仅仅为了防腐,更多的是为了核电站的安全运行。在现场施工时,除了必须满足设计技术规格书和采用西屋设计方推荐的涂层产品外,现场严格的施工管理和质量控制也是必须的。在相关涂层施工时,从经验反馈来看,需着重注意贯穿件涂层的施工问题,同时,现场质保单位也必须对“不可达区域”进行审慎的分析考虑,减少对质量的损害。

参考文献

- [1] 孙文科. AP1000 自主化依托项目管理模式的实践与探索[J]. 中国核电, 2010, 3(1): 24-33.
- [2] 林城格, 郁祖盛, 欧阳予. 非能动安全先进压水堆核电技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2008: 8.
- [3] 熊壮. AP1000 核电站钢制安全壳保护性涂层探讨[J]. 中国涂料, 2012, 27(5): 58-62.
- [4] 谭功理, 王晰. AP1000 核电站钢制安全壳防护涂层的设计[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(9): 66-70.