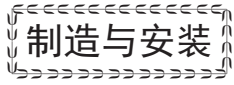


doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2025.06.009



非能动核电站钢制安全壳焊接及焊后热处理探讨

朱瑞峰^{1,2}, 张俊宝^{1,2}, 吴崇志¹, 丛大志^{1,2}

(1.上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233; 2.核电关键材料全国重点实验室, 上海 200233)

摘要:针对钢制安全壳制造过程中焊接工艺优化与质量控制的难点,基于工程实践和相关标准规范的分析,系统探讨了焊缝管辖判定、焊接预热、工艺选择及焊后热处理等关键制造环节。结果表明:SA-738 Gr.B钢材因碳当量存在差异,需采用定制化的预热方案;采用焊条电弧焊进行打底,结合机械焊完成填充与盖面的组合工艺,能够在保证质量的同时提高效率;通过使用工装夹具可有效控制焊后热处理过程中的变形,且在标准允许范围内免除热处理更具经济性。研究为核电站钢制安全壳的制造工艺优化提供了重要参考,相关方法论也可推广应用于其他安全级设备的制造过程中。

关键词:钢制安全壳;焊缝管辖;焊接预热;焊接工艺;焊后热处理

中图分类号:TH49;TG44;TG15

文献标志码:B

Discussion on welding and PWHT of steel containment vessels for passive nuclear power plants

ZHU Ruifeng^{1,2}, ZHANG Junbao^{1,2}, WU Chongzhi¹, CONG Dazhi^{1,2}

(1.Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co.,Ltd.,Shanghai 200233,China;

2.State Key Laboratory of Materials for Advanced Nuclear Energy,Shanghai 200233,China)

Abstract: To address the difficulties in welding process optimization and quality control during the manufacturing of steel containment vessels, this paper systematically discusses key manufacturing steps such as weld jurisdiction determination, welding preheating, process selection, and post-weld heat treatment based on the analysis of engineering practices and relevant standards and codes. The results show that due to differences in carbon equivalent, SA-738 Gr. B steel requires customized preheating schemes; using shielded metal arc welding for the root pass combined with mechanized welding for filling and capping passes can ensure quality while improving efficiency; The use of tooling fixtures can effectively control deformation during post-weld heat treatment, and exemption from heat treatment within the allowable range of standards is more economical. The study provides an important reference for the optimization of manufacturing processes for nuclear power plant steel containment vessels, and the related methodology can also be extended to the manufacturing of other safety-class equipment.

Key words: steel containment vessel; weld jurisdiction; welding preheating; welding process; post-weld heat treatment

0 引言

某系列三代核电站基于非能动安全理念,其反应堆厂房采用如图1所示的双层结构^[1]。外层为钢筋混凝土或钢板混凝土结构,其功能包括放射性屏蔽、形成冷却流道、支撑顶部水箱及防御外部飞射物,从而保护内部设备。内层为钢制安全壳,其核心作用有二:一是作为防止放射性物质外

泄的最终安全屏障;二是作为最终热阱的换热面,通过重力水膜和空气对流等自然方式,实现对安全壳内热量的非能动冷却。

根据 ASME BPVC, Section III : *Rules for Construction of Nuclear Facility Components—Division 1; Subsection NE—Class MC Components* 规范进行设计和制造的钢制安全壳,是一种带有上下椭球形封头的自立式圆柱形钢制容器,属于

MC级设备,其整体结构如图2所示^[2-3]。

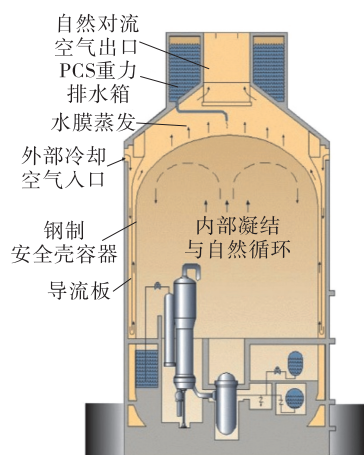


图1 钢制安全壳与屏蔽构筑物非能动冷却效果示意^[1]

Fig.1 Schematic of passive cooling effect for steel containment vessel and shielding structure^[1]

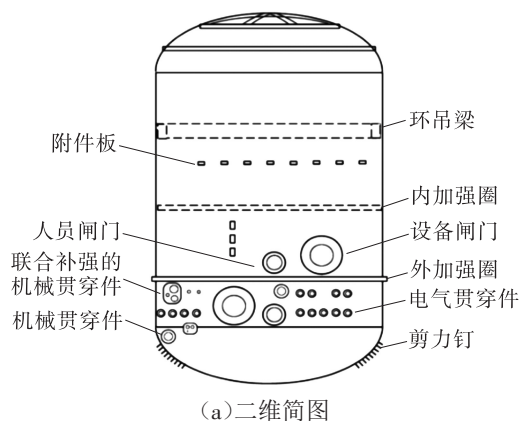


图2 钢制安全壳结构示意图

Fig.2 Schematic of steel containment vessel structure

1 焊缝管辖标准

钢制安全壳的内外接口数量多、结构复杂,包括实现内外连通的各类贯穿件与闸门,以及构成平台通道的多种钢结构。这些接口的焊接需遵循不同的标准,因此,正确判定焊缝管辖是开展焊接施工的前提。钢制安全壳主体的承压焊缝严格遵循 ASME BPVC. III.1.NE—2023 规范进行设计与制造。然而,钢制安全壳与附件之间的焊缝,以及贯穿件与管道之间的焊缝情况各异,部分已超出 ASME BPVC. III.1.NE—2023 的管辖范围,需进行单独分析并选定合适的执行标准。

1.1 钢制安全壳与附件

钢制安全壳的附件可分为结构附件、非结构附件、承压附件和非承压附件这4种基本类型。这些类别并非彼此独立,而是存在交叉关联关系,如

钢制安全壳结构复杂,包含设备闸门、人员闸门、机械贯穿件、电气贯穿件、加强圈、环吊轨道及各类用于支架安装的附件板。随着反应堆功率的不同,该系列堆型的钢制安全壳在直径、高度、板厚、筒体与封头布置等方面均有所差异。以某型号为例,其壳体材料为 SA-738 Gr.B,厚度范围在 41~55 mm 之间。

在钢制安全壳的制造过程中,存在若干技术难题,主要包括:因对标准理解不足而导致的焊缝管辖标准判定困难;焊接预热温度与 SA-738 Gr.B 具体碳当量不匹配引发的裂纹问题;焊接方法选择不当造成的清根缺陷;局部焊后热处理过程中因变形不协调而产生的裂纹。本文将结合工程实践,对上述关键技术进行系统分析与总结,以指导实际工程施工。

图3所示,并可进一步组合为以下3种主要分类。

(1)承压的结构附件:指兼具承压功能与结构支撑作用的附件。图2中的内、外加强圈即属此类,其焊接施工须遵循 ASME BPVC. III.1.NE—2023 与 ASME IX *Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators* 规范。

(2)非承压的结构附件:指不承担承压功能、但位于钢制安全壳主要载荷路径上的结构附件。由于该钢制安全壳采用自立式设计,其荷载完全由壳体自身承担,因此,在实际结构中不存在此类附件。

(3)非承压的非结构附件:指既不承担承压功能,也不在钢制安全壳支承载荷路径上的附件。此类附件在安全壳上应用最为广泛,例如图2所示的附件板,其功能是通过扩展连接面,实现与外部钢结构、管道支架等部件的对接。关于其焊缝

的管辖判定如图4所示：I类焊缝受ASME BPVC. III.1.NE-2023管辖；II类焊缝则不归ASME BPVC. III.1.NE-2023管辖，可以依据所连接物项的设计准则进行确定，如连接钢结构时需采用钢结构焊接标准。

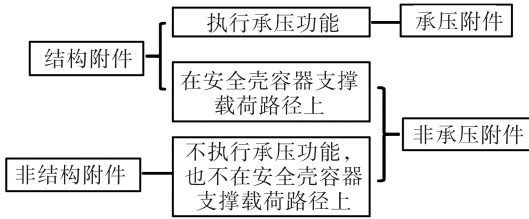


图3 钢制安全壳附件分类

Fig.3 Classification of steel containment vessel attachments

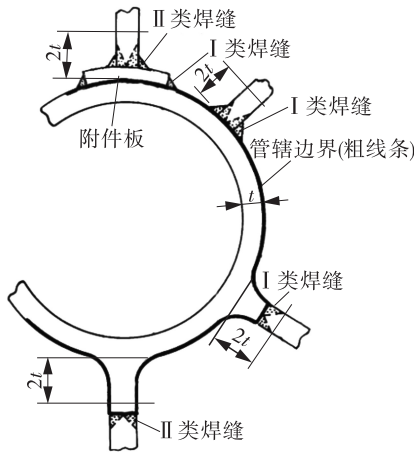


图4 非结构附件示意

Fig.4 Schematic of non-structural attachments

除了上述正式附件外，钢制安全壳在施工过程中还涉及部分临时附件。临时附件的焊接不应

因其临时性而降低质量控制要求，某些情况下甚至需提高管控标准。以图5中用于吊装的吊耳为例^[4]，虽属临时附件，但由于其直接焊接在钢制安全壳的承压边界上，应参照图4中的I类焊缝进行管控。吊耳焊缝若采用全熔透焊接，推荐使用封底焊或清根工艺，以确保根部焊接质量，并禁止使用衬垫。原因在于带衬垫的焊接接头根部贴合面存在间隙，在吊装载荷作用下，该间隙尖端可能成为裂纹源。

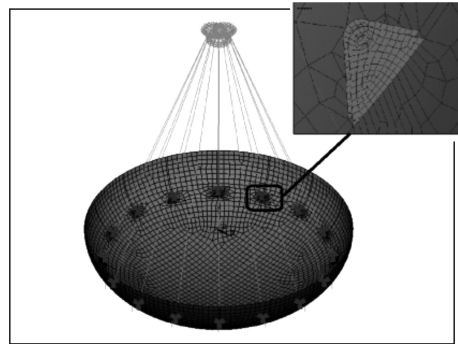


图5 底封头吊装分析模型

Fig.5 Lifting analysis model of bottom head

1.2 贯穿件与管道

钢制安全壳的贯穿件主要分为2类：机械贯穿件，用于实现安全壳内外的物质交换（如核燃料、蒸汽、水等）；电气贯穿件，用于贯通安全壳内外的电气与仪控线路。尽管各类贯穿件的基本结构相似，但正确划分其接口焊缝的等级是焊接施工的重要前提。图6示出贯穿件接口焊缝分级的范例，可为焊缝等级的确认提供有效指导。

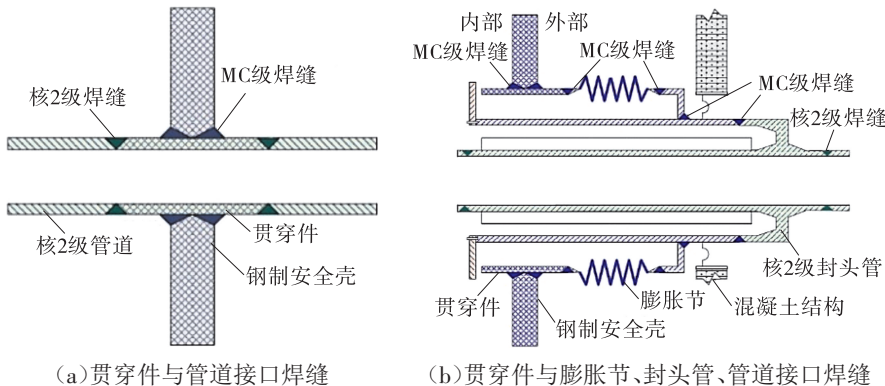


图6 贯穿件接口焊缝分级

Fig.6 Classification of penetration weld joints

图6(a)示出钢制安全壳上一种基本且广泛应用的一种贯穿件接口形式，该贯穿件连接核2级管道。其焊缝等级划分如下：贯穿件与安全壳间的焊缝属MC级；贯穿件与管道间的焊缝属核2

级。依据在于，该连接焊缝按安全壳边界规定应划归为管道的一部分。

图6(b)示出钢制安全壳上一种极为复杂且至关重要的贯穿件接口形式，主要用于主蒸汽和

主给水管道(两者均属核2级)。在此结构中,除直接连接管道的焊缝为核2级外,其余焊缝均属MC级。这是因为这些焊缝共同构成了钢制安全壳的压力边界,其完整性至关重要,一旦发生泄漏将导致最终安全屏障失效。

焊缝等级的确认直接决定了焊接工艺评定与施工所依据的标准。具体而言,MC级焊缝的焊接施工应依据ASME BPVC. III. 1. NE—2023和ASME IX执行;而核2级管道的焊接施工则需遵循ASME BPVC, Section III: *Rules for Construction of Nuclear Facility Components—Division 1: Subsection NC—Class 2 Components*和ASME IX的规定。

2 焊接工艺

2.1 SA-738 Gr.B母材

钢制安全壳的主体材料为SA-738 Gr.B钢板,其在ASME IX标准中归属于P-No.1组3,以调质状态供货。钢板在生产中综合采用了炉外精炼、控轧控冷及细晶强化等工艺,所得微观组织如图7所示,主要表现为回火贝氏体与少量先共析铁素体的混合结构。SA-738 Gr.B钢的化学成分标准值及某批次实测值见表1。在力学性能方

面,要求屈服强度不低于415 MPa,抗拉强度范围为585~705 MPa,并在最低服役温度(-28 °C)下,3个试样的夏比V型冲击功平均值不低于54 J,单个试样最小值不低于47 J。

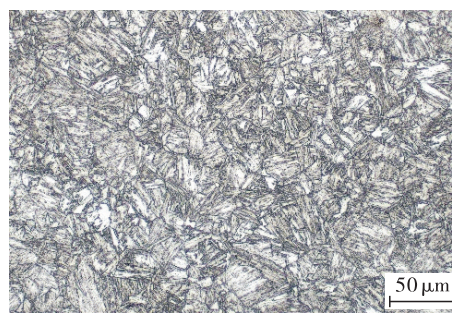


图7 SA-738 Gr.B微观组织

Fig.7 Microstructure of SA-738 Gr.B

表1 SA-738 Gr.B化学成分

Tab.1 Chemical composition of SA-738 Gr.B

元素	C	Mn	S	P	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	V+Nb
标准值	≤0.20	0.84~1.62	≤0.030	≤0.030	0.13~0.60	≤0.38	≤0.63	≤0.34	≤0.33	≤0.08	≤0.05	≤0.10
实测值	0.080	1.470	0.004	0.003	0.210	0.020	0.430	0.310	0.220	0.045	0.022	0.067

依据2001版及之前的ASME BPVC. III. 1. NE—2023规范,可用于制造钢制安全壳的SA-738钢材仅包括Gr.A和Gr.C,而Gr.B等级当时未被允许使用。直至2002年,经ASME标准委员会在规范案例Code Case N-655 Use of SA-738, Grade B for Metal Containment Vessels, Class MC中纳入SA-738 Gr.B,随后获得美国核管会在监管指南RG 1.84 Design, Fabrication, and Materials Code Case Acceptability, ASME Section III第33版中的有条件认可,该等级钢材方可用于钢制安全壳的制造^[5]。

2.2 焊接预热

焊接预热能够均匀化焊接过程中的温度场,改善接头应力状态,并通过降低焊缝金属及热影响区的冷却速率,延长800~500 °C温度区间的冷却时间,从而抑制淬硬组织的形成,是预防冷裂纹的有效措施。基于碳当量公式(如 CE_{IIW} , CE_{JIS} , P_{cm} 等)^[6],可评估SA-738 Gr.B钢材的焊接冷裂纹

敏感性,进而确定所需的预热温度。采用ITO等^[7]提出的碳当量 P_{cm} 来计算冷裂纹敏感指数 P_c ,最终确定防止冷裂纹所需的预热温度 t_0 ,具体计算公式如下:

$$P_{cm} = w(C) + w(Si)/30 + w(Mn + Cu + Cr)/20 + w(Ni)/60 + w(Mo)/15 + w(V)/10 + 5w(B) \quad (1)$$

$$P_c = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{\delta}{600} \quad (2)$$

$$t_0 = 1440P_c - 392 \quad (3)$$

式中, H 为熔敷金属中扩散氢含量,mL/(100 g); δ 为板厚,mm。

以典型的SA-738 Gr.B为例,其化学成分见表1,在板厚 δ 为55 mm、焊材为E9018-G-H4的条件下,得出 P_{cm} 为0.20%, P_c 为0.36%, t_0 为126 °C。该结果与ASME III Appendices D中P-No.1组3材料推荐的预热温度120 °C基本吻合。

采用 ASME III 附录 D 推荐的预热温度进行焊接施工,在多数情况下能有效避免冷裂纹。然而,在某一批次附件板的角焊缝焊接中,焊趾部位出现了大量的裂纹,如图 8 所示。对来自不同钢厂的 84 个批次 SA-738 Gr.B 的碳当量进行统计,结果如图 9 所示,经分析发现,其碳当量分布在 0.40%~0.50% 之间。尽管所有数据均符合标准要求,但不同批次的焊接性能存在显著差异,碳当量越高,SA-738 Gr.B 的焊接性能越差,越易诱发焊接裂纹。因此,焊接工艺规程中的最低预热温度不应固定不变,而需根据钢材的实际化学成分进行调整。对于碳当量偏高的批次,应适当提高预热温度,以有效防止冷裂纹的产生。

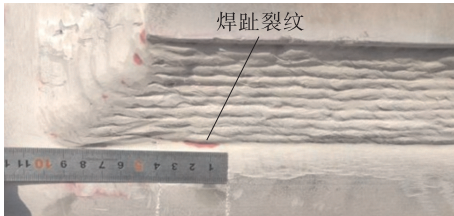


图 8 附件板角焊缝焊趾裂纹

Fig.8 Toe crack of fillet weld on attachment plate

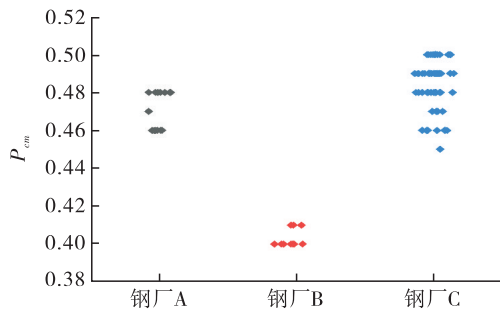


图 9 来自不同钢厂的 SA-738 Gr.B 的碳当量差异

Fig.9 Carbon equivalent differences of SA-738 Gr.B from different steel mills

2.3 焊接方法

SA-738 Gr.B 的焊接性能良好,其焊接难度较低。国内施工中常用的焊接方法包括焊条电弧焊 (SMAW)、熔化极气体保护机械焊 (GMAW) 和埋弧机械焊 (SAW)。焊接方法的选择应依据接头组对质量和焊接位置确定。根据工程实践,推荐的焊接方法如表 2 所示。

焊条电弧焊适用范围广,尤其在接头组对质量不佳时,由熟练焊工操作可保证打底焊道的质量,避免出现缺陷。图 10 示出横焊位置采用 GMAW 方法焊接并清根后的渗透检测结果,可以看出,在组对不良时,该方法难以保证根部焊接质量。此外,在横焊位置采用埋弧机械焊,在立焊位

置采用熔化极气体保护机械焊,均可获得良好的填充与盖面成型质量,如图 11 所示。这些机械焊方法不仅能显著提高焊接效率,还可降低焊工劳动强度。

表 2 钢制安全壳推荐焊接方法

Tab.2 Recommended welding methods for steel containment vessels

焊接位置	推荐焊接方法
全位置	SMAW
横焊	SMAW(打底)+SAW(填充、盖面)
立焊	SMAW(打底)+GMAW(填充、盖面)

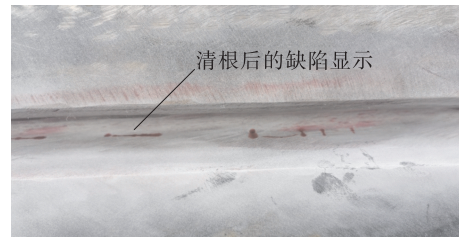


图 10 GMAW 机械焊清根后的液体渗透检测

Fig.10 Liquid penetration examination of GMAW mechanical welding after back gouging



(a)立焊位置的 GMAW



(b)横焊位置的 SAW

图 11 机械焊填充及盖面成型情况

Fig.11 Weld bead formation status during mechanized welding filling and capping passes

3 焊后热处理

压力容器的焊后热处理是一种在金属相变点以下进行的特定热过程,旨在改善焊接区的性能并消除残余应力等有害影响。该过程需将焊接区(或其局部)加热至预定温度并保温一定时间,随后均匀冷却。鉴于该处理具有整体性、一次性和不可逆性的特点,若过程中出现偏差,严重时可能导致压力容器整体报废。钢制安全壳作为一种特殊的压力容器,其焊后热处理流程主要包括再热裂纹倾向分析、模拟焊后热处理及正式焊后热处理等环节。

3.1 再热裂纹倾向分析

对于含有沉淀强化合金元素的厚板焊接结构,在进行焊后热处理时,焊接热影响区可能产生一种称为“再热裂纹”(消除应力处理裂纹)的缺陷。该类裂纹常见于低合金高强钢、珠光体耐热钢、奥氏体不锈钢及部分镍基合金的焊接热影响区粗晶部位,其发生温度区间通常为 $550\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$,且具有沿晶开裂的特征。鉴于SA-738 Gr.B的焊后热处理温度通常要求控制在 $595\sim 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,恰处于再热裂纹的敏感温度区间,因此,必须对其再热裂纹倾向进行分析。

以典型的SA-738 Gr.B为例,其中,Ti元素含量为 0.010% 。采用 ΔG 法和 P_{SR} 法进行判断^[8],具体计算公式如下:

$$\Delta G = w(\text{Cr}) + 3.3w(\text{Mo}) + 8.1w(\text{V}) - 2(\%) \quad (4)$$

计算得出 $\Delta G < 0$,表明不易产生再热裂纹。

$$P_{SR} = w(\text{Cr}) + w(\text{Cu}) + 2w(\text{Mo}) + 5w(\text{Ti}) + 7w(\text{Nb}) + 10w(\text{V}) - 2(\%) \quad (5)$$

计算得出 $P_{SR} < 0$,表明不易产生再热裂纹。

3.2 模拟焊后热处理

ASME BPVC. III.1.NE—2023规定,为确保正

式焊后热处理的质量,必须进行模拟焊后热处理。具体要求为:如果产品焊缝需要焊后热处理,那么用于制造该产品的母材、焊材及焊接工艺评定试板,都必须经过模拟焊后热处理。模拟热处理的保温温度应与产品保温温度一致,且累计保温时间不低于产品总热处理时间的 80% 。假设产品焊缝的热处理时间为 2 h ,并为产品返修和在役返修各预留 1 次热处理裕量,则其生命周期内可能的总热处理时间为 6 h 。这意味着,相关母材、焊材及工艺评定的模拟热处理保温时间均不应少于 4.8 h 。该模拟过程可以一次性完成,也可累计完成,如图12所示^[9]。

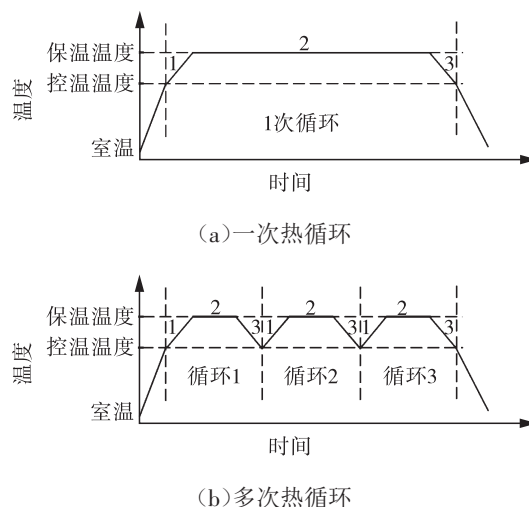


图12 模拟焊后热处理示意^[9]

Fig.12 Schematic of simulated PWHT^[9]

3.3 正式焊后热处理

常规压力容器的焊后热处理方式有炉内整体、炉内分段、炉外整体及局部热处理等多种形式。钢制安全壳作为直径约 40 m 、高度约 70 m 的巨型容器,内部包含反应堆厂房,因此,只能选择局部焊后热处理,如图13所示^[10]。

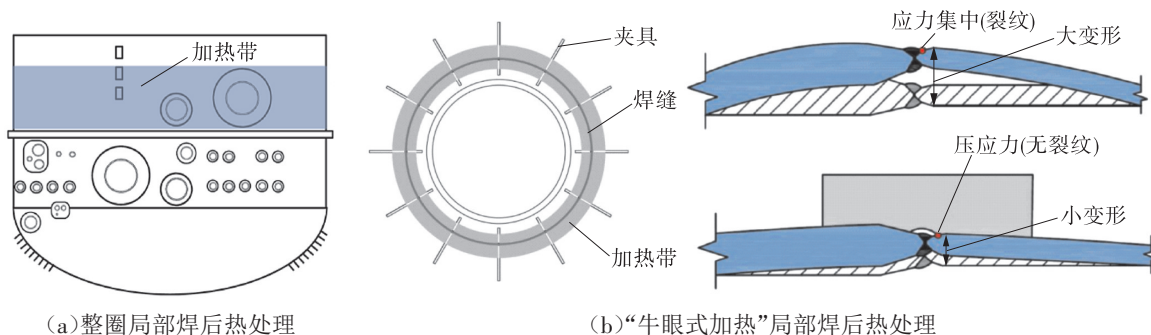


图13 钢制安全壳局部焊后热处理

Fig.13 Local PWHT of steel containment vessel

然而, ASME BPVC. III. 1.NE—2023 标准要求局部热处理必须对容器整个圆周进行加热。以处理上部闸门为例, 加热带需环绕筒体一周(见图 13(a)), 此方案因加热面积过大、能耗极高而缺乏工程可行性。

为解决上述问题, WRC 452 *Recommended Practices for Local Heating of Welds in Pressure Vessels* 提出可采用“牛眼式加热”作为局部焊后热处理的替代方案。该方法的实施前提是必须审慎评估主要结构的不连续特征和控温区域内的机械荷载。具体而言, 当对上部设备闸门和人员闸门进行热处理时, 因补强板与筒体厚度不同, 加热中会因变形不协调而产生裂纹风险。因此, 需加装工装夹具以协调热变形, 化解结构不连续带来的附加荷载^[10], 如图 13(b)所示, 从而规避变形过大与裂纹问题。

3.4 免除焊后热处理

焊后热处理旨在消除焊接残余应力和改善焊接区的金相组织。然而, 这两项作用对于钢制安全壳的实际效益值得商榷。焊接完成后, 残余应力存在于焊缝及周边区域, 且因焊接顺序差异, 结构内、外表面分别呈现拉应力与压应力分布。理论上, 焊后热处理可使残余应力重新分布, 起到“削峰填谷”的均匀化效果。但由于钢制安全壳结构庞大, 实施难度高, 不均匀的温度场反而会引入新的热应力, 可能导致壳体变形或焊缝开裂, 此类问题在工程实践中确有发生。

钢制安全壳属于静载容器, 不承受疲劳载荷, 也不存在应力腐蚀环境, 因此无需考虑疲劳失效和应力腐蚀问题。SA-738 Gr.B 材料具有充足的塑性, 当拉应力达到屈服强度后, 已屈服区域的应力不再增加, 转而发生塑性变形。根据内应力对静载强度的影响机理, 若继续施加载荷, 未屈服区域的应力将持续增大直至相继屈服, 最终使整个截面应力趋于均匀^[11]。由此可见, 焊接残余应力并不会降低钢制安全壳的承载能力, 对其静载强度没有影响。而在改善金相组织方面, 相关研究表明^[12-16], 焊后热处理反而会产生负面效应。该过程会促使焊缝、热影响区及母材晶界处的夹杂物聚集, 导致晶界结合能下降, 从而劣化材料的冲击韧性。

基于上述分析, 推动 SA-738 Gr.B 钢材免除焊后热处理至关重要。自 2013 年起, 国外设计单位便致力于将免热处理的适用厚度从 44 mm 提升至 60 mm。此倡议于 2014 年获得 ASME 标准委员会

认可, 并通过规范 ASME BPVC-CASE N-841 *Exemptions to Mandatory PWHT of SA-738 Grade B for Class MC Applications Section III, Division 1* 得以实现; 美国核管会也在监管指南 RG 1.84 第 38 版中予以采纳。美国的相关研究背景清晰地反映了其对钢制安全壳焊后热处理的立场, 即在缺乏明确收益且可能带来负面影响时, 不推荐强制实施。

4 结论

基于钢制安全壳的工程实践, 对焊缝管辖、焊接预热、焊接方法及焊后热处理等关键工艺技术进行了系统研究与应用总结, 主要结论如下。

(1) 在焊缝施工前, 须依据 ASME BPVC. III. 1.NE—2023 规范及工程设计文件, 并按照所连接项目的功能, 准确判定其焊缝管辖标准, 以确保后续施工的正确性, 防止标准选用错误。

(2) 研究表明, 不同钢厂的 SA-738 Gr.B 碳当量在 0.40%~0.50% 之间波动, 虽符合标准却导致焊接性能差异。采用固定预热温度时, 高碳当量材料易出现裂纹。为此, 焊接工艺规程必须根据实际碳当量动态调整预热温度。此外, 从保证长远制造质量出发, 后续设计应在标准内对成分加以更严限制, 控制碳当量, 从而系统性降低裂纹发生概率。

(3) SA-738 Gr.B 焊接性能良好, 常规工艺均可满足要求。但当接头组对不佳时, 若采用机械焊打底, 易出现根部裂纹, 增加清根工作量。此时, 应由经验丰富的焊工采用焊条电弧焊进行打底, 以确保根部质量。对于填充及盖面焊道, 立焊位置推荐采用熔化极气体保护机械焊, 横焊位置推荐埋弧机械焊, 这 2 种方法可有效兼顾质量与效率。

(4) 由于钢制安全壳是静载容器, 无疲劳载荷与应力腐蚀环境, 焊后热处理不仅收益有限, 还可能劣化材料冲击韧性。因此, 应在标准允许范围内尽可能予以免除。对于无法免除、必须进行的局部焊后热处理, 则须遵循“个案分析”原则, 在不等厚区域, 采用工装夹具是控制热变形、避免负面结果的关键。

参考文献:

- [1] 林诚格. 非能动安全先进压水堆核电技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
LIN C G. Advanced passive pressurized water reactor technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010.
- [2] 吴崇志, 朱瑞峰. AP1000 钢制安全壳压力边界建造

- 要求的系统性分析[J]. 压力容器, 2015, 32(12): 43-50.
- WU C Z, ZHU R F. Systemic analysis of construction requirements for AP1000 steel containment vessel pressure boundary [J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32(12): 43-50.
- [3] 赵旭, 晏桂珍, 丁海明. AP1000 钢制安全壳结构整体性试验介绍[J]. 核科学与工程, 2018, 38(2): 204-210.
- ZHAO X, YAN G Z, DING H M. Introduction to structural integrity test of AP1000 steel containment vessel [J]. Nuclear Science and Engineering, 2018, 38(2): 204-210.
- [4] 张瑞, 柳胜华, 汤福平. 钢安全壳吊装及施工优化[J]. 核科学与工程, 2020, 40(1): 55-59.
- ZHANG R, LIU S H, TANG F P. Lifting plan for steel containment vessel and construction optimization [J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(1): 55-59.
- [5] 朱瑞峰, 吴崇志, 苏靖杰, 等. AP1000 钢制安全壳选材及应用[J]. 压力容器, 2016, 33(3): 56-60.
- ZHU R F, WU C Z, SU J J, et al. Selection and application of material for AP1000 steel containment [J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(3): 56-60.
- [6] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第2卷)[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- China Welding Society. Welding handbook (volume 2) [M]. 3rd Edition. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [7] ITO Y, BESSYO K. Weldability formula of high strength steels related to heat affected zone cracking [J]. Sumitomo Search, 1968, 37(1): 59-70.
- [8] 刘鹏, 李阳, 郭伟, 等. 焊接质量检验及缺陷分析实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- LIU P, LI Y, GUO W, et al. Welding quality inspection and defect analysis cases [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [9] 吴崇志, 朱瑞峰, 陶军, 等. ASME MC 级安全壳容器的焊后热处理工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(11): 84-88.
- WU C Z, ZHU R F, TAO J, et al. ASME MC class containment vessel post weld heat treatment process [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(11): 84-88.
- [10] LUO Y, JIANG W, YANG Z, et al. Using reinforce plate to control the residual stresses and deformation during local post-welding heat treatment for ultra-large pressure vessels [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 191: 1-11.
- [11] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- FANG H Y. Welding structural engineering [M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [12] 王勇, 孙殿东, 王长顺, 等. 模拟焊后热处理对 SA-738 Gr.B 钢板组织及韧性的影响[J]. 压力容器, 2014, 31(1): 10-14.
- WANG Y, SUN D D, WANG C S, et al. Effect of simulated post-welded heat treatment on microstructure and impact properties of SA-738 Gr.B steel plate [J]. Pressure Vessel Technology, 2014, 31(1): 10-14.
- [13] 张俊宝, 谷雨, 刘卫华. 核电站钢制安全壳 SA-738 Gr.B 钢免除焊后热处理探讨[J]. 热加工工艺, 2017, 46(1): 230-232.
- ZHANG J B, GU Y, LIU W H. Discussion on exemption from PWHT of SA-738 Gr. B steel for nuclear power plant steel containment vessel [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(1): 230-232.
- [14] 张蕾, 刘宝剑, 王军杰, 等. 焊后热处理对 Alloy33 堆焊层耐蚀性的影响[J]. 压力容器, 2024, 41(11): 19-25.
- ZHANG L, LIU B J, WANG J J, et al. Influence on corrosion resistance of Alloy33 corrosion-resistant layer by PWHT [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(11): 19-25.
- [15] 张俊宝, 丛大志, 谷雨, 等. SA 738 Gr.B 焊接接头力学性能[J]. 电焊机, 2018, 48(9): 26-31.
- ZHANG J B, CONG D Z, GU Y, et al. Mechanical properties of welded joint of SA 738 Gr.B [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(9): 26-31.
- [16] 张俊宝, 柳胜华, 谷雨. 焊后热处理对 SA 738 Gr.B 钢热影响区冲击性能和断裂韧性的影响[J]. 压力容器, 2021, 38(8): 29-33.
- ZHANG J B, LIU S H, GU Y. Effect of PWHT on impact property and fracture toughness of SA 738 Gr. B steel heat affected zone [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(8): 29-33.

作者简介: 朱瑞峰(1982), 男, 高级工程师, 主要从事核电焊接设计工作, 通信地址: 200233 上海市徐汇区虹漕路 29 号上海核工程研究设计院股份有限公司, E-mail: zhuruifeng@snerdi.com.cn.

本文引用格式:

朱瑞峰, 张俊宝, 吴崇志, 等. 非能动核电站钢制安全壳焊接及焊后热处理探讨[J]. 压力容器, 2025, 42(6): 74-81.

ZHU Ruifeng, ZHANG Junbao, WU Chongzhi, et al. Discussion on welding and PWHT of steel containment vessels for passive nuclear power plants [J]. Pressure Vessel Technology, 2025, 42(6): 74-81.