

核电站双层安全壳设计的起源、发展历程和趋势分析

汪井春, 岳冲, 任根民

中广核陆丰核电有限公司, 广东 汕尾 516599

DOI:10.61369/EPTSM.2025010021

摘要 : 本文深入探讨核电站双层安全壳的设计起源、发展历程与未来趋势。从起源看, 是为应对核电站安全需求, 尤其是防止放射性物质泄漏。发展过程历经从单层到双层、材料和结构不断优化, 技术标准逐步完善。未来趋势是向更安全、智能、经济方向发展, 融合新技术, 适应不同环境与需求。双层安全壳设计在核电站安全体系中至关重要, 对其研究有助于提升核电站安全水平、推动核电产业可持续发展。

关键词 : 核电站; 双层安全壳; 设计起源; 发展历程; 趋势分析

Origin, Development and Trend Analysis of Double Containment Design for Nuclear Power Plants

Wang Jingchun, Yue Chong, Ren Genmin

CGN Lufeng Nuclear Power Co., LTD. Shanwei, Guangdong 516599

Abstract : This paper deeply explores the design origin, development process and future trends of the double-layer containment of nuclear power plants. In terms of its origin, it is designed to meet the safety requirements of nuclear power plants, especially to prevent the leakage of radioactive substances. During the development process, it has evolved from a single-layer to a double-layer structure, with continuous optimization of materials and structures, and gradual improvement of technical standards. The future trend is to develop towards a safer, smarter and more economical direction, integrating new technologies to adapt to different environments and needs. The design of the double-layer containment is of great significance in the safety system of nuclear power plants, and the research on it helps to improve the safety level of nuclear power plants and promote the sustainable development of the nuclear power industry.

Keywords : nuclear power plant; double-layer containment; design origin; development process; trend analysis

引言

核电站凭借其高效的能源产出特性, 在全球能源结构中占据着举足轻重的地位。据国际原子能机构统计, 截至2024年, 全球范围内运行的核电站总数达439座, 为众多国家提供了稳定的电力供应^[1]。然而, 核电站运行过程中放射性物质泄漏风险始终如高悬的达摩克利斯之剑, 一旦发生核事故, 将会对环境和人类健康造成难以估量的巨大危害。

安全壳作为核电站抵御事故风险的最后一道物理屏障, 其设计的合理性与可靠性直接关系到核电站能否安全运行。双层安全壳设计通过增设一层防护结构, 构建起更为可靠的多重包容体系, 极大地增强了对放射性物质的包容能力, 显著降低了事故工况下放射性物质向环境释放的风险, 已然成为现代核电站安全设计的重要发展趋势。本文将围绕核电站双层安全壳的设计起源、发展进程和未来趋势展开深入剖析, 旨在为相关研究和工程实践提供有益参考。

一、核电站双层安全壳的设计起源

(一) 早期核电站安全壳设计背景

20世纪50年代, 世界上第一批核电站投入商业运行。当时的核电站安全壳主要采用单层结构, 材料多为钢或钢筋混凝土。早

期的钢安全壳尺寸较小, 1953年, 世界上第一个安全壳于美国西米尔顿的诺尔斯核动力试验室建成, 其整体设计相对简单, 仅仅能够满足最基本的防护要求^[2]。随后出现的供工程实用的球形及圆筒形钢安全壳, 尺寸同样不大。这类钢安全壳在一定程度上虽能阻挡放射性物质的泄漏, 但由于尺寸和结构的限制, 防护能力

作者简介: 汪井春(1992.03-), 男, 汉族, 江苏省宿迁市人, 助理工程师, 大学本科, 研究方向: 核电运行。

较为有限，面对严重核事故时难以提供足够的安全保障。

钢筋混凝土安全壳于60年代初由美国率先采用，其目的在于降低钢安全壳的高昂造价。这种安全壳由内径超过30米的圆筒壳和半球顶组成，并在内侧敷设薄碳钢衬里。该设计在一定程度上解决了钢安全壳成本过高的问题，同时借助混凝土良好的抗压性能，提升了安全壳的承载能力。然而，在实际应用过程中发现，这些早期的单层安全壳在防止放射性物质泄漏方面存在诸多不足，面对严重事故时，很难为核电站提供充分的防护。

（二）双层安全壳设计理念的提出

双层安全壳概念的诞生，源于核电安全需求的持续攀升。早期的核电站事故，如1979年美国三哩岛事故和1986年苏联切尔诺贝利事故，无情地暴露了单一安全壳设计的局限性。三哩岛核电站由于配备了单层安全壳，尽管发生了堆芯熔化事故，但仍有效地阻止了放射性物质向外泄漏；而切尔诺贝利核电站由于缺乏安全壳这一关键防护设施，导致大量放射性物质泄漏到环境中，引发了极为严重的生态灾难和社会危机。这一鲜明对比，凸显了安全壳在核事故防范过程中的关键作用。

随着第三代核电技术的研发，国际社会对核电站抵御极端外部事件，如地震、飞机撞击，以及内部事故，如堆芯熔毁的能力提出了更为严苛的要求。双层安全壳设计应运而生，其核心目标是通过构建多重屏障，显著增强核电站的防护能力^[3]。例如，中国“华龙一号”在设计之初，就将双层安全壳理念融入其中，以应对福岛核事故后全球安全标准的大幅升级。在设计过程中，设计团队充分考虑了各种可能出现的事事故场景，通过对双层安全壳的结构和材料进行优化，大幅提升了其在极端条件下的防护性能。

二、核电站双层安全壳的发展历程

（一）材料与结构的演变

1. 材料的发展

从材料角度来看，早期钢安全壳壁厚通常被控制在38毫米以内，以避免进行焊后热处理。随着技术的不断进步，材料性能持续提升，对安全壳材料的强度、耐腐蚀性等方面的要求也越来越高。预应力混凝土安全壳于60年代中期首次应用于法国的EL4核电站，通过在混凝土中施加预应力，有效提升了安全壳的承载能力和抗裂性能。这一技术的应用，使得安全壳能够承受更大的压力和变形，显著提高了其在事故工况下的可靠性。

后续，预应力混凝土安全壳不断改进，采用不灌浆无粘接的预应力配筋方式，方便对预应力钢束进行定期检查、补张拉以及必要的更换。这一改进举措极大地提升了安全壳的可维护性，确保了其在长期运行过程中的安全性。与此同时，新型材料的研发工作也在持续推进，例如高强度、耐辐射的复合材料的研究，为安全壳材料的进一步升级提供了新的可能。近年来，部分科研团队探索将纳米材料引入安全壳材料体系，期望借助纳米材料的优异性能，进一步提升安全壳的综合性能。

2. 结构形式的改进

在结构形式方面，安全壳从早期的球形、圆筒形，逐渐向更复杂、更合理的形式发展。

这种结构形式的演变，是基于对安全壳力学性能的深入研究以及丰富的工程实践经验总结。通过优化结构形式，不仅提高了

安全壳的承载能力和稳定性，还降低了建设成本，提升了工程效率。此外，随着计算机辅助设计技术的快速发展，安全壳的结构设计变得更加精确和高效，能够更好地满足工程实际需求。如今，借助有限元分析软件，设计人员可以对安全壳在各种复杂工况下的力学性能进行模拟分析，为结构设计提供科学依据。

（二）技术标准与规范的完善

随着双层安全壳的不断发展，相关的技术标准与规范也在持续完善。安全壳的设计需要综合考虑多种因素，如反应堆发生事故时冷却剂逃逸导致的内压和温度变化、恒载、活荷载、雪荷载、施工荷载，以及地震、龙卷风、飞机失事冲撞等外界不利因素。同时，对安全壳的泄漏率有着严格的限制，一般规定24小时内设计事故压力下的泄漏量不得超过安全壳自由容积空气总重的0.1 - 0.5%，这就要求安全壳上的贯穿件以及壳体结构本身具备良好的密封措施^[4]。

各国都制定了相应的核安全法规和导则，中国核安全法规 haf00200《核电厂设计安全规定》和安全导则 haf0212《核反应堆安全壳系统的设计》，对安全壳完整性监督等方面作出了原则性规定^[5]。各核电厂依据这些规定和导则，并结合自身的安全分析报告及设计规范，制定具体的监督计划。这些法规和导则的出台，为双层安全壳的设计、建造和运行提供了明确的指导和约束，有力地保障了核电站的安全运行。此外，国际原子能机构也定期发布相关标准和报告，推动全球核安全标准的统一和提升^[6]。

（三）典型核电站双层安全壳案例分析

1. AP1000核电站双层安全壳

AP1000是美国西屋公司和ABB - CE公司联合研发的先进型非能动压水堆。它采用双层安全壳设计，设计容量为110 - 120万千瓦。其非能动安全系统在无需大规模安全支持系统的情况下，仍能保持正常运行功能，有效降低了相应成本。同时，双层安全壳设计极大地提高了核电站的安全性，设计堆芯融化概率和放射性大规模释放概率分别降低为 5.08×10^{-7} /堆·年和 6×10^{-8} /堆·年，相较于现有的二代机组降低了100倍^[7]。

AP1000的双层安全壳设计，充分体现了现代核电技术对安全性和经济性的追求。通过采用非能动安全系统，减少了对外部电源和机械设备的依赖，提升了核电站在事故情况下的自主性和可靠性。双层安全壳的设计进一步降低了放射性物质泄漏的风险，为核电站的安全运行筑牢了根基。此外，AP1000的安全壳在建造过程中，采用了模块化施工技术，大幅缩短了建设周期，降低了建设成本。

2. 华龙一号核电站双层安全壳

华龙一号是我国拥有完整自主知识产权的三代核电技术。它采用双层安全壳设计，内层厚度1.3米，内部衬6毫米钢板，实现完全密封；外层主要用于防御极端外部灾害。其内外安全壳厚度分别达到1.3米和1.8米，采用直径40毫米的高级钢筋，仅外安全壳就设置了4层这样的钢筋，创新性的双层安全壳设计使得钢筋用量比以往核电站增加了两倍。华龙一号的双层安全壳能够承受商用大飞机的直接撞击、17级台风和9级烈度的地震。

三、核电站双层安全壳的发展趋势

（一）安全性提升

未来双层安全壳将在安全性方面实现进一步提升。随着材料

科学的不断发展,研发具有更高强度、更好耐辐射性能和抗冲击性能的先进材料成为可能。例如,纳米材料、高性能复合材料等新型材料的研究和应用,有望为安全壳的材料升级提供新的契机。在结构设计方面,采用更优化的力学模型和分析方法,能够提高安全壳在各种极端工况下的承载能力和密封性。

进一步深入研究严重事故下安全壳的响应特性,优化双层安全壳之间的连接方式和密封结构,确保在事故情况下放射性物质不会泄漏到环境中。通过开展数值模拟和实验研究,深入了解安全壳在不同事故场景下的力学行为和失效机制,为安全壳的优化设计提供坚实的理论依据。部分科研机构正在探索采用多物理场耦合分析方法,全面考虑热、力、流体等因素对安全壳性能的影响,以提升安全壳的设计水平。

(二) 智能化与数字化

随着信息技术的飞速发展,双层安全壳的设计和运行将朝着智能化与数字化方向迈进。在设计阶段,采用数字化模拟技术,对不同设计方案进行虚拟仿真分析,提前发现潜在问题,优化设计方案,缩短设计周期,降低设计成本。通过建立安全壳的数字化模型,模拟其在不同工况下的性能,为设计决策提供科学依据。同时,智能化的监测和管理系统能够及时发现安全壳的异常情况,提前采取应对措施,避免事故的发生。例如,利用机器学习算法对监测数据进行分析,能够快速识别安全壳的潜在故障模式,为运维人员提供预警信息。

(三) 经济与环保

在满足安全要求的前提下,降低双层安全壳的建设和运维成本是未来的重要发展方向。通过优化设计,减少材料用量和施工难度,提高施工效率,降低建设成本。在运维方面,利用智能化监测和诊断技术,及时发现和处理故障,减少非计划停机时间,降低运维成本。

同时,注重环保因素,采用环保型材料和施工工艺,减少对环境的影响。例如,研发可回收利用的安全壳材料,在核电站退役时,能够更方便、更环保地进行拆除和处理。通过推广绿色施工技术,减少施工过程中的能源消耗和环境污染,实现核电产业的可持续发展。部分研究团队正在探索采用3D打印技术建造安全壳,以提高施工效率,减少材料浪费^[8]。

(四) 适应多样化需求

随着核电技术在全球的广泛应用,不同地区的自然条件、地质条件和能源需求存在显著差异,双层安全壳需要适应多样化的需求。对于地震多发地区,加强安全壳的抗震设计,采用

隔震、减震技术,提高安全壳的抗震性能;对于沿海地区,考虑海水腐蚀等因素,采用耐腐蚀材料和防护措施,延长安全壳的使用寿命^[9]。例如,巴基斯坦卡拉奇K-2/K-3机组在采用华龙一号技术时,针对高温高湿环境优化了安全壳防腐涂层,展现了技术本地化的必要性。只有通过全球知识共享与协同创新,才能推动双层安全壳技术持续突破,为核电可持续发展筑牢安全基石。

(五) 全生命周期管理的优化

未来双层安全壳的设计将更加注重全生命周期的经济性与可持续性。在建造阶段,模块化施工技术(如AP1000采用的钢制安全壳模块)可减少现场焊接工作量,缩短工期并降低人为误差风险。在运维阶段,基于数字孪生技术的安全壳健康管理系统可实现实时监测与预测性维护。例如,通过传感器网络采集安全壳的应力、温度及密封性数据,结合人工智能算法预测材料老化趋势,提前制定维护计划。此外,退役阶段的环保问题也受到关注。欧盟“H2020”计划资助的“CLEANFACT”项目提出,采用可拆卸式安全壳设计,使用环保复合材料以简化退役流程,减少放射性废物产生^[10]。这些创新方向表明,双层安全壳的发展正从单一安全目标转向安全、经济与环保的多维协同。

四、结论

核电站安全壳作为防止放射性物质泄漏的最后一道物理屏障,其设计直接关系到核能利用的安全性和公众信任。随着核电技术从第二代向第三代的逐步演进,双层安全壳逐渐成为主流设计。核电站双层安全壳的设计起源于对核安全的更高追求,其发展历程伴随着材料、结构、技术标准等多方面的持续进步。从早期的单层安全壳到现在的双层安全壳,在材料上从普通钢材、钢筋混凝土发展到预应力混凝土等高性能材料,结构形式不断优化,技术标准日益完善。典型的AP1000和华龙一号核电站双层安全壳展示了当前先进的设计水平。

展望未来,双层安全壳将朝着更安全、智能、经济、适应多样化需求的方向发展。对核电站双层安全壳设计起源、发展和趋势的研究,对于提升核电站的安全水平、推动核电产业的可持续发展具有重要意义。在未来的核电工程实践中,应不断借鉴先进技术和经验,结合实际需求,持续优化双层安全壳的设计和应用,为核能的安全、高效利用提供坚实保障。通过开展国际合作,共享技术成果,推动全球核电产业的健康发展,为解决全球能源问题贡献力量。

参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Advanced Safety Features of Nuclear Power Plants[R]. Vienna: IAEA, 2019.
- [2] G. F. N. L ó pez, A. M. Fern á ndez. Evolution of Containment Systems in Nuclear Power Plants: From Single to Double Layer[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 126: 103417.
- [3] 赵敏, 王建国. 华龙一号双层安全壳抗飞机撞击分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 234-240.
- [4] 徐立伟, 周宏, 孙晓峰. 核电站安全壳密封性试验技术研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(1): 102-107.
- [5] 国家核安全. 《HAD102-06核动力厂反应堆安全壳系统的设计》[R]. 北京: 国家核安全局, 2020.
- [6] 陈思远, 何伟, 张磊. 核电站安全壳智能化监测系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(5): 34-38.
- [7] E. D. Kharitonov, V. A. Petrov. Advanced Materials for Nuclear Containment Structures[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 543: 152588.
- [8] 李伟, 周涛, 黄小林. 3D打印技术在核安全壳建造中的应用探索[J]. 核科学与工程, 2023, 43(2): 88-93.
- [9] 张朝弼, 林静, 徐浩. CPR1000核电安全壳结构抗震安全分析[J]. 河南城建学院学报, 2019(2): 12-18.
- [10] 代涛, 刘斯亮, 刘建阁. 安全壳冷却系统设计方案的综述[J]. 核科学与技术, 2017, 5(3): 109-115.