

结构设计制造

我国 PWR 燃料组件运输容器定期评价与经验反馈

孙树堂¹, 曾亮², 李国强¹, 周海兵², 孟东原¹, 王学新¹, 路庆丰², 曹莲²

(1. 中国辐射防护研究院, 太原 030006; 2. 中核建中核燃料元件有限公司, 宜宾 644000)

摘要: **目的** 介绍我国放射性物品运输容器定期安全性能评价的相关标准和要求, 并着重介绍我国现有 3 种不同型号的压水堆新燃料组件运输容器定期安全评价工作。**方法** 根据 GB 11806 等标准规范的要求, 检查容器的使用维护历史, 通过一系列的现场实验和数据分析, 对容器结构、包容、传热、屏蔽和防止临界等 5 个方面的安全性能进行系统评价。**结果** 通过对 245 台不同型号的 PWR 燃料组件运输容器的现场检查结果分析, 容器主要存在防腐层损伤、吊耳焊缝裂纹、密封垫开裂老化等安全隐患。**结论** 该项工作全面系统地总结了我国压水堆新燃料组件运输容器的安全现状, 特别是验证了我国使用了 20 余年的新燃料组件运输容器的安全性能, 具有重要的现实意义。同时, 对今后放射性物品运输容器的设计、使用、维护等方面进行了经验总结和反馈。

关键词: 定期评价; 燃料组件运输容器; 标准; 经验反馈

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)23-0105-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.018

Regular Evaluation and Experience Feedbacks for PWR Fuel Assembly Transport Containers in China

SUN Shu-tang¹, ZENG Liang², LI Guo-qiang¹, ZHOU Hai-bing²,
MENG Dong-yuan¹, WANG Xue-xin¹, LU Qing-feng², CAO Lian²

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;

2. CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co., Ltd., Yibin 644000, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the relevant standards and requirements for regular safety performance evaluation of radioactive materials transport containers in China, and emphatically introduce the regular safety evaluation of the existing three different types of PWR fuel assembly transport containers in China. According to the requirements of GB 11806 and other standard specifications, the history of the use and maintenance of containers was inspected. Through a series of on-site experiments and data analyses, the safety performances of the container were evaluated, including structure, containment, heat transfer, shielding and criticality prevention. Through the analysis of the on-site inspection results of 245 different types of PWR fuel assembly transport containers, there were major safety hazards of the container, such as anticorrosive coating damage, lug weld cracks, and sealing gasket cracking and aging. The above-mentioned work summarizes the current safety status of China's PWR fuel assembly transport containers, and in particular verifies the safety performance of the new fuel assembly transport container used in China for more than 20 years, which has important practical significance. At the same time, experience summary and feedback on the design, use, maintenance and other aspects of transport containers for radioactive materials in the future have been made.

KEY WORDS: regular evaluation; fuel assembly transport containers; standard; experience feedback

放射性物品的运输容器是放射性物品与环境、人类之间的一道重要屏障, 起到了保护内容物、包容和隔离放射性、保护人类和防止环境受到放射性

污染的重要作用^[1]。放射性物品运输容器的寿命普遍约为 20~30 年, 而设计寿命是否合适、寿期内的容器安全性能是否满足要求无从知晓。此外, 在容器

收稿日期: 2018-06-11

作者简介: 孙树堂 (1989—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为辐射防护、放射性物质运输安全。

漫长的使用过程中,操作不当、检修不及时等诸多原因,也会降低容器的安全性能。目前,国际上通用的做法为定期对容器进行安全性能评价,以确保容器安全可靠^[2-3]。

我国《放射性物品运输安全管理条例》(国务院第562号令)和《放射性物品运输安全监督管理办法》(环保部第38号令)都明确指出:一类放射性物品运输容器应每2年进行一次安全性能评价,并将评价结果报国务院核安全监管部门备案^[4-5]。

1 定期评价重点与内容

1.1 评价重点

放射性物品运输容器定期安全性能评价主要依据《放射性物质安全运输规程》(GB 11806—2004)、

《放射性物品运输容器定期安全性能评价指南》。必要时,还应参考容器的设计、制造、验收、使用与维护等相关文件^[6-7]。容器定期安全性能评价主要分为结构评价、包容性能评价、传热性能评价、屏蔽性能评价和防止临界性能评价^[8],评价标准各有重点又相互关联,见表1。

1.2 定期评价内容与手段

放射性物品运输容器定期安全性能评价包括对容器的使用情况、维护和维修历史、发生的事故等信息的梳理总结和容器现场检查。其中容器现场检查为定期评价工作的重要部分^[9],使用的方法包括尺寸测量、目视检查、PT检测^[10]、负载试验^[11]、泄漏检验^[12]、传热试验、屏蔽试验等,具体评价内容和检验手段见图1^[13]。

表1 放射性物品运输容器定期安全性能评价重点

Tab.1 Key points of regular safety performance evaluation of radioactive material transport containers

评价项目	评价内容
结构评价	容器表面是否有变形、磨损、锈蚀
	吊耳是否变形、扭曲和裂纹
	容器内部吊篮、减震装置等是否完好
	提升装置(吊耳)应进行1.5倍载荷试验,或进行目视检查和焊缝PT检测
包容性能评价	螺栓是否磨损或变形
	密封面是否存在划伤、凹痕、锈蚀等缺陷
	密封垫是否老化、开裂,更换时间和频次是否满足要求
传热性能评价	与热相关的部件是否有较大变形或位移
	导热途径的连续性、表面散热率和吸收率是否与设计保持一致
	传热试验(必要时)或采用历史实测数据
屏蔽性能评价	屏蔽性能试验(必要时)或采用历史实测数据
防止临界性能评价	与临界相关的部件(包装组件、中子吸收材料等)是否有较大变形或移位等
	中子毒物或其他临界控制部件的存在、位置和浓度是否与设计相同
	密封系统应能够防止进水(必要时)

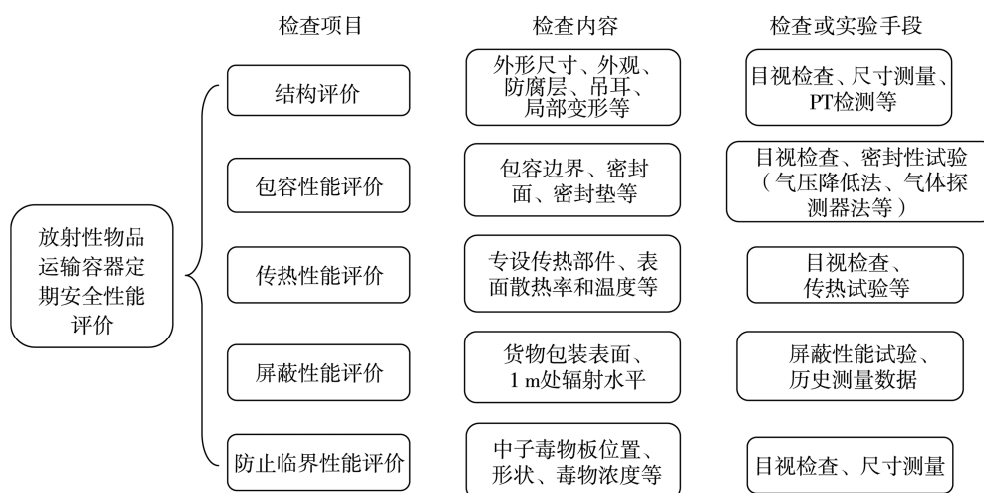


图1 容器现场检查的内容与手段

Fig.1 Contents and methods of on-site container inspection

针对该次评价的燃料组件运输容器,根据其设计相关文件要求如下所述。

1) 吊耳应每年(不超过 14 个月)进行一次静负荷试验,然后对吊耳和吊耳焊缝进行目视检查,不允许有缺陷和永久变形;或对吊耳焊缝进行 100%PT 检测, I 级合格。

2) 采用气压降低法验证容器的包容性能。向容器内充入 (0.07 ± 0.007) MPa 的氮气,保持 8 h,检查容器内的压强,不低于 0.055 MPa 为合格。

3) 由于其装载的燃料组件发热功率低,且容器无专门的传热性能设计,因此,无需进行传热性能评价^[14]。

4) 货包的运输指数为 0.5。

2 评价过程及结果

压水堆燃料组件运输容器用于装运未经辐照的新燃料组件,属于一类放射性物品运输容器中的 B(U)F 型货包。目前,我国在用的压水堆燃料组件运输容器主要有 3 种: CNFC-3G 新燃料运输容器、新燃料组件运输容器和俄罗斯的 TK-C5-M 型新燃料运输容器。该次评价的范围是中核建中核燃料元件有限公司(以下简称“CJNF”)使用的 245 台以上 3 种型号的组件运输容器。

2.1 容器简介

CNFC-3G 新燃料运输容器是为运输 AFA3G 新燃料组件而设计的专用设备,由中国核电工程有限公司、CJNF 共同自主研发。2011 年 10 月 28 日国家核安全局下达了“关于颁发 CNFC-3G 新燃料运输容器设计批准书的通知”,设计批准号为 CN/022/A(F)-96 (NNSA)。2013 年国家核安全局已经批准 CNFC-3G 新燃料运输容器用于 CJNF 的 AFA3G 新燃料组件运输活动。目前 CJNF 在用的 CNFC-3G 新燃料运输容器共 95 台。

新燃料组件运输容器是 1992 年由中核建中设计院依据法国法玛通(FRAMATOME) RCC-3 型燃料组件运输容器的图纸等效转化设计而成,并于 1994 年取得国家核安全局核安材字(1994)070 号文件批准,设计批准号为 CN/002/AF-85 (NNSA)。新燃料组件运输容器共有 115 台,其中 65 台用于装运 600 MW, 900 MW 和 1000 MW 燃料组件,50 台专门用于装运 300 MW 燃料组件。由于该型容器服役时间较长,目前,燃料组件的运输已不再使用该型容器。

TK-C5-M 型新燃料运输容器是 NCCP 制造的 TK-C5 系列容器的改进版,用于运输田湾核电站 VVER-1000 型反应堆新一代的燃料组件 TVS-2M。2013 年 6 月,国家核安全局批准 33 台 TK-C5-M 型新燃料运输容器在中华人民共和国境内使用,之后又

批准新增 35 台 TK-C5-M 型新燃料运输容器在中华人民共和国境内使用。

2.2 容器维护历史

该次评价的所有燃料组件运输容器在使用过程中均未发生碰撞、跌落、火烧等事故。在使用过程中,发现部分容器表面发生轻微锈蚀,并进行了除锈补漆维修,维修后可以满足容器设计规定。

CJNF 核材料运输部主管运输容器存放、日常维护工作,运输容器的日常检修严格按 CJNF 的容器维护保养规程执行。

运输容器的维修由建中汽车维修有限公司实施。所有运输容器均于 2014 年 12 月至 2015 年 8 月对安全阀、密封垫进行了全面检查。

2.3 定期安全检查的结果

2.3.1 结构检查结果

1) 容器表面没有凹痕、穿透、焊缝裂纹、过度磨损等情况,大部分容器表面有轻微漆面损伤,主要集中在上、下壳体法兰边、角、螺栓紧固部位和吊耳表面,并伴有轻微锈蚀。

2) 所有容器吊耳表面有轻微漆面损伤,吊耳与壳体连接处内侧存在不同程度锈蚀(见图 2a)。

3) 运输容器内部结构完好,支撑框架没有划痕和凹坑等缺陷,橡胶减震块不存在凹痕、裂纹等。

4) 对吊耳的承载焊缝和危险区域进行尺寸检验、目视检查,其中 8 台容器吊耳存在漏焊或焊缝裂纹等问题(见图 2b)。



a 防腐层损伤



b 焊缝裂纹

图 2 容器存在的结构安全隐患

Fig.2 Structure's safety hazards of the container

2.3.2 包容性能检查结果

1) 容器螺栓完好, 无螺栓变形、螺纹磨平等情况。

2) 容器的密封面没有划伤、凹痕、锈蚀等缺陷, 部分容器密封垫存在老化、变形或裂纹等问题(见图3)。

3) 使用气压降低法检测容器的密封性能, 其中 53 台容器密封性能不满足要求, 其余容器密封性能良好, 满足设计要求。气密性试验检查记录实例见表 2。

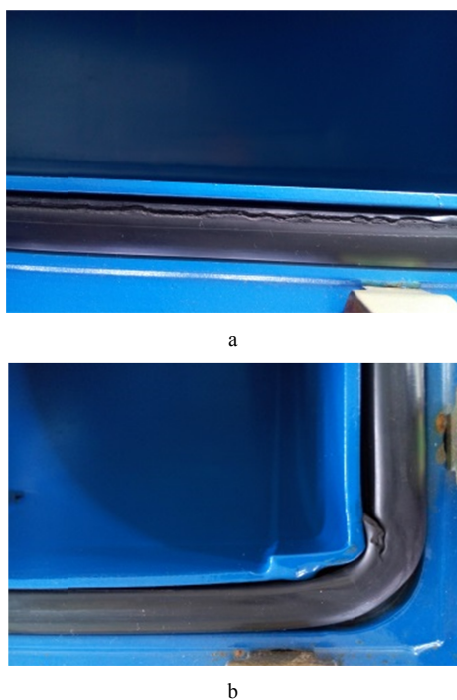


图 3 密封垫开裂老化

Fig.3 Sealing gasket cracking and aging

气压降低法检验的泄漏率是由理想气体方程推

导而来的。当检验过程中 V 体积的气体温度从 T_1 变为 T_2 , 归一化到气体参考温度 T_0 时的泄漏率 Q 为:

$$Q = \frac{VT_0}{t} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) \quad (1)$$

式中: V 为气体体积 (m^3); T_0 为参考温度, 298 K; t 为检验时间 (s); P_1, P_2 分别为检验开始、结束时气体压强 (Pa); T_1, T_2 分别为检验开始、结束时气体温度 (K)。故 8 h 内表 2 中 2 台容器泄漏率分别约为 $0.119 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 和 $4.948 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

2.3.3 传热性能检查结果

燃料运输容器所装载的压水堆燃料组件发热功率低(单个组件的衰变热小于 1 W), 且容器的结构、材料均未发生改变, 因此, 传热性能无变化。

2.3.4 屏蔽性能检查结果

3 种燃料组件运输容器依靠容器筒体、端板等部件屏蔽燃料组件的辐射, 单个容器可运输 2 组新燃料组件。以 AFA3G 17×17 型压水堆燃料组件为例, 其金属铀含量约为 460 kg, ^{235}U 富集度不大于 4.45%, α 总活度为 $5.40 \times 10^{10} \text{ Bq}$, 即单个货包的 α 总活度为 $10.804 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。除 α 粒子外, 还发射少量的 γ 射线和 X 射线, 其能量均不超过 0.2 MeV。单个燃料组件自发裂变中子发射率为 $4.97 \times 10^3 \text{ n/s}$ 。因此, PWR 燃料组件运输容器通常不做专门的屏蔽设计, 其外部辐射水平不大于 GB 11806—2004 的要求。

选用 2015 年实际运输的测量值进行屏蔽性能评价(实例见表 3)。所有运输容器均满足 GB 11806—2004 中对货包外表面辐射水平的要求和容器设计批准证书中对运输指数的规定。

2.3.5 防止临界性能检查结果^[15]

作为临界设计的一部分, 容器筒体的结构保持完好, 其内部的支承框架始终保持在原设计位置上, 压

表 2 气密性试验检查记录

Tab.2 Inspection record for air tightness test

容器编号	初时	初压/kPa	初温/℃	终时	终压/kPa	终温/℃	8 h后压强/kPa	结论
CNFC-3G-063	2016-07-14T16:11:00	69.7	27	2016-07-15T9:16:00	67.8	27	68.8	合格
CNFC-3G-045	2016-07-14T16:47:00	73.2	27	2016-07-15T9:15:00	7.8	27	35.7	不合格

表 3 3 种燃料组件运输容器辐射水平监测值实例

Tab.3 Examples of monitoring values of three fuel assembly transport containers' radiation level

型号	容器编号	监测日期	γ 外照射剂量率/($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)			α 表面污染/($\text{mBq} \cdot \text{cm}^{-2}$)
			表面	1 m	2 m	
CNFC-3G	CNFC-3G-001	2015-06-30	7.3	1.48	0.83	1.99
新燃料组件运输容器	03-3G	2015-09-25	8.43	1.86	0.97	2.49
TC-C5-M	0240	2015-04-07	10.56	2.70	1.26	2.74

紧装置能够保证对燃料组件的夹持使其在支承框架上的位置保持固定；容器内的含硼不锈钢板均处在设计位置，未发生明显变形和移位。据此判定，新燃料运输容器仍能保证其临界安全性能满足设计要求。

2.3.6 检查结果小结

通过对 245 台不同型号的 PWR 燃料组件运输容器的现场检查结果分析，容器主要存在的安全隐患有防腐层损伤、吊耳焊缝裂纹、密封垫开裂老化等，检查结果汇总见表 4。

表 4 我国在用 PWR 燃料组件运输容器现场检查结果汇总
Tab.4 Summary of on-site inspection results of PWR fuel assembly transport containers in China

安全问题	数目	所占比例/%
防腐层损伤	> 200	> 82
吊耳焊缝裂纹	8	3.3
密封垫开裂老化	53	21.6
其他	3	1.2

2.4 维修与复检

对于该次容器定期安全检查中发现问题，CJNF 组织了专项维修，包括更换密封垫、整平吊耳、焊缝补焊等。经复检，维修后的容器均满足设计和相关标准要求，可继续用于 PWR 燃料组件的运输。

3 结语

在我国，放射性物品运输容器一般需要设计、仿真分析、试验、安全分析、设计许可、制造许可等几个步骤，但所有的评价分析工作只针对新容器，对于长时间使用的容器并没有严格的监管措施。该次定期安全评价是我国首次系统的对压水堆新燃料组件运输容器的定期安全性能评价，对于了解和掌握我国境内使用的 PWR 燃料组件运输容器的使用情况、安全状态意义非凡。同时，该次评价为我国放射性物品运输容器的设计、制造、使用和维护提供了宝贵的经验。

1) 定期对容器防腐层进行修复，特别是易磕碰和易积水的部位，避免腐蚀恶化，同时，容器的设计应尽量避免维护死角的出现。

2) 尽量避免装运过程造成的容器撞击、跌落等事故，防止螺栓、法兰、吊耳、肋板等重要部位和部件的变形损伤。

3) 容器的运输环境和存放环境同样重要，应引起足够重视，包括运输途中的防雨措施、交货地的容器操作和维护等，必要时，在容器的设计阶段对容器使用环境的湿度、洁净度等做一定的要求。

4) 对于有密封要求的容器，应依据容器的使用

频次作为密封垫的更换和密封面的修复的依据，而非容器的使用时长。

参考文献：

[1] 范深根, 汪佳明, 刘学成. 我国放射性物质运输概况[J]. 辐射防护, 1989, 9(1): 12—17.
FAN Shen-gen, WANG Jia-ming, LIU Xue-cheng. Survey of Radioactive Material Transport in China[J]. Radiation Protection, 1989, 9(1): 12—17.

[2] IAEA SSR-6. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[R]. Vienna, 2012.

[3] IAEA TS-G-1. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material [R]. Vienna, 2008.

[4] 中华人民共和国国务院. 第 562 号令 放射性物品运输安全管理条例[Z]. 2009.
State Council of the People's Republic of China. Decree No.562 Regulations on the Safety of the Transportation of Radioactive Material[Z]. 2009.

[5] 环境保护部. 第 38 号令 放射性物品运输安全监督管理办法[Z], 2016.
Ministry of Environmental Protection. Decree No.38 Measures for the Administration of Safety Inspection of the Transportation of Radioactive Articles[Z]. 2016

[6] GB 11806—2004, 放射性物质安全运输规程[S].
GB 11806—2004, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[S].

[7] 核安全法规技术文件. 放射性物品运输容器定期安全性能评价指南[Z]. 2016.
Nuclear Safety Regulations Technical Documents. Guideline for the Periodic Safety Performance Evaluation of Radioactive Material Transport Containers[Z]. 2016.

[8] U.S.NRC. Standard Review Plan for Transportation Packages for Radioactive Material[R]. NUREG-1609, 1999.

[9] 易传裕. 压力容器安全管理与定期检验的探讨[J]. 中国新技术新产品, 2017(11): 131.
YI Chuan-yu. Discussion on Safety Management and Regular Inspection of Pressure Vessels[J]. China New Technology and New Products, 2017(11): 131.

[10] NB/T 47013—2015, 承压设备无损检测[S].
NB/T 47013—2015, Nondestructive Testing of Pressure Equipment[S].

[11] ASME 2007, Boiler & Pressure Vessel Code: Section III[S].

[12] GB/T 17230—1998, 放射性物质安全运输货包的泄漏检验[S].
GB/T 17230—1998, Leakage Inspection of Safe

- Transportation of Radioactive Materials[S].
- [13] 李宁, 张洪军, 徐小刚. CNFC-HTR 新燃料运输容器结构设计与验证[J]. 科技视界, 2016(8): 204—205.
- LI Ning, ZHANG Hong-jun, XU Xiao-gang. Structural Design and Verification of the CNFC-HTR New Fuel Transport Container[J]. Science & Technology Vision, 2016(8): 204—205.
- [14] 郭春秋, 邹佳讯, 衣大勇, 等. 新燃料元件运输容器热工安全分析及试验验证[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(11): 1992—1997.
- GUO Chun-qiu, ZOU Jia-xun, YI Da-yong, et al. Thermal Safety Analysis and Experimental Validation of New Fuel Element Transport Cask[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(11): 1992—1997.
- [15] 易璇, 霍小东. 运输容器临界安全评价要点剖析[J]. 原子能科学技术. 2013, 47(6): 309—311.
- YI Xuan, HUO Xiao-dong. Consideration in Critically Safety Evaluation of Transport Package[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(6): 309—311.