

高燃耗乏燃料组件运输期间的限制准则研究

方俊*, 李亚如, 刘佳泰, 孙燕宇

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: **目的** 研究运输期间乏燃料组件包壳温度变化幅度的影响因素, 以确定乏燃料运输容器装载高燃耗组件的热负荷与装载位置是否存在限制。**方法** 将乏燃料运输容器的径向传热简化为具有内热源的圆柱体导热问题, 开展理论分析, 并使用 CFX 软件开展三维温度场分析, 进一步证明理论分析的结论。**结果** 高温工况和低温工况下大气环境温度的差值、太阳曝晒与热负荷随时间的衰减是包壳温度变化的主要原因, 高温工况与低温工况热负荷的偏差引入的容器温度梯度差值, 被容器选用的材料和乏燃料组件热导率随温度升高而变大以及热辐射随温度升高而增强的效应抵消。容器外表面温度的变化幅度基本决定包壳温度的变化幅度, 前者与容器外表面的发射率和太阳辐射吸收比的组合有关, 有可能超过 100 °C, 因此必须对装载高燃耗组件的运输容器是否满足包壳温度变化限制准则进行分析论证。**结论** 容器外表面的发射率应尽可能高, 太阳辐射吸收比应尽可能低, 在恰当的组合下, 可以保证任意热负荷和任意装载方案下包壳温度变化幅度满足包壳温度变化限制准则, 从而无需在技术规格书中对装载高燃耗组件的热负荷和装载方案提出限制, 保证了装载的灵活性。

关键词: 高燃耗; 乏燃料; 包壳; 运输容器; 非满载

中图分类号: TL93+1; TB485.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)05-0250-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.032

Restriction Criterion of High-burnup Spent Fuel Assemblies during Transportation

FANG Jun*, LI Yaru, LIU Jiatai, SUN Yanyu

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

ABSTRACT: The work aims to study the factors affecting the cladding temperature variation of spent fuel assemblies during transportation to determine whether there are restrictions on the thermal load and loading position of high-burnup assemblies in spent fuel cask. The radial heat transfer of the spent fuel cask was simplified into the heat conduction of a cylinder with internal heat source to carry out theoretical analysis, and the CFX software was used to carry out three-dimensional temperature field analysis to further prove the conclusion of theoretical analysis. The difference in atmospheric environment temperature between hot condition and cold condition, the solar radiation and the decay of thermal load over time were the main reasons for the variation in cladding temperature. The difference in cask temperature gradient introduced by the deviation of thermal load between hot condition and cold condition was offset by the effects of the increase in thermal conductivity of the material selected for the cask and the spent fuel assembly with the increase in temperature and the enhancement of thermal radiation with the increase in temperature. The variation of the cask external surface temperature basically determined the variation of the cladding temperature, and the former was related to the combination of the emissivity and solar radiation absorption ratio of the cask external surface and might exceed 100 °C.

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 中核集团集中研发项目“华龙后续机型研发”(2008)

*通信作者

Therefore, it was necessary to analyze and demonstrate whether the cask loaded with high burnup assemblies met the criterion of cladding temperature variation. The emissivity of the external surface of the cask should be as high as possible, and the solar radiation absorption ratio should be as low as possible. Under an appropriate combination of the emissivity and solar radiation absorption ratio of the cask external surface, it can be ensured that the variation of cladding temperature under any thermal load and any loading configuration meets the criterion of cladding temperature variation, so there is no need to put forward requirements on the thermal load and loading configuration of loading high-burnup assemblies in the technical specification, which ensures the flexibility of loading.

KEY WORDS: high-burnup; spent fuel assembly; cladding; transportation cask; non-full-loading

对于锆合金燃料包壳, 与低燃耗乏燃料组件相比, 高燃耗组件卸料后初始衰变热功率更高、包壳腐蚀层更厚、包壳氢含量更高、裂变气体释放量更多, 从而造成包壳内压更大、包壳和芯块间的接触比例更高, 这些因素共同导致包壳性能发生劣化^[1]。将高燃耗组件从乏燃料水池卸出后, 在运输至厂外贮存或后处理厂期间, 为保证包壳结构完整性, 乏燃料运输容器在设计上需要针对高燃耗组件开展额外的评价。

考虑大气环境温度变化以及衰变热功率随时间降低, 高燃耗乏燃料组件在运输过程中, 燃料包壳温度有可能低于包壳韧脆转变温度 (Ductile to Brittle Transition Temperature, DBTT), 受到外部作用后更容易破裂, 从而失去对燃料芯块的包容和限制功能。乏燃料运输容器的热评价采用包壳温度变化限制准则来预防包壳温度低于 DBTT。

对于低燃耗组件, 只需要论证运输期间包壳峰值温度低于限制准则。容器的设计热负荷限制了容器可以装载的最大热负荷, 即使实际装载的热负荷低于设计热负荷, 或者出现非满载的情况, 由于热负荷越大, 包壳峰值温度越低, 实际装载条件下的包壳峰值温度必然低于设计热负荷对应的包壳峰值温度。因此, 对于装载低燃耗组件的运输容器, 在技术规格书中无需对装载方案提出限制要求。

对于高燃耗组件, 除了满足包壳峰值温度限制准则, 还需满足包壳温度变化限制准则。在运输期间, 由于昼夜温差和季节变化, 环境温度的变化幅度很大, 可能达到 78 °C。取决于容器外表面的发射率和太阳辐射吸收比, 太阳曝晒对容器输入的热流密度可导致容器外表面温度升高 10~35 °C。运输的持续时间较长, 乏燃料组件的衰变热功率在此期间发生衰减, 尤其是对于冷却年限较短的高燃耗组件, 衰变热功率降低幅度更大, 有可能达到 10%。这 3 个因素的存在使得运输期间包壳温度变化幅度有可能超过限制准则。

某型号乏燃料运输容器在论证装载高燃耗组件的安全性时, 针对设计热负荷开展了分析论证, 证明包壳温度变化幅度满足限制准则。监管部门在对该型号乏燃料运输容器进行审评时, 要求申请者进一步论证在其他热负荷或非满载的情况下, 包壳温度变化幅

度是否满足限制准则, 是否需要在技术规格书中对装载高燃耗组件的热负荷和装载方案提出限制要求。

为响应监管部门的要求, 论证包壳温度变化幅度在何种条件下能够满足限制准则, 对该具体型号乏燃料运输容器开展理论分析, 研究运输期间包壳温度变化幅度的影响因素, 并使用 CFX 软件开展三维温度场分析, 进一步证明理论分析的正确性。结合理论分析和 CFX 软件的分析结果, 对乏燃料运输容器的设计和高燃耗组件的装载方案给出相关建议, 进一步提高高燃耗组件在运输期间的安全性。

1 包壳温度变化限制准则

NAC-STC 乏燃料运输容器^[2]在提交国家核安全局的安全分析报告中, 对直接装载平均燃耗低于 55 MWd/t 的锆合金包壳高燃耗组件, 提出并使用了以下包壳完整性评价方法: 1) 确定包壳氢化物溶解温度, 保守选取 250 °C; 2) 确定 DBTT, 保守选取 150 °C; 3) 确定包壳温度变化限制准则, 定为 100 °C, 即将包壳氢化物溶解温度和 DBTT 相减得到的温差; 4) 开展热评价, 通过将高温工况和低温工况的温度场相减, 得到高温工况包壳温度超过 250 °C 的区域与低温工况相比的最大温差, 将最大温差与包壳温度变化限制准则进行比较, 确认最大温差低于 100 °C。该方法已获得国家核安全局的认可。

为确定正常运输条件下的最大包壳温度变化幅度, NAC-STC 容器定义了一个高温工况和一个低温工况来考察包壳温度的变化。高温工况定义为容器的设计热负荷、环境温度 38 °C、有太阳曝晒, 低温工况定义为装载半年后的热负荷、环境温度 -40 °C、无太阳曝晒。装载半年后的热负荷在设计热负荷的基础上保守减少 12%, 但 NAC-STC 容器的安全分析报告没有论证在非满载或者实际装载的热负荷低于设计热负荷的情况下是否满足包壳温度变化准则。

设定一种极端的情况, 论证包壳温度变化幅度是否满足包壳温度变化限制准则。假设容器装载的热负荷为 0, 容器在高温工况和低温工况下的温度场都是等温的均匀温度场, 且各自等于容器外表面温度。在高温工况下, 取决于容器外表面的发射率和太阳辐射

吸收比,容器的温度可能为 48~73 °C;在低温工况下,容器的温度等于-40 °C。包壳温度变化幅度很可能接近或超过 100 °C,不满足包壳温度变化限制准则。对于在零功率和设计热负荷之间的功率水平,包壳温度变化幅度可能介于两者之间。

NAC-STC 容器装载高燃耗组件使用的评价方法,能够满足美国核管理委员会(United States Nuclear Regulatory Commission, U.S.NRC)发布的临时细则 ISG-11 Rev.3 中的要求。包壳完整性评价相关的研究成果和结论,在 U.S.NRC 出版的 NUREG 文件和 ISG 系列文件中进行了详述。申腾等^[3]比较了 U.S.NRC 发布的 1997 版^[4]和 2010 版^[5]NUREG-1536 文件,对乏燃料包壳破损机理^[6-11]进行了梳理分析,有助于理解乏燃料包壳破损机理及其演变过程。

洪哲等^[12]对影响包壳结构完整性的温度限值、包壳氢化物溶解温度以及 DBTT 进行探讨,推荐将 250 °C 作为包壳氢化物的溶解温度,并给出证明高燃耗组件包壳能够保持延性的评价方法和步骤。该方法与 NAC-STC 容器的评价方法一致。

汪俊等^[13]通过对氢化物再取向机理的分析,确定乏燃料包壳能够保持韧性的条件,提出并实践一种通过温度场分析判断高燃耗组件厂外正常运输条件下保持安全性的方法,即温度超过 250 °C 的包壳,在运输期间其温度始终高于 150 °C。通过对比高温工况包壳温度超过 250 °C 的区域与低温工况温度低于 150 °C 的区域是否重叠,判断是否满足包壳温度变化限制准则,这是一种有效、直观的判定方式。该方法与 NAC-STC 容器的评价方法本质上一致。汪俊等的分析,未考虑装载的热负荷在运输期间的衰减,也未考虑非满载或者实际装载的热负荷低于设计热负荷的情况。

以上研究和实践表明,对于直接装载铝合金包壳高燃耗组件的乏燃料运输容器,在正常运输条件下,包壳完整性评价的准则可解耦为包壳仍然保持韧性,还可继续解耦为温度超过 250 °C 的包壳,在运输期间其温度始终高于 150 °C。因此,包壳温度变化限制准则可描述为在正常运输条件下,包壳温度变化幅度应低于 100 °C。在设计热负荷下,多个文献都表明包壳温度变化幅度可以满足包壳温度变化限制准则,但是尚未调研到论述包壳温度变化幅度影响因素的相关文献。

从乏燃料水池卸出的乏燃料组件装入乏燃料运输容器,经历真空干燥、氦气回填,吊装到指定车辆后开始运输。正常运输条件下,乏燃料包壳温度限值为 400 °C^[14]。为保证乏燃料运输容器的装载能力,通常会尽可能提高容器的设计热负荷,使得包壳最高温度接近 400 °C,但是仍留有几十摄氏度的裕量。这表明容器内的包壳存在温度超过 250 °C 的区域。保守假设运输过程持续一年^[15],考虑环境温度变化以及衰变热功率历经一年后的衰减,温度超过 250 °C 的包壳在运输结束时温度有可能低于 150 °C。本文从审慎的角

度,以某具体型号乏燃料运输容器为分析对象,研究运输期间乏燃料组件包壳温度变化幅度的影响因素,在何种条件下包壳温度变化幅度能够满足包壳温度变化限制准则,以及是否需要对装载的热负荷和装载方案提出限制要求。

2 运输期间包壳温度变化幅度的影响因素

2.1 理论分析

以某具体型号乏燃料运输容器作为分析对象,运输期间,容器顶部和底部安装减震器。容器设计装载 24 个指定类型的乏燃料组件,设计热负荷为 24 kW。由于减震器内填充热导率极低的木材,而乏燃料组件的发热段处于整个容器的中段,保守认为减震器包裹的容器表面为绝热区域。容器内乏燃料的衰变热主要沿容器的径向,通过热辐射、热对流与热传导的方式,先传导至容器内表面,然后沿着容器内筒体、铅层、外筒体、中子屏蔽层、中子屏蔽层外壳等部件传导至容器外表面,最终由大气环境将热辐射带走,实现自然循环冷却。

2.1.1 简化模型

径向为容器内热流密度的主流方向,为开展理论分析,将容器的径向传热简化为具有内热源的圆柱体导热问题。在容器的轴向,可截取线功率密度最高的一段开展研究,进一步简化为一维导热问题。容器内腔等效为只存在热传导的等效模拟体,且具有均匀内热源,半径为 r_1 ; 从内到外依次为不锈钢层,外半径 r_2 ; 铅层,外半径 r_3 ; 不锈钢层,外半径 r_4 ; 中子屏蔽层,外半径 r_5 ; 不锈钢层,外半径 r_6 。一维导热模型如图 1 所示。

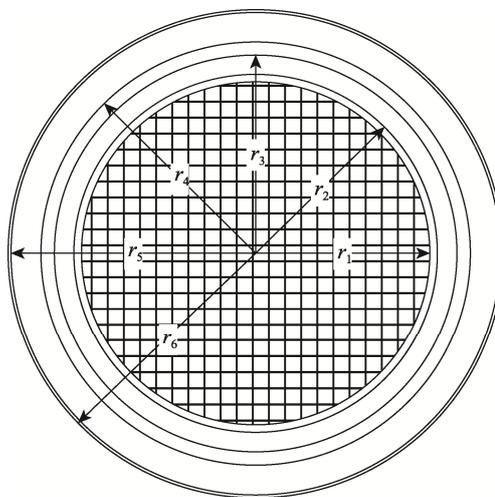


图 1 具有内热源的圆柱体一维导热模型
Fig.1 One-dimensional heat conduction model of cylinder with internal heat source

具有内热源的圆柱体, 一维导热微分方程为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda_1} = 0 \quad (1)$$

式中: r 为距圆心的距离, 对应到乏燃料容器, 即距容器轴线的距离; t 为 r 处的温度; $\dot{\Phi}$ 为容器内腔的功率密度; λ_1 为容器内腔的等效热导率。

边界条件为

$$r = 0, \quad \frac{dt}{dr} = 0; \quad r = r_1, \quad t = t_1 \quad (2)$$

式中: t_1 为 r_1 处的温度。

求解一维导热微分方程, 其解析解为

$$t = t_1 + \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi}}{\lambda_1} (r_1^2 - r^2) \quad (3)$$

截取单位长度 l 的圆柱体作为分析对象, l 可取 1 m, 则该圆柱体的功率为

$$\Phi = \dot{\Phi} \pi r_1^2 l \quad (4)$$

式中: Φ 为单位长度圆柱体的功率。

达到热平衡时, 容器外表面温度由式 (5) 确定。

$$r = r_6, \quad \frac{\Phi}{2\pi r_6 l} + f \alpha q_{\text{solar}} = h_{\text{eff}} (t_6 - t_{\infty}) \quad (5)$$

式中: f 为太阳曝晒因子; α 为容器外表面对太阳辐射的吸收比; q_{solar} 为太阳曝晒热流密度, 对于水平放置的圆柱体外表面, 考虑 24 h 平均值, 保守取 200 W/m^2 ; h_{eff} 为容器外表面与大气环境的等效换热系数; t_6 为容器外表面温度; t_{∞} 为大气环境温度。

由式 (5) 可求得容器外表面温度为

$$t_6 = t_{\infty} + \frac{1}{h_{\text{eff}}} \left(\frac{\dot{\Phi} r_1^2}{2r_6} + f \alpha q_{\text{solar}} \right) \quad (6)$$

为确定运输期间包壳温度变化幅度, 定义了高温工况和低温工况, 见表 1。 f 取 1 表示高温工况考虑太阳曝晒, f 取 0 表示低温工况不考虑太阳曝晒。考察不同富集度、不同燃耗深度、不同冷却年限的乏燃料组件的衰变热功率发现, 冷却一年后, 衰变热功率下降低于 12%。因此, 保守考虑乏燃料组件运输一年后, 衰变热功率下降 12%。

表 1 高温工况和低温工况的定义

Tab.1 Definition of hot condition and cold condition

工况	环境温度 $t_{\infty}/^{\circ}\text{C}$	热负荷 Φ/kW	太阳曝晒 因子 f
高温工况	38	Φ	1
低温工况	-40	0.88Φ	0

容器外表面与大气环境的等效换热系数综合了自然对流和辐射换热 2 种换热机制。

自然对流换热系数与容器外表面温度、大气环境温度以及容器的特征长度 (取容器的外径) 有关, 计

算见式 (7)。

$$Gr = \frac{g \beta (t_6 - t_{\infty}) D_6^3}{\nu^2} \quad (7)$$

式中: Gr 为格拉晓夫数; g 为重力加速度; β 为空气在 t_f 下的体膨胀系数; D_6 为容器外表面直径; ν 为空气在 t_f 下的运动黏度。

其中, t_f 为容器外表面温度和大气环境温度的平均值, 是用来确定空气物性的定性温度, 即:

$$t_f = (t_6 + t_{\infty}) / 2 \quad (8)$$

体膨胀系数用式 (9) 计算。

$$\beta = 1 / t_f \quad (9)$$

$$D_6 = 2r_6 \quad (10)$$

Ra 为瑞利数, 定义为

$$Ra = Gr \times Pr \quad (11)$$

式中: Pr 为空气在 t_f 下的普朗特数。

计算努塞尔数 Nu 时采用被广泛使用的 Churchill-Chu 关系式^[16], 见式 (12)。

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (12)$$

当 $Ra \leq 10^{12}$ 时, 自然对流换热系数 h_c 根据式 (13) 计算。

$$h_c = \frac{k}{D_6} Nu \quad (13)$$

式中: k 为空气在 t_f 下的热导率。

在容器外表面, 自然对流换热热流密度 q_c 为

$$q_c = h_c (t_6 - t_{\infty}) \quad (14)$$

在容器外表面, 辐射换热热流密度用式 (15) 计算。

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (t_6^4 - t_{\infty}^4) = \varepsilon \sigma (t_6^2 + t_{\infty}^2) (t_6 + t_{\infty}) (t_6 - t_{\infty}) \quad (15)$$

式中: ε 为容器外表面的发射率; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。

在容器外表面, 总的换热热流密度 q 为

$$q = q_c + q_{\text{rad}} = h_{\text{eff}} (t_6 - t_{\infty}) \quad (16)$$

由式 (16) 可知, 在容器外表面, 等效换热系数 h_{eff} 由式 (17) 求得。

$$h_{\text{eff}} = h_c + \varepsilon \sigma (t_6^2 + t_{\infty}^2) (t_6 + t_{\infty}) \quad (17)$$

式 (17) 第 2 项可认为是辐射换热系数 h_{rad} , 它与容器外表面的发射率、容器外表面温度以及大气环境温度有关, 即:

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (t_6^2 + t_{\infty}^2) (t_6 + t_{\infty}) \quad (18)$$

容器外表面达到热平衡时应满足式 (19)。

$$q = \frac{\Phi}{2\pi r_6 l} + f \alpha q_{\text{solar}} \quad (19)$$

根据多层圆筒壁导热公式, r_1 处的温度 t_1 用式 (20) 求解。

$$t_1 = t_6 + \Phi \left[\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi l \lambda_2} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi l \lambda_3} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi l \lambda_4} + \frac{\ln(r_5/r_4)}{2\pi l \lambda_5} + \frac{\ln(r_6/r_5)}{2\pi l \lambda_6} \right] \quad (20)$$

$$\Delta t_c = \Phi \left[\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi l \lambda_2} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi l \lambda_3} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi l \lambda_4} + \frac{\ln(r_5/r_4)}{2\pi l \lambda_5} + \frac{\ln(r_6/r_5)}{2\pi l \lambda_6} \right] \quad (21)$$

Δt_c 为容器筒体产生的温度梯度，则容器内腔等效模拟体的温度可由式 (22) 求解。

$$t = t_6 + \Delta t_c + \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi}}{\lambda_1} (r_1^2 - r^2) \quad (22)$$

2.1.2 影响因素分析

包壳温度变化幅度定义为同一位置处高温工况和低温工况包壳温度的变化量，由式 (22) 可知，它由 3 个部分组成，即容器外表面温度的差值、容器筒体温度梯度的差值以及容器内腔温度梯度的差值，可从这 3 个部分开展包壳温度变化幅度的影响因素分析。

2.1.2.1 容器外表面温度的差值

根据式 (6)，对于一个几何尺寸已确定的容器，高温工况和低温工况下容器外表面温度的差值取决于环境温度、容器装载的热负荷、太阳辐射吸收比以及等效换热系数。等效换热系数与容器外表面温度、环境温度和容器外表面的发射率有关，容器外表面温度则与环境温度、等效换热系数、容器装载的热负荷以及太阳辐射吸收比有关。根据式 (6) 和式 (17)，可以推断出 3 条显而易见的结论：

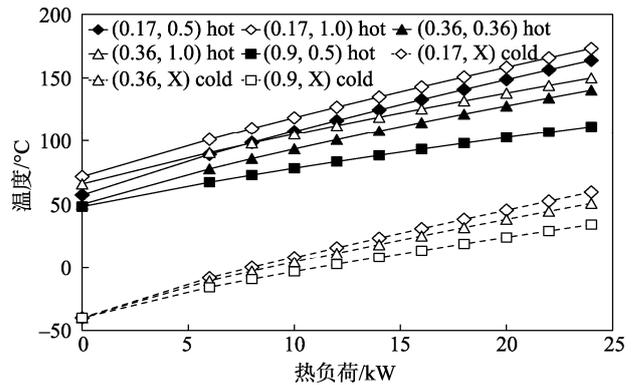
- 1) 容器装载的热负荷越大，意味着 $\dot{\Phi} r_1^2$ 越大，容器外表面温度越高；
- 2) 容器外表面的太阳辐射吸收比 α 越大，容器外表面温度越高；
- 3) 容器外表面的发射率 ϵ 越低，等效换热系数 h_{eff} 越小，容器外表面温度越高。

由于容器外表面温度和等效换热系数存在耦合关系，高温工况和低温工况下容器外表面温度的差值不能用显性的关系式表达，因此无法通过公式直接推断出容器外表面温度的差值与容器装载的热负荷、容器外表面的太阳辐射吸收比和发射率之间的关系。一种可行的方法是直接计算在不同的热负荷、太阳辐射吸收比和发射率组合下容器外表面温度的差值，再根据结果分析容器外表面温度的差值与这 3 个参数之间的规律。

为考察容器非满载以及装载的热负荷低于设计热负荷的情形，考虑的热负荷范围从零功率一直到设计热负荷。发射率和太阳辐射吸收比的取值为 0~1，考虑到乏燃料运输容器外表面常用的材料为不锈钢，

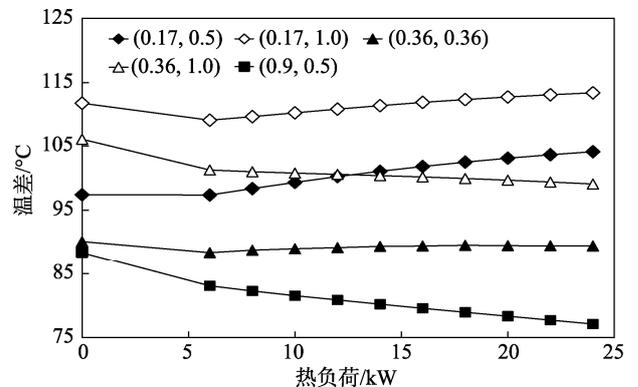
研究考察了 3 种发射率 (0.17、0.36、0.9) 和 3 种太阳辐射吸收比 (0.36、0.5、1.0) 的 5 种组合情况。3 种发射率中，0.17 为各类型不锈钢表面的最小发射率，0.36 为 NAC-STC 容器外表面使用的发射率，0.9 为考虑容器外表面涂漆后的最小发射率。3 种太阳辐射吸收比中，0.36 为 NAC-STC 容器使用的太阳辐射吸收比，0.5 为无光泽不锈钢的太阳辐射吸收比，1.0 为最保守的太阳辐射吸收比。发射率和太阳辐射吸收比的考察范围覆盖乏燃料运输容器外表面可能出现的参数范围，并且具有保守性。

容器外表面温度、高温工况和低温工况下容器外表面温差的计算结果以图示的方式给出。图 2 为高温工况和低温工况下容器外表面温度与容器装载的热负荷、容器外表面的太阳辐射吸收比以及发射率的关系，图 3 为高温工况和低温工况下容器外表面温差与容器装载的热负荷、容器外表面的太阳辐射吸收比以及发射率的关系。



注：图例中括号里的第 1 项是容器外表面发射率，第 2 项是太阳辐射吸收比，X 表示该曲线与太阳辐射吸收比无关。

图 2 高温工况和低温工况下容器外表面温度变化
Fig.2 Variation of temperature of external surface of the cask under hot condition and cold condition



注：图例中括号里的第 1 项是容器外表面发射率，第 2 项是太阳辐射吸收比。

图 3 高温工况和低温工况下容器外表面温度的差值变化

Fig.3 Variation of the difference between the temperature of external surface of the cask under hot condition and cold condition

图 2 中: 所有曲线的变化趋势均表明, 热负荷越大容器外表面温度越高; 曲线“(0.17, 1.0) hot”在“(0.17, 0.5) hot”之上, 曲线“(0.36, 1.0) hot”在“(0.36, 0.36) hot”之上, 表明太阳辐射吸收比越大, 容器外表面温度越高; 曲线“(0.17, 0.5) hot”在“(0.9, 0.5) hot”之上, 曲线“(0.17, 1.0) hot”在“(0.36, 1.0) hot”之上, 曲线“(0.17, X) cold”在“(0.36, X) cold”之上, 曲线“(0.36, X) cold”在“(0.9, X) cold”之上, 表明发射率越低, 容器外表面温度越高。

图 3 中: 曲线“(0.17, 1.0)”在“(0.17, 0.5)”之上, 曲线“(0.36, 1.0)”在“(0.36, 0.36)”之上, 表明太阳辐射吸收比越大, 容器外表面温差越大; 曲线“(0.17, 0.5)”在“(0.9, 0.5)”之上, 曲线“(0.17, 1.0)”在“(0.36, 1.0)”之上, 表明发射率越低, 容器外表面温差越大; 容器外表面温差随热负荷变化的趋势与发射率和太阳辐射吸收比的组合有关, 有的组合呈升高趋势, 有的组合呈下降趋势, 总体上随热负荷变化的波动不大, 最大波动发生在发射率为 0.9 的情况下, 波动幅度 $<12^{\circ}\text{C}$, 对于不涂漆的不锈钢表面, 波动幅度 $<7^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.2.2 容器筒体温度梯度的差值

根据式 (21), 对于几何尺寸已确定的容器, 容器筒体温度梯度的差值与热物性及热负荷相关。筒体使用的材料为不锈钢、铅和中子屏蔽层, 假设它们的热导率不随温度变化, 在设计热负荷下, 容器筒体温度梯度的差值最大, 不超过 3°C 。考虑不锈钢的热导率随温度升高而变大, 这一差值将进一步缩小, 并低于 3°C 。

2.1.2.3 容器内腔温度梯度的差值

容器内腔装有吊篮和乏燃料组件, 并充装氦气, 吊篮由不锈钢和铝制成, 这几种材料的热导率都随温度升高而变大。将容器内腔用等效模拟体代替, 其等效热导率约 $2.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。根据式 (3), 在设计热负荷下, 容器内腔温度梯度的差值最大, 不超过 27°C 。

高温工况与低温工况相比, 环境温度相差 78°C , 热负荷相差 12%, 进一步增大了高温工况和低温工况容器内腔温差。容器内腔存在热辐射和热传导 2 种传热机制, 温度越高, 热辐射效应越强, 容器内腔热阻越小, 等效热导率越大。乏燃料组件等效热导率随温度变化较大, 温度升高 80°C 时, 等效热导率增加约 19%。考虑容器内腔等效热导率随温度升高而变大的特性, 容器内腔温度梯度的差值将进一步缩小。

高温工况和低温工况下容器外表面温差和包壳温差变化如图 4 所示。图 4 中, 曲线“包壳-CFX”低于“容器外表面-CFX”, 表明包壳温度变化幅度低于容器外表面温度变化幅度, 说明高温工况和低温工况下容器内腔温度梯度的差值为负值, 这是容器内腔等效热导率随温度升高而变大导致的结果。

2.1.2.4 小结

综合容器外表面温差、容器筒体温度梯度的差值

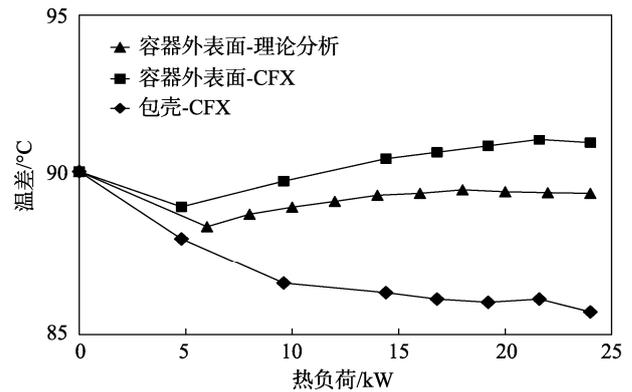


图 4 高温工况和低温工况下容器外表面温差和包壳温差变化

Fig.4 Variation of the difference between the temperature of external surface of the cask and the difference between the temperature of cladding under hot condition and cold condition

以及容器内腔温度梯度的差值, 包壳温度变化幅度有可能超过 100°C , 也有可能低于 100°C 。因此, 在开展乏燃料运输容器热评价时, 对于装载高能耗组件的装载方案, 必须对包壳温度变化幅度进行计算分析论证。

2.2 三维温度场分析

为证明理论分析结论的可靠性, 针对装载不同热负荷的情况, 使用 CFX 软件开展三维温度场分析, 判断包壳温度变化幅度与热负荷的关系。为保证实际运输时装载方案的灵活性, 针对非满载的情况也开展了分析。

2.2.1 包壳温度变化幅度与热负荷的关系

CFX 软件计算的所有工况使用的发射率和太阳辐射吸收比均为 0.36。理论分析和 CFX 软件在预测容器外表面温差上具有良好的一致性, 最大偏差不超过 2°C , 对随热负荷变化的趋势预测得也很准确。包壳温度变化幅度低于容器外表面温度变化幅度, 证实了理论分析的猜想。容器内腔结构复杂, 传热路径为三维, 理论分析采用等效模拟体的方式无法准确表征容器内腔实际的传热特性。CFX 软件的计算结果表明, 容器内腔的吊篮设计与乏燃料组件的热物理性质组合后, 高温工况和低温工况由于热负荷偏差 12% 引入的容器内腔温度梯度差值, 可以被热导率随温度升高而变大以及热辐射随温度升高而增强的效应抵消, 从而使包壳温度变化幅度基本与容器外表面温度变化幅度相当。这意味着容器外表面的发射率和太阳辐射吸收比基本确定了包壳温度变化幅度的范围, 而这两者的特定组合有可能导致包壳温度变化幅度超过 100°C 。

2.2.2 非满载的情况

针对 3 种非满载的情况, 使用 CFX 软件开展三维温度场分析, 分别将 12 组 1 kW 的乏燃料组件装载在最中心, 将 12 组 1 kW 的乏燃料组件装载在最外圈,

将8组1 kW的乏燃料组件装载在最外圈,计算结果见表2。由表2可知,非满载情况的包壳温度变化幅度与满载情况相当,略低于容器外表面温度变化幅度。对于零功率的极端情况,由图3可知,发射率和太阳辐射吸收比均为0.36的容器外表面,包壳温度变化幅度为89℃,低于100℃的限制准则。表2和图3的数据表明,实际运输时可以不满载,无需对装载方案提出限制,保证了装载方案的灵活性。

表2 非满载工况包壳温度变化幅度的CFX计算结果

Tab.2 CFX results of cladding temperature variation of non-full-loading cases

装载方式	热负荷/ kW	容器外表面温度 变化幅度/℃	包壳温度 变化幅度/℃
满载, 24组全部放 满, 单组1.0 kW	24	91.0	85.7
满载, 24组全部放 满, 单组0.5 kW	12	90.2	86.5
非满载, 12组放最 中心, 单组1 kW	12	90.3	87.5
非满载, 12组放最 外圈, 单组1 kW	12	90.0	86.4
满载, 24组全部放 满, 单组0.33 kW	8	89.8	87.1
非满载, 8组放最外 圈, 单组1 kW	8	89.4	87.3

3 结论

对于乏燃料运输容器,在装载高燃耗组件时,除了论证满足包壳峰值温度限制准则,还需论证满足包壳温度变化限制准则。由于包壳温度变化幅度与影响因素之间的关系相对复杂,特别是在论证其他热负荷或者非满载的情况下,仅通过定性分析无法得出明确的结论,需要开展细致的定量分析。通过理论分析以及CFX软件开展三维温度场分析,得出以下结论。

1) 容器外表面发射率越低,太阳辐射吸收比越大,高温工况和低温工况下容器外表面温度变化幅度越大。

2) 容器常用材料和乏燃料组件的热导率随温度升高而变大,以及热辐射随温度升高而增强的效应,能够抵消高温工况与低温工况热负荷偏差引入的容器温度梯度差值,导致包壳温度变化幅度与容器外表面温度的变化幅度基本相当。对于一个确定的容器设计方案,如果高温工况和低温工况下容器外表面温度的变化幅度低于100℃,则包壳温度变化幅度将低于100℃。

3) 容器外表面发射率和太阳辐射吸收比的组合,如较低的发射率和较高的太阳辐射吸收比,可能导致容器外表面温度的变化幅度超过100℃,从而使包壳

温度变化幅度不满足包壳温度变化限制准则。

4) 容器设计时应保证容器外表面具有较高的发射率(≥ 0.36)和较低的阳光辐射吸收比(≤ 0.5),以保证在正常运输条件下,包壳温度变化幅度低于包壳温度变化限制准则。针对这2个参数,应在技术规格书中提出要求,并通过试验确认它们满足要求。

本文的研究成果表明,选取合适的材料并进行恰当的表面处理,使容器外表面具有较高的发射率和较低的阳光辐射吸收比,能够保证任意热负荷和任意装载方案下包壳温度变化幅度满足包壳温度变化限制准则,即在正常运输条件下,包壳温度变化幅度低于100℃,并且具有一定的裕量。评价容器的设计在非满载以及实际装载的热负荷低于设计热负荷的情况下是否能够保证乏燃料组件在运输期间满足包壳温度变化限制准则时,可以参考本文的评价方法和评价结论。

参考文献:

- [1] HANSON B D, MARSCHMAN S C, BILLONE M C, et al. High Burnup Spent Fuel Data Project Sister Rod Test Plan Overview: FCRD-UFD-2016-000063[R]. Washington, D.C.: U.S. DOE, 2016.
- [2] U.S. NRC. Docket No. 71-9235[R]. Washington, D.C.: U.S. NRC, 2016.
- [3] 申腾, 江小川, 宋子凡, 等. 干法贮存中乏燃料包壳温度限值准则及机理分析[J]. 核标准计量与质量, 2017(3): 2-8.
SHEN T, JIANG X C, SONG Z F, et al. Temperature Limit Criterion and Mechanism Analysis of Spent Fuel Cladding in Dry Storage[J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2017(3): 2-8.
- [4] U.S. NRC. Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems (NUREG-1536)[S]. Washington, D.C.: U.S. NRC, 1997.
- [5] U.S. NRC. Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility (NUREG-1536)[S]. Washington, D.C.: U.S. NRC, 2010.
- [6] THOMAS G R, SCHWARTZ M W. Updated Model for Predicting Spent Fuel Cladding Integrity During Dry Storage[R]. Livermore, San Francisco Bay Area: U.S. LLNL, 1996.
- [7] RASHID Y R. A Critical Assessment of Potential Damage Mechanisms for Spent Fuel in Dry Storage[R]. San Diego: ANATECH, 2000.
- [8] RASHID J, MACHIELS A. A Methodology for the Evaluation of Fuel Rod Failures under Accident Conditions[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of

- Radioactive Material, 2005, 16: 211-218.
- [9] WON J J, MIN S J, KIM K T. Cooldown-Induced Hydride Reorientation of Hydrogen-Charged Zirconium Alloy Cladding Tubes[J]. *Metals and Materials International*, 2015, 21(1): 31-42.
- [10] U.S. NRC. Interim Staff Guidance-11 Revision 3[S]. Washington, D.C. : U.S. NRC, 2003.
- [11] CHU H C, WU S K, KUO R C. Hydride Reorientation in Zircaloy-4 Cladding[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, 373(1-3): 319-327.
- [12] 洪哲, 詹乐昌, 刘卓, 等. 高燃耗对乏燃料贮存和运输的影响研究[J]. *辐射防护*, 2019, 39(5): 423-428.
HONG Z, ZHAN L C, LIU Z, et al. Study on the Influence of High Burn-up on Storage and Transportation of Spent Fuel[J]. *Radiation Protection*, 2019, 39(5): 423-428.
- [13] 汪俊, 申腾. 高燃耗乏燃料组件包壳氢化物应力再取向对运输安全影响的评价方法研究[J]. *核科学与工程*, 2022, 42(5): 1206-1211.
WANG J, SHEN T. Study on the Evaluation Method of Hydride Stress Reorientation of High Burnup Spent Fuel Assembly Cladding on Transportation Safety[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2022, 42(5): 1206-1211.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. 乏燃料运输容器设计要求: HJ 1355—2024[S]. 北京: 生态环境部, 2024.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Design Requirements of Spent Fuel Transport Cask: HJ 1355-2024[S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2024.
- [15] IAEA. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition): Specific Safety Guide No. SSG-26[S]. Vienna: IAEA, 2014.
- [16] CHURCHILL S W, CHU H H S. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1975, 18(9): 1049-1053.