

新燃料元件运输容器热工安全分析及试验验证

郭春秋, 邹佳讯, 衣大勇, 张金山

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要: 新燃料元件运输容器是为运输 493 反应堆燃料元件设计的专用设备。为保证燃料元件在运输过程中的安全性, 使运输容器及燃料元件的各项性能指标符合标准 GB 11806—2004 的要求, 对运输容器进行了热工设计计算和验证试验。通过计算与相应热工试验结果的比较, 验证了运输容器热工设计的准确性。采用该运输容器运输新燃料元件, 在正常运输工况和事故运输工况下可保证燃料元件的安全, 完全满足 GB 11806—2004 的规定。

关键词: 运输容器; 热工设计; 验证试验; 正常运输工况; 事故运输工况

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)11-1992-06

doi: 10. 7538/yzk. 2016. 50. 11. 1992

Thermal Safety Analysis and Experimental Validation of New Fuel Element Transportation Container

GUO Chun-qiu, ZOU Jia-xun, YI Da-yong, ZHANG Jin-shan

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-33, Beijing 102413, China)

Abstract: The new fuel element transportation container is a specific equipment designed for transporting 493 reactor's fuel elements. In order to insure the safety of fuel elements during transportation and fulfill the requirements of standard GB 11806—2004, thermal design calculation and validation experiments were carried out. The accuracy of the container's thermal design was proven by comparing thermal design results with thermal experimental data. The safety of the new fuel elements can be insured and the requirements of GB 11806—2004 can be fulfilled by using the new fuel elements transportation container under both normal transport condition and accidental transport condition.

Key words: transportation container; thermal design; validation experiment; normal transport condition; accidental transport condition

新燃料元件运输容器(简称运输容器)是为运输 493 反应堆燃料设计的专用设备,其类型为 2 型工业新燃料元件运输容器(IF-2 型),使用温度为 $-40\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$, 运输指数为 1, 容器设计

寿命为 15 a。

为保证运输容器的安全性,使其各项性能指标符合相关法规的要求,在进行结构设计后,需进行热工设计计算,然后通过设计结果与相应热

工试验数据的比较,验证容器热工设计的准确性和可靠性,从而确保运输容器的安全可靠。

关于放射性物质运输容器的正常运输条件和事故运输条件下的传热,根据 GB 11806—2004《放射性物质安全运输规程》^[1] 的规定,在有无日晒情况下和火灾事故工况下,运输容器及所装载的燃料必须满足特定热工要求。

本文针对运输容器的结构特点及正常运输工况和事故运输工况,建立相应的物理和数学模型,对各种运输工况进行计算分析,并根据 GB 11806—2004 中的相关要求进行验证试验。

1 容器结构概述

运输容器为箱式结构,容器外壳和内部材料构成容器主体。运输容器如图 1 所示,容器外壳由箱盖和箱体通过螺栓连接组成,箱体与箱盖之间设有密封橡胶垫。内部材料由外向内依次为隔热材料、软木板和纤维缓冲材料。容器外形尺寸为 1 920 mm×770 mm×510 mm,重约 480 kg。燃料元件的燃料芯体包壳构成放射性物质的包容系统。

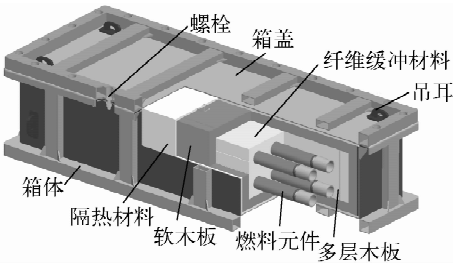


图 1 运输容器结构
Fig. 1 Structure of transportation container

放射性内容物为 493 新燃料元件,元件外形为圆柱体,最大外形尺寸为 $\phi 64\text{ mm}\times 1\,520\text{ mm}$ 。元件核材料为 $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ 均匀弥散体,燃料芯体包壳材料为 T6061-T6 铝合金,其他结构材料为 LT-24 铝合金。图 2 示出 8 根燃料元件在运输容器内的排布。

运输容器中热工设计计算的主要材料性能数据列于表 1,在计算中使用的材料的热物性数据为在 $-40\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内保守的热物性数值。

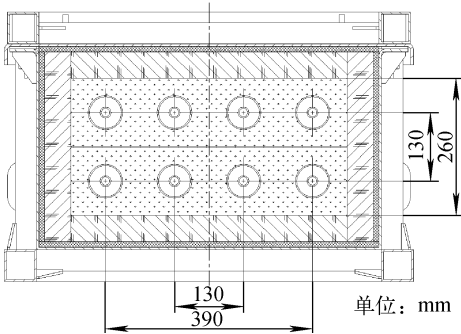


图 2 元件排列剖视图
Fig. 2 Cross view of fuel element distribution

表 1 运输容器所用材料的热物性数据

Table 1 Thermal physics data of materials used in transportation container

材料	性能参数	数值
钢板	密度, kg/m ³	7 850
	热导率, W/(m·K)	16. 75
	比热容, J/(kg·K)	502
内衬(软木)	密度, kg/m ³	300
	热导率, W/(m·K)	0. 055
	比热容, J/(kg·K)	2 050
缓冲材料	密度, kg/m ³	100
	热导率, W/(m·K)	0. 05
	比热容, J/(kg·K)	2 000
燃料元件包壳	密度, kg/m ³	1 120
	热导率, W/(m·K)	62
	比热容, J/(kg·K)	962
隔热板	密度, kg/m ³	200
	热导率, W/(m·K)	0. 025
	比热容, J/(kg·K)	1 500

2 法规要求及热工设计准则

结合 GB 11806—2004 相关规定对运输容器的要求,在有无太阳暴晒及火灾事故的情况下,结合元件在堆内运行的设计要求,确定了运输容器的热工设计准则。

2. 1 太阳暴晒工况的相关要求及热工设计准则

太阳暴晒情况下的相关要求为:1) 假设环境温度 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$;2) 对太阳暴晒数据的规定列于表 2;3) 运输容器的最大正常工作压力不得超过表压 700 kPa 。

太阳暴晒情况下的热工设计准则为:燃料包壳温度不得超过它在堆内运行时所能达到的最高温度 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 太阳暴晒数据表
Table 2 Sunshine data list

状态	表面的形状和位置	每天 12 h 的
		暴晒量/(W·m ²)
1	运输的水平平坦朝下表面	0
2	运输的水平平坦朝上表面	800
3	运输的垂直平坦侧表面	200
4	运输其他朝向的非水平平坦表面	200
5	所有其他表面	400

2.2 无日晒工况的相关要求及热工设计准则

无日晒,环境温度为-40~38℃工况的相关要求为:在环境温度为38℃时,没有太阳暴晒的情况下,容易接近的任何表面的最高温度不得超过50℃。

无日晒,环境温度为-40~38℃工况热工设计准则为:1) 在环境温度为38℃时,没有太阳暴晒的情况下,容易接近的任何表面的最高温度不得超过50℃;2) 运输容器的设计必须适应环境温度范围-40~38℃。

2.3 火灾事故工况的要求及热工设计准则

使试样暴露在热环境中30 min,该热环境提供的热流密度至少相当于在完全静止的环境条件下烃类燃料/空气火焰的热流密度,该热环境给出最小火焰发射系数为0.9,平均温度至少为800℃,试样完全被火焰所吞没,使表面吸收系数为0.8或采用运输容器暴露在所规定的火焰中其实际的吸收系数。

火灾事故工况的热工设计准则为:燃料包壳温度不得超过它在堆内事故工况下所能允许的最高温度400℃。

3 简化假设和边界条件

计算程序采用三维热工流体力学计算程序FLUENT。

3.1 计算分析简化假设

在运输容器的稳态热工设计中,在太阳暴晒情况下对运输容器的计算模型采用了以下假设:1) 太阳暴晒数据按照GB 11806—2004规定值选取;2) 计算中燃料元件的发热设为0;3) 在计算模型中,忽略容器外表面的螺栓和外加强筋板;4) 容器中各层的接触考虑为完全接触;5) 在计算中将元件所占空间全部用铝填充替代;6) 机械外力造成的局部变形非常小,在

热工设计计算中忽略这些形变^[2]。

对运输容器在火灾事故下的计算模型采用了以下假设:1) 计算中燃料元件的发热设为0;2) 忽略容器外表面的螺栓和外加强筋板;3) 容器中各层的接触考虑为完全接触;4) 机械外力造成的局部变形非常小,在热工设计计算中忽略这些形变;5) 在火灾事故计算中,将元件所占空间全部用空气填充;6) 容器内衬(软木)和缓冲材料均被容器箱体(钢板)及防火板包容,在火灾事故条件下处于极度缺氧环境,因此假设上述材料在事故中均不发生燃烧现象。

3.2 边界条件

太阳暴晒运输容器热工设计的边界条件为:1) 太阳与容器外表面的辐射换热,按照给定热流密度的边界条件选取,热流密度的取值参照表2选取;2) 容器与外界空气间的对流换热系数采用公式 $h=1.3\times\Delta T^{0.33}$ 计算,其中, h 为对流换热系数, ΔT 为温差。

火灾情况下运输容器热工设计的边界条件为:1) 定温边界条件,容器的初始温度为38℃,按照法规的要求,火灾事故下的温度为800℃,持续时间为半小时,事故后的环境温度降为38℃,事故前后均不考虑太阳的辐射;2) 容器与外界空气间的对流换热采用公式 $h=1.3\times\Delta T^{0.33}$ 计算;3) 基于保守考虑,火焰发射率和容器吸收率均取0.9。

4 热工设计结果与分析

4.1 太阳暴晒运输容器

图3示出太阳暴晒条件下运输容器和燃料元件的温度分布。由图3可见,在太阳暴晒情况下,容器外表面最高温度为115.2℃,隔热材料最高温度为114.9℃,软木板最高温度为112.6℃,缓冲材料最高温度为97.0℃,燃料最高温度为88.3℃。以上设计结果远低于太阳暴晒下的热工设计准则中元件要求的限值温度190℃,满足设计要求。

4.2 无太阳暴晒运输容器

由于容器所运输的燃料为新燃料,释放的热量几乎为0,因此在稳态条件下,无太阳暴晒,环境温度为38℃,整个容器各组成部分的温度均为38℃。

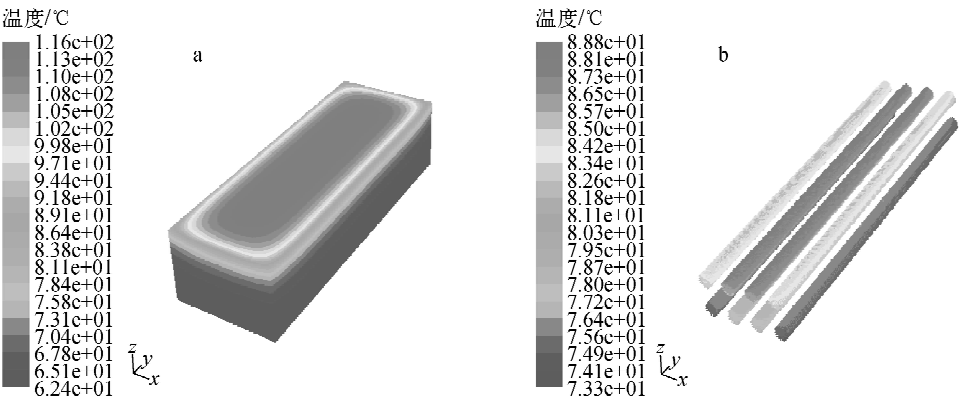


图3 太阳暴晒条件下运输容器(a)和燃料元件(b)的温度分布

Fig. 3 Temperature distributions of transportation container (a) and fuel element (b) under sunshine condition

同理,由于容器所运输的燃料为新燃料,释放的热量几乎为0,因此在稳态条件下,无太阳暴晒,环境温度为一40℃,整个容器各组成部分的温度均为-40℃。

以上设计结果远低于无太阳暴晒下的热工设计准则中运输容器任何容易接近的表面不超过50℃,运输容器的设计适应环境温度为-40~38℃,满足设计要求。

4.3 火灾情况下的运输容器

火灾情况下运输容器热工设计的计算结果示于图4。由图4可见:在时间为1800s时,箱体温度达到最高值795.6℃,隔热材料温度达到最高值795.5℃;在时间为2005s时,软木板温度达到最高值462.7℃;在时间为5540s时,缓冲材料温度达到最高值163.4℃;在时间为8095s时,燃料芯体包壳的温度达到了最高值124.7℃,低于准则中燃料芯体包壳温度不得超过400℃,不会破坏燃料元件。

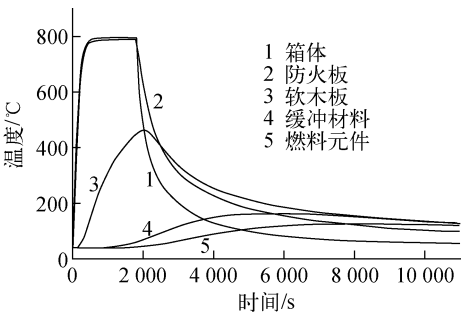


图4 火灾条件下运输容器各部件温度的分布
Fig. 4 Temperature distribution of transportation container under fire condition

5 耐热验证试验

5.1 试验条件

试验容器采用原型容器,即新燃料元件运输容器。试验初始温度为环境温度,介于一40~38℃之间。容器为常压容器,试验前的容器内、外压强为环境大气压。容器为新制造的容器,经过贯穿试验、自由下落试验Ⅰ、自由下落试验Ⅱ和自由下落试验Ⅲ,开展耐热试验。

图5、6示出耐热试验原理和容器在加热炉中的位置。耐热试验选用大连热处理有限公司的加热炉。

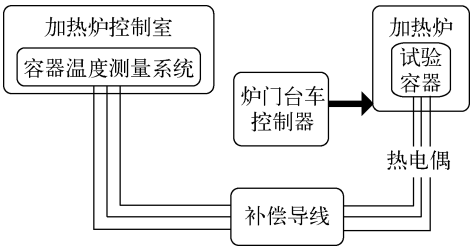


图5 试验原理
Fig. 5 Experimental principle

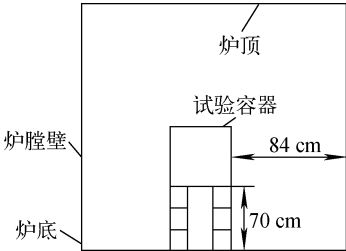


图6 容器位置
Fig. 6 Container's location

通过在容器周围布置的 8 副热电偶来测量炉温,采用温度记录仪记录容器周围的环境温度,记录的数据将实时保存在计算机中。试验持续 30 min,在 30 min 内,加热炉的平均温度应超过 810 ℃。加热炉内壁面为保温棉,发射率大于 0.9,燃料为柴油,满足法规中的相应要求。

5.2 试验程序

在耐热试验前,先调试好加热炉、防护屏和台车,将容器固定于台车上并推入炉膛,关闭炉门,炉温超过 800 ℃ 开始计时,监测各测量点的温度。加热时间达 30 min,打开炉门,移出台车,关闭加热炉。

停止加热后继续测量,直到所有测量点的温度下降,不采用人工手段冷却容器,燃烧的物质任其自燃至熄灭。通过对以上试验方法和程序的分析表明,该试验方法完全符合 GB 11806—2004。

5.3 温度测点布置

在运输容器中布置了 2 根原厂、原工艺的燃料元件(模拟元件),其余 6 根元件采用质量及质心分布一致的配重元件。模拟元件除采用的贫铀与真实元件不同外,其余结构、尺寸、加工工艺、材料等均与真实元件相同。为监测 2 根模拟元件在耐热试验中温度的变化,在其上布置了 4 个直径为 1 mm 的铠装热电偶,实时监测燃料元件表面温度的变化。模拟元件在容器中的位置示于图 7,其中模拟元件在 D、G 位置。

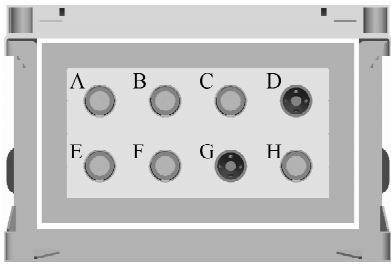


图 7 模拟元件的位置

Fig. 7 Location of simulation element

5.4 试验结果

耐热试验验收准则为:在整个耐热试验过程中,燃料元件的包壳温度不超过 400 ℃。

试验过程中炉温试验曲线示于图 8。图 8 中,加热炉温度变化共分为 6 个区间:A,加热炉升温;B,加热炉保温;C,容器入炉;D,关炉门

升温;E,保温 30 min;F,容器出炉冷却。由图 8 可知,试验期间平均温度超过 810 ℃,满足法规要求。

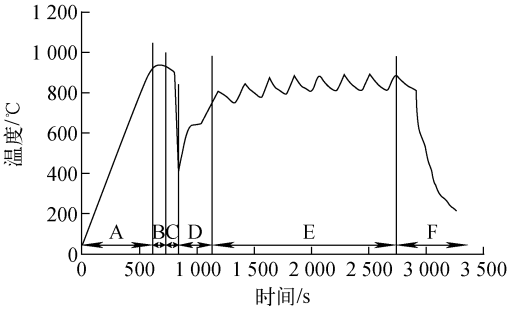


图 8 炉温试验曲线

Fig. 8 Experimental curve of oven temperature

运输容器各层温度随时间的变化示于图 9。由图 9 可看出,各部分温度随时间连续变化,规律性好,尤其是元件处温度突降,说明热保护措施对提高容器的耐火能力作用明显,该试验曲线与国外同类运输容器的试验曲线非常相似。容器推出炉腔后 75 min,元件表面温度达到最大值 93.4 ℃,远低于准则温度 400 ℃。从试验结果看容器是安全的,有较大的安全裕度。

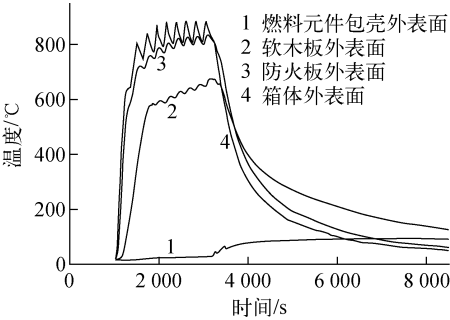


图 9 运输容器各层温度随时间的变化

Fig. 9 Temperature of each layer for container vs. time

5.5 结果对比

不同位置外表面温度随时间的变化示于图 10。由图 10 可见,各部分温度与计算结果趋势符合得很好,元件包壳最大温度计算值高于试验值,证明热工设计是保守的。由于加热炉喷油频率较低,造成容器各结构材料温度在

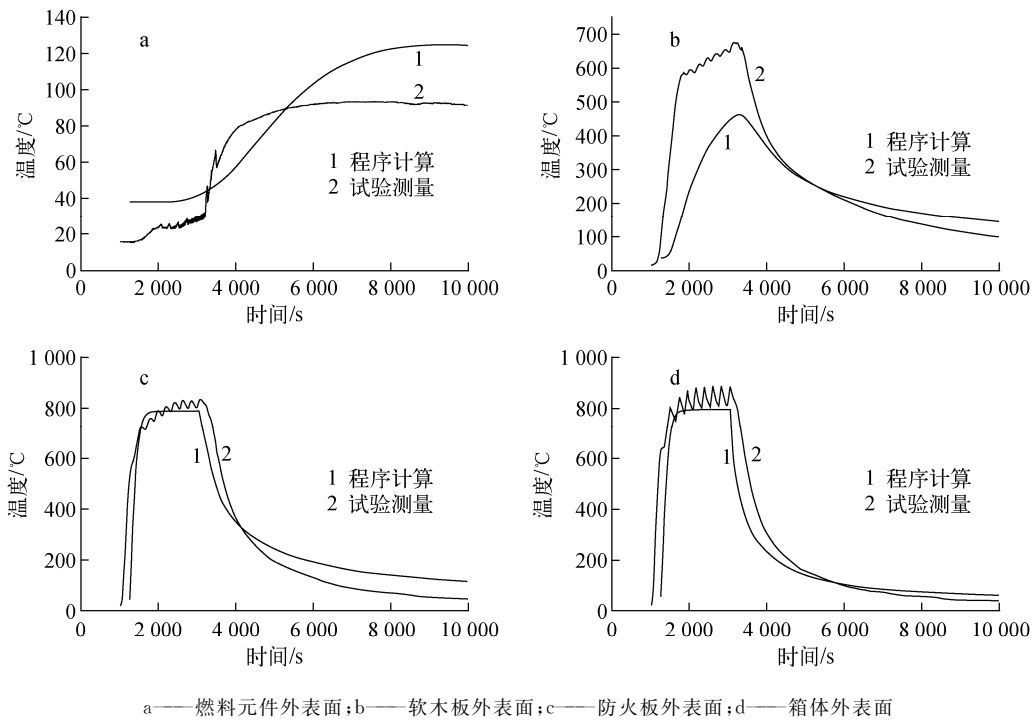


Fig. 10 Temperature vs. time at different locations

30 min 内出现波动,板缝的对称布置造成了烟气进入容器内腔,形成一定的对流换热作用,使得升温与降温的速度均高于理论计算结果。

5.6 试验装置的误差分析

热电偶校验误差 $\Delta t_1 = \pm 3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,自动平衡记录仪校验误差 $\Delta t_2 = \pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此总测量误差为:

$$\Delta t = \pm \sqrt{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2} = \pm 5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

可见,考虑试验中系统的测量误差后,试验结果仍能满足设计准则的要求。

6 结论

本文针对新燃料元件运输容器的结构和运行工况建立了数学和物理模型,并对计算结果的合理性和适用性进行了分析,表明采用运输容器运输新燃料元件,在正常运输工况和事故运输工况下能满足法规中相应的规定。

在耐热试验中,运输容器经 30 min 平均炉温大于 810 °C 的炉内加热后,运输容器在无任何人工冷却的条件下,燃料元件的包壳最高温度为 93.4 °C,远低于设计准则要求的 400 °C,燃料元件及容器各部分的温度随时间的变化趋势与理论计算结果符合较好,证明了热工分析的合理性和保守性。

热工计算和耐热试验结果表明,采用该运输容器运输 493 反应堆的新燃料元件,完全满足 GB 11806—2004 的要求。

参考文献:

[1] 孙喜云,许明霞,王维善,等. GB 11806—2004 放射性物质安全运输规程[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[2] 王庆,谢亮,姚志平,等. RY-IA 型乏燃料容器设计审批申请书(安全分析报告)[R]. 北京:核工业第二研究设计院,2003.