

基于CFD的放射性废物运输容器热工分析

李华升¹, 靳超然², 何炳希², 翟吉超², 管星², 李万利², 李树莹³

¹国核铀业发展有限责任公司, 北京

²国电投核安科技(重庆)有限公司, 重庆

³上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海

收稿日期: 2024年9月29日; 录用日期: 2024年11月13日; 发布日期: 2024年11月22日

摘要

高密度聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)屏蔽运输容器的开发, 需要满足《放射性物品安全运输规程》(GB 11806-2019)的要求, 进行热工计算分析。本文对HDPE-HIC的屏蔽运输容器建立了三维模型, 通过STAR-CCM软件对正常运输工况和事故运输工况屏蔽运输容器的传热特性进行数值模拟分析, 得到了屏蔽运输容器的温度分布。结果表明, 容器能够保持完好的包容性和屏蔽性, 满足GB 11806-2019要求, 可为后续验证试验提供支持。

关键词

计算流体动力学, 运输容器, 热工分析

Heat Transfer Simulation of Radioactive Waste Transport Container Based on CFD

Huasheng Li¹, Chaoran Jin², Bingxi He², Jichao Zhai², Xing Guan², Wanli Li², Shuying Li³

¹State Nuclear Uranium Resource Development Company, Ltd., Beijing

²SPIC HE-AN Technology (Chongqing) Co., Ltd., Chongqing

³Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: Sep. 29th, 2024; accepted: Nov. 13th, 2024; published: Nov. 22nd, 2024

Abstract

The development of high-density polyethylene high integral container (HDPE-HIC) shielded transport container needs to meet the requirements of the "regulations for the safe transport of radioactive material" (GB 11806-2019) and carry out thermal calculation analysis. In this paper, a three-dimensional model of HDPE-HIC shielded transport vessel is established. STAR-CCM software is used to

文章引用: 李华升, 靳超然, 何炳希, 翟吉超, 管星, 李万利, 李树莹. 基于 CFD 的放射性废物运输容器热工分析[J]. 应用物理, 2024, 14(11): 721-729. DOI: 10.12677/app.2024.1411077

numerically simulate the heat transfer characteristics of the shielded transport vessel under normal transport conditions and accident transport conditions, and the temperature distribution of the shielded transport vessel is obtained. The results show that the container can maintain its integrity and shielding properties, meet the requirements of “regulations for the safe transport of radioactive material” (GB 11806-2019), and provide support for subsequent verification tests.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, Transport Container, Heat Transfer Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在核电厂生产过程中,不可避免地会产生大量放射性废物,高整体容器(HIC)作为一种废物储存容器,具有无需对放射性废物进行固化即可处置的特点,有利于废物的最小化。高整体容器的使用寿命预计在300年以上,在使用寿命内可以对其中盛装的低、中水平放射性固体废物起到有效的包容。高整体容器按其材料可分为混凝土高整体容器、高密度聚乙烯高整体容器和球墨铸铁高整体容器[1]。高密度聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)在美国具有良好的工程应用业绩,我国阳江核电、海阳核电引进了HDPE-HIC用于处理废树脂和废过滤器芯[2]。盛装放射性废物的HDPE-HIC在核电厂暂存后,需要运输到处置场做最终处置,因此需要开发一套HDPE-HIC屏蔽运输容器用于厂外运输。运输容器的开发需要满足《放射性物品安全运输规程》(GB 11806-2019)的相关规定,开展容器正常运输和事故运输工况下的热工分析,以保证容器在运输过程的安全性。

我国研究人员利用数值模拟的方法对放射性物品运输容器进行热工分析,为后续容器设计提供支撑。祝玲琳[3]等采用FLUENT软件对乏燃料干法转运容器铅层和结构壳体之间的空气间隙所产生的接触热阻的影响热工模拟,结果表明随着间隙的增大,会造成温差的增大,温差过大会导致铅层过热而失去屏蔽功能。蔡创广[4]采用CFD方法对NUHOMS卧式乏燃料干法贮存系统混凝土模块贮存工况进行模拟分析,结果表明混凝土模块在正常和各事故工况下混凝土及各部件温度均不超过法规标准限值,符合热工安全的评估标准。郭春秋[5]等对新燃料元件运输容器进行了热工计算,采用FLUENT软件得出了有太阳暴晒、无太阳暴晒、火灾情况下运输容器和燃料元件的温度分布,结果远小于热工设计准则中的限制要求,满足设计要求。刘杨[6]等对高温气冷堆燃料运输容器进行了热工计算分析,采用CFX软件模拟了高温气冷堆燃料运输容器内外热传导、热对流和热辐射等传热方式,得到了正常运输工况和事故运输工况下容器的温度分布,模拟结果表明,容器的热工设计满足相关法规要求。张欣悦[7]等对乏燃料运输容器进行了热工计算分析,建立了三维模型,利用STAR-CCM+对模型开展热工分析,得到了不同冷、热态工况下燃料包壳的最大温差。

本文使用STAR-CCM计算软件对HDPE-HIC屏蔽运输容器正常运输和事故运输工况下的温度分布进行分析,为容器顺利通过验证试验提供保障。

2. 容器结构概述

HDPE-HIC运输容器结构如图1所示。主要结构由上下减震器、筒体、筒盖、筒底等组成。

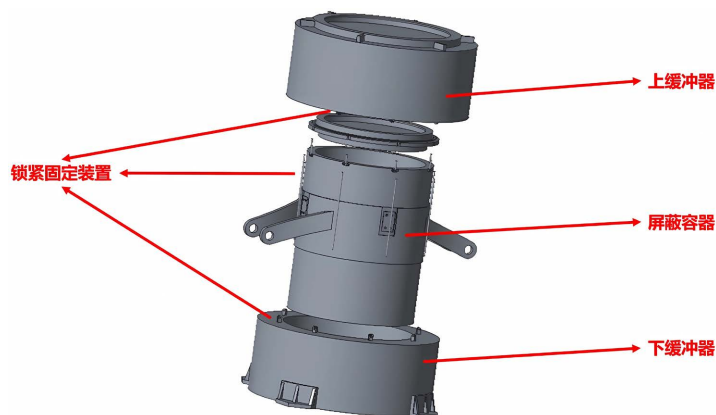


Figure 1. Structure diagram of HDPE-HIC
图 1. HDPE-HIC 结构示意图

3. 法规要求

3.1. 分析计算

本文采用计算流体力学方法对 HDPE-HIC 运输容器的流动传热特性进行数值模拟分析。首先采用 NX 软件对几何模型进行处理, 然后采用 STAR-CCM 进行计算域的网格划分, 进行前处理计算设置、计算求解以及计算后处理等工作, 获得运输容器的温度场分布等数据。

3.2. 几何建模

首先并不影响模拟结果的前提下, 对计算模型进行简化, 忽略吊耳、螺栓等小的结构。在事故运输工况下, 假设跌落造成的减震器变形均匀, 且选择最大变形量。由于 HDPE-HIC 运输容器为竖直转运, 且具有对称性, 因此计算选取其 1/4 对称模型开展, 计算模型包含上下减震器、筒体和顶盖以及防尘盖和筒盖之间的空气域。图 2 和图 3 分别为正常运输工况下和事故运输工况下 HDPE-HIC 运输容器计算模型。

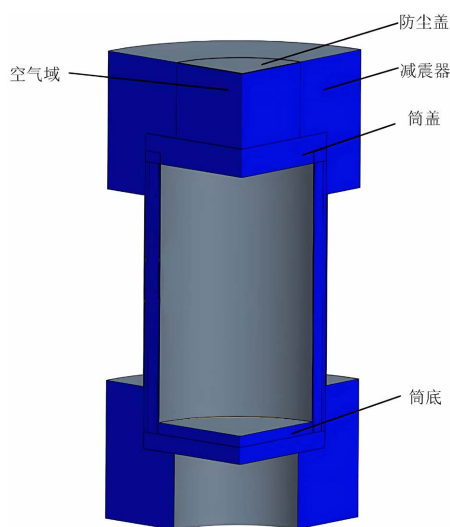


Figure 2. Normal transport condition calculation model
图 2. 正常运输工况计算模型

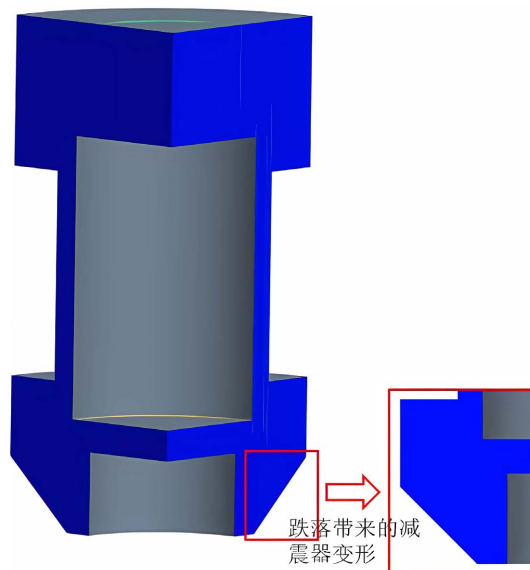


Figure 3. Accident transportation condition calculation model
图 3. 事故运输工况计算模型

3.3. 网格划分及无关性验证

图 4 和图 5 分别为正常运输工况下和事故运输工况下 HDPE-HIC 运输容器模型网格划分情况，整体采用多面体网格与棱柱层网格相结合的方式划分，采用不同数量的网格进行模拟计算，通过对比温度变化来进行网格无关性验证，最终选用正常运输工况网格总数量约为 484 万，事故运输工况所用网格总数量为 473 万。

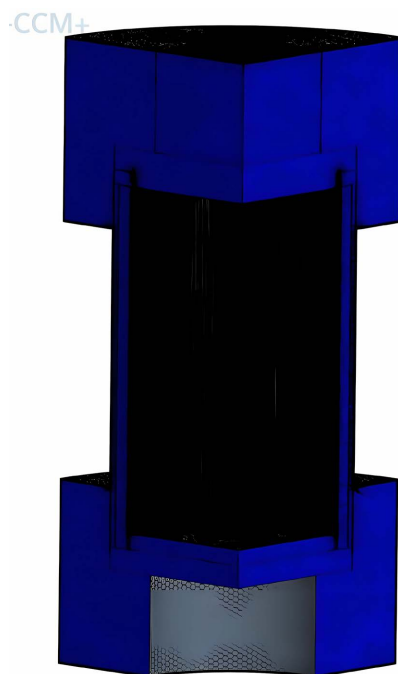


Figure 4. Normal transport condition calculation model grid
图 4. 正常运输工况计算模型网格

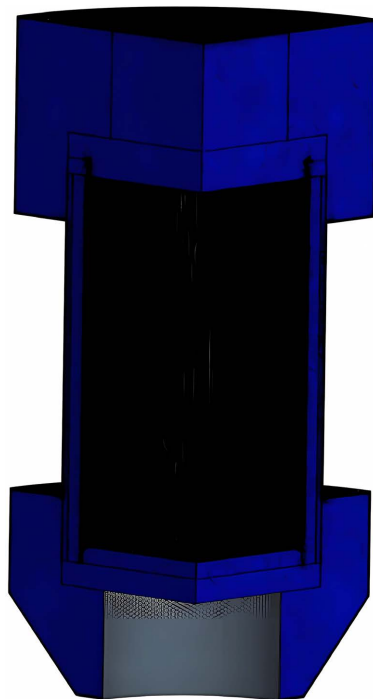


Figure 5. Accident transportation condition calculation model grid
图 5. 事故运输工况计算模型网格

3.4. 物性参数

HDPE-HIC 运输容器上减震器防尘盖和筒盖之间的空腔设置为常压的空气，减震器材料设置为聚氨酯泡沫，筒体、筒底、筒盖材料设置为 SA516。

3.5. 边界条件

计算考虑防尘盖和筒盖之间的热辐射和空气的自然对流，辐射模型选用 DO 模型，计算中添加重力项，湍流模型选用 SST $k-\omega$ 模型。考虑到结构的对称性，将计算模型的对称面设置为对称边界。将流体和固体间的交界面设置为无滑移流固热耦合边界，将固体与固体间的交界面设置为耦合传热边界。

根据《放射性物品安全运输规程》(GB 11806-2019)规定，针对 B(U)型货包的设计应满足在正常运输工况和事故运输工况下，其包容性和屏蔽性仍保持完好。正常运输工况和事故运输工况条件如表 1 所示。

Table 1. Description of operating conditions
表 1. 工况说明

工况	工况条件
正常运输工况	环境温度为 38℃，考虑太阳暴晒， 太阳暴晒数据依据表 3 确定
事故运输工况	800℃火烧 0.5 小时

正常运输工况下，将模型外表面设置为热流密度边界条件，线性插值表见表 2。模型外表面与环境之间的辐射换热及太阳辐射载荷，见表 3 暴晒数据。事故运输工况下，模型所有外表面设置为定壁温边界，壁面温度为 800℃。

Table 2. Table of natural convection heat flux density differences**表 2.** 自然对流换热热流密度差值表

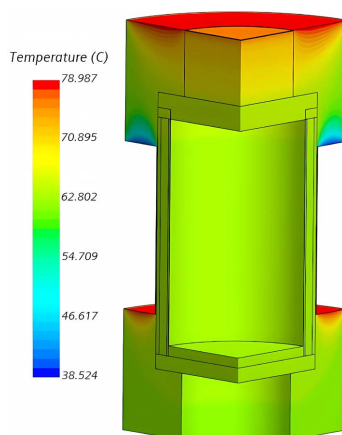
温度(K)	热流(W/m ²)
313.15	3.21
323.15	34.81
333.15	77.25
343.15	125.95
353.15	179.09
363.15	235.63
373.15	294.87
383.15	356.31
393.15	419.58
403.15	484.36
413.15	550.44
423.15	617.62
433.15	685.72
443.15	754.65
453.15	824.23
463.15	894.39
473.15	965.07

Table 3. Sunshine data**表 3.** 曝晒数据

状态	表面形状和位置	每天暴晒 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	其他朝下(非水平)表面	200
5	所有其他表面	400

4. 计算结果

在正常运输工况下，HDPE-HIC 运输容器温度分布如图 6 所示，由于容器采用直立的方式运输，上下减震器水平朝上表面收到太阳辐射较大，温度较高，最高温度不超过 79℃；容器上减震器朝下表面由于未收到太阳辐射，温度较低，接近环境温度。由图 7 可以看出在上部空气域均有微弱的自然对流发生。

**Figure 6.** Temperature distribution under normal transportation condition**图 6.** 正常运输工况温度分布云图

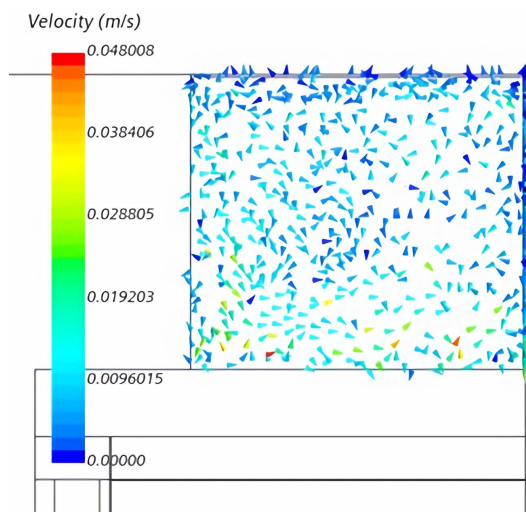


Figure 7. The velocity vector diagram of the upper air domain under normal transportation condition

图 7. 正常运输工况上部空气域速度矢量图

在事故运输工况下，对 HDPE-HIC 运输容器不同时刻下的温度分布结果进行分析。图 8 和图 9 所示为 HDPE-HIC 运输容器火烧 300 s 和火烧 1800 s 的温度分布。由温度分布云图可以看出随着时间的推移 HDPE-HIC 运输容器内部各组件温度逐渐升高，筒体的中间段由于没有减震器的阻挡，温度上升较为明显，两端由于被减震器包裹阻挡了热量的传递，温度上升较小，一直到火烧结束减震器中间大部分位置温度依旧没有显著变化。图 10 为 $t = 1800$ s 时刻顶部空气域速度矢量图，可见在火烧工况下，流体域自然对流有所增强。

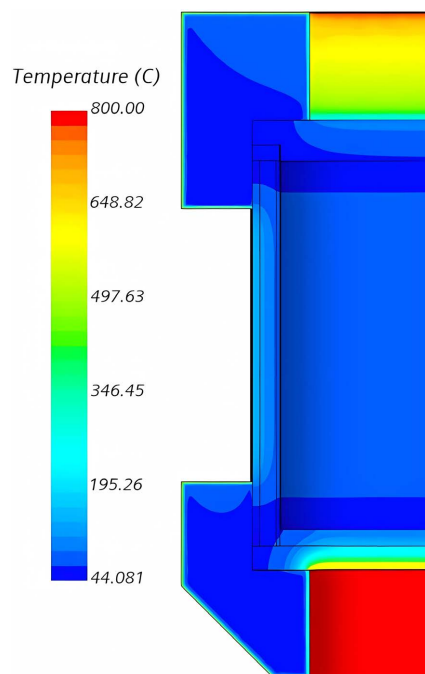


Figure 8. Temperature distribution of $t = 300$ s under accident transportation condition

图 8. 事故运输工况 $t = 300$ s 温度分布云图

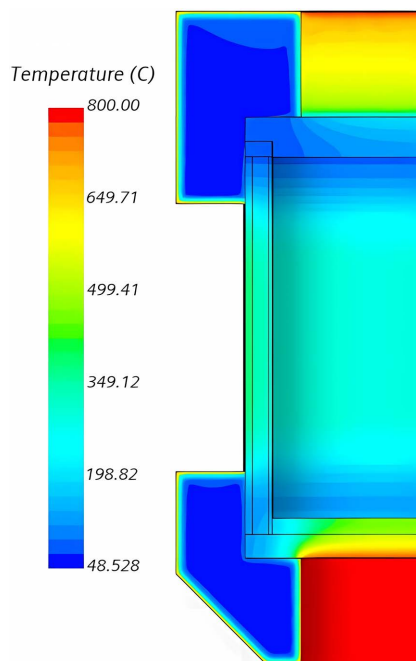


Figure 9. Temperature distribution of $t = 1800$ s under accident transportation condition
图 9. 事故运输工况 $t = 1800$ s 温度分布云图

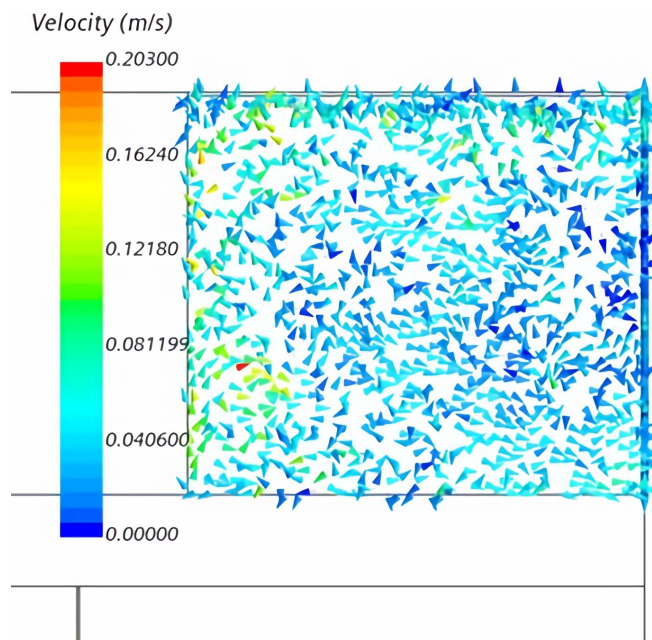


Figure 10. The velocity vector diagram of the upper air domain under accident transportation condition
图 10. 事故运输工况上部空气域速度矢量图

5. 结论

本文针对 HDPE-HIC 屏蔽运输容器建立了模型，按照 GB 11806-2019 要求，使用 STAR-CCM 软件对容器进行了热工分析，得到了正常运输工况和事故运输工况下容器的温度分布。在正常运输工况下，HDPE-HIC 运输容器上下减震器水平朝上表面温升较高，容器上减震器水平朝下表面温升较小，接近环

境温度。在事故运输工况下，筒体中间段温升较为明显，两端温升较小。通过数值模拟对 HDPE-HIC 屏蔽运输容器进行热工分析，容器能够保持完好的包容性和屏蔽性，满足 GB 11806-2019 要求，可为后续验证试验提供支持。

基金项目

聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)处置方案及运输容器设计研究(169001JX0120230008)。

参考文献

- [1] 杨彬, 方祥洪, 马若霞, 王棋赟. 高密度聚乙烯高整体容器(HIC)处理技术研究[J]. 核科学与技术, 2016, 4(4): 99-102.
- [2] 姚勇, 王彩霞, 万皓宇, 周若凡, 陈勇. 交联聚乙烯 HIC 在美国处置场应用实践及对我国的启示[J]. 辐射防护, 2021, 41(5): 453-458.
- [3] 祝玲琳, 唐琼辉, 陈柳彤. 气隙和接触热阻对乏燃料干法转运容器热工安全影响研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(6): 230-236.
- [4] 蔡创广. 乏燃料卧式干法贮存热工安全数值模拟与分析[D]: [硕士学位论文]. 广州: 中山大学, 2019.
- [5] 郭春秋, 邹佳讯, 衣大勇, 张金山. 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.
- [6] 刘杨, 汪俊. 高温气冷堆燃料运输容器热工计算分析[J]. 核动力工程, 2017, 38(5): 160-163.
- [7] 张欣悦, 周有新, 商超皓, 毛玉龙. 高燃耗乏燃料包壳延性评价热工分析方法研究[J]. 核科学与技术, 2023, 11(3): 260-270.