

ICS 27.120.20

F 65

备案号: 59655—2017

NB

中 华 人 民 共 和 国 能 源 行 业 标 准

NB/T 20462—2017

压水堆乏燃料干法贮存设施热工分析

**Thermal analysis of spent fuel dry storage installation
for pressurized water reactor**

2017 - 04 - 01 发布

2017 - 10 - 01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 热工分析要求 2

 4.1 一般要求 2

 4.2 分析工况 2

 4.3 热工限值 2

 4.4 热工分析输入 3

 4.5 密封容器压力计算 3

5 验证 4

附录 A（资料性附录） 立式混凝土筒仓贮存容器热工分析 5

附录 B（资料性附录） 压水堆乏燃料干法贮存设施热工分析工况 12

附录 C（资料性附录） 燃料组件等效导热系数的计算 14

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由能源行业核电标准化技术委员会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：中广核工程有限公司。

本标准参加起草单位：上海核工程研究设计院。

本标准主要起草人：黄甲、唐琼辉、曹雷生、唐邵华、廖蓉国、戚小英、于富军、倪陈宵。

压水堆乏燃料干法贮存设施热工分析

1 范围

本标准规定了压水堆乏燃料干法贮存设施热工限值、工况分类、分析方法等。

本标准适用于压水堆乏燃料干法贮存设施的热工分析,其他堆型的乏燃料干法贮存设施的热工分析也可参考。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 11806 放射性物质安全运输规程

NB/T 20461 压水堆乏燃料干法贮存设施设计准则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

乏燃料 **spent fuel**

在乏燃料贮存设施中进行操作、贮存、回取和监测活动时不再拆开的一组燃料元件。

注:可包括控制棒组件等相关组件。

3.2

干法贮存 **dry storage**

将乏燃料贮存在密封空气或惰性气体环境中的贮存方式。

3.3

乏燃料干法贮存设施 **spent fuel dry storage installation**

乏燃料自反应堆乏燃料水池移出后,到进行后处理或作为放射性废物处理前这段时间内,用作乏燃料干法贮存的一种中间贮存设施。

3.4

密封容器 **sealed container**

一种用于装载乏燃料并提供放射性物质包容功能的容器。

3.5

贮存容器 **silo/cask**

地面式轻便或非轻便结构,含有一个或多个单独贮存腔。

注:每个贮存腔能容纳一个或多个燃料组件。屏蔽主要由钢、铸铁或混凝土等结构材料提供,通过结构屏蔽材料至大气的换热实现排热。

3.6

贮存室 **vault**

一种地上的或地下的钢筋混凝土建筑物,内有贮存腔阵列。每个贮存腔可容纳一个或多个燃料元件。贮存室的外部构筑物提供屏蔽。热量通常由贮存腔外部上空的循环空气或气体带出;随后或直接排至外部大气,或通过二次排热系统散失。

4 热工分析要求

4.1 一般要求

4.1.1 热工分析应说明乏燃料干法贮存设施的排热能力能够使乏燃料包壳峰值温度低于设计准则所规定的限值,并保证设施的热工参数不超过限值。

4.1.2 分析论证的方法包括试验以及数值分析,或两者并用。立式混凝土筒仓式贮存容器热工计算可参考附录 A。

4.2 分析工况

4.2.1 乏燃料干法贮存设施应能承受 I 类、II 类、III 类、IV 类工况下的热负荷。I 类、II 类、III 类、IV 类工况的定义以及对应关系见 NB/T 20461 中第 6 章。

4.2.2 热工分析所选取的工况以及采用的分析方法可参见附录 B。

4.3 热工限值

4.3.1 燃料包壳

4.3.1.1 在长期贮存下,蠕变是导致乏燃料包壳变形的主要因素。乏燃料包壳上较高的温度、压差及相应的环向应力将导致乏燃料包壳发生持续永久蠕变。

4.3.1.2 蠕变所引起的变形会随着时间的推移缓慢发展并使乏燃料棒内的压力降低,乏燃料包壳温度降低也会使环向应力减小,从而减缓蠕变的速率。由于乏燃料衰变热随时间减小,在干法贮存后期,进一步的蠕变变形将微乎其微。

4.3.1.3 为了保证乏燃料组件的结构完整性,确保蠕变不会导致包壳破损,对于锆合金包壳,应满足以下温度限值的要求:

- a) I 类工况下,对所有燃耗的乏燃料,包壳峰值温度不得超过 400℃;
- b) I 类工况的乏燃料短期装载和贮存操作(包括干燥、填充惰性气体以及容器转运)过程中,可能出现反复的热循环(反复加热/冷却),热循环的次数应小于 10 次,且每次的热循环周期中包壳温度变化幅值应低于 65℃;
- c) II 类、III 类、IV 类工况下,对所有燃耗的乏燃料,包壳峰值温度不得超过 570℃。

注:对于低燃耗燃料(指燃耗低于 45 GWd/tU 的燃料),可对 I 类工况的乏燃料短期装载和贮存操作(包括干燥、填充惰性气体及容器转运)过程采用更高的温度限值,只要分析人员证明:对于调整后的温度限值,采用最佳估算的包壳环向应力等于或小于 90 MPa。如果分析人员能够证明,在 570℃ 的温度条件下采用最佳估算的包壳环向应力小于或等于 90 MPa,则 570℃ 是最高温度限值。对于更高的温度限值,分析人员应提供合理充分的理由,并经过国家核安全部门的认可。

4.3.2 其他材料

本条规定了除乏燃料包壳以外的其他材料确定温度限值的基本要求。已有标准规定的材料可按照标准选取温度限值。对于无标准规定的材料,确定温度限值时应考虑以下要求:

- a) 对材料的结构强度造成影响时的温度,以及处于该温度下对结构强度造成影响所需的时间;

- b) 材料发生化学反应的温度，并对屏蔽、次临界或结构完整性造成的影响；
- c) 材料温度限值的不确定性而提供的保守裕量；
- d) 材料在 I 类、II 类、III 类、IV 类工况下可能达到的温度。

4.4 热工分析输入

4.4.1 乏燃料衰变热

4.4.1.1 计算乏燃料衰变热时，需考虑燃料初始富集度、燃耗深度、卸料后冷却时间及反应堆运行过程的影响。

4.4.1.2 乏燃料产生的衰变热位于乏燃料组件的有效燃料区内（即活性段区域），且应保守考虑衰变热功率沿燃料组件轴向的分布。

4.4.2 环境温度

热工分析时所采用的环境温度应根据乏燃料干法贮存设施所在厂址的气象条件进行选取。

4.4.3 环境压力

热工分析时所采用的环境压力应根据乏燃料干法贮存设施所在厂址的气象条件进行选取。随着海拔升高，大气压逐渐降低。对于依靠自然对流冷却的乏燃料干法贮存设施，气压降低会减弱空气自然对流的冷却效果。热工分析时应保守考虑厂址的海拔高度对环境压力的影响。

4.4.4 太阳辐射

4.4.4.1 乏燃料干法贮存容器采用露天放置时，应考虑太阳辐射的影响。太阳辐射的强度应根据干法贮存容器所在厂址的气象条件进行选取。在气象记录缺失时，太阳辐射强度可参考 GB 11806 的要求。

4.4.4.2 由于干法贮存容器的质量和热容量较大，太阳辐射可视为平均照射值。可基于全天 12h 的太阳辐射，在 24h 昼夜的基础上，计算出平均太阳辐射值。即将每天曝晒 12h 的曝晒量 (W/m^2) 除以 2，获得 24h 内的平均太阳辐射值。

4.4.5 材料热物性

4.4.5.1 燃料组件内的传热可采用等效导热系数的方法进行简化处理，但需证明其保守性。等效导热系数的计算参见附录 C。

4.4.5.2 对于材料参数及性能随温度改变而变化的部件，应评估干法贮存容器各部件所出现的温度最大值和最小值，并根据温度范围选取材料热物性。

4.4.5.3 对于混凝土及中子屏蔽材料，热工计算时应考虑材料配方和工艺对热物性的影响。

4.5 密封容器压力计算

热工分析需要计算密封容器内的气体压力，以保证其内压在各类工况下均满足设计限值。压力计算应遵循以下要求：

- a) 压力计算可使用理想气体状态方程，并对容器腔内各气体成分的分压进行求和；
- b) 压力计算应考虑容器腔的自由体积、容器腔内填充气体量（摩尔）及从破损的燃料棒中释放出的气体量；
- c) 破损的燃料棒中所释放出的填充气体和裂变气体会使容器腔内的压力增大，I 类工况下应假设燃料棒的破损率为 1%，II 类、III 类工况下应假设燃料棒的破损率为 10%，IV 类工况下应假设燃料棒的破损率为 100%；

- d) 应假设破损的燃料棒内 100%填充气体和 30%主要的裂变气体释放到容器腔内;
- e) 压力计算应考虑密封容器内的温度分布。

5 验证

对于压水堆乏燃料干法贮存设施,可采用试验的方法对热工分析的结果进行验证。热工试验可遵循以下要求:

- a) 压水堆乏燃料干法贮存设施首批建造时,可在贮存设施内设置若干温度测点,温度测量值用于校正热工分析的计算模型和方法;
- b) 采用缩比模型进行试验时,应保证几何相似;
- c) 试验场地的环境温度和环境压力应与热工分析采用的输入保持一致,如果环境温度与环境压力存在差异,应说明此差异对试验结果的影响;
- d) 如果乏燃料贮存腔或贮存容器内填充了惰性气体,则试验中应填充同一种气体,并对压力值进行测量;
- e) 温度测点应涵盖燃料组件中心区域、中子吸收体、贮存容器内壁面、贮存容器外壁面、混凝土筒仓内壁面、混凝土筒仓外表面、混凝土筒仓底部和顶盖等关键位置;
- f) 编制试验大纲,试验大纲的内容应包括试验方案、试验人员、试验步骤、试验要求和评定标准。

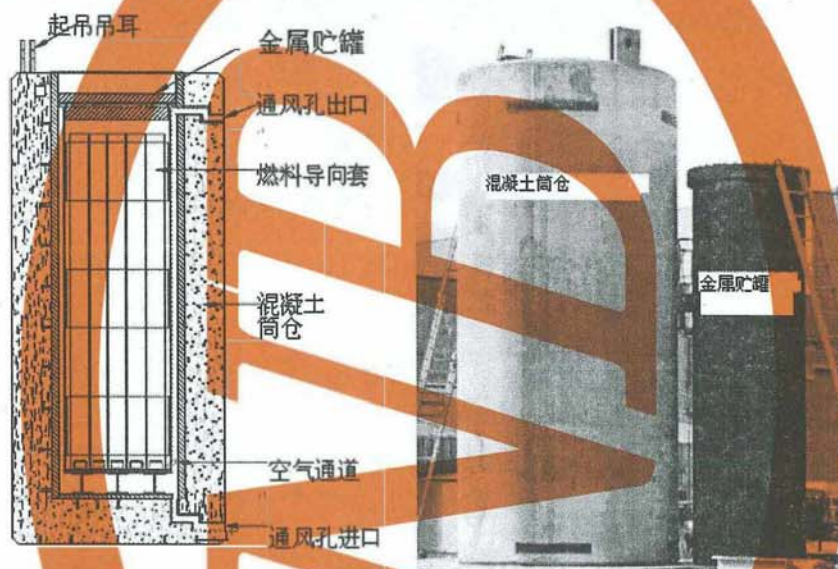
附录 A

(资料性附录)

立式混凝土筒仓贮存容器热工分析

A.1 概述

本附录选取立式混凝土筒仓贮存容器为分析对象,采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, 简称CFD)进行热工分析。图A.1为立式混凝土筒仓贮存容器的结构示意图,其中金属密封容器内填充氦气,混凝土筒仓和金属密封容器的间隙为自然对流的空气通道,空气由混凝土筒仓底部的进风口流入,加热后从上部的出口风流出,形成自然对流。



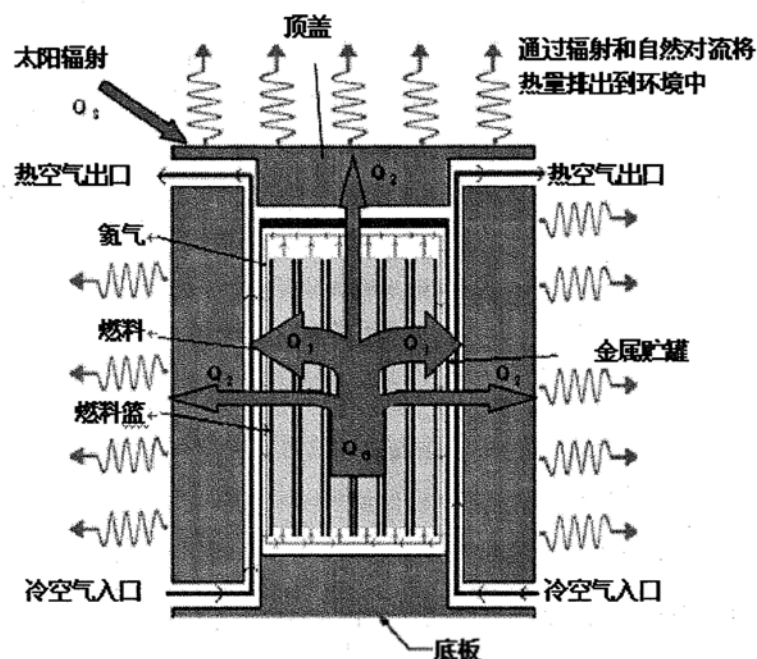
图A.1 立式混凝土筒仓贮存容器结构示意图

A.2 传热机制

乏燃料干法贮存设施多采用不锈钢金属贮罐用于贮存乏燃料组件,外部通过金属或者混凝土提供放射性屏蔽,内部则通过惰性气体、空气或二氧化碳等包围并冷却乏燃料组件。

对于乏燃料干法贮存设施,热量通过燃料组件及内部的部件传递到表面,再经自然对流或强制对流排放至外部环境。热工分析需要考虑辐射换热、对流换热以及热传导。

如图A.2所示,对于立式混凝土筒仓贮存容器,需要排出的总热量包括乏燃料组件的衰变热 Q_d 和太阳辐射到贮存容器的热量 Q_s 。热量传递主要通过以下两个途径完成,其中最主要的途径是由进风口流入、从出风口流出的空气(烟囱效应)带走的热量 Q_1 ;另外一部分热量通过辐射和热传导传递至混凝土筒仓外侧壁和顶盖外表面,通过与环境的对流和辐射换热排出热量 Q_2 。这二个传热途径在热工分析中均需要加以考虑。



图A.2 立式混凝土筒仓贮存容器散热机制示意图

A.3 几何模型

几何模型是热工分析的基本输入，几何建模中应遵循以下要求：

- a) 采用正确的坐标和单位制;
- b) 选取合理的计算区域, 选取的范围必须涵盖分析对象和相应的流动区域;
- c) 对几何结构进行简化时, 不应改变原有的传热过程和传热机制, 并确保结构简化对于热工分析是保守的;
- d) 对于燃料组件, 通常可不建立包括燃料棒、控制棒导向管和中子注量率测量导管的详细三维模型, 而是将整个燃料组件采用固体或多孔介质进行等效处理。燃料组件区域内的热传导和热辐射采用等效导热系数进行等效处理, 详见附录 C;
- e) 对于立式混凝土筒仓贮存容器, 混凝土筒仓外表面的钢衬结构、燃料篮格架底部的支撑结构对热传导有显著影响, 几何建模时应加以考虑;
- f) 热工分析时应考虑密封容器内各部件之间的间隙, 间隙的存在会产生气隙热阻, 阻碍热传导并导致温度上升;
- g) 几何结构对称时, 可选取 1/2 或 1/4 模型进行对称建模。

A.4 计算网格

CFD分析时流场被划分为大量网格,通过在网格内求解流体的控制方程,从而获得整个流场的密度、压力、速度和温度分布。

以立式混凝土筒仓贮存容器为例,混凝土筒仓和金属贮罐间的空气流道域和金属贮罐内的密闭氦气域内存在自然对流,边界层网格对计算结果的影响较大,边界层网格的无量纲壁面距离 y^+ 应根据所使用的湍流模型来确定(如 $k-\varepsilon$ 模型建议 y^+ 在30~100之间)。网格单元的数量应确保能够获得计算区域内流动的准确信息,并进行网格敏感性分析以保证计算结果的可靠性。

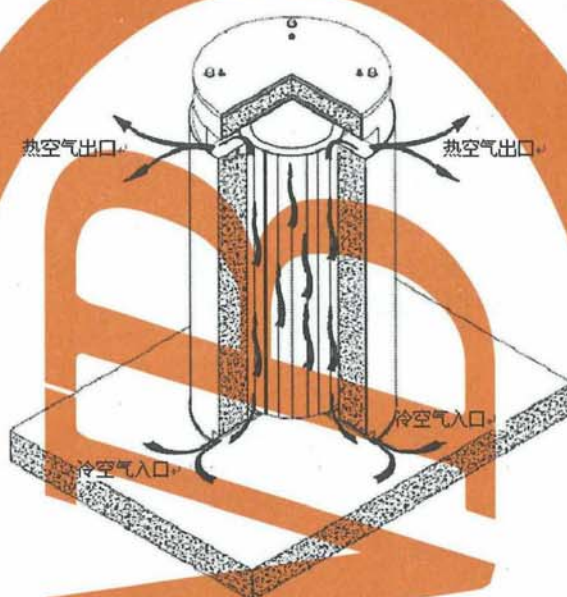
A.5 物理模型

A.5.1 计算域

A.5.1.1 以立式混凝土筒仓贮存容器为例，可将混凝土筒仓和金属贮罐之间的空气流道（以下简称空气域，见图A.3）和金属贮罐内的密闭氦气域（以下简称氦气域，见图A.4）设置为独立的流体域。

A.5.1.2 空气域和氦气域为浮力驱动的自然对流，由于温度变化较大，建议采用理想气体状态方程描述空气和氦气的热力学状态。热工分析时应选取合理的参考压力和参考密度，以减少数值计算的误差。

A.5.1.3 对于燃料组件区域，采用多孔介质进行等效处理时，需要设置合理的孔隙率、渗透率和阻力系数，用于计算氦气流经乏燃料组件时的压降 ΔP 。



图A.3 空气域的自然对流



图A.4 氦气域的自然循环

A.5.2 流动状态

由于乏燃料组件衰变余热,空气域和氦气域的壁面上存在较大温差,从而产生密度驱动的自然对流。选取热工分析的湍流模型前,需要对计算域内的流动状态进行判定。

通常可采用格拉晓夫数 Gr 判断自然对流的流动状态。

$$Gr = \frac{g\alpha_v\Delta Tl^3}{\nu^2} \dots\dots\dots(A.1)$$

式中:

g ——重力加速度;

α_v ——体积热膨胀系数;

ΔT ——温度差;

l ——特征长度;

ν ——运动黏度。

对于竖圆柱形状的空气域和氦气域:

—— Gr 为 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^9$ 时,空气域和氦气域内的流动为层流;

—— Gr 为 $3 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{10}$ 时,空气域和氦气域内的流动为过渡流;

—— $Gr > 2 \times 10^{10}$ 时,空气域和氦气域内的流动为湍流。

A.5.3 湍流模型

确定空气域和氦气域的流动状态后,应选用合理的流体分析模型。空气域可采用 $k-\epsilon$ 模型,氦气域可采用层流模型或 $k-\epsilon$ 模型。

A.5.4 辐射模型

A.5.4.1 在乏燃料干法贮存设施可能出现的温度范围内,空气、氦气发射和吸收辐射的能力非常弱,可近似为热辐射的透明体。热工分析中可以忽略空气和氦气的辐射和吸收特性,并在此基础上选用合适的辐射换热模型。

A.5.4.2 采用FLUENT程序计算辐射传热时可采用分散坐标模型(Discrete Ordinates,简称DO模型)或分散传输辐射模型(Discrete Transfer Radiation Model,简称DTRM模型);使用CFX程序计算辐射传热时可采用分散传输模型(Discrete Transfer Model,简称DTM模型)。

A.5.4.3 对于燃料组件区域,由于辐射传热已通过等效导热系数 λ_{eff} 加以考虑,因此不再考虑该区域内的辐射传热。

A.5.5 衰变热源

热工分析时,乏燃料的衰变热作为热源设置在乏燃料组件区域内,由于乏燃料组件燃耗深度的不同,每个乏燃料组件的衰变热功率可能存在差异,应根据实际装载方案确定每个乏燃料组件的衰变热功率。衰变热应设置在燃料组件的活性段区域(即燃料芯块区域),通常活性段中间区域的燃耗最大,设置衰变热时应考虑沿燃料组件轴向的功率分布。

A.5.6 边界条件

以立式混凝土筒仓贮存容器为例,热工分析时,需设置以下的边界条件:

——通风孔进口,采用压力进口边界,进口压力为环境压力,进口温度为环境温度;

——通风孔出口,采用压力出口边界,出口压力为环境压力;

——混凝土筒仓顶部和侧面，综合考虑自然对流换热和辐射换热；对于自然对流换热，可采用如下的关联式：

$$Nu = C(GrPr)^n \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：



Nu ——努塞尔数；

Gr ——格拉晓夫数；

Pr ——普朗特数。

对于几种典型的表面形状及其布置情况，由实验确定的常数 C 和 n 值如下表A.1所示。

表A.1 大空间自然对流关联式的常数 C 和 n

加热表面 形状与位置	流动情况示意	流态	系数 C 及指数 n		Gr 数适用范围
			C	n	
竖平板及 竖圆柱		层流	0.59	1/4	$10^4 \sim 3 \times 10^9$
		过渡流	0.0292	0.39	$3 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{10}$
		湍流	0.11	1/3	$> 2 \times 10^{10}$
横圆柱		层流	0.48	1/4	$10^4 \sim 5.76 \times 10^8$
		过渡流	0.0445	0.37	$5.76 \times 10^8 \sim 4.65 \times 10^9$
		湍流	0.10	1/3	$> 4.65 \times 10^9$

对于混凝土筒仓底部可采用绝热边界进行保守考虑，也可设置对流换热系数，对流换热系数可按照3m厚度土壤的热传导进行等效计算。

A.6 求解控制

A.6.1 离散格式

为保证计算精度，选择离散格式时应尽量避免使用一阶离散格式，建议采用二阶及以上精度的离散格式。如使用FLUENT时，压力项可选择二阶精度（Second Order）、动量项和湍动能项可选择二阶迎风格式（Second Order Upwind）或更高精度的设置。使用CFX时，对流项和湍流数值项可采用高精度（High Resolution）设置。

A.6.2 时间步长

对于瞬态计算，应设置合理的时间步长以保证计算结果的收敛性。时间步长的选取与特征长度和特征速度相关。

以CFX为例，可按照以下方法选取时间步长。

$$\Delta t = \min(\Delta t_U, \Delta t_{\Delta P}, \Delta t_g, \Delta t_{rot}, \Delta t_c) \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$$\Delta t_U = 0.3 \frac{L_{scale}}{\max(U_{bc}, U_{node})};$$

$$\Delta t_{\Delta P} = 0.3 \frac{L_{scale}}{U_{\Delta P}};$$

$$\Delta t_g = \sqrt{\frac{L_{scale}}{g}};$$

$$\Delta t_{rot} = \frac{0.1}{\omega};$$

$$\Delta t_c = \frac{L_{bc}}{\max(U_{bc}, U_{node}, U_{\Delta P}, \bar{c})}。$$

计算公式中的 L_{vol} , L_{ext} , L_{bc} 定义如下:

$$L_{vol} = \sqrt[3]{V} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$L_{ext} = \max(L_x, L_y, L_z) \dots\dots\dots (A.5)$$

$$L_{bc} = \min \sqrt{A_{bc}} \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

V ——计算域的体积;

L_x , L_y 和 L_z ——所有计算域的 x 、 y 、 z 方向的最大尺寸;

A_{bc} ——入口(inlet)、出口(outlet)或者开口边界(opening)的面积;

L_{scale} —— $\min(L_{vol}, L_{ext})$ 。

公式中采用的速度定义如下:

$$U_{bc} = \max |\bar{U}_{bc}| \dots\dots\dots (A.7)$$

$$U_{node} = |\bar{U}_{node}| \dots\dots\dots (A.8)$$

$$U_{\Delta P} = \sqrt{\frac{p_{bc,max} - p_{bc,min}}{\bar{\rho}_{node}}} \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

U_{bc} ——边界上的数值平均速度;

U_{node} ——节点的数值平均速度;

$p_{bc,max}$ 和 $p_{bc,min}$ ——某“开口”边界的最大和最小压力值;

$\bar{\rho}$ ——~~错误! 未定义书签。~~节点的数值平均密度。

A. 6. 3 残差控制

A. 6. 3. 1 热工分析中需要尽量减小残差。通常， $1e-4$ 的残差可以获得较为稳定的计算结果； $1e-5$ 的残差可以获得工程上可以接受的计算结果； $1e-6$ 的残差可获得非常准确的计算结果。

A. 6. 3. 2 除监测残差的数量级外，还应在计算域内设置温度监控点，温度值达到稳定后方可确认计算获得收敛结果。

A. 7 结果分析与验证

热工分析获得计算结果后，应对以下关键点的计算结果进行分析验证：

- a) 燃料包壳峰值温度；
- b) 燃料篮和中子吸收体温度；
- c) 金属贮罐内壁面温度；
- d) 金属贮罐外壁面温度；
- e) 混凝土筒仓内壁面温度；
- f) 通风口入口和出口温度和速度；
- g) 金属贮罐底板和顶盖温度；
- h) 混凝土筒仓底板和顶盖温度；
- i) 混凝土温度。

通过上述数据，分析乏燃料干法贮存设施是否满足以下设计要求：

- a) 燃料包壳峰值温度是否在温度限值内；
- b) 乏燃料干法贮存设施的各种材料，如中子吸收体、混凝土材料、金属材料是否在材料允许温度范围内。

为了验证热工分析的计算结果，也可在乏燃料干法贮存设施内设置温度检测点，采集温度数据，用于校正热工分析的计算模型和方法。

附录 B
(资料性附录)

压水堆乏燃料干法贮存设施热工分析工况

B.1 I类工况

热工分析需说明贮存腔或贮存容器内的燃料组件所产生的热量能够被传出去,且不会超过规定的温度限值。对于I类工况,环境温度可按照干法贮存设施厂址的历年气象记录选取多年平均气温。

B.2 II类、III类工况

B.2.1 异常高温

对于异常高温,环境温度可按照干法贮存设施厂址的历年气象记录选取连续3 d的最高平均气温。

B.2.2 部分堵塞

对于具有内部空气流道的乏燃料干法贮存设施,应考虑空气流动出现部分堵塞的情况,可假定进风口一半的气流区域出现堵塞进行热工分析。如果设计的进风口数量为偶数,可假设一半数量的进风口完全堵塞。

B.2.3 密封失效

如果为加快传热速率在贮存腔或贮存容器内填充了惰性气体,则应分析密封失效后惰性气体泄漏对传热的影响。如果密封容器的顶盖和筒体采用焊接工艺连接且通过密封性检测证实无泄漏,则热工分析中不再考虑密封失效的情况。

B.3 IV类工况

B.3.1 极端高温

对于极端高温,环境温度可按照干法贮存设施厂址的历年气象记录选取1 d中的最高气温。

B.3.2 能动散热系统故障

对采用能动散热系统冷却或辅助冷却的乏燃料干法贮存设施,应评价能动散热系统发生故障对热量排出的影响。

如果乏燃料干法贮存设施的排热功能(如强制对流、通风)需要外部电源,应对外部电源的可靠性进行评价。如果供电系统的可靠性达不到要求,则应论证在供电丧失的情况下燃料包壳和其他材料的温度不会超过限值。

B.3.3 全堵塞

对于具有内部空气流道的乏燃料干法贮存设施,应考虑空气通风口完全堵塞的情况。

如果通气口全部被堵塞，这可能造成衰变热无法导出，并导致乏燃料温度逐渐升高。为确保堵塞事故能及时被检测到，宜对贮存设施进行定期的通风口目视检查并对温度进行测量，以确保散热正常。每次检查的时间间隔应小于通风口完全堵塞下乏燃料升温至事故温度限值所需的时间。

B.3.4 废墟掩埋

乏燃料干法贮存设施如果位于建筑物内，则应考虑建筑物倒塌的影响。建筑物倒塌会造成贮存容器周围布满瓦砾，应对由此所引起的温度变化进行评价。这种评价应根据清除建筑物瓦砾所需时间进行保守的假设。

B.3.5 火灾

运输车辆泄漏的燃油或其他可燃物的燃烧可能导致火灾事故。分析火灾事故时需考虑火灾的持续时间。

对于持续时间较短的火灾（少于容器自身热时间常数的10%），可将容器内壁假定为绝热条件计算乏燃料升高的温度，采用乏燃料在火灾持续期间释放的衰变热量除以乏燃料组件和燃料篮的总热容量得到乏燃料升高的温度。

以混凝土筒仓为例，容器自身热时间常数定义如下：

$$\tau = \frac{c_p \rho L_c^2}{k} \quad \text{..... (B.1)}$$

式中：

τ ——容器自身热时间常数；

c_p ——筒仓结构材料的比热容；

ρ ——筒仓结构材料的密度；

L_c ——筒仓本体的径向特征长度，通常取混凝土层的厚度；

k ——筒仓结构材料的导热系数。

对于持续时间较长的火灾，应建立包含贮存容器内部结构的详细物理模型，并对整个火灾过程进行瞬态热工分析。

对于假想火灾事故，热工分析应满足以下要求：

- 按照运输车辆油箱完全泄漏保守估计火灾的燃油量；
- 火焰表面的辐射发射率至少为 0.9，火焰平均温度至少为 800℃；
- 泄漏的燃油应水平延伸出容器的外表面至少 1 m，但不可以超过 3 m 以上；
- 保守假定贮存容器暴露在火焰中的对流换热系数。

附录 C
(资料性附录)

燃料组件等效导热系数的计算

C.1 概述

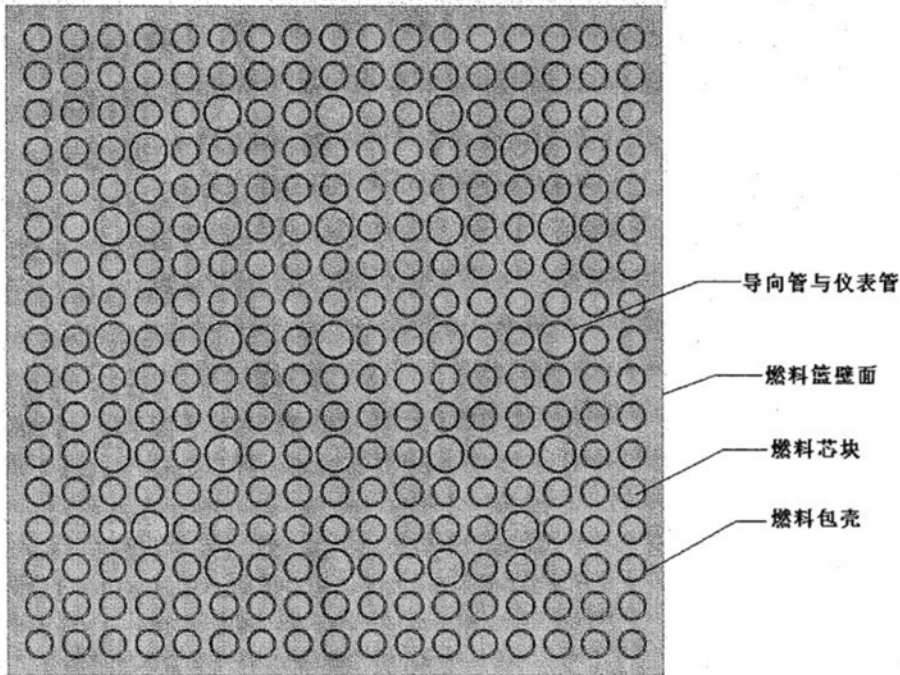
通常，贮存室或贮存容器内均贮存有多组的燃料组件，如果将燃料组件中所有的燃料棒、控制棒导向管和中子注量率测量导管建立详细的三维模型，会造成网格数量和计算规模极其庞大，甚至有可能导致热工分析无法开展。为了降低热工分析的计算规模，并且保证计算结果的准确性和可靠性，推荐采用等效导热系数的方法对燃料组件进行简化处理。

C.2 径向等效导热系数

热量沿燃料组件径向传递时，主要依靠热传导和热辐射。热传导随温度变化较小，而辐射传热与温度成四次方关系。高温下，燃料棒和燃料篮壁面之间主要通过辐射传递热量，与热传导相比，此时辐射传热占主要因素。

C.2.1 燃料组件建模

计算等效导热系数需要建立燃料组件的二维模型，该模型必须涵盖燃料棒的具体结构和特征，包括燃料芯块、燃料包壳、控制棒导向管、仪表管、燃料篮壁面以及燃料棒之间的间隙等特征，详细的二维模型见图C.1。



图C.1 燃料组件的二维模型

C.2.2 稳态热分析

建立燃料组件的二维模型后，忽略对流传热，仅考虑热传导和辐射传热，将衰变热施加于燃料芯块区域，施加边界条件，进行稳态热分析。

通过选取一系列的燃料篮壁面温度，进行稳态热分析，可以获得该壁面温度下燃料组件的包壳峰值温度，这一温度值将用于计算径向等效导热系数。

C.2.3 计算公式

燃料组件通常为方形截面，对于方形截面，径向等效导热系数的计算公式为：

$$\lambda_{\text{eff}} = 0.2947 \times \frac{Q}{4L_a(T_c - T_w)} \quad \text{..... (C.1)}$$

式中：

Q ——单个燃料组件的衰变热功率，单位为瓦（W）；

L_a ——燃料组件活性段长度，单位为米（m）；

T_c ——燃料组件包壳峰值温度，单位为开尔文（K）；

T_w ——燃料篮壁面温度，单位为开尔文（K）。

C.3 轴向等效导热系数

热量沿燃料组件径向传递时，会受到燃料棒之间间隙的影响；而热量沿燃料组件轴向传递时，可以沿燃料棒包壳连续热传导。计算轴向等效导热系数时，可以选取燃料包壳材料的导热系数，并根据燃料棒包壳材料与燃料组件的截面积之比进行加权计算。

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{clad}} \frac{A_{\text{clad}} N}{A_{\text{assembly}}} \quad \text{..... (C.2)}$$

式中：

λ_{eff} ——燃料包壳材料的导热系数，单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]；

A_{clad} ——单根燃料棒包壳材料的截面积，单位为平方米（m²）；

N ——一组燃料组件中燃料棒的数量；

A_{assembly} ——燃料组件的截面积，单位为平方米（m²）。

采用公式（C.2）计算轴向等效导热系数，忽略了热量沿燃料芯块的传递，对热工分析是保守的。

中 华 人 民 共 和 国
能 源 行 业 标 准
压水堆乏燃料干法贮存设施热工分析
NB/T 20462—2017

*

核工业标准化研究所出版发行
北京海淀区骚子营 1 号院
邮政编码：100091
电 话：010-62863505
原子能出版社印刷
版权专有 不得翻印

*

2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
印数 1—50 定价 37.00 元