

# HJ

## 中华人民共和国国家生态环境标准

HJ 1355—2024

### 乏燃料运输容器设计要求

Design requirements of spent fuel transport cask

本电子版为正式标准文本，由生态环境部环境标准研究所审校排版。

2024-02-20 发布

2024-05-01 实施

生态环境部 发布

## 目 次

前 言.....	ii
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 通用设计要求.....	2
5 材料要求.....	2
6 结构设计要求.....	5
7 热工设计要求.....	6
8 包容设计要求.....	8
9 屏蔽设计要求.....	9
10 临界安全设计要求.....	10
11 制造要求.....	12
附录 A（资料性附录） 容器设计对包壳完整性影响的评价.....	13



## 前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《中华人民共和国核安全法》《放射性物品运输安全管理条例》，防治放射性污染，保障人体健康，保护生态环境，规范乏燃料运输容器的设计活动，制定本标准。

本标准依据《放射性物品安全运输规程》（GB 11806—2019），并参考《放射性物质安全运输条例》（IAEA SSR-6）等国内和国际放射性物品安全运输准则制定，规定了乏燃料运输容器的设计准则和要求，包括材料要求、结构设计要求、热工设计要求、包容设计要求、屏蔽设计要求、临界安全设计要求以及制造要求等。

本标准的附录 A 为资料性附录。

本标准为首次发布。

本标准由生态环境部辐射源安全监管司、法规与标准司组织制订。

本标准主要起草单位：中国核电工程有限公司。

本标准生态环境部 2024 年 2 月 20 日批准。

本标准自 2024 年 5 月 1 日起实施。

本标准由生态环境部解释。

# 乏燃料运输容器设计要求

## 1 适用范围

本标准规定了乏燃料运输容器（以下简称“运输容器”）的设计要求，包括运输容器材料、结构、热工、包容、屏蔽、临界安全及制造等要求。

本标准适用于运输方式为道路、铁路、水路的运输容器的设计。

## 2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB 11806—2019	放射性物品安全运输规程	
GB 15146.2	反应堆外易裂变材料的核临界安全	第 2 部分：易裂变材料操作、加工、处理的基本技术规则与次临界限值
GB 15146.8	反应堆外易裂变材料的核临界安全	第 8 部分：堆外操作、贮存、运输轻水堆燃料的核临界安全准则
GB/T 15146.12	反应堆外易裂变材料的核临界安全	第 12 部分：轻水堆燃料燃耗信用制
GB/T 17230	放射性物质安全运输	货包的泄漏检验
GB/T 41024	乏燃料运输容器结构分析的载荷组合和设计准则	
HJ 1201	放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南	
HJ 1202	钢制乏燃料运输容器制造通用技术要求	
NB/T 20002	压水堆核电站核岛机械设备焊接规范	
NB/T 20328.2	核电站核岛机械设备无损检测另一规范	第 2 部分 超声检测
NB/T 20328.4	核电站核岛机械设备无损检测另一规范	第 4 部分 渗透检测
NB/T 20328.5	核电站核岛机械设备无损检测另一规范	第 5 部分 磁粉检测

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1

**临界安全相关部件** criticality safety components

在运输过程中，除包容边界以外的对运输容器临界安全可能产生影响的部件。

### 3.2

**其他安全相关部件** other safety components

除包容边界和临界安全相关部件以外，实现运输容器其他安全相关功能的所有结构部件。

注：二次密封结构及其螺栓、提升装置（提升耳轴）等。

3.3

常规运输条件 routine conditions of transport

该条件下，货包在运输和操作使用过程中无任何事件发生。

3.4

正常运输条件 normal conditions of transport

货包在运输和操作过程中发生 GB 11806—2019 附录 C 中 C.4.4 规定的验证经受正常运输条件能力试验的事件。

3.5

运输事故条件 accident conditions of transport

货包在运输和操作过程中发生 GB 11806—2019 附录 C 中 C.4.6~C.4.8 规定的验证经受运输事故条件能力试验的事故。

4 通用设计要求

4.1 应明确所设计的运输容器允许装载的乏燃料特性，包括名称、最大装载量、化学和物理形态、位置和结构、主要材料、初始富集度、燃耗深度、最大衰变热等信息。

4.2 应明确运输容器的操作要求、运输方式和使用环境。

4.3 应明确运输容器的功能和操作过程，结构设计应满足功能要求，并尽可能使容器操作简便，减少操作人员可能受到的辐射剂量，避免与现场设施发生干涉，缩短操作时间，避免误操作。

4.4 应根据实际操作和运输条件，尽可能将运输容器设计成易于去污，且可防止集水和积水。

4.5 运输容器的设计需要通过试验或分析，或两者相结合的方式验证其安全性和可靠性。

4.6 运输容器在正常运输条件和运输事故条件下其材料、结构、热工、包容、屏蔽、临界应满足本标准的要求。

4.7 应明确运输货包的类型（国内及国际货包类型）、运输指数、临界安全指数及容器寿命。

4.8 运输容器的设计应考虑影响寿命的老化机理和老化效应，包括辐照、温度、腐蚀因素等环境要素对容器关键部件老化的影响。

4.9 应明确运输容器在寿期内需定期进行的维护及试验，包括定期试验、检查、更换计划及部件和子系统在需要时更换和维修的准则。

4.10 运输容器的设计应能适用于-40℃~38℃的环境温度。

4.11 容器包容系统的最大正常工作压力不得超过 700 kPa 表压。

4.12 运输期间附加在容器上的但不属于容器组成部分的任何部件均不得降低容器的安全性。

4.13 应设计有封记的部件，该部件应不易损坏，其完好无损即可证明容器未曾打开过。

4.14 除另有要求外，容器尺寸、质量、重心等应满足运输和装卸接口条件。

4.15 容器设计应考虑正常运输条件和运输事故条件对包壳完整性的影响，可采用附录 A 的方法对燃料包壳进行完整性评价；当假设芯块堆积时，临界计算关于芯块堆积的假设应与燃料包壳完整性评价相一致。

5 材料要求

5.1 一般规定

5.1.1 运输容器组成材料主要包括结构材料和功能材料两部分。选用的材料宜优先选用已纳入标准或有工业使用经验的材料。如果采用新材料，应按照监管部门的要求进行评审，合格后方可使用。

5.1.2 运输容器任何部件或构件的材料在物理和化学性质上均应彼此相容，并且应与放射性内容物相容。应考虑这些材料在辐照下的行为。

5.1.3 运输容器结构材料的选用应考虑容器使用条件、材料性能和主要制造工艺。容器使用条件至少应包括 GB 11806—2019 中所述的常规运输条件、正常运输条件和运输事故条件。材料性能包括力学性能、工艺性能、化学性能和物理性能。制造工艺主要包括铸造、锻造、焊接、热处理、机加工等。

5.1.4 在运输容器设计寿命期内，材料性能应能始终满足设计要求。

## 5.2 结构材料

### 5.2.1 通用要求

材料的选取应考虑使用条件及环境的要求，对于包容边界和临界安全相关部件材料，设计文件除遵循相应的材料标准的规定外，还至少应包含 5.2.2~5.2.7 相关的补充要求；对于其他安全部件用材料，设计文件应遵循相应材料标准的规定。

### 5.2.2 化学成分

材料应有每炉熔炼分析报告、每批成品分析报告，必要时应进行化学成分复验。分析报告结果以及化学成分复验结果均应符合相应标准的规定。

### 5.2.3 热处理和交货状态

5.2.3.1 对标准中规定需进行热处理的材料应在性能热处理状态使用。

5.2.3.2 对于奥氏体不锈钢材料，应在固溶处理后进行酸洗、钝化处理。在制造过程中，除焊接操作外，材料不得加热至 427 °C 以上。

5.2.3.3 对于碳钢和合金钢部件，如果在后续加工制造过程中需要进行热处理消除应力，在材料采购的技术要求中还应考核模拟焊后热处理后的性能，模拟焊后热处理保温时间至少是制造过程中可能进行的各个热处理实际保温时间总和的 80%。

### 5.2.4 力学性能

5.2.4.1 材料的力学性能应按批进行检查和验收。同一批材料至少应满足以下要求：相同牌号、相同冶炼炉号、相同规格及同炉热处理（或在连续式炉中进行连续热处理）。

5.2.4.2 容器承载部件材料应能满足各工况对应温度下的力学性能需要，并按规定温度进行需要的力学性能试验。

### 5.2.5 重新热处理

5.2.5.1 如果一批材料的一项或几项力学性能不合格，可进行重新热处理，重新热处理的条件应在交工文件中注明。

5.2.5.2 重新热处理后应重新进行除化学成分和非金属夹杂物检验外的所有检验和试验。

5.2.5.3 重新热处理只允许进行一次。

### 5.2.6 表面质量检查

应对材料表面进行检查。材料表面不允许存在超标缺陷。当对表面缺陷存在疑问时，可按 5.2.7 进行渗透检验或磁粉检验。

## 5.2.7 无损检验

### 5.2.7.1 一般要求

对于包容系统和临界安全相关部件材料，应按 5.2.7.2 和 5.2.7.3 的规定进行无损检验。

### 5.2.7.2 渗透检验或磁粉检验

除钢板外，应对加工到最终成品尺寸的零件进行渗透检验或磁粉检验，检验方法和验收准则等按 NB/T 20328 的规定执行。

### 5.2.7.3 超声检验

下述材料应在交货状态进行超声检验，检验方法和验收准则等除按 NB/T 20328 的规定执行外，还应满足如下补充要求：

- a) 对于所有锻件应进行 100%超声检验；
- b) 对于所有直径大于等于 50 mm 的棒材需逐根进行 100%超声检验；
- c) 对于厚度大于等于 12 mm 的钢板应进行 100%超声检验，相邻探头的重叠部分应不小于 10%。

## 5.3 功能材料

### 5.3.1 中子吸收材料

5.3.1.1 中子吸收材料应经过验证证明其在使用条件下能够满足设计要求或具有良好的使用经验。

5.3.1.2 中子吸收性能应采用中子衰减法或化学分析法进行测定。

5.3.1.3 非金属中子吸收材料由于其相对金属具有较大的膨胀系数，应考虑部件设计温度范围内热胀冷缩的影响。每次制造均应对中子吸收材料的物理特性、核素分布的均匀性进行测试。

### 5.3.2 屏蔽材料

5.3.2.1 屏蔽材料性能应与设计评价中采用的材料相匹配。

5.3.2.2 中子屏蔽材料应经过鉴定具有良好的成形性能、耐辐照性能和耐热性能。材料中主要中子屏蔽核素及材料的密度应满足设计要求。

### 5.3.3 密封材料

密封材料在设计温度范围内应具有良好的稳定性，应考虑高温压缩永久变形及低温脆性测试。此外，密封材料还应具有良好的耐辐照性能和密封性能，并满足相应的设计要求。

### 5.3.4 减震材料

减震材料应采用经证明能够在 GB 11806—2019 中规定的正常运输条件及运输事故条件所涉及的相关冲击载荷下确保货包安全的材料。

### 5.3.5 保护涂层

5.3.5.1 可通过涂覆涂层对基体材料进行防腐保护。该涂层应满足相应标准中性能评定试验的要求，并在涂装后满足质量控制要求。在役期间应对涂覆该涂层的设备进行定期巡检，如发现涂层破损应及时修补维护。

5.3.5.2 涂层应在常规运输条件下保持稳定，并且涂层与基材间应有足够的附着力，使涂层可在 10

年内牢固的附着在基材表面并具有足够的防腐蚀能力，即至少在 10 年内锈蚀面积不超过涂层总面积的 0.5%，出现外观缺陷（如起泡、裂纹、粉化等）的涂层总面积不超过 5%。

5.3.5.3 应至少评估涂层产品耐腐蚀、耐化学品和耐辐照的性能。

5.3.5.4 任何涂层产品（包括油漆或镀层）应经过试验验证。

## 6 结构设计要求

### 6.1 一般要求

6.1.1 运输容器的设计应考虑其质量、体积和形状，并便于固定在运输工具内或运输工具上，以便安全地运输。

6.1.2 运输容器应能经受在常规运输条件下可能产生的任何加速度、振动或共振的影响，并且不造成对容器上的各种密闭器件的有效性或货包完好性的不利影响。应把螺母、螺栓和其他紧固器件设计成即使经多次使用后也不会意外地松动或脱落的形式。

6.1.3 运输容器在正常运输条件和运输事故条件下所需考虑的载荷及其组合方式和结构安全设计准则应按 GB/T 41024 执行。

6.1.4 运输容器的防脆性断裂评价应考虑材料的断裂韧性问题，并遵照 HJ 1201 的要求执行。

6.1.5 运输容器的结构应能保证在正常运输条件和运输事故条件下保持次临界，包容和屏蔽功能满足 GB 11806—2019 相应要求。

6.1.6 设计应明确运输容器能够经受 GB 11806—2019 附录 C 中 C.4 规定的验证经受正常运输条件能力的试验和验证经受运输事故条件能力的试验。在进行上述规定的破坏性物理试验时，可根据其特点采用全尺寸原型容器或比例模型容器进行。比例模型容器的尺寸不宜小于原型容器的 1/4，并满足相似原则。比例模型容器的结构和结构材料能够完全反映原型容器的主要结构和材料特性，在破坏性物理试验中不能验证的性能在比例模型容器中可以忽略，如容器中子屏蔽性能等。设计者应对模型比例进行充分验证，对比例模型容器中各部件比例选取的有效性进行说明。

### 6.2 包容结构要求

6.2.1 应明确运输容器包容边界的范围。

6.2.2 运输容器应设计成在最大正常工作压力下，经受 GB 11806—2019 附录 C 中 C.4.4 正常运输条件能力的试验和附录 C 中 C.4.6 运输事故条件能力的试验后，包容系统的变形不会导致容器的泄漏率超过规定的限值。

6.2.3 包容边界的紧固方式应可靠，确保不会因内压增大等原因造成意外打开或泄漏率超过允许的限值。

6.2.4 运输容器的包容边界不应设置泄压装置、通风装置、过滤器或机械冷却装置。

6.2.5 由焊接方式构成的包容结构，需对全焊透焊缝进行体积和表面检验，合格后需对包容边界进行强度和密封性检查。

6.2.6 若包容系统构成了容器的一个独立单元，则其应独立于容器的其他构件，并采用一种牢固的紧固方式进行密封。

6.2.7 当辐射屏蔽层作为包容系统的一部分时，设计应考虑防止该屏蔽层因发生意外而脱落。当辐射屏蔽层与包容系统构成一个独立单元时，则该单元应独立于容器的其他构件，并采用一种牢固的紧固方式进行密封。

### 6.3 临界安全相关部件要求

运输容器如需设置中子吸收材料，则应选用合适的材料类型，并合理布置，在正常运输条件和运输事故条件下均能保证货包和货包阵列处于次临界状态。

### 6.4 其他安全相关部件要求

6.4.1 应确保运输容器上的提升装置按预期的方式使用时不会失效，即使在提升装置失效时，也不会削弱运输容器满足本标准其他要求的能力。设计时还应考虑相应的安全系数，以适应突然起吊情况。提升装置一般情况下应满足在承受 3 倍最大吊装载荷时不屈服，承受 5 倍最大吊装载荷时不断裂；对于大型乏燃料运输容器，其提升装置应在承受 6 倍最大吊装载荷时不屈服，承受 10 倍最大吊装载荷时不断裂。

6.4.2 运输容器的外表面上可能被误用于提升的附加装置和其他任何部件（如栓系耳），应设计成能够承受容器的重量并考虑相应的安全系数，或应将其设计成可拆卸的，并要求在运输前拆除，如不能拆除，应采取措施使其不能当做提升装置使用。

## 7 热工设计要求

### 7.1 一般要求

7.1.1 热工设计应保证乏燃料运输容器的传热性能，确保乏燃料包壳峰值温度和容器各部件的温度满足接受准则所规定的限值要求。

7.1.2 应对乏燃料运输容器开展热评价。

7.1.3 热评价应考虑衰变热负荷、环境温度、太阳曝晒、正常运输条件和运输事故条件的相应组合。

### 7.2 分析工况

考虑衰变热负荷、环境温度、有无太阳曝晒以及正常运输条件和运输事故条件的组合，热评价应考虑以下四种工况：

正常运输条件

- a) 最大衰变热负荷、环境温度 38 °C、有太阳曝晒；
- b) 最大衰变热负荷、环境温度 38 °C、无太阳曝晒；
- c) 最小衰变热负荷、环境温度 -40 °C、无太阳曝晒；

运输事故条件

- d) 最大衰变热负荷、在耐热试验条件下暴露 30 min 后自然冷却。

### 7.3 计算模型

#### 7.3.1 热负荷

7.3.1.1 应明确在热评价中假设的最小和最大衰变热负荷。假设的最大衰变热负荷应与屏蔽和包容分析中假设的源项一致。如果未限制最小衰变热负荷，则假设最小衰变热负荷为 0。

7.3.1.2 应考虑热负荷在容器径向和轴向的分布情况。

### 7.3.2 环境条件

#### 7.3.2.1 环境温度

热评价环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

#### 7.3.2.2 太阳曝晒

假设太阳曝晒条件如表 1 所示。

表 1 曝晒数据

状态	表面的形状和位置	每天曝晒 12 h 的曝晒量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
1	运输时水平朝下的平面	0
2	运输时水平朝上的平面	800
3	运输时的竖直表面	200 <sup>a</sup>
4	其他朝下(非水平)表面	200 <sup>a</sup>
5	所有其他表面	400 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> 另一种方法是用正弦函数表征太阳曝晒量, 采用吸收系数, 并忽略邻近物体可能的反射效应。

### 7.3.3 热物理性质

7.3.3.1 应给定容器各部件和乏燃料组件的热物理性质。

7.3.3.2 吸收比和发射率应适用于各部件的表面条件及所分析工况的条件。当热物理性质为单一值时, 热评价应表明该值包络了与温度有关的等效特性。

### 7.3.4 模型简化与计算假设

应明确计算模型与真实容器相比所做的简化以及采用的假设, 并说明上述简化和假设的合理性和保守性。如对不同工况使用了不同的简化或假设, 应进行说明。

## 7.4 接受准则和安全评价

### 7.4.1 接受准则

7.4.1.1 正常运输条件下, 对于锆合金燃料包壳, 包壳最高温度不应超过  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 对于其他类型燃料包壳, 应确定相应的包壳温度限值。

7.4.1.2 运输事故条件下, 对于锆合金燃料包壳, 包壳最高温度不应超过  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 对于其他类型燃料包壳, 应确定相应的包壳温度限值。

7.4.1.3 应依据使用的材料确定各部件的温度限值, 容器各部件的最高温度不应超过其温度限值。热评价应关注结构材料和功能材料。结构材料可不直接给定温度限值, 可根据其温度场进行应力计算评定。功能材料包括中子吸收材料、屏蔽材料和密封材料, 必须为这些材料组成的部件确定温度限值。

7.4.1.4 在假设环境温度为  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$  且无太阳曝晒的环境条件下, 采用非独家使用方式运输时容器的可接近表面温度不高于  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 采用独家使用方式运输时容器的易接近表面温度不高于  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可考虑使用屏障或隔板保护运输人员, 而这些屏障或隔板无需接受任何试验。

## 7.4.2 安全评价

### 7.4.2.1 正常运输条件

7.4.2.1.1 温度范围应包含最高、最低环境温度，并考虑最大、最小衰变热负荷。

7.4.2.1.2 假设容器在环境温度为 38 °C 以及如表 1 所示太阳暴晒的环境条件下存放 1 年后，给出货包的最大正常工作压力，并说明如何计算。

7.4.2.1.3 应将容器各部件和燃料包壳的温度、容器内腔压力等结果与限值进行比较。

### 7.4.2.2 运输事故条件

7.4.2.2.1 运输事故条件下，应针对耐热试验条件开展热评价。应考虑经受力学试验后的效应。力学试验应合理考虑容器开展各种自由下落试验的次序，以确保在完成力学试验后，容器在后续的耐热试验中会受到最严重的损坏。

7.4.2.2.2 初始条件对应容器在以下工况达到的热平衡状态：最大衰变热负荷、环境温度 38 °C、有太阳暴晒。

7.4.2.2.3 耐热试验包括以下条件：

- a) 使容器暴露在热环境中 30 min，该热环境提供的热流密度至少相当于在充分静止的环境条件下烃类燃料/空气火焰的热流密度，最小平均火焰发射系数为 0.9，平均温度至少为 800 °C，容器完全被火焰所吞没，表面吸收系数为 0.8 或采用容器暴露在所规定的火焰中其实际具有的吸收系数值；
- b) 30 min 后，使容器在经受乏燃料组件所产生的最大衰变热负荷和在表 1 中所规定的太阳暴晒条件下，暴露在 38 °C 环境温度中足够长的时间，以保证容器各部位的温度都在下降或接近初始稳定状态。

7.4.2.2.4 计算应模拟足够长的时间，应至少计算到容器各部件和燃料包壳的瞬态峰值温度出现，温度持续下降且不再有上升的趋势时。

7.4.2.2.5 应确定耐热试验期间作为时间函数的容器各部件和燃料包壳的瞬态峰值温度。

7.4.2.2.6 容器内腔的最大压力评价应基于最大正常工作压力，并考虑耐热试验诱发的容器温度的增加、容器相关材料的热燃烧或分解、燃料棒的破损等因素。

7.4.2.2.7 应将容器各部件和燃料包壳的温度、容器内腔压力等结果与限值进行比较。

## 8 包容设计要求

### 8.1 一般要求

应明确包容系统及其相关部件，包括包容结构的主要零部件、材料构成、尺寸描述、密封方法、密封操作等。

### 8.2 分析工况

运输容器应进行正常运输条件和运输事故条件下的包容完整性评定。

### 8.3 计算要求

8.3.1 运输容器包容分析时，应明确内容物源项，确定放射性内容物总可释放活度和容器容许泄漏率。

8.3.2 运输容器包容分析时，可假设正常工况下破损的燃料棒释放到容器内腔的放射性物质为其可释

放放射性物质的3%，事故工况破损燃料棒释放到容器内腔的放射性物质为其可释放放射性物质的100%。

8.3.3 运输容器包容分析时，应考虑正常运输条件和运输事故条件下最大工作压力时包容边界的泄漏率。

#### 8.4 接受准则和安全评价

8.4.1 运输容器在经受了 GB 11806—2019“附录 C 中 C.4.4 验证经受正常运输条件能力的试验”中规定的试验后，其放射性内容物的漏失应限制在每小时不大于  $10^{-6}A_2$ 。

8.4.2 运输容器在经受了 GB 11806—2019“附录 C 中 C.4.6 验证经受运输事故条件能力的试验”的试验后，应能使一周内放射性内容物的累积漏失对氙-85 限制在不大于  $10A_2$  和对所有其他的放射性核素不大于  $A_2$ ；计算混合物放射性核素  $A_2$  时，对氙-85 取  $10A_2$  的  $A_{2(i)}$  有效值。

8.4.3 如果容器具有多层包容边界，则在正常运输和运输事故条件下，每层包容边界应分别满足设计的泄漏率要求，泄漏率引起的放射性内容物漏失应满足 8.4.1 和 8.4.2 的要求。

8.4.4 设计者应明确容器泄漏率的检测方法和验收准则，检测方法可依据 GB/T 17230 执行。

8.4.5 在环境压力降至 60 kPa 的情况下，包容系统应仍能保持其放射性内容物不泄漏。

### 9 屏蔽设计要求

#### 9.1 一般要求

屏蔽设计应以辐射防护最优化为原则，在确保安全的前提下，方便操作，尽量缩小体积、减轻重量，并适当考虑成本因素。

#### 9.2 分析工况

容器应进行常规、正常运输条件和运输事故条件下的辐射安全评定。

#### 9.3 屏蔽设计源项

9.3.1 对于乏燃料组件源项，应考虑燃料组件类型、 $^{235}\text{U}$  初始富集度、燃耗深度以及运行历史不同带来的乏燃料组件源项多样性的影响，并考虑一定的包络性。

9.3.2 应综合考虑  $\gamma$  射线和中子的复合辐射场对运输容器屏蔽设计的影响。

#### 9.4 计算模型

9.4.1 可根据不同设计对象以及源项特征，选用通用计算方法计算辐射场。

9.4.2 屏蔽模型的构建应考虑结构的制造工艺偏差和因辐照引起的屏蔽材料质量损失。

9.4.3 屏蔽模型应考虑结构评价给出的各工况尺寸变化，以及运输事故条件下屏蔽结构的损伤、损失。

#### 9.5 接受准则和安全评价

9.5.1 货包或集合包装的外表面上任一点的最高辐射水平应不超过 2 mSv/h，满足下列任何一项情况除外：

- a) 按独家使用方式通过铁路和道路运输的货包或集合包装，在满足下述条件时可超过 2 mSv/h，但不可超过 10 mSv/h：
  - 1) 车辆采取实体防护措施防止未经批准的人员在常规运输条件下接近托运货物；
  - 2) 对货包或集合包装采取了固定措施，在常规运输条件下它们在车辆内的位置能够保持不变；
  - 3) 运输期间，无任何装载和卸载作业。

- b) 使用船舶运输的货包或集合包装，按独家使用方式装载在车辆内或车辆上，且始终不从车辆上卸下。
  - c) 按特殊安排方式使用船舶运输的货包或集合包装。
- 9.5.2 按独家使用方式运输，货包或集合包装的外表面上任一点的最高辐射水平应不超过 10 mSv/h。
- 9.5.3 应分析运输容器外表面 1 m 处的最高辐射水平以确定运输指数。
- 9.5.4 应将货包设计成在经受了 GB 11806—2019“附录 C 中 C.4.4 验证经受正常运输条件能力的试验”中规定的试验后，能使表面污染水平不超过 GB 11806—2019 中“5.4 表面污染水平限值”，防止货包的任何外表面上的辐射水平提高 20% 以上。
- 9.5.5 应将货包设计成在经受了 GB 11806—2019“附录 C 中 C.4.6 验证经受运输事故条件能力的试验”的试验后，能保持足够的屏蔽能力，保证在货包内装的放射性内容物达到所设计的最大数量时，距货包表面 1 m 处的辐射水平不会超过 10 mSv/h。

## 10 临界安全设计要求

### 10.1 一般要求

在常规运输条件、正常运输条件和运输事故条件下，货包应保持次临界状态。即货包的有效增殖系数在考虑不确定度后（包括计算方法、材料、尺寸公差等引起的不确定度）应小于或等于次临界限值。

在常规运输条件、正常运输条件和运输事故条件下，货包的次临界限值应考虑为确保次临界而施加的裕量以及基准试验的偏倚和其不确定度，不大于 0.95。

### 10.2 分析工况

10.2.1 容器应进行正常运输条件和运输事故条件下的临界安全评定。

10.2.2 单个容器评定时最大反应性的工况：考虑容器需经受正常运输条件和运输事故条件评定时所规定的试验以及意外事件。

10.2.3 正常运输条件下容器阵列的评定时最大反应性的工况：容器之间应无任何物品，容器排列应受到周围至少 20 cm 厚的水层的反射和货包经受正常运输条件能力的试验后验证的条件。

10.2.4 运输事故条件下容器阵列的评定时最大反应性的工况：容器间存在含氢慢化物，容器排列应受到周围至少 20 cm 厚的水层的反射；在经受住正常运输条件能力的试验后，再进行验证经受运输事故条件能力的试验中规定的任何一系列较严的试验：

- a) 自由下落试验 II 和自由下落试验 III（对于质量不超过 500 kg 并依据外部尺寸计算的总体密度不大于 1000 kg/m<sup>3</sup> 的货包），或自由下落试验 I 和自由下落试验 II（对于其他所有的货包）；随后进行耐热试验以及易裂变材料容器的水泄漏试验或水浸没试验。
- b) 水浸没试验，对于含有超过 10<sup>5</sup>A<sub>2</sub> 的 B(U)型和 B(M)型货包需进行强化水浸没试验。

10.2.5 在经历上述试验后，若产生容器外形或燃料组件栅距的变化，应在运输事故条件下最大反应性的工况中考虑，除非能证明货包不会进水，否则还应同时考虑水渗入容器的情况。

10.2.6 此外在乏燃料运输容器的临界安全设计中，还应特别考虑下述意外事件：

- a) 水渗入容器或从容器泄出，尤其应考虑水渗入容器、处于最佳慢化状态的情况，并考虑燃料棒包壳进水的可能；
- b) 容器内的中子吸收剂性能降低；
- c) 内容物在容器内可能重新排列或因其从货包内漏失而可能引起的重新排列；
- d) 容器内或容器之间的间距缩小；
- e) 容器浸没在水中或埋入雪中；

f) 温度变化。

### 10.3 计算模型

#### 10.3.1 最大反应性证明

核临界安全分析的计算模型应使用恰当的参数和条件,使正常运输条件和运输事故条件的分析评价均是保守的,在此基础上给出最大反应性证明。

#### 10.3.2 燃料组件建模

10.3.2.1 根据设计特性,燃料组件的模型应保守的选择芯块直径、芯块中心孔(如有)、包壳内径、包壳外径、导向管和(或)仪表管内径、导向管和(或)仪表管外径、燃料棒栅距等几何参数值,以及燃料芯块核素成分及其分布、结构材料等材料参数;或采用名义值,将上述参数的不确定度考虑在最终的不确定度中。应论证燃料组件其他结构部件的简化处理是保守的。

10.3.2.2 若采用燃耗信用制,应使用合适的置信水平,保守考虑燃料组件燃耗、堆芯运行参数和冷却时间等因素。

10.3.2.3 对于含有可燃吸收体的燃料组件,仅可置信固定式可燃吸收体。应保守考虑可燃吸收体的类型、分布、含量等。应考虑随着辐照进行,易裂变材料和可燃吸收体的消耗对燃料组件反应性带来的竞争效应。

#### 10.3.3 运输容器建模

10.3.3.1 若采用简化的几何结构,应论证简化结构的保守性。

10.3.3.2 对容器的结构、中子吸收体等的材料成分、尺寸等进行敏感性分析,选取保守参数值;或采用名义值,将上述参数的不确定度考虑在最终的不确定度中。

10.3.3.3 应保守考虑中子吸收体的置信度。对于含硼的复合材料,可以采用75%的置信度,当采取测试手段可证明材料具有足够的吸收能力时,可以采用90%的置信度。对于其他材料应根据中子吸收体材料的类型和制造的工艺和是否有相关测试来选取保守的置信度。

10.3.3.4 单个货包或货包阵列应至少被厚度为20 cm的水反射层紧包围,或由周围材料提供更强的中子反射。

### 10.4 程序验证

10.4.1 应基于所分析系统的物理特征来选择经过评价的、合适的临界基准实验。宜从多个独立的来源和实验系列选择临界基准实验以减少系统误差。

10.4.2 选定的临界基准实验的物理参数范围宜涵盖所分析系统预期的各种工况下物理参数的变化。

10.4.3 计算程序分析临界基准实验所采用的核截面数据,应与所分析系统所采用的核截面数据一致。

10.4.4 应基于选定的临界基准实验的数量选择合适的方法确定偏倚及其不确定度。如采用统计学方法,应验证临界基准实验数量满足统计学要求。

10.4.5 对于蒙特卡罗程序的计算结果,应检查中子抽样的完备性和收敛准则的适当性。应对计算结果进行分析,判断其是否符合预期。如不符合预期判断,应对计算模型和假设条件进行分析,以确定原因。

### 10.5 接受准则和安全评价

10.5.1 应根据计算方法的偏倚及其不确定度,所分析系统材料、制造公差、计算模型、对几何或材料近似处理所引起的不确定度,程序计算结果的统计不确定度或收敛不确定度,以及为确保次临界安全所施加的裕量,确定临界安全分析的接受准则。如采用燃耗信用制还应考虑核素成分计算引入的不确定度。

- 10.5.2 确定接受准则的方法应遵照 GB 15146.2、GB 15146.8 和 GB/T 15146.12 的相关规定。
- 10.5.3 应明确所分析系统临界安全所依赖的受控参数，明确其设计限值、操作限值。这些受控参数、设计限值、操作限值发生改变时，应重新开展临界安全评价进行核实。
- 10.5.4 在正常运输条件下货包阵列的评定，推导的货包件数“ $N_1$ ”值，在 5 倍“ $N_1$ ”件货包应是次临界的。
- 10.5.5 在运输事故条件下货包阵列的评定，推导的货包件数“ $N_2$ ”值，在 2 倍“ $N_2$ ”件货包应是次临界的。
- 10.5.6 临界安全指数应采用以下方法确定：装有易裂变材料货包的临界安全指数应由 50 除以  $N_1$ 、 $N_2$  中的较小者即  $N$  得到（即  $CSI=50/N$ ）。倘若无限多个货包是次临界的（即  $N$  是无限大），临界安全指数值可以为 0。

## 11 制造要求

### 11.1 一般要求

设计应编制容器技术规格书，提出容器制造要求。制造要求按照 HJ 1202 执行。

### 11.2 焊接要求

- 11.2.1 焊接方法通常允许采用氩弧焊、焊条电弧焊、埋弧焊进行焊接，使用其他焊接方法应事先报设计单位，设计应充分评估该焊接方法的可靠性。不得使用药芯焊丝电弧焊。
- 11.2.2 运输容器包容边界的纵向焊缝和环向焊缝应采用全焊透对接接头，应按照 NB/T 20002—2021 1 级焊缝或其他合适标准进行焊接和无损检验。
- 11.2.3 运输容器临界安全相关部件，在满足结构评价的前提下，允许采用非全焊透焊接接头形式，焊接和无损检验应满足设计要求。
- 11.2.4 焊缝分布应避免应力集中，主焊缝禁止交叉。
- 11.2.5 不等厚部件焊接接头斜度应不大于 1:4。
- 11.2.6 包容边界的纵向焊缝应设置焊接见证件。

### 11.3 检验试验要求

- 11.3.1 应规定在运输容器制造过程中对相关零部件需满足的功能及性能进行验证，包括制造过程有密封或压力要求的各零部件密封性能试验或压力试验、零部件尺寸测量、容器的  $\gamma$  屏蔽试验等。
- 11.3.2 应规定在其服役前对运输容器及其相关部件的功能及安全性能进行验证，包括容器的压力试验、排水试验、真空干燥试验、密封性能试验、热传导试验、提升装置载荷试验、模拟组件在贮腔中的抽插试验、阀及可拆卸零部件等相关部件的功能试验等。
- 11.3.3 应明确试验要求的验收准则，其中  $\gamma$  屏蔽试验检测范围应能全覆盖待测表面。

## 附录 A

(资料性附录)

## 容器设计对包壳完整性影响的评价

为确保容器的设计对燃料棒提供有效的保护,应基于容器对燃料棒的作用对乏燃料包壳进行完整性评价。乏燃料包壳完整性评价需要满足 A.1 至 A.4 的要求。

A.1 乏燃料包壳评价应考虑载荷包括但不限于以下方面:

- a) 温度—包壳金属可能达到的最高温度;
- b) 内部压力—包壳内部可能达到的最大压力,当压力与温度相关时,允许有不同的组合;
- c) 惯性力—惯性力,操作、正常运输条件或运输事故条件下的加速度,根据具体设计要求而定。

A.2 乏燃料包壳完整性评价中包壳的壁厚应考虑最不利的制造公差,并应计及包壳氧化层的厚度。其余尺寸根据名义尺寸确定。

A.3 在 A.1 中所述载荷的作用下,评价乏燃料包壳的完整性,以及在惯性力的作用下燃料棒的屈曲失稳。

A.4 评价可以采用准静态分析也可以采用动载分析,采用准静态分析时应考虑相应的动载系数。