

团 体 标 准

T/CNS 90—2023

高温气冷堆球形燃料元件技术规范

Technical specifications for spherical fuel elements
of high temperature gas-cooled reactor

2023-11-29 发布

2024-01-01 实施

中国核学会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
5 试验方法	3
6 检验规则	4
7 包装、贮存和运输	5
8 产品质量证明文件	6

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业化研究所归口。

本文件起草单位：清华大学核能与新能源技术研究院、核工业化研究所。

本文件主要起草人：刘荣正、赵宏生、刘兵、李筱珍。

高温气冷堆球形燃料元件技术规范

1 范围

本文件规定了球床模块式高温气冷堆（简称高温气冷堆）球形燃料元件的技术要求、试验方法、检验规则、包装、贮存和运输、产品质量证明文件等要求。

本文件适用于高温气冷堆球形燃料元件的制造和采购。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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/T 13372 二氧化铀粉末和芯块中杂质元素的测定 ICP-AES法

EJ/T 20236.1~20236.12 高温气冷堆球形燃料元件测试方法

NB/T 20408 核电厂物项包装、运输、装卸、接收、贮存和维护要求

YB/T 5146 高纯石墨总灰分的测量方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

核芯 kernel

球形燃料元件包覆燃料颗粒的内核，成分为 UO_2 的球形颗粒。球形燃料元件结构示意图见图1。

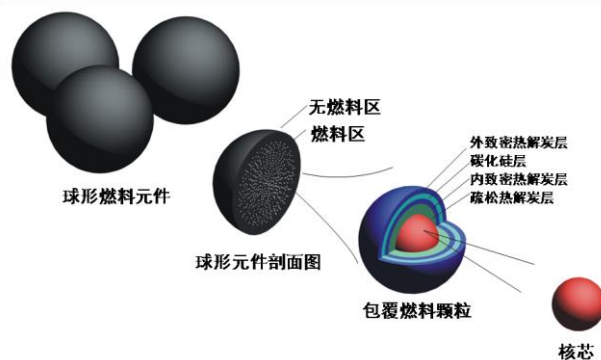


图1 球形燃料元件结构示意图

3.2

包覆燃料颗粒 coated fuel particle

由 UO_2 核芯颗粒、疏松热解炭层、内致密热解炭层、碳化硅层和外致密热解炭层构成的球形颗粒。

3.3

燃料区 fuel zone

包覆燃料颗粒均匀弥散在基体石墨中的球形区域。

3.4

无燃料区 fuel free zone

由与燃料区相同的基体石墨材料制成的包围燃料区的壳形区域。

注：无燃料区和燃料区的基体石墨之间没有物理上的分界面。

3.5

基体石墨球 matrix graphite ball

与球形燃料元件采用相同的基体石墨材料，以及相同制造工艺制成的不含包覆燃料颗粒的石墨球。

注：基体石墨球用于测定基体石墨和球形燃料元件的部分性能。

4 技术要求

4.1 包覆燃料颗粒

4.1.1 核芯

4.1.1.1 O/U 比应小于等于 2.01。

4.1.1.2 密度应大于 10.40 g/cm^3 。

4.1.1.3 直径应为 $450 \mu\text{m} \sim 550 \mu\text{m}$ ，95 % 的数据在规定范围内，置信度为 95 %。

4.1.1.4 不圆度（最大直径/最小直径）应小于等于 1.2，95 % 的数据在规定范围内，置信度为 95 %。

4.1.1.5 总当量硼含量应小于等于 $4.0 \mu\text{g/g}$ 。

4.1.2 包覆层

4.1.2.1 疏松热解炭层

4.1.2.1.1 密度应小于等于 1.10 g/cm^3 。

4.1.2.1.2 厚度应为 $50 \mu\text{m} \sim 140 \mu\text{m}$ ，95 % 的数据在规定范围内，置信度为 95 %。

4.1.2.2 内致密热解炭层

4.1.2.2.1 密度应为 $(1.9 \pm 0.1) \text{ g/cm}^3$ 。

4.1.2.2.2 厚度应为 $20 \mu\text{m} \sim 60 \mu\text{m}$ ，95 % 的数据在规定范围内，置信度为 95 %。

4.1.2.2.3 光学各向异性度（OPTAF）应小于等于 1.03。

4.1.2.3 碳化硅层

4.1.2.3.1 密度应大于等于 3.18 g/cm^3 （样品单个值大于等于 3.17 g/cm^3 ）。

4.1.2.3.2 厚度应为 $25 \mu\text{m} \sim 45 \mu\text{m}$ ，95 % 的数据在规定范围内，置信度为 95 %。

4.1.2.4 外致密热解炭层

4.1.2.4.1 密度应为 $(1.9 \pm 0.1) \text{ g/cm}^3$ 。

4.1.2.4.2 厚度应为 $20 \mu\text{m} \sim 60 \mu\text{m}$ ，95 % 的数据在规定范围内，置信度为 95 %。

4.1.2.4.3 光学各向异性度（OPTAF）应小于等于 1.03。

4.2 球形燃料元件

4.2.1 直径应为 $59.6 \text{ mm} \sim 60.2 \text{ mm}$ 。

4.2.2 表面质量满足下列要求：

a) 凹痕、孔洞、缺口和机加工痕迹等视为缺陷；

b) 应无切向长度大于等于 5 mm 且径向深度大于等于 2 mm 的缺陷，同时切向长度大于等于 2 mm 且径向深度大于等于 1 mm 的缺陷不超过 1 个；

c) 表面光洁度高，表面干净，无裂纹和加工切屑，无油污和其他污染物等。

4.2.3 压碎载荷应大于等于 18.0 kN。

- 4.2.4 落球强度（4 m 高，球床）应大于等于 50 次。
- 4.2.5 无燃料区厚度应大于等于 4.0 mm。
- 4.2.6 自由铀含量应小于等于 $6.0 \times 10^{-5} \text{ gU}_{\text{自由}}/\text{gU}_{\text{总}}$ 。
- 4.2.7 基体石墨铀污染率应小于等于 $7.0 \times 10^{-6} \text{ gU}_{\text{油污}}/\text{gU}_{\text{总}}$ 。

4.3 基体石墨球

- 4.3.1 基体石墨球的密度应为 $1.70 \text{ g/cm}^3 \sim 1.77 \text{ g/cm}^3$ 。
- 4.3.2 基体石墨球的总灰分应小于 $150 \mu\text{g/g}$ 。
- 4.3.3 基体石墨球至少应测定 B、Cd、Gd、Dy、Eu、Sm 和 Li 等元素的含量，并根据其当量硼因子计算总当量硼含量，总当量硼含量应小于等于 $1.3 \mu\text{g/g}$ 。
- 4.3.4 基体石墨球的锂含量应小于等于 $0.05 \mu\text{g/g}$ 。
- 4.3.5 基体石墨球的导热系数（1 000 °C）应大于等于 $25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。
- 4.3.6 基体石墨球应测量在 1 000 °C 下、在含 1 vol% 水气的 He 气氛下 10 h 的腐蚀速率，单个样品的腐蚀速率应小于 $1.5 \text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ ，单批样品的平均腐蚀速率应小于等于 $1.3 \text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ 。
- 4.3.7 基体石墨球磨损速率（20 个球，100 h）应小于等于 $6 \text{ mg}/(\text{球}\cdot\text{h})$ 。
- 4.3.8 基体石墨球热膨胀各向异性度（室温～500°C）应小于等于 1.3。

5 试验方法

5.1 包覆燃料颗粒

5.1.1 燃料核芯

- 5.1.1.1 O/U 比应采用燃烧恒重法测定。
- 5.1.1.2 密度应采用比重瓶法或颗粒尺寸分析仪法测定。
- 5.1.1.3 直径应按照 EJ/T 20236.1 规定的光学照相/显微分析法，或采用动态颗粒尺寸分析仪法测定。
- 5.1.1.4 不圆度应按照 EJ/T 20236.1 规定的光学照相/显微分析法，或采用动态颗粒尺寸分析仪法测定。
- 5.1.1.5 应按照 GB/T 13372 的规定测定 B、Cd、Gd、Dy、Eu、Sm 和 Li 等元素的含量，并根据其当量硼因子计算总当量硼含量。

5.1.2 包覆层

5.1.2.1 疏松热解炭层

- 5.1.2.1.1 密度应采用重量体积法测定。
- 5.1.2.1.2 厚度应按照 EJ/T 20236.2 规定的金相法，或动态颗粒尺寸分析仪法，或 X 射线成像法测定。

5.1.2.2 内致密热解炭层

- 5.1.2.2.1 密度应按照 EJ/T 20236.3 规定的沉浮法测定。
- 5.1.2.2.2 厚度应按照 EJ/T 20236.2 规定的金相法，或动态颗粒尺寸分析仪法，或 X 射线成像法测定。
- 5.1.2.2.3 光学各向异性度应按照 EJ/T 20236.4 规定的光学反射率法。

5.1.2.3 碳化硅层

- 5.1.2.3.1 密度应按照 EJ/T 20236.3 规定的沉浮法测定。
- 5.1.2.3.2 厚度应按照 EJ/T 20236.2 规定的金相法，或动态颗粒尺寸分析仪法，或 X 射线成像法测定。

5.1.2.4 外致密热解炭层

5.1.2.4.1 密度应按照 EJ/T 20236.3 规定的沉浮法测定。

5.1.2.4.2 厚度应按照 EJ/T 20236.2 规定的金相法,或动态颗粒尺寸分析仪法,或 X 射线成像法测定。

5.1.2.4.3 光学各向异性度应按照 EJ/T 20236.4 规定的光学反射率法测定。

5.2 球形燃料元件的检验方法

5.2.1 直径应按照 EJ/T 20236.11 规定的专用设备测定。

5.2.2 表面质量按照 EJ/T 20236.11 规定的方法进行测定。

5.2.3 压碎载荷按照 EJ/T 20236.10 规定的方法进行测定。采用万能材料试验机,测试球形燃料元件垂直或平行于燃料元件制造基面的压碎载荷,加载速度为 1 mm/min。

5.2.4 落球强度按照 EJ/T 20236.9 规定的方法进行测定。采用专用设备,球形燃料元件在 4 m 高处自由落落到石墨球床上,统计球形燃料元件在指定落球次数后是否保持完整。

5.2.5 无燃料区厚度应按照 EJ/T 20236.12 规定的 X 射线透射法测定。

5.2.6 自由铀含量应采用燃烧浸取/激光荧光分析仪法测定。

5.2.7 基体石墨铀污染率应采用燃烧浸取/激光荧光分析仪法测定。

5.2.8 密度用体积-质量法测定,卡尺精度 0.02 mm,天平精度不低于 0.001 g,至少测量 6 个方向的直径值。

5.2.9 总灰分按照 YB/T 5146 规定的方法进行测量。

5.2.10 总当量硼含量是单个元素当量硼含量之和,单个元素当量硼含量等于该元素当量硼因子与含量之积,单位为微克每克 ($\mu\text{g/g}$)。单个元素含量用化学分析的方法测定,测定元素至少应包含 B、Cd、Sm、Eu、Gd、Dy、Li、Cl、Ag、Ti、Cu、Cr、Fe、Co、Ni、V、Mo、W、Pb、Au、Zn、Na、K、Ca、Ba、Si、F、Th、U 等。

5.2.11 锂含量采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-AES) 测定。

5.2.12 导热系数按照 EJ/T 20236.7 规定,分别在每个石墨球垂直和平行于制造基面方向上各制取一个样品,采用激光脉冲法测定。分别给出垂直、平行方向导热系数测量数据。

5.2.13 腐蚀速率按照 EJ/T 20236.6 规定的方法进行测定。采用专用设备,在干燥的 Ar 气氛中将石墨球样品加热到 1 000 °C,然后将气氛切换成含 1 vol% 水气的 He 气氛,保持 10 h,再将气氛切换回干 Ar,停炉冷却 (Ar 气氛保持到炉温降至 100 °C)、称重,计算石墨球单位表面积单位时间的失重量。

5.2.14 磨损速率按照 EJ/T 20236.5 规定的方法进行测定,以 20 个石墨球为一组进行磨损速率试验。磨损速率试验除测定单球磨损平均值外,还应逐个观察每一个石墨球的表面情况,并记录异常情况。

5.2.15 热膨胀各向异性度按照 EJ/T 20236.8 规定的方法进行测定。在室温至 500 °C 选取实验温度点,分别在每个石墨球垂直和平行于制造基面方向上各制取一个样品,采用垂直和平行于石墨球制造基面向上的热膨胀系数的比值来表征。测量结果应给出每个球每个方向上的热膨胀系数测量值、每个球各向异性度。

6 检验规则

6.1 检验分类

本文件规定的检验分类为鉴定检验和质量一致性检验。

6.2 组批规则

球形燃料元件的批是由一定数量的,采用同一厂家和同一采购批次的原材料,采用相同的制备工艺连续生产制造的燃料元件组成。

6.3 检验项目和取样数量

6.3.1 检验项目及取样数量见表1。

表1 检验项目及取样数量

序号	检验项目	鉴定检验	质量一致性检验	取样数量	要求章条号	检验方法章条号
1	球形燃料元件直径	●	●	全检	4.2.1	5.2.1
2	球形燃料元件表面质量	●	●	全检	4.2.2	5.2.2
3	球形燃料元件压碎载荷	●	○	10个/批	4.2.3	5.2.3
4	球形燃料元件落球强度	●	○	5个/批	4.2.4	5.2.4
5	球形燃料元件无燃料区厚度	●	●	全检	4.2.5	5.2.5
6	球形燃料元件自由铀含量	●	●	5个/批	4.2.6	5.2.6
7	球形燃料元件基体石墨铀污染率	●	●	3个/批	4.2.7	5.2.7
8	基体石墨球密度	●	●	5个/批	4.3.1	5.2.8
9	基体石墨球总灰分	●	●	3个/批	4.3.2	5.2.9
10	基体石墨球总当量硼含量	●	●	3个/批	4.3.3	5.2.10
11	基体石墨球锂含量	●	○	3个/批	4.3.4	5.2.11
12	基体石墨球导热系数	●	○	3个/批	4.3.5	5.2.12
13	基体石墨球腐蚀速率	●	○	3个/批	4.3.6	5.2.13
14	基体石墨球磨损速率	●	○	20个/批	4.3.7	5.2.14
15	基体石墨球热膨胀各向异性度	●	●	3个/批	4.3.8	5.2.15

注：●为必检项目，○为供需双方协商检验项目。

6.3.2 对于压碎载荷和落球强度性能，可采用基体石墨球替代球形燃料元件。应在鉴定检验阶段分别测试球形燃料元件和基体石墨球的性能，存在两种情况：

- 如果基体石墨球的性能等效或低于球形燃料元件性能，则在质量一致性检验中可以采用基体石墨球代替球形燃料元件进行性能检测；
- 如果基体石墨球的性能高于球形燃料元件的性能，则应在质量一致性检验中对基体石墨球的性能数据进行修正。

6.3.3 表1中序号8~15的质量一致性检验，可采用基体石墨球进行检验。

6.4 判定规则

6.4.1 所有试验样品的测试结果均满足技术指标的要求，则判定合格。

6.4.2 对于直径和表面质量，不合格产品应剔除；对于其他检验项目，如果某个试验样品的检验结果不满足技术指标的要求，可加倍取样进行该项目的复验，所有复验结果均合格则判定合格。

7 包装、贮存和运输

7.1 包装形式

应密封包装，以防损伤及污染。包装方式和材质等具体要求由供需双方商定。

7.2 贮运容器

由供需双方商定。每个贮运容器应标识如下内容：

- 产品名称；

- 供方名称；
- 生产批号；
- 容器编号；
- 毛重、净重和产品个数；
- 合同号；
- 日期。

7.3 包装和贮运要求

应符合NB/T 20408的规定，在包装和贮运中不应污染球形燃料元件，损伤球形燃料元件的完整性。

8 产品质量证明文件

质量证明文件应至少包括以下内容：

- 合格证；
 - 合同号；
 - 产品名称；
 - 供方名称；
 - 生产批号；
 - 生产日期；
 - 容器编号；
 - 测试报告。
-