

团 体 标 准

T/CNS 89—2023

高温气冷堆石墨球技术规范

Technical specifications for graphite balls
of high temperature gas-cooled reactors

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	1
5 试验方法	2
6 检验规则	3
7 包装、贮存和运输	4
8 质量证明文件	5

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，辽宁国瑞新材料有限公司，核工业化研究所。

本文件主要起草人：赵宏生、刘兵、唐亚平、国俊华、李筱珍。

高温气冷堆石墨球技术规范

1 范围

本文件规定了高温气冷堆核电厂石墨球的技术指标、试验方法、检验规则、包装、贮存和运输、质量证明文件等要求。

本文件适用于球床模块式高温气冷堆核电厂石墨球的生产 and 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。

- EJ/T 20236.5~20236.11 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

石墨球 **graphite sphere**

由与球形燃料元件相同的基体石墨材料或人造细颗粒核纯石墨制造，用于调节高温气冷堆初装堆芯反应性的石墨材料球体

注：石墨球的外形尺寸、力学性能和热学性能与球形燃料元件基本一致。

4 技术要求

- 4.1 直径应为 59.90 mm~60.20 mm。
- 4.2 表面质量应满足下列要求：
 - 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 的缺陷应不超过 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。
- 4.3 表观密度单批平均值应为 $(1.75 \pm 0.03) \text{ g/cm}^3$ 。
- 4.4 总灰分单批平均值应小于等于 $150 \mu\text{g/g}$ 。
- 4.5 锂含量应小于等于 $0.05 \mu\text{g/g}$ 。
- 4.6 总当量硼含量应小于等于 $1.3 \mu\text{g/g}$ 。
- 4.7 导热系数（1000 °C）应大于等于 $25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。
- 4.8 热膨胀各向异性度（室温~500 °C）应小于等于 1.3。
- 4.9 腐蚀速率（1000 °C，1vol% H₂O-He，10 h）单个值应小于等于 $1.5 \text{ mg/(cm}^2\cdot\text{h)}$ ，平均值应小于等于 $1.3 \text{ mg/(cm}^2\cdot\text{h)}$ 。
- 4.10 磨损速率（20 个球，100 h）应小于等于 $6 \text{ mg/(球}\cdot\text{h)}$ 。

- 4.11 压碎载荷应大于等于 20 kN。
- 4.12 落球强度（4 m，球床）应大于等于 50 次。
- 4.13 铀含量应小于等于 0.6 $\mu\text{g/g}$ 。
- 4.14 石墨化度应大于等于 80 %。

5 试验方法

5.1 直径

应按照EJ/T 20236.11的规定进行测定，至少测量3个方向的直径值，卡尺或专用直径测量仪的精度不低于0.02 mm。

5.2 表面质量

应按照EJ/T 20236.11的规定进行测定。

5.3 表观密度

采用体积-质量法测定，卡尺或专用直径测量仪的精度不低于0.02mm，天平精度不低于0.001 g，至少测量6个方向的直径值。

5.4 总灰分

应按照YB/T 5146中规定的方法进行测量。

5.5 锂含量

采用电感耦合等离子体质谱法（ICP-AES）测定。

5.6 总当量硼含量

石墨球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（ $\mu\text{g/g}$ ）。单个元素含量采用电感耦合等离子体光谱法（ICP-OES）或电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）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。

5.7 导热系数

应按照EJ/T 20236.7的规定进行测定。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。

5.8 热膨胀各向异性度

应按照EJ/T 20236.8的规定进行测定。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，以两个方向从室温到500 $^{\circ}\text{C}$ 平均热膨胀系数的比值来表征石墨球热膨胀各向异性度。测量结果应给出单个球每个方向上的热膨胀系数测量值、每个球的热膨胀各向异性度。

5.9 腐蚀速率

应按照EJ/T 20236.6的规定进行测定。采用专用设备，在干燥的Ar气氛中将已称重并测量石墨球样品加热到1 000 $^{\circ}\text{C}$ ，然后将气氛切换成含水约1%体积的高纯He气氛，保持10 h，再将气氛切换回干燥的Ar气，停炉冷却（Ar气氛保持到炉温降至100 $^{\circ}\text{C}$ ）、称重，计算石墨球单位表面积单位时间的失重量。

5.10 磨损速率

应按照EJ/T 20236.5的规定进行测定，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。

5.11 压碎载荷

应按照EJ/T 20236.10的规定进行测定。采用万能材料试验机，测试石墨球垂直或平行于石墨球制造基面的压碎载荷，加载速度为1 mm/min。

5.12 落球强度

应按照EJ/T 20236.9的规定进行测定。采用专用设备，石墨球在4m高处自由落下到石墨球床上，统计石墨球在指定落球次数后是否保持完整。

5.13 铀含量

采用电感耦合等离子体质谱法。将石墨球在马弗炉中高温灰化、以硝酸溶解后，再以电感耦合等离子体质谱测定铀溶液浓度，计算石墨球的铀含量。

5.14 石墨化度

采用X-射线衍射仪测定石墨晶格参数的方法，基本原理为未石墨化碳制品的平均层面间距离为0.3440 nm，而完全有序的理想石墨层面间距离为0.3354 nm。石墨化度可用公式（1）计算：

$$\text{石墨化度} = (0.344 - d_{002}) / 0.0086 \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

0.344 ——未石墨化碳制品的平均层面间距离，单位为纳米（nm）；

d_{002} ——衍射仪测得制品的002面间距，单位为纳米（nm）；

0.0086 ——理想石墨层面间距（0.3354 nm）与未石墨化平均层面间距（0.3440 nm）的差值，单位为纳米（nm）。

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

批由同一批原材料、采用相同制备工艺、经同一炉次石墨化处理并采用同一机加工工艺生产的石墨球产品组成。

6.3 检验项目及采样数量

石墨球的检验项目及取样数量见表1。

表1 石墨球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	直径	●	●	全检	4.1	5.1
2	表面质量	●	●	全检	4.2	5.2
3	表观密度	●	●	5个/批	4.3	5.3
4	总灰分	●	●	3个/批	4.4	5.4
5	锂含量	●	○	3个/批	4.5	5.5
6	总当量硼含量	●	●	3个/批	4.6	5.6
7	导热系数	●	○	3个/批	4.7	5.7
8	热膨胀各向异性度	●	●	3个/批	4.8	5.8
9	腐蚀速率	●	○	3个/批	4.9	5.9
10	磨损速率	●	○	20个/批	4.10	5.10
11	压碎载荷	●	●	10个/批	4.11	5.11
12	落球强度	●	○	5个/批	4.12	5.12
13	铀含量	●	○	3个/批	4.13	5.13
14	石墨化度	●	●	3个/批	4.14	5.14

注：●为必检项目，○为供需双方协商检验项目。

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石墨球，保证石墨球的完整性。

8 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。
-