

ICS 29.050
CCS Q 53



中华人民共和国国家标准

GB/T 40408—2021

高温气冷堆堆内构件用核级等静压石墨

Nuclear grade isostatic graphite for high temperature gas-cooled reactor internals

2021-08-20 发布

2022-03-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

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。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：中钢集团新型材料(浙江)有限公司、清华大学、冶金工业信息标准研究院。

本文件主要起草人：杨辉、孙立斌、黄岱、吴厚政、郑景须、史力、李贺、杨小武、刘涛、许汉春、曹曙林、毛玉珍、徐建平。

高温气冷堆堆内构件用核级等静压石墨

1 范围

本文件规定了用于高温气冷堆反射层部件用核级等静压石墨的分类、技术要求、试验方法、检验规则、包装、标志、储存、运输和质量说明书。

本文件适用于高温气冷堆堆内构件用核级等静压石墨。

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 1431 炭素材料耐压强度测定方法
- GB/T 3074.1 石墨电极抗折强度测定方法
- GB/T 3074.2 石墨电极弹性模量测定方法
- GB/T 3074.4 石墨电极热膨胀系数(CTE)测定方法
- GB/T 8719 炭素材料及其制品的包装、标志、储存、运输和质量证明书的一般规定
- GB/T 8721 炭素材料抗拉强度测定方法
- GB/T 8722 炭素材料导热系数测定方法
- GB/T 24528 炭素材料体积密度测定方法
- GB/T 38338 炭素材料断裂韧性测定方法
- JY/T 0567 电感耦合等离子体原子发射光谱方法通则
- YB/T 5146 高纯石墨制品灰分的测定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

核级等静压石墨 nuclear grade isostatic graphite

由炭骨料、沥青等原材料通过磨粉、混捏等静压成型、焙烧、浸渍、石墨化、纯化等工艺步骤制造而成的核工业用石墨。

注：该类石墨在快中子($E_n \geq 0.1$ MeV)辐照情况下需要考虑尺寸和材料性能变化对设计的影响，且主要用于高温气冷堆反射层部件，这些部件同时承担堆芯支承结构的功能。

3.2

各向同性度 isotropy

α

成型重力方向热膨胀系数与垂直成型重力方向热膨胀系数的比值。

4 分类

核级等静压石墨按各向同性度指标分为各向同性核级等静压石墨、近各向同性核级等静压石墨和

各向异性核级等静压石墨。

5 技术要求

5.1 未辐照基本指标

核级等静压石墨未辐照基本技术指标要求见表 1。

表 1 基本技术指标

项目	单位	指标		
		各向同性核级等静压石墨 (IIG)	近各向同性核级等静压石墨 (ING)	各向异性核级等静压石墨 (IAG)
各向同性度	—	$1.00 \leq \alpha < 1.10$	$1.10 \leq \alpha < 1.15$	$\alpha \geq 1.15$
体积密度	g/cm ³	1.75~1.85	1.75~1.85	≥ 1.70
热导率 ^{a,b} //,⊥, 室温	W/(m·K)	≥ 120	≥ 110	≥ 100
热膨胀系数 ^{a,c} //,⊥, 室温~500℃	10 ⁻⁶ /℃	3.5~5.5	3.5~5.5	≤ 5.5
抗拉强度 ^a //,⊥	MPa	≥ 24	≥ 20	≥ 20
耐压强度 ^a //,⊥	MPa	≥ 65	≥ 60	≥ 55
断裂韧性 ^a //,⊥	MPa·m ^{1/2}	≥ 0.98	≥ 0.95	≥ 0.90
弹性模量 ^a //,⊥	GPa	8~15	8~15	≥ 8
灰分	%	$\leq 0.005\ 0$	$\leq 0.005\ 0$	$\leq 0.005\ 0$
硼当量	%	$\leq 0.000\ 09$	$\leq 0.000\ 09$	$\leq 0.000\ 09$
<p>当反应堆运行最高温度超过 800℃, 应提供能够包括最高温度下的各项材料热性能测试数据, 温度间隔不应超过 200℃。</p> <p>注 1: // 为垂直成型重力方向 (against gravity), 即横向 (transverse) 或平行晶粒方向 (with grain)。</p> <p>注 2: ⊥ 为成型重力方向 (with gravity), 即轴向 (axial) 或垂直晶粒方向 (against grain)。</p> <p>^a 需要测试两个方向的数据。</p> <p>^b 同时给出温度 200℃、400℃、600℃ 和 800℃ 下的热导率数据。</p> <p>^c 同时给出温度 -200℃、400℃、600℃ 和 800℃ 下的热膨胀系数数据。</p>				

5.2 未辐照其他指标

高温气冷堆反射层部件采用核级等静压石墨时, 还应考虑抗拉强度威布尔分布几何参数、抗折强度、泊松比、硬度、电阻率、孔隙率、氧化性能、疲劳性能、显微组织、石墨缺陷描述 (如裂纹长度、针孔直径、针孔深度、夹杂和气孔尺寸) 等指标要求。

5.3 辐照指标

石墨辐照应在临近于 300℃、450℃、600℃、750℃ 等至少四个温度点, 快中子通量不低于 $36 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ (折合 $20 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ EDND, Equivalent DIDO Nickel Dose), 辐照性能包含尺寸变形、蠕变系数、热导率、热膨胀系数、弹性模量、石墨强度等随快中子通量和温度变化的关系。

5.4 其他要求

当反应堆运行最高温度超过 750 °C 时,应提供能够包括最高温度下的主要辐照性能数据,推荐温度间隔不应超过 150 °C。

6 试验方法

6.1 体积密度

按 GB/T 24528 的规定执行。

6.2 热导率

按 GB/T 8722 的规定执行。

6.3 热膨胀系数

按 GB/T 3074.4 的规定执行。

6.4 各向同性度

按 $CTE_{\perp}/CTE_{\parallel}$ 计算,如 $CTE_{\perp} < CTE_{\parallel}$,则按 $CTE_{\parallel}/CTE_{\perp}$ 计算。

6.5 抗拉强度

按 GB/T 8721 的规定执行。

6.6 耐压强度

按 GB/T 1431 的规定执行。

6.7 抗折强度

按 GB/T 3074.1 的规定执行。

6.8 断裂韧性

按 GB/T 38338 的规定执行。

6.9 弹性模量

按 GB/T 3074.2 的规定执行。

6.10 灰分

按 YB/T 5146 的规定执行。

6.11 硼当量

按 JY/T 0567 的规定应至少测试出 Gd、B、Sm、Eu、Cd、Li 六种元素的杂质含量。硼当量按公式(1)计算:

$$A = 4.400 \times C_{Gd} + 1 \times C_B + 0.534 \times C_{Sm} + 0.425 \times C_{Eu} + 0.317 \times C_{Cd} + 0.144 \times C_{Li} \cdots (1)$$

式中：

A ——硼当量；

C_{Gd} ——样品中 Gd 钆元素的含量；

C_B ——样品中 B 硼元素的含量；

C_{Sm} ——样品中 Sm 钐元素的含量；

C_{Eu} ——样品中 Eu 铕元素的含量；

C_{Cd} ——样品中 Cd 镉元素的含量；

C_{Li} ——样品中 Li 锂元素的含量。

注：公式中各含量前的系数为相应杂质元素硼当量因子。

6.12 石墨辐照测试方法

石墨辐照测试方法参照附录 A。

注：附录 A 仅为一种参照方法。

7 检验规则

7.1 组批

每块石墨块应具有唯一性追溯编号，同一石墨化炉内同一牌号石墨为一个批次。

7.2 取样

石墨抗拉强度和耐压强度检测取样时，应按表 2 规定的取样数量 A 执行；石墨热导率、热膨胀系数、各向同性度、石墨抗折强度、断裂韧性、石墨成分检测取样时，应按表 2 规定的取样数量 B 执行；其他特性检测取样时，应按表 2 规定的取样数量 C 执行。

检测样品提取时，应覆盖石墨块不同位置，特别是要包括石墨块中心区和边缘区。同一特性的样品不能在同一石墨块上提取。

在一个批次之内，选取检测样品的石墨块应通过随机抽样得到，且取样以后要记录所在石墨块的批次、编号和取样位置。

表 2 取样数量

批的重量 β t	取样数量 A 个	取样数量 B 个	取样数量 C 个
$\beta \leq 10$	12	6	2
$10 < \beta \leq 40$	16	10	3
$40 < \beta \leq 100$	20	14	4

当批的重量大于 100 t 时，对超出部分，应按同样规则增加取样。当对应批的重量石墨块数不足取样数量时，可只对每块石墨取样。

7.3 性能检验

石墨块产品应经供方检验部门逐批检验合格、附产品合格证后方可出厂。具体检测指标、试验方法和取样要求见第 5 章、第 6 章、7.1、7.2。

7.4 判定规则

当检验结果符合第 5 章规定的要求时为合格；当存在不符合项，因石墨材料本身具有非绝对均质特性，可对留样或同组批产品中加倍取样，对不合格项进行一次复验，复验合格则判为合格，复验不合格则判为不合格。

8 包装、标志、储存、运输和质量说明书

按 GB/T 8719 的规定执行。



附录 A
(资料性)
石墨辐照测试方法

A.1 辐照样品取样

在批量稳定制造石墨(批容量至少为 10 t)中随机抽取 1 块具有代表性尺寸的石墨坯料,推荐选取的石墨坯料尺寸应是反应堆主要构件数量最多的石墨坯料。

将选取辐照的石墨坯料在高度方向(通常为成型重力方向)等分为 A、B、C 和 D,见图 A.1 a);再对其进行细分为 4 等份:B-1、B-2、B-3 和 B-4,见图 A.1 b);针对 B-1 在长、宽方向等分得到 B-1-1,见图 A.1 c);然后进行切割以制备不同类型样品,见图 A.1 d)。

经过以上步骤,可获取不同位置(上、中、下、边缘、中心),不同方向、测试不同性能的样品,用于辐照测试样品。

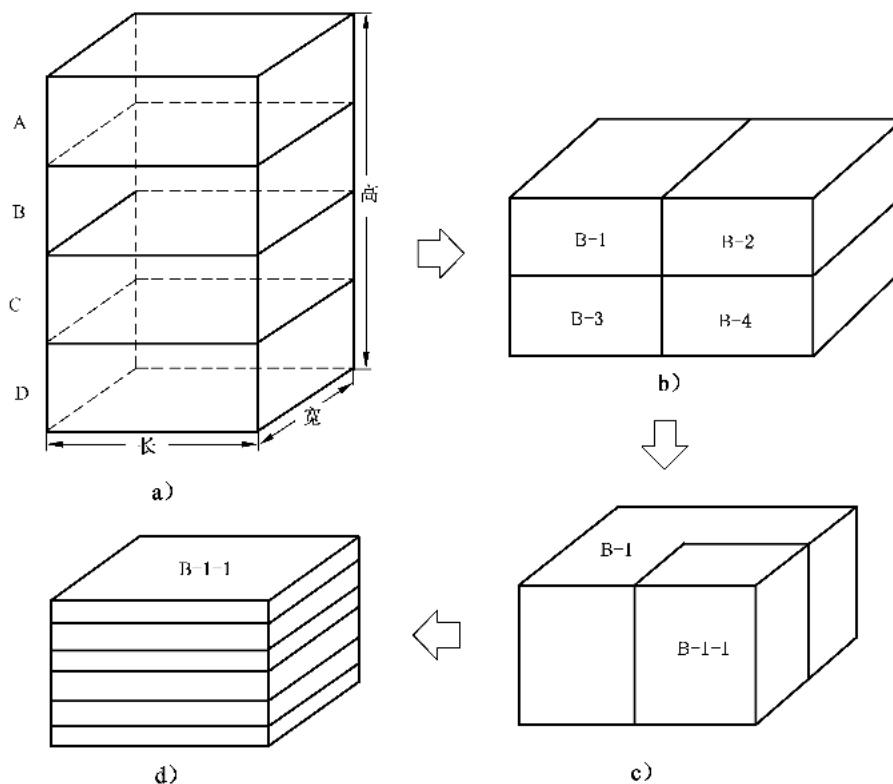


图 A.1 坯料取样切割

A.2 辐照样品尺寸效应测试

当进入材料测试反应堆的辐照样品不符合第 6 章中涉及检测方法标准中要求的样品尺寸,应对进堆的样品进行尺寸效应测试。如耐压强度尺寸效应测试示例见图 A.2。用于尺寸效应测试的单个位置、单个方向的单项性能样品数量应不少于 30 个。

注：受制于辐照测试技术条件限制，进堆的样品一般小于第 6 章中涉及检测方法标准中要求的样品尺寸。

每个样品应进行标识，可通过高精度加工中心或激光刻码标识，并确保标识过程不应影响样品本身性能，且标识应能追溯至样品尺寸、形状、位置以及方向等信息。

单位为毫米

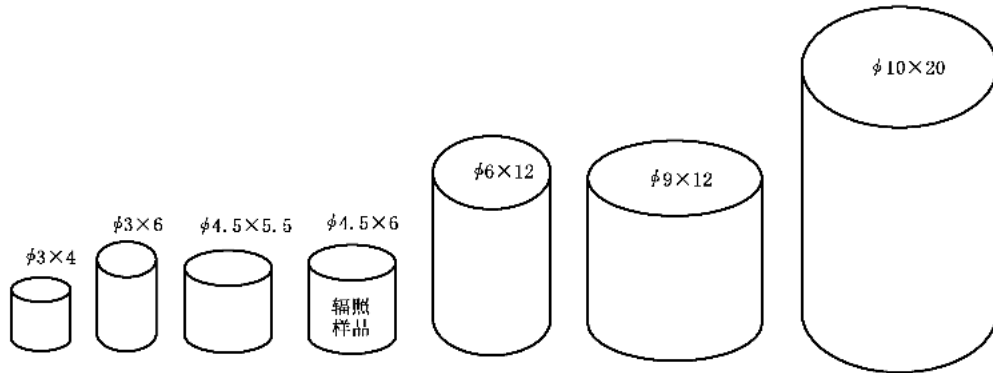


图 A.2 辐照样品尺寸效应测试



A.3 辐照性能测试

进行辐照性能测试时，选取国际公认的材料测试反应堆，辐照测试条件矩阵宜按图 A.3 设计，然后按 5.3 的规定进行测试。因辐照测试成本高、周期长，宜至少选择 2 个以上候选石墨牌号进行 900 °C 或以上温度、快中子注量约 $(15 \times 10^{25}) \text{ n/m}^2$ 辐照筛选测试，经获取并通过辐照筛选阶段数据评估后再进行其他辐照条件测试，以获取全部辐照前、后性能变化数据。

测试方案应保证辐照温度的稳定性和测量数据的准确性，测试报告中应对各种变量进行误差分析。

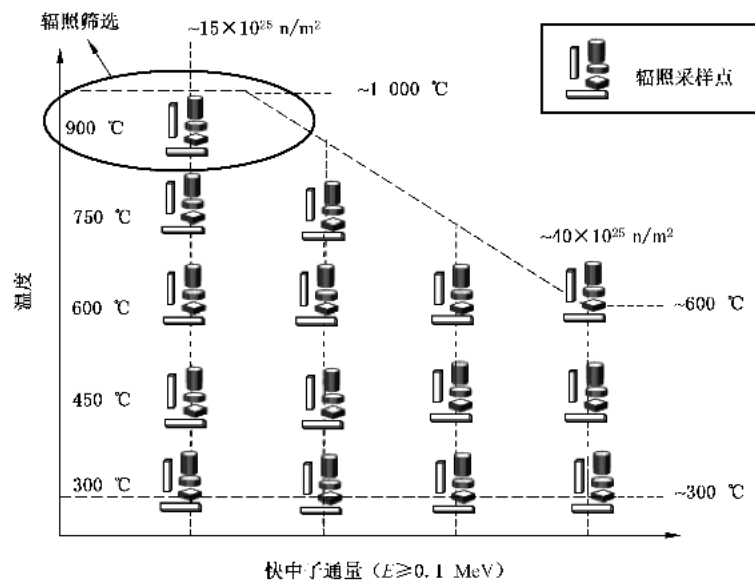


图 A.3 辐照测试矩阵