

NB

中 华 人 民 共 和 国 能 源 行 业 标 准

NB/T 20536—2018

用作乏燃料贮运设备核临界控制的 含硼金属基中子吸收材料

**Boron based metallic neutron absorbers for nuclear criticality control for
storage and transportation of spent fuel**

2018 - 12 - 10 发布

2019 - 04 - 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.....	2
4 化学成分和粒度.....	2
5 密度.....	3
6 ^{10}B 面密度及硼分布均匀性.....	3
7 力学性能.....	4
8 金相.....	5
9 外观检查.....	6
10 尺寸.....	6
11 鉴定试验.....	6
12 标志、包装.....	6
13 质量证明文件.....	7
附录 A（规范性附录） 化学分析法测定 ^{10}B 面密度的方法.....	8
附录 B（资料性附录） 加速腐蚀试验方法.....	9
附录 C（资料性附录） 加速热老化试验方法.....	10

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：中国核动力研究设计院、中国核电工程有限公司、上海核工程研究设计院、中广核工程有限公司。

本标准主要起草人：刘晓珍、王美玲、付道贵、郑越、石悠、王傲松。

用作乏燃料贮运设备核临界控制的含硼金属基中子吸收材料

1 范围

本标准规定了压水堆核电厂乏燃料贮存和运输设备中用于核临界控制的含硼金属基中子吸收材料在性能、试验、检验和验收等方面的技术要求。

本标准适用于压水堆核电厂乏燃料湿法贮存、干法贮存和运输设备核临界控制用含硼铝基材料（简称硼铝材料，下同）和硼不锈钢等含硼金属基或含硼合金中子吸收材料的设计、生产和产品鉴定。硼的存在形式可以是碳化硼、硼铁等形式，硼元素可为天然硼或富集硼。

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/T 223.3 钢铁及合金化学分析方法 二安替比林甲烷磷钼酸重量法测定磷量
- GB/T 223.5 钢铁 酸溶硅和全硅含量的测定 还原型硅钼酸盐分光光度法 (GB/T 223.5—2008, ISO 4829-1:1986, ISO 4829-2:1988, MOD)
- GB/T 223.6 钢铁及合金化学分析方法 中和滴定法测定硼量
- GB/T 223.11 钢铁及合金 铬含量的测定 可视滴定或电位滴定法 (GB/T 223.11—2008, ISO 4937:1986, MOD)
- GB/T 223.25 钢铁及合金化学分析方法 丁二酮肟重量法测定镍量
- GB/T 223.26 钢铁及合金 钼含量的测定 硫氰酸盐分光光度法
- GB/T 223.58 钢铁及合金化学分析方法 亚砷酸钠-亚硝酸钠滴定法测定锰量
- GB/T 223.60 钢铁及合金化学分析方法 高氯酸脱水重量法测定硅含量
- GB/T 223.62 钢铁及合金化学分析方法 己酸丁脂萃取光度法测定磷量
- GB/T 223.63 钢铁及合金化学分析方法 高碘酸钠（钾）光度法测定锰量
- GB/T 223.71 钢铁及合金化学分析方法 管式炉内燃烧后重量法测定碳含量
- GB/T 223.86 钢铁及合金 总碳含量的测定 感应炉燃烧后红外吸收法 (GB/T 223.86—2009, ISO 9556:1989, IDT)
- GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法 (GB/T 228.1-2010, ISO 6892-1:2009, MOD)
- GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法 (GB/T 228.2-2015, ISO 6892-2:2011, MOD)
- GB/T 229—2007 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法 (ISO 148-1: 2006, MOD)
- GB/T 230.1 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法 (A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺)
- GB/T 247 钢板和钢带验收、包装、标志及质量证明书的一般规定
- GB/T 2975 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备
- GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分

- GB/T 3199 铝及铝合金加工产品包装、标志、运输、贮存
GB/T 3246.2 变形铝及铝合金制品组织检验方法
GB/T 3280 不锈钢冷轧钢板和钢带
GB/T 3850 致密烧结金属材料与硬质合金密度测定方法
GB/T 3880.1 一般工业用铝及铝合金板、带材 第1部分：一般要求
GB/T 3880.3 一般工业用铝及铝合金板、带材 第3部分：尺寸偏差
GB/T 6524—2003 金属粉末 粒度分布的测量 重力沉降光透法
GB/T 11170 不锈钢的光谱分析方法
GB/T 13298 金属显微组织检验方法
GB/T 20066 钢和铁 化学成分测定用试样的取样和制样方法
GB/T 20123 钢铁 总碳硫含量的测定 高频感应炉燃烧后红外吸收法（常规方法）
（GB/T 20123—2006，ISO 15350：2000，IDT）
GB/T 20124 钢铁 氮含量的测定 惰性气体熔融热导法（常规方法）
GB/T 20975 铝及铝合金化学分析方法
ASTM C 750 核级碳化硼粉末规范（Specification for Nuclear-Grade Boron Carbide Powder）
ASTM C 791 核级碳化硼的化学、质谱和光谱分析的标准方法（Standard Test Methods for Chemical, Mass Spectrometric, and Spectrochemical Analysis of Nuclear-Grade Boron Carbide）
ASTM E 2971 用中子衰减测定在铝中子吸收体中有效硼10面密度的试验方法（Standard Test Method for Determination of Effective Boron-10 Areal Density in Aluminum Neutron Absorbers using Neutron Attenuation Measurements）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

¹⁰B 面密度 ¹⁰B areal density

单位面积上中子吸收材料所含的中子吸收剂 ¹⁰B 的质量，是材料中单位体积所含 ¹⁰B 质量与材料厚度的乘积，单位为克每平方厘米（g/cm²）。

4 化学成分和粒度

4.1 技术要求

4.1.1 硼铝材料

硼铝材料制造用原材料包括铝合金和碳化硼（B₄C），或其他形式的硼化物，铝合金的化学成分应符合GB/T 3190中铝合金的成分规定，订货合同中应明确铝合金的牌号，碳化硼（B₄C）的化学成分应符合ASTM C 750 Type1的规定。订货合同有特殊要求时，中子吸收材料的原材料化学成分分析结果应满足订货合同要求。

对采用粉末冶金方法制造的硼铝材料，应至少对碳化硼原材料粉末提出粒度要求，包括平均粒径及粒径分布。

硼铝材料产品的化学成分应满足订货合同要求，化学成分应至少包括总硼含量、¹⁰B同位素丰度等参数。

4.1.2 硼不锈钢

硼不锈钢的化学成分应满足表1的要求。订货合同有特殊要求的，按订货合同执行。

表 1 硼不锈钢的化学成分

单位为百分比

元素	Fe	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	B	Co	其他
质量 分数	余量	≤0.08	≤2.00	≤0.045	≤0.030	≤0.75	18.00~ 20.00	12.00~ 15.00	0.2~ 2.25	≤0.2	N≤ 0.10

4.2 分析方法

制造厂应对原材料进行化学成分分析。铝合金的化学成分分析应按GB/T 20975的适用部分进行，原材料B₂C的成分复验应按ASTM C 791进行。硼不锈钢原材料化学成分分析按照GB/T 223.3、GB/T 223.5、GB/T 223.6、GB/T 223.11、GB/T 223.25、GB/T 223.26、GB/T 223.58、GB/T 223.60、GB/T 223.62、GB/T 223.63、GB/T 223.71、GB/T 223.86进行。

制造厂应对成品抽样进行成分分析。每批次成品材料应随机至少取一件进行成分分析。板材的取样方法按照GB/T 20066进行，试样数不少于3个。

硼铝材料产品的成分分析中，总硼含量和¹⁰B同位素含量应按照ASTM C 791中的化学滴定法和质谱法进行。硼不锈钢产品成分分析按GB/T 223的适用部分或GB/T 11170、GB/T 20123、GB/T 20124的规定进行；仲裁试验方法应按GB/T 223的适用部分的规定进行。订货合同中有特殊要求的除外。

粉末粒度及分布应按GB/T 6524—2003的规定进行。

4.3 复验

原材料分析结果不满足4.1成分要求时，应按原取样方法加倍取样，分析结果仍不满足成分要求的，该批次原材料不合格。

成品化学成分分析结果不满足4.1成分要求的，应在原取样位置加倍取样。加倍取样分析结果仍不满足成分要求的，该批次产品不合格。

5 密度

中子吸收材料的密度应大于理论密度的99%。

密度试样的取样位置应具有代表性，如在成品材料的头、中、尾取样，试样总数不少于3个。

密度的测定应按GB/T 3850进行。

密度检验结果不满足要求的，应在原取样位置附近加倍取样检验，如果检验结果不满足要求，该产品不合格。

6 ¹⁰B 面密度及硼分布均匀性

含硼金属基中子吸收材料的¹⁰B面密度应满足订货合同要求。

¹⁰B面密度检查应按批次进行，取样位置和数量应有代表性。

中子吸收材料的¹⁰B面密度测试可采用中子衰减法或化学分析法测试。中子衰减的方法应符合ASTM E 2971，并得到采购方的认可，化学分析法应按照附录A的方法进行。

硼分布均匀性应进行检测，试验方法须得到采购方认可。

检验结果不满足要求时，应在原取样位置附近加倍取样进行检验，如果检验结果仍不满足要求，则该批次产品不合格。

7 力学性能

7.1 性能要求

7.1.1 硼铝材料

硼铝材料的力学性能根据碳化硼含量的不同进行具体规定，以满足材料在使用过程中的具体要求。材料应进行室温力学性能和硬度测试，提供数据。

对于乏燃料干式贮存和运输容器的硼铝材料，应进行高温力学性能测试。

7.1.2 硼不锈钢

硼不锈钢根据力学性能分为A级和B级两类，见表2。订货合同中另有规定的按订货合同执行。

表 2 硼不锈钢力学性能要求

类型	硼含量 wt%	等 级	规定塑性延伸强度 R _{p0.2} /MPa（最小）	抗拉强度 R _m /MPa（最小）	断后伸长率 A _{50mm} /（%）（最 小）	夏比 V 型缺口冲 击能量 J（最小）	洛氏硬度 HRB（最大）
304B	0.29～ 0.29	A	205	515	40.0	88	92
		B	205	515	40.0	54	92
304B1	0.30～ 0.49	A	205	515	40.0	81	92
		B	205	515	35.0	47	92
304B2	0.50～ 0.74	A	205	515	35.0	65	92
		B	205	515	27.0	22	92
304B3	0.75～ 0.99	A	205	515	31.0	52	92
		B	205	515	19.0	14	92
304B4	1.00～ 1.24	A	205	515	27.0	41	95
		B	205	515	16.0	—	95
304B5	1.25～ 1.49	A	205	515	24.0	31	95
		B	205	515	13.0	—	95
304B6	1.50～ 1.74	A	205	515	20.0	22	100
		B	205	515	9.0	—	100
304B7	1.75～ 2.25	A	205	515	17.0	14	100
		B	205	515	6.0	—	100
注1：两类硼不锈钢材料的区别在于冲击韧性不同，A级硼不锈钢中硼化物的分布优于B级硼不锈钢中硼化物的分布。							
注2：常规熔铸法制造的硼不锈钢的性能满足B级硼不锈钢的要求。							

7.2 取样

力学性能的检验应按批次进行。每批次成品应随机抽取至少1件进行力学性能检验。

力学性能的取样应按照GB/T 2975进行，试样的取样数量和位置也可按订货合同的要求执行。

试样切取应采用线切割或其他不影响材料性能的机加工方法，加工中不能产生对性能有影响的热影响区。试样应平直，无毛刺，无机械损伤和可见缺陷。不准许对加工试样的样坯或试样进行校直、弯曲或局部反复弯曲等矫形。

7.3 试验

7.3.1 试验项目和数量

试验项目、试样数量和试验条件列于表3。

表 3 试验项目、试样温度和试验数量

中子吸收材料	试验项目	试验温度	试样数量/件
硼铝材料	拉伸试验	室温	3
		高温（500℃）	3
	洛氏硬度试验	室温	3
硼不锈钢	拉伸试验	室温	3
	冲击试验	室温	3
	洛氏硬度试验	室温	3

7.3.2 试验方法

7.3.2.1 拉伸试验

室温拉伸试验按GB/T 228.1的规定执行。高温拉伸试验按GB/T 228.2的规定执行。

如果拉伸试验结果不满足要求是由于试样存在物理缺陷（不影响产品的使用性能），或由于试样装夹不妥、或试验机失常等而导致，则应另取试样进行试验，并获得采购方认可，若重复试验合格，则该批次材料合格。

若拉伸试验结果不满足要求，则应在试料上重新加倍取样进行试验，若重新试验结果合格，则该批次材料合格；反之，则该批材料不合格。

7.3.2.2 冲击试验

按GB/T 229—2007的规定对硼不锈钢材料进行冲击试验。试样应符合GB/T 229—2007中表2的V型缺口试样的要求。

如果试验结果仅有一个值低于表2规定的最小值，则可在邻近不合格试样的取样部位，截取两组（三个试样一组）试样，进行重复试验。若试验结果满足表2规定，则该材料合格。如果两组试样中的任何一组试验结果不合格，则该材料不合格。

如果试验结果有超过一个值低于冲击性能规定值，则该材料不合格。

7.3.2.3 硬度试验

洛氏硬度试验应按GB/T 230.1进行。

如果试验结果仅有一个值低于硬度的规定，则可在邻近不合格试样的取样部位，截取两组（三个试样一组）试样，进行重复试验。若试验结果满足硬度要求的规定，则该材料合格。如果两组试样中的任何一组试验结果不合格，则该材料不合格。

如果试验结果有超过一个值低于规定值，则该性能不合格。

8 金相

硼铝材料应进行金相检验，金相照片应能够清晰观察到材料的显微组织，基体无明显的孔洞、连通的空隙和裂纹，含硼相应均匀分布在合金基体中，无明显聚集，含硼相和基体间界面清晰，无影响材料性能的界面反应产物。金相观察的放大倍数根据材料自身特点确定，建议放大倍数在200倍以上。

金相检验按批次在材料的头尾取样，沿最终轧制方向进行金相检验。
硼铝材料的金相检验按GB/T 3246.2进行；硼不锈钢金相检验按GB/T 13298进行。

9 外观检查

硼铝材料表面应洁净，无裂纹、无凹坑、无孔洞、无起皮等影响使用的缺陷。

10 尺寸

硼铝板材的尺寸及允许偏差按表4规定执行。硼不锈钢冷轧板材的尺寸及允许偏差按GB/T 3280进行。订货合同中另有规定的按合同执行。

表 4 硼铝板材尺寸及允许偏差

单位为毫米

尺寸名称	尺寸范围	允许偏差
长度	<3500	±2.5
	3500~4500	±4.5
	>4500	±5
宽度	—	+2.0
厚度	2.0~4.0	±0.15
	4.0~7.0	±0.20

硼铝板材的不平度应不低于GB/T 3880.3高精级板材的规定，硼不锈钢板材的不平度要求按GB/T 3280执行；合同另有规定的除外。

尺寸检查应逐件进行。
外形尺寸不满足要求，但机械处理后满足合同规定的应视为合格。

11 鉴定试验

硼铝鉴定试验应包括加速腐蚀试验、加速热老化试验和辐照试验等。加速热老化试验和加速腐蚀试验方法参见附录 B和附录 C，辐照试验要求由供需双方协商确定。

硼不锈钢鉴定试验按合同要求进行，应至少包括腐蚀试验，腐蚀试验的类型可根据具体的使用环境进行规定。

试验后材料的¹⁰B面密度不低于订货合同规定的¹⁰B面密度的最低要求，且硼铝材料的性能变化不能导致设计功能不可接受的变化。

鉴定试验用板材的制造工艺应与批量生产的制造工艺相同。

12 标志、包装

硼铝材料应按GB/T 3880.1进行标志，硼不锈钢应按GB/T 247进行标志。订货合同有规定的按订货合同执行。

硼铝材料应按GB/T 3199进行包装；硼不锈钢应按GB/T 247进行包装。订货合同有规定的按订货合同执行。

13 质量证明文件

制造厂应至少提供以下文件：

- 原材料和成品分析的化学分析报告；
- 密度检验报告；
- 金相检验报告；
- 力学性能试验报告；
- ^{10}B 面密度检验报告；
- 硼分布均匀性检测报告；
- 热物理性能报告；
- 尺寸及表面质量检验报告；
- 鉴定试验报告。

附 录 A (规范性附录)

化学分析法测定 ^{10}B 面密度的方法

A.1 数据测量

化学分析法测定 ^{10}B 面密度需要测定以下参数：

- a) 材料厚度 (t)，用游标卡尺或千分尺测量材料的厚度 t ；
- b) 密度 (ρ)，按照 GB/T 3850 的规定，测定材料密度 ρ ；
- c) 总 B 质量分数 ($\omega(\text{B})$)，按照 ASTM C 791 中的规定的化学滴定法测定材料中总 B 质量分数 $\omega(\text{B})$ ；
- d) ^{10}B 同位素的原子百分比 ($O(^{10}\text{B}/\text{B})$)，按照 ASTM C 791 中规定的质谱法测定材料中 ^{10}B 同位素的原子百分比 $O(^{10}\text{B}/\text{B})$ 。

A.2 ^{10}B 面密度 $\sigma(^{10}\text{B})$ 的计算方法

根据上述结果按照公式 (A.1) 计算获得试样中 ^{10}B 面密度 $\sigma(^{10}\text{B})$ (单位: g/cm^2)：

$$\sigma(^{10}\text{B}) = 0.0925 \times \rho \times \omega(\text{B}) \times O(^{10}\text{B}/\text{B}) \times t \dots\dots\dots (\text{A. 1})$$

式中：

- $\sigma(^{10}\text{B})$ —— ^{10}B 面密度，单位为克每平方厘米 (g/cm^2)；
- ρ —— 密度，单位为克每立方厘米 (g/cm^3)；
- $\omega(\text{B})$ —— 总 B 质量分数，单位为百分比 (%)；
- $O(^{10}\text{B}/\text{B})$ —— ^{10}B 同位素的原子百分比，单位为百分比 (%)；
- t —— 材料厚度，单位为毫米 (mm)

附 录 B
(资料性附录)
加速腐蚀试验方法

B.1 加速腐蚀试验试样

试样应取自代表性板材，腐蚀试样的表面状态应与板材的交货状态一致。腐蚀试样包括五类：均匀腐蚀试样、电偶腐蚀试样、缝隙腐蚀试样、划痕试样和封装试样，每类试样应有足够的平行试样以满足不同时间的取样要求。

B.2 加速腐蚀试验要求

腐蚀试验用溶液应满足采购方乏燃料池水化学条件要求，硼浓度 $\geq 2500\mu\text{g/g}$ 。

腐蚀试验温度需控制在 90°C ，试验期间溶液温度误差应控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内。试验进行过程中，每2000 h取出部分试样，进行腐蚀后试样的性能测定，试样的最长腐蚀浸泡时间不得小于8000 h。

B.3 加速腐蚀试验试样检验

腐蚀试验前后，均匀腐蚀试样应至少检查试样的外观、厚度、质量、显微形貌、密度和 ^{10}B 面密度，并与试验前数据进行对比。

划痕试样和缝隙试样应至少检查腐蚀试验前后的厚度、质量和显微形貌的变化。

电偶腐蚀试样应至少检查腐蚀试验前后的厚度、质量变化及接触区的显微形貌变化。

封装试样应至少检查腐蚀试验前后的厚度、质量、显微形貌的变化。

附 录 C
(资料性附录)
加速热老化试验方法

C.1 加速热老化试验试样

试样应取自代表性材料,试样的表面状态应与材料的交货状态一致。试样类型应包括矩形试样和拉伸试样。每类试样应有足够的平行试样以满足不同试验时间段的取样要求。

C.2 加速热老化试验要求

C.2.1 长期高温实验

将试样置于空气气氛的保温炉内,在400℃的温度下保温,温度偏差控制在±10℃以内。每保温2000 h取试样进行试验后检查。总的试验时间建议不低于8000 h。

C.2.2 短期高温试验

将试样置于常压氦气气氛炉中,在500℃下恒定48 h,温度偏差控制在±10℃以内,研究短期高温氦气环境对材料性能的影响。

C.3 加速热老化试样检验

加速热老化试样应进行试验前后外观、质量、尺寸、密度、B₄C质量分数、¹⁰B面密度和力学性能的检验,以考察材料在热老化试验前后性能的变化。

中 华 人 民 共 和 国
能 源 行 业 标 准
用作乏燃料贮运设备核临界控制的
含硼金属基中子吸收材料

NB/T 20536—2018

*

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

*

2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—50

定价 28.00 元