

ICS 27.120

F 48

# NB

## 中华人民共和国能源行业标准

NB/T 20538—2018

---

### 压水堆核电厂燃料包壳用锆合金管材

**Zirconium alloy tubes used as fuel cladding for pressurized water reactor  
nuclear power plants**

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 .....	1
4 要求 .....	1
5 试验方法 .....	5
6 检验规则 .....	6
7 包装、标志、贮存和质量证明书 .....	6
附录 A（规范性附录） 燃料元件用锆合金管材室温爆破试验方法 .....	8
附录 B（规范性附录） 燃料元件包壳用锆合金管材氢化物取向因子测定方法 .....	10
参考文献 .....	12

## 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、上海核工程研究设计院。

本标准主要起草人：戴训、程竹青、洪晓峰、王朋飞、杨忠波、蒋有荣、吕亮亮、曾奇锋。

# 压水堆核电厂燃料包壳用锆合金管材

## 1 范围

本标准规定了压水堆核电厂燃料包壳用锆合金管材的制造、性能、试验、检验等技术要求。

本标准适用于压水堆核电厂燃料包壳用Zr-4合金管材,其他堆型燃料包壳用锆合金管材也可参照执行。

## 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 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法

GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分:高温试验方法

GB/T 6394—2017 金属平均晶粒度测定方法

GB/T 13747 锆及锆合金化学分析方法(所有部分)

GB/T 34645 金属管材收缩应变比试验方法

EJ/T 1028 锆及锆合金的高压釜腐蚀试验

NB/T 20003.2 核电厂核岛机械设备无损检测 第2部分:超声检测

NB/T 20003.7—2010 核电厂核岛机械设备无损检测 第7部分:目视检测

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**最大周向延伸率** **total circumferential elongation (TCE)**

爆破试验后管材破口处最大周向伸长量与原始周长之比的百分率。

### 3.2

**氢化物取向因子** **hydride orientation fraction**

$F_n$

所观察的视场内偏向管材径向一定角度范围的氢化物板条数量与氢化物板条总数的比值。

示例:  $F_n^{45^\circ}$  表示所观察的视场内偏向管材径向  $45^\circ$  范围内的氢化物板条数量与氢化物板条总数的比值。

## 4 要求

### 4.1 产品分类

管材的牌号、状态和规格应符合表1的规定。



表1 管材的牌号、状态和规格

单位为毫米

牌号	外径	状态	名义壁厚				
			0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Zr-4	5~8	再结晶退火态 M	○ <sup>a</sup>	○	○	○	—
	>8~12		— <sup>b</sup>	○	○	○	—
	>12~16		—	○	○	○	○
<sup>a</sup> 包括本值； <sup>b</sup> 不包括本值。							

4.2 制造要求

4.2.1 制造大纲

- 管材制造前，应制订制造大纲，其内容应至少包括：
- 工艺流程；
  - 铸锭的熔炼工艺，主要包括：熔炼方式、电极制备、熔炼次数等；
  - 加工工艺，主要包括：锻造、β相均匀化处理及淬火、热挤压、冷轧、中间退火、最终退火及精整；
  - 管坯的表面处理工艺（必要时）；
  - 成品管材的表面处理；
  - 成品管材的标识；
  - 成品管材的无损检测；
  - 试样的取样计划及其在试料上的位置；
  - 检验项目及方法。

4.2.2 熔炼

用于管材制造的铸锭采用真空自耗电弧炉熔炼，熔炼次数不少于3次；其自耗电极不准许使用钨极氩弧焊接，用于熔炼铸锭的组分不能被铀沾污。

4.2.3 加工

管材的加工工艺及其变更需经需方认可。

4.2.4 产品标识

每支管材应有产品标识，可追溯锭号、批号等。

4.3 化学成分

管材的化学成分应符合表2的规定，需方化学成分复验允许偏差应符合表3的规定。

表2 化学成分

单位为百分比

主元素	含量	杂质元素	含量（不大于）
Zr	余量	Al	0.0075
Sn	1.20~1.50	B	0.00005
Fe	0.18~0.24	Cd	0.00005
Cr	0.07~0.13	Ca	0.0030
Fe+Cr	0.28~0.37	Co	0.0010
—	—	Cu	0.0050
—	—	Hf	0.010
—	—	Mg	0.0020
—	—	Mn	0.0050
—	—	Mo	0.0050
—	—	Ni	0.0070
—	—	Nb	0.010
—	—	Pb	0.013
—	—	Si	0.012
—	—	Ti	0.0050
—	—	V	0.0050
—	—	W	0.010
—	—	U	0.00035
—	—	Cl	0.010
—	—	C	0.016
—	—	N	0.0060
—	—	H	0.0025
—	—	O	0.16

表3 化学成分复验分析允许偏差

单位为百分比

元素	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	O	其他杂质元素
成分复验允许偏差，不大于	0.050	0.020	0.010	0.020	0.020	0.002 或 规定极限的20%，取较小者

#### 4.4 力学性能

##### 4.4.1 拉伸性能

管材室温及高温拉伸性能应符合表4的规定。其他状态管材的室温及高温拉伸性能由供需双方协商确定。

表4 拉伸性能

试验温度 ℃	抗拉强度 $R_m$ /MPa	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 $A_{50mm}$ (%)
室温	≥460	≥270	≥22
380	≥210	≥125	≥30

4.4.2 爆破性能

再结晶退火态管材室温爆破强度应不低于500 MPa，最大周向延伸率应不低于20%，其他状态管材的室温爆破性能指标由供需双方协商确定。

若需开展高温爆破性能试验，指标由供需双方协商确定。

4.4.3 收缩应变比

收缩应变比（CSR）的指标由供需双方协商确定。

4.5 晶粒度

再结晶退火态管材纵向截面的平均晶粒度级别应不小于GB/T 6394—2017中规定的7级。

4.6 腐蚀性能

试样腐蚀72h的增重应不大于22 mg/dm<sup>2</sup>，试样腐蚀336 h的增重应不大于38 mg/dm<sup>2</sup>。经腐蚀试验后，试样内外表面应为灰黑色、致密、光泽均匀的氧化膜，无白色或褐色的腐蚀产物。

4.7 氢化物取向因子

再结晶退火态管材的氢化物取向因子 $F_n$ 值应不大于0.50，其他状态的管材由供需双方协商确定。

4.8 尺寸和尺寸允许偏差

4.8.1 管材的尺寸和尺寸允许偏差应符合表 5 的规定。

表5 尺寸和尺寸允许偏差

单位为毫米

外径	外径允许偏差	内径允许偏差	最小壁厚
5~8	±0.040	±0.030	由供需双方协商确定
>8~12	±0.045	±0.035	
>12~16	±0.050	±0.040	

4.8.2 管材长度应为 2000 mm~5000 mm。管材以定尺状态交货时，长度允许偏差为±0.7 mm。

4.8.3 管材以定尺状态交货时，管材两端端面垂直度应不大于 0.05 mm。

4.8.4 管材直线度应不大于 0.25 mm/300 mm。

4.8.5 若需方有其他要求，由供需双方协商并在采购合同中规定。

4.9 超声检测

管材超声检测的信号幅度不大于标准人工缺陷最小幅值的75%。

4.10 表面质量

管材内外表面应洁净，无氧化色、裂纹、折叠、起皮、针孔、凹凸、凹陷、划伤、点坑等目视可见的缺陷，必要时建立标样进行检验。

管材内外表面粗糙度Ra均应不大于0.80  $\mu\text{m}$ 。

## 5 试验方法

### 5.1 化学分析

管材化学成分分析按GB/T 13747的规定执行或供需双方均认可的其他方法进行。

### 5.2 力学性能

#### 5.2.1 拉伸性能

管材室温拉伸试验按GB/T 228.1的规定进行，高温拉伸试验按GB/T 228.2的规定进行。达到规定塑性延伸强度前应变速率应为0.00025  $\text{s}^{-1}$ ，相对误差 $\pm 20\%$ ，拉伸到达规定塑性延伸强度后，其应变速率升高到0.0067  $\text{s}^{-1}$ ，相对误差 $\pm 20\%$ 。

#### 5.2.2 爆破性能

管材室温爆破试验方法应符合附录A的规定。

若需方要求并在合同（或订货单）中注明需开展高温爆破性能试验，供需双方应就试验方法达成共识。

#### 5.2.3 收缩应变比

管材收缩应变比检验按GB/T 34645的规定执行。

### 5.3 晶粒度

管材晶粒度测定按GB/T 6394的规定执行。

### 5.4 腐蚀性能

试样在400℃ $\pm 3^\circ\text{C}$ 、10.3 MPa $\pm 0.7$  MPa的水蒸气中进行72 h或336 h的腐蚀，管材蒸气腐蚀试验应按EJ/T 1028的规定执行。除非需方有特别的规定，腐蚀试样应取自具有工艺代表性的最终交货状态管材。

### 5.5 氢化物取向因子

管材氢化物取向因子的检测方法应符合附录B的规定。

建议氢化物与管材径向的夹角为45°，或由供需双方协商确定。

### 5.6 尺寸和尺寸允许偏差

采用超声的方法检验管材全长的内外径和壁厚。

其他尺寸和尺寸允许偏差的检测采用相应精度的量具进行检测。

### 5.7 超声检测

所有管材均应全长开展超声检测，检测方法按照NB/T 20003.2的规定执行或供需双方均认可的其他方法进行。

超声检验装置应采用与被检验管材同材料、尺寸、表面状态、加工工艺及最终热处理制度的标准样管进行校验。标准样管至少在内外表面各加工一个纵向和横向缺陷，人工缺陷应为U型。

标准人工缺陷的长度不大于1.65 mm，宽度不大于0.127 mm，深度应为管材名义壁厚的10%，最深不大于0.05 mm。

## 5.8 表面质量

管材表面缺陷采用目视方法检验，目视方法按照NB/T 20003.7—2010中7.1的规定进行，或采用标样对比检测。

管材表面粗糙度参照GB/T 10610的规定进行检查。

## 6 检验规则

### 6.1 组批

每批管材由同一牌号、熔炼炉号、规格、加工工艺和同一最终热处理炉次产品组成。

如果在检测前，一批管材中的一些管材经过返修，则这些管材应视为单独的一批。

### 6.2 检验项目及取样

管材的检验项目及取样应符合表6的规定。

表6 检验项目及取样

检验项目	取样规定	要求的章条号	试验方法章条号
化学分析	氧、氮、氢在成品管材上取样分析，每批任取三支管材，每支各取一个试样。其他元素可在铸锭或成品上分析，每个铸锭的上、中、下各取一份试样或每批任取两支管材，每支各取一份试样	4.3	5.1
室温拉伸	每批任取三支管材，每支各取一个试样	4.4.1	5.2.1
高温拉伸	每批任取三支管材，每支各取一个试样	4.4.1	5.2.1
爆破性能	每批任取两支管材，每支各取一个试样	4.4.2	5.2.2
收缩应变比	每批任取两支管材，每支各取一个试样	4.4.3	5.2.3
晶粒度	每批任取两支管材，每支各取一个试样	4.5	5.3
腐蚀性能	每批任取三支管材，每支各取一个试样	4.6	5.4
氢化物取向因子	每批任取两支管材，每支各取一个试样	4.7	5.5
尺寸及尺寸允许偏差	逐根	4.8	5.6
超声检测	逐根	4.9	5.7
表面缺陷	逐根	4.10	5.8
表面粗糙度	每批任取五支管材	4.10	5.8

### 6.3 检验结果判定

6.3.1 化学成分、力学性能、氢化物取向因子、腐蚀性能及晶粒度检验中，如有一个试样检验结果不合格，则从该批取双倍试样对该不合格项目进行重复试验，如仍有结果不合格时，则判该批产品不合格，重复试验的试验结果和原试验结果均应提供给需方；若有两个及以上试样结果不合格，则判该批产品不合格。

6.3.2 尺寸及尺寸允许偏差、超声检测和表面质量不合格时，判单支管材不合格。

## 7 包装、标志、贮存和质量证明书

### 7.1 包装及标志

管材应分层包装，管材间应用较软的材料隔开，防止其相互窜动触碰造成任何损伤。包装操作应确保管材表面洁净。箱内应采取防潮保护措施，箱外注明“防潮”“轻放”等字样或标志。每个包装箱应标记如下内容：

- 订单号或合同号；
- 牌号；
- 管材尺寸、数量、毛重和净重；
- 标准编号包括版本号；
- 产品批号；
- 制造厂名。

### 7.2 贮存

所有产品均应放在干燥、清洁的库房内，室内不得有酸、碱等易挥发物或腐蚀性气体，并应注意产品相应技术标准中有关保存期限的规定。

### 7.3 质量证明书

每批次管材应附有质量证明书，注明如下内容：

- 合格证书；
- 不符合项报告（如果有）；
- 供方名称；
- 产品名称；
- 产品牌号、规格和状态；
- 熔炼炉号（锭号）、批号、批重和件数；
- 分析检验结果及质量检验部门印记；
- 标准编号；
- 包装日期；
- 采购合同号。

## 附 录 A (规范性附录)

### 燃料元件用锆合金管材室温爆破试验方法

#### A.1 仪器设备

主要仪器设备如下:

- 试验装置, 能够满足锆合金管材内压爆破试验要求相关的试验装置。
- 压力传感器, 精度不低于0.5%FS;
- 外径千分尺, 精度不低于0.005mm;
- 壁厚千分尺, 精度不低于0.005mm;
- 卡尺, 精度不低于0.02mm。

#### A.2 试样

A.2.1 爆破试样应取自具有工艺代表性的最终交货状态管材。

A.2.2 管材试验段长度要求应大于外径的10倍。

A.2.3 若需使用芯轴, 芯轴中心段直径尺寸为 $(d-0.30)\text{mm} \sim (d-0.20)\text{mm}$ , 其中 $d$ 为管材平均内径(单位为毫米), 且沿芯轴长度方向应加工有凹槽, 以利于试验介质的流动。

#### A.3 试验步骤

A.3.1 检查设备状态, 完成锆合金管的外径及壁厚的测量。在管材试验段长度两端及中部各进行一次外径的测量, 其平均值为管材外径。在管材两端沿周向等角度各进行至少三次壁厚的测量。外径及壁厚测量的精度应不低于0.005mm。

A.3.2 将试样固定接通加压回路, 将管路中的气体排除干净。

A.3.3 在室温( $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ )下, 采用恒定加压速率的方法进行内压加载(加压速率为 $13.8\text{ MPa/min} \pm 1.4\text{ MPa/min}$ )直至管材试样破裂。

A.3.4 试验完成后进行管材的周向伸长量的测量位置应为破口处最大膨胀部分(不含破口), 其精度不低于0.5 mm。

#### A.4 试验数据处理

爆破强度按公式(A.1)计算:

$$S = \frac{PD}{2t} \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

式中:

$S$ ——周向爆破强度, 单位为兆帕(MPa);

$P$ ——爆破流体压力, 单位为兆帕(MPa)

$D$ ——管材试样试验前平均外径与平均壁厚的差值, 单位为毫米(mm);

$t$ ——管材试样试验前最小壁厚, 单位为毫米(mm)。

最大周向延伸率按公式(A.2)计算:

$$TCE = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100\% \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$TCE$ ——最大周向延伸率，单位为百分数（%）；

$C_2$ ——管材试样破口部位最大周长（不含破口），单位为毫米（mm）；

$C_1$ ——管材试样试验前周长，单位为毫米（mm）。

#### A.5 试验报告

试验报告至少应给出一下几个方面的内容：

- 实验室名称；
- 设备编号和试验日期；
- 试样名称、数量等试样信息；
- 升压速率及试验温度；
- 最大流体压力和爆破强度；
- 最大周向延伸率。



## 附 录 B (规范性附录)

### 燃料元件包壳用锆合金管材氢化物取向因子测定方法

#### B.1 仪器设备

主要仪器设备如下：

- 高压釜渗氢或电解渗氢或气相渗氢装置；
- 金相显微镜，放大倍数50倍～500倍；
- 图像分析仪，像素大于 $512 \times 512$ ；
- 热电偶，K型，II级；
- 温控仪，0.3级。

#### B.2 试样

B.2.1 氢化物取向因子测定试样应取自具有工艺代表性的最终交货状态管材。

B.2.2 管材试样加工过程中不能产生变形。

#### B.3 试验步骤

B.3.1 采用高压釜渗氢、电解渗氢或气相渗氢获得含氢试样，渗氢温度不超过 $414^{\circ}\text{C}$ 。渗氢方法不能使氢在试样表面积聚，且渗氢后试样表面不能进行机械加工。

B.3.2 若样品在渗氢过程中或渗氢后进行热处理，热处理应在惰性环境下进行，温度为 $399^{\circ}\text{C} \pm 14^{\circ}\text{C}$ ，时间为 $5\text{ h} \pm 1\text{ h}$ ，冷却速率低于 $14^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。若热处理在真空下进行，为防止脱氢，热处理时的压力应大于 $1.33 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。

B.3.3 每批次渗氢样品至少分析一次氢含量，氢含量的分析按GB/T 13747的规定执行，氢含量应在 $100\mu\text{g/g} \sim 250\mu\text{g/g}$ 之间。

B.3.4 在具有代表性的视场中将管材沿直径方向均分为三层（内层、中间层和外层）。

B.3.5 采用图像分析仪对每一层氢化物进行角度和条数的统计，记录视场内与直径方向成一定角度的氢化物条数及总条数，其中长度小于 $0.015\text{ mm}$ 的氢化物不列入统计，且长度大于 $0.015\text{ mm}$ 的氢化物分叉应视为单独一个氢化物。

#### B.4 试验数据处理

氢化物取向因子按公式（B.1）进行计算：

$$Fn = \frac{N_{\theta}}{N} \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

式中：

$N_{\theta}$ ——视场内与径向成一定角度的氢化物条数；  
 $N$ ——视场内与所成角度在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的氢化物条数。

#### B.5 试验报告

试验报告至少应给出一下几个方面的内容：

- 实验室名称；
- 设备编号和试验日期；
- 试样名称、数量等试样信息；
- 渗氢方式及氢含量；
- 氢化物取向因子。

### 参 考 文 献

- [1] GB/T 10610 产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法
-

中 华 人 民 共 和 国  
能 源 行 业 标 准  
压水堆核电厂燃料包壳用锆合金管材  
NB/T 20538—2018

\*

核工业标准化研究所出版发行  
北京市海淀区骚子营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