YS

××××-××-××实施

××××-××-××发布

锆合金管材内压蠕变试验方法

Method for burst creep testing of zirconium alloy tubes

（送审稿）

YS/T XXX－XXXX

中华人民共和国有色金属行业标准

ICS 77.040.10

H 22

 DAITI

中华人民共和国工业和信息化部 发布

**前 言**

本标准是按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）提出并归口。

本标准负责起草单位：西部新锆核材料科技有限公司、中国核动力研究设计院、苏州热工研究院有限公司、西安汉唐分析检测有限公司、深圳市万斯得自动化设备有限公司、西北有色金属研究院。

本标准主要起草人：惠泊宁、周军、李帆、李维敏、任洁、戴训、张晏玮、洪晓峰、柏广海、黄建良、焦磊、李顺平、於旻。

锆合金管材内压蠕变试验方法

1. 范围

本标准规定了锆合金管材内压蠕变试验方法。

本标准适用于锆合金管材内压蠕变试验，其他金属管材的内压蠕变试验也可参照执行。

1. 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 228.2-2015 金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

有效长度 effective length

*L*0

室温下施力前，样品两个密封端面之间的长度。*L*0应不小于10*D*0，为避免样品因密封应力影响试验结果准确度，*L*0宜为不包含样品两端距离密封连接处各10mm的剩余长度。

原始参考外径 original reference outer diameter

*D*0

室温下施力前，样品有效长度范围内的外径测量值。

原始参考壁厚 original reference wall thickness

*δ*0

室温下施力前，样品两端的壁厚测量值。

原始参考管壁中径 original reference tube wall centre diameter

*D*c

室温下施力前，管材侧壁中心线的直径。*D*c无法直接测量，通过原始参考外径*D*0与原始参考壁厚*δ*0之差计算。

试验起始参考外径 test start reference diameter

*D*s

试验温度下，施加试验力时，试验起始时刻，样品有效长度范围内的外径测量值。

形变参考外径 deformation reference outer diameter

*D*d

试验期间任一时刻，样品有效长度范围内的外径测量值。

试验结束参考外径 test end reference diameter

*D*e

试验温度下，施加试验力时，试验结束时刻，样品有效长度范围内的外径测量值。

非弹性形变试验起始参考外径 inelastic deformation test start reference diameter

*D*si

试验升温前，施加试验力时，样品有效长度范围内的外径测量值。

非弹性形变试验结束参考外径 inelastic deformation test end reference diameter

*D*ei

试验降至室温时，施加试验力时，样品有效长度范围内的外径测量值。

参考应力 reference stress

*σ*

在样品内部单位横截面内，施加在管材内部的试验力与样品管壁横截面积之比。规定单位横截面的周长为原始参考管壁中径的周长。

试验压强 test pressure

*P*

试验期间，施加于样品内的流体压强。

外径延伸 diameter elongation

Δ*D*

试验温度下，施加试验力时，试验期间任一时刻，形变参考外径*D*d相对于试验起始参考外径*D*s的增量；或试验结束参考外径*D*e相对于试验起始参考外径*D*s的增量。

非弹性形变外径延伸 inelastic deformation diameter elongation

Δ*D*i

室温非弹性形变下，试验结束参考外径*D*ei相对于非弹性形变试验起始参考外径*D*si的增量。

外径蠕变延伸率 diameter percentage creep elongation

*A*fD

试验温度下，施加试验力时，外径延伸Δ*D*与试验起始参考外径*D*s之比的百分率。

注1：关于外径延伸的术语，可用符号“ε”代替“*A*”。

注2：下标f为法文中蠕变的意思。

注3：*A*fD25表示距离样品长度方向中心为25mm位置的两侧中任一侧，对应的外径蠕变延伸率。

非弹性形变外径蠕变延伸率 inelastic deformation diameter percentage creep elongation

*A*fDi

室温下，非弹性形变外径延伸Δ*D*i与非弹性形变试验起始参考外径*D*si之比的百分率。

1. 原理

将密封好的样品一端与增压系统连接，试验环境宜为真空或惰性气氛保护，升温至试验温度后，在管材内部以惰性气体为介质施加恒定的试验力，并保持一定时间，测定外径蠕变延伸率、蠕变速率等力学性能。

1. 材料
	1. 惰性气体：体积分数不小于99.99%，推荐氩气。
	2. 高压密封卡套：推荐硬密封，密封压强应大于试验压强*P*，推荐不小于50MPa。
2. 试验设备
	1. 测力系统
		1. 试验机

试验机应能使样品施加至试验压强*P*，压强波动宜≤0.5MPa。

* + 1. 压强测量系统

压强测量系统的准确度应为0.5级或优于0.5级。

* 1. 测形变系统
		1. 外径形变测量系统

光学或激光测量系统，测量精度应为0.005mm或优于0.005mm。

注：当仅测量非弹性形变外径蠕变延伸率*A*fDi时，不涉及本章条的外径形变测量系统。

* + 1. 千分尺

测量精度应为0.01mm或优于0.01mm。

* + 1. 游标卡尺

测量精度应为0.02mm或优于0.02mm。

* 1. 加热装置
		1. 温度的允许偏差

加热装置应能使样品加热至试验温度*T*。

*T*1是指在样品有效长度表面上测量的温度，该温度已进行系统误差修正，但未考虑温度测量系统的不确定度。

测量温度*T*1和试验温度*T*的允许偏差及温度梯度参照GB/T 228.2-2015第9.3.1章条表2执行。

* + 1. 温度测量系统

温度测量系统的最低分辨力为1℃，允许误差应在±0.004 *T*或±2℃内，取最大值。

* + 1. 样品舱室

样品舱室宜能进行真空或惰性气体保护，真空保护时极限真空度宜等于或优于5×10-3Pa，工作真空度宜等于或优于5×10-2Pa。

1. 样品
	1. 取样

将锆合金管材样品使用车床或其他方式加工，确保有效长度*L*0≥10*D*0，长度宜为5mm的倍数。加工过程中应尽可能使样品表面缺陷或残余变形降到最低。

* 1. 原始参考管壁中径*D*c的测定

宜在样品有效长度范围内以足够的点数测量样品的外径与壁厚，以平均值计算原始参考外径*D*0与原始参考壁厚*δ*0，根据本标准第3章给出的定义计算原始参考管壁中径*D*c。

1. 试验步骤
	1. 试验条件
		1. 240h蠕变试验条件：试验温度T=400℃±3℃，参考应力*σ*=130MPa±10MPa，试验时间t=240h±1h。
		2. 其他试验条件依据产品标准规定。
	2. 样品的装载与加热
		1. 将样品使用密封卡套进行密封。
		2. 施加试验力可采用以下两种任意方式：
			1. 实时测量方式：当测量外径蠕变延伸率或非弹性形变外径蠕变延伸率时，先将密封好的样品装于试验机上，以氩气（或氦气）为介质在样品内部施加预载试验力，预载压强宜不大于试验压强*P*，通过压强值是否恒定检查密封性。
			2. 终点测量方式：当仅测量非弹性形变外径蠕变延伸率时，以氩气（或氦气）为介质在样品内部施加试验力，压强按照第8.3.1章条计算。通过压强值是否恒定检查密封性，并将密封好的样品装于试验机上。
		3. 检查完毕后宜将样品舱室抽真空或冲氩气（或氦气）保护，抽真空保护的工作真空度宜等于或优于5×10-2Pa，升温至达到规定的试验温度范围。

注：当采用第8.2.2.2章条的终点测量方式时，不涉及本标准第8.3.3章条的施加试验力，不涉及本标准第8.5.1章条的读取外径实测值。

* 1. 施加试验力
		1. 试验所需施加的试验压强*P*按式（1）计算：

*P*=*σ×2δ*0*/D*c····················································（1）

式中：

*P*$ $——试验压强，单位为兆帕（MPa），结果保留至0.1MPa；

*σ* ——参考应力，单位为兆帕（MPa），结果保留至0.1MPa；

*δ*0——原始参考壁厚，单位为毫米（mm），结果保留至0.01mm；

*D*c——原始参考管壁中径，单位为毫米（mm），结果保留至0.01mm。

* + 1. 按照规定的试验条件，设定试验压强，试验时间。
		2. 升温至规定试验温度范围后，开始施加试验力。
		3. 在开始记录试验时间前，样品应至少保温与保压10min，除非产品标准另有规定。
	1. 试验中断
		1. 当试验不满足试验条件范围时，应中断试验并停止计时。重新达到试验条件后，继续试验并继续计时。试验中断后，重新开始试验至达到试验条件的时间累计不应超过试验条件中试验时间的10%。
		2. 应确保不因样品收缩而导致样品上试验力超载，宜在中断期间保持样品上的试验压强。
		3. 对于每次试验意外中断的原因，应在试验条件恢复后，记录在试验报告中。例如：加热中断或停电。
		4. 当试验发生中断时，试验中断的数据可依据外径延伸率-时间曲线中有效数据的线性进行模拟修正。
	2. 温度和外径延伸的记录
		1. 当试验条件达到规定范围时，外径形变测量系统应持续测量样品形变参考外径*D*d，直至试验结束，分别记录试验起始参考外径*D*s、形变参考外径*D*d、试验结束参考外径*D*e。

注：形变参考外径的测量，宜在10s内读取不少于5次外径实测值，求平均数计算。

* + 1. 在整个试验过程中应充分记录样品的温度，来证实满足试验条件。
		2. 在整个试验过程中应连续记录或记录足够多的外径延伸数据来绘制外径延伸率-时间曲线。
		3. 当只测定规定时间的外径蠕变延伸率时，可不绘制外径延伸率-时间曲线，只测定试验起始参考外径*D*s和试验结束参考外径*D*e。
		4. 当只测定规定时间的非弹性形变外径蠕变延伸率时，可不绘制外径延伸率-时间曲线，只测定非弹性形变试验起始参考外径*D*si和非弹性形变试验结束参考外径*D*ei，但宜考虑施加气体在试验温度下的膨胀系数并在计算时进行数据修正。
	1. 外径延伸率-时间曲线

依据所记录的外径延伸率和时间，绘制外径延伸率-时间曲线，示意图见图1。



图1 外径延伸率-时间曲线示意图

1. 试验数据处理
	1. 结果的计算与表示

外径蠕变延伸率计算按式（2）进行。

$ A\_{fD}=\frac{D\_{e}-D\_{s}}{D\_{s}}$···················································（2）

其中：

$A\_{fD}$——外径蠕变延伸率，单位为百分比（%），修约至0.01%；

*D*e ——试验结束参考外径，单位为毫米（mm），修约至0.01mm；

*D*s ——试验起始参考外径，单位为毫米（mm），修约至0.01mm。

* 1. 其他结果的表示

根据本标准第3章给出的定义计算相关试验结果，试验结果的表示应按以下规定和GB/T 8170进行修约：

——规定温度（*T*）：1℃；

——长度（*L*0）：0.1mm；

——外径（*D*0、*D*d、*D*si、*D*ei）、外径延伸（Δ*D*、Δ*D*i）：0.01mm；

——非弹性形变外径蠕变延伸率（*A*fDi、*A*fDi25）：0.01%。

1. 测量不确定度

由于不确定度是依据试验材料本身特性以及试验条件得出，本标准附录给出N36锆合金Ф9.5mm×δ0.57mm规格包壳管的评估范例。

1. 试验报告
	1. 试验报告应包含下列内容：

——样品的基本信息（包括样品编号，材料名称等）；

——使用的标准（包括发布或出版年号）；

——试验条件（包括试验温度、试验压强、试验时间）；

——外径蠕变延伸率；

——与基本试验步骤的差异；

——试验中观察到的异常现象；

——试验日期。

* 1. 本标准定义的试验条件和限定不应受测量结果的不确定度而调整（见附录）。
	2. 不应将试验结果与估测的测量不确定度组合起来评定产品是否符合相关产品标准（见附录）。

附 录 A

（资料性附录）

管材内压蠕变试验测量结果不确定度的评定

A.1 总则

测量不确定度的分析对于识别测量结果的不一致性的主要来源是有用的。而不恰当的根据测量不确定度进行调整而判断产品不合格是很有风险的。因此根据以下步骤推导的不确定度仅供参考，除非客户有特别要求。

本附录给出了利用已知蠕变性能的材料根据本标准评估测量不确定度的实例。应明确利用本方法是不能给出标准的不确定度值，因为不确定度的分量既有与材料相关的也有与材料不相关的。因此在进行测量不确定度的计算之前，宜对该种材料温度和应力的关系进行了解。

A.2 测量结果不确定度的评定范例

A.2.1 试验条件

240h蠕变试验条件：试验温度T=400℃±3℃，参考应力*σ*=130MPa±10MPa，试验时间t=240h±1h，升压时间宜为5min~10min。

A.2.2 试验结果

锆合金管材内压蠕变试验结果的测量不确定度的影响因素包含：试验结束参考外径、试验起始参考外径、重复性、试验条件波动对外径蠕变延伸率的影响（试验温度、试验压强）。

使用6个N36锆合金Ф9.5mm×δ0.57mm规格的包壳管样品得到测量列，均未发生试验中断的现象，测量结果见表A.1。结果的标准偏差按照贝塞尔公式计算：

$S\_{i}$=$\sqrt{\frac{\sum\_{i=0}^{n}\left(X\_{i}-\overbar{X}\right)^{2}}{n-1}} $················································（A.1）

式中：

$\overbar{X }$=$ \frac{1}{n}\sum\_{i=1}^{n}X\_{i}$

表A.1 重复性试验结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 试验起始参考外径$D\_{s}$ / mm | 试验结束参考外径$D\_{e}$ / mm | 试验温度*T* / ℃ | 试验压强*P* / MPa | 外径蠕变延伸率$ A\_{fD}$ / % |
| 1 | 9.554 | 9.600 | 402.5 | 16.97 | 0.48 |
| 2 | 9.561 | 9.603 | 399.0 | 16.95 | 0.44 |
| 3 | 9.555 | 9.602 | 400.5 | 17.66 | 0.47 |
| 4 | 9.562 | 9.602 | 401.0 | 15.55 | 0.43 |
| 5 | 9.556 | 9.600 | 399.5 | 15.93 | 0.46 |
| 6 | 9.562 | 9.601 | 397.5 | 16.11 | 0.42 |
| 平均值 | 9.558  | 9.601  | 400.0  | 16.53  | 0.45  |
| 标准偏差*S*i | 0.004  | 0.001  | 1.732  | 0.793  | 0.024  |
| 相对标准偏差*S* | 0.039% | 0.013% | 0.433% | 4.797% | 5.259% |

A.3 外径蠕变延伸率不确定度的评定

A.3.1 数学模型

外径蠕变延伸率不确定度的数学模型为：

$ A\_{fD}=\frac{D\_{e}-D\_{s}}{D\_{s}}$···················································（A.2）

$u\_{crel}$($A\_{fD}$)=$ \sqrt{u\_{rel}^{2}\left(D\_{e}\right)+u\_{rel}^{2}\left(D\_{s}\right)+u\_{rel}^{2}\left(rep\right)+u\_{rel}^{2}\left(A\_{fDC}\right)}$······················（A.3）

式中：

$ A\_{fD}$ ——外径蠕变延伸率；

$D\_{e}$——试验结束参考外径；

$D\_{s}$——试验起始参考外径；

$rep$——重复性；

$A\_{fDC}$ ——试验条件波动对外径蠕变延伸率的影响。

A.3.2 重复性$rep$的A类相对标准不确定度分项$u\_{rel}\left(rep\right)$的评定

本例评定2个平行样品测量平均值的不确定度，则：

$u\_{rel}\left(rep\right)=\frac{s}{\sqrt{n}}$ = $\frac{5.259\%}{\sqrt{2}}$ = 3.719%

A.3.3 试验结束参考外径$D\_{e}$的B类相对标准不确定度分项$u\_{rel}\left(D\_{e}\right)$的评定

光学测量系统示值误差带来的相对标准不确定度$u\_{rel}\left(D\_{e}\right)$，光学测量系统的示值误差为0.005mm，本试验的平均试验结束参考外径为9.601mm，按均匀分布考虑*k*=$\sqrt{3}$，则：

$u\_{rel}\left(D\_{e}\right)=\frac{0.005}{\sqrt{3} × 9.601}$ = 0.030%

A.3.4 试验起始参考外径$D\_{s}$的B类相对标准不确定度分项$u\_{rel}\left(D\_{s}\right)$的评定

光学测量系统示值误差带来的相对标准不确定度$u\_{rel}\left(D\_{s}\right)$，光学测量系统的示值误差为0.005mm，本试验的平均试验起始参考外径为9.558mm，按均匀分布考虑*k*=$\sqrt{3}$，则：

$u\_{rel}\left(D\_{s}\right)=\frac{0.005}{\sqrt{3} × 9.558}$ = 0.030%

A.3.5 试验条件波动*C*影响带来的相对标准不确定度分项$u\_{rel}\left(A\_{fDC}\right)$的评定

在试验温度、试验压强等试验条件允许的变化范围内，外径蠕变延伸率最大相差0.06%，所以试验条件波动对外径蠕变延伸率的影响为±0.03%，按均匀分布考虑*k*=$\sqrt{3}$，则：

$u\_{rel}\left(A\_{fDC}\right)=\frac{0.03\%}{\sqrt{3} × 0.45\%}$ = 3.849%

A.3.6 外径蠕变延伸率的相对合成不确定度

$u\_{crel}$($A\_{fD}$)=$ \sqrt{u\_{rel}^{2}\left(D\_{e}\right)+u\_{rel}^{2}\left(D\_{s}\right)+u\_{rel}^{2}\left(rep\right)+u\_{rel}^{2}\left(A\_{fDC}\right)}$

= $\sqrt{3.719\%^{2}+0.030\%^{2}+0.030\%^{2}+3.849\%^{2}}$ = 5.352%

A.3.7 外径蠕变延伸率的扩展不确定度

取包含概率*р*=95%，按*k*=$2$

$U\_{95,rel}(A\_{fD})$=*k*·$u\_{crel}$($A\_{fD}$)········································（A.4）

$U\_{95,rel}(A\_{fD})$=2 × 5.352% = 10.704%

0.45% × 10.704% = 0.048%