

团 体 标 准

T/CNS 145—2025

Cr 涂层锆合金包壳单应力小冲杆环向 蠕变试验方法

Test method for single-stress small punch circumferential creep of zirconium
alloy cladding with Cr coating

2025-06-11 发布

2025-08-01 实施

中 国 核 学 会 发 布
中 国 标 准 出 版 社 出 版

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 原理2

5 试样3

6 试验装置3

7 试验步骤4

8 试验数据5

9 数据处理6

10 断口检查7

11 试验报告7

附录 A(资料性) 夹具设计参考尺寸9

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有可能涉及专利。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。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：中国核动力研究设计院、中山大学、福州大学、苏州热工研究院有限公司、重庆大学、中广核研究院有限公司。

本文件主要起草人：钟运涛、赖焕生、张瑞谦、郭金泉、李紫祎、韦天国、伍晓勇、黄齐飞、刘康林、武焕春、张勇、王瀚霄、刘鹏亮、薛佳祥。

Cr涂层锆合金包壳单应力小冲杆环向蠕变试验方法

1 范围

本文件描述了Cr涂层锆合金包壳单应力小冲杆环向蠕变试验方法的试验原理、试验设备、试样、试验步骤和试验报告内容。

本文件适用于金属薄壁管的单应力小冲杆环向蠕变试验。

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 2039 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法

GB/T 29459.1 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法 第1部分:总则

GB/T 16825.1—2008 静力单轴试验机的检验 第1部分:拉力和(或)压力试验机测力系统的检验与校准

3 术语和定义

GB/T 29459.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

试样厚度 initial thickness of the specimen

h_0

试样在试验前的厚度。

3.2

断口厚度 final thickness adjacent to the area of the fracture specimen

h_f

试验断裂失效后断口处的试样壁厚。

3.3

冲头半径 radius of semi-cylindrical-headed punch

r

半圆柱形冲头的半径。

3.4

冲头宽度 width of semi-cylindrical-headed punch

W

冲杆半圆柱形冲头的宽度。

3.5

冲压区宽度 width of the punch region

b

试样受冲压载荷区域的宽度。

3.6

摩擦系数 friction coefficient

μ

压头与试样间的摩擦系数。

3.7

蠕变应力 creep stress

σ

试样在伸长方向的载荷。

3.8

位移 displacement

u

蠕变过程中冲杆的位移。

3.9

蠕变应变 creep strain

ϵ

试样在伸长方向的蠕变应变。

3.10

厚度方向的断裂应变 fracture strain in the thickness direction

ϵ_f

试样断裂时的等效蠕变断裂应变。

3.11

最小蠕变应变速率 minimum creep strain rate

$\dot{\epsilon}_{\min}$

试样在大范围稳态蠕变阶段的最小蠕变应变速率。

4 原理

管材的壁厚约为 0.5 mm、外径约为 10 mm,并且具有各向异性的力学性能,为了测试其环向蠕变性能,开发了如图 1 所示的单应力小冲杆测试方法,试样被上下夹具夹紧,具有半圆柱形冲头的冲杆穿过上夹具导向孔,把力施加到试样的冲压区,下夹具开有正方形孔使试样受力后可以向下变形。试样直接从管中取样,制样时不应破坏管的微观组织,试样冲压区的宽度 b 略小于冲头的宽度 W ,确保试样都能被冲头施加到力。由于试样四周被夹紧,只在冲压区受到力,且试样很薄,可以忽略薄膜弯曲应力,因而试样只在伸长方向受到单个应力 σ 的作用,见图 2。若能算出 σ 以及对应的蠕变应变 ϵ ,则可以从试验结果中构建 Cr 涂层锆合金包壳的环向蠕变本构模型。

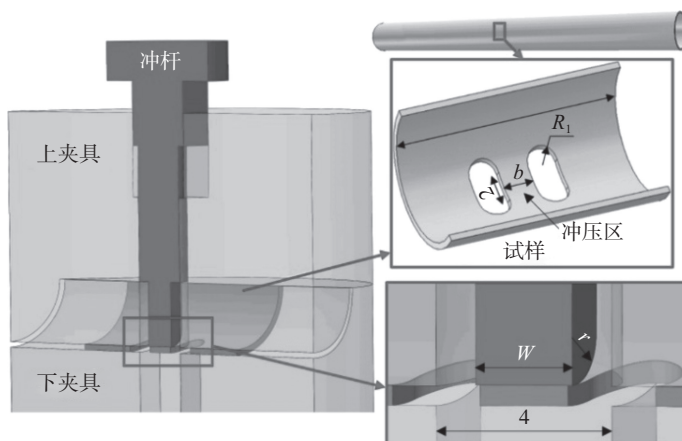


图1 单应力小冲杆试验装置的剖面图

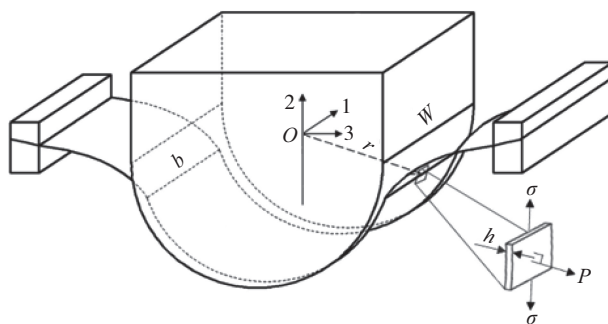


图2 试样冲压区受冲头力作用后的受力图

5 试样

试样直接从管材截取。具体制样方法是,从管中截取一根长为10 mm~15 mm的管,通过制样,得到具有两个对称孔的试样,孔的尺寸具体见图1,冲压区的宽度 b 建议取1.5 mm~2 mm,试样长度 L 取为10 mm~15 mm。

6 试验装置

6.1 总则

试验装置通常包含试验机(包含加载系统、载荷测试系统、位移测试系统、加热装置以及温度测量装置)、夹具等。试验装置的精度等级应达到GB/T 16825.1—2008中表2所规定的0.5级要求。

6.2 夹具

6.2.1 上下夹具见图2。上下夹具用于夹住试样,因而上下夹具夹试样的表面,应根据测试Cr涂层铝合金包壳的外径进行设计制作。另外,上夹具开有导向孔,导向孔上半部分是正方形孔,以确保试验过程中冲头不会绕冲头轴线转动,下半部分是圆孔,以减少冲杆与夹具导向孔之间的摩擦力。上下夹具通过螺栓夹紧试样,在上夹具导向孔的作用下,冲杆的力垂直施加到试样冲压区的表面上。下夹具开有长和宽为4.00 mm的正方形孔,使试样受力后能向下变形。

6.2.2 冲杆见图2。冲杆顶部的圆柱台用于承受来自试验机施加的冲压力,其余部分与上夹具的配套使用,但是冲杆末端应是半圆柱冲头。

6.2.3 附录A给出了上下夹具和冲头的尺寸作为设计参考,只要能实现测试目的即可,但是下夹具开的长和宽为4.00 mm的方形孔为固定尺寸。

6.2.4 冲头的硬度不低于55 HRC,该值参照GB/T 29459.1。

6.2.5 上下夹具孔的垂直度不大于0.02 mm。上下夹具孔的中心线偏离不超过0.025 mm,该值参照GB/T 29459.1。

6.2.6 试样单位面积上的压紧力应达到15 MPa,该值参照GB/T 29459.1。

6.3 试验机

6.3.1 试验机应能提供施加轴向力,试验前应对试验机进行外观检查以确保试验机的加力杆、夹具等都处于良好状态。

6.3.2 试验力应均匀平稳无振动地施加在试样上。

6.3.3 试验机应远离外界的振动和冲压。试验机应具有试样断裂时自动停机的功能。

6.3.4 为了保证试验机能够对试样准确地施加力,应定期校准试验机的力值和加载同轴度,试验机的加载同轴度应不超过10%。试验设备两次校准/检定的时间间隔依据设备类型、试验条件、维护水平和使用频次而定,除非另有规定,校准/检定周期不超过12个月。如果能够证明试验设备在更长的时间内能够满足相关规定的要求,那么可延长两次校准/检定之间的时间。

6.4 加载系统

分辨力应取最大试验力的 $\pm 1/300\,000$ 或 $\pm 0.2\text{ N}$ 中的小值。

6.5 载荷测试系统

测得的载荷值误差应不超出实际载荷值的 $\pm 0.5\%$,必要时加装挠度计进行辅助修正。

6.6 位移测试系统

测得的位移值误差应控制在试样厚度的 $\pm 0.01\%$ 以内。

6.7 加热装置

加热装置应能使样品加热至试验温度 T ,温度波动在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

6.8 温度测量装置

温度显示装置分辨力至少应为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,测温装置的准确度应等于或优于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

7 试验步骤

7.1 总则

试样加热与施加载荷主要按照GB/T 2039执行。

7.2 试验尺寸测量

多次测量试样的初始厚度 h_0 和冲压区宽度 b 并取平均值,最小测量次数不低于3次。

7.3 试样安装

把试样安装到夹具中,注意半圆柱形冲头的轴线方向应与试样的轴线方向一致。

7.4 试样加热

7.4.1 试样安装好后,对试样进行加热至规定的试验温度。试样、夹具等都应达到热平衡。

7.4.2 试样加热到试验温度后,应该在试验力施加前至少保温 1 h,除非产品标准另有规定。对于连续试验保温时间不应超过 24 h。对于不连续试验,试样保温时间不应超过 3 h,卸载后试样保温时间不应超过 1 h。

7.4.3 升温过程中,任何时间试样温度不应超过规定温度所允许的偏差。如果超出,应在报告中注明。

7.4.4 在升温过程中施加初始负荷(小于试验力的 10%)来保持试样加载链的同轴(例如在 $t=0$ 之前)。

7.5 施加载荷

7.5.1 载荷应以产生最小弯矩的方式在试样的轴向上施加。

7.5.2 载荷至少应准确到 $\pm 1\%$ 。试验力的施加过程应无振动。

7.5.3 当载荷完成加载时,作为蠕变试验开始($t=0$)点并记录冲杆位移。

8 试验数据

8.1 位移-蠕变时间曲线

试验获得的位移-蠕变时间($u-t$)曲线如图 3 所示。随着 t 的增加,试样的位移速率先快速减小,然后到达一个稳定值,之后快速增加直至试样断裂。

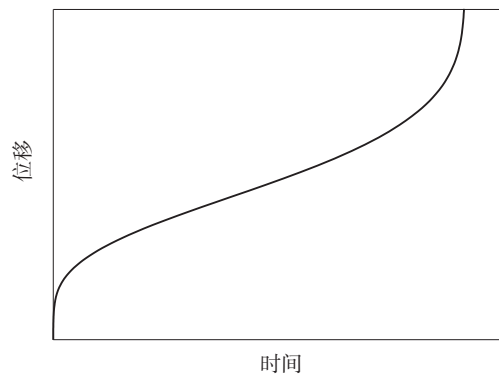


图 3 位移与蠕变时间示意图

8.2 断口厚度 h_f

断口厚度测量部位见图 4,在至少 3 个部位测量并取平均值得断口厚度 h_f 。

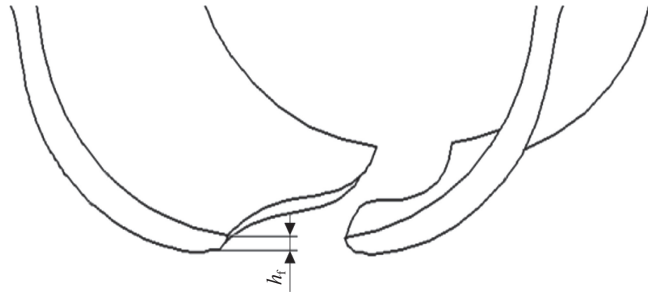


图4 试样断口厚度测量示意图

9 数据处理

9.1 总则

根据试验加载力和测出的位移-时间曲线,采用经验关联公式换算出对应的蠕变应力和蠕变应变。

9.2 蠕变应力 σ

试样在冲压区最底端的 σ - t 曲线,见图5,在试验开始时, σ 随着 t 的增加不断变小,然后进入大范围稳态蠕变阶段 σ 基本保持不变,之后进入蠕变第三阶段 σ 开始不断增大,最后试样断裂。在大范围稳态蠕变阶段, σ 基本不变。因此,为了建立被测试Cr涂层钎合金包壳在大范围稳态蠕变阶段的幂律蠕变本构模型,只需要算出试样在大范围稳态蠕变阶段的 σ 。根据图2试样受力变形图,可得出大范围稳态蠕变时的 σ ,见公式(1)和公式(2):

$$\sigma = \frac{F}{2Sk_{sp}} \dots\dots\dots (1)$$
$$S = h_0b \dots\dots\dots (2)$$

- 式中:
- F —— 载荷,单位为牛(N),结果保留至0.1 N;
 - k_{sp} —— 关联系数,无量纲常数,若取图5中的最小应力为大范围稳态蠕变阶段的 σ ,通过有限元模拟计算得出 $k_{sp}=0.52$ (假设小冲杆蠕变压头与样品间的摩擦系数 μ 为0.2);
 - S —— 试样冲压区的横截面积,单位为平方毫米(mm^2),结果保留至0.01 mm^2 ;
 - σ —— 蠕变应力,单位为兆帕(MPa),结果保留至0.01 MPa,公式(1)表明 σ 与冲头的半径 r 无关;
 - b —— 冲压区宽度,单位为毫米(mm),结果保留至0.01 mm;
 - h_0 —— 试样初始厚度,单位为毫米(mm),结果保留至0.01 mm。

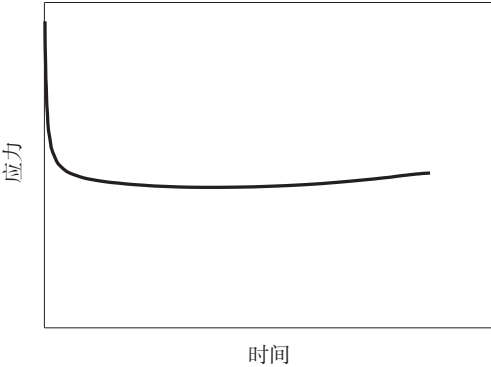


图5 蠕变应力与时间的示意图

9.3 蠕变应变 ϵ

通过单应力小冲杆蠕变试验,可以测出冲杆位移 u 与蠕变时间 t 的曲线图,见图3。根据试验测出的 u ,可计算出与 σ 对应的蠕变应变 ϵ ,见公式(3):

$$\epsilon = 1.2 \left(\frac{u}{2} \right)^{1.5} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

ϵ ——蠕变应变,无量纲常数,结果保留至0.001或0.1%;

u ——位移,单位为毫米(mm),结果保留至0.001 mm。

根据试验测出的 $u-t$ 曲线图,利用公式(2),可计算得到 $\epsilon-t$ 曲线,再从 $\epsilon-t$ 曲线可计算出最小蠕变应变速率 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 。

9.4 蠕变幂律本构模型

在不同应力水平下进行单应力小冲杆蠕变试验,可得到不同的 σ 和 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 值,从而可绘制得到 $\dot{\epsilon}_{\min}-\sigma$ 图,见图6,通过曲线拟合,可建立被测Cr涂层铝合金包壳的环向蠕变幂律本构模型。

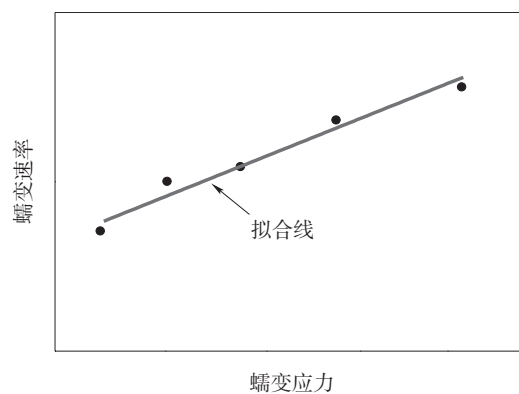


图6 $\dot{\epsilon}_{\min}-\sigma$ 曲线示意图

9.5 厚度方向的断裂应变 ϵ_f

根据试验结果测出的 h_f, ϵ_f 由公式(4)计算得到:

$$\epsilon_f = \ln(h_0/h_f) \dots\dots\dots (4)$$

10 断口检查

试验结束后,可采用目视或扫描电子显微镜进行断口以及涂层开裂情况观察。

11 试验报告

试验报告一般应包括下列内容:

- 试验报告编号及名称;
- 试样信息:管材名称、牌号、标识、原始尺寸、管材状态、取样位置、表面处理方式等;
- 试验设备:试验设备型号和编号;

- d) 试验条件:试验温度、载荷等;
- e) 测试结果:位移、蠕变应变以及试样断口厚度等;
- f) 试验中发现的任何异常或其他有必要记录的信息;
- g) 试验日期。

附 录 A
(资料性)
夹具设计参考尺寸

A.1 上夹具导向孔上半部分是长和宽为 5.05 mm 的正方形孔(高 10.00 mm),下半部分为直径 4.05 mm 的圆孔(高 20.00 mm),以减少冲杆与夹具导向孔之间的摩擦力。上下夹具通过 4 个 M5 的螺栓夹紧试样。

A.2 冲杆顶部是直径 10.00 mm(高 10.00 mm)的圆柱,接着是长和宽为 5.00 mm 的正方形柱(高 10.00 mm),然后是直径为 4.00 mm 的圆柱(高 20.00 mm),最后是宽为 2.00 mm 和长为 2.60 mm 方形柱(高 3.00 mm),末端是半圆柱冲头。为了使试样冲压区受冲头作用后满足薄膜理论, r 根据公式(A.1)算出:

$$r \geq 5h_0 \quad \dots\dots\dots(\text{A.1})$$

式中:

r —— 冲头半径;

h_0 —— 试样的初始厚度。

中国核学会
团 体 标 准
**Cr涂层锆合金包壳单应力小冲杆环向
蠕变试验方法**

T/CNS 145—2025

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 19 千字
2025年7月第1版 2025年7月第1次印刷

*

书号:155066·5-15946 定价 31.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107



T/CNS 145-2025