

小冲杆蠕变试验综述

张艺霖, 曹铁山*

大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年8月18日; 录用日期: 2025年9月12日; 发布日期: 2025年9月22日

摘要

在石油化工、核工业、航空航天等长时间需要高温作业的行业, 其压力容器和传输管道的使用非常集中, 并且长期在高温高压、腐蚀、辐照等苛刻的工况下, 构件易发生蠕变、热疲劳、腐蚀等现象, 导致构件的材料力学性能受损甚至失效, 使得服役寿命严重缩短, 材料容易劣化并可能导致安全事故。其中最主要的失效形式为蠕变。因此, 如何检验管道老化和设备使用寿命, 一直都是检验工作的重点。然而, 传统的无损检测技术和表面金相分析都存在局限性, 两者都无法真正评估在役承压结构材料的力学性能、断裂性能或蠕变性能。尽管常规试验方法能够测试材料的多种性能, 但它们往往会对原设备造成显著的损伤和破坏。相比之下, 小冲杆试验技术自20世纪80年代初提出以来, 已经迅速发展成为一种微损取样且能确定材料力学性能的先进试验方法, 具有破坏小、操作简单、使测定局部材质成为可能等优点。通过学者们的研究和探索, 如今小冲杆蠕变试验有了突破性进展, 通过小冲杆蠕变试验研究HDPE管的力学性能、对固体氧化物燃料电池钎焊密封接头蠕变损伤演化规律等研究都证明现在这种技术已经比较成熟。

关键词

小冲杆, 蠕变, 应力, 应变, 材料性能

A Review of Creep Tests on Small Punch Rods

Yilin Zhang, Tieshan Cao*

School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Received: Aug. 18th, 2025; accepted: Sep. 12th, 2025; published: Sep. 22nd, 2025

Abstract

In industries that require high-temperature work for a long time, such as petrochemical industry,

*通讯作者。

文章引用: 张艺霖, 曹铁山. 小冲杆蠕变试验综述[J]. 材料科学, 2025, 15(9): 1774-1782.

DOI: 10.12677/ms.2025.159189

nuclear industry, aerospace, etc., the use of pressure vessels and transmission pipelines is very concentrated, and under harsh working conditions such as high temperature and high pressure, corrosion, and irradiation for a long time, components are prone to creep, thermal fatigue, corrosion, etc. resulting in damage or even failure of the material mechanical properties of components, which seriously shortens the service life, makes the materials easy to deteriorate and may lead to safety accidents. The most important form of failure is creep. Therefore, how to inspect the aging of pipelines and the service life of equipment has always been the focus of inspection work. However, both traditional non-destructive testing techniques and surface metallographic analysis have limitations, neither of which can truly evaluate the mechanical, fracture, or creep properties of in-service pressure-bearing structural materials. Although conventional test methods are capable of testing a wide range of properties of materials, they often cause significant damage and destruction to the original equipment. In contrast, since the early 80s of the 20th century, the small punch bar test technology has rapidly developed into an advanced test method for micro-loss sampling and the determination of the mechanical properties of materials, which has the advantages of small damage, simple operation, and making it possible to determine local materials. Through the research and exploration of scholars, there has been a breakthrough in the creep test of small punch rods, and the research on the mechanical properties of HDPE pipes through the creep test of small punch rods, and the creep damage evolution law of brazed sealed joints of solid oxide fuel cells have proved that this technology is now relatively mature.

Keywords

Small Punch Bar, Creep, Stress, Strain, Material Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

小冲杆试验技术最初是为了满足材料微观力学性能测试的需求而发展起来的。早期主要集中在小冲杆拉伸、弯曲等基本力学性能测试方面。在初期,小冲杆蠕变实验的理论和技術并不完善,试验结果的准确性和可靠性有待提高;后来,研究人员开始尝试将其应用于蠕变性能测试,不断研究创新,提高试验结果的准确性和可靠性。

近年来,随着计算机技术、有限元分析方法以及高精度测试设备的发展,小冲杆蠕变实验技术得到了快速发展。通过建立准确的有限元模型,对小冲杆蠕变实验过程进行数值模拟,深入理解了试样的变形机理和应力分布规律,为试验结果的解释提供了理论支持,也更加方便地找出实验过程中出现错误的部分,提高试验效率和准确度,能够实现高精度的载荷控制和位移测量,提高了试验数据的质量。

目前,小冲杆蠕变实验已经在多个领域得到了广泛应用。在新材料研发中,用于快速评估新材料的蠕变性能,指导材料的成分设计和工艺优化。在核工程领域,针对燃料包壳管等具有特殊要求的材料,开发了单应力小冲杆测试方法,解决了各向异性材料力学性能测试的难题。

2. 国内外研究现状

2.1. 国外研究现状

小冲杆试验最早可以追溯到 20 世纪 80 年代的欧洲,用于解决反应堆压力容器材料监督试样不足的问题。在 1980 年代,英国曼彻斯特大学首次提出小冲杆试验概念,用于替代传统夏比冲击试验,评估材

料的韧脆转变温度。2000 年代, 欧洲标准化委员会(CEN)于 2006 年发布首个小冲杆试验标准(CEN/TS 10325), 规范了蠕变、拉伸及断裂测试的试样尺寸、加载方式及数据处理方法。

基于 Chakrabarty 薄膜伸张理论, 国外学者建立了小冲杆试验的应力-应变关系模型, 并通过有限元模拟验证其准确性。Wilshire 方程和 Larson-Miller 参数法被广泛应用于高温材料蠕变寿命预测, 结合试验数据优化了模型参数。近年来, 研究扩展至辐照、腐蚀等复杂环境下材料的蠕变行为, 如美国阿贡国家实验室针对核反应堆材料的辐照蠕变测试。除 CEN 标准外, ASTM 于 2020 年发布《ASTM E2760-20》, 进一步规范了小冲杆蠕变试验的流程和参数。小冲杆蠕变技术广泛应用于核电、航空航天及能源领域[1]。例如, 法国电力公司将 SPT 用于核电站延寿评估。

2.2. 国内研究现状

2000 年代初, 国内首次引入小冲杆试验技术, 华东理工大学、清华大学等高校率先开展研究, 重点聚焦核电材料。2005 年, 第五届全国压力容器学术会议上, 首次报道了针对国产 12Cr1MoV 钢的小冲杆蠕变试验研究。国内学者改进了 Chakrabarty 模型, 提出考虑试样厚度非均匀性的修正公式[2]。

2012 年, 中国发布《在役承压设备金属材料小冲杆试验方法》(GB/T 29459.1-2012) [1], 成为国内试验的主要依据。浙江大学通过对比小冲杆试验与传统拉伸试验数据, 建立了国产 800HT 合金的蠕变性能经验关联式[3]。国家核电技术公司(SNPTC)将 SPT 用于 AP1000 反应堆压力容器的材料寿命评估。北京航空航天大学针对钛合金的高温蠕变行为开展研究, 支撑航空发动机叶片选材。针对固体氧化物燃料电池的 NiO-YSZ 阳极材料, 武汉理工大学利用 SPT 评估其高温机械强度。国内企业推出 HY-SPT 系列试验机, 载荷精度达 0.5 级, 填补了国产设备的空白。

在材料性能的研究和工程应用中, 常规试验需要通过大量的材料堆积来获取数据, 不仅浪费材料, 同时因为对服役中的材料进行性能评估时不能大量取样, 所以学者采用小冲杆试验来代替常规试验, 以少量的材料和更加简单的试验装置, 获取材料的相关力学性能信息, 为材料研究、设备维护和寿命评估找到更加简单便捷的方法。

在当今时代, 高温构件材料性能的研究领域吸引了国内外众多研究人员的广泛关注和深入探索。这些研究工作主要可以划分为两大类: 一类是专注于非破坏性检测技术, 这类技术包括了金属组织测定法、硬度测定法、超声波测定法以及数值模拟法等多种方法[2]。非破坏性检测技术因其能够不损伤材料本身而进行检测的特性, 受到了广泛的认可和青睐。然而, 这种检测方法也具有局限性, 它能够发现材料的宏观缺陷, 测量材料的剩余壁厚, 并且能够帮助我们了解材料组织结构的变化[4]。但是, 此类非破坏性检测无法提供关于材料的力学性能、断裂性能或蠕变性能等更为深入的信息。另一类研究方向是破坏性检测技术, 这类技术包括了拉伸试验方法、冲击试验方法、材料密度法以及高温蠕变试验法等[2]。破坏性检测技术在工程应用中已经相当成熟, 其测量结果通常准确可靠。但是, 破坏性检测技术的一个主要缺点是需要较大的试样尺寸, 增加了检测成本, 并且在某些情况下还可能会带来额外的风险和不便。

3. 小冲杆蠕变试验体系

3.1. 小冲杆蠕变实验装置

小冲杆蠕变试验装置是一个复杂的系统(见图 1), 它由多个关键组件构成, 包括试样夹具、加载系统、加热系统、控温系统、变形测量系统、保温装置、数据采集记录设备以及支撑装置等在小冲杆蠕变试验中, 首先需通过冲杆和冲头对试样中心施加恒定垂直载荷[5]。试验过程中, 采用数据采集系统实时监测并记录载荷施加开始至试样断裂全过程的位移-时间曲线及应力应变演变规律。基于这些试验数据, 科研人员可深入分析微型试样的蠕变特性。

在进行蠕变试验时, 施加荷载的方法的选择是非常重要的[6]。主要有液压传动荷载和固定重量荷载这两种方法。在长期试验中, 液压传动荷载的方法可能会引起一定的荷载波动。固定重量荷载的方法是通过将事先校准过重量的砝码缓慢地放置在重量盘上, 以此来保证试验过程中荷载的稳定性。为了获得准确的试验结果, 在试验中可以使用各种变形测量装置。不过, 施加荷载的速度必须尽可能均匀, 并且测量得到的位移值的精度必须控制在试样厚度的 0.1% 以内[7]。在小冲杆测试中, 试样的尺寸与夹具尺寸之间存在密切的相互影响。为了避免冲头在下夹具中心孔内卡死, 以及确保试样不会受到来自下夹具孔壁的摩擦力, 必须满足一定的尺寸关系。具体来说, 下夹具孔径 D 应大于冲杆直径 d 加上两倍的试样厚度 t , 即 $D > d + 2t$, 其中 D 、 d 和 t 的单位均为毫米。

其中, d 代表冲杆直径, 单位为毫米。 t 代表试样厚度, 单位为毫米。

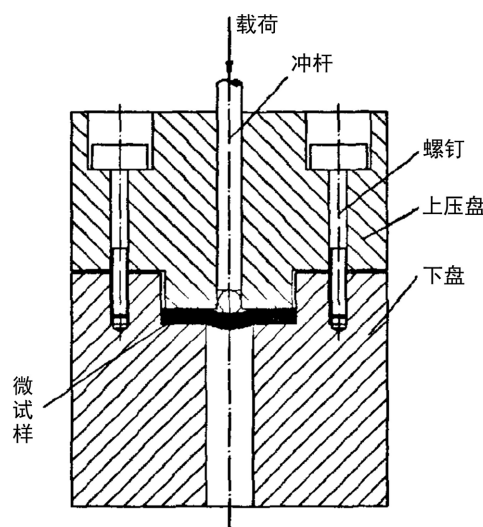


Figure 1. Schematic diagram of the creep test device for small punch rods [2]

图 1. 小冲杆蠕变试验装置示意图[2]

3.2. 小冲杆试验操作过程

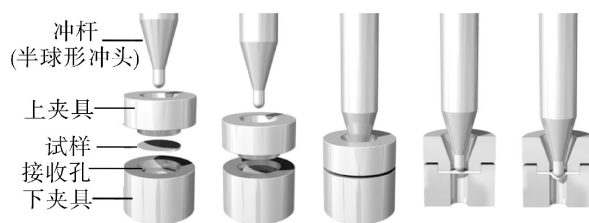


Figure 2. Typical small punch rod creep test device [3]

图 2. 典型小冲杆蠕变试验装置[3]

小冲杆试验主要包括以下操作步骤:

(1) 试样安装过程: 首先, 需要将待测试的样品放置在下夹具的凹槽中(见 图 2), 确保样品能够被正确地固定。接着, 通过螺栓施加适当的夹紧力[8], 使得样品被牢固地固定在上下夹具之间。在样品固定之后, 需要安装两根温度检测装置和应变检测装置, 这些装置将用于实时监测样品在试验过程中的温度和应变变化[9]。为了进一步确保试验的准确性, 为阻止热量流失, 需要在试验装置的上下部分填充保温棉, 使样品提供一个相对稳定的温度环境。

(2) 施加温度的步骤: 在试验开始之前, 必须确保加热装置和温度控制装置已经准备就绪。通过这些装置, 可以迅速地将试验温度提升至预定的水平, 并且在小冲杆蠕变试验的过程中, 长时间稳定地保持在设定的温度范围内[10]。这一措施至关重要, 因为它可以确保试验温度的稳定性, 避免由于试验温度的波动而对最终的实验结果产生不利影响, 从而导致实验数据出现误差, 甚至可能导致整个实验失败。

(3) 施加载荷的细节: 在试验温度稳定之后, 接下来的步骤是启动数据采集软件, 以便开始记录试验过程中的各种数据[11]。在软件启动后, 需要在短时间内平稳地将施加在样品上的载荷提升至预定的试验载荷。这一过程需要操作者具备一定的技巧和经验, 以确保载荷的施加既平稳又准确。

(4) 试验数据采集与处理: 在试验进行期间, 操作者需要在连接的计算机上连续监测并记录试验数据。在确定了试验的关键变量之后, 需要记录试样随着蠕变时间增长而发生的变形阶段。为了确保整个试验过程被完整记录, 需要适当调整数据采集的记录间隔时间。此外, 为了保证试验条件的稳定性, 需要定期检查和校准系统[12]。最终, 将记录的数据通过数据处理和表格生成的方式进行分析, 这样可以更直观地展示试验结果, 并为后续的研究和分析提供便利。

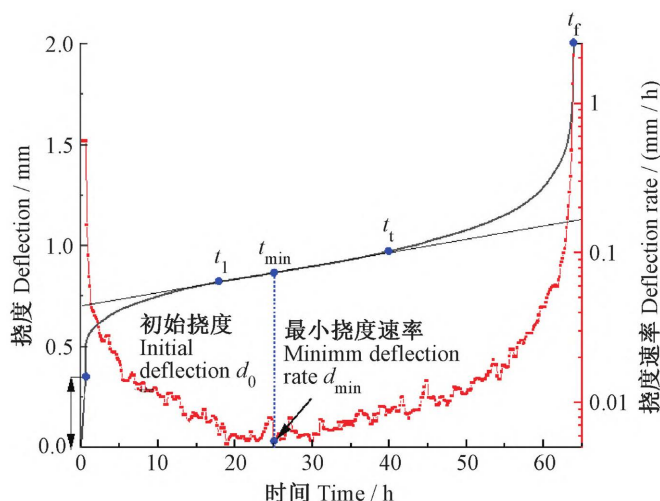


Figure 3. Creep test curve of a typical small punch rod [13]

图 3. 典型小冲杆蠕变试验曲线[13]

图 3 展示出了典型小冲杆蠕变试验曲线, 根据挠度速率 - 时间曲线, 可以清楚的找到最小的挠度速率, 以及不同载荷下, 其挠度速率的变化, 发现与典型的小冲杆曲线相似, 与单轴蠕变规律相符合[14]。

4. 小冲杆理论模型

Chakrabarty 薄膜伸张理论模型

应变和应力的计算公式

根据 Chakrabarty 薄膜伸张模型分析, 从而判断出试样中心的变形 δ 为模型得到试样中心的变形为:

$$\begin{aligned} \delta &= R(1 - \cos \theta_0) + R \sin^2 \theta_0 \ln \frac{\tan(\theta_0/2)}{\tan(\theta/2)} \\ &= R(1 - \cos \theta_0) + R \sin^2 \theta_0 \times \ln \frac{\tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \left\{ 1 + \cos \left[\arcsin \left(R \sin \frac{\theta_0^2}{a} \right) \right] \right\}}{R \sin \frac{\theta_0^2}{a}} \end{aligned}$$

试样中心的等效应变为

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 2 \ln \frac{2(1 + \cos \theta)}{(1 + \cos \theta_0)^2} \\ &= \frac{2[h - R(1 - \cos \theta_0)]}{R \sin^2 \theta_0} - 2 \ln \left(\cot \frac{\theta_0}{2} - 2 \ln \frac{a}{2R} \right)\end{aligned}$$

其中: $\sin \theta = \frac{R}{a} \sin^2 \theta_0$

式中: θ_0 冲头与试样接触边界法向与冲杆轴向的夹角;

θ 试样与夹具接触边界的法向与平行于冲杆轴方向的夹角模型得到试样与冲头接触区域的等效应力为(von Mises 应力)为:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{2\pi R t \sin^2 \theta_0} \\ \frac{F}{\sigma} &= 2\pi R t \times \sin^2 \theta_0\end{aligned}$$

其中:

$$t = t_0 \left(\frac{1 + \cos \theta_0}{1 + \cos \theta} \right)^2$$

式中 σ 为等效应力 Mpa

F 为冲头载荷 N

t 为瞬时厚度 mm

t_0 为试样初始厚度 mm

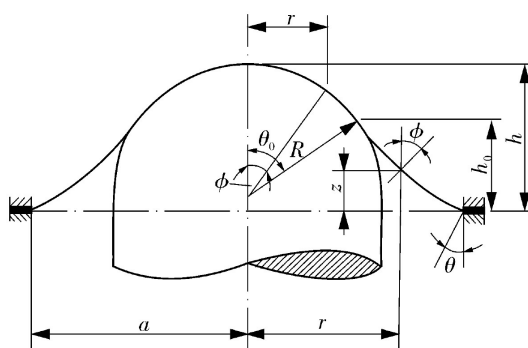


Figure 4. Chakrabarty theoretical model [3]

图 4. Chakrabarty 理论模型[3]

虽然小冲杆理论模型有试样尺寸小、适用于特殊材料等优势(见图 4),但是其具有简化带来的误差、试样制备难度大、难以反应材料宏观性能,因此我引进了小冲杆蠕变测试寿命的分析方法。

5. 小冲杆蠕变测试寿命分析方法

Wilshire 和 Larson-Miller 参数法

$$\frac{\sigma}{R_m} = \exp \left\{ -k \left[x t_r \exp \left(-\frac{Q^*}{RT} \right) \right]^u \right\}$$

上述为蠕变寿命与应力和温度的函数, 是 Wilshire 等人于 2007 年提出的蠕变寿命预测模型, 通过引入材料抗拉强度(R_m)、断裂时间(t_r)、蠕变激活能(Q^*)以及绝对温度(T)等参数, 建立了应力与温度对材料性能影响的定量关系。其中, k 和 u 为模型参数, R 为通用气体常数[14]。

另一种广泛应用的寿命评估方法是 Larson-Miller (L-M)参数法, 其基于 Arrhenius 速率方程, 通过关联温度、应力和时间, 为高温环境下材料的蠕变行为提供了一种可靠的预测手段。该技术在工程实践中尤其适用于长期服役的高温构件寿命评估[15]。通过这种方法, 研究者们能够有效地预测材料在高温环境下的长期行为。

通过提升蠕变试验的温度, 可以显著缩短试验所需的时间。这样做的好处是可以在较短的时间内获得足够的数据, 从而利用在较高温下获得的短期蠕变试验数据, 推算出在较低温度下的长期力学性能指标[16]。这种方法不仅提高了试验效率, 而且还能在一定程度上减少试验成本。其表达式为

$$L_{LMP} = T \lg[\lg(t_r) + C']$$

式中, C' 为材料常数, 一般可取定值 20, LMP 为 Larson-Miller 参数, 表示为应力的函数, 通常三次项拟合出 LMP 与应力 σ 的关系: $L_{LMP}(\sigma) = A\sigma^3 + B\sigma^2 + C\sigma + D$

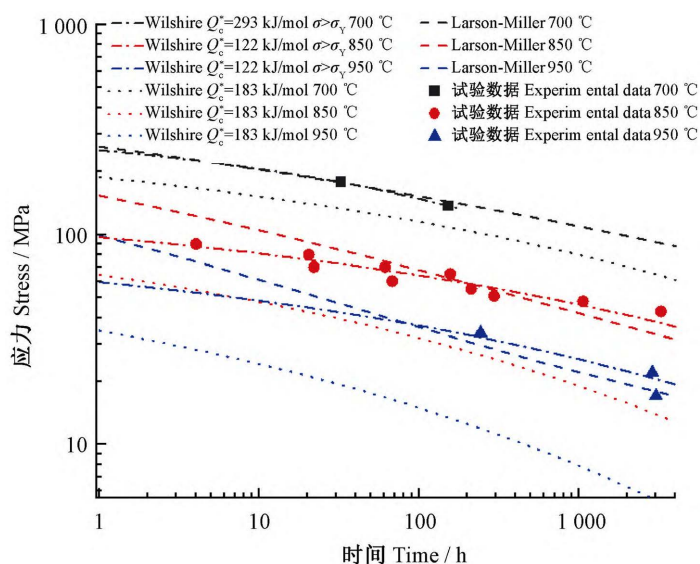


Figure 5. Uniaxial creep test time-stress correlation curve 800 ht [13]

图 5. 单轴蠕变试验时间 - 应力关联曲线 800 ht [13]

上图 5 展示了 800 HT 合金其中采用了统一蠕变激活能 Q_c^* 的 Wilshire 方程拟合的曲线与试验数据偏差较大, 而考虑了屈服状态激活能 Q^* 的 Wilshire 方程拟合曲线与试验数据拟合较好。对比 Wilshire 方程, Larson-Miller 方程在不需要抗拉强度的情况下即能拟合三组温度下蠕变数据。对比两种[17]方法的拟合效果还需开展更多温度、应力下的蠕变数据。依据目前已有试验数据显示, 在 700°C 下 Wilshire 和 Larson-Miller 方程短时蠕变(100 h)下应力差别较小。在 850°C 和 950°C 温度下短时蠕变下 Wilshire 拟合曲线应力低于 Larson-Miller 曲线, 这与试验数据更为吻合[3]。

6. 小冲杆蠕变试验有限元分析方法

有限元分析方法通过将小冲杆蠕变试验的物理模型离散成有限个单元, 利用数学方法求解各单元的力学响应, 进而得到整个模型的应力、应变分布等信息。在小冲杆蠕变试验的有限元分析中, 首先需要

建立精确的几何模型, 包括冲头、试样和夹具等部件, 同时合理设置材料参数, 如弹性模量、泊松比、蠕变本构关系等。边界条件的设定也至关重要, 需准确模拟试验过程中的加载方式和约束条件[18]。

众多学者运用有限元方法对小冲杆蠕变试验进行了深入研究。比如通过有限元分析对 F82H 钢小冲杆蠕变试样进行应力分析, 明确了应力转换系数的物理意义, 发现球与试样间的摩擦系数对小冲杆蠕变性能有显著影响, 摩擦系数增加会使断裂时间延长, 且施加荷载与稳态平均等效应力呈线性相关。

有限元分析方法能够直观展示小冲杆蠕变试验过程中试样的应力、应变分布情况帮助研究人员深入理解试验机理。通过模拟不同试验条件下的力学响应, 可优化试验方案, 提高试验效率和准确性。还能对试验结果进行预测和验证, 为材料性能评估和工程设计提供可靠依据。但该方法也存在一定局限性, 如模型简化可能导致结果与实际情况存在偏差, 计算精度受单元类型、网格划分等因素影响(见图 6)。

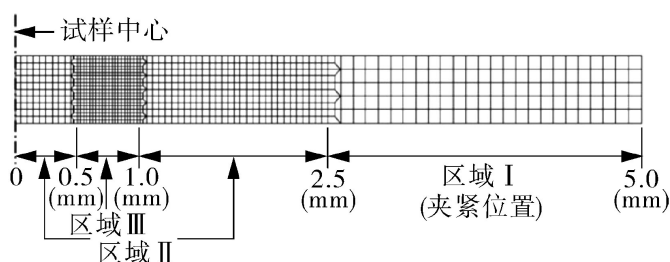


Figure 6. Finite element model of small punch rod creep specimens [3]

图 6. 小冲杆蠕变试样有限元模型[3]

7. 存在的不足和改进意见

7.1. 存在的不足

目前小冲杆试验装置测量精度较低。由于小冲杆试验的试样尺寸较小, 对试验设备的精度要求较高。但是, 目前市场上的一些试验设备在精度和稳定性方面还不能完全满足小冲杆蠕变试验的要求, 可能导致试验结果存在较大误差。此外, 试验设备的自动化程度较低, 操作过程较为繁琐, 不仅增加了试验人员的工作量, 而且容易引入人为误差[19]。

小冲杆试验的国家标准和规范还不完善。目前, 不同学者采用的试验方法和参数都不相同, 这使得试验结果之间缺乏可比性。例如, 在试样的制备、加载方式、数据采集等方面, 都存在较大的差异。

7.2. 改进方法

研发高精度、高稳定性的小冲杆蠕变试验设备。通过采用先进的传感器技术、控制算法和制造工艺, 提高试验设备的精度和稳定性, 减少试验结果的误差。同时, 实现设备高度自动化, 能够自动、同步地完成参数控制和数据采集处理工作。

制定统一的小冲杆蠕变试验标准和规范。组织相关领域的专家和学者, 共同制定小冲杆蠕变试验的标准和规范, 明确试样的制备方法、加载方式、数据采集和处理方法等, 确保试验结果的可比性和可靠性。此外, 还应加强对试验人员的培训, 提高其对试验标准和规范的理解和执行能力。

参考文献

- [1] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC262). GB/T29459.1-2012 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法 第1部分: 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [2] 刘玉, 涂晶洁, 杨豫新. 小冲杆试验法的研究[J]. 机械工程与自动化, 2010(4): 1-3.

- [3] 盛晓茜, 洪军, 朱林波. 小冲杆蠕变测试技术的研究综述[J]. 压力容器, 2018, 35(10): 44-58, 64.
- [4] 刘斌, 张云, 涂宝峰, 等. 中温固体氧化物燃料电池 NiO/YSZ 阳极的还原过程[J]. 催化学报, 2008(10): 979-986.
- [5] 庄法坤, 涂善东, 周幅彦, 等. 不同小试样测量蠕变性能的比较研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6): 9-18.
- [6] 赵杰. 耐热钢蠕变持久性能的统计分析 & 寿命的可靠性预测[C]//中国机械工程学会理化检验分会, 中国机械工程学会失效分析分会. 2009 年全国失效分析学术会议论文集. 大连: 大连理工大学材料科学与工程学院, 2009: 35.
- [7] 赵杰, 李东明. 一种用于高温材料持久性能设计的可靠性方法[C]//中国机械工程学会理化检验分会, 中国机械工程学会失效分析分会. 2009 年全国失效分析学术会议论文集. 大连: 大连理工大学材料学院, 2009: 382-386.
- [8] 韩浩, 关凯书, 李建卫, 等. 小冲杆试验参数的有限元分析[J]. 机械强度, 2004(4): 455-459.
- [9] Hyde, T.H., Ali, B.S.M. and Sun, W. (2013) Analysis and Design of a Small, Two-Bar Creep Test Specimen. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **135**, Article ID: 041006. <https://doi.org/10.1115/1.4025192>
- [10] Zhuang, F.K., Tu, S.T., Zhou, G.Y. and Wang, Q.Q. (2014) A Small Cantilever Beam Test for Determination of Creep Properties of Materials. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **38**, 257-267. <https://doi.org/10.1111/ffe.12225>
- [11] Zhuang, F.K., Zhou, G.Y. and Tu, S.T. (2013) Numerical Investigation of Frictional Effect on Measuring Accuracy of Different Small Specimen Creep Tests. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **110**, 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.04.020>
- [12] Hyde, C.J., Hyde, T.H., Sun, W., Nardone, S. and De Bruycker, E. (2013) Small Ring Testing of a Creep Resistant Material. *Materials Science and Engineering: A*, **586**, 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.081>
- [13] 江涛, 关凯书, 钟继如. 小冲杆试验技术测试国产 800HT 合金高温蠕变性能研究[J]. 机械强度, 2024, 46(4): 999-1003.
- [14] 段颢颀. 小冲杆试验研究 HDPE 管的力学性能[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2021.
- [15] 宋明, 杜传胜, 王炳英, 等. 小冲杆高温蠕变试验平台在力学实验教学中的应用[J]. 实验力学, 2021, 36(2): 345-350.
- [16] 王玉成, 徐宏, 刘阿龙, 等. 小冲杆试验方法评价 1.25Cr0.5Mo 珠光体钢的蠕变性能[J]. 机械强度, 2006, 28(3): 389-392.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T30580-2014 电站锅炉主要承压部件寿命评估技术导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [18] 关凯书, 黄弈昶, 李璞. 小冲杆测试材料屈服载荷的有限元分析[J]. 塑性工程学报, 2007(6): 152-156.
- [19] 杨镇, 王志文. 蠕变现象的小冲杆试验研究——蠕变应力分析[J]. 压力容器, 2002, 19(2): 12-15.