

基于动态测试的维卡软化温度测定仪校准装置研制

苏彩山 史盼敬 张帅星 孙鹏

(河北省计量监督检测研究院 石家庄 050051)

摘要: 维卡软化温度测定仪长期使用后,常出现温度示值偏差与升温速率不准的问题。为此,研究开发了一套基于动态测试原理的高精度校准装置。这套装置配备自动触发式图像采集温度记录装置,当试样发生1 mm变形或被压针刺入的瞬间,能实时捕捉形变临界点,精准记录温度。其工作流程包含试样放置、参数设定等环节,各环节衔接顺畅。实际测试中,该装置表现出明显优势:12℃/6 min升温速率下,实际升温速率在(11.9~12.1)℃/6 min之间,温度示值误差为(-0.1~0.2)℃;5℃/6 min升温速率下,实际升温速率处于(4.9~5.1)℃/6 min范围,温度示值误差(-0.1~0.2)℃,均符合技术要求。经分析,温度示值误差标准不确定度为0.067℃,升温速率误差标准不确定度为0.091℃/h。研究的创新点体现在提出动态升温校准方法,优化动态采集策略,将智能校准算法与自动化流程集成,可支持多温度点、多样品站同步校准。该装置有效解决了现有校准方法存在的问题,实现了温度与升温速率的同步动态精准测量,为材料热性能测试提供了可靠保障,在材料研发、质量控制等领域发挥着重要作用。

关键词: 温度计量;温度偏差;升温速率;校准

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.2020

Development of calibration device for vicat softening point tester based on dynamic testing

Su Caishan Shi Panjing Zhang Shuaixing Sun Peng

(Hebei Provincial Institute of Metrology Supervision and Testing, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: After long-term use of Vicat softening temperature testers, problems such as temperature indication deviation and inaccurate heating rate often occur. To address this, a high-precision calibration device based on the principle of dynamic testing has been developed. This device is equipped with an auto-triggered image acquisition and temperature recording device, which can real-time capture the deformation critical point and accurately record the temperature at the moment when the sample undergoes a 1 mm deformation or is pierced by the pressure needle. Its working process includes steps such as sample placement and parameter setting, with smooth connection between each step. In practical tests, the device shows obvious advantages: at a heating rate of 12℃/6 min, the actual heating rate ranges from (11.9~12.1)℃/6 min, and the temperature indication error is (-0.1~0.2)℃; at a heating rate of 5℃/6min, the actual heating rate is in the range of (4.9~5.1)℃/6 min, and the temperature indication error is (-0.1~0.2)℃, all meeting the technical requirements. Through analysis, the standard uncertainty of temperature indication error is 0.067℃, and the standard uncertainty of heating rate error is 0.091℃/h. The innovation of this research lies in the proposal of a dynamic heating calibration method, optimization of dynamic acquisition strategy, and integration of intelligent calibration algorithms with automated processes, which can support synchronous calibration of multiple temperature points and multiple sample stations. This device effectively solves the problems existing in current calibration methods, realizes synchronous dynamic and accurate measurement of temperature and heating rate, provides a reliable guarantee for material thermal performance testing, and plays an important role in fields such as material research and development and quality control.

Keywords: temperature measurement; temperature deviation; heating rate; calibration

0 引言

维卡软化温度测定仪作为精准测定热塑性塑料、硬橡

胶等材料热变形温度与维卡温度的关键设备,在材料研发、质量控制等环节举足轻重,深刻影响着从日常塑料制品到高端航空航天材料等众多领域产品的性能与可靠性^[1-3]。

德国的耐驰 (NETZSCH) 公司推出的维卡软化点测定仪, 凭借自适应温度控制算法以及冗余校准传感器技术, 能够将温度示值误差控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内^[4]; 美国 TA Instruments 公司的维卡软化点测定仪采用 8 通道独立温控设计, 温度控制范围覆盖 $-150^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$, 升温速率可在 $0.5^\circ\text{C}/\text{min} \sim 2^\circ\text{C}/\text{min}$ 间精准调节, 温度示值误差 $\leq \pm 0.3^\circ\text{C}$, 在航空航天材料研发实验室中使用频率颇高^[5]。国内在这方面也有诸多进展。浙江省计量科学研究所和包头市检验检测中心起草制定的《热变形/维卡软化温度测定仪校准规范》分别于 2010 年和 2024 年正式发布实施, 2025 年京津冀地方技术规范《热变形/维卡软化温度测定仪校准规范》发布实施, 为国内仪器的量值溯源和产品质量提升提供了有力支撑^[6-8]。张掖市质检院助力甘肃肃南节水有限公司更新维卡软化点温度测定仪等设备, 推动当地农业节水灌溉和建筑排水产品质量提升。

然而, 当下维卡软化点温度测定仪在长期使用过程中暴露出棘手问题, 温度示值偏差与升温速率测量不准现象频发。温度示值偏差使得材料实际热性能判定出现偏差, 可能导致在高温环境下, 产品因材料耐热性不足而发生变形、损坏; 升温速率测量不准, 则干扰材料热性能测试的标准化流程^[9-10]。现有校准方法, 如恒温环境校准法虽能在静态下高精度检测温度误差, 但脱离仪器实际工作状态且无法校准升温速率; 实时比对法虽可动态监测温度与升温速率, 却因传感器响应差异、瞬时读数波动以及温度/时间参数分离计量等因素, 导致显著误差。鉴于此, 开发一套能实现温度与升温速率同步动态校准的装置, 对满足维卡软化点测定仪温度参数的精准计量需求迫在眉睫^[11-20]。

本文提出的维卡软化点温度测定仪校准装置, 创新提出动态升温校准方法, 针对维卡软化点测试中形变瞬间发生的特性, 开发自动触发式图像采集温度记录装置, 实时捕捉形变临界点, 有效解决动态测试中温度指示偏差难题; 硬件设计上优化动态采集策略, 根据不同升温速率分别设置扫描间隔, 确保测温时效性; 软件系统集成智能校准算法与自动化流程, 支持多温度点、多样品站同步测量。通过精准的不确定度分析与控制, 实现温度示值误差标准不确定度 0.067°C 、升温速率误差 $0.091^\circ\text{C}/\text{h}$ 的高精度表现, 全面满足动态升温过程中温度均匀性、速率误差等关键计量特性的校准需求。

1 校准装置的原理及设计

为满足动态升温过程中的实时温度校准需求, 校准装置需涵盖同步测量、自动数据采集与计算、实时监控试验温度曲线并动态绘制温度变化曲线, 并支持历史数据自动存盘与试验报告即时打印, 确保校准过程可追溯、结果可量化。具体量化指标为: 温度示值误差需控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内; 升温速率误差针对 $50^\circ\text{C}/\text{h}$ 和 $120^\circ\text{C}/\text{h}$ 两种标准速率, 分别要求 $\pm 5^\circ\text{C}/\text{h}$ 和 $\pm 10^\circ\text{C}/\text{h}$; 温度均匀度需 $\leq 1^\circ\text{C}$ 。

针对以上关键温度计量技术指标, 本研究提出创新校准方法并配套开发自动触发式图像采集温度记录装置, 可精准确定校准范围, 有效减小温度指示误差及升温速率校准中的测温偏差。基于以下动态测试原理: 当被测试样在负载作用下发生 1 mm 变形或被压针刺入时, 形变瞬间完成, 试样未处于相对恒定的温度状态。

维卡测试中, 热塑性材料在恒定载荷下的压入变形符合粘弹性蠕变特性, 采用 Kelvin-Voigt 模型描述, 其本构方程为:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \quad (1)$$

其中, $\sigma = F/A$ 为压针施加的恒定应力, F 为载荷, A 为压针接触面积, E 为弹性模量, η 为粘度系数, $\varepsilon = \delta/h_0$ 为应变 (δ 为刺入深度, h_0 为试样初始厚度)。

在恒定应力 σ_0 作用下, 求解式 (1) 可得应变随时间的演化关系, 进而得到刺入深度公式:

$$\delta(t) = \frac{\sigma_0 h_0}{E} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2)$$

其中, $\tau = \eta/E$ 为材料松弛时间, 表征粘弹性变形的时间尺度。

温度通过热激活机制显著影响材料参数。松弛时间随温度升高呈指数下降, 遵循 Arrhenius 关系:

$$\tau(T) = \tau_0 e^{Q/RT} \quad (3)$$

其中, τ_0 为参考松弛时间, Q 为活化能, R 为气体常数, T 为绝对温度。

弹性模量则随温度线性软化:

$$E(T) = E_0 - k(T - T_0) \quad (4)$$

其中, E_0 为参考温度 T_0 下的模量, k 为软化系数。

当刺入深度达到临界值 $\delta_{crit} = 1 \text{ mm}$ 时, 对应温度即为维卡软化温度 T_{VST} 。联立式 (2)~(4) 并结合升温速率 $\beta = dT/dt$, 可得:

$$\delta_{crit} = \frac{F h_0}{[E_0 - k(T_{VST} - T_0)]} (1 - e^{-\frac{T_{VST} - T_{start}}{\beta \tau_0 e^{\frac{Q}{RT_{VST}}}}}) \quad (5)$$

自动触发式图像采集温度记录装置框图如图 1 所示。

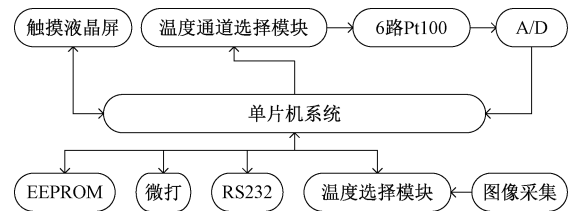


图 1 自动触发式图像采集温度记录装置框图

Fig. 1 Block diagram of the auto-triggered image acquisition and temperature recording device

这一特性要求温度记录点准确捕获测定仪的实时指示温度。为满足该需求, 重点对测量标准读数系统和数据记录装置进行改进: 一是采用高速图像采集系统实时捕捉形

变临界点;二是开发同步触发机制确保温度记录的时效性;三是优化数据处理算法以提高测量精度,从而适配动态测试中的瞬时响应需求。本装置采用 Canny 边缘检测+模板匹配组合算法定位临界点,具体流程如下:

试验前采集压针-试样初始位置图像,存储压针顶端与试样表面的基准距离 h_0 ,消除油浴初始反光干扰;相机以 10 fps 帧率连续捕捉图像,通过 Canny 算子提取压针与试样的边缘轮廓;基于轮廓坐标计算实时距离 $h(t)$,当 $h(t)-h_0 \geq 1 \text{ mm}$ 时,触发同步信号;触发信号通过 FPGA 控制模块传输至多通道铂电阻阵列温度测量模块,记录当前温度值,总触发延迟 $\leq 100 \text{ ms}$,远小于形变持续时间 0.5 s,无显著精度影响。

本文研制的维卡软化温度测定仪校准装置主要由温度测量模块、时间测量模块、图像采集模块、智能校准系统及分析软件组成。温度测量模块需选用尺寸、形状合适且响应速度足够快的温度传感器及显示仪表,以保证测量准确度、稳定性并满足动态测量要求;时间测量模块在温度升至某点时触发计时,到设定上限温度停止;图像采集模块选用海康威视 1 000 万像素彩色工业相机,支持手动调节增益和曝光时间。维卡软化温度测定仪校准装置的工作模块及流程如图 2 所示。

对系统关键模块响应时间进行实测,结果如下:Pt100 传感器热响应时间 $\leq 5 \text{ s}$,24 位 A/D 转换延迟 $\leq 10 \text{ ms}$,温度测量总延迟 $\leq 5.01 \text{ s}$;海康威视工业相机曝光时间 50 ms+数据传输延迟 30 ms,单帧采集延迟 $\leq 80 \text{ ms}$,帧率 10 fps 可覆盖形变瞬间;触发信号通过 FPGA 传输,延迟 $\leq 20 \text{ ms}$,总系统延迟 $\leq 5.11 \text{ s}$ 。最高升温速率约 $0.033^\circ\text{C}/\text{s}$,100 ms 延迟内温度变化量 0.0026°C ,远小于 0.067°C 的标准不确定度;图像延迟导致的形变测量误差 $\leq 0.01 \text{ mm}$,小于 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 的位移示值误差要求,因此延迟对测量精度无显著干扰。

维卡软化温度测定仪校准装置有 6 个测量点,各配铂电阻传感器,油槽温度由一根控温铂电阻传感器控制,如图 3 所示。实验时,将规定试样置于测量站并加负载,连接位移传感器,设定超标准变形量以确保实验在上限温度前不停止。6 路维卡软化温度测定仪校准装置如图 3 所示。

依据校准规范及操作流程,设计开发了适配的智能校准软件,该软件为维卡软化点温度测定仪校准装置实现自动化、流程化校准,借助计算模型动态采集分析数据并生成原始记录,达成校准工作自动化。智能校准软件工作流程如图 4 所示。

2 校准温度参数测量不确定度计算及分析

针对维卡软化温度测定仪的温度参数,重点分析温度示值误差与升温速率误差的测量不确定度。其中,被校测定仪温度指示分辨率 0.01°C ;测量标准采用温度巡检仪具有 $0^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 量程, 0.01°C 分辨率, $\pm 0.10^\circ\text{C}$ 最大允许误

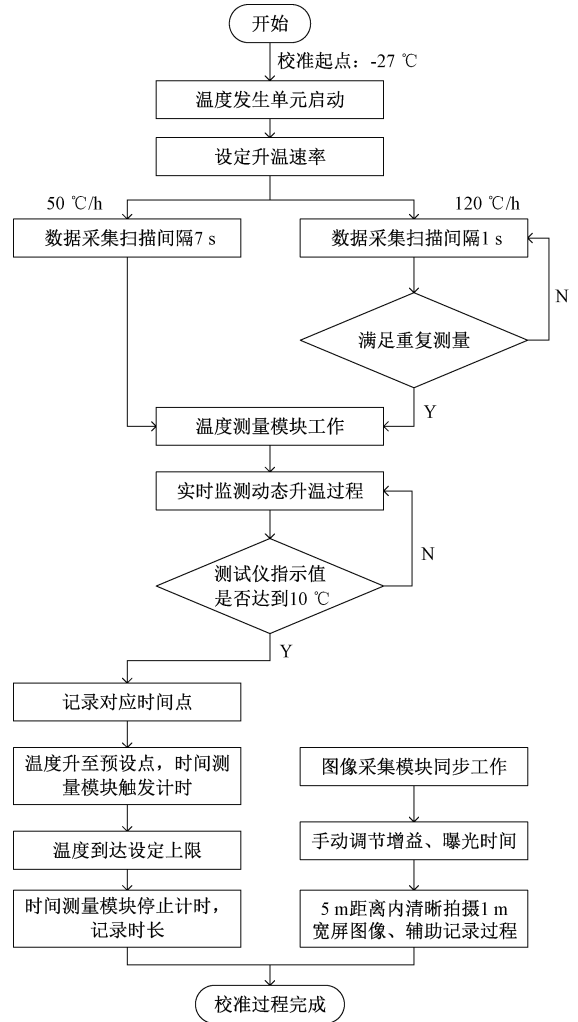


图 2 维卡软化温度测定仪校准装置的工作模块及流程
Fig. 2 Working modules and processes of the Vicat/softening temperature tester calibration device



图 3 6 路维卡软化温度测定仪校准装置
Fig. 3 6-channel Vicat softening temperature tester

差;秒表具有 0.1 s 分辨率, $\pm 0.5 \text{ s/d}$ 最大允许误差。温度示值误差测量模型为 $\Delta t = t_x - t_s$ (Δt 为示值误差, t_x 为测定仪指示值, t_s 为巡检仪测得值), 不确定度源于被校仪器

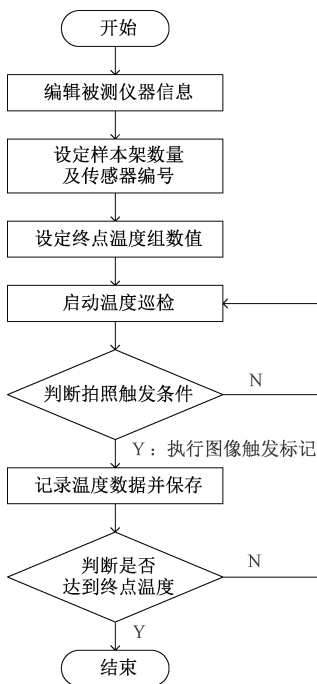


图 4 智能校准软件工作流程

Fig. 4 Intelligent calibration software workflow

的测量重复性与指示分辨力、温度巡检仪的分辨力及最大允许误差,合成标准不确定度按 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$ 计算,其中 u_1, u_2, u_3 分别为各来源不确定度分量。升温速率误差测量模型为 $\Delta v = v_x - v_s$ (Δv 为速率误差, v_x 为设定标称值, v_s 为实际测得值),不确定度源于升温速率测量重复性、温度巡检仪的分辨率及最大允许误差,合成标准不确定度同样按 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$ 计算。

为验证校准装置测量不确定度,对同一组样品分别进行了升温速率($12^\circ\text{C}/6\text{ min}$) (图 5) 和升温速率($5^\circ\text{C}/6\text{ min}$) (图 6) 测试。结果显示, $12^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 升温速率测试中,各时间段实际升温速率为 $(11.9 \sim 12.1)^\circ\text{C}/6\text{ min}$,均处于技术要求的 $(12 \pm 0.1)^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 范围内;温度示值误差为 $(-0.1 \sim 0.2)^\circ\text{C}$,满足 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的允许误差要求。在 $5^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 升温速率测试中,实际升温速率为 $(4.9 \sim 5.1)^\circ\text{C}/6\text{ min}$,符合 $(5 \pm 0.5)^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 的技术指标;温度示值误差为 $(-0.1 \sim 0.2)^\circ\text{C}$,同样在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 允许范围内。两种速率下所有测量点均判定为合格,表明该校准装置在动态升温过程中具有良好的温度示值准确性和升温速率稳定性,为其测量不确定度的验证提供了可靠数据支持。

接着对测定仪校准装置的温度示值误差及升温速率误差进行了系统的不确定度分析。在温度示值误差分析中,基于测量模型 $\Delta t = t_x - t_s$ (其中 Δt 为示值误差, t_x 为测定仪指示值, t_s 为巡检仪测得值),3 项主要不确定度来源为:被校准器的测量重复性及指示分辨力,通过 6 次重复测量计算得标准偏差 0.034°C ,结合分辨力 0.01°C 引入的 0.003°C ,取较大值 0.034°C 作为分量 u_1 ;温度巡检仪分辨

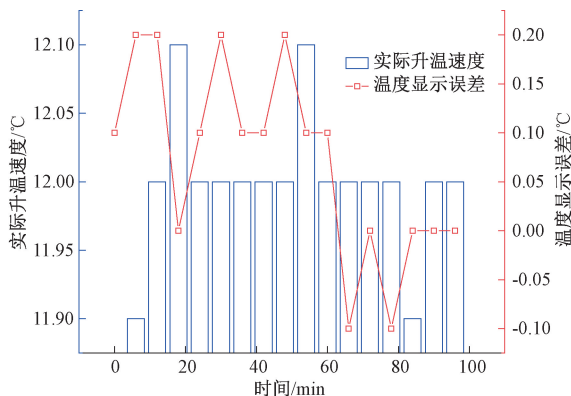


图 5 样品在升温速率 $12^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 时的温度示值误差
Fig. 5 Temperature indicated error of the sample at a heating rate of $12^\circ\text{C}/6\text{ min}$

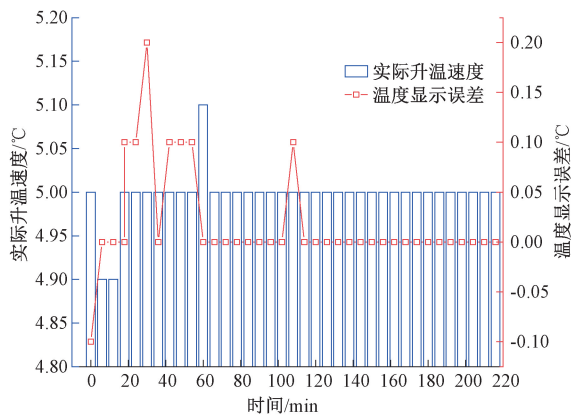


图 6 样品在升温速率 $5^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 时的温度示值误差
Fig. 6 Temperature indicated error of the sample at a heating rate of $5^\circ\text{C}/6\text{ min}$

力 0.01°C 引入的 $u_2 = 0.003^\circ\text{C}$;巡检仪最大允许误差 $\pm 0.10^\circ\text{C}$ 按均匀分布计算的 $u_3 = 0.058^\circ\text{C}$ 。经合成得标准不确定度 $u_c = 0.067^\circ\text{C}$ 。在升温速率误差分析中,依据模型 $\Delta v = v_x - v_s$ (Δv 为速率误差, v_x 为标称值, v_s 为实测值),不确定度来源包括:6 次重复测量得到的重复性分量 $u_1 = 0.07^\circ\text{C}/\text{h}$;巡检仪分辨力 $0.01^\circ\text{C}/\text{h}$ 引入 $u_2 = 0.003^\circ\text{C}/\text{h}$;以及巡检仪最大允许误差 $\pm 0.10^\circ\text{C}$ 对应的 $u_3 = 0.058^\circ\text{C}$ 。合成后标准不确定度 $u_c = 0.091^\circ\text{C}$ 。

3 结 论

本研究中的维卡软化点温度测定仪校准装置依据动态测试原理运行,利用被测试样在负载作用下发生变形自动触发式图像采集温度记录装置实时捕捉形变临界点,以此实现对温度的精准记录。装置的工作流程涵盖试样放置、参数设定、数据采集、分析及报告生成等环节。测试数据显示: $12^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 升温速率下,实际升温速率处于 $(11.9 \sim 12.1)^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 区间,温度示值误差在 $(-0.1 \sim 0.2)^\circ\text{C}$ 范围; $5^\circ\text{C}/6\text{ min}$ 升温速率下,实际升温速率为 $(4.9 \sim$

5. 1)℃/6 min, 温度示值误差为(-0.1~0.2)℃, 全部符合技术要求。不确定度分析结果为: 温度示值误差标准不确定度 0.067℃; 升温速率误差标准不确定度 0.091℃/h。本研究提出的动态升温校准方法及所研制的维卡软化点温度测定仪校准装置, 解决了现有校准方法存在的问题, 实现了温度与升温速率的同步动态精准校准, 为材料热性能测试提供可靠保障, 在材料研发、质量控制等领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] 曾宪钰, 张佳仁, 陈功. 热变形、维卡软化点温度测定仪测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(3): 102-103, 106.
ZENG X Y, ZHANG J R, CHEN G. Evaluation of measurement uncertainty for heat distortion and vicat softening point temperature tester[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 45(3): 102-103, 106.
- [2] 程银宝, 陈晓怀, 王汉斌, 等. 基于精度理论的测量不确定度评定与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 8.
CHENG Y B, CHEN X H, WANG H B, et al. Evaluation and analysis of measurement uncertainty based on precision theory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 8.
- [3] 易杰, 吴媚. 热变形、维卡软化点温度测定仪的校准方法[J]. 中国计量, 2017(1): 107-108.
YI J, WU M. Calibration method for heat distortion and vicat softening point temperature tester[J]. China Metrology, 2017(1): 107-108.
- [4] 龚伟, 毛爽, 罗涵, 等. 热变形、维卡软化点温度测定仪温度校准方法探讨[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(9): 83-85.
GONG W, MAO SH, LUO H, et al. Discussion on temperature calibration method for heat distortion and vicat softening point temperature tester[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 45(9): 83-85.
- [5] 王浩. 热变形维卡软化温度测定仪校准方法研究[J]. 品牌与标准化, 2023(1): 56-58.
WANG H. Study on calibration method for heat distortion vicat softening temperature tester[J]. Brand and Standardization, 2023(1): 56-58.
- [6] 孙兴伟, 杨铜铜, 杨赫然, 等. 基于 CNN-GRU 组合神经网络的数控机床进给系统热误差研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 219-226.
SUN X W, YANG T T, YANG H R, et al. Study on thermal error of CNC machine tool feed system based on CNN-GRU combined neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 219-226.
- [7] 戴野, 战士强, 王建辉, 等. 基于键合图的变压预紧力电主轴热误差建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 7.
DAI Y, ZHAN SH Q, WANG J H, et al. Study on thermal error modeling of electric spindle with variable pressure preload based on bond graph[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 7.
- [8] 符堃. 热变形及维卡软化点温度测试仪温度参数在线校准方法[J]. 上海计量测试, 2016, 43(2): 29-31.
FU K. Online calibration method for temperature parameters of heat distortion and vicat softening point temperature tester [J]. Shanghai Metrology and Testing, 2016, 43(2): 29-31.
- [9] 何剑华. 一种热变形维卡试验机: CN202320181076. 3[P]. CN219348699U. 2025-08-18.
HE J H. A heat distortion vicat testing machine: CN202320181076. 3[P]. CN219348699U. 2025-08-18.
- [10] 杨斌, 张钟党. 一种热变形、维卡软化点温度测定仪电动升降机构: CN202110682225. X[P]. CN113281373B. 2025-08-18.
YANG B, ZHANG ZH D. Electric lifting mechanism for heat distortion and vicat softening point temperature tester: CN202110682225. X [P]. CN113281373B. 2025-08-18.
- [11] 高云鹏, 冀万文, 黄丽丽. 维卡软化点温度测定方法及仪器的研究[J]. 有色金属工程, 2023, 13(10): 154.
GAO Y P, JI W W, HUANG L L. Study on determination method and instrument of vicat softening point temperature [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(10): 154.
- [12] 单峰. 一种热变形维卡软化点温度测定仪: CN202410420074. 4[P]. CN118275490A[2025-10-24].
SHAN F. A heat distortion vicat softening point temperature tester: CN202410420074. 4 [P]. CN118275490A[2025-10-24].
- [13] 林潇, 陈海生. 一种维卡软化点温度测定装置: CN202322596473. X[P]. CN220894196U [2025-10-24].
LIN X, CHEN H SH. A vicat softening point temperature determination device: CN202322596473. X [P]. CN220894196U[2025-10-24].
- [14] 张雪莹. 热变形、维卡软化点温度测定仪校准方法探讨[J]. 大众标准化, 2023(15): 186-188.
ZHANG X Y. Discussion on calibration method of heat distortion and vicat softening point temperature tester [J]. Popular Standardization, 2023(15): 186-188.

- [15] 高云鹏,李昊燃,董大伟. 智能热变形维卡软化点温度测定仪研制创新思路研究[J]. 汽车博览,2023(30):127-129.
GAO Y P, LI H R, DONG D W. Study on development and innovation ideas of intelligent heat distortion vicat softening point temperature tester[J]. Automotive Expo, 2023(30):127-129.
- [16] LIU S N, CHEN L W. Study on the correction method of radiant temperature measurement of turbine blades under the background of high-temperature dynamics[J]. Instrumentation, 2025,12(2):80-90.
- [17] 魏明明,李芬. 二等铂电阻温度计标准装置校准结果的验证[J]. 电子测量技术,2023,46(19):177-181.
WEI M M, LI F. Verification of calibration results for secondary platinum resistance thermometer standard device [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19):177-181.
- [18] 周旺亮,秦华旺. 基于 SWGU-ConvLSTM 模型的温度偏差订正[J]. 电子测量技术,2025,48(8):144-153.
ZHOU W L, QIN H W. Temperature deviation correction based on SWGU-ConvLSTM model [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(8):144-153.
- [19] 孟庆富,涂程旭,杨洪波,等. 微秒级温度传感器动态校准研究进展[J]. 电子测量技术,2023,46(24):54-60.
MENG Q F, TU CH X, YANG H B, et al. Research progress on dynamic calibration of microsecond-level temperature sensors [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24):54-60.
- [20] 陈相洪,史凡萍,杨鹏,等. 基于高精度数字温度传感器测试系统及建模仿真[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(7):42-52.
CHEN X H, SHI F P, YANG P, et al. Test system and modeling simulation based on high-precision digital temperature sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7):42-52.

作者简介

苏彩山,本科,高级工程师,主要研究方向为电磁、力学、热工计量研究工作。

E-mail:sucaishan@163.com

张帅星(通信作者),本科,高级工程师,主要研究方向为热工计量研究工作。

E-mail:872434711@qq.com