

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.04.015

# 并联式微小试样力学拉伸性能高通量测试系统\*

王贵勇<sup>1,2</sup>, 王海舟<sup>1,3\*</sup>, 王 蓬<sup>1,2</sup>, 朱林茂<sup>1,2</sup>, 祝铁柱<sup>1,2</sup>,  
沈学静<sup>1,2</sup>, 赵 雷<sup>2,3</sup>, 李冬玲<sup>2,3</sup>

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081; 2. 钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100081;  
金属材料表征北京市重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**针对材料力学拉伸性能的高通量测试设备及方法缺失的问题,提出了一种并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统。首先,对测试系统的结构进行了设计,阐述了其工作原理;对测试系统的控制系统和软件进行了设计,阐述了其工作流程,并搭建了测试系统;然后,对测试系统的准确度进行了评价,并开展了实验研究;实验中,设计了3种不同尺寸的微小拉伸试样,从国家标准拉伸物质上进行了取样加工,并在测试系统上进行了测试;最后,对实验的结果进行了分析,并对测试结果的不确定度进行了评定。研究表明:并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统准确度等级为0.5级;被测试样的强度随着试样直径的减小,出现了减小的趋势;评定的测试结果不确定度可满足GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》的要求;测试系统的方案可行,能同时对多个微小拉伸试样的力学性能进行测试,且测试结果的离散度较小;相关研究可为微小试样力学性能的高通量测试及工程应用提供设计参考。

**关键词:**金属材料;力学拉伸性能;微小试样;高通量测试系统

中图分类号:TH871

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)04-0524-08

## High-throughput testing system for mechanical tensile properties of parallel micro-specimen

WANG Gui-yong<sup>1,2</sup>, WANG Hai-zhou<sup>1,3</sup>, WANG Peng<sup>1,2</sup>, ZHU Lin-mao<sup>1,2</sup>, ZHU Tie-zhu<sup>1,2</sup>,  
SHEN Xue-jing<sup>1,2</sup>, ZHAO Lei<sup>2,3</sup>, LI Dong-ling<sup>2,3</sup>

(1. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. NCS Testing Technology Co., LTD.,  
Beijing 100081, China; 3. Beijing Key Laboratory of Metal Material Characterization, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the lack of high-throughput testing equipment and methods for mechanical tensile properties of materials, a high-throughput testing system based on parallel for mechanical tensile properties of micro-samples was proposed. The structure of the testing system was designed and its working principle was explained. The control system and software of the testing system was designed, its work flow was explained, and the testing system was built. Then, the accuracy of the testing system was evaluated, and experimental research was carried out. In the experiment, three types of micro tensile specimens of different sizes were designed, which were sampled and processed on the national standard tensile material, and were tested on the testing system. Finally, the results of the experiment were analyzed, and the uncertainty of the testing results was evaluated. The results indicate that the accuracy level of the high-throughput testing system for mechanical tensile properties of micro-specimen based on parallel is 0.5, the strength of the tested specimen has a decreasing trend as the diameter of the specimen decreases, and the uncertainty of the evaluated testing results meets the requirements of GB/T 228.1-2010 Metallic Materials-Tensile Testing Part 1: Method of Test at Room Temperature. The testing system is feasible which can test the mechanical tensile properties of multiple micro-samples at the same time, and the dispersion of the test results is small. The relevant research can provide design reference for high-throughput testing and engineering application of mechanical properties of micro-specimen.

**Key words:** metallic material; mechanical tensile property; micro-specimen; high-throughput testing system

收稿日期:2021-10-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0704100;2021YFB3702103)

作者简介:王贵勇(1985-),男,贵州兴仁人,博士,高级工程师,主要从事高通量材料性能测试装备及计量校准技术方面的研究。E-mail:guiyong\_w16@163.com

通信联系人:王海舟,男,中国工程院院士,教授,博士生导师。E-mail:wanghaizhou@ncschina.com

## 0 引言

针对金属材料拉伸性能的测试,传统的测试方法试样尺寸较大,同时,大量重复性测试会造成材料浪费。另外,对服役中的材料(特别是复杂结构材料及材料尺寸有限的服役材料)进行测试时,传统的测试方法割取试样会造成设备的损伤。

而微小试样力学性能拉伸测试通过截取微型试样进行测试,可接近满足对材料力学性能的无损检测<sup>[1,2]</sup>。

由于被测材料的体积受限,无法制备满足常规尺寸要求,借助微小拉伸样品进行力学性能测试的方法称为微小拉伸样品测试方法<sup>[3]</sup>。通常把试样尺寸区别于常规拉伸样品的试样称为微小拉伸试样,其名义横向尺寸通常小于3 mm,纵向尺寸小于25 mm。

针对微小试样的拉伸测试,目前的研究主要集中在单轴微拉伸方面。如 LUCAS G E 等人<sup>[4]</sup>开展了小尺寸样品在辐射材料方面的应用研究。张国庆等人<sup>[5]</sup>设计了微拉伸测试系统,并对 SU-8 光刻胶进行了微尺度力学性能测试。

然而,单轴拉伸由于一次只能进行一根试样的测试,难以满足高通量测试技术的需求。高通量测试技术是指在相同环境条件下,一次对多个样品同时进行测试的技术<sup>[6-8]</sup>。

关于高通量力学拉伸性能测试技术,相关研究较少。国外仅有 HECKMAN N M<sup>[9]</sup>、SALZBRENNER B C<sup>[10]</sup>等人使用了增材制造对微小拉伸样品进行了批量制备,然后使用测试设备对制备的试样逐一进行了测试,实现材料表面粗糙度、孔隙率和微观结构等随机性差异对性能分布变化影响的评估。国内仅有陈新<sup>[11]</sup>、周宇<sup>[12]</sup>、张东升<sup>[13]</sup>等人在专利中对高通量试验装置提出了设想,而工程应用中鲜见相关报道。

因此,笔者开发一种力学性能高通量测试系统,可同时对多个微小试样进行拉伸力学性能测试,在系统上实现对微小试样力学拉伸性能的高通量测试,并通过准确度评价、实验结果分析及不确定度评定对测试系统进行验证。

## 1 结构设计

基于并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统结构示意图如图1所示。

并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统主要由:力传感器、变形传感器、滚珠丝杠及夹具组成的6个独立通道的力学性能测试装置,以及1个电机、减速系统组成的动力传动系统组成。

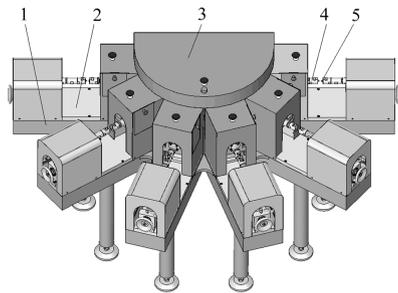


图1 基于并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统结构示意图

1—工作台面;2—测试装置;3—电机及减速系统;4—夹具;5—试样

其工作原理为:电机转动时,驱动减速系统转动,减速系统驱动力学性能测试装置上的滚珠丝杠转动,实现对力学性能测试装置的横梁来回运动的控制,进而完成拉伸、压缩等性能测试。

测试时,可同时选中6个通道的力学性能测试装置,实现同时对6根微小试样进行力学性能测试。也可根据测试需要,选中其中的任意几个或1个通道进行测试。

测试中,多个通道的测试装置同时进行测试时,如果某个测试通道的测试结束,则该测试通道的离合器自动分开,测试通道停止工作,其余未完成测试的测试通道则继续工作,直到所有测试全部结束。每个测试通道均拥有独立的变形传感器和力值传感器,独立采集每个被测试样的变形及力值等数据。

## 2 控制系统及软件设计

### 2.1 控制系统设计

控制系统结构图如图2所示。

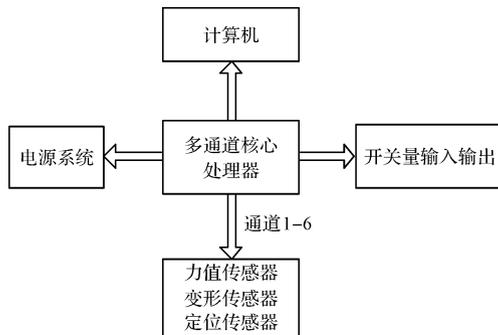


图2 控制系统的结构组成

该控制系统主要由计算机、多通道核心处理器、开关输入输出模块、电源系统及各测试通道的力值、变形及定位传感器等组成。

其中,开关量输入输出主要用于系统及测试通道的安全保护、限位保护及离合器通断控制等;各测试通道的变形传感器、力值传感器则通过并行传输的方式

同时传递到多通道核心处理器,核心处理器采集到各通道测试数据后,进行信号转换及数据处理,并将处理后的数据传递给控制软件;定位传感器用来对测试通道的夹具位置进行快速复位。

控制系统的工作原理为:通过在控制软件上一键操作,可以实现对 6 个测试通道的独立同步控制,进而实现对多个被测试样的同步测试。具体如下:

控制软件向测控系统发送指令驱动电机工作,电机通过减速系统驱动测试通道的上的滚珠丝杠实现同步转动,实现各测试通道移动横梁的同步来回运动,进而实现对被测样品的同步拉伸、压缩等测试。测试过程中,控制软件能够独立采集并处理各测试通道的力值和试样变形数据,并绘制各测试通道的测试曲线,以及计算、处理测试结果等。

测试中,当某个测试通道的测试结束时,并不影响其他测试通道的测试继续进行,直到全部被测样品完成测试。如果测试单元的移动横梁到达安全保护位置时,离合器将自动断开,实现对测试通道的安全保护。

### 2.2 软件设计

控制软件功能模块如图 3 所示。

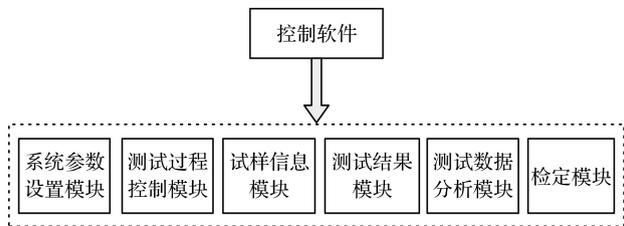


图 3 控制软件功能组成

软件系统主要由系统参数设置模块、测试过程控制模块、试样信息模块、测试结果模块、测试数据分析模块及检定模块等组成。

系统参数设置模块包括数据采集周期、显示精度,测试项目及曲线坐标设置等。测试过程控制模块主要对测试过程进行控制,包括测试通道的选择,测试速度、预载力设置及测试开始及测试结束等。试样信息模块主要对被测试样的尺寸、材料等信息进行录入。

测试结果模块主要对每个测试通道的测试数据及计算结果等信息进行显示。测试数据分析模块可以对测试曲线、曲线上的特征点及计算结果进行详细分析。检定模块主要用于力值、变形传感器的示值标定和校准。

测试系统的工作流程图如图 4 所示。

测试工作流程为:

根据被测样品的类型选择相应的测试方法,然后对被测样品的尺寸进行测量,并把相关测量参数及材料牌号等录入到每个试样信息模块中;

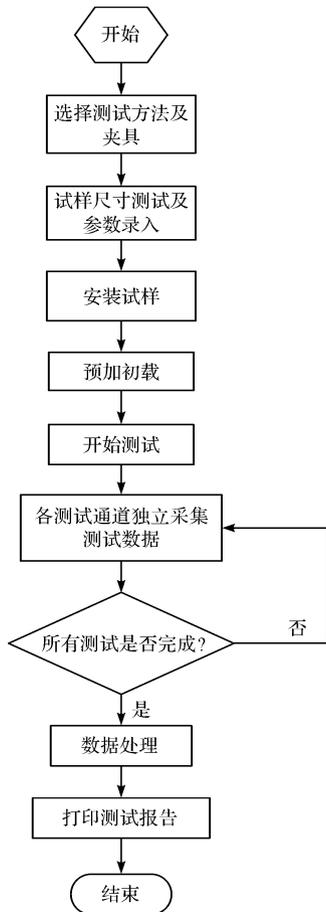


图 4 测试系统工作流程图

按照试样的尺寸选择合适的夹具,并将试样和夹具安装到测试通道上;当所有被测样品全部安装完成后,通过软件操作对试样进行预加初载,然后在控制软件上点击“开始测试”,各测试通道将同步启动对被测样品进行测试;

测试中,各测试通道独立采集每个被测试样的力值和变形数据,并在控制软件界面实时显示时间-力值、时间-变形、应变-应力、变形-力值等测试曲线;当被测样品完成测试时,控制软件将自动判断是否有其他测试,如果有,则测试继续进行;没有,则测试结束;

测试结束后,控制软件将自动进行测试数据处理和计算,并在控制软件上显示测试结果,可根据需要选择是否打印测试报告。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 测试系统的准确度评价

并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统的实物图如图 5 所示。

对测试系统的测量准确度进行评价时,需要结合测试系统各测试通道的力值、变形测量装置及位移速率的准确度进行综合评定。

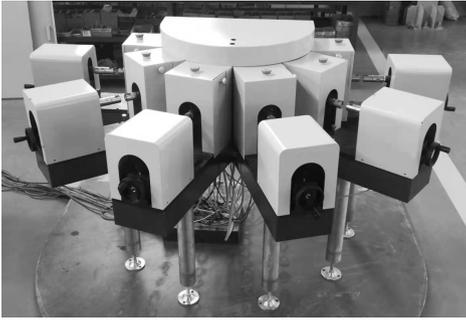


图5 并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统实物图

参照 JJG 475—2008《电子式万能试验机检定规程》及 JJF 1296.1—2011《静力单轴试验机型式评价大纲第1部分:电子式万能试验机》,笔者采用准确度等级为0.1级的标准测力仪对各测试通道的力值进行校准;采用准确度等级为0.05级高精度位移速率检定装置对变形测量装置、位移速率进行校准。

笔者分别对力值、变形及位移速率的测量结果进行不确定度评定并对评定结果进行验证,结果表明,测试系统的准确度等级为0.5级。

### 3.2 实验

笔者采用国家标准拉伸物质进行比对测试实验。

具体方案为设计直径分别为1.0 mm、1.5 mm、2.5 mm的3种微小拉伸样品,从国家标准拉伸物质上进行取样加工,在测试系统上进行拉伸测试。测试速率根据小试样的横截面积和平行段长度,参照标准拉伸物质给定的速率进行等比例缩小。

为保证测试材料取样的一致性,笔者规定取样位置为拉伸标准物质的中间平行段,取样位置示意图如图6所示。

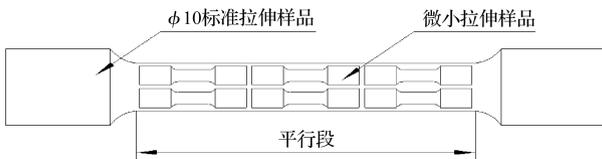


图6 取样位置示意图

比对的测试参数为:最大抗拉强度、上屈服强度、下屈服强度和规定塑性延伸强度(0.2%)。笔者通过比对,观察不同直径微小拉伸试样的强度指标随尺寸变化而发生改变的规律,为后续进行微小试样力学性能测试研究,建立尺寸效应相关性模型奠定基础。

标准拉伸物质的最大抗拉强度、下屈服强度通过标准物质的证书获得,并在常规拉伸试验机上进行测试验证;上屈服强度、规定塑性延伸强度(0.2%)通过在常规拉伸试验机上进行多次测试,取其平均值作为参考值。

进行对比测试的国家标准拉伸样品编号为:GSB 03—2039—2016(φ10),出厂编号为:211014—41—211014—45,标准抗拉强度为(655 ± 15) MPa,标准下屈服强度为(400 ± 15) MPa,通过在常规拉伸试验机上进行测试,得到的上屈服强度为(405 ± 15) MPa,规定塑性延伸强度(0.2%)为(403 ± 15) MPa。

最大抗拉强度定义为最大测试力所对应的应力:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1)$$

式中: $F_m$ —最大力; $S_0$ —原始横截面积。

上屈服强度定义为测试力首次下降前的最大力对应的应力,通常取屈服前的第1个峰值应力为上屈服强度:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (2)$$

式中: $F_{eH}$ —测试力首次下降前的最大力; $S_0$ —原始横截面积。

下屈服强度定义为不计初始瞬时效应时,屈服阶段中的最小力所对应的应力:

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (3)$$

式中: $F_{eL}$ —不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最小力; $S_0$ —原始横截面积。

规定塑性延伸强度(0.2%)的计算,定义为:在曲线图上作一条与测试曲线的弹性直线段部分平行,且在延伸轴上与该直线段的距离等效于规定塑性延伸率的直线,该直线与测试曲线的交截点即为所求规定塑性延伸强度的力对应的应力:

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0} \quad (4)$$

式中: $F_{p0.2}$ —规定塑性延伸率为0.2%时对应的测试力; $S_0$ —原始横截面积。

设计的微小拉伸样品尺寸图如图7所示。

制备试样时,为消除表面粗糙度对测试结果的影响,笔者规定试样的中间平行段表面粗糙度与标准拉伸物质的表面粗糙度相同,试样制备后通过表面粗糙度比较样块进行加工质量控制。

由于微小试样的横截面积尺寸误差对强度指标的影响较明显,因此,原始横截面积不能用尺寸误差范围内的名义值代替,需要对每个试样的尺寸进行实际测量。

在形状公差方面,沿着微小拉伸试样整个平行段长度,规定横向直径尺寸测量值的极差优于国标标准要求,取0.02 mm。

笔者将加工完成的微小拉伸试样进行编号,在系统上进行测试。

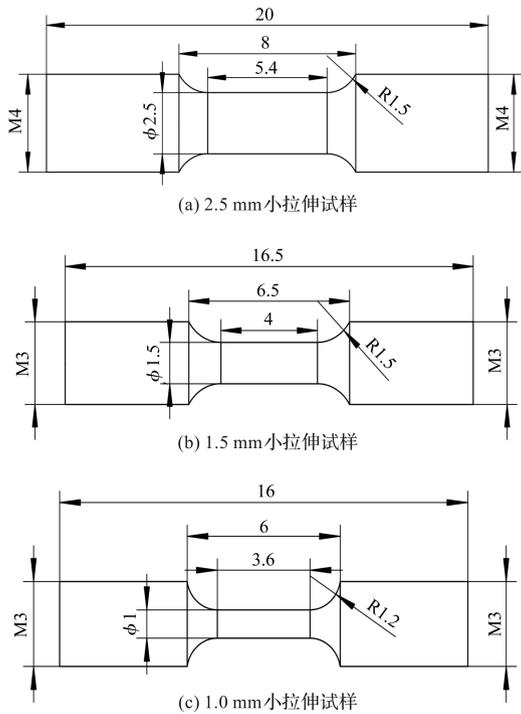
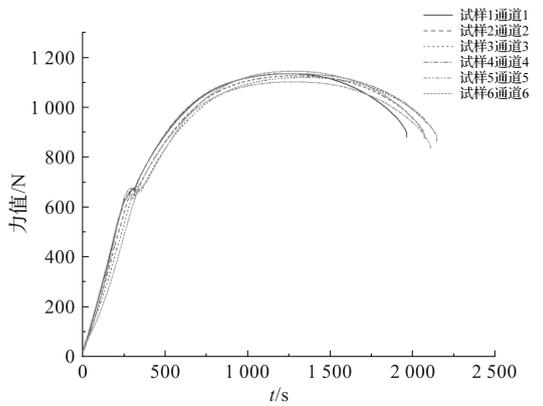


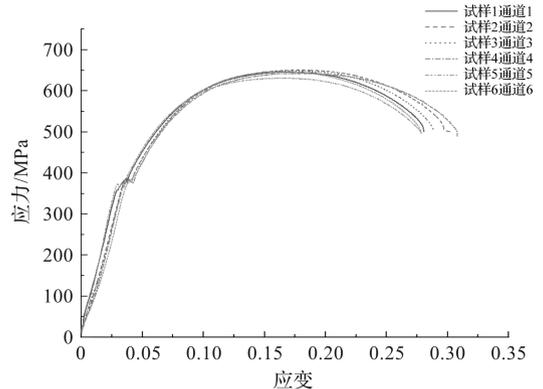
图 7 微小拉伸试样加工尺寸图

### 3.3 结果分析

直径为  $\phi 2.5\text{ mm}$ 、 $\phi 1.5\text{ mm}$ 、 $\phi 1.0\text{ mm}$  的微小拉伸试样,在 6 个测试通道同时进行测试的时间-力值、应变-应力曲线图,如图(8~10)所示。

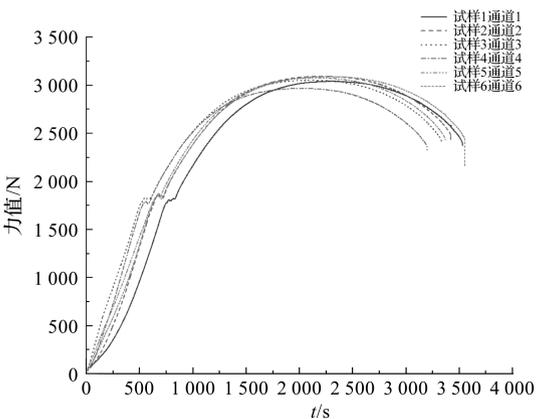


(a) 时间-力值曲线

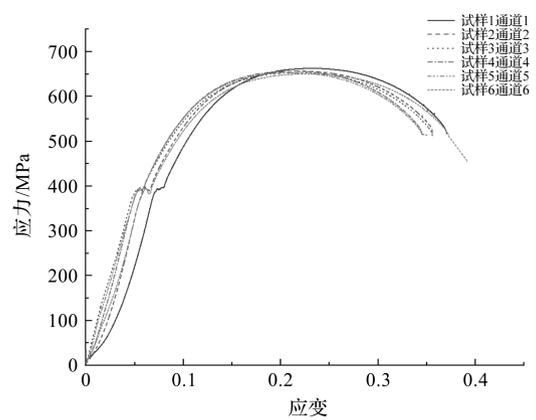


(b) 应变-应力曲线

图 9  $\phi 1.5\text{ mm}$  拉伸试样的测试曲线图

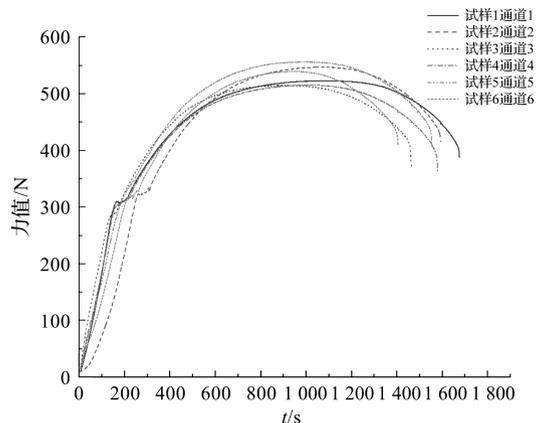


(a) 时间-力值曲线

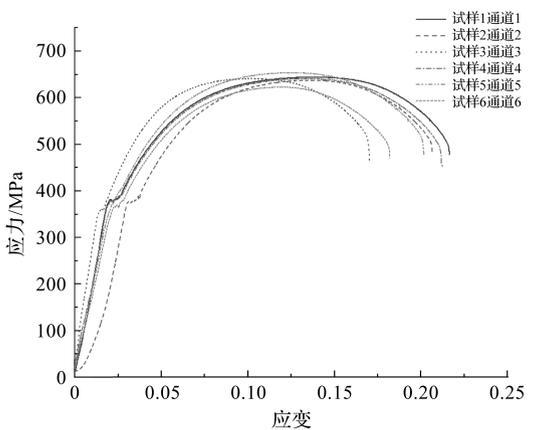


(b) 应变-应力曲线

图 8  $\phi 2.5\text{ mm}$  拉伸试样的测试曲线图



(a) 时间-力值曲线



(b) 应变-应力曲线

图 10  $\phi 1.0\text{ mm}$  拉伸试样的测试曲线图

从图(8~10)可知:对于不同直径的微小拉伸试样,6根试样同时进行测试时,各试样的测试曲线趋势较为一致,均出现了明显屈服的现象;且相同直径的试样的测试曲线较为接近,一致性较好。

此外,各试样的测试曲线较为光滑,说明各测试通道之间相互干涉较小。已经结束测试的通道并不会对

其他正在进行测试的通道造成明显干涉,也不会影响其他通道测试的继续进行,直到全部测试结束。

上述结果说明,并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统方案可行。

测试的最大抗拉强度、屈服强度、塑性延伸强度实测值与标准(参考)值对比情况如表1所示。

表1 最大抗拉强度、屈服强度、塑性延伸强度实测值与标准(参考)值对比

序号	参数	圆截面直径/mm	标准抗拉强度/MPa	实测抗拉强度/MPa	参考上屈服强度/MPa	实测上屈服强度/MPa	标准下屈服强度/MPa	实测下屈服强度/MPa	参考塑性延伸强度 $R_{p0.2}$	实测塑性延伸强度 $R_{p0.2}$
2.5 mm 试样	试样1	2.431	655 ± 15	661	405 ± 15	397	400 ± 15	395	403 ± 15	395
	试样2	2.449	655 ± 15	657	405 ± 15	398	400 ± 15	389	403 ± 15	394
	试样3	2.442	655 ± 15	652	405 ± 15	391	400 ± 15	389	403 ± 15	390
	试样4	2.402	655 ± 15	656	405 ± 15	393	400 ± 15	392	403 ± 15	396
	试样5	2.448	655 ± 15	654	405 ± 15	394	400 ± 15	390	403 ± 15	391
	试样6	2.451	655 ± 15	659	405 ± 15	399	400 ± 15	387	403 ± 15	398
1.5 mm 试样	试样1	1.494	655 ± 15	648	405 ± 15	386	400 ± 15	378	403 ± 15	380
	试样2	1.485	655 ± 15	651	405 ± 15	388	400 ± 15	384	403 ± 15	388
	试样3	1.483	655 ± 15	649	405 ± 15	382	400 ± 15	381	403 ± 15	379
	试样4	1.494	655 ± 15	648	405 ± 15	385	400 ± 15	378	403 ± 15	384
	试样5	1.478	655 ± 15	643	405 ± 15	381	400 ± 15	371	403 ± 15	380
	试样6	1.502	655 ± 15	651	405 ± 15	392	400 ± 15	391	403 ± 15	380
1.0 mm 试样	试样1	1.017	655 ± 15	644	405 ± 15	382	400 ± 15	376	403 ± 15	382
	试样2	1.045	655 ± 15	638	405 ± 15	377	400 ± 15	375	403 ± 15	375
	试样3	1.007	655 ± 15	647	405 ± 15	364	400 ± 15	361	403 ± 15	363
	试样4	1.012	655 ± 15	641	405 ± 15	379	400 ± 15	377	403 ± 15	379
	试样5	1.041	655 ± 15	654	405 ± 15	370	400 ± 15	369	403 ± 15	376
	试样6	1.041	655 ± 15	634	405 ± 15	376	400 ± 15	371	403 ± 15	373

从表1可以看出:不同直径的试样,随着试样直径的减小,强度指标出现了减小的趋势,即出现了“越小越弱”的现象,符合第一类尺寸效应。

### 3.4 拉伸测试结果的不确定度评定

影响试样强度测试结果的主要影响因素包括测试结果的重复性、测试力、试样原始横截面积及拉伸速率等。上述因素都会为测试结果带来不确定性。

最大抗拉强度、上屈服强度、下屈服强度、规定塑性延伸强度的测量模型分别如式(1~4)所示。

笔者采用GUM<sup>[14,15]</sup>法对测试结果进行不确定度评定。笔者对测试重复性引入的不确定分量,根据表1中试样直径为2.5 mm的测试结果,采用A类方法中的贝塞尔公式计算,取6根试样测试结果的平均值的标准偏差作为标准不确定度,即:

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

式中: $x_i$ —第*i*根试样的测量结果; $n$ —被测试样的数量; $\bar{x}$ —测量结果的平均值。

相对标准不确定度为:

$$u_r = u(\bar{x})/\bar{x} \quad (6)$$

笔者将表1中试样直径为2.5 mm的测试结果代入式(5,6),计算得到最大抗拉强度、上屈服强度、下屈服强度及规定塑性延伸强度(0.2%)重复性引入的相对不确定度分量分别为: $u_{\text{mm}} = 0.203\%$ 、 $u_{\text{reH}} = 0.324\%$ 、 $u_{\text{reL}} = 0.293\%$ 、 $u_{\text{rp0.2}} = 0.314\%$ 。

笔者对测试力、试样原始横截面积及拉伸速率引入的不确定分量,采用B类方法评定。

测试力引入的不确定度分量由示值误差和标准测力仪引入的不确定分量合成。测试系统的准确度等级为0.5级,得到其示值误差为±0.5%,按均匀分布考虑 $k = \sqrt{3}$ ,则 $u(F_1) = 0.5\%/\sqrt{3} = 0.288\%$ 。

标准测力仪的准确度等级为0.1级,其最大允许

误差为  $\pm 0.1\%$ ,按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ ,则  $u(F_1) = 0.1\% / \sqrt{3} = 0.057\%$ 。测试力引入的标准不确定分量为:  $u_r(F) = \sqrt{u(F_1)^2 + u(F_2)^2} = 0.294\%$ 。

测量试样原始横截面积时,笔者使用数显千分尺进行测量,千分尺的最大允许误差为  $\pm 4 \mu\text{m}$ ,按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ ,被测试样直径为  $2.5 \text{ mm}$ ,则测量直径的相对标准不确定度  $u_r(d) = 4 / (\sqrt{3} \times 2500) = 0.231\%$ 。由于横截面积为  $S_0 = \pi \cdot d^2 / 4$ ,根据不确定度传播率得到原始横截面积引入的标准不确定度分量为:  $u_r(S_0) = 2 \cdot u_r(d) = 0.462\%$ 。

拉伸测试的速率用  $0.05$  级高精度位移速率检定装置测试,其最大允许误差为  $\pm 0.05\%$ ,按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ ,则由拉伸测试速率引入的标准不确定度分量  $u_r(v) = 0.05\% / \sqrt{3} = 0.029\%$ 。

最大抗拉强度的合成标准不确定度为:

$$u_{\text{cm}} = \sqrt{u_{\text{rm}}^2 + u_r(F)^2 + u_r(S_0)^2 + u_r(v)^2} \quad (7)$$

上屈服强度的合成标准不确定度为:

$$u_{\text{ceH}} = \sqrt{u_{\text{reH}}^2 + u_r(F)^2 + u_r(S_0)^2 + u_r(v)^2} \quad (8)$$

下屈服强度的合成标准不确定度为:

$$u_{\text{ceL}} = \sqrt{u_{\text{reL}}^2 + u_r(F)^2 + u_r(S_0)^2 + u_r(v)^2} \quad (9)$$

规定塑性延伸强度 ( $0.2\%$ ) 的合成标准不确定度为:

$$u_{\text{cp}0.2} = \sqrt{u_{\text{p}0.2}^2 + u_r(F)^2 + u_r(S_0)^2 + u_r(v)^2} \quad (10)$$

测试结果取  $95\%$  的置信区间,则置信因子  $k = 2$ ,将置信因子分别乘以式 (7 ~ 10),即得到各测试参数为扩展不确定度。扩展不确定度取 2 位有效数字。

测试结果的标准不确定度分量、合成标准不确定度及扩展不确定度计算结果汇总如表 2 所示。

表 2 测试结果的标准不确定度分量、合成标准不确定度及扩展不确定度计算结果汇总

名称	不确定度来源	标准不确定分量	合成不确定	置信因子	相对扩展不确定度	扩展不确定度
最大抗拉强度	测量重复性	$u_{\text{rm}} = 0.203\%$	$u_{\text{cm}} = 0.585\%$	$k = 2$	$U_{\text{m}} = 1.2\%$	$U_{\text{m}} = 7.9 \text{ MPa}$
	最大抗拉力	$u_r(F) = 0.294\%$				
	原始横截面积	$u_r(S_0) = 0.462\%$				
	测试速率	$u_r(v) = 0.029\%$				
上屈服强度	测量重复性	$u_{\text{reH}} = 0.324\%$	$u_{\text{ceH}} = 0.637\%$	$k = 2$	$U_{\text{reH}} = 1.3\%$	$U_{\text{ceH}} = 5.1 \text{ MPa}$
	上屈服力	$u_r(F) = 0.294\%$				
	原始横截面积	$u_r(S_0) = 0.462\%$				
	测试速率	$u_r(v) = 0.029\%$				
下屈服强度	测量重复性	$u_{\text{reL}} = 0.293\%$	$u_{\text{ceL}} = 0.622\%$	$k = 2$	$U_{\text{reL}} = 1.2\%$	$U_{\text{ceL}} = 5.1 \text{ MPa}$
	下屈服力	$u_r(F) = 0.294\%$				
	原始横截面积	$u_r(S_0) = 0.462\%$				
	测试速率	$u_r(v) = 0.029\%$				
规定塑性延伸强度 ( $0.2\%$ )	测量重复性	$u_{\text{rp}0.2} = 0.314\%$	$u_{\text{cp}0.2} = 0.632\%$	$k = 2$	$U_{\text{rp}0.2} = 1.3\%$	$U_{\text{cp}0.2} = 5.1 \text{ MPa}$
	规定塑性延伸力	$u_r(F) = 0.294\%$				
	原始横截面积	$u_r(S_0) = 0.462\%$				
	测试速率	$u_r(v) = 0.029\%$				

从表 2 可知:最大抗拉强度、上屈服强度、下屈服强度、规定塑性延伸强度 ( $0.2\%$ ) 的相对扩展不确定度分别为  $U_{\text{m}} = 1.2\%$  ( $k = 2$ )、 $U_{\text{reH}} = 1.3\%$  ( $k = 2$ )、 $U_{\text{reL}} = 1.2\%$  ( $k = 2$ )、 $U_{\text{rp}0.2} = 1.3\%$  ( $k = 2$ ),换算成扩展不确定分别为  $U_{\text{m}} = 7.9 \text{ MPa}$  ( $k = 2$ )、 $U_{\text{ceH}} = 5.1 \text{ MPa}$  ( $k = 2$ )、 $U_{\text{ceL}} = 5.1 \text{ MPa}$  ( $k = 2$ )、 $U_{\text{cp}0.2} = 5.1 \text{ MPa}$  ( $k = 2$ ),评定的不确定度满足 GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》的要求。

且由表 1 可知:给定的标准拉伸试样的最大抗拉强度、上屈服强度、下屈服强度及规定塑性延伸强度 ( $0.2\%$ ) 的允许误差为  $\pm 15 \text{ MPa}$ ,因此,评定的测量结

果不确定度均小于允许误差,表明测试结果的分散性较小。

上述实验及结果表明:并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统方案可行,能够同时对多个微小试样进行拉伸力学性能测试,且测试结果的分散性小,可为金属材料力学拉伸性能的微型化、高通量测试提供设计参考。

## 4 结束语

笔者对并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测

试系统的结构、控制系统、控制软件进行了设计,并通过准确度评价、实验结果分析及不确定度评定,该对测试系统进行了验证。

研究表明:

(1)并联式的微小试样力学拉伸性能高通量测试系统准确度等级为0.5级;

(2)随着试样直径的减小,被测试样的强度出现了减小的趋势;评定的测试结果不确定度满足GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》的要求;

(3)测试系统的方案可行,能够同时对多个微小拉伸试样的力学性能进行测试,且测试结果的离散度较小。

笔者后续的研究方向:多物理场耦合环境下,微小试样力学性能高通量的原位表征研究;尺寸效应研究及相关性模型的建立。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王贵勇,王海舟,朱林茂,等.一种微小试样力学性能高通量测试系统及方法:中国,CN110018040A[P].2019-07-16.
- [2] 陈浩,刘方圆.一种新型小试样微拉伸试验装置及其测试方法:中国,CN110954411A[P].2020-04-03.
- [3] AKBARY F H, SANTOFIMIA M J, SIETSMA J. Elastic strain measurement of miniature tensile specimens[J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54(2):165-173
- [4] LUCAS G E, ODETTE G R, MATSUI H, et al. The role of small specimen test technology in fusion materials development[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007(367-370):

1549-1556.

- [5] 张国庆,褚金奎,高佳丽.微拉伸测试系统中PZT微驱动器的设计与实现[J].*仪表技术与传感器*, 2013(7):23-25,48.
- [6] 宿彦京,付华栋,等.中国材料基因工程研究进展[J].*金属学报*, 2020, 56(10):1313-1323.
- [7] 关洪达,李才巨,高鹏,等.材料高通量制备与表征技术研究进展[J].*稀有金属材料与工程*, 2019, 48(12):4131-4140.
- [8] 王海舟,汪洪,丁洪,等.材料的高通量制备与表征技术[J].*科技导报*, 2015, 33(10):31-49.
- [9] HECKMAN N M, IVANOFFA T A, ROACH A M, et al. Automated high-throughput tensile testing reveals stochastic process parameter sensitivity[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2020(772):1-9.
- [10] SALZBRENNNER B C, RODELASA J M, MADISON J D, et al. High-throughput stochastic tensile performance of additively manufactured stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2017(241):1-12.
- [11] 陈新,许巍,王亮.一种高通量力学试验装置:中国,CN109556944A[P].2019-04-02.
- [12] 周宇,赵东杨,张波,等.一种高通量旋转拉伸试验装置:中国,CN210166221U[P].2020-03-20.
- [13] 张东升,张水强,刘斌,等.高通量膜材料力学测试装置及方法:中国,CN106596277B[P].2020-06-30.
- [14] KACKER R N. Measurement uncertainty and its connection with true value in the GUM versus JCGM documents[J]. *Measurement*, 2018(127):525-532.
- [15] 魏明明.蒙特卡洛法与GUM评定测量不确定度对比分析[J].*电子测量与仪器学报*, 2018, 32(11):17-25.

[编辑:雷敏]

#### 本文引用格式:

王贵勇,王海舟,王蓬,等.并联式微小试样力学拉伸性能高通量测试系统[J].*机电工程*, 2022, 39(4):524-531.

WANG Gui-yong, WANG Hai-zhou, WANG Peng, et al. High-throughput testing system for mechanical tensile properties of parallel micro-specimen[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(4):524-531.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>