DOI: 10.3901/JME.2020.14.019

新型移动式热湿拉强度测试仪研制*

刘 扬¹ 鲁德才¹ 梁 博¹ 王 傲² 石德全² 李大勇²

(1. 哈尔滨理工大学荣成学院 荣成 264300;

2. 哈尔滨理工大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150080)

摘要: 热湿拉强度是表征型砂力学性能的重要指标之一, 在传统的热湿拉强度设备研究中, 设计者多数将测试仪定位在实验室检测或现场的检测, 使其无法兼顾实验室和生产现场的检测; 同时, 传统的测试仪多数存在无法实时观察型砂热湿拉强度曲线动态变化的问题, 而只能获得一个强度值, 这就使得试验者无法准确掌控整个测试过程。为此, 设计一款新型移动式热湿拉强度测试仪, 既可满足实验室检测又能适应生产现场检测, 还能实时观察热湿拉强度曲线动态变化, 具有一定意义。测试仪以 GB/T 2684—2009《铸造用砂及混料试验方法》为基准, 以型砂微变形理论为设计基础, 通过计算机、PLC、高精度步进电机、传感器、采集器等完成硬件的设计, 以 DELPHI 为编程语言完成测试界面及软件设计, 稳定的实现了对标准试样测试过程中的数据实时采集、处理及保存等功能, 并实时绘制热湿拉强度-时间-温度曲线。整体结构采用框架式, 在保障结构稳定性的同时极大程度减轻整体重量, 且测试仪底部配有万向轮便于测试人员移动。最后, 用自主研发的新型移动式热湿拉强度测试仪与某品牌测试仪进行了对比试验, 采用标准方法进行制样, 试验结果表明, 本测试仪具有较高的精确度和精密度, 且操作更加方便。

关键词: 热湿拉强度测试仪; 移动式; 实时曲线; PLC

中图分类号: TG23

Development of New Movable Hot-wet Tensile Strength Tester

LIU Yang¹ LU Decai¹ LIANG Bo¹ WANG Ao² SHI Dequan² LI Dayong²

(1. Harbin University of Science and Technology Rongcheng Campus, Rongcheng 264300;

2. Material Science and Engineering College, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Abstract: Hot-wet tensile strength is one of the important indexes to characterize the mechanical properties of molding sand. In the study of traditional hot-wet tensile strength equipment, most designers design the tester to only be used for laboratory or on the spot, so make it impossible to test both in laboratory and the production site. At the same time, most of the traditional testers cannot observe the dynamic change of the hot-wet tensile strength curve in real time, but can only obtain one strength value, which makes the tester unable to accurately control the whole testing process. Therefore, it is significant to design a new type of mobile hot-wet tensile strength tester, which can not only meet the needs of laboratory testing, but also meet the needs of production site testing, and can observe the dynamic changes of hot-wet tensile strength curve in real time. The tester is designed on the basis of GB/T 2684—2009 Test Methods for Foundry Sands and Molding Mixtures and the theory of molding sand micro deformation. The hardware is designed by PC, PLC, high precision stepping motor, sensor and collector, and the software is designed by DELPHI programming language. The tester can stably realize the functions of real-time data collection, processing and storage in the process of testing standard samples, and draw the curves of hot-wet tensile strength and temperature with time in real time. The overall structure adopts frame type, which can greatly reduce the overall weight while ensuring the stability of the structure, and the bottom of the tester is equipped with universal wheels to facilitate the movement of the tester. Finally, the new type of self-developed mobile hot-wet tensile strength tester is compared with a brand of tester, and the standard method is used for sample preparation. The test results show that the tester has high accuracy and precision, and the operation is more convenient.

Key words: hot-wet tensile strength tester; mobile type; real-time curve; PLC

* 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2018205)
和黑龙江省普通高校基本科研业务费专项(LGYC2018JC052)资助项目。
20190724 收到初稿, 20200414 收到修改稿

0 前言

湿型砂的力学性能对铸件的质量具有重要影响,精准把控湿型砂的力学性能指标是获得合格铸件当中的重要一环^[1]。因此,我国的众多研究者从20世纪70年代就开始针对湿型砂的热湿拉强度测试仪进行研发,如1965年长春市非金属材料试验机制造厂制造了国内第一台热湿拉强度测试仪^[2],该测试仪通过记录空载和负荷状态下的水银柱差值后经换算得到热湿拉强度值;2006年清华大学黄天佑等^[3-4]以气压为主要动力,以蓝牙无线通信技术为媒介研制的新型热湿拉强度测试仪,可实现试验数据的短距离实时传输,标志着测试与分析不再受空间限制;2016年无锡市三峰仪器设备有限公司薛江^[5]研制了一种智能热湿拉强度仪,其采用电机驱动代替气动液压传动,并采用上下两个加热装置对标准试样进行加热,保证加热的均匀性,进一步提升现场检测的准确性。而国外,从1961年由PATTERSON等提出型砂热湿拉强度试验的方法,到目前国外市场上存在诸多类型的热湿拉强度测试仪,让复杂多变的铸造过程变得逐步可控,明显地提升现场铸造质量的同时降低了废品率,诸如美国Dietert公司的PNZ-A(NO.780)型热湿拉强度测试仪、美国辛普森公司的型号为42104电子通用砂强机、印度VERSATILE公司的VWT型热湿拉强度测试仪、瑞士的FOUNDRY LEXICON公司的LRP型热湿拉强度测试仪、德国JUNG INSTRUMENTS公司的WJ1型热湿拉强度测试仪等^[6-10],虽然这些设备在实用性上均能满足对型砂热湿拉强度的检测,但这些设备的定位多设定在生产现场或者实验室的检测,为“定点”类型设备,无法兼顾生产现场及实验室检测。同时,国内外现有的测试仪多数存在无法实时观察型砂强度曲线动态变化的问题,而只能获得到一个强度值,这就使得试验者无法准确掌控整个测试过程^[11]。因此研制一款新型移动式热湿拉强度的测试仪对保障铸件质量、提升铸件生产成功率及同时满足生产现场和实验室检测具有重要意义,为此,本研究旨在研制一款新型移动式热湿拉强度测试仪,使测试仪具有操作简单、使用方便、人机交互性好等优点,既能快速检测湿型砂的热湿拉强度,反映湿型砂的力学性能指标,又能实时观察热湿拉强度曲线变化规律,便于调整湿型砂质量参数,同时使测试仪便于移动,满足不同场合的检测,为湿型砂质量优化控制提供可靠依据^[12],满足科研及生产需求。

1 新型移动式热湿拉强度测试仪总体结构及工作过程

新型移动式热湿拉强度测试仪的总体结构如图1所示,其采用框架式结构,在保障结构稳定性的同时极大程度减轻整体重量(全部约18 kg),同时测试仪底部配有四个万向轮便于测试人员移动,其结构主要由动力控制模块、数据采集与处理模块、试样测试模块及上位机等构成。其中动力控制模块主要为高精步进电动机、相应驱动器及微型滑移平台,可实现下拉架(带动测试标准试样)的上升及下降,并且其速度可依据实际需要进行选择,以适应不同移动速度进程中的强度的测定;数据采集及处理模块主要为计算机、PLC、传感器及串行通信接口等,可实时测定试样测试过程中的拉力、温度信号等;温度控制模块主要为加热块、热电偶及继电器等,可实现对试样的加热,温度信号的输出。此部分需特别指出,温度控制模块为单独控制模块,可依据实际需求进行选择,即本测试仪亦能测试湿型砂的湿拉强度;试样测试模块主要为上拉伸架、下拉架,可实现试样的安放、支撑与固定等作用。上位机(计算机)为主站,PLC为从站,计算机内置自主研发的可视化界面,亦是本测试仪的控制和运算中心。

图1 新型移动式热湿拉强度测试仪的总体结构

新型移动式热湿拉强度测试仪的工作过程可简要描述如下:PLC系统和数据采集模块(研华USB-4711A)在接收到上位机信息后,完成初始化及控制相应通道的开启和关闭。利用自主研发的软件控制发出相应指令,PLC控制高精步进电动机进行正、反旋转,实现微型滑移平台中的平台完成向上

或向下直线动作，进而实现试样测试模块的下拉伸架向上运动或向下运动。数据采集模块将采集到的数据信息经缓存、处理及判断后传送至上位机，并在上位机界面中以曲线和数字形式进行实时显示，其数据曲线可依据需求进行放大、缩小功能，以便于观察实时曲线规律。同时，可以借助 Windows 平台实现数据的保存、打印等命令。

2 热湿拉强度测试基本原理

热湿拉强度是衡量型砂质量水准的重要指标之一，是指模拟浇注过程中，湿型砂内的水分在浇注金属液的高温作用下，发生一定迁移，在砂型内表层形成水分凝聚区(高湿层)，即测量标准试样加热后的“高湿层”的抗拉强度。按照机械行业标准 JB/T 9227—2013^[13]需将加热块加热到 $320\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，停留在装有标准试样的标准试样筒上 20 s，测量湿型砂的热湿拉强度。加热块的实时温度信号、拉力传感器的拉力信号均被研华 USB-4711A 采集，经缓存、转化后实时显示在测试仪界面上。参照 GB/T 2684—2009^[14]中要求，标准试样筒尺寸要求为 $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ，并于高度 1/5 处沿径向开启，顶端往下至距离 4 mm 位置有 5° 倾斜角度，设计如图 2 所示的热湿拉强度标准试样筒，该试样筒与自主设计的下拉伸支架可快速配合、定位，为快速测试提供保障。

图 2 自主设计的热湿拉强度标准试样筒

3 硬件系统设计

新型移动式热湿拉强度测试仪的硬件系统结构框图如图 3 所示，主要由稳压电源、拉力传感器、温度传感器、USB-4711A、继电器、西门子 PLC-224XP 及计算机等构成。

其中西门子 PLC-224XP 通过控制一个继电器的开启和闭合实现加热块的加热和停止加热动作。为方便接线，西门子 PLC-224XP 模块输入、输出通道分别选择 M0.0、M0.1、M0.2、M0.3、M0.4、M0.5、M0.6、M0.7、M1.0 和 Q0.0、Q0.2、Q0.3 接口，其中 M0.0、M0.1 控制步进电动机起停动作，M0.2、M0.3

控制步进电动机正反转动作，M0.4、M0.5、M0.6 分别对应程序中的 3 mm/min、6 mm/min、9 mm/min 运动速度，默认为 3 mm/min，M0.7、M1.0 分别控制继电器的开启和闭合，研华 USB-4711A 输入通道分别选择 AI0、AI1 接口。

图 3 硬件系统结构框图

西门子 PLC-224XP 控制步进电动机运动的简易接线如图 4 所示，通过编程控制使 PLC-224XP 的高速脉冲端 Q0.0 向步进电动机 PUL 控制端发送脉冲，其中对脉冲周期和脉冲数进行设置，通过步进电动机驱动器的转换，由脉冲周期控制步进电动机转速，脉冲数控制步进电动机的转数。再经 PLC-224XP 的 Q0.2 端口向步进电动机驱动器的 DIR 控制端发送置位和复位指令，以达到控制步进电动机正转和反转^[15]。

图 4 西门子 PLC-224XP 控制步进电机简易接线图

4 新型移动式热湿拉强度测试仪软件设计

4.1 新型移动式热湿拉强度测试仪下位机软件设计

新型移动式湿型砂强度测试仪的下位机软件设计主要包括系统监控程序、高精步进电动机动作程序、温度控制程序及信息采集程序等构成，其所实现的程序主要流程如图 5 所示。受篇幅影响，以下主要以步进电动机正转及采集器对应拉力信号为例，做简单介绍。

高精步进电动机的正转是实现微型滑移平台上

升的决定因素,其动作控制完全有上位机进行控制。单击测试软件上的相应按钮即可实现高精步进电动机所对应的相关动作,测试软件可实现自动操作,也可以按照需求实现手动操作,高精步进电动机正转程序的流程图如图 6 所示。

图 5 主要程序流程图

图 6 高精步进电动机驱动流程图

在数据采集,系统采用的是研华生产的 USB-4711A 采集器,该采集器具有 16 路模拟量输入,12 bit 分辨率 A/D 转换器,支持 USB2.0 等诸多性能,可实现采集电压模拟量输入信号。依据实际需要,选择输入模式为电压模式,输出量程选择 0~±5 V,供电电压为 24 V 直流电源。本测试仪中拉力信号的采集,选择模拟量同步单批次采样模式,即 BufferedAiCtrl 模式,其采集流程如图 7 所示。

图 7 BufferedAiCtrl 采样流程图

4.2 新型移动式热湿拉强度测试仪上位机软件设计

上位机软件全部采用面向对象的 Delphi 语言进行编写程序,主要包括上位机与下位机的通信程序、数据处理程序以及管理下位机程序等。测试仪测试的热湿拉强度界面如图 8 所示。

图 8 测试仪界面图

上位机与下位机的通信程序主要采用了通信专用控件 MSComm 控件实现,设置其为十六进制的通信信息格式,波特率为 9 600、8 位数据位、无奇偶校验和 1 位停止位,串口接收缓冲区的字符数不小于 32 时,便产生一个串口接收事件,即在接收数据过程中产生一个 OnComm 事件,可以通过 CommEvent 属性了解通信事件类型。采集信息主要用到了研华数据采集程序包 DAQNav,同时,研华采集器可兼容众多开发软件,并可以将采集系统的

程序包以控件的形式导入到开发软件中，当中的一些控件可用 DAQVavi Wizard 设定参数，只需编写少量程序即可实现采集动作，极大程度地减少了编程难度。利用 DAQVavi Wizard 设置的模拟量同步单批次采样模式(BufferedAiCtrl)，其完成效果图如图 9 所示。

图 9 BufferedAiCtrl 设置完成效果图

数据处理程序主要包括信息采集处理程序、数据转换程序和历史数据统计分析程序等，信息采集处理程序中主要为将采集到的信息进行判别，并作为输入量进行输出；数据转换程序主要是对采集到的程序进行相应转换并进行绘制和显示，此部分依据所测数据进行相应标度变换即可求得，编写程序相对简单；而历史数据统计分析程序主要是对所获取的历史信息进行保存，以便于研发者进入后台进行观察，同时亦能作为历史记录有助于试验者分析整个过程。此部分需要特别指出，温度信号采集利用模拟量瞬时读取模式(InstantAiCtrl 控件)进行读取，读取的电压值一方面进行转化成温度值，实时显示在桌面上的热湿拉强度曲线区域及数字化区域，另一方面会对该电压值进行判断，通过 Delphi 中的 if 语句可较容易实现，若采集到的电压小于 13.081 mV，则计算机会发出特定的十六进制字符串指令，通过控件 MSComm 传送给 PLC-224XP，让加热块继续加热，若采集到的电压大于 13.833 mV，PC 会发出特定的十六进制字符串指令，通过控件 MSComm 传送给西门子 PLC-224XP，让加热块停止加热，其中，13.081 mV 与 13.833 mV 是 K 型热电偶于 320 ℃±1 ℃所对应的电压值，这样就极大限度的保证精准控制温度的目的。而其余数温度值的显示是将采集到的电压信号和 K 型热电偶的温度分度表电压值进行对比得出，借此实现数字化显示和曲线绘制。

5 模拟测试及结果分析

制取砂样时，参照机械行业标准 JB/T 9227—2013，选择 2 000 g 标准砂(内蒙古大林标准砂)与 100 g 铸造用钙基膨润土放入混砂机，干混 2 min，加水 40 mL 再混碾 8 min 后出砂，并将混制好的试验用混合料进行密封存放 10 min，之后再经 75 μm (200 目数)筛网过筛，使得制取后的型砂均匀松散、分布均匀，再选择 AFS 型标准锤击式制样机制作试样，所有试样均经过三锤紧实。按照 GB/T 2684—2009 中规定测定紧实率，试验实测混合料紧实率为 45%左右，符合试验要求，再进行测试试验。

试验地点选择实验室及车间现场，对比试验选择市场上存在的某品牌热湿拉强度测试仪，其中自主研发的新型移动式热湿拉强度测试界面实际效果如图 10 所示。随机选取同温度同批次实验室混合料及随机选取同温度同批次车间现场混合料所测量多组试验中的 9 组数据，其试验结果如表 1 所示。

图 10 测试仪测试效果图

(320.2 ℃, 2.137 kPa; 320.4 ℃, 2.156 kPa)

现以多次测量的平均值作为“真值”，进行定量分析，在实验室和车间不同温度下所得相对的误差参照表格顺序分别为：0.936、0.935、1.826、1.784、1.033、1.031、1.779、2.063，通过数据分析可得，本测试仪相对的误差均在 1.1%之内，某品牌热湿拉强度测试仪相对误差在 2.1%之内，说明自主研发的新型移动式热湿拉强度测试仪在精确度方面比某品牌热湿拉强度测试仪高。

通过所获试验数据的标准偏差及相对标准偏差分析可得，本测试仪的标准偏差和相对标准偏差在 0.030 和 1.3%之内，某品牌热湿拉强度的标准偏差和相对标准偏差在 0.055 和 2.6%之内。自主研发的热湿拉强度测试仪的标准偏差及相对标准偏差都比某品牌热湿拉强度测试仪小，说明自主研发的热湿拉强度测试仪在精密度方面比某品牌热湿拉强度测试仪高。

表 1 热湿拉强度测试结果及误差分析

序号	实验室不同室温下强度值/kPa				车间内不同温度下强度值/kPa			
	本测试仪		某测试仪		本测试仪		某测试仪	
	26.6 °C	27.3 °C	26.6 °C	27.3 °C	29.5 °C	31.4 °C	29.5 °C	31.4 °C
1	2.137	2.127	2.07	2.19	2.142	2.109	2.15	2.19
2	2.156	2.169	2.17	2.16	2.146	2.096	2.11	2.07
3	2.175	2.166	2.18	2.13	2.098	2.134	2.03	2.13
4	2.123	2.113	2.15	2.12	2.166	2.153	2.19	2.17
5	2.119	2.123	2.12	2.08	2.145	2.161	2.20	2.19
6	2.169	2.156	2.16	2.13	2.107	2.097	2.12	2.12
7	2.106	2.159	2.04	2.16	2.121	2.138	2.14	2.11
8	2.118	2.119	2.16	2.18	2.097	2.148	2.11	2.04
9	2.125	2.129	2.17	2.02	2.149	2.162	2.17	2.18
平均值	2.136	2.140	2.136	2.130	2.130	2.133	2.136	2.133
标准偏差	0.025	0.022	0.049	0.053	0.025	0.026	0.051	0.054
相对标准偏差 (%)	1.170	1.028	2.294	2.488	1.174	1.219	2.388	2.532

6 结论

新型移动式热湿拉强度测试仪既有 PLC 的编程灵活性和抗干扰性强等特点, 又发挥了上位机强大的计算、运算能力和良好人机交互等优点。结构优化使得整体重量降低, 适合实验室及生产现场检测, 测试界面简洁明了易于接受。通过与某品牌热湿拉强度测试仪在不同试验环境下, 采用同批次混料型砂做对比试验说明, 自主研发的新型移动式热湿拉强度测试仪在精确度、精密度上均可靠。

参 考 文 献

- [1] 石德全, 李大勇, 董静薇, 等. 湿型砂质量参数智能测试车的研制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 194-197.
SHI Dequan, LI Dayong, DONG Jingwei, et al. Development of an intelligent apparatus of testing the quality parameters of green sand[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 194-197.
- [2] 长春市非金属材料试验机制造厂. 型砂受热湿拉强度试验仪[J]. 铸造, 1966 (10): 28-29.
Changchun Nonmetal Material Testing Machine Factory. Hot-wet tensile strength tester for molding sand[J]. Casting and Forging Machinery Communication, 1966(10): 28-29.
- [3] 黄天佑, 金宏伟, 胡永沂, 等. 用于测定黏土湿型砂的气动热湿拉强度测试仪: 中国, 200520113536. 0[P].

2006-11-15.

- HUANG Tianyou, JIN Hongwei, HU Yongyi, et al. Pneumatic thermohygroscopic strength tester for measuring clay wet sand: China, 200520113536. 0[P]. 2006-11-15.
- [4] 金宏伟, 李华, 黄天佑, 等. 新型湿型砂热湿拉强度测试仪的研制[J]. 铸造, 2006, 55(8): 825-827.
JIN Hongwei, LI Hua, HUANG Tianyou, et al. New-type apparatus for the measurement of wet tensile strength of green sand[J]. Foundry, 2006, 55(8): 825-827.
- [5] 薛江. 一种智能热湿拉强度仪: 中国, 201610607915.8[P]. 2016-12-21.
XUE Jiang. An intelligent hot-wet tensile strength meter: China, 201610607915. 8[P]. 2016-12-21.
- [6] MELINDA E G. Critical assessment of current metalcasting green sand system control and monitoring processes[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2009.
- [7] NING L, BAILIN W, CHEE P T. Tensile strength characteristics of unsaturated sands[J]. American Society of Civil Engineers, 2007, 133(2): 139-146.
- [8] SAM R, MO K, KALAMAZOO, et al. Dynamic testing of green sand[J]. Modern Casting, 2015, 9(15): 91-96.
- [9] RAMANA M V, RAO S V, PRASAD N L. Parametric optimization of green sand moulding process based on wet tensile strength: A full factorial experimental approach[J]. International Journal of Engineering and Research & Technology, 2013, 2(12): 2544-2548.
- [10] DAS B M, YEN S C, DASS R N. Brazilian tensile strength test of lightly cemented sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(1): 167-171.
- [11] KUMAR P, NAGARAJAN K, STALLON D S. Embedded based system for testing tensile strength of foundry sand[J]. Materials Science Forum, 2018, 3(6): 168-171.
- [12] ATTILA D, VASILE L D, ANDERS E W. New possibilities with improved green sand testing equipment[J]. International Journal of Engineering Sciences & Research, 2018, 925(6): 504-511.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 9227—2013. 铸造用膨润土[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. JB/T 9227—2013. Bentonite for foundry[S]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2684—2009. 铸造用砂及混料试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 2684—2009. Test methods for foundry sands and molding mixtures[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.

- [15] 雷大军. 基于可编程控制器的步进电机控制[J]. 电子测试, 2016, 19(8): 20-21.

LEI Dajun. The control about step motor based on PLC[J]. Electronic Test, 2016, 19(8): 20-21.

作者简介: 刘扬, 女, 1986 年出生, 讲师。主要研究方向为计算机智能信息处理。

E-mail: 382252642@qq.com

鲁德才(通信作者), 男, 1988 年出生。主要研究方向为铸造过程快速检测技术。

E-mail: hlgldc@163.com