

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.03.020

面向精密分析仪器的加热炉体温度场分布特征研究*

石守娟 吴国新

(北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

摘要:热分析仪属于精密分析仪器,需要具有较高的测试分析性能要求,对热分析仪器炉体温度场分布特征的研究是实现其精密计量分析的必要前提条件。传统的炉体由于气流对温度分布的影响,容易产生测量误差。对炉体结构进行适当调整,可提高仪器的分析精度,改变其温漂特性。建立了炉体三维优化分布模型,应用有限元分析软件中的热分析模块对温度场进行分析。通过对热分析仪器的热力学分析、传热方式研究、不同进气流量下的炉腔温度场分析,阐述了热分析炉体温度场分布与气氛流量、炉体方向等之间的热传导关系。这一分析方法和理论结果可作为热分析仪器炉体温度场、炉内均温区分布情况的参考,为仪器的温度测量的可靠性、准确性、热分析仪的温度控制等研究提供依据。

关键词:精密仪器;炉体改造;提高精度;温度场分布;理论分析。

中图分类号: TH831 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Study on distribution characteristics of temperature field of furnace body for precision analysis equipment

Shi Shoujuan Wu Guoxin

(Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology ministry of Modern Education
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Thermal analysis instruments usually have high performance requirements, and the study of the temperature field distribution of the furnace is the prerequisite for the realization of precise econometric analysis. Due to the influence of air flow on the temperature distribution, the traditional furnace is prone to measurement error. Adjusting the mechanical structure of furnace can improve the accuracy of the equipment and change its temperature drift characteristics. In this paper, a three-dimensional optimal distribution model of furnace body is established. And the finite element analysis software is used to analyze the temperature field. In this paper, with the analysis of thermodynamics, heat transfer methods, temperature field distribution under different inlet flow, the relationship between the temperature field distribution of the furnace and the gas flow, and the direction of the furnace is described. It provides a theoretical basis for improving the accuracy of temperature control of the thermal analysis instrument. The analysis method and theoretical results can be used as a reference for distribution of thermal analysis instrument furnace temperature field and uniform temperature region in the furnace. And then it provides the basis for the research of the temperature control of the thermal analyzer. And it can lay a foundation for improving the repeat ability, accuracy and stability of the thermal analysis instrument.

Keywords: precision equipment; furnace transformation; improving accuracy; temperature field distribution; theoretical analysis

1 引言

其功能是在程序控制温度下,测量物质与参比物之间单位时间的能量差(或功率差)随温度变化的一种技术,是研究各种聚合物、药物、矿物等化学制品在加热和冷却的过程中发生的物理反应和化学变化的重要途径。跟其他

差示扫描量热仪(DSC)是一种常见的热分析仪器,

收稿日期:2017-01 Received Date: 2017-01

* 基金项目:国家高技术研究发展计划(2015AA043702)、北京市属高等学校青年拔尖人才培养计划(CIT&TCD201404120)、北京市优秀人才培养资助D类项目(2013D005007000009)、北京市重点实验室开放项目(KF20161123201)、北京市重点实验室开放课题(KF20161123202)资助项目

的热分析方法相比,它所需样本少、分析速度快、有很宽广的温度测量范围、有非常优良的定量计算分析能力,通过此方法设计制造的差示扫描量热仪是应用最广泛的热分析仪器之一。

它的工作原理是将试样和参比物处在一定速率加热或冷却的相同温度状态环境中,记录下试样和参比物之间建立零温差时所需要的能量^[1]。差示扫描量热仪的炉体为试样和参比物提供稳定的升温、保温和降温环境,炉体由热流传感器、匀热炉膛、隔热保温件等部分组成^[2]。其中炉膛反应室的材料、体积、形状、结构等因素对炉体的温度均匀分布情况有很大的影响。而提高热分析仪器重复性、精确性和稳定性的重要途径就是提高仪器对温度控制的精度,这往往是国内各热分析仪器厂家技术研发的重点所在,也是制约国内热分析仪器研发的关键问题之一。

热分析仪器内均温区的分布情况是影响仪器测量准确性的关键因素,是衡量热分析仪器性能的重要指标之一,因此对加热炉内的温度场分析尤为重要。欲精确地进行试样及参比物加热后的特性分析,首先要能在样品加热区有稳定的温度场^[3-6]。

在对加热炉升温试验时发现,加热炉内均温区经常发生改变。考虑到温度场各位置温度变化及温度梯度等对精密仪器使用精度的影响^[7-8],在炉体的结构上,进行了机械结构方面的优化设计。通过改造炉体,研究温度场分布特征等方式,保证了热分析仪器的精度和稳定性,适用性强且易于实现。

不同的实验条件对温度场分布有很大影响,因此研究不同升温速率、气氛条件下的温度场意义重大。结合以上分析,针对现有实验设备 DSC-100 差示扫描量热仪,进行结构改进,并提供此改进下的一种理想的实验条件。

再利用软件分析,对加热炉的温度场进行仿真计算,为差示扫描量热仪加热炉的炉膛均温区设计提供理论参考。较为合理的处理了功能参数的温漂故障影响因素。

2 热分析仪炉体三维优化方案

2.1 传统炉体结构介绍

如图 1 所示,传统的外加热式炉体结构由外盖、内盖、铂盖分为 3 层,内层是一个耐火陶瓷炉芯管材,周围螺旋状采用埋入式缠绕铂铑丝。试样和参比物在炉芯中央,加热后产生的吸收和放出的热量由热电偶传感器测量输出。绝缘层和中间层由保护性石棉填充,绝缘层和外层之间充满着不断流动的冷却气体,可以给炉体降温。炉芯中需要充入不同的加热气氛来满足不同试样的保护条件,满足试验情况的重复性和多样性,这些功能由气氛填充管路来实现。炉体底部布置了水冷却机构,环绕在

炉体底部的冷却水能有效控制炉芯底部由于加热变形而影响的采样精度。

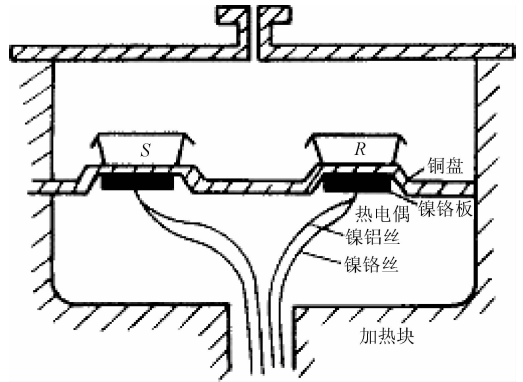


图 1 加热炉腔结构

Fig. 1 Schematic diagram of heating furnace cavity

2.2 炉体结构优化

当采用不同的升温速率对炉体进行升温试验时发现,传统炉体在升温空白曲线线性良好的情况下,均温区温度飘移程度比较大,炉体内部均温区上下区间存在温度误差,均温区上部与下部的温度分布呈现交替变化,这样的情况会影响仪器的分析精度,增大试验误差^[8-16]。

为了提高仪器的分析精度,改变其温飘特性,可以对炉体结构进行适当调整,改变炉体内部的热传导方式,使其能更好地满足试验要求。根据热传导理论分析,如果将炉体安装方式改成横置安装,就可以降低炉体内部由于加热后的保护气氛的对流而对炉膛均温区的影响,减少其测量误差。参照现有的实验设备 DSC-100 差示扫描量热仪,对加热炉体进行结构上的优化设计,使其满足横置安装要求,最终确定炉长 70 mm,椭圆形弧度半径 350 mm,炉体最小直径部分 12 mm。优化后的炉体结构如图 2 所示。

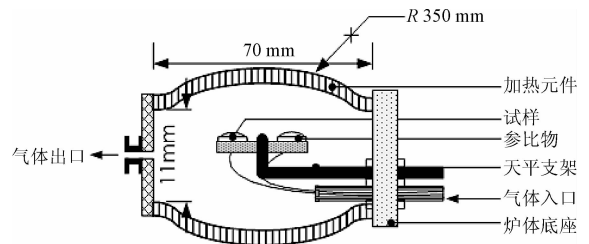


图 2 炉体优化结构

Fig. 2 Optimization structure of furnace body

2.3 炉体模型

试样和参比物的温度主要由加热元件的热辐射所提供的热量来控制,而由气体入口通入的保护气体在炉腔内形成湍流,会影响到炉腔内温度场的分布。为了研究气氛与炉壁之间发生的共轭传热过程,需要建立炉体模

型,在建模时根据经验将模型做一些简化,如图3所示。

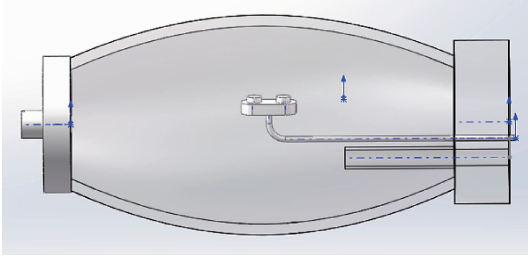


图3 炉体模型

Fig.3 The model of furnace body

3 炉膛传热方式分析

3.1 热力学分析原理

热力学分析的目的就是计算模型内的温度场分布以及热梯度、热流密度等物理量。热载荷包括热源、热对流、热辐射、热流量、外部温度场等。ANSYS Workbench 可以进行两种热分析,即稳态热分析和瞬态热分析^[17]。

稳态热力学分析一般方程为:

$$[K]\{I\} = \{Q\}$$

式中:[K]是传导矩阵,包括热系数、对流系数及辐射系数和形状系数;{I}是节点温度向量;{Q}是节点热流向量,包含热生成。

瞬态热力学分析一般方程为:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\}$$

式中:[K]是传导矩阵,包括热系数、对流系数及辐射系数和形状系数;[C]是比热矩阵,考虑系统内能的增加;{T}是节点温度向量;{\dot{T}}是节点温度对时间的导数;{Q}是节点热流向量,包含热生成。

基本传热方式有热传导、热对流及热辐射3种。从热分析仪器的的工作环境分析,在对试样进行加热时,考虑到通入保护气体的情况,其热传递方式主要为对流和辐射。采用通过分析加热炉内的对流和辐射情况进行温度场分析研究。

热对流满足牛顿冷却方程:

$$q'' = h(T_s - T_b)$$

式中:h是对流换热系数(或称膜系数), T_s 是固体表面温度, T_b 是周围流体温度。

在工程中通常考虑两个或者多个物体之间的辐射,系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可用斯蒂芬玻尔兹曼方程来计算:

$$q = \varepsilon\sigma A_1 F_{12}(T_1^4 - T_2^4)$$

式中:q为热流率, ε 为辐射率(黑度), σ 为黑体辐射常数, $\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A_1 为辐射面1的面积; F_{12} 为由辐射面1到辐射面2的形状系数; T_1 为辐射

面1的绝对温度; T_2 为辐射面2的绝对温度。

从热辐射的方程可知,如果分析包括热辐射,则分析为高度非线性。

3.2 保护气氛流动传热分析

为了保证炉膛加热室中试样与参比物能在稳定的环境中进行试验,在试验的过程中需要不断向加热室中通入保护气体。气体给加热室提供了对流的环境,保护气体在炉体加热室内的流动及传热过程可以用 $k \sim \varepsilon$ 湍流模型来描述。强湍流传热是流动的保护气体主要进行的传热方式,而辐射传热是炉膛给试样和参比物加热的主要方式,可以以下几个控制方程来描述这一过程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

湍流动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) + \rho g_i \quad (2)$$

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_i) + \frac{\partial m_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\text{湍流能量守恒方程: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho u H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_i}{C_p} \nabla H \right) + S_h \quad (4)$$

式中: ρ 为密度,单位 kg/m^3 ; t 为时间,单位 s ; u 为层流粘性系数; x 为直角坐标系坐标; τ_{ij} 为粘性应力,单位是 N/m^2 ; P 为压力,单位 Pa ; g 为重力加速度; m_i 为组分 i 的质量分数; H 为总焓,单位是 J/kg ; C_p 为比热,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; S_h 为源项; k_i 为湍流导热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

根据上面的公式可以比较准确地计算出共轭传热影响下的加热炉体的整个温度场^[18]。

4 温度场分布仿真

有限元法是一种高效能、常用的计算方法,有限元法在早期是以变分原理为基础发展起来的,所以它广泛地应用于拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中(这类场与泛函的极限问题有紧密的联系)。采用有限元法对温度场进行仿真是可行的,并且仿真结果准确有效^[19-22]。因此将采用有限元法对炉体内的温度场的分布状况进行仿真研究。

通过 Solidworks 与 ANSYS Workbench 的无缝接口导入优化后的炉体模型,并在 workbench 中对实体用六面体单元进行网格划分,对结构局部区域进行网格加密处理,以保证湍流分析的精度和准确性。并且可以使用较少的单元数量进行求解减小计算的误差。网格模型如图

4 所示。

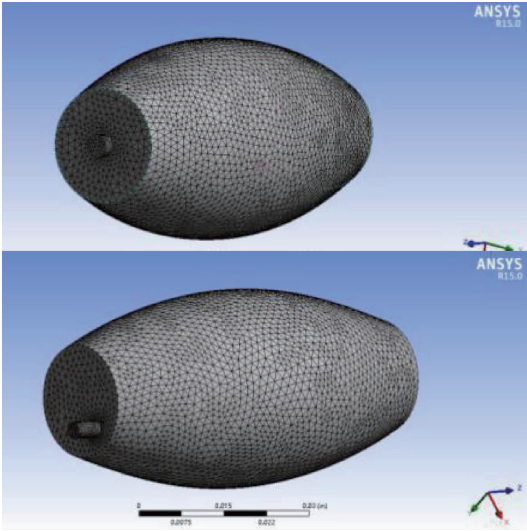


图 4 炉体网格模型

Fig.4 The model of furnace body network

方程初始条件与边界条件的设定步骤如下：

1) 视炉膛底部及炉盖进行低换热系数的对流换热, 对流换热系数 α 根据经验设置为 $1.2(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ 。

2) 设定炉壁为热源, 热源向周围环境瞬时传热, 温度由室温升高到 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$, 升温速率为 $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$, 取 400 、 800 、 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 时的温度场进行分析。

3) 设定由炉底面偏心孔进气, 进气口气氛流量分别为 1 、 2 、 3 、 $4\ \text{mm}/\text{s}$, 进口温度为室温 $25\ ^\circ\text{C}$, 气氛为氮气, 炉盖中心孔为出气孔。

结合给出的模型, 计算分析热分析仪在不同进气流量、不同温度下的温度场分布。

进气流量的大小对炉腔对流传热及气氛的湍流形貌有很大的影响, 进而影响炉腔温度场的分布。本文研究了改进结构后, 分析仪炉腔从室温加热到 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 的过程中, 不同进气流量下的炉腔温度场特性如表 1 所示。其中加热温度为 $400\ ^\circ\text{C}$ 时, 4 种不同进气流量下的温度场分布如图 5 所示。

表 1 温度与均温区特性关系

Table 1 Relationship between temperature and equal-temperature area characteristics

温度值/ $^\circ\text{C}$	400				800				1 200			
流量/ $\text{ml} \cdot \text{s}$	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
均温区特性	较差	优秀	良好	良好	优秀	良好	较差	优秀	良好	良好	较差	优秀

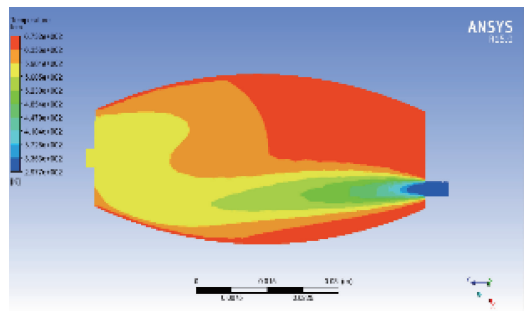
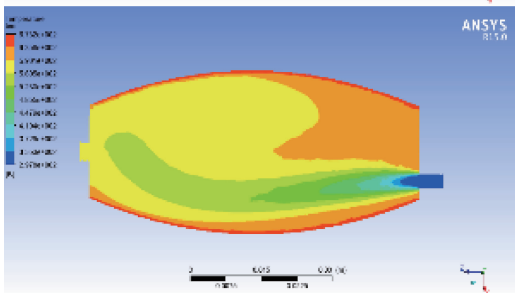
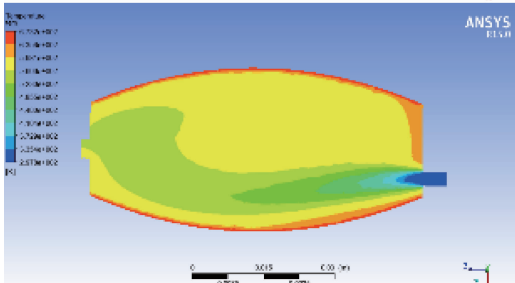
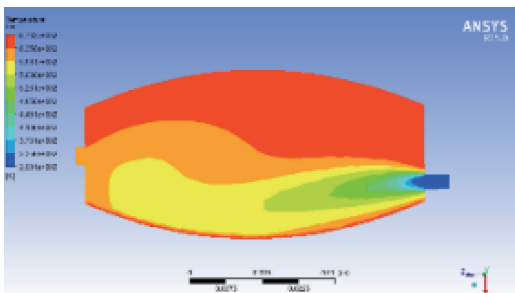


图 5 不同进气流量下温度场

Fig.5 The temperature field under different inlet flow

由图中可以看出当温度为 $400\ ^\circ\text{C}$, 进气流量在 2 、 $3\ \text{mm}/\text{s}$ 时, 试样和参比物所在区域温度场比较稳定, 可以看作均温区域。气体在进加热炉腔预热的过程中, 在贴壁面的地方由于有流体的粘滞力, 在热对流过程中温度略低于炉壁温度。气体会在炉腔中心形成涡流区, 最后再从炉盖中心孔出来, 与周围空气紊流换热, 这部分并不会对中心加热区域造成太大的影响, 整个温度场呈现一定的温度梯度分布。

图 6 所示为温度为 800 和 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 时, 不同气体流量下的温度场分布图。综合几种加热温度, 可以看出随着温度的升高, 炉腔内温度梯度明显增大, 如表 1 所示。

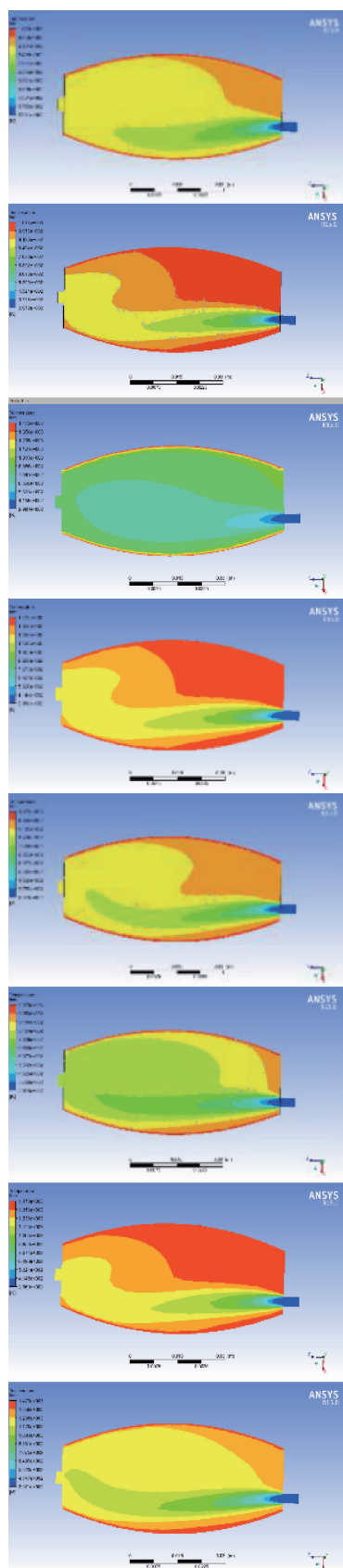


图6 温度场分布

Fig. 6 The distribution of temperature field

不同进气流量会影响炉腔的对流和湍流情况,热源的温度也对气体的形貌有较大的影响。总结温度与炉体均温性特性关系,如表1。由本文分析的炉腔温度场分布来看,与进气流量在3 mm/s时,加热过程中,均温区温度性由良好变为较差。因中心有效加热区域的湍流较大,温度场不稳定,温度梯度大,温度分布范围分散,进而会增加样品和参比物的温度差异,影响对比结果。因此,在对试样进行试验,由室温加热到1 200 °C过程中,可以控制进气流量在低温时为2 mm/s。考虑到进气流量过小不能很好地为试样和参比物提供稳定的保护环境,也会影响测量结果,可以加热到400 °C左右时,改为4 mm/s的进气流量。由此保证整个加热过程中实验区的均温性。

5 结 论

结合多次实验总结发现,炉腔内的温度分布情况受到加热炉丝的均匀性,壁厚情况,样品到炉壁的距离,进气流量,升温速率等因素的影响。本文假设其他实验条件理想,并对炉体结构进行了改造,研究加热温度从室温升到1 200 °C过程,理论分析发现此实验条件下的最佳进气流量为2、4 mm/s。采用有限元进行热分析可降低设计开发成本,减少试验次数,缩短开发周期,提高产品质量,为DSC的优化设计提供依据,具有良好的实际意义。

参考文献

- [1] 胡中权,高锦宏,徐小力. 智能化差示扫描量热仪系统研究[J]. 电子技术,2008, 45(4):19-22.
HU ZH Q, GAO J H, XU X L. Intelligent differential scanning calorimeter system research [J]. Electronic Technology, 2008, 45(4):19-22.
- [2] 唐亨,滕召胜,黄强,等. 脉宽调制式电子分析天平的漂移补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报,2014, 35(11):2466-2472.
TANG X, TENG ZH SH, HUANG Q, et al. Study on drift compensation method of PWM electronic analytical balance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11):2466-2472.
- [3] 黄强,滕召胜,唐亨,等. 电子分析天平温度漂移的加权融合补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(8):1121-1129.
HUANG Q, TENG ZH SH, TANG X, et al. The weighted fusion balance temperature drift compensation method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1121-1129.
- [4] 王家龙,骆东森,姜著成. 我国热分析仪的现状和发展[J]. 中国仪器仪表,2008(10):28-30.

- WANG J L, LUO D M, JIANG Zh CH. The status and development of chinese thermal analysis instrument [J]. China Instrument, 2008(10):28-30.
- [5] 张美玲,孙元雪,闫立东. 热分析技术的应用[J]. 化工中间体,2012(2):54-56.
- ZHANG M L, SUN Y X, YAN L D. The application of thermal analysis techniques[J]. Chemical Intermediate, 2012(2):54-56.
- [6] 王岩,况军. 热分析技术的发展现状及其在稀土功能材料中的应用[J]. 金属功能材料,2014(4):43-46,56.
- WANG Y, KUANG J. Development of thermal analysis technology and its application in rare earth functional materials [J]. Metal Functional Materials, 2014(4):43-46,56.
- [7] 黄张洪,赵惠,吕利强,等. 热分析技术及其应用[J]. 热加工工艺,2010,39(7):19-26.
- HUANG ZH H, ZHAO H, LV L Q, et al. Thermal analysis technology and its application [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(7):19-26.
- [8] 钟洪钧,胡运发. 虚拟仪表综合热分析仪[J]. 计算机工程,2007,33(5):234-236.
- ZHONG H J, HU Y F. Virtual instrument integrated thermal analyzer [J]. Computer Engineering, 2007, 33(5):234-236.
- [9] 陈联群,曾红梅,蒋杰,等. 温度对CDR-1型差动热分析仪仪器常数的影响[J]. 现代仪器,2007,13(2):30-33.
- CHEN L Q, ZENG H M, JIANG J, et al. Effect of temperature on the constant of CDR-1 dynamic differential thermal analyzer instrument [J]. Modern Instruments, 2007, 13(2):30-33.
- [10] 任婉婷,王颖. 功率补偿式DSC曲线的理论分析[J]. 纺织学报,2010,31(1):11-18.
- REN W T, WANG Y. Analysis of power compensation DSC curve theory [J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(1):11-18.
- [11] 徐阳,傅燕翔,王龙. 差示扫描量热仪校准方法[J]. 计量与测试技术,2012,39(8):14,16.
- XU Y, FU Y X, WANG L. Calibration method of differential scanning calorimeter [J]. Metrology and Testing Technology, 2012, 39(8):14,16.
- [12] 吴国新,徐小力,时延辉,等. 基于TRIZ理论的热分析仪加热炉体设计[J]. 北京信息科技大学学报:自然科学版,2010,25(3):65-70.
- WU G X, XU X L, SHI Y H, et al. Heating furnace design for the thermal analysis in strum based on TRIZ theory [J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University: Natural Science Edition, 2010, 25(3):65-70.
- [13] 杨维祯,郭颖,王雪峰,等. 基于TI杯电子竞技的金属探测系统设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(2):54-57.
- YANG W Y, GUO Y, WANG X F, et al. Design of metal detection system based on TI cup electronic competition [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(2):54-57.
- [14] 梅新勇,高锦宏,徐小力. 对传统差示热分析仪(DSC)的改进方法[J]. 北京机械工业学院学报,2005,20(3):35-37.
- MEI X Y, GAO J H, XU X L. On high, the traditional differential thermal analyzer (DSC) method [J]. Journal of Beijing Insititute of Machinery Industry, 2005, 20(3):35-37.
- [15] 黄强,滕召胜,唐享,等. 电磁力平衡传感器非线性的温度影响与补偿[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1415-1423.
- HUANG Q, TENG ZH SH, TANG X, et al. The influence of temperature on electromagnetic force balance sensor nonlinear compensation and instrument [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6):1415-1423.
- [16] 阚哲,孟国营,王晓蕾,等. 基于遗传算法的炉膛温度场重建算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(10):1149-1154.
- KAN ZH, MENG G Y, WANG X L, et al. Research of boiler temperature field reconstruction algorithm based on genetic algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10):1149-1154.
- [17] 浦广益. ANSYS Workbench 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010:89-90.
- PU G Y. Basic Tutorial with Detailed Examples of ANSYS Workbench [M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press,2010:89-90.
- [18] 王晓娜,曾颖,张炜,等. 差示扫描量热仪炉膛温度场仿真研究[J]. 计算机与应用化学,2014,31(5):551-554.
- WANG X N, ZENG Y, ZHANG W, et al. Simulation of the temperature field in the furnace of differential scanning calorimeter [J]. Computer and Applied Chemistry, 2014, 31(5):551-554.
- [19] 廖宁波,周静雷. 基于ANSYS Workbench的微型扬声器振膜的有限元分析[J]. 电子测量技术,2014,37(9):45-49.
- LIAO N B, ZHOU J L. Finite element analysis of diaphragm for micro loudspeaker based on ANSYS

- Workbench [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(9):45-49.
- [20] 刘润,李海兵,王姝歆. 高精度石英挠性加速度计的温度场分析[J]. 电子测量技术,2015,38(2):6-9.
LIU R, LI H B, WANG SH X. Temperature field analysis of high precision Quartz flexible accelerometer [J]. Electronic Measurement Technology 2015, 38(2): 6-9.
- [21] 何子路,卜雄洙,于靖. 干式离合器钢片摩擦传热的有限元分析[J]. 国外电子测量技术,2016,35(11):32-35.
HE Z L, BO X ZH, YU J. Finite element analysis of dry clutch sheet steels friction and heat transfer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(11): 32-35.
- [22] 马占龙,王高文,张健,等. 基于有限元及神经网络的磨削温度仿真预测[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(11):1080-1085.
MA ZH L, WANG G W, ZHANG J, et al. Simulation and forecast of the grinding temperature based on finite element and neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27 (11): 1080-1085.

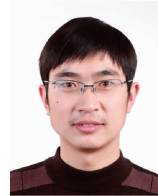
作者简介



石守娟,1990年出生,2014年于北华航天工业学院获得学士学位,现北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室研究生,主要研究方向为机电一体化技术。

E-mail:ssjyoujian@163.com

Shi Shoujuan was born in 1990, received B. Sc. from North China Institute of Aerospace Engineering in 2014. She is now a M. Sc. candidate in the Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology of the Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University. Her main research direction is mechanical and electrical integration technology.



吴国新,1977年出生,2000年于北京机械工业学院获得学士学位,2003年于北京机械工业学院获得硕士学位,2011年于北京理工大学获得博士学位,现为北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室研究员,主要研究方向为机电一体化技术。

E-mail:wgx1977@bistu.edu.cn

Wu Guoxin was born in 1977, received B. Sc. from Beijing Institute of Machinery Industry in 2000, M. Sc. from Beijing Institute of Machinery Industry in 2003, and Ph. D. from Beijing Institute of Technology in 2011, respectively. He is currently a researcher in the Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology of Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University. His main research direction is mechanical and electrical integration technology.