# 大负载高温变率高低温试验系统

# 马平昌,高飞,刘洁,刘玥,李红

(北京强度环境研究所,北京 100076)

摘要:目的 研制一种闭合循环单回路方式的大负载高温变率高低温试验系统,并介绍其设计思路和关键技术,其有效负载高达 1.0 t (铝),温变率最高可达 5 ℃/min 以满足产品的实测需求。方法 针对大负载高温 变率的要求,对加热制冷的方式以及功率进行设计;针对试验系统试验舱大空间、大负载等特点所造成的 空间温度梯度大,波动剧烈的难点,对各个系统进行协调设计,特别提出低温系统的引射雾化设计以及温 度积分分离的控制策略等创新点。结果 高低温试验系统工作区的温度在升温阶段实现了较好的温度变化跟 随性,在稳定阶段具有较好的空间均匀性和波动性,工作区各点温度均匀性≤2 ℃,温度波动度性≤±0.5 ℃。 结论 采用闭合循环单回路方式,并通过低温系统的引射雾化设计以及温度积分分离的控制策略,可以实现 大负载高温变率高低温试验系统的空间均匀性和波动性以及温变跟随性的要求。 关键词:高低温试验系统;大负载;高温变率;大空间;引射雾化;积分分离控制策略 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.07.005

中图分类号: TJ01 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)07-0020-05

# High-and-Low Temperature Testing System with Characteristics of Large Load and High Temperature Change Rate

*MA Ping-chang, GAO Fei, LIU Jie, LIU Yue, LI Hong* (Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** Objective To develop a high-and-low temperature testing system with characteristics of large load and high temperature change rate, and introduce its key technologies and design thoughts. Its payload was up to 1.0 t (aluminum) and the temperature change rate was up to 5 °C/min to meet the requirement on actual measurement. Methods In order to satisfy requirements of the large load and high temperature change rate, the heating and refrigeration methods and power were designed. Because of characteristics of large space and large load in test zone, the space temperature gradient would be large and temperature would fluctuate dramatically. In view of these difficulties, coordinated design of each system was done. Especially, the design of ejector atomization in low temperature system and temperature integral separation control strategy were put forward. **Results** The temperature in test zone achieved a better follow in the temperature change stage and it has good spatial uniformity and volatility in the stable stage. Temperature uniformity in space was less than or equal to 2 °C, and volatility was less than or equal to  $\pm 0.5$  °C. **Conclusion** By using the closed single loop mode, and through design of ejection atomization and the control strategy of temperature integral separation, the space uniformity and fluctuation of the high-and-low temperature testing system and the requirement of temperature variation can be realized.

**KEY WORDS:** high-and-low temperature testing system; large load; high temperature change rate; large space; ejector atomization; integral separation control strategy 在环境试验中,温度是引起产品失效的重要因素 之一,高低温环境导致产品热胀冷缩、性能发生变化, 并且影响产品的寿命。随着温度的变化,产品失效的 各种过程会发生剧烈的变化<sup>[1]</sup>。温度试验箱/舱是人工 模拟环境试验中使用时间最长、用量最大的一种设 备,航空、航天、兵器、电子很多产品均需要在其环 境内进行性能检测试验<sup>[2-3]</sup>,此外温度环境也是其他 综合试验的基本环境<sup>[4-5]</sup>。随着各类武器装备的发展, 各类产品装备使用的环境越来越严苛,所以装备环境 适应性的试验需求急剧增大,试验方对温度环境试验 系统的空间和性能也提出了更高的要求<sup>[6-8]</sup>。目前的 环境试验设备在大温变率过程中,温度的非线性现 象明显,试验区均匀性较差<sup>[9]</sup>,而对于大空间环境 试验设备满足其内部的温度均匀度是非常大的技术 难题<sup>[10-11]</sup>。

为了满足航空、航天、兵器等产品的试验,并且 考虑到相关产品的外形特点,建设了一套大负载高温 变率细长型非标高低温试验系统。其环境温变率最高 可达 5℃/min,以满足产品实测环境温变率,并保证 高低温试验系统的有效工作区温度在升降温阶段能 实现较好的温度变化跟随性,在稳定阶段具有较好的 空间均匀性和波动性。

### 1 试验系统基本要求

试验系统基本要求如下:有效工作区的温度范 围为 5~50 ℃;有效负载为 1.0 t ( 铝 );有效工作区 的环境温变率为 5 ℃/min;有效工作区的温度均匀 度:  $\leq 2$  ℃ ( 稳定时 );有效工作区的温度波动度为 ±1 ℃;试验舱入口温度限制为-40~85 ℃;试验舱有 效工作区尺寸为  $\phi$ 1600 mm × 2500 mm;试验舱压力 为常压。

大负载高温变率高低温试验系统相对于传统的 温箱,对加热制冷方式提出了更高的要求。由于舱体 高度方向尺寸较大,如何保证其有效工作区的温度均 匀度以及波动度成为设计的难点。

# 2 主要结构及工作原理

高低温试验系统是采用对流换热的方式提供所 需要的试验温度环境,为实现高低温试验系统具有大 负载高温变率的能力,试验系统采用大功率风道式的 电阻加热方式以及液氮雾化制冷方式。高低温试验系 统主要由加热系统、制冷系统、送风系统、试验舱、 控制系统等组成,系统原理如图1所示。高低温系统 采用闭合循环单回路方式,采用闭合循环回路充分利 用试验舱出口回气温度,有利于节省功率,采用单回 路方式将加热系统与制冷系统集成在同一主回路有 利于实现冷热平衡温度控制。



#### 2.1 加热系统

加热系统主要由大功率风道式电阻式加热器组成,考虑到有效工作区的温度范围为 5~50 ℃,所以 采用不锈钢式的 U 型加热管,在风道内均匀布置, 并可达到扰流的作用,使加热器与循环气流的换热更 加充分。由于系统要求大负载、高温升率,因此加热 器的功率选择至关重要。设计考虑舱内空气的升温功 率 *Q*<sub>x</sub>、系统负载升温功率 *Q*<sub>g</sub>、试验负载升温功率 *Q*<sub>d</sub> 以及系统漏热功率 *Q*<sub>L</sub>,考虑一定的设计余量,最终 选择电加热器的电功率为 500 kW。

各负载升温功率计算公式为:

$$Q = cm \frac{dT}{dt}$$
式中: c 为定压比热容, J/(kg·K); m 为负载质量,

kg;  $\frac{dT}{dt}$ 为相应的温升率,  $C/s_{\circ}$ 

漏热功率计算公式为:

 $Q_{\rm L} = KA\Delta T$ 

式中: K 为等效传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K); A 为漏热 面积 m<sup>2</sup>;  $\Delta T$  为试验舱内部与外界环境的温差, ℃。

#### 2.2 制冷系统

为满足大负载、大降温率的设计要求,制冷系统 主要利用液氮的汽化潜热进行制冷,将液氮通入主管 路发生汽化,进行制冷。通过调节液氮管路上的低温 流量调节阀来控制喷入主管路中的液氮量,从而控制 相应的制冷功率。

由于液氮汽化膨胀会使送风管路内的局部压力 升高,造成喷出液氮不连续,这样会导致降温时温度 波动较大,且会产生较大的温度超调,难以控制。在 液氮输送管末端设计雾化装置,其原理如图 2a 所示。 雾化装置使高压液氮雾化形成高速喷雾,其喷射方向 顺着气流方向,高速喷雾对周围高温气流进行引射, 促进液氮与气流的混合接触,从而充分利用液氮的汽 化潜热,混合气流经过一定长度的混合装置,形成温 度较为均匀的低温气体,经主管路送入试验舱。利用 引射原理与雾化器雾化的共同作用,使液氮连续进入 循环风道中,从而改善了低温系统的控制环境。实际 液氮雾化装置效果如图 2b 所示。



图 2 液氮雾化装置

#### 2.3 送风系统

送风系统采用离心风机进行循环供气,试验舱采 用上进下回的气流方式建立有效的试验环境。离心风 机前方设置流量调节阀,根据试验舱内负载的大小对 供气流量进行调节。试验舱进气端设计进气扰流器, 对试验舱送气进行扰动增加气流的湍流度,从而有利 于试验舱内温度混合。由于试件自身的大热容以及与 试验舱外界的热交换,有效工作区的各环境温度测点 不可避免地具有一定的温度梯度,所以为保证有效试 验区的各环境温度测点具有较好的均匀度,必须对循 环送风的流量进行合理设计<sup>[12-13]</sup>。

考虑实际空间含有一定的水分, 空气定压比热容 取  $c_g$ =1.4 kJ/(kg·K), 由于试验舱的进入最高温度为 85 ℃, 考虑沿程热量的损失,设计加热器出口最高 温为 90 ℃,取加热器进口温度为–20 ℃(考虑冬季 环境温度),即 $\Delta T$ =110 ℃,所以送气流量为 3.25 kg/m<sup>3</sup>。 考虑系统阻力损失,最终选择离心风机的最大风量为 10 000 N·m<sup>3</sup>/h, 全压为 3000 Pa。

此外为保证系统压力正常,进而确保系统的结构 安全性,在主送气管路靠近舱体入口位置处设置安全 阀。当系统进行加热或制冷时,由于空气自身的受热 膨胀或液氮气化膨胀会导致系统压力升高,一旦超过 设计安全压力时,系统将进行自动泄压。

#### 2.4 试验舱

试验舱用于建立有效高低温试验环境,由于试验

舱内有效工作区间要求温度均匀度≤2℃,温度波动 度≤±1℃,所以对于试验舱的结构设计提出了很高 的要求,试验舱的结构直接影响工作区的温度环境。 为减小试验舱漏热对舱内环境的影响,试验舱壁采用 夹层式结构,内箱壁采用优质高级不锈钢板 (SUS304),外壁采用优质冷轧钢板,中间夹层使用 导热系数小、吸水性小、强度高、高温下性能稳定的 隔热材料进行保温,同时考虑消防安全,绝热材料中 添加阻燃剂,防止温度过高引起火灾事故。

试验舱进气位置设计扩压减速段,以降低来流速 度,减小送风流速对于试验产品的影响和流阻损失。 此外一定程度地降低有效工作区的空气流速,可以减 小当地空气与舱体的对流换热能力,从而降低有效工 作区高度方向的温度梯度。由于试验舱扩压段的扩张 比较大(稳定段截面积/入口截面积),设计扩压段高 度为 4000 mm,此时扩压段扩张角约为 14°;扩压段 内设计导流锥,进一步防止入口气流分离,形成漩涡" 死区",从而造成局部的高温或低温区;扩压段后设 计一段平直段用于稳定来流,高度约为 1000 mm,从 而保证试验舱各截面内温度较为均匀。有效工作区尺 寸根据技术要求设计为  $\phi$  1600 mm × 2500 mm。试验 舱体的下段与上段结构尺寸基本相同,具体结构如图 3 所示。



#### 2.5 控制系统

根据试验需要,产品需要完成连续多个剖面温 度曲线的高低温试验,要求控制系统长时间运行可 靠,所以选择了西门子公司的 S7-300PLC 作为控制 系统的硬件,并开发了用于试验的高低温控制软件。 如图 4 所示,控制系统分为低温制冷控制、加热升 温控制以及信号采集功能。控制系统根据采集的被 控点温度信号,经过闭环控制算法,通过调节低温 电动调节阀、加热调功模块分别控制降温过程和加 热升温过程。

由于该系统采用对流换热的方式,温度控制具 有惯性大、滞后的特点,传统 PID 控制算法不能满

· 23 ·



图 4 控制原理

足高精度的温度控制<sup>[14]</sup>。由于系统惯性、滞后的特 点,PID 控制算法中积分项不断累积,当需要回调 控制量时,PID 控制算法的总输出响应缓慢,不能 及时调整控制量,所以在 PID 控制算法中引入了积 分分离功能。

传统积分分离的基本思想为:当被控量与设定值的偏差|e(k)|大于某特定值时,取消积分的作用,执行 PD 控制,减少系统的稳定时间;而当|e(k)|小于这个 特定值时,启动积分作用,执行 PID 作用,降低稳态 误差。该系统具有大惯性、大滞后的特点,变温过程 中执行 PD 控制,但是比例-微分作用在温度逼近目标 值时对系统输出功率起抑制作用,所以传统的积分分 离尽管解决了系统大超调的问题,但是进入稳定阶段 后,逼近目标温度所需要时间较长。

为了实现系统小超调、小稳态误差,快速逼近目标温度,该控制方法对传统积分分离 PID 方法进行了改进。通过调试试验,设置 PID 控制误差带 ε,系统 设备输出量 U为:

$$U = \begin{cases} \left( K_{\rm p} + K_{\rm I} \frac{1}{s} + K_{\rm D} s \right) \cdot e(k), \ \left| e(k) \right| < \varepsilon \\ \left( K_{\rm p} + K_{\rm D} s \right) \cdot e(k) + \delta, \qquad \left| e(k) \right| > \varepsilon \end{cases}$$

当|*e*(*k*)|< ε 时, 启动 PID 控制, 当|*e*(*k*)|> ε 时, 积分误差不再累积进行保持,形成系统输出的直流分 量 δ。由此目标温度在进入温度保持阶段时,由于对 升降温过程积分误差累计作用的削弱,系统固有滞后 性所带来的大超调现象得以解决,并且目标温度实现 了快速稳定保持。

图 5 为传统 PID 控制算法和加改进型积分分离后 的 PID 算法控制效果的对比。如图 5a 所示,直接使 用传统 PID 算法进行控制时,系统升温过程存在波 动,且超调量达到 3 ℃,稳态时存在周期波动,稳 态误差达到 2 ℃。为此,控制算法加入积分分离后, 在误差过大时,关闭积分累加。升温过程平稳,超调 量为 1 ℃,随后进入保温过程,保温过程中,无波 动现象,控制点反馈温度基本与设定温度重合,稳态 误差<0.5 ℃,如图 5b 所示。由此可见,控制系统及 控制算法满足了试验要求。



## 3 试验结果分析

在试验舱内搁置真实负载,在舱体入口和出口分 别设置温度传感器,监测系统的送气/回气温度,在 有效工作区均匀布置4个温度测点,并选取温度测点 1作为主控制温度点,如图6所示。温度控制点的温 度范围设定为5~50℃,验证其5℃/min温变率能力 以及稳态自动控制效果,试验结果如图7所示。





在升降温阶段中,温控点具有良好的温度跟随 性,满足5℃/min的升降温速率要求。升温阶段,温 度控制点的高温超调量为 2.2 ℃,随后温度控制点温 度逐渐趋于平稳进行保温,保温阶段的稳态误差不大 于 0.5 ℃;降温阶段,由于低温制冷方式不存在大惯 性的特点,所以温度超调量较小,为0.7℃,随后温 度控制点温度逐渐趋于平稳进行保温,保温阶段的稳 态误差不大于 0.5 ℃。有效工作区内的各温度测点包 括控制点、测点 2、测点 3、测点 4, 保温阶段均匀 性较好,保持在 2 ℃以内。试验舱入口的最高温为 75.3 ℃,最低温为-19 ℃,满足试验舱入口温度限 制-40~85℃的要求。高温保持时试验舱进出口的温 差为 20 ℃,低温保持时试验舱进出口的温差为 10 ℃,进出口温差较大主要是因为进口扩压段与出口收 缩段内流速较高导致的漏热较大。此外高温保持时试 验舱进出口温差较低温保持时大,其原因在于高温保 持时舱内与外界环境温差较大,导致漏热较大。

# 4 结语

文中对大负载高温变率高低温试验系统的设计 原理和结构进行了阐述,介绍了一种闭合循环单回路 方式的高低温系统形式。通过对加热、制冷方式的设 计,满足了试验系统大负载高温变率的要求。此外结 合送风系统的扰流设计、低温系统的引射雾化设计、 试验舱的气动结构设计以及使用温度积分分离的控制策略,解决了大空间试验舱、大负载试验件所造成的温度均匀度和波动度的设计难点,有效工作区各温度测点温度均匀度保持在2℃以内,温度波动度保持在±0.5℃以内。

#### 参考文献:

- [1] 王莹, 郭建宇. 高温和高湿对电子产品安全性能的影响[J]. 安全与电磁兼容, 2008(4): 61-63.
- [2] 王浚,黄本诚,万才大,等.环境模拟技术[M].北京: 国防工业出版社,1996.
- [3] 陆晨, 刘钰, 程建, 等. 温湿度环境试验箱转温控湿的 方法探讨[J]. 环境技术, 2017, 35(1): 51-54.
- [4] 吴清才. 航天电子产品热环境试验策略研究[J]. 装备 环境工程, 2015, 12(3): 80-86.
- [5] 史明丽, 毛剑晖. 机载导弹特殊环境分析[J]. 装备环境 工程, 2017, 14(1): 57-60.
- [6] 池耀田. 城轨车辆试验设施[J]. 环境技术, 2011(5): 5-10.
- [7] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 09(1): 60-65.
- [8] DRAKE C W. Environment Test Capabilities of the air Force McKinley Climatic Laboratory[R]. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1985.
- [9] 周芳, 嘉业宁. 变温过程试验箱温度特性分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 72-77.
- [10] 刘猛, 李骊, 王浚, 等. 低气压环境下的大空间温度均 匀度模拟方法研究[J]. 低温工程, 2010(6): 33-36.
- [11] 王文光, 胡爱军. 关于温湿度检定箱校准参数的探讨 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(1): 62-66.
- [12] 马建军, 孙侠生, 李喜明. 环境实验室温度均匀性的数 值分析研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 48-53.
- [13] 张新太, 孙江平. 某大型环境舱流场及温度场仿真计 算[J]. 科技视界, 2017(7): 14-15.
- [14] 徐亚飞,刘官敏,高国章,等. 温箱温度 PID 与预测控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(4): 554-557.