

对热真空环模试验设备设计中有关问题的讨论

刘 强

(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 热真空环模试验设备是专用设备, 应用面相对比较窄, 加上不同的被试件各自的特殊要求, 因此在设计方面很难使用统一的标准。对热真空环模试验设备设计中的真空室与热沉最小尺寸确定和表面处理、冷管引入的真空密封结构、热沉的结构确定和设计计算、真空抽气主泵选择、加热形式的选择以及加热器的位置、制冷方式选择和温度循环设计、设备程序控制等有关问题, 结合热真空试验技术特点提出见解, 同时简介了所研制的热真空环模试验设备的简况。还对热真空环模试验设备的检测项目、检测方法进行了论述。

关键词: 热真空; 试验设备; 设备检测; 试验技术

中图分类号: TB756

文献标识码: B

文章编号: 1006-7086(2006) 04-0238-08

TO DISCUSS SOME PROBLEM IN DESIGNING VACUUM ENVIRONMENT EQUIPMENT

LIU Qiang

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The vacuum environment equipment is for special use in industry. It hasn't have centralized standard in designing for its narrow application and usually different products have different requests. With the characterization of the vacuum testing technique, it points out the view of vacuum chamber designing in vacuum environment equipment and to confirm the minimum size of the shroud and its cover-processing. It also discuss the problem of vacuum air-proof construction which has refrigerant tube. The constructive of the shroud and its calculating in design are confirmed. Choosing throughout of vacuum main pump, heating way, the position of the heater, cooling way, thermal circling design and service proceeding control are designed. Some brief condition in researching and producing the equipment are introduced. Others like the equipment's testing program and methods have been narrated.

Key words: vacuum environment equipment; measured of test equipment; test technique

1 引 言

环境是指在任何时间和地点所存在或遇到的自然的和诱发的条件总和。空间环境条件存在着真空、温变、失重、地磁干扰、高能粒子辐射、微流星袭击等因素。对于航天器而言, 空间真空的作用下会出现新的物理现象, 如材料表层的升华加剧、热传导变坏(1×10^{-2} Pa 时热传导系数仅有大气时的万分之一)、表面电导改变引起的容易发生放电、材料雾化、机械性能改变以及材料与外部环境介质的摩擦加剧等。

地面的热真空环境模拟试验就是验证航天产品在执行任务期间, 遭遇到真空和热条件时, 其运行模式能否满足设计和试验的要求。热真空环境模拟设备是按照热真空的试验要求提供高真空、高温和低温的恒温与交变, 以及被试件特殊要求等条件的专项试验设备。

收稿日期: 2005-03-01.

作者简介: 刘强(1952-), 男, 陕西省蒲城县人, 高级工程师, 从事真空科学与技术研究。

由于热真空试验设备是专项试验设备,应用面相对比较窄,加上不同的被试件各自不同的特殊要求,因此在设计方面很难使用统一的标准。热真空试验设备的设计者们根据不同的依据和理解进行设计,每套设备在实际运行中或多或少都存有遗憾。对于试验人员和参与试验的产品设计人员来讲,由于在试验技术和试验条件等诸方面的不同,以及对试验和检测的理解存在的差异而引起争议。作者结合新研制的热真空试验设备,对设计和设备性能测试中的一些技术问题进行讨论。

2 热真空环模试验设备

对于卫星总体和分系统的综合试验而言,热真空环境模拟试验涉及到的环境条件要复杂得多,试验容器的体积也大得多。一般称之为空间环境模拟设备。此文是专指对于设备级产品试验的热真空环模试验设备。

热真空环境模拟设备主要由试验真空容器、热沉、真空抽气机组、冷却和加热系统、控制和数据采集处理系统及其他特殊需求的机构所组成。现代试验往往需要多种环境条件下的综合试验。作者我们研制的设备采用了两路相互独立的温度控制系统,有效地将真空环境下部分热平衡试验和低压下真空放电试验等功能集合在热真空环境模拟设备中。标准配置的热真空设备一般由4个单元所组成,见图1: (1)真空试验容器单元; (2)抽气机组; (3)温度循环单元; (4)控制单元。

2.1 真空试验容器单元

2.1.1 真空室设计

真空室的设计与一般真空设备相似,根据所需要的容积和技术指标确定容器所用的材料和壁厚,以及合理地选择抽气主泵和配置抽气机组。虽说真空室内径不同,相应的设计考虑的因素有所增减,但因为真空室与其他真空装置的计算没有大的差异,就不作赘述。在此对设计中认为值得注意的问题加以讨论。

(1)真空室设计中值得注意的几个问题:真空室的内径确定应该依据热沉的尺寸。采用电阻或灯阵加热时,热沉最大外尺寸距真空室内表面的距离不小于100 mm。真空室的内表面应该进行抛光处理,采用化学电解抛光更理想。

(2)冷热管接头设计:热沉所需的工作介质的引入管道接头设计十分重要,尤其是液氮管道与真空之间的密封问题。考虑到冷损失可以采用波纹管夹套结构,接头之间的材料选择和连接形式必须加以关注。作者设计了新型的接头,见图2。在液氮通过时,冷漏率 $Q \leq 1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

(3)加热器的位置:许多设计人员将加热器放在热沉中,但是实践证明放在热沉与真空室之间,其温度均匀性会更好。

(4)测试和控制引线:多路温度检测和大量的测试引线是设备气载的主要来源,选择小出气量的引线裹敷材料是值得注意的。

(5)温度测量点的布置:常压下的固体表面温度由于平面周边热损、材料制造误差、温度传感器不同位置和安装方式不同等因素所造成的测温元件导热损失,使得测量产生较大的偏差。真空中的温度测量不同于常

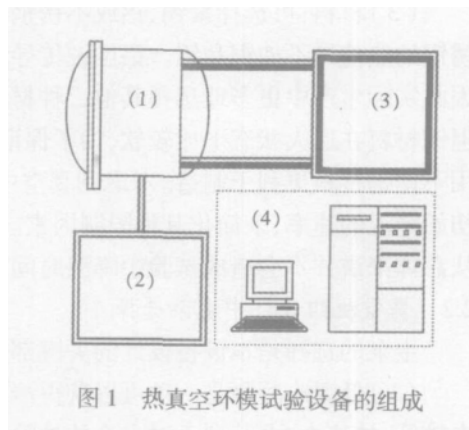


图1 热真空环模试验设备的组成

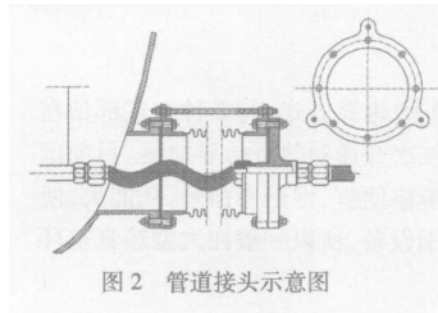


图2 管道接头示意图

压,高真空状态下的温度测量,由于气体分子的平均自由程 λ 远远大于真空容器的直径 D ,所以温度仅在物体表面(器壁和试验件表面)具有急剧变化的特征,真空中温度测量仅反映物体和测温元件材料本身的温度,在空间并无温度梯度的概念。热真空试验的温度检测属真空中固体表面温度测量问题,值得深究。作者曾经试验,在同一位置和同一传感器,仅仅安装的压紧力不同,所测得温度结果误差将近20%。此类问题

的物理概念和测量技术由于受到文章篇幅的限制,将在其他文章中详细探讨。

2.1.2 热沉的设计

(1) 结构: 根据不同的材料、温度范围和设备温度均匀度要求, 确定盘管结构、排管结构或夹层结构。一般在采用液氮介质的情况下, 考虑尽可能减小冷漏的因素, 选择盘管结构。而常用的酒精和全氟聚醚热传导液介质, 由于工作温度不会低于 -70°C , 则采用排管或夹层结构, 有利于提高一次热交换的效率。

(2) 尺寸: 热沉内尺寸应大于被试件的最大几何尺寸, 一般工件与热沉内表面空间间距不小于 100 mm 。热沉尺寸是确定真空室内径的依据。

(3) 材料: 可选择紫铜、铝或不锈钢。紫铜和铝热传导系数接近, 紫铜的真空性能不如铝和不锈钢, 而不锈钢的热传导不如铜和铝。铝虽说传导性和真空性能都很好, 但是由于铝的焊接很难保证足够小的漏气率, 因此实际生产中更多地选择其他二种材料。一般盘管结构多选用铜质材料, 为的是尽可能的减少焊接接头, 但铜材料在退火状态下比较软, 为了保证热沉强度, 必须增加 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 加强支架。排管和夹层结构推荐选用不锈钢材料更利于制造。考虑到真空中辐射传热的时间远远大于热沉的第一次热交换时间, 可以牺牲一点初始降温的速率, 来简化其他限制因素。不锈钢材料表面的发黑处理好, 更有利于真空中辐射形式的热交换, 从总体来讲并不会造成试验中降温时间的延长。

2.2 真空机组设计中主泵选择

主泵的选择是本设备设计的关键部分, 主泵选择不适当, 直接会影响设备的性能和今后的使用。

(1) 低温冷凝泵是一种可以获得清洁真空的全无油真空泵。它使用寿命长, 适合长期连续运转, 运转成本较低; 抽速大, 尤其利于对水气的抽除; 工作时噪音较小。因此在真空环模设备中被广泛使用。但是由于国产泵质量和性能不尽如人意, 只能选用进口产品, 所以一次性投资较大。在国内往往由于经费的限制, 常采用其他类型的真空泵。

(2) 涡轮分子泵是一种高速旋转的机械泵, 虽说可以得到较为清洁的真空, 但由于轴承的润滑, 还不能称之为无油真空泵。但是分子泵启动快, 噪音小, 运行成本相对较低等优点是国内用户比较青睐的, 尤其值得关注的是其要求配置前级泵体积不大, 从而使设备做的比较紧凑, 外观美观。该泵采用中频电源, 工作转速在 $24\ 000\sim 40\ 000\text{ r/min}$, 其电源所产生的高频干扰是很难控制的。如果对高频干扰要求允许的情况下, 将电源远离设备 10 m 以上有一定的效果。但是分子泵的抽速很难做得很大, 分子泵高速旋转, 轴承的使用寿命是有限的, 不适合长期连续运转, 在使用上受到一定限制。

(3) 油扩散泵具有可靠性高, 适合长期连续运转, 抽速大, 运行可靠, 一次性投资小等优点。但是, 由于它的工作介质一般是油, 所以不管采用什么措施, 油污染的因素是必然的, 不过程度不同。选择扩散泵为主泵, 一般采用水冷障板, 最好采用氟利昂制冷挡板, 这样必然导致抽气流导的降低。为了保证达到工作真空度的抽气时间要求, 必须增大抽气管道的直径和主泵的抽速, 选用大抽速的旋片泵、罗茨泵为前级泵, 造成设备的体积和投入都会相应增大, 就设备整体而言其投资强度不比分子泵小。扩散泵机组使用电炉加热, 消耗功率大, 需要单独的冷却系统, 因此运行成本较前 2 种主泵要大得多。国产大抽速的旋片泵、罗茨泵由于机械加工的限制, 所以长期连续运转和高可靠性存在一定的问题。

2.3 温度循环单元设计

热真空设备选择什么样的加热和制冷方式, 取决于试验温度的范围、升降温速率、温度控制精度要求和投资强度。

2.3.1 加热单元设计

(1) 加热方式

加热可以采用电阻加热、石英管碘钨灯加热、热氮气和其他介质对热沉加热等方式, 前 2 种方式都是在真空中以辐射加热的方式使热沉达到试验温度, 后 2 种则是利用被加热的二次介质对热沉传导加热。目前国内主要采用的是前 2 种方式。电阻加热结构简单, 技术含量低, 制造方便, 价格便宜, 但是寿命短, 耗能大, 使用的安全性相对较低, 限制了它的大量应用。氮气加热由于需要一定的外围设备, 所以一般在大型热真空环模设备中采用。下面仅对石英管碘钨灯和液态介质二次加热进行介绍。

液态介质二次加热。由于以往的制冷都是采用低温液态介质来达到对热沉进行降温的目的,如果加热也采用液体,那么给热沉管道设计和制造必然带来极大的困难,所以采用一种既可以满足高温加热,又可以达到低温制冷的宽范围的介质是温度交变设备设计者所追求的,国外研制的全氟聚醚热传导液则达到这一要求。因此当前国外的温度交变试验设备多采用这种液体介质,通过二次加热或制冷来完成升降温的目的,简化了设备的结构。由于该方法的介质工作温度范围较大,制冷和加热是通过一种介质来完成的,因此能量不可储存,对于热沉的升降温平均速率而言,不可能做到大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。但是采用一种介质可以有效地控制介质温度,使热沉的温度控制精度做到 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。然而宽范围的全氟聚醚热传导液国内尚不能生产,只能进口,价格十分昂贵。这就是国内目前生产热真空设备仍然沿用传统的加热和制冷方式的主要因素。

石英管碘钨灯加热。采用碘钨灯阵红外加热。碘钨灯安装在热沉与真空室内,利用光(红外为主)较均匀地将热沉腹板加热,腹板则以辐射形式提供试验的高温空间环境。

在真空中,光子对热沉外表面进行轰击,将能量传给热沉。热沉接收的光子来自于光源的直接照射和真空室内壁反射,热沉接收返回光子的面积大于直接照射面积,假设光子在真空室内壁的反射符合余弦定律,可以认为热沉加热时温度比较均匀。由于光子在真空中的速度(约 $3\times 10^8\text{ m/s}$)远大于气体分子的运动速度(约 10^2 m/s),所以热沉在加热时的热损失将是很小的(在热沉加热过程中,损失的热量不足 1%),基本上可以忽略不计。因此选择光加热可以降低加热功率。作者设计的各种型号的设备多数采用了灯阵加热模式。

(2) 灯阵加热方式的设计

加热功率计算:通过对热沉筒体的需求热量计算,得到在热沉上最大温度差(简称温压)。一般计算按理想状态条件的假设,必然与实际工作状态产生较大的偏差,因此在计算过程中,往往留有设计余度,温压比实际要求大 20~30%,由此得到的最高温度值作为设备控制的极限保护温度,以提高设备在高温下的工作安全性。同时,在设计中还应考虑真空室内壁与热沉筒体间通过光子热量辐射交换这一复杂的物理过程的计算所带来的误差,以及热沉在加热过程中热损耗等因素。

灯阵设计:可以根据加热所需的总功率,合理选择碘钨灯的功率和盏数。按照热沉周长和直段尺寸,均匀地布置。为了提高碘钨灯使用寿命,使用中可以采用每 2 盏串联为 1 组的方法,使碘钨灯长期工作的功率仅有额定功率的 1/4。实践证明,这一方法使设备经过 6 年的使用还未发生过灯管损坏的故障。

灯阵的连接:每 2 盏串联为 1 组,工作电压 220 V(灯管工作在 110 V 电压下),三相均等分配,每相若干组,组-组并联。

2.3.2 制冷单元设计

真空中的热传递以热辐射为主导。在制冷时由于是中间一个凸形物体温度高于外围密闭的物体的温度,因此由内向外辐射,其热辐射角系数 $\varphi_{\text{内}}$ 不等于 1,有效辐射远小于加热时一个外围密闭的物体对中间一个凸形物体的有效辐射,其值不到加热时的 20%。由于降温速率是指数函数关系式,因此设计时,要求确保热沉达到的最低温度应比工件最低工作温度至少低 30%,才能相对缩短试验中降温的时间。建议在选择热真空设备热沉温度技术指标时,应考虑这一因素。在以往的部分试验中,被试验工件的试验温度与热沉温度之间相差不到 20%,使试验的降温时间长达十几个小时,增大了试验成本。

(1) 制冷方式

常见的制冷方式有 2 种:机械冷冻机组制冷;采用液氮直接制冷。通常是按照工作温度范围来确定的,当设备要求的最低温度高于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用机械冷冻机组作为冷源;当设备工作温度低于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,采用液氮直接制冷。如果热沉设计得当,则热沉温度可以低于 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 制冷循环的设计

液氮循环:大型热真空试验设备多采用闭环液氮循环,在此不作讨论。一般小型热真空设备采用开路循环比较经济,设备运转简单,容易维护。相对于闭环方式来讲,经济上是合算的。大气中氮气资源非常丰富,随着液氮生产机器的小型化,当前大型热真空设备也逐渐开始采用开路设计了。

从液氮与热沉的热交换角度来讲,应有较小热阻。但考虑到对工件辐射传热所需要的时间远远长于热沉温度的改变,适当地放慢热沉的降温速率,其利大于弊。适当增加热沉热阻和减小液氮的通入量(增加液氮流

阻或降低输入液氮的压力), 可以节省液氮, 降低运行成本, 也可以减少冷漏现象的发生。对于液氮循环来讲, 流阻过大或过小都将影响最低温度指标, 热沉设计时必须严格控制。液氮的流量也是一个设计的关键, 它虽说与流阻有一定的关联, 但它直接影响着从常温到最低温度全过程的温度调节。液氮循环系统是靠液氮管道内的气液比来调节温度变化的。液氮流入量大, 则管内液态氮所占比例大, 温度就低。反之, 液氮量小则气态氮比例大, 温度就相对高。液氮流量是液氮引入压力和流导大小的函数, 通过大量的试验可以找到最佳的数值。较大的自动控制热真空设备, 可以选用昂贵的低温调节阀门来进行控制, 而小直径的设备, 则可以采用固定流导的阀门, 以调节液氮压力的方法来达到控制液氮流量的目的。阀门流导与液氮压力之间的配合, 可以通过优选法选择得到较好的参数。

考虑到对极限真空的需求, 应该严格控制设备的漏率, 液氮管路的设计必须对此引起足够的重视, 除了引入接口, 采用盘管结构的热沉是理想的方案, 其盘管接头越少越有利。

机械制冷: 为了减小冷冻机的制冷量功率, 采用二次工作介质制冷的方式无疑是一种很好的选择。无论采用哪种介质, 均不易选择低温下动力黏度过大的工作介质。目前采用较多的介质是乙醇或全氟聚醚热传导液。这 2 种介质的物理性能存在较大的差异, 因此在设计循环系统时必须充分区别。本文就国内应用较为广泛的乙醇流程进行介绍。

图 3 是一个典型的热真空设备的乙醇流程图, 整个循环系统由热沉、冷冻机组、乙醇箱、循环泵、阀门、温度测量仪器和管道组成。乙醇箱容积应足够大, 才能达到冷量储藏的目的, 从而保障降温伊始可尽快地带走热沉的热量, 缩短降温启动时间。为了试验现场的安全生产, 乙醇箱应该密封, 不得有乙醇泄漏。加注口应采用密封盖, 保证加注乙醇方便的同时应尽可能减小挥发的乙醇气体泄漏。乙醇预冷温度最好低于热沉最低工作温度 10°C 。乙醇箱应有乙醇液面指示和乙醇温度测量装置。液体介质在低温下的黏度增大, 为了使箱内乙醇不产生层分现象, 推荐安装搅拌器。液体出口安装在乙醇箱下部, 回流乙醇从上部流回。设计中注意了以上事项, 那将会给设备的使用带来许多方便。

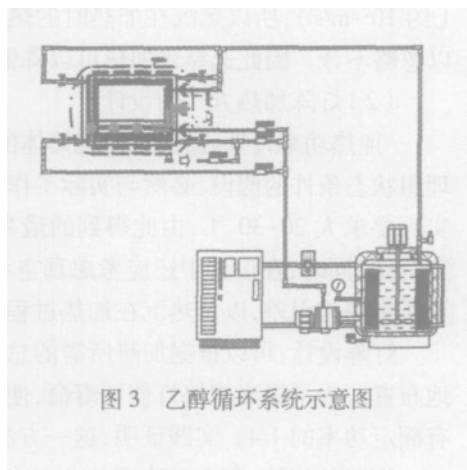


图 3 乙醇循环系统示意图

液体介质在低温下的黏度较大, 即便是乙醇也不例外, 因此循环泵的选配也不可忽视。全氟聚醚热传导液的温度循环系统所使用的泵, 安装在贮液槽的回流管接口前, 可以降低对循环泵的要求。而乙醇介质的循环系统由于设备加热状态已经将乙醇收回到乙醇箱内, 管道内是没有液体的, 因此必须将泵安装在乙醇出口处。如果是双循环控制, 泵必须配置变频器, 以保障管道压力改变时, 不造成泵的损坏。

2.4 控制单元的设计

控制的模式采用手动、半自动、自动或程序控制。热真空试验设备由于试验过程的要求, 不能完全采用手动控制。热真空试验变化因素较多, 国产的设备以往多数采用的是半自动或自动模式, 即便选择计算机也不过是作为温度测量的采集和显示, 设备操作则是用鼠标来点击控制。多年来, 在研制多种类型的热真空环境设备和通过大量热真空试验的经验积累下, 作者于 2002 年开发了新的软件, 成功地研制了新的热真空试验设备的计算机程序控制单元。控制单元采用相对独立的手动控制和程序控制 2 个系统。手动控制便于设备安装、调试和程序控制运行中出现意外时应急或执行紧急关机等操作, 以保证设备和试验产品的安全。此外, 手动操作使设备更具有扩展性, 以便在更宽的使用范围内进行试验工作, 例如航天产品可靠性设计的热平衡试验等。程序控制则是针对比较成熟的试验工艺路线所设计的专业版控制方法。程控是在对设备的各项参数进行检测, 确认系统安全的前提下转入到试验程序的。它降低了系统对人的依赖, 减少了人为因素所造成的试验失误, 利于试验稳定进行, 增加了试验工作的可靠性。

控制单元可以对热沉和安装试验件的底板分别进行独立的双路控制, 互不干扰。本设备除了完成热真空试验, 还可以进行真空下的热平衡试验。控制单元包括真空系统抽气控制、温度交变控制、试验程序控制和试验数据处理(采集、存储、传输、打印)等 4 部分内容, 每部分依据控制对象的不同和控制对象自身的特点采用

不同的控制量, 而且各控制量均采用标准制式以便于各部分之间通信。

控制单元的 4 个部分并不是完全独立的控制, 而是一个有机联系的整体, 只是控制的重点不同。要保障试验的安全、可靠, 并顺利实现设备设计的功能, 必须使各部分相互之间统筹设计和考虑。采用 PLC 加上位机的方式, 可以提高系统的稳定性与可靠性。上位机是用户控制系统的工具, 用来和 PLC 通讯, 协调各部分做出“软件”的配合。PLC 是试验的核心控制器, 接受上位机下达的控制指令, 按照编写好的程序对试验设备进行控制, 实现与“硬件”的配合。控制单元原理构成框图见图 4。

试验程序是控制单元的核心, 在进入试验程序控制以后, 一切试验操作都按照程序设定依次进行。考虑到试验的多变性, 设计了必要的手动介入功能。依据具体的试验工艺, 可与上位机进行实时通讯, 来确认下一步操作, 便于操作员根据整个试验过程来控制试验的顺利进行。控制程序逻辑框图见图 5。

试验过程中控制的因素有温度、时间和真空度。温度是试验要求十分重要的参数, 也是控制的重点。要保证按试验的要求有规律的温度变化, 必须很好地控制高低温。其控制主要由 PLC 来完成, 包括控制参数的采集, 模拟量输入、输出, 开关量的输入、输出等。用户通过上位机与 PLC 进行实时通讯。在试验开始前根据具体试验大纲(或试验细则)对控制温度循环的参数(如循环次数、边界条件等)进行修改, 以适应不同的试验条件。在试验开始后通过上位机来显示整个控制系统的工艺过程, 实时显示温度变化曲线及真空度检测等, 并记录历史数据, 对数据进行处理, 这样用户就可以通过这些变化曲线和数据来对试验过程进行监控和预测。设备在运转过程和试验阶段, 设计了安全报警程序, 真空机组中有关的阀门间的互锁或互联, 设备对冷却水、动力气等保障条件进行自检。热沉或底板设置了超温安全限, 一旦不满足设备或试验的要求, 控制单元将声光报警, 并实行应急处理。

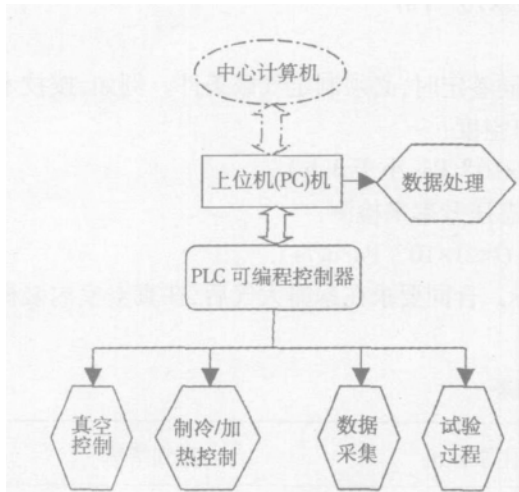


图 4 控制单元原理构成框图

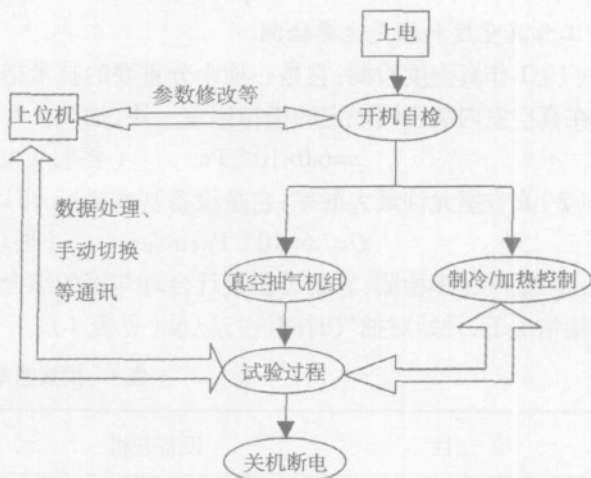


图 5 控制程序逻辑框图

控制系统监控相互独立的两路温度单元。一路检测热沉温度, 采用阶梯式加热, 当温度变化超过高温上限或低温下限时, 温控单元会输出信号去控制加热电流, 改变碘钨灯的输出功率, 实现加热温度控制。真空中温度的惯性较大, 为避免温度过冲, 而在热沉温度接近试验所需的温度时采用间歇式的加热方式。由于试验工件热负荷的存在, 真空室内环境温度即便达到试验需求的温度, 也不能从根本上消除过冲, 因此采用一路底板温度控制, 可使试验件尽快达到试验条件。无论热沉还是底板, 采用逐渐逼近法, 使温度平滑过渡到恒温控制状态。

在恒温控制过程中, 由于在真空中影响温度的因素比较多, 为了弥补常规 PID 调节系统对真空设备控制中的不足, 根据以往的经验可以采用渐进法来提高控制精度。可以将多种影响因素与温度之间看成 n 维数组函数, 即对真空设备中影响温度的主要因素建立数组表, 通过试验调试对数组表内容进行修改, 建立较为准确实用的数组表, 由此提高控制精度。图 6 是恒温控制中所采用的数组运算原理框图。

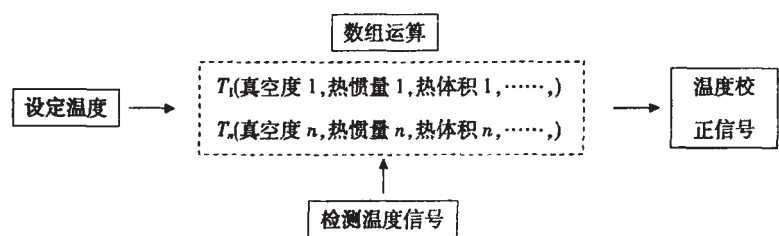


图 6 数组运算原理框图

3 热真空试验设备的检测

热真空试验设备的测试, 目前尚没有统一的标准, 必须检测哪一些项目, 多数是凭使用方与制造方协商的技术条件来确定。但是许多单位是借鉴低气压环境试验箱的技术条件和通用真空设备的检测条件来进行检测的。由于高真空状态下温度的物理概念与常压或粗低真空下的温度概念有着根本的不同, 势必得到差别很大的测试结果。关于测试项目和测试的方法, 本文将介绍作者研制的 RZHM-600-BC 热真空环境模拟设备测试结果, 起到抛砖引玉作用, 希望同行人员进行讨论, 得到共识, 尽早制定出相关标准。

3.1 极限压力

本项指标是设计中理论计算的依据, 虽说对于工作真空没有意义, 但是可以间接反映设备制造水平。RZHM-600-BC 热真空环境模拟设备测试结果:

$$p=2.7 \times 10^{-5} \text{Pa} \quad (\text{用户要求 } 5 \times 10^{-5} \text{ Pa})$$

3.2 工作真空度和抽气速率检测

(1) 工作真空度检测: 它是一项十分重要的技术指标, 在合同签订时, 必须制定气载条件。例如, 按技术要求在真空室内装合同规定的模拟铝锭一块, 抽气 1 h 后检测真空度:

$$p=6.0 \times 10^{-4} \text{ Pa} \quad (\text{要求从大气至 } 1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa 小于 3 h})$$

(2) 真空室允许最大漏率: 它是设备基本指标, 可以采用静态压升率来检测:

$$Q=7.6 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \quad (\text{要求总漏率 } Q \leq 1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s})$$

(3) 抽气速率检测: 它是设备设计合理与否的综合评价指标。合同要求在暴露大气后, 在真空室内装模拟铝锭情况下, 开始对抽气时间进行记录(见表 1)。

表 1 抽气速率检测数据表

项 目	设备开机	主泵开机	达到指标
压力/Pa	1×10^5	1×10^0	1.3×10^{-3}
时间记录	08 : 31	08 : 35	09 : 01
抽气时间/min	0	4	30

3.3 热沉温度

由于试验件的状态不可能相同, 对于热真空试验设备的性能而言, 热沉温度的检测可以评价设备的设计和制造水平, 因而热沉温度是设备性能的基本指标, 作为是否达到试验要求的关键。RZHM- 600- BC 热真空环境模拟设备测试结果见表 2。

若选择 Pt100 温度传感器, 建立通过对 Pt100 的 R_0 电阻值比较来选择相对一致的传感器。对利用计算机二次显示温度值时, 必须在检测验收时由计量部门对其进行温度的标定。

4 结束语

热真空环模试验设备是航天产品研制和生产必备的设备, 是属于专业性较强的设备, 因此过去只是单台

表 2 热沉检测数据

序号	测试项目	指标要求	测试方法	测试结果	备注
1	热沉温度范围	-150 ~ 140 ℃	在热沉上测量得到的最低和最高温度值。	-150 ~ 150 ℃	
2	工作温度范围	-150 ~ 140 ℃	测量底板温度。	-100 ~ 125 ℃	
3	升温、降温 平均速率	大于 3 ℃/min	在热沉表面上测量得到的全量程温度升降变化的平均值。	升温速率: 8.4 ℃/min 降温速率: 3.2 ℃/min	
4	温度均匀度	± 2 ℃	恒温状态下在热沉轴向中段 450 mm 范围内, 距热沉壁 10 mm 位置, 用 5 个传感器测量, 与平均温度的误差值。	高温状态下: 1.44 ℃; 低温状态下: -1.16 ℃。	最大偏差
5	温度控制精度	± 2 ℃	空载状态下, 在 -80 ~ 80 ℃ 之间, 以安装在底板上控制传感器测量为准。	高温状态下: 0.8℃, -0.5 ℃; 低温状态下: 0.6℃, -1.7 ℃。	最大偏差

注: 传感器布置位置为热沉温度: 传感器 1、2、3; 底板温度: 加热控制传感器、制冷控制传感器; 空间温度(距热沉 10 mm、中段 450 mm 内) 5、6、7; 空间温度(距热沉 10 mm、中段 450 mm 两端) 4、8。

研制。由于我国航天事业的蓬勃发展, 所以有了一定的需求量。由于没有相应的生产和检测标准, 许多生产商按照自己的理解和认识去设计、生产, 使当前国内同类产品在使用中不能得到用户的满足。于是拙笔成文, 总结成败, 浅谈自己的理解和认识, 希望得到同行人员的指导和讨论。

(上接第 193 页)

[18] JANKOVSKY R S, JACOBSON D T, RAWLIN V K, et al. NASA's Hall Thruster Program[R]. AIAA- 2001- 3888, 2001.

[19] JANKOVSKY R S, JACOBSON D T, PIÑERO L R, et al. NASA's Hall Thruster Program 2002[R]. AIAA- 2002- 3675,2002.

[20] JACOBSON D T, MANZELLA D H, HOFER R R, et al. NASA's 2004 Hall Thruster Program[R]. AIAA- 2004- 3600,2004.

[21] OH D Y. Electric propulsion[J]. Aerospace America, 2001, December: 58 -59.

[22] OLESON S. Electric propulsion[J]. Aerospace America,2002, December: 58 -59.

[23] BLANDINO J. Electric propulsion[J]. Aerospace America,2003,December: 60 -61.

[24] BAGGETT R , DANKANICH J. Electric propulsion[J]. Aerospace America, 2004, December: 58 -59.

[25] WALKER M. Electric propulsion[J]. Aerospace America, 2005, December: 54 -55.

[26] WITZBERGER K E, MANZELLA D H. Performance of Solar Electric Powered Deep Space Missions Using Hall Thruster Propulsion[R]. AIAA- 2005- 4268, 2005.

[27] HOFER R R, GALLIMORE A D. The Role of Magnetic Field Topography in Improving the Performance of High-Voltage Hall Thrusters[R]. AIAA- 2002- 4111,2002.

[28] SMIRNOV A, RAITSEY, FISCH N J. Electron Transport and Ion Acceleration in a Low-Power Cylindrical Hall Thruster[R]. AIAA- 2004- 4103,2004.

[29] MANZELLA D, JACOBSON D. Investigation of Low- Voltage/High- Thrust Hall Thruster Operation[R]. AIAA- 2003- 5004, 2005.

[30] MAKELA J M, KING L B, MASSEY D R. Development and Testing of a Prototype Bismuth Cathode for Hall Thrusters[R]. AIAA- 2005- 4236,2005.

[31] KIECKHAFFER A, KING L B. Energetics of Propellant Options for High- Power Hall Thrusters[R]. AIAA- 2005- 4228,2005.

[32] POLK J E,KAKUDA R Y,BRINZA D, et al. Demonstration of the NSTAR Ion Propulsion System on the Deep Space One Mission[R]. IEPC- 01- 075,2001.

[33] 黄良甫. 电推进系统发展概况与趋势[J]. 真空与低温, 2005,11(1): 40 -45.