

液氧/煤油发动机煤油高低温试验工艺技术

来代初, 苏红军, 李 伟

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了进行液氧/煤油发动机煤油高低温试验, 试车台必须具备煤油换热能力, 掌握换热工艺。通过分析和比较, 确定了煤油换热系统的组成、换热方法及煤油中游离水的去除方法。介绍了煤油换热的时间安排、煤油升温 and 降温的工艺过程、换热用煤油的流量调节及温度控制要求。提出了试车前煤油温度的保证方法、系统调试及模拟试验的实施效果评定方法。

关键词: 液氧/煤油发动机; 发动机试验; 试车台; 煤油; 高低温

中图分类号: V434.3

文献标识码: A

文章编号: (2009) 04-0053-06

High and low temperature test technology of kerosene of the LOX/kerosene engine

Lai Daichu, Su Hongjun, Li Wei

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The test facility with kerosene heat transfer capability is available to meet the requirements of kerosene with higher and lower temperature for LOX/kerosene engine fire test. The kerosene heat transfer system, the method of heat transfer and removing free water from kerosene have been determined by discussion and comparison. The kerosene heat transfer technological process, kerosene flow rate regulation and the temperature control are introduced. The method of keeping constant temperature of kerosene, preparation of system and evaluation of the simulation test results are presented.

Key words: LOX/kerosene engine; engine test; fire test stand; kerosene; high and low temperature

收稿日期: 2009-06-13; 修回日期: 2009-07-18。

作者简介: 来代初 (1955—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机试验。

0 引言

当发动机研制进行到一定程度后,为了模拟发射时的周围环境温度或者加严考核发动机,需进行煤油的高低温试验。因此发动机试车台必须具备煤油换热能力,试验人员必须掌握煤油换热的工艺过程及关键技术。就煤油换热系统及工艺过程而言,通过查阅文献及技术交流,具备了一定的系统设计方法及工艺技术,但具体实施尚存在一定的难度,如煤油中水分的去除、具体的换热工艺过程和方法。通过对国内有关设备情况、煤油生产厂生产工艺及相关推进剂换热系统的调研,掌握了煤油换热过程必须解决的工艺技术及方法,设计了煤油换热系统,提出了解决一些关键技术的措施与方案。

1 问题的提出

发动机煤油高低温试验时,煤油的高温试验温度比夏天的环境温度高,煤油的低温试验温度比冬天的环境温度低许多。为此,试车台必须具备煤油换热功能和煤油高低温试车能力。

液氧/煤油发动机试车台具备煤油换热功能并进行煤油高低温试车,需解决以下关键技术:煤油的换热方法和换热系统设计技术;煤油中游离水分的去除与检测技术;煤油换热的工艺过程及流量、温度控制技术;换热后的高(低)温煤油在容器和煤油供应管道内的温度保证方法。

2 煤油换热系统的解决方案

2.1 煤油的换热方法

(1) 某卫星发射中心的推进剂换热方法

某卫星发射中心的推进剂换热系统,据了解其换热温度区间比较窄,采用与空调相同的制冷加热方法,加热、制冷工质为乙二醇,推进剂换热器置于乙二醇溶液中,换热工质初期使用盐水,由于盐水中氯离子对设备产生腐蚀而改用乙

二醇。发射中心的换热方法适用于较小温度范围的推进剂换热,其设备与结构庞大,显然不适用于试车台煤油较大温度范围的换热。

(2) 煤油生产厂的换热方法

煤油生产厂在生产煤油的过程中,为了用抽真空的方法进行裂解并脱去部分水分,对煤油也进行加热处理。煤油的加热采用换热器,由蒸汽加热,加热后进行裂解和脱水处理。

(3) 乌克兰试车台的换热方法

乌克兰南方厂试车台的煤油换热系统采用泵和换热器。加热时在换热器内加水,往水中通入热蒸汽,实际上是由热蒸汽对水进行加热,热水通过换热器加热煤油,没有直接用热蒸汽。冷却时,在换热器内通入液氮,由液氮通过换热器冷却煤油。为了取得良好的换热效果,还往液氮内吹入常温氮气,进行鼓泡换热。此换热工艺采用泵作为动力,将加入试车台主容器的煤油通入换热器,进行循环冷却或加热。直至温度满足要求。

(4) 某试车台煤油换热系统方案选择

比较某卫星发射中心、煤油生产厂和乌克兰南方厂试车台的换热方法,显然乌克兰南方厂试车台的方法较为简单、合理。以乌克兰南方厂试车台的煤油换热系统为基础,根据某试车台的实际情况,设计了煤油换热系统,系统组成及原理如图 1 所示。

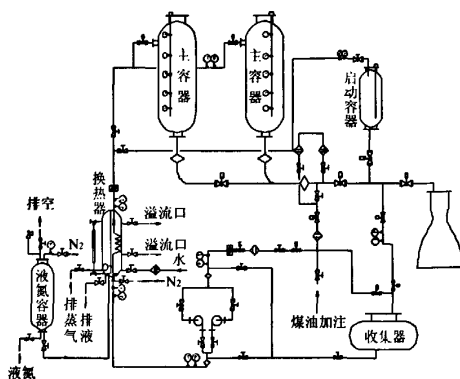


图 1 煤油换热系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of kerosene heat transfer system

该系统分别由屏蔽泵、换热器、阀门及管道

组成煤油循环换热系统;由液氮容器、阀门及管道等组成液氮贮存供应系统;由蒸汽锅炉、阀门及管道等组成高温蒸汽供应系统;由调节阀、流量计及相应的测量控制系统组成煤油流量调节及控制系统;由温度传感器、压力传感器、液位传感器及相应的测量设备组成温度、压力、液位测量和显示系统;由预过滤器、水过滤分离器及微量水分测定仪等组成水过滤及水分测定系统。

系统主要阀门采用远距离控制方式。煤油由主容器底部隔离阀门前的加注阀门处流出,也可由距离发动机最近的阀门前的主管道煤油回收阀门处流出,经换热系统后,从主容器顶部或启动容器顶部流入,这种设计方法主要是考虑了主管道和启动容器内煤油的换热,缩短开车前的准备时间和开车后煤油温度达到任务书要求的时间。

乌克兰南方厂试车台的做法是从主容器底部流出煤油,经换热系统后流入主容器,开车前由主容器加入主管道和启动容器。这种方法,由于开车前加入启动容器和主管道的煤油产生升温(降温),开车前的准备时间和开车后煤油温度达到任务书要求的时间较长。

采用从距离发动机最近的阀门前的主管道煤油回收阀门处流出,虽然增加了主管道和启动容器的换热面积(可以通过采用包扎式绝热方法减少热损耗),但是这种做法保证了煤油温度的一致性,在开车前不需要进行补换热,这样的系统设计应该是可行的。

煤油的加热用蒸汽锅炉产生的热蒸汽,煤油的冷却用液氮。加热和冷却共用一套换热系统。进行煤油冷却时,为了防止煤油在换热器内结冰,换热时进行实时的温度测量、流量测量及煤油流量调节,实时监控及调整换热器内液氮液面。换热系统及煤油系统沿程均设温度监测点,观察记录各点温度及主容器内煤油温度。

2.2 煤油中水分的去除技术

2.2.1 煤油中水的存在状态、含量及危害

水在煤油中有一定的溶解度,其溶解量随着温度、压力及湿度的变化而变化,煤油内的水以溶解状态和游离状态存在。从生产厂出来的煤油水含量较小,但是在运输、转注、贮存等过程中

与空气接触,此时煤油将吸附空气中水分,达到水饱和状态,所以在煤油的运输、转注及贮存等过程中必须尽量减少与空气的接触,更要杜绝人为地混入外来水。常压下水在煤油中的溶解度20℃时为0.0064%,0℃时为0.0041%,−10℃时为0.0026%。按上述数据,煤油在常压下若温度变化40℃,析出水的质量为0.005%,按50吨煤油计算,可析出约2.5公斤水。

煤油中水的析出过程如下:煤油迅速冷却时,过量溶解水在冷却时间内来不及从煤油中逸出并进入气相,其结果是凝结而形成第二液相沉淀水。煤油的冷却速度越快,存留其中的游离水越多。除游离水外,煤油中还有微粒乳化水,微粒乳化水是由于溶解的水冷却过渡成游离水而形成的,由于乳化水的存在,煤油会出现轻微混浊。当煤油温度处于0℃以下时,煤油冷却过程中溶解水就变成游离水并冻结,生成微小的冰晶体。对于试车台来说,这些冰晶体就会堵塞过滤器滤网而造成严重后果。乌克兰南方厂试车台在RD-120发动机低温煤油试车时,曾因煤油中的水分结冰而堵塞主管道过滤器,造成试车失败。

某试车台目前使用的煤油不存在液态水,但在转注过程中难免吸收空气中的水分,煤油是否处于水饱和状态尚不清楚。

综上所述,要进行煤油的低温试验,必须选择一种经济合理、有效的除水工艺及方法,将煤油中的水分除到低温试验要求的温度以下时也不出现结冰的程度。

2.2.2 煤油中水的去除方法

(1) 乌克兰试车台的方法

乌克兰南方厂试车台采用气体吸收除水的方法,介绍的煤油除水方法有以下三种:

第一种方法:用露点低于−45℃的氮气,通过煤油捕捉水分并带出,采用上述方法在大贮箱内速度较慢,且氮气耗量较大;

第二种方法:将容器上部抽真空,从容器底部吹入氮气,进行气体搅拌和真空蒸发,反复多次,除去溶解在煤油中的水分;

第三种方法:从容器底部充入氮气,排出饱和气体,再充入氮气,再排出气体,循环2~5

次, 由经验及检测煤油中的水分决定是否再次循环。该方法为乌克兰南方厂试车台所采用, 用较低露点的氮气进行除水, 除水循环次数与水含量及要求的煤油温度有关。

(2) 用过滤分离器过滤水的方法

上海敏泰科技有限公司引进德国技术, 生产的过滤分离器用亲水材料和憎水材料作为滤芯, 利用亲水材料吸附水分子, 憎水材料挡住水分子的原理进行油料中水分的去除。滤出的水分由专

门的出口排出。该水过滤分离器大量用于飞机场煤油加注系统 (飞机在高空, 其环境温度下降较多, 也有类似于煤油低温试验的情况), 由上海敏泰科技有限公司的资料可知, 在飞机场煤油加注系统中的设置位置 (图 2)。由于过滤分离器的滤孔较细, 使用时必须配置前置过滤器, 进行预过滤, 前置过滤器的过滤精度为 $5\mu\text{m}$, 这种过滤水的方案, 投资较多。煤油通过过滤后可以满足低温试车的要求。

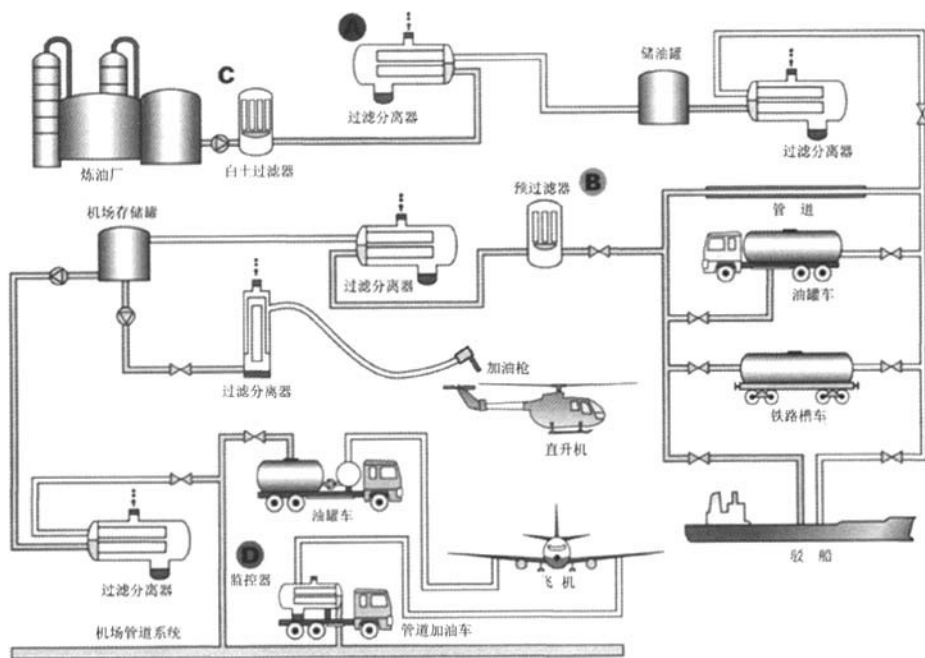


图 2 水过滤分离器在飞机场煤油加注系统中的设置位置

Fig.2 Location of water separation filter in the kerosene filling system of an airport

(3) 煤油生产厂的方法

煤油在生产过程中也有除水这一工艺过程, 生产厂的做法是在煤油真空裂解工艺过程中除去部分水分, 在最后进入成品库前, 配置专用的泵提供动力, 用压滤机加压过滤, 采用棉滤纸吸附水分并去除机械杂质。每次过滤用滤纸的费用不高, 压滤机的投资不大, 应该说是一种较好的去除机械杂质和水分的方法, 其缺点是工作一段时间后就必须更换滤纸。

(4) 选定的煤油中水分去除方法

比较上述三种分离去除水分的方法, 若采用

上述第一种方法, 由于煤油主容器设计时未考虑气体扩散器及充气系统, 所以实施有一定的难度。上述第三种方法由于不能连续作业, 不适合试车台使用。尽管某试车台低温试验的次数有限, 但考虑到采用过滤分离器的方法可以连续工作, 设计选用水过滤分离器的方法。该水过滤分离器和预过滤器设置在库房至试车台的煤油加注管道之间, 作为加注管道的旁通设置, 用手动阀门隔离, 不需要除水的煤油在加注时不通过水过滤分离器和预过滤器, 需要除水的煤油在加注时才通过水过滤分离器和预过滤器。

煤油中所含的微量水分,可采用微量水分测定仪进行测定。

2.3 煤油换热工艺过程

2.3.1 煤油换热时间安排

在发动机试验准备过程中,煤油预先从库房加注至主容器,加注量应留有一定的余量,换热时间安排在试车的前一天下午进行,换热温度由试验任务书要求决定。由于换热后煤油温度的变化取决于环境温度、煤油容器及管道的换热面积和绝热方式,通过理论计算确定温度的变化速率较为复杂。简单的做法是待系统建立后,根据系统调试结果,确定试车前一天换热后至试车开车时间段内的煤油温度变化量,设置温度的过冷(过热)量。若温度变化量较大,不能满足温度要求时,则考虑试车当天补换热或全部煤油都在当天进行换热。由于换热系统相对独立,可以一边进行煤油换热,一边进行试车准备工作。待温度符合要求后,就可以进行试验。采用多加注的煤油进行主管路和启动容器的预冷(预热)。具体的过冷量(过热量)和主管路及启动容器内温度可由调试确定。

2.3.2 煤油的换热过程

(1) 煤油的升温

煤油的升温采用在换热器先加入水再通入蒸汽的方法。实际上是用热水对煤油进行加热,通入的蒸汽在换热器内起搅拌作用,促进换热。根据设计的系统组成,煤油的升温过程大致如下:煤油用量按要求预先加注到试车台的主容器,在换热器内充入一定高度的水,通入热蒸汽开始加热水,换热系统加注煤油,启动屏蔽泵,进行煤油的循环回流。开始时先进行主容器内煤油的升温,启动容器内的煤油在换热的过程中进行加注和回流升温,可以是单独升温,也可以在主容器内煤油升温到一定程度后同时升温。

升温过程中,观察各温度测点的升温情况,根据升温情况,调节煤油流量和通入换热器内的蒸汽量及水的液面高度。

当煤油温度达到比试车温度高若干度的换热要求后,先停止蒸汽供应,视水的温度下降情况,再停止煤油回流。

由于煤油的升温采用热水进行换热,煤油不会出现过热及大量汽化的问题,系统的运行比较安全。

(2) 煤油的降温

煤油的降温采用液氮,液氮由液氮贮存容器供给,液氮流量由手动阀门调节,换热器内液氮液面高度由电容式液位计指示,换热器壳程通大气,汽化后的氮气排入大气。为了提高液氮的换热效率,乌克兰南方厂试车台的经验是往液氮中通入常温氮气,进行鼓泡搅拌。其降温过程大致如下:预先对台上主容器进行煤油加注,加注时进行脱水处理。对脱水的煤油进行水含量测定。满足要求后等待换热,若煤油中水含量不满足要求,则将煤油泄回库房,再进行加注脱水及水含量测定。降温开始时先进行煤油换热系统的煤油加注,启动屏蔽泵,进行煤油的正常循环回流后,再往换热器内加入液氮,严格控制换热器内液氮的液面高度,观察各温度测点的降温情况,监视换热器煤油进出口温度,防止煤油在换热器内结冰。监视各测点温度,视情况进行煤油流量调节,当煤油温度达到比试车温度低若干度的换热要求后,先停止液氮供应,待液氮汽化耗尽后,再停止煤油回流。

煤油降温过程中的主要问题是防止换热器内煤油结冰,堵塞换热器,导致系统不能正常工作。

2.3.3 换热过程的流量、温度控制

换热过程的流量、温度控制是一个关键问题,系统设计可采用涡轮流量计测量换热系统的煤油流量并实时显示。在控制间采用调节阀远距手动调节煤油流量。

在主容器、启动容器、主管道、蒸汽进口、屏蔽泵进出口及换热器内的不同液面高度设温度测点,测量煤油温度和换热工质的温度,并实时显示。根据显示的流量、温度情况调节煤油流量和换热工质(液氮或蒸汽)的供应量。蒸汽或液氮的供应量采用现场手动调节。

实时显示屏蔽泵及换热器的进出口压力和试车台煤油系统压力,判断系统的运行情况。

换热后的煤油在主容器内有温度分层的问题

题,同时由于煤油换热的先后及煤油的容量,换热后的主容器内煤油温度和发动机入口温度有一定的差异,必要时可对煤油主管道进行包扎式绝热,具体情况应视调试结果和试验任务书要求确定。

2.4 煤油温度的保证

系统设计时,应考虑到主容器内温度满足试验要求的煤油加注到主管道和启动容器时,温度有较大的变化,待稳定的时间较长,所以煤油换热系统的煤油从离发动机入口最近的主管道煤油回收阀出口流出,换热后流回主容器和启动容器。这种方法可以保证主管道内和启动容器内煤油及管道和容器本身都经过了充分的换热并达到了煤油换热的温度要求。当试车当天进行补换热后,可以在距开车前较短的时间内停止换热,保证主管道内和启动容器内的煤油温度符合试车要求。

若开车前发动机加注煤油后,发动机入口的煤油温度没有达到要求值,则可以采取向煤油收集器排放的方法,让主管道内的煤油流入发动机时尽可能地更接近要求值。

由于某试车台主管道的管径为 DN200,其中煤油容量较少,预计升温或降温速度较快,所以主管道系统采取包扎式绝热方式。通过调试,若启动容器内煤油的温度变化也较快时,启动容器也采取包扎式绝热方式。

通过系统的调试和模拟试验,必要时也可以适当提高煤油的换热温度范围,保证开车时煤油的温度满足要求。

3 系统调试

换热系统安装就绪应进行系统调试。通过调试确定系统的密封性情况,屏蔽泵的运行情况,流量调节阀和各温度压力测点的显示情况,以及系统工作的协调性。在调试完成的基础上进行煤油的升温 and 降温模拟试验。通过模拟试验可以完成以下项目的实施效果评定:

水过滤分离器的处理效果;

煤油换热工艺过程的合理性及换热能力;

煤油在主容器内的分层情况及消除方法;

煤油在主容器内的温度变化速率;

煤油在主管道和启动容器内的温度变化速率;

确认煤油入口温度的保证方法。

4 结论

综上所述,通过对液氧煤油发动机高低温试验工艺技术的确定及其模拟试验的完成,可以得出以下结论:

(1) 确定的煤油流量调节和温度控制方法,简单有效。

(2) 从距离发动机最近的主管道回收阀流出煤油,对管道和启动容器内煤油进行换热,可以缩短试验开车前的准备时间。

(3) 系统主要阀门选用远距离控制,压力、流量、温度可远距离显示,提高了系统运行的安全性和工作可靠性。

(4) 用水过滤分离器和预过滤器去除游离水的方法,工艺过程简单,但投资较大,特别是过滤精度 $5\mu\text{m}$ 的要求,提高了系统运行和维护的难度。针对试车台间隙运行的情况,可以通过试验,掌握气体吸收除水法,采用气体吸收除水法去除煤油中的游离水可以降低投资。

参考文献:

- [1] 马瀚英. 航天煤油[M]. 北京: 中国宇航出版社. 2003.
- [2] 来代初,唐德芳. RD-120发动机试车台[J]. 火箭推进, 2002, 28(5): 31-34.
- [3] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社. 1990.
- [4] 徐烈,朱卫东,汤晓荧. 低温绝热与贮运技术 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1999.
- [5] QJ3277-2006 液氧煤油发动机试验方法[S].
- [6] GJB5425-2005 液体火箭发动机用煤油规范[S].

(编辑: 马 杰)