

直流式喷注器设计

孙宏明

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 参阅国外文献并利用国内研究试验结果, 论述了直流式喷注器的基本型式, 给出了设计方法, 包括喷嘴排列设计、排列计算。从喷注器设计的角度出发, 提出了解决燃烧性能、燃烧不稳定性和冷却问题的途径; 叙述了喷注器的制造工艺过程及加工方法。

关键词: 直流式喷注器; 结构型式; 排列设计; 制造工艺

中图分类号: V432

文献标识码: A

文章编号: (2004)05-0001-09

Design of Orifice Injector

Sun Hongming

(Shaanxi Engine Design Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: General orifice injector structures are documented through basic study of foreign references and domestic development results. Design approaches including orifice arrangement, design calculations are presented. The resolutions for combustion performance, combustion instability and cooling are given in the aspect of injector design. Manufacturing processes of the injectors are also mentioned briefly.

Key words: orifice injector; structure; orifice arrangement design; manufacturing process

1 引言

液体火箭发动机的研制有很多关键技术要突破, 以求达到性能高、稳定性好和工作可靠。推力室组织燃烧和产生推力, 是液体火箭发动机的核心部件, 其研制是液体火箭发动机首先要完成的技术工作。

推力室由燃烧室和喷管两部分组成。燃烧室的性能、燃烧稳定性和可靠冷却与喷注器的设计

有着极为密切的关系。因而, 从液体火箭发动机研制的一开始, 就十分重视喷注器设计技术, 也可以说, 喷注器的方案选择和结构设计是液体火箭发动机研制首先应突破的关键技术。美国 F-1 发动机在研制初期, 为选择性能优良的喷注器进行了 2000 多次燃烧试验。

喷注器的主要组成部分是喷嘴或喷注元件。由于液体火箭发动机也是一种热机, 其喷嘴或喷注元件与早期的活塞式发动机和航空发动机所用的喷嘴原理是相同的。作为喷嘴喷雾的研究, 可

收稿日期: 2004-05-10; 修回日期: 2004-05-21。

作者简介: 孙宏明 (1936—), 研究员, 研究领域为液体火箭发动机设计。

以追溯到很早的年代。1946年,在美国ARS杂志上就有直流式喷嘴流动和喷雾的仔细研究报道。由于活塞式发动机和航空发动机的耗油量都很小,只要求喷嘴喷雾细微就可以了,主要是采用简单直流式或离心式喷嘴。液体火箭发动机,尤其是大推力发动机,推进剂流量很大,不仅要求雾化细微,燃烧性能高,而且要求燃烧稳定性好,还要组织推力室的可靠冷却,因而喷嘴的设计要求大大不同于活塞式发动机和航空发动机。关于喷嘴的研究,一般分为流动特性研究和喷雾特性研究。前者研究流体流经喷嘴时的流态变化过程、流动稳定性和流量系数的大小以及质量和混合比分布,后者研究喷雾细微的程度、喷雾锥角的大小、液滴尺寸及分布、射流破裂长度等问题。前苏联和美国等国家对于喷嘴的流动过程和喷雾问题都作了大量、实用的研究,并将这些研究成果用于液体火箭发动机设计,研制出了各种类型发动机。

液体火箭发动机喷注器有各种各样的结构形式。按照传统的分类,因所用喷注单元的不同,可以分为离心式喷注器、直流式喷注器、混合型喷注器。早期的设计,多采用简单的喷注形式,如莲蓬头式、单组元离心式喷嘴。如德国V-2发动机燃烧室喷注器为典型的混合型,梨形头部有18个预燃室,每个预燃室为斗形,侧壁上装有44个离心式燃料喷嘴,中央装有一个由直流式喷嘴组成的液氧喷雾器。后来的发动机推力室基本上是以苏、美为代表分为两派。苏联多采用离心式喷注器结构,如自RD-107以来的液氧/煤油发动机;美国则采用直流式喷注器结构,如“雷神”以后的一批液氧/煤油发动机,包括巨型火箭“土星V”发动机F-1。

随着历史的发展,要求研制高性能发动机,单个发动机推力增大,而结构尺寸和质量要求很小,这样不得不缩小推力室尺寸。如RD-170、RD-0120和SSME等发动机必需采用双组元喷嘴才能通过很大的流强。这就出现了由双组元内混合同轴离心式喷嘴组成的先进喷注器。内混合室的深度选择以对燃烧稳定性有利为原则。用长喷嘴组成分区,起到隔板的作用。对于小发动机,则设计了层板喷注器。层板喷注器是将很薄的不锈钢板片,用光刻的

方法刻蚀出不同形状的流动通道和孔,再将多片叠加形成特殊的喷嘴喷雾形式。

直到今天,各航天国家都从未停止过对喷注器的研究工作。如美国的TRW公司研制的低成本液氧/液氢发动机,推力为2886kN,采用了特殊形式的针栓式喷注器,中心液氧喷嘴为一直径约300mm的圆柱带端部针状阀,液氢则采用围绕液氧圆柱体大型环形喷嘴。TRW公司研制的微型发动机喷注器则是在很小的面积上制造出无数的喷嘴孔。这一大一小,充分显示了喷注器的形式是不拘一格的。总之,未来先进喷注器发展必需突破传统的观念,切切不可墨守成规。

中国研制的发动机,喷注器设计充分借鉴了国外经验,尤其是美、苏的经验,采用了离心式、直流式,也有混合形式。新型发动机将采用先进的双组元同轴离心式内混合喷嘴,小发动机则研制了层板喷注器。艺无止境,可以预见,中国也必将研制出更为新型的喷注器形式,以适应未来航天事业的发展。

本文只讨论有关直流式喷注器的有关问题。

2 直流式喷注器设计

直流式喷注器是由直流式喷嘴为喷注单元组成的喷注器。这种喷注器广泛用于各种推力的发动机,如美国的“三神(雷神、宇宙神、大力神)”、“F-1”、“H-1”以及“兰光”等运载火箭所用的大型液氧/煤油发动机都采用了直流式喷注器。我国的大、中、小推力发动机也采用了直流式喷注器。

根据推力的大小和其它特殊要求,喷注器结构有各种不同形式。

2.1 喷注器结构

2.1.1 整体式

所谓整体式是指喷注器组件是由一块金属加工而成,即氧化剂、燃料进口通道和喷嘴都加工在一个零件上。很显然,这种喷注器适用于较小推力的发动机。整体式喷注器可有各种不同的结构形式,典型的结构如图1所示。

2.1.2 组合式

组合式喷注器,也有多种形式。可以用特型的管子拼焊而成,在喷注面开孔。层板喷注器也

是组合喷注器的一种。但对于大型发动机，基本上都采用了盘环式结构。盘环式喷注器也有正面开槽式和背面开槽式两种。

2.1.2.1 正面开槽式

这种型式喷注器曾用于英国“兰光”发动机 RZ-2，但最为典型的是美国 F-1 发动机喷注器，如图 2 所示。

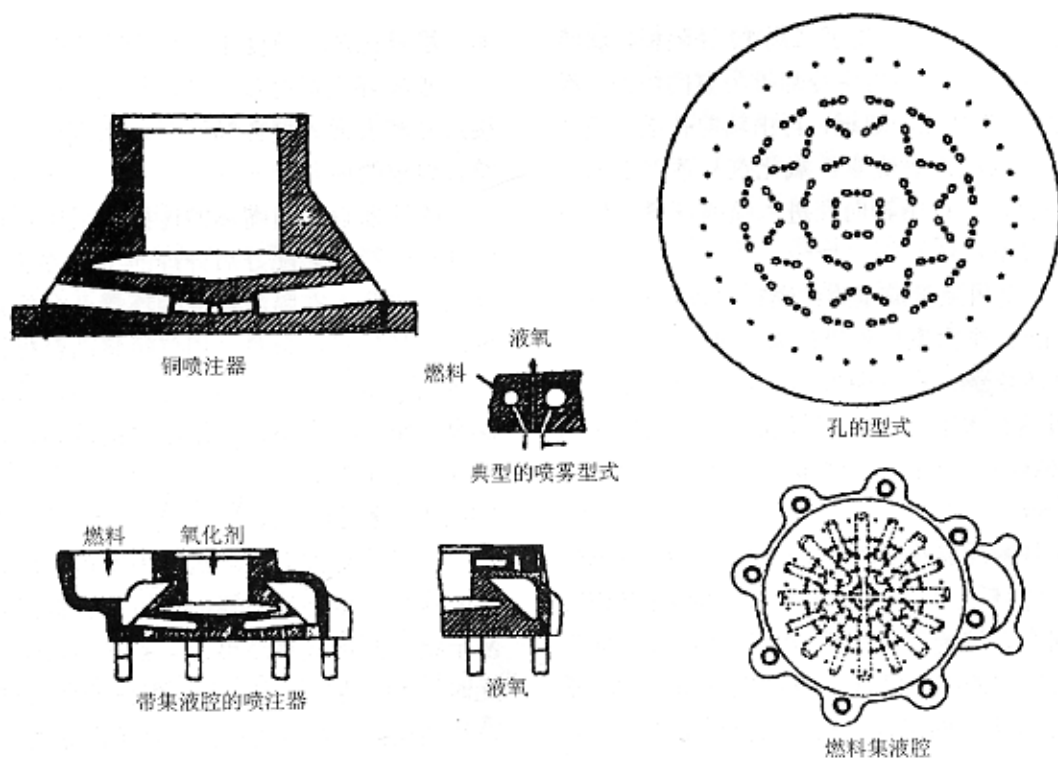


图 1 整体式直流喷注器

Fig.1 Integrated orifice injector

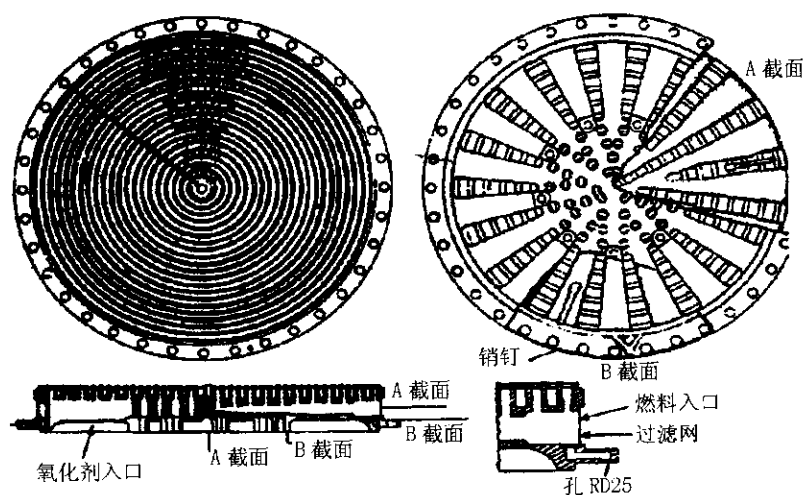


图 2 F-1 发动机正面开槽式直流喷注器

Fig.2 Orifice injector with slots on the front surface for F-1 engine

F-1 发动机采用液氧/煤油为推进剂,地面推力高达 680t(6770kN),采用了大型直流式喷注器。燃烧室直径为 1000mm,喷注器为典型的燃料和氧化剂环槽交替排列的盘环结构形式,有 10 个燃料环和 9 个氧化剂环。采用了二周 12 径隔板,将喷注器面分为 13 个区。再生冷却推力室的煤油,经集合器进入 32 个径向通道,再由轴向孔进入喷嘴环槽并从喷嘴喷入燃烧室;氧化剂从顶盖上的入口进入集合器,再由轴向孔进入喷嘴环槽,经喷嘴喷入燃烧室。

F-1 发动机质量流量为:燃料 797kg/s、氧化剂 1808kg/s;推力室质量流量为:燃料 742kg/s、氧化剂 1784kg/s。在直径为 100cm 的燃烧室喷注面上流过这么多的流量,流量强度是很大的,约为 $0.2526\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。单个直流式喷嘴的孔径最大为 7.137mm。

为选择喷注器花了两年多时间,对 15 种喷注器和 14 种隔板方案,通过 2000 多次的燃烧试验,进行了研究,选择了燃烧性能和稳定性好,能可靠冷却推力室的喷注器。F-1 发动机参加 13 次“土星 V”运载火箭的飞行试验,取得全部成功。其研制经验理所当然地载入了航天运载器发展的史册。

我国长征系列大发动机参考了“兰光”、“F-1”及“H-1”发动机的结构也设计为盘环结构形式。

这种喷注器具有非常好的工艺性和结构可靠性。由于推进剂两组元在结构上就保证了是绝对隔开的,不会有串腔的可能,这样就避免了很多工艺上的麻烦。其缺点是相邻两环上的撞击喷嘴的对应关系不严格,不易设计特殊的喷嘴形式,如互击式喷嘴。另外,安装环的过程中喷嘴孔有变形,会影响喷雾质量。

推进剂组元的进入方式一般设计为再生冷却剂组元从喷注器侧向进入,而另一组元从顶部进入。入口通道的设计原则是保证各喷嘴环喷前压力的一致性。由于排列计算时喷前压力为一定值,如果喷前压力沿径向有变化,将影响到排列设计时流量或混合比分布的准确性。所以,设计为前大后小的偏心阶梯形孔(F-1 发动机为锥形孔),

底面是齐平的。

另一组元进入的通道,设计原则是在不影响结构强度的前提下,通道面积尽可能大,即流阻损失尽量小。这样也可使结构质量大大减轻。因而,沿氧化剂环槽设计了各种弧形孔。

喷嘴环用板材作毛坯,加工至要求厚度、连接尺寸和表面光度并钻孔后,切割成内外径尺寸符合要求的环。

喷注器盘与喷嘴环的连接,采用在环的内外侧加钎焊料,装配好后钎焊的工艺方法。为了提高连接强度,在喷注器盘的连接凸台处留有一定可供铆接的材料余量,用气锤将凸台处铆压至喷注器面基本齐平,最后一环外侧的连接是在喷注器盘上留有一个小边,用滚轮滚压小边,即可将喷嘴环可靠连接。

2.1.2.2 背面开槽式

一般较小推力发动机推力室可采用背面开槽式喷注器。这种喷注器的特点是整板式喷注面,易于组织互击式喷注单元。当采用自击式喷注单元时,相临两排撞击对可以保证严格的对应关系。这种结构型式,也为曲面喷注器所采用。

这种喷注器为了将两推进剂腔隔开,采用了“十字”形肋板,将喷注器背面等分为四个区,在燃料腔用环形隔条将氧化剂环堵死,而在氧化剂腔将燃料环堵死。

其优缺点与整体式几乎恰恰相反。由于在背面开槽,从正面(出口)加工孔后,其进口边毛刺很难去除,更不能像盘环结构那样,在进口加工倒角。另外,推进剂两组元的进口腔道要靠多个环的焊缝隔开,这就存在一个可靠密封的问题。

2.1.3 曲面喷注器

曲面喷注器系指非平面喷注器,并不是一个新概念。早在第二次世界大战期间,德国的 A-4 发动机燃烧室就采用了梨型头部,没有发现燃烧不稳定性现象,甚至因此阻碍了对燃烧不稳定性问题的认识。由于这种喷注器结构很复杂,当平面喷注器也可以满足要求时,自然就采用了平面喷注器。如美国早期的“雷神”、“宇宙神”、“大力神 1”。这“三神”都采用了平面直流式喷注器。对于液氧/煤油发动机应用平面喷注器好像成了传

统,但是,当人们对燃烧不稳定性问题有了认识,或者遇到了不稳定燃烧的挫折后,才又对曲面喷注器产生了兴趣,并广泛应用起来。“大力神 2”、“大力神 3”和“双子座”发动机都采用了曲面喷注器,代表着美国当时的发展趋势。LR-99 发动机最初采用平面喷注器遇到了不稳定燃烧问题,因而又改为半球形喷注器使问题得到了解决,发动机可以起动上百次,总工作时间达到 1 小时。

2.1.3.1 曲面喷注器的优点

(1) 曲面喷注器有较好的燃烧稳定性

根据不稳定燃烧激发机理,必须具备两方面条件:即有压力扰动源存在和这种扰动传播与加强的时间和空间条件。曲面喷注器因其特殊的型面,可以允许采用平面流强分布,这样就有可能消除因沿径向质量分布不均匀而造成压力不均匀,从而产生压力扰乱的可能。这叫做断其源。由于喷嘴(或部分喷嘴)分布于曲面,且为平面流强分布,火焰前锋自然也是曲面状的、参差不齐的,造成了压力敏感介质不连续,对于径向传播的压力扰动得不到能量补充,这叫做无助力。曲面喷注器对纵向或横向压力波都有很好的耗散作用。在某种意义上讲,有隔板的作用可有效的阻尼压力波的传播,这叫做有阻力。由此可见,曲面喷注器比平面喷注器在防止燃烧不稳定性方面有着先天的优越性。

(2) 曲面喷注器有利于提高燃烧效率

曲面喷注器可以采用整体喷注面结构。由于避免了盘环连接所占面积,以及曲面又增加了喷注面积,提供了多安排环数和多排列喷嘴的可能。实际排列结果表明,当燃烧室直径为 400mm 时,曲面喷注器可以安排 19 环和排列约 3500 多个喷嘴,而平面喷注器只能安排 15 环和排列约 2300 多个喷嘴;整体喷注面易于实现多种喷嘴型式,如自击式、互击式、多击式;整体结构避免了在环上加工喷嘴撞击对的误差,从而提高撞击精度;整体喷注面可以保证相临异类撞击对对应精度;整体结构还避免了因铆接盘环而对喷嘴造成威胁。如果在占绝大部分喷嘴的曲面部分,喷嘴撞击对是垂直于曲面,那么,就可以减小轴向速度分量,相当于减少了初速度,增加了气化长度,基于同样原因,燃烧紊流度也可以增加,曲面有

一定深度,相当于增加了燃烧室长度。所有这些,都有利于燃烧效率的提高。

(3) 曲面喷注器易于解决隔板强度问题

采用曲面喷注器以后,由于其对横向和纵向不稳定振型都有很好的耗散作用,有可能不用隔板即可达到稳定燃烧,如“大力神 2”第二级发动机。

当采用隔板时,曲面喷注器也表现出显著的优点。相对平面喷注器而言,隔板可以短一些。据文献报道,应用混肼 50/N₂O₄ 为推进剂的燃烧室,采用平面喷注器时,隔板的最大冷却长度为 127mm,而对于曲面喷注器,文献也指出,当单元推力为 90.7kg 时,应用再生冷却隔板的长度为 50mm,应用端头喷射混合冷却隔板时,长度仅为 43.5mm 即可达到动力稳定。这就是说,隔板可以短一些。短隔板在同样压力载荷下,受力要小的多,既结构强度易于保证。曲面喷注器由于较高的燃烧性能,给采用混合冷却隔板提供了可能。或者说虽然混合冷却隔板损失一些性能也是可以允许的。混合冷却隔板具有结构简单工作可靠的特点。国外文献指出,混合冷却隔板一般不增加泵的负荷,因而常被采用。

(4) 工艺性较好

曲面喷注器消除了铣加工工序及钎焊工序,大大简化了工艺。

工艺上也有一些缺点,由于是整体结构,孔的进口去毛刺就比较困难,如有个别孔加工错误,修补也比较困难。但是,这些问题是可以解决的,都不能成为选择曲面喷注器的障碍。

2.1.3.2 曲面喷注器结构选择

曲面喷注器结构选择主要指型面、曲率、曲面深度和具体结构等的选择和设计问题。

(1) 型面选择

曲面型面一般有球面、锥面、碟型以及混合型面等。图 3 为这几种型面示意图。

球面有一个曲率问题,一般当燃烧室直径和曲面深度确定后,曲率也自然确定了。如燃烧室直径为 400mm,曲面深度确定为 70mm,则曲面曲率为 300mm。球面具有很好的防振性能,从声学理论分析,其特殊的型面对于横向或纵向各种振型都有很好的耗散作用。但是,其加工是十分困难的,可以说还没有一种好方法。

锥面具有最简单的结构型式,也具有一定的防振能力。但是,纯尖锥体由于锥体部分过深,结构上是不允许的。

碟型是一种实用的结构,常用的有球面碟型和锥面碟型两种,一般选用锥面碟型结构。这种

型面具有一定的防振性能。对于横向不稳定燃烧的激发,主要是在较大的直径区域,碟型恰好在这个区域有最大的斜率(或曲率)。锥面碟型具有很好的工艺性,加工容易,不需要专用工装。我们选择了锥面碟型结构。

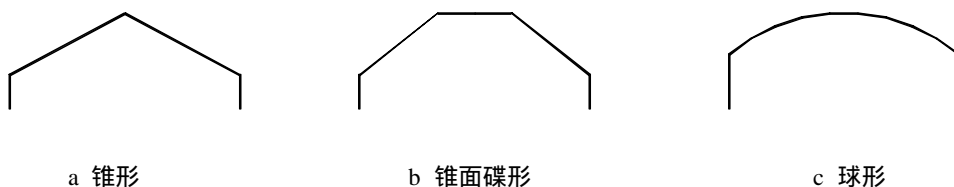


图 3 各种型面的曲面喷注器示意图

Fig.3 Types of injectors with curved surface

(2) 曲面深度确定

确定曲面深度的原则是,在这个深度范围内推进剂燃烧反应基本结束。根据液体火箭发动机的设计准则,对于采用二股自击直流式喷嘴进行了计算,结果表明,在距喷注面 70mm 区域内,推进剂蒸发率大于 60%。国外文献报道,应用最易激发高频切向不稳定燃烧的发动机试验表明,从 5.1mm~68.6mm 为最敏感区。“大力神 2”和“大力神 3”以及“双子座”研制经验指出,以 N_2O_4 为基的自燃推进剂发动机,燃烧不稳定性敏感区域为 50mm~60mm,所以,采用了 50mm 的短隔板。基于以上几点,我们确定曲面深度为 80mm,应该说已经留有余量。

(3) 碟型底部面积确定

在曲面喷注器方案设计时,平板喷注器已进行了第一次试车。从试车后喷注器上留下的烧蚀痕迹可以清楚地看到,在 170mm 的隔板区域内没有不稳定燃烧现象。由于曲面防止不稳定燃烧的效果比圆周隔板要差,所以碟型底部直径的选取比 170mm 要小一些,确定为 104mm。另外,通过用贝塞尔函数计算了燃烧室内压力相对振幅与燃烧室相对半径的关系,结果绘成图线,如图 4 所示。从图上可以看出,在 104mm 处,压力相对振幅仅为最大值的一半,影响很小。同时,一次切向的频率已高达 7000Hz,这么高的频率需要很高的能量,说明不易激发不稳定燃烧。

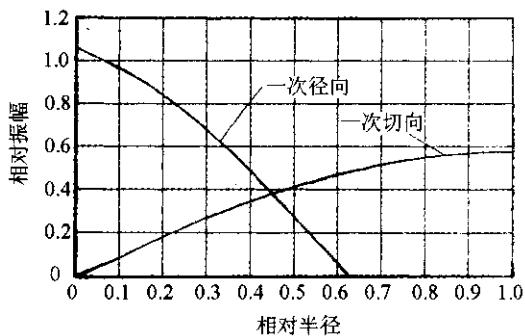


图 4 相对压力振幅与相对半径的关系

Fig.4 Relative pressure amplitude versus relative radius

(4) 结构与强度

曲面喷注器是一种典型的背面开槽式结构。主要由喷注器盘、顶盖、肋板、盖板环以及进口管道等组成。喷注器盘背面加工有交替安排的氧化剂环槽和燃烧剂环槽。正面(喷注面)加工直流喷嘴孔。用肋板将推进剂腔分开,肋板一般呈十字形分布,将喷注器分为氧化剂腔和燃料腔。在氧化剂腔用盖板环将燃料环槽封死;而在燃烧剂腔,用盖板环将氧化剂腔封死,之后用四块顶盖封死各个腔。顶盖上开有进口孔,与进口导管相接。所有连接均采用电弧焊。

曲面喷注器与盘环式直流式平面喷注器都具有很高的结构强度,尤其与板(底)与喷嘴连结结构(如离心式喷注器)要强的多,即结构强度都是足够的。

2.2 排列设计

所谓排列设计是指将喷嘴（喷注单元）沿喷注面合理布置，以达到获得高的燃烧性能、燃烧稳定性和可靠冷却的目的。喷嘴的排列可有多种形式，但对于盘环式结构的直流式喷注器来说，受到了很大限制，只能采用同心圆排列。

2.2.1 排列设计的原则

直流式喷嘴的排列主要考虑以下问题：

2.2.1.1 燃烧性能

(1) 尽量多安排喷嘴

很明显，同样推进剂流量下，喷嘴越多，喷嘴直径可以小一些，可以获得更细的喷雾。

(2) 采用撞击喷嘴

曲面喷注器不仅可以采用自击式喷嘴，而且极易实现异类组元撞击，还可以保证相临异类组元撞击对有精确的对应关系。在曲面部分，也可以使撞击对垂直于喷注面，既撞击对轴线与燃烧室轴线有一定夹角，有利于提高燃烧性能。

(3) 较高的喷注速度或较高的喷嘴压降

喷注速度越高喷雾越细，有利于提高燃烧效率。

(4) 选取较大的撞击角

撞击角越大喷雾越细，有利于提高燃烧效率，但也不能过大。

(5) 合理的混合比分布

一般来说，总的混合比为最佳值，中心绝大部分为略高于最佳值，而边区则低于最佳值。

2.2.1.2 燃烧稳定性

(1) 合理的流强分布

如选用了锥面碟型喷注器。底部平面部分流强可以是均匀流强，也可以是不均匀流强。不均匀流强可为尖锋分布，也可为驼峰分布。曲面部分由于已经形成了参差不齐的火焰前锋，一般为均匀流强分布就可以了。

(2) 留有隔板位置

在曲面部分，喷嘴撞击对为径向隔板的倍数，一般为6的倍数，当采用隔板时，只须取消径向隔板处一个撞击对即可。如采用混合冷却隔板，还要由排列喷嘴组织内外冷却。

(3) 正确选择喷嘴压降与压降比

一般喷嘴压降为燃烧室压力的10%~15%，

氧化剂与燃烧剂喷嘴压降比为1.2~1.5。相应的速度比和动量比也应保证为合理值。

2.2.1.3 可靠冷却

(1) 组织隔板冷却

如混合冷却隔板的内外冷却。

(2) 组织喷注面冷却

一般靠密集的排列喷嘴，不留空隙。另外，喷嘴撞击对的撞击距离氧化剂要远于燃烧剂，撞击角氧化剂要大于燃烧剂。局部可采用单个直流孔，以提高局部流强或抵制燃气回流。

(3) 组织边区冷却

一般最外一排喷嘴采用向燃烧室壁面倾斜的直流式喷嘴，倾斜角为 $10^\circ \sim 30^\circ$ ，流量大小由传热计算决定。

2.2.2 喷注单元设计

2.2.2.1 喷嘴型式

直流式喷嘴可以有多种型式。一般分为单孔直流式喷嘴和撞击式喷嘴。撞击式喷嘴又分为自击式和互击式。互击式又分为二股互击、三股互击和多股互击等多种型式。互击式喷嘴在其喷雾中，混合比分布如果是均匀的，可以获得较高的燃烧效率。但从试验结果看，当使用可贮存自燃推进剂时，由于撞击后混合比和质量分布不均匀，又由于液相反应激烈，往往造成局部压力突升，成为压力扰动源，易激发不稳定燃烧。平板喷注器当采用自击、互击喷嘴时明显出现大振动。互击式喷嘴加工相对困难一些。因而，当自击式喷嘴可以满足要求时，一般不采用互击式喷嘴。

曲面喷注器因其特殊结构只能采用不带进口倒角的喷嘴，进口去毛刺不倒圆。

选用了二股自击式喷嘴，喷嘴撞击角分别为氧化剂 40° 、燃烧剂 60° 。喷嘴撞击高度为氧化剂6mm~8mm、燃烧剂3mm~5mm。

2.2.2.2 喷嘴流量系数

曲面喷注器，由于孔多且小，我们计算时用了相同的流量系数，即流量公式中的 $C_d=0.7$ 。如果计算更精确一些，可以按孔径比 L/d 的不同选取不同的流量系数。流量系数是用大量喷嘴试片通过液流试验得到的。通常绘制成 C_d-L/d 曲线，以备计算时选用。

2.2.2.3 单孔流量计算

单孔流量按流量公式计算

$$q_{mh} = 3.5 c_d d_h^2 \sqrt{\Delta p r}$$

式中, 为单孔的流量, g/s; c_d 为孔的流量系数;
 d_h 为孔的直径, cm; Δp_h 为喷嘴孔的压降, Pa;
 ρ 为流体的密度, g/cm³。

按孔径大小不同和流量系数不同计算单孔流量绘制成表, 以备计算时查用。

2.2.3 排列计算

根据以上原则, 以曲面喷注为例, 进行排列计算。曲面喷注器共交替安排 19 环, 每环上有两排孔。我们的方案选择了平均流强分布, 除边区具有较低混合比(余氧系数)以外, 其余均为相同的混合比(余氧系数)。具体排列计算略。

3 直流喷注器制造

以正面开槽盘环组合式喷注器为例, 制造过程主要有以下几步: 喷嘴环加工→喷注器盘加工→喷嘴环安装→铆接→钎焊→安装隔板组合件→气密检查。

3.1 喷嘴环的加工

喷嘴环是一个重要零件, 是用不锈钢 1Cr18Ni9Ti 薄板材为原材料, 机械加工而成。主要工序为: 粗车→精车→钻孔→切环→去毛刺。

粗车: 去除毛皮, 消除板面的不平度, 为精加工作好准备。

精车: 加工出最内一环以外的环面尺寸, 保障厚度尺寸和精度、粗糙度。

钻孔: 这是喷嘴环加工的最关键工序, 下面详细叙述。

切环: 按尺寸精度要求, 切下已钻孔的各环。

去毛刺: 按图样要求去除毛刺。切记喷嘴孔进出口不可倒圆, 只去毛刺, 保留锐边。允许用铰刀去毛刺, 但不影响孔口型面。

直流式喷嘴的钻孔工序有不同的工艺方法。一般有用钻模加工和用钻套加工。钻模加工是用一块整板作模板, 钻孔时先钻通模板, 再钻喷嘴孔, 这种方法不需要专门的机床, 加工精度低,

且模板损耗大。采用专用钻床, 利用钻套导向的方法简便、易行, 加工精度高, 国外都采用这种方法, 我们也选用这种方法。

对于双股自击式喷嘴, 加工的基本要求是:

(1) 撞击对的射流中心线应在一个平面上, 射流应相交, 交点偏差不大于 0.05mm;

(2) 撞击对中心线, 圆周应分布均匀, 角度偏差小于 10' ;

(3) 喷嘴孔的尺寸: 孔径、撞击角、间距、撞击点高度、进口倒角等应保证;

(4) 撞击对所在圆周对圆心的偏差满足要求;

(5) 撞击对平面对板面倾斜角;

(6) 撞击精度的检查, 使用销棒。

为加工撞击式喷嘴, 需要专用钻床。基本加工要求是:

(1) 主轴可沿一平面度不大于 0.02mm 的平面左右摆动;

(2) 钻套与主轴的同轴性要高;

(3) 工作台的平面度不大于 0.02mm;

(4) 有精确的分度机构。开始用分度头, 后来改进为计算机数字分度。

对于钻头的要求:

(1) 名义尺寸应比孔径小 0.02mm~0.03mm;

(2) 应同时准备左右旋钻头;

(3) 刃磨角度为 130°~150° ;

(4) 钻头应及时刃磨, 以保证孔型、孔径和光度。

钻撞击对的一面斜孔时, 刀具与零件接触后产生一个切削力, 而当钻另一面斜孔时, 同样有这个切削力, 但方向相反。如两斜孔都用左旋(或右旋)钻头工作, 仅因切削力的方向不同, 就会造成撞击精度的大偏差, 为此, 专门制造了左右旋钻头。这是一条非常重要的经验。

在按要求作好准备的基础上, 加工所有直流孔。撞击式喷嘴加工中常出现的问题有:

(1) 孔径偏差过大。主要是选钻头不当、刃磨不好、进刀速度太快;

(2) 孔型不好, 尤其进出口孔径偏大, 出现锥面。主要是钻套选择不当, 尺寸过大, 也要检查床子主轴是否跳动量过大;

(3) 撞击精度超差过大。主要是左右旋钻头的

应用是否正确,钻头要常刃磨;

- (4) 撞击点高度不对;
- (5) 撞击角偏差过大;
- (6) 撞击对分度不均。

3.2 喷注器盘的加工

喷注器盘是由一块重达近百公斤的不锈钢锻件机械加工而成的。在粗加工后,精车出15个环形槽,按尺寸精度要求,加工与喷嘴环配合的尺寸,用铣切加工出背面的各种弧形槽(孔),用不同直径的钻头借助偏心钻套加工底部齐平的16个阶梯孔。

喷注器盘加工的关键是:要保证与喷嘴环配合面尺寸及精度;推进剂隔离部分不应相通;径向阶梯孔的加工。当喷嘴环配合尺寸超差时,允许配车喷注器盘或喷嘴环上的相应尺寸,以保证配合间隙符合钎焊要求。如果推进剂的两腔由于加工错误或材料缺陷不能保证尺寸要求,甚至相通时,可以采取焊接的方法排除。

3.3 隔板组合件装配与钎焊

隔板组合件是在喷注器组件装配前就装配焊接好的。其装配中主要注意事项是端头焊缝应外面齐平,内无焊漏,按要求规范进行钎焊,且气密性检查和液流试验合格。

3.4 喷注器装配与钎焊

喷注器装配是指将喷嘴环装于喷注器盘并固定的过程,主要有以下几步:

- (1) 准备工作:裁剪钎焊料,清洗零件;
- (2) 将钎焊料点焊在喷嘴环的内外径表面;
- (3) 将喷嘴环按顺序装配到环槽内,装配中特别注意喷嘴环上的径向刻线要对准;
- (4) 用铆接的方法将喷嘴环与喷注器盘固定,铆接过程要多遍轻打,不得影响喷嘴孔;
- (5) 装配隔板转接座;
- (6) 将装配好的喷注器面朝下放在钎焊炉中,加温至规定的钎焊参数和时间进行钎焊。

3.5 喷注器与隔板组合件连接

将隔板组合件对应安放在喷注器园周隔板的凸肩上及六个径向转接座“ Γ ”形槽内,用氩弧焊将它们连接在一起。

3.6 喷注器试验

喷注器试验主要指钎焊后的气密性检查。检查使用煤油,首先在喷注面上涂白垩粉,面朝上放置,浸泡煤油中,煤油不得高于喷注器面。观察喷嘴环钎焊缝处有无渗漏。

喷注器的液流试验是随头部一起进行的。

4 结论

(1) 喷注器设计是液体火箭发动机研制的一个最重要环节,在研制工作的开始就应进行充分论证,选择合理的方案;

(2) 直流式喷注器方案选择应全面考虑提高燃烧性能、拟制燃烧不稳定性组织和冷却问题;

(3) 直流式喷注器能适应较高的流强,适用于小收缩比燃烧室设计;

(4) 直流式喷注器可适用于大型发动机,也可用于中小型等各种发动机;

(5) 直流式喷注器结构简单、工艺性好,有利于降低生产制造成本,从而降低发射成本。

参考文献:

- [1] 吕能杨译,火箭发动机喷注器性能[J],火箭导弹技术,1964,(1).
- [2] 朱宁昌等,液体火箭发动机设计(上)[M],宇航出版社,1994.
- [3] 陈祖奎译,F-1液体火箭发动机不稳定评述[J],火箭推进,1996,(特刊).

(编辑:陈红霞)