

纳米技术在液体火箭发动机上的应用

黄智勇, 胡钟兵

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了纳米技术在液体火箭发动机的应用现状, 对今后纳米技术在液体火箭发动机的应用前景和效果作了初步探讨。重点叙述了我国自行研制的液氧/煤油高压补燃发动机上采用的纳米技术及一些工艺方法, 同时将它们的试验情况作了对比分析。提出了今后在液体火箭发动机中采用纳米技术的设想和建议。

关键词: 液体火箭发动机; 纳米技术; 应用

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2004)05-0036-05

Application of Nano-technology in Liquid Propellant Rocket Engine

Huang Zhiyong, Hu Zhongbing

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

Abstract: The article introduces present application of nano-technology in liquid propellant rocket engine, and discusses its future application prospect and effects in the area. It narrated the application and some process of nano-technology in LOX/Kerosene high pressure staged combustion rocket engine. The test results of different technology and methods are compared. Some suggestions and proposals for the future application of nano-technology in liquid propellant rocket engine are also presented.

Key words: liquid propellant rocket engine; nano-technology; application

1 引言

在上世纪下叶, 新科学、新技术的大量出现及加速度向前发展, 给人类社会带来了巨大的物质财富和精神财富。纳米技术的出现、发展和工程实际应用, 使得过去人类认为很难实现的理想

成为了现实。

液体火箭发动机作为航天运载器的主要动力装置, 具有大推力、高性能、高可靠性和长寿命的特点, 但恶劣的工作环境和以往传统的工业技术又严重影响着所要求的性能特点, 如决定发动机寿命和可靠性的轴承技术、密封技术等。如果

收稿日期: 2003-11-20; 修回日期: 2003-12-12。

作者简介: 黄智勇 (1964—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵。

不采用新技术新工艺就难以使液体火箭发动机性能水平再上一个新台阶。在液体火箭发动机关键零组件上应用纳米技术,大大拓展了这些零件的使用范围,提高了它们对环境的适应能力。如在重载、高 DN 值轴承工作表面上采用纳米级粉末膜层,就能提高轴承的寿命和可靠性;在动密封和其它具有相对运动的摩擦副面采用不同的喷镀方法喷镀上一层纳米级金属或非金属粉末就能极大的提高它们的耐磨损性,抗高温和防腐蚀性等。这些新技术在上世纪 80 年代研制成功的发动机上得到了应用,效果良好,使液体火箭发动机多次启动、重复使用、单机入轨等技术要求成为现实。

纳米技术作为国际性的前沿科学,发展时间虽然不长,尚有许多需要人类研究和探索的奥秘。但它已经广泛应用于各工程领域,并给某些领域带来了技术革命。开展纳米技术在液体火箭发动机上的应用研究,对我国航天工程的发展具有重大的意义。

2 纳米技术在液体火箭发动机中应用现状和前景

由于纳米技术是一门发展不久且尚不成熟的新技术,液体火箭发动机上采用纳米技术并不十分广泛,只有八十年代研制出的高性能发动机少数零组件上采用了这种新技术,并且绝大部分是为了改变和提高零组件的表面性能作为主要目的,使用效果良好。大大提高了发动机的寿命和可靠性。

2.1 应用现状

世界上八十年代研制出的高性能液体火箭发动机,主要有美国航天飞机主发动 SSME,前苏联的液氧/煤油高压补燃发动机,日本的 LE-7 氢氧发动机等。从现在了解的情况来看,这些发动机在某些关键零件上大都采用了纳米技术来延长发动机的寿命和提高它们的可靠性。表 1 列出了目前世界上高性能液体火箭发动机涡轮泵轴承表面采用不同材料的纳米粉末膜层解决起动的润滑情况。

表 1 高性能液体火箭发动机轴承表面膜层

Tab.1 Surface films of the high performance LRE bearing.

序号	产品型号	内外圈表面处理	钢球表面处理	保持架
1	SSME(H/O)	溅射 $\text{MoS}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$		PTFE-GF
2	高压补燃发动机(H/O)	氢泵镀铅膜氧泵镀银膜		PTFE(SS)
3	高压补燃发动机(F/O)	TAC 多层膜	$\text{MoS}_2\text{-4}$	PTFE(SS)
4	LE-7(H/O)	溅射 PTFE 膜	PTFE	PTFE-GF

在轴承内外套圈和钢球表面喷镀上纳米级的金属非金属及其氧化物,主要解决发动机起始自润滑与磨损烧蚀问题。试验结果表明,采用这些技术后它们都能多次起动或重复使用。

火箭发动机的燃气通道和涡轮动静叶片的面烧结上了一层抗富氧燃气的搪瓷涂层,防止高温富氧燃气与管道和涡轮叶片发生燃烧。从我们的剖切分析和咨询了解到,搪瓷粉末的粒度达到了亚微米和纳米级。主要是利用了纳米级材料的特性,提高涂层的韧性,结合力与致密性,在烧结过程中降低搪瓷粉末的熔点,保证基体材料的性能。根据前苏联的试验结果。没有此类涂层的

富氧燃气通道和涡轮动静叶片在燃气温度达到某一值时,某些金属零件在燃气中就会起火燃烧且燃烧速度非常快,而涂有涂层的富氧燃气通道抗起火燃烧的能力就大大提高了。

在火箭发动机中具有相对运动的摩擦副面,如机械密封表面,阀的滑动密封表面,轴向力平衡系统中的各流体密封表面等。喷镀有纳米级金属和非金属氧化物粉末,如金粉,银粉,镍铬混合物粉末, Al_2O_3 , MoS_2 粉末。这些具有粉末涂层表面的耐磨性导热性和抗高温性都得到了很大的改善,大幅度提高了发动机的性能、寿命和可靠性。

2.2 应用前景

在技术发达经济雄厚的国家, 已经开始了在液体火箭发动机中采用液浮轴承的研究和试验。将纳米技术应用在液浮轴承中, 会使轴承的寿命和可靠性成百倍提高。涡轮盘是发动机中最关键的零件, 它是在高温高压高速条件下工作, 失效率很大。如果采用纳米级粉末冶金制造, 将大幅度提高涡轮盘的强度和抗高温性能, 使发动机的性能上一个新台阶。发动机出现故障最多的原因是各种密封的失效。密封面的表面质量是决定密封性能好坏的主要因素。利用纳米材料制成密封零件基体或在密封表面覆盖一层纳米粉末将会极大的改善密封性能。推力室的内壁冷却和抗高温是发动机的关键技术, 经常因为推力室的冷却和抗高温而改变发动机的性能要求。如果采用抗高温或导热性极好的纳米级金属粉末涂镀在推力室内壁上, 就可以解决这个问题。在发动机零部件的生产中也可以采用纳米技术以提高质量。如钎焊, 等离子焊, 表面处理等工序中采用纳米技术可以提高产品质量。总之, 随着纳米技术的发展和在工程实际应用的完善, 在液体火箭发动机和其它工程领域将会得到更加广泛的应用。

3 液氧/煤油高压补燃发动机中采用的纳米技术

前苏联的液氧/煤油高压补燃发动机, 在许多关键零件上采用了纳米涂层技术的手段来扩大这些零件的使用范围, 提高发动机的可靠性。这给我们很大的启发, 因此我们在研制液氧 / 煤油发动机时, 在发动机中的某些关键部位就采用了纳米涂层技术。

3.1 重载、高 DN 值轴承中采用纳米结构梯度复合镀膜技术

液体火箭发动机主涡轮泵的轴承是决定发动机的寿命、起动次数和可靠性最关键的零件之一。解决轴承在起动工作过程的自润滑、烧蚀、磨损和疲劳破坏是最主要的任务。六, 七十年代研制成功的大推力发动机能多次起动的非常少, 其原因之一就是当时轴承技术很难达到多次起动的要求。八十年代, 纳米技术逐步应用于工程领域。发动机多次起动和寿命的问题得到了解决。如日

本的 LE-7 发动机, 美国的 SSME 发动机都具有多次起动的能力, 其原因之一就是在轴承上采用了纳米技术。

3.1.1 轴承内外圈滚道和滚珠表面自润滑膜层材料的选择

根据国内外的使用经验, 轴承内外圈滚道和滚珠的表面膜层材料必须要具备自润滑性能好, 耐磨, 导热快, 着火点高等特点, 因此膜层应采用多种材料的混合物。主涡轮泵轴承工作表面采用纳米梯度结构复合多层薄膜, 内外圈滚道膜层材料可采用新型的 MoS_2 -4 基复合薄膜、TACTM 多层薄膜等。对于重载的止推轴承, 内外圈滚道表面选用 TAC 多层薄膜、自润滑合金 Ag-Ln 基和梯度合金的金属 Cu-Ag 基多层自润滑耐磨薄膜。钢球表面采用耐磨的陶瓷和金属陶瓷薄膜 ($\text{Ti}(\text{Al}, \text{V})\text{N}$ 和 Zr-ZrN 等薄膜), 并构成匹配的摩擦副。在上述合金和金属多层薄膜表面溅射低摩擦的 MoS_2 基薄膜作为起始润滑剂, 高速段则以 PTFE 转移膜作为辅助润滑剂。

3.1.2 轴承内外滚道和钢球表面自润滑膜层的镀膜方法

轴承运动表面纳米级膜层的喷镀有许多方法。目前发动机轴承的钢球表面采用了低温离子镀膜手段将 $\text{Ti}(\text{A}, \text{V})\text{N}$ 新型陶瓷薄膜镀在表面, 内外圈滚道采用多弧离子镀结合射频磁控溅射的多功能镀膜方法将纳米梯度结构复合金属 (如 Ag-Cu, Ag-Ln 等) 多层膜+ MnO_2 基复合薄膜镀在滚道表面。至于等离子喷涂, 高温喷涂, 离子束气相沉积的方法能否用在轴承的镀膜技术上有待今后的深入研究和探索。

3.2 富氧燃气通道内表面和涡轮动静叶片表面采用纳米级搪瓷涂层和金属及其混合物镀层

涡轮的驱动工质采用富氧燃气还是富油燃气, 对发动机系统、寿命、可靠性都有非常大的影响。三十年代美国用于登月的发动机, 涡轮的驱动工质采用了富油燃气, 试验后发现燃气通道内存在积碳等其它问题, 严重影响着发动机的可靠性和寿命。后来随着氢氧发动机和大推力固体发动机的研制成功, 他们就放弃了富油燃气驱动涡轮的液氧/煤油发动机。随着苏联的解体, 他们高性能的采用富氧燃气驱动涡轮的液氧/煤油发动

机展现在世人面前, 给世界航天事业带来了巨大的惊喜。彻底解决富氧燃气驱动涡轮给发动机带来一系列问题的办法就是纳米技术的成功应用。

3.2.1 抗氧化、防烧蚀和低温的纳米级搪瓷涂层

具有一定温度、压力和流速的富氧燃气在金属管道内流动是很危险的。虽然燃气管道和涡轮转子、静子采用性能很好的高温合金。但在上述燃气流动时如果管道中有金属屑、尖角、飞边、拐弯半径过小和燃气温度由于其它原因升高达到某一特定值时就会起火燃烧。根据有关资料介绍, 镍铬高温合金在富氧燃气中燃烧的温度计算公式是:

$$T=651.95+4.9x\text{Cr}\%+8.19x\text{Ni}\%-0.42x\text{Al}\%-1.52x\text{Mn}\%-0.3x\text{W}\%$$

表 2 是富氧燃气在碳素钢管中流速与压力的范围。

表 2 富氧燃气在碳素钢管中流速与压力关系

Tab.2 Oxidizer-rich gas flow speed vs pressure

in carbon steel pipe					
$p(\text{MPa})$	≤ 0.1	0.6~1.6	1.6~3.0	3.0~10	>10
$v(\text{m/s})$	20	10	8	6	4

根据上述计算公式和数据, 表面没有覆盖层的金属管很难使得发动机中的富氧燃气安全通过。直接采用航空发动机中成熟的搪瓷涂层技术又存在低温和受热条件下涂层的崩裂、脱落问题。将搪瓷材料超细化为纳米级粉末, 加入某些添加剂, 根据工件的具体要求和形状采用喷涂、浸涂和刷涂等方法, 将纳米级搪瓷粉末涂在工件表面, 再采用不同的烧结温度和方法使涂层和工件表面紧密结合。经试验表明这种纳米级搪瓷涂层具有很好的结合力和韧性, 可以在 900K 到 90K 的热冷冲击下正常工作数十次不崩、不裂、不脱落, 且表面非常光滑, 完全满足发动机中富氧燃气管道的要求。目前我们在发动机中采用了自己研制的搪瓷, 经超细化达纳米级后烧结在所需的管道和叶片表面, 经冷热冲击和热试车后的考验基本上能满足要求。

3.2.2 纳米级金属非金属及其混合物的镀层

从 3.2.1 节中求金属燃烧温度的公式中可知, 某些金属的燃烧温度很高, 不易在富氧燃气中燃

烧。我们就利用这个特点, 将这些金属制成纳米级粉末, 采用燃结、等离子喷涂、离子镀等方法将这些粉末涂镀在富氧燃气和高温燃气的通道内壁。在内壁形成一种致密的保护层, 彻底隔绝高温富氧燃气与管壁基体的接触。根据金属的特性, 镍铬抗高温氧化性能比较好, 因此, 把镍铬及其化合物制成纳米级粉末 (Ni-Cr, Ni-Cr-Al, Ni-20Cr-2 等) 采用等离子喷涂、高温喷涂或离子束气相沉积等方法将这些粉末均匀的喷涂到内壁。在我们研制的发动机上采用了 Ni-Cr 镀层, 喷涂在推力室内壁和富氧燃气管道内壁, 使之能大幅度提高抗高温和抗氧化能力。

发动机中端面密封动环表面和轴向力平衡系统的高低压节流间隙部位都是处在有高速相对运动的条件下工作, 如果不在表面采取措施, 磨损将会很严重以致引起密封失效, 同时有可能摩擦生热导致局部高温起火爆炸。因此我们在发动机氧涡轮泵上的机械密封动环表面采用等离子喷涂的手段, 喷涂上一层纳米级金属氧化物 (Al_2O_3 , $\text{ZrO}_2\text{-MgO}$, $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 等) 涡轮端的机械密封动环基体材料采用在富氧燃气中摩擦不起火的纳米级金属粉末 Cu-Ni-Ca 热合制成。在轴向力平衡系统的高低压节流间隙部位镶嵌上一块 Cu-Ni-Ca 粉末合金, 或者在这些部位喷涂上纳米级纯银粉末。

4 试验结果及分析

研究试验结果表明, 涡轮端的机械密封动环基体材料要用普通 Cu-Ni-Ca 粉末冶金和普通粉末涂层, 产品冷调后, 密封的泄漏量增大数十倍。而经改进后, 密封的泄漏量在试车前后基本无变化。某次试车时, 由于其它原因, 引起富氧燃气温度高于试车调整值。涡轮的动静叶片表面没有喷涂搪瓷涂层, 导致涡轮叶片和富氧燃气起火烧坏。在产品上喷涂纳米级搪瓷涂层后, 在热试车中再没有出现烧蚀破坏的现象, 有的零件还经过了多次试车的考验。在轴向力平衡系统中的高低压间隙部位采用的是纯银层。数次试验证明效果很好。液氧主阀阀芯采用纯金层, 主阀经多次热试车考验后工作特性良好。

(下转第 53 页)

粘接成型工艺基本确定, 为了提高橡胶半膜合格率、增强橡塑两半膜的粘接强度减少粘接不良现象, 对工艺进行了改进, 即将橡胶半膜分为两部分模压。通过改进, 解决了橡胶半膜成型困难、合格率低的问题, 复合半膜球面橡胶半膜与氟塑料半膜之间粘接良好, 基本无气泡和粘接不良, 仅在直线段部分存在小面积气泡和粘接不良, 按此改进后工艺试制了试验件并进行了验证试验。

5 验证试验结果

将试验件装配于贮箱进行验证试验, 试验目的是考核按此改进工艺生产的橡塑复合半膜在工作条件下(真空状态、加注、泄出、翻转等)是否粘接良好, 是否有损伤, 是否能够满足半膜的设计要求。试验结果见表 5。

通过试验验证, 我们认为按改进后的工艺生产出的橡塑复合半膜可以满足使用要求。

表 5 验证试验结果

Tab.5 Result of validation experiments

试验方法	试验条件	试验结果
抽真空试验	真空度 10^{-6} MPa	夹层中的气泡大小无变化, 粘接情况良好
加注泄出	10 次	同上
翻 转	30 次	同上

6 结论

经过专家对整个研制过程的评审, 认为该研制过程中方案制定全面, 方案验证试验充分, 考核结果有说服力, 生产的产品满足橡塑复合半膜的设计要求。

(编辑: 侯早)

(上接第 39 页)

主涡轮泵中的轴承进行水力试验和低温介质试验, 在水介质中轴承在额定的实验工况下, 可以起动 8~10 次, 累计工作时间超过 3 小时。低温介质试验由于受试验台的限制, 不作加重载和长时间寿命试验, 只进行起停试验。在涡轮泵联试和半系统试车后, 对有涂层和无涂层的情况进行了分析, 富氧燃气的流速在 420m/s, 压力在 23MPa 条件下, 如果温度达到 830K, 目前采用的涡轮静子叶片材料会起火燃烧。在叶片表面涂有搪瓷层后, 可在富氧燃气温度为 900K 的条件下工作。密封动环的表面没有耐磨涂层时, 在转子空转和冷调后气密性能下降, 热试车后磨损严重, 有时磨出沟槽, 气密性很不好, 在采用正确的方

法喷涂耐磨涂层后, 试车后动环端面的磨损量很少, 气密性能达到技术要求指标。轴向力平衡系

统和轴承涂层由于目前实验时起动次数比较少, 试验时间不长, 不能完全考验涂层的性能, 但这几次试车中它们都没有出现故障, 说明涂层的材料和工艺方法是可行的。

5 建议和设想

在今后研制的液体火箭发动机上除了在上述零件采用纳米涂层外, 涡轮盘采用粉末冶金制造, 高压静密封表面喷涂软金属粉末。泵内流体密封基体材料采用普通材料, 表面喷涂性能良好的纳米级金属层。这些措施既能提高发动机的性能和可靠性, 又能降低发动机的成本。

(编辑: 王建喜)