

火箭发动机清洗用氟里昂替代物的研究

兰海平, 田青凤

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 本文介绍了一种可以替代氟里昂 CFC-113 用于液氧煤油发动机的新型清洗剂, 经与多种材料的表面化学稳定性试验及清洗效果试验证明, 与正在研制的液氧煤油发动机所用材料有较好的相容性, 并对煤油有优良的清洗效果。

关键词: 火箭发动机; 清洗剂; 氟里昂; 相容性; 替代物

中图分类号: V514

文献标识码: A

文章编号: (2004) 04-0055-08

Research on the Freon Replacement Cleaning Agent for Rocket Engine

Lan Haiping, Tian Qingfeng

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

Abstract: A new type cleaning agent to replace freon(CF-113) for washing LOX/kerosene engine is presented. The surface chemical stability experiments and washing effect comparison have proved that the agent has better compatibility with the LOX/kerosene engine materials and perfect washing effects for kerosene.

Key words: rocket engine; cleaning agent; freon; compatibility; replacement

1 引言

以液氧煤油为推进剂的火箭发动机, 是我国目前正在研制的新一代可重复使用的液体火箭发动机。对发动机试验、使用后的整机进行清洗及生产装配过程中零部件的清洗要求十分严格, 若清洗未达到规定的技术指标, 发动机使用时可能会发生不可控燃烧, 甚至爆炸。根据俄罗斯提供的清洗技术, 我国目前仍使用氟里昂 CFC-113 进

行发动机整机、零部件及其材料清洗, 由于氟里昂 CFC-113 是世界公认的破坏大气臭氧层的物质, 已被定为限制、消减并最终全面禁止使用。根据《北京宣言》, 我国政府已向世界承诺: 在 2006 年 1 月 1 日前全部淘汰氟里昂 CFC-113 的生产和消费。为了保障液氧煤油发动机及其它型号战略战术火箭发动机研制的顺利进行, 必须开发取代氟里昂 CFC-113 作为清洗剂的替代物(以下简称: 新型清洗剂)。为此, 开展了氟里昂替代物(即液

收稿日期: 2004-02-27; 修回日期: 2004-03-29。

作者简介: 兰海平(1964—), 男, 高级工程师, 研究领域为化学化工。

体火箭发动机新型清洗剂)的研究。

对于精密复杂的火箭发动机的清洗使用场合,考虑其材料对水腐蚀的敏感性,清洗后不能有任何残留物以及清洗使用的温度等要求,只有非水系替代物可以考虑。国外研究较多的非水系替代物是氟系清洗剂,主要有 HCFC(含氢氟氯化碳)、HFC(含氢碳氟化物)、HFE(氢氟醚)等几种。这几类替代物的特点是易挥发去除、无残留物,并具有较小的臭氧破坏能力。当前处于清洗领域领先地位的杜邦(Dupont)公司的研制方向就是 HFC 清洗剂,还有 3M 公司,其主攻方向是氟醚清洗剂。HFC 和 HFE 有很多是 CFC 的替代品,但是价格非常昂贵,一般在 35.0~70.0 万元/吨。虽然杜邦公司及 3M 公司力图以扩大产量来降低成本,但预计未来十年之内不会有数量级的改变。另外,日本、德国也在开展 CFC-113 替代物的研究,从有关文献及产品资料看,不仅价格昂贵(25.0~40.0 万元/吨),而且由于材料相容性等問題,无法应用于液氧煤油发动机的清洗。

国内对于非水系替代物的研究也有报导^[1,2],研究的方向也是 HCFC、HFC 等几类物质,但进展较慢,至今只有 HCFC 类过渡型替代产品小批量生产,其它并无样品,更无产品面世。

2 研究方案的确定

2.1 研究方案的理论依据

清洗过程首先是清洗剂能够润湿被清洗工件表面,即清洗剂在被洗工件表面形成一种均匀、不破裂的薄膜,从而代替污染物对工件表面的粘附。从能量角度解释为:清洗剂与工件表面润湿后的界面能,和清洗剂与污染物表面润湿后的界面能之和,小于工件与污染物的界面能^[3,4]。表面张力是表征清洗剂润湿或渗透能力的主要指标,即清洗剂的表面张力是决定清洗效果的重要因素。因此在清洗剂的研制中应考虑到表面张力因素。可通过在清洗剂中添加一定量的表面活性物质来降低清洗剂的表面张力,从而增强清洗能力。

清洗过程的第二步是污染物溶解到清洗剂中。煤油是以铺开的油膜连续存在于工件表面上,在清洗剂的优先润湿作用下,逐渐“卷缩”成为油珠,并离开工件表面溶解在清洗剂中^[3,5]。随着清洗剂的去除,而实现了清洗目的。在被清洗介

质确定后,应遵循相似相溶原理,即清洗剂与被清洗介质分子结构及极性相似时,易溶解去除。故非极性的煤油一般应采用非极性或极性小的清洗剂。但在实际应用中,应综合考虑多种因素,可将极性物质与非极性物质混合使用。

2.2 技术指标依据

技术指标依据分别是:发动机清洗后清洗剂中油含量小于 0.1%(体积比)。由中国航天科技集团公司第十一研究所下发的技术通知单“120001A 试车后清洗发动机内腔通知”,及“与清洗剂接触的材料”。

2.3 研究结果的预期目标

(1) 清洗剂与发动机采用的金属、非金属材料相容;

(2) 清洗除油效果接近于 CFC-113;

(3) 清洗剂沸点不高于 60℃,易挥发去除,且无残留物;

(4) 清洗剂对环境的影响小(对臭氧层破坏小);

(5) 成本接近 CFC-113,具有较高的经济适用性;

(6) 清洗工艺易于实现,可利用原 CFC-113 清洗工艺和装置。

2.4 研究方案的技术思路

本研究是解决液氧煤油发动机清洗问题。发动机清洗时必须有良好的清洗效果,但同时清洗剂对发动机的数十种金属、非金属材料(含特种润滑脂)应能相容,且应具有合适的沸点范围,以利于挥发去除。所以拟研发的清洗剂,必须同时满足发动机清洗中的各种技术要求。

基于目前人们对清洗理论的认识,在非极性化合物中添加适量改性剂,以降低表面张力,增强清洗效果^[3]。同时添加助剂,以调整沸点范围,并降低混合物的毒性和臭氧消耗潜能值,达到研究的预期目标。为此,先结合材料相容性试验和沸点调整试验进行配方试制,在配方满足以上基本要求后,再进行清洗效果试验及特种油脂耐清洗试验。在以上试验取得满意效果后,对发动机模拟装置进行清洗效果试验,以验证清洗效果的可靠性。最后根据试验结果得出结论。

2.5 研究试验中的检测方法

金属材料相容性试验及特种油脂耐清洗试验检测方法,参照 QJ1387-88《金属材料在硝基氧化

剂中静态腐蚀试验方法》按试件几何尺寸变化及重量变化进行检测；非金属材料相容性试验按照 GB/T1690-92、GB/T531-99、GB/T528-98 进行检测；清洗效果试验检测按本课题研究建立的“清洗剂中煤油含量的检测方法”进行检测。

3 试验内容

3.1 清洗剂组分的选择

3.1.1 选择原则

根据发动机对清洗剂的特殊要求，以及被清洗介质的物理化学性质，清洗剂的组分考虑如下：

(1) 主溶剂

这是发动机清洗剂的主要成份，约占总组分的 60%~90%（体积百分比），它的性能必须满足替代清洗剂的全部性能要求。即对油类的溶解性强，沸点较低，易挥发去除；对环境的影响相对较小，且与各类材料有较好的相容性；为此，选用非极性或弱极性的溶剂作主溶剂。

(2) 改性剂

应能有效降低替代清洗剂的表面张力，无毒无污染，对材料的相容性好，并能与主溶剂在有效的浓度范围内互溶，且彼此间具备化学稳定性。本研究选用的改性剂为低级醇类溶剂。

(3) 助剂及其它

对油类的溶解性好，与材料有好的相容性，无毒无污染，不破坏臭氧层。并对调整替代清洗剂的沸点范围有贡献，最好能与其它溶剂形成共沸混合物，并保持产品在实际应用和储存过程中的稳定性，对于其它组分，则应具有优良的溶解性和化学稳定性。本文选用非极性的烷烃类作为

助剂。

3.1.2 组分配方

依据主溶剂及与其它组分组合比例的不同，在考虑材料相容性及清洗剂沸点范围的限制条件下，先后配制并试验了 40 多种配方组合，在经过初步优选后，选定了 T 系列（T₁、T₂、T₃）和 TQ 系列（TQ₁、TQ₂、TQ₃）的六种配方组合作为以下试验对象。配方组成为：

(1) TQ 系列配方组成（以体积百分数计）：

- 主溶剂 ≥60%；
- 助剂 I 25%~30%；
- 改性剂 I 6%~10%；
- 其它 0.5%~1%。

(2) T 系列配方组成（以体积百分数计）

- 主溶剂 ≥70%；
- 助剂 II 17%~25%；
- 改性剂 II 3%~8%；
- 其它 0.5%~1%。

3.2 材料相容性试验

3.2.1 非金属材料相容性试验

本项试验由西北橡胶研究院协作完成，试验结果见表 1。

从表 1 结果可以看出：与 CFC-113 相比较，T 系列配方与几种非金属材料的相容性好，最低为 II 级相容；而 TQ 系列与 X9319-5、试 5171 两种非金属为 IV 级相容，为不推荐使用。

3.2.2 金属材料的相容性试验

金属材料相容性试验方法参照 QJ1387-88 执行，试验结果见表 2。

表 1 几种非金属材料的相容性结果

Tab.1 The compatible results of several nonmetal materials

材料种类	试验温度	试验状态	测试结果			测试方法
			CFC-113	T 系列	TQ 系列	
X9319-3	常温	液相全浸 1h	I 类相容	II 级相容	II 级相容	GB/T1690-92 GB/T531-99 GB/T528-98
X9319-5	常温	液相全浸 1h	I 类相容	I 级相容	IV 级相容	
试 5171	常温	液相全浸 1h	I 类相容	I 级相容	IV 级相容	
F ₄	常温	液相全浸 6h	II 类相容	I 级相容	I 级相容	QJ1387-88

注：相容性级别判定参照液体推进剂与材料的相容性级别标准执行。I 类相容为可长期储存使用；II 类相容为在一定条件下较长期储存使用；III 类相容为短期可使用；IV 类相容为不推荐使用。

表 2 金属材料相容性试验结果

Tab.2 The compatible results of several metal materials

材料种类	试验条件	试验结果			测试方法
		CFC-113	T 系列	TQ 系列	
S-06	常温/液相全浸 6h	I 类相容	I 类相容	I 类相容	QJ1387-88 《金属材料在硝基氧化剂中静态腐蚀试验方法》
S-08		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
L4		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
S-07		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
S-07 镀铬		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
QCr0.8 镀镍		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
GH4169		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
QA110-4-4		I 类相容	II 类相容	II 类相容	
1Cr18Ni9Ti		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
Qbe210		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
S-07 镀铜		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
GH-202		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
T2m		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
S-222		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
S-700 (环状)		I 类相容	II 类相容	II 类相容	
B-19		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
S-03		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
1Cr18Ni9A		I 类相容	I 类相容	I 类相容	
铜镍钙粉末冶金		I 类相容	II 类相容	II 类相容	
1Cr18Ni9A 镀银 (环状)		II 类相容	II 类相容	II 类相容	

注：I 类相容为长期储存使用；II 类相容为在一定条件下较长期储存使用；III 类相容为短期可使用；IV 类相容为不推荐使用。

由表 2 结果可以看出：T 系列配方和 TQ 系列配方对各类金属均有较好的相容性（最低为 II 类相容），几乎与 CFC-113 相当。

3.3 特种油膏的耐清洗试验

油膏是发动机活门、泵等部件的化学密封脂，

发动机在整机清洗时，要求其对清洗剂有一定的耐受性，为了比较起见，将新型清洗剂与 CFC-113 一并进行了耐清洗试验。

试验方法为在小烧杯内壁涂覆 1cm 高 1mm~2mm 厚的油膏，分别用几种清洗剂在 35℃恒温条

件下浸泡 1 小时，挥发去除清洗剂后恒温称重，根据油膏浸泡前后重量变化给出试验结果，见表 3。

表 3 油膏耐清洗试验结果
Tab.3 The results of ointment washing-resistant

油膏种类	试验条件	试验结论		
		T 系列	TQ 系列	CFC-113
7804 [#]	杯内壁涂覆 1cm	耐受性好	耐受性好	耐受性一般
7805 [#]	杯内壁涂覆 1cm	耐受性好	耐受性好	耐受性一般
特 221 [#]	杯内壁涂覆 1cm	耐受性一般	耐受性一般	耐受性一般

表 3 中油膏失重大于 20%为耐受性一般；失重小于 5%为耐受性好。显然：T、TQ 系列清洗剂与 CFC-113 相比，油膏对其的耐受性更好。

3.4 清洗效果试验

(1) 采用试件挂片静态清洗效果试验。清洗效果检测采用毛细管柱气相色谱法，试验方法如下：

将尺寸为 $\phi 25 \times 2$ 的圆型试片在煤油中全浸 30 分钟，取出静挂 5 分钟，然后放入一定量的清洗剂中静态浸泡 10 分钟，取出试片并对清洗剂进行含油量测定，重复以上操作直到清洗剂中油含量达标。根据清洗次数和油含量变化对清洗效果进行评价。试验结果见表 4。

表 4 挂片静态清洗试验结果
Tab.4 The results of hanging slice static state washing

试验材质	表面状态	试验条件	清洗次数	清洗剂中油含量的变化 ΔC^*	清洗剂种类	清洗效果
L ₄	光洁	静态浸泡	2 次	0.09%	TQ ₁	较好
X9319-5	较光洁	静态浸泡	2 次	0.07%	TQ ₁	较好
F ₄	粗糙表面	静态浸泡	2 次	0.50%	TQ ₂	好
			2 次	0.54%	TQ ₃	
F ₄	较粗表面	静态浸泡	2 次	0.14%	TQ ₁	较好
F ₄	粗糙表面	静态浸泡	2 次	0.61%	T ₁	好
			2 次	0.60%	T ₂	
			2 次	0.58%	T ₃	
F ₄	粗糙表面	静态浸泡	2 次	0.51%	CFC-113	好

注：*清洗剂中油含量变化 ΔC 值指多次清洗中，上次清洗后清洗剂中油含量与相临的下次清洗后油含量的差值平均值。 ΔC 值愈大，表明清洗剂对工件表面油的溶解能力愈强，除油清洗效果愈好。

为准确真实的检验清洗剂的除油能力，我们对试件表面进行了粗糙化处理，考虑到非金属 F₄ 材料的易加工性，主要采用 F₄ 材料作为试片除油试验的对象。最大程度地增强其对煤油的吸附能力，提高吸附容量，以期增加清洗难度，并以清洗后清洗剂中油含量不高于 0.1%（体积百分比）作为完成一个清洗过程的标准。

从挂片试验结果可以看出：T 系列（T₁、T₂、T₃）和 TQ 系列（TQ₂、TQ₃）对 F₄ 粗糙表面的除油清洗能力很强（清洗剂中油含量变化 ΔC 值大），清洗效果优于或相当于 CFC-113。

(2) 发动机模拟装置清洗效果试验。发动机模拟装置采用板式换热器，容积为 3 升，内表面面积为 0.96m²。

考虑到本模拟装置的结构复杂程度低于真实火箭发动机,为使研究试验的清洗效果更接近于发动机的实际清洗效果,所以清洗模拟件时,未进行清洗剂的循环、机械晃动、加热、抽真空等强化清洗效果程序。试验方法如下:

- 向模拟装置内充满 8284 批次煤油(约 3L),30 分钟后放出直至流出液体速度小于 2 滴/分后关闭阀门;
- 向模拟装置充满新型清洗剂,为保证取样分析的准确性,静止 10 分钟后循环一遍;
- 放出清洗剂并取样分析清洗剂中的油含量;
- 根据检测结果(清洗剂中煤油含量应小于 0.1%)确定清洗次数,必要时重复清洗步骤。试验结果见表 5。

体面比是达到清洗效果时清洗剂用量(用体积 L 表示)与被清洗表面积(用 m²表示)的比值,它反映清洗剂的清洗能力。体面比值越小表明清洗能力越强,反之则清洗能力越弱。从表中结果得出,对于模拟装置来说,TQ₃ 和 T₃ 的清洗能力

等同或优于 CFC-113。

表 5 静态清洗模拟装置中煤油的试验结果
Tab.5 The results of kerosene in the static state washing
simulating device

清洗剂种类	清洗次数	体面比 L/m ²	清洗剂中油含量变化 ΔC	效果评价
CFC-113	2 次	5.21	0.94%	好
TQ ₃	2 次	5.21	1.15%	好
T ₃	2 次	5.21	1.27%	好

3.5 配方的沸程测试试验

3.5.1 试验方法

按照有机化合物沸点的测定方法,用水浴作热源,安装好沸点测试装置,缓慢加热,测量常压下的馏出液起始温度和终止温度。利用减压蒸馏原理,测定负压状况下的馏出液起始温度和终止温度(干点)。

3.5.2 测定结果

测定结果见表 6。

表 6 几种压力下的清洗剂沸程测定结果
Tab.6 The results of boiling point of washing agent under several pressures

项目 \ 压力	T 系列清洗剂					TQ 系列清洗剂
	-20kPa	-40kPa	-60 kPa	-80 kPa	常压 101.3 kPa	常压 101.3kPa
初馏点, ℃	26	26	25	21	36	34
终馏点(干点), ℃	47	37	34	32	59	47

如表 6 测定结果表明:T 系列清洗剂在常压 101.3KPa 下沸程范围为 36℃~59℃;在负压状态下,终馏点(干点)温度大幅降低,这种情况有利于发动机清洗结束后清洗剂的去除,降低了抽空后处理的工艺难度。

4 试验结果

4.1 清洗剂配方的确定

根据本研究的预期目标,在结合以上材料相容性试验、油膏耐清洗试验、清洗煤油效果试验及沸程范围测试试验。即对表 1 至表 6 结果进行分析可知,T 系列和 TQ 系列中大多数配方对煤油的清洗效果很好,即使在粗糙的工件表面也是如

此,尤其 T₃ 和 TQ₃ 通过试件清洗和模拟装置清洗效果检验,完全可以与 CFC-113 清洗效果相媲美,甚至除油效果稍高于 CFC-113。而由表 1 非金属材料相容性得出的结论看,TQ 系列与两种非金属材料相容性不理想,为 IV 类,属不推荐使用,所以剔除 TQ 系列的 TQ₃ 配方。在综合考虑毒性及使用安全性等多种因素后,确定 T 系列的 T₃ 配方作为 CFC-113 替代品,即发动机新型清洗剂。其配方组成(以体积百分数计)如下:

- 主溶剂 ≥70%;
- 助剂 22%~25%;
- 改性剂 3%~5%;
- 其它 0.5%~1.0%。

4.2 清洗剂的配制工艺

制工艺流程如图 1 所示:

经过多种配制方案的试验, 最终优化出的配

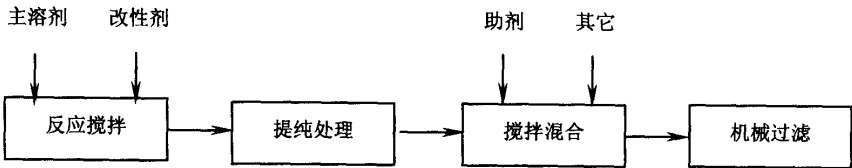


图 1 优化配制工艺流程图

Fig.1 Optimized confecting process flow chart

4.3 技术指标评定

目前, 可替代 CFC-113 的清洗剂尚无国家标准和行业标准可循, 参照国家和化工行业中石油产品和水基清洗剂的技术标准, 根据火箭发动机实际清洗时的状况, 为确保替代产品的性能接近于 CFC-113, 并满足发动机清洗要求, 对研发的新型清洗剂的理化性能参数进行了测试, 并对环境参数进行计算, 测试结果见表 7。

从表 7 中数据得出, T₃ 配方的各项指标与 CFC-113 相近, 其中粘度指标甚至低于 CFC-113 的粘度, 这样更有利于清洗剂的流动和渗透, 增

强除油能力; 而对大气臭氧层的破坏指数(即 ODP 值)不到 CFC-113 的 1/10, 大大降低了其对环境的影响。

4.4 清洗剂毒性毒理试验结果

经中国人民解放军第四军医大学毒理学教研室对清洗剂分别进行急性毒性试验、皮肤刺激试验、急性眼刺激试验和细胞微核试验, 其结论为: 清洗剂在加热温度为 60℃条件下, 呼吸道急性毒性、急性皮肤刺激和急性眼刺激试验安全。微核试验无致突变作用。可以提供工业安全使用。

表 7 理化性能及环境参数测试结果

Tab.7 Testing results of physical and chemical capability and environment parameters

项 目	外观	密 度	粘 度	表面张力	苯胺点	燃 点	冰 点	PH 值	ODP 计算值
单位		20℃/4℃	mPa · s	N/m	℃	℃	℃		
T ₃ 指标	无色透明溶液	1.071	0.418	19.4×10 ⁻³	< -40	无	< -40	6~7	0.07
CFC-113 指标		25℃/4℃ 1.56	0.68	19×10 ⁻³		无	-35	6~7	0.8
测试单位		西安化工研究所						165 所	
执行标准		GB2540 -81	GB/265 -88	GB/T11985 -89	GB262 -88	GB267 -88	GB/T618 -88	试 纸	计 算

5 结论及讨论

5.1 结论

(1) 本课题研制出的替代氟里昂 CFC-113 的新型清洗剂, 溶油效果好, 具有较低的苯胺点、表面张力和粘度, 清洗发动机模拟件的效果与

CFC-113 相当, 适用于液氧煤油发动机整机清洗及装配件清洗。

(2) 新型清洗剂与发动机的材质(包括金属和非金属)相容性较好。

(3) 新型清洗剂具有低的臭氧消耗潜能值, 对环境的影响较小。

(4) 新型清洗剂为常温下使用的中性清洗剂,

沸点低,易于挥发,清洗后无残留物。

(5) 新型清洗剂属基本无毒物质,对工作人员的健康影响小。且清洗剂不易燃,安全性较高。

(6) 新型清洗剂的成本价不超过 CFC-113 市场价,具有较好的性能价格比,且清洗工艺与 CFC-113 相同,操作简便,适于推广应用。如果批量生产定会产生较好的经济效益和社会效益。

5.2 讨论

(1) 由于火箭发动机的结构较为特殊,要求精密度高,且涉及使用的材料种类繁多,而本清洗剂能够同时满足这些要求,所以可推广到其它精密清洗领域,如航空、电子、邮电、轻工、家电、汽车等行业及其它军工领域,具有较高的推广应用价值。

(2) 本课题研究的清洗剂,初始流出液温度略偏低,在大气压 101.3kPa 时为 36℃,因此,在实际应用中应使用密闭容器以减少挥发。应继续开展探讨研究,研发出沸点接近 50℃,并且沸程范

围更窄的清洗剂,以提高其在多种环境温度下的适用性。

参考文献:

- [1] 孙更生. 清洗剂替代品 HFCS 及 HCFCs[C]. 中国清洗行业 ODS 淘汰全国工作会议文件汇编, 2000.
- [2] 陈旭俊. 工业清洗剂及清洗技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991.
- [4] M J Rosen. Surfactants and Interfacial Phenomena [M]. 1978.
- [5] W M Linfield, J Am. Oil Chemists[M]. 1978.
- [6] 程能林. 有机溶剂手册(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994, 9.

(上接第 14 页)

对高速转动的转子施加一个周期性的径向力,加强了转子的径向振动。

6 结论

(1) 理论计算与工程应用情况证明: 泵启动时, 决定浮动环浮起的主要因素是它的重量。最小液膜厚度随转速升高迅速增大, 转速达到一定值后, 最小液膜厚度达到最大, 但随着浮动环端面摩擦力的加大和方向的变化, 浮动环自重的影响就很小。

(2) 浮动环在液氧工作中的最小液膜厚度较小, 因此浮动环和与之配合零件的形状公差要小、工作表面粗糙度要小, 间隙选择时一定要考虑温度、压力和高速旋转离心力引起的变形。

(3) 液体火箭发动机涡轮泵浮动环密封的压差很大, 在浮动环结构设计时, 要选择合适的两端面压力差, 保证浮动环在工作过程中既不脱离壳体端面以保证泵容积效率, 又不能压的太紧导

致端面磨损严重。

(4) 用于起动快、密封压差大的浮动环, 要把增大零件的刚度和提高工作中尺寸的稳定性作为设计重点, 用于起动慢、多次工作、密封压差较小的浮动环, 浮动环和壳体的配合表面需要有耐磨膜层。

(5) 高转速、大压差浮动环的泄漏量较其它间隙密封小, 对高速转子有辅助支撑作用, 能提高泵的容积效率, 改善高速转子的动力学特性。

参考文献:

- [1] 奥夫相尼科夫. 液体火箭发动机涡轮泵装置原理与计算[M]. 北京: 宇航出版社, 1999.
- [2] 徐灏. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [3] 刘站国, 樊根民, 董锡鉴. 我国首次闭式循环发动机发生器—涡轮泵联试试验研究[J]. 火箭推进, 2003, 29(4).

本期责任编辑: 马 杰