

# 适用于空间站各系统的密封材料

王江 马国富 郑剑 刘小坤

( 湖北红星化学研究所 襄樊 441003 )

**文 摘** 介绍了空间站各系统密封材料的使用环境及对材料的性能要求;对空间站中气动系统、推进系统和液压系统使用的密封材料进行了配方研制;重点对气动系统密封材料的环境适应性与空间卫生性给出了评估。结果表明,材料满足航天器使用环境的需要。

**关键词** 空间站,密封材料,气动系统,推进系统,液压系统

## Seal Materials for Different Systems of Space Station

Wang Jiang Ma Guofu Zheng Jian Liu Xiaokun

( Hubei Red-star Chemical Inst. Xiangfan 441003 )

**Abstract** The seal materials service environment on space station and the requirement of materials performance are introduced. The formula of seal materials used in pneumatic system, propulsion system and hydraulic system of space station are studied. The environmental adaptability and space hygiene of seal materials for pneumatic system are briefly evaluated. Experimental results indicate the materials are suitable for space station.

**Key words** Space station, Seal material, Pneumatic system, Propulsion system, Hydraulic system

### 1 引言

我国计划发展空间站,密封技术是要解决的关键技术之一。开展密封材料的研究,目标是研制出适合空间站使用的密封材料配方和样品,为我国的空间站作技术储备。

### 2 空间站密封材料的使用环境与性能要求分析

#### 2.1 使用环境

空间站一般在 300 km ~ 600 km 的低地球轨道上运行,其外部空间环境为:高真空( $1.3 \times 10^{-4}$  Pa ~  $10^{-7}$  Pa),高、低温循环(-90 ~ +125,每90 min左右交变一次),太阳射线辐照,带电粒子辐照,微陨石和人造轨道碎片撞击以及原子氧侵蚀等<sup>[1,2]</sup>。同时,空间密封材料的舱内工作环境还必须保持适宜的温度、压力、湿度及气体成分<sup>[3]</sup>。

#### 2.2 性能要求分析

#### 2.2.1 耐辐照

空间站在轨运行时,对总吸收剂量有贡献的主要辐照环境有:捕获电子、捕获质子和太阳质子。长时间的辐照会使有机密封材料降解或交联,逸气加速,从而改变其物理机械性能,甚至丧失密封能力,因此空间站运行的外辐照环境要求有机密封材料必须具有良好的抗辐照性。

#### 2.2.2 逸气少

逸气会带来材料成分上的变化,进而引起密封材料性能的改变和尺寸的变化,最终影响密封效果。同时,材料的逸气产物还会严重降低光学系统、遥感系统敏感器件的使用性能。通常优先用逸气性能来筛选空间材料。

#### 2.2.3 无毒无气味

载人航天器密封舱内气体成分及其含量对宇航

收稿日期:2001-12-24;修回日期:2002-04-15

王江,1973年出生,工程师,主要从事绝热层、衬层及密封材料等高分子材料的研究工作

员的安全、健康及工效有着极大的影响<sup>[4]</sup>。有机材料是密封舱内空气的重要污染源,具有潜在的毒性危害,因此密封材料不仅要求逸气少,而且要求逸气产物无毒无气味,对有毒成分的量要求严格控制,NASA 载人航天中心(MSC)在早期就制订了材料逸气产物中的一氧化碳和总有机物的测试方法和评价标准。现在,欧空局(ESA)已将该方法制订成标准方法<sup>[5]</sup>,作为空间材料的评价标准。

### 2.2.4 不易燃烧

载人航天始终把安全性放在首位,舱内材料意外着火,不仅损坏设备,而且燃烧产生的有毒气体及烟雾将直接威胁宇航员的生命安全,因此对用于航天器上的材料应进行可燃性评估,美国宇航局与欧空局均制订了相应标准<sup>[6,7]</sup>。

### 2.2.5 耐高温和低温

空间环境大范围的温度变化(-90 ~ +125)要求某些部位(如舷窗)的密封材料不仅要经受得住长时间交变的高温,而且在低温下弹性要好,

在飞行器返回再入大气层过程中,还要能满足瞬时的热密封、动密封,以保证在整个温度范围内可靠地密封。

### 2.2.6 长寿命

空间站是一种在空间轨道上长期运行的大型载人航天器,其寿命在10 y以上。空间环境异常恶劣,高低温循环、高真空及辐照等加速了密封材料的老化。密封材料不仅要求静态寿命长,而且要求在轨运行的极端环境中具有符合设计要求的使用寿命。

### 2.3 国外航天器密封技术概述

航天器是复杂的大系统,各组件之间及其内部的成千上万个连接处都必须采用密封技术,以保证各连接处的泄漏控制在安全界限内。

以航天飞机为例,其密封主要应用在三大系统(推进系统、液压系统和气动系统)中。由于功用不同,密封形式和材料也各不相同(见表1)。

表1 密封技术在航天飞机中的应用  
Tab.1 Seal technique applied to space shuttle

应用部位	材料	形式	主要功用
推进系统	不锈钢、铝合金、聚四氟乙烯/玻璃布层压复合材料,AF-E-124D, AF-E-411, AF-E-411A	金属垫片,弹性体垫片,“O”形环,挤压密封和楔形密封;导线、排囊薄膜	在管路、阀门箱体、轴上的静密封与动密封控制液体推进剂的流动和贮存,推进剂排囊
液压系统	金属材料(不锈钢、镍铜合金、铝合金),丁腈橡胶,氟碳弹性体(Viton,氟硅橡胶)	金属垫片,弹性体垫片,“O”形环,挤压密封和唇形密封	用于流体压力很高和高温情况下,管路、阀门和油箱上的静态、动态密封
气动系统	丁基橡胶、丁腈橡胶、硅橡胶、氯丁橡胶,Viton 氟橡胶,聚硫橡胶,聚氨酯橡胶,增强碳纤维复合材料 Nomex 毡,Inconel 镍基合金等	弹性体密封件,腻子,橡胶膜片“O”形环,垫片	静态密封,维持系统的气密性(低压)和保持气动压力系统(高压,适当温度),热静(或摆动)密封

## 3 空间站密封材料配方研制

空间站中密封部位很多,各部位有不同的密封介质和使用环境,这对材料的性能有不同的要求,本研究主要是针对空间站气动系统的密封材料进行了配方研制,如舱门、舷窗、舱体间的结构密封等。另外,还初步对空间站推进系统及液压系统密封材料进行了研制。

### 3.1 气动系统密封材料配方研制

宇航材料工艺 2002年 第6期

气动系统是空间站的主要密封系统之一,它直接影响密封舱内的工作环境和宇航员的生命安全。该系统密封环境无特殊液体介质,如舱门、舷窗、舱体间结构密封等。根据环境特点,对该系统的密封材料配方进行了重点研究。确定主体材料、硫化体系及补强体系的种类及用量。所研制的配方 QD42A 综合性能与美国宇航材料 AMS3345B 的技术要求基本接近,见表2。材料的环境适应性与空间

卫生性均符合欧空局对材料的筛选标准。

表 2 QD42A 配方与 AMS3345B 性能对比

Tab. 2 Property comparison between the formula of QD42A and AMS3345B

配方	常温物理机械性能					热空气老化性能 <sup>*</sup>			高温压缩永久变形 <sup>**</sup> / %	低温脆性性能 <sup>***</sup>
	硬度 (邵 A)	100 % 定伸 强度/MPa	拉伸强度 /MPa	撕裂强度 /MPa	扯断伸长率 / %	硬度变化 (邵 A)	拉伸强度变 化率/ %	扯断伸长率 变化率/ %		
QD42A 实测数据	55	1.4	7.9	27.7	396	1	- 3	- 10	23.8	合格
AMS3345B 指标要求	50 ±5	< 6.2	> 6.86	> 26.2	> 450	0 ~ 15	< 40	< 50	< 55	合格

\* 配方 QD42A 数据是在 (200 ±2) ×24 h 条件下测得, 配方 AMS3345B 数据是在 (225 ±2) ×24 h 条件下测得。

\*\* 配方 QD42A 数据是在 (200 ±2) ×24 h、30 % 压缩率条件下测得, 配方 AMS3345B 数据是在 (225 ±2) ×24 h 条件下测得。

\*\*\* 配方 QD42A 性能是在 - 74 条件下测得, 配方 AMS3345B 性能是在 - 75 条件下测得。

### 3.2 空间站推进系统与液压系统密封材料初步研制

推进系统密封材料的工作环境为液体推进剂, 由于液体推进剂有极强的氧化性和还原性, 这对密封材料提出了苛刻的性能要求, 密封材料必须与推进剂有很好的相容性。为此选用了液体推进剂中有代表性的无水肼作为相容性试验的介质, 对密封材料进行了配方研制。

通过资料调研和实验对主体材料和配方组分进行了筛选, 初步研制出了以三元乙丙橡胶为主体, 配合其它耐介质填料的耐液体推进剂的配方 TJ42B, 其性能见表 3。该配方与 NASA—Case—Npo—11433 与肼接触的橡胶排囊规范性能相当。

表 3 TJ42B 配方性能<sup>\*</sup>

Tab. 3 Properties of hydrazine-resistance material JT42B

项目	强度 /MPa	伸长率 / %	硬度 (邵 A)	质量 /g	弹性模量 /MPa
实测值	16.08	512.4	72	-	0.76
浸泡后变 化率/ %	- 18.90	+ 5.39	0	+ 7.45	- 36.8

\* 浸泡介质为无水肼, 时间为 14 d。浸泡 10 d 后材料无明显变化。

液压系统密封材料工作环境为油类, 这要求材料耐油性要好, 并且要有好的空间环境适应性, 为此研制了几种耐油配方, 表 4 是其中综合性能较好的氟硅橡胶配方 YY42C, 其性能优于 GB1790—93 耐燃油氟硅橡胶材料规范中 型材料。

表 4 YY42C 配方性能

Tab. 4 Properties of oil-resistance material YY42C

硬度 (邵 A)	拉伸强度 /MPa	伸长率 / %	热老化性能				耐油性		压缩永久变形/ %		耐 12 <sup>#</sup> 航空油		
			200 强度变化 率/ %	×20 h 伸长率变 化率/ %	250 强度变化 率/ %	×4 h 伸长率变 化率/ %	1 <sup>#</sup> 标准油 体积变化 率 V/ %	100 质量变化 率 G/ %	×72 h	压缩率 30 % 200 250 20 h 4 h	脆性温 度/	150 强度变 化率/ %	×24 h 伸长率变 化率/ %
65	6.6	215	+ 3.2	- 4.8	- 2	+ 13	- 0.07	+ 0.13	27.6	24.2	< - 50	16.7	5.2

### 4 空间站密封材料的环境适应性分析

影响密封材料的空间因素主要有: 高真空、粒子辐照、高低温。本研究针对以上因素对材料的环境适应性给出评价。

#### 4.1 低温试验

欧空局对空间密封橡胶材料使用温度范围的典型值为 - 80 ~ + 200。美国宇航材料标准要求

脆性温度达到 - 75。我们研制的橡胶材料, 经测试, 脆性温度达到 - 74 以下, 为国外同类材料水平, - 55 时压缩耐寒系数达到 0.82, 表明低温下材料的回弹性非常好, 可实现良好的低温密封, 基本上能够满足低温环境对材料的性能要求。

#### 4.2 高温试验

用差热分析方法测得密封材料的分解温度为  
宇航材料工艺 2002 年 第 6 期

426 ,具有较好的热稳定性;在 200 进行热空气老化实验,力学性能变化率小于 20 % ,高温压缩永久变形小于 40 % ,达到美国宇航材料 AMS3345B 的标准要求。

#### 4.3 辐照试验

对密封材料在空间辐照环境下的适应性评估是相当困难的,首先,辐照剂量难以确定,轨道上的辐照剂量是时间、空间的函数,具有不确定性,而且结构材料的屏蔽作用难以估计,各种粒子的贡献难以统计;其次,模拟试验中的辐照源不可能完全再现空间环境,为了对材料作出初步的评估,需要对各种因素作合理的简化。假定空间站运行在 300 km 的低地球轨道上,倾角 28.5°,屏蔽材料为铝材,经简化计算,20 y 的累计吸收量为  $2.86 \times 10^4$  rad,可能的最大剂量为  $4.4 \times 10^4$  rad。在这两个辐照剂量下,用  $Co^{60}$  作辐照源进行辐照试验,得到的结果如表 5 所示。

表 5 不同辐照剂量下材料力学性能的变化  
Tab.5 Influence of radiation dose on mechanical performance of seal material

辐照剂量 / $10^4$ rad	拉伸强度变 化率/ %	扯断伸长率 变化率/ %
2.86	+1.6	0
4.4	+3.1	-21.5

实验结果表明:研制出密封材料具有相当好的耐辐照老化性能。

#### 4.4 真空试验

在真空环境下,空间材料的逸气性一直是人们关注的问题,材料空间的真空性能原位测试与评价主要包括:真空中材料质量损失测试,真空中材料可凝挥发物测试,这二项指标是评价材料空间真空性能的首选指标。在  $2 \times 10^{-4}$  Pa 的高真空环境下,对密封材料进行真空性能原位测试,所得结果如表 6 所示。实验表明,材料总的质量损失、可凝挥发物含量均符合空间材料的要求。

表 6 材料的真空性能

项目	可凝挥发物含量	总的质量损失
实测值	$1.43 \times 10^{-2}$	0.46
NASA、ESA 标准	<0.1	<1

## 5 空间密封材料卫生性评价

### 5.1 气味试验

产生气味是聚合物的重要特征,本文研制的密封材料在 68 下连续烘烤 72 h,打开密闭窗口时无不适的气味,不会影响宇航员的主观舒适性。

### 5.2 逸气成分的定性定量分析

由于技术复杂,逸气成分的定性定量分析检测往往不完全。另外,由于缺乏有害气体联合作用方面的资料,促使人们只关注材料逸气物中毒性大和带有共性的成分。应用 HEWLETT PACKARD 6890 色—质联用仪,对密封材料的逸气成分进行定性分析,分析结果表明有机成分的含量极少,在仪器精度范围内,基本上测不出有机成分。应用日本岛津 GC9A 气相色谱仪作进一步的定量分析,密封材料逸气成分中全部有机物的含量均少于 ESA DSS—01—729 规定的  $100 \mu\text{g/g}$ ,并且均无含量大于  $10 \mu\text{g/g}$  的逸气成分,符合空间材料的卫生性要求。

## 6 结论

在分析空间密封材料的使用环境与性能要求,并对国外航天器用密封材料进行了调研的基础上,研制出的空间站气动系统用密封材料配方 QD42A,综合性能与美国同类型密封材料性能相当;研制的推进系统配方 T42B 与液压系统密封材料配方 YY42C 具有较好的耐介质性能;通过对材料的环境适应性分析,表明该配方具有较好的环境适应性,适合于空间站密封;通过对材料的卫生性评价,表明该材料不会对空间站舱内环境造成不良影响。

### 参考文献

- 1 邱惠中.宇宙飞船用关键材料工艺的发展研究.见:刑继发.航天情报研究报告(系列文集第八集).北京:航空航天部航天情报研究所,1993:517~529
- 2 李承受.低地球轨道环境条件下材料的行为特性.见:刑继发.航天情报研究报告(系列文集第四集).北京:航空航天部航天情报研究所,1990:509~512
- 3 夏益霖,刘钟,方良玉等.前苏联载人航天器的环境控制和生命保障系统.出国考察技术报告,1993;105(2):31~32
- 4 余秉良.航天舱室内非金属材料的两重性毒性危险与卫生学评价.航天医学与医学工程,1994;7(1):70~71
- 5 ESA pss-01-729
- 6 NHB8060.1C.
- 7 ESA pss-01-721

(编辑 马晓艳)