

灌封用硫化硅橡胶空间适用性分析

何端鹏¹ 袁翠萍² 王楠³ 张静静¹ 高鸿¹ 邢焰¹

(1. 中国空间技术研究院材料可靠性中心, 北京, 100094; 2. 北京卫星制造厂有限公司电子装联中心, 北京, 100094; 3. 北京卫星制造厂有限公司热表工程中心, 北京, 100094)

摘要: 针对航天器灌封用硫化硅橡胶, 研究了其在 γ 射线辐照前后电学性能及力学性能的变化规律, 揭示了引起性能变化的内部状态的变化及性能变化机理, 同时也研究了其在空间站和载人舱中应用时的阻燃特性、逸出有害气体情况、抗菌防霉性能。结果表明, 总剂量辐照后硫化硅橡胶的红外特征峰峰位和峰强基本上未产生变化, 热分解行为也无变化, 但绝缘性能增强, 力学性能随着剂量的提升先增强后衰减, 硬度不断增大然后趋于稳定, 阐述了出现这些现象的原因。在载人舱中应用时应注意垂直燃烧特性及对部分细菌的抗菌性能。研究成果可为硫化硅橡胶在航天器中的使用提供参考和指导。

关键词: 硫化硅橡胶; γ 射线辐照; 阻燃; 逸出有害气体; 抗菌防霉

中图分类号: TQ333.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)S-0118-07

Applicability of Vulcanized Silicone Rubber Used in Encapsulation of Aerospace Devices

HE Duanpeng¹, YUAN Cuiping², WANG Nan³, ZHANG Jingjing¹, GAO Hong¹, XING Yan¹

(1. Division of Material Engineering, Material Reliability Center, China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China; 2. Electronic Assembly Center, Beijing Space Crafts, Beijing, 100094, China; 3. Thermal Control and Surface Treatment Department, Beijing Space Crafts, Beijing, 100094, China)

Abstract: In this paper, the effects of γ -ray radiation on the electrical and mechanical properties of vulcanized silicone rubber used for spacecraft encapsulation are studied. The internal state of the silicone rubber before and after γ -ray irradiation and evolution mechanism is explained. The flame retardant characteristics, harmful gas emission and antibacterial properties of silicone rubber for space station and manned cabins are illustrated. The results show that the infrared characteristic peaks and thermal decomposition temperature remain generally unchanged after irradiation, while the electrical insulation becomes strengthened. With the increase of radiation dose, the tensile strength first increases and then decreases, the elongation at break decreases gradually, and hardness increases and then becomes stable. This paper expounds the cause of these phenomena respectively. Attention should be paid to vertical combustion characteristics and resistance to certain bacteria in application of manned cabins. The research provides instructions and guidance for engineers to select vulcanized silicone rubber in spacecraft.

Key words: vulcanized silicone rubber; γ -ray irradiation; flame retarding; harmful gas emission; antibacterial

硫化硅橡胶是典型的半无机半有机高分子硅材料, 兼具无机及有机材料的特点, 具有耐臭氧、耐紫外、耐气候、耐高低温、耐烧蚀以及良好的电气绝

缘性能等优点, 在器件固定及铸型方面发挥着重要作用, 是航天航空领域常用的非金属灌封材料^[1]。但是材料应用于航天航空领域, 由于飞行器的高标

收稿日期: 2019-04-09; **修订日期:** 2019-06-20

通信作者: 高鸿, 女, 高级工程师, E-mail: gaohong.cast@sina.com; 邢焰, 男, 研究员, E-mail: xingyan@sohu.com。

引用格式: 何端鹏, 袁翠萍, 王楠, 等. 灌封用硫化硅橡胶空间适用性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 118-124. HE Duanpeng, YUAN Cuiping, WANG Nan, et al. Applicability of Vulcanized Silicone Rubber Used in Encapsulation of Aerospace Devices[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 118-124.

准,要求选用综合性能优良的材料。同时,由于服役所处环境的复杂性^[2-5],除了空间极限高低温影响外,还会遭受各类射线粒子的作用,可能导致其性能的退化^[6-8],如材料的硬度与韧性等力学性能的变化,造成器件或单机失效,影响系统可靠性。相关研究已有大量的报道,比如,Maxwell等^[9]对聚二甲基硅氧烷-聚甲基苯基硅氧烷共聚物体系进行了Co-60 γ 射线辐照加速老化试验,并分析了辐照对材料的影响。Labouriau等^[10]研究了二氧化硅填充硫化硅橡胶泡沫的电离辐射效应,其所研究的体系中辐照引起的交联反应在剂量范围内占主导地位。Liu等^[11]研究了 γ 射线辐照对氟硅橡胶性能的影响,分析了 γ 射线照射前后氟硅橡胶的表面形貌以及力学和动态力学性能。但以往研究主要集中在硅橡胶的力学性能的变化,对于电学性能的变化规律研究相对较少,同时对于硅橡胶的内部状态以及粒子对性能的影响机理鲜有研究。同时还注意到,随着新型硫化硅橡胶在载人飞船及空间站中的应用推广,确有必要开展硫化硅橡胶在载人舱中的适用性研究。

本文针对灌封用硫化硅橡胶,研究了其在 γ 射线辐照前后电学性能及力学性能的变化规律,揭示了硅橡胶辐照前后内部状态变化情况及性能变化机理,同时也研究了其在空间站和载人舱中应用时的阻燃特性、逸出有害气体情况、抗菌防霉性能。研究成果将为此类灌封胶在航天器件及空间载人舱内的设计选用提供参考和指导。

1 实验方法

1.1 实验胶料

实验胶料为日本信越化学工业公司(Shin-Etsu)生产的液态双组份胶黏剂,牌号为KE1310ST,使用时将两种组分按照比例混合均匀并脱泡后对产品进行灌封,固化后为弹性固体。其基本组成如表1所示,由基础胶、增强填料和助剂3部分构成。基础胶为基础材料,增强填料用于提升硫化硅橡胶的物理强度,而助剂包括催化剂及功能助剂。

1.2 固化

硫化硅橡胶是含氢基硅氧烷(Si-H)和乙烯

基硅氧烷(Si-CH=CH₂)以及二氧化硅(SiO₂)补强填料在铂系催化剂的作用下发生加成反应生成的固化物。固化前为线型聚硅氧烷,固化后变为网状结构的弹性体。固化时将A,B两种组分按10:1的质量比进行配比混合,并搅拌均匀,真空除气,进行样品制备,完成后再次进行真空除气,随后固化制得样品。具体流程如图1所示。

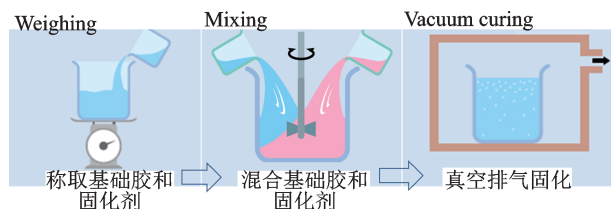


图1 硫化硅橡胶固化过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of curing process of vulcanized silicone rubber

1.3 辐照实验

将固化后的硫化硅橡胶真空封装,放进辐照装置中,启动钴源;总剂量控制为 6×10^5 rad(Si), 6×10^6 rad(Si), 9×10^6 rad(Si), 6×10^7 rad(Si),辐照剂量率为200 rad(Si)/s。

1.4 性能测试

使用旋转黏度计(DV2TRVTJ0, Brookfield)对硫化硅橡胶两组分及混合体系的黏度进行测试。基于阿基米德原理,采用排水法测定固化后试样的密度(ρ)。采用LX-A型邵氏硬度仪(07107136,上海伦捷机电仪表有限公司)测试试样的表面硬度。使用热失重分析仪(TGA, NETZSCH, STA 449F3)测定样品的TGA曲线,测试氛围:空气或氮气中,测试温度范围:室温到500 °C,升温速率:10 °C/min。利用傅里叶变换红外测试仪(Nicolet 6700, Thermo)对辐照前后试样进行红外光谱分析。采用差示扫描量热仪(DSC 200 F3 NETZSCH)测试橡胶的比热容(C_p),采用激光闪射仪(LFA 467, NETZSCH)测试其热扩散系数(β),并通过式(1)计算得到导热系数。

$$\lambda = \rho \times C_p \times \beta \quad (1)$$

采用电子万能试验机(MTS6104,美特斯工业系统(中国)有限公司)测定试样的拉伸强度、断裂伸长率。粒子辐照前后的体积电阻率采用高阻测量仪(4339B, Agilent)测定。阻燃特性使用HV-FAA燃烧箱中进行测定。逸出有害气体采用气相色谱仪、气相色谱质谱联用仪及电子天平进行测定。硅橡胶的抗菌性能采用恒温培养箱、冷藏箱、生物光学显微镜、电热干燥箱等设备进行测定,霉菌试验采用MJX-150B型霉菌培养箱进行测定。

表1 硫化硅橡胶的基本组成

Tab.1 Composition of vulcanized silicone rubber

成分	组成
基础胶	甲基乙稀基硅油
	甲基含氢硅油
增强填料	白炭黑、硅树脂
助剂	乙烯基铂络合物
	阻聚剂、增塑剂

2 结果与讨论

2.1 基础性能分析

硫化硅橡胶A组分黏度为82.2 Pa·s,离散系数为1.43%(采用7号转子进行测试),B组分黏度为1.12 Pa·s(采用6号转子进行测试),离散系数为0.13%,说明硅橡胶两组分胶液均匀性良好。将两组分按10:1的质量比混合后体系黏度随时间变化如图2(a)所示,黏度随着时间的增长而增大(采用7号转子进行测试)。固化后固体试样密度为1.079 g/cm³,离散系数为0.026%,邵氏硬度测试结果为43H_A,离散系数1.29%,表明固化后硫化硅橡胶的均匀性依然良好。硫化硅橡胶在氮气气氛及空气气氛中测试得到的热分解温度分别为412,378 °C,在惰性气氛中的热分解温度高于空气气氛中的热分解温度,如图2(b)所示,表明惰性气氛中硫化硅橡胶的热稳定性优于空气气氛中的热稳定性。分析原因是相比惰性气氛保护,硅橡胶在空气中受热时,通常会发生侧链有机基团的氧化及主链Si—O—Si键的裂解反应,从而降低聚硅氧烷的耐热性。

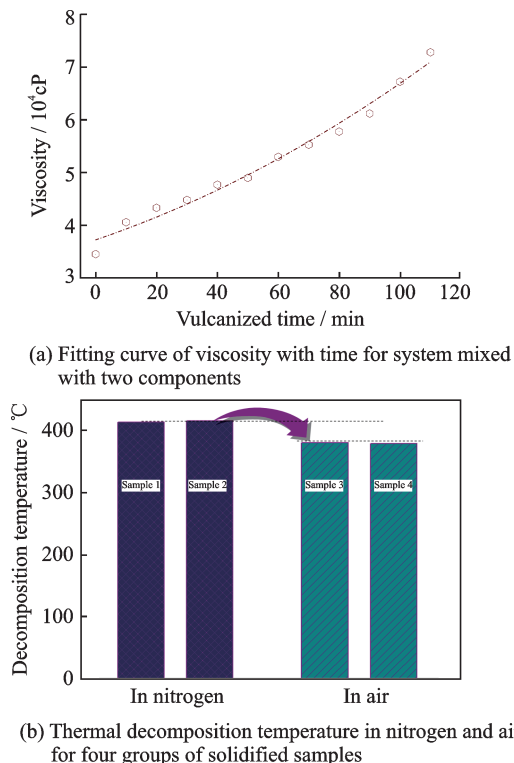


图2 混合原胶液的黏度特性及固化胶的耐热特性

Fig.2 Viscosity properties of mixed adhesive raw materials and heat resistance of cured adhesive

硫化硅橡胶的导热系数在-80~100 °C下接近0.20 W/(m·K),优于普通橡胶^[12-13],但相比导热胶,其导热效果一般,应用于高功率器件或者散热要求较高的器件时应提高警惕。

2.2 总剂量辐照效应

选取未经辐照及经总剂量 6×10^7 rad(Si)粒子辐照后的试样进行外观观察、红外分析及热失重分析。图3(a)为辐照前后的试样外观图片。辐照后,试样外观颜色明显变黄。同时用手触摸试样,发现试样弹性降低,明显变硬。图3(b)为硫化硅橡胶辐照前后试样的红外光谱,由图可知,2963 cm⁻¹附近的吸收峰对应于-CH₃中的C—H反对称和对称伸缩振动^[14],1400 cm⁻¹附近吸收峰归属于-CH₃和其他基团中的C—H变角振动,1260 cm⁻¹附近出现明显且比较强的吸收峰,归属于Si—CH₃振动峰^[15],1010~1070 cm⁻¹出现非常大的吸收峰是大量的Si—O—Si,800 cm⁻¹附近出现尖锐单吸收峰是Si—(CH₃)₂,700 cm⁻¹附近出现吸收峰对应于Si—(CH=CH₂)^[16]。硅橡胶既含有有机基团又具有无机结构的特殊结构,使它具有有机物的特性,又兼具无机物的功能。其分子主链由键能较高的硅氧键(Si—O—Si)组成,侧基含有各类有机基团。值得注意的是,经过总剂量辐照后硫化硅橡胶的特征峰峰位、强度基本上没有变化,说明该体系发生辐照降解或交联反应并未产生新的官能团。

而硅橡胶受热过程会发生侧链有机基团的分解反应,温度继续升高则发生主链的裂解。图4(a)为硅橡胶辐照前后的热分解实验结果,热失重

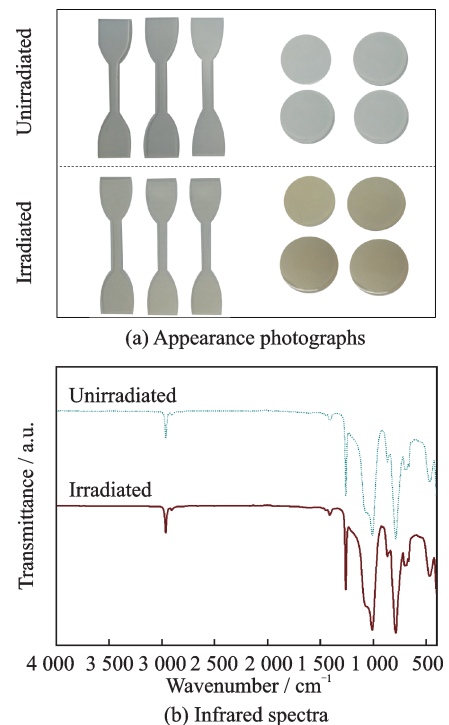
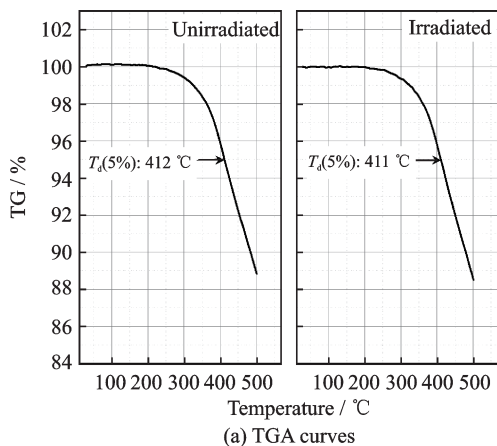
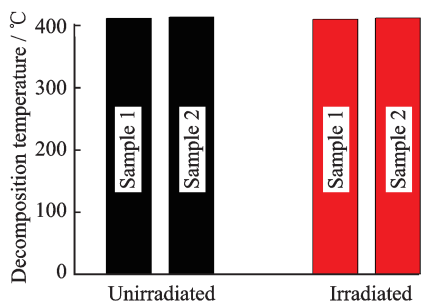


图3 硫化硅橡胶辐照前后的外观照片及红外光谱图
Fig.3 Appearance photographs and infrared spectra for vulcanized silicone rubber before and after γ -ray irradiation

曲线表明辐照前后的硫化硅橡胶热分解行为基本一致,350℃以后体系分解加剧,热失重达到5%时的温度分别为411,412℃,说明粒子辐照对硫化硅橡胶的热稳定性无显著影响。



(a) TGA curves



(b) Thermal decomposition temperature

图4 硫化硅橡胶辐照前后的热稳定性分析

Fig.4 Thermal decomposition test results of the vulcanized silicone rubber before and after γ -ray irradiation

如图5所示,辐照后的硅橡胶的体积电阻率相对于辐照前提升了一个数量级,表明粒子辐照有利于增强硅橡胶的绝缘性能。分析原因是硅橡胶发生交联固化反应时内部形成孔穴(见图6,球棍模型中分子交联点附近的空位),辐照后硅橡胶自由体积收缩,孔穴变小,而孔穴的体积电阻率相对较小,导致硅橡胶的绝缘性能增强。另外,固化过程若有残留助剂小分子,则会形成微气泡,经过粒子辐照后,微气泡逸出,也会导致硅橡胶的绝缘性能增强。上述两种过程可由密度测试结果得到证实,试样未经辐照含有更多的孔穴(微气泡),其密度较低,辐照后自由体积收缩,孔穴减小(或内部微气泡逸出,气泡减少),密度增大。通过测试不同剂量辐照的试样密度发现,随着辐照剂量的提升,硅橡胶的密度逐渐增大,如图7所示。

硅橡胶邵氏硬度(Shore A)随总剂量的变化关系见图8(a),在辐照初始阶段,硬度增加较快,之后随着总剂量的增加,硬度变化趋向平缓,表现出一定的饱和趋势,而且后期硅橡胶已经变脆而失去弹

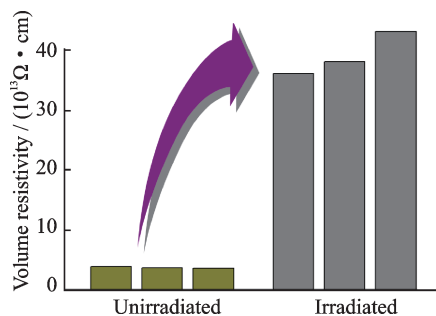


图5 粒子辐照前后硅橡胶的体积电阻率

Fig.5 Volume resistivity of un-irradiated and irradiated silicone rubber

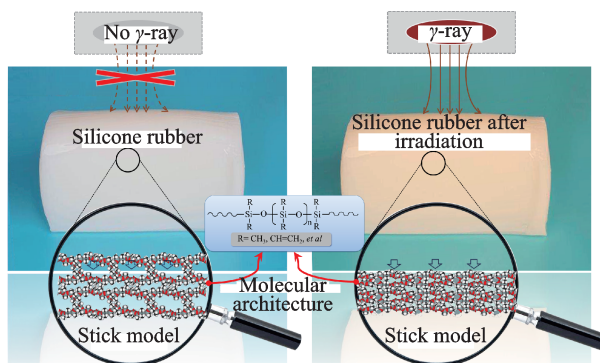


图6 硅橡胶结构变化过程

Fig.6 Process of structure change

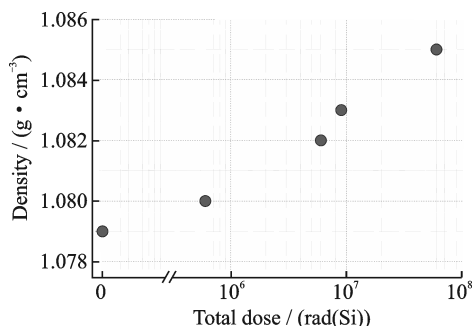
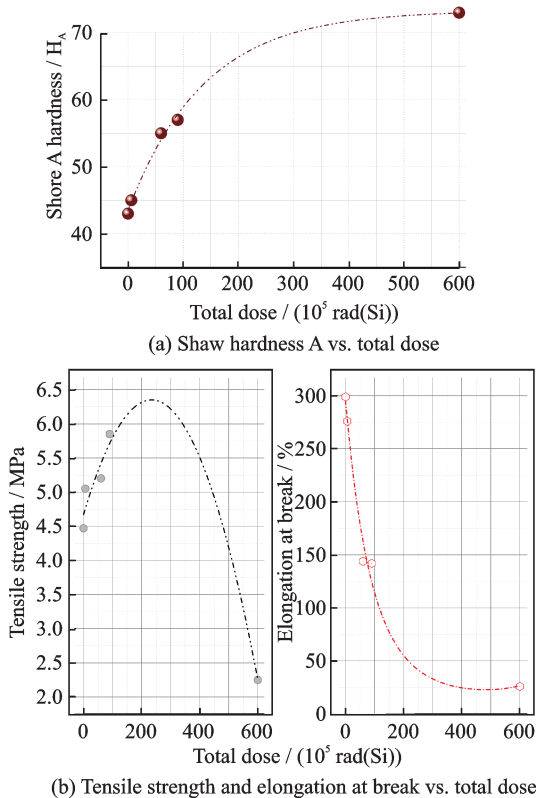


图7 密度随总剂量的变化关系

Fig.7 Density vs. total dose

性。在辐照过程中,硅橡胶同时发生辐射交联和裂解反应,其力学性能的变化与辐射交联和裂解的相对强弱存在联系。如图8(b)所示,在辐照剂量相对较小的初始阶段,硫化硅橡胶的力学性能(拉伸强度)有一定幅度的提升,表明硫化硅橡胶在该辐照剂量区段,发生的反应以交联为主。随着剂量的提升,力学性能会发生快速的衰减,这个阶段,体系发生的反应主要以降解反应为主。根据硫化硅橡胶应用于航天器的实际环境,在低轨航天器及空间站中(累计剂量 $<9 \times 10^6$ rad(Si)),其辐照后的力学性能能保持稳定甚至增强,而在高轨辐照(累计剂量 $\sim 6 \times 10^7$ rad(Si))环境下,电离导致了硅橡胶Si-O主链、侧链甲基、乙烯基等化学键断裂,硫化



(b) Tensile strength and elongation at break vs. total dose

图8 硅橡胶在粒子辐照前后的力学性能

Fig.8 Variation of mechanical properties of silicone rubber with total irradiation dose

硅橡胶的拉断伸长率急速下降,硅橡胶趋于脆化而失去弹性,这跟硫化硅橡胶辐照后的硬度变化趋势相吻合。大辐照剂量下由于发生降解反应更加剧烈,形成一些气体分子和固体产物,这也是硅橡胶辐照后出现刺鼻性气味的缘故。

2.3 阻燃特性、逸出有害气体及抗菌防霉性能

硫化硅橡胶应用于载人舱及空间站时,由于舱内特殊的密闭特性,热解和燃烧事故、非金属材料脱气及人体代谢滋生霉菌等构成了主要风险点。所以本文研究了硫化硅橡胶的阻燃特性、逸出有害气体情况、抗菌防霉性能。

聚合物材料的有氧燃烧过程会经历受热升温、发生相变、分子分解、起火燃烧、火焰传播、充分燃烧、熄灭等阶段。硫化硅橡胶发生燃烧时,其历程包括,侧链有机基团被氧化分解成小分子物,温度继续升高时,则发生主链的裂解,生成低分子量的硅氧烷,在氧气存在下燃烧,在更高温度下,硅橡胶会生产 SiO_2 ,其表面则形成陶瓷薄层,中断热量传递,阻止内部继续燃烧。垂直燃烧试验测定结果中熄灭时间为 20 s,该结果不满足《民用飞机舱内非金属材料燃烧性能要求》(HB 5470—1991)中规定的“移去火源后的平均续燃时间不得超过 15 s”的要求^[17],因此建议使用时采取特定保护措施,比如使用热缩套管等对其进行热缩处理,外部用金属壳

体隔离。水平燃烧试验项目能够达到阻燃试验考核指标,满足飞船、空间站的使用要求(表 2,3)。

表 2 硫化硅橡胶 12 s 垂直燃烧试验检测结果

Tab. 2 Results of 12 s vertical combustion test

试样编号	熄灭时间 / s	燃烧长度 / mm	滴落物熄灭时间 / s
1	18	4	0(无)
2	21	3	0(无)
3	20	3	0(无)
平均值	20	3	0

注:火焰温度:855 °C,水平燃烧同

表 3 硫化硅橡胶 15 s 水平燃烧试验检测结果

Tab. 3 Results of 15 s horizontal combustion test

试样编号	燃烧速率 / ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	0
2	0
3	0
平均值	0

非金属材料脱气产生的有害气体无法排除到外界环境,积聚舱内会对航天员的生命安全和身心健康及工作效能造成伤害。测试结果表明,在 50 °C 下,硫化硅橡胶逸出一氧化碳含量($0.037 \mu\text{g}/\text{g}$)、总有机物含量($43.913 \mu\text{g}/\text{g}$),具体逸出各类有机物含量详见表 4,小于空间站有害气体限定释放量。气味等级为 1.5 级。实验结果可为空间站乘员舱内硫化硅橡胶的选用、设计和实施以及污染物控制提供参考。

硫化硅橡胶抗细菌率的检测结果见表 5,对表皮葡萄球菌、金黄色葡萄球菌抗细菌率分别达到

表 4 主要挥发性有机物组分及检测质量浓度

Tab. 4 Main volatile organic components and detection concentration

有机物	含量 / ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
2-丁烯	0.040
三甲基硅烷	0.353
乙醛	4.410
三甲基氟硅烷	0.401
乙醇	0.060
丙酮	0.082
异丙醇	0.047
二氯甲烷	0.004
三甲基硅醇	30.369
乙酸乙酯	0.072
呋喃	0.028
六甲基二硅氧烷	0.429
2-氯乙烯基二甲基乙氧基硅烷	7.618
总计	43.913

表5 硫化硅橡胶抗细菌率检测结果

Tab. 5 Antibacterial test results

细菌名称	抗细菌率 / %
大肠杆菌	75
金黄色葡萄球菌	94
白色念珠菌	0
表皮葡萄球菌	96
藤黄微球菌	0
变异库克菌	0

96%和94%,具有优异的抗菌性能。硫化硅橡胶试样上大肠杆菌生长缓慢,对大肠杆菌有一定的抗菌性能。但白色念珠菌、藤黄微球菌、变异库克菌能够存活并大量生长,表明硫化硅橡胶对白色念珠菌、藤黄微球菌、变异库克菌3种细菌无抗菌性能,因此使用时应注意对白色念珠菌、藤黄微球菌、变异库克菌3种细菌的抗菌要求。对硫化硅橡胶进行防霉性能评价,实验霉菌种类为:黄曲霉、杂色曲霉、绳状青霉、球毛壳霉、黑曲霉,检测发现无明显的霉变,长霉等级为1级,具有抗霉菌作用。根据硅橡胶的使用部位及环境不同,其可能受污染的菌种也不一样,本研究选取了易污染橡胶的菌种开展实验,在密封舱内若有特殊应用场合应全面评估霉变菌种,适当增加其他菌种做验证分析。

3 结 论

本文针对航天器灌封用硫化硅橡胶,研究了经过 γ 射线辐照其电学性能及力学性能的变化规律,揭示了引起性能变化的内部状态变化情况及性能变化机理,同时也研究了其在空间站和载人舱中应用时的阻燃特性、逸出有害气体情况、抗菌防霉性能,并获得以下结论:

(1)总剂量辐照后硫化硅橡胶的红外特征峰峰位、峰强基本未发生变化,热分解行为也无变化,但体积电阻率增大一个数量级,绝缘性能明显增强,原因是辐照后硅橡胶自由体积收缩,孔穴减小(以及残留微气泡逸出)。力学性能随着剂量的提升先增强后衰减,邵氏硬度不断增大然后趋于稳定,原因是辐照过程中,硅橡胶同时发生辐射交联和裂解反应,其力学性能的变化取决于辐射交联和裂解反应的相对强弱。

(2)硫化硅橡胶垂直燃烧试验熄灭时间为20 s,因此建议使用时采用包裹处理。硅橡胶逸出气体情况:一氧化碳含量(0.037 $\mu\text{g/g}$)、总有机物含量(43.913 $\mu\text{g/g}$),气味等级为1.5级。测试结果可为空间站舱内安全防火设计以及污染物控制提供参考。

(3)硫化硅橡胶对表皮葡萄球菌、金黄色葡萄

球菌的抗菌率分别达到96%和94%,具有优异的抗菌性能,对大肠杆菌有一定的抗菌性能,但对白色念珠菌、藤黄微球菌、变异库克菌3种细菌无抗菌性能。硅橡胶长霉等级为1级,具有抗霉菌作用。研究结果将为硫化硅橡胶在密封舱内使用能否满足微生物控制要求提供参考和指导。

参考文献:

- [1] 雷燕,吴峰,陆丹,等. 实用化工材料手册[M]. 广州:广东科技出版社,1994:127-128.
- [2] CHEN Jun, DING Nengwen, LI Zhifeng, et al. Organic polymer materials in the space environment [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2016, 83:37-56.
- [3] PEI Xianqiang, LI Yan, WANG Qihua, et al. Effects of atomic oxygen irradiation on the surface properties of phenolphthalein poly(ether sulfone) [J]. Appl Surf Sci, 2009, 255(11):5932-5934.
- [4] BRISKMAN B, BELYAKOV A, KLINSHPONT E, et al. Space environment simulation for radiation tests of materials: Third version of an international standard [J]. High Perform Polym, 2001, 13(3):483-492.
- [5] MUSABAEV T, ZHANTAYEV Z, GRICHSHENKO V. Complex influence of space environment on materials and electronic devices In the conditions of microgravity [J]. Advances in Space Research, 2016, 58(6):1138-1145.
- [6] 刁岫. 新型硅橡胶的制备与性能研究[D]. 济南:山东大学, 2011.
DIAO Shen. Study of preparation and properties of new silicon rubber [D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [7] 郑玉展,蔡震波. 甲基苯基乙烯基硅橡胶电离总剂量效应 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(12):124001-1-5.
ZHENG Yuzhan, CAI Zhenbo. Total dose effect of ionization of methyl phenyl vinyl silicone rubber [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(12):124001-1-5.
- [8] HUANG Wei, FU Yibei, WANG Chaoyang, et al. A study on radiation resistance of siloxane foam containing phenyl [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 64(3):229-233.
- [9] MAXWELL R S, COHENOUR R, SUNG W, et al. The effects of γ -radiation on the thermal, mechanical, and segmental dynamics of a silica filled, room temperature vulcanized polysiloxane rubber [J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 80(3):443-

- 450.
- [10] LABOURIAU A, CADY C, GILL J, et al. The effects of gamma irradiation on RTV polysiloxane foams[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, 117:75-83.
- [11] LIU Y, ZHOU C, FENG S. Effects of γ - ray radiation on the properties of fluorosilicone rubber[J]. *Materials Letters*, 2012, 78:110-112.
- [12] WANG Q, GAO W, XIE Z. Highly thermally conductive room-temperature-vulcanized silicone rubber and silicone grease [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 89(9):2397-2399.
- [13] MU Q, FENG S, DIAO G. Thermal conductivity of silicone rubber filled with ZnO [J]. *Polymer Composites*, 2007, 28(2):125-130.
- [14] ANYSZKA R, BIELIŃSKI D M, JĘDRZEJCZYK M. Thermal behavior of silicone rubber-based ceramizable composites characterized by Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy and microcalorimetry [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(12):1437-1440.
- [15] ZENASNI A, JOUSSEAUME V, HOLLINGER P, et al. The role of ultraviolet radiation during ultralow films curing: Strengthening mechanisms and sacrificial porogen removal [J]. *J Appl Phys*, 2007, 102(9):094107.
- [16] SOCRATES G. Infrared characteristic group frequencies tables and charts[M]. 2nd ed. Chichester, UK:John Wiley and Sons, 1994.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. HB 5470—2014, 民用飞机机舱内部非金属材料燃烧性能要求[S]. 2014.

(编辑:夏道家)