

空间飞行器用电线电缆绝缘材料

孙彩霞¹, 王复东¹, 马磊¹, 徐杰¹, 刘晓海², 王爱琴¹, 张涛¹

(1. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023;

2. 大连市环境保护局甘井子分局, 辽宁 大连 116031)

摘要: 综述了空间飞行器上常用的电线电缆绝缘材料—聚硅氧烷、含氟弹性体、聚酰亚胺的性能, 空间飞行环境对绝缘材料的要求和这三类材料的优缺点, 尤其是耐原子氧的性能进行了比较, 含氟弹性体如氟化乙丙烯橡胶 (FEP) 受原子氧侵蚀最轻, 具有较强的耐原子氧能力。指出了新型空间飞行器用电线电缆绝缘材料的研究开发方向。

关键词: 电线电缆; 绝缘材料; 聚硅氧烷; 含氟弹性体; 聚酰亚胺; 空间飞行器

中图分类号: TM249; V259.5; TQ323.7; TQ333.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-9239(2004)02-0050-03

Insulating materials for spacecraft wire and cable

SUN Cai-xia¹, WANG Fu-dong¹, MA Lei¹, XU Jie¹,

LIU Xiao-hai², WANG Ai-qin¹, ZHANG Tao¹

(1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China;

2. Ganjingzi Branch of Dalian Environmental Protection Bureau, Dalian 116031, China)

Abstract: In this paper, the properties of three kinds of usual insulating materials (polysiloxane, fluorocarbon elastomer and polyimide) for spacecraft are reviewed, especially their resistibility to atomic oxygen is discussed. The future development of new insulating materials for spacecraft is prospected.

Key words: wire and cable; insulating material; polysiloxane; fluorocarbon elastomer; polyimide; spacecraft

1 前言

由于空间飞行器所处的特殊环境, 对电线电缆绝缘材料的性能提出了特殊的要求^[1]。除了要求具有优良的电气绝缘性能、质轻、低燃(或不燃)、耐高低温、优异的力学性能外, 还要求很低的真空脱气性、很高的耐原子氧和耐辐射等性能。

2 材料的种类

空间飞行器用电线电缆常用的有机高分子聚合物为聚硅氧烷、含氟弹性体和聚酰亚胺等。表 1 给出了这三类材料的部分性能。

这三类材料独特的分子结构决定了它们均具有优良的机械性能、耐热性、抗氧化性以及电绝缘性能^[2-6]。聚硅氧烷具有优异的耐电流超载能力, 无论在燃烧时或燃烧后都能维持耐电流超载能力^[7]。但是聚硅氧烷材料的真空脱气性较差、抗切断能力不高, 它最大的缺点是可燃, 且燃烧时有烟生成, 从而限制

了其应用。

虽然含氟弹性体的介电常数是最低的 (3.0 以下), 但是燃烧时会释放出剧毒和强腐蚀性的氟化氢气体, 给仪器设备和宇航员造成很大威胁, 还由于其密度大, 制成的绝缘材料比较重, 耐辐射性能也不是很理想, 耐寒性较差, 价格也较高, 这些在一定程度上限制其在空间飞行器上的应用。

在空间飞行器上应用最多的电绝缘材料是聚酰亚胺, 例如采用 Kapton* 聚酰亚胺薄膜绕包的电线电缆在飞行器的舱内舱外都用到它。在这三类材料中, 聚酰亚胺的耐辐射性能最好, 密度最小, 可大大减轻电线电缆的重量和空间^[8-9]。但是 Kapton* 易被原子氧侵蚀, 而且耐电弧能力差^[10]。

3 耐原子氧性能

美国航空航天局 (NASA) 对现有的绝缘材料在空间环境下长时间暴露实验表明, 原子氧、紫外辐射、离子辐射、冷热循环、微流星撞击等对材料都有损害, 其中以原子氧的侵蚀最为严重。表 2 列出了不同绝缘材料的耐原子氧性能^[11]。

收稿日期: 2003-10-17

作者简介: 孙彩霞, 女, 硕士, 助研, 主要从事航空航天用高分子材料方面的研究 (Tel: 0411-4379157, Email: suncx@dicp.ac.cn)。

表 1 各种电线电缆绝缘材料的性能

性能	聚酰亚胺 (Kapton [®])	聚四氟乙烯 (TEFLON [®])	氟化乙丙烯 (TEFLON [®])	聚四氟乙烯-乙烯共聚物 (TEFZEL [®])	聚硅氧烷 (RTV-615)
密度, g/cm ³	1.42	2.16	2.15	1.70	1.57
长期使用温度, ℃	260	260	200	150	200
限氧指数, %	43	95	95	30	22
介电常数, 1kHz	3.2	1.8~2.2	2.0	2.6	3.5
耐辐照性能, rads	5×10 ⁹	5×10 ⁵	5×10 ⁵	5×10 ⁷	10 ⁸
抗冷流能力	优	差	差	良	良
抗切断性能	优	差	差	良	差
真空脱气性	良	良	良	良	差

表 2 各种绝缘材料的耐原子氧性能 (在原子氧动能 4.5ev 时)

材料	聚酰亚胺 (Kapton [®])	聚四氟乙烯 (TEFLON [®])	氟化乙丙烯 (TEFLON [®])	聚硅氧烷 (RTV-615)	聚乙烯
原子氧侵蚀率 (×10 ⁻²⁴ cm ³ /atom)	3.0	0.05	0.037	0.05~1.5	3.7

3.1 聚硅氧烷

聚硅氧烷材料在低空间轨道中受原子氧的侵蚀率并不高, 其原因是聚硅氧烷表面暴露于原子氧后, 生成一薄层耐原子氧的氧化硅, 它可以保护下面材料不受进一步的损害^[12]。Scialdone 等^[13]的元素分析结果表明, RTV-615 硅橡胶在空间环境下长时间暴露的迎风表面, C 含量减少, Si 含量不变, O 含量增加了一倍。氧化收缩导致表面层有裂纹, 原子氧可以由此扩散到材料内层, 进一步侵蚀内层聚合物, 因此聚硅氧烷不适合耐原子氧壁垒^[14]。

3.2 含氟弹性体

实验结果表明, 氟化乙丙烯橡胶 (FEP) 受原子氧侵蚀最轻, 具有较强的耐原子氧能力。这可能与 FEP 结构中 (见图 1) 键能高和侧基保护有关。FEP 中 C-C 键能 4.3eV, C-F 键能高达 5.5eV, 而聚乙烯的 C-C 键能为 3.9eV。FEP 的侧基 (-CF₃、-F) 及其高的键能保护了主链。不然 FEP 暴露于原子氧环境中时, 其侵蚀率应该与聚乙烯接近, 而实际上 FEP 远比聚乙烯的侵蚀率小, 因此推测侧基 C-F 键的断裂是 FEP 受原子氧损害的主要机理。在低地球轨道环境中只有 30% 的原子氧具有 5.5eV 这么高的能量, 所以 FEP 的侵蚀率较低。

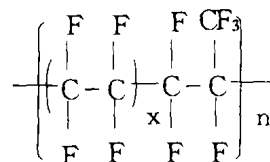


图 1 Teflon[®] FEP 的分子结构示意图

3.3 聚酰亚胺

聚酰亚胺的结构决定了在有原子氧存在的情况下它很容易受到侵蚀。在原子氧动能 4.5ev 时, 如果将 0.1mm 厚的 Kapton[®] 聚酰亚胺暴露于空间站舱外, 约 400 天就会被侵蚀掉; 在最大原子氧流时, 1mm 厚的 Kapton[®] 聚酰亚胺三年就会侵蚀完^[15]。

由于聚酰亚胺受原子氧侵蚀较为严重, 单独用于空间环境时寿命较短。然而目前它又是空间飞行器中必不可少的材料, 为了使之不受原子氧的侵蚀或减少其破坏程度, 人们对聚酰亚胺的改性或涂层修饰都作了很多研究^[16,17], 例如将 SiO_x、SiO₂、Al₂O₃ 喷溅沉积到 Kapton[®] 聚酰亚胺薄膜上, 可以防止原子氧的氧化。在聚酰亚胺高分子结构内引入硅氧键也可以提高其对原子氧的抵抗能力。表 3 给出了原子氧对改性后的聚酰亚胺的侵蚀率。

表 3 原子氧对改性聚酰亚胺的侵蚀率

材料	聚酰亚胺	硅氧烷/聚酰亚胺	Al ₂ O ₃ /聚酰亚胺	SiO ₂ /Al/聚酰亚胺
原子氧侵蚀率 (×10 ⁻²⁴ cm ³ /atom)	3.0	0.05	0.037	0.05~1.5

4 新的材料的研究与开发

上述三类材料各有优缺点, 将这三种材料混合使

用或相互共混、共聚改性是研究开发新型绝缘材料的

(下转第 55 页)

4 应用前景展望

由上可见,细胞介电电泳分离技术具有许多优点:第一,不需要添加抗体,因此,细胞不会在分离过程中因抗体反应而发生生物性质改变。第二,所用交变电场对细胞的作用是“非破坏性”的。初步研究证明,细胞经过这类电场作用后,其生长及分裂性质不会改变。第三,这类技术的使用灵活、电场强度、频率、相位都容易调控,便于自动化。第四,可以重复使用。第五,该技术还可与其它方法结合使用,以达到最佳的细胞分离检测效果。因此介电电泳分离技术完全可以用来替代传统的分离技术。作为电磁操作生物芯片技术中电场部分的主要应用基础,介电电泳具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 马立人,蒋中华.生物芯片[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [2] Pohl H A. Dielectrophoresis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

(上接第51页)

方向。如有机硅-聚酰亚胺共聚物,既具有无机硅优异的耐高温性和耐候性,又具有聚酰亚胺的韧性和强度,不仅克服了聚酰亚胺的脆性和难以加工的特点,也避免了有机硅强度低、易燃烧的缺点。该树脂的介电常数为2.9(1kHz),限氧指数达到46%,而密度只有1.18kg/cm³。这种混合树脂完全可以应用于单一聚合物不能使用的场合^[18]。

鉴于聚酰亚胺耐电弧能力差,目前NASA致力于寻找替代材料。实验发现,一种聚酰亚胺带和聚四氟乙烯层结合的绝缘结构可以明显地改进耐电弧性能^[19~20]。这种结构的电线可以阻断在电弧蔓延过程中由于热降解而生成碳的途径,同时在很宽的温度范围内能保持其机械性能,具有耐久性好、燃烧时发烟量小、便于安装、有多种来源和一定的产量等特点,作为宇航电线已经得到NASA的认可。

参考文献

- [1] W Khachen, et al. Aerospace-specific design guidelines for electrical insulation[J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1993, (5): 76~886.
- [2] L D Schwartz, et al. Heat release, flammability, smoke and toxic hazard of various aircraft insulated wires[J]. Proc. Int. Conf. Fire Saf., 1999, (27): 168~185.
- [3] A Hammoud, et al. Effects of thermal and electrical stressing on the breakdown behavior of space wiring[J]. Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., 1995: 266~269.
- [4] 孙彩霞,王复东,徐杰.空间飞行器阻燃防火材料研究报告-高性能聚酰亚胺材料的研制,中国国防科学技术报告GF863-2-2-1-15[M].大连:中国科学院大连化学物理研究所,2001.
- [5] 孙彩霞,王复东,徐杰.一种制备聚酰亚胺模塑粉的方法[P]. CN 1428360, 2001-12-25.

- [3] Jones T B. Electromechanics of particles[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, 5~33.
- [4] Pethig R. Dielectric and electronic properties of biological materials [M]. J. Wiley & Sons, 1979, 186~206.
- [5] Markx GH, Talary MS, Pethig R. Separation of viable and non-viable yeast using dielectrophoresis [J]. J Biotechnology, 1994, 32(1): 29~34.
- [6] Pethig R. Dielectrophoresis: using inhomogeneous AC electrical fields to separate and manipulate cells[J]. Crit. Rev. Biotechnology, 1996, (16): 331~348.
- [7] Sanders G H W, Manz A. Chip-based Microsystems for genomic and proteomic analysis[J]. Trends Anal Chem, 2000, 19 (6): 364~378.
- [8] Pethig R, Markx G.H. Applications of dielectrophoresis in biotechnology[J]. Trends in Biotechnology, 1997, (15): 426~432.
- [9] Cheng J, Fortina P, Sorrey S, et al. Microchip-based device for molecular of genetic disease [J]. Molecular Diagnosis, 1996: (1), 183~190.
- [10] Burt J.P., H., Chan K.L., Dawson, D., Parton A., Pethig R. Assays for microbial contamination and DNA analysis based on electrorotation[J]. Ann. Biol. Clin, 1996, (54): 253~257.

- [6] 孙彩霞,王复东,徐杰.一种易加工的高性能聚酰亚胺材料及其制备方法[P]. CN 1428361, 2001-12-27.
- [7] M A Cabey. New silicone rubber cable insulation promises circuit integrity in flaming environment[C]. International Wire and Cable Symposium Proceedings, 1983: 175.
- [8] 戴雯琼.聚酰亚胺绝缘电缆[J].电线电缆译丛,1993,(6):33~34.
- [9] 练传银.运载火箭电缆网减重研究[J].上海航天,1992,(2): 14~19.
- [10] 王志和.航天电线电缆电弧漏泄痕迹的调研[J].文献快报:纤维光学与电线电缆,1995,(5):17~22.
- [11] B A. Banks, et al. Atomic oxygen effects on materials [C]. NASA Conference Publication 3035, 1988.
- [12] J A. Dover. Low earth orbital atomic oxygen and ultraviolet radiation effects on polymers[R]. NASA TM 103711, 1991.
- [13] J. J. Scialdone and C. H. Clatterbuck. Four space application material coatings on the long duration exposure flight[R]. NASA TM 104574, 1993.
- [14] B. A. Banks, et al. LDEF 69months in space[C]. Proceedings of NASA 1st Post Symposium, 1991: 108.
- [15] 王复东,徐筠,孙彩霞,等.空间飞行器阻燃防火材料研究调研报告(续),中国国防科学技术报告GF863-2-2-1-15[M].大连:中国科学院大连化学物理研究所,2000.
- [16] P W Knopf, et al. Correlation of laboratory and flight data for the effects of atomic oxygen on polymeric materials [C]. AIAA 20th Thermophysics Conference. Williamsburg, VA, 1985.
- [17] B. A. Banks, et al. Ion beam sputter-deposited thin film coatings for the protection of the spacecraft polymers in low earth orbit[C]. 23rd Aerospace Sciences Meeting. Reno, Nevada, 1985.
- [18] Maguire G. [J] Wire Journal International, 1989, (10): 72~84.
- [19] A N Hammoud, et al. Performance of partially fluorinated polyimide insulation for aerospace applications [J]. Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., 1995: 262~265.
- [20] G. A. Slenski. New insulation constructions for aerospace wiring applications[R]. N95-16056, 1994.