

原子氧对航天材料的影响与防护

张 岚, 刘 勇, 董尚利, 土比木乃, 叶铸玉
(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 文章综述了低地球轨道(LEO)中原子氧(AO)环境对航天材料影响的研究现状。首先介绍AO对材料的危害及作用机制等。然后重点阐述了国内外学者关于AO与Al、Ag、Cu、Ni等金属材料以及半导体材料作用的研究成果。最后总结了AO的防护方法,及其对不同材料抗AO侵蚀能力的改善结果。

关键词: 原子氧(AO); 侵蚀效应; 金属材料; 原子氧防护

中图分类号: TP3; V25

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)02-0185-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.02.014

0 引言

距离地面200~700 km的低地球轨道(LEO)空间,是宇宙飞船、对地观测卫星、气象卫星和空间站等航天器的主要运行区域。航天器在LEO中运行时将受到原子氧(AO)、紫外辐射、粒子辐射、高真空、等离子体、热循环以及微流星体与空间碎片等的影响^[1]。美国航空航天局(NASA)的飞行试验(STS)、长期暴露试验平台(LDEF)、有限期选择性暴露试验(LDCE)、前苏联的“和平号”空间站搭载试验(COMES/Mir)以及大量的先期研究结果,使学者对材料暴露在LEO环境中的影响有了基本的了解。虽然AO在LEO中的密度很低,能量仅为0.1 eV,却是导致材料失效的主要原因^[2-3]。

AO环境效应主要是指其与航天器材料表面发生反应,使其氧化形成氧化物;同时导致材料表面形貌发生变化,放气速度加快,质量损失率增加,机械强度下降,光学和电性能改变等^[4]。此外,AO与材料作用产生的挥发性气体及非附着性氧化物,会使航天器受到污染,给光学系统、温控涂层等部件和材料的热性能、光性能带来严重的影响(如涂层太阳吸收率变化,电池的电源输出减小等)^[5]。

AO与材料之间的作用机制非常复杂,是多种效应协同作用的结果,既包括强氧化性造成的化学反应,又包括原子溅射引起的表面物质损失。

Banks等人^[6]认为:AO可能是简单地以原始状态或者改变后的带电状态在材料表面产生溅射;可能与航天器表面的N原子发生化学反应,或者一碰到材料表面就与N形成激发态的氮氧化物,随后以产生辉光的形式失去活性;可能在材料表面发生物理吸附,引起材料表面的剥蚀;可能被在表面上或表面下的势阱俘获,通过化学反应形成氧化物,或从表面迁移到材料基体内部。

AO对有机物材料的侵蚀比较明显,相关研究报道比较多;对无机物(如金属、金属氧化物、SiO₂等)的影响相对较弱,因此过去研究的比较少。现有研究结果表明,无机物也不同程度地受到AO的影响。

1 AO对材料的作用

应用于航天器的有机材料均不同程度地受到AO侵蚀。在AO的作用下,大部分有机物的质量和厚度都会有所损失,表面由光滑变得凹凸不平,呈“灯芯绒”或“地毯”状。对聚合物基复合材料而言,AO优先与表层树脂产生反应,使得纤维逐渐裸露在表面,最终可使复合材料外层的纤维与基体脱开。大多数的金属材料及其氧化物对AO有较好的稳定性,因为金属的氧化物能生成致密的氧化层而形成保护膜,但也有一些金属受AO侵蚀比较严重,如银、钨。AO与银相互作用生成非附着性氧化物,使材料逐渐剥蚀;与钨作用形成高蒸气压

收稿日期: 2011-05-03; 修回日期: 2011-06-24

基金项目: 国家973项目“材料及构件的空间辐照与原子氧侵蚀效应”(项目编号: 2010CB731601)

作者简介: 张 岚(1985—),女,硕士研究生,主要从事1Cr18Ni9Ti不锈钢的原子氧效应研究。E-mail: zhanglan0525@126.com。

的 OsO_4 , 造成质量损失^[7]。

1.1 AO 对铝的作用

铝在氧化过程中, 表面形成稳定的 Al_2O_3 氧化膜, 这层氧化膜可以避免铝进一步被氧化, 使得铝具有抗氧化性能。李丹等人^[8]研究了铝在 AO 环境中的抗侵蚀性能, 指出由于纯铝比较软, 富有延展性, 易于塑性成型, 所以可以通过发展多元共渗方法(如在纯铝中添加 Cu、Mg、Si、Ti、Cr、Zn、Mn)提高铝的抗氧化能力。合金中的难溶金属如 Mo、W、Ta 和 Cr 等在涂层与基体中沉积, 形成难移动的碳化物和金属化合物, 阻止涂层中 Al 等的扩散, 从而有效地抑制合金基体的氧化和涂层的剥落, 延长涂层的使用寿命。

1.2 AO 对铜的作用

金属铜由于具有良好的导电性能而在航天器上被广泛采用。铜在空间 AO 的作用下, 质量和光学性能都有较大的改变, 尤其反射率的变化是除金属银外变化量最大的。李中华等人^[9]模拟了 AO 对铜的作用。研究发现, 铜片暴露于 AO 的部分颜色变浅, 未暴露部分的颜色加深, 试样架的颜色也由原来的浅金黄色变成了较深的暗红色, 分析表明红色物质是 CuO 和 Cu_2O , 而且铜的氧化物容易脱落, 对其他表面造成较为严重的污染。铜表面的氧化反应对温度较为敏感, 在较低的温度下, 氧化物的成分以 Cu_2O 为主, 随着反应温度升高, 反应更加容易, 可在表面形成一定厚度的氧化层, 其中外层主要由 CuO 组成, 而内层则由 Cu_2O 组成。

1.3 AO 对银的作用

因为银具有良好的导电性, 太阳能电池板组件之间的电连接都采用银互连片。银与 AO 相互作用生成氧化物, 氧化的银层会脱落, 银互连片的结构完整性就会受到破坏, 将失去其导电作用。多树旺等人^[10]指出, 银在 AO 中的氧化分为两个阶段: 在开始氧化过程中表面形成了一层较厚的 Ag_2O 膜, 由于氧化膜内较大的生长应力, 使得氧化膜起皱、开裂和剥落; 第二阶段为氧化膜顶层 AgO 的形成。当银膜暴露在 AO 环境中时, AO 与银表面的非弹性碰撞一般会导致氧原子损失大部分能量, 碰撞过程将引起中性氧原子和银表面原子产生电离作用

导致电子激发或者电子迁移。这些过程影响物质的化学活性, 在银原子和入射氧原子之间会形成化学键, 在银表面上导致 Ag_2O 形核和生长。在气体/氧化物界面处产生的氧原子在化学梯度、温度和电子迁移引起的电场作用下, 扩散到氧化层/金属界面处和银箔反应, 导致在氧化物/金属界面处 Ag_2O 的进一步沉积。当 Ag_2O 膜的厚度增加时, 在氧化膜内会产生很大的生长应力, 这将导致应力氧化膜的起皱、开裂和剥落。此时, 基体银膜又重新暴露在 AO 中, 导致银膜的进一步氧化。 Ag_2O 膜的生长和失效重复进行, 最后氧化膜可达到相当的厚度。在整个氧化过程中, 表面生成的 Ag_2O 膜吸附真空腔中的氧原子束流, 最终导致在氧化膜顶层 Ag_2O 转变为 AgO 。

Li Long 等人^[11]研究在 220°C , 5.2 eV 条件下单晶体银在热 AO 作用下的行为时发现, 表面不仅有 Ag_2O 的生成, 而且还形成了多晶体银 (polycrystalline silver)。在 $\text{Ag}(100)$ 和 $\text{Ag}(111)$ 表面形成的鳞片状氧化物厚度达 10 多 μm , 氧化层上有微孔、微通道、晶界和孪晶等缺陷。这些缺陷为 AO 通过氧化层到达氧化物/银界面提供了通道。EDS 及 NA-EDP 分析表明这些氧化鳞片大多是多晶体银, 氧的含量仅为 $3\%\sim 5\%$, 且主要以 Ag_2O 形式存在。用银在 AO 作用下快速氧化并在随后发生热分解的现象可以解释多晶体银“氧化层”形成的过程。首先银与 AO 反应生成 Ag_2O , 随后 Ag_2O 发生热分解形成等轴 Ag 晶粒。由于银晶粒排列疏松, AO 可到达基体表面, 于是 Ag 晶粒下面开始形成一层新的氧化层。随着快速氧化和热分解的反复进行, 最终形成了具有微孔、微通道的多晶体银层及其与基体之间少量的 Ag_2O 结构。

高晓明等人^[12]对 Ag 及 Ag-Cu 合金薄膜的地面模拟试验和空间试验结果进行了考察分析。XPS 分析表明: 在地面模拟试验中 Ag 薄膜表面有 AgO 和 Ag_2O 生成, 在空间模拟试验中只有 Ag_2O 生成, 且随着刻蚀深度的增加, 氧化程度逐渐降低。无论是空间试验还是地面模拟试验, Ag-Cu 合金薄膜表面仅有 Ag_2O 生成。空间试验过程中, Ag 膜样品表面明显发现龟裂现象, Ag-Cu 合金薄膜表面未观察到龟裂及脱落现象, 仅观察到表面光洁度下降。

结合地面模拟试验过程中 Ag-Cu 合金薄膜表面仅生成 Ag_2O 这一现象, 表明 Ag-Cu 合金薄膜相对于纯 Ag 薄膜表现出较好的抗 AO 性能。

1.4 AO 对镍的作用

Raspopov 等人^[13]研究了 AO 对 Ni 的氧化行为。分子态氧反应活化能为 182 kJ/mol, 而 AO 的反应活化能仅为 76 kJ/mol。Ni 在 AO 中的氧化产物为 NiO, 且随着温度的升高反应产物增多。Ni 之所以在 AO 环境中更易氧化, 是因为 AO 更容易在表面形成化学吸附。他们假设 AO 在气态和 NiO 表面的吸附氧近似平衡的基础上建立了动力学模型, 很好地解释了这个现象。

1.5 AO 对半导体的作用

王文文等人^[14-15]研究了 AO 对透明半导体氧化物薄膜的作用。AO 辐照不仅使 In_2O_3 : Sn(ITO) 薄膜中霍尔迁移率提高, 而且还降低了载流子浓度。迁移率和载流子浓度的变化直接影响 ITO 试样的传导性能。AO 还使 ITO 的结晶度发生了细微的变化, 分析认为这可能是由 AO 的强氧化性降低了 O^{2-} 空位缺陷浓度引起的。此外 O^{2-} 空位缺陷浓度的降低及电离 Sn 的氧化可能使载流子浓度降低。AO 辐照仅对 ZnO: Al (ZAO) 薄膜的表面具有氧化效应, 导致表面化学成分中晶格氧比例的提高和薄膜载流子浓度的下降, 却很难改变 ZnO: Al (ZAO) 的结构。AO 辐照的强氧化性会导致 ZAO 薄膜表面的重结晶, 从而导致表面颗粒尺寸增大及表面粗糙度增大。此外, 还会导致表面晶格氧含量的增大, 从而导致氧空位及间隙 Zn、Al 的减少, 进而导致薄膜载流子浓度的下降。AO 的氧化效应仅作用于薄膜的最表层, 随着氧化层厚度的增加, 其载流子浓度下降的比率变小, 薄膜的导电性能受 AO 辐照的影响逐渐减小。

2 AO 的防护

通过以上讨论可以看出, 通常认为受 AO 侵蚀作用比较小的无机物, 在 LEO 长期暴露, 也不同程度地受到影响。为了避免 AO 环境的危害, 最理想的方法是避免使用 AO 敏感材料、避免使关键的航天器表面暴露在 AO 环境中。然而, 在这些方法无法实现的情况下, 则应采用 AO 防护措施。在基

体表面应用一层薄的防护涂层是一种常用的防护方法。涂层的质量主要取决于它的连续性、空隙率、与基体的结合程度以及在 AO 环境中的耐蚀性^[16]。

目前应用于 AO 防护的涂层及涂层组合很多, 从本质上来说, 根据其成分可划分为 3 类: 金属及金属氧化物; 无机化合物; 有机化合物。

2.1 金属及金属氧化物

绝大多数金属具有较好的 AO 稳定性, 在 AO 的作用下, 可在金属表面形成致密的金属氧化物层, 保护底层的金属材料不再受 AO 的侵蚀。因此金属及金属氧化物可以保护空间材料免受 AO 侵蚀。

铝在 AO 作用下可在表面形成稳定的 Al_2O_3 氧化膜, 这层氧化膜可以避免铝进一步被氧化, 因此铝是常用的表面防护材料之一。任屏源等人^[17]应用电弧离子镀技术在 C/E 复合材料表面沉积 Al 膜, 研究表面镀铝后具有明显的防护作用。Kiefer 等人^[18]将含有铝的乙酰丙酮化物 (Alacac) 加入 Kapton 材料中, 显著提高了 Kapton 的抗 AO 侵蚀能力。罗彻斯特大学 (University of Rochester) 研制了可添加到聚酰亚胺中的锆络合物, 当其暴露于 AO 环境中时可在表面形成锆的氧化物保护层^[19]。金属锡同样有良好的抵抗 AO 侵蚀能力, 镀锡银箔在 AO 试验中的质量损失比银箔试样的减少了 2 个量级^[20]。

Cooper^[21]用 ALD 方法制备了 Al_2O_3 。试验证明 35 Å 厚的 Al_2O_3 能够阻止 AO 与基体材料的反应, 在加工过程及热循环影响下仍能保持柔韧性, 可较好地提高材料的抗 AO 侵蚀能力。此外, In_2O_3 、ZnO、 TiO_2 性能稳定, AO 在其表面扩散系数低, 均能起到很好的防护作用。

金属涂层的 AO 剥蚀率极低, 涂层不仅具有极好的抗 AO 侵蚀能力, 还具有耐各种辐射环境作用的能力; 但是涂层制备困难, 工艺复杂, 成本很高, 并且无论是离子束溅射还是反应磁控溅射都难以用于大规模实际生产, 涂层的制备工艺还有待改善。

2.2 无机化合物

无机物可与 AO 反应形成玻璃化氧化物层, 由于 O 在氧化物中的浓度差降低, 这层氧化物可以阻碍 AO 的扩散及进一步的撞击, 从而保护底层材料不被 AO 剥蚀。

向材料中添加纳米 SiO_2 颗粒是一种有效提高材料抗 AO 侵蚀能力的方法。Wang Xin 等人^[22]将纳米 SiO_2 颗粒加入到玻璃纤维/聚酰亚胺 (glass fiber/polyimide) 复合材料中, 使其抗 AO 能力得到了显著的提高。且随着 SiO_2 颗粒含量的增加, 剥蚀率降低。研究表明, 纳米 SiO_2 颗粒可能与树脂基底反应生成一些新的结构, 如 $\text{Si}-\text{C}$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{C}$, 这些新形成的结构不与 AO 反应, 因此可以阻止 AO 与材料的进一步反应。

多树旺等人^[23]采用溶胶-凝胶法在聚酰亚胺上制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 复合陶瓷涂层。该涂层的 AO 反应系数约为 $1.5 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{atom}$, 比聚酰亚胺 (AO 反应系数为 $3.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$) 降低了 2 个数量级, 而且涂覆涂层的试样表面在 AO 暴露前后没有发生明显的变化。Xiao Fei 等人^[24]的研究结果表明, ZrO_2 也可以降低 AO 剥蚀率, 提高聚酰亚胺的抗 AO 侵蚀能力。

虽然无机涂层的抗 AO 侵蚀能力较强, 但它的应用也会受到限制。例如, 当无机涂层与基体的热膨胀系数差异较大时, 在热循环的作用下涂层会产生裂纹。此外, 无机涂层一般都比较脆, 在加工及装配过程中容易产生缺陷, AO 可通过这些缺陷与基体材料作用, 出现掏蚀现象。可以通过加入玻璃性密封剂防止氧通过缺陷到达基体材料。典型的密封剂中一般都含有硅酸盐和硼酸盐, 它们可以减少涂层与基体之间的热膨胀系数差, 增强涂层与基体的附着力。张蕾等人^[25]以无机高分子成膜物质钾水玻璃 (硅酸钾水溶液) 为黏结剂, 以氧化钛为颜料, 加入适当的填料 (云母粉、滑石粉等) 制备涂料, 获得了 $\text{TiO}_2-\text{K}_2\text{SiO}_3$ 无机涂层。研究表明该涂层具有良好的抗 AO 侵蚀性能。因为涂层的黏结剂为 $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ 网状结构, 具有较好的耐氧化性, 且涂层表面有 TiO_2 、云母、滑石粉等稳定的氧化物和硅酸盐矿物, O 在其中的扩散系数很低, 因此涂层能起到 AO 防护作用。

2.3 有机化合物

有机涂层与基体结合牢固, 柔软性好, 耐高低温冲击, 工艺性能好, 因此被广泛应用于航天材料的防护。通常以聚有机物树脂为基体混合适当的颜填料制备有机涂层, 涂覆到材料表面。

有机硅涂层有较好的抗 AO 侵蚀能力, 比聚酰亚胺基体抗侵蚀能力提高了 1 个数量级以上。有机硅涂层在 AO 辐照时表面会形成一层 SiO_2 薄膜, 从而阻止 AO 对基体的进一步侵蚀, 由于所形成的氧化膜透明, 所以对基体的光学性质基本上没有影响。Miyazaki 等人^[26]对聚硅氧烷涂层进行了深入研究, 在 AO 作用下它的质量损失仅为聚酰亚胺的 1% 或者更少。经过 TEM 观察和 XPS 分析发现, 在 AO 的辐照下涂层表面生成了自愈合 SiO_2 层, 从而保护材料免受进一步腐蚀。

通常聚硅氮烷相对聚硅氧烷等有机硅聚合物来说, 抗 AO 侵蚀能力要高一些。 $\text{Si}-\text{N}-\text{S}$ 键在 AO 辐照下可被氧化, 促进 SiO_2 层在表面的形成。通常形成的 SiO_2 为无定形态的, 密度比结晶态的低, 收缩倾向小, 从而不易产生裂纹。聚硅氮烷剥蚀率比较低, 在 $10^{-26} \text{ cm}^3/\text{atom}$ 数量级上。通常, 紫外线会与 AO 发生复合效应, 加速材料的降解。然而, Hu Longfei 等人^[27]研究聚硅氮烷涂层时发现, 当 VUV 和 AO 共同存在时, VUV 辐照可以使暴露的表面形成新的自由基位置, 促进致密 SiO_2 层的形成, 从而使聚硅氮烷的抗 AO 侵蚀能力进一步提高。

无机涂层的剥蚀率低, 但是由于其塑性差容易产生裂纹; 有机涂层有着良好的抵抗裂纹形成能力, 但是剥蚀率要比无机涂层低 1 到 2 个数量级, 而且对 VUV 比较敏感。为了用无机涂层保护现有的聚合物, 无机/有机复合涂层逐渐发展起来, 它的无机组成成分在 AO 作用下产生钝化层, 起到保护作用。北京卫星环境工程研究所用溶胶-凝胶化学制备有机硅/ SiO_2 杂化涂层, 涂层 AO 反应率为 $10^{-26} \text{ cm}^3/\text{AO}$, 比聚合物基底材料抗 AO 性能提高了 100 倍^[28]。张蕾等人^[29]研究了 ZnO 有机硅涂层。 ZnO 氧化物性能稳定且氧元素对其扩散系数低, 能起到很好的阻碍层作用, 同时加入片状硅酸盐矿物型添加剂, 使之与有机硅进行反应, 生成有机硅酸盐涂层。因为涂层表面有稳定的氧化物 ZnO 、 SiO_2 及片状的硅酸盐矿物, 氧在其中的扩散系数很低, 所以涂层能起到良好的 AO 防护作用, 且具有良好的空间稳定性。

3 结束语

AO 对无机物的侵蚀效应具有长期累积性, 短期的效应不是很明显, 因此没有引起足够的重视。现有研究表明不仅有机物受 AO 剥蚀严重, 银、钨、铜、镍等金属以及半导体材料也不同程度地受 AO 影响, 关于 AO 对金属材料等无机物的作用还有待深入研究。因为大多数航天材料都是 AO 敏感性材料, 所以对材料进行防护非常重要。常用的涂层材料主要有金属及金属氧化物、 SiO_2 及含硅的有机物等。为了提高航天器在 LEO 环境下的生存能力并实现长寿命、高可靠运行, 还需深入研究 LEO 的 AO 环境效应, 寻找最优航天材料应用与防护措施。

参考文献 (References)

- [1] 童靖宇, 刘向鹏, 孙刚, 等. 原子氧/紫外综合环境模拟实验与防护技术[J]. 真空科学与技术学报, 2006, 26(4): 263-267
Tong Jingyu, Liu Xiangpeng, Sun Gang, et al. Simulation of combined environment of atomic oxygen and ultraviolet and development of protection technologies[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2006, 26(4): 263-267
- [2] Reddy M R. Effect of low earth orbit atomic oxygen on spacecraft materials[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30: 281-307
- [3] Banks B A, Rutledge S K, Brady J A. The NASA atomic oxygen effects test program. NASA-1989-12589[R], 1989
- [4] 龚自正, 曹燕, 侯明强, 等. 空间环境及其对航天器的影响与防护技术[C]//中国数学力学物理学高新技术交叉研究学会第十二届学术年会论文集, 2008: 287-297
- [5] 沈志刚, 赵小虎, 王鑫. 原子氧效应及其地面模拟试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 11
- [6] Banks B A, Rutledge S K, Brady J A, et al. Atomic oxygen effects on materials. NASA-1989-23540[R], 1989
- [7] 湛永钟, 张国定. 低地球轨道环境对材料的影响[J]. 宇航材料工艺, 2003(1): 1-5
Zhan Yongzhong, Zhang Guoding. Low earth orbit environmental effects on materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2003(1): 1-5
- [8] 李丹, 唐锦. 铝在原子氧环境中的腐蚀与防护[J]. 失效分析与防护, 2009, 4(3): 188-192
Li Dan, Tang Jin. Corrosion and protection of aluminum in atomic oxygen environment[J]. Failure Analysis and Prevention, 2009, 4(3): 188-192
- [9] 李中华, 李丹明, 王敬宜, 等. 原子氧对金属铜的作用[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 18-21
Li Zhonghua, Li Danming, Wang Jingyi, et al. The interaction of atomic oxygen with copper[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(1): 18-21
- [10] 多树旺, 李美栓, 张亚明, 等. 银在原子氧环境中的氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(7): 1057-1060
Duo Shuwang, Li Meishuan, Zhang Yaming, et al. The oxidation behaviour of polycrystalline silver films by atomic oxygen[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(7): 1057-1060
- [11] Li Long, Yang J C, Minton T K. Morphological changes at a silver resulting from exposure to hyperthermal atomic oxygen[J]. American Chemical Society, 2007, 111: 6763-6771
- [12] 高晓明, 胡明, 伏彦龙, 等. 原子氧对 Ag 基薄膜表面影响分析[C]//中国空间科学学会空间材料专业委员会 2009 学术交流会论文集, 2009
- [13] Raspopov S A, Gusakova A G, Voropayev A G, et al. Enhanced oxidation of nickel in atomic oxygen[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1995, 227: 5-9
- [14] Wang W W, Wang T M. Effects of atomic oxygen irradiation on transparent conductive oxide thin films[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20: 464-468
- [15] 王文文, 刁训刚, 王天民. γ 射线和原子氧辐照对 ZnO:Al 薄膜的影响[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(3): 39-43
Wang Wenwen, Diao Xungang, Wang Tianmin. Effects of γ ray irradiation and atomic oxygen treatment on ZnO: Al films[J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(3): 39-43
- [16] Kleiman J I, Iskanderova Z A, Perez F J, et al. Protective coatings for LEO environments in spacecraft applications[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 76-77: 827-834
- [17] 任屏源, 任妮, 马占吉, 等. C/E 表面镀 Al 膜的原子氧试验[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(4): 65-69
Ren Pingyuan, Ren Ni, Ma Zhanji, et al. Effects of atomic oxygen on C/E composite-based aluminum films[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(4): 65-69
- [18] Kiefer R L, Anderson R A, Thibeault S A. Modified polymeric materials for durability in the atomic oxygen space environment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2003, 208: 300-302
- [19] Illingsworth M, Betancourt J, He L, et al. Zr-containing 4,4'-ODA/PMDA polyimide composites. NASA/TM-2001-211099[R], 2001
- [20] 沈志刚, 王忠涛, 赵小虎, 等. 空间太阳能电池板银互连片原子氧效应模拟试验[J]. 北京航空航天大学学

- 报, 2000, 26(6): 676-679
- Shen Zhigang, Wang Zhongtao, Zhao Xiaohu, et al. Experiment of silver interconnects of photovoltaic solar array in IFM ground-based AO effect simulation facility[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(6): 676-679
- [21] Cooper R. Protection of polymer from atomic-oxygen erosion using Al_2O_3 atomic layer deposition coatings[J]. Thin Solid, 2008, 516: 4036-4039
- [22] Wang Xin, Zhao Xiaohu, Wang Mingzhu, et al. The effects of atomic oxygen on polyimide resin matrix composite containing nano-silicon dioxide[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2006, 243: 320-324
- [23] 多树旺, 刘庭芝, 邹小平, 等. 溶胶-凝胶制备的 Al_2O_3 - SiO_2 复合陶瓷涂层抗原子氧侵蚀性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(z2): 743-746
- Duo Shuwang, Liu Tingzhi, Zou Xiaoping, et al. Properties of Al_2O_3 - SiO_2 protective coatings prepared by Sol-Gel process in atomic oxygen environment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(z2): 743-746
- [24] Xiao Fei, Wang Kai, Zhan Maosheng. Atomic oxygen erosion resistance of polyimide/ ZrO_2 hybrid films[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(24): 7384-7388
- [25] 张蕾, 严川伟, 屈庆, 等. TiO_2 - K_2SiO_3 无机涂层对空间材料 Ag 的防护行为研究[J]. 化学学报, 2003, 61(9): 1369-1374
- Zhang Lei, Yan Chuanwei, Qu Qing, et al. Study on the protection of TiO_2 - K_2SiO_3 inorganic coatings for Ag used in space[J]. Acta Chimica Sinica, 2003, 61(9): 1369-1374
- [26] Miyazaki E, Tagawa M, Yokota K, et al. Investigation into tolerance of polysiloxane-block-polyimide film against atomic oxygen[J]. Acta Astronautica, 2010, 66: 922-928
- [27] Hu Longfei, Li Meishuan, Xu Caihong, et al. A polysilazane coating protecting polyimide from atomic oxygen and vacuum ultraviolet[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 3338-3343
- [28] 多树旺, 李美栓, 尹孝辉, 等. 溶胶-凝胶制备的 Al_2O_3 涂层抗原子氧侵蚀性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(z2): 735-738
- Duo Shuwang, Li Meishuan, Yin Xiaohui, et al. Properties of Al_2O_3 protective coatings prepared by Sol-Gel process in atomic oxygen environment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(z2): 735-738
- [29] 张蕾, 严川伟, 孙刚, 等. 原子氧对 Kapton 侵蚀及 ZnO -有机硅涂层防护效应研究[J]. 航空材料学报, 2003, 23(4): 26-30
- Zhang Lei, Yan Chuanwei, Sun Gang, et al. Ground-based investigations of atomic oxygen erosion behaviors of Kapton and ZnO -siloxane coatings on Kapton[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(4): 26-30

The effect of atomic oxygen on spacecraft materials and the protection measures

Zhang Lan, Liu Yong, Dong Shangli, Tubi Mu'nai, Ye Zhuyu

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The effect of low earth orbit (LEO) atomic oxygen (AO) on spacecraft materials is reviewed in this paper. Firstly, the mechanism of AO interaction with space materials and the related hazards are briefly discussed. Then, particular emphasis is put on the AO interactions with metals, such as with Al, Ag, Cu, Ni, and semi-conductive materials. Finally, the techniques of AO protection as well as the related results on the AO resistance of various materials are summarized.

Key words: atomic oxygen(AO); erosion effect; metallic materials; AO protection