

特约专栏

# 空间站微生物腐蚀研究进展

白子恒, 肖葵, 颜利丹

(北京科技大学 腐蚀与防护中心、新材料技术研究院, 北京 100083)

**摘要:** 从1971年人类第一次发射空间站至今, 空间站环境下微生物腐蚀问题, 已经成为空间站发展的重要监控对象之一。在外太空条件下, 微生物的腐蚀作用会被增强, 容易造成航天器内部设备的失效, 影响航天器的运行安全。在前人对国际号空间站(International Space Station, ISS)和“和平号”空间站(Mir Space Station, Mir)内微生物多样性的研究基础之上, 综合已有的微生物腐蚀研究, 总结了空间站在长期运行条件下分布的优势菌种及空间站环境下微生物腐蚀试验的进展及研究方法, 为相关的工作提供技术参考。

**关键词:** 航空航天; 微生物腐蚀; 空间站; 模拟环境; 微生物多样性

**中图分类号:** TG172.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-3962(2018)01-0009-05

## Recently Development of Microbial Corrosion of Space Station

BAI Ziheng, XIAO Kui, YAN Lidan

(Corrosion and Protection Center, Institute of Advanced Materials and Technology,  
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Since the first launch of space station in 1971, the problem of microbial corrosion in space station has become one of the most important monitoring objects. In outer space conditions, the corrosion of microorganisms may be enhanced, resulting in the failure of spacecraft equipment, and affecting the safety of spacecraft operation. Based on the previous study on microbial diversity of the international space station and the Mir space station, the dominant bacteria of the space station under long-term operation are listed. This article summarizes progress of the microbial corrosion test under the environment of space station. The methods of microbial corrosion test under simulated environment are summarized, which provides technology support for related research.

**Key words:** aviation; microbiologically influenced corrosion; space station; simulated environment; microbial diversity

### 1 前言

空间站在运行中, 具有密闭、控温控湿等特点, 在给宇航员提供适宜生活环境的同时, 也给微生物的生长繁殖提供了条件<sup>[1]</sup>。微生物通过地面组装、宇航员携带等途径进入空间站内部, 在站内的空气、材料表面和冷却水系统等处大量繁殖<sup>[2-4]</sup>。太空中的微重力环境、宇宙射线等会对微生物的生理活动造成影响, 影响微生物的繁殖能力和代谢能力<sup>[4,5]</sup>。微生物对材料的腐蚀作用通

常是通过其代谢产物<sup>[6]</sup>和生物膜进行的<sup>[7,8]</sup>, 在失重环境下, 微生物的繁殖、代谢能力, 以及生物膜与材料表面的交互作用会增强<sup>[9]</sup>。因此, 在航天器实际运行当中, 微生物对材料的腐蚀倾向较地面环境更为严重。因此从空间站运行初期开始, 就应该对舱内材料表面的微生物进行监测, 同时开展相关的微生物腐蚀研究。目前, 对于微生物腐蚀问题, 已经开展了一系列的研究, 但是空间站环境下的微生物腐蚀试验, 则相对较少。因此, 开展空间站环境下微生物材料腐蚀行为的研究具有重要意义。

### 2 空间站微生物腐蚀危害

微生物会利用高分子材料作为碳源, 在其表面生长繁殖, 直接降解高分子材料。微生物生成的生物膜会在冷凝水系统内表面附着<sup>[10]</sup>, 破坏金属表面, 危害金属材料的安全性能。微生物在航天器内的繁殖会造成循环水

收稿日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51671027, 51771027, 51271032); “973”计划资助项目(2014CB643300)

第一作者: 白子恒, 男, 1992年生, 硕士研究生

通讯作者: 肖葵, 男, 1969年生, 副研究员, 博士生导师,

Email: xiaokui@ustb.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.01.02

系统、绝缘橡胶、空调系统等的破坏。例如，霉菌的繁殖可能造成电路板等电子元器件的短路，引起电子设备的失效<sup>[11]</sup>，细菌在冷凝水系统中繁殖，产生的有机酸会腐蚀材料，造成泄露。图 1<sup>[9]</sup>为国际空间站上拍摄到的，微生物在多种材料表面的繁殖情况，图 2<sup>[9]</sup>为国际空间站内某设备内部霉菌腐蚀情况。

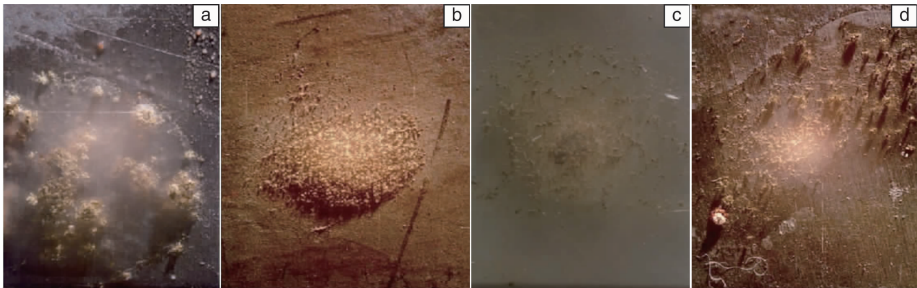


图 1 微生物在材料表面的繁殖状况：(a) 橡胶；(b) 钛；(c) 电路板；(d) 铝<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Reproduction of microorganisms on materials: (a) rubber; (b) titanium; (c) circuit board; (d) aluminum <sup>[9]</sup>

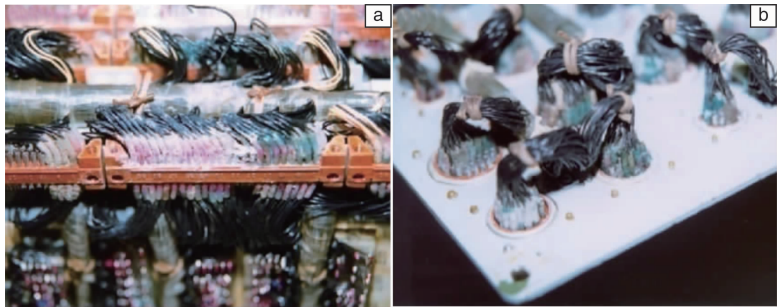


图 2 电子设备腐蚀状况<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Microbial corrosion of the electronic equipment <sup>[9]</sup>

国际上，俄罗斯、美国、德国和日本等国已经先后开展了一系列航天器及空间站内微生物多样性的研究，研究对象包括 Apollo(“阿波罗”号飞船)、Skylab(“天空实验”号空间站)、Space Shuttle(航天飞机)、Mir(“和平”号空间站)和 ISS(国际空间站)等。Novikova 等<sup>[12]</sup>对和平号空间站和国际空间站的微生物多样性进行了长达 10 ~ 15 年的追踪研究，结果表明，在空间站内，材料表面附着的真菌主要以青霉属 *Penicillium*、曲霉属 *Aspergillus* 和枝孢霉属 *Cladosporium* 为主，三者在地球环境中均广泛分布，且对材料有腐蚀倾向。细菌主要以葡萄球菌属 *Staphylococcus*、棒状杆菌属 *Corynbacterium*、芽孢杆菌属 *Bacillus* 和微球菌属 *Micrococcus* 为主，主要来源于人体和地表大气。相关优势菌种信息见表 1。

表 1 舱内材料表面优势菌种信息

Table 1 Information of dominant bacteria in inner surface of cabin

Genus	Source
<i>Aspergillus</i>	Earth environment
<i>Penicillium</i>	Earth environment
<i>Cladosporium</i>	Earth environment
<i>Staphylococcus</i>	Human and earth environment
<i>Corynbacterium</i>	Earth environment
<i>Bacillus</i>	Earth environment
<i>Micrococcus</i>	Earth environment

Ott 等<sup>[13]</sup>对 Mir 的冷凝水进行微生物分析研究，结果显示，真菌中，枝孢霉属、镰刀菌属 *Fusarium* 和青霉属占主要优势，三者在地表环境均占优势，同时，三者有潜在的材料腐蚀作用。而细菌则以芽孢杆菌属 *Bacillus* 和微球菌属为主。相关菌种信息见表 2。Castro 等<sup>[14]</sup>对初期运行的 ISS 进行微生物检测发现，不同位置获取的水样，菌种分布有所不同，并能检测到鞘氨醇单胞菌属 *Sphingomonas* 和甲基杆菌属 *Methylobacterium*。水循环系统中的菌种分布，可能与其所处的位置有关。航天器内的细菌主要来自于地表和人体环境，优势菌种与地表和人体环境占优势的菌种有相关性。

表 2 循环水系统优势菌种信息

Table 2 Information of dominant bacteria in water circulation system

Genus	Source
<i>Cladosporium</i>	Earth environment
<i>Penicillium</i>	Earth environment
<i>Fusarium</i>	Earth environment
<i>Bacillus</i>	Earth environment
<i>Micrococcus</i>	Earth environment
<i>Sphingomonas</i>	Earth environment

### 3 航天材料微生物腐蚀机理研究进展

空间站内常用的航天材料包括不锈钢、铝合金、镁合金、钛及多种高分子材料。微生物腐蚀研究中,主要采用传统培养法<sup>[15]</sup>获取目标分离源的菌种用于后续腐蚀试验。

#### 3.1 霉菌对材料的腐蚀作用

霉菌对金属材料腐蚀作用的研究,主要以曲霉属和枝孢霉属为主,其中以曲霉属中的黑曲霉 *Aspergillus niger* 居多,枝孢霉属次之。Umesh 等<sup>[6]</sup>对黑曲霉的代谢产物研究发现,温度、摇床转速等因素会影响柠檬酸的分泌量,培养过黑曲霉的离心培养基上清液对 Sn, Al 等金属有腐蚀作用,且柠檬酸是起腐蚀作用的主要成分。Qing 等<sup>[16]</sup>研究了镁合金在含有黑曲霉的人造海水中的腐蚀行为,结果表明镁合金在含有黑曲霉的人造海水中,自身的腐蚀电流密度增大、腐蚀速率加快,黑曲霉起到了加速金属腐蚀的作用。Dai 等<sup>[17]</sup>研究表明,黑曲霉的存在会大大加速铝合金在大气环境中的腐蚀速率,当材料表面薄液膜内含有  $\text{Cl}^-$  时,腐蚀速率更快。

霉菌对材料的腐蚀作用机理可分为3大类:①霉菌的直接腐蚀,霉菌利用材料作为碳源进行生理活动,直接导致材料发生降解,主要发生于天然高分子材料和部分合成高分子材料中,如聚氯乙烯和聚氨酯等;②霉菌的代谢产物腐蚀作用,霉菌在材料表面的代谢活动中会产生一系列有机酸,如柠檬酸、乙二酸、草酸和乳酸等,有机酸可以直接作用于金属材料表面使得金属材料被腐蚀<sup>[18]</sup>;③霉菌的附着会改变材料表面的局部环境条件,如改变局部含氧量造成氧浓差腐蚀,或改变局部 pH 值等。

#### 3.2 细菌对材料的腐蚀作用

对于细菌的研究主要以硫酸盐还原菌(Sulfate-Reducing Bacteria, SRB)、硝酸盐还原菌(Nitrate-Reducing Bacteria, NRB)铁氧化细菌(iron-Oxidizing Bacteria, IOB)、锰氧化细菌(Manganese-Oxidizing Bacteria, MOR)产酸细菌(Acid-Producing Bacter, APB)等为主<sup>[19]</sup>。芽孢杆菌属是人类生活中分布最为广泛的细菌之一,广泛分布与自然界中,Mcnamara 等<sup>[20]</sup>证实,部分芽孢杆菌在一定条件下,可以加速铝合金的腐蚀。Deen 等<sup>[21]</sup>证实,巨大芽孢杆菌 *Bacillus Megaterium* 可以加速 Al-Cu 合金点蚀,降低其力学性能。在国际空间站俄罗斯段(Russian-ISS),曾出现过红球菌属 *Rhodococcus spp.*, 该属主要分布于土壤中,对高分子材料具有腐蚀作用<sup>[22]</sup>。

通常,生物膜的形成会加速材料的局部腐蚀。当细菌在材料表面繁殖时,可以在材料表面形成一层生物膜。

生物膜是影响金属材料微生物腐蚀的主要因素,其主要成分为含水量 95% 以上的凝胶相,同时含有细胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)和悬浮颗粒等<sup>[23]</sup>。

### 4 空间站及模拟环境微生物腐蚀试验研究进展

#### 4.1 空间站内环境微生物腐蚀研究现状

目前,对于空间站内微生物腐蚀的研究,主要以地面实验室条件下开展的相关试验为主。可以从混合菌种和单一菌种对材料的腐蚀作用这两方面进行研究。

Alekhova 等<sup>[24-26]</sup>进行过一系列地面模拟环境腐蚀试验,其试验方法是将在空间站内分离得到的霉菌孢子喷洒在被试验材料的表面,在地面实验室环境中,进行材料微观形貌的表征或腐蚀试验。结果表明,从 ISS 俄罗斯舱段表面筛得的多种霉菌混合在一起时,会对铝镁合金和高分子材料产生腐蚀作用,随着与霉菌接触时间的延长,材料腐蚀加重。同时进行了单一菌种的腐蚀试验,结果发现不同单一菌种造成的腐蚀程度有所不同。其中,黑曲霉、黄曲霉 *Aspergillus flavous* 和蜡叶芽枝霉 *Cladspori-um herbarum* 对材料的腐蚀作用最强,细菌中最强的是微球菌属。而聚多曲霉 *Aspergillus sydowii* 和红球菌属对金属的腐蚀作用最弱。

Reidt 等<sup>[1]</sup>对4种常用航天材料在ISS俄罗斯舱段内135天的搭载暴露实验表明,高分子材料表面附着的微生物最多,其次为铝合金和印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)。微生物附着量通常与材料种类和表面状态有关,高分子材料可以提供碳源且粗糙度较大,因此附着的微生物最多,铝合金和PCB表面粗糙度相对较低,因此附着的菌种较少,同时,阳极化处理会使材料耐微生物腐蚀作用增强。

不同种类、表面状态的材料对微生物腐蚀的耐蚀能力有所不同,而不同菌株对材料的腐蚀作用也有所不同。通常认为,提高耐微生物腐蚀材料的使用比例、降低材料表面粗糙度,可以整体增强航天器耐微生物腐蚀的能力。

#### 4.2 地面模拟环境下腐蚀试验方法

人们在获得特定菌种后,需要研究在一定温度、湿度和养分的情况下,微生物的腐蚀行为。用模拟环境的方法,可以在先期开展材料耐腐蚀性的研究及评价,为空间站及相关航天器的长期运行提供技术支持。对于常用的微生物腐蚀试验。基本方法分为3大类:上清液腐蚀法<sup>[6]</sup>,液体培养基法<sup>[7,8,16,20,21]</sup>和固体培养基法<sup>[17,24-26]</sup>。

(1)上清液腐蚀法:将微生物在液体培养基中进行

培养,一段时间后,将悬浊液过滤,留下不含菌种的上清液,在特定条件下与金属材料进行腐蚀反应。该方法主要着眼于微生物代谢产物对金属材料的腐蚀作用。优点是快速地分析微生物活动对材料的影响,无菌操作要求比较低。但其缺点是不能直接用于研究菌体与材料表面的交互作用。

(2)液体培养基法:该方法是微生物腐蚀领域中使用最广泛的研究方法,可以研究液体环境中微生物对材料的腐蚀行为。采用含有微生物的菌悬液作为接种液,将其接种于模拟液中,设置温度、湿度和溶氧度等条件,培养4~15 d左右。该方法可以在模拟溶液环境中进行微生物对材料腐蚀行为的研究。但该方法的主要缺点是操作较繁琐,对于无菌操作要求较高。

(3)固体培养基法:将材料放置于固体培养基中,喷洒霉菌孢子悬液,并放置于合适的培养条件下。该方法可以最大程度地模拟大气环境下微生物对材料的腐蚀行为。该方法可以应用于霉菌对材料腐蚀行为的研究,试验操作简单。但其缺点是孢子悬液喷洒可能不均匀,试验随机性较大。

#### 4.3 微生物控制方法

在空间站设计时,在兼顾整体设计之上选用相应的抗霉菌材料以减少霉菌的生长速度。在地面组装、准备发射阶段应控制相应场地、人员和设备的微生物含量,以减少空间站初始运行阶段的微生物携带量。在运行过程中,应对空气进行净化,定期用消毒剂清洁舱内材料表面,对循环水系统进行消毒等。但由于空间站处于相对密闭的条件,灭菌手段又必须对宇航员身体无害,因此,在实际运行中对微生物防护手段提出了比较高的要求。

#### 4.4 微生物腐蚀试验特点

微生物腐蚀与传统材料的腐蚀研究相比,对实验人员的要求有以下几点:

(1)微生物试验自身波动性大,需要实验人员了解微生物筛选、纯化、培养、保藏等操作,并依据微生物试验的思路和特点设计合理的实验方案;

(2)对操作者本身的无菌理论和技术提出了较高的要求;

(3)对电化学技术和材料表征手段都提出了更高的要求;

(4)细菌与霉菌因其生理结构不同,在无菌操作、实验方法上有所不同,需要实验人员在实际操作中加以区分。

## 5 结 语

针对航天器的微生物腐蚀问题,美国国家航空航天

局和俄罗斯航空局等对国际空间站和“和平号”空间站航天器的微生物多样性进行了20余年的研究,涵盖地面组装到初期运行,再到长期运行,建立了较为完善的微生物多样性检测手段,并对微生物腐蚀的机理进行了初步的探究,提出了空间站运行的微生物控制指标<sup>[10]</sup>。目前,我国在航空航天领域取得了突飞猛进的发展,但是对于航天站环境下微生物腐蚀检测技术及机理研究,还处在开始的阶段。从航天站的运行到长期维护的角度来看,有必要在微生物腐蚀领域开展相关研究,填补国内相关领域的空白。

## 参考文献 References

- [1] Reidt U, Helwig A, Plobner L, et al. *Gravitational and Space Biology Bulletin*[J], 2014, 2(2): 46-57.
- [2] Yuan Junxiang(袁俊霞), Yin Hong(印红), Zhao Biao(赵彪), et al. *Chinese Journal of Space Science*(空间科学学报)[J], 2017, 37(2): 185-191.
- [3] Chen Jingwei(陈景威), Sui Xin(随欣), Zhang Naifu(张乃夫), et al. *Manned Spacecraft*(载人航天)[J], 2017, 23(2): 252-257.
- [4] Zhang Lantao(张兰涛), Wei Chuanfeng(魏传锋), Bai Fanlu(白梵露), et al. *Spacecraft Environment Engineering*(航天器环境工程)[J], 2014, 31(4): 415-419.
- [5] Zou Shiwen(邹士文), Xiao Kui(肖葵), Dong Chaofang(董超芳), et al. *Science & Technology Review*(科技导报)[J], 2013, 31(30): 61-66.
- [6] Jadhav U, Hong H. *Corrosion Science*[J], 2014, 82(2): 248-254.
- [7] Liu H, Gu T, Zhang G, et al. *Corrosion Science*[J], 2016, 102: 93-102.
- [8] Liu H, Gu T, Lv Y, et al. *Corrosion Science*[J], 2017, 117: 24-34.
- [9] Yang Hong(杨宏), Hou Yongqing(侯永青), Zhang Lantao(张兰涛). *Manned Spacecraft*(载人航天)[J], 2013, 19(2): 38-46.
- [10] Bai Fanlu(白梵露), Wei Chuanfeng(魏传锋), Zhang Lantao(张兰涛). *Life Science Instruments*(生命科学仪器)[J], 2015, 13(03): 16-22.
- [11] Zou Shiwen(邹士文). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2013: 21.
- [12] Novikova N, Boever P D, Poddubko S, et al. *Research in Microbiology*[J], 2006, 157(1): 5-12.
- [13] Ott C M, Bruce R J, Pierson D L. *Microbial Ecology*[J], 2004, 47(2): 133-136.
- [14] Castro V A, Thrasher A N, Healy M, et al. *Microbial Ecology*[J], 2004, 47(2): 119-126.
- [15] Wang Baojun(王保军), Liu Shuangjiang(刘双江). *Microbiology China*(微生物学通报)[J], 2013, 40(1): 6-17.
- [16] Qu Q, Wang L, Li L, et al. *Corrosion Science*[J], 2015, 98(04): 249-259.
- [17] Dai X, Wang H, Ju L K, et al. *International Biodeterioration & Biodegradation*[J], 2016, 115: 1-10.

- [18] Wang Zhong(王 忠), Chen Hui(陈 晖), Zhang Zheng(张 铮). *Environment Test*(环境试验)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [19] Zheng Bijuan(郑碧娟). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 1.
- [20] Mcnamara C J, Iv T D P, Leard R, *et al.* *Biofouling*[J], 2005, 21(5-6): 257-265.
- [21] Deen K M, Yousaf M, Afzal N, *et al.* *Materials Technology*[J], 2014, 29(5): 269-274.
- [22] Zhukov D V, Murygina V P, Kalyuzhnyi S V. *Applied Biochemistry and Microbiology*[J], 2007, 43(6): 587-592.
- [23] Yang Jiadong(杨家东), Xu Fengling(许凤玲), Hou Jian(侯 健), *et al.* *Equipment Environment Engineering*(装备环境工程)[J], 2015, 12(1): 59-65.
- [24] Alekhova T A, Aleksandrova A A, Tiu N, *et al.* *Applied Biochemistry & Microbiology*[J], 2005, 41(4): 382-389.
- [25] Alekhova T A, Zagustina N A, Aleksandrova A V, *et al.* *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*[J], 2007, 1(4): 411-416.
- [26] Alekhova T A, Aleksandrova A V, Novozhilova T Y, *et al.* *Moscow University Biological Sciences Bulletin*[J], 2008, 63(4): 163-169.

(编辑 吴 琛)