

空间站环境控制与生命保障系统 微生物腐蚀行为与控制方法

邹士文, 肖葵, 董超芳, 丁康康, 李晓刚

北京科技大学腐蚀与防护中心, 北京 100083

摘要 空间站环境控制与生命保障(环控生保)系统微重力条件下,空间站密闭狭小舱内的真菌和细菌等微生物主要来自航天员生理代谢产生的废物(尿液、粪便),日常生活和工作中形成的废弃物,以及在密闭生态系统中进行食物、气和水反复净化和再生处理所应用的微生物。空间站环控生保系统中的水、冷凝水、废水等介质中极易滋生微生物,并通过微生物产生具有腐蚀性的代谢产物,如硫酸、有机酸、硫化物和氨等,恶化金属材料腐蚀的环境。本文综述了微重力条件下的微生物生物效应、空间站材料微生物腐蚀行为、材料微生物腐蚀防护技术等3个方面,讨论了太空特殊的微重力环境下微生物生理生化性状的变化及其与材料间的复杂相互作用,认为开展微重力条件下相关材料的微生物腐蚀实验研究,明确生物膜的形成及其腐蚀作用机制,开发新型抗微生物防护材料体系,对保障空间站环控生保系统材料安全服役具有重要意义。

关键词 空间站;微重力环境;微生物;材料腐蚀行为

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.30.009

Corrosion Behavior and Control Methods of Microbiologically Influenced Corrosion of Space Station Environmental Control and Life Support System

ZOU Shiwen, XIAO Kui, DONG Chaofang, DING Kangkang, LI Xiaogang

Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract Microbes including fungus and bacteria in confined and limited capsules of space station environmental control and life support system under microgravity mainly come from astronaut metabolic wastes (stool and urine) and domestic garbage. In addition, repeated purification and recycle of food, gas and water in closed ecological facility need certain microbes, which add to the amount and species of microbes in capsules. Meanwhile, the medium such as condensate and water waste creates good breeding ground for microbes, of which corrosive metabolite such as sulfuric acid, organic acid, sulfide and ammonia and so on, will deteriorate the corrosion environment. The biological effect of microbes under microgravity condition, the microbial corrosion behavior to space station material and microbial corrosion protection technology are reviewed. Meanwhile the effect of special space microgravity environment to the physiological and biochemical characters of microbes as well as the complex interaction process between materials and microbes are discussed. It is suggested that performing microbial corrosion experiment research on related materials, expliciting the formation process of biofilms as well as corresponding corrosion mechanism, and developing new antimicrobial protection material system, are important to guarantee the safety of space station environmental control and life support system. Finally, some suggestions are provided for the relevant research and the developments, which are expected in the future.

Keywords space station; microgravity environment; microbes; material corrosion behavior

收稿日期: 2013-06-11; 修回日期: 2013-08-19

基金项目:《科技导报》博士生创新研究计划资助项目(kjdb2011006);国家自然科学基金项目(51271032);航空科学基金项目(2011ZD74003)

作者简介: 邹士文, 博士研究生, 研究方向为金属材料腐蚀与防护, 电子信箱: zoushiwen908@163.com; 肖葵(通信作者), 副教授, 研究方向为金属材料腐蚀与防护, 电子信箱: xiaokui@sina.com

0 引言

要实现空间站的长期载人飞行,保障航天员的生命安全和工作高效率,必须为空间站专门设计一套环控生保系统。环控生保系统是根据航天员对环境的需求以及人体生理代谢的摄入和排泄进行配置与设计的一种长期连续运行的较为复杂的系统。它可为航天员提供安全、健康的生活和工作环境,包括合适的气体总压、氧分压、空气温度和湿度、通风条件以及进行有害气体的控制等,同时还为航天员提供食物、饮水并处理航天员产生的代谢废物^[1]。空间站的内部环境与机组人员的健康密切相关,造成环境污染的污染源主要包括舱内设备排放的气体、大量使用的化学物质和机组人员新陈代谢的产物。载人航天器环境条件适合人类居住,也适合细菌和真菌等微生物的生长繁殖。

微重力条件下的微生物生物效应受微重力等因素的影响,空间站内微生物生态系统的种群结构、生理生化性状等会发生明显变化,原本对人体和环境无害的微生物种群会在生长繁殖、毒力、致病性、抗生素敏感性、突变率等方面发生变异^[2],如不加以控制将严重危害宇航员健康,腐蚀电子元器件及结构件,影响航天精密仪器的正常使用。

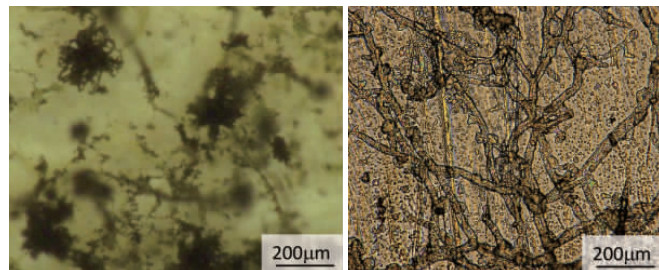
微生物以非常复杂的方式与材料相互作用,微生物腐蚀产生的不是单一形式的局部腐蚀,可造成包括点蚀、缝隙腐蚀、沉积膜下腐蚀以及选择性腐蚀的综合性腐蚀,提高应力腐蚀敏感性,还能增加电偶腐蚀和冲刷腐蚀。微生物在有氧条件下对材料的主要影响是提高局部腐蚀诱发的可能性,改变材料所处环境状态,如氧浓度、盐浓度、pH值等,使材料表面形成氧浓差等局部腐蚀^[3]。而且微生物还可以破坏金属材料表面有保护性的非金属覆盖层的稳定性。目前空间站舱内微生物种类、生命活动对腐蚀影响作用尚不十分清楚,而且在长期、密闭舱内环境中污染物浓度累积所导致冷凝水质的恶化共同作用下的腐蚀机理更加复杂,因此探明在微生物和污染物耦合作用下的材料腐蚀机理与电化学规律,是开展空间站长周期服役安全的关键和基础科学问题。

1 微重力条件下的微生物生物效应

1.1 空间站微生物种类

俄罗斯科学院生物化学研究所和莫斯科大学土壤系的研究人员发现,在“和平号”轨道空间站内水循环系统中检测到至少4种细菌,包括荧光假单胞菌、肠杆菌、微球菌和奈瑟氏球菌。在“和平号”服役的10多年间,共检测到20多种微生物,其中包括4种细菌和16种真菌,如青霉、曲霉等^[4]。霉菌的生长形态参见图1。研究还发现,由于国际空间站的升空时间比“和平”号晚,所以目前国际空间站上的微生物种群与“和平”号上有所区别,但种类数基本相同。俄罗斯研究人员通过一种特殊采样器,采集国际空间站中的微生物群落^[5]。在完成考察返回地面前,宇航员可以借助采样器从各种仪器设备表面采集样本,返回地面2h后,生物学家会将菌种放入培养基中培养,进行生长性状等相关研究。根据研究结果,科学

家确定了20多种太空微生物。许多霉菌在国际空间站上“安家落户”后,逐年滋生,越长越多;至于细菌,通常有3~4种玫瑰球菌、杆菌和细球菌同时落入轨道站上^[7]。在这些微生物菌群中偶尔会出现生物多样性,例如生物学家2003年在国际空间站上发现了9种完全不同的细菌。



(a) 黑曲霉 (a) *Aspergillus niger*
(b) 绳状青霉 (b) *Penicillium funiculosum*

图1 霉菌的生长形态

Fig. 1 Stereo microscopic images of mold

1.2 微重力环境微生物生长

微重力环境下细菌生长繁殖研究中,Klaus等^[8]使用大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等进行研究发现,与地面环境重力下细菌生长过程相比,微重力环境下细菌的对数生长期缩短,生长速度明显加快,最终的生物数量增加。微重力环境下好氧的嗜有机甲基杆菌可表现出厌氧生长的趋势^[9]。Urban^[10]利用“和平号”对4类细菌进行4个月的研究,发现4种细菌的抗生素敏感性发生了改变,大部分细菌表现为对抗生素的抵抗力变强,但回到地面后这种现象很快消失,具体机制尚不明确。美国国家航空航天局(NASA)一项针对宇航员体内细菌种群的研究表明:在5次太空飞行后,宇航员体内固有肠道细菌群落发生部分交换,并且部分固有细菌的抗生素耐药性增强^[11]。

微重力环境可以对细菌的毒力产生影响。Wilson等^[12]通过对沙门氏菌的研究发现,模拟微重力条件下由于毒力因子侵袭作用,蛋白、脂多糖等的表达受到影响。Chopra等^[13]采用旋转壁式生物反应器模拟微重力环境,研究了沙门氏菌和肠致病性大肠杆菌微重力处理前后的毒力变化,结果表明微重力处理后沙门氏菌的毒力明显增强。Orihuela等^[14]使用旋转细胞培养生物反应器研究了模拟微重力前后肺炎链球菌的毒力变化,研究发现,微重力处理后细菌对细胞的黏附能力增加,同时一种黏附蛋白A的表达量升高。Aviles等^[15]使用克雷伯杆菌,采用与Orihuela等同样的模拟微重力方式,得到了相似的结论。

微重力环境下,液体失重和浮力引起的对流可降低细胞外物质运输效率,并提高悬浮生长细菌的底物利用率。研究表明^[17,18],微重力可以缩短大肠杆菌无运动培养物的延滞时间,对数生长期延长,同等条件下细菌数比地面参照多25%。微重力条件下耐辐射异常球菌对辐射损伤的修复作用有显

著增强。空间微重力环境下培养的大肠杆菌数量和底物利用率同地面参照相比提高了 25%。相反用超重实验培养的大肠杆菌最后数量比地面对照减少了 33%~40%。研究人员在研究大肠杆菌在微重力环境下的抗菌功能时发现,细菌次生代谢产物积累位点会随重力的变化发生转移^[2]。

微重力环境可以改变细菌生理生化性状,抑制细胞 DNA 断链的修复,提高细菌对诱变剂的敏感性,进而提高细菌的变异率。日本学者对经太空飞行后的大肠杆菌的研究发现,微重力可诱发细菌基因突变并产生 SOS 效应^[9]。这是因为在低重力环境下,随着营养物质的消耗,这些基因表达的改变有助于细菌进入生长静止阶段,从而适应贫养环境^[9]。

2 空间站材料微生物腐蚀行为

2.1 空间站材料微生物腐蚀的危害

微生物可对空间站材料进行腐蚀,危及空间站安全。自人类建立空间站以来,一直伴随着微生物腐蚀的威胁。1980 年“礼炮 6 号”空间站运行期间,第 5 批乘员组在宇航员活动舱内一些装饰处、健身器材索上和其他区域发现了一层由青霉、曲霉和镰孢霉等组成的白色薄膜^[20]。之后俄罗斯开始有针对性地研究微生物对航天器造成损坏的问题。5a 后,在“礼炮 7 号”空间站工作舱的一些部件接合处和电缆上发现肉眼可见的霉菌。将部分样品带回地面研究后发现,样品表面 25%~50% 的面积被霉菌菌丝体覆盖,在某些材料(如绝缘带)上甚至发现了穿透性缺陷^[2]。

“和平号”空间站就曾发生聚合物结构材料遭微生物破坏、金属发生生物性腐蚀、水再生系统液压管路形成生物膜层和堵塞物等航天器生态危机^[7]。科研人员在“和平号”空间站报废的通讯交换设备控制器上发现,在绝缘管、插头和高强度的聚氨脂油漆表面均生长着大量霉菌,绝缘材料遭破坏处的铜导线都发生了腐蚀^[21]。研究人员采集国际空间站上的微生物群落,在地面上进行材料腐蚀实验时发现,微生物可以在 1 个月内将聚酯纤维“咬断”;3 个月内可以将铝镁合金“吃掉”。其中玫红球菌的破坏性最强,其生长代谢过程中产生的有机酸和酶对设备和仪器有强烈的破坏作用^[7]。因此科学家建议,建造仪器和宇宙飞船的全部材料必须做微生物实验,以便确定这些材料的耐生物损伤性能。

2.2 材料微生物腐蚀行为及电化学规律

目前关于微生物腐蚀已有一定的研究,细菌腐蚀方面的研究主要集中在异养厌氧菌硫酸盐还原菌(SRB),对硫氧化细菌和铁细菌等化能自养好氧菌也有少量报道,而对自然界中广泛存在且在空间站环境中也可能存在的化能异养好氧菌的腐蚀研究则鲜有报道。俞敦义等^[22]研究了温度对 SRB 生长的影响及对 A3 钢和 J55 钢 SRB 腐蚀的影响,着重分析了温度和 Fe^{2+} 浓度对碳钢 SRB 腐蚀的影响。刘宏芳等^[23]研究了介质 pH 值对 SRB 生长的影响,开展了不同 pH 值介质中 SRB 的变异规律及变异菌对碳钢腐蚀影响的研究,结果表

明,耐酸菌与耐碱菌的活性均弱于原始菌,对碳钢腐蚀性更强,其中耐碱菌腐蚀性最强。樊友军等^[24]采用交流阻抗和动电位极化曲线等电化学方法研究了化能异养好氧菌小球菌和芽孢杆菌对碳钢腐蚀的影响,结果表明无菌状态下 A3 钢暴露 2d 的腐蚀速率(C_{rate})为 $4.143 \times 10^{-6} A/cm^2$,接种小球菌和芽孢杆菌暴露 2d 的 C_{rate} 分别为 $4.432 \times 10^{-5} A/cm^2$ 和 $2.479 \times 10^{-5} A/cm^2$ 。两种菌均能促进碳钢的腐蚀进程,但其影响不及 SRB 显著。王庆飞等^[25]进行过相关研究,它们将所选定的试样浸在指定海域中进行海上挂片实验,然后定期取出观察,以研究海洋微生物对材料的附着以及生物膜的形成对金属腐蚀的影响,结果表明均匀完整的生物膜并不改变低合金钢阴极的极化类型和控制步骤,其扩散屏障作用一定程度上减缓了低合金钢的腐蚀,但增加了不锈钢的孔蚀敏感性。

邹士文等^[27-29]对霉菌作用下的印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)腐蚀行为进行了研究,结果表明不同表面处理的印制电路板表面在适宜的温湿度环境下都有霉菌的生长,如图 2 和图 3 所示。霉菌生长造成覆铜板(PCB-Cu)表面有菌区域贫氧,降低霉菌生长区域金属被氧化的速率,抑制腐蚀过程,但却使得整个金属表面开尔文(SKP)电位上升,导致 PCB-Cu 腐蚀加速。霉菌在无电镀镀金处理印制电路板(PCB-ENIG)表面微孔处附着繁殖,吸湿、产酸等代谢能促进微孔腐蚀的发生和发展,造成 PCB-ENIG 严重腐蚀,由于表面腐蚀产物脱落,易造成电子电路失效;同时随着霉菌的生长,导致整个金属表面 SKP 电位上升,加速 PCB-ENIG 的微孔腐蚀。经浸银处理,PCB 表面霉菌菌落区域作为阳极发生腐蚀;经喷锡处理 PCB 表面霉菌菌落区域作为腐蚀电池的阴极受到保护,而菌落边缘区域作为阳极发生腐蚀。浸银处理工艺不能完全抑制 PCB 表面霉菌的生长,不能完全满足 PCB 防霉菌的要求。

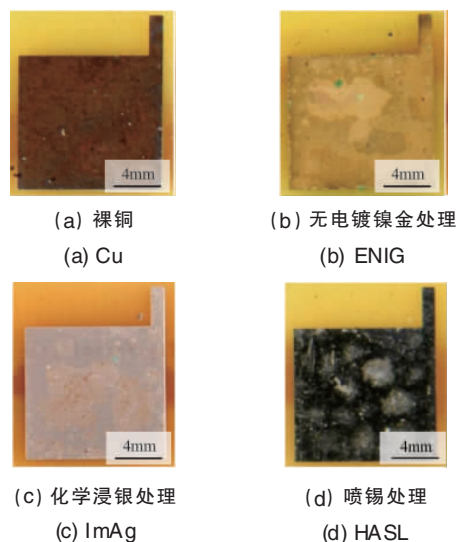


图 2 印制电路板霉菌实验后的宏观形貌
Fig. 2 Macro-morphology of PCB with different finished methods after mold test

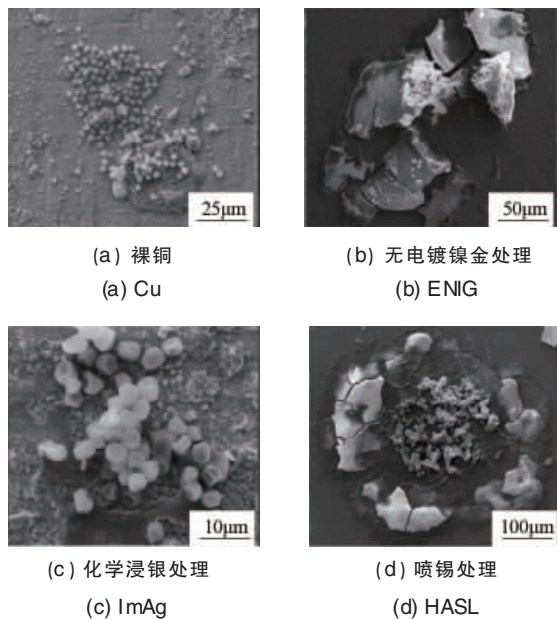
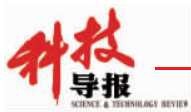


图3 印制电路板霉菌实验后的 SEM 形貌
Fig. 3 SEM images of PCB with different finished methods after mold test

北京科技大学腐蚀与防护中心对3种不同表面处理的LF31防锈铝进行了宛氏拟青霉和黑曲霉环境腐蚀实验,研究发现铝合金表面(Al_2O_3)、钝化处理表面(铬酸盐钝化)和有机涂层(环氧锌黄)表面都有霉菌孢子的生长繁殖,并形成菌丝体,如图4所示。其中铬酸盐钝化处理表面利于霉菌孢子附着,初期霉菌长势最好;环氧锌黄涂层表面光滑,初期菌落少,但随着时间延长,霉菌菌丝体迁移式交叉网状生长,与材料表面结合紧密,不易脱落。霉菌的附着生长繁殖过程伴随着吸湿、产酸等物理化学作用,造成材料表面氧浓差电池腐蚀的发生,提高疏水涂层的吸水性,降低表面处理工艺的防腐蚀作用。

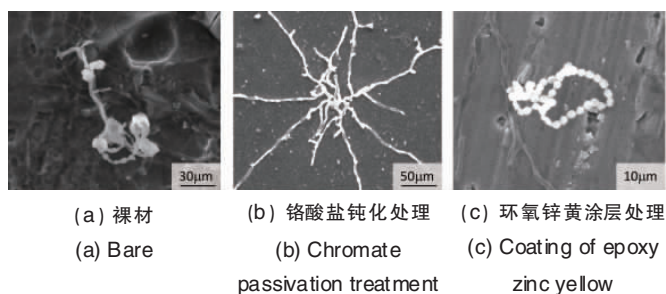


图4 不同表面处理的LF31防锈铝经霉菌实验后的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM images of aluminum alloy LF31 with different finished methods after mold test

3 材料微生物腐蚀防护技术

材料微生物腐蚀的关键在于生物膜与金属基体间的相互作用,因此了解生物膜的形成及腐蚀作用机制对改进材料

微生物腐蚀防护技术具有重要意义。生物膜是微生物附着在材料表面形成的一个不同于本体溶液的,进行着大量复杂的化学反应的特殊环境,研究人员对此开展了大量研究工作^[30-39]。微生物在材料表面附着受生物与材料两方面特性的影响,如营养条件、生长类型与碳源、材料成分、表面粗糙度、化学组分和极化程度等。生物膜是一种不均匀的动态膜,生物膜的性质和状态很难进行定量描述。通过比较极化电流与微电极测量的两组氧扩散流量数据,可以推导生物膜内氧流量;通过稳态测量和电流体动力学阻抗(EHD)相结合的技术可以测定生物膜的扩散层厚度,氧扩散系数以及孔隙率等参数以表征生物膜的特性;同时可以采用统计推断等方法建立细菌种群生长的动力学模型,分析测定生物膜的动力学参数,获得模型参数的统计分布。

研究人员发现几乎所有的空间站和空间飞行器上都长有多种微生物,并快速繁殖、生长、变异,它们腐蚀材料表面及涂覆层,其中空间站冷却系统被微生物腐蚀最严重。科学家建议在进行空间站和宇宙飞船设计和选材时,全部材料必须作微生物腐蚀实验,以便确定材料的耐生物腐蚀损伤性能,确保仪器设备和关键部件的服役安全。金属材料表面的防护涂层在空间站实际服役过程中不可避免地受到各种微生物的腐蚀破坏,因此研究人员致力于开发新型的抗菌防霉涂层新材料和工艺技术。目前国内外关于抗菌防霉涂层方面的研究主要包括基于添加杀菌剂的纳米复合抗菌涂层技术和基于低表面能的防微生物污损纳米涂层技术等。按添加抗菌剂种类分,目前国内外的研究主要集中在以Ag、Cu、Zn等重金属离子为抗菌剂的抗菌涂层和含 TiO_2 、ZnO等纳米材料的光催化型纳米抗菌涂层两个方面。含抗菌剂的涂层材料可以通过喷涂、辊涂、溶胶-凝胶、复合镀等工艺在材料表面制备。

重金属离子具有杀菌能力,安全顺序为 $Ag > Co > Ni > Al > Zn > Cu = Fe > Mn > Sn > Ba > Mg > Ca$,其中Ag最好,目前应用最广泛的是Ag系、Cu系和Zn系。当细菌与金属离子接触时,金属离子可破坏细菌主体结构,与细菌增殖的酶结合,使酶失去活性,从而达到防菌抗菌的目的^[37]。日本神户钢铁公司开发了一种用于不锈钢、钛材和铝材等抗菌镀层材料的合金镀技术——“KENI FINE”镀层,具有优良的抗菌、防霉和防藻性能,其附着性、耐冲击性和耐蚀性也很优良。美国科学家开发了一种含有银沸石的抗菌涂层钢板,能抑制细菌与微生物的生长繁殖。德国科学家借助纳米技术开发出一种可以直接作用于微生物细胞壁的新型无毒防护涂层,阻止病原体繁殖并杀死病原体。该涂层可以阻止墙壁表面受霉菌和藻类等的侵袭,还可以自主清除对抗生素具有抗药性的“医院病菌”。

常见的光催化材料有 TiO_2 和ZnO等,其中最为常用的是锐钛型 TiO_2 。在紫外线照射下,其表面产生氧化作用很强的活性物质 $OH\cdot$ 、 O_2 等使细菌分解,起到杀菌作用。日本神户钢铁公司开发的表面氧化处理后的灭菌钛板“SPARK”,表面形成的 TiO_2 光触媒可从紫外线吸收能量而杀菌。经日本食品分析中心测试,该灭菌钛板经荧光灯照射30min,70%以上的大

肠杆菌可被杀灭,照射 2h,大肠杆菌全部被杀灭,此种钛板还可除臭、防污。日本金属工业公司成功开发了具有抗菌、防霉、防污效果的含光催化涂层的环境功能型不锈钢板,该涂层同时具有光活性与耐候性两种功能^[8]。

近年来研究人员通过在材料表面制备超疏水特性(接触角 $>150^\circ$)的低表面能涂层来防止微生物附着和腐蚀材料。理想的超疏水表面应该同时具有较大的接触角和较小的滚落角(滚落角 $\alpha < 10^\circ$)。相比普通涂层,超疏水技术是一种新兴的表面处理技术,具有更强的疏水性能和抗水分子渗透作用,因而具有更好的防腐性能。超疏水涂层具有较低的表面能,细菌等污损生物难以在涂层表面附着,即使附着也不牢固,在自重、水流或其他外力作用下很容易脱落。低表面能防污涂层利用自身的物理特性达到防菌除霉的目的,能起到长期防生物污损、抑制材料腐蚀的效果,具有广阔的发展前景。

4 结论

空间站环控生保系统内的微生物对人机安全构成严重威胁,微生物的直接或间接作用能够导致材料腐蚀失效,并引发设备故障。空间站环控生保系统内材料表面的微生物附着生长是不可避免的,控制难度大。因此选用抗微生物耐蚀材料,开发新型防护体系成为空间站环控生保系统选材的依据和发展方向;开展相关材料的微生物腐蚀实验研究,明确材料耐微生物腐蚀损伤性能成为确保仪器设备和关键部件服役安全的必要环节。

参考文献 (References)

- [1] 黄志德, 沈学夫. 空间站环境控制和生命保障技术[J]. 中国航天, 2002 (2): 28-32.
Huang Zhide, Shen Xuefu. Aerospace China, 2002(2): 28-32.
- [2] 王伟, 薛小平, 杨慧. 微重力环境下的细菌生物学效应[J]. 生命的化学, 2011, 31(1): 162-166.
Wang Wei, Xue Xiaoping, Yang Hui. Chemistry of Life, 2011, 31(1): 162-166.
- [3] Juzeliunas E, Ramanauskas R, Lugauskas A, et al. Microbially influenced corrosion acceleration and inhibition. EIS study of Zn and Al subjected for two years to influence of *Penicillium frequentans*, *Aspergillus niger* and *Bacillus mycoides*[J]. Electrochemistry Communications, 2005, 7(3): 305-311.
- [4] Juzeliunas E, Ramanauskas R, Lugauskas A, et al. Microbially influenced corrosion of zinc and aluminium—two-year subjection to influence of *Aspergillus niger*[J]. Corrosion Science, 2007, 49(11): 4098-4112.
- [5] Vesper S J, Wong W, Kuo C M, et al. Mold species in dust from the International Space Station identified and quantified by mold-specific quantitative PCR[J]. Research in Microbiology, 2008, 159(6): 432-435.
- [6] 杨宏, 侯永青, 张兰涛. 微生物控制——我国空间站面临的新挑战[J]. 载人航天, 2013, 19(2): 38-46.
Yang Hong, Hou Yongqing, Zhang Lantao. Manned Spaceflight, 2013, 19 (2): 38-46.
- [7] 秦朝晖. “细菌”入侵国际空间站[J]. 科学大众: 中学版, 2008, 4: 023.
Qin Chaohui. Popular Science, 2008, 4: 023.
- [8] Klaus D M, Howard H N. Antibiotic efficacy and microbial virulence during space flight[J]. Trends in Biotechnology, 2006, 24(3): 131-136.
- [9] Kacena M A, Leonard P E, Todd P, et al. Low gravity and inertial effects on the growth of *E. coli* and *B. subtilis* in semi-solid media[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1997, 68(12): 1104-1108.
- [10] Lam K S, Gustavson D R, Pimik D L, et al. The effect of space flight on the production of actinomycin D by *Streptomyces plicatus*[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2002, 29(6): 299-302.
- [11] Urban J E. Adverse effects of microgravity on the magnetotactic bacterium *Magnetospirillum magnetotacticum*[J]. Acta Astronautica, 2000, 47(10): 775-780.
- [12] Juergensmeyer M A, Juergensmeyer E A, Guikema J A. Long-term exposure to spaceflight conditions affects bacterial response to antibiotics[J]. Microgravity Science and Technology, 1999, 12(1): 41-47.
- [13] Wilson J W, Ott C M, Ramamurthy R, et al. Low-Shear modeled microgravity alters the *Salmonella enterica* serovar typhimurium stress response in an RpoS-independent manner[J]. Applied Environmental Microbiology, 2002, 68(11): 5408-5416.
- [14] Chopra V, Fadl A A, Sha J, et al. Alterations in the virulence potential of enteric pathogens and bacterial-host cell interactions under simulated microgravity conditions[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health Part A: Current Issues, 2006, 69(14): 1345-1370.
- [15] Orihuela C J, Wilson C, Kawasaki M, et al. *Streptococcus pneumoniae* gene expression and virulence potential in simulated microgravity and the space environment [C/OL]// Division of Space Life Sciences. Bioastronautics Investigators' workshop, Galveston, 2001[2008-08-30]. <http://www.dsls.usra.edu/meetings/bio2001/pdf/160.pdf>.
- [16] Aviles H, Belay T, Fountain K, et al. Increased susceptibility to *Pseudomonas aeruginosa* infection under hindlimb-unloading conditions[J]. Journal of Applied Physiology, 2003, 95(1): 73-80.
- [17] Thevenet D, D'ari R, Bouloc P. The SIGNAL experiment in BIORACK: *Escherichia coli* in microgravity[J]. Journal of Biotechnology, 1996, 47 (2/3): 89-97.
- [18] Brown R B, Klaus D, Todd P. Effects of space flight, clinorotation, and centrifugation on the substrate utilization efficiency of *E. coli*[J]. Microgravity Science and Technology, 2002, 13(4): 24-29.
- [19] Takahashi A, Ohnishi K, Takahashi S. The effects of microgravity on induced mutation in *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Advances in Space Research, 2001, 28(4): 555-561.
- [20] Raja V, Eric M, Laura L. Changes in gene expression of *E. coli* under conditions of modeled reduced gravity[J]. Microgravity Science Technology, 2008, 20(1): 41-57.
- [21] 唐光泽, 白羽马, 欣新. TiO₂ 光催化材料在未来空间领域的应用[C]// 2009年空间环境与材料科学论坛, 北京, 11.14, 2009.
Tang Guangze, Bai Yuma, Xin Xin. Applications of TiO₂ photocatalytic materials in the field of future space[C]. 2009 Space Environment and Materials Science Forum, Beijing, November 14, 2009.
- [22] 黄训经. 微生物——空间站的大敌[J]. 世界博览, 2002(10): 41-42.
Huang Xunjing. World Vision, 2002(10): 41-42.
- [23] 俞敦义, 彭芳明, 郑家荣. 硫酸盐还原菌对油田套管腐蚀的研究[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 154-158.
Yu Dunyi, Peng Fangming, Zheng Jiashen. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 154-158.
- [24] 刘宏芳, 冯绪文, 许立铭, 等. 细菌的变异及其腐蚀行为的研究[J]. 材料保护, 2000, 33(7): 5-6.
Liu Hongfang, Feng Xuwen, Xu Liming, et al. Journal of Materials Protection, 2000, 33(7): 5-6.

- [25] 樊友军, 皮振邦, 华萍. 微生物腐蚀的作用机制与研究方法现状[J]. 材料保护, 2001, 34(5): 18-20.
Fan Youjun, Pi Zhenbang, Hua Ping. Journal of Materials Protection, 2001, 34(5): 18-20.
- [26] 王庆飞, 隋静, 苏润西, 等. 模拟生物膜方法研究钢在海水中的腐蚀行为[J]. 电化学, 1999, 5(1): 55-58.
Wang Qingfei, Sui Jing, Su Runxi, et al. Electrochemistry, 1999, 5(1): 55-58.
- [27] 邹士文, 李晓刚, 董超芳, 等. 霉菌对裸铜和镀金处理的印制电路板腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(6): 687-695.
Zou Shiwen, Li Xiaogang, Dong Chaofang, et al. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(6): 687-695.
- [28] 邹士文, 肖葵, 董超芳, 等. 霉菌对化学浸银处理印制电路板腐蚀行为的影响[J]. 科技导报, 2012, 30(11): 21-26.
Zou Shiwen, Xiao Kui, Dong Chaofang, et al. Science & Technology Review, 2012, 30(11): 21-26.
- [29] 邹士文, 李晓刚, 董超芳, 等. 霉菌环境下喷锡处理印制电路板腐蚀的微区电化学研究[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3): 809-815.
Zou Shiwen, Li Xiaogang, Dong Chaofang, et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3): 809-815.
- [30] 樊友军, 皮振邦, 华萍, 等. 细菌对碳钢腐蚀的电化学研究[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(3): 93-96.
Fan Youjun, Pi Zhenbang, Hua Ping, et al. Corrosion and Protection, 2002, 23(3): 93-96.
- [31] Brenda J L, Patricia W. Factors influencing the adhesion of microorganisms to surfaces[J]. The Journal of Adhesion, 1986, 20(3):187-210.
- [32] Lewandowski Z. Structure and function of bacterial biofilms[J]. Corrosion, 1998, 54(5): 296-303.
- [33] Rasmussen K, Lewandowski Z. The accuracy of oxygen flux measurements using microelectrodes[J]. Water Research, 1998, 32(12): 3747-3755.
- [34] LHostis E, Festy D, Tribollet B, et al. Characterization of biofilms formed on gold in natural seawater by oxygen diffusion analysis [J]. Corrosion, 1997, 53(1): 53-60.
- [35] Bois F Y, Fahmy T, Block J C, et al. Dynamic modeling of bacteria in a pilot drinking water distribution system[J]. Water Research, 1997, 31(12): 31-37.
- [36] Riefler R G, Ahlfeld D P, SmetsGuy B F. Respiriometric assay for biofilm kinetics estimation: Parameter identifiability and retrievability[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1998, 57(1): 35-45.
- [37] 高令远, 王向东, 王成蓓. 近年日本抗菌材料的发展[J]. 特殊钢, 2002, 23(3): 32-34.
Gao Lingyuan, Wang Xiangdong, Wang Chenbei. Special Steel, 2002, 23(3): 32-34.
- [38] 时海芳, 姜晓红, 李智超. 金属基抗菌涂层发展现状[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(10): 55-58.
Shi Haifang, Jiang Xiaohong, Li Zhichao. Electroplating and Finishing, 2008, 27(10): 55-58.

(责任编辑 王媛媛)

· 学术动态 ·



2013年诺贝尔物理学奖揭晓

2013年10月8日,2013年诺贝尔物理学奖揭晓。比利时科学家 Francois Englert、英国科学家 Peter W. Higgs 因“理论性发现了一种机制,有助于我们理解亚原子粒子质量的起源,最近欧洲大型强子对撞机 ATLAS 和 CMS 实验所发现的预测中的基本粒子对其进行了确认”而获得 2013 年诺贝尔物理学奖。

1964 年, Francois Englert 和 Peter W. Higgs 分别提出了粒子如何获得质量的理论。2012 年,设在瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心实验室发现了所谓的希格斯粒子,证实了他们提出的理论。整个标准模型是建立在一种特殊粒子存在的基础上,这种粒子即希格斯粒子,它来源于一种填满所有空间的无形场域,通过与该场域的接触,所有粒子才会获得质量。Englert 和 Higgs 提出的理论描述了这一过程。

详见科学网 <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/10/283493.shtm>。