

三种典型菌种复合环境下 2A12 铝合金的 腐蚀行为研究

张洪波¹, 张勇², 樊伟杰², 刘宏禧²

(1. 海军研究院 空中所, 上海 200436;

2. 海军航空大学 青岛校区 航空机械工程与指挥系, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 研究由硫酸盐还原菌、铁细菌、脱氮硫杆菌三种典型菌种复合环境下飞机常用材料 2A12 铝合金的腐蚀行为。**方法** 实验室内菌种培养再现飞机内部封闭部位复合菌种环境, 通过电化学交流阻抗、动电位极化曲线及体视显微镜对 2A12 铝合金的电化学性能和宏观形貌进行表征, 揭示 2A12 铝合金在复合菌落下腐蚀程度随时间和复合菌落的影响。**结果** 与空白试验对比发现, 复合菌种环境下, 2A12 铝合金表面出现明显裂缝与腐蚀坑, 部分腐蚀孔隙中有腐蚀产物与微生物膜的残留。在复合菌液中, 腐蚀电流密度最小为 $1.12 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 最大为 $2.43 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。**结论** 三种典型菌种复合环境下, 2A12 铝合金的腐蚀速率是对照组的 62.79 倍, 腐蚀深度是对照组的 3.41 倍, 复合菌落对 2A12 铝合金的腐蚀影响规律与菌落种类、代谢特点及多种菌落间相互作用有关。

关键词: 复合菌种; 腐蚀; 电化学; 微观形貌

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.003

中图分类号: TG172.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)02-0013-07

Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy in Combined Environment of Three Typical Bacterial Species

ZHANG Hong-bo¹, ZHANG Yong², FAN Wei-jie², LIU Hong-xi²

(1. Institute of Air Combat Systems, Naval Research Academy, Shanghai 200436, China;

2. Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Qingdao, 266041, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy, a common material for aircraft, under the compound environment with three typical strains, namely, sulfate reducing bacteria, iron bacteria and thiobacterium denitrifides. The compound bacteria environment in the internal closed parts of airplane was reproduced and the electrochemical properties and macro microstructure of 2A12 aluminum alloy were characterized through electrochemical impedance, potentiodynamic polarization curve and stered microscope, revealing the 2A12 aluminum alloy corrosion degree in conformity with colony and the effect of compound colony over time. Compared with the blank test, it was found that there were obvious cracks and corrosion pits on the surface of 2A12 aluminum alloy under the compound bacteria environment, and some corrosion products

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2019-10-22

Received: 2019-08-16; **Revised:** 2019-10-22

作者简介: 张洪波 (1967—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为无线电通信指挥。

Biography: ZHANG Hong-bo (1976—), Female, Senior Engineer, Research focus: wireless communication.

通讯作者: 张勇 (1981—), 男, 副教授, 主要研究方向为海军飞机的腐蚀与防护。

Corresponding author: ZHANG Yong (1981—), Male, Associate professor, Research focus: the navy aircraft corrosion and protection.

and microbial film residues were found in the corrosion pores. In the compound bacterial solution, the minimum corrosion current density was $1.12 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, and the maximum was $2.43 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$. The corrosion rate of 2A12 aluminum alloy is 62.79 times as high as that of the control group and the corrosion depth is 3.41 times as high as that of the control group under the combined environment of three typical bacterial species. The rule of the influence of compound colonies on the corrosion of 2A12 aluminum alloy is related to the types of colonies, metabolic characteristics and the interaction among various colonies.

KEY WORDS: compound bacteria; corrosion; electrochemistry; microstructure

海军飞机常年服役于高温高湿的地区,油箱、内部封闭部位密封胶等有丰富碳源,这些条件均为微生物的生长提供了适宜的生存环境^[1-3]。微生物在金属表面生长形成生物膜,在生物膜内部,因微生物新陈代谢活动,pH值、溶解氧、离子等因素均导致金属基体发生腐蚀。这种因微生物新陈代谢活动导致的金属腐蚀称为微生物腐蚀(Microbiologically Influenced Corrosion)。在全部的腐蚀种类中,微生物腐蚀是对日常生活影响最为严重的,20%的金属材料和建筑材料损失与微生物的活动有关。

飞机在海洋环境飞行时,微生物会随着空气进入机体内部,并附着在飞机的油箱、管路或电子器械等封闭部位,进而在材料表面形成致密的生物膜。一旦发生微生物腐蚀,将损伤结构强度,缩短飞机使用寿命,增加维护保养费用,甚至威胁飞行安全^[4-5]。

研究表明,导致飞机内部封闭部位发生腐蚀的典型微生物主要有硫酸盐还原菌(SRB)、铁细菌(IOB)、脱氮硫杆菌(*T.dentrificans*)。李庆超等^[6]研究了海泥环境中典型的硫酸盐还原菌、铜绿假单胞菌、噬油菌等复合菌种对Q235铜和黄铜的腐蚀机理。结果显示,铜绿假单胞菌和噬油菌能够抑制对腐蚀起主要作用的硫酸盐还原菌的生长,形成拮抗作用,一定程度抑制Q235钢在该复合菌种环境下的腐蚀。常雪婷等人^[7]通过实海挂片的方式取得材料表面三种优势附着菌种分别为芽孢杆菌、氯酚节杆菌和耐盐黄色链霉菌,并通过不同菌种对酸性环境的影响,研究了微生物对Fe₃Al的腐蚀机理。王华、梅朦、汪梅芳等人^[8-10]分别证明了硫酸盐还原菌、铁细菌、脱氮硫杆菌会加速金属的腐蚀。除此之外,国内文献中有关复合菌种下金属腐蚀机理的研究少见报道。

2A12铝合金因其具有良好的焊接性、高强度及热处理强化等优势,被大量运用于飞机油箱与蒙皮等位置。国内许多学者^[11-14]针对该金属在氯离子环境、酸性环境等物理环境中的腐蚀行为进行了系统性研究,但针对2A12铝合金在复合菌种环境下的腐蚀行为研究未见报道。实际工况下的微生物群落均为多菌种共生环境,因此研究复合菌种环境下2A12铝合金的腐蚀行为对飞机某些部位的设计选材及抑菌环境选择具有重要意义。

文中选取飞机表面对腐蚀影响较为明显的三种典型菌种作为研究对象,通过实验室内培养的方式再现表面环境,采用电化学、微观形貌观察等手段,对2A12铝合金的腐蚀行为进行研究^[15]。实验结果表明,不同微环境中,金属的腐蚀规律有较大差异。通过与空白试验的对比,证明了三种混合菌落对2A12铝合金的腐蚀有着明显的加速。

1 实验

1.1 材料

金属材料选用飞机油箱与管路中常用的2A12铝合金,材料的化学成分见表1。经线切割加工成边长为1cm的立方体,选取其中一个工作面。在工作面对侧面用导电胶与铜导线电连接,除工作面外,整体用环氧树脂固封。工作表面用金相磨抛机逐级打磨至1500#,依次用蒸馏水、无水乙醇和丙酮脱水脱脂,放入干燥器中备用。试验前置于紫外灯下灭菌30min,保证试验件表面无杂菌干扰。实验中其他所用营养液、培养基等试剂均为国药集团化学试剂有限公司生产,纯度均为分析纯。

表1 2A12铝合金化学组成
Tab.1 Chemical composition of 2A12

元素	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Ni	Fe	Al
质量分数/%	0.5	3.8	1.2	0.3	0.6	0.15	0.01	0.5	余量

1.2 菌种培养

单一菌种先在相应的培养基中培养1~2周,培养基具体成分如下所述。

硫酸盐还原菌培养基: 0.5 g/L KH₂PO₄, 1.0 g/L NH₄Cl, 0.5 g/L Na₂SO₄, 0.1 g/L CaCl₂, 2.0 g/L MgSO₄,

6 mL 乳酸钠, 1.0 g/L 酵母粉, 0.3 g/L 柠檬酸钠, 1 L 陈海水。

铁细菌培养基: 0.2 g/L NaCl, 0.5 g/L NaNO₃, 0.5 g/L MgSO₄, 0.5 g/L K₂HPO₄, 0.5 g/L 硫酸亚铁铵, 10.0 g/L 柠檬酸铁铵, 15.0 g/L 琼脂。

脱氮硫杆菌培养基: 5 g/L Na₂S₂O₃·5H₂O, 2 g/L

KNO_3 , 2 g/L KH_2PO_4 , 1 g/L NaHCO_3 , 0.5 g/L $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.01 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.5 g/L NH_4Cl 。

上述三种培养基在接种前用 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 值为 6.8~7.2, 将配置好的培养基放入锥形瓶中, 经 121 °C 的高压灭菌。

1.3 复合菌种腐蚀过程

复合菌种环境由上述三种菌种溶液按照 1:1:1 (质量比) 的比例复配而成。将 2A12 铝合金试件放入混合菌种中浸泡, 在恒温 38 °C 条件下进行培养。分别在培养 2、4、6、8 d 后, 取出一组试件进行测试表征, 表征完的试件不再放回培养液中。为研究菌种对腐蚀速率的影响, 设置一组空白件, 培养液环境与培养试件与试验组相同, 但不接种微生物菌种。

1.4 腐蚀行为表征

定期取出试件, 依次借助电化学性能测试和微观形貌表征的方法对腐蚀状况进行表征。

采用经典三电极体系在 PARSTAT 4000 电化学工作站上进行电化学性能测试, 其中 2A12 铝合金为工作电极, 铂电极 (10 mm×10 mm, 有效测试面积为 1 cm²) 为对电极, 饱和甘汞电极 (SEC) 为参比电极。分别测试不同腐蚀时间后 2A12 铝合金的电化学交流阻抗谱和动电位极化曲线, 进而对其腐蚀机理及腐蚀速率进行分析表征。交流阻抗测试的频率范围为 10⁵~10⁻² Hz, 扰动电位为 10 mV。动电位极化曲线测试起始电位为 -0.4 V, 当扫描电位达到击穿电位时停止扫描, 扫描速度为 20 mV/min。

将进行完电化学测试的试件, 采用浓硝酸除去表面非附着性腐蚀产物, 然后用无水乙醇脱水, 丙酮除油。置于科视达 KH7700 体视显微镜下对腐蚀形貌进行观察。

2 结果与分析

2.1 腐蚀形貌

在混合菌液中浸泡不同时间后, 2A12 铝合金的表面微观形貌如图 1 所示。图 1a 中显示, 在腐蚀浸泡 2 d 后, 2A12 铝合金表面开始出现局部较小的点状腐蚀和沿划痕方向的缝隙腐蚀, 在随后的浸泡过程中这一现象逐渐严重。由图 1b 可知, 腐蚀坑直径明显增大, 但未连接成片, 部分位点缝隙腐蚀宽度出现增大现象。从图 1c 可以看出, 腐蚀坑中仍可看到未清除的附着性腐蚀产物, 腐蚀坑密度及直径均增大明显, 小范围连成片。这一过程主要伴随着铝合金表面点蚀从萌生到快速扩展的过程。图 1d 为浸泡 8 d 后的形貌, 此时 2A12 铝合金表面逐渐出现大量的腐蚀坑孔和腐蚀裂缝, 形成白色菜花样结构, 白色物质在试件表面交联, 并呈簇状分布。这种形貌的形成是因为在腐蚀的环境中, 微生物附着在铝合金表面的厚度不同, 从而产生不均匀的腐蚀产物, 形成一定的氧气浓度差, 从而导致腐蚀不均匀, 形成局部腐蚀。从图 1d 中可以清晰地看出, 腐蚀的裂缝与坑孔中有腐蚀产物生物膜的残留。分别对两个实验件中腐蚀程度较深的 10 个点进行深度测量, 结果见表 2。根据表 2

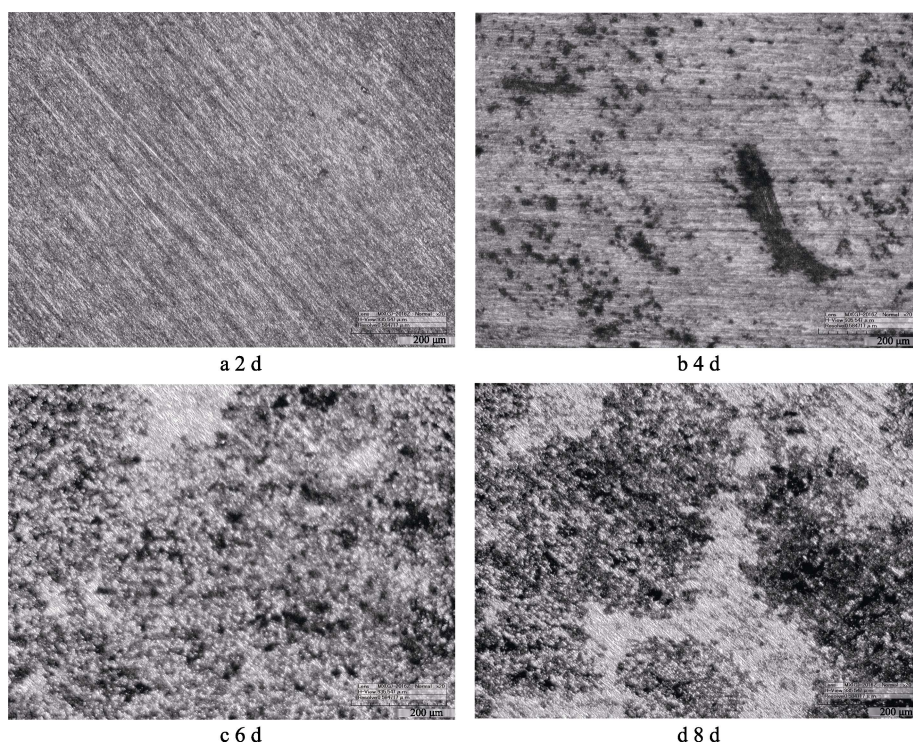


图 1 2A12 铝合金在菌液腐蚀中随时间变化的腐蚀产物的微观形貌

Fig.1 Microstructure of 2A12 aluminum alloy after being soaked in solution for different time

表2 2A12 铝合金腐蚀深度
Tab. 2 Corrosion depth of 2A12 aluminum alloy

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	平均值
实验组	120.2	138.2	118.2	119.3	123.2	125.1	126.1	133.2	125.6	121.7	125.1
对照组	34.3	40.2	36.4	36.8	35.4	38.7	40.1	36.5	34.5	33.2	36.6

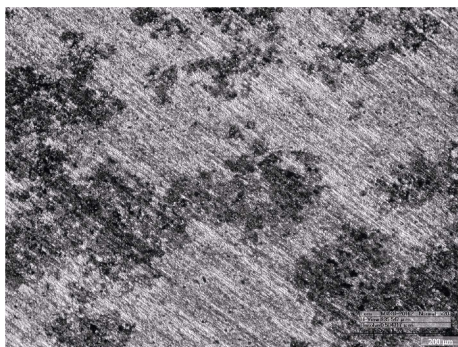


图2 空白件浸泡8 d后的微观形貌
Fig.2 Macromorphologies of blank parts soaked for 8 d

可知,实验组的腐蚀深度是对照组的3.41倍。由此可见,复合菌种环境下,实验组的腐蚀现象远远大于对照组。

2.2 交流阻抗谱分析

2A12 铝合金空白组和菌液中的交流阻抗谱如图3所示。不同时间下,测得阻抗谱的形状相同,表明整个腐蚀过程中的腐蚀机理并未发生变化。阻抗谱直径一定程度上反应试件表面钝化膜及生物膜的完整性:浸泡初期(2 d),样件的容抗较大,随后(4 d)表现出减小趋势,且随着时间延长(6 d),变化趋势逐渐平缓。分析这一过程与试样表面的钝化膜层在微生物作用下点蚀萌生扩展过程相关。应用 ZSimpWin 软件中等效电路(如图4所示)对不同时间的阻抗谱用非线性最小二乘法进行拟合,得到的拟合参数见表3和表4。为更加清晰地分析过程中各个参数随浸泡时间变化趋势,将参数 R_p 与数据曲线拟合,如图5所示。

表3 2A12 铝合金在混合菌液中浸泡的阻值拟合参数
Tab.3 Resistance fitting parameters of 2A12 aluminum alloy soaked in mixed bacterial solution

Time/d	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$C/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$
2	14.6	5.47	3420
4	13.77	11.19	6957
6	16.97	6.37	3396
8	18.98	5.56	3716

由图5可知,在复合菌液环境中的试件,浸泡初期电荷转移电阻出现增大现象,分析认为这一过程与微生物在2A12铝合金表面的附着有关。微生物在铝合金表面迅速生长,形成完整的生物膜层,覆盖在外

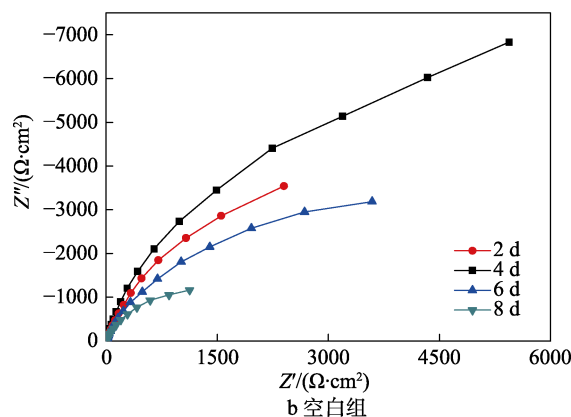
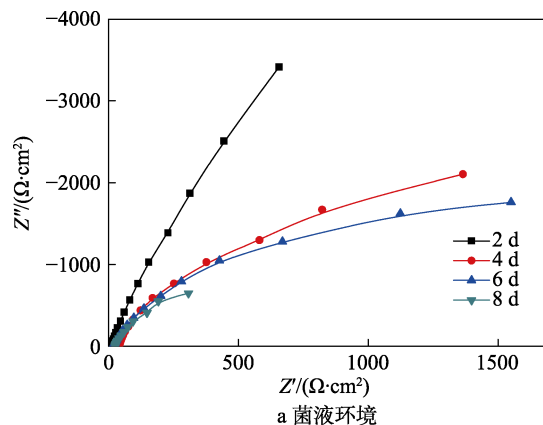


图3 2A12 铝合金腐蚀交流阻抗谱
Fig.3 Corrosion AC impedance chart of 2A12 aluminum alloy: a) microbial environment; b) blank group

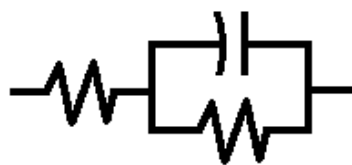


图4 等效电路
Fig.4 The equivalent circuit

表4 对照组试件的阻值拟合参数
Tab.4 Resistance fitting parameters of the specimens in the control group

Time/d	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$C/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$
2	9.55	7.38	5154
4	9.13	7.73	7000
6	8.31	12.1	8120
8	9.075	32.9	14960

部钝化膜层表面。随着浸泡时间的延长,微生物新陈代谢活动产生的酸性物质等会导致2A12铝合金表面

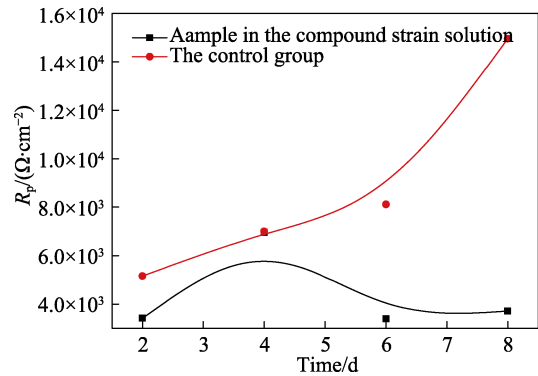


图 5 R_p 参数对比分析
Fig.5 Comparative analysis on parameter R_p

氧化膜腐蚀严重，甚至脱落，体现为第 6 天电荷转移电阻有急剧减小的变化趋势。对于空白对照组试件，由于缺少微生物的作用，试件表面钝化膜层较为完整，且短时间内腐蚀产物会在表面堆积，形成覆盖膜层。因此对比是否含有微生物的试验结果可知，在确定的环境体系中，菌落对 2A12 铝合金的腐蚀影响规律与菌落种类、代谢特点及多种菌落间相互作用有关。

2.3 极化曲线分析

不同时间下，2A12 铝合金空白组和在复合菌液中的动电位极化曲线如图 7 所示。由图 7a 可知，2A12 铝合金塔菲尔曲线中，在所有时间段内，阴、阳极部分曲线形状和斜率没有发生太大变化。从曲线特征分析可以看出，腐蚀特性没有改变。通过图 7a 可以看出，不同时间段内，2A12 铝合金极化曲线出现了较大变化。4~6 d 腐蚀电位负移，腐蚀电流正移，但 8 d 腐蚀电位正移，腐蚀电流负移，而其余时间段内 2A12 铝合金的极化曲线几乎没有太大变化。造成这种曲线现象的原因是：当 2A12 铝合金浸入复合菌种溶液时，2A12 铝合金表面与空气发生钝化反应，形成氧化膜，大大加强了 2A12 铝合金的耐腐蚀性。随着时间的推移，氧化膜被完全腐蚀脱落，菌落开始腐蚀 2A12 铝合金，从而腐蚀电位正移，腐蚀电流负移。另外发现在 8 d 的极化曲线阴极有电流峰凸起，表明在相应的电位下，有额外的电极反应参与阴极过程，这应该是接种中微量的 Al_2O_3 引起的。与图 7b 对比可知，在空白组中，腐蚀氧化铝薄

膜时间较长，所以极化曲线较稳定，腐蚀电位正移，腐蚀电流不变。

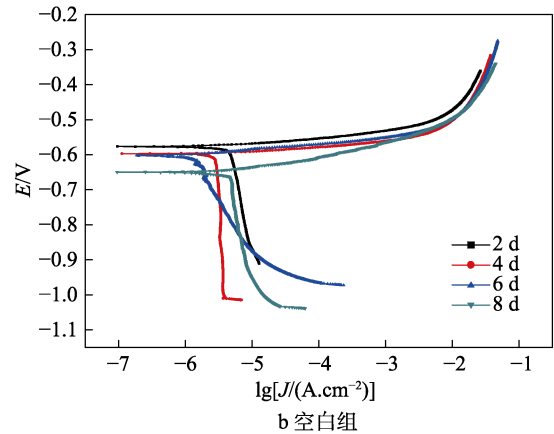
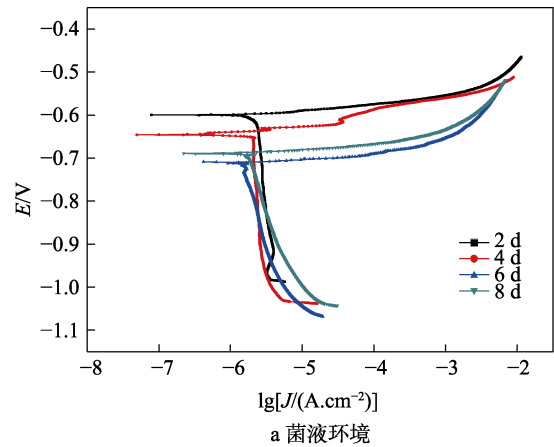


图 7 2A12 铝合金腐蚀极化曲线
Fig.7 Corrosion polarization curve of 2A12 aluminum alloy: a) microbial environment; b) blank group

通过 Cview 软件对图 7a 进行拟合，得到表 5。可以看出，2A12 铝合金在复合菌液中的腐蚀电流密度最小为 $1.12 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，最大为 $2.43 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。这表明第 6 天在氧化层被腐蚀穿后，腐蚀加速，且加速效果比较明显，这一现象与文献[16]所得结论相似。对图 7b 进行拟合，得到表 6。可以看出，2A12 铝合金在空白组中的腐蚀电流密度最小为 $2.59 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，最大为 $3.87 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。通过计算第 8 天 2A12 铝合金在复合菌液中的腐蚀速率可知，菌液环境中试件的腐蚀速率是空白组的 62.79 倍，且呈增长趋势。

表 5 2A12 铝合金在混合菌液中浸泡的极化曲线拟合参数

Tab.5 Polarization curve fitting parameters of 2A12 aluminum alloy immersed in mixed bacterial solution

Time/d	E/V	$J/(\times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$	B_c/mV	B_a/mV	Corrosion rate/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
2	-0.6123	2.27	-749.39	21.55	0.027
4	-0.6468	2.39	-681.60	37.63	0.026
6	-0.7007	1.12	-380.71	29.03	0.012
8	-0.7604	2.43	-486.94	48.36	0.029

表6 对照组的极化曲线拟合参数

Tab.6 Polarization curve fitting parameters of the control group

Time/d	E/V	$J/(\times 10^{-6} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	B_c/mV	B_a/mV	Corrosion rate/(mm·a ⁻¹)
2	-0.7199	2.59	-896.42	21.03	0.000 31
4	-0.5991	2.66	-701.55	13.08	0.000 32
6	-0.6022	2.96	-437.51	14.30	0.000 35
8	-0.6434	3.87	-352.4	22.07	0.000 46

3 结论

文中选取飞机表面对腐蚀影响较为明显的三种典型菌种作为研究对象,通过实验室内培养的方式再现表面环境,采用电化学、微观形貌观察等手段对 2A12 铝合金的腐蚀行为进行研究,初步得到以下结论。

1) 对第 6 天 2A12 铝合金菌液腐蚀速率特别缓慢进行分析得出,在混合菌体系中,混合菌落代谢生成的致密生物膜对腐蚀的深入发展造成阻碍,腐蚀抑制作用更加明显。

2) 通过对比实验可以得出,在复合菌液中,2A12 铝合金的钝化膜遭到破坏,复合菌落的产物加速了材料的腐蚀,且容易产生大面积点腐蚀。实验数据表明,在复合菌液中,2A12 铝合金的腐蚀速率是空气中的 62.79 倍,且随着时间的增长呈上升态势。

3) 菌落对 2A12 铝合金的腐蚀影响规律与菌落种类、代谢特点及多种菌落间相互作用有关。

参考文献:

- [1] NEIHOF R, MAY M. Microbial and Particulate Contamination in Fuel tanks of Naval Ships[J]. Int Biodeterior Bull, 1983, 19: 59.
- [2] HAGGETT R D, MORCHAT R M. Microbiological Contamination: Bio-cide Treatment in Naval Distillate Fuel[J]. Int Biodeter Biodegr, 1992, 29: 87.
- [3] 陈德斌, 胡裕龙, 陈学群. 舰船微生物腐蚀研究进展[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(1): 79.
CHEN De-bin, HU Yu-long, CHEN Xue-qun. Progress of Microbial Influenced Corrosion in Warship[J]. J Naval Univ Eng, 2006, 18(1): 79.
- [4] WADE S A, MART P L, TRUEMAN A R, et al. Investigation of the Potential for MIC in the Bilge Waters of Australian Naval Vessels[C]// NACE International Corrosion 2009 Conference & Expo. Atlanta, USA: NACE, 2009.
- [5] JAVAHERDASHTI R. Impact of Sulphate-reducing Bacteria on the Performance of Engineering Materials[J]. Appl Microbiol Biot, 2011, 91: 1507.
- [6] 李庆超. 复合菌种对海洋工程材料微生物腐蚀的影响研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2016.
- [7] 常雪婷. 海洋优势菌种附着腐蚀 Fe₃Al 及其复合材料界面与机理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
CHANG Xue-ting. Investigation on the Interface and MIC Mechanisms of the Dominantly-adhered Bacteria on Fe₃Al and Its Composite[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [8] 梅朦, 郑红艾, 高阳, 等. 循环冷却水含铁细菌对 20 碳钢管壁腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2017, 50(1): 26-29.
MEI Meng, ZHENG Hong-ai, GAO Yang, et al. Effect of Iron Bacteria on Corrosion Behavior of 20 Carbon Steel in Circulation Cooling System[J]. Materials Protection, 2017, 50(1): 26-29.
- [9] 王华. 硫酸盐还原菌对几种金属材料的腐蚀机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
WANG Hua. Sulfate Reducing Bacteria on the Corrosion Mechanism of Several Metal Materials Research[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [10] 苑海涛, 弓爱君, 李晓刚, 等. 脱氮硫杆菌生长特性及其对碳钢 SRB 腐蚀的防护作用研究[J]. 化学与生物工程, 2009, 26(5): 50-54.
YUAN Hai-tao, GONG Ai-jun, LI Xiao-gang, et al. Study on Growth Characteristics of Thiobacillus Denitrificans and Its Defence Effect on the Microbiological Corrosion of Carbon Steel Caused by SRB[J]. Chemistry & Bioengineering, 2009, 26(5): 50-54.
- [11] 陈送义, 李际宇, 王习峰, 等. Cu 含量对 2A14 铝合金显微组织和腐蚀性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(12): 29-37.
CHEN Song-yi, LI Ji-yu, WANG Xi-feng, et al. Effect of Cu Content on Microstructure and Corrosion Properties of 2A14 Aluminum Alloy[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(12): 29-37.
- [12] 詹鑫, 李慧中, 梁霄鹏, 等. 非等温时效对 2A14 铝合金晶间腐蚀和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2018, 38(6): 139-142.
ZHAN Xin, LI Hui-zhong, LIANG Xiao-peng, et al. Effect of Non-Isothermal Aging on Intergranular Corrosion and Mechanical Properties of 2A14 Aluminum Alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(6): 139-142.
- [13] 汪笑鹤, 汪明球, 李博文, 等. 大气环境腐蚀检测技术

- 在铝合金大气腐蚀研究中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(6): 671-675.
- WANG Xiao-he, WANG Ming-qiu, LI Bo-wen, et al. Application of Atmospheric Corrosion Monitoring Technique for Atmospheric Corrosion of Al-alloys[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(6): 671-675.
- [14] 付明, 刘群. 2A12 铝合金化学铣切加工工艺探讨[J]. 材料保护, 2018, 51(7): 100-103.
- FU Ming, LIU Qun. Chemical Milling Weight Reduction Process of 2A12 Aluminum Alloy Wing[J]. Materials Protection, 2018, 51(7): 100-103.
- [15] 刘福江, 宁薇薇. 霉菌试验标准的方法探讨[J]. 环境技术, 2018, 36(1): 79-81.
- LIU Fu-jiang, NING Wei-wei. Discussion on Fungal Test Standards Method[J]. Environmental Technology, 2018, 36(1): 79-81.
- [16] 陈菊娜, 吴佳佳, 王鹏, 等. 脱硫弧菌和溶藻弧菌对船体结构材料 907 钢海水腐蚀行为的影响研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(5): 402-410.
- CHEN Ju-na, WU Jia-jia, WANG Peng, et al. Effect of *Desulfovibrio* sp. And *Vibrio Alginolyticus* on Corrosion Behavior of 907 Steel in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(5): 402-410.