

海水电沉积作用碳酸钙结晶与珊瑚骨骼晶体的比较

黄宝威^{1,2,3,4}, 袁翔城^{1,2}, 黄 晖^{1,2,3}, 刘 胜^{1,2}

(1. 中国科学院 南海海洋研究所, 中国科学院 热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广东省应用海洋生物学重点实验室, 广东 广州 510301; 3. 中国科学院 海南热带海洋生物实验站, 海南 三亚 572000; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 电沉积促进珊瑚生长和岸礁修复技术是国际上常采用的生态修复方法, 但电沉积技术中电流条件与沉积晶体之间的关系却鲜有研究, 关于其形成的电沉积物的晶体结构的报道更是少有。本文探索了在不同电流密度的条件下海水形成碳酸钙晶体的特点, 并与珊瑚骨骼晶体进行了对比。本实验设置了 300、600、900 和 1200 mA/m² 四组电流密度, 在海水中进行 5 d 电沉积反应, 实验后称量了阴极上形成的电沉积物质量, 用扫描电子显微镜和 X-射线衍射分析了电沉积物中晶体特点并与珊瑚骨骼进行了比较。结果发现, 随着电流密度增大, 电沉积物质量增加, 电流密度为 600 mA/m² 条件下电沉积物形成的速率与南海的滨珊瑚的生长速率相当。在各个电流密度梯度条件下形成的晶体均与珊瑚骨骼的晶体结构相似。较低电流密度下电沉积物中碳酸钙比例较高。其中, 在电流密度为 600 mA/m² 的条件下, 形成的沉积物碳酸钙文石比例最高, 和珊瑚骨骼晶体最为接近。本研究为促珊瑚生长的电沉积技术提供了基础数据和理论。

关键词: 电沉积; 碳酸钙结晶; 电流密度; 珊瑚; 钙化

中图分类号: P746.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)07-0113-07

DOI: 10.11759/hyxx20160905002

海水里有丰富的碳酸盐和钙离子, 可谓自然界最大的矿场。但如何利用这些离子形成人类可利用的碳酸钙结晶是无疑是一大难题。在自然界, 珊瑚等造礁生物可以富集钙离子形成碳酸钙礁石。根据这个现象, 20 世纪 70 年代已经有人研究利用电解装置富集钙离子形成碳酸钙结晶促进珊瑚钙化生长, 并形成人工礁石。利用通电装置在溶液中聚集钙离子这种方法称为电沉积作用, 最先由 Hilbertz 等^[1]发现, 其原理是通过外加低电压在两电极间通直流电使海水电解, 离子根据自身特点在海水中定向移动, 而溶解在海水中的钙和镁能在导电阴极金属表面上形成结晶。这种方法能够在电极周围聚集和浓缩溶解在海水中的矿物离子, 形成自然矿物^[2-3], 从而可以让受到严重腐蚀的海滩上长出礁石恢复礁体生态系统, 保护由于全球海平面上升造成的海岸线侵蚀, 甚至生长成人工岛^[4]。随后, 该技术对海洋生物特别是造礁生物的影响得到越来越多的研究^[4-7]。

目前, 电沉积作用形成碳酸钙结晶技术主要在海水中保护电极方面应用较多, 而对电沉积物的晶体形态结构方面的研究报道较少。有报道称, 通过电沉积作用形成的晶体, 主要有方解石和霏石, 而且多为碳酸钙和氢氧化镁的混合物, 其晶体形态结构

与标准的方解石或霏石的结构均不一样, 而且, 随着碳酸钙和氢氧化镁两者成分比例的变化, 晶体形态结构也会发生变化^[7]。

不同材料做电极, 所形成的电沉积物也会有所区别, 如铝在电沉积反应中会与海水发生反应自然形成含铝的氧化物保护层所以铝合金阴极保护所需的电流密度一般较小, 约为碳钢在海水中所需的电流密度的十分之一^[8]。Fedorov 等^[9]利用自来水在碳基电极上通过电化学还原氧对羟基离子沉积碳酸钙发现, 虽然在早期的沉积阶段观察到一些球霏石, 在后期的主要晶型是方解石。

国内目前还缺乏利用海水进行电沉积反应生成的晶体特点的报道。虽然, 2002 年 Akamine 等^[10]已经利用人工海水进行了电沉积实验, 但他们没有对

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2017-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(No.3137099, 41106107 和 2014BAC01B03)
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.3137099, 41106107, 2014BAC01B03]

作者简介: 黄宝威(1986-), 男, 广东广州人, 硕士研究生, 主要从事促进珊瑚钙化作用研究, 电话: 020-89023440, E-mail: baowei-huang@163.com; 袁翔城, 通信作者, 副研究员, 电话: 020-89023440, E-mail: xcyuan@scsio.ac.cn; 黄晖, 通信作者, 研究员, 电话: 020-84460294, E-mail: huanghui@scsio.ac.cn

电沉积物的晶体结构进行详细分析,对文石的形成条件没有详细说明。2012 年,徐旭荣等^[11]的研究表明文石通常在镁离子浓度较高的环境下形成,但没有采用电沉积的方法。另外,虽然电沉积技术应用在人工造礁和珊瑚礁修复方面有不少成功的案例,但也有很多应用失败的报道^[12-13]。而失败的原因有很多,而电流密度的控制可能是关键因素。加上目前人们对电沉积作用条件形成碳酸钙结晶没有一个系统的认识,从而严重阻碍了电解海水形成人工礁石和促进珊瑚钙化研究的发展。因此,本研究探索了在不同电流密度下海水经过电沉积作用形成碳酸钙结晶的特点,为海水电沉积作用形成人工礁石和促进珊瑚钙化研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验设备及材料

电解装置(包括导线、电极用碳棒(直径为 1.2 mm,长度 60 mm)、电极接头、滑动变阻器和南孚 5 号电池等),奥立龙 320P-01A 精密便携式 pH 计, HZK-FA 分析天平, 万用表, S-3400N 扫描电子显微镜, terra 便携式 X-射线衍射仪。

1.2 实验海水的制备

用美国红十字海盐配制人工海水(水体条件:海水初始碱度 2.5 mmol/L, 水温 25℃, 海水盐度 35, 初始 pH 为 8.221)。

1.3 实验组设计

本实验设置四组电流密度: 300、600、900、1200 mA/m², 每组设 3 个重复。

测量碳棒接入电路的有效面积:

$$S = 2\pi r l / 2 + \pi r^2 = (2 \times 3.14 \times 0.006 \times 0.04) / 2 + 3.14 \times 0.006^2 = 0.000867 \text{ m}^2$$

r 为碳棒半径(m), l 为碳棒浸入电解液高度。根据公式 $I = DS$ (I 为实际电流, D 为电流密度, S 为有效面积)算出四组应设置电流分别为 0.26、0.52、0.78 和 1.04 mA。

1.4 实验装置设置

在常温(25℃)条件下,以一碳棒为阳极,另一碳棒为阴极,用一个 1.5 V 的 5 号电池作为电源,电路用铜锌导线连接电路设置(如图 1 所示)。用 1 000 Ω , 0.5 A 的滑动变阻器调节电流。为保证获得足量的碳酸钙和相对稳定的 pH 环境,放入装有 15 L 人工海水的电解池里进行反应。实验中采用的电极材料、形

状和介质条件均一致,采用改变接入电路的电阻的方法调整电流密度。

1.5 实验参数测定

1.5.1 质量

实验 5 d 后用分析天平称量各个实验组阴极碳棒上白色沉淀物质量,算出各电流密度下形成电沉积物的平均质量和标准差。

1.5.2 晶体形貌

取四个电流密度组各取 3~5 小块电沉积物放入恒温干燥箱中烘干, 45℃, 48 h。将准备好的样品用镊子放置在电镜纽扣上, 喷金, 在扫描电镜下进行观察。取珊瑚骨骼样品, 经处理^[14]后在扫描电镜下观察。

1.5.3 成分分析

取四个电流密度组各取 3~5 小块电沉积物放入恒温干燥箱中烘干, 45℃, 48 h。将样品磨成粉末, 用 XRD 检测沉淀物成分。取珊瑚骨骼样品, 经适当处理后磨成粉末, 用 XRD 检测分析。

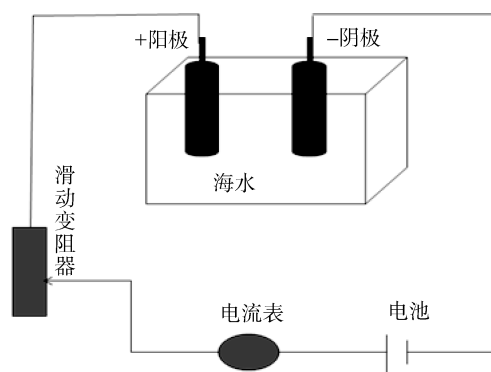


图 1 装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device structure

2 结果与分析

2.1 不同电流密度下实验后形成沉积物质量

随着电流密度的增强,电沉积物的质量增加,而且呈现较好的线性关系(图 2)。证明电流密度的增加能使电沉积物的增加。

2.2 不同电流密度下海水形成电沉积物结晶形态分析

图 3k、l 为珊瑚成体骨骼结构, 图 3m、n 为珊瑚刚附着的幼体生成的骨骼结构; 从图 3k、m 对比可知, 珊瑚幼体的骨骼似乎更加疏松; 而对比图 3l、n 两图又可以看出, 珊瑚骨骼都有相似的针状文石结

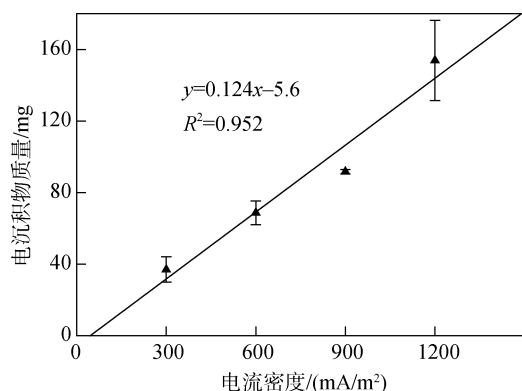


图2 不同电流密度下形成的电沉积物质

Fig. 2 The weight of the electrodeposition formed under different current density

构。在不同电流密度的电沉积物的晶体图中,也可以发现针状文石的结构。300 mA/m²条件下的图 3a, 600 mA/m²条件下的图 3d, 900 mA/m²条件下的图 3g 均有相似的针状文石结构。而对比 600 mA/m²条件下的图 3c, 900 mA/m²条件下的图 3f, 1 200 mA/m²条件下的图 3i, 和珊瑚成体骨骼图 3k, 可以发现, 这些图都有相似的板块状结构。而对比 600 mA/m²条件下的图 3b, 900 mA/m²条件下的图 3e, 1 200 mA/m²条件下的图 3h, 和珊瑚幼体骨骼图 3m, 可以发现, 这些图都有圆形的晶体结构。从 1 200 mA/m²条件下的图 3j 还可以看出, 其晶体结构是圆形结构镶嵌在板状结构中, 这与珊瑚幼体结构图 3m 相似。

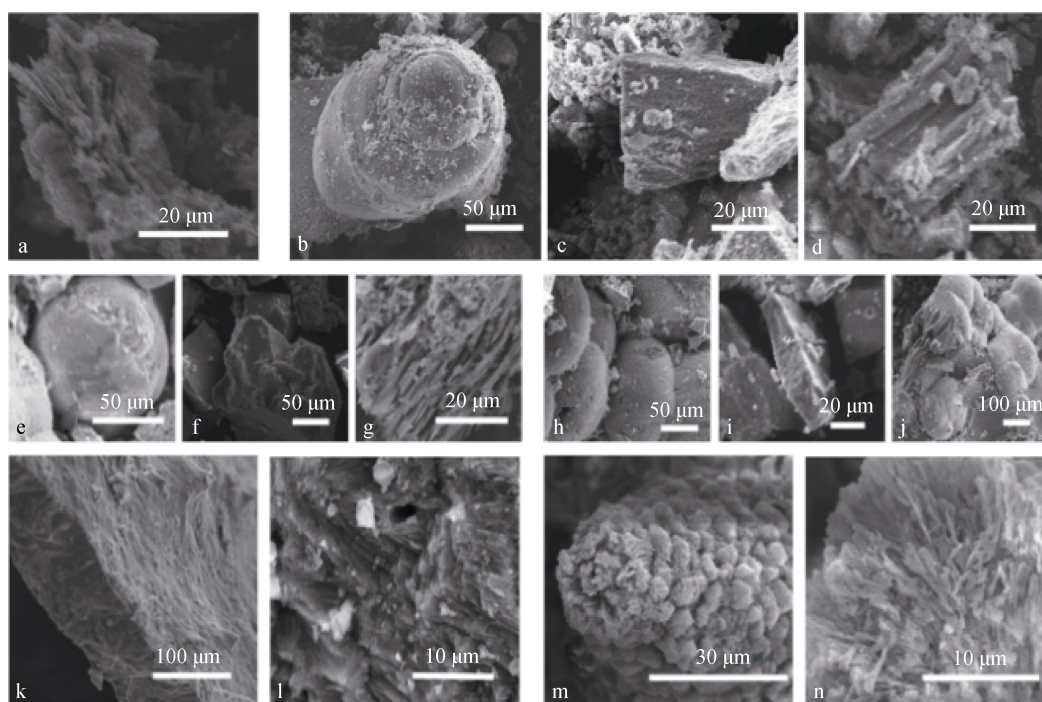


图3 扫描电镜下电沉积物晶体结构图

Fig. 3 Scanning electron microscopy of the crystal structure of electrical sediment

a. 300 mA/m²; b, c, d. 600 mA/m²; e, f, g. 900 mA/m²; h, i, j. 1200 mA/m²; k, l. 珊瑚成体骨骼; m, n. 珊瑚附着后 7 d 幼体骨骼
a. 300 mA/m²; b, c, d. 600 mA/m²; e, f, g. 900 mA/m²; h, i, j. 1200 mA/m²; k, l. the skeleton of coral; m, n. the skeleton of the larva of coral

综上所述, 在各个电流密度梯度条件下形成的晶体与珊瑚骨骼的晶体结构相似。

2.3 不同电流密度下形成的电沉积物 X 射线衍射分析

经 X-射线衍射分析, 四种条件下形成电沉积物的 X-射线衍射图都与 Mg(OH)₂ 和 CaCO₃ 两种物质的特征峰吻合(图 4), 可知海水中电沉积作用形成的沉积物主要有 Mg(OH)₂ 和 CaCO₃ 文石两种成分。通过 Mg(OH)₂ 和 CaCO₃ 两种成分比例分析可知在 300 和

600 mA/m² 条件下(较低电流密度条件)电沉积作用形成碳酸钙结晶的比例比在 900 和 1 200 mA/m² 条件(较高电流密度条件)下更高, 而且从本实验所选择的电流密度范围内分析, 在电流密度为 600 mA/m² 左右的时候碳酸钙比例最高(表 1)。

3 讨论

本文电解条件为温度 25℃, pH 8.0 至 8.5, 与相关文献报道中形成碳酸钙的条件相符^[15-16]。

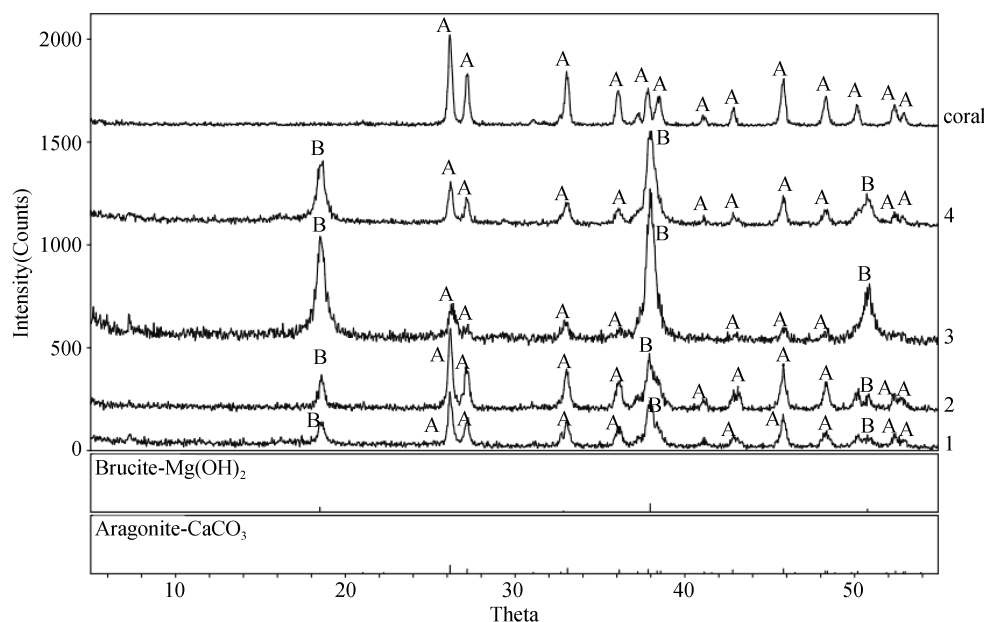


图 4 不同电流密度下电沉积物 X 射线衍射图

Fig. 4 X-ray diffraction pattern of the electric sediment formed under different current density

1. 300 mA/m²; 2. 600 mA/m²; 3. 900 mA/m²; 4. 1 200 mA/m²; coral 为珊瑚骨骼; A. 碳酸钙文石的特征峰; B. 氢氧化镁的特征峰.

1. 300 mA/m²; 2. 600 mA/m²; 3. 900 mA/m²; 4. 1 200 mA/m²; A. represents the characteristic peaks of aragonite; B. the characteristic peaks of magnesium hydroxide.

表 1 电沉积物成分组成(%)

Tab. 1 Composition of electrodeposit(%)

成分	300 mA/m ²	600 mA/m ²	900 mA/m ²	1 200 mA/m ²	珊瑚
CaCO ₃	79.3	84.2	46.9	60.9	100
Mg(OH) ₂	20.7	15.8	53.1	39.1	0

通过人为通电的方法可以获得碳酸钙,那么与自然界的造礁生物相比其效率究竟如何?我们可以拿典型的造礁生物——珊瑚做比较。滨珊瑚是石珊瑚中生长较慢的种类,我们可以根据以往人们的研究数据将人工电沉积造礁和自然生物造礁做一个粗略的比较(表 2, 表 3)。根据电流密度越大形成的电沉积物越多这一规律,我们发现使用人工电沉积造礁须采用电流密度在 600 mA/m² 或以上才能达到南海南部滨珊瑚的钙化速率。而要达到印度尼西亚爪哇和大堡礁滨珊瑚的钙化速率则要采用 1200 mA/m² 以上的电流密度。

表 2 电沉积物形成速率

Tab. 2 The rate of electrodeposition form

电流密度(mA/m ²)	沉积物形成速率(mg/(cm ² ·d))
300	0.98
600	1.824
900	2.436
1200	4.085

表 3 不同地区珊瑚生长速率

Tab. 3 Coral growth rate in different areas

滨珊瑚生长地区	珊瑚生长速率(mg/(cm ² ·d))	相关文献
南海南部	1.954	[17]
印度尼西亚爪哇	5	[18]
澳洲大堡礁	4.465	[19]

人工造礁中形成的碳酸钙结晶与自然造礁生物的骨骼结晶有相似但也有些区别。海水中含有大量的镁离子和钙离子,所以电沉积作用形成的矿物主要有氢氧化镁和碳酸钙^[14, 20]。在本实验中,在低电流密度下形成的板块状或针状的碳酸钙结晶,而较高电流密度下则为含有较多镁离子的圆形矿物晶体。而在生物的矿化作用中,生物体内形成骨骼的主要成分是文石^[21]。像珊瑚和贝类的骨骼晶体主要是针状或片状堆积的文石结构^[14]。因为尽管文石水溶液处于亚稳态,但文石的成核和生长稳定,所以广泛存在于生物系统^[2]。徐旭荣等的电沉积作用研究也表明,镁离子可以抑制方解石的生长,所以文石的

形成通常在镁离子浓度较高的环境下形成^[11, 16]。还有研究表明,生物体是能够控制晶体成核的位置和取向以及生长的微晶的形状^[2, 6]。碳酸钙的晶格结构和结晶形态可以被溶液中的电场作用改变^[22]。方块状的方解石一般可以在没有电场作用的条件下形成,棒状形貌的球霏石结构在高电场下形成;而随着电流密度的增大,球霏石棒状结构会堆积形成的花瓣状的层^[8]。

由于现在有 X-射线衍射和红外光谱分析等技术,我们可以更为准确的知道电沉积物成分。本研究利用 X-射线衍射分析发现,低电流密度条件下,电沉积物的成分中含有的碳酸钙文石的比例较高,其中,电流密度为 600 mA/m² 左右的时候碳酸钙比例最高。而自然生物造礁则通过钙泵作用使钙离子聚集,在体内形成碳酸钙骨骼。钙泵在生物体中的作用是运输钙离子,其运输过程也是一个电子传递过程。而施加低电压,产生弱的电流作用就相当于在水中制造了一个钙泵,使钙离子聚集。但是电压电流过大可能使海水中的比钙离子含量更多的镁离子吸引到阴极上,从而形成构造相对疏松的氢氧化镁结构^[14, 23-24]。

其实,最早在 1978 年 Hilbertz 等^[1]已经发现低电流电压条件可以形成碳酸钙结晶,而且电流越小,碳酸钙在电沉积中的比例相对较多,并把该技术应用到人工造礁和珊瑚修复领域。但是,他们采用电沉积技术修复珊瑚礁的研究都普遍采用相对较高的电流(比本文采用的电流和电压高)^[12-13]。我们的研究结果表明电流太高容易形成疏松的晶体结构,而且氢氧化镁比例较高。因此,本文采用的较高电流范围应用于促进珊瑚钙化是否合适,需要进一步探索。2002 年 Kenichi 等^[10]利用人工海水进行电解实验,也发现了低电流下电沉积物中碳酸钙成分更高,而也得到在 600 mA/m² 左右电流密度下碳酸钙比例最高。但是他们没有对电沉积作用产生的晶体结构是否和珊瑚骨骼晶体一致进行验证。本文认为对两者的晶体结构的对比,对我们了解人工电沉积造礁和自然生物造礁作用中形成的礁石的性质意义重大。

综上所述,600 mA/m² 的电流密度下形成电沉积物的质量接近滨珊瑚等块状珊瑚的造礁速率。低电流密度下形成的电沉积物晶体结构与珊瑚骨骼晶体结构相似,为碳酸钙文石结构。在较低电流密度下,本实验为 600 mA/m² 或以下,形成的沉积物含有比例较高的碳酸钙。本文的实验结果为海水电沉积作用形成人工礁石和促进珊瑚钙化研究提供参考。

实际上,电沉积作用在人工造礁和珊瑚礁修复方面的应用在国际上早有先例。Hilbertz 等^[1]从发明该技术的初衷就是实现岸礁修复。随后,陆续有研究者利用该技术对促进珊瑚钙化方面进行探索,不少人获得了积极的效果^[13, 24]。但对该技术的研究中,对采用的电流密度条件尚没有定论。而从本文获得的结果看,在本实验采用的电流密度条件下,均获得了与珊瑚骨骼相似的文石结构结晶,而且经过 X-射线衍射分析,其成分与珊瑚骨骼的成分比较接近,其中电流密度为 600 mA/m² 条件下最佳。这为电沉积技术的实施在电作用条件方面提供了重要参考。而且珊瑚骨骼本身是珊瑚幼体附着的良好基质^[14],所以本实验中最佳电流密度条件下形成的电沉积物,有望替代海水中的礁石和白化后形成珊瑚骨骼成为珊瑚幼体附着的理想基质,这对珊瑚的有性繁殖修复有重要的指导意义。

4 结论

在低电流密度下(1200 mA/m² 或以下)利用海水形成的电沉积物,随着电流密度的增大,电沉积物的增多,在 600 mA/m² 条件下,电沉积物的碳酸钙含量较高。所形成的电沉积物的晶体结构和成分组成和珊瑚骨骼相似,皆含有文石结构。

致谢:此研究获得国家自然科学基金(31370499, 41106107 和 2014BAC01B03)的资助。

参考文献:

- [1] Hilbertz W. Electrodeposition of minerals in seawater[J]. *Oceans*, 1978, 10(1): 699-706.
- [2] Yoreo J J D, Vekilov P G. Principles of crystal nucleation and growth[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 54(1): 57-93.
- [3] Hasson D, Lumelsky V, Greenberg G, et al. Development of the electrochemical scale removal technique for desalination applications[J]. *Desalination*, 2008, 230(1): 329-342.
- [4] Goreau T J. Marine electrolysis for building materials and environmental restoration[J]. *Vacuum*, 2012, 15(7): 382.
- [5] Euvrard M, Membrey F, Filiatre C, et al. Crystallization of calcium carbonate at a solid/liquid interface examined by reflection of a laser beam[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 265(1): 322-330.
- [6] 王瑞兴, 钱春香, 王剑云. 微生物沉积碳酸钙研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(1): 191-195.
Wang Ruixing, Qian Chunxiang, Wang Jianyun. Study

- on microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. Journal of Southeast University, 2005, 35(1): 191-195.
- [7] Lajevardi S A, Tafreshi H, Shahrabi T. Investigation of calcareous deposits formation on 5052 aluminium alloy under cathodic polarisation in natural and artificial sea water[J]. Corrosion Engineering Science & Technology, 2011, 46(3): 249-255.
- [8] Qi J Q, Guo R, Wang Y, et al. Electric field-controlled crystallizing CaCO_3 nanostructures from solution[J]. Nanoscale Research Letters, 2016, 11(1): 120.
- [9] Fedorov P P, Osiko V V, Kuznetsov S V, et al. Nucleation and growth of fluoride crystals by agglomeration of the nanoparticles[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 401(9): 63-66.
- [10] Akamine K, Kashiki I. Corrosion protection of steel by calcareous electrodeposition in seawater (Part 1)[J]. Corrosion Engineering, 2002, 53(4): 496-501.
- [11] Zhang Z, Xie Y, Xu X, et al. Transformation of amorphous calcium carbonate into aragonite[J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 343(1): 62-67.
- [12] Sabater M G, Yap H T. Long-term effects of induced mineral accretion on growth, survival and corallite properties of *Porites cylindrica* Dana[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2004, 311(2): 355-374.
- [13] Goreau T J. Electrical stimulation greatly increases settlement, growth, survival, and stress resistance of marine organisms[J]. Natural Resources, 2014, 05(10): 527-537.
- [14] Goreau T J, Trench R K. Innovative methods of marine ecosystem restoration[J]. CRC Press, 2012.
- [15] Xie H, Liu T, Hou Z, et al. Using electrochemical process to mineralize CO_2 and separate $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ions from hard water to produce high value-added carbonates[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(11): 6881-6890.
- [16] Nam J Y, Jwa E, Kim D, et al. Selective removal of multivalent ions from seawater by bioelectrochemical system[J]. Desalination, 2015, 359: 37-40.
- [17] 苏瑞侠, 隋丹丹, 张叶春, 等. 南海南部最近几十年珊瑚钙化趋势与大气 CO_2 浓度升高和全球变暖的联系[J]. 第四纪研究, 2012, (6): 1087-1106.
- Su Ruixia, Sui Dandan, Zhang Yechun, et al. Coral calcification under increasing atmospheric CO_2 concentration and global warming in the southern South China Sea[J]. Quaternary International, 2012, (6): 1087-1106.
- [18] Edinger E N, Limmon G V, Jompa J, et al. Normal coral growth rates on dying reefs: are coral growth rates good indicators of reef health?[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(5): 404-425.
- [19] Lough J M, Barnes D J. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2000, 245(2): 225-243.
- [20] Akamine K, Kashiki I. Corrosion protection of steel by calcareous electrodeposition in seawater (Part 3): effects of dilution on deposition[J]. Corrosion Engineering, 2004, 51(4): 496-501.
- [21] 叶承, 黄晖, 张成龙. 鹿角杯形珊瑚骨骼构造和显微结构的研究[J]. 热带海洋学报, 2013, (02): 102-111.
- Ye cheng, Huang Hui, Zhang Chenglong Skeletal architecture and microstructure of calcifying coral pocillopora damicornis[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(2): 102-111.
- [22] Watanabe J, Akashi M. Effect of an alternating current for crystallization of CaCO_3 on a porous membrane[J]. Acta Biomaterialia, 2009, 5(4): 1306-1310.
- [23] Hilbertz W. Electrodeposition of minerals in sea water: Experiments and applications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1979, 4(3): 94-113.
- [24] Hilbertz W. Solar-generated building material from seawater as a sink for carbon[J]. AMBIO - A Journal of the Human Environment, 1992, 21(2): 126-129.

Comparison of calcium carbonate crystals of seawater electrodeposit and coral skeleton crystal

HUANG Bao-wei^{1, 2, 3, 4}, YUAN Xiang-cheng^{1, 2}, HUANG Hui^{1, 2, 3}, LIU Sheng^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Marine Biology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 3. Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Sep.5, 2017

Key words: Electrodeposition; calcium carbonate; crystallization; current density; coral; calcification

Abstract: Electrodeposition technique can be used for the restoration of the reef, but the relationship between the current conditions and the formation rate of the electrodeposit is rarely studied. Researches on the crystal structure of the electrodeposit are even less. Hence, this paper aims to explore the characteristics of calcium carbonate crystal in the electrodeposit forming at different electrical current density in seawater, and compare the crystal of the electrodeposit with the coral skeleton crystal. In this experiment, four groups of current density gradient (300, 600, 900 and 1200 mA/m²) were set up. 5 days after the reaction, the electrodeposits formed on the cathode were weighed and analyzed using scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The results showed that the weight of electrodeposits increased with the current density. When the current density is 600 mA/m², the formation rate of the electrodeposit is equivalent to the growth rate of the *Porites andrewsi* in the South China Sea. The results of scanning electron microscopy showed that the morphology of the crystals of the electrodeposit was found to have a similar crystal structure with the structure of the coral skeleton. The X-ray diffraction results showed that the higher proportion of calcium carbonate was present at the low current density, and reached up to the highest proportion of 84% at the current density of 600 mA/m². This study provides basic data and theory for the electrodeposition technology promoting coral growth.

(本文编辑: 康亦兼)