

# Brief Review about the Developments of the Ballast Water's Treatment Technology

Haiyang Xu, Shenyang Du, Zhipeng Zhu, Ming Sun\*

Institute of Electrostatic, Shanghai Maritime University, Shanghai  
Email: [924856911@qq.com](mailto:924856911@qq.com), \* [mingsun@shmtu.edu.cn](mailto:mingsun@shmtu.edu.cn)

Received: Sep. 15<sup>th</sup>, 2015; accepted: Oct. 8<sup>th</sup>, 2015; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Ballast water discharge can cause such problems as alien biological invasion, destroy the local Marine economical environment, and has been attracting world-wide attention. This paper briefly describes the two kinds of preparation methods of feasible simulating ballast water in current laboratory studying the Ballast water's treatment technology, and reviews about the existing method of the Ballast water's treatment. The discharge plasma water treatment technology was introduced in detail; this paper summarized the influence factors of water treatment of gas-liquid two-phase hybrid pulse discharge plasma and the research progress of Ballast water using the water technology.

## Keywords

Simulating Ballast Water, Discharge Plasma, Gas-Liquid Two-Phase, Influence Factor, Water Treatment Technology

---

# 浅谈压舱水处理技术的进展

徐海洋, 杜审言, 朱志鹏, 孙 明\*

上海海事大学静电研究所, 上海  
Email: [924856911@qq.com](mailto:924856911@qq.com), \* [mingsun@shmtu.edu.cn](mailto:mingsun@shmtu.edu.cn)

收稿日期: 2015年9月15日; 录用日期: 2015年10月8日; 发布日期: 2015年10月12日

---

\*通讯作者。

## 摘要

压舱水的排放会引发外来生物入侵等问题、破坏当地海洋生态环境,已受到世界范围的关注。本文简述目前实验室研究压舱水处理技术中两种可行的模拟压舱水的制备方法,并简要回顾已有的压舱水处理方法。介绍了放电等离子体水处理技术,总结了气液两相混合脉冲放电等离子体水处理的影响因素,以及其用于压舱水处理的研究进展。

## 关键词

模拟压舱水, 放电等离子体, 气液两相, 影响因素, 水处理技术

## 1. 引言

压舱水能保持船体平稳航行,对于远洋船舶而言必不可少。一般情况下,船舶底部以及边舱均建有压载水舱。空船航行前必须将水舱装满压舱水,当其载货物时,就需将水舱的压舱水排出。由于压舱水的使用特点,使得压舱水随着远洋船舶只在不同港口进行抽取和排放。其作用不言而喻,但其带来的问题也不容被忽视。压舱水大多取自海湾中的原生海水,故其携带的微生物有数千种,包括细菌和其他微生物。这些微生物主要是通过压载水吸水口进入船体,随着船舶航行在全球运动,势必会造成了物种入侵,严重恶化海洋生态链,同时带来经济损失和危害人体健康[1] [2]。在全球范围内,每天有超过 3000 种的海洋植物和动物随着压舱水被转移离原生地,而压舱水引起的生物入侵的例子[3]也不在少数,包括海藻、鱼、牡蛎、多毛虫、软体动物、海星、其他的浮游动物以及霍乱弧菌。由此知道压舱水本身不具有任何危害能力,危害主要来源于其携带物。如今,远洋船舶携带的压舱水正随着远洋船舶运输量的快速增加而日益增加。船舶压舱水带来的生物入侵问题,已被世界环保基金会确认为危害海洋的四大威胁之一。压舱水处理的研究内容主要可以分为两个方面:压舱水处理前后参数指标的变化情况、压舱水处理技术(包括压舱水水处理系统及设备)的发展情况。研究压载水处理可以起到保护海洋生态环境、减少经济损失、减少对人体的伤害、提高国产船舶关键设备装船率、提高航运业和造修船业的核心竞争力等其他作用。因此,对于压舱水的处理及其研究显得刻不容缓。

## 2. 压舱水的制备及处理

### 2.1. 模拟压舱水的制备

由于地域性差异,海洋、江河等自然水体的水质不尽相同,使得各港口船舶压舱水水质也各有不同。文献[4]给出海水水质标准,港口船舶压舱水的参数指标属于第四类海水水质标准。对于港口船舶压舱水处理的研究而言,其主要需要考虑的参数指标(不涉及细菌和微生物)可以采用表 1 给出的第四类海水水质标准的部分参数指标作为参考。

不同航线、船型、装水方法和位置等因素,又使得了港口压舱水沉积物性质(细菌、藻类、原生动物等生物)变得相当复杂,这也是远洋船舶压舱水参数变的尤为复杂的主要原因。所以出现相当一部分研究者在研究处理压舱水时,不能直接选取港口船舶压舱水(港口海水)进行研究。冯岩等[5]在研究用微孔过滤与紫外辐射联用的处理方法对压载水中藻类进行去除时,选取的压舱水是经过后续处理过的大连市星海湾海水。陈操等[6]在研究用羟基法处理船舶压载水对压载舱腐蚀时,选取的是经过后处理的大连市长海县海域的海水。所以为了研究需要,制备模拟压舱水是十分必要和重要的。模拟压舱水的制备要考虑

**Table 1. Quality standard of the fourth kind of sea water**  
**表 1. 第四类海水水质标准**

序号	项目	第四类海水
1	飘浮物质	无明显油膜、浮沫和其他漂浮物质
2	色、臭、味	无令人厌恶和不快的色、臭、味
3	悬浮物质	人为增加的量 $\leq 150$ mg/L
4	pH	6.8~8.8 (同时不超出该海域正常变动范围的 0.5 pH 单位)
5	溶解氧值>	3 mg/L
6	COD $\leq$	5 mg/L
7	BOD $\leq$	5 mg/L

到实际压舱水的地域性特征即综合性参数，比如电导率，pH 值，水中的各种藻类等。模拟压舱水的制备方法比较实用的是以下两种方法：

一是张春玲等[7]提出的制备方法，主要由配制人工海水、配制 COD 标准溶液和配置模拟海水三步组成。将 31 g NaCl 和 4 g MgSO<sub>4</sub> 加蒸馏水溶解至 1 L，配制出人工海水，其盐度为 35.2‰，pH = 6.4；将葡萄糖在 103℃ 烘箱内干燥 1 h，称取 150 mg，用人工海水溶解，定容至 1000 mL 容量瓶中，配制出 COD 标准溶液，该溶液的化学需氧量(COD)理论值为 159.8 mg/L；将配制好的人工海水用 COD 标准溶液稀释 10 倍，按 0.0535 g/L 加入硅藻土，配置成模拟海水，该水样浊度为 20~21，COD 为 9~11 mg/L，pH  $\approx$  8。这种方法优点是操作简单、配置周期短、无需培养，但是这种制备方法制备的是近似于港口压舱水的模拟海水而不是模拟压舱水。

二是宋成文等[8]提出的制备方法，第一步将原生海水过滤、消毒灭菌处理；第二步配制藻类培养液，分别以扁藻、小球藻和叉鞭金藻作为藻种；第三步用第一步处理后的海水稀释藻类培养液，配制出所需密度的模拟压舱水。这种方法相比较于前一种方法，其操作复杂、配置周期长、需要培养，但是其引进了藻类，制备的是更加接近实际的压舱水。从以上两个方法可以知道，模拟压舱水中危害最大的就是微生物，典型的可以选择相应的藻类作为目标物配置模拟压舱水。可以将以上两个方法混合使用，第一步采用第一种制备方法制备出模拟海水，第二步和第三步分别同第二种制备方法的第二步和第三步一样，就可以使得制备出来的模拟压舱水更加的接近实际的压舱水。

## 2.2. 压舱水处理技术

由于认识到压舱水的间接危害，压舱水处理技术得到了显著的发展。在初期阶段，一些国家主要通过压舱水置换的方法，来减少压舱水中细菌与外海域物种的影响[9]。后期阶段，压舱水常用的处理方法[10]-[12]，主要可以分为物理法、化学法、以及联合法。压舱水处理技术的方法、原理、进展、优缺点如表 2 所示。

目前，主要有德国的 Cleanballast 系统、瑞典的 Pureballast 系统以及美国的 Venturi oxygen stripping ballast 系统压舱水处理设备已被国际海事组织(IMO)最终认可的[11] [12]。随着科学技术的迅猛发展，越来越多先进的技术可以用来处理压舱水，其中一项技术就是等离子体技术。

## 3. 放电等离子体水处理技术

放电等离子体是部分或者全部电离的状态，包括电子、激发态的原子、离子、自由基和分子。放电等离子体处理压舱水技术是一种具有臭氧氧化、电化学手段、光催化氧化、高能电子辐射、强电场、冲

**Table 2. Comparison of various kinds of ballast water treatment technology**  
**表 2. 各种压舱水处理技术比较**

方法	原理	进展	优缺点	
置换法	排空法	直接将压载舱内的水排空，再注入大洋海水[1]。	操作简单、成本低，但会降低船舶的稳定性，造成事故。	
	溢流法	从压载舱的底部泵入海水，经过空气管溢出，以带走原来舱中的压舱水[13]。	操作简单、稳定性较高，但管路系统设计复杂，操作时间长，更换效率不高。	
	稀释法	从压载舱的顶部泵入压舱水，同时以相同的速率将底部的压舱水泵出[14]。	置换率相比溢流法有所提高，也比较安全，但效率不高、消耗的能源较多、经济成本较高。	
物理法	紫外线法	破坏生物内部结构，使得 DNA 分子不能正常复制，生物组织不能细胞分裂，达到减少微生产量的效果。	汪亨玉等[2]提到的用紫外线方法来处理压舱水。	运行安全，易于操作，但紫外光易被溶解性有机物吸收，紫外光被较大的颗粒悬浮物遮挡，降低了杀灭率。
	超声波法	利用其产生热量和压力波的偏向形成真空或半真空状态的特性，使得生物脱氧致死。	康凯等[15]用到了超声波方法来处理压舱水。	无污染，可以降解难降解的污染物。但处理的水量有限，能量损耗较大，并且一些超声波伤害人体的健康。
化学法	电解法	生成各种电解产物会破坏生物有机体的，同时也会有电场的作用。	刘光洲等[16]研究电解法处理压舱水的腐蚀行为。	电解产生的粒子会引起压载舱的腐蚀，同时带来二次污染，会对环境存在潜在威胁。
	氯化法	具体是通过加入液氯、氯气、二氧化氯、次氯酸盐等实现。	适量的氯可以有效处理不同海域的压舱水。	但当氯的浓度大于 10 mg/L 时，会产生三卤甲烷等致癌物造成二次污染，伤害人体健康。
	羟基自由基法	其与压舱水中微生物反应，破坏微生物的蛋白质，也会破坏微生物的细胞结构。	陈操等[6][17]研究羟基自由基法处理压舱水。	很大程度上不会影响压舱水的水质，但是一定程度上的会腐蚀压载舱。
	臭氧法	破坏生物的细胞膜和细胞壁，扰乱细胞正常的繁殖和代谢，使得水生生物死亡。	臭氧法并不适用于船上压舱水的处理。	这种方法费用较高，会对船体有一定的腐蚀作用，过量臭氧会伤害人体健康。
	过氧化氢法	产生的羟自由基可以破坏生物的细胞壁，从而使压载水中的微生物死亡。	压载水中的有机物含量高使得处理压载水的效率下降。	这种方法费所需的浓度很高，费用昂贵，同时会带来存储、操作安全等相关问题。
联合法	过滤紫外线法	过滤法先去除尺寸较大的浮游动植物、悬浮颗粒等，再利用紫外线的特性处理经过过滤的压舱水。	冯岩等[5][18]将过滤法和紫外线结合起来处理压舱水。	成本低，能耗低，无二次污染，但是只是对于个体较大的藻类去除效果好，总的效率不是很高。
	臭氧光催化法	在 UV-C 辐射下，当光催化和臭氧复合应用时，可能会有更好的灭菌效果。	吴东海等[19]采用臭氧-光催化技术处理压舱水。	持续灭火能力高，效率显著，操作简单，但是存在腐蚀船体，费用高。
	高梯度磁分离紫外法	采用高梯度磁过滤器对船舶压载水进行高效过滤，然后采用紫外辐射处理船舶压载水。	赵焯等[20]研究高梯度磁分离-紫外复合技术处理压舱水。	对微生物的灭活率可达 99% 以上，效率提高显著，但是只是在管道输送压载水过程中去除压载水中的细菌、病毒、原生动物。

击波等多种效应共同作用的新型压载水处理技术，它涉及化学、物理、电气、环保、生物等各门学科，是一种全新概念的处理压载水的新技术。放电等离子体的非平衡性特点，可以使得反应体系保持低温，在节省了能源及设备的投资的同时，还使得电子有足够高的能量激发、电离、离解反应物分子，从而使得细菌、污染物、藻类等得到降解。文献[21]认为体系中粒子的非弹性碰撞的结果，导致等离子体可以降解污染物。放电等离子体中存在活性粒子，比如自由基，激发态的分子和原子等，在降解污染物以及微生物的灭火等方面都起到了相当大的作用。自由基与藻体细胞发生作用，破坏藻细胞中的碳水化合物及

蛋白质,使酶失去活性,破坏藻细胞的细胞核和生物膜,从而使藻细胞死亡,将其杀灭。当反应器中通入含氧体时,放电的过程中会生成臭氧,能破坏氧化生物细胞壁、损害细胞膜、破坏 DNA 分子链等,并且臭氧可使藻细胞色素脱色,无法进行光合作用,造成生物个体的死亡。同时臭氧也会与水中某些溶解物质作用生成一系列的自由基。臭氧与水中某些溶解物质分解,会放生一系列反应[22]如式(1)~(4)所示;高能电子的作用,大致反应[23]过程可以以式(5)~(8)所示;臭氧与紫外光的联合作用,发生的反应[24]如式(9)和(10)所示;过氧化氢的作用,发生的反应[25]如式(11)和(12)所示。



以上可以看成,放电等离子体处理压舱水的优势在于其产生了具有氧化性极强的羟基、臭氧、过氧化氢等物质,相当于起到羟基自由基法、臭氧法以及过氧化氢法处理压舱水的效果;在放电过程中会产生紫外光,一方面紫外光单独作用分解污染物,另一方面紫外光可与臭氧联合作用分解有害物质,等价于紫外线法及其联合法;放电产生的高温、高压在液体内产生的巨大冲击波,也可去除有害物质从而使得污染物降解去除。放电等离子体水处理原理实际上比较复杂,是多种活性物质和强电场等因素作用在压舱水上。其具有没有二次污染,能源利用效率高等优势,逐步成为水处理的主要方法。

研究表明[26]与交流驱动相比,脉冲放电产生大气压等离子体具有许多优势,如它的 VUV、氧原子、及臭氧的产生效率高;峰值电流密度、电子密度、及电子产生效率也更高。

#### 4. 气液两相脉冲放电

高压脉冲等离子体的放电形式,可分为气相放电、液相放电、气液混合两相放电。按外加的电压可分为直流放电、交流放电、脉冲放电三种,目前国内外的学者就各种放电形式的研究很多,对于不同的放电形式在国内外得到了广泛的应用。气液两相放电的两种基本形式,分别是在液体中引入气泡和在气体中喷雾状液体。这两种基本形式的气液两相放电,目的都是使等离子体能与水有更大的接触面积。引入气泡的气液两相放电就是将放电电极置于水中,同时在水中吹进气泡时的放电。气泡分散于水中,臭氧、紫外线、高能电子、过氧化氢等能够与水充分的接触,从而产生更多的羟自由基[27]。在气体中喷雾状液体的气液两相放电,就是将待处理的水以喷雾的方式喷洒到放电电极上。文献[28]研究以空气射流液滴的脉冲流光放电进行水处理时,将废水以液滴形式喷洒到脉冲流光放电空间,而这种水处理方法适用

于蓝胭脂红水溶液。而在处理压舱水时,一般采用的是引入气泡的气液两相放电。

孙等人[29]研究了在多针板脉冲放电混合反应器中,活性物质的生成和转移特性。得出峰值电压、处理时间等因素对于臭氧及其过氧化氢溶度的影响,可以用来间接的提高处理压舱水的效率。

谷一彬[30]设计了一种气液混合多针板高压脉冲放电反应器,对其放电过程中输入能量、放电产物等特性方面进行研究分析。该反应器高 15.5 cm, 内径 15 cm, 下极板直径 14.5 cm, 进气孔内径为 3 mm, 出气孔、进出水口内径 5 mm, 光谱测试端口内径 15 mm。研究脉冲峰值电压、针电极到液面的距离、反应溶液的初始电导率和通入反应器的气体类型这些因素, 分别对输入能量以及放电产物的影响。其研究对于压舱水的处理带来一定的参考意义, 考虑到以上的这些因素的影响, 便可以提高能源效率和对微生物的灭活速率。

孙冰等人[10]用板孔板式反应器实现气液两相混合放电, 来处理压舱水中的藻类。得到压舱水中的绿藻是最难处理的物种, 硅藻次之, 金藻是因脉冲放电最容易失活的物种。当电压、频率和处理时间分别高于 28 kV、25 Hz、10 min 时, 处理后的小球藻不再生长。气液两相混合放电反应器的结构可以多样, 电极结构也可以多样, 但是放电的原理及其产物是没有区别的。在不同的研究中, 会选到不同的电极结构以及反应器结构。每种电极结构和反应器结构, 都有其自身的优势。现在越来越多的研究, 就是在基于已有的放电电极结构和反应器结构的基础上, 探索出更加有效的放电电极结构和反应器结构。Wang 等人[31]对偶氮染料进行漂白处理时, 知道针电极分布模式也会影响漂白速率的影响。可以联想到, 电极结构也会影响到压舱水的处理。

## 5. 总结展望

放电等离子体技术处理压舱水处理的影响因素, 主要有脉冲峰值电压、脉冲频率、放电电极结构、溶液初始电导率、溶液初始 pH 值、微生物种类、微生物含量等。各种技术的联合, 提高了处理压舱水的效果。放电等离子体对于压舱水的处理, 具有无二次污染等优势, 受到越来越多人的关注和研究。不同的反应器, 不同的电极结构都会影响放电效果, 从而影响到压舱水处理的效果。气相、液相、气液两相混合放电, 有各自的特点, 现在已经出现了气液固多相放电, 对于放电方式的研究一直在深入。对于压舱水的处理而言, 脉冲峰值电压、脉冲频率、处理时间是主要的影响因素。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51207089)。

## 参考文献 (References)

- [1] 魏国强, 赵岩, 沙豪, 等 (2011) 船舶压舱水的危害及压舱水处理技术的现状. *广东化工*, **8**, 71-72.
- [2] 汪亭玉 (2012) 紫外激光技术在船舶压舱水处理系统中的应用. *应用激光*, **4**, 336-339.
- [3] 杨清双, 陈凡, 熊焕昌 (2005) 国外船舶压舱水管理和处理技术. *中国国境卫生检疫*, **3**, 174-180.
- [4] 海水水质标准 GB3097-1997.
- [5] 冯岩 (2009) MPF&UV 联用处理压舱水中藻类实验研究. 硕士论文, 大连海事大学, 大连.
- [6] 陈操, 程超, 白敏冬, 等 (2015) 羟基法处理船舶压舱水对压舱舱腐蚀的研究. *海洋环境科学*, **4**, 582-586.
- [7] 张春玲, 金玉莲, 石碧清, 康春莉(2013) FeCl<sub>3</sub>/PAM 混凝 - 光催化氧化法对海水的预处理. *吉林大学学报(理学版)*, **4**, 739-743.
- [8] 宋成文, 陶平, 宋学凯, 等 (2013) 煤基多孔炭膜去除压舱水中微藻的研究. *无机材料学报*, **10**, 1067-1071.
- [9] 谢承利, 翁平, 李小军, 刘喜元 (2010) 船舶压舱水处理技术应用综述. *船海工程*, **6**, 86-90.
- [10] Sun, B., Aye, N.N., Wang, X.M., Zhu, X.M. and Sato, M. (2011) Eradication of invasive organisms from ballast water

- with electrodeless pulsed-discharge hybrid reactor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **47**, 1079-1085. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2011.2125932>
- [11] 黄宏, 余华峰, 刘光明, 等 (2012) 船舶压载水处理设备及应用技术研究进展. *水处理技术*, **3**, 12-15.
- [12] 党坤, 殷佩海, 孙培廷 (2004) 国内外船舶压载水处理技术现状. *航海技术*, **2**, 64-66.
- [13] 丁奉 (2003) 用“溢流法”更换船舶压载水的研究. 硕士论文, 大连海事大学, 大连.
- [14] 高永强 (2005) 用“稀释法”更换船舶压载水的研究. 硕士论文, 上海海事大学, 上海.
- [15] 康凯 (2013) 超声及其强化技术处理船舶压载水的研究. 硕士论文, 哈尔滨工程大学, 哈尔滨.
- [16] 刘光洲, 王建明, 张鉴清, 曹楚南 (2011) 电解法处理压载水对 316L 不锈钢腐蚀行为的影响. *金属学报*, **12**, 1600-1604.
- [17] 钟华仓 (2011) 羟基自由基对压载水水质的影响研究. 硕士论文, 大连海事大学, 大连.
- [18] 杨晓红, 王少波, 原培胜, 等 (2011) 过滤 - 紫外线消毒技术处理压载水试验. *舰船科学技术*, **11**, 123-125.
- [19] 吴东海 (2011) 臭氧/光催化高效生物灭活及在船舶压载水处理中的应用. 博士论文, 哈尔滨工业大学, 哈尔滨.
- [20] 赵焯 (2012) 高梯度磁分离 - 紫外复合压载水处理技术的研究. 硕士论文, 哈尔滨工程大学, 哈尔滨.
- [21] 赵华侨 (1993) 等离子化学与工艺. 中国科技大学出版社, 合肥, 220-252.
- [22] Tang, Q., Jiang, W., Zhang, Y., et al. (2009) Degradation of azo dye acid red 88 by gas phase dielectric barrier discharges. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **29**, 291-305. <http://dx.doi.org/10.1007/s11090-009-9181-3>
- [23] Grymonpre, D.R., Finner, W.C., Clark, R.J., et al. (2003) Suspended activated carbon particles and ozone formation in aqueous-phase pulsed corona discharge reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **42**, 5117-5134. <http://dx.doi.org/10.1021/ie020330n>
- [24] Sugiartoa, A.T., Itoa, S., Ohshimaa, T., et al. (2003) Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water. *Journal of Electrostatics*, **58**, 135-145. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3886\(02\)00203-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(02)00203-6)
- [25] Grymonpre, D.R., Sharma, A.K., Finney, W.C., et al. (2001) The role of Fenton's reaction in aqueous phase pulsed streamer corona reactors. *Chemical Engineering Journal*, **82**, 189-207. [http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00345-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00345-4)
- [26] 卢新培, 严萍, 任春生, 邵涛 (2011) 大气压脉冲放电等离子体的研究现状与展望. *中国科学*, **7**, 801-815.
- [27] 叶齐政, 万辉, 雷燕, 等 (2003) 放电等离子体水处理技术中的若干问题. *高电压技术*, **4**, 32-34.
- [28] Sugai, T. and Minamitani, Y. (2013) Influence of rise rate of applied voltage for water treatment by pulsed streamer discharge in air-sprayed droplets. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **41**, 2327-2334.
- [29] 孙冰, 高志鹰, 内爱, 等 (2013) 多针 - 板脉冲放电气液混合反应器气液中活性物质的生成和转移特性. *高电压技术*, **1**, 109-116.
- [30] 谷一杉 (2011) 气液混合高压脉冲放电反应器特性及应用研究. 硕士论文, 大连海事大学, 大连.
- [31] Wang, H.J., Li, J. and Quan, X. (2006) Decoloration of azo dye by a multi-needle-to-plate high-voltage pulsed corona discharge system in water. *Journal of Electrostatics*, **64**, 416-421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2005.11.004>