

海水电磁屏蔽体

王身云, 计想建, 岑大维

(南京信息工程大学 应用电磁研究中心, 南京 210044)

摘要: **目的** 将海水作为一种电磁屏蔽材料, 研究其电磁屏蔽效能以及影响因素。**方法** 基于海水和玻璃的电磁特性参数, 并利用电场和磁场切向分量连续边界条件, 推导由双层玻璃封装海水所构成的复合电磁屏蔽体结构的屏蔽效能计算公式。**结果** 具有一定厚度和盐度的海水墙体可以展示出良好的电磁屏蔽效能。通过增加海水层的厚度, 提高海水的盐度以及温度, 均可以有效增强海水电磁屏蔽体的屏蔽效能。改变封装海水的玻璃层厚度, 对海水电磁屏蔽体的屏蔽效能影响较小。**结论** 海水可以作为一种有效的电磁屏蔽材料, 并具有光波透明、电磁屏蔽效能易重构、可循环导热等独特的优势。在军事和民用领域, 海水电磁屏蔽体将具有重要的理论和应用价值。

关键词: 海水; Debye 模型; 电导率; 电磁屏蔽材料; 屏蔽效能; 传输系数

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.05.003

中图分类号: X123 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)05-0009-04

Seawater Electromagnetic Shield

WANG Shen-yun, JI Xiang-jian, CHEN Da-wei

(Research Center of Applied Electromagnetics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the shielding effectiveness of the seawater and its affecting factors where seawater is used as electromagnetic shielding material. **Methods** Formulas for calculating the shielding effectiveness of composite electromagnetic shielding structure made up of a seawater layer sandwiched by double glazing glass were derived with electromagnetic property parameters of sea water and glass and electromagnetic boundary condition that tangential fields be continuous. **Results** The seawater electromagnetic shielding wall with enough salinity and thickness had good shielding effectiveness. The shielding effectiveness could be enhanced by increasing the thickness, salty and temperature of the seawater layer, while it was not sensitive to the glass thickness. **Conclusion** Seawater can be used as effective electromagnetic shielding material. It has advantages of optical transparency, shielding effectiveness reconfiguration, cycle control of heat conduction. It has theoretical and application value in military and civilian areas.

KEY WORDS: seawater, Debye model, conductivity, electromagnetic shielding materials, shielding effectiveness, transmission coefficient

电磁屏蔽技术是一种重要的电磁干扰防护手段^[1]: 一方面, 电磁屏蔽技术是利用特定的电磁屏蔽体, 将受防护的电子电气元件与干扰性或甚至是毁伤性的

电磁能量进行空间隔离, 使设备与系统工作空间的电磁环境电平满足设备免遭毁伤和干扰的要求。针对民用电子设备与系统, 干扰电磁能量可能来源于广播、

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61302048); 江苏省自然科学基金(BK20151528);

作者简介: 王身云(1981—), 男, 湖北人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电磁兼容、计算电磁学和智能天线。

雷达和其他功能性辐射设备等人工源，也可能是雷电、宇宙辐射等自然源；在军事方面，受防护对象通常是武器装备电子系统和操作人员，干扰电磁能量主要来源于电子对抗干扰机、大功率雷达以及定向高功率电磁能武器（如高功率微波武器、主动拒止武器、电磁炸弹等^[2]）。另一方面，电磁屏蔽技术是利用特定的电磁屏蔽体，防止信息保密区域的电磁信号泄露，如机要屏蔽室^[3]。

电磁屏蔽体的屏蔽效果由电磁屏蔽效能来表示，其定义为屏蔽区域在屏蔽前后的电场（或电压）与磁场（或电流）或功率之间的比值。这个比值越大，表明屏蔽效果越好。在物理机制上，电磁屏蔽效能则取决于屏蔽体的材料电磁特性参数及其厚度，进而决定干扰电磁能量被分配到屏蔽体上的反射、吸收和透射的比值。文献[4-5]计算了电磁波在海水中的衰减特性，结果表明，进入海水中的电磁波会快速衰减。目前，被广泛应用的电磁屏蔽材料主要有铁磁材料、良导体金属和导电复合材料^[6]。铁磁材料具有较高的磁导率，具有旁路磁能量的功能，主要应用于低频磁场的屏蔽；良导体金属电导率非常大，从而使其具有较好的电磁屏蔽效果；导电复合材料，如导电高分子材料^[7]、导电混凝土^[8]、导电橡胶^[9]以及智能半导体电磁屏蔽材料等^[10]，它们是以掺杂或填充金属的方式促使其具有较高的电导率，从而使其具有较好的电磁屏蔽（或能量选择性屏蔽）效能。虽然上述各种类型的电磁屏蔽材料已获得广泛的应用，但也存在不可避免的问题，如良导体金属具有加工困难、易腐蚀等缺点^[11-12]；导电复合材料具有制备工艺复杂、价格昂贵、环境敏感易失效以及屏蔽效能有限等缺点。

文中根据电磁屏蔽材料的物理屏蔽机制，即材料的电导率在电磁屏蔽机理上起关键作用，提出将海水作为一种有效的电磁屏蔽材料的概念。海水是一种自然流体物质，具有较高的介电常数和电导率参数，对于干扰电磁波具有较强的反射和衰减效应，因而天然具有较好的电磁屏蔽效能。特别地，针对海洋防务或舰船武器装备领域的电磁屏蔽和电磁防护，海水电磁屏蔽体具有价格低廉、结构和屏蔽效能均易重构、光波透明（不影响屏蔽室的采光、视觉观察以及激光通信设备工作）以及可以循环导热等独特优势，因而具有较好的理论研究和应用价值。

1 研究方法

海水的复介电常数采用由 Klein 和 Swift 拟合的经典单 Debye 模型来表示^[13]：

$$\hat{\epsilon}(t, S) = \epsilon_0 \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 (\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau(t, S)} - j \frac{\sigma(t, S)}{\omega} \quad (1)$$

式中： ϵ_∞ 为无限高频率的介电常数，在 Klein 和 Swift 模型中取常数值 4.9； ω 为入射电磁波的角

频率； $\epsilon_s(t, S)$ 、 $\tau(t, S)$ 、 $\sigma(t, S)$ 分别为静态介电常数、Debye 弛豫时间和由盐离子引起的电导率，三者均是海水温度和盐度的函数。

Klein 和 Swift 通过 1.43、2.653 GHz 的实验测量数据，获得了各参数的拟合估算公式，该模型被证明在低频电磁波段具有较高的精度。将海水复介电常数表示成一般形式： $\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)$ ，则有：

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_0 \left(\epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \quad (2)$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{\epsilon_0 \omega \tau (\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{\sigma}{\omega} \quad (3)$$

由于海水是流体物质，形成电磁屏蔽体结构需要采用固体材料封装。为了形成具有光波透明的电磁屏蔽体结构，固体封装材料采用低介电常数的 DM305 玻璃^[14]，其复介电常数实部和虚部分别近似为： $\epsilon'(\omega) = 3.5\epsilon_0$ ， $\epsilon''(\omega) = 0.0003\epsilon_0$ 。海水和玻璃材料被认为是无磁性的，因此，其导纳率和阻抗率可以分别表示为： $\hat{y}(\omega) = j\omega(\epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega))$ 和 $\hat{z}(\omega) = j\omega\mu_0$ ，其中 ϵ_0 和 μ_0 分别为空气的介电常数和磁导率。

考虑海水电磁屏蔽体结构是由双层玻璃封装海水构成（如图 1 所示），针对远场电磁干扰，入射源可近似为平面波。在频域，假定正入射的电磁波为垂直极化或如图 1 所示的 x 轴极化，根据电场切向分量连续的边界条件，在整个 z 轴传播方向上，电磁场的通解为：

$$E_x(z, \omega) = E_x^{(+)}(z_0, \omega)e^{-jkz} + E_x^{(-)}(z_0, \omega)e^{+jkz} \quad (4)$$

$$H_y(z, \omega) =$$

$$\frac{\hat{k}}{\omega\hat{\mu}(\omega)} \left[E_x^{(+)}(z_0, \omega)e^{-jkz} - E_x^{(-)}(z_0, \omega)e^{+jkz} \right] \quad (5)$$

式中： \hat{k} 为复数波数， $\hat{k} = \sqrt{-\hat{y}(\omega)\hat{z}(\omega)}$ 。

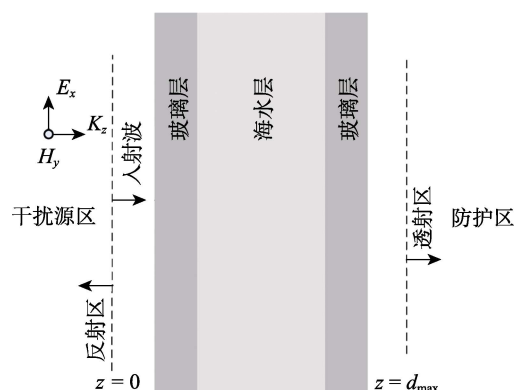


图 1 双层玻璃封装海水电磁屏蔽体结构

在传输方向上，考虑随机传输空间增量 Δz ，利用式(4)和(5)，则有关系式：

$$\begin{bmatrix} E_x(z + \Delta z, \omega) \\ jH_y(z + \Delta z, \omega) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\hat{k}\Delta z) & -\omega\mu_0 \cdot \sin(\hat{k}\Delta z)/\hat{k} \\ +\hat{k} \cdot \sin(\hat{k}\Delta z)/\omega\mu_0 & \cos(\hat{k}\Delta z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(z, \omega) \\ jH_y(z, \omega) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中的系数矩阵称为在增量介质层 $[z, z + \Delta z]$ 的传输矩阵, 记为 $\mathbf{M}(\Delta z, \omega)$ 。选择如图 1 所示的虚线作为参考面, 并假定这两个参考面无限接近于双层玻璃封装海水屏蔽体的表面, 即左右参考面的位置分别为 $z = 0$ 和 $z = d_{\max}$ 。入射干扰电磁波经由左侧参考面进入屏蔽体, 并在表面产生部分能量反射; 而进入屏蔽体内部的电磁能量被海水物质吸收, 然后经由右侧参考面进入电磁屏蔽或防护区域。因此, 左侧参考面上的电磁场由入射波和反射波叠加组成, 而右侧的电磁场只有透射波。具体可以表示为:

$$\mathbf{X}(\omega) \begin{bmatrix} E_x^{(+)}(d_{\max}, \omega) \\ j\hat{k} \cdot E_x^{(+)}(d_{\max}, \omega)/\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x^{(+)}(0, \omega) + E_x^{(-)}(0, \omega) \\ j\hat{k} \cdot (E_x^{(+)}(0, \omega) - E_x^{(-)}(0, \omega))/\omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X}(\omega)$ 为多层材料的传输矩阵, $\mathbf{X}(\omega) = \prod_{j=1}^{N=3} \mathbf{M}(d_j, \omega)$ 。假定由图 1 所示的海水电磁屏蔽体的背景介质为空气, 由式(7)可以得到入射电磁波穿透屏蔽体时的透射系数:

$$t(\omega) = \frac{E_x^{(+)}(d_{\max}, \omega)}{E_x^{(+)}(0, \omega)} = \frac{2}{x_{22}(\omega) + x_{11}(\omega) + j[\omega\mu_0 x_{21}(\omega)/k_0 - k_0 \cdot x_{21}(\omega)/\omega\mu_0]} \quad (8)$$

式中: $x_{ij}(\omega)$ 为传输矩阵 $\mathbf{X}(\omega)$ 的元素; k_0 为空气中的波数。因此, 根据屏蔽效能的定义有:

$$SE(\omega) = 20 \lg \left(\frac{|E_x^{(+)}(0, \omega)|}{|E_x^{(+)}(d_{\max}, \omega)|} \right) = 20 \lg \left(\frac{1}{|t(\omega)|} \right) \quad (9)$$

式(9)可以被看作严格的屏蔽效能计算公式, 所计算的效能包括了传统理论计算公式里的反射损耗 R 、吸收损耗 A 和多次反射损耗 B 所引起的屏蔽效能^[1]。

2 结果及分析

首先, 按照 Klein 和 Swift 拟合的海水 Debye 方程系数估算公式^[11], 取常温 $t=20\text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 $S=3.5\%$ 时的参考值: $\varepsilon_s(t, S)=72.5$, $\tau(t, S)=9.09 \times 10^{-12}\text{ s}$, $\sigma(t, S)=4.8\text{ S/m}$ 。设置双层玻璃厚度 $d_1=d_3=3.0\text{ cm}$, 不同海水层厚度 d_2 对复合海水电磁屏蔽体结构的屏蔽效能计算结果的影响如图 2 所示。可以看到, 当海水的电磁特性参数确定时, 海水层的厚度越大, 屏蔽效能越高。同时, 当海水电磁屏蔽体的结构参数和电

磁特性参数确定时, 电磁屏蔽效能随频率的增加而增强。例如, 当海水层厚度 $d_2=3.0\text{ cm}$ 时, 入射电磁波频率 $f \geq 2.2\text{ GHz}$ 的屏蔽效能达到低等级标准 40 dB; 当 $d_2=9.0\text{ cm}$ 时, $f \geq 20\text{ MHz}$ 的屏蔽效能均达到低等级屏蔽标准 40 dB, $f \geq 1.0\text{ GHz}$ 的屏蔽效能达到高等级屏蔽标准 80 dB。针对低频或极低频电磁波, 海水电磁屏蔽体的屏蔽效能会急剧降低, 即失去了电磁屏蔽效能。因而, 潜艇通信通常采用低频或极低频电磁波作为信号载体。

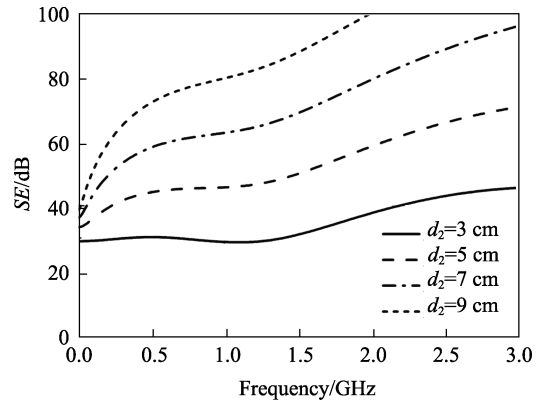


图 2 海水层厚度 d_2 对屏蔽效能的影响

设置海水层厚度 $d_2=7.0\text{ cm}$, 计算了不同玻璃层厚度 d_1 对屏蔽效能的影响, 计算结果如图 3 所示。可以看到, 由于玻璃层对干扰电磁波的损耗较小, 因而, 玻璃层的厚度对所设计的海水电磁屏蔽体的屏蔽效能影响较小。特别地, 针对低频段电磁波, 玻璃层的厚度相比于入射电磁波的波长可以忽略, 海水电磁屏蔽体的屏蔽效能差异很小。

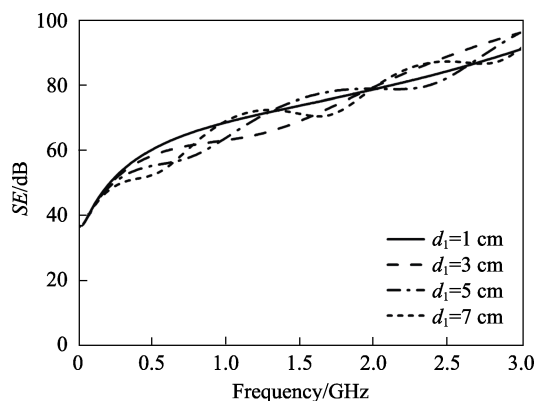


图 3 玻璃层厚度 d_1 对屏蔽效能的影响

最后, 分别计算了海水的盐度和温度对特定几何结构海水电磁屏蔽体的屏蔽效能影响。这里假定了玻璃层的厚度 $d_1=d_3=3\text{ cm}$, 海水层的厚度 $d_2=7.0\text{ cm}$ 。由式(1)可以看到, Debye 方程中的系数为海水温度和盐度的二元函数。影响海水磁屏蔽效能的关键系数是海水电导率。一般地, 海水盐度越高, 含有的离子数浓度越高, 引起的水电导率越高。当海水盐度或盐

离子数浓度一定时,海水温度也会影响其电导率。温度越高,海水盐离子在电场作用下的离子迁移率越高,从而电导率就越高。首先,假定了海水的温度 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据文献[11]中的拟合公式计算了不同海水盐度所对应的 Debye 方程系数,并计算对应的海水电磁屏蔽体的屏蔽效能,如图 4 所示。全球海水的盐度值大约在 0.1%~4.0%,平均值约 3.5%。从图 4 中可以看到,海水盐度值越高,其屏蔽效能越好。当海水盐度为 0 时,其电磁特性接近于去离子水,屏蔽体对低频电磁波的传导吸收损耗较小,主要产生周期性的反射损耗,如图 4 中的低频区所示。针对高频电磁波,屏蔽效能增强,如图 4 中的高频区所示,主要是由海水介质极化损耗增强所致。总体而言,当海水盐度较低时,屏蔽效能较差,达不到电磁屏蔽的低等级电磁屏蔽标准。考虑海水温度对特定海水电磁屏蔽体的屏蔽效能影响,图 5 给出了当海水盐度为 3.5% 时不同

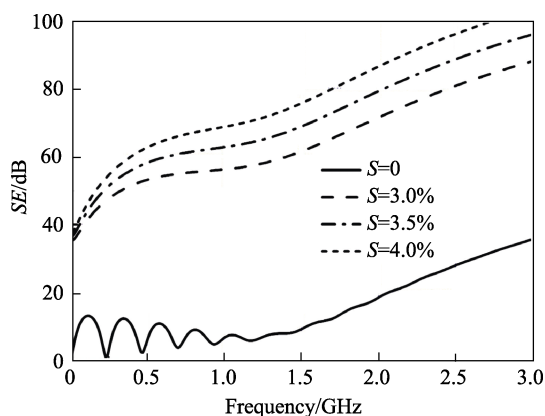


图 4 海水盐度对屏蔽效能的影响

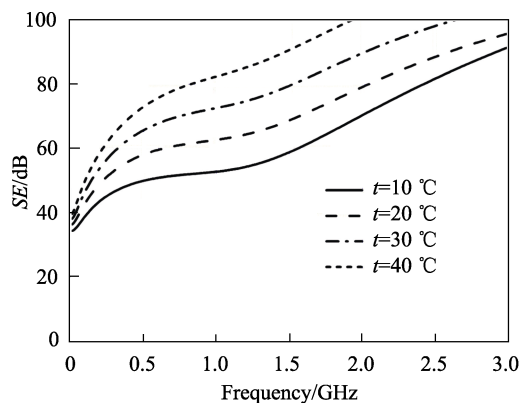


图 5 海水温度对屏蔽效能的影响

海水温度的屏蔽效能计算结果。如前所述,温度越高,引起海水的电导率越大,从而屏蔽效能增强,在不同的电磁波频段可以达到不同的屏蔽标准级别。

3 结论

文中基于海水 Debye 电磁参数模型,严格导出了由玻璃介质封装海水所构成的海水电磁屏蔽体的屏蔽效能计算公式。计算结果表明,海水的高电导率特性使得海水具有良好的电磁屏蔽效能。通过增加海水层的厚度、盐度以及温度,均可以提高海水电磁屏蔽体的屏蔽效能。

参考文献:

- [1] 何金良. 电磁兼容概论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 聂秀丽, 赵晓凡. 车辆强电磁脉冲条件下的分层防护及验证方法探讨[J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 36-41.
- [3] 吕立波. 信息设备电磁辐射与信息安全[J]. 网络与通信安全, 2007, 67(4): 67-68.
- [4] 郑强, 杨日杰. 电磁波在海水中的传播特性研究[J]. 电声技术, 2013, 37(2): 33-35.
- [5] 焦瑜呈. 海水中电磁波特性的分析与研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(8): 176-179.
- [6] 刘琳, 张东. 电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 功能材料, 2016, 46(3): 3016-3022.
- [7] 李新, 陆萍, 汪立海. 导电聚合物在电磁屏蔽材料中的应用进展[J]. 广东化工, 2018, 45(6): 133-134.
- [8] 奚江琳, 黄茜茜. 现代建筑空间电磁污染及防护设计[J]. 四川建筑, 2014, 34(1): 38-39.
- [9] 杨晓东, 李洪春, 刘清宝, 等. 新型高导电高温硫化硅橡胶研制[J]. 火箭推进, 2016, 42(2): 64-68.
- [10] 成伟, 王妍, 王赞, 等. 自适应智能电磁防护材料测试方法研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 32-35.
- [11] 张晓东, 胡裕龙, 卜世超, 等. 船体钢海水腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2017, 15(6): 33-40.
- [12] 张彭辉, 王伟, 郭为民, 等. 海工钢在热带海域长尺试验腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 77-80.
- [13] KLEIN L, SWIFT C. An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2003, 25(1): 104-111.
- [14] 欧金凤, 沈卓身. 低介电常数封装玻璃的研制[J]. 半导体技术, 2010, 35(6): 560-563.