

白皮书

腐蚀与防护建模

作者 ED FONTES 和 BERTIL NISTAD

目录

简介	3
腐蚀原理	3
热力学和动力学	3
传递现象和模型方程	5
腐蚀建模	6
电偶腐蚀	6
缝隙腐蚀	7
点蚀	7
应力腐蚀开裂	8
全面均匀腐蚀	8
腐蚀防护建模	9
阳极保护	9
阴极保护	9
结语	11

更多资源

用户案例集锦

cn.comsol.com/stories

案例下载

cn.comsol.com/models

科技论文和技术资料

cn.comsol.com/papers-presentations

COMSOL 博客

cn.comsol.com/blogs

联系信息

如需了解如何使用 COMSOL® 软件的数值仿真和 App 设计功能来满足您的独特应用需求, 请访问 cn.comsol.com/contact。

您也可以通过以下页面联系技术支持：
cn.comsol.com/support。

作者简介

Ed Fontes, COMSOL, www.comsol.com

Ed Fontes 是 COMSOL 公司的首席技术官, 在位于瑞典斯德哥尔摩的皇家理工学院 (KTH) 获得应用电化学博士学位, 现担任 COMSOL 公司化学工程、计算流体力学(CFD)和传热产品系列的开发主管, 全面负责 COMSOL 的技术开发工作。

Bertil Nistad, COMSOL, www.comsol.no

Bertil Nistad 是 COMSOL 公司的技术经理, 在位于特隆赫姆的挪威科技大学 (NTNU) 获得电气工程博士学位, 一直致力于“腐蚀模块”的开发工作。

简介

世界上几乎每一种人造结构都离不开金属的使用, 这些金属通常是易腐蚀的非贵金属。据估计, 全球每年因腐蚀造成的损失约 2.5 万亿美元, 而采取适当的防腐措施可以减少 15%~55% 的损失^[1]。因此, 了解腐蚀及其防护措施具有非常重要的经济价值。

数学建模与仿真是理解腐蚀和腐蚀防护的有效工具。基于系统的热力学和动力学特性的高保真模型经验证后, 不仅可以帮助人们理解其中的原理, 还可以预测腐蚀的影响, 提高人们的直觉判断能力并促进该学科的创新发展。

介绍了用于描述腐蚀及其防护的模型, 并剖析模型背后的基本原理; 此外, 还举例说明了如何使用这些模型来理解、创新和优化设备和工艺, 从而有效减轻腐蚀。

腐蚀原理

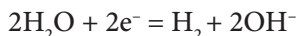
腐蚀过程建模以非均相化学反应理论为基础。发生腐蚀的表面反应包括还原反应和氧化反应, 其中金属结构与电解液接触。氧化和还原反应发生在表面上的两个不同位置(称为位点), 电子通过金属结构从氧化位点传导到还原位点。电解液中的电化学反应和离子运动引起的电流传输使电路闭合(图 1)。其中, 氧化反应发生在阳极区, 即电解

液中阴离子迁移的目标位置; 还原反应发生在阴极区, 即电解液中阳离子迁移的目标位置。

热力学和动力学

决定一个位点是阳极区还是阴极区的主要因素是金属对电子的亲合力。对电子具有高亲和力的金属将吸引电子, 用作阴极; 具有较低亲和力的金属将失去电子并因此发生腐蚀。电子亲和力由反应的吉布斯自由能(ΔG)决定, 由于其中涉及电子, 因此 ΔG 会受到电位的影响。这一现象可由法拉第定律描述, 将该定律与吉布斯方程相结合, 可得到电化学反应的能斯特方程^[2]。

在腐蚀过程中, 常见的氧化反应(阳极区)为金属溶解, 而常见的还原反应(阴极区)为析氢。



阳极反应和阴极反应的速率由阿伦尼乌斯定律确定, 该定律表明反应速率与活化能成指数关系。金属表面既可以用作阴极, 也可以用作阳极, 具体取决于其中的电位。与较贵金属连接时, 次贵金属表面用作阳极(图 2)。同样, 由于涉及电子, 活化能(ΔG^\ddagger)也受电位的影响。将法拉第定律和阿伦尼乌斯定律相结合, 可得到电化学反应的 Butler-Volmer 方程。

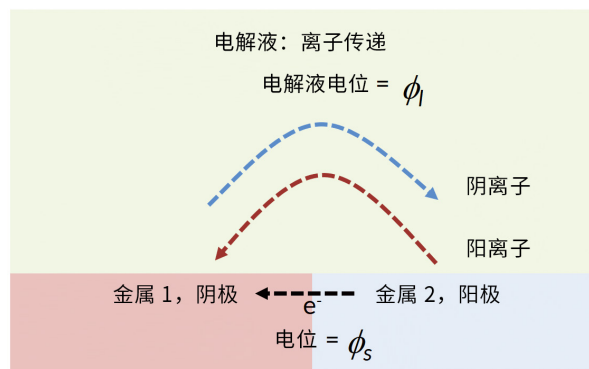


图 1 一种原电池, 其中金属 1 用作阴极, 金属 2 用作阳极, 通过覆盖在两个金属表面的电解液使电路闭合。

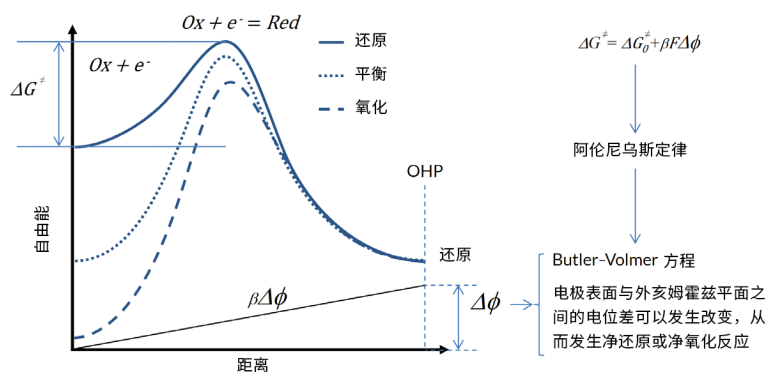


图 2 金属表面既可以用作阴极, 也可以用作阳极, 具体取决于其中的电位。与较贵金属连接时, 次贵金属表面作为阳极。OHP 表示带电双层的外亥姆霍兹平面。

Butler-Volmer 方程给出了表面位点的电化学反应速率与电化学电位的函数关系。由于其中涉及电子，因此使用法拉第定律可得到电流密度^[2]。如 Butler-Volmer 方程可以描述析氢反应：

$$i_{H_2} = i_{0,H_2} \left\{ (C_{OH^-})^2 P_{H_2} \exp\left(\frac{3F}{2RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{F}{2RT} \eta\right) \right\}$$

其中， F 为法拉第常数， R 为气体常数， T 表示温度， η 表示反应过电位。 η 定义如下：

$$\eta = \phi_s - \phi_l - (\phi_{s,eq} - \phi_{l,eq})$$

式中， ϕ_s 表示金属表面电位； ϕ_l 表示带电双层外亥姆霍兹平面(OHP, 极稀的电解液除外)电解液电位。

假设这是一个可逆反应，此方程中的 i_{H_2} 表示由析氢反应引起的金属表面法向的电流密度。交换电流密度 i_{0,H_2} 是指平衡态时阳极和阴极电流密度的大小，反映了反应速率常数。交换电流密度大意味着反应为快速动力学反应。氢氧根离子(OH⁻)的无量纲浓度(C_{OH^-})表述如下：

$$C_{OH^-} = \frac{c_{OH^-}}{c_{OH^-,eq}}$$

式中， c_{OH^-} 为金属表面的 OH⁻ 浓度； $c_{OH^-,eq}$ 为金属表面的 OH⁻ 平衡态浓度。对应的无量纲氢分压表述为：

$$P_{H_2} = \frac{p_{H_2}}{p_{H_2,eq}}$$

由此可知，过电位是电极反应偏离平衡时的电极电位与其平衡电位的差值，即无电流通过(平衡状态)和有电流通过时的电位差值。电位差 $\phi_s - \phi_l$ (无论平衡与否)无法测量，因为需要在电解液中插入另一个金属表面(如微电极)，而这会产生另一个电解液与电极之间的电位差。为此，可以使用一个较高阻抗的参比电极，以便在测量电位差时可以得到相同的测量值。如果在模型中使用相同的参考值，则过电位可以表示如下：

$$\eta = \phi_s - \phi_l - E_{eq}$$

式中， E_{eq} 为平衡电极电位，是使用同一个参考电极，在同

一个位置根据平衡和非平衡状态进行测量的结果。在模型中，这也意味着必须在一个点上设置电位 ϕ_s 。例如，在其中一种金属的一个点上设置电位，理论上保持平衡和非平衡状态下的值和位置相同。通常在参比电极与电位更负的电极相连(理论上)的位置，设置电位为零，即 $\phi_s = 0V$ 。如没有设置该参考电位点，则为一个欠约束问题。

如果一个金属表面由两种不同金属组成，彼此相互发生电子接触，并且均与同一电解液接触，则具有较高电子亲和力的表面位点产生的电化学平衡电位(E_{eq})更高。由于表面位点是电子接触并与相同的电解液接触，因此可得到一个净电流为零的混合电位(也称腐蚀电位， E_{corr})的原电池。该原电池的阳极和阴极位点彼此非常接近，如图3所示。由图3可以看出，具有较低亲和力的表面用作阳极，定义为表面正的电荷转移电流密度；具有较高电子亲和力的表面用作阴极，定义为负电流密度。在净电流密度为零时，阳极和阴极反应的电流密度绝对值称为腐蚀电流， i_{corr} 。

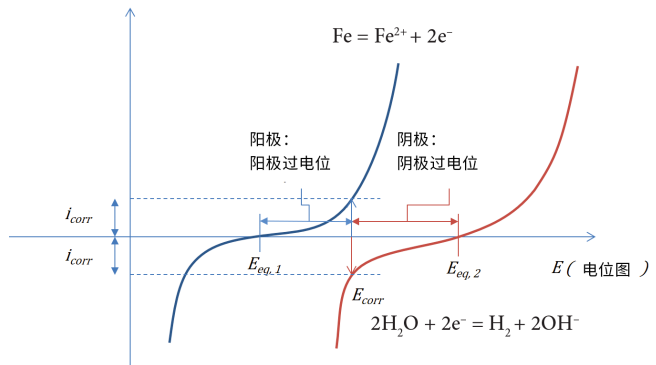


图3 次贵金属表面(蓝色)和较贵金属表面(红色)反应的Butler-Volmer 方程。

电极反应也可以用埃文斯图(图4)来描述，即将电化学电位绘制成电化学电位与电流绝对值对数的函数。在没有欧姆损耗和质量传递损失的情况下，可以看到腐蚀电位和腐蚀电流。

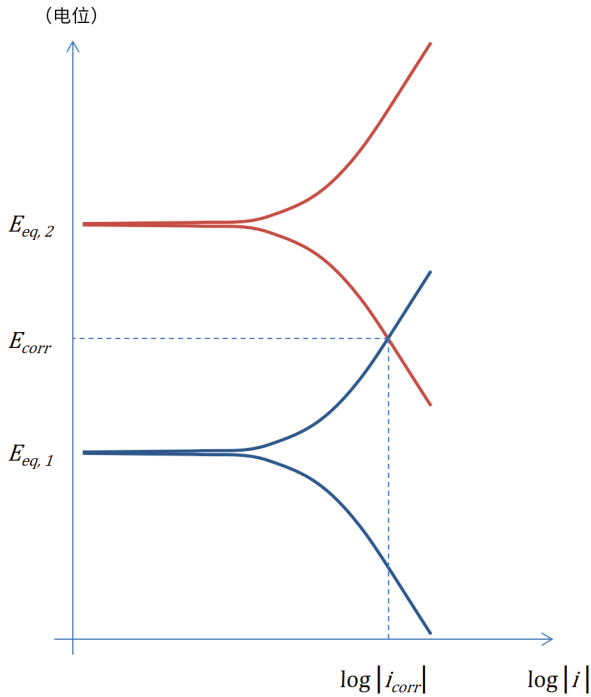


图 4 在没有欧姆损耗和质量传递损失的情况下，两个电极反应的埃文斯图。

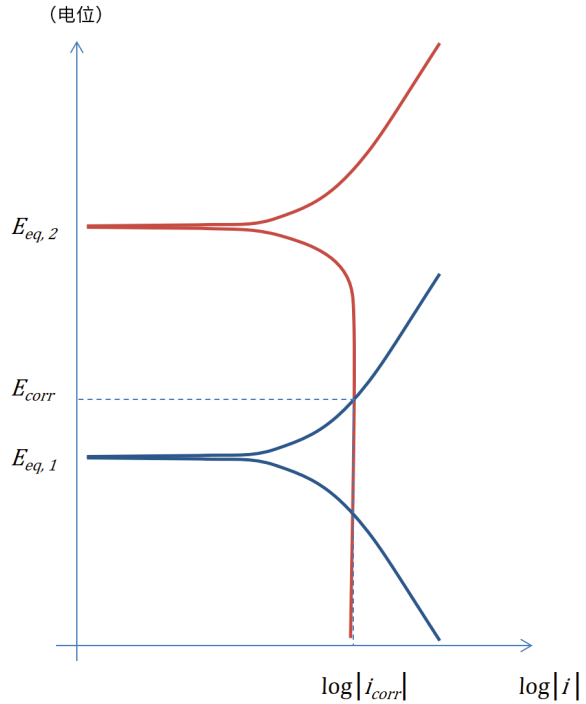


图 6 氧气还原半反应中极限电流的埃文斯图，对应于图 5。

当存在质量传递限制时，质量传递损失会抑制过电位的指数增长趋势。电流密度较高时不再呈指数增加，而会逐渐接近一个常数值，称为极限电流密度。图 5 所示阴极（负极）上的氧气还原反应（红色曲线）体现了这一点。

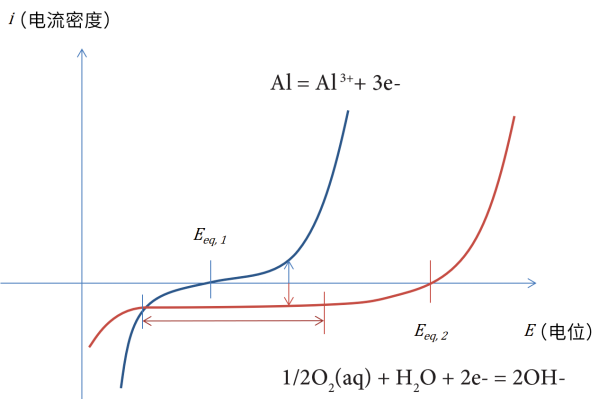


图 5 氧气还原（红色曲线）是在较宽的电位范围内受限的质量传递。当析氢开始时，绝对负电流仅在负电位上增加。

图 6 为传输限制的氧气还原和金属阳极溶解对应的埃文斯图^[3]。

传递现象和模型方程

不仅电子电位和电解液电位可以随时空变化，电解液的组成也可能随时空发生变化。高保真的腐蚀与防护模型必须能够描述电解液的组成以及金属和电解液中的电位分布。引入电解液中的带电离子通量，所有物质的质量守恒以及电中性条件作为模型方程，并将上述电化学反应的表达式作为金属表面的边界条件。

描述电解液中带电离子运输的方程称为Nernst-Planck 方程。带电离子通量 N_i 包含扩散、迁移和对流。在质量守恒中，不同方向的通量变化通过时间积累来平衡，即下文所述方程中的瞬态项，其中 c_i 表示物质 i 的浓度。此外，也可以通过电解液中的均相反应来平衡，用质量守恒方程中的 R_i 表示。

电解液域的模型方程如下:

(1) $n-1$ 种物质的质量守恒方程

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_i + R_i = 0$$

带电离子通量由 Nernst-Planck 方程给出

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_{m,i} F c_i \nabla \phi_i + c_i \mathbf{u}$$

其中, D_i 为物质 i 的扩散系数, z_i 为离子 i 的电荷, $u_{m,i}$ 为迁移率, \mathbf{u} 为描述电解液流动的速度矢量。

(2) 电解液中电流密度 \mathbf{i}_l 的平衡方程

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_l = 0$$

电解液中的电流密度为电解液中所有电荷的通量之和, 这些电荷通量来自离子通量, 结合法拉第定律可得

$$\mathbf{i}_l = \sum_{i=1}^n z_i F \mathbf{N}_i$$

(3) 泊松方程

$$\nabla \cdot (-\varepsilon \nabla \phi_l) = F \sum_{i=1}^n z_i c_i$$

其中, ε 为介电常数。对于大多数电解液(高度稀释的电解液除外), 均可以使用电中性条件将此方程近似表示为

$$\sum_{i=1}^n z_i c_i = 0$$

在电解液域中, 有 $n+1$ 个未知数: n 个物质浓度和电解液电位 ϕ_l 。物料平衡方程的个数为 $n-1$ 。电流密度平衡方程是第 n 个方程, 它是所有带电粒子质量平衡的线性组合。电中性条件给出电解液中的最后一个方程($n+1$), 从而得到与未知变量($n+1$)数量相同的方程。

对于金属结构中的电子电位, 可结合欧姆定律使用电流守恒方程表示。

(4) 金属中的电流密度守恒

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_s = 0$$

其中,

$$\mathbf{i}_s = -\kappa_s \nabla \phi_s$$

式中, κ_s 为金属电导率。

金属-电解液界面两侧的域方程的边界条件使用了上

面讨论的 Butler-Volmer 方程。例如, 如果离子 i 参与表面的电化学反应, 那么其边界条件基于这样一个事实: 边界处的通量必须与单位面积反应速率相匹配。

$$\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{n} = -\frac{s_i}{nF} i_{BV}$$

式中, \mathbf{n} 表示金属表面的法矢, s_i 是电荷转移反应中物质 i 的化学计量系数, n 为电子数, i_{BV} 是离子 i 参与的电化学反应的 Butler-Volmer 表达式。该表达式可以写为一系列反应的总和。电流密度守恒的边界条件如下:

$$\mathbf{i}_l \cdot \mathbf{n} = i_{BV}$$

此外, Butler-Volmer 表达式 i_{BV} 还可以是多个反应的表达式之和。同样, 通过以下表达式可以得到金属中电流密度平衡的边界条件:

$$\mathbf{i}_s \cdot \mathbf{n} = -i_{BV}$$

在充分混合的电解液中, 除金属结构表面上非常薄的微观边界层外, 可以忽略其余各处的浓度梯度, 此时电流密度平衡方程变为

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_l = 0$$

其中,

$$\mathbf{i}_l = -\left(\sum_{i=1}^n z_i^2 u_{m,i} F^2 c_i\right) \nabla \phi_l + \left(F \sum_{i=1}^n z_i c_i\right) \mathbf{u}$$

然而, 上述方程右边第二项包含电中性条件因子, 其值等于零。右边第一项括号内的因子等于电解液电导率 κ_l , 因此可以得到充分混合电解液中的电流密度表达式

$$\mathbf{i}_l = -\kappa_l \nabla \phi_l$$

腐蚀建模

电偶腐蚀

电偶腐蚀是指具有不同电子亲和力的两种金属相互发生电子接触, 并均与同一电解液接触而形成原电池。在汽车工业和造船业中, 当不同的金属进行焊接时, 会发生电偶腐蚀。在靠近两种金属之间的接触区域, 次贵金属在电偶腐蚀过程中会发生阳极溶解。因此, 必须对这种结构进行保护, 如使用涂层防止金属表面与含有离子的水溶液(电解液)直接接触。

假设一种电解液充分混合,可以使用 Butler-Volmer 方程来描述金属-电解液界面上的析氢和金属溶解,并在金属中的相应边界上设置电子电位。图 7 为原电池电解液中的电流密度流线和等电位曲线。该问题基于动网格求解,考虑了阳极溶解。在初始状态下,贵金属和次贵金属的初始表面是水平的,72 h 后,次贵金属通过阳极溶解发生腐蚀。

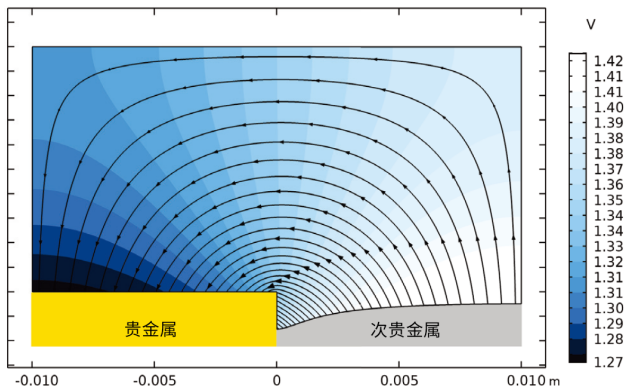


图 7 原电池电解液中的电流密度流线和等电位曲线。在初始状态下,贵金属和次贵金属的初始表面是水平的。72 h 后,次贵金属通过阳极溶解发生腐蚀。

在电子工业中,铜与其他次贵金属(如焊接金属)一起使用即为潮湿环境中电偶腐蚀的一个例子。当水在未受保护的表面上凝结,使离子缓慢溶解而形成电解液时,较易形成原电池。此时,铜结构变为阴极表面,溶解次贵的焊接金属,从而导致电子器件失效。

缝隙腐蚀

在上文中,我们讨论了由于不同金属的电子亲和力不同而引起的电偶腐蚀,电解液组成的变化也可能造成腐蚀。如在缝隙腐蚀中,由于缝隙口的氧活度较高,其电化学电位高于缝隙底部的电化学电位。

缝隙腐蚀过程由金属表面成分的微小变化开始,这些

变化导致一些成分变成阳极,另一些部分变成阴极,于是发生全面腐蚀。阴极氧气还原反应消耗整条缝隙上的氧气,并最终导致缝隙底部的氧气耗尽,因此此位置的氧气传输阻力最大。

与缝隙口相比,缝隙底部的氧气活度相对较低,因此其中的电化学电位也较低,从而使此阶段的腐蚀过程加快。出现这种情况时,缝隙底部产生强烈的阳极极化,并发生阳极金属溶解,而缝隙口则成为阴极,发生氧还原阴极反应。

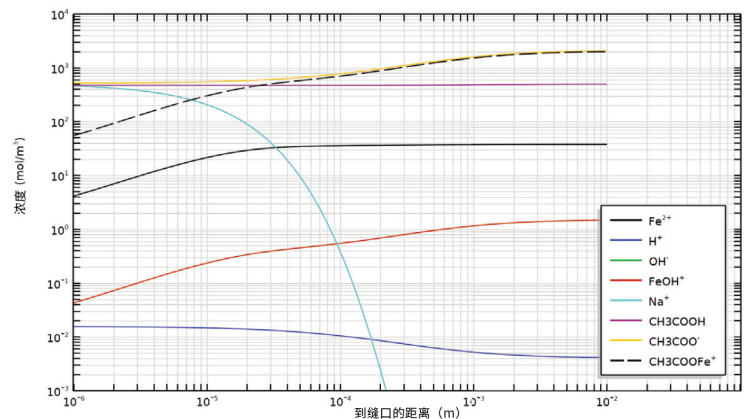


图 8 沿缝隙深度方向的离子和离子配合物的浓度分布。

图 8 为沿缝隙深度方向的离子和离子配合物的浓度分布图,其中铁在乙酸/乙酸钠溶液中发生腐蚀。模型方程的解验证了 Walton 的研究成果^[4]。由图 8 可知,与本体相比,缝隙中的钠离子浓度明显较低,而尖端附近的铁离子和铁配合物浓度较高。

点蚀

金属表面的液滴可能导致类似于缝隙腐蚀的浓差电池。均匀腐蚀会消耗覆盖在金属表面上液滴中的氧气,导致液滴中部的氧气被耗尽,而液滴边缘的氧气传输阻力较小。之后,液滴边缘变为阴极,液滴中间下方的表面变为阳极。

点蚀可能由此开始。液滴中间可能会形成一个小坑。当表面的液滴干燥时，湿度仍然存在。之后的腐蚀过程与缝隙腐蚀非常相似。由于坑口与氧气接触，会变为阴极，而坑底则会变为阳极，使金属溶解并加剧腐蚀过程。图 9 为点蚀反应发生过程示意图。

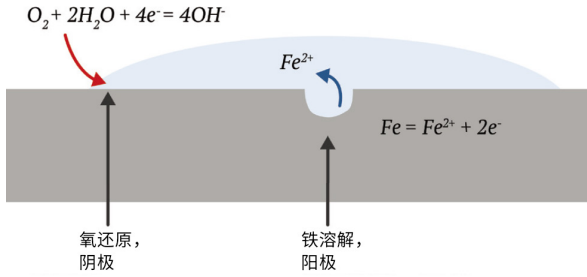


图 9 腐蚀开始于均匀的氧还原和铁溶解，最终在表面形成氧气梯度，并由此形成阴极表面和阳极表面；也就是说，反应不再均匀分布。

应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂与点蚀类似，但这种类型的腐蚀是由机械形成的裂纹引起的。这些裂纹常常会再钝化，即迅速形成保护氧化膜。如果不发生再钝化，则出现类似于点蚀的腐蚀过程，此时裂纹口变为阴极，裂纹尖端变为阳极。图 10 所示的模型将金属的腐蚀（假设电解液充分混合）与固体力学仿真进行耦合分析。

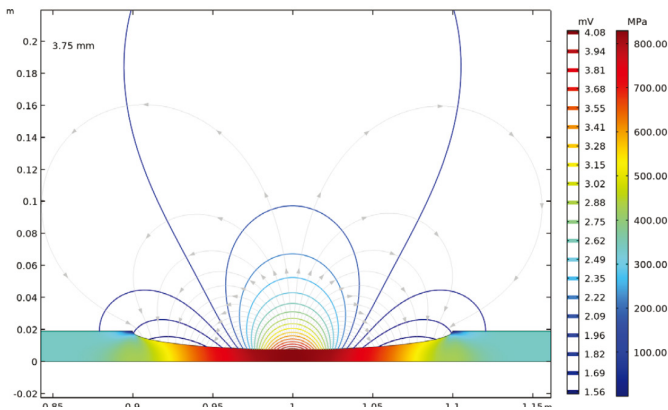


图 10 与电解液接触的金属板上的应力。板的较薄区域具有最大的应力，成为阳极。

金属板中部承受的应力最大，变为阳极，并随着应力的增加而开始腐蚀，其动力学表达式解释了导致应力腐蚀开裂的微裂纹的形成。

全面均匀腐蚀

金属表面由不同成分的晶粒和晶界组成。不同的晶粒和晶界可能具有不同的电子亲和力。当金属表面被电解液覆盖时，会形成微观原电池。这种腐蚀局限于微观尺度，但肉眼观察，类似于表面的均匀腐蚀。图 11 为采用动网格的腐蚀仿真结果。可以看出，在较贵金属晶粒周围的次贵金属晶粒的溶解过程。原始表面是完全平整的，与电解液接触 60 h 后，在腐蚀的作用下变得愈发粗糙。

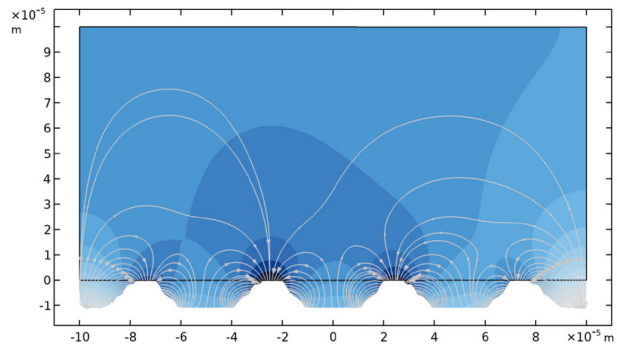


图 11 采用动网格的腐蚀仿真结果。最初平整的表面与电解液接触 60 h 后，开始变得略微粗糙。

图 12 为暴露于潮湿空气中的母线板装配表面上的电极电位。该结构常常被一薄层凝结的电解液覆盖，通过仿真可得到不同金属的腐蚀速率。

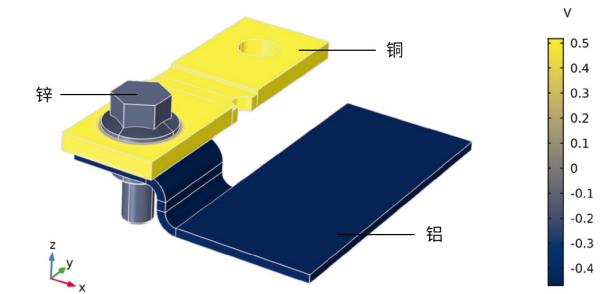


图 12 暴露于潮湿空气中的母线板装配表面上的电极电位。该结构常常被一薄层凝结的电解液覆盖。通过仿真得到了不同金属的腐蚀速率：铜（上部母线板）、锌（螺栓）和铝（下部母线板）。

大气腐蚀是均匀腐蚀的一个例子。在潮湿环境中，金属表面经常被液膜覆盖，是一个不可忽视的大问题。沿海地区的金属结构还会受到含氯离子雾的影响，导致腐蚀加速。一般而言，大气污染也可能加重大气腐蚀的程度。

腐蚀防护建模

阳极保护

通过高度受控的金属表面氧化形成的氧化膜可以保护金属,使其免受进一步腐蚀。作为阳极的金属表面通常会溶解,因此“阳极保护”这一表述似乎与之相矛盾。然而,在阳极保护情况下,氧化膜通过阳极电位达到稳定,仅获得极小的腐蚀电流密度。这种极小的电流密度有助于保护氧化膜的稳定。阳极保护并不是一种常见的方法,但它适用于极酸性环境,如含有磷酸的不锈钢罐和含有硫酸的钛罐。

通过阳极保护建模,可以研究待保护金属表面上的电位分布。阳极的电流密度可以在钝化电流(边界条件)下保持恒定。在钝化区,电位必须足够高,但变化却要足够小,以避免在高出钝化范围电位下出现再活化(图13)。模型方程与阴极保护的方程非常相似,钝化处理类似于阴极保护中的氧气还原反应。

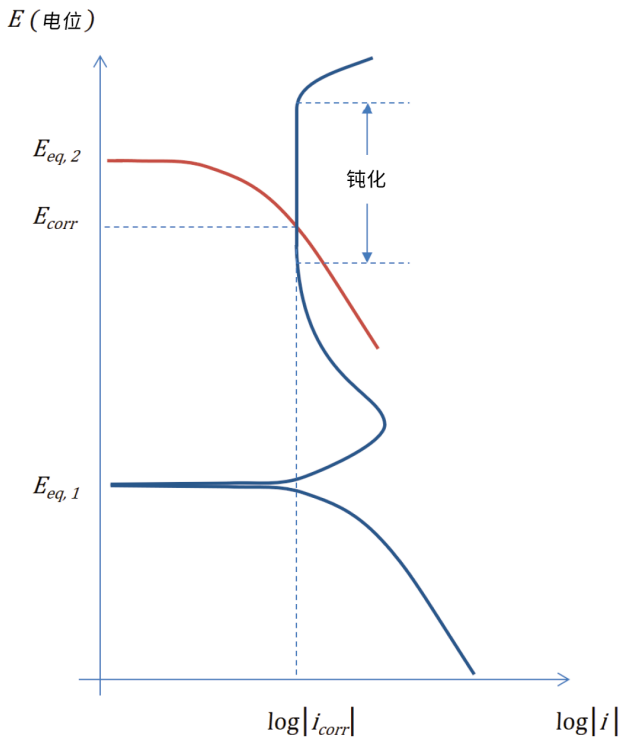


图13 在阳极保护中,电位必须保持在钝化范围内。

阴极保护

阴极极化是主动保护金属表面的一种最常用的方法。表面电位降到足够低时,氧气还原反应是阴极表面发生的唯一反应(或者至少是主要反应)。氧还原在受保护表面形成碱性环境,并可生成钙质层保护表面,从而进一步降低所需的保护电流。

根据电化学原理,阴极保护分为两种不同的过程:牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护(ICCP)。

牺牲阳极阴极保护的原理见图5。通过刻意形成原电池,使阳极反应以受控方式溶解铝等阳极材料。只要存在铝阳极,阴极极化就会在金属表面持续进行,并形成阴极保护。图14为大型货船的阳极周围海水中的流线。叶轮叶片的内部零件受到的保护略小于其他结构。

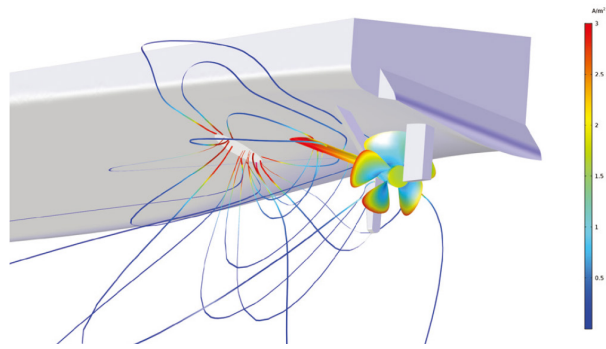


图14 大型货船的阳极周围海水中的流线。通过外加电流保护螺旋桨,叶轮叶片的内部受到的保护略小于其他结构。

牺牲阳极阴极保护建模的目的是定位牺牲阳极,使待保护的整个金属表面在氧还原反应的电位窗口范围内。边界条件是阴极表面的恒电流密度,由此产生的电位分布应在氧还原的电位窗口范围内。否则,必须重新定位牺牲阳极。电化学电位变化较大带来双重风险:表面可能过度阴极极化,导致产生不需要的析氢,析氢可能会使钢结构等发生氢脆;或者表面可能由于不受保护而加速腐蚀。

当物体浸入海水中时,复杂的反应机制会导致产生钙质沉积物。这些沉积物具有保护膜的作用,可以减少氧向

裸露金属表面的传输,从而降低阴极反应的电流需求。在建模时考虑到这一点,即可获得更准确的结构寿命模型。对于全尺寸水下结构而言,建立一个严格的完整反应机制模型过于复杂。但是,通过将测量值拟合到更简单的钙质沉积物沉淀模型中,即可快速得到真实的结果。图 15 为石油平台导管架结构安装两年后,其中的电位分布和牺牲阳极的电流输出仿真结果。图 16 为石油导管架结构安装两年后的沉积物(采用无量纲单位)仿真结果。

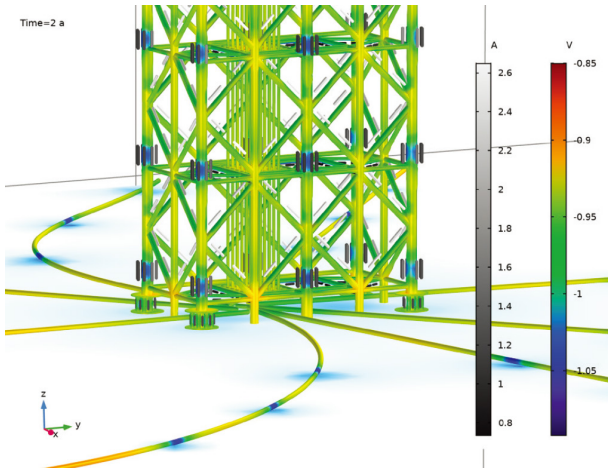


图 15 石油平台导管架结构安装两年后,其中的电位分布和牺牲阳极的电流输出。

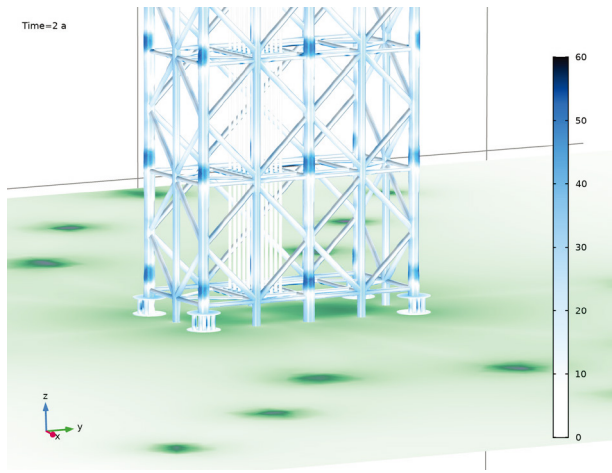


图 16 石油导管架结构安装两年后的沉积物(采用无量纲单位)仿真结果。由于通过沉积物层的氧扩散减少,致使通过表面的电流减少,因此沉积物会影响电流分布。

外加电流阴极保护与牺牲阳极的阴极保护类似。然而,使用尺寸稳定的阳极(DSA)替代溶解阳极,与不施加外加电流的情况相比,通过施加外部电流,阳极可以放置在离金属表面更远的位置。即阳极和阴极之间的电子连接是通过外部电缆获得的,这些外部电缆连接到电源用于输送所需的直流电。图 17 为采用 ICCP 方法进行腐蚀防护的部分结构位于海面以下的海上风电场仿真结果。

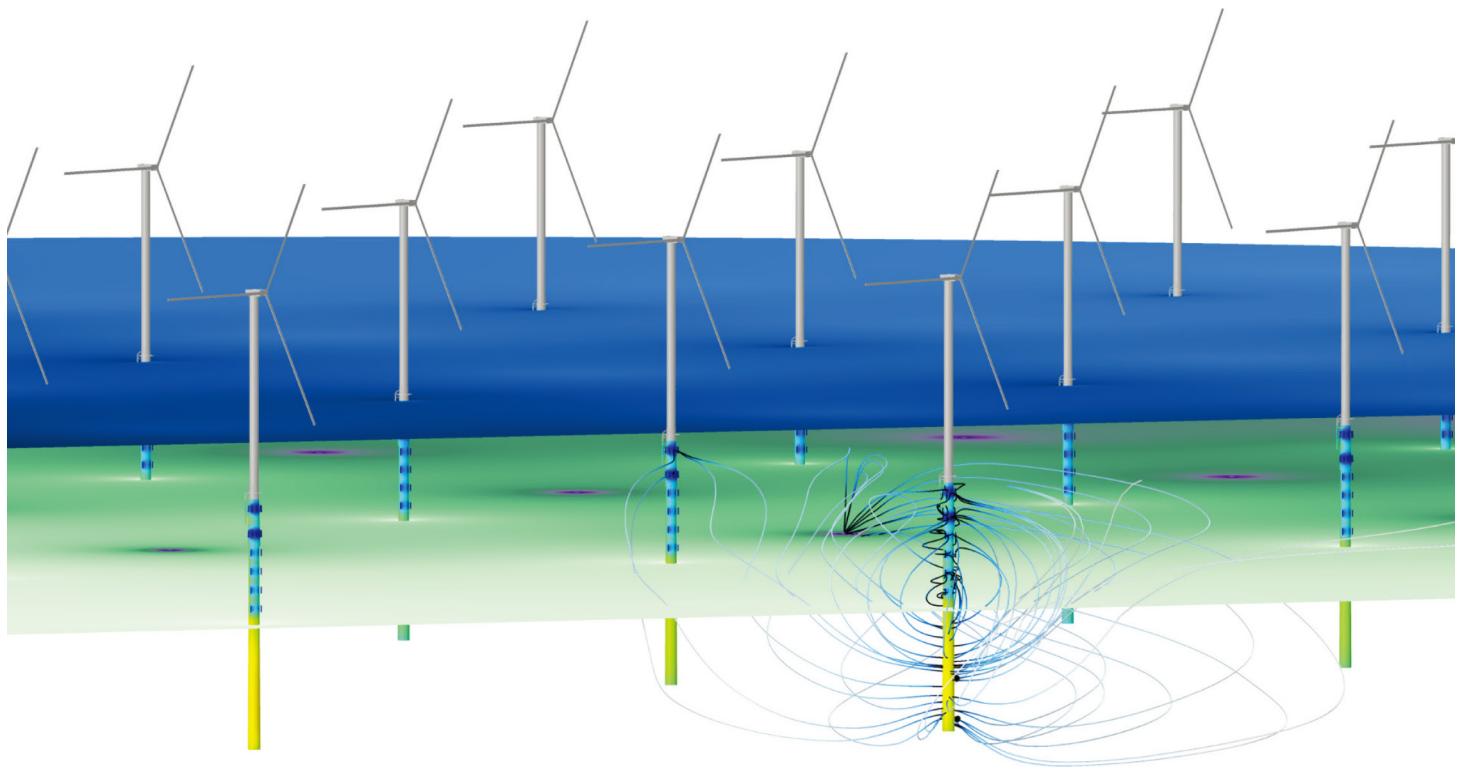


图 17 采用 ICCP 方法进行腐蚀防护的部分结构位于海面以下的海上风电场仿真结果。部分结构位于海面以下的海上风电场使用 ICCP 来防止腐蚀。仿真的目的是定位阳极以保护结构。

采用 ICCP 方法建模与无外部电流的系统的建模非常相似,其区别在于电位的边界条件不同。无外部电流的系统是短路的,这表明两种金属之间接触点的电位相同。在 ICCP 方法建模中,通过外部电源单元提供电位差。在这种情况下定位阳极时,必须使阴极电位在氧气还原的电位窗口范围内。但是,阳极定位的自由度更大。此外,功耗和过度保护等可能会加大影响。

不仅如此,ICCP 方法建模还引入了双极效应问题。如长期在受保护结构附近锚泊的船只可能成为双极电极,导致其自身腐蚀并对 ICCP 系统造成干扰。图 18 为锚泊在石油钻机附近的船只受到圆柱形阳极电流的影响仿真结果。

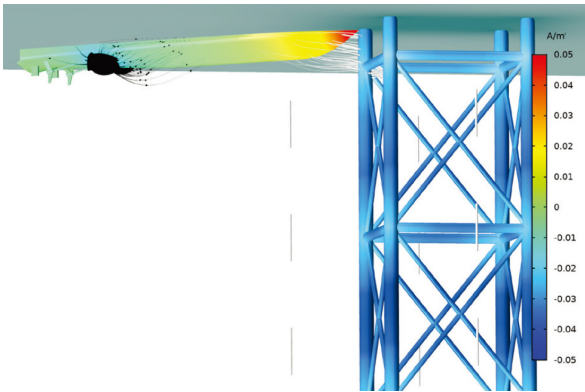


图 18 锚泊在石油钻机附近的船只受到圆柱形阳极电流影响的仿真结果。该阳极可以保护钻机结构免受腐蚀。船只作为双极电极,其中靠近石油钻机的船体部分可能发生阳极腐蚀。黑色流线表示 ICCP 阳极的输出,灰色流线表示电流流向导管架结构的方向。

此外,采用 ICCP 方法的操作自由度和灵活性具有一定的困难,原因是受保护系统附近的其他金属结构可能会消耗部分电流,从而引起杂散电流效应。

结语

综上所述,高保真一维、二维和三维模型的建模与仿真能够帮助理解腐蚀及其防护过程。不仅如此,在此基础上,还可以设计各种设备及其保护过程,以达到减轻腐蚀的目的。与单纯的经验设计或基于简化集总模型的设计相比,建模和仿真具有明显的优势,不但能够以较低的成本实现对产品的理解、设计和优化,还可以避免进行昂贵的重新设计和修复,降低成本风险。

参考文献

- [1] G. Jacobson, "Impact, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study", NACE International, 2016.
- [2] J.O. Bockris and A.K.N. Reddy, "Modern Electrochemistry", Plenum Press, 1970, 862-908.
- [3] G. Gibson and D. Scantlebury, "Criteria for Cathodic Protection", The Journal of Corrosion Science and Engineering, vol. 3, no. 17, 2001.
- [4] J.C. Walton, "Mathematical Modeling of Mass Transport and Chemical Reaction in Crevice and Pitting Corrosion," Corrosion Science, 1990, 30 (8/9), 915-928.



扫描识别二维码
关注 COMSOL 微信



COMSOL-China

联系我们

COMSOL 中国

网址: cn.comsol.com

电话: +86 21 5077 6566