

Application Research of Comsol Multiphysics on Corrosion Protection

Qiong Feng, Yaping Zhang*, Hao Yu, Lianqing Yu, Xianghong Yan

College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong
Email: *zhangyp@upc.edu.cn

Received: Apr. 28th, 2016; accepted: May 21st, 2016; published: May 24th, 2016

Copyright © 2016 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

Comsol Multiphysics is a multi-functional and practical simulation software which can provide services for science researchers and engineers from many kinds of fields. Many corrosion researchers apply Comsol Multiphysics into numerical calculations of physical and chemical changes on metal surface under the measures of corrosion protection, and then restore internal corrosion mechanism from microscopic scale, so as to evaluate the performances of protective measures from macroscopic scale. This paper introduces the current application of Comsol Multiphysics about the corrosion protection methods in recent years, summarizes the situation of usage in cathode protection, electroplating protection and other types of protection, expounds the key role it plays in corrosion protection research, and puts forward prospects to its future application in the study of corrosion.

Keywords

Comsol Multiphysics, Corrosion Protection, Application

Comsol Multiphysics软件在腐蚀防护中的应用研究

封琼, 张亚萍*, 余豪, 于濂清, 闫向宏

中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛

*通讯作者。

文章引用: 封琼, 张亚萍, 余豪, 于濂清, 闫向宏. Comsol Multiphysics 软件在腐蚀防护中的应用研究[J]. 化学工程与技术, 2016, 6(3): 33-42. <http://dx.doi.org/10.12677/hjct.2016.63005>

Email: *zhangyp@upc.edu.cn

收稿日期: 2016年4月28日; 录用日期: 2016年5月21日; 发布日期: 2016年5月24日

摘 要

Comsol Multiphysics是一款为许多领域科研工作者和工程师提供仿真服务的多功能实用模拟软件。许多腐蚀研究者使用**Comsol Multiphysics**软件对腐蚀防护措施下金属表面的物理、化学变化进行数值计算,从微观尺度上还原腐蚀内部机制,以便于从宏观尺度上对防护措施的性能进行评价。本文介绍了**Comsol Multiphysics**软件近些年在腐蚀防护方法中的应用研究现状,综述了其在阴极保护、电镀保护及其它类型保护中的使用情况,阐述了其在腐蚀防护研究中起到的关键性作用,并对其在未来腐蚀研究中的应用前景提出了展望。

关键词

Comsol Multiphysics, 腐蚀防护, 应用

1. 引言

Comsol Multiphysics 是瑞典 **Comsol** 公司为许多领域的科研工作者和工程师提供的一款多功能多物理场模拟软件。它凭借高效的数学计算能力和出众的多场双向直接耦合分析能力来实现高精确度的数值仿真。其内嵌的 CAD 建模工具可以使用户自由地在软件中建立需要的二维和三维模型,丰富的后处理功能可轻松导出计算结果,为任意多物理场的数值仿真提供帮助。其强大的网格划分能力支持各种网格的生成和移动,很大程度上提高了对于复杂边界的数值计算效率。**Comsol** 软件可以直接使用基本几何形状(如矩形、块、圆和球体)创立几何模型,然后通过布尔操作形成复杂的实体形状;也可以通过工作平面先创立二维的几何轮廓,然后使用拉伸等功能生成三维实体;也可以通过 CAD 软件先创建几何模型,然后导入到 **Comsol** 软件中去。

Comsol Multiphysics 是以有限元分析法为基础,利用求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)的方法来仿真实际物理现象的分析工具,即采用数学方法来求解物理现象,享有“第一款真正的任意多物理场直接耦合分析软件”的美誉。目前 **Comsol Multiphysics** 软件已经在电磁学、声学、光学、热传导、微波工程、光子学、流体动力学、量子力学、生物科学、化学反应、弥散、燃料电池、地球科学、微系统、多孔介质等领域得到了十分广泛的应用[1]-[3]。**Comsol Multiphysics** 以其完善的理论基础、整合的算法、功能性、实用性和灵活性等特点,在解决实际问题 and 理论计算中发挥了显著的优势,在全球领先的数值仿真领域里获得了高度的评价。

近些年,腐蚀学家开始利用 **Comsol Multiphysics** 软件模拟金属腐蚀防护措施下的微观现象,为腐蚀防护机理分析提供良好的依据,同时也提高了腐蚀防护研究的工作效率。目前,许多的腐蚀研究者使用 **Comsol Multiphysics** 软件对金属的腐蚀防护机理进行理论评价、模拟和计算,使其成为研究金属腐蚀防护的重要手段。通过得到的计算结果,可还原出金属表面腐蚀的微观过程,为腐蚀防护措施的性能评价提供了充足的条件。本文将重点评述 **Comsol Multiphysics** 软件在腐蚀防护中的应用。

2. Comsol Multiphysics 软件在阴极保护中的应用

近年来阴极保护(CP)技术发展迅速[4]-[8],已成为金属腐蚀防护中应用最为广泛的电化学方法之一。

阴极保护技术就是通过向被保护的钢质管道通以足够的保护电流,使管道表面发生阴极极化,进而达到阻止管道腐蚀的目的。根据提供电流方式的不同,阴极保护可分为牺牲阳极阴极保护和外加(强制)电流阴极保护。

赵金艳[9]利用 Comsol Multiphysic 软件对外加辅助阳极前后放电空间内的等离子体性能进行模拟,结果表明,辅助阳极的存在的确能够影响放电空间内的电场,从而使等离子体分布产生差异;等离子体的分布不仅与放电空间内的磁场分布有关,还与其电场分布有关。对辅助阳极的性能进行分析,研究发现辅助阳极能够提高放电空间内的等离子体离化率,且辅助阳极部分参量如:相对于溅射靶的位置、辅助阳极相对于溅射靶的中心的位置、辅助阳极电压和辅助阳极尺寸对其性能的影响并不是线性关系,而是存在着一个中间的最优值。

张明[10]根据腐蚀动力学原理,利用 Comsol Multiphysic 软件对电厂海水冷却系统泵体进行数值仿真计算,以拉普拉斯方程作为电化学腐蚀控制方程,以阴阳极表面的电位和电流状态作为电极电位边界条件。通过设置辅助阳极距离、阳极长度、阳极数量以及阳极横向距离为参数扫描项来探讨其对阴极保护电位分布的影响。结果表明,欲达到合理阴极保护作用,阳极位置、阳极长度、阳极横向距离应处于一定范围内,过小易导致过保护,过大则易导致欠保护。而阳极数量增加很大程度上可以提高电位分布,但是会造成施工压力增大。采用经典偏微分方程模块下的 Laplace equation 进行优化计算,最终确定最佳保护参数。

R. Montoya [11]等通过设置电解质不规则域和合适的边界条件,采用有限元法近似模拟阴极保护系统中的电位分布。数值计算结果表明,电解质不规则域的大小影响电化势的分布,且不规则域越大阴极保护效果就会越差。低电导率的电解质不规则域越靠近阴极,保护效果也会随之降低。仿真结果进一步表明,对于合理的阴极保护,电势往往在应用标准以外的一个窄频带产生差异;在理想加固钢筋混凝土结构(RCS)中孔隙度对于阴极保护效果也有一定的影响。一般情况下,阴极保护系统的设计需要考虑电导率小于 0.777S/m 的电解质不规则域,模拟得到的理论结果与实验结果吻合较好。

李格妮[12]采用牺牲阳极阴极保护法对换能器的腐蚀进行防护,将分程隔板作为阳极,通过 Comsol Multiphysics 软件模拟计算管板表面电位分布。结果表明,在靠近隔板牺牲阳极处电位较低,随着与阳极距离的增大,电位值也随之增大。在靠近阳极处由于电位过负会发生过保护,而在距离阳极较远处管板表面的电位不在保护范围内会发生欠保护。

王东[13]以牙哈装车南站储罐底板阴极保护系统为研究对象,建立储罐底板阴极保护的电位分布数学模型,基于 Comsol Multiphysics 软件,模拟计算不同参数条件下储罐底板的电位分布。结果表明,随着深井阳极埋地深度以及距储罐的距离增加,储罐底板电位正向偏移,且阳极距储罐底板的距离对电位变化产生的影响更为明显;随着深井阳极的长度增加,储罐底板电位正向偏移,且电位分布均匀性变化不明显;随着深井阳极输出电流以及阳极井数量的增加,储罐底板电位均负向偏移。

李成杰[14]依据腐蚀动力学理论,利用 Comsol Multiphysics 软件对 AISI1020 钢在不同温度下的极化曲线进行研究,从而获得其自腐蚀电位及极化特征。结果表明,自腐蚀电位随着温度的降低而正移;极化曲线的阳极部分随着温度的降低而降低,说明低温下的腐蚀电流密度较低。通过建立海管阴极保护物理模型,对海管穿越深海温跃层环境下的阴极保护系统进行优化设计,研究不同牺牲阳极位置和数量对海管阴极保护电位分布的影响规律,计算结果表明,距离阳极越近,则海管受到阳极的极化越强烈,电流密度越大,钙质沉积层的形成越迅速,相应的阴极表面电阻率就越大。安放单个阳极时,阳极位于跃层区(76.1 cm)的阴极保护效果最好,并且在阴极保护初期的 60 h 内,海管上保护电位最正处达到了 -0.8 V ;安放两个阳极时,阳极分别位于跃层区和深层区时的阴极保护效果最好;安放三个阳极时,保护 60 h 后海管的保护电位已经负于两个阳极保护 120 h 后的保护电位值。图 1 和图 2 分别为阴极保护 60 h、120 h 时不同

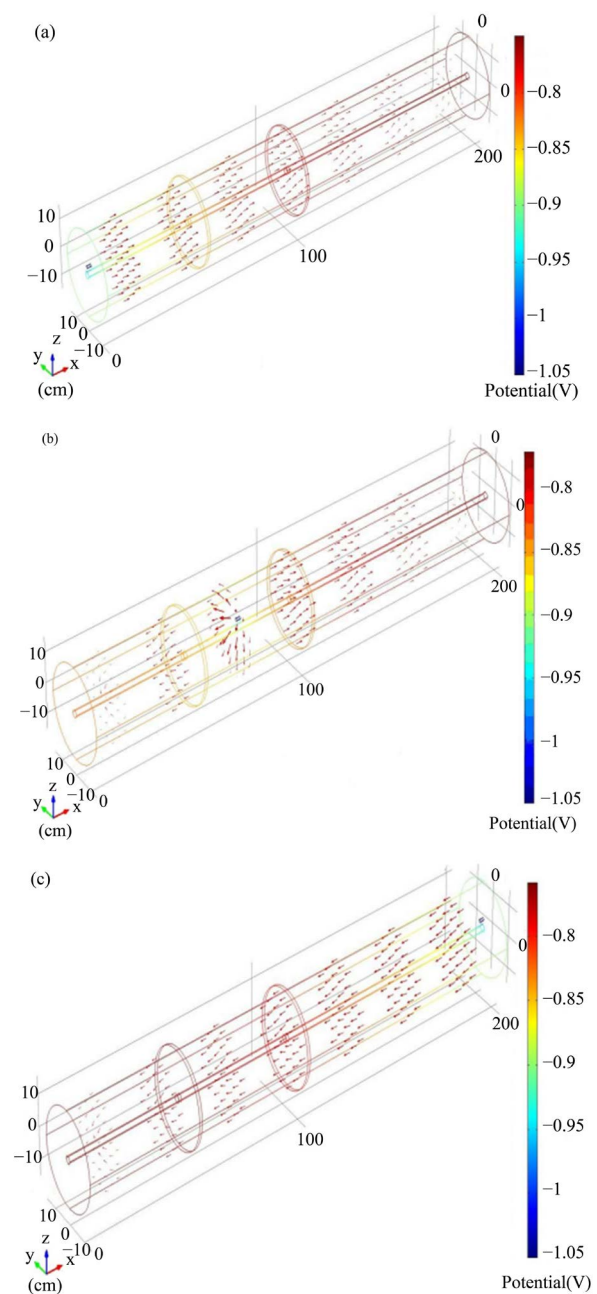


Figure 1. Numerical results of 60 h by galvanic anode CP for the anode position at: (a) SZ (0 cm), (b) TZ (76.1 cm), (c) DZ (203 cm)
图 1. 阴极保护 60 h 后的电位分布数值计算结果; (a) 阳极表层区(0 cm), (b) 阳极跃层区(76.1 cm), (c) 阳极深层区(203 cm)

温跃层位置的电位分布数值计算结果。

邱枫等[15]基于 Comsol Multiphysics 对贮罐底板外侧阴极保护体系中的电位分布进行仿真计算，评价了土壤电阻率、涂层、阳极极化量和阳极数量及分布等因素对电位分布的影响。通过计算结果得到，土壤电阻率低，极化值随距离变化的衰减较小，即保护电位分布较均匀，但所需的保护电流密度大。绝缘性能越高的涂层极化值衰减越小，电位分布越均匀，且所需的保护电流密度小。提高底板靠近阳极处

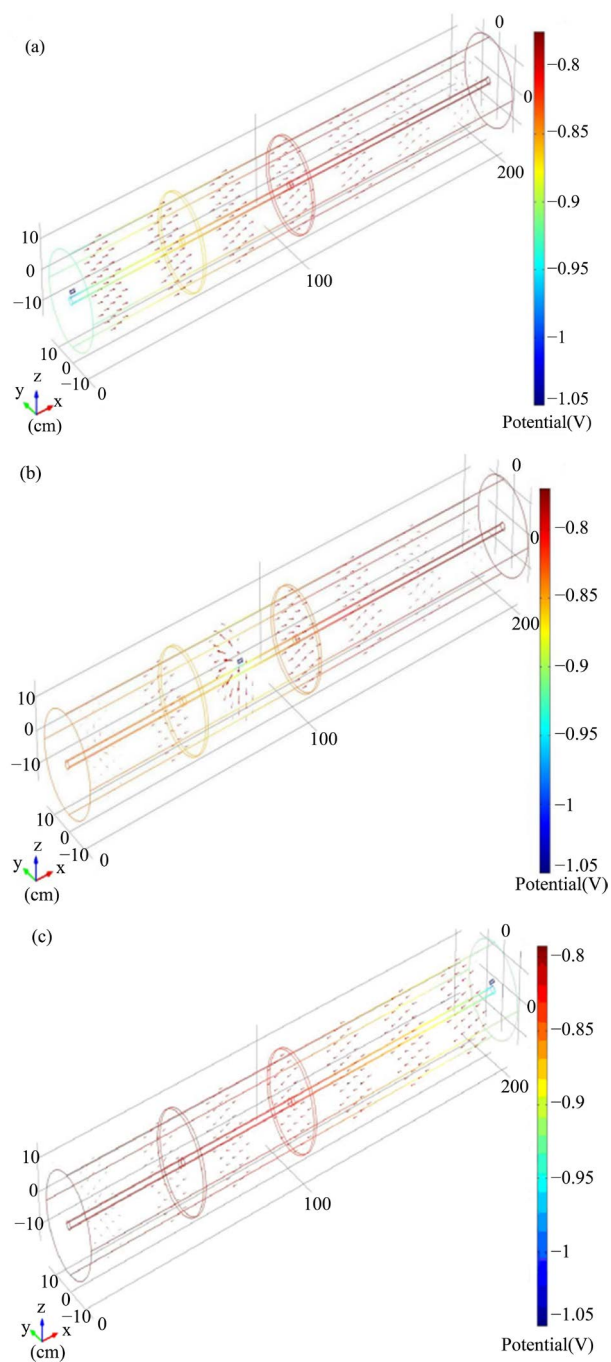


Figure 2. Numerical results of 120 h by galvanic anode CP for the anode position at; (a) SZ (0 cm), (b) TZ (76.1 cm), (c) DZ (203 cm)

图 2. 阴极保护 120 h 后的电位分布数值计算结果; (a) 阳极表层区(0 cm), (b) 阳极跃层区(76.1 cm), (c) 阳极深层区(203 cm)

的极化值，反而加大整个底板上极化值和电流密度分布的不均匀性，有可能造成靠近阳极的部位过保护以及总保护电流大大上升。增加阳极的数量可以改善电位分布的均匀性，但同时会造成工程量加大。评价结果表明，土壤电阻率和涂层的质量对电位分布的影响比较大。

方卫林等[16]利用 Comsol Multiphysics 建立三维几何模型对阴极保护电位分布及阳极干扰进行模拟计算,分析结果发现:不存在阳极干扰时,站场附近线路受到良好的阴极保护;存在阳极干扰时,站场附近线路由于受到阳极干扰而发生电位负移,但未发生过保护的情况。区域阴极保护系统对站外系统的阳极干扰未引起站外管线的极化电位过负的现象。

由此可见,近些年 Comsol Multiphysics 软件在阴极保护措施中发挥了可观的应用价值,通过以电解质电位的拉普拉斯方程作为腐蚀控制方程,以阴阳极表面的电位、电流状态作为电极边界条件,探究了阳极、电解质相关参量变化对阴极保护性能产生的影响,从而对阴极保护的分析、评价提供了一定的理论指导。

3. Comsol Multiphysics 软件在电镀保护中的应用

电镀就是利用电解原理把基片放入电解液中,使其表面生成金属膜或合金的过程,从而起到防止金属氧化的目的。电镀时,镀层金属或其他不溶性材料做阳极,待镀的工件做阴极,镀层金属的阳离子在待镀工件表面被还原形成镀层。电镀技术对于活性金属腐蚀防护具有十分重要的应用。

S. K. Bagaria¹ 和 C. Periasamy [17]以 Ni 和 Ni-Fe 合金为研究对象,利用 Comsol Multiphysics 软件进行模拟计算,仿真结果验证了电铸 Ni 的磁性是电镀电流密度的一个重要的功能参数,随着电镀电流密度的增大,合金的相对磁导率单调递增;根据得到的 B-H 曲线可以看出,电镀电流密度与饱和磁场强度成正比,与矫顽力成反比。实验仿真数据还表明电流密度能提高 Ni 的柔软性能。

Nadezhda Strusevich 等[18]提出利用超声传感器在电镀槽中产生声流来提高电镀性能,通过在 Comsol Multiphysics 软件中设置声速大小,经过数值计算得到流速大小,进而模拟出声场在电镀槽中的传播情况。模拟结果得到声流可以加快槽口附近铜离子的传输速率,从而通过扩散的形式来填充微型槽,对电镀性能产生了一定的积极效应。

Wolfgang E.G.Hansal 等[19]利用脉冲反向电镀技术对金属 Ni 的电镀性能进行深入探讨,考虑静态机械平面应力模式,借助 Comsol Multiphysics 软件可视化电势和电流场线的分布情况,从而设置相关参数并数值计算出脉冲电镀过程中镀镍的纵横比可达到 1:6.4,同时还得到其他的参数值包括共振频率、热膨胀系数、应力梯度等。模拟结果表明,脉冲电镀过程可提高镀镍的纵横比以及电镀的工作效率,但是镀镍的纵横比又受光刻过程所限制,因此实验中要注意光刻过程的控制。

Linxian Ji 等[20]通过使用旋转电极来深入研究铜的电镀过程,利用 Comsol Multiphysics 软件建立二维动态模型来描述流体动力学在工作电极表面对铜离子浓度和电流分布产生的影响。模拟结果得到阴极附近离子浓度梯度和不同旋转速度下扩散层厚度的变化,与理论结果吻合较好;控制旋转速度能减小小液体流动对电流分布带来的影响。数值模拟方法的引用对准确分析预测铜的电镀过程提供了较大的支持。

王颖[21]通过建立流场的数学模型以及二次电镀的数学模型,根据电喷镀加工工艺参数设置边界条件,利用 Comsol Multiphysics 软件对电喷镀加工过程进行模拟,对三种阳极喷嘴分别为底端对称方角形(A型)、底端圆弧形(B型)、底端方角不对称形(C型)建立二维模型,对流场、电场以及沉积层的生长过程进行模拟,得到不同结构加工区域流场、电场分布及不同时刻沉积层生长的轮廓曲线。结果表明:B型喷嘴加工区域流场、电场分布的均匀性以及沉积层轮廓光滑度均优于A型和C型。

魏红军[22]基于 Comsol Multiphysics 平台,建立了考虑加速剂和抑制剂作用的硅通孔电镀铜仿真模型,以深宽比为 1:8(孔径 20 μm , 孔深 160 μm)的硅通孔为研究对象,结合电镀实验,得到了基于硫酸铜工艺的加速剂和抑制剂的量浓度最优配比为 1:6,验证了该配方的准确性。

王尧[23]对三种不同的镀锡层挂金表面受力情况、合金内应力以及挂金表面金相组织变化进行了定性分析,建立了不同的钢套镀锡层挂金表面接触面形式下的界面结合强度理论计算模型,利用 Comsol

Multiphysics 对其结合界面进行有限元应力场仿真模拟, 分析不同生产工艺条件下界面应力分布情况, 通过试验测试、采集数据、对比分析修正以及对所构建的模型进行总结和评价。研究发现: 界面应力理论与试验值之间的相对误差均小于 10%。不同的挂金表面, 表面粗糙度一定的条件下, 接触面的增大导致界面应力值增大, 有效提高了界面致密性和结合性能。

苗斌[24]以电沉积镍铸层为研究对象, 运用 Comsol Multiphysics 建立了电沉积物理场数学模型, 将磁场、流体流场、电场耦合并进行数值仿真计算, 得到电沉积过程中流体流场分布、镀液中电场分布以及不同时间段铸层厚度变化特征。结果表明: 磁场在两极头之间区域较强, 在磁场作用下镀液粒子间的相互作用力增加, 使得镀液粘度随之增加; 与无磁场作用相比, 施加磁场作用后镀液中会出现对流, 因此电流密度相应提高, 铸层厚度也较无磁场环境下增加, 且厚度分布也更趋于均匀; 施加磁场后铸层晶粒的形核速度和生长速度增大, 镍晶晶粒得到细化, 铸层表面质量提高, 并且随着磁场磁感应强度的提高晶粒会进一步细化, 实验结果与数值仿真结果相一致。图 3 为无磁场和 0.2 T 磁场作用下镀液中电场分布的数值模拟情况。

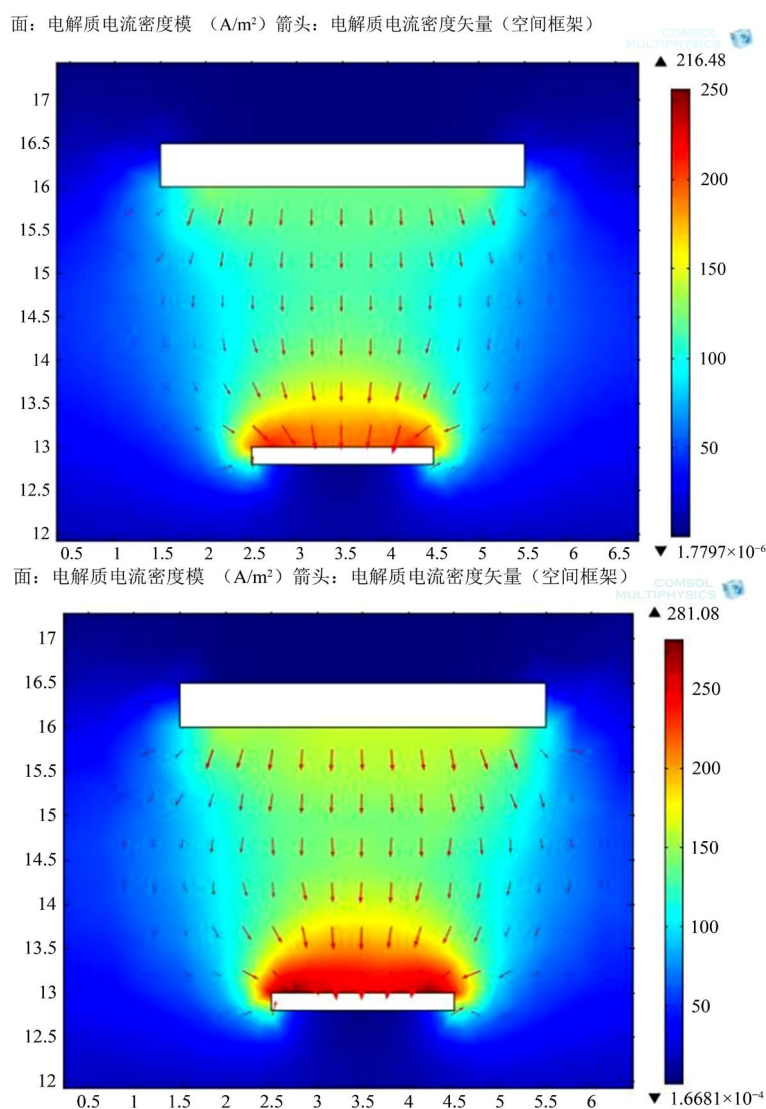


Figure 3. Electric field distribution characteristics of the plating solution

图 3. 镀液中电场分布特征

张锦秋等[25]用 Comsol Multiphysics 软件在三维模式下建立电镀体系的几何模型, 研究无氰电镀银表面阴极电流密度分布的影响因素。通过选择阵列电极电势和阳极材料, 借助低频电磁场中的电流模块进行建模。模拟结果显示: 随着阵列电极直径的增大, 阴极电流密度变小。正多边形排布的阵列电极的电流密度分布最为均匀。以其他形式排布时, 越靠近几何中心的电极的电流密度越大。在几何形状相同的排布情况下, 排布越紧密, 电极的电流密度越大。

综上所述, 利用 Comsol Multiphysics 软件可视化电势、电流场线的优点, 建立流场、电场分布模型, 从而综合分析了影响电镀性能的指标包括: 镀件磁性、镀件纵横比、镀液离子传输率、离子浓度等, 对于提升电镀保护性能具有一定的借鉴意义。

4. Comsol Multiphysics 软件在其他类型保护中的应用

Comsol Multiphysics 软件对其他腐蚀防护方法也有着极其广泛的应用, 包括除去环境中的腐蚀物质、化学镀、防腐层、施加电磁应力、无机涂料等。通过基于有限元法对各种腐蚀防护模型进行预测、分析、计算, 从而得到所建模型的解并且还还原到实际问题当中, 十分方便有效。

刘艳芝[26]采用电化学方法去除混凝土中氯化物来减轻埋地钢筋的腐蚀, 使用 Comsol Multiphysics 软件进行了二维和三维的有限元模拟, 分析了电化学技术参数以及相关混凝土技术参数对电化学脱盐过程和混凝土孔隙溶液中离子运动的影响。模拟结果表明, 随着水灰比、钢筋表面积与混凝土截面积之比、阳极边数的增加, 混凝土内 Cl^- 的迁移量增加, 脱盐效率也随之增加。混凝土孔隙溶液中的 Cl^- 离阳极越远, 阳极对其影响也就越小。然后通过数值方法得出各影响因素与脱盐效率的拟合方程。最后考虑各因素间的耦合效应和时间因素的影响, 回归出脱盐效率总方程。

薛生杰[27]采用化学镀铜技术金属化 AlN 陶瓷基板表面, 利用有限元仿真模拟软件 Comsol Multiphysics 模拟封装后的温度分布, 并与常用的 Al 基板进行对比研究; 同时用数值仿真模拟的手段分别研究了 ITO、石墨烯及 ITO+石墨烯作为透明导电层和 p-Pad 电极掩埋深度对 GaN 芯片热电特性的影响。模拟结果表明: 两种基板的软件仿真结果与实验结果的误差均在 1% 以内, 两种模型的准确度均较高, 而 AlN 陶瓷镀铜基板的综合电热性能要优于常用的六角铝基板; 100 nm-ITO 和 20 nm-ITO + 3-layer Gr 做透明导电层时, GaN-LED 芯片的最高模拟温度相比于 240 nm-ITO 相差较小, 且电流密度分布也较均匀; p-Pad 电极掩埋深度为 0.51 μm 时, GaN-LED 的热电性能最好。

赵丹铮[28]以单层钢板、覆有完好有机玻璃板的钢板、覆有破损有机玻璃板的钢板为研究对象, 运用有限元仿真软件 Comsol Multiphysics 研究添加防腐层后钢板中超声波传播特性的改变。仿真与实验结果表明, 防腐层的覆盖对超声波在钢板中的传播有一定的影响。当超声波在双层介质中传播时遇到介质间的交界面会发生折射、反射、波型转换等现象, 会消耗更多的声能, 使超声波的波速减小、幅值变小、能量变小。当防腐层存在破损, 即防腐层覆盖面积减小时, 超声波的波速比覆有完好防腐层的钢板中的超声波波速大、幅值大, 但比单层钢板中的超声波传播速度小、幅值小。

Philippe Dauphin-Ducharme 等[29]基于 Comsol Multiphysics 软件, 应用一维扩散近似理论进行数值模拟来探究镁合金腐蚀中中间产物二茂铁甲醇(FcMeOH)的再生率对腐蚀的影响, 并且提出采用碳微电极(C-ME)进行探测从而避免因还原产物氢气与电极作用带来的困扰。模拟结果表明, $\text{FcMeOH}/\text{FcMeOH}^+$ 的标准电位比大多数镁合金阴极腐蚀电位高, 1.5 V 左右的过电位将导致 FcMeOH 的减少, 从而阻碍扩散的进行。 FcMeOH 的再生率并不依赖于金属本身的活动性或相关的极化反应, 而与腐蚀产物膜的厚度、孔隙率等参数有关。

Ji Li 和 Gary J. Cheng [30]应用强脉冲电磁效应在金属表面施加抗压应力来缓解金属表面腐蚀疲劳, 利用多物理场数值计算的方法模拟腐蚀孔周围金属内表面受到的压缩残余应力的情况。模拟结果验证了

电磁锤击的可行性,同时得到残余应力的分布与不同腐蚀孔的深度和工件厚度存在一定的关系:随着孔深度的增加,压缩残余应力随之变大,但孔内各处应力分布呈现出均匀现象;工件厚度与应力并不满足线性关系,而是存在一个最优值,实验测得工件厚度为 5 mm 时应力达到最小值。充电电压、线圈节距以及线圈与工件间的距离等过程参量对残余应力也会产生一定的影响。

Katakam 等[31]通过使用连续波二极管抽运镜激光器在 AISI 4130 钢基片上合成出一种铁基非晶涂料($\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{Y}_2\text{C}_{15}\text{B}$),并应用 Comsol Multiphysics 软件的三维热模型来近似预测激光加工过程中特定位置和深度下涂料的温度变化和冷却速度。研究结果表明,随着深度的增加,冷却速度和温度都呈现出下降趋势。热模型中预测的冷却速度要比维持非晶相所需的临界冷却速度高得多,且复合涂料出现结晶相和非晶相两种状态,非晶相的形成主要归因于 Y_2O_3 的作用。

目前科研工作者基于 Comsol Multiphysics 软件对腐蚀保护方法投入了大量的人力、物力,从不同角度、不同层面展开了广泛调研。诸如除去环境中的腐蚀物质、化学镀、防腐层、施加电磁应力、无机涂料等保护措施具有先进、可行的特点,在实际工程中得到了广泛的应用,也为新型腐蚀防护措施的研究指引了方向。

5. 结论与展望

Comsol Multiphysics 软件在腐蚀防护领域中的应用前景十分可观,其内部丰富的接口服务可以帮助研究者模拟腐蚀防护过程中发生在表面及其附近的电极、电解质、腐蚀产物等的微观变化,为腐蚀内部机理分析提供较大的支持,也为复杂工况下腐蚀防护现象的监测开辟了新的道路。相信不久的将来,使用 Comsol Multiphysics 软件对腐蚀防护进行预测、分析、计算将成为必然趋势,同时也会大大提高研究效率、节约资金成本和腐蚀工作者的研究时间。

参考文献 (References)

- [1] 詹建国. 油气管线腐蚀状态测试系统研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2012.
- [2] 王玥, 刘丽炜, 胡思怡, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 对 Cu_2S 量子点的表面等离激元共振模拟研究[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 197803-1-197803-6.
- [3] 冯硕, 刘得军, 张颖颖, 等. 基于 COMSOL 的井地电阻率正演研究[J]. 断块油气田, 2013, 20(5): 589-592.
- [4] 刘玲莉, 陈洪源, 刘明辉, 等. 输油气站场区域性阴极保护技术[J]. 油气储运, 2005, 24(7): 28-32.
- [5] 杜艳霞, 张国忠. 输油泵站区域性阴极保护实施中的问题[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(8): 417-421.
- [6] 陈航. 长输油气管道工艺站场的区域性阴极保护[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(8): 485-487.
- [7] 葛艾天, 涂明跃. 区域阴极保护在陕京管道站场的应用[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(5): 343-345.
- [8] 陈洪源, 范志刚, 刘玲莉, 等. 区域性阴极保护技术在输气站场中的应用[J]. 油气储运, 2005, 24(5): 41-44.
- [9] 赵金艳. 等离子体增强溅射技术中辅助阳极性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [10] 张明. 电厂海水冷却系统泵体阴极保护数值仿真和优化设计[D]. [硕士研究生论文]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
- [11] Montoya, R., Nagel, V., Galv, J.C.N, et al. (2013) Influence of Irregularities in the Electrolyte on the Cathodic Protection of Steel: A Numerical and Experimental Study. *Materials and Corrosion*, **64**, 1055-1065.
- [12] 李格妮. 换能器管子与管板焊缝的腐蚀与防护技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- [13] 王东. 牙哈装车南站储罐底板阴极保护电位分布研究[D]: [硕士学位论文]. 南充: 西南石油大学, 2015.
- [14] 李成杰. 深海阴极保护过程研究及其在温跃层环境下数学模型的建立[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [15] 邱枫, 徐乃欣. 钢质储罐底板外侧阴极保护时的电位分布[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996, 16(1): 29-36.
- [16] 方卫林, 李振军, 洪娜, 吴思宪, 刘志达. 典型站场区域阴极保护系统对线路阴极保护系统干扰的检测及处理[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(3): 272-275.

- [17] Bagaria, S.K. and Periasamy, C. (2015) Magnetic Properties of Electroformed Ni and Ni-Fe for Micromagnetic MEMS Applications. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **28**, 3357-3363. <http://dx.doi.org/10.1007/s10948-015-3168-5>
- [18] Strusevich, N., Desmulliez, M.P.Y., Abraham, E., *et al.* (2013) Electroplating for High Aspect Ratio Vias in PCB Manufacturing: Enhancement Capabilities of Acoustic Streaming. *Advances in Manufacturing*, **1**, 211-217. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-013-0039-9>
- [19] Hansal, W.E.G., Steiner, H., Mann, R., Halmdienst, M., Schalko, J., Keplinger, F. and Svasek, P. (2014) Microgalvanic Nickel Pulse Plating Process for the Fabrication of Thermal Microactuators. *Microsystem Technologies*, **20**, 681-689. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-013-2007-5>
- [20] Ji, L.X., Wang, C., Wang, S.X., *et al.* (2015) Multiphysics Coupling Simulation of RDE for PCB Manufacturing. *Circuit World*, **41**, 20-28. <http://dx.doi.org/10.1108/CW-09-2014-0037>
- [21] 王颖, 康敏. 基于 COMSOL 的电喷镀阳极喷嘴设计研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(9): 1180-1184.
- [22] 魏红军, 师开鹏. 基于多种添加剂的 TSV 镀铜工艺研究[J]. 电子工艺技术, 2014, 35(4): 239-241.
- [23] 王尧. 油膜轴承巴氏合金与钢体的结合强度理论与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [24] 苗斌. 超声波和磁场复合作用下微电铸工艺试验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连大学, 2013.
- [25] 张锦秋, 王海博, 王晓伟, 等. 有限元模拟电镀银体系阴极电流密度分布[C]. 第十二届全国表面工程·电镀与精饰年会暨 2014(重庆)国际表面工程论坛论文集.
- [26] 刘艳芝. 电化学方法去除混凝土中氯化物的有限元模拟[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [27] 薛生杰. 大功率 LED 散热用陶瓷金属基板的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 大学重庆大学, 2014.
- [28] 赵丹铮. 基于超声波的管道防腐层缺陷检测方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [29] Dauphin-Ducharme, P., Kuss, C., Rossouw, D., *et al.* (2015) Corrosion Product Formation Monitored Using the Feedback Mode of Scanning Electrochemical Microscopy with Carbon Microelectrodes. *Journal of the Electrochemical Society*, **162**, C677-C683. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0701512jes>
- [30] Li, J. and Cheng, G.J. (2009) Multiphysics Simulation on Electromagnetic Peening of Predrilled Holes. *International Journal of Mechanical Sciences*, **51**, 825-836. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.09.016>
- [31] Katakam, S., Hwang, J.Y., Paital, S., Banerjee, R., Vora, H. and Dahotre, N.B. (2012) *In Situ* Laser Synthesis of Fe-Based Amorphous Matrix Composite Coating on Structural Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **43**, 4957-4966. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-012-1312-4>