

帮助汽车零件抵御 腐蚀破坏

对混合材料汽车零件和接头的仿真，使我们能够为汽车应用作出创新的腐蚀防护设计。

作者：LEXI CARVER

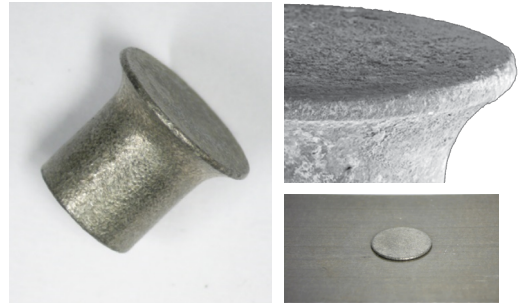


图 1. 左：干净的铆钉。右上：由于腐蚀出现氢氧化镁沉积（白色生长）的铆钉。右下：测试板上的铆钉放大图。

拥堵在车流中时，您可能无意中扫视过桥上的支撑梁；候机时，您也可能打量过飞机的舱门；您也许还检查过汽车的引擎盖，在这些地方，您都会看到那些小小的、圆圆的铆钉头，正是它们把不同的表面连接在了一起。不论是具有金属外壳的车辆，还是交通行业中的各类支撑结构，铆钉都只是其中一个很不起眼的小零件，但它们担负着将承受巨大机械应力的组件连接在一起的重任。一些汽车中会包含 2,000 个以上的铆钉。

由于汽车设计正朝轻量化的方向发展，以及各种金属材料的使用，人们开始关注另一个可能带来严重破坏，但往

往只在事后才能发现的无形凶手，那就是腐蚀。

→ 金属和金属之间的冲突：电偶腐蚀

电偶腐蚀是一个无处不在的过程，每年都会给汽车行业造成数十亿美元的损失。这类腐蚀由不同金属相互接触时带来的化学反应造成，现实生活中就是我们常常会在金属零件表面看到的白色粉末状生长物（见图 1 的右上图）。通常油漆起泡和铝材质量下降是一些显著的信号，我们可以据此判断金属离子正发生交换，金属表面正在发生降解。

不同金属组合对环境影响的反应不同，其他一些因素，例如连接技术、材料属性和表面粗糙度，也会影响在铆钉及依靠它们连接在一起的薄板上所发生的化学反应。因此，我们必须理解这背后的电化学，才能开发出有力的腐蚀防护措施。

为了能够更快地测试，并开发出更好的腐蚀防护措施，德国亥姆霍兹联合会 (HZG) 和戴姆勒集团 (Daimler AG) 的工程师们正在合作使用多物理场仿真来研究腐蚀防护方法。HZG 是一家专注于材料、医学技术和海岸研究的德国机构；戴姆勒集团则是知名汽车品牌梅

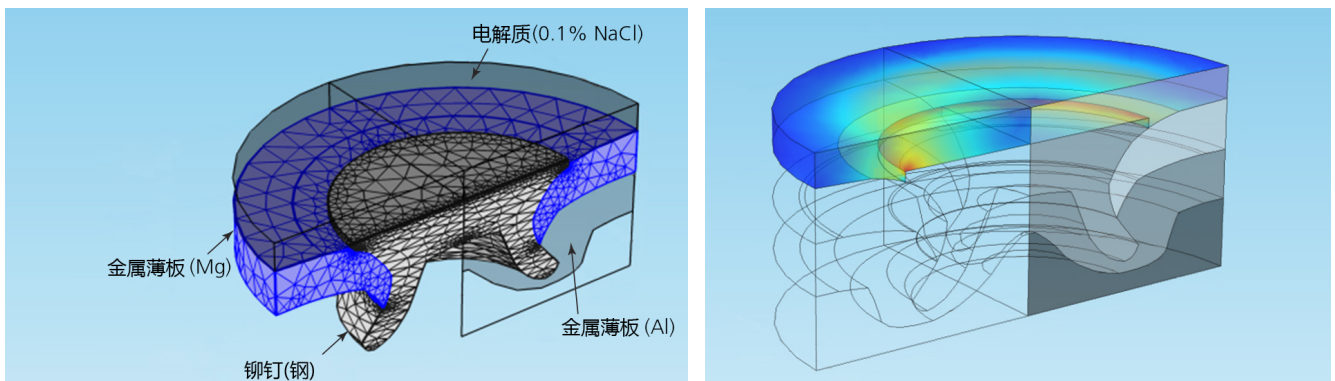


图 2. 左：COMSOL Multiphysics® 软件中描述了铆钉冲头一半的几何。右：仿真结果显示了铆钉表面和金属薄板上的电流密度。仿真从数学角度模拟了铆钉-薄板界面的电流；最高电流密度出现在锋利的边缘。

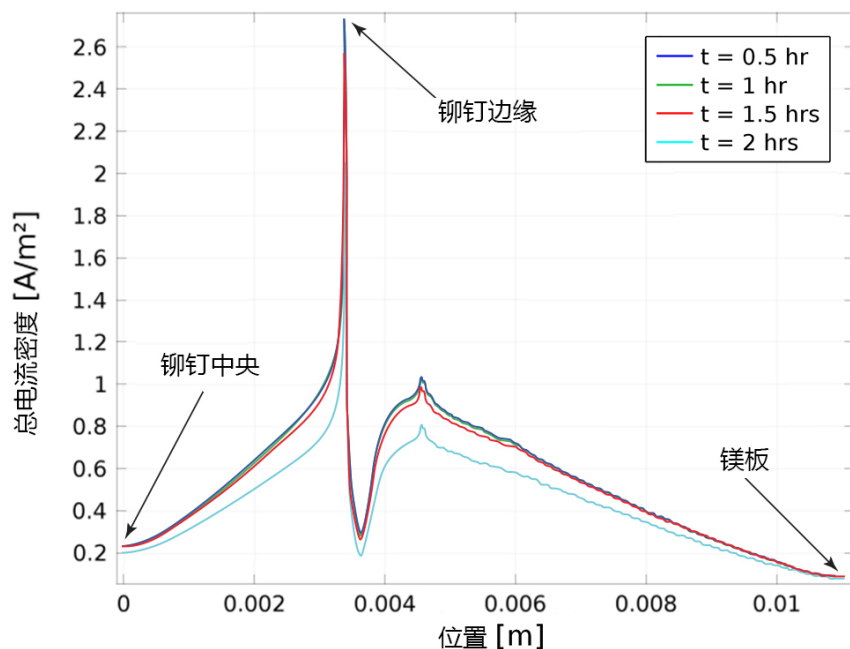


图 3. COMSOL® 软件绘图显示了铆钉接头表面上不同位置处的局部电流密度。

赛德斯 - 奔驰的制造商。这两个团队正在寻找一些方法，希望能简化铆钉的设计和开发，降低物理测试到最低程度，同时能减少对表面处理之类后续步骤的需求。

→ 多物理场模拟帮助工程人员深入理解腐蚀动力学

为了研究电偶腐蚀动力学，以及包括材料损耗、材料表面条件、以及相互反应金属之间的长期行为，HZG 的科学家 Daniel Höche 博士通过使用 COMSOL Multiphysics® 软件创建了一个钢铆钉冲头的仿真。铆钉上镀有铝锌合金，能为钢提供阴极保护。该软件使 Höche 能够分析铆钉表面和边缘的电化学反应，预测邻接薄板的腐坏，并调整几何以最小化腐蚀。

他的模型包括铆钉、由铝和镁粘合而成的金属薄板，覆盖在表面代表外部环境的 0.1% NaCl 电解质层，以及铆钉和薄板界面上形成的电偶（见图 2）。他还向铆钉几何中加入了一个尖角，用

来模拟锋利边缘的存在，这会增加电解质电势中的梯度，增大电流，并加快引起电偶腐蚀的电化学反应。

随着铆钉和薄板之间的界面出现腐蚀，镁板的降解速度开始快于其他金属。化学反应中会生成氢氧化镁

($Mg(OH)_2$)，这会在表面形成一个较弱的阻隔薄膜。沉积层的生长实际上会增强对进一步腐蚀的抵御能力，阻止腐蚀蔓延。然而，由于 $Mg(OH)_2$ 存在孔隙率，无法完全阻止腐蚀的蔓延，腐蚀会继续朝向金属深处扩展。

为了确定电流分布并分析化学反应，Höche 需要考虑这一非恒定的生长，以及受此影响的材料属性。使用 COMSOL® 软件的两个附加模块，化学反应工程模块和电池与燃料电池模块，他将铆钉和金属薄板处理为一组电极。这使他可以评估阳极/阴极面积比、电解质暴露时长、以及由于 $Mg(OH)_2$ 的累积而造成的电流变化将如何影响镁的降解。

“由于孔隙率会直接影响阻隔属性，形成的表面拓扑会受到向下降解速率和沉积反向生长的影响。基本电偶电流密度的计算将因沉积层生长的形貌而进行修正。” Höche 评论说：“这促使我们开始研究电极电化学反应的瞬态变化。”

模型包括化学反应速率，已知的金属电化学属性，以及 24 小时暴露时长的瞬态函数。他的结果显示了当铆钉接头暴露于电解质中时的电势和电流密

仅延伸至 e-涂层的划痕 (1 mm 宽) 由手术刀造成的划痕 (0.1 mm 宽) 延伸至钢层的划痕 (1 mm 宽)

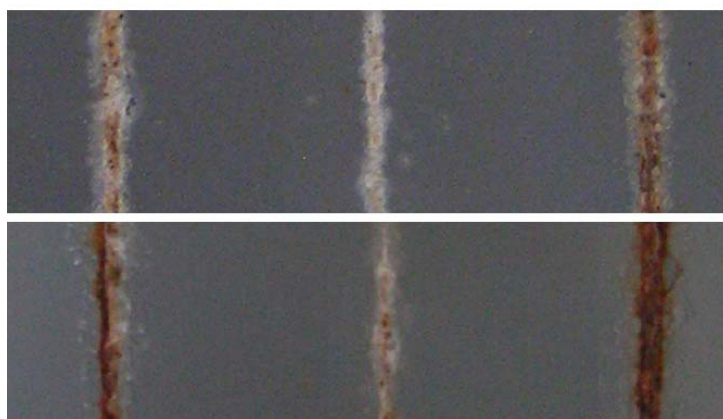


图 4. 镀锌钢板上的腐蚀测试表明划痕层出现了可见的腐蚀（俯视图）。Bösch 制造了几个不同深度和宽度的划痕，以分析划痕大小对脱层过程的影响。图中分别为 1 周（上）和 5 周（下）后的结果。

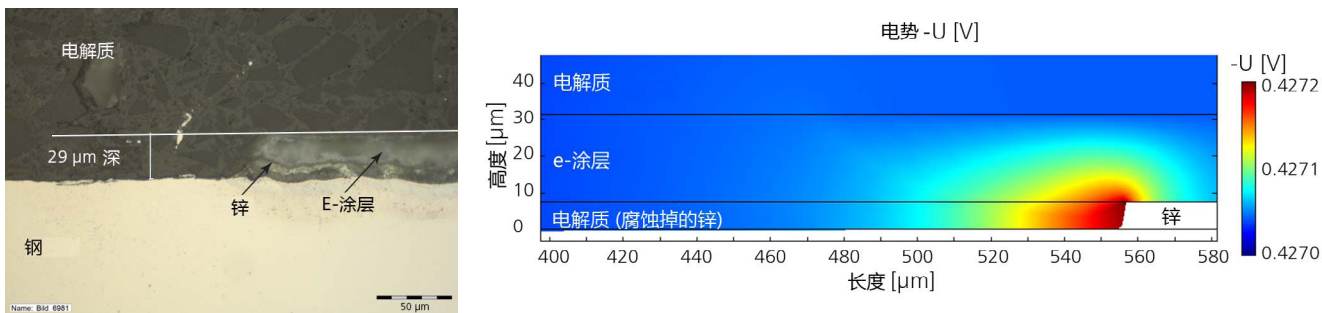


图 5. 左：测试薄板的截面放大图，其中一个划痕破坏了 e-涂层和锌层的一部分。右：COMSOL Multiphysics® 软件结果显示了 e-涂层和电解质中的电势。白色区域显示了大部分锌被消耗之后剩余的锌。

度，揭示了浸入开始后不同时间点的表面覆盖率 ($Mg(OH)_2$ 覆盖的薄板和铆钉表面的比例)。电流密度因距铆钉中心的距离而不同，这显示了最快发生腐蚀的位置（见图 3）。

→ 深层研究：脱层的风险

除了发生在铆钉-薄板界面的电偶腐蚀，其他汽车零件也面临着被电偶腐蚀破坏的风险。一些很小的、看似很浅的缺陷，例如面板涂层或油漆上的划痕，就可能为腐蚀打开方便之门，使湿气



Daniel Höche 博士，HZG 的科学家。



Nils Bösch，戴姆勒集团的研究员。

和环境电解质进入导电表面。在汽车面板中，微小的损害就会带来一个电偶，进而引发脱层，即金属薄板上涂层的脱离，这将极大地削弱腐蚀防护能力。

为了分析这一额外的风险，Höche 与戴姆勒集团的研究员 Nils Bösch 正在合作研究镀锌测试钢板上的脱层，钢板上镀有一层阴极涂层，即 e-涂层（见图 4）。“由于划痕会延伸到钢表面，你将在锌和钢之间得到一个电偶，锌随即发生腐蚀。” Bösch 解释说：“这会在 e-涂层和钢之间造成一个裂隙，该裂隙会沿水平方向持续生长，而非垂直穿过不同的层。”这一行为非常类似裂缝腐蚀过程，它会在两个表面间生长，并在金属中造成裂缝。虽然明显的损害和总体的材料缺损看上去并不多，但这些裂缝底部的应力开裂最终会造成零件失效。

Höche 和 Bösch 使用 COMSOL 的参数化扫描来研究电解质和 e-涂层中的电势，以了解不同 e-涂层的阻隔属性。他们的模型报告了随着裂隙对锌的消耗，对应的水平生长情况（见图 5）。

他们有关表面缺陷大小会如何影响锌消耗速率的研究还在继续。截止目前，模型显示出这些缺陷宽度带来的影响要大于它们的深度：与较宽的缺陷相

比，在较窄的划痕中，阴极/阳极之比较小，且扩散更加有限，这可以减缓腐蚀的发生。他们正在根据现有结果进一步研究涂层缺陷给腐蚀防护带来的负面影响。

→ 为更持久的结构支撑奠定基础

虽然腐蚀是一种无处不在，且无法完全避免的过程，但可以通过专业的设计和仔细的分析来尽量将腐蚀降到最低程度。Höche 和 Bösch 减少了铆钉接头的锋利边缘，打磨了几何，希望在维持机械稳定性的同时能尽量减少暴露面积。他们还推荐了一种 e-涂层，从参数化研究来看，该涂层显示了最低的电流，因此在嵌板中出现的破坏最少。COMSOL 模型是深入理解相关电化学行为的一种不可或缺的资源，也为 HZG 和戴姆勒集团的工程师们提供了优化铆钉接头的工具，从而实现最优的腐蚀防护。

“这类计算机辅助分析帮助加强了轻量化设计的开发，支持在设计早期阶段尽量发现可能的腐蚀问题。” Höche 总结说：“尽管腐蚀是汽车铆钉的一个危险敌人，我们还是利用自己的加工知识及仔细的几何设计掌握了如何控制镁的腐蚀。” ❖