

慷慨赴“蚀”

张依莹

上海电力大学

2022年，春风和煦，芳草萋萋，上海的街道卸去了人潮拥挤、车水马龙，偶有寥寥车辆匆匆而过，充满了寂静与紧张。疫情严峻，全市戒备，当整个城市慢下了脚步，大部分居民隔离在家时，一部分人彻夜奔走忙碌，隐藏下疲惫与恐惧，克服着身体与精神的双重煎熬，竭尽全力保障城市的正常运转、人民的生活供给和安全健康。

2022年4月24日是第14个世界腐蚀日，上海疫情正处于最严峻的时刻，隔离在家的我每每看到奔走在抗疫一线的工作人员，由衷心生敬佩与感动。他们牺牲自我，用平凡造就伟大，捍卫着这座城市。正值世界腐蚀日，我想和大家聊一聊腐蚀里的“牺牲”。

腐蚀渗透在生产生活的各个角落，尽管现在的科学研究能有效减缓腐蚀的速率，但腐蚀仍然无处不在，不可避免。抑制腐蚀的方法有很多，阴极保护是一种传统的能有效抑制金属腐蚀的技术，分为外加电流阴极保护和牺牲阳极阴极保护。牺牲阳极是以少部分金属的牺牲为代价，换取基体的完整。阳极的慷慨赴“蚀”虽无马革裹尸的壮烈豪迈，亦无舍身取义、捐躯报国的忠肝义胆，但正是因为阳极的无畏牺牲才保护了基体免受环境的腐蚀。正如那些奋斗在抗疫一线的工作人员，甘为“阳极”，用自己的牺牲抵御病毒的侵蚀，慷慨就义，何其悲壮！

牺牲阳极的阴极保护法

根据腐蚀机理，一般可分为化学腐蚀和电化学腐蚀，其中电化学腐蚀是最常见和最普遍的腐蚀。发生电化学腐蚀时，金属与离子导电的介质间发生电化学作用而破坏，金属在阳极区域被溶解而释放电子，电子迁移到阴极区域被能吸收电子的物质所吸收，负极区和正极区组成了腐蚀电池。通过外接电源或用导线将被保护金属与另一块电极电位较低的金属相连接时，由于不同金属的电极电位不同，产生了电位差，形成了腐蚀电池，负极反应直接造成了金属的破坏，以使腐蚀发

生在电位较低的金属上，示意图如图 1 所示。

相比于外加电流阴极保护，牺牲阳极保护法不需要外部电源，只需要将具有更多负电势的金属或合金与受保护的金属相连接，使被保护的金属成为腐蚀电池中的阴极，另一种金属作为阳极发生氧化反应而被消耗，从而减缓被保护的阴极金属的腐蚀。

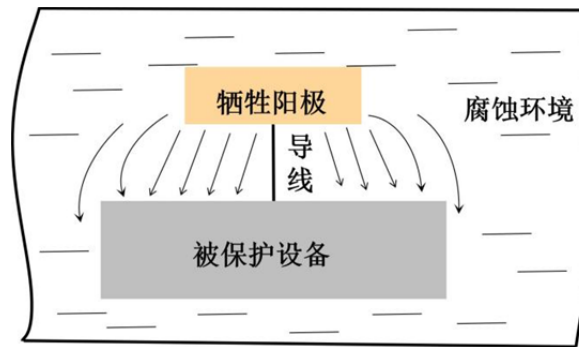


图 1 牺牲阳极的阴极保护法

牺牲阳极保护法的优缺点和要求

每种缓蚀技术都有其优劣和适用性，牺牲阳极保护法的优点主要有：使用时不需要外接电源；可在无电源区域使用；不会对附近的金属设施造成干扰；施工简单、使用期间不需要经常维护；小电流输出导致小或无杂散电流干扰；地皮和维护成本低；提供均匀的电流，不容易发生过度保护。缺点主要有：驱动电压较小，难以调节保护电流；输出电流有限；易腐蚀金属需要使用较多的阳极；在高电阻土壤中可能无法使用；不适用于涂层较劣质的金属；有效保护时间受阳极寿命的限制。

利用牺牲阳极保护法来减缓阴极金属腐蚀时，阳极需要满足以下要求：电位要适宜，避免阴极区域发生析氢反应；阳极极化率小，电流输出稳定；电容量大，理论电容量是单位质量牺牲阳极溶解时所产生的电量，因此牺牲阳极材料的理论电容量要足够大，即单位重量的发生电量较高或消耗率较低；电流效率要高；阳极溶解均匀且腐蚀产物易脱落；阳极价格低廉，易于加工，原料充足；腐蚀物质无毒无害，不对环境构成污染。

牺牲阳极的选择

不同环境下，金属发生溶解时的平衡电位不同，但通常情况下镁、铝、锌及其合金的电位较负，适合作为牺牲阳极的金属材料。然而，铝、锌在高 pH 值下

化学性质不稳定，在碱性环境中会发生快速溶解，作为牺牲阳极材料使用寿命有限。Zn 中添加少量元素 Mg 可以改善防腐性能，形成锌-镁固溶体和一些金属化合物，延长使用寿命。在海水中铝合金对钢具有良好的保护作用，镁合金则表现出过度保护行为，可能导致氢脆^[1]。

镁合金阳极表面不易极化，腐蚀产物疏松且易脱落，一般用于电阻率较高的土壤或淡水中，在油气工程上应用较多的是带状镁合金阳极。锌合金阳极在海水中或土壤中电流效率较高，电位稳定，可根据环境和保护金属的状态自动调节阳极的输出电流，适用于低电阻率土壤和海水中。铝合金在海水和氯离子含量高的环境中性能稳定，在保护钢结构时可自动调节电流和电位。但是铝易钝化，只有通过合金化来限制表面氧化膜的形成，促进表面活化。牺牲阳极的选择要根据环境介质和保护的金属而确定。

牺牲涂层

单纯使用金属作为牺牲阳极往往寿命较短，不耐极端环境，近些年来多使用牺牲阳极与涂层结合，制备牺牲涂层，增强金属的耐蚀性及使用寿命。涂层是抑制腐蚀中常用的手段，涂层系统旨在将防腐涂料涂敷在材料表面上使之与周围介质相隔离，防止环境对材料的侵蚀。如图 2 所示，为保障防腐蚀性能，涂层作为金属的保护屏障时通常由三层组成：底漆、中间漆和面漆。面漆用于保护下面的金属和其他层免受环境因素的影响，它也通常由聚氨酯等有机材料组成，中间漆一般为环氧树脂有助于增强被保护金属与底漆之间的附着力，有些情况下为实现涂层和牺牲阳极的双层保护作用会选择牺牲金属作为底漆。

锌是世界上第四大消费最广泛的金属。几乎所有生产的锌的一半用于镀锌过程，以保护钢铁结构免受腐蚀和生锈。锌及其合金是最常用的牺牲涂层材料。锌在早期发生腐蚀时会形成氧化锌和氢氧化物等腐蚀产物。局部涂层缺陷，例如划痕或缝隙，会使锌底漆直接暴露于环境中，暴露的锌有助于与缺陷处暴露的金属进行有益的电偶耦合，并且限制了锌在完整内部的耦合，由于锌腐蚀产物填充孔隙，可以形成屏障保护，从而有效提高了阴极保护的持续时间^[2]。

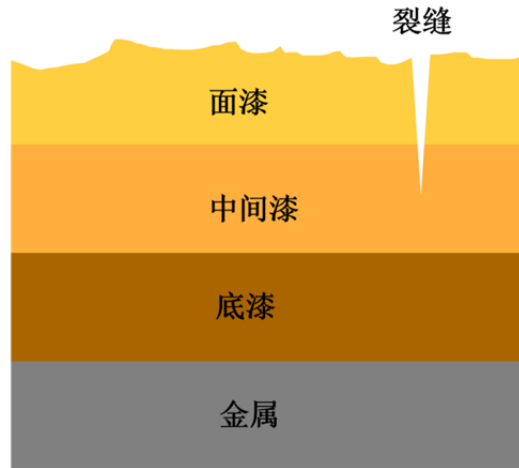


图2 三层涂层示意图

牺牲阳极抑制微生物腐蚀

在微生物燃料电池（MFC）、微生物电解池（MEC）等生物电化学系统中通常使用金属作为能与载体进行电子传递的电活性生物膜生长的电极材料。生物膜主要由微生物细胞和胞外聚合物组成，金属上形成的生物膜会对运行设备的金属产生负面影响，导致传热效率下降和产生微生物腐蚀（MIC）。但是对于生物电化学系统必须要保持生物膜的活性才能保障系统的正常功能，不能通过抑制微生物的生长抑制微生物腐蚀。牺牲阳极的阴极保护法既能有效保护金属，减缓 MIC，同时又能保持生物膜的活性，维持生物电化学系统的正常运行^[3]。

牺牲阳极的改进方法

为提高牺牲阳极的耐蚀性，增加使用寿命可以采用合金化处理、表面处理、改进制备工业等途径。表面处理技术是将材料表面与基体共同作为一个系统进行设计和制造。表面处理方法主要有表面转化技术、涂层技术、镀层技术和薄膜技术。利用表面处理技术能使材料表面获得所需的功能，调整材料物理、化学或微电子等方面的特性，以增强抵抗环境侵蚀的能力。化学成分和微观组织结构决定了金属材料的主要性能，因此可以通过改进制备工艺和合金化改变阳极的化学成分和微观组织来改善其性能。通过合金化处理将不同种类和含量的元素添加在不同的金属中可以有效增强金属的耐蚀性与耐磨性，改善牺牲阳极的电极电位和电流、表面氧化膜等。金属在不同的冶炼工艺条件下可以得到不同微观组织，这些不同的微观组织主要有合金元素偏析相、晶粒大小、位错、固溶度、夹杂物及铸

造缺陷等^[4]。通过改善或创新制备工艺可以使牺牲阳极材料获得更好的性能。

总结

牺牲阳极保护法在海底电缆、海上钻井平台、船舶、码头等海洋设施，输油管道、地铁、地下电缆、桥梁等地下设施，蒸馏塔、换热器、给排水管道等地上工业设备中都有广泛的应用。对于化学反应，当能量降低时，反应就可能自发进行，而腐蚀就是这样一种自发过程，所以腐蚀往往是不可避免的。尽管很难找到缓蚀效果好、成本低、适用范围广、环境友好的缓蚀技术，但人类对腐蚀领域的探索从未停歇。也许牺牲阳极并不是一种理想的技术方法，但现实中很多情况下牺牲是无法避免的。

当阳极与基体金属连接的那一刻，就开始了“牺牲”的使命，正如战士奔赴战场，消防员冲入火海，视死如归，义无反顾。阳极的一生是短暂的，也是辉煌的。沧海横流，方显英雄本色；风高浪急，更见砥柱中流。岁月静好的盛世下是数代人民的奋斗、血泪和牺牲。疫情持续，我们无所畏惧，因为那些牺牲自我、终日奋战在一线的工作人员，因为无数中华儿女平凡的坚守，中华民族必将战胜一切！愿疫情消散，山河无恙，人间皆安！

参考文献

- [1] J. Rhee, J. Lee, Electrochemical evaluation of corrosion properties of aluminum alloy as a sacrificial anode for offshore structure protection [J]. Journal of The Korean Institute of Surface Engineering, 2015, 48 (2): 68-72.
- [2] Lau K, Permeh S. Assessment of durability and zinc activity of zinc-rich primer coatings by electrochemical noise technique [J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 167: 106840.
- [3] Shamsuddin R a A, Abu Bakar M H, Wan Daud W R, et al. Can electrochemically active biofilm protect stainless steel used as electrodes in bioelectrochemical systems in a similar way as galvanic corrosion protection [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (58): 30512-30523.
- [4] Venugopal A, Raja V S. Evidence of dissolution redeposition mechanism activation of aluminum by indium [J]. British Corrosion Journal, 1996, 31 (4): 318-320.