

抛石环境中铝合金阳极性能评价及其对 海底隧道钢壳保护效果评估

赵永韬¹, 宋神友², 孙仁兴¹, 尹萍¹, 白润昊¹, 尹学涛¹,
高建邦¹, 朱帅帅¹, 金文良²

(1.青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司, 山东 青岛 266101; 2.深中通道管理中心, 广东 中山 528400)

摘要: 目的 解决埋覆介质中牺牲阳极电化学性能评价的不确定性, 实现非匀质介质中牺牲阳极电容量测试结果的评价和对比。**方法** 模拟沉管隧道埋覆的环境介质, 对铝合金牺牲阳极的电容量和溶解形貌进行评测。为区别于现有的海水等匀质介质中阳极的检测方法, 建立非匀质介质中铝阳极电化学性能评价方法。另外, 在上述埋覆介质中, 测定阳极和阴极的极化曲线, 修正仿真计算的边界条件, 有利于模拟这种高电阻率介质环境下阴极保护电位分布。**结果** 测试箱所测电阻率与商用便携式电导率仪测定精度相当。A1 阳极在低电阻率的海水中 (25~40 $\Omega\cdot\text{cm}$) 性能稳定, 电容量稳定在 2500 A·h/kg, 溶解性能良好; 在 40 $\Omega\cdot\text{cm}$ 海淡水+回填石的混合介质中, 电容量测试值数据波动大, 重现性差。B1 阳极在海水 (25~40 $\Omega\cdot\text{cm}$) 中的电容量和 A1 阳极相当, 未见到差异, 在 40 $\Omega\cdot\text{cm}$ 海淡水+回填石混合介质中, 电容量数值分散性小, 电化学活性高。**结论** 混合介质中的评价试验体现了海淡水、混合介质电阻率和回填石对阳极溶解产物阻滞的综合效应, 提高了抛石环境中铝阳极寿命评估的准确性, 尤其适用于沉管隧道钢壳用铝合金阳极电化学性能评价和牺牲阳极保护效果评估。

关键词: 钢壳混凝土沉管; 铝合金阳极; 阴极保护; 电化学性能; 回填石

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)09-0078-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.012

The Evaluation of Aluminum Alloy Anode and Its Associated Protection Simulation in the Brine With Backfilled Stone for the Steel Sheet of Immersed Tunnel

ZHAO Yong-tao¹, SONG Shen-you², SUN Ren-xing¹, YIN Ping¹, BAI Run-hao¹, YIN Xue-tao¹,
GAO Jian-bang¹, ZHU Shuai-shuai¹, JIN Wen-liang²

(1. SunRui Marine Environment Engineering Co., Ltd, Qingdao 266101, China; 2. Shenzhen-Zhongshan Link Administration Center, Zhongshan 528400, China)

收稿日期: 2020-07-30; 修订日期: 2020-10-14

Received: 2020-07-30; Revised: 2020-10-14

基金项目: 广东省重点领域研发计划专项 (2019B111105002)

Fund: Key-area Research and Development Program of Guangdong Province (2019B111105002)

作者简介: 赵永韬 (1973—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: ZHAO Yong-tao (1973—), Male, Researcher, Research focus: corrosion and protection.

通讯作者: 孙仁兴 (1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为海洋化学。

Corresponding author: SUN Ren-xing (1981—), Male, Senior engineer, Research focus: marine chemical.

引文格式: 赵永韬, 宋神友, 孙仁兴, 等. 抛石环境中铝合金阳极性能评价及其对海底隧道钢壳保护效果评估[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 078-085.

ZHAO Yong-tao, SONG Shen-you, SUN Ren-xing, et al. The evaluation of aluminum alloy anode and its associated protection simulation in the brine with backfilled stone for the steel sheet of immersed tunnel[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 078-085.

ABSTRACT: This paper aims to solve the uncertainty of electrochemical performance evaluation of sacrificial anode in buried medium and realize the evaluation and comparison of capacitance test results of sacrificial anode in heterogeneous medium. The capacitance and dissolution morphology of aluminum alloy sacrificial anode were evaluated by simulating the environmental medium buried in immersed tunnel. In order to distinguish the existing detection methods of aluminum anode in homogeneous medium such as seawater, an evaluation method of electrochemical performance of aluminum anode in heterogeneous medium was developed. In addition, in the above buried medium, measuring the polarization curves of anode and cathode and modifying the boundary conditions of simulation calculation were conducive to simulate the cathodic protection potential distribution in this high resistivity medium environment. The resistivity measured by the test box was equivalent to that measured by the commercial portable conductivity meter. A1 anode had stable performance in seawater with low resistivity ($25\sim 40\ \Omega\cdot\text{cm}$), stable capacitance at $2500\ \text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ and good solubility; in the mixed medium of $40\ \Omega\cdot\text{cm}$ sea fresh water + backfilled stone, the capacitance test value data fluctuated greatly and the reproducibility was poor. The capacitance of B1 anode in seawater ($25\sim 40\ \Omega\cdot\text{cm}$) was equivalent to that of A1 anode, and there was no difference. In the mixed medium of $40\ \Omega\cdot\text{cm}$ sea and fresh water + backfilled stone, the dispersion of capacitance value was small and the electrochemical activity was high. The associated results displays the comprehensive effects under the salinity of brackish water, overall resistivity of heterogeneous medium and the block effect of dissolved product in the stones. The testing under the marine brackish/backfilled stone/deposited sea mud will be appropriate for evaluation of aluminum alloy anode and its protection performance for the steel shell immersed tube tunnel and also the predicted usage life of anode in the backfilled stone condition will be accurately.

KEY WORDS: steel shell concrete immersed tunnel; aluminum alloy anode; cathodic protection; electrochemical performance; backfilled stone

对于海洋环境水线以下的钢结构长寿命防腐蚀技术,通常会采用铝合金牺牲阳极。目前铝合金阳极电容量的检测标准都是采用天然或人工海水介质,短期检测主要用于相对成熟的铝合金阳极做出厂质量检验。例如 GB/T 17848、NACE TM0190、DNV RP B401 (附录 B)。长期性能测试方法的标准较少,通常参考 DNV RP B401 附录 C,对阳极进行为期 12 个月的试验测试^[1]。还有研究是针对深海等极端工况的,通过实验室模拟压力、含氧量等因素评价深海中金属结构物阴极保护效果和阳极消耗水平^[2-4]。这些基于海水或淡海水的测试介质,都是匀质介质,其盐度和电阻率容易测定和控制,批量铝阳极电容量测定结果的重现性高,因此被公认为铝阳极质量检验的标准和依据。

对于钢壳式沉管隧道,其外部是粒径为 $5\sim 80\ \text{mm}$ 碎石回填埋覆的永久性固定构筑物^[5-7]。埋覆介质的电阻率($100\sim 500\ \Omega\cdot\text{cm}$)远高于海水($25\ \Omega\cdot\text{cm}$ 左右),因此铝阳极的工作电位将会正移、发生电流降低和电容量下降,表面溶解形貌也远逊于海水中^[8-11]。

考虑到上述原因,对于回填石、海泥等介质埋覆下金属结构的牺牲阳极保护,保守设计都采用比较低的电容量数值。如铝阳极在海泥长期电容量设计值采用 $1500\ \text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$,相对于海水中设计值($2000\ \text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$),减小了 25%^[12-14]。相关文献指出^[15-17],阳极在海泥中可能会钝化,建议在海泥环境下慎用铝合金阳极^[14]。现行国内外标准没有明确铝合金阳极材料在抛石或海底石子中阳极电容量的测试方法。因此,海底环境下铝阳极阴极保护设计往往存在着很大的主观性。

对于海水中大桥和港口码头钢管桩的铝合金阳极保护,设计寿命通常为 $25\sim 35\ \text{a}$,而对于使用寿命超长的沉管式海底隧道,沉管钢壳安放后被回填埋覆,铝阳极无法再更换和补充,因此阴极保护寿命要求达到 $100\ \text{a}$ 。如果借用海水或海泥中铝阳极电容量指标,势必会造成阳极数量和保护寿命的巨大偏差。甚至由于不能正确甄别适用于回填石介质的铝合金阳极,将造成沉管钢壳的牺牲阳极保护作用远远低于设计要求,大大降低沉管钢壳耐久性,导致腐蚀风险。

文中报道了一种在非匀质介质中评价铝合金阳极电化学性能的测试方法,并对比评价了两种铝阳极在匀质和非匀质介质中电化学性能的差异。

1 试验

1.1 试样材料

牺牲阳极试样采用两种铝合金成分进行对比试验。一种是 Al-Zn-In-Cd 成分的国标铝合金阳极,普遍应用于海水介质;另一种是自研的六元合金铝阳极^[18]。两种铝合金的化学成分见表 1。

试样号 A1 (A 成分)和 B1 (B 成分),试样尺寸为 $\phi 10\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$,参照 DNV RP B401 (附录 B)对两种铝合金阳极试样进行电容量测定。试样号 B2 (B 成分)和 B3 (B 成分),试样尺寸为 $\phi 120\ \text{mm}\times 120\ \text{mm}$,顶部 $R60\ \text{mm}$ 圆弧倒角。试样的下底表面钻有 $\phi 10\ \text{mm}$ 的孔,并攻丝,用于连接 $350\ \text{mm}$ 长的

表 1 铝阳极化学成分
Tab.1 Chemical composition of aluminum anode

Sample	Anode alloy	Zn	In	Sn	Cd	Si	Ti	Fe
A	Al-Zn-In-Cd	2.5~4.5	0.018~0.050	—	0.005 ~ 0.020	—	—	<0.15
B	Al-Zn-In-Sn-Si-Ti	4.0~6.0	0.015~0.030	0.005~0.02	—	0.05~0.4	0.005~0.03	<0.07

钛导电棒。试样号 B2 和 B3 与 B1 成分相同，且为同一炉熔炼。

沉管钢壳材料为 Q420C (C 0.18% (质量分数), Mn 0.55%, Si 0.21%, P 0.023%, S 0.034%), 工作电极面积为 0.785 cm², 其余部分用环氧树脂封装。工作面用水砂纸打磨至镜面状态, 将电极放入测试介质。

1.2 电化学性能测试装置

铝阳极电容量测试装置如图 1 所示, 测试箱内埋覆回填石/海水混合介质。测试装置中电流表采用市售的 C65 型号, 万用表为 VC9807A+, 便携式电导率仪为 Bante 900P, 恒流源采用 30 V/10 A 线性电源, 导电螺杆和辅助电极板为不锈钢材质, 辅助电极板采用 $\phi 0.03$ m 的圆盘, 面积为 0.28 m²。测试箱用亚克力板焊接成 0.2 m×0.2 m×0.4 m 的立方体。

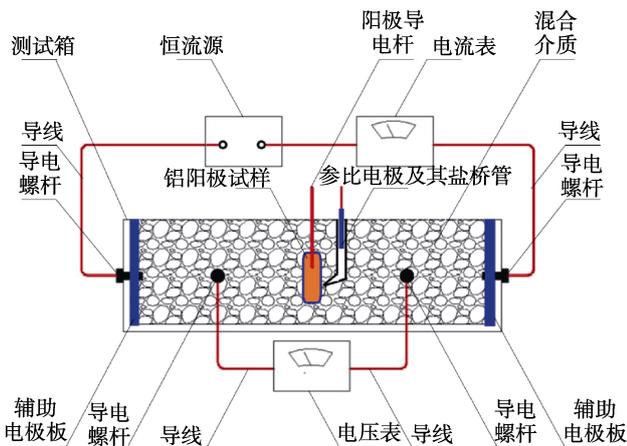


图 1 铝阳极电容量测试装置

Fig.1 Schematic diagram of aluminum anode capacity test device

1.3 测试介质

电容量测试介质分匀质和非匀质两种。匀质介质采用海水, 通过添加蒸馏水来稀释一定容积的天然海水, 用便携式电导率仪监测电阻率, 最终达到测试所需的电阻率水平。非匀质介质为沉管用回填石+海水混合, 回填石粒径为 8~40 mm。

1.4 极化曲线测量

极化曲线测量采用图 1 装置中三电极体系。参比电极为饱和甘汞电极 (SCE), 所有的电位值均相对于 SCE。动电位极化曲线测量使用 PAR M2273TM 恒电位仪。测量软件为 PowersuitTM, 扫描速度为 1 mV/s。

2 试验结果

2.1 匀质介质电阻率的测定和校准

测试箱内装入不同电阻率的海淡水, 水线高度为 0.35 m。用测试箱装置通 10~200 mA 恒定电流, 记录测试装置中电流和电压。根据式 (1) 计算测试箱内海淡水体积电阻, 根据式 (2) 计算出海淡水电阻率, 其结果见图 2。

$$R=U/I \tag{1}$$

$$\rho=RS/L \tag{2}$$

式中: R 为测试装置混合介质的体积电阻; ρ 为混合介质的电阻率; L 为辅助电极板之间的距离, S 为垂直于两个辅助电极板连线方向沉管回填介质的截面积。

从图 2 可以看出, 电流较小时, 电阻率测定值不稳定, 当电流增大到一定值, 电阻率测定值才趋于稳定。按照 ASTM D1125 水的电导率和电阻率的标准测试方法, 使用便携式电导率仪测定海淡水电阻率, 两者结果的相关性见图 3。由图 3 可以确认, 采用文

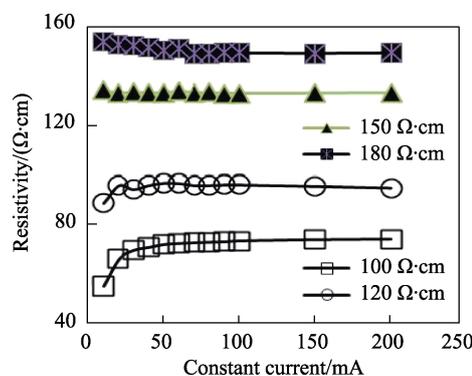


图 2 测试箱 5 通过不同恒电流测定的电阻率
Fig.2 Resistivity of test box 5 measured by different constant current

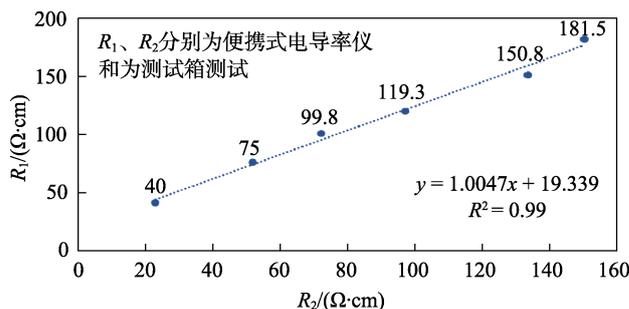


图 3 海淡水电阻率测试结果相关性
Fig.3 Correlation between the two testing methods in brine

中所述测试箱所测电阻率与商用便携式电导率仪测定精度相当。

2.2 非匀质介质混合电阻率测定

测试箱内装入一定粒径的回填石和电阻率为 $40 \Omega \cdot \text{cm}$ 的海淡水，水线与石子顶部平齐，高度为 0.35 m ，阳极试样在装入石子过程中埋入。用测试箱装置通 50 mA 恒电流，测定测试箱内混合介质体积电阻，然后计算出海淡水电阻率，不同粒径回填石 + $40 \Omega \cdot \text{cm}$ 海淡水混合介质的电阻率测试结果见图 4。考虑到每次装入石子可能有间隙的差异，图 4 显示的是 5 次测试结果的平均值和标准偏差。

2.3 铝阳极电容量测定试验

试样标号 A1 和 B1，试样尺寸直径为 10 mm ，长度为 50 mm ，参照 DNV RP B401 (附录 B) 设定的恒电流对两种铝合金阳极试样进行电容量测定。测试介质为不同电阻率海淡水和回填石 + $40 \Omega \cdot \text{cm}$ 海淡水混

合介质，测试结果见图 5 和图 6。

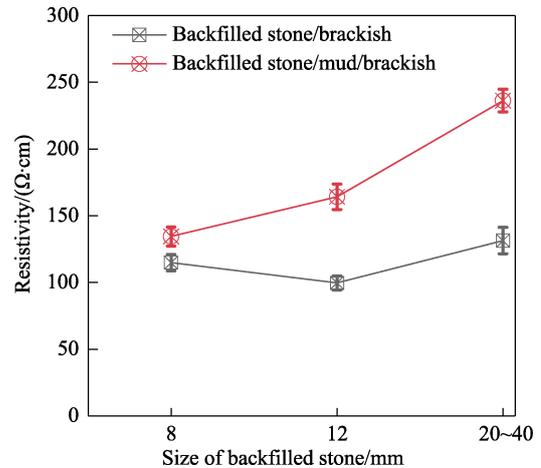


图 4 不同石子粒径的混合介质(回填石+ $40 \Omega \cdot \text{cm}$ 海淡水)电阻率测试结果

Fig.4 Resistivity tested in the mixed medium (backfilled stone + $40 \Omega \cdot \text{cm}$ brine) with different stone size

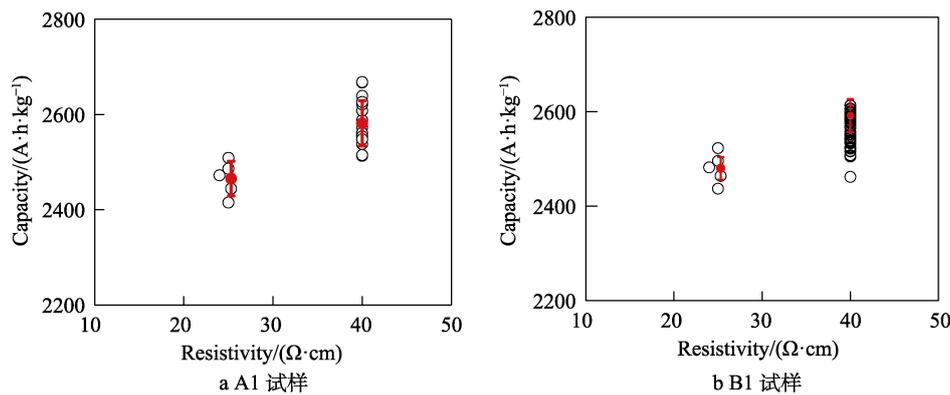


图 5 铝阳极在海淡水中的电容量

Fig.5 Capacity of aluminum anode in brine: a) sample A1; b) sample B1

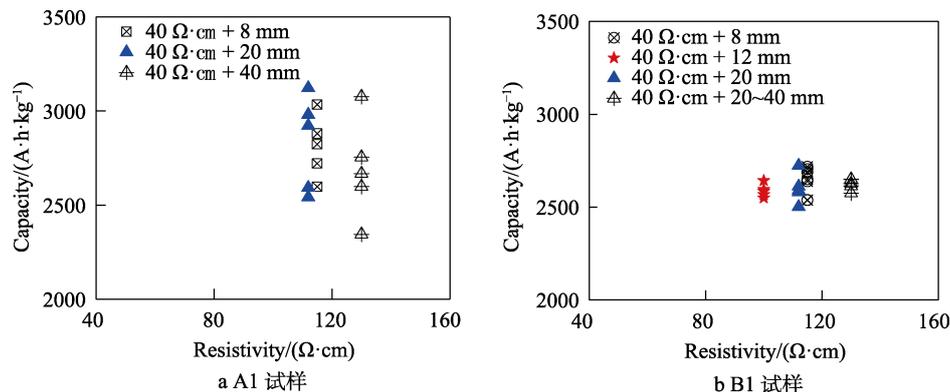


图 6 铝阳极在混合介质 ($40 \Omega \cdot \text{cm}$ 海淡水+回填石) 中的电容量

Fig.6 Capacity of aluminum anode in mixed medium ($40 \Omega \cdot \text{cm}$ brine + backfilled stone): a) A1 sample; b) B1 sample

从图 5 可以看到，A1 阳极在低电阻率的海水中 ($25 \sim 40 \Omega \cdot \text{cm}$) 性能稳定，电容量稳定在 $2500 \text{ A} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ，溶解性能良好，因此被广泛用于海洋环境水介质中阴极保护。但是在 $40 \Omega \cdot \text{cm}$ 海淡水+回填石的混合介质中，电容量测试值数据波动大 (见图 6)，

重现性差。电容量超过 $2800 \text{ A} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 的试样均存在大面积的不溶解，溶解性能劣化明显 (见图 7)，A1 铝阳极实际上产生了钝化。这种情况下，电容量的数值已经失去了实际意义，不能作为沉管钢壳环境介质中适用的铝合金阳极。



图7 铝阳极在混合介质（40 Ω·cm 海淡水+回填石）中腐蚀形貌
Fig.7 Corrosion morphology of aluminum anode in mixed medium (40 Ω·cm brine + backfilled stone): a) A1 sample; b) B1 sample

B1 阳极在海水（25~40 Ω·cm）中的电容量和 A1 阳极相当，未见到差异。但是在 40 Ω·cm 海淡水+回填石混合介质中，电容量数值分散性小，电化学活性高，表现为阳极表面溶解均匀和工作电位足够负和阳极发生电流更大（见图 8），阴极保护的驱动力足够大。因此，适用于沉管钢壳在回填石+海水混合介质。

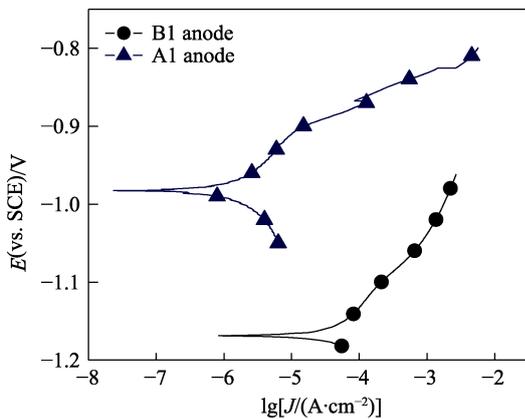


图8 铝阳极在混合介质（40 Ω·cm 海淡水+回填石）中 120 h 的阳极极化曲线
Fig.8 anode polarization curve of aluminum anode in mixed medium (40 Ω·cm brine + backfilled stone) at 120 h

3 结果讨论

3.1 确定混合电阻率实现沉管适用铝阳极筛选

采用现有的测试方法，两种铝合金阳极在海水/海

淡水介质中的电容量几乎没有差别，但是在 40 Ω·cm 海淡水+回填石的混合介质中，阳极 A1 电容量测试值波动很大，部分数据超过理论值 2890 A·h/kg。这主要是由于阳极溶解很不均匀，电容量数值不能反映阳极在混合介质中的电化学活性，批量结果的平均值也不能作为海淡水+回填石混合介质环境中真实的电容量值，溶解形貌反映了 A1 阳极在该环境中溶解性能很差。反之，B1 阳极在 40 Ω·cm 海淡水+回填石的混合介质中电容量测试值分散性小，试样溶解均匀，对比说明了 B1 阳极在回填石混合介质中具备良好的电化学性能。

在 40 Ω·cm 海淡水+回填石混合的非匀质介质中做电化学性能评价试验，现有标准无法量化阳极埋覆介质的差异，主要是由于非匀质介质中回填石粒径和密实度无法控制。采用文中所述方法和图 1 的装置，首先量化了埋覆阳极的环境介质电阻率，在同一电阻率水平下测试铝阳极电容量，实现了阳极电化学性能的对比评价，最终达到筛选沉管埋覆介质下铝合金适用阳极的目的。

3.2 测试介质对铝阳极超长服役性能评价的影响

B2 和 B3 试样分别放入 120 Ω·cm 海淡水介质和 40 Ω·cm 海淡水+8~40 mm 粒径回填石混合介质进行电容量测试，两种介质的电阻率相当，都在 120 Ω·cm 左右的水平。通过电解方式对铝阳极试样进行加速寿命试验，铝阳极的电解电流密度为 1 mA/cm²，进行 90 d 的电容量试验，结果见图 9 和图 10。试验结束后，清洗掉腐蚀产物，可以明显看到两种介质对测试结果的影响。海淡水介质中，B2 试样的电容量为 2728.6 A·h/kg，在混合介质中为 2529.3 A·h/kg，相差 7.5%。混合介质中，阳极腐蚀产物被回填石阻滞，不易扩散，包裹在阳极表面，甚至结壳（见图 9b），铝阳极输出电流有减小的趋势，电容量还会进一步降低。海淡水介质中，铝阳极腐蚀产物容易脱落，溶解均匀而细腻（见图 9a 和 10a）。在上述两种介质中对比试验 360 d，海淡水介质中 B2 试样的电容量为 2677.7 A·h/kg，混合介质中 B3 试样电容量为 2268.4 A·h/kg，相差 18%，阳极腐蚀产物的积累效应明显增大。

可以看出，尽管两种介质（120 Ω·cm 海淡水介质和 40 Ω·cm 海淡水+12 mm 粒径回填石混合介质）的电阻率相当，但是两种介质海淡水盐度差异很大（分别为 0.45%和 1.6% NaCl），以及混合介质对阳极腐蚀产物包裹效应，两者的溶解形貌和电容量差异明显。以上述两种测试介质中阳极电容量测定测试值作线性外推，设计沉管钢壳保护寿命 100 a 所需要的阳极数量，也将产生巨大的差异。

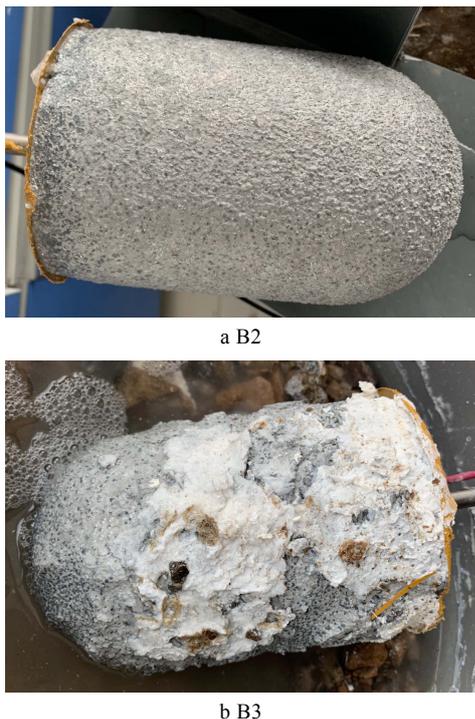


图 9 铝阳极试样电容量测试试验 90 d 后未清除腐蚀产物形貌
Fig.9 Dissolving morphology before the removal of corrosion product for the 90 days of capacity testing of aluminum anode sample B2, B3

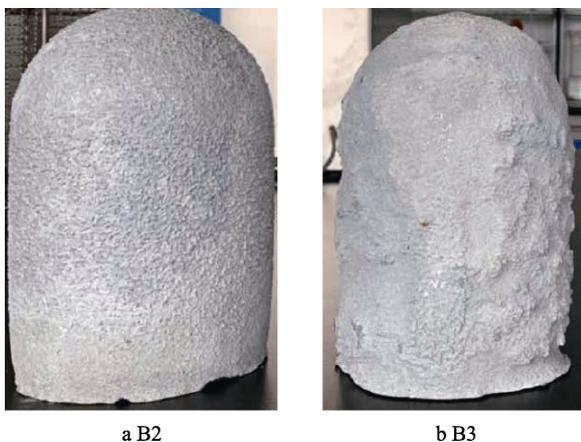


图 10 铝阳极试样电容量测试试验 90 d 后清除腐蚀产物形貌
Fig.10 Morphology after removal of corrosion product for 90 days of capacity testing of aluminum anode sample B2, B3

3.3 仿真计算推演阴极保护运行效果

由于海底隧道沉管钢壳是埋覆在上述高电阻率介质环境中，其牺牲阳极保护的设计就不仅仅包含铝合金阳极的数量和寿命核算，在高电阻率环境下避免保护电位的不均匀，并且根据沉管安装的舾装件来调整和优化阳极的布置，就显得十分重要。通过数值仿真计算和缩比模型试验模拟，可以进一步确定阳极的使用年限和保护范围。

在不同介质中测定的 Q420C（沉管钢壳材质）和 B1 铝阳极的极化曲线如图 11 所示。海淡水中阴极极化曲线有明显的氧的极限扩散电流密度。相同电阻率下，海淡水加回填石的介质中，这个现象弱化很多，在海泥中没有氧极限扩散电流。从阳极极化曲线可以看出，海淡水+回填石介质中，铝阳极还能表现出良好的发生电流，而同样电阻率条件下，120 Ω·cm 海淡水介质中阳极的极化明显。这表明海淡水介质中大大降低的氯离子浓度，造成了阳极电化学活性降低。由此可见，3 种介质中的极化曲线差异很大。因此，采用在接近实际工况介质中测定的阴极/阳极极化曲线，作为边界元计算的关键参数，是仿真分析沉管钢壳阴极保护效果的关键。

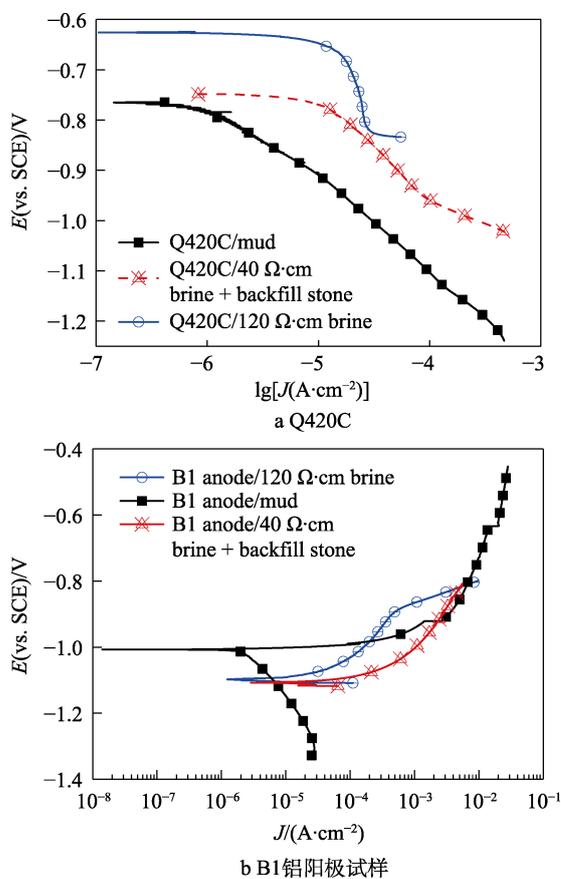


图 11 海泥、海淡水和回填石介质中浸泡 42 d 的极化曲线
Fig.11 The polarization curves measured in mud and brine/backfilled stone medium, immersed 42 days: a) Q420C mild steel; b) B1 aluminum anode sample

通过对海淡水+回填石介质电阻率的测定，可以模拟沉管钢壳和铝合金阳极的埋覆介质条件，进一步测定该体系的阴极、阳极极化曲线，进行边界元仿真计算。截取 30 m 长的管节环段作为仿真分析对象，对牺牲阳极保护效果进行评估，并进一步优化阳极的布置方案，如图 12 所示。实际工程中，确定阳极安装的最终位置还需要考虑沉管安装舾装件对保护电位的影响因素。

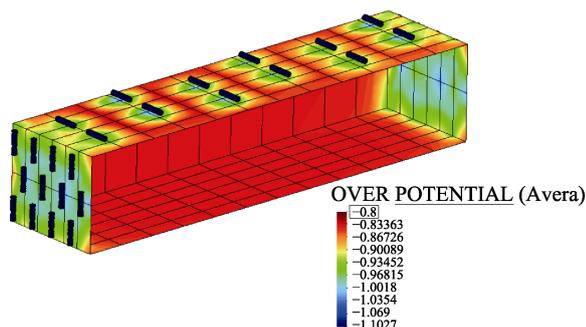


图 12 边界元仿真计算 30 m 长的沉管环段阴极保护电位分布

Fig.12 The protection potential distribution of steel shell of 30-meter-length immersed tunnel section

上述 30 m 沉管环段仿真计算的结果表明,电阻率在 $150 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下时,沉管外表面均能达到良好保护; $300 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上时,顶面和侧面可得到良好保护,但底面无法获得完全的阴极保护。

对于未来营运的隧道沉管,其埋覆介质还将增加淤泥沉积。因此,缩比模型试验模拟时,须增加淤泥沉积对阴极、阳极极化条件的影响,测定相应的仿真计算的边界条件,由此可以推演沉管隧道钢壳外壁不同运营时段的阴极保护运行效果^[19-20]。

不同于现有的海(淡)水等匀质介质中铝合金阳极的电化学性能评价方法,文中报道了沉管埋覆的抛石环境中铝阳极电化学性能评价方法,通过测定非匀质固液态混合介质的体积电阻率,解决了沉管回填介质中阳极电化学性能评价的困难。通过阳极电化学性能试验参数的量化控制,实现了该环境介质中电容量测试结果的评价和对比。试验结果体现了海淡水、混合介质电阻率和回填石对腐蚀产物阻滞的综合效应,测试条件更接近于真实的环境工况。该评价方法提升了非匀质介质中的铝合金阳极寿命评估的准确性,尤其适用于沉管隧道钢壳和海底埋覆状态下的铝合金阳极的电化学性能评估。

4 结论

铝合金牺牲阳极埋覆在海淡水+回填石混合介质中,其发生电流和电流效率均会下降,海水介质中常用的 Al-Zn-In-Cd 阳极在沉管埋覆介质中容易出现钝化现象。与此同时,Al-Zn-In-Sn-Si-Ti 阳极保持了足够的电化学活性,表现为工作电位更负,溶解形貌均匀和阳极发生电流更大。

相同电阻率水平下,海淡水介质不适用于沉管钢壳铝合金阳极评价和筛选,而海淡水+回填石混合介质中测试阳极电化学性能,试验结果体现了海水盐度、混合介质电阻率和回填石对阳极溶解产物阻滞的综合效应,更接近于沉管埋覆实际介质的试验模拟提升了铝合金阳极寿命评估的准确性,尤其适用于沉管隧道钢壳用铝合金阳极电化学性能评估。

参考文献:

- [1] DNV RP B401, Cathodic protection design[S].
- [2] ALASTAR T, ROBIN O. Cathodic protection at a simulated depth of 2500 m[C]//Corrosion 2000. Houston, Texas, USA: NACE International, 2000.
- [3] LIN S H, DEXTER S C. Effects of temperature and magnesium ions on calcareous deposition[J]. Corrosion, 1988, 44(9): 615-622.
- [4] YAN J F, WHITE R E, GRIFFIN R B. Parametric studies of the formation of calcareous deposits on cathodically protected steel in seawater[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(5): 1275-1280.
- [5] 宋神友, 陈伟乐, 金文良, 等. 深中通道工程关键技术及挑战[J]. 隧道建设, 2020, 40(1): 143-152.
SONG Shen-you, CHEN Wei-le, JIN Wen-liang, et al. Key technologies and challenges of Shenzhong link[J]. Tunnel construction, 2020, 40(1): 143-152.
- [6] 王炜英. 桥隧横越厄勒海峡连通丹麦和瑞典[J]. 地下工程与隧道, 1994(1): 48.
WANG Wei-ying. Bridge and tunnel crossing oresund strait linking denmark and sweden[J]. Underground engineering and tunnels, 1994(1): 48.
- [7] 宋神友, 聂建国, 徐国平, 等. 双钢板-混凝土组合结构在沉管隧道中的发展与应用[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 109-120.
SONG Shen-you, NIE Jian-guo, XU Guo-ping, et al. Development and application of steel-concrete-steel composite structures in immersed tunnels[J]. China civil engineering journal, 2019, 52(4): 109-120.
- [8] SCHRIEBER C F, MURRAY R W. Supplementary studies of the galvalum III anode—Hot saline mud and brine environment[J]. Materials Performance, 1981, 20(3): 19-21.
- [9] SCHRIEBER C F, MURRAY R W. Effect of hostile marine environments on the Al-Zn-In-Si sacrificial anode[J]. Materials Performance, 1988, 27(7): 70-77.
- [10] SCHRIEBER C F. The aluminum anode in deep ocean environments[C]//Corrosion/89. Houston, Texas: NACE International, 1989.
- [11] REDING J T. Sacrificial anodes for ocean bottom application[C]//Corrosion/71. Houston, Texas: NACE International, 1971.
- [12] ISO 13174—2012, Cathodic protection of harbor installation[S].
- [13] JTS 153-3—2007, 海港工程钢结构防腐技术规范[S].
JTS 153-3—2007, Technical specification for corrosion protection of steel structures for sea port construction[S].
- [14] SYT 6878-2012, 海底管道牺牲阳极阴极保护[S].
SYT 6878—2012, Cathodic protection for submarine

- pipelines by galvanic anodes[S].
- [15] 许敬, 任中华. 滩海海泥介质中牺牲阳极材料研究[J]. 石油工程建设, 1999, 25(4): 8-11.
XU Jing, RER Zhong-hua. Research on sacrificial positive pole in sea mud medium on offshore beach[J]. Petroleum engineering construction, 1999, 25(4): 8-11.
- [16] 朱承德, 李异. 用于不同温度的海水、海泥中新型高效牺牲阳极的研制[J]. 中国海上油气 工程, 1999, 11(1): 28-31.
ZHU Cheng-de, LI Yi. Development of high efficient new sacrificial anode for sea water and saline at different temperatures[J]. China offshore oil and gas (engineering), 1999, 11(1): 28-31.
- [17] 李异, 戚本盛, 邓和平. 铝合金牺牲阳极在南海海泥中的性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1991, 3(1): 22-26.
LI Yi, QI Ben-sheng, DENG He-ping. Studies on performance of aluminum anode embedded in mud of south sea[J]. Corrosion science and protection technology, 1991, 3(1): 22-26.
- [18] ZHAO Y T. A high performance aluminum alloy sacrificial anode suit for high resistivity corrosive medium: China, 10908965.X [P]. 2017-05-10.
- [19] ZHAO Y T. Design on sacrificial anode protection of immersed tunnel and numerical optimization[C]// 2018 international symposium on corrosion control of ships and offshore structures (CCSOS). Qingdao: [s. n.], 2018.
- [20] 赵永韬, 宋神友, 汪相辰, 等. 海底结构牺牲阳极保护仿真计算和物模实验验证[C]//第十届全国腐蚀大会. 南昌, 2019.
ZHAO Y T, SONG S Y, WANG X C, et al. Design and verification of galvanic cathodic protection based on simulation modeling[C]//10th sino corr conference. Nanchang, 2019.