**行业标准**

**YS /T XXXX－XX《锌及锌合金牺牲阳极》**

**编制说明**

**（送审稿）**

《锌及锌合金牺牲阳极》标准起草小组

**2020年08月**

**一、工作简况**

**1.1 任务来源**

根据工信部《工业和信息化部办公厅关于印发2018年第四批行业标准制修订计划的通知》（工信厅科[2018]73号）及全国有色金属标准化技术委员会《关于转发2019年第一批有色金属行业标准、协会标准制（修）订项目计划的通知》有色标委[2019]10号的文件精神，由厦门火炬特种金属材料有限公司负责起草《锌及锌合金牺牲阳极》行业标准，项目计划编号2018-2067T-YS，计划于2020年完成。

**1.2 标准制定的必要性**

阴极保护用牺牲阳极常用的金属材料主要包括镁合金牺牲阳极、铝合金牺牲阳极、锌及锌合金牺牲阳极（以下简称锌阳极）三大类。镁合金牺牲阳极和铝合金牺牲阳极均有成熟完整的标准可以引用，而目前锌阳极在应用领域中缺乏系统的、完整的锌阳极产品标准。

锌阳极适用于温度低于50℃和电阻率小于15 Ω·m的海水、淡海水、土壤等电解质中的金属构件阴极保护，目前已广泛应用于船舶、港工设施、海洋工程、埋地金属管道、储罐、海水冷却水系统等钢结构阴极保护，以及可以应用于锌接地极、参比电极、接地电池、防交流干扰等特殊用途领域。而且在某些应用领域中, 锌阳极特别是带状锌阳极的作用具有其它材料所不能取代的重要位置。不过也有一些应用在国内还属发展阶段,，还落后于国外，国内具有很大的发展潜力。目前国内需求量到达4000吨以上，其中带状锌阳极1000余吨。

因此，起草制定的《锌及锌合金牺牲阳极》标准将在广泛调研，引用现有船舶、石油领域提到锌阳极产品种类的基础上，补充新的产品种类，完善产品的技术要求，形成一项包含多个应用领域专门针对锌阳极产品的新标准，可以同时在船舶、石油和其它相关领域使用。

**1.3标准项目的可行性及拟解决的问题**

目前国内外暂无适用于包含多个应用领域锌阳极产品的标准。锌阳极阴极保护目前主要在船舶和石油行业中应用较多，船舶和石油相关标准中有涉及锌阳极的应用要求，但主要是针对锌阳极应用而不是针对产品特性和具体要求，产品种类、产品技术要求也不尽相同，只适合本行业使用，目前没有系统、完整的锌阳极标准可以引用。但随着阴极保护技术的发展和新产品的应用，锌阳极的使用领域越来越广，客户对产品种类以及性能指标又提出了新的要求。原有的应用范围较窄，产品种类不完整、一些具体产品技术要求不明确、不统一等问题逐渐暴露出来，行业迫切需要能充分体现锌阳极完整产品种类和产品要求的标准参考应用。

起草制定《锌及锌合金牺牲阳极》标准具有非常重要的现实意义，能弥补和解决目前市场上针对锌阳极产品标准缺失的问题，进一步推动锌阳极应用和加强我国船舶、港工、基础设施和工程建设钢构件等领域的阴极保护工作，减少由于腐蚀、交流干扰等问题造成的经济损失。

**1.4 承担单位情况及主要工作过程**

**1.4.1承担单位情况**

有研科技集团有限公司（原北京有色金属研究总院）创建于1952年，是我国有色金属行业规模最大的综合性研究开发机构。厦门火炬特种金属材料有限公司成立于1992年，属有研集团控股公司。专业从事防腐阳极的研发、生产、销售和技术服务，主要产品为镁、铝和锌基牺牲阳极。在过去的20多年的发展中，我公司以有研集团强大的科研能力及自身研发力量为技术依托，密切追踪国内外先进技术与新产品信息，不断向市场推出高性能新产品，创造了防腐阳极领域的多个“第一”：率先开发出具有国际水平、国内独一无二的Mg-Mn高电位镁合金牺牲阳极制备技术；开发出工艺独特、国内首创的复合挤压工艺技术，攻克了镁合金基体与铁芯的无缝隙包覆和挤压成型难题；国内首家建立牺牲阳极电化学性能检测实验室并参与相关国标的制定；开发出能在-20℃低温环境下使用的高品质锌阳极带，综合性能达到国内领先水平。镁阳极及其产业化于1999年被科技部评定为“国家新产品”，2003年被科技部列为“科技兴贸行动计划项目”，2005年货“中国有色金属工业科学技术奖”二等奖，获十多项知识产权专利保护，企业通过ISO9001质量管理体系认证和6S现场管理体系认证。

国标（北京）检验认证有限公司前身是北京有色金属研究总院分析测试技术研究所，是国家有色金属行业最知名的第三方检验机构。国标（北京）检验认证有限公司运营管理着国家有色金属及电子材料分析测试中心和国家有色金属质量监督检验中心，拥有一支基础理论扎实、实践经验丰富的研究和服务队伍，自2004年至今共承担了国家科技支撑计划、国家863计划、国家自然科学基金、军工配套等省部级科技项目40余项；曾获国家科技进步奖6项，国家发明奖3项，省部级科技进步一等奖10项，二、三等奖107项；近5年获得国家发明专利20余项；负责和参加起草制订分析方法国家标准、行业标准300余项；国家标准物质/标准样品120个，在国内外科技期刊上发表论文800余篇，撰写论著22部。

**1.4.2主要工作过程**

2019年3月，厦门火炬特种金属材料有限公司接受《锌及锌合金牺牲阳极》行业标准编制任务后，成立了《锌及锌合金牺牲阳极》行业标准编制组。标准编制工作组成员查阅了相关资料，如ASTM B418-2016 《Standard Specification for Cast and Wrought Galavanic Zinc Anode》， MIL-A-18001K 《Military Specification Anode Sacrificial Zinc Alloy》， JIS H2107- 2015 《Zinc Ingots》，AS2239-2003 《Galvanic(sacrificial ) anodes for cathodic protection》 ，GB/T 4950-2002 《锌-铝-镉牺牲阳极》，GB/T 21448-2008 《埋地钢质管道阴极保护技术规范》，GB/T 470 《锌锭》等，并结合厦门火炬特种金属材料有限公司多年对锌及锌合金牺牲阳极的研究情况，编制组组织相关技术和管理人员进行多次讨论后，2019年10月初步确定了《锌及锌合金》的主要技术指标，提出了该版的讨论稿。

2019年11月27日，在深圳召开了首次讨论会，浙江海亮股份有限公司、中铝洛阳铜加工有限公司等10余家单位参加。会上各与会单位对本标准讨论稿进行了充分讨论。在整理、讨论和完善了相关意见和建议后，于2020年5月形成了该版预审稿。

2020年6月，通过视频及杭州现场召开了预审稿会议，对标准进行了审议，与会专家提出了许多数据方面的问题并给出了较好的合理化建议。

本稿形成期间，自2019年11月份-2020年8月份，共发出征求意见表21份，共收到回复21份，涉及标准18项条款，经标准编制组讨论，均对回馈的意见分别予以处置（其中19份采纳，2份不采纳）回馈意见及处置见下表：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 标准章节编号 | 意见内容 | 提出单位 | 处理意见 | 备注 |
| 1 | 1 | “淡海水”这个名称是否规范 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 不采纳 | “淡海水”名称是规范名称，指与海水混合的淡水，密度在每立方米1000~1260千克之间。 |
| 2 | 2 | GB/T 4951、GB/T 12689 、GB/T 13912 、GB/T 17848上述标准需使用最新版本 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 |  |
| 3 | 3.3 | 中心度定义不规范 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 | 改为“同心度”。 |
| 4 | 4.1.1 | 建议用表格的形式将锌阳极的分类和型号表示方法列出，不要直接引用GB/T 4950-2002 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 |  |
| 5 | 4.1.2 | 在本标准中Zn代表是锌及锌合金阳极，与而GB/T 4950-2002中Z代表锌-铝-镉合金牺牲阳极，代号矛盾，容易混淆 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 | 统一用“Z”代表锌阳极，加工方法分别用铸造和挤压的英文名称的首字母“C”和“E表示”。 |
| 6 | 4.2 | 去掉4.2锌阳极规格、参数和结构形式，内容与5.3合并 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 |  |
| 7 | 4.2.2 | 叫“带状”不妥，对应带材是指厚度不大于宽度的1/10。建议标准中“带状”改为“卷状” | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 |  |
| 8 | 5.1 | 表4中的杂质总和要明确有哪些杂质，余量Zn是否需要检测？是差减还是实测？ | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 | 去掉“杂质总和”，并在注解中注明Zn含量为100%减去表中元素实测值所得。 |
| 9 | 5.3 | 重量和尺寸偏差需放在电化学性能之前 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 |  |
| 10 | 5.4.1 | “铸造锌阳极表面可为铸造面”表述有歧义。 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 | 去掉“铸造锌阳极表面可为铸造面”这句话。 |
| 11 | 5.4.1 | 关于铸造缩孔深度的描述应该更加精确 | 浙江力博实业有限公司 | 采纳 |  |
| 12 | 5.4.2 | 挤压阳极的表面不允许有影响用户使用的缺陷，这个影响条件很难界定，需要明确说明。 | 浙江海亮股份有限公司 | 采纳 |  |
| 13 | 5.7 | 弯曲性能需放在5.5铁脚和钢芯前面 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 |  |
| 14 | 6.1 | 化学成分中各元素对应的检测方法都需要明确指出。 | 宁波博德高科股份有限公司 | 采纳 |  |
| 15 | 6.7 | 接触电阻测试仪的设备要求以及测试方法需要明确写出。 | 广州有色金属研究院 | 采纳 |  |
| 16 | 6.8 | 弯曲试验操作方法可参考GB/T 232标准，具体描述清楚。 | 绍兴市质量技术监督检测所 | 不采纳 | GB/T232弯曲试验采用的是三点弯曲法，不适用于评估卷装锌阳极的弯曲性能。为便于用户更好的理解和操作弯曲试验，特增加附录B，用于指导弯曲试验操作。 |
| 17 | 7.1.2 | 需方收到货品对检测结果有异议时，需要在规定时间内向供方提出。 | 中色奥博特铜铝业有限公司 | 采纳 |  |
| 18 | 7.2 | 组批应考虑设定一个最大限重。 | 佛山市华鸿铜管有限公司 | 采纳 | 检验批限重设定为60t。 |
| 19 | 7.4 | 表12中“化学成分取点分布均匀并且不少于5点”，表述不准确，到底是每支（或卷）取5点，还是一共取5点 | 全国重金属标准化分技术委员会 | 采纳 | 改为“每个试样上的取样量为不少于20g的碎屑”。 |
| 20 |  | 回函同意，无意见！ | 芜湖恒鑫铜业有限公司 |  |  |
| 21 |  | 回函同意，无意见！ | 苏州富瑞合金科技股份有限公司 |  |  |

1. **标准编制原则**

本标准起草单位自接受起草任务后，成立了本系列标准编制工作组负责收集生产统计、检验数据、市场需求及客户要求等信息。初步确定了《锌及锌合金牺牲阳极》标准起草所遵循的基本原则和编制依据：

1. 以满足国内外锌及锌合金牺牲阳极的实际生产和使用的需要为原则，提高标准的适用性。
2. 以与实际结合为原则，提高标准的合理性和可操作性。
3. 根据技术发展水平及测试数据确定技术指标取值范围；
4. 完全按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定编写。

**三、标准主要内容的依据**

**3.1适用范围**

本标准规定了锌及锌合金牺牲阳极(以下简称锌阳极)的分类和标记、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存及随行文件和订货单内容。

本标准适用于在温度低于50℃和电阻率小于15Ω·m的海水、淡海水、土壤等电解质中的金属构件阴极保护用的锌阳极的设计、制造、检验、贮存等，包括船舶、港工设施、海洋工程、埋地金属管道、储罐、海水冷却水系统等钢结构阴极保护用的锌阳极，以及锌接地极、参比电极、接地电池、防交流干扰等特殊用途领域。

**3.2 产品分类**

根据目前锌阳极市场实际使用情况，参考GB/T 4950-2002«锌-铝-镉牺牲阳极»中产品分类，按照加工方式及形状对锌阳极进行产品分类，以便于客户灵活选择，相关情况说明如下：

（1）目前锌阳极的状态按生产方法主要分为铸造和挤压，其状态代号按GB/T 340-1976《有色金属及合金产品牌号表示方法》规定执行。其中铸造锌阳极的型号代号参照GB/T 4950-2002中4.1进行表示；挤压锌阳极型号代号则按照材质、形状代号、规格型号的顺序进行表示。

（2）铸造态的锌阳极的形状和尺寸执行GB/T 4950-2002《锌-铝-镉牺牲阳极》中的全部规定，新增了挤压生产的带状锌阳极和棒状锌阳极的形状尺寸和重量，并结合目前市场需求现状，将带状锌阳极依据截面大小分为4种型号；棒状锌阳极的直径区间确定为12≤A≤50mm，长度区间确定为200≤L≤1500mm。

（3）锌阳极的标记：按照GB/T 1.1-2020的规定，锌阳极产品标记产品名称、 文件编号、牌号、生产方法、型号代号的顺序来表示。

**3.3 化学成分**

本标准在调研了国内外市场现有锌阳极的种类后，确定3个牌号的锌阳极。其中Zn99.98和ZnAl0.3Cd05牌号锌阳极直接引用ASTM B418标准中化学成分的规定，ZnAl0.5Cd08牌号直接引用GB/T 4950标准中化学成分的规定。我们针对这3个牌号的锌阳极，各收集了100个化学成分数据进行验证，具体验证结果见表1。

表1 锌阳极化学成分测试结果统计表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 牌号 | 样本量 | 化学成分（质量分数）/% | | | | | |
| Al | Cd | Fe | Cu | Pb | Si |
| Zn99.98 | 100 | ＜0.005 | ＜0.001 | ＜0.001 | ＜0.001 | 0.0014～0.0016 | - |
| ZnAl0.3Cd0.05 | 100 | 0.29～0.40 | 0.031～0.040 | ＜0.005 | ＜0.001 | 0.0016～0.0018 | - |
| ZnAl0.5Cd0.08 | 100 | 0.38～0.48 | 0.074～0.090 | ＜0.005 | ＜0.001 | 0.0017～0.0018 | 0.02～0.09 |

根据以上表1实测数据，确定标准正文中这3个牌号的锌阳极的化学成分见表2。

表2 锌阳极化学成分

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 牌号 | 化学成分（质量分数）/% | | | | | | |
| Zn | Al | Cd | Fe | Cu | Pb | Si |
| Zn99.98 | 余量 | 0.005 | 0.003 | 0.0014 | 0.002 | 0.003 | - |
| ZnAl0.3Cd0.05 | 余量 | 0.1～0.5 | 0.025～0.07 | 0.005 | 0.005 | 0.006 | - |
| ZnAl0.5Cd0.08 | 余量 | 0.3～0.6 | 0.05～0.12 | 0.005 | 0.005 | 0.006 | 0.125 |
| 注1：Zn含量为100%减去表中元素实测值所得。  注2：有范围值的元素为合金元素，其他为杂质元素，数值为最高限量。 | | | | | | | |

**3.4尺寸和重量偏差**

3.4.1 铸造锌阳极重量和尺寸偏差沿用GB/T 495-2002标准中的要求。

3.4.2 卷状锌阳极

我们对于卷状锌阳极的尺寸和重量分别进行了检测，具体检测数据见表3-a和表3-b。根据表3-a和表3-b 反映的实际生产控制水平和目前用户使用要求，标准正文中规定卷状锌阳极产品标称尺寸和重量偏差见表4和表5：

表4 卷状锌阳极尺寸及允许偏差

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | D1×D2  mm | D1、D2  允许偏差  mm | 钢芯直径 ∅  mm | 钢芯直径 ∅  允许偏差  mm | 标准卷长 L  m | 标准卷长 L  允许偏差  m | 标准卷内径D  mm | 钢芯的同心度  mm |
| ZR-1 | 25.4×31.8 | ±1.0 | 4.70 | ±0.4 | 30.5 | +0.60，-0 | 850～950 | ≤2 |
| ZR-2 | 15.9×22.2 | ±1.0 | 3.43 | ±0.4 | 61 | +1.20，-0 | 550～600 |
| ZR-3 | 12.7×14.3 | ±1.0 | 3.30 | ±0.3 | 152 | +3.00，-0 | 300～350 |
| ZR-4 | 8.7×10.3 | ±0.8 | 2.92 | ±0.3 | 305 | +3.00，-0 | 300～350 |

表5 卷状锌阳极重量及允许偏差

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 每米质量  kg/m | 每米质量允许偏差  kg/m | 标准卷（含铁芯）净重  kg | 标准卷（含铁芯）净重允许偏差 | 钢芯的同心度  mm |
| ZR-1 | 3.570 | ±5% | 108.9 | +2%，-0% | ≤2 |
| ZR-2 | 1.785 | ±5% | 108.9 | +2%，-0% |
| ZR-3 | 0.893 | ±5% | 135.7 | +2%，-0% |
| ZR-4 | 0.372 | ±5% | 113.5 | +2%，-0% |

表3-a卷状锌阳极尺寸及重量检测数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 样本数量 | D1数据范围 | D2数据范围 | 每米质量数据范围 | 钢芯直径数据范围 | 卷长数据范围 | 卷重数据范围 | 钢芯同心度范围 |
| ZR-1  （25.4×31.8） | 100 | 24.5～26.4 | 30.8～32.8 | 3.396～3.742 | 4.31～5.10 | 30.6～31.10 | 109.0～110.9 | 0.1～2.0 |
| ZR-2  （15.9×22.2） | 100 | 14.9～16.8 | 21.3～22.2 | 1.721～1.872 | 3.04～3.83 | 61～62 | 108.9～110.9 | 0.1～2.0 |
| ZR-3  （12.7×14.3） | 100 | 11.7～13.5 | 13.3～15.2 | 0.850～0.934 | 3.00～3.59 | 152～155 | 135.7～138.3 | 0.1～2.0 |
| ZR-4  （8.7×10.3） | 100 | 7.9～9.5 | 9.5～11.1 | 0.361～0.390 | 2.63～3.22 | 305～308 | 113.6～115.7 | 0.1～2.0 |

表3-b 卷状锌阳极尺寸及重量偏差数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 样本数量 | D1偏差范围 | D2偏差范围 | 每米质量偏差范围 | 钢芯直径偏差范围 | 卷长偏差范围 | 卷重偏差范围 | 钢芯同心度范围 |
| ZR-1  （25.4×31.8） | 100 | -0.9～1 | -1～1 | -4.87%～4.81% | -0.39～0.4 | 0.33%～1.97% | 0.09%～1.8% | 0.1～2.0 |
| ZR-2  （15.9×22.2） | 100 | -1～0.9 | -0.9～0 | -3.6%～4.87% | -0.39～0.4 | 0～1.64% | 0～1.8% | 0.1～2.0 |
| ZR-3  （12.7×14.3） | 100 | -0.8～1.0 | -0.9～1.0 | -4.82%～4.59 | -0.3～0.29 | 0～1.97% | 0～1.92% | 0.1～2.0 |
| ZR-4  （8.7×10.3） | 100 | -0.8～0.8 | -0.8～0.8 | -2.96%～4.84% | -0.29～0.3 | 0～0.98% | 0.09%～1.94% | 0.1～2.0 |

3.4.3 棒状锌阳极的尺寸和重量偏差

我们对于卷状锌阳极和棒状锌阳极的重量和尺寸分别进行了检测，具体检测数据见表6。根据表6-a和表6-b反映的实际生产控制水平和目前用户使用要求，规定棒状锌阳极产品标称尺寸及重量偏差按表7规定进行。

表7 棒状锌阳极尺寸、重量及允许偏差

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | A  mm | A允许偏差  mm | B  mm | B允许偏差  mm | C  mm | C允许偏差  mm | 每米质量（含铁芯）  kg/m | 每米质量（含铁芯）允许偏差  kg/m | L  mm | 钢芯的同心度  mm |
| ZB-1 | 12 | ±0.5 | - | - | - | - | 0.81 | ±5% | 200～1200 | ≤1 |
| ZB-2 | 16 | ±0.5 | - | - | - | - | 1.43 | ±5% | 200～1800 |
| ZB-3 | 25 | ±0.5 | 3.4 | ±0.3 | 50 | ±1 | 3.50 | ±5% | 300～1800 |
| ZB-4 | 33 | ±0.5 | 4.2 | ±0.3 | 100 | ±1 | 6.10 | ±5% | 300～1800 |
| ZB-5 | 50 | ±0.5 | - | - | - | - | 14.01 | ±5% | 300～800 |

根据表6-c和表6-d反映的实际生产控制水平和目前用户使用要求，规定棒状锌阳极产品长度及偏差按表8规定进行。

表8 棒状锌阳极长度允许偏差

单位：mm

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 长度L | 200≤L＜500 | 500≤L＜1000 | 1000≤L≤1800 |
| 长度允许偏差 | ±3 | ±4 | ±5 |

**3.5 电化学性能**

参考AS 2239-2003、GB/T 21448-2008以及GB/T 4950-2002标准中电化学性能要求，本标准仍然根据不同的使用环境对锌阳极的电化学性能给出了参考指标。其中Zn99.98牌号锌阳极在海水环境中的开路电位指标引用AS 2239-2003标准，海水中实际电容量、电流效率以及土壤介质中的电化学性能指标沿用GB/T 21448-2008标准。ZnAl0.3Cd05牌号锌阳极电化学性能指标直接引用GB/T 21448-2008标准。ZnAl0.5Cd08牌号锌阳极在海水环境中的开路电位指标在GB/T 4950-2002标准基础上进行了修订，其他指标沿用GB/T 4950-2002标准。我们针对这3个牌号锌阳极，按照GB/T17848标准测试方法，分别在海水和土壤环境介质中收集了一定量数据进行验证。其中电流效率η的计算，采用如下公式进行：

……………………（1）

表6-a棒状锌阳极尺寸及重量检测数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 样本数量 | A数据范围 | B数据范围 | C数据范围 | 每米净重数据范围 | 钢芯同心度范围 |
| ZB-1 | 100 | 11.5～12.5 | - | - | 0.77～0.85 | 0.1～1 |
| ZB-2 | 100 | 15.6～16.5 | - | - | 1.36～1.49 | 0.1～1 |
| ZB-3 | 100 | 24.5～25.5 | 3.1～3.7 | 49～51 | 3.35～3.67 | 0.1～1 |
| ZB-4 | 100 | 32.5～33.5 | 3.9～4.4 | 99～101 | 5.80～6.40 | 0.1～1 |
| ZB-5 | 100 | 49.5～50.4 | - | - | 13.31～14.70 | 0.1～1 |

表6-b棒状锌阳极尺寸及重量偏差数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 样本数量 | A数据偏差范围 | B数据偏差范围 | C数据偏差范围 | 每米净重偏差范围 | 钢芯同心度范围 |
| ZB-1 | 100 | -0.5～0.5 | - | - | -4.94%～4.94% | 0.1～1 |
| ZB-2 | 100 | -0.4～0.5 | - | - | -4.90%～4.20% | 0.1～1 |
| ZB-3 | 100 | -0.5～0.5 | -0.3～0.3 | -1～1 | -4.29%～4.86% | 0.1～1 |
| ZB-4 | 100 | -0.5～0.5 | -0.3～0.2 | -1～1 | -4.92%～4.92% | 0.1～1 |
| ZB-5 | 100 | -0.5～0.4 | - | - | -4.99%～4.93% | 0.1～1 |

表6-c ZB-2棒状锌阳极长度检测数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 标称长度/mm | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 | 1200 | 1500 | 1800 |
| 实测长度  数据范围/mm | 198～201 | 297～302 | 497～502 | 796～803 | 996～1002 | 1195～1204 | 1495～1504 | 1795～1802 |

表6-d ZB-2棒状锌阳极长度偏差数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 标称长度/mm | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 | 1200 | 1500 | 1800 |
| 实测长度  偏差范围/mm | -2～1 | -3～2 | -3～2 | -4～3 | -4～2 | -5～4 | -5～4 | -5～2 |

式中：

*Q0*—理论电容量，单位安培小时每千克（A·h/kg）

*A、B、C*—合金成分质量百分比，单位%

*X、Y、Z*—合金成分的理论电容量，单位安培小时每千克（A·h/kg）

…………………………………（2）

式中：

*Qg*—实际电容量，单位安培小时每千克（A·h/kg）

*Q1*—电子库仑计读数，单位安培秒（A·S）

*m1*—锌阳极试样试验前初始重量，单位kg

*m2*—锌阳极试样试验后最终重量，单位kg

……………………………………（3）

式中：

η—电流效率；

*Qg*—实际电容量，单位安培小时每千克（A·h/kg）

*Q0*—理论电容量，单位安培小时每千克（A·h/kg）

经计算，本标准三个牌号锌阳极的理论电容量均为820 A·h/kg。

**3.5.1 Zn99.98牌号锌阳极电化学性能**

共收集该牌号锌阳极在海水介质和土壤介质电化学性能数据各100组。

3.5.1.1 Zn99.98牌号锌阳极在海水介质中开路电位数据统计频数和频率分布表、分布图见表9和图1，电流效率统计频数和频率分布表、分布图见表10和图2.

表9 Zn99.98锌阳极在海水环境下开路电位频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | -1.070 | [-1.070，-1.080] | 26 | 0.26 |
| 2 | -1.080 | [-1.080，-1.085] | 38 | 0.38 |
| 3 | -1.085 | [-1.085，-1.090] | 22 | 0.22 |
| 4 | -1.090 | [-1.090，-1.095] | 14 | 0.14 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图1 Zn99.98锌阳极在海水环境下开路电位数据分布直方图

表10 Zn99.98锌阳极在海水环境下电流效率频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | 95.50 | [95.0，95.5] | 28 | 0.28 |
| 2 | 96.50 | [95.5，96.5] | 33 | 0.33 |
| 3 | 97.50 | [96.5，97.5] | 22 | 0.22 |
| 4 | 98.50 | [97.5，98.5] | 17 | 0.17 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图2 Zn99.98锌阳极在海水环境下电流效率数据分布直方图

3.5.1.2 Zn99.98牌号锌阳极在土壤介质中开路电位数据统计频数和频率分布表、分布图见表11和图3，电流效率统计频数和频率分布表、分布图见表12和图4。

表11 Zn99.98锌阳极在土壤环境下开路电位频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | -1.070 | [-1.070，-1.080] | 23 | 0.23 |
| 2 | -1.080 | [-1.080，-1.085] | 32 | 0.32 |
| 3 | -1.085 | [-1.085，-1.090] | 25 | 0.25 |
| 4 | -1.090 | [-1.090，-1.100] | 20 | 0.20 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图3 Zn99.98锌阳极在土壤环境下开路电位数据分布直方图

表12 Zn99.98锌阳极在土壤环境下电流效率频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | 67.00 | [65，67] | 22 | 0.22 |
| 2 | 69.00 | [67，69] | 24 | 0.24 |
| 3 | 71.00 | [69，71] | 37 | 0.37 |
| 4 | 73.00 | [71，73] | 17 | 0.17 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图4 Zn99.98锌阳极在土壤环境下电流效率数据分布直方图

由图表可知，Zn99.98牌号锌阳极在海水环境和土壤环境条件下开路电位、电流效率均在标准正文中表7和表8确定的指标范围内，由公式（3）计算可知，实际电容量在标准正文中表7和表8确定的指标范围内。各项指标制定合理，该产品属于成熟产品。

**3.5.2 ZnAl0.3Cd0.05牌号锌阳极电化学性能**

共收集该牌号锌阳极在海水和土壤介质电化学性能数据各100组。

3.5.2.1 ZnAl0.3Cd0.05牌号锌阳极在海水介质中开路电位数据统计频数和频率分布表、分布图见表13和图5；电流效率统计频数和频率分布表、分布图见表14和图6：

表13 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在海水环境下开路电位频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | -1.030 | [-1.030，-1.040] | 9 | 0.09 |
| 2 | -1.045 | [-1.040，-1.060] | 23 | 0.23 |
| 3 | -1.060 | [-1.060，-1.085] | 35 | 0.35 |
| 4 | -1.085 | [-1.085，-1.100 | 33 | 0.33 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图5 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在海水环境下开路电位数据分布直方图

表14 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在海水环境下电流效率频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | 92.00 | [90，92] | 23 | 0.23 |
| 2 | 94.00 | [92，94] | 27 | 0.27 |
| 3 | 96.00 | [94，96] | 36 | 0.36 |
| 4 | 98.00 | [96，98] | 14 | 0.14 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图6 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在海水环境下电流效率数据分布直方图

3.5.2.2 ZnAl0.3Cd0.05牌号锌阳极在土壤介质中开路电位数据统计频数和频率分布表、分布图见表15和图7，电流效率统计频数和频率分布表、分布图见表16和图8。

表15 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在土壤环境下开路电位频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | -1.030 | [-1.030，-1.050] | 33 | 0.33 |
| 2 | -1.050 | [-1.050，-1.070] | 42 | 0.42 |
| 3 | -1.070 | [-1.070，-1.080] | 18 | 0.18 |
| 4 | -1.080 | [-1.080，-1.100] | 7 | 0.07 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图7 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在土壤环境下开路电位数据分布直方图

表16 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在土壤环境下电流效率频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | 67.00 | [65，67] | 31 | 0.31 |
| 2 | 69.00 | [67，69] | 38 | 0.38 |
| 3 | 71.00 | [69，71] | 21 | 0.21 |
| 4 | 73.00 | [71，73] | 10 | 0.10 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图8 ZnAl0.3Cd0.05锌阳极在土壤环境下电流效率数据分布直方图

由图表可知，ZnAl0.3Cd0.05牌号锌阳极在海水环境和土壤环境条件下开路电位、电流效率均标准正文中表7和表8确定的在指标范围内，由公式（3）计算可知，实际电容量在标准正文中表7和表8确定的指标范围内。各项指标制定合理，该产品属于成熟产品。

**3.5.3 ZnAl0.5Cd0.08牌号锌阳极电化学性能**

共收集该牌号锌阳极在海水介质和土壤介质电化学性能数据各100组。

3.5.3.1 ZnAl0.5Cd0.08牌号锌阳极在海水介质中开路电位数据统计频数和频率分布表、分布图见表17和图9；电流效率统计频数和频率分布表、分布图见表18和图10。

表17 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在海水环境下开路电位频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | -0.980 | [-0.980，-1.000] | 27 | 0.27 |
| 2 | -1.000 | [-1.000，-1.020] | 39 | 0.39 |
| 3 | -1.020 | [-1.020，-1.030] | 22 | 0.22 |
| 4 | -1.030 | [-1.030，-1.040] | 12 | 0.12 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图9 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在海水环境下开路电位数据分布直方图

表18 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在海水环境下电流效率频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | 95.50 | [95.0，95.5] | 20 | 0.20 |
| 2 | 96.50 | [95.5，96.5] | 41 | 0.41 |
| 3 | 97.50 | [96.5，97.5] | 24 | 0.24 |
| 4 | 98.50 | [97.5，98.5] | 15 | 0.15 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图10 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在海水环境下电流效率数据分布直方图

3.5.3.2 ZnAl0.5Cd0.08牌号锌阳极在土壤介质中开路电位数据统计频数和频率分布表、分布图见表19和图11，电流效率统计频数和频率分布表、分布图见表20和图12。

表19 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在土壤环境下开路电位频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | -0.980 | [-0.980，-1.000] | 23 | 0.23 |
| 2 | -1.000 | [-1.000，-1.020] | 36 | 0.36 |
| 3 | -1.020 | [-1.020，-1.030] | 26 | 0.26 |
| 4 | -1.030 | [-1.030，-1.040] | 15 | 0.15 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图11 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在土壤环境下开路电位数据分布直方图

表20 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在土壤环境下电流效率频数和频率分布表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 分割点 | 区间 | 频数 | 频率 |
| 1 | 67.00 | [65，67] | 27 | 0.27 |
| 2 | 69.00 | [67，69] | 42 | 0.42 |
| 3 | 71.00 | [69，71] | 22 | 0.22 |
| 4 | 73.00 | [71，73] | 9 | 0.09 |
| 合计 |  |  | 100 |  |

图12 ZnAl0.5Cd0.08锌阳极在土壤环境下电流效率数据分布直方图

由图表可知，ZnAl0.5Cd0.08牌号锌阳极在海水环境和土壤环境条件下开路电位、电流效率均在标准正文中表7和表8确定的指标范围内，由公式（3）计算可知，实际电容量在标准正文中表7和表8确定的指标范围内。各项指标制定合理，该产品属于成熟产品。

**3.6 卷状锌阳极弯曲性能**

弯曲性能是卷状锌阳极在实际使用过程中一个重要的性能指标，直接影响到客户正常使用，特别是在低温施工中。因此，本标准首次将卷状锌阳极的弯曲性能做出明确要求。弯曲直径的大小可以直接反映卷状锌阳极的弯曲性能。此次通过我们在实践中积累的弯曲直径数据，对卷状锌阳极的弯曲性能做出了明确规定，具体测试数据见表21。在弯曲测试中，每个弯曲直径测试样本数量为100个，取适当的长度沿相应弯曲直径的卷筒弯曲一周，再展开，以弯曲后锌阳极凸面不出现裂纹，展开后锌阳极不断裂，为合格标准。

表21-a 普通级卷状锌阳极的弯曲直径测试数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 普通级型号 | 弯曲直径/mm | | | | | | |
| 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 |
| 合格数量 | | | | | | |
| ZR-1 | - | - | - | 0 | 24 | 100 | 100 |
| ZR-2 | 0 | 6 | 33 | 100 | 100 | - | - |
| ZR-3 | 17 | 100 | 100 | - | - | - | - |
| ZR-4 | 36 | 100 | 100 | - | - | - | - |

表21-b 高精级卷状锌阳极的弯曲直径测试数据

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 高精级型号 | 弯曲直径，合格数量 | | | | | |
| 150 | 180 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 合格数量 | | | | | |
| ZR-1 | - | - | 0 | 12 | 100 | 100 |
| ZR-2 | - | - | 0 | 18 | 100 | 100 |
| ZR-3 | 7 | 100 | 100 | - | - | - |
| ZR-4 | 15 | 100 | 100 | - | - | - |

综上数据，我们将各规格卷状锌阳极的弯曲直径确定按表22规定进行。

表22 卷状锌阳极的弯曲直径

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 型号 | 弯曲直径  mm | |
| 普通级 | 高精级 |
| ZR-1 | ≤500 | ≤300 |
| ZR-2 | ≤400 | ≤300 |
| ZR-3 | ≤300 | ≤180 |
| ZR-4 | ≤300 | ≤180 |

**3.7 锌阳极基体和铁脚之间的接触电阻**

锌阳极基体和铁脚之间的接触电阻直接引用GB/T 4950标准中的要求。

**四 标准水平分析**

通过文献检索和网上查询，国内外关于锌及锌合金牺牲阳极标准主要有以下几个：

（1）美国标准： ASTM B418-2016标准中的牌号TypeII与本标准的Zn99.98牌号化学成分一致，TypeI与本标准的ZnAl0.3Cd0.05牌号化学成分一致。标准中对化学成分、连接方式、表面质量、取样方法等做了规定，但没有具体区分产品种类，也没有对重量、尺寸、钢芯接触电阻、卷状锌阳极的弯曲性能做出规定，同时也缺少电化学性能指标及测试方法。

（2）美国标准： MIL-DTL-18001L-2013标准中只有一个牌号，与本标准的ZnAl0.3Cd0.05牌号化学成分一致。该标准对此牌号锌阳极化学成分、形状、尺寸、卷状锌阳极弯曲性能、等做了具体规定，但未涉及其他牌号锌阳极，同时也缺乏电化学性能指标及测试方法。

（3）澳大利亚标准：AS2239-2003标准中的牌号同样分为TypeI和TypeII，化学成分与ASTM B418完全相同。该标准中对锌阳极的形状、尺寸、化学成分、电化学性能做了具体规定。对于挤压阳极，只列出了典型形状，但对尺寸、重量未做说明，同时也缺少卷状锌阳极的弯曲性能。

（4）欧盟标准：只涉及铸造锌阳极，并且主要用于海洋设施的阴极保护工程中。EN12496-2013针对铸造锌阳极的牌号、化学成分、电化学性能、重量、几何尺寸、表面质量做出了详细规定，但同样缺少对挤压锌阳极的规定。DNVGL-RP-B401-2017、DNVGL-RP-F103-2016主要是以设计规范为主，只涉及了铸造锌阳极的化学成分和电化学性能，对重量、几何尺寸、表面质量、接触电阻等未做规定。

（4）中国标准：GB/T 4950标准只有一种牌号锌阳极，与本标准ZnAl0.5Cd0.08的化学成分一致，且只针对铸造阳极，没有涉及挤压锌阳极，与本标准相比，内容不够系统和全面。GB/T 21448-2008标准主要是针对埋地钢制管道阴极保护用锌阳极提出了化学成分和电化学性能的规定，并且只涉及卷状和棒状锌阳极，未涉及铸造阳极，并且也未对重量、尺寸、表面质量、接触电阻、卷状锌阳极的弯曲性能等做出规定，与本标准相比，对锌阳极实际生产过程的指导意义不大。

（5）日本暂无针对锌阳极的专项标准。

本标准与其他标准具体指标对比分析表见表23。

综上所述，目前国内外没有针对多个牌号锌阳极在化学成分、电化学性能、重量、几何尺寸、弯曲性能等各项指标覆盖比较完整的参考标准。为了满足国内外市场对锌阳极产品的需要，保证产品质量和企业权益，制订该产品标准具有非常重要的现实意义，能弥补和解决目前市场上针对锌阳极产品完整标准缺失的问题，进一步推动锌阳极应用。本标准结合锌及锌合金牺牲阳极的生产情况和市场应用情况，参照美国ASTM B418-2016《Standard Specification for Cast and Wrought Galavanic Zinc Anode》、MIL-A-18001K 《Military Specification Anode Sacrificial Zinc Alloy》、AS2239-2003 《Galvanic(sacrificial ) anodes for cathodic protection》、GB/T 4950-2002 《锌-铝-镉牺牲阳极》及GB/T 21448-2008 《埋地钢质管道阴极保护技术规范》等标准，将目前国内外用于阴极保护的锌合金牺牲阳极产品进行了梳理、补充和整合，从实际现状出发，完善细化了各项技术指标，形成一项包含多个应用领域、系统且完整的锌阳极产品新标准。本标准首次提出带状锌阳极的弯曲性能等技术指标及测试方法，对于带状锌阳极产品品质提高有了更加清晰的目标和要求。本标准填补了锌及锌合金牺牲阳极产品的标准空白。综上所述，本标准的总体标准水平达到了国际一般水平。

**五 与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性**

目前我国针对锌阳极的标准是GB/T 4950。本标准中的产品分类、牌号以及技术指标涵盖了GB/T 4950标准的内容，在此基础上又补充了其他种类的产品，因此本标准是现有国家标准或行业标准不可替代的，本标准的制定是现行国家标准体系的完善和补充。本标准的制定与现行的相关法律、法规、规章及相关标准的关系不矛盾、不冲突，其相互关系非常协调。是我国锌合金加工行业国家标准体系的补充和发展。

六 **重大分歧意见的处理经过和依据**

无重大分歧。

**七 标准作为强制性标准或推荐性标准的建议**

建议作为中国有色金属标准化技术委员会推荐性标准。

**八 贯彻标准的要求和措施建议**

本标准反映了锌合金牺牲阳极的使用要求，因此可积极向厂家及国内外用户采用本标准。

**九 废止现行有关标准的建议**

无。

**十 其他予以说明的事项**

无

《锌及锌合金牺牲阳极标准编制组》

二〇二〇年八月

表23 本标准与其他标准具体指标对比分析表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 国家 | 标准号 | 牌号 | 产品分类 | 规格形状 | 化学成分 | 电化学性能 | 弯曲性能 | 重量及尺寸偏差 | 表面质量 | 铁脚和钢芯 | 接触电阻 |
| 中国 | 本标准 | Zn99.98（同ASTM B418 TypeII）  ZnAL0.3Cd0.05（同ASTM B418 TypeI）  ZnAL0.3Cd0.08(同GB/T 4950) | 铸造、挤压 | 方形、梯形、异形、卷状、棒状、 | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Si、Zn | 海水、土壤环境下的开路电位、闭路电位、实际电容量、电流效率 | 提及 | 几何尺寸、重量偏差，以及铁芯中心度或同心度 | 提及 | 提及 | 提及 |
| GB/T 4950 | 锌铝镉合金（同本标准ZnAL0.3Cd0.08） | 铸造 | 方形、梯形、异形 | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Si、Zn | 海水、土壤环境下的开路电位、工作电位、实际电容量、电流效率、消耗率 | 未提及 | 几何尺寸、重量偏差 | 提及 | 提及 | 提及 |
| GB/T 21448-2008 | 锌合金（同ASTM B418 TypeI）  高纯锌（同ASTM B418 TypeII） | 未提及 | 棒状、卷状 | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Si、Zn | 海水、土壤环境下的开路电位、实际电容量、电流效率、消耗率 | 未提及 | 未提及 | 未提及 | 未提及 | 未提及 |
| 美国 | ASTM B418-2016 | Type I  Type II | 未提及 | 钻石,正方形,长方形,椭圆形,或其他截面 | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Zn | 未涉及 | 未提及 | 未提及 | 提及 | 提及 | 未提及 |
| MIL-DTL-18001L-2013 | 同ASTM B418 TypeI | 未提及 | 方形、椭圆形、梯形、异形、卷状、棒状 | 同ASTM B418 TypeI | 未涉及 | 提及 | 几何尺寸、重量偏差 | 提及 | 提及 | 未提及 |
| NACE SP0387-2014 | 未提及 | 铸造 | 未具体区分，统称铸造阳极 | 未提及 | 未提及 | 提及 | 几何尺寸、重量范围 | 提及 | 提及 | 未提及 |
| AWWA D106-16 | 同ASTM B418 TypeII | | | | | | | | | |
| 澳大利亚 | AS2239-2003 | Z1 (同ASTM B418 TypeI)  Z2（同ASTM B418 TypeII） | 铸造、挤压 | 方形、梯形、卷状、棒状、异形 | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Si、Zn | 海水、土壤环境下的开路电位、消耗率 | 未提及 | 规定几何尺寸、重量，但没有公差 | 提及 | 提及 | 提及 |
| 欧盟 | EN12496-2013 | Alloy Z1(同ASTM B418 TypeI)  Alloy Z2（同ASTM B418 TypeII）  Alloy Z3  Alloy Z4(高温合金) | 铸造 | 圆柱形、手镯形、 | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Sn、Mg、Zn | 海水/海洋沉积物环境下的工作电位、实际电容量、消耗率，未提及开路电位。 | 未提及 | 几何尺寸、重量范围 | 提及 | 提及 | 未提及 |
| DNVGL-RP-B401-2017 | Zn-base(除Cd外，其余元素同ASTM B418 TypeI) | 铸造 | 细长直立型、嵌入式手镯型 | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Zn | 海水/海洋沉积物环境下的工作电位、实际电容量、消耗率，未提及开路电位。 | 未提及 | 未提及 | 未提及 | 未提及 | 未提及 |
| DNVGL-RP-F103-2016 | Zn anode(同ASTM B418 TypeI) | 铸造 |  | Al、Cd、Fe、Cu、Pb、Zn | 海水/海洋沉积物环境下的工作电位、实际电容量、消耗率，未提及开路电位。 | 未提及 | 未提及 | 未提及 | 未提及 | 未提及 |