

CSCP

中国腐蚀与防护学会标准

T/CSCP 0001--2024

海水和含盐泥砂中阴极保护
用牺牲阳极

Sacrificial anode for cathodic protection in seawater and saline
mud and stone

2024年1月30日发布

2024年1月30日实施

中国腐蚀与防护学会 发布

目 次

目 次.....	II
前 言.....	III
海水和含盐泥砂中阴极保护用牺牲阳极.....	1
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
3.1.....	1
4 牺牲阳极材料及其电化学性能.....	3
4.1 一般要求.....	3
4.2 阳极材料.....	3
4.3 电化学性能.....	3
5 阳极试验检验.....	4
5.1 一般要求.....	4
5.2 化学成分.....	4
5.3 重量、尺寸及质量要求.....	5
5.4 电化学性能测试.....	5
5.5 阳极钢芯材料.....	5
5.6 电缆连接.....	6
附录 A（规范性附录）牺牲阳极的化学成分和电化学性能.....	7
附录 B（规范性附录）牺牲阳极重量、尺寸及质量检验.....	11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准的附录A和附录B为规范性附录。

本文件由中国腐蚀与防护学会标准化技术委员会提出并归口。

本文件起草单位：青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司、中国船舶集团有限公司第七二五研究所、太仓市凯德防腐科技有限公司、河南盛世达防腐工程有限公司、费县福瑞成防腐科技有限公司、焦作市华宇镁业有限公司、南通海门鑫瑞船舶配件有限公司、山东豪迈机械制造有限公司、山东电力工程咨询院有限公司、烟台中集来福士海洋工程有限公司

本文件主要起草人：赵永韬、孙明先、李威力、钟显康、贾世磊、张峻萍、郭仕奎、王冬冬、张也平、玄晓阳、张贤慧、董亮、汪相辰、王胜贺、董建业、宋孚彦、王昊宇、曲本文

海水和含盐泥砂中阴极保护用牺牲阳极

1 范围

本文件规定了在海水和含盐泥砂或砂石中阴极保护用铝合金、镁合金和锌合金铸造阳极的化学成分、电化学性能、物理偏差以及试验检验程序的最低要求。

本文件适用于梯形、D 型或圆形截面的铸造阳极和镯式型阳极。其他形状的阳极如半球形、纽扣形等可参照采用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1391	金属覆盖层钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法
GB/T 4948	铝-锌-钢合金牺牲阳极
GB/T 4949	铝-锌-钢系合金牺牲阳极及化学分析方法
GB/T 4950	锌合金牺牲阳极
GB/T 7387	船用参比电极技术条件
GB 8923	涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级
GB/T 13748	镁及镁合金化学分析方法
GB/T 17731	镁合金牺牲阳极
GB/T 17848	牺牲阳极电化学性能试验方法
GB/T 24488	镁合金牺牲阳极电化学性能测试方法
T/CSCP 0007-2022	沉管隧道钢壳外表面防腐蚀技术规范
ASTM B418	锌合金牺牲阳极 (Anode, Sacrificial zinc alloy)
BS EN 12496	海水和含盐泥砂中阴极保护的牺牲阳极 (Galvanic anode cathodic protection in seawater and saline mud)
DNV-RP-B401-2021	阴极保护设计 (Cathodic protection design)
Mil-A-18001k	锌合金牺牲阳极 (Anode, Sacrificial zinc alloy)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

阳极消耗率 anode consumption rate

一年中输出一安培电流所消耗的阳极材料质量，单位，kg/(A·y)。

3.2

理论电容量 anode current capacity

根据法拉第定律计算消耗单位质量的牺牲阳极所产生的的电量，单位 A·h/kg。

3.3

实际电容量 practical current capacity

实际测得的消耗单位质量的牺牲阳极所产生的的电量，单位 $A \cdot h/kg$ 。

3.4

电流效率 current efficiency

牺牲阳极实际电容量与理论电容量的比值。

3.5

工作电位 working potential

当电流在阳极和被保护表面之间流动时，在阳极上测量的电位。

3.6

驱动电压 driving voltage

牺牲阳极工作电位与被保护体的保护电位的差值。

3.7

电化学性能 electrochemcial properties

电势和电流容量的特性，作为阳极的特征，可以通过定量测试来评估。

3.8

冷隔 cold shut

由于不连续浇铸使得后浇铸液与已固化的阳极体产生的表面不一致。

3.9

裂纹 cracking

沿某一路径断裂的金属，产生类似不规则边缘的金属不连续。

3.10

气孔 gas hole

金属液凝固过程中陷入起泡形成的孔洞。

3.11

非金属夹杂物 non-metallic inclusions

熔化或浇铸过程中，困在液态金属中的氧化物和其他耐火材料颗粒。

3.12

收缩凹陷 shrinkage depressions

当浇铸液在模具中凝固而没有额外补偿液-固转变过程中体积的减少时，所产生的自然凹面。

3.13

平贴阳极 flush anode

阳极表面与被保护结构表面接触或非常接近的阳极。（所有术语结束，加句号）

3.14

支架阳极 stand-off anode

阳极相对被保护结构表面保持一定距离的阳极。

3.15

镯式阳极 bracelet anode

由两片半环形或多片阳极组成，安装时形成圆环状固定在管状圆周上的阳极。

3.16

钝化 passivation

金属和所处环境之间的反应而形成的金属表面上薄的致密的钝化膜，因钝化膜而造成的腐蚀速度的降低。

3.17

点蚀 pitting

局部腐蚀导致的点状蚀坑，如从金属表面向内部扩展的空洞。

4 牺牲阳极材料及其电化学性能**4.1 一般要求**

海水或含盐泥砂砂石中的牺牲阳极可采用铝合金、镁合金和锌合金。牺牲阳极在实际应用环境中的适用性及其电化学性能，取决于合金成分、阳极电流密度、环境介质的组成特性和使用温度。

4.2 阳极材料

4.2.1 铝阳极、镁阳极、锌阳极的化学成分和电化学性能应符合附录 A。

4.2.2 阳极应由原生金属合金制成，不能采用再生金属或边角料生产阳极。

4.2.3 用于牺牲阳极保护的阳极化学成分应检测，确保化学成分符合成分范围要求。

4.2.4 牺牲阳极的电化学性能取决于具体的合金成分，它决定了阳极的活化、钝化、电流效率和溶解形貌的变化。杂质元素对阳极电化学性能有不利影响，其含量应严格控制。

4.3 电化学性能**4.3.1 通则**

牺牲阳极材料电化学性能取决于化学成分及其均匀性、电流密度和工作的环境条件。

阳极材料的电化学性能包括：工作电位、电容量、阳极消耗率以及阳极溶解形貌。检测方法见 5.4。

如果阳极在其拟用环境中没有长期电化学性能数据，应进行测试，以确定电流密度、温度对工作电位和阳极性能的影响。

4.3.2 工作电位

阳极的工作电位应负于阴极保护的电位。阳极的工作电位在服役期间应趋于稳定。

4.3.3 电容量

阳极材料在冷热海水、海底泥浆等不同环境条件下的实际电容量不同。

阳极合金的实际电容量应根据具体使用环境做长期测试，并加以记录。

用于海水和含盐泥砂环境中时，阳极实际电容量会随温度的升高而降低。牺牲阳极保护系统设计时应考虑温度升高对阳极电容量的影响。

实际电容量随阳极电流密度的增大而增加。在极低的电流密度下，阳极自腐蚀更明显，实际电容量将显著降低。

4.3.4 阳极消耗率

所有阳极材料的实际消耗率与理论消耗率都有差别。

阳极消耗率与电容量的关系见公示（1）：

$$E = \frac{8760}{Q} \quad (1)$$

式（1）中：

E：阳极消耗率(kg/(A·y))；

Q：电容量(A·h/kg)；

8760：一年的小时数。

5 阳极试验检验

5.1 一般要求

5.1.1 阳极(包括钢芯和支架)的设计应在制造、运输、安装和操作过程中达到规定的性能。阳极、钢芯和附件的尺寸和形状设计应能够承受可能作用在阳极上的机械力，例如波浪、波浪水流、打桩或振动。阳极和钢芯的尺寸应满足安装要求。

5.1.2 潜水器或水下机器人工作的海底区域，可采用支架阳极，其钢芯伸出阳极端面，以减少缠绕电线、绳索等的危险。

5.1.3 应避免二次浇铸填补阳极收缩凹陷。铸造阳极表面凝固之前，阳极的浇铸应一次成型。阳极的表面可通过加热(例如火焰喷射器)保持一段时间液态，但一旦凝固，不允许再熔化，也不允许填充收缩凹陷。

5.1.4 除了平贴阳极和镯式阳极的内表面涂覆涂层，阳极暴露的工作表面不应涂覆涂层。

5.1.5 阳极的物理偏差应按照附录 B 的要求。

5.2 化学成分

5.2.1 阳极材料的性能与化学成分有关。应严格控制合金的化学成分，包括合金元素和杂质。

5.2.2 化学分析试样应按照铸件编号识别。所有的阳极应采用铸件编号进行标识。

5.2.3 通过阳极取样进行化学分析，可验证阳极的化学成分合格与否。为保证后期复测，应采集和储存额外的分析试样。

5.2.4 化学成分检测实行炉批次管理。同一时间同一台熔炼炉浇铸的阳极为为一炉。试样应在铸造开始和结束时从浇铸流中提取。熔炼炉容量<1000kg 的熔炼炉，每炉取一个试样。试样在第一炉开始时、第二炉结束时、第三次炉开始时取样，以此类推。熔炼炉容量≥1 吨，每炉取两个试样做化学分析，炉前、炉后各取 1 个试样。

5.2.5 化学成分检测不合格的炉号试样，应加倍复测，其中一个复测结果不合格，宜判定为该炉阳极不合格。

5.2.6 技术要求中涉及热处理的阳极合金，应详细记录每种炉料的热处理记录。化学分析、温度传感和记录设备应定期校准。

5.3 重量、尺寸及质量要求

- 5.3.1 阳极设计应符合物理性能要求和尺寸偏差。
- 5.3.2 阳极及其钢芯表面或内部缺陷不得影响阳极的运输、安装和使用性能。重量和尺寸偏差以及允许的质量缺陷应符合附录 B。

5.4 电化学性能测试

- 5.4.1 阳极电化学性能要求见附录 A。在没有电化学性能数据的环境中应用时，宜进行相应的电化学性能测试。
- 5.4.2 实验室测试方法宜模拟实际的使用条件(包括测试介质、温度和阳极电流密度)。
- 5.4.3 阳极电化学性能按检测时间分为短期性能测试和长期型式试验，每一种测试方法测试阳极性能的重点不同。
- 5.4.4 短期性能按 GB/T17848 或 GB/T 24488 规定的方法进行。阳极质量控制程序采用短期大电流密度测试方法，每 15 t 一批电化学测试。同时应保留后期复测的试样。短期电化学测试只作为出厂质量检测的依据，而不宜作为牺牲阳极保护的设计依据。
- 5.4.5 新型阳极成分以及没有使用记录或实验数据的阳极，应进行长期型式试验，按照挪威船级社标准 DNV RP-B401-2021 的附录 C 规定的方法进行。海工结构长寿命的牺牲阳极，长期型式试验宜作为强制性要求。长期型式试验结果可作为设计依据。阳极电化学测试应由独立的检验机构进行或在其见证下进行。
- 5.4.6 阳极电化学性能测试结果应包含阳极的溶解形貌，可用于评估阳极溶解活化或钝化趋势。
- 5.4.7 阳极发生点蚀性溶解会导致腐蚀凹坑内形成酸性环境，增加了凹坑内阳极的自腐蚀，造成电容量的损失。这导致阳极材料损耗增加和阳极使用寿命下降。溶解形貌不均匀或发生点蚀性溶解的阳极不宜使用。
- 5.4.8 晶间腐蚀导致阳极体的快速崩解，大大降低阳极的使用寿命。电化学性能测试呈现晶间腐蚀形貌的阳极不宜使用。

5.5 阳极钢芯材料

- 5.5.1 阳极钢芯应满足被保护结构的焊接要求。阳极钢芯材质的碳当量(CE)不应超过将焊接的钢结构 CE 值。CE 值采用公式 (2) 计算：

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (2)$$

如果钢芯材质报告没有完整的化学成分，则可以使用替代的 CE 公式(3)。

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + 0.04 \quad (3)$$

阳极钢芯 CE 值不应超过 0.45。

- 5.5.2 阳极浇铸前应对铸件进行 100%的目视检查。
- 5.5.3 锌阳极或镁阳极，钢芯可采用裸钢或热浸镀锌钢。热浸镀锌应符合 GB/T1391 的要求。喷砂清理或镀锌表面不允许有可见的表面污染。采用裸钢作阳极钢芯，应喷砂清理，应达到 GB 8923.1 规定的 Sa 2.5 级。
- 5.5.4 铝阳极铸造前，钢芯应喷砂清理，应达到 GB 8923.1 规定的 Sa 2.5 级。不得使用镀锌或电镀锌的钢芯。
- 5.5.5 阳极浇铸前不允许钢芯出现锈蚀和/或可见的表面污染。

5.6 电缆连接

5.6.1 对于阳极不直接焊接到被保护结构上，可采用电缆连接。应确保电缆具有牢固的电连接。电缆应采用多股绞合、最小的电缆尺寸为 10 mm^2 截面面积。同时宜考虑辅助固定结构，保障阳极承重。

5.6.2 电缆须采用合适尺寸和固定的电缆接头连接到阳极上。电缆应通过机械压接和焊接或钎焊两种方式固定在挂耳上。电缆接头可通过（螺栓）机械压接或焊接与阳极钢芯连接。电连接点应采用环氧类涂料或相应防腐材料防腐并做好防水密封。

5.6.3 采用电缆连接的阳极，须考虑一定程度的冗余电缆，以防电缆受力损坏。

5.6.4 电缆连接到被保护结构上的阳极安装，须保证机械安全和低电阻连接，如铜钎焊、铝热焊或锁止垫圈和螺母。接触电阻应小于 0.01Ω 。

附录 A
(规范性附录)

牺牲阳极的化学成分和电化学性能

A. 1 铝阳极

A. 1. 1 阳极材料

GB/T 4948-2002 规定的铝阳极适用于本文件,其他铝阳极材料成分范围应符合表 A. 1。化学成分的分析应按 GB/T 4949 规定的方法进行。

表 A. 1 铝阳极的化学成分, wt%

元素	A 1	A 2	A 3	A 4
Zn	2.0 – 6.0	2.5 – 5.75	4.75 – 5.75	4.0 – 6.0
In	0.010 – 0.030	0.015 - 0.040	0.016 – 0.020	0.015 – 0.030
Fe	≤ 0.12	≤ 0.09	≤ 0.06	≤ 0.07
Si	≤ 0.12	≤ 0.12	0.08 – 0.12	0.05 – 0.40
Cu	≤ 0.006	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.003
Cd	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002	-
Ti	-	-	-	0.001 – 0.03
Sn	-	-	-	0.001 – 0.02
其他(每个)	≤ 0.02	≤ 0.02	0.02	≤ 0.02
其他(总)	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.05
Al	余量	余量	余量	余量

注 1: 铝阳极 A1 可用于船舶领域; 铝阳极 A2 可用于海油工程; 铝阳极 A3 可用于深海和冷水; 铝阳极 A4 可用于高电阻率环境介质。如抛石埋覆、海泥和砂石埋覆下的海底环境。

注 2: A1 和 A3 符合 BS EN 12496 的 A1 和 A3 规定, A2 符合 DNV-RP-B401 规定, A4 符合 T/CSCP 0007-2022 规定。

注 3: 铝阳极宜用于盐度大于 5g/kg 的介质, 即电阻率小于 $2 \Omega \cdot m$ 的海水或咸水。

A. 1. 2 电化学性能

铝阳极的电化学性能可按 GB/T17848 规定的方法进行。铝阳极电化学性能数据应符合表 A. 2。

铝阳极的实际电流容量应根据至少 12 个月的长期性能试验或根据长期实际经验确定。可依照挪威船级社标准 DNV RP-B401 的附录 C。短期性能测试由于采用了比较高的电流密度, 电容量测定值会偏高。没有阳极长期电化学性能数据情况下, 应采用保守的电容量设计值。

较高的工作温度下, 铝阳极电容量将显著降低。例如, 铝阳极 A1 和 A2 的电容量从 25℃ 时的 2500 A·h/kg 下降到 80℃ 时的 500 A·h/kg (即: 阳极消耗速率从在 25℃ 时 3.5 kg/(A·a) 上升到 80℃ 时 17.5 kg/(A·a))。在含盐泥砂中、高温下阳极电容量值将低于海水的电容量值。

盐水、不同盐度的海水或海底沉积物环境, 无论是否有硫化氢(H_2S), 都会导致铝阳极电化学性能变化。

表 A.2 铝阳极电化学性能 (5°C~25°C)

合金类型	环境	工作电位 (Ag/AgCl/海水参比电极) V	实际电容量 A·h/kg	阳极消耗率 kg/(A·a)
A 1	海水	≤ -1.09	≥ 2500	≤ 3.5
	海底沉积物	≤ -1.05	≥ 2000	≤ 4.4
A 2	海水	≤ -1.09	≥ 2500	≤ 3.5
	海底沉积物	≤ -1.05	≥ 2000	≤ 4.4
A 3	海水	≤ -1.09	≥ 2500	≤ 3.5
	海底沉积物	≤ -1.05	≥ 2000	≤ 4.4
A 4	海水	≤ -1.05	≥ 2600	≤ 3.4
	70Ω·cm~80 Ω·cm 淡水	≤ -1.05	≥ 2600	≤ 3.4
	8mm~40 mm 砂石 /40Ω·cm 淡水	≤ -0.95	≥ 2000	≤ 4.4

A. 2 镁阳极

A. 2.1 阳极材料

海水电阻率足够低, 铝合金或锌阳极可发生足够的电流, 因此通常不需要将镁阳极用于海水中。但是, 在需要高驱动电压以产生足够电流的半咸水或淡水中, 或者在需要快速极化的海水中, 则需要使用镁阳极。镁合金化学成分应符合 A. 3。化学成分的分析应按 GB/T 13748 规定的方法进行。

表 A.3 镁阳极化学成分, wt%

元素	M 1	M 2
Mn	0.15 - 0.7	0.5 - 1.5
Al	5-7	≤ 0.05
Zn	2-4	≤ 0.03
Fe	≤ 0.005	≤ 0.03
Cu	≤ 0.08	≤ 0.02
Si	≤ 0.3	≤ 0.05
Pb	≤ 0.03	≤ 0.01
Ni	≤ 0.003	≤ 0.002
其他(总)	≤ 0.30	0.05
Mg	余量	余量

注 1: M1 和 M2 符合 BS EN 12496 的镁阳极。

A. 2.2 电化学性能

镁阳极有更负的工作电位，但其自腐蚀较高而具有较低的电容量，应符合表 A. 4。

表 A. 4 镁阳极电化学性能 (5- 25°C)

合金类型	环境	工作电位 (Ag/AgCl/海水参比电极) V	实际电容量 A·h/kg	阳极消耗率 kg/(A·a)
M 1	海水	≤ -1.50	≥ 1200	≤ 7.3
M 2	海水	≤ -1.70	≥ 1200	≤ 7.3

镁合金的实际电容量值包含了其自腐蚀(约 50%)。在低电流密度或长时间运行时，镁阳极的实际电容量可能相当低。

A. 3 锌阳极

A. 3. 1 阳极材料

锌阳极广泛用于船舶，也可用于海上结构，但其较高的密度会限制其应用。锌阳极可用于咸水和淡水。

纯锌只有铁杂质含量小于 0.00014%时才能用作牺牲阳极，添加铝元素，锌阳极中铁杂质允许值略有提高，进一步添加镉会促进阳极上形成一种软的、非附着性腐蚀产物。

典型锌阳极的化学成分应符合表 A. 5。化学成分的分析应按 GB/T 4950 规定的方法进行。

表 A. 5 锌阳极化学成分, wt%

元素	合金 Z 1	合金 Z 2	合金 Z 3	合金 Z 4
Al	0.1-0.5	≤ 0.005	0.10 – 0.20	0.10 – 0.25
Cd	0.025 – 0.07	≤ 0.003	0.04 – 0.06	≤ 0.001
Fe	≤ 0.005	≤ 0.0014	≤ 0.001 4	≤ 0.002
Cu	≤ 0.005	≤ 0.002	≤ 0.005	≤ 0.001
Pb	≤ 0.006	≤ 0.003	≤ 0.006	≤ 0.006
Sn	-	-	≤ 0.01	-
Mg	-	-	≤ 0.5	0.05 – 0.15
其他(总)	≤ 0.10	≤ 0.005	≤ 0.1	≤ 0.1
Zn	≥ 99.314	≥ 99.99	余量	余量

注 1: Z1 符合 GB/T4950-2021 的 II 型阳极和美国 Mil -18001- k (前面标准引用列上) 或 ASTM B418 (前面标准引用列上) 的 I 型阳极

注 2: Z2 是“高纯锌阳极”，符合 GB/T4950-2021 的 II 型阳极和 ASTM B418 的 II 型阳极。

注 3: Z4 是高温环境使用锌阳极，符合 BS EN 12496 的规定。

A. 3. 2 电化学性能

Z1、Z3 锌阳极使用温度不宜超过 50℃。50℃以上，锌合金 Z1 和 Z3 可能会发生晶间腐蚀，尤其是埋在高温含盐泥砂中时，晶间腐蚀更为严重。合金 Z1 和 Z3 不应在沉积物的温度高于 50℃ 以上使用。

在较高温度下 (> 70℃)、低氯化物环境中，Z1 和 Z3 锌阳极对钢发生极性逆转。

锌阳极的实际电容量按 GB/T17848 规定的方法进行，电化学性能应符合表 A. 6。

高温锌阳极 Z4 可在高达 85℃ 的高温下工作。高温介质中电化学性能应符合表 A. 7。

表 A. 6 锌阳极电化学性能 (5℃~25℃)

合金类型	环境	工作电位 (Ag/AgCl/海水参比电极) V	电容量 A·h/kg	阳极消耗率 kg/(A·a)
Z 1	海水	≤ -1.03	≥ 780	≤ 11.2
	海底沉积物	≤ -0.99	≥ 750	≤ 11.8
Z 2	海水	≤ -1.00	≥ 760	≤ 11.5
Z 3	海水	≤ -1.03	≥ 780	≤ 11.2
Z 4	海水	≤ -1.03	≥ 780	≤ 11.2
	海底沉积物	≤ -0.98	≥ 710	≤ 12.3

表 A. 7 高温锌阳极电化学性能

合金类型	介质温度	工作电位 (Ag/AgCl/海水参比电极) V	电容量 A·h/kg	阳极消耗率 kg/(A·a)
Z 4	60℃海水	≤ -0.97	≥ 690	≤ 12.7
	50℃海底沉积物	≤ -0.95	≥ 710	≤ 12.3
	85℃海底沉积物	≤ -0.94	≥ 430	≤ 20.4

附录 B
(规范性附录)
牺牲阳极重量、尺寸及质量检验

B.1 阳极质量

质量检验应符合表 B.1。

表 B.1 质量检验

检验频次	要求	
	单块质量偏差	总重偏差
≥ 140 kg, 100%; ≤ 140 kg, 10%	牺牲阳极 ≥ 50 kg 时, ($\pm 3\%$, 2.3 kg) 的最小值; 牺牲阳极 < 50 kg, $\pm 3\%$	0%~+2%

B.2 阳极尺寸和直线度

a) 10 公斤以下支架阳极和平贴阳极, 除非合同约定, 长度、宽度、厚度的尺寸偏差应 $\leq \pm 3$ 毫米; 10 公斤以上阳极的尺寸应符合表 B.2。

表 B.2 尺寸检验

检验频次	要求				
	长度偏差	宽度偏差	厚度偏差	直线度	圆柱形阳极直径偏差
10%	$\pm 3\%$ 和 ± 25 mm 的最小值	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\leq 2\%$	$\leq \pm 2.5\%$ 公称直径

b) 镯式阳极尺寸应符合下列要求:

- 1) 阳极铸造的平均长度应为公称长度的 $\pm 3\%$ 或 ± 25 mm, 两者以较小时为准。
- 2) 阳极内径应符合以下尺寸偏差:
 - ① 管道直径 ≤ 300 mm, 阳极内径偏差为 0 mm ~ 4 mm;
 - ② 300 mm < 管道直径 ≤ 610 mm, 阳极内径偏差为 0 mm ~ 6 mm;
 - ③ 管道直径 > 610 mm, 阳极内径偏差为 0 mm ~ 1mm;
- 3) 阳极厚度的尺寸偏差为 ± 3 mm, 检验数量至少为阳极总数的 10%。
- 4) 阳极应避免过度弯曲或扭曲。镯式阳极应进行圆度校正, 外径不应超过上述偏差。

B.3 钢芯

镯式和平贴阳极钢芯位置的偏差为 ± 5 mm, 而对于支架阳极, 至少有厚度的 $\pm 10\%$ 的阳极材料应覆盖在钢芯上。阳极钢芯突出部分和其他关键尺寸应进行测量, 并应符合图纸要求。

B.4 阳极表面

阳极应进行目测检查, 以确认符合下列要求:

- a) 收缩凹坑不应超过阳极的标称厚度或深度的 10%。收缩凹陷不允许暴露阳极钢芯。
- b) 浇铸填充区最大收缩不得超过 10 mm 深度, 不应超过阳极总体积的 0.5%。浇铸填充材料或浇铸表面的缺陷都应与本体阳极材料完全结合。
- c) 冷隔深度不应超过 10 mm; 冷隔长度不应超过阳极宽度的 3 倍。镯式阳极冷隔不应大于 150 mm。
- d) 在搬运过程中对人员有危险的阳极凸起物都应去除。
- e) 阳极表面应保持干净, 不应沾有油漆、污物等。

B.5 铸造阳极裂纹

B.5.1 一般要求

在裂纹检验前和检验过程中，都不得研磨、敲打或以任何其他方式修补阳极裂缝。

裂纹检验用目视法检查阳极表面，应符合以下要求：

- a) 锌阳极和镁阳极不允许有裂纹。
- b) 铝阳极上的细小裂纹可接受，需确定这些细小裂纹在安装、运输或使用过程中不造成机械故障。其他裂缝和阳极钢芯的剥离都会影响阳极的使用，具体如下：
 - 1) 阳极材料内部没有钢芯支撑，不允许有可见的裂纹。
 - 2) 不允许有裂纹延伸到钢芯位置或贯穿性阳极裂纹。

B.5.2 支架阳极和平贴阳极

为保证钢芯能支撑阳极本体，裂纹应满足以下要求：

- a) 裂纹长度不超过 100 mm 和/或宽度超过 1 mm，可接受。
- s) 宽度小于 1mm 的裂纹，每个阳极最多 10 个，可接受。细小的裂纹团可以看作 1 条裂纹。
- c) 纵向裂纹不被接受。

B.5.3 镯式阳极

镯式阳极易出现裂纹。为保证钢芯能支撑阳极本体，裂纹应满足以下要求：

- a) 纵向裂纹宽度 $\leq 0.5\text{mm}$ ，而裂纹长度小于阳极长度 50%，可接受；纵向裂纹长度 \leq 阳极长度的 20%，宽度大于 0.5mm 但小于 3mm，可接受。
- b) 横向或圆周裂纹 $\leq 0.5\text{mm}$ ，而长度小于阳极内径 50%，可接受；长度 \leq 阳极内径的 50%，宽度大于 0.5mm 但小于 3mm，可接受。
- c) 以下裂纹不被接受：
 - 1) 宽度 $>3\text{mm}$ ；
 - 2) 纵向裂纹长度超过阳极长度 50%；
 - 3) 横向或圆周裂纹超过阳极内径 50%；
 - 4) 深度 $>$ 阳极材料与钢芯之间厚度的 50%。

B.6 刨切检验和阳极内部缺陷

每个阳极类型或尺寸应刨切检验，刨切数量至少为每种阳极 2 块。

刨切检验应符合 B.3 要求，如一次刨切不合格，应加倍进行刨切检验。如仍不满足规定要求，应判定刨切检验不合格。

对于防止内部孔洞特别困难的非管状钢芯阳极，阳极制造商和买方可另行商定验收标准。钢芯在阳极内的位置应通过切割面上的测量来确定。

表 B.3 刨切检验

剖切位置	长条型和平贴阳极	长度方向 25%，33%和 50%
	镯式阳极	标称长度的 25%和 50%处横切
切割面的目测检验	气孔	总面积不得超过刨切面总面积的 2%，也不得超过单个刨切面的 5%；
	非金属夹杂	不得超过总表面的 1%，也不得超过单个刨切面的 2%；
	无粘结（靠近阳极钢芯的空隙）	钢芯周围空隙长度的平均值不能超过钢芯周长的 10%，单个间隙长度最大不能超过钢芯周长的 20%。