ICS 27.120.99
CCS F 63

T

团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2026

深海/深空探测用微型核电池技术要求

Technical requirements for micro nuclear batteries used in deep-sea and deep-space exploration

（草案）

2026-X-XX 发布 2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发 布

目　　次

前言 III
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 分类与命名 2
4.1 分类 2
4.2 命名规则 2
5 技术要求 2
5.1 总体要求 3
5.2 放射源要求 3
5.3 换能器件要求 3
5.4 电性能要求 3
5.5 机械与环境适应性要求 4
5.6 辐射安全与封装要求 4
5.7 寿命与可靠性要求 5
6 试验方法 5
6.1 试验条件 5
6.2 核素与放射源检验 5
6.3 换能器件及电性能测试 5
6.4 环境适应性试验 5
6.5 辐射安全与封装试验 6
6.6 寿命与可靠性试验 6
7 7 检验规则 6
7.1 检验分类 6
7.2 型式检验 6
7.3 出厂检验 6
7.4 周期性检验 6
8 标志、包装、运输和贮存 7
8.1 标志 7
8.2 包装 7
8.3 运输 7
8.4 贮存 7
9 退役与回收 7
9.1 退役处理 7
9.2 回收与处置 7

9.3 信息追溯 7
附 录 A （规范性） 微型核电池技术指标分级 8
附 录 B （资料性） 试验方法补充说明 9
参 考 文 献 10

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

深海/深空探测用微型核电池技术要求

1 范围

本文件规定了深海/深空探测用微型核电池的分类与命名、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存以及退役与回收要求。

本文件适用于：

a）深海型微型核电池（工作深度不小于3000 m，设计寿命不小于10年）；

b）深空型微型核电池（满足真空、极端温差及空间辐照环境要求，设计寿命不小于20年）；

c）以纯β衰变放射性同位素（碳-14、氚、镍-63等）为能量来源、采用辐射伏特效应换能、输出功率为纳瓦至毫瓦级的微型核电池产品及其模块。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 191 包装储运图形符号标志

GJB/Z 299C 电子设备可靠性预计手册

GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A： 低温

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温

GB/T 2423.5 环境试验 第2部分:试验方法 试验Ea和导则:冲击

GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）

GB/T 2423.23 环境试验 第2部分：试验方法 试验Q：密封

GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB 11806 放射性物质安全运输规程

GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GB 27742 可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度

JJG 1009 X、γ辐射个人剂量当量HP(10）监测仪检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

微型核电池 micro nuclear battery

以放射性同位素衰变能为能量来源，通过换能器件将衰变能转换为电能，输出功率在纳瓦至毫瓦级、体积不大于 100 cm^3 的固态电源装置。

3.2

辐射伏特效应 betavoltaic effect

高能β粒子入射半导体 p-n 结形成电子-空穴对，进而被内建电场分离并在外回路形成电流的物理效应。

3.3

换能器件 energy conversion device

将放射源释放的β粒子能量转换为电能的半导体器件，本文件特指基于宽禁带半导体（碳化硅、金刚石、氮化镓等）材料的换能器件。

3.4

放射源芯 radioisotope source core

经纯化和成型加工、封装于电池内部的放射性同位素材料本体。

3.5

比能量 specific energy

单位质量微型核电池在设计寿命内累计可输出的电能，单位为毫瓦时每克。

3.6

性能衰减率 performance degradation rate

在规定工作条件下，设计寿命末期输出功率相对初始标称值的下降百分比。

3.7

深海型微型核电池 deep-sea type micro nuclear battery

满足深海高压、海水腐蚀、低温等环境条件要求，用于深海探测装备供电的微型核电池。

3.8

深空型微型核电池 deep-space type micro nuclear battery

满足真空、极端温差循环、宇宙射线辐照等环境条件要求，用于深空探测装备供电的微型核电池。

4 分类与命名

4.1 分类

4.1.1 按应用场景分类

微型核电池按应用场景分为两类：

a）深海型（代号 S）：工作深度不小于 3000 m，环境温度-2 ℃～40 ℃，长期浸没于海水；

b）深空型（代号 V）：真空度不高于 10^{-4} Pa，环境温度-180 ℃～+200 ℃，存在宇宙射线辐照。

4.1.2 按输出功率等级分类

按输出功率等级分为三级：

a）Ⅰ级（nW 级，≤1 μW）；

b）Ⅱ级（μW 级，1 μW～1 mW）；

c）Ⅲ级（mW 级脉冲型，峰值 1 mW～100 mW）。

4.2 命名规则

微型核电池产品型号由下列五部分组成：

MNB—应用场景代号—功率等级代号—核素代号—设计寿命代号

示例：MNB-S-Ⅱ-C14-50 表示深海型、Ⅱ级功率、以碳-14 为核素、设计寿命 50 年的微型核电池。

5 技术要求

5.1 总体要求

5.1.1 构成

微型核电池应由放射源芯、换能器件、多层防护封装结构、能量管理单元及电输出接口五部分组成，整体采用全封闭固态结构，不含液态电解质及可燃材料。

5.1.2 制备

产品应具备从放射源制备到电池封装的全流程技术自主性，关键材料及器件应有稳定的供货渠道。

5.1.3 设计

产品设计应遵循纵深防御原则，在正常、异常及事故工况下均应保证放射源的完整包容。

5.2 放射源要求

5.2.1 放射源类别

放射源应优先选用纯β衰变放射性核素，如氚（^{3}H）、碳-14（^{14}C）或镍-63（^{63}Ni）；不应选用含α衰变、强γ辐射或自发裂变中子发射的放射性核素。

5.2.2 放射源比活度

放射源应具备较高的比活度，其中：

a）碳-14 的比活度不低于 4 Ci/g；

b）氚的比活度不低于 10 Ci/g；

c）镍-63 的比活度不低于 15 Ci/g。

5.2.3 源芯成型与固定

放射源芯应通过化学键合、晶格掺杂或基底固定等方式成型，避免以可弥散粉尘形态存在；碳-14 源芯应优先采用碳化硅基掺杂或类金刚石碳固定方式，保证源芯在封装破损事故下不发生弥散性泄漏。

5.2.4 衰变产物

放射源芯衰变产物应为稳定核素，不得产生长寿命放射性子体。

5.3 换能器件要求

5.3.1 半导体材料

换能器件应采用宽禁带半导体材料，优先采用碳化硅（SiC）半导体；金刚石、氮化镓等材料经试验验证满足本文件要求后亦可采用。

5.3.2 输出性能

换能器件在标准测试条件下（25 ℃、标称活度放射源、额定负载）应满足：

a）能量转换效率不低于 3%；

b）开路电压不低于 1.5 V；

c）短路电流密度不低于 2 nA/cm²（碳-14 源）；

d）连续工作 1000 h 后输出功率衰减不大于 2%。

5.3.3 稳定性

换能器件应具备抗β辐照位移损伤能力，在相当于设计寿命积分剂量的β辐照下，性能衰减率满足 5.7.2 的规定。

5.4 电性能要求

5.4.1 标称输出电压

Ⅰ级、Ⅱ级产品不低于 1.8 V；Ⅲ级脉冲型产品输出电压不低于 3.0 V（经能量管理单元升压）。

5.4.2 电压稳定度

稳态工况下不劣于±5%。

5.4.3 比能量

不小于 2200 mWh/g（以碳-14 源为例，含放射源芯与换能器件总质量，设计寿命阶段累计能量输出）。

5.4.4 能量管理单元

应满足以下要求：

a）毫瓦级脉冲放电能力，脉冲宽度 1 ms～10 s 可调，峰值电流不低于 100 mA（Ⅲ级产品）；

b）储能缓冲单元，容量匹配脉冲放电需求；

c）输出状态监测，具备开路电压、输出电流及温度采集接口；

d）过温、过流及输出短路保护。

5.5 机械与环境适应性要求

5.5.1 深海型产品

微型核电池用于深海探测场景时，应能承受深海水压、海水腐蚀及低温等环境条件的作用，并满足下列要求：

a）耐静水压：应能承受 1.5 倍额定工作水深对应的静水压力（如额定 60 MPa，试验 90 MPa），保压 24 h 后无泄漏、无结构变形；

b）外壳抗压强度不低于 1200 MPa，对应工作水深不小于 6000 m；

c）密封性能：氦质谱检漏泄漏率不大于 1×10^{-9} Pa·m³/s；

d）海水腐蚀：外壳在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 720 h 后，腐蚀深度不大于 0.01 mm，表面无点蚀；

e）生物附着：外壳表面宜采用防生物附着涂层处理；

f）工作温度范围：-2 ℃～40 ℃，贮存温度范围-20 ℃～60 ℃。

5.5.2 深空型产品

微型核电池用于深空探测场景时，应能承受真空、极端温差循环、宇宙射线辐照及发射段力学环境的作用，并满足下列要求：

a）真空适应性：在真空度不高于 10^{-4} Pa 条件下连续工作 1000 h，无真空冷焊、无出气污染，总质损（TML）不大于 1%，可凝挥发物（CVCM）不大于 0.1%；

b）温度循环：-180 ℃～+200 ℃，工作 20 年后输出功率衰减率不大于 10%，封装无开裂；

c）宇宙射线辐照：在累积电离总剂量不小于 100 krad(Si）及质子/重离子注量不低于 1×10^{10} p/cm² 条件下，输出功率衰减率不大于 5%；

d）抗加速度：发射段准静态加速度 20 g（三轴向），持续 10 min；

e）振动：随机振动 10 Hz～2000 Hz，总均方根加速度 14.1 g_rms，试验中及试验后，输出功率衰减率不大于 2%；

f）冲击：半正弦冲击 100 g/6 ms，三轴向各 3 次；

g）尘埃防护：外壳防护等级不低于 GB/T 4208 规定的 IP6X。

5.5.3 共性环境要求

深海型与深空型微型核电池除应满足各自应用场景的专项要求外，还应满足下列共性要求：

a）电池应能承受热真空循环、低气压及湿热等通用环境条件的作用，试验后应无机械损伤、无泄漏，且电性能应满足 5.4 的规定；

b）电池在额定工作温度范围内任一温度点启动，输出性能应满足 5.4 的规定。

5.6 辐射安全与封装要求

5.6.1 封装结构

应采用多层纵深设计，由内向外至少包括放射源包容层、半导体换能层、屏蔽层和外壳层；各层间应实现冶金结合或气密焊接。

5.6.2 表面辐射水平

距电池外表面 5 cm 处，β 表面污染不大于 0.4 Bq/cm²，γ 剂量率不大于 0.1 μSv/h。

5.6.3 封装完整性

通过 GB/T 2423.23 规定的密封试验；经 1.5 m 跌落（混凝土表面）、10 J 冲击、针刺试验后，放射源芯仍保持完整包容，无放射性物质释放。

5.6.4 事故工况包容性

事故工况下（模拟火烧 800 ℃/30 min、深冷-196 ℃突变、水浸 24 h），封装结构应保持包容功能，外泄放射性核素活度不超过 GB 27742 规定的豁免水平。

5.6.5 辐射安全合规性

放射源活动应符合国家放射性同位素与射线装置安全和防护相关法规要求，产品在设计、制造、使用、退役全过程执行 GB 18871 的规定。

5.7 寿命与可靠性要求

5.7.1 设计寿命

深海型不小于 10 年，深空型不小于 20 年。

5.7.2 性能衰减率

应满足以下要求：

a）^{3}H 放射源微型核电池，10 年设计寿命内输出功率衰减率不大于 45%；

b）^{3}H 放射源微型核电池，20 年设计寿命内输出功率衰减率不大于 70%；

c）^{63}Ni 放射源微型核电池，10 年设计寿命内输出功率衰减率不大于 10%；

d）^{63}Ni 放射源微型核电池，20 年设计寿命内输出功率衰减率不大于 15%；

e）^{14}C 放射源微型核电池，10 年设计寿命内输出功率衰减率不大于 3%；

f）^{14}C 放射源微型核电池，20 年设计寿命内输出功率衰减率不大于 5%。

5.7.3 加速寿命试验

在 200 ℃、额定负载条件下连续工作 2000 h，等效外推设计寿命末期性能衰减率满足 5.7.2 的规定。

5.7.4 无故障时间

10 年设计寿命内，平均无故障时间（MTBF）不小于 1×10^{5} h，20 年设计寿命内，平均无故障时间（MTBF）不小于 2×10^{5} h。

5.7.5 可靠性预计

应按 GJB/Z 299C 或相应方法进行可靠性预计，深海型产品任务可靠度不低于 0.95，深空型不低于 0.98（置信度 0.6）。

6 试验方法

6.1 试验条件

除非另有规定，试验在 GB/T 2423.1 规定的标准大气条件下进行：温度 15 ℃～35 ℃，相对湿度 45%～75%，气压 86 kPa～106 kPa。

6.2 核素与放射源检验

6.2.1 放射性核素纯度采用高纯锗 γ 谱仪及 β 谱仪联合测定；碳-14、氚等纯 β 核素采用液体闪烁计数法标定。

6.2.2 比活度采用经 JJG 1009 检定合格的放射性活度计测定，结果按 GB/T 8170 修约。

6.2.3 核素化学形态及源芯成型质量采用扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射（XRD）及拉曼光谱表征。

6.3 换能器件及电性能测试

6.3.1 能量转换效率在标准测试条件下，由输出电功率与放射源衰变功率之比计算，测量不确定度不大于 8%（k=2）。

6.3.2 开路电压、短路电流采用高输入阻抗源表（精度不低于 0.1%）测量。

6.3.3 比能量由设计寿命内累计输出电能除以电池总质量获得。

6.3.4 脉冲放电能力采用电子负载模拟脉冲负载，记录输出电压跌落及恢复时间。

6.4 环境适应性试验

6.4.1 高低温试验按 GB/T 2423.1、GB/T 2423.2 规定的方法进行。

6.4.2 静水压试验在高压舱内进行，升压速率不大于 1 MPa/s，保压 24 h，试验前后分别测量密封性及电性能。
6.4.3 海水腐蚀试验按 3.5%NaCl 溶液、35 ℃、720 h 浸泡条件进行，试验后测量腐蚀深度并观察表面形貌。
6.4.4 热真空试验在真空度不高于 10^{-4}Pa、温度-180 ℃～+200 ℃的空间环境模拟设备内进行，循环 500 次。
6.4.5 总剂量辐照试验采用钴-60γ源进行，剂量率 0.1 Gy(Si）/s～1 Gy(Si）/s，累积剂量满足 5.5.2c）的规定；单粒子效应试验采用质子或重离子加速器进行。
6.4.6 振动、冲击试验分别按 GB/T 2423.10、GB/T 2423.5 规定的方法进行。

6.5 辐射安全与封装试验

6.5.1 密封性能按 GB/T 2423.23 规定的氦质谱检漏法测定。
6.5.2 表面污染采用 α/β 表面污染仪测量；γ 剂量率采用经检定的 X-γ 剂量率仪测量，测点距表面 5 cm。
6.5.3 跌落、针刺、冲击等封装完整性试验参照 GB 11806 相关要求进行；试验后对电池表面进行擦拭取样，用液体闪烁计数法评估放射性残留活度。
6.5.4 火烧试验在 800 ℃环境中持续 30 min，试验后自然冷却至室温，检测封装完整性及表面污染水平。

6.6 寿命与可靠性试验

6.6.1 加速寿命试验按 5.7.3 规定条件执行，通过 Arrhenius 模型外推设计寿命末期性能。
6.6.2 可靠性预计方法按 5.7.5 规定执行，形成可靠性预计报告。

7 7 检验规则

7.1 检验分类

产品检验分为型式检验、出厂检验和周期性检验。

7.2 型式检验

7.2.1 检验时机

有下列情况之一时进行型式检验：

a）新产品定型或老产品转厂生产；
b）结构、材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能；
c）停产一年以上恢复生产；
d）出厂检验结果与上次型式检验有较大差异；
e）国家监管部门或用户提出要求。

7.2.2 检验项目

型式检验项目为本文件规定的全部技术要求，样本数量不少于 3 只，其中破坏性试验样本单独抽样。

7.2.3 合格判定

型式检验全部项目合格判定为型式检验合格；若出现不合格项目，允许加倍抽样对不合格项目进行复验一次，复验合格判定合格，否则判定不合格。

7.3 出厂检验

7.3.1 每只产品均应进行出厂检验，检验项目包括外观、标称输出电压、短路电流、开路电压、密封性能、表面污染、γ 剂量率、尺寸及质量。
7.3.2 出厂检验应随产品提供检验报告及放射性活度标定证书。

7.4 周期性检验

批量生产产品每两年进行一次周期性检验，项目包括环境适应性试验及加速寿命试验抽样验证。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

8.1.1 产品应在显著位置设置铭牌，内容包括：产品名称、型号、标称输出参数、核素种类及活度、设计寿命、制造日期、制造商名称及产品编号。

8.1.2 外包装应标注 GB/T 191 规定的相应图示标志及 GB 11806 规定的放射性物质运输标志（含电离辐射警告标志、运输指数等）。

8.2 包装

产品应采用符合 GB 11806 规定的 A 型或 B 型放射性物质运输包装容器包装，内衬减振材料，随附产品合格证、检验报告、放射性活度标定证书及使用说明书。

8.3 运输

运输应符合 GB 11806 及国家放射性物品运输安全管理相关法规的规定，由具备相应资质的单位承运；运输过程中应避免剧烈冲击、跌落及高温环境。

8.4 贮存

产品应贮存于通风、干燥、无腐蚀性气体的专用库房内，远离人员密集区域，温度-20 ℃～+50 ℃，相对湿度不大于 75%；贮存期间应每两年进行一次密封性及表面污染抽检。

9 退役与回收

9.1 退役处理

达到设计寿命或经检测无法满足使用要求的产品，应移交具备放射性废物处理资质的单位进行退役处理，不应自行拆解或弃置。

9.2 回收与处置

退役产品中的碳-14、镍-63、氚等放射性核素应优先回收再利用；无法回收的，按国家放射性废物管理规定处置。

9.3 信息追溯

制造商应建立产品全生命周期追溯档案，记录每只产品自放射源制备至退役处置的全部信息，保存期限不少于产品设计寿命加 10 年。

附 录 A

（规范性）

微型核电池技术指标分级

主要技术指标分级见表 A.1。

表 A.1 主要技术指标分级

序号	指标项目	Ⅰ级（nW）	Ⅱ级（μW）	Ⅲ级（mW 脉冲）	试验方法条款
1	标称输出电压（V）	≥1.8	≥1.8	≥3.0（经升压）	6.3.2
2	能量转换效率（%）	≥6	≥8	≥8	6.3.1
3	比能量	≥1500	≥2200	≥2200	6.3.3
4	深海型设计寿命（年）	≥10	≥10	≥10	6.6.1
5	深空型设计寿命（年）	≥20	≥20	≥20	6.6.1
6	50 年衰减率（%）	≤8	≤5	≤5	6.6.1
7	工作温度范围（℃）	-100～+200	-100～+200	-100～+200	6.4.1
8	表面γ剂量率（μSv/h@5cm）	≤0.1	≤0.1	≤0.1	6.5.2
9	密封泄漏率（Pa·m³/s）	$\leq 1\times10^{-9}$	$\leq 1\times10^{-9}$	$\leq 1\times10^{-9}$	6.5.1

附 录 B
（资料性）
试验方法补充说明

B.1 换能器件β辐照损伤评估

碳化硅换能器件长期受β粒子轰击，晶格位移损伤将导致少数载流子寿命下降。可采用深能级瞬态谱（DLTS）评估辐照前后的深能级缺陷密度变化，结合输出功率衰减曲线建立损伤—性能耦合模型，用于寿命外推。

B.2 放射源芯弥散性事故验证

建议采用机械冲击+火烧+水浸三重耦合试验模拟深海/发射事故工况，试验后采用高压液相色谱-液体闪烁联用法测定释放的有机碳-14 形态活度，评价源芯包容可靠性。

B.3 智能能量管理典型工况

推荐设置三种典型工况：

a）常值微功率输出（额定负载）；

b）周期脉冲（1 mA/10 ms/1 Hz）；

c）深度休眠-突发唤醒。

注：三种工况下电池均应保持稳定输出且不触发保护。

参 考 文 献

[1] 放射性同位素与射线装置安全和防护条例（国务院令第 449 号）
[2] 放射性物品运输安全管理条例（国务院令第 562 号）

T/CEATEC XXX—XXXX

中 华 人 民 共 和 国
团 体 标 准
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
T/CEATEC XXXX－XXXX
*
中国欧洲经济技术合作协会
网址 https://www.ceatec.org.cn/
*
开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 XXX 千字
2026 年 X 月第一版 2026 年 X 月第一次印刷
*
如有印装差错 由中国欧洲经济技术合作协会调换
版权专有 侵权必究
举报电话：010-64516951

T/CEATEC XXX—2026