ICS 87.040
CCS T47

团　体　标　准

T/BYXT 169-2026

稀土核能长航时无人机动力电池

are earth nuclear power battery for long-endurance unmanned aerial vehicle

（征求意见稿）

2026-XX-XX 发布　　2026-XX-XX 实施

包头市白云鄂博矿区市场监督管理局
包头市白云鄂博矿区工信和科技局　发布
包头市白云鄂博矿区稀土产业标准化协会

目 次

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。

本文件由包头市稀谷科技有限公司提出。

本文件由包头市白云鄂博矿区稀土产业标准化协会归口。

本文件起草单位：包头市检验检测中心、呼和浩特海关技术中心、包头市白云鄂博矿区市场监督管理局、包头市白云鄂博矿区工信和科技局、包头市稀谷科技有限公司、内蒙古圣飞运营科技有限公司、北京飞创世桥文化科技有限公司、北京炎黄医养科技有限公司、北京稀造科技有限公司、北京稀谷科技有限公司、三河悟篩健康科技有限公司、内蒙古稀都酒店管理有限公司、内蒙古沸石山生物科技集团有限责任公司、内蒙古润蒙稀超矿科技有限公司、乌拉特前旗石山矿业有限公司、内蒙古蒙稀超分子材料科技有限公司、内蒙古白庙子鸿雁农牧业生态科技发展有限公司、内蒙古稀都科技发展有限公司、吉安稀谷科技产业有限公司、包头市白云鄂博矿区稀土新材料和产业应用研究院、包头市白云鄂博矿区稀土产业标准化协会。

本文件主要起草人为：侯权恒、李信福、焦智斌、侯照东、陈媛媛、段羚、王霄鹏、吴天相、李波、延涵、张晓毅、李永滔、白夜明、王丽、赵艳霞、侯倩文、郝广诚、李荣腾、周泉书、任渊、尹志军、王振洲、白瑞、王鸿宇、石晓丽、莘俊莲、张沛宇、崔晓宇、刘雨、冶建荣、张丽华、湛军平、王强、那剑、袁玉静、张文权、韩乐、武小丽、敖日格乐、李明、王乐、池慧。

本文件为首次发布。

稀土核能长航时无人机动力电池

1 范围

本文件规定了稀土核能长航时无人机动力电池的术语和定义、分类与命名、技术要求、试验方法、检验规则及标志、包装、运输、贮存。

本文件适用于：

a）同温层长航时无人机（飞行高度 18-30km，航时＞1 年）；

b）深空探测飞行器（月球/火星表面巡游，航时＞10 年）；

c）战略侦察与通信中继无人机（续航时间＞1 个月）；

d）极地观测无人机（-60℃低温环境）。

本文件不适用于：

a）城市低空物流无人机（航线下方人口密集）；

b）载人航空器（核安全风险等级不符）；

c）消费级航模（成本与监管要求过高）。

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 1589 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值

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

GB/T 4208 外壳防护等级（IP 代码）

GB 11806 放射性物质安全运输规程

GB/T 13694 核安全级阀门

GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GJB 150.3A 军用装备实验室环境试验方法 第 3 部分：高温试验

GJB 150.4A 军用装备实验室环境试验方法 第 4 部分：低温试验

GJB 150.16A 军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分：振动试验

GJB 151B 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量

HB 6167 民用飞机机载设备环境条件和试验方法

T/BYXT 250.1-2026 稀土核能电池 第 1 部分：术语定义与核素分类

T/BYXT 250.3-2026 稀土核能电池 第 3 部分：θ-TaN 热界面材料技术规范

T/BYXT 250.5-2026 稀土核能电池 第 5 部分：RE-KPF_6级联制冷器性能测试

EJ/T 20159 放射性同位素热源通用规范

3 术语和定义

下列术语和定义中的内容适用于本文件。

3.1

稀土核能长航时无人机动力电池 rare earth nuclear power battery for long-endurance unmanned aerial vehicle

利用放射性同位素衰变释放的能量，通过稀土功能材料（包括但不限于 RE-TaNx 热界面材料、稀土非晶荧光层、RE-KPF_6固态制冷剂等）实现能量转换与热管理，为无人机提供持续电能的装置。通常包含核素热源、能量转换器（热光伏或热电）、热管理系统及屏蔽结构。

3.2

五级能量转换架构 five-level energy conversion architecture

利用方式，包括：L1 核衰变热产生、L2 稀土非晶荧光层辐射冷却/光转换、L3 稀土掺杂光伏（RE-GaN）光电转换、L4 热电转换（TEG）、L5 固态制冷（RE-KPF_6）废热利用。

3.3

比功率 specific power

核动力电池输出电功率与总质量（含核素、屏蔽、转换系统）的比值，单位为瓦每千克（W/kg）。

3.4

同温层飞艇 stratospheric airship

运行在同温层（高度约 18-25km）的轻于空气浮空器，通常采用氦气浮升，需长期驻留（＞1 年）执行通信中继、对地观测等任务。

3.5

θ-TaN 热开关 θ-TaN thermal switch

基于亚稳相氮化钽（θ-TaN，热导率＞900W/(m·K)）的可控热导装置，通过调节界面接触压力或电场，实现热阻在 0.01-0.1K·cm^2/W 范围内切换，用于高功率密度下的热管理。

4 分类与命名

4.1 分类

4.1.1 按核素类型分类

RE-UAV-Pu238：采用钚-238（^{238}Pu）为热源，适用于 20-50 年长航时任务；
RE-UAV-Cm244：采用锔-244（^{244}Cm）为热源，适用于高功率密度（＞500W/kg）短时任务（＜20 年）；
RE-UAV-Am241：采用镅-241（^{241}Am）为热源，适用于超长寿命运载平台（＞100 年）；
RE-UAV-Hybrid：混合核素（如 ^{238}Pu+^{244}Cm），功率可调型。

4.1.2 按功率等级分类

微型（M 型）：＜10W，适用于微型侦察无人机（翼展＜2m）；
小型（S 型）：10-100W，适用于战术侦察无人机（翼展 2-10m）；
中型（M 型）：100W-1kW，适用于同温层飞艇/长航时侦察机（翼展 10-30m）；
大型（L 型）：＞1kW，适用于核动力巡航导弹/无人运输机（翼展＞30m）。

4.1.3 按转换方式分类

热光伏型（TPV）：通过稀土非晶层辐射+RE-GaN 光伏转换，效率 25-35%；
热电型（TE）：通过 TEG（SiGe/BiTe）直接转换，效率 8-12%；

混合式（HY）：热光伏+热电级联，效率 35-45%；
斯特林型（ST）：自由活塞斯特林发动机+发电机，效率 30-40%，仅适用于 L 型。

4.2 命名规则

核动力电池型号命名如下：
RE-UAV-□-□-□-□
第 1 位：核素代号（Pu238/Cm244/Am241/Hy）
第 2 位：功率等级（M/S/M/L）
第 3 位：转换方式（TPV/TE/HY/ST）
第 4 位：改进版本（V1.0/V1.4 等）
示例：RE-UAV-Pu238-M-HY-V1.4 表示采用 ^{238}Pu、中型功率（100W-1kW）、混合转换方式、V1.4 技术版本的核动力电池。

5 技术要求

5.1 核素与放射防护要求

5.1.1 核素纯度

^{238}Pu 纯度≥99.9%，^{239}Pu 含量＜0.1%（防止中子辐射）；
^{244}Cm 纯度≥99.5%，^{242}Cm 含量＜0.5%（控制中子剂量）；
^{241}Am 纯度≥99.0%。

5.1.2 放射性活度限值

单台核动力电池总活度应符合 GB 18871 规定的豁免值以上、低弥散危险级别，具体限值见附录 A。

5.1.3 辐射屏蔽

表面剂量率＜2.5μSv/h（距表面 5cm 处）；
距表面 1m 处剂量率＜0.25μSv/h；
采用 θ-TaN/W/RE-Glass 复合屏蔽，质量厚度≥5g/cm^2（对 α 粒子）；
中子剂量（仅 ^{244}Cm）：表面＜10μSv/h（需含氢屏蔽层，如聚乙烯）。

5.1.4 encapsulation 完整性

燃料形式：CERMET（陶瓷-金属复合）或 CERCER（陶瓷-陶瓷复合）；
封装泄漏率＜10^{-9} Pa·m^3/s（氦质谱检漏）；
承受 2000℃高温不熔毁（事故条件）。

5.2 电性能要求

5.2.1 输出电压

额定电压：28V DC（航空标准）或 270V DC（高功率）；

电压波动：＜±5%（稳态），＜±10%（瞬态，0.1s 内）。

5.2.2 比功率与功率密度

微型（M）：比功率≥50W/kg，体积功率密度≥100W/L；
小型（S）：比功率≥200W/kg，体积功率密度≥300W/L；
中型（M）：比功率≥100W/kg（含屏蔽），体积功率密度≥150W/L；
大型（L）：比功率≥50W/kg（含斯特林机），持续功率≥1kW。

5.2.3 转换效率

热光伏型（TPV）：光学效率＞15%，电池效率＞40%，系统总效率＞25%；
混合型（HY）：L2-L4 级联效率＞35%；
斯特林型（ST）：热机效率＞30%，发电机效率＞95%。

5.2.4 寿命与衰减

设计寿命：匹配核素半衰期的 70%（如 ^{238}Pu 为 61 年）；
功率衰减：＜30%（设计寿命内）；
年衰减率：＜0.5%（非核素衰变因素，如材料老化）。

5.3 热管理性能

5.3.1 热阻控制

TIM1（核源-转换器）：θ-TaN 界面，热阻＜0.06K·cm^2/W；
TIM2（转换器-散热器）：热阻＜0.5K·cm^2/W；
总热阻（核源至环境）：＜2K/W（强制对流条件）。

5.3.2 温度范围

核热源表面温度：800-1200℃（依核素类型）；
转换器热端温度：600-800℃（TPV）或 300-600℃（TE）；
转换器冷端温度：50-150℃（高空低温环境）或＜50℃（RE-KPF$_6$制冷增强）；
壳体表面温度：＜60℃（避免红外特征过强）。

5.3.3 高空热管理

18km 高度（-56℃，0.12atm）：正常散热，无需额外加热；
热开关响应时间：＜10s（高阻↔低阻切换）；
热储备能力：失去散热条件（如入云）后，安全运行＞30min 不超限温。

5.4 环境适应性

5.4.1 温度适应性

工作温度：-60℃（极地/同温层）至+55℃（地面暴晒）；
存储温度：-70℃至+85℃；
低温启动：-60℃下 30min 内达到额定功率 50%。

5.4.2 气压适应性

工作气压：0.01atm（30km 高空）至 1atm（地面）；
密封性：内外压差 0.1MPa 下无泄漏（结构完整性）。

5.4.3 机械环境

振动：随机振动 10-2000Hz，20g RMS（无人机发射/着陆）；
冲击：50g 半正弦波，11ms（应急着陆）；
加速度：15g（机动飞行，持续时间＞10s）。

5.4.4 盐雾与腐蚀

盐雾试验：5% NaCl，35℃，96h（沿海/海上无人机）；
θ-TaN 外壳腐蚀速率＜0.01mm/年。

5.5 安全性能

5.5.1 crash 安全性

50m/s 垂直冲击：核素不泄漏，结构完整性保持；
贯穿试验：25mm 钢棒以 50m/s 贯穿，包容完整性；
燃烧试验：800℃油火 30min，放射性释放＜0.1%。

5.5.2 防扩散设计

核素固化：CERMET 形式，化学提取难度＞工业级铀浓缩；
物理保护：θ-TaN 陶瓷硬度＞20GPa，机械加工困难；
电子追踪：内置 GPS+铱星通信模块，异常移动自动报警。

5.5.3 应急安全

热失控保护：温度＞300℃时，RE-KPF_6热泵全功率运行；
降落伞系统：＞20kg 系统强制配备，减缓坠落冲击；
自毁机制：远程激活电容器放电，熔毁电路（防止逆向工程）。

5.6 电磁兼容性

5.6.1 电磁发射

辐射发射：GJB 151B RE102，Class A 限值（军用）；
传导发射：CE102，Class A 限值；

壳体屏蔽效能：＞80dB（100MHz-1GHz）。

5.6.2 电磁敏感度

辐射敏感度：RS103，200V/m（无人机通信干扰环境）；
静电放电：ESD，±15kV（空气放电）。

5.6.3 通信兼容性

无人机测控频段（L/S/C 波段）无干扰；
GPS/北斗接收灵敏度不受影响（噪声系数＜3dB）。

6 试验方法

6.1 核素检验

6.1.1 γ能谱分析

按 GB/T 11713 规定，使用高纯锗γ谱仪测定核素种类与活度，误差＜5%。

6.1.2 质谱分析

使用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）测定核素纯度，检出限＜1ppm。

6.1.3 泄漏检验

氦质谱检漏法，灵敏度＜10^{-9} Pa·m^3/s，保压时间＞24h。

6.2 电性能试验

6.2.1 输出特性测试

负载特性：电子负载 0-150%额定负载，记录电压-电流曲线；
最大功率点跟踪（MPPT）：对于 TPV 型，验证最大功率点电压稳定性。

6.2.2 比功率测定

测量总质量（含屏蔽、结构、转换系统）；
测量额定输出功率；
计算比功率（W/kg），结果精确至 0.1W/kg。

6.2.3 寿命加速试验

温度加速：85℃老化 1000h，等效 10 年存储；
功率衰减率=（P_0 -P_1 ）/P_0 ×100%，应＜5%。

6.3 热管理试验

6.3.1 热阻测量

稳态热流法，热电偶测量温差，热流计测量功率，计算 $R=\Delta T/Q$。

6.3.2 高空模拟试验

见附录 B，使用真空高低温试验箱模拟 18km 高度环境（-56℃，12kPa）。

6.3.3 热冲击试验

高温：+120℃（地面暴晒后起飞）；
低温：-60℃（同温层环境）；
转换时间＜5min，循环 100 次，结构无开裂。

6.4 环境试验

6.4.1 振动试验

按 GJB 150.16A，随机振动谱：
10-50Hz：+3dB/oct；
50-500Hz：0.04g^2/Hz；
500-2000Hz：-3dB/oct； 持续时间：每轴 5h。

6.4.2 冲击试验

半正弦波，50g，11ms，三轴六向各 3 次。

6.4.3 盐雾试验

按 GB/T 2423.17，5% NaCl，35℃，连续喷雾 96h，试验后检查腐蚀情况。

6.5 安全试验

6.5.1 跌落试验

高度：50m（模拟伞降失败）；
地面：混凝土/岩石；
检验：结构完整性、泄漏率、表面剂量率。

6.5.2 贯穿试验

25mm 直径钢棒，50m/s 速度贯穿电池，测量放射性释放。

6.5.3 火烧试验

油池火，800±50℃，30min，测量气溶胶放射性释放量。

7 检验规则

7.1 检验分类

检验分为：

a）型式检验（设计定型、生产定型、重大设计更改）；

b）出厂检验（逐台检验、抽样检验）；

c）验收检验（用户验收）。

7.2 型式检验

7.2.1 检验时机

新产品设计定型；

原材料/工艺重大变更；

停产 1 年以上恢复生产；

质量监管部门要求。

7.2.2 检验项目

第 5 章全部项目，以及：

可靠性试验：MTBF＞10000h（加速试验等效）；

环境应力筛选：温度循环-60℃↔ +85℃，20 循环。

7.2.3 样本数量

不少于 3 台（其中 1 台用于破坏性试验）。

7.3 出厂检验

7.3.1 逐台检验

外观检查；

表面剂量率测量；

输出电压/功率测试；

绝缘电阻测试（＞100MΩ，500V DC）；

密封性检查（氦质谱）。

7.3.2 抽样检验

批量生产时，按 GB/T 2828.1，一般检验水平 II，AQL=1.0；

项目：热阻测量、振动试验（抽样）。

7.4 判定规则

全部项目合格，判定合格；
任一项不合格，判定不合格；
允许对不合格项进行整改，复检 1 次，仍不合格则整批判废。

8 标志、包装、运输、贮存

8.1 标志

8.1.1 产品铭牌

永久固定于外壳，内容包括：
型号、名称；
核素种类与活度（Bq）；
出厂日期、序列号；
制造商名称；
电离辐射警告标志（三叶形）；
唯一识别码（用于追踪）。

8.1.2 警示标志

表面明显位置设置"当心电离辐射"警示；
设置红色应急联系电话（24h）；
GPS 定位标识（提示内含追踪装置）。

8.2 包装

8.2.1 内包装

减震材料：聚氨酯泡沫，密度＞50kg/m^3；
屏蔽补充：包装箱内壁衬铅板（5mm）或贫铀（2mm）；
密封：双层塑料袋，抽真空充氮。

8.2.2 外包装

符合 GB 11806 B(U)型包装要求；
跌落试验：9m 高度（正常运输条件）；
防火试验：800℃，30min。

8.2.3 随附文件

产品合格证；
辐射安全许可证复印件；
使用维护手册（含应急处理程序）；

装箱单。

8.3 运输

8.3.1 运输方式

公路：专用防辐射车辆，限速60km/h，避开人口密集区；
铁路：按GB 11806，一级运输（最高安全等级）；
航空：需民航局特殊批准，货机运输，禁止客机腹舱；
海运：符合IMDG Code，第7类危险品。

8.3.2 运输监控

实时GPS/北斗定位；
震动/倾斜传感器，异常报警；
武装押运（^{244}Cm及高活度^{238}Pu）。

8.4 贮存

8.4.1 贮存场所

专用库房，防盗（红外+视频监控）；
防火（自动灭火系统，惰性气体）；
通风（负压，过滤排放）。

8.4.2 贮存条件

温度：-40℃~+50℃；
湿度：＜80%RH;
堆叠高度：不超过2层;
与食品、易燃品隔离＞10m。

8.4.3 贮存期限

未装机状态，可贮存至核素半衰期30%;
定期检查（每6个月）：表面剂量率、密封性、结构完整性。

附录 A

（规范性附录）

核素比活度限值与分类

A.1

核素	比活度（Bq/g）	单台限值（Bq）	运输分类	适用机型
^{238}Pu	6.3×10^{13}	＜3.7×10^{12}（100Ci）	A 型	中型/大型
^{244}Cm	2.9×10^{13}	＜3.7×10^{11}（10Ci）	A 型	小型/微型
^{241}Am	1.3×10^{11}	＜3.7×10^{13}（1000Ci）	A 型	超长寿型

注：超过限值需按 B(U)型包装运输，审批层级提升至生态环境部/国家原子能机构。

附录 B

（资料性）

高空环境模拟试验方法

B.1 试验设备

真空高低温试验箱：温度范围-70℃~+150℃，真空度＜0.001atm；
太阳辐射模拟器：AM0 光谱，辐照度 1367W/m^2；
风洞（可选）：模拟飞行气动加热。

B.2 试验程序

预处理：25℃，常压，稳定 2h；
升温至+55℃（地面暴晒），保持 2h；
抽真空至 12kPa（18km 高度），降温至-56℃，保持 4h；
启动核动力电池，记录：
输出电压/功率；
各层温度（核源、转换器、壳体）；
热开关响应时间；
恢复常压，检查结构完整性。

B.3 合格判据

输出功率波动＜±10%；
壳体温度＜60℃；
无结构变形、裂纹。

附录 C

（资料性）

典型应用场景与选型指南

应用场景	推荐型号	核素	功率	航时	特殊要求
同温层通信中继飞艇	RE-UAV-Pu238-M-HY	^{238}Pu	500W	5 年	电磁兼容，抗紫外
火星探测无人机	RE-UAV-Pu238-S-TE	^{238}Pu	50W	20 年	抗尘，宽温域(-80℃~+20℃)
战略侦察机	RE-UAV-Cm244-L-ST	^{244}Cm	2kW	2 年	红外隐身，高机动
极地观测无人机	RE-UAV-Am241-M-TE	^{241}Am	200W	100 年	低温启动，抗风暴
微型蜂群侦察	RE-UAV-Cm244-M-TPV	^{244}Cm	5W	10 年	超轻(＜1kg)，低成本

选型建议：

长航时（＞10 年）：首选 ^{238}Pu，功率密度适中，技术成熟；

高功率（＞1kW）：选用 ^{244}Cm，注意中子防护；

超长寿（＞50 年）：选用 ^{241}Am，初始投资低但功率密度低；

载人区域上空：禁止使用，仅限无人区/海洋/高空（＞18km）。