

ICS 27.120.99

CCS F63

团 体 标 准

T/BYXT 160-2025

稀土核电池通用技术要求

General technical requirements for rare earth nuclear batteries

2025-12-19 发布

2025-12-19 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	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 通用技术要求	1
4.1 核素要求	1
4.2 能量转换方式	2
4.3 设计与结构	2
4.4 性能要求	2
4.5 安全要求	3
5 特殊应用领域附加要求	3
5.1 航天航空应用	3
5.2 航海与水下应用	3
5.3 应急电站与固定设施	3
5.4 军工、特种机动车、无人机、机器人	3
5 试验方法	3
5.1 能量转换效率测试	3
5.2 极端环境试验	3
5.3 机械滥用测试	3
6 试验方法	3
6.1 电性能测试	3
6.2 环境试验	4
6.3 机械可靠性试验	4
6.4 安全相关试验	4
7 检验规则	4
7.1 出厂检验	4
7.2 型式检验	4
8 标志、包装、运输与储存	5
8.1 标志	5
8.2 包装、运输与储存	5
9 安全要求	5
9.1 辐射安全	5
9.2 功能安全	5
9.3 环境与机械安全	5
9.4 质量保证	5

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、内蒙古稀都酒店管理有限公司、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：李科、包中华、杜红伟、侯权恒、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、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。

稀土核电池通用技术要求

1 范围

本文件规定了稀土核电池的术语定义、通用技术要求、试验方法、检验规则、安全、标志、包装、运输与储存要求。

本文件适用于航天航空、航海、应急电站、军工装备、特种机动车、无人机、机器人等特殊领域与极端环境下的能源系统。

本文件不适用于在公共道路行驶的民用乘用车动力电池系统。

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 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 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）

GB/T 6495.1 光伏器件 第1部分：光伏电流-电压特性的测量

GB 11806 放射性物品安全运输规程

GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

IAEA SSR-6 放射性物质安全运输条例

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

稀土核电池 rare earth nuclear battery

以放射性同位素衰变能为主要能量源，通过稀土掺杂荧光材料将衰变能转换为光能，并利用光电转换器件将光能、热能转换为电能的装置。

3.2

能量转换层 energy conversion layer

由稀土荧光材料与光电转换器件组成的，实现“衰变能-光能-电能”两级转换的功能层。

3.3

屏蔽与包容系统 shielding and containment system

由中子吸收材料、伽马射线屏蔽材料及密封包壳构成的，用于限制放射性物质泄漏与减弱辐射剂量的多层结构。

4 通用技术要求

4.1 核素要求

适合作为核电池材料的核素：

——钚-238 (^{238}Pu)：通过 α 衰变释放能量，每克钚-238衰变释放约0.568瓦热量；半衰期约86.4年，衰变产物为铀-234，无爆炸风险； α 粒子易被屏蔽，降低了运输和使用中的安全风险。

——镅-241 (^{241}Am)：通过 α 衰变能量，每克释放约0.1瓦热量；半衰期约433年，是商用反应堆废料中的副产品，提取成本低，约为钚-238的1/5，原料来源充足。

——镅-244 (^{244}Am)：通过 α 衰变释放能量，每克释放约2.8瓦热量，能量密度高；半衰期约17.6年；可通过反应堆中子辐照钚-239 (^{239}Pu)制备，原料来源充足。

——锶-90 (^{90}Sr)：通过 β 衰变释放能量，释放的电子可直接用于辐射伏特效发电。

——铯-137 (^{137}Cs)：通过 β 衰变释放能量，能量较高，但 γ 射线辐射较强，需额外屏蔽。

——镍-63 (^{63}Ni)：通过 β 衰变释放能量，仅发射软 β 粒子，无法穿透皮肤，且衰变产物是稳定的铜-63，无放射性废物产生。

4.2 能量转换方式

稀土核能电池能量转化方式：

核素衰变能量-稀土发光-光伏发电-温差发电-半导体发电。

4.3 设计与结构

4.3.1 电池应至少包含同位素源芯、能量转换层、屏蔽与包容系统、热管理系统及电输出接口。

4.3.2 结构设计应确保在规定的环境与机械应力下，屏蔽与包容系统的完整性。

4.4 性能要求

4.4.1 电性能

a) 额定输出电压及允许波动范围应在产品规格书中明确规定；

b) 比能量（能量密度）应不低于产品规格书的宣称值。

c) 能量密度： $\geq 2300\text{Wh/kg}$ （ -60°C 下容量保持率 $\geq 80\%$ ）；

d) 核心组件性能：

同位素层：镅-243活度10-50mCi，镍-63活度 $\leq 100\text{mCi}$ ，封装于Y-Al合金包壳（厚度1~5mm）；

能量转换层：铽基荧光陶瓷量子效率 $\geq 92\%$ ，钙钛矿光伏薄膜（ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ）光电转换效率 $\geq 28\%$ ；

防护层： $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 复合材料中子吸收截面 $\geq 10^5\text{barn}$ ，表面辐射剂量 $\leq 1\mu\text{Sv/h}$ 。

4.4.2 环境适应性

a) 工作温度范围：应根据目标应用领域确定，例如：航天（ $-80^\circ\text{C}\sim 120^\circ\text{C}$ ）、深海（ $-50^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ ）；

b) 电池在规定的极端温度下应能正常启动并输出功率；

c) 工作温度 $-60^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ ，功率波动 $\leq 5\%$ 。

4.4.3 寿命

a) 在额定工况下，电池的输出功率衰减至初始值的80%的时间应不低于产品规格书宣称的设计寿命；

b) 设计使用寿命 ≥ 50 年（Am-243）或 ≥ 20 年（Ni-63）。

4.5 安全要求

辐射安全：符合 ICRP 103 公众剂量限值，屏蔽层需通过针刺/枪击测试（无泄漏）；
热管理：余热回收系统确保表面温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ ，紧急散热响应时间 $\leq 10\text{s}$ 。

5 特殊应用领域附加要求

5.1 航天航空应用

应满足额外的振动、冲击、真空环境及粒子辐射耐受性要求。具体指标由供需双方协议确定。

5.2 航海与水下应用

应满足规定的防水等级（如 IP68）及耐压深度要求。材料应具备耐海水腐蚀性。

5.3 应急电站与固定设施

应强调长期运行的稳定性、远程监控接口及场地辐射安全屏蔽的附加设计要求。

5.4 军工、特种机动车、无人机、机器人

应满足相应的军用或行业专用标准中关于环境适应性、电磁兼容性 & 可靠性的要求。

5 试验方法

5.1 能量转换效率测试

荧光量子效率：采用积分球光谱仪（UV-2600）测试 520nm 发射峰强度；
光伏层效率：按 GB/T 6495.1 在 AM1.5 光照条件下测试。

5.2 极端环境试验

低温启动： -60°C 环境中冷启动时间 $\leq 2\text{s}$ （参照 MIL-STD-810G 振动标准）；
高温循环： 200°C 下持续 1000 小时，容量衰减 $\leq 2\%$ 。

5.3 机械滥用测试

碰撞测试：模拟 50km/h 正面碰撞，电池模块结构完整性 $\geq 95\%$ ；
挤压测试：施加 200kN 压力，无泄漏或热失控。

6 试验方法

6.1 电性能测试

按照产品规格书和 GB/T 6495.1 等相关标准，在标准测试条件下测量输出电压、电流、功率及能量转换效率。

6.2 环境试验

6.2.1 高低温工作试验

按 GB/T 2423.1 和 GB/T 2423.2 进行，在宣称的工作温度上下限条件下测试电池启动和输出性能。

6.2.2 温度循环试验

在宣称的温度范围内进行循环，考核电池结构的可靠性。

6.3 机械可靠性试验

6.3.1 振动试验

按 GB/T 2423.10 进行，模拟运输及使用环境的振动条件。

6.3.2 冲击试验

按相关标准进行，考核电池在意外撞击下的结构完整性与安全性。

6.4 安全相关试验

6.4.1 屏蔽效能测试

测量电池表面及规定距离处的辐射剂量率，应符合 GB 18871 及产品安全规格书要求。

6.4.2 包容性验证（热-机械滥用测试）

模拟极端情况（如火烧、撞击），测试后应无放射性物质泄漏，辐射剂量率不超过限值。

7 检验规则

7.1 出厂检验

每套电池出厂前必须进行以下检验，合格后方可放行：

- a) 外观与结构检查；
- b) 开路电压与输出短路电流测试；
- c) 表面辐射剂量率检测。

7.2 型式检验

有下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品定型或老产品转厂生产；
- b) 正式生产后，如材料、工艺有重大改变；
- c) 产品停产一年以上恢复生产；
- d) 正常生产周期内（如每三年）。

型式检验应包括本文件第 6 章规定的全部试验项目。

8 标志、包装、运输与储存

8.1 标志

每套电池必须在醒目位置永久性标注以下信息：

- a) 产品名称与型号；
- b) 唯一性编号；
- c) 放射性标志（三叶形）及“放射性”字样；
- d) 主要技术参数（如额定电压、同位素种类、活度、生产日期）；
- e) 制造商名称或商标。

8.2 包装、运输与储存

8.2.1 包装

- a) 应符合 GB 11806 中对相应类型放射性货包的要求，确保在正常运输条件和事故条件下都能提供足够的屏蔽与包容；
- b) 电池外壳需标注放射性标志、制造商编码及安全警示。

8.2.2 运输

应遵守 GB 11806 及国家有关放射性物品运输的法律法规，办理相关许可。

8.2.3 运输与储存

- a) 符合 IAEA SSR-6 的 A 型货包要求，公路运输时速 $\leq 80\text{km/h}$ ；
- b) 储存场所应有防火、防水、防盗及辐射防护措施，并符合环保与安保规定。

9 安全要求

9.1 辐射安全

电池的设计、生产、测试、运输、使用和报废处理全过程，必须严格遵守 GB 18871 的规定，确保对工作人员和公众的辐射照射控制在合理可行尽量低的水平。

9.2 功能安全

- 9.2.1 应设计必要的电气保护功能，如防止短路、过载、反接等。
- 9.2.2 对于大功率系统，应具备故障诊断和紧急状态安全关机或隔离的机制。

9.3 环境与机械安全

电池必须能承受其目标应用环境预期的机械应力、气候条件及电磁干扰，而不发生危及安全的失效。

9.4 质量保证

制造商应建立并实施覆盖设计、采购、生产、测试全过程的质量保证体系，确保产品的安全性与可靠性。

