ICS 87.040
CCS T47

团　　体　　标　　准

T/BYXT 174-2026

基于稀土材料的同位素衰变能源发电技术规范

Technical specification for isotope decay energy power generation based on rare earth materials

（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、三河悟筛健康科技有限公司、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。

基于稀土材料的同位素衰变能源发电技术规范

1 范围

本文件规定了基于稀土材料的同位素衰变能源发电装置（核电池）的术语定义、材料体系、设计制造、性能测试及质量控制通用技术要求。

本文件适用于：

a) 采用 ^{238}Pu、^{241}Am、^{244}Cm、^{90}Sr 等放射性同位素为热源的核电池设计制造；

b) 稀土功能材料（RE-TaNx、稀土非晶、RE-KPF_6等）的选型、制备与性能评价；

c) 核电池的结构设计、工艺控制、质量检验；

d) 为 T/BYXT 169-172 应用标准提供技术基础。

本文件不适用于：

a) 核反应堆、临界装置；

b) 非稀土材料体系的核电池（如传统 SiGe-RTG）；

c) 放射性同位素生产与分离工艺。

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 4339 金属材料热膨胀特征参数的测定

GB/T 5593 电子元器件结构陶瓷材料

GB/T 11297 光学晶体透过率测量方法

GB/T 14264 半导体材料术语

GB/T 14847 重掺杂衬底上轻掺杂硅外延层厚度的红外反射测量方法

GB/T 15548 光学玻璃

GB/T 22588 闪光法测量热扩散系数或导热系数

GB/T 25962 高速条件下汽车轮毂轴承润滑脂漏失量测定法

GB/T 34643 烧结金属多孔材料气体过滤性能试验方法

EJ/T 20159 放射性同位素热源通用规范

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

YS/T 1127 镍钨合金化学分析方法

ISO 14705 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test method for flexural strength of monolithic ceramics at room temperature ASTM E1461 Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method

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

稀土功能材料 rare earth functional materials

利用稀土元素特殊物理化学性质（4f 电子、大原子半径、高电负性等）实现特定功能的材料，包括 RE-TaNx、稀土非晶氧化物、稀土氟化物等。

3.2

亚稳相 metastable phase

在热力学上非最稳定但在动力学上可长期存在的晶体结构，如 θ-TaN（正方结构），具有本征高热导率但需稀土元素稳定。

3.3

超均匀性指数 hyperuniformity index（α）

描述非晶材料密度波动抑制程度的参数，α＞3.5 表示超均匀结构，有利于抑制晶化和辐射损伤。

3.4

电卡效应 electrocaloric effect (ECE)

介电材料在外电场作用下温度发生变化的物理现象，RE-KPF_6在室温附近具有巨电卡效应（ΔT＞20K）。

3.5

热阻网络 thermal resistance network

描述核电池内部热量传递路径的等效电路模型，包括传导热阻、接触热阻、对流热阻等。

3.6

能量转换级联 energy conversion cascade

核衰变热→光→电的多级转换过程，每级具有特定转换效率和光谱匹配要求。

4 稀土功能材料体系

4.1 RE-TaNx 热界面材料

4.1.1 材料组成

基体：TaNx，x=0.8-1.2；
稀土添加剂：La、Ce、Y，含量 0.5-5at%，用于稳定亚稳相 θ-TaN；
掺杂方式：固溶掺杂或晶界偏聚。

4.1.2 晶体结构要求

主相：θ-TaN（正方结构，空间群 P4/mbm），含量＞95%；
抑制相：δ-TaN（立方结构）＜3%，α-Ta（金属钽）＜2%；
晶粒尺寸：10-100nm，纳米晶结构提高断裂韧性。

4.1.3 物理性能

热导率：＞900W/(m·K)（室温），温度系数负值（高温略降）；
热膨胀系数：4.5-5.5×10^{-6}/K（25-500℃），匹配 SiC、GaN；
硬度：＞20GPa（纳米压痕），断裂韧性＞5MPa·$m^{1/2}$；
电阻率：＞10^{12}Ω·cm（本征半导体特性，避免短路）。

4.1.4 化学稳定性

抗氧化：空气中 600℃不氧化（表面形成 Ta_2O_5/TaON 保护层）；
耐蚀性：耐海水（3.5% NaCl）、耐酸（pH＞1）、耐碱（pH＜12）；
核素相容性：与 ^{238}Pu、^{241}Am、ZrC 燃料相容，1200℃不反应。

4.2 稀土非晶荧光层

4.2.1 材料体系

基础体系：La_2O_3-CeO_2-Al_2O_3（LCAO）；
改性添加剂：Nd_2O_3（提高辐射吸收）、Y_2O_3（提高热稳定性）；
稀土总含量：30-60mol%。

4.2.2 非晶结构要求

结构：完全非晶，XRD 无晶化峰；
超均匀性指数：α＞3.5（小角 X 射线散射 SAXS 测定）；
配位数：La-O 6-8，Ce-O 6-8，Al-O 4-6，分布标准差＜1.5；
自由体积分数：＞5%，利于自修复。

4.2.3 辐射转换性能

辐射冷却发射率：ε＞0.9（红外波段 8-14μm）；
光致发光量子效率：＞30%（可见光波段）；
辐射稳定性：α 粒子通量 $10^{15}/cm^2$后，α＞3.5，无晶化。

4.2.4 热物理性能

玻璃转变温度：Tg＞600℃；
热导率：0.5-1.5W/(m·K)（隔热与导热的平衡）；
热膨胀系数：6-8×10^{-6}/K。

4.3 RE-KPF_6固态制冷材料

4.3.1 材料组成

基体：KPF_6（六氟磷酸钾）；
稀土掺杂：Ce^{3+}、La^{3+}，含量 1-10mol%，替代 K^+位；
晶型：立方结构，空间群 Fm-3m。

4.3.2 电卡性能

绝热温变：ΔT＞20K（电场 50MV/m，室温）；
等温熵变：ΔS＞30J/(kg·K)；
制冷系数：COP＞3（工作温跨 30K）；

响应时间：＜1s（电场切换）。

4.3.3 电学性能

击穿场强：＞100MV/m；
介电常数：εr＜20（减少寄生电容损耗）；
介电损耗：tanδ＜0.01（1kHz）。

4.3.4 热管理参数

热导率：1-2W/(m·K)；
比热容：800-1000J/(kg·K)；
工作温度范围：-60℃∽+150℃。

4.4 稀土掺杂能量转换材料

4.4.1 RE-GaN 光伏材料

衬底：GaN 自支撑衬底（位错密度＜$10^{8}cm^{-2}$）；
稀土掺杂：Ce 或 La，浓度 10^{18}-$10^{20}cm^{-3}$；
作用：位错钉扎、应力调控、带隙工程；
光电转换效率：＞40%（AM0 光谱，单结）。

4.4.2 RE-SiC 热电材料

基体：SiC（4H 或 6H）；
稀土掺杂：Ce、Y，用于优化载流子浓度（10^{19}-$10^{20}cm^{-3}$）；
功率因子：＞50μW/(cm·K^{2})（1200K）；
热导率降低：稀土点缺陷散射，晶格热导率＜10W/(m·K)。

4.4.3 稀土卤化物闪烁体

材料：$Cs_3RE_2X_9$（RE=Ce、Eu；X=Cl、Br、I）；
光产额：＞50000 photons/MeV；
能量分辨率：＜5%（@662keV）；
衰减时间：＜100ns。

5 设计与制造通用要求

5.1 总体设计要求

5.1.1 设计输入

核素类型与活度：确定热源功率与寿命；
应用场景：确定环境条件（温度、压力、辐射）；
输出要求：电压、功率、寿命、可靠性指标；

安全要求：剂量限值、屏蔽要求、事故工况。

5.1.2 **能量流设计 建立能量流模型：**

输入：P_heat = A × E_decay × η_absorption；
转换：P_elec = P_heat × η_thermal × η_conversion；
损耗：P_loss = P_heat × (1 - η_total)；
目标：η_total ＞ 20%（热电）或 ＞ 40%（热光伏）。

5.1.3 **热设计 建立热阻网络模型：**

R_total = R_source + R_TIM1 + R_converter + R_TIM2 + R_sink；
要求：热点温度＜1200℃（Pu-238），转换器冷端＜150℃；
安全裕度：最高温度＜材料熔点 80%。

5.2 **结构设计要求**

5.2.1 **层状堆叠结构 标准堆叠顺序（由内至外）：**

核素热源（CERMET 燃料）；
θ-TaN 热均布层（厚度 1-3mm）；
稀土非晶荧光层（厚度 0.05-0.2mm）；
光伏/热电转换层（厚度 0.5-2mm）；
RE-KPF_6热管理层（可选，厚度 0.5-2mm）；
散热器/外壳（θ-TaN 或 Al 合金）。

5.2.2 **热膨胀匹配 各层 CTE 匹配要求（25-500℃）：**

CTE 差异＜2×10^{-6}/K，或采用梯度过渡层；
θ-TaN（5×10^{-6}/K）与 SiC（4×10^{-6}/K）匹配良好；
RE-Glass（7×10^{-6}/K）与金属外壳（Al：23×10^{-6}/K）需过渡层。

5.2.3 **密封设计**

密封等级：氦漏率＜10^{-9} Pa·m^3/s（T/BYXT 169 要求）或＜10^{-11} Pa·m^3/s（T/BYXT 171 要求）；
密封方式：θ-TaN 陶瓷金属化+钎焊、激光焊接、扩散焊；
密封材料：AgCuTi 钎料、AuNi 焊料。

5.3 **制造工艺要求**

5.3.1 RE-TaNx **制备（EVD 工艺）**

基底：抛光 SiC 或金属 Ta，粗糙度 Ra＜0.1μm；
源材料：$TaCl_5$+$La(C_2H_5)_3$，载气 H_2/Ar；
温度：600-800℃；
沉积速率：0.1-1μm/h；

厚度控制：±10%（在线石英晶体监测）。

5.3.2 **稀土非晶层制备（磁控溅射或溶胶-凝胶）**

溅射：La-Ce-Al 合金靶，Ar/O_2混合气氛，室温沉积；
退火：200-400℃真空退火，消除应力，保持非晶；
厚度：50-200nm（辐射冷却）或 1-5μm（光转换）。

5.3.3 RE-KPF_6**制备（水热法或熔盐法）**

水热：KPF_6+$RE(NO_3)_3$，150℃，24h；
压片：冷等静压 200MPa，致密度＞95%；
烧结：300-400℃，Ar 气氛，避免分解。

5.3.4 **集成与封装**

洁净度：Class 100（核素操作区）；
键合：热压键合（温度＜400℃，压力 10-50MPa）；
检漏：氦质谱检漏，保压 24h。

6 性能测试方法

6.1 材料性能测试

6.1.1 RE-TaNx **热导率（闪光法） 按** GB/T 22588 **或** ASTM E1461：

样品：直径 10mm，厚度 1-2mm，两面抛光；
温度范围：25-500℃；
测量精度：±5%。

6.1.2 **非晶超均匀性指数（**SAXS）

仪器：小角 X 射线散射仪；
拟合：I(q) ∽ q^(-α)，提取 α 值；
要求：α＞3.5。

6.1.3 RE-KPF_6**电卡性能**

样品：直径 10mm，厚度 0.1-0.2mm，电极 Au；
电场：0-50MV/m；
测温：红外热像仪或热电偶（响应＜100ms）；
计算：ΔT = T(E) - T(0)。

6.2 转换效率测试

6.2.1 **热光伏转换效率**

热源：石墨加热器，温度 600-1000℃；
光谱：黑体辐射或模拟 AM0；
测量：I-V 曲线，标准太阳电池校准；
计算：$\eta = P_{max} / (\sigma T^4 A)$。

6.2.2 **热电转换效率**

热端：加热台，温度 300-800℃；
冷端：水冷或制冷器，温度 25-50℃；
测量：开路电压、短路电流、负载功率；
计算：$\eta = P_{out} / P_{heat}$（量热法测热流）。

6.3 热管理性能测试

6.3.1 **热阻测量（稳态法）**

热流计法或防护热板法；
温差 ΔT，热流 Q，计算 $R = \Delta T/Q$；
要求：TIM1 热阻＜0.06K·cm^2/W。

6.3.2 **制冷性能（$RE\text{-}KPF_6$）**

冷端：量热计（测制冷量 Q_c）；
热端：恒温水浴（散热）；
电功率：$W = \int U \cdot dt$；
$COP = Q_c / W$。

6.4 长期可靠性测试

6.4.1 **热循环试验**

温度范围：-60℃～+200℃（或应用相关）；
循环次数：1000 次；
监测：热阻变化＜20%，结构无开裂。

6.4.2 **辐射稳定性试验**

α 辐照：^{241}Am 或 ^{244}Cm 源，累积剂量 $10^{15}/cm^2$；
监测：材料结构（XRD）、性能（热导/光转换）变化＜10%。

6.4.3 **加速老化试验**

温度：85℃（电）或 150℃（热）；
时间：1000h 等效 10 年；
失效判据：功率衰减＞20%或热阻增加＞50%。

7 质量控制与检验

7.1 原材料检验

核素：活度、纯度、形态（CERMET 密度＞95%）；
稀土材料：成分（ICP-MS）、结构（XRD）、性能（热导等）；
金属材料：成分、力学性能、腐蚀性能。

7.2 过程检验

薄膜厚度：椭偏仪或台阶仪；
成分：EDS 或 XPS；
结合力：划痕试验（临界载荷＞20N）；
密封性：氦质谱（半成品）。

7.3 成品检验

按 T/BYXT 169-172 相应等级要求：
外观：无裂纹、无气泡、无污染；
尺寸：公差±0.1mm（关键尺寸）；
性能：输出电压、功率、效率；
安全：表面剂量率、密封性、绝缘电阻。

8 标志、包装、运输、贮存

8.1 标志

材料标识：稀土材料类型、成分、批号；
质量标识：检验合格章、日期；
安全标识：放射性标志（如含核素）。

8.2 包装

洁净包装：真空或氮气保护，防氧化；
缓冲包装：防震泡沫，防机械损伤；
屏蔽包装（含核素时）：铅或贫铀屏蔽，表面剂量率＜2mSv/h。

8.3 运输

普通材料：常规物流；
含核素：GB 11806 B(U)型包装；
温敏材料（RE-KPF_6）：-20℃～+40℃，避免高温分解。

8.4 贮存

环境：温度-40℃～+40℃，湿度＜60%RH，洁净；

期限：稀土材料（未封装核素）2 年；核电池（成品）按设计寿命。

附录 A

（规范性附录）

稀土材料物理化学参数表

A.1

材料	密度(g/cm^3)	热导率(W/m·K)	CTE(10^{-6}/K)	硬度(GPa)	电阻率(Ω·cm)	主要应用
θ-TaN	15.6	900	5.0	20	＞10^{12}	TIM、壳体
La-Ce-Al-O	5.2	1.0	7.0	8	10^{14}	荧光层
RE-KPF_6	2.8	1.5	25	0.5	10^{13}	制冷
RE-GaN	6.1	130	3.2	15	10^{8}	光伏
RE-SiC	3.2	120	4.0	25	10^{5}	热电

附录 B

（资料性）

设计计算示例

B.1 热阻网络计算示例

已知：核热源功率 P=5W，热点允许温度 T_hot=800℃，环境温度 T_amb=25℃。 要求：计算所需总热阻 R_total。

计算： ΔT = 800 - 25 = 775K R_total = ΔT / P = 155K/W

分配： R_source（核燃料）= 5K/W R_TIM1（θ-TaN）= 0.5K/W R_converter = 50K/W R_sink = 99.5K/W

验证：需散热器热阻＜100K/W，可通过增大散热面积或强制风冷实现。

B.2 能量转换效率估算

L1（衰变热）：100% L2（非晶层辐射）：15%光 + 85%热 L3（光伏转换）：15% × 40% = 6%电 L4（TEG 转换）：85% × 12% = 10.2%电 总电效率：16.2% 废热：83.8%（可利用 RE-KPF_6热泵提升综合效率至 60%）。

附录 C

（资料性）

制造工艺关键控制点

C.1

工序	控制参数	控制限	检测方法	记录
EVD 沉积	温度	700±20℃	热电偶	每炉
	厚度	100±10nm	椭偏仪	每片
非晶溅射	真空度	＜5×10^{-4}Pa	电离规	每炉
	成分	La:Ce:Al=45:35:20	EDS	每批
钎焊密封	温度	380±10℃	红外测温	每炉
	氦漏率	＜10^{-9}Pa·m^3/s	氦质谱	每只