

团体标准

T/BYXT 175-2026

稀土铝空气固态电池技术要求

Rare Earth Aluminum-Air Solid-State Battery Technical Requirements

(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 I

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 3

 5.1 外观要求 3

 5.2 电性能要求 3

 5.3 安全性能要求 5

 5.4 环境适应性要求 5

 5.5 材料要求 6

 5.6 制备工艺要求 7

6 试验方法 7

 6.1 试验条件 8

 6.2 外观检验 8

 6.3 电性能试验 8

 6.4 安全性能试验 9

 6.5 环境适应性试验 10

 6.6 材料性能试验 11

7 检验规则 11

 7.1 检验分类 11

 7.2 出厂检验 11

 7.3 型式检验 11

8 标志、包装、运输、贮存 11

 8.1 标志 12

 8.2 包装 12

 8.3 运输 12

 8.4 贮存 12

附录 A（规范性附录） 14

 A.1 单体电池结构示意图 14

附录 B（资料性） 15

 B.1 化学成分 15

 B.2 物理性能 15

 B.3 电化学性能 16

 B.4 热学性能 16

附录 C（资料性） 17

C.1 理论背景 17

C.2 实验数据 17

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。

稀土铝空气固态电池技术要求

1 范围

本文件规定了稀土铝空气固态电池的术语和定义、分类与命名、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于以稀土掺杂亚稳相氮化钽（RE-TaN_x）超离子导材料为关键固态电解质组分，以稀土改性铝合金为阳极的固态铝空气单体电池、电池模块及电池系统。

本文件不适用于采用液态或凝胶态电解质的铝空气电池，以及非稀土掺杂的固态铝空气电池。

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 191 包装储运图示标志

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限(AQL)检索的逐批检验抽样计划

GB/T 31467.1-2015 电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统 第1部分：高功率应用测试规程

GB/T 31467.2-2015 电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统 第2部分：高能量应用测试规程

GB/T 31484-2015 电动汽车用动力蓄电池循环寿命要求及试验方法

GB/T 31485-2015 电动汽车用动力蓄电池安全要求及试验方法

GB/T 31486-2015 电动汽车用动力蓄电池电性能要求及试验方法

GB 38031-2020 电动汽车用动力蓄电池安全要求

GB/T 19596-2017 电动汽车术语

GB/T 36972-2018 电动自行车用锂离子蓄电池

T/BYXT 001-2023 稀土术语

T/BYXT 002-2023 稀土产品分类与牌号表示方法

IEC 62660-1:2018 电动道路车辆用锂离子二次电池 第1部分：性能测试

IEC 62660-2:2018 电动道路车辆用锂离子二次电池 第2部分：可靠性和滥用测试

UN 38.3 联合国《关于危险货物运输的建议书 试验和标准手册》第3部分 38.3节

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

稀土铝空气固态电池 rare earth aluminum-air solid-state battery

以稀土改性铝合金为阳极，以稀土掺杂亚稳相氮化钽（RE-TaN_x）与石榴石型氧化物（Pr-LLZTO）构成的异质结构为固态电解质，以空气中的氧气为阴极活性物质，通过铝的氧化和氧的还原实现化学能向电能转换的一次（或 mechanically rechargeable）电池。

3.2

RE-TaN_x 超离子导材料 RE-TaN_x superionic conductor

以亚稳相氮化钽（θ-TaN）为基体，掺杂稀土元素（La、Pr、Ce 中的一种或多种）形成的具有锂离子快速传导能力的陶瓷材料，室温锂离子电导率不低于 $5 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ ，电子电导率不高于 10^{-8} S/cm 。

3.3

异质固态电解质 heterogeneous solid-state electrolyte

由两种或两种以上不同晶体结构、不同离子传导机制的固态电解质材料通过界面键合形成的复合电解质结构，本文件特指 Pr-LLZTO/RE-TaNx 双层异质结构。

3.4

等离子体活化界面 plasma-activated interface

通过低温等离子体处理在两种固态电解质材料表面产生活性位点，促进界面处化学键合，降低界面阻抗的处理工艺。

3.5

机械可充电 mechanically rechargeable

通过物理更换消耗的阳极材料（铝）实现电池能量补充的方式，区别于电化学可充电（通过外接电源逆转电化学反应）。

3.6

额定容量 rated capacity

在规定的条件下，电池完全放电所能提供的电量，单位为 Ah（安时）。

3.7

质量能量密度 gravimetric energy density

电池所能输出的电能与其质量之比，单位为 Wh/kg（瓦时每千克）。

3.8

体积能量密度 volumetric energy density

电池所能输出的电能与其体积之比，单位为 Wh/L（瓦时每升）。

4 分类与命名

4.1 分类

4.1.1 按应用场景分类

动力型（P）：适用于电动汽车、电动船舶、eVTOL 等交通工具；

储能型（E）：适用于电网储能、分布式能源等固定式储能；

特种型（S）：适用于极端环境（高/低温、高海拔、强振动等）装备。

4.1.2 按结构形式分类

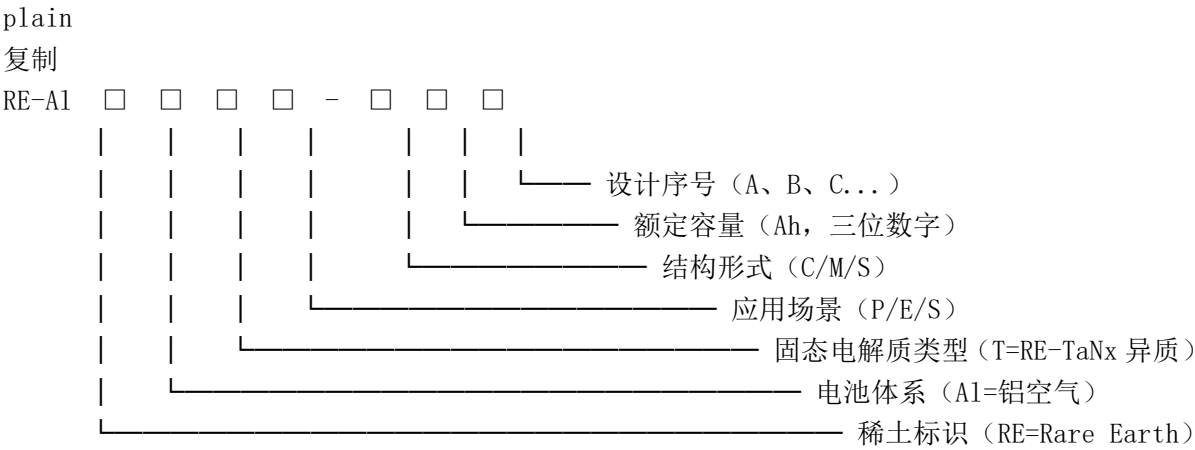
单体电池（C）：基本电化学单元；

电池模块（M）：由若干单体电池串联和/或并联组成；

电池系统（S）：由若干电池模块、管理系统、热管理系统、封装结构等组成。

4.2 命名规则

稀土铝空气固态电池型号按照以下规则命名：



示例：RE-A1-TPC-100-A 表示：稀土铝空气固态电池，RE-TaNx 异质电解质，动力型，单体电池，额定容量 100Ah，第一代设计。

5 技术要求

5.1 外观要求

- 5.1.1 电池外壳应清洁、无锈蚀、无变形、无裂纹，表面涂层均匀，无流挂、气泡、脱落等现象。
- 5.1.2 电池标识应清晰、完整，包括型号、额定参数、极性标识、警示标识等。
- 5.1.3 电池接口应无损伤、无变形，接触面应平整、光洁，无氧化、无污染。
- 5.1.4 固态电解质表面应无可见裂纹、无气泡、无杂质污染，颜色均匀。

5.2 电性能要求

5.2.1 单体电池电性能

单体电池在 25℃±2℃条件下的电性能应满足表 1 要求。

表 1 单体电池电性能要求

项目	单位	技术要求	试验方法
额定电压	V	2.70~2.80	6.3.1
额定容量	Ah	标称值±3%	6.3.2
质量能量密度	Wh/kg	≥8,000（动力型） ≥8,500（储能型） ≥7,500（特种型）	6.3.3
体积能量密度	Wh/L	≥4,000（动力型） ≥4,200（储能型） ≥3,800（特种型）	6.3.3

项目	单位	技术要求	试验方法
最大持续放电电流	A	$\geq 3C$	6.3.4
峰值放电电流（30s）	A	$\geq 5C$	6.3.4
循环寿命（至 80%容量）	次	$\geq 3,000$ （机械更换阳极）	6.3.5
自放电率（25℃，30 天）	%	≤ 1.5	6.3.6
能量效率（额定工况）	%	≥ 75	6.3.7

5.2.2 电池模块电性能

电池模块的电性能应满足表 2 要求。

表 2 电池模块电性能要求

项目	单位	技术要求	试验方法
额定电压	V	标称值 $\pm 2\%$	6.3.1
额定容量	Ah	标称值 $\pm 5\%$	6.3.2
质量能量密度	Wh/kg	$\geq 7,500$	6.3.3
体积能量密度	Wh/L	$\geq 3,800$	6.3.3
模块内单体一致性（容量）	%	≤ 3	6.3.8
模块内单体一致性（电压）	mV	≤ 50	6.3.8

5.2.3 电池系统电性能

电池系统的电性能应满足表 3 要求。

表 3 电池系统电性能要求

项目	单位	技术要求	试验方法
额定电压	V	标称值 $\pm 2\%$	6.3.1
额定容量	Ah	标称值 $\pm 5\%$	6.3.2
质量能量密度	Wh/kg	$\geq 7,000$	6.3.3

项目	单位	技术要求	试验方法
体积能量密度	Wh/L	$\geq 3,500$	6.3.3
系统效率（含 BMS、热管理）	%	≥ 70	6.3.7
绝缘电阻	M Ω	≥ 100 （直流 500V）	6.3.9

5.3 安全性能要求

5.3.1 单体电池安全性能

单体电池应满足表 4 的安全性能要求。

表 4 单体电池安全性能要求

项目	试验条件	技术要求	试验方法
过放电	1C 放电至 0V	不起火、不爆炸、不漏液	6.4.1
过充电	2C 充电至 110%SOC	不起火、不爆炸	6.4.2
短路	外部短路（ $<5\text{m}\Omega$ ）	不起火、不爆炸，表面温度 $<150^{\circ}\text{C}$	6.4.3
针刺	$\Phi 3\text{mm}$ 钢针，贯穿	不起火、不爆炸	6.4.4
挤压	半径 75mm 半圆柱， 挤压力 100kN 或变形 30%	不起火、不爆炸	6.4.5
热失控	ARC 测试，升温速率 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	触发温度 $>300^{\circ}\text{C}$	6.4.6
跌落	1m 高度，6 个方向	不起火、不爆炸，电压正常	6.4.7

5.3.2 电池系统安全性能

电池系统应满足 GB 38031-2020 中规定的安全要求，并额外满足：
 热扩散：单一电池热失控后，5 分钟内不起火、不爆炸；
 防水防尘：满足 IP67 等级；
 电磁兼容：满足 GB/T 18655 Class 3 要求。

5.4 环境适应性要求

5.4.1 温度适应性

电池在不同温度条件下的性能应满足表 5 要求。

表 5 温度适应性要求

项目	试验条件	技术要求	试验方法
额定工作高温	+150℃	容量保持率≥70%	6.5.1
额定工作低温	-70℃	容量保持率≥70%	6.5.2
极限工作高温	+150℃，持续 2h	不起火、不爆炸	6.5.3
极限工作低温	-70℃，持续 2h	可正常启动	6.5.4
温度循环	-70℃↔ +150℃， 循环 100 次	容量保持率≥90%， 外观无损伤	6.5.5

5.4.2 机械环境适应性

应符合表 6 要求。

表 6

项目	试验条件	技术要求	试验方法
振动	随机振动，20G RMS	结构完好，性能正常	6.5.6
机械冲击	半正弦波，50G，11ms	不起火、不爆炸，性能正常	6.5.7
盐雾	5%NaCl，35℃，96h	外观无腐蚀，绝缘电阻>50MΩ	6.5.8

5.4.3 低气压适应性

应符合表 6 要求。

表 6

项目	试验条件	技术要求	试验方法
高海拔	25kPa（等效海拔 10,000m）	正常工作，无鼓包、无泄漏	6.5.9

5.5 材料要求

5.5.1 RE-TaNx 超离子导材料

RE-TaNx 材料应满足附录 B 的技术要求，关键指标包括：

相组成： θ -Ta₂N₃≥98%，无 δ -Ta₂N₃ 杂相；

稀土掺杂：La 3-7at%，或 Pr 3-5at%，或 Ce 4-8at%；

离子电导率： $\geq 5 \times 10^{-4}$ S/cm (25℃)；

电子电导率： $\leq 10^{-8}$ S/cm (25℃)；

热导率： ≥ 800 W/m·K (25℃)。

5.5.2 Pr-LLZTO 石榴石电解质

化学式： $\text{Li}_{6-x}\text{Pr}_x\text{La}_{3-x}\text{Zr}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{12}$, $x=0.3-0.7$ ；

离子电导率： $\geq 8 \times 10^{-4}$ S/cm (25℃)；

相对密度： $\geq 98\%$ ；

晶粒尺寸：1-3 μm 。

5.5.3 稀土改性铝阳极

合金成分：Al-(2.5-4.5)La-(1.0-2.0)Ce-(0.5-1.0)Sc-(0.5-1.0)Zn (at%)；

孔隙率：70-80%；

平均孔径：100-200nm；

腐蚀速率： ≤ 0.5 $\mu\text{m/h}$ (25℃，固态电解质接触)。

5.6 制备工艺要求

5.6.3.1 固态电解质制备

5.6.1.1 应采用脉冲激光沉积 (PLD) 或电致气相沉积 (EVD) 方法制备。

5.6.1.2 PLD 工艺参数应满足：

激光波长：248nm (KrF) 或 308nm (XeCl)

激光能量密度：2-5 J/cm²

基底温度：600-750℃

沉积气氛： O_2 (Pr-LLZTO) 或 N_2 (RE-TaNx)， 10^{-5} - 10^{-3} mbar

沉积速率：3-10 nm/min

5.6.1.3 异质界面应进行等离子体活化处理，处理参数：

等离子体源：Ar/ O_2 混合 (9:1)

功率：50-150W

时间：1-5min

处理后界面阻抗应 <0.5 $\Omega \cdot \text{cm}^2$

5.6.2 电池组装

5.6.2.1 应在干燥环境 (露点 $<-40^\circ\text{C}$) 或惰性气氛 (Ar, $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2<1\text{ppm}$) 中进行。

5.6.2.2 阳极与电解质键合应采用热压工艺：

温度：200-300℃

压力：5-20 MPa

时间：10-30min

5.6.2.3 电池密封应满足气密性要求： He 泄漏率 $<1 \times 10^{-9}$ Pa·m³/s。

6 试验方法

6.1 试验条件

6.1.1 标准试验大气条件

除非另有规定，试验应在以下环境条件下进行：

温度：25℃±2℃

相对湿度：45%~75%

大气压力：86kPa~106kPa。

6.1.2 测量仪器精度

电压测量装置：±0.1% FS

电流测量装置：±0.1% FS

温度测量装置：±0.5℃

时间测量装置：±0.1%

质量测量装置：±0.1%。

6.2 外观检验

目视检查电池外观，必要时使用 5 倍放大镜。尺寸测量使用游标卡尺或三坐标测量机，精度±0.02mm。

6.3 电性能试验

6.3.1 额定电压测量

电池在 25℃±2℃下静置 2h 后，用电压表测量开路电压，即为额定电压。

6.3.2 额定容量试验

按以下步骤进行：

a) 电池在 25℃±2℃下以 1C 电流放电至截止电压 1.5V；

b) 静置 30min；

c) 更换新阳极（机械可充电电池）或充电至满电状态；

d) 以 1C 电流恒流放电至截止电压 1.5V，记录放电容量；

e) 重复 a)-d) 3 次，取平均值作为额定容量。

6.3.3 能量密度试验

测量电池质量（m，kg）和外形尺寸计算体积（V，L），按 6.3.2 方法测量放电能量（E，Wh）：

质量能量密度 = E / m （Wh/kg）

体积能量密度 = E / V （Wh/L）

6.3.4 最大放电电流试验

以 3C 电流恒流放电，记录电压曲线，要求放电过程中最低电压>1.8V。

以 5C 电流脉冲放电 30s，记录电压降，要求电压>1.5V。

6.3.5 循环寿命试验

模拟机械可充电工况：

放电：1C 至 1.5V

更换阳极：模拟换电时间 10min

静置：10min

记录每次循环容量，至容量衰减至 80%额定容量。

6.3.6 自放电率试验

电池充满电后，在 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 下开路搁置 30 天，测量剩余容量：

自放电率 = (初始容量 - 剩余容量) / 初始容量 $\times 100\%$ 。

6.3.7 能量效率试验

记录放电能量 (E_{dis}) 和更换阳极消耗的能量等价 (或充电能量 E_{ch} ，如适用)：

能量效率 = $E_{\text{dis}} / E_{\text{ch}} \times 100\%$ 。

6.3.8 一致性试验

对模块内所有单体电池进行容量和电压测量，计算：

容量一致性 = $(C_{\text{max}} - C_{\text{min}}) / C_{\text{avg}} \times 100\%$

电压一致性 = $V_{\text{max}} - V_{\text{min}}$ (开路状态)。

6.3.9 绝缘电阻试验

用 500V 直流兆欧表测量电池正负极与外壳之间的绝缘电阻。

6.4 安全性能试验

6.4.1 过放电试验

电池以 1C 电流放电至 0V，继续强制放电 1h，观察 1h。

6.4.2 过充电试验

更换新阳极后，以 2C 电流充电至额定容量的 110%，观察 1h。

6.4.3 短路试验

将电池正负极通过 $< 5\text{m}\Omega$ 电阻短接 10min，记录温度变化，观察 1h。

6.4.4 针刺试验

用 $\Phi 3\text{mm}$ 耐高温钢针以 80mm/s 速度垂直贯穿电池，停留 10min，观察 1h。

6.4.5 挤压试验

按 GB 38031-2020 中 8.2.2 方法进行。

6.4.6 热失控试验

采用绝热量热仪 (ARC)，以 0.5℃/min 升温速率加热，记录自放热起始温度。

6.4.7 跌落试验

电池从 1m 高度自由跌落至水泥地面，6 个方向各一次，检查外观和性能。

6.5 环境适应性试验

6.5.1 额定工作高温试验

电池在+150℃环境下静置 2h，以 0.5C 放电，测量容量。

6.5.2 额定工作低温试验

电池在-70℃环境下静置 16h，以 0.1C 放电，测量容量。

6.5.3 极限工作高温试验

电池在+150℃环境下静置 2h，观察外观和安全性。

6.5.4 极限工作低温试验

电池在-70℃环境下静置 2h，尝试启动放电。

6.5.5 温度循环试验

按 GB/T 31467.1-2015 中 7.7 方法进行，温度范围-70℃~+150℃。

6.5.6 振动试验

按 GB/T 31467.3-2015 中 7.1 方法进行随机振动。

6.5.7 机械冲击试验

按 GB/T 31467.3-2015 中 7.2 方法进行半正弦冲击。

6.5.8 盐雾试验

按 GB/T 2423.17 方法进行 96h 中性盐雾试验。

6.5.9 低气压试验

按 GB/T 31467.3-2015 中 7.6 方法进行，气压 25kPa。

6.6 材料性能试验

6.6.1 离子电导率测量

采用交流阻抗谱（EIS），频率范围 1MHz-0.1Hz，振幅 10mV，用 Z-view 软件拟合。

6.6.2 电子电导率测量

采用直流极化法，施加小电压（ $<0.5V$ ），测量稳态电流。

6.6.3 相组成分析

采用 X 射线衍射（XRD），Cu K α 辐射， 2θ 范围 $10^\circ - 90^\circ$ ，Rietveld 精修定量。

7 检验规则

7.1 检验分类

检验分为：

出厂检验（例行检验）

型式检验（周期检验或鉴定检验）。

7.2 出厂检验

7.2.1 每批产品应进行出厂检验，检验项目包括：

外观（5.1）

额定电压（5.2.1）

额定容量（5.2.1）

绝缘电阻（5.2.3）

7.2.2 抽样方案按 GB/T 2828.1，一般检验水平 II，AQL=1.0。

7.3 型式检验

7.3.1 有下列情况之一时，应进行型式检验：

新产品定型鉴定；

正式生产后，结构、材料、工艺有较大改变；

停产一年以上恢复生产；

出厂检验结果与上次型式检验有较大差异；

国家质量监督机构提出检验要求。

7.3.2 型式检验项目包括本文件第 5 章全部技术要求。

7.3.3 型式检验样品数量不少于 3 组

8 标志、包装、运输、贮存

8.1 标志

8.1.1 每个电池应清晰、持久地标明：

型号、规格

额定电压、额定容量

质量能量密度、体积能量密度

生产日期、批号

制造商名称、地址

警示标识（禁止拆解、禁止短路等）

稀土元素标识（符合 T/BYXT 002-2023）

8.1.2 电池系统应有铭牌，标明系统参数和安全警示。

8.2 包装

8.2.1 电池应采用防潮、防震包装，内包装为铝塑复合袋抽真空密封，外包装为瓦楞纸箱或木箱。

8.2.2 包装箱内应附：

产品合格证

使用说明书

安全数据表（SDS）

更换阳极操作指南（机械可充电电池）

8.2.3 包装储运图示标志应符合 GB/T 191 规定。

8.3 运输

8.3.1 电池运输应符合 UN 38.3 要求。

8.3.2 运输过程中应：

防止剧烈振动、冲击、挤压

防止日晒、雨淋

温度控制在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$

8.3.3 空运时应按危险品申报，符合 IATA DGR 规定。

8.4 贮存

8.4.1 电池应贮存在干燥、通风、清洁的环境中。

8.4.2 贮存条件：

温度： $-20^{\circ}\text{C}\sim+35^{\circ}\text{C}$

相对湿度： $\leq 75\%$

避免阳光直射，远离热源、火源

8.4.3 长期贮存（ >6 个月）应：

每 6 个月检查一次电压

电压低于 2.0V 时应更换阳极

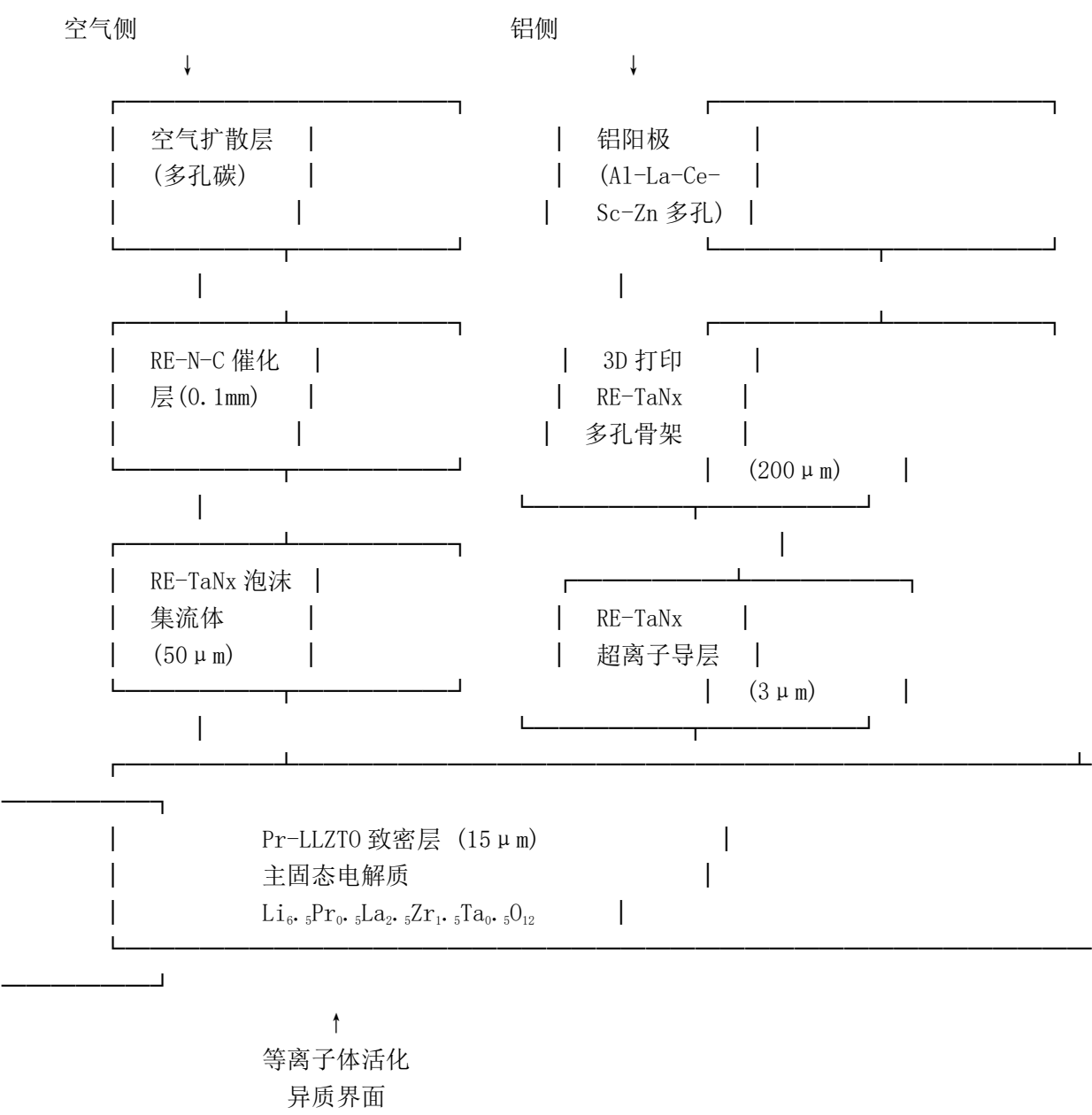
贮存期不超过 2 年（从生产日期计）。

附录 A

(规范性附录)

稀土铝空气固态电池结构示意图

A.1 单体电池结构示意图



附录 B
(资料性)

RE-TaNx 超离子导材料技术要求

B.1 化学成分

RE-TaNx 材料的化学成分应符合表 B. 1 要求。

表 B. 1 RE-TaNx 化学成分 (at%)

元素	含量范围	允许偏差
Ta	85.0-95.0	±0.5
N	49.5-50.5 (相对于金属)	±0.3
La	0-7.0	±0.3
Pr	0-5.0	±0.2
Ce	0-8.0	±0.3
O	≤1.0	-
C	≤0.5	-
其他杂质	≤0.5	-

注：La、Pr、Ce 至少含一种，总稀土含量 3-10at%。

B.2 物理性能

项目	单位	技术要求	试验方法
晶体结构	-	θ-TaN (六方)，空间群 P6 ₃ /mmc	XRD
相纯度	%	≥98% θ相，无 δ相	XRD Rietveld 精修
晶格常数 a	Å	5.25-5.35	XRD
晶格常数 c	Å	2.90-3.00	XRD

项目	单位	技术要求	试验方法
密度	g/cm^3	13.8-14.2	阿基米德法
维氏硬度	GPa	20-30	GB/T 4340.1
断裂韧性	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	3-5	压痕法

B.3 电化学性能

项目	单位	技术要求	试验方法
锂离子电导率 (25℃)	S/cm	$\geq 5 \times 10^{-4}$	EIS
活化能	eV	≤ 0.25	Arrhenius 拟合
电子电导率 (25℃)	S/cm	$\leq 10^{-8}$	直流极化
电化学窗口	V vs Li/Li ⁺	0-4.5	循环伏安
与锂稳定性	-	500h 无反应	对称电池

B.4 热学性能

项目	单位	技术要求	试验方法
热导率 (25℃)	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	≥ 800	激光闪射法
热膨胀系数 (25-300℃)	$10^{-6}/\text{K}$	4.0-5.0	热膨胀仪
比热容	$\text{J}/\text{g} \cdot \text{K}$	0.18-0.22	DSC

附录 C
(资料性)

稀土元素掺杂浓度与离子电导率关系

C.1 理论背景

稀土元素掺杂通过以下机制影响 θ -TaN 的离子电导率：
价态补偿产生 Li^+ 空位
晶格畸变扩大迁移通道
电子结构调控优化 Li^+ 与骨架相互作用

C.2 实验数据

表 C.1 给出了不同稀土元素掺杂浓度与离子电导率的典型关系。
表 C.1 稀土掺杂浓度-离子电导率关系（25℃）。

稀土元素	掺杂浓度 (at%)	离子电导率 (S/cm)	备注
无掺杂	0	1×10^{-5}	基准
La	3	3×10^{-4}	-
La	5	8×10^{-4}	最优
La	7	5×10^{-4}	过掺杂
Pr	3	5×10^{-4}	-
Pr	5	1×10^{-3}	最优
Ce	5	6×10^{-4}	-
Ce	8	4×10^{-4}	过掺杂
La+Pr (1:1)	各 2.5	9×10^{-4}	协同效应