

Toyota固态锂电池专利技术分析报告（2004-2024）

1. 概述

Toyota在固态锂电池领域的专利布局呈现显著的阶段性特征。2014年前为技术探索期，聚焦硫化物固态电解质合成工艺（如专利1）；2016-2017年进入系统集成阶段，围绕全固态电池结构设计与安全控制集中申请专利（如专利2-9）；2018年后转向材料优化与制造工艺创新，重点突破硅基负极界面稳定性（专利17）和复合电解质体系（专利25）。专利授权率自2018年后显著提升，表明核心技术逐步成熟。

2. 专利分布与技术演进

2.1 固态电解质

- 硫化物体系主导**：2014年首次公开LiHS/LiX合成路径（专利1），2018年引入Br/I/N元素提升离子电导率至 10^{-4} S/cm（专利10），2020年通过金属-磷硫化物复合（LPS/MPS）实现电解质活化能 ≤ 0.36 eV（专利29）
- 氧化物与聚合物补充**：2021年开发含氟化物超离子导体（专利31），2023年提出Zr基石榴石型电解质界面改性技术（专利43）

2.2 正极材料

- 橄榄石型结构优化**：2017年通过过渡金属硫化物表面包覆（厚度 ≤ 10 nm）抑制相变（专利4），2023年引入双电解质层（LiX/Li-S）降低热失控风险（专利44）
- 复合导电网络构建**：2017年采用LiNbO₃包覆提升界面稳定性（专利7），2021年通过氧化物/硫化物电解质空间分布调控（SB/SA=3-30%）降低接触阻抗（专利33）

2.3 负极体系

- 硅基材料突破**：2019年通过预掺杂石墨/LTO补偿硅膨胀（专利14），2022年开发陶瓷-柔性复合负极（专利39），实现100%压实密度
- 金属锂界面工程**：2020年提出纳米合金界面层（含Mg/Zn/Ag）抑制枝晶（专利28），2024年开发Li-Mg-X（X=Zn/Sn）复合层提升循环稳定性（专利48）

2.4 制造工艺

- 层压工艺创新**：2017年采用转印法控制粘结剂梯度分布（专利34），2022年通过介电测试优化绝缘层可靠性（专利37）
- 封装技术升级**：2019年开发多层树脂封装结构（弹性模量比 ≤ 0.4 ）（专利21），2024年引入电解铁箔集流体（Ra=0.2-0.6 μ m）防止硫化（专利38）

3. 材料创新趋势

材料类别	关键进展	时间趋势
固态电解质	$\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11} \rightarrow \text{Li-P-S-Br-I-N} \rightarrow \text{LPS/MPS复合}$	2014→2018→2020
正极活性物质	$\text{LiFePO}_4 \rightarrow \text{过渡金属硫化物包覆} \rightarrow \text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2/\text{LiX复合}$	2017→2023
负极体系	石墨/LTO \rightarrow Si/C复合 \rightarrow 金属锂/纳米合金界面	2019→2022→2024

4. 技术路线特征

- 1. 电解质先行 (2004-2014)：确立硫化物固态电解质合成工艺，解决基础离子传导问题
- 2. 系统集成 (2015-2018)：开发光检测 (专利2)、PTC薄膜 (专利8) 等安全控制技术，完善电池架构
- 3. 材料优化 (2019-2021)：突破硅基负极膨胀抑制、正极/电解质界面改性等关键瓶颈
- 4. 量产准备 (2022-2024)：聚焦卷压工艺 (专利30)、封装可靠性 (专利42) 等制造技术升级

5. 未来三年展望

- 高能量密度路线：基于金属锂负极 (专利28) 和富镍正极 (专利44) 的组合，预计能量密度突破400 Wh/kg
- 界面工程深化：开发梯度复合电解质 (专利24) 和自适应粘结剂体系 (专利41)，提升循环寿命至 > 2000次
- 制造技术突破：推进干法电极工艺 (专利46) 和模块化封装技术 (专利42)，降低生产成本30%以上

参考文献

[1] Manufacturing Method for Sulfide-Based Solid Electrolyte Material (2014)

[2] All-Solid-State Battery System (2016)

[48] All-Solid-State Battery and Manufacturing Method (2024)