应用科技研究

2026 年 11 月 第 1 卷第 5 期

# 钠金属电池集流体界面调控研究进展

张树铠 [1]，赵晨星 [1]，赵玉文 [1]，高欢 [1]，张志佳 [1,2*]

1.天津工业大学 材料科学与工程学院，分离膜与膜过程国家重点实验室，天津市；2. 江苏复源芥子新材料研究院金属材料实验室，江苏 徐州

**摘　要**｜本文围绕钠金属电池集流体的界面调控与循环演化展开综述，按基底晶面、表面化学、合金型界面和磁控溅射薄膜归纳钠的成核、生长及剥离行为。结合原位成像、界面物相分析、活性钠损失定量和有限钠全电池测试，比较不同策略对沉积均匀性、电子接触和循环可逆性的影响。现有的相关研究证实，集流体改性效果取决于成核动力学、沉积层锚定、SEI 演化以及测试条件的共同作用。Al(100)晶面可改善电解液润湿和 $Na^+$ 传输，并在初始无负极电池中表现出较高的循环稳定性。

**关键词**｜钠金属电池；集流体；磁控溅射；金属薄膜；界面调控

Copyright © 2026 by the author(s).

This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

## 引言

钠金属理论比容量约为 1166 $mAh \cdot g^{-1}$，具有较低的电极电势，是高比能钠电池的重要负极材料[1]。在初始无负极体系中，正极释放的 $Na^+$ 在充电过程中迁移至负极集流体，并在其表面还原沉积为金属钠[2]。集流体表面的化学组成、晶体结构和形貌会影响钠的初始成核，基底的机械完整性和界面结合状态则关系到后续剥离过程。比较不同集流体的循环性能，需要同步考察电子传输、沉积形貌和界面演化。

近些年来，集流体相关的研究工作逐步从静态材料参数的对比分析，转向对于晶面本征特性、亲钠位点、合金化反应以及剥离接触状态的协同分析工作，研究的重心也从初始成核环节延伸至沉积—剥离完整过程当中的界面演化行为。

已有的综述文献会把负极集流体的改性手段归纳为三维结构设计、元素掺杂、引入晶种以及构筑缓冲层等几类策略[3]。平面金属箔的改性方式大多会调整表面组分以及界面接触情况，基底部分依旧维持箔材本身的形态。三维结构则可以进一步调整钠沉积的空间分布情况以及有效反应的面积。不同的研究工作会在面容量、初始钠库存以及电解液体系等方面存在区别，那么就需要依靠统一的测试条件去对比各类集流体所具备的调控作用。

本文运用叙述性综述的研究方式，依靠 Web of Science、Scopus 以及中国知网作为主要的检索渠道，

作者简介：张志佳，天津工业大学材料科学与工程学院教授，博士生导师，主要从事电化学能源存储与转化、金属集流体及金属基复合材料等方向的研究。

文章引用：张树铠, 赵晨星, 赵玉文, 高欢, 张志佳. 钠金属电池集流体界面调控研究进展[J]. 应用科技研究, 2026, 1（5）: 251-202.

https://doi.org/110.68070/asymrk92

检索工作的截止时间为 2026 年 11 月 14 日，检索关键词包含“sodium metal battery”“current collector”“sodium deposition”“interface engineering”“magnetron sputtering”“aluminum foil”等。纳入的文献资料需要直接和钠沉积/剥离过程、集流体界面调控、金属薄膜制备或是有限钠全电池验证相关联，并且能够追溯对应的关键实验条件、表征手段或者计算支撑依据。和钠金属沉积不存在直接联系的材料耐蚀性研究、没有给出完整测试条件的文献报道以及重复性偏弱的二次资料，不会被选用作为核心论据。

# 1 集流体调控钠沉积的基本机制

## 1.1 界面反应与电子供给

溶剂化钠离子抵达电极近表面的区域之后，就会经历配位结构的重排、界面传质以及电子转移的相关过程，最终得以还原成为金属钠，对应的总反应可以参考公式（1）。针对人工 SEI 的相关研究结果表明，稳定的界面层需要同时契合离子传导、电子绝缘以及机械完整性这几项要求[4]。在沉积的过程当中，电子会沿着集流体开展传输工作，$Na^+$ 穿过 SEI 之后就可以抵达对应的反应位点。

$$[Na(solv)_n]^+ + e^- \rightleftharpoons Na(s) + n\,solv \quad (1)$$

Yui 等人借助原位光学显微技术去对钠的沉积-剥离过程开展动态观测工作，发现钠晶核偏向于优先在电极表面所存在的凹坑缺陷位置生成，之后逐步生长形成针状的形貌；进入剥离阶段当中，一部分“死钠”就会从电极的表面发生脱落[5]。这样的行为说明，沉积形貌的演化、剥离环节的界面接触状态以及界面的动态变化过程，都会对电化学体系当中的电压信号起到影响作用。

## 1.2 异相成核与表面扩散

新相的形成会伴随着体系体积自由能的下降以及新增界面能的上升。在简化后的理论模型当中，界面能越高，生成临界晶核所需要的半径就会越大；如果有效过电位得以升高，临界晶核的半径就会相应变小。异相成核的过程会受到基底界面能以及液固接触角的共同作用。

Scharifker–Hills 模型依靠无量纲化的电流暂态曲线去区分瞬时成核以及渐进成核这两类模式，但是该模型的推导前提为三维成核过程并且反应会受扩散步骤所控制[6]。在瞬时成核模式当中，晶核大多会在反应刚开始的阶段集中并且大量生成；渐进成核所具备的特性也就是新晶核会跟着反应的持续推进不断出现。在完成无量纲处理之后，电流峰值前后的信号变化规律可以更加方便不同体系之间开展横向对比工作。

在恒电流测试当中，成核过电位一般选取初始电压谷值和后续生长平台二者之间的电位差值，用来表征钠成核起始阶段以及稳定生长阶段当中的电位损耗差别。需要加以说明的是，该参数和相对于 $Na^+/Na$ 参比电极的绝对电位并不契合。电流暂态测试可以捕捉成核行为跟着时间变化的动态演化过程，显微表征手段则能够直观展示晶核的数量、尺寸以及空间分布的特性。这两种表征方式的观测方向各有区别，只凭借成核过电位更低这单一指标，难以对沉积层的综合性能开展完整的评价工作。

## 1.3 通量分布与剥离接触

Chazalviel 开展的相关研究表明，在特定条件当中，界面离子耗尽现象以及枝晶状金属沉积行为之间会存在内在的关联[7]。Sand 时间的计算表达式如式（2）所示，式里 D 代表电解液的有效盐扩散系数，$c_0$ 为初始盐浓度，j 是电流密度，$t_+$ 代表阳离子迁移数，F 为法拉第常数。该公式的推导工作是建立在一价二元电解液体系、半无限一维扩散过程以及恒电流工况的前提之上，没有把对流效应纳入考量范围，会用作分析传质受限过程当中的演化趋势。

$$\tau_{Sand} = \frac{\pi D}{4}\left[\frac{Fc_0}{j(1-t_+)}\right]^2 \quad (2)$$

钠剥离的过程当中，沉积层有一定概率和集流体断开电子接触，进而带来容量损失的问题。Deng 等人借助无外加压力的光学电池去开展观察工作，发现沉积的金属钠在剥离阶段会从基底的表面发生脱落，并且以细小金属碎屑的形态分散在电解液里面。这一部分钠脱离了电子传输的路径，在后续的循环过程当中难以继续参与对应的电化学反应[8]。由此可见，电池内部所留存的金属钠并不一定具备电化学活性。

# 2 集流体结构与表面改性研究进展

## 2.1 铝箔晶面与表面状态

在铝基集流体体系中，钠原子的初始吸附和表面迁移会受到晶面取向、晶界排布以及表面状态的共同影响。Tang 等人制备了具有（100）择优取向的单晶铝基底，并通过原位表征和理论计算研究钠的沉积行为[9]。Al(100)表面的电解液接触角为 36.5°，低于商用铝箔的 42.3°，说明其具有更好的电解液润湿性；同时，$Na^+$ 界面传输活化能由商用铝箔的 50.7 $kJ\cdot mol^{-1}$ 降至 32.3 $kJ\cdot mol^{-1}$，交换电流密度由 3.3 $mA\cdot cm^{-2}$ 提高至 5.2 $mA\cdot cm^{-2}$[9]。这些结果表明，晶面有序化能够改善电解液铺展和界面电荷传递，但电解液接触角并不等同于钠晶核的固液接触角，仍需结合吸附能、成核过电位和形貌结果综合判断。

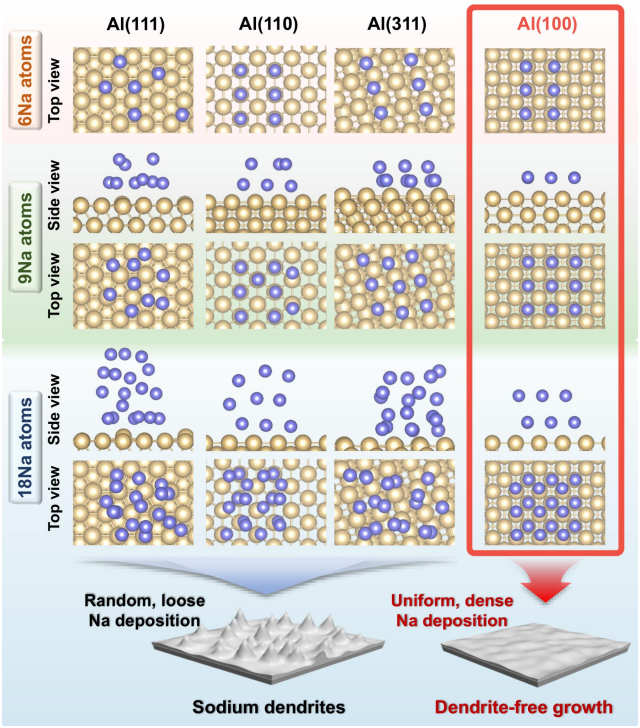


图 1 不同铝晶面上钠原子沉积与生长的计算模型[9]

Fig. 1. Computational models of sodium atom deposition and growth on different aluminum crystal facets

（金色与紫色球分别表示铝和钠原子，比较 6、9、18 个钠原子的顶视与侧视构型。）

图 1 对不同铝晶面上的钠原子排布和聚集状态进行了比较。计算结果显示，Al(100)对低覆盖度钠原子的平均吸附能处于较有利范围，且规则的表面几何有助于形成排列较均匀的初始钠层；随着覆盖度升高，吸附能差异逐渐减小，沉积层性质逐步接近金属钠本身[9]。因此，Al(100)的作用更适合表述为对沉积初期界面状态和 $Na^+$ 传输的协同调节，而不能简单归结为单一的“亲钠性增强”。在 2 $mA·cm^{-2}$、2 $mAh·cm^{-2}$条件下，Al(100)集流体循环 500 圈后的库仑效率达到 99.9%，相应钠对称电池在 0.5 $mA·cm^{-2}$、0.5 $mAh·cm^{-2}$条件下运行超过 2500 h[9]。

## 2.2 亲钠位点及其成核机制

在集流体改性的相关研究当中，构筑亲钠位点属于一类经常选用的策略。Zhu 等人借助第二主族金属在基体内部所具备的有限固溶效应，降低钠成核过程当中的阻力，并把镁活性位点均匀分散在三维导电骨架之内，以此去调控钠的成核位置以及空间分布状态[10]。Xing 等人在铜集流体的表面制备金、银、锗这类亲钠金属层，并与镓—锡—铟液态合金共同构筑复合界面，考察该界面对钠成核以及沉积均匀程度所带来的影响[11]。各类金属和钠之间的反应路径会存在区别，针对成核的分析工作需要结合实际生成的物相去开展判断。

复合亲钠界面所能实现的改性效果，会由金属层以及液态合金二者之间的界面协同作用所决定。对应的相关研究依靠对比不同金属层以及界面构型，去解析循环过程当中沉积形貌还有界面稳定性所发生的变化[11]。Deng 等人运用宏观光学图像、扫描电镜以及元素分布表征手段，对比钠剥离完成之后各类合金薄层在界面位置的留存情况[8]。该类界面可以从两个维度开展评价工作，其一为对初始成核行为的调节作用，其二是改性层和沉积钠在循环进程当中维持接触的能力。

## 2.3 反应与表面迁移的竞争

钠原子在完成表面吸附之后，会开展扩散以及迁移的相关过程，这两类过程同时对沉积形貌产生影响。Zou 等人选用纳米孪晶 Al−Si 合金当作研究模型，同步探究亲钠位点以及原子迁移的相关特性，并且引入电化学 Damköhler 数去解析界面反应和物质扩散二者之间所存在的竞争关系[12]。图 2 展示了不同反应速率以及传质条件之下的钠沉积形貌，也就是枝晶、岛状结构以及连续薄膜。对应的相关结论依靠电化学测试、原位表征以及原子尺度计算共同提供支撑。


https://doi.org/10.68070/asymrk92

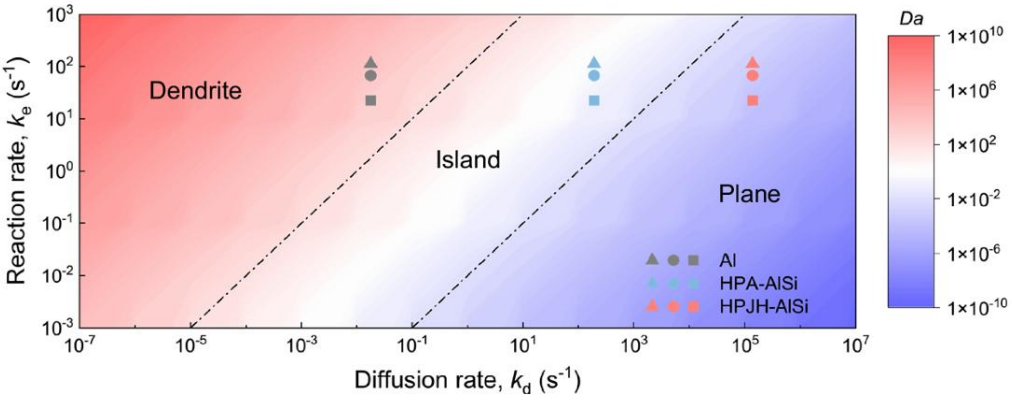


图 2 反应与扩散竞争控制钠沉积的形貌相图[12]

Fig. 2. Morphology phase diagram of sodium deposition governed by competition between reaction and diffusion

分子动力学模拟的结果表明，钠原子在各类材料表面之上所具备的扩散系数会存在差别。纳米孪晶 Al–Si、常规 Al–Si 合金以及纯铝表面对应的扩散系数依次为 $1.428\times10^{-3}$、$8.465\times10^{-4}$和 $6.196\times10^{-4}$ Å$^2$·ps$^{-1}$[12]。该研究团队依靠电化学测试手段以及 Damköhler 数，对界面反应速率和扩散速率开展定量对比工作，解析沉积过程从扩散控制模式向反应控制模式发生转变的条件，并且依托这些内容搭建图 2 当中所展示的形貌相图。

相关研究人员还借助环境透射电镜固态纳米电池去原位观测钠的沉积生长过程。在沉积时长达到 150 s 的时候，纳米孪晶 Al–Si 表面之上的钠沉积物呈现球状形态，它的直径约为 400 nm；另外两类对照基底的表面就生成了枝晶状的结构[12]。原位成像手段用来记录生长环节当中的动态变化情况，原子尺度计算则用来分析钠原子所开展的表面迁移行为。

### 2.4 三维宿主与平面薄膜的比较

三维宿主结构的相关研究工作主要涵盖三维骨架设计、元素掺杂、晶种引入以及缓冲层构筑等几类策略[3]。张智强等人围绕三维碳基集流体，探讨活性位点设计以及孔道结构调节所能够发挥的作用[13]。三维骨架可以为钠的沉积过程提供容纳的空间并且扩大有效反应面积，但它的质量占比、孔隙利用率、SEI 生长情况以及电解液消耗程度都需要纳入评价工作当中。沉积均匀性、电极整体厚度以及面载量同样会对最终的电化学性能产生影响。

平面薄膜集流体和三维骨架宿主承载钠沉积的空间模式存在区别。在平面体系当中，钠大多在集流体箔材的表面完成沉积并且生长；三维结构就可以引导钠进入孔道以及骨架的间隙内部。已有的相关综述已经把比表面积、骨架负载量、孔隙利用率以及界面成膜特性归入统一的评价框架当中[13]。

## 3 磁控溅射薄膜及界面演化

### 3.1 膜层生长与厚度控制

磁控溅射研究通常比较膜层材料、膜厚和沉积工艺。Yalçınöz 等人在商用 316L 不锈钢表面溅射 Ti、Ni、Ge 和 In 薄层，考察其对钠沉积—剥离行为的影响[14]。该研究采用室温直流溅射，先在硅片上用台阶仪标定沉积速率，再制备 50、200 和 500 nm 膜层，并结合电化学测试、SEM、XRD、拉曼和 XPS 跟踪初始膜层、合金化反应及 SEI 演化。

Deng 等人也采用物理气相沉积制备金属改性层，其中金和银通过磁控溅射沉积，铅和锡通过热蒸发制备，基底均为抛光不锈钢。沉积过程实时监测膜厚，并用台阶仪复核。研究先将膜厚统一为 100 nm，比较不同金属层的电压、库仑效率和循环后形貌，再进一步调整金、锡膜厚，以排除膜厚差异对电化学结果的影响[8]。

Yalçınöz 等人发现，锗和铟可优先与钠发生合金化反应，形成相应的缓冲层，钛和镍则作为不发生合金化的对照。首圈电化学活化条件优化后，50 nm 铟层在该组样品中表现出较好的长周期沉积—剥离稳定性[14]。

### 3.2 金属表面与SEI演化

集流体表面改性工作以及人工 SEI 的构筑过程，会涉及界面组分还有传输行为方面的调控。余永诗等人归纳了无机、有机以及复合人工界面层在钠金属负极当中的运用情况[15]。Zhao 等人分别选用原子层沉积[16]以及分子层沉积手段[17]，在钠金属的表面搭建 $Al_2O_3$ 保护层：无机—有机复合涂层，并且考察该类涂层对于循环稳定性所带来的作用。这些研究依靠界面组成、涂层结构以及电化学性能三者之间的对应关联，分析人工界面层所具备的保护效果。

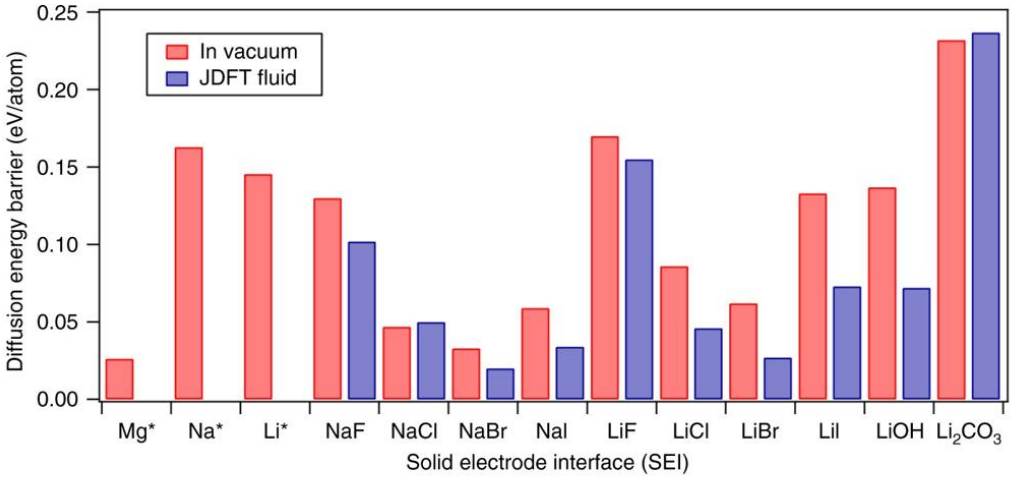


图 3 界面组分改变表面扩散势垒的计算示例[18]

Fig. 3. Computational example illustrating the effect of interfacial composition on surface diffusion barriers

Choudhury 等人结合密度泛函理论和实验表征，研究了富 NaBr 界面的作用[18]。计算结果显示，NaBr 修饰能够降低钠表面的扩散能垒；实验中制备的富 NaBr 表层也表现出较低的界面离子传输活化能。该结果说明，界面化学组成会同时影响 $Na^+$ 传输和沉积形貌，但相关结论仍需与具体电解液、成膜条件和循环压力相联系。

电解液组分会改变金属表面的反应环境。Seh 等人通过调整盐组分与醚类溶剂的组合，提高了钠沉积—剥离过程的可逆性[19]。针对弱溶剂化局域高浓度电解液和醚类溶剂结构调控的研究，分别考察了溶剂化形态[20]以及 SEI 成膜过程[21]；Xing 等人进一步分析了溶剂化结构对正、负极界面的差异化作用[22]。因此，比较金属修饰层时，应统一电解液配方、化成制度和堆叠压力。

### 3.3 循环过程中的界面演化与失效

集流体对首圈成核的改善并不等同于长期循环稳定。反复沉积—剥离过程中，SEI 会发生破裂、再生成和组分重排，沉积层内部的孔隙与裂纹也会改变局部电流分布，使后续钠优先在残留凸起、裸露基底或膜层缺陷处成核。若沉积钠与集流体之间的根部结合不足，剥离时就可能发生局部脱附，形成与电子通路断开的“死钠”，表现为库仑效率下降[8]和可循环钠库存持续减少[23]。

Al(100)研究显示，商用铝箔上的钠层在首圈即呈疏松多孔形貌，循环后孔边突起进一步演化为枝晶；Al(100)表面则保持较致密、均匀的沉积形貌，10 圈后仍未观察到明显枝晶[9]。这一对比说明，晶面有序化的影响会延伸到生长和剥离阶段，评价集流体时不能只比较初始成核过电位。对磁控溅射薄膜而言，膜层在循环中的连续性、残余应力、界面粘附和体积变化适应性同样决定沉积层能否维持电子接触。

循环失效还可能来自集流体本身的腐蚀或界面化学变化。对于含 NaFSI、NaTFSI 等盐的高电压体系，Al 集流体的稳定性应通过极化曲线、循环后表面形貌和元素分析单独核查；相关研究已将 Al 腐蚀视为限制钠金属电池高电压运行的失效因素之一[25]。因此，失效分析应把钠脱附、SEI 增厚、膜层开裂和 Al 腐蚀分别记录，再与容量衰减和阻抗增长对应起来。

## 4 集流体沉积行为的表征与性能评价

### 4.1 沉积形貌与失效观察

循环过程中需要区分形貌失稳、电子接触中断和化学钠损耗。Deng 等人观察到，沉积钠在剥离阶段可从基底脱落并分散为细小金属碎屑，这些碎屑与集流体失去电子连接，后续循环难以重新利用[8]。Sayahpour 等人的定量结果表明，首圈活性钠损失主要来自 SEI 生成，电解液类型和外加压力会进一步改变 SEI 厚度、孔隙结构和沉积层致密性[23]。对集流体改性样品，应将循环后残余钠的位置、膜层完整性、SEI 厚度和界面阻抗结合起来分析，避免把所有容量损失都归因于枝晶生长。

铝基集流体的晶面调控相关研究会把原位表征以及原子尺度计算配合起来开展使用[9]。针对 Al–Si 合金体系，Zou 等人选用环境透射电镜、分子动力学模拟还有常规电池测试手段，从原子、纳米以及器件尺度去解析沉积过程[12]。这类多尺度分析方


https://doi.org/10.68070/asymrk92

法分别契合界面结构、沉积生长以及宏观循环性能等方面的研究问题。

### 4.2 钠损失定量与界面组成

仅凭循环曲线难以确定容量损失的具体来源。Sayahpour 等人利用滴定气相色谱定量分析醚类和碳酸酯电解液中的活性钠损耗，并研究外加压力的影响[23]。早期循环中，SEI 生成是钠库存损耗的重要原因，适当外压能够减缓该过程。作者比较循环电量与实际消耗钠量，分析钠损耗路径。XPS 和低温扫描透射电镜结果表明，醚类电解液形成的 SEI 较致密，表层以有机组分为主、内层富含无机相；碳酸酯体系形成的界面层较厚且疏松，并含有羰基和羧基产物。

钠剥离环节中，由电子接触中断以及界面成膜现象所带来的活性钠损耗，分属于不一样的失效模式。Deng 等人依靠原位观察手段以及循环之后的元素分布结果，去追踪沉积金属发生脱落以及改性层在界面位置的留存情况[8]。Sayahpour 等人借助滴定气相色谱以及低温表征技术，解析活性钠库存的损耗情况以及界面的组分信息[23]。

前一类研究重点关注界面电子接触所具备的长期稳定特性，后一类研究则聚焦于活性钠所发生的化学损耗。把两类研究结果相互结合，就可以从残留金属、SEI 组成以及沉积形貌这三个方面评价钠沉积过程的可逆特性。

### 4.3 循环可逆性与全电池表现

合金涂层发生合金化和脱合金化时所对应的电量会计入库仑效率。Deng 等人指出，部分样品的对比结果未扣除合金反应容量。对于 100 nm Au 修饰膜，在总沉积容量为 1 mAh·cm$^{-2}$时，约 80%的剥离容量来自金属钠本身[8]。

在全电池测试中，Deng 等人在铜箔和带 100 nm Au 膜的不锈钢基底上预沉积 5 mAh·cm$^{-2}$钠，随后组装负、正极容量比接近 1∶1 的 Na∥SPAN 全电池[8]。该体系限制了钠源总量，并将正极因素纳入集流体界面性能评价。其供钠条件与厚钠片对称电池不同，结果比较时需要明确实验基准。

综合不同集流体结构的测试结果来看，Al(100)晶面集流体在 2 mA·cm$^{-2}$电流密度与 2 mAh·cm$^{-2}$面容量下循环的库仑效率可达 99.9%[9]；纳米孪晶 Al−Si 合金集流体在 3 mA·cm$^{-2}$、1 mAh·cm$^{-2}$的测试条件下，库仑效率为 99.71%[12]。

Deng 等人得到的循环测试结果表明，锡修饰层会出现不同程度的损耗现象，金镀层就可以维持相对完整的界面结构。界面物相能够依靠 XRD 以及电压曲线当中的合金化特征信号加以判别[8]。该研究把库仑效率方面的差异和钠剥离完成之后的界面留存状态建立起关联。

Sayahpour 等人在 Na∥$NaCrO_2$ 全电池当中对初始钠储备量开展调节工作，正极的面负载约为 13 mg·cm$^{-2}$，负极钠库存相比于正极总含钠量高出 100%。该电池在 2C 倍率之下循环 500 圈之后，容量保持率可以达到 91.84%[23]。这项研究把外压带来的作用、沉积形貌以及 SEI 相关特性纳入全电池的评价工作当中。

Li 等人在铝集流体的表面制备石墨化碳修饰层，并搭配含硼电解液去组装初始无负极钠金属电池。该体系的初始能量密度超过 200 Wh·kg$^{-1}$，在没有外加压力的条件之下稳定循环 260 圈[24]。对应的研究结果表明，改性层能够改善钠成核的均匀程度、减少沉积裂纹的生成并且维持界面的稳定状态。

不同全电池研究对初始钠量的设置并不一致。Deng 采用预沉积钠负极[8]，Sayahpour 设置过量钠储备[23]，Li 则研究初始无负极体系[24]。由于各体系可用于补偿损耗的钠库存不同，容量保持率和循环寿命应结合相应实验条件进行比较。

### 4.4 电化学测试数据与全电池验证

集流体改性后的电化学性能应结合倍率性能、长循环稳定性和有限钠库存条件下的器件表现进行评价。Tang 等人组装 Na@Al(100)‖NVP 初始无负极全电池，并将 Al(100)集流体与商用铝箔进行对比[9]。

图 4 显示，在 0.1755~0.8775 mA·cm$^{-2}$范围内，Al(100)集流体全电池的平均放电比容量为 79.3 mAh·g$^{-1}$；当电流密度升至 1.755 和 3.51 mA·cm$^{-2}$时，放电比容量分别为 67.6 和 53.6 mAh·g$^{-1}$。长循环测试中，该体系在 0.8775 mA·cm$^{-2}$下循环 200 圈后放电比容量仍为 66.2 mAh·g$^{-1}$，在 1.755 mA·cm$^{-2}$下循环 100 圈后为 68.0 mAh·g$^{-1}$[9]。

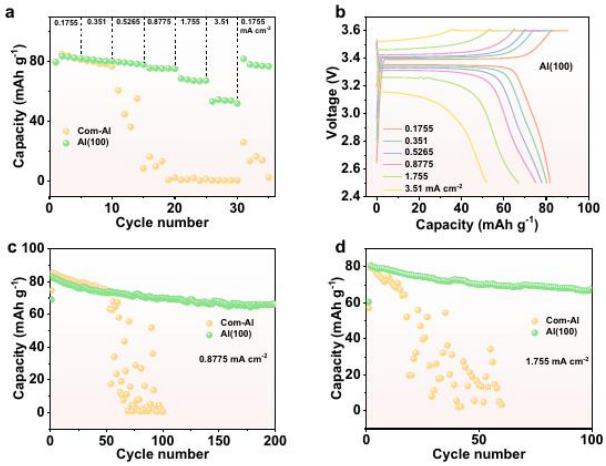


图 4 Al(100)集流体在初始无负极钠全电池中的电化学性能[9]

Fig. 4. Electrochemical performance of Al(100) current collectors in anode-free sodium full cells

（（a）不同电流密度下的倍率性能；（b）不同倍率下的充放电曲线；（c）0.8775 mA·cm$^{-2}$下的长循环性能；（d）1.755 mA·cm$^{-2}$下的长循环性能）

倍率测试的过程当中，该体系的平均库仑效率约为 94%，进入稳定长循环阶段之后，可维持在 98%上下。选用商用铝集流体组装得到的全电池在高倍率条件之下的容量衰减现象会更加突出，部分测试组别还出现了短路失效的情况。以上结果说明，晶面取向调控手段能够改善钠沉积的均匀程度，并且提升全电池所具备的倍率性能以及循环稳定特性。

## 5 结论

现有研究表明，集流体界面调控贯穿钠沉积的成核、生长、剥离和失效全过程。晶面取向、表面化学组分、亲钠位点和三维结构会改变 $Na^+$ 传输、初始吸附、沉积形貌及沉积层的空间分布；循环过程中，SEI 重构、沉积层开裂、根部脱附、电子接触中断以及集流体腐蚀共同决定活性钠库存和界面阻抗的变化。Al(100)研究提供了较完整的证据链：其较好的电解液润湿性、较低的 $Na^+$ 传输活化能和较有序的表面几何与均匀沉积相对应，但这些指标仍需与成核过电位和循环后形貌结合解释。合金型界面、亲钠金属层和人工 SEI 能够改善部分界面环节，磁控溅射薄膜的作用则取决于材料相行为、膜厚、连续性、层间结合和循环应力适应性。

## 参考文献

[1] LIU Y, YANG J, WANG M, et al. Recent developments in interface engineering strategies for stabilizing sodium metal anodes[J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(5): 101965. DOI: 10.1016/j.xcrp.2024.101965.

[2] ZHENG X, YU D, TIAN F, et al. Grain boundary engineered aluminum current collector for energy-dense initially anode-free sodium metal batteries[J]. Nature Communications, 2026, 17: 7225. DOI: 10.1038/s41467-026-74177-8.

[3] 唐芳, 刘聪聪, 黄弘扬, 等. 钠金属电池负极集流体改性的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9): 2306-2321. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20230168.

[4] YIN H, CAO Y, WANG Y, et al. Artificial solid electrolyte interphase for sodium metal batteries: Mechanistic insights and design strategies[J]. Energy & Environmental Materials, 2025, 8(6): e70077. DOI: 10.1002/eem2.70077.

[5] YUI Y, HAYASHI M, NAKAMURA J. In situ microscopic observation of sodium deposition/dissolution on sodium electrode[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 22406. DOI: 10.1038/srep22406.

[6] SCHÄRIFKER B, HILLS G. Theoretical and experimental studies of multiple nucleation[J]. Electrochimica Acta, 1983, 28(7): 879-889. DOI: 10.1016/0013-4686(83)85163-9.

[7] CHAZALVIEL J N. Electrochemical aspects of the generation of ramified metallic electrodeposits[J]. Physical Review A, 1990, 42(12): 7355-7367. DOI: 10.1103/PhysRevA.42.7355.

[8] DENG Y, ZHENG J, ZHAO Q, et al. Highly reversible sodium metal battery anodes via alloying heterointerfaces[J]. Small, 2022, 18(37): e2203409. DOI: 10.1002/smll.202203409.

[9] TANG F, YANG Y, LIU C, et al. Initially anode-free sodium metal battery enabled by

strain-engineered single-crystal aluminum substrate with (100)-preferred orientation[J]. Nature Communications, 2025, 16: 2280. DOI: 10.1038/s41467-025-57424-2.

[10] ZHU M, LI S, LI B, et al. Homogeneous guiding deposition of sodium through main group II metals toward dendrite-free sodium anodes[J]. Science Advances, 2019, 5(4): eaau6264. DOI: 10.1126/sciadv.aau6264.

[11] XING N, FU M, NIU R, et al. Interfacial engineering of sodiophilic metal layers on liquid alloys for dendrite-free sodium metal anodes[J]. Rare Metals, 2026, 45(5): e70285. DOI: 10.1002/rar2.70285.

[12] ZOU G, WANG J, SUN Y, et al. A nanotwinned-alloy strategy enables fast sodium deposition dynamics[J]. Nature Communications, 2025, 16: 1795. DOI: 10.1038/s41467-025-56957-w.

[13] 张智强, 董德锐, 曹柳悦, 等. 三维碳基集流体在高比能钠金属电池中的应用与展望[J]. 化学学报, 2025, 83(11): 1386-1396. DOI: 10.6023/A25050154.

[14] YALÇINÖZ M, FALLARINO L, DE LASEN-TEJADA M, et al. Nanoscale sputtered buffer layers for in situ fabrication of thin sodium metal anodes[J]. Journal of Physics: Energy, 2025, 7(4): 045025. DOI: 10.1088/2515-7655/ae0af9.

[15] 余永诗, 夏先明, 黄弘扬, 等. 钠金属负极人工界面保护层的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1380-1391. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0324.

[16] ZHAO Y, GONCHAROVA L V, LUSHINGTON A, et al. Superior stable and long life sodium metal anodes achieved by atomic layer deposition[J]. Advanced Materials, 2017, 29(18): 1606663. DOI: 10.1002/adma.201606663.

[17] ZHAO Y, GONCHAROVA L V, ZHANG Q, et al. Inorganic–Organic Coating via Molecular Layer Deposition Enables Long Life Sodium Metal Anode[J]. Nano Letters, 2017, 17(9): 5653-5659. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b02464.

[18] CHOUDHURY S, WEI S, OZHABES Y, et al. Designing solid-liquid interphases for sodium batteries[J]. Nature Communications, 2017, 8: 898. DOI: 10.1038/s41467-017-00742-x.

[19] SEH Z W, SUN J, SUN Y, et al. A highly reversible room-temperature sodium metal anode[J]. ACS Central Science, 2015, 1(8): 449-455. DOI: 10.1021/acscentsci.5b00328.

[20] QU H, LI H, WANG J, et al. Weak-solvation-mediated localized high-concentration electrolyte for sodium metal batteries[J]. Advanced Science, 2026: e78680. DOI: 10.1002/advs.78680.

[21] WANG S, WENG S, LI X, et al. Unraveling the solvent effect on solid-electrolyte interphase formation for sodium metal batteries[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(50): e202313447. DOI: 10.1002/anie.202313447.

[22] XING Q, LEE J M, YANG Z, et al. Directing selective solvent presentations at electrochemical interfaces to enable initially anode-free sodium metal batteries[J]. Nature Communications, 2025, 16: 8265. DOI: 10.1038/s41467-025-63902-4.

[23] SAYAHPOUR B, LI W, BAI S, et al. Quantitative analysis of sodium metal deposition and interphase in Na metal batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2024, 17(3): 1216-1228. DOI: 10.1039/D3EE03141A.

[24] LI Y, ZHOU Q, WENG S, et al. Interfacial engineering to achieve an energy density of over 200 Wh $kg^{-1}$ in sodium batteries[J]. Nature Energy, 2022, 7(6): 511-519. DOI: 10.1038/s41560-022-01033-6.

[25] HUANG L, WANG K, ZHANG W, et al. Fluorinated ether cosolvents to prevent aluminum current collector corrosion for high-voltage sodium metal batteries[J]. Energy Storage Materials, 2026, 91: 105566. DOI: 10.1016/j.ensm.2026.105566.

# Research Progress on Current Collector Interface Engineering for Sodium Metal Batteries

Zhang shukai[1], Zhao chenxing[1], Zhao yuwen[1], Gao huan[1], Zhang zhijia[1,2 *]

1.School of Material Science and Engineering, State Key Laboratory of Separation Membrane and Membrane Processes, Tiangong University, Tianjin;; 2. Metal Materials Laboratory, Jiangsu Fuyuan Mustard New Materials Research Institute, Xuzhou Jiangsu

**Abstract:** This review examines current-collector interfaces in sodium metal batteries. Crystal orientation, surface chemistry, alloying interphases, and magnetron-sputtered films are compared for their effects on nucleation, growth, stripping contact, and sodium inventory. In situ imaging, phase analysis, impedance tracking, and lean-sodium full-cell tests show that long-term reversibility depends on deposit anchoring, SEI evolution, and collector stability. Al(100) improves electrolyte wetting and Na+ transport.

**Keywords:** Sodium metal batteries; Current collectors; Magnetron sputtering; Metal thin films; Interfacial regulation


https://doi.org/10.68070/asymrk92