

激光表面改性技术

# Cu 箔集流体飞秒激光深刻蚀织构化及其对 锂离子电池性能的影响

王京博, 曹利, 李松原, 肖荣诗, 黄婷\*

(北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100124)

**摘要:** **目的** 使用飞秒激光在 Cu 箔表面深刻蚀织构化, 制备微纳沟槽结构, 提高锂离子电池 Si 电极循环稳定性。**方法** 系统研究激光能量密度、单位点有效脉冲数对厚度为 9  $\mu\text{m}$  的 Cu 箔的表面形貌和微纳结构的影响规律, 根据结果设计不同沟槽密度和沟槽深度的 Cu 箔, 并组装成 Si 电极锂离子电池, 通过循环测试及循环后电极形貌揭示其稳定性提升的内在机理。**结果** 最佳的激光能量密度为 3.18 J/cm<sup>2</sup>, 此时改变单位点有效脉冲数和扫描间距可有效控制刻蚀沟槽的密度和深度。Si 电极的循环稳定性随着 Cu 箔表面沟槽密度和沟槽深度的增加而逐渐提升, 当沟槽密度为 75%、沟槽深度为 6  $\mu\text{m}$  时, 循环 300 圈后剩余的容量高达 911 mA·h/g, 保持率为 89%, 电极形貌相对最完整、稳定。**结论** 刻蚀表面纳米结构增加了电极层与集流体之间的黏结强度; 微米沟槽结构进一步保护了电极层, 缓解了体积膨胀效应。采用 Cu 箔集流体深刻蚀显著改善了 Si 电极的剥离和开裂现象, 实现了其电化学性能的提升。

**关键词:** 绿光飞秒激光; 激光刻蚀; Cu 箔集流体; Si 电极; 循环稳定性

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)01-0115-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.01.011

## Texturing of Cu Foil Current Collector by Femtosecond Laser Deep Ablation and Its Effect on Performance of Lithium-ion Batteries

WANG Jingbo, CAO Li, LI Songyuan, XIAO Rongshi, HUANG Ting\*

(Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**ABSTRACT:** The significant volume expansion of Si-based electrodes is very likely to lead to electrode materials exfoliation at the interface of Cu foil current collectors, and the interfacial stability of the electrode is a critical issue to be addressed urgently. Femtosecond laser ablating is an advanced surface processing technology, which can produce micro-nano surface structures with regular patterns and significantly improve the adhesive strength. In this paper, a green femtosecond laser with a wavelength of 515 nm was employed to deeply ablate and texture the Cu foils (9  $\mu\text{m}$ -thick), and the effects of laser energy density and effective pulse number on the surface morphology and micro-nano structure of Cu foil as well as the cycle stability of Si-based electrodes of Cu foil samples with different structures were investigated. A femtosecond laser (TruMicro 5280 Femto Edition, TRUMPF)

收稿日期: 2022-11-24; 修订日期: 2023-05-05

Received: 2022-11-24; Revised: 2023-05-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51975018)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975018)

引文格式: 王京博, 曹利, 李松原, 等. Cu 箔集流体飞秒激光深刻蚀织构化及其对锂离子电池性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(1): 115-122.

WANG Jingbo, CAO Li, LI Songyuan, et al. Texturing of Cu Foil Current Collector by Femtosecond Laser Deep Ablation and Its Effect on Performance of Lithium-ion Batteries[J]. Surface Technology, 2024, 53(1): 115-122.

\*通信作者 (Corresponding author)

equipped with a scanning galvanometer (Scanlab Hurry SCAN14) was employed to deeply ablate the groove structure on the Cu foil surface. The univariate method was adopted. Firstly, the effective pulse number was fixed at 5, and the laser energy density was 1.27, 1.91, 2.55, 3.18, 3.82, 6.37 J/cm<sup>2</sup>, respectively. Then the laser energy density was fixed at 3.18 J/cm<sup>2</sup>, and the effective pulse number was 5, 25, 50, 75, respectively. Based on the results, Cu foils with different groove densities and groove depths were designed. The surface morphology of Cu foil was observed with a scanning electron microscope (HITACHI S-3400N) and a super-depth-of-field microscope (KEYENCE VHX-950F). The elemental content of the Cu foil surface was characterized with an energy spectrometer. The active material layer was formulated and coated on the surface of the Cu foil current collector. The active material layer was composed of 70% of active material Si (100 nm in diameter), 20% of binder and 10% of conductive agent. The electrodes (active layers and current collectors) were dried for 8 h at 80 °C under vacuum before they were transferred into the glove box for cell assembly. The cells were tested by galvanostatic cycling at 1C rate. It was found that the ablation threshold of the green femtosecond laser of Cu foil was 0.52 J/cm<sup>2</sup>, and the width of the ablated area increased gradually with the laser energy density. But when the laser energy density was too high, the ablating effect appeared "saturation" phenomenon. The surface of the ablated groove was nanostructured and no significant oxidation occurred. The optimal laser energy density for deeply etching was 3.18 J/cm<sup>2</sup>, and the depth of the groove could be regulated by changing the effective pulses number. The cycle stability of the Si-based electrodes gradually increased with the increase of groove density and depth. It was worth noting that when the groove density was 75% and the groove depth was 6 μm, the capacity remained 911 mA·h/g after 300 cycles at 1C with a retention rate of 89%. Using femtosecond laser deep ablation method and optimizing the laser parameters can successfully prepare micron-groove structure on the surface of Cu foil. The nanostructure increases the adhesive strength between the electrode and the current collector, while the micro-groove structure protects the electrode and alleviates its volume expansion. The deeply ablated Cu foil significantly improves the exfoliation of the Si-based electrodes and achieves the enhancement of the electrochemical performance.

**KEY WORDS:** green femtosecond laser; laser ablation; Cu foil current collector; Si-based electrode; cycling stability

锂离子电池作为主要的储能器件,广泛应用于各行业<sup>[1-3]</sup>。随着电动汽车、智能化电网等高新技术的快速发展,对锂离子电池的能量密度和寿命提出了更高的要求<sup>[4-5]</sup>。Si 的理论比容量高达 3 579 mA·h/g,是一种极具潜力的高容量负极材料<sup>[6-7]</sup>。然而,在充放电过程中 Si 发生了显著的体积膨胀(>300%),极易导致电极层从集流体表面剥离,造成电池循环寿命快速衰退<sup>[8]</sup>。

集流体的表面形貌是影响界面稳定性的关键因素<sup>[9]</sup>。商用 Cu 箔集流体表面光滑,与电极层的接触面积小、黏结强度低,难以应对 Si 电极体积膨胀时产生的应力和变形<sup>[10]</sup>。目前,主要采取表面刻蚀织构化工艺提高集流体的表面粗糙度<sup>[11-13]</sup>,进而增强电极涂层与集流体间的黏结强度。

激光刻蚀具有柔性高、无污染、效率高等优点,在材料表面织构化方面具有显著优势<sup>[14-16]</sup>。其中,飞秒(10<sup>-15</sup> s)激光加工技术具有热影响小、精度高等特点,近年来开始应用于集流体的织构化<sup>[17-18]</sup>。Wang 等<sup>[19]</sup>在商用 Cu 箔表面采用飞秒激光加工技术刻蚀网状阵列图案,在石墨全电池中循环 200 圈后其容量保持率达到 74.7%。Zhang 等<sup>[20]</sup>使用飞秒激光加工技术在 Cu 箔表面制备周期性圆形图案,石墨电极在循环 100 圈后的剩余容量比原始电极提升了 30%。目前,Cu 箔集流体飞秒激光织构化刻蚀深度很小,仅在表面形成了周期性微纳米图案<sup>[19]</sup>,难以应对 Si 电极显著的

体积膨胀效应。

文中采用波长为 515 nm 的飞秒激光器,研究 Cu 箔集流体深刻蚀(刻蚀深度超过基体厚度的 50%)织构化对 Si 电极性能的影响。首先,通过 Cu 箔飞秒激光刻蚀工艺,获得不同沟槽密度和深度的集流体,然后研究不同样品的微结构对 Si 电极充放电行为的影响规律,从而实现电化学性能的提升。

## 1 试验条件和方法

### 1.1 飞秒激光刻蚀系统

Cu 箔集流体表面飞秒激光刻蚀采用 TruMicro 5280 Femto Edition 激光器( TRUMPF ),搭载 Scanlab Hurry SCAN14 扫描振镜系统,其激光波长、脉宽、重复频率、最大激光功率和聚焦光斑直径分别为 515 nm、800 fs、50 kHz、75 W、50 μm。将激光聚焦于厚度为 9 μm 的锂离子电池 Cu 箔集流体表面,通过控制刻蚀工艺参数和激光运动路径,制备出沟槽宽度  $W$ 、深度  $d$ 、沟槽边距  $S$  的沟槽结构,如图 1 所示。

### 1.2 结构表征

Cu 箔集流体的表面形貌和微结构使用 HITACHI S-3400N 扫描电子显微镜( SEM )和 KEYENCE VHX-950F 超景深光学显微镜观测。在刻蚀前后,Cu

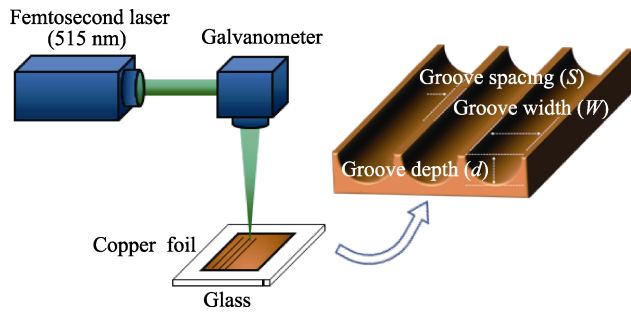


图 1 飞秒激光刻蚀 Cu 箔集流体制备微结构示意图

Fig.1 Schematic for fabrication of micro-nano structure on Cu foil current collector by femtosecond laser ablation

箔表面的元素含量使用能谱仪 (EDS) 进行表征。

### 1.3 电极制备与性能测试

分别采用原始光面 Cu 箔和不同刻蚀微结构的 Cu 箔为集流体制备 Si 电极, 并测试其电化学性能。通过传统涂覆工艺制备电极, 将质量分数为 70% 的活性材料纳米 Si (直径约为 100 nm, Aladdin)、20% 的黏结剂 PAALi (深圳科晶) 和 10% 的导电剂炭黑 (深圳科晶) 混合, 并置于去离子水中制备浆料。然后, 将浆料均匀涂覆在集流体表面, 经 80 °C 真空干燥 12 h 后获得电极。

将制备的电极在手套箱中组装为半电池, 将电极、锂对比电极、Celgard 2400 隔膜及 LiPF<sub>6</sub> 电解液封装于 CR2032 扣式电池壳中。电极的电化学性

能使用 Land CT2001A 电池测试仪进行测试, 测试充放电倍率为 1C (3579 mA·g<sup>-1</sup>), 测试电压范围为 0.01~1.5 V。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Cu 箔刻蚀阈值及刻蚀表面形貌特征

刻蚀阈值是材料去除所需的最小能量密度。如图 2 所示, Cu 箔表面白色区域为飞秒激光扫描后形成的。当激光能量密度分别为 1.27、1.91、2.55、3.18 J/cm<sup>2</sup> 时, 刻蚀线宽分别为 33、40、45、48 μm, 如图 2a~d 所示。激光能量密度的升高导致刻蚀区域的尺寸逐渐增大, 且宽度接近激光光斑尺寸。当能量密度持续升至 3.82、6.37 J/cm<sup>2</sup> 时, 其刻蚀宽度分别为 49、52 μm, 增加程度明显降低, 如图 2e、f 所示。

根据以上刻蚀线宽的变化规律, 计算 Cu 箔的飞秒激光烧蚀阈值。当能量密度较低时, 线宽与能量密度之间符合以下关系, 见式 (1)~(2)。

$$W^2 = 2\omega_0^2 \left( \ln \frac{F_0}{F} \right) \quad (1)$$

$$F_0 = \frac{2P}{\pi\omega_0 f} \quad (2)$$

式中:  $F_0$  为焦点处的峰值能量密度;  $F$  为 Cu 箔的烧蚀阈值;  $\omega_0$  为激光光斑半径;  $P$  为功率;  $f$  为重

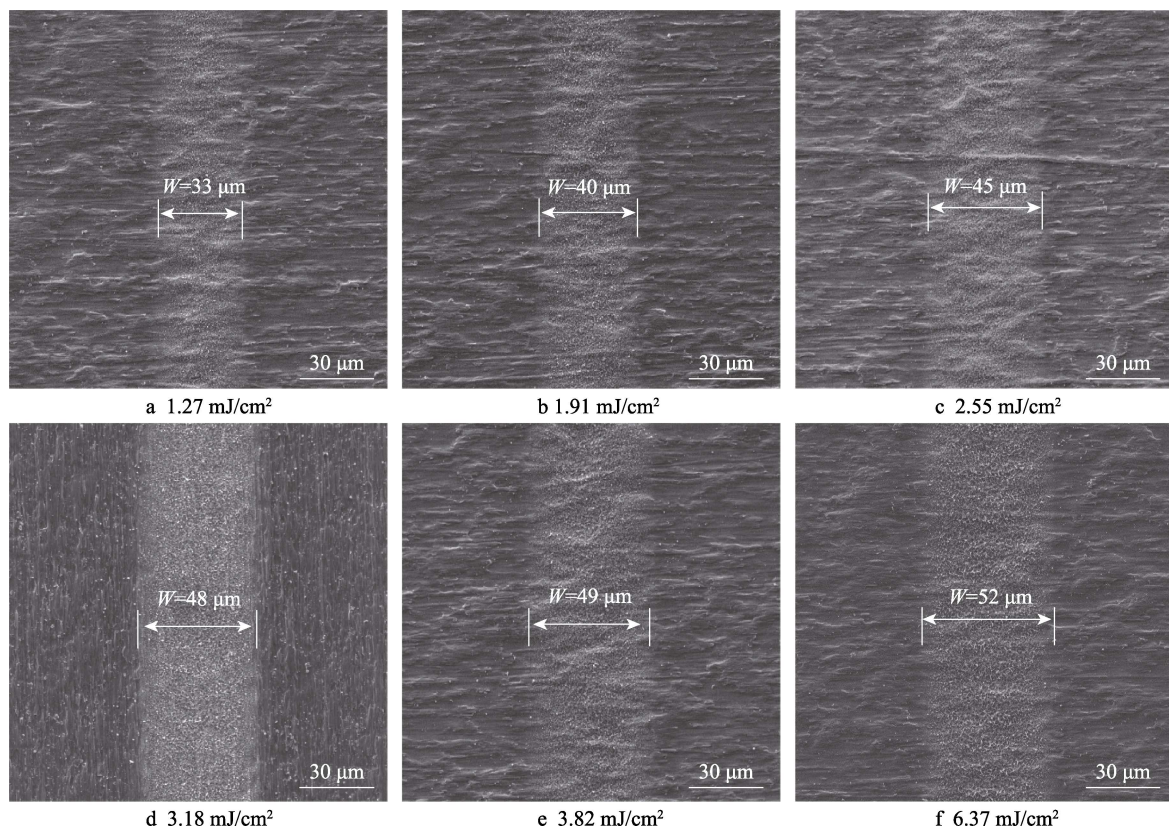


图 2 不同激光能量密度下刻蚀后 Cu 箔表面的微观形貌

Fig.2 Surface morphology of copper foil ablated under different laser fluence



复频率。

如图3所示,当激光能量密度低于  $3.18 \text{ J/cm}^2$  时,根据公式拟合,获得烧蚀阈值为  $0.52 \text{ J/cm}^2$ 。同时,通过拟合线性结果可以获得高于烧蚀阈值的不同激光能量密度下对应的刻蚀宽度。当激光能量密度过高时,刻蚀宽度逐渐偏离拟合直线,即出现“饱和”现象。后续制备微米沟槽结构的激光能量密度均采用  $3.18 \text{ J/cm}^2$ 。

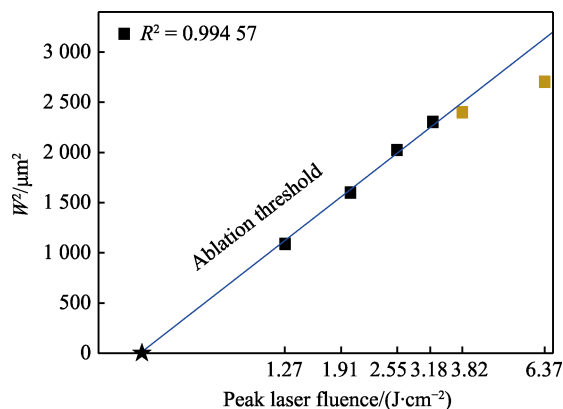


图3 刻蚀区域线宽的平方随激光能量密度的变化  
Fig.3 Relationship between square of ablation width and laser fluence

当能量密度为  $3.18 \text{ J/cm}^2$  时, Cu 箔不同刻蚀区域的微观结构如图4所示。原始 Cu 箔表面为不规则、均匀性差的微米划痕状结构。经激光作用后,刻蚀区域呈现出均匀的纳米结构<sup>[21-22]</sup>,有利于增大接触面积,从而提高 Cu 箔与电极涂层之间的黏结强度<sup>[23]</sup>。在刻蚀边缘区域未出现显著的热影响区。此外,通过 EDS 检测 Cu 箔的化学组分可知,在激光刻蚀前后 Cu 箔表面 Cu 元素的质量分数分别为 98.96%、99.21%,未发生明显氧化,表明飞秒激光刻蚀工艺仅改变了 Cu 箔的表面形貌和微观结构。

## 2.2 沟槽结构飞秒激光刻蚀

当激光能量密度为  $3.18 \text{ J/cm}^2$  时,沟槽刻蚀深度随单位点有效脉冲数的变化规律如图5所示。单位点有效脉冲数的计算见式(3)。

$$N = n \frac{2\omega_0 f}{v} \quad (3)$$

式中:  $v$  为激光扫描速度;  $n$  为扫描次数。

在试验中,通过改变扫描次数控制单位点有效脉冲数。结果表明,单位点有效脉冲数对刻蚀线宽无显著影响;当单位点有效脉冲数为 5、25、50、75 时,沟槽深度分别为 0.4、2.0、3.9、6.0  $\mu\text{m}$ 。深度随着单位点有效脉冲数的增大呈正比例线性增加,可有效调控沟槽的刻蚀深度。

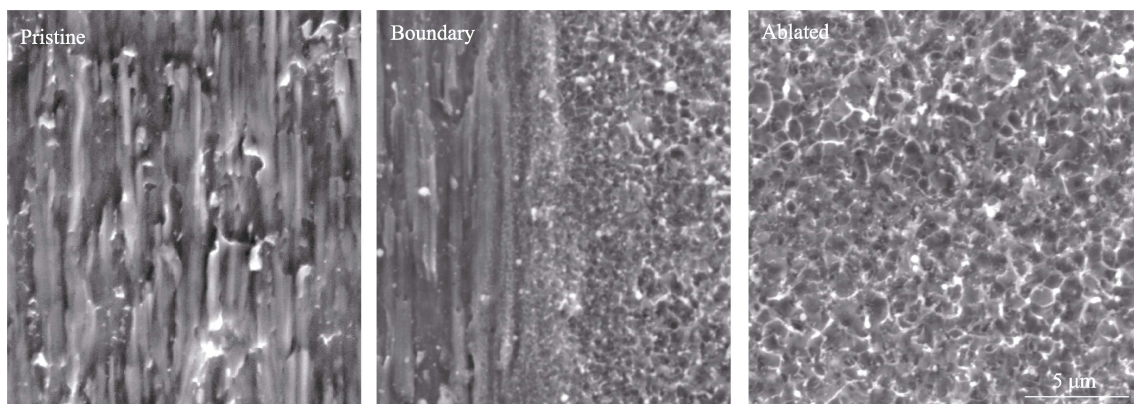


图4 当能量密度为  $3.18 \text{ J/cm}^2$  时 Cu 箔的原始区域、刻蚀边界、刻蚀区域的微观结构  
Fig.4 Microstructure of Cu foil at pristine area, ablated boundary and ablated area under  $3.18 \text{ J/cm}^2$

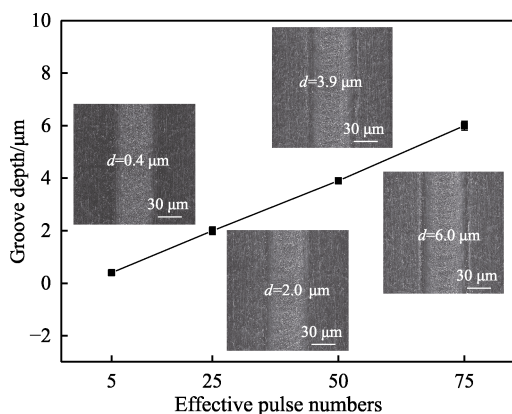


图5 沟槽深度随单位点有效脉冲数的变化  
Fig.5 Relationship between ablated depth and effective pulse number

由先前研究报道可知,集流体表面粗糙度越大,则与电极的接触面积越大,界面黏附性越强。同时,微纳结构空间可应对 Si 电极的体积膨胀效应<sup>[10]</sup>,因此应尽可能制备刻蚀沟槽深度大的集流体。根据以上研究规律,在 Cu 箔集流体表面设计了不同的结构化结构,并进行对比分析。结构特征包括沟槽密度 ( $D$ ) 和沟槽深度 ( $d$ )。其中,沟槽密度为沟槽投影面积与总投影面积之比,见式(4)。

$$D = \frac{W}{W + S} \times 100\% \quad (4)$$

通过 SEM 和超景深光学显微镜获得的集流体表面刻蚀形貌如图6所示。经激光刻蚀后,集流体表面均呈现阵列状沟槽结构。如图6a~c所示,保持单位

点有效脉冲数不变, 集流体的沟槽深度均为  $6\text{ }\mu\text{m}$ ; 在不同扫描间距下 (对应的  $S$  和  $W$  标记于图 6 中), 依次获得了沟槽密度  $D$  为 25%、50%、75% 的集流体。值得注意的是, 在沟槽密度  $D$  (75%) 和沟槽深度  $d$  ( $6\text{ }\mu\text{m}$ ) 较大时, Cu 箔集流体的宏观形貌未发生明显变形 (图 6c), 实现了厚度  $9\text{ }\mu\text{m}$  Cu 箔表面的深刻蚀。随后, 保持沟槽密度为 75%, 通过改变单位点有

效脉冲数制备沟槽深度  $d$  分别为  $2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4\text{ }\mu\text{m}$  的集流体 (图 6d、e), 其数值与图 5 的结果对应。

集流体的结构特征见表 1, 并依次命名为 Cu-D25-d6、Cu-D50-d6、Cu-D75-d6、Cu-D75-d2、Cu-D75-d4。此外, 为了进一步说明激光深刻蚀织构化的影响, 通过光束搭接扫描实现 Cu 箔集流体表面的整体刻蚀, 刻蚀表面仅形成了纳米结构 (如图 6f 所示, Cu-nano)。

表 1 Cu 箔集流体的结构特征  
Tab.1 Structure features of laser-ablated Cu foil current collector

Structure features	Cu-D25-d6	Cu-D50-d6	Cu-D75-d6	Cu-D75-d2	Cu-D75-d4
$D/\%$	25	50	75	75	75
$d/\mu\text{m}$	6	6	6	2	4

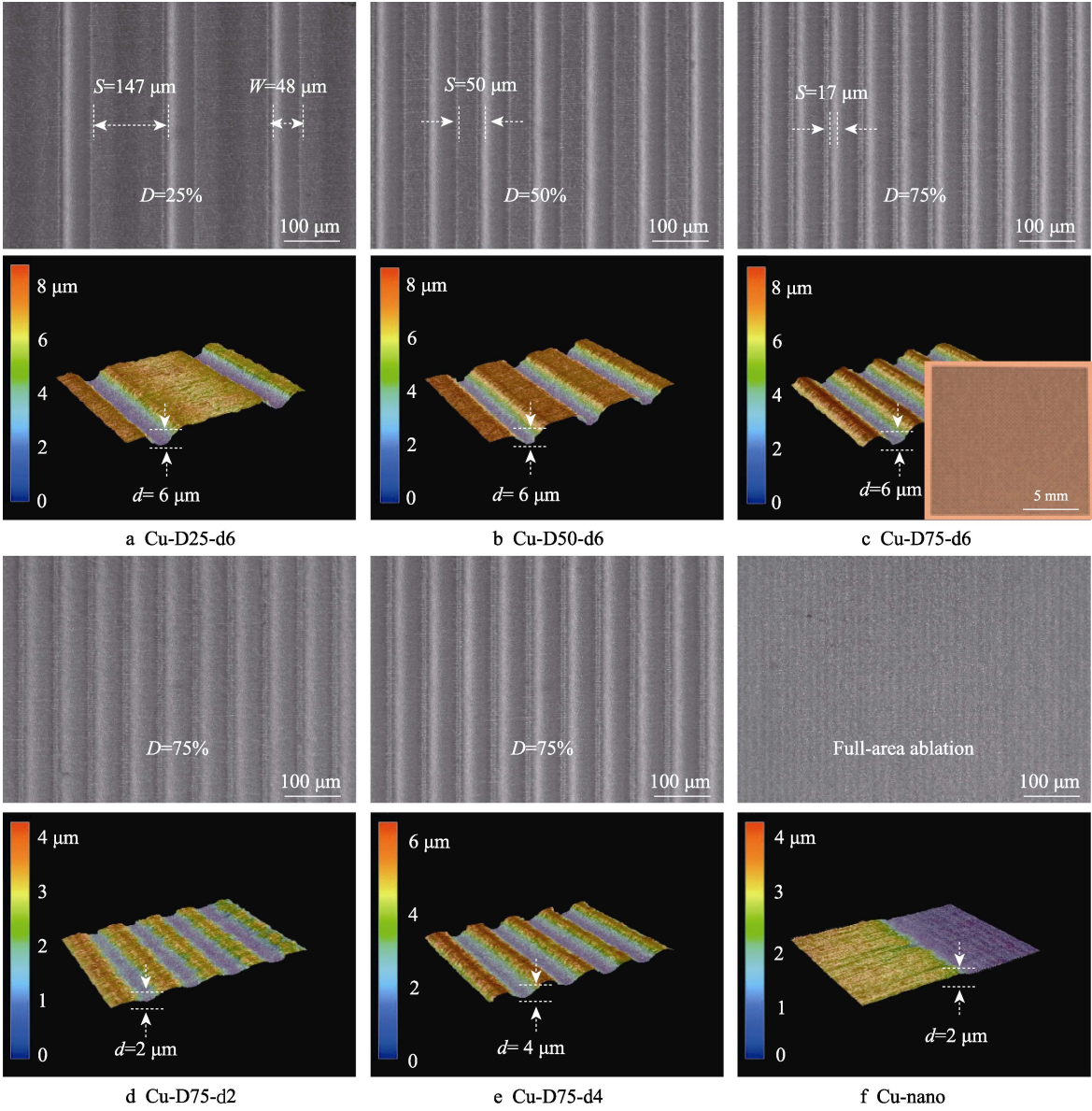


图 6 不同工艺参数下刻蚀 Cu 箔的表面形貌  
Fig.6 Surface morphology of ablated Cu foil with different parameters: a) Cu-D25-d6; b) Cu-D50-d6; c) Cu-D75-d6 (Insert is the macroscopic morphology of the ablated Cu foil); d) Cu-D75-d2; e) Cu-D75-d4; f) Cu-nano



## 2.3 沟槽密度和沟槽深度对电化学性能的影响

在嵌脱锂过程中, 由于 Si 的体积不可避免地发生了巨大的变化, 因此形成了 Si 负极的 3 种典型衰减机理: 不稳定的固态电解质界面 (SEI); 材料的粉化和破碎; Si 电极整体形貌和体积的变化。其中, 整体形貌和体积变化会造成电极内部 Si 颗粒与周围的电连接脱离, 而且极易导致电极层从集流体上剥离。通过研究失效机理并结合实验结果, 有助于研究 Si 负极衰减的解决方案。

将原始及激光刻蚀后的 Cu 箔作为集流体, 在锂离子电池中测试它们对 Si 电极电化学性能的影响。通常, Si 电极在早期嵌锂阶段会产生显著的体积变化, 使初始容量急剧下降。对比了 1C 下不同集流体的 Si 电极首圈放电容量, 如图 7a 所示。与未经激光刻蚀的原始集流体 (Cu-P) 相比, 表面完全刻蚀 (Cu-nano) 使 Si 电极的容量由 563 mA·h/g 显著提高至 981 mA·h/g。由此可知, 与原始微米划痕结构相比, 在激光作用后形成的纳米结构增大了集流体与电极间的接触面积, 更有利于 Si 电极的嵌锂-脱锂稳定性。对比沟槽结构特征对 Si 电极性能的影响时发现, 当沟槽深度为 6  $\mu\text{m}$ , 沟槽密度分别为 25%、50%、75% 时, 首圈放电容量分别为 754、1 003、1 023 mA·h/g; 当密度为 75%, 沟槽深度为 2、4、6  $\mu\text{m}$  时, 容量分别为 761、994、1 023 mA·h/g。由以上结果可知, 随着集流体的沟槽密度和深度的增大, Si 电极的容量逐渐上升, 最终高于 Cu-nano 集流体的电极容量, 表明深刻蚀沟槽结构可进一步保证 Si 电极稳定的嵌锂-脱锂反应。

此外, 不同电极在 1C 下循环 300 圈后的剩余容量及容量保持率结果 (图 7b) 表明, Cu-P 集流体的 Si 电极容量基本衰减, 其保持率仅为 2%。与首圈容

量的变化规律相似, 具有沟槽结构集流体的 Si 电极剩余容量及保持率随着沟槽密度和深度的增大逐渐增加。当沟槽密度和深度分别达到 75%、6  $\mu\text{m}$  时, Si 电极的剩余容量为 911 mA·h/g, 保持率为 89%, 高于 Cu-nano 集流体的电极剩余容量 (844 mA·h·g<sup>-1</sup>) 和保持率 (85%)。由此可知, 在激光刻蚀形成的纳米结构和深刻蚀沟槽的共同作用下, 显著提升了 Si 电极的循环稳定性。

通过 Si 电极循环后的形貌演变 (图 8) 得到如下所述的集流体深刻蚀结构对电化学性能的增强机制。基于 Si 显著的体积膨胀 (>300%), 在原始 Cu 箔集流体表面的电极层中形成了大量裂纹, 并伴随着显著的电极层剥离现象 (图 8a)。在完全刻蚀的 Cu 箔集流体表面, 电极层中仍存在大量裂纹, 然而它与集流体稳定连接, 未发生明显的电极层剥离现象, 如图 8b 所示。这是由于集流体表面形成的纳米结构增大了集流体与电极层之间的接触面积, 使得黏结强度增大<sup>[24]</sup>, 从而提高了电极的结构稳定性。对比集流体表面沟槽结构特征对电极形貌的影响时发现, 当密度较小时仍旧存在剥离现象, 但剥离区域面积小于原始集流体, 如图 8c~e 所示。随着密度的增大, 剥离现象逐渐消失。当沟槽深度增大, 电极层中的裂纹密度逐渐降低, 且未出现明显剥离现象, 如图 8f、g 所示。电极的形貌演变规律与对应的电化学性能保持一致。结合先前的报道可知, 沟槽结构不仅增强了界面黏附性, 而且为 Si 电极剧烈体积变化提供了足够的缓冲空间, 具有保护作用 (图 8h), 抑制了循环过程中裂纹的生成<sup>[25]</sup>, 极大地改善了电极内部电连接脱离情况<sup>[26]</sup>。由于沟槽密度和深度越大, 对体积膨胀效应的缓解作用越明显, 因此深刻蚀 Cu-D75-d6 电极的性能最佳。综上可知, 经飞秒激光刻蚀获得的纳米结构和微米沟槽结构可以有效缓解 Si 电极的体积膨胀效应, 保证了电极结构的稳定性, 从而提升了电化学性能。

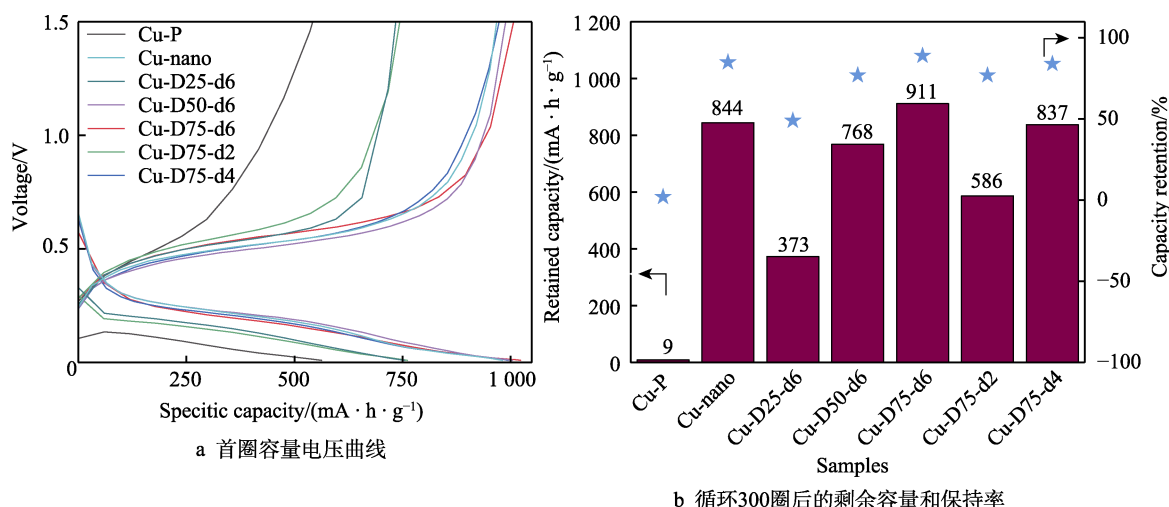


图 7 1C 下不同 Cu 集流体的 Si 电极电化学性能

Fig.7 Electrochemical performance of Si electrodes with different Cu current collector at 1C: a) voltage-capacity curves at first cycle; b) retained capacity and corresponding retention after 300 cycles

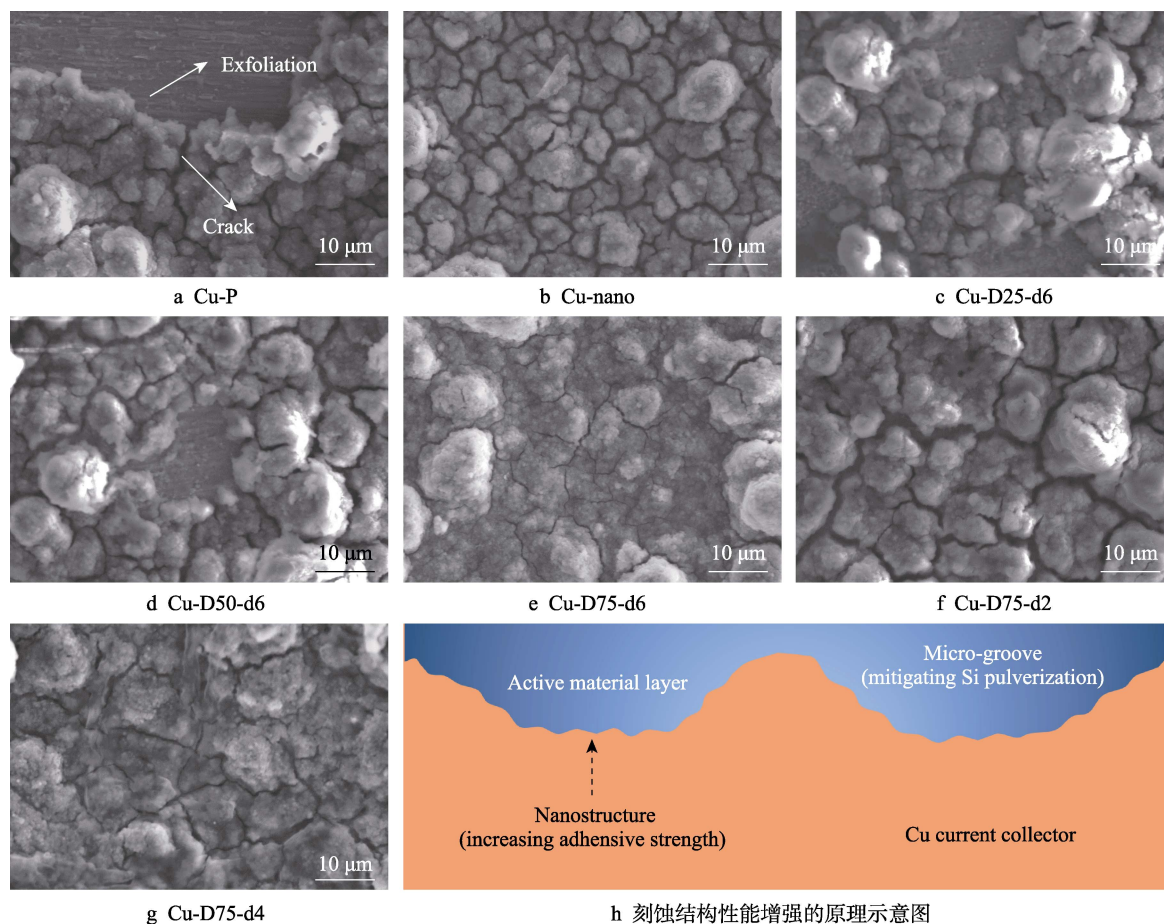


图 8 Si 电极在 1C 下循环 50 圈后的表面形貌

Fig.8 Surface morphology of Si anode after 50 cycles at 1C: a) Cu-P; b) Cu-nano; c) Cu-D25-d6; d) Cu-D50-d6; e) Cu-D75-d6; f) Cu-D75-d2; g) Cu-D75-d4; h) schematic for enhancement mechanism of anode performance by ablated structure

### 3 结论

采用波长为 515 nm 的飞秒激光器在锂离子电池 Si 电极 Cu 箔集流体表面深刻蚀, 制备了微纳沟槽结构, 得到如下结论。

1) Cu 箔绿光飞秒激光的烧蚀阈值为  $0.52 \text{ J/cm}^2$ , 沟槽深度随着单位点有效脉冲数的增加而线性增大, 刻蚀沟槽表面呈纳米结构, 未发生明显氧化现象。

2) Cu 箔集流体的 Si 电极在 1C 下循环 300 圈后容量保持率仅为 2%。在 Cu 箔集流体表面制备沟槽密度和深度分别为 75%、 $6 \mu\text{m}$  的微结构后, Si 电极的循环稳定性显著提升, 容量保持率高达 89%。

3) 刻蚀表面纳米结构的高黏结强度和深刻蚀沟槽结构的保护作用减少了 Si 电极的剥离和开裂 (电连接脱离), 有效缓解了 Si 电极的体积膨胀效应, 是电极性能提升的主要原因。

#### 参考文献:

[1] CAO L, ZHENG M, WANG J B, et al. Alloy-Type

Lithium Anode Prepared by Laser Microcladding and Dealloying for Improved Cycling/Rate Performance[J]. ACS Nano, 2022, 16(10): 17220-17228.

[2] 卢健, 隋欣梦, 郝胜智, 等. 锂离子电池用石墨负极材料改性研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 135-145.

LU J, SUI X M, HAO S Z, et al. Modification of Graphite Anode Materials for Lithium-Ion Batteries[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 135-145.

[3] LIU J W, YUE M, WANG S Q, et al. A Review of Performance Attenuation and Mitigation Strategies of Lithium-Ion Batteries[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(8): 2107769.

[4] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.

SUN Y S, YANG M, SHI C L, et al. Analysis of Application Status and Development Trend of Energy Storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.

[5] TAN K M, BABU T S, RAMACHANDARAMURTHY V K, et al. Empowering Smart Grid: A Comprehensive Review of Energy Storage Technology and Application with Renewable Energy Integration[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102591.

- [6] CAO L, HUANG T, ZHANG Q W, et al. Porous Si/Cu Anode with High Initial Coulombic Efficiency and Volumetric Capacity by Comprehensive Utilization of Laser Additive Manufacturing-Chemical Dealloying[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(51): 57071-57078.
- [7] CAO L, XIAO R S, WANG J B, et al. Recycling Waste Al-Si Alloy for Micrometer-Sized Spongy Si with High Areal/Volumetric Capacity and Stability in Lithium-Ion Batteries[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(25): 8143-8150.
- [8] REYTER D, ROUSSELOT S, MAZOUZI D, et al. An Electrochemically Roughened Cu Current Collector for Si-Based Electrode in Li-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2013, 239: 308-314.
- [9] ZHU P C, GASTOL D, MARSHALL J, et al. A Review of Current Collectors for Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2021, 485: 229321.
- [10] YANG Y, YUAN W, ZHANG X Q, et al. A Review on Structuralized Current Collectors for High-Performance Lithium-Ion Battery Anodes[J]. Applied Energy, 2020, 276: 115464.
- [11] CHEN J Q, WANG X G, GAO H T, et al. Rolled Electrodeposited Copper Foil with Modified Surface Morphology as Anode Current Collector for High Performance Lithium-Ion Batteries[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 410: 126881.
- [12] YANG D F, LAFORGUE A. Laser Surface Roughening of Aluminum Foils for Supercapacitor Current Collectors[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(12): A2503.
- [13] YANG D F, LAFORGUE A. Performance of Carbon-Nickel Composite Coatings on Laser Surface Roughened Aluminum Foils for Supercapacitor Current Collectors[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(5): 050504.
- [14] KUMAR V, VERMA R, KANGO S, et al. Recent Progresses and Applications in Laser-Based Surface Texturing Systems[J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 101736.
- [15] 李亚军, 逢显娟, 孙乐民, 等. 激光表面织构化对 45 钢摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 147-154.
- LI Y J, PANG X J, SUN L M, et al. Effects of Laser Surface Texturing on Friction and Wear Properties of 45 Steel[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 147-154.
- [16] LONG J Y, CHU P C, LI Y, et al. Dual-Scale Porous/Grooved Microstructures Prepared by Nanosecond Laser Surface Texturing for High-Performance Vapor Chambers[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 914-923.
- [17] 张欣, 黄婷, 肖荣诗. 晶面对单晶硅高功率绿光飞秒激光加工的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 362-371.
- ZHANG X, HUANG T, XIAO R S. Effect of Crystal Orientation on High Power Green Femtosecond Laser Processing of Single Crystal Silicon[J]. Surface Technology, 2021, 50(11): 362-371.
- [18] 秦晓阳, 黄婷, 肖荣诗. 高功率绿光飞秒激光诱导产生钛表面周期性微结构[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002006.
- QIN X Y, HUANG T, XIAO R S. Periodic Microstructure on Ti Surface Induced by High-Power Green Femtosecond Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002006.
- [19] WANG Y Y, ZHAO Z X, ZHONG J, et al. Hierarchically Micro/Nanostructured Current Collectors Induced by Ultrafast Femtosecond Laser Strategy for High-Performance Lithium-Ion Batteries[J]. Energy & Environmental Materials, 2022, 5(3): 969-976.
- [20] ZHANG N X, ZHENG Y J, TRIFONOVA A, et al. Laser Structured Cu Foil for High-Performance Lithium-Ion Battery Anodes[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2017, 47(7): 829-837.
- [21] ANOOP K K, FITTIPALDI R, RUBANO A, et al. Direct Femtosecond Laser Ablation of Copper with an Optical Vortex Beam[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(11): 113102.
- [22] 秦凯. 超快激光作用下铜膜烧蚀动力学的数值模拟与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019: 47-49.
- QIN K. Numerical Simulation and Experimental Study on Ablation Kinetics of Copper Films Irradiated by Ultrafast Laser[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019: 47-49.
- [23] KROMER R, COSTIL S, CORMIER J, et al. Laser Surface Patterning to Enhance Adhesion of Plasma Sprayed Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 278: 171-182.
- [24] ZHENG Y, AN Z, SMYREK P, et al. Direct Laser Interference Patterning and Ultrafast Laser-Induced Micro/Nano Structuring of Current Collectors for Lithium-Ion Batteries[C]// SPIE LASE Proc SPIE 9736, Laser-Based Micro- and Nanoprocessing X, 2016: 271-277.
- [25] TANG X X, LIU W, YE B Y, et al. Preparation of Current Collector with Blind Holes and Enhanced Cycle Performance of Silicon-Based Anode[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1723-1727.
- [26] SO J Y, MOON S H, KIM M C, et al. Stress Dispersed Cu Metal Anode by Laser Multiscale Patterning for Lithium-Ion Batteries with High Capacity[J]. Metals, 2018, 8(6): 410.