

特约专栏

热电池复合阴极材料 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 放电性能的研究

马士平, 曹 勇, 张小强, 魏开远, 吴 涛, 王 超, 崔艳华

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: NiCl_2 阴极材料具有高的理论放电电压和理论比能量, 作为一种新型热电池阴极材料而被广泛研究。 NiCl_2 阴极材料在放电过程中会产生 LiCl 等物质, 这将导致含 LiCl 的熔盐电解质出现成分偏析, 并产生较大的极化阻抗, 从而使 NiCl_2 阴极材料的放电性能明显下降。通过添加不同含量的 NiF_2 构建 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 双活性复合阴极材料, 能够抑制 NiCl_2 阴极材料在放电过程中造成的熔盐成分偏析。研究表明, 当添加的 NiF_2 质量分数为 30% 时, 在电流密度为 $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 双活性复合阴极材料的放电比容量达到 $291.2 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 比能量密度达 $0.701 \text{ Wh} \cdot \text{g}^{-1}$ (截止电压 $\geq 2 \text{ V}$), 比能量密度分别是 NiCl_2 和 NiF_2 阴极材料的 1.67 和 2.11 倍。

关键词: 热电池; 阴极材料; 复合材料; $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$

中图分类号: TM912 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)08-0561-06

Research on the Discharge Characteristics of $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ Composite Cathode Materials in Thermal Batteries

MA Shiping, CAO Yong, ZHANG Xiaoqiang, WEI Kaiyuan, WU Tao,
WANG Chao, CUI Yanhua

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

Abstract: NiCl_2 has been widely studied as a new cathode material for thermal batteries due to its high theoretical discharge voltage and specific energy. However, LiCl generates during the discharge process of NiCl_2 cathode, which results in composition segregation and larger polarization resistance of the molten salt electrolyte containing LiCl . It makes a significant reduction for the discharge performance of NiCl_2 cathode. In this contribution, NiF_2 was adopted as an additive to construct a $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ dual active composite cathode in order to suppress the composition segregation of molten salt electrolyte during the discharge process. The research results show that when the content of NiF_2 is 30wt%, the specific discharge capacity and specific energy density of $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ composite cathode respectively reach $291.2 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.701 \text{ Wh} \cdot \text{g}^{-1}$ at the cut-off voltage over 2 V and the discharge current density of $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. The specific energy density of $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ composite cathode is 1.67 and 2.11 times of NiCl_2 and NiF_2 cathode, respectively.

Key words: thermal batteries; cathode materials; composite materials; $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$

1 前 言

热电池是一种热激活式贮备电池, 使用高温熔盐作为电解质, 具有快激活、大功率、长贮存寿命等优点,

常用于导弹和火箭弹等先进武器中^[1-3]。其主要由单体电池、加热片、保温材料、引燃材料、壳体等组成, 如图 1 所示。在贮存过程中, 热电池所使用的熔盐电解质为固态, 电导率极低, 因此热电池自放电速率维持在极低水平。当通过引燃加热材料快速释放热量, 热电池内部温度快速 ($\leq 1 \text{ s}$) 升高至熔盐电解质熔点以上, 熔盐电解质电导率显著升高 ($1 \sim 3 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$), 此时热电池能够进行大电流放电^[4]。

目前, 热电池中常使用 LiB 、 LiSi 等合金作为阳极材料^[3, 5], LiCl-KCl 、 LiCl-LiBr-KBr 、 LiF-LiCl-LiBr 作为电解质, FeS_2 、 CoS_2 等硫化物作为阴极材料^[6-9]。硫化物

收稿日期: 2021-05-07 修回日期: 2021-06-18

基金项目: NSAF 联合基金项目 (U1930208); 中国工程物理研究院创新发展基金项目 (CX20200009); 国家自然科学基金项目 (11804321)

第一作者: 马士平, 男, 1993 年生, 博士研究生

通讯作者: 崔艳华, 女, 1972 年生, 研究员, 博士生导师,

Email: cuiyanhua@caep.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202105005

具有放电容量高、与熔盐电解质相容性好等优点,但其较低的热分解温度和单体电池放电电压($<2.0\text{ V}$)导致热电池体积难以进一步减小^[10-12]。因此,亟需发展具有较高放电电压的热电池阴极材料,以满足未来武器系统对热电池小型化的发展需求^[6, 9, 13-18]。

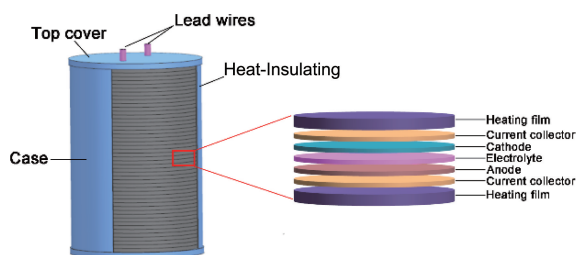


图 1 热电池的结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of thermal battery

目前,热电池高放电电压阴极材料主要分为氧化物、氯化物^[19-22]和氟化物^[23-25]。其中, NiCl_2 作为热电池阴极材料,具有高的理论放电电压(当阳极材料为Li金属时,其放电电压为 2.64 V)、理论放电比容量($413\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$)和热分解温度($>800\text{ }^\circ\text{C}$),应用前景相对广泛^[26]。Giagloglou等^[27]采用LiCl-KCl熔盐作为 NiCl_2 阴极材料的电解质,其实际放电比容量可达到 $360\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ (放电截止电压 $\geq 1\text{ V}$)。在本团队的前期研究中,通过采用新型全锂 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 电解质代替传统全锂 LiF-LiCl-LiBr 电解质,实现了 NiCl_2 阴极材料在大电流放电过程中实际放电容量达到 $377\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ (放电截止电压 $\geq 1.2\text{ V}$)^[26]。

但是, NiCl_2 阴极材料在放电过程中,会在其周围生成LiCl等物质,如式(1)所示:



导致含LiCl熔盐电解质中的LiCl含量显著增高,引起熔盐电解质成分出现偏析,进而降低熔盐电解质的液相点,导致 NiCl_2 阴极材料在放电过程中的极化电阻显著增大、放电电压下降^[20, 21, 28, 29]。因此,采取有效措施抑制 NiCl_2 阴极材料在放电过程中产生的LiCl等物质对熔盐电解质成分造成影响,对于提升其放电性能具有重要意义。

在本研究中,提出了将 NiF_2 与 NiCl_2 进行复合的方法,通过两者间的相互反应(式(2)):



调控熔盐电解质中LiF、LiCl的含量,从而减小 NiCl_2 阴极材料在放电过程中造成的熔盐电解质成分偏析对其放电性能的影响。此外, NiF_2 材料较高的理论放电电压(2.96 V)和理论放电比容量($554\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$),能够使 NiCl_2 阴极材料的放电电压和放电容量得到进一步提升。

2 实验

2.1 电池材料的制备及单体电池组装

$\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的制备过程如下:首先,按质量比分别为9:1, 8:2, 7:3和6:4的比例混合 NiCl_2 和 NiF_2 材料(均购自国药集团化学试剂有限公司);然后,在球磨机中以 $450\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速球磨10 h;最后,将制备的 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料保存在Ar气氛中。

$\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 低共熔熔盐电解质的制备:将购自阿拉丁集团的LiF粉体、LiCl粉体、 Li_2SO_4 粉体在 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥10 h,然后以11.4:35.0:52.6的质量比混合,经过熔化、制片、粉碎和干燥得到 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 低共熔熔盐电解质(E)。

电解质隔离粉(EB)的制备:将电解质E和MgO粉体(购自阿拉丁集团)按质量比4:6混合,经过熔融、球磨、过筛、干燥制得EB,将制备好的电解质E和电解质隔离粉EB保存于Ar气氛中待用。

阳极材料的制备:称取一定量的Li-Si合金和Ag粉(质量比为9:1)放入研钵中研磨混合均匀,随后放入手套箱中待用。

单体电池的组装:将0.5 g阳极材料、0.8 g EB粉、0.3 g阴极材料依次平铺在直径为32 mm的单体电池模具中,以 $40\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的加压速度加载到100 MPa并保压10 s,冷压成型单体电池。

单体电池的电极材料制备及组装均在露点温度低于 $-50\text{ }^\circ\text{C}$ 的干燥间内进行。此外,本实验涉及的电解质及电解质隔离粉的详细制备过程参见本团队前期工作^[26]。

2.2 材料表征及电化学性能测试

使用Bruker D8 Advance型X射线衍射仪(XRD)进行物相表征,基本参数为:Cu-K α 、扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 、扫描角度范围为 $10^\circ\sim 90^\circ$;采用NETZSCH STA449C型综合热分析仪对 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 及其与 NiF_2 的混合物进行热性能表征,基本参数为:Ar气氛、温度为 $30\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 、升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$;采用自制的热电池单体放电装置和Land电化学测试系统,对单体电池进行放电测试与数据收集。

3 结果与讨论

图2a为 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 电解质及其与 NiF_2 阴极材料的混合物的热重-差热分析(TG-DSC)曲线。可以看出, $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 在 $438.8\text{ }^\circ\text{C}$ 处有一个吸热峰,对应其熔化过程。而对于 NiF_2 与 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 的混合物,除了在 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 熔点附近有一个吸热峰外,在更高温度

(506.8 °C) 下, 出现了一个新的吸热峰, 表明 NiF_2 和 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 发生了相互溶解或反应。

图 2b 为 NiF_2 与 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 电解质隔离粉的混合物(50% : 50%, 质量分数)在 520 °C 下、Ar 气氛中煅烧 30 min 后的 XRD 图谱。可以看出, 经过煅烧后, 在 NiF_2 与 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 电解质隔离粉的混合物中, 并未发现 LiCl 的特征峰, 而在 36.2°、52.5°和 55.0°发现了分别对应于 NiCl_2 材料(104)、(018)和(113)晶面的衍射峰, 表明 NiF_2 与 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 熔盐电解质中的 LiCl 发生了化学反应^[30]。表 1 为反应式(2)中的反应物和生成物在约 520 °C 的热力学焓值(ΔH)及熵值(ΔS), 其中 T 为反应温度。通过式(3)计算, 反应式(2)的吉布斯自由能(ΔG)为 $-45.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 表明此化学反应在 520 °C 左右能够自发进行。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

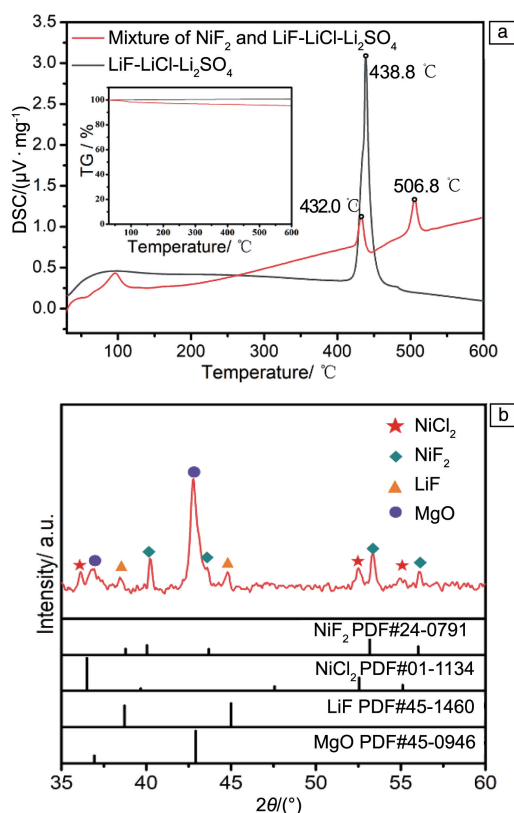


图 2 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 电解质及其与 NiF_2 混合物的热重-差热分析(TG-DSC)曲线(a); 在 Ar 气氛中, NiF_2 与 $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ 电解质隔离粉在 520 °C 下煅烧 30 min 后的 XRD 图谱(b)

Fig. 2 TG-DSC curves of $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ electrolyte and its mixture with NiF_2 (a); XRD pattern of the mixture of NiF_2 and $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4$ electrolyte separator calcined at 520 °C for 30 min in Ar atmosphere (b)

表 1 反应式(2)中涉及的不同物质在 520 °C 下的焓值及熵值

Table 1 Enthalpies and entropies of different materials involved in reaction (2) at 520 °C

	NiF_2	LiCl	NiCl_2	LiF
$\Delta H/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	-621.3	-381.0	-266.1	-591.8
$\Delta S/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	144.6	111.9	174.2	84.0

当放电电流密度为 $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, $\text{LiSi/LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4/\text{NiCl}_2$ 单体电池在不同温度下的放电曲线, 如图 3 所示。可以看出, NiCl_2 阴极材料在不同温度下随着放电深度的增加, 其放电电压显著下降, 原因在于, 随着放电深度增加, 放电产物 LiCl 在熔盐电解质中的含量急剧增加, 引起熔盐电解质出现成分偏析, 导致熔盐电解质的液相点降低、极化内阻显著增大, 进而表现为 NiCl_2 阴极材料的放电电压迅速降低。对比图 3 中不同温度下的放电曲线, 发现 $\text{LiSi/LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4/\text{NiCl}_2$ 体系中 NiCl_2 阴极材料的放电性能并不单纯地随着温度的升高而上升或下降。当温度较低(490 °C)时, 电解质离子的电导率较低, Li^+ 的扩散受到影响, 单体电池内阻较大, 导致其放电平台电位较低、放电性能较差; 当温度较高(550 °C)时, NiCl_2 阴极材料在电解质中的溶解度增大, 导致其自放电速率增加、放电性能下降。当放电温度为 520 °C 时, $\text{LiSi/LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4/\text{NiCl}_2$ 单体电池中 NiCl_2 阴极材料的放电性能达到最优, 因此, 在对 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的研究中设定其放电温度为 520 °C。

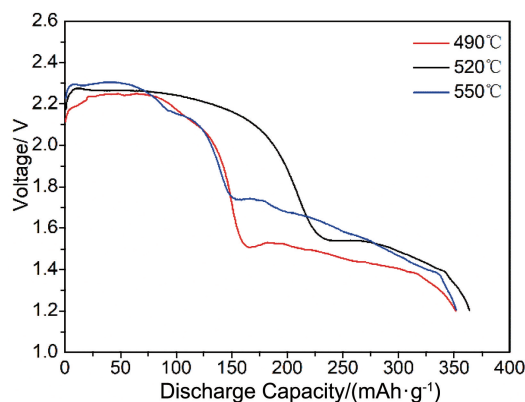


图 3 当放电电流密度为 $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, NiCl_2 阴极材料在不同温度下的放电曲线

Fig. 3 Discharge curves of NiCl_2 cathode material under different temperatures at the discharge current density of $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$

当放电电流为 $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 不同 NiF_2 含量的 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料在 520 °C 下的放电曲线如图 4a 所示。可以看出, 当仅以 NiCl_2 为阴极材料时, 不仅其放

电电压明显低于理论放电电压, 而且放电电压高于 2 V 的有效放电容量也较低; 当以 NiF_2 为阴极材料时, 虽然其放电电压明显高于 NiCl_2 阴极材料, 但其实际放电容量较低, 主要是由于 NiF_2 会与电解质发生反应; 当将 NiF_2 与 NiCl_2 进行复合时, 复合阴极材料的放电电压不仅得到明显提升, 同时其放电电压较为平稳。当添加的 NiF_2 质量分数分别为 10%, 20% 和 30% 时, 复合阴极材料的放电容量可分别达到 216.0, 226.7 和 291.2 $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (截止电压为 2.0 V), 相较于 NiCl_2 (187.8 $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 NiF_2 (126.2 $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$) 阴极材料的放电容量都有较为明显的提升, 且其高电位平台非常平稳。图 4b 为 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$

复合阴极材料的放电比能量密度 (截止电压 ≥ 2 V) 随 NiF_2 含量的变化图。当 NiF_2 的质量分数小于 30% 时, 随 NiF_2 含量的逐渐提高, $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的比能量密度也在逐渐升高, 表明 NiF_2 的添加对 NiCl_2 阴极材料放电过程中产生的熔盐电解质成分偏析抑制作用逐渐增大。当 NiF_2 的质量分数达到 30% 时, $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的比能量密度最高, 达到 0.701 $\text{Wh} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别是 NiCl_2 和 NiF_2 阴极材料的 1.67 和 2.11 倍。但是, 当 NiF_2 的质量分数大于 30% 时, $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的比能量密度逐渐降低。由此可见, 当 NiF_2 的质量分数为 30% 时, $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料具有最优的放电性能。

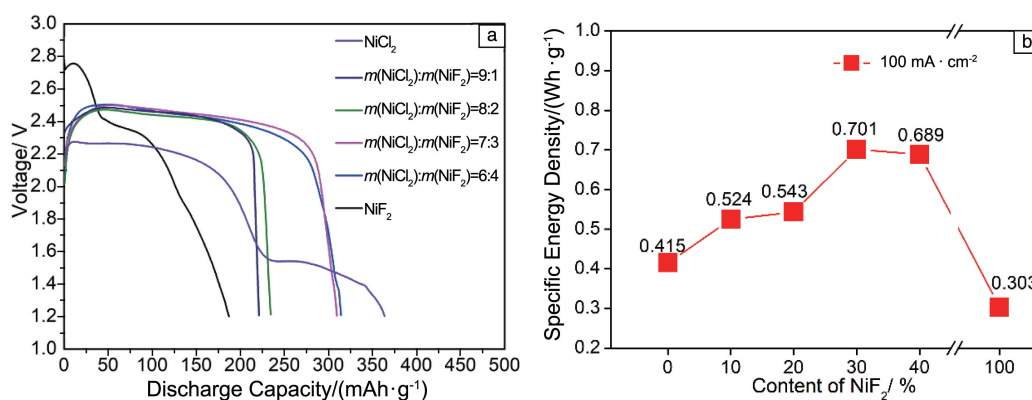


图 4 当放电电流密度为 $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料在 520°C 下的放电性能: (a) 放电曲线, (b) 比能量密度变化 (截止电压 ≥ 2 V)

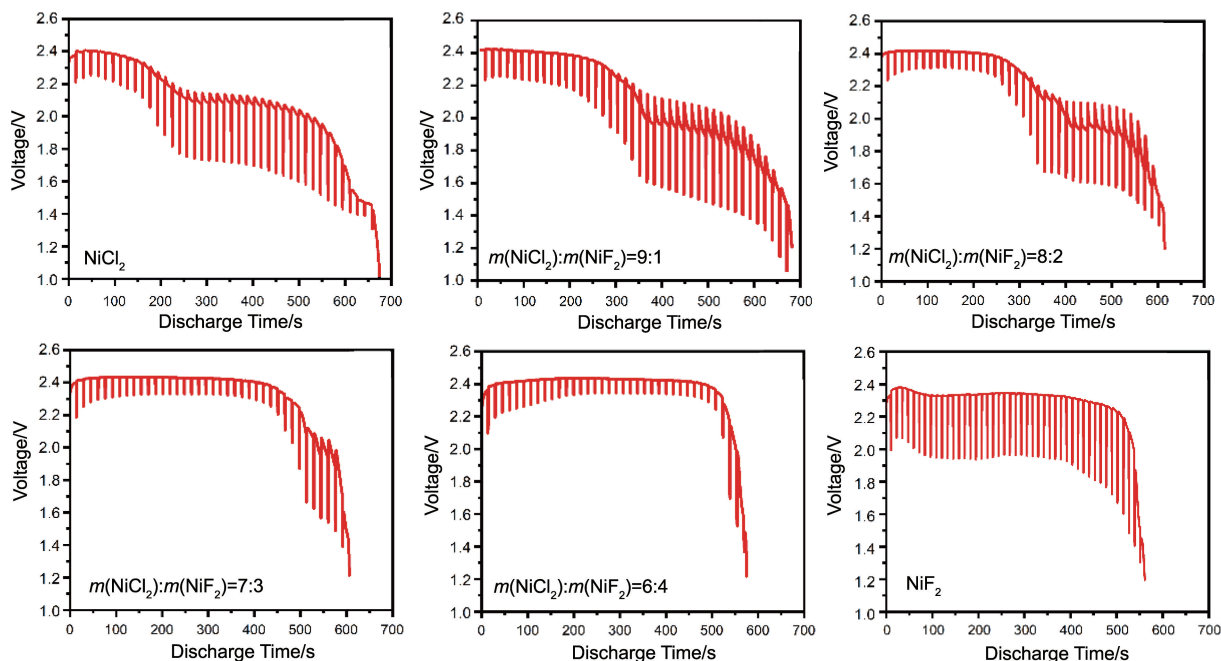
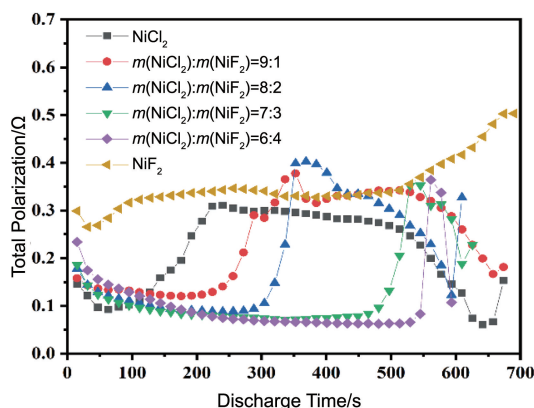
Fig. 4 Discharge performances of $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ composite cathode materials at 520°C under the discharge current density of $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$: (a) discharge curves, (b) variation of specific energy density (Cut-off voltage ≥ 2 V)

图 5 和图 6 分别为不同 NiF_2 含量的 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的脉冲放电曲线和极化电阻随时间变化图, 采用的恒放电电流为 $50 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 脉冲电流为 $200 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 时间间隔为 15 s, 时长为 1 s。当施加脉冲电流时, $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的放电电压明显下降, 移去脉冲电流后, 电压快速回复至较高水平并快速下降, 主要是由于放电过程中反应产物的生成导致极化增大。该现象在不同 NiF_2 含量的 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料中均出现, 且随着 NiF_2 含量的增加逐渐变弱甚至消失。综上, 在相同条件下, NiF_2 的添加一方面能够与 NiCl_2 阴极材料的放电产物 LiCl 发生反应, 降低熔盐电解质中 LiCl 的含量, 进而抑制熔盐电解质的成分偏析, 使得 NiCl_2 阴极材料在放电过程中的极化电阻得到有效降低; 另一方面, NiF_2 材料较高的放电电压和放电容量也有益于 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料放电性能的提升。通过对比不同 NiF_2 含量的 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的单体电池的极化内阻 (图 6), 进一步表明 NiF_2 可以有效降低 NiCl_2 在

放电过程中因 LiCl 生成引起熔盐电解质成分偏析而导致的较大的极化电阻。

4 结 论

通过简单的球磨法合成 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料, 能够有效抑制 NiCl_2 阴极材料在放电过程中产生的 LiCl 所引起的熔盐电解质成分偏析, 从而降低 NiCl_2 阴极材料在放电过程中的极化电阻, 进而实现 NiCl_2 阴极材料放电性能较为明显的提升。当 NiF_2 的质量分数为 30% 时, $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料的放电容量可达 291.2 $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (截止电压 ≥ 2 V), 较 NiCl_2 阴极材料 (187.8 $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 截止电压 ≥ 2 V) 提升了 55%。由此可见, 将 NiF_2 和 NiCl_2 阴极材料进行复合, 是一种有效提升 NiCl_2 阴极材料放电性能的方法。本研究不仅为解决 NiCl_2 阴极材料在热电池实际应用中产生的问题提供了新的解决方法, 也为推动热电池新型阴极材料的发展提供了新的研究思路。

图5 以不同 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料制备的单体电池的脉冲放电曲线Fig. 5 Pulse discharge curves of single cells prepared with different $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ composite cathode materials图6 以不同 $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ 复合阴极材料制备的单体电池的极化内阻变化Fig. 6 Variation of polarization internal resistance for single cells prepared with different $\text{NiCl}_2/\text{NiF}_2$ composite cathode materials

参考文献 References

- [1] GUIDOTTI R A, MASSET P J. Journal of Power Sources[J], 2006, 161(2): 1443-1449.
- [2] MASSET P J, GUIDOTTI R A. Journal of Power Sources[J], 2007, 164(1): 397-414.
- [3] GUIDOTTI R A, MASSET P J. Journal of Power Sources[J], 2008, 183(1): 388-398.
- [4] KANG S H, CHAE S H, CHEONG H W, et al. Ceramics International[J], 2017, 43(5): 4023-4028.
- [5] CHOI Y S, YU H R, CHEONG H W. Journal of Power Sources[J], 2015, 276: 102-104.
- [6] MASSET P J, GUIDOTTI R A. Journal of Power Sources[J], 2008, 177(2): 595-609.
- [7] GIAGLOGLOU K, PAYNE J L, CROUCH C, et al. Journal of the Electrochemical Society[J], 2017, 164(9): A2159-A2163.
- [8] XIE S, DENG Y, MEI J, et al. Composites Part B: Engineering[J], 2016, 93: 203-209.
- [9] XIE S, DENG Y, MEI J, et al. Electrochimica Acta[J], 2017, 231: 287-293.
- [10] GIAGLOGLOU K, PAYNE J L, CROUCH C, et al. Journal of the Electrochemical Society[J], 2016, 163(14): A3126-A3130.
- [11] WANG Y, BAI X, LUO Z, et al. Frontiers in Chemistry[J], 2020, 8: 575787.
- [12] CAO Y, GAO C, YANG X, et al. Journal of the Electrochemical Society[J], 2021, 168(1): 01053.
- [13] MASSET P J, GUIDOTTI R A. Journal of Power Sources[J], 2008, 178(1): 456-466.
- [14] JIN C, ZHOU L, FU L, et al. Journal of Power Sources[J], 2017, 352: 83-89.
- [15] KO J, KIM I Y, JUNG H M, et al. Ceramics International[J], 2017, 43(7): 5789-5793.
- [16] HU J, ZHAO L, CHU Y, et al. Journal of Alloys and Compounds[J], 2018, 762: 109-114.
- [17] ZHENG X, ZHU Y, SUN Y, et al. Journal of Power Sources[J], 2018, 395: 318-327.
- [18] DI BENEDETTO G L, MORRIS L A, SWANSON D B, et al. Journal of the Electrochemical Society[J], 2021, 168(4): 046520.
- [19] HU J, CHU Y, TIAN Q Q, et al. Materials Letters[J], 2017, 207: 198-201.

- [20] JIN C, ZHOU L, FU L, *et al.* Applied Surface Science[J], 2017, 402: 308–313.
- [21] JIN C, FU L, GE B, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2019, 800: 518–524.
- [22] LUO Z, LIN X, TANG L, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2020, 12(31): 34755–34762.
- [23] HAIMOVICH N, DEKEL D R, BRANDON S. Journal of the Electrochemical Society[J], 2015, 162(3): A350–A362.
- [24] GUO S N, GUO H, WANG X Y, *et al.* Journal of the Electrochemical Society[J], 2019, 166(15): A3599–A3605.
- [25] CHANG Q, LUO Z S J, FU L C, *et al.* Electrochimica Acta[J], 2020, 361: 137051.
- [26] CAO Y, LI J, YANG P, *et al.* Science China Technological Sciences[J], 2021, 64: 91–97.
- [27] GIAGLOGLOU K, PAYNE J L, CROUCH C, *et al.* Journal of the Electrochemical Society[J], 2018, 165(14): A3510–A3516.
- [28] ZHANG X, WANG C, YANG P, *et al.* Physical Chemistry Chemical Physics[J], 2021, 23(1): 196–203.
- [29] LIU W, LIU H, BI S, *et al.* Science China Materials[J], 2017, 60(3): 251–257.
- [30] LIAO Z, FU L C, ZHU J J, *et al.* Journal of Power Sources[J], 2020, 463: 228–237.

(编辑 王 瑶)



特约编辑陈人杰

陈人杰:男,1976年生,北京理工大学教授、博士生导师。主要从事新型二次电池及关键材料方面的研究,包括高能量密度电池新体系的构筑、电池安全性能的改善、功能器件的设计开发、多电子高比能二次电池新体系及关键材料、新型离子液体及功能复合电解质材料、特种电源用新型薄膜材料、绿色二次电池资源化再生等方向。主持了国家自然科学基金委项目、科技部重点研发计划项目、科技部“863”计划项目、科技部国际科技合作项目、中央在京高校重大成果转化项目、北京市重大科技项目等课题。在 *Chem. Rev.*, *Chem. Soc.*



特约撰稿人崔艳华

Rev., *Adv. Mater.*, *Nat. Commun.* 等期刊发表SCI收录论文200余篇;申请发明专利95项,获授权42项;获批软件著作权10项,出版学术专著2部(《先进电池功能电解质材料》《多电子高比能锂硫二次电池》)。获得国家技术发明二等奖1项、部级科学技术一等奖4项。入选教育部“长江学者奖励计划”特聘教授、北京高等学校卓越青年科学家、中国工程前沿杰出青年学者、英国皇家化学学会会士、科睿唯安2020全球“高被引科学家”。现兼任国家部委能源专业组委员,中国材料研究学会(能源转换及存储材料分会秘书长)、中国硅



特约撰稿人李琦阳

酸盐学会固态离子学分会、国际电化学能源科学院(IAOES)理事,中国化工学会化工新材料专业委员会委员、中国电池工业协会全国电池行业专家,《中国材料进展》编委等。

崔艳华:女,1972年生,中国工程物理研究院电子工程研究所研究员、博士生导师。担任国家某部委电能源专业组专家、科技部评审专家、博士后基金评审专家。长期从事军用化学电源及新型能源材料研究,目前主要研究方向为全固态薄膜锂离子电池、高温熔盐电池、新型电池材料及界面电化学。近5年来,主持国家自然科学基金委重点



特约撰稿人邱景义

项目、国防预研重大项目子任务、跨行业预研专项、中国工程物理研究院创新发展基金创新项目、中国工程物理研究院超精密重点实验室重点项目等多项项目。在 *Energy Storage Mater.*, *Adv. Funct. Mater.*, *ACS Nano* 等SCI期刊发表论文50余篇;获授权发明专利16项。获军队科技进步二等奖2项、军队科技进步三等奖1项,获中国工程物理研究院科技创新Top10等多项奖励;研制的部分产品已应用于重点型号工程的军事装备。

李琦阳:女,1991年生,2018年博士毕业于中国地质大学(武汉)材料科学与工程专业。一

直从事于电化学储能和计算材料学相关方向的研究工作,具体为采用理论计算结合实验手段进行金属锂一次电池、金属锂二次电池的研究工作,以及碳材料改性、粘结剂制备优化、相关电池材料改性优化以及电化学超级电容器活性材料制备等。在 *J. Mater. A*, *Micro. & Mesop. Mater.*, *Adv. Mater.* 等期刊发表论文7篇。

邱景义:男,1981年生,2009年毕业于北京大学化学学院,现为军事科学院防化研究院电源室主任、研究员,先进化学蓄电技术与材料北京市重点实验室主任,入选军队高层次人才工程。发明了全极耳引流电池、高安全凝胶电解质辐射制备、增程式多功能供电平台等技术,研发多型特种电源系统支撑了新型装备发展。发表论文60余篇,授权发明专利20余项。获军队科技进步二等奖1项、三等奖2项,武警部队科技进步二等奖1项。