蓬勃发展的金属锂负极

张强^{1,*}, 郭玉国^{2,*}

¹ 清华大学化学工程系, 绿色化学反应工程与技术北京市重点实验室, 北京 100084

² 中国科学院化学研究所, 中国科学院分子纳米结构与纳米技术重点实验室, 北京 100190

The Booming Li Metal Anodes

Qiang Zhang^{1,*}, Yu-Guo Guo^{2,*}

¹ Beijing Key Laboratory of Green Chemical Reaction Engineering and Technology, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China.

² CAS Key Laboratory of Molecular Nanostructure and Nanotechnology, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100190, China.

Emails: zhang-qiang@mails.tsinghua.edu.cn (Q.Z.), ygguo@iccas.ac.cn (Y.G.)

Published online: November 30, 2020.

当今, 国际格局正在产生重大变革, 能源利用从传统化石能源主体逐渐转向低碳可再生能源。以电化学反应为基础的高效储能体系不受地理环境限制。发展高能量密度与高安全性的电化学储能技术, 是以可再生能源、新能源汽车工业为代表的能源革命的重要环节。

目前, 锂离子电池技术成熟度高, 在促进社会智能化、便携化进程中发挥着重要作用。基于电化学插层反应的锂离子电池经过将近三十年的发展, 能量密度趋近于理论极限, 但仍不能满足当代社会的储能需求。因此, 发展高安全高比容量的下一代电极材料势在必行。

作为极具前景的新型储能系统, 基于电化学反应的金属锂负极理论比容量高达3860 mAh·g⁻¹, 远高于目前锂离子插层化学提供的容量, 是未来构建高能量密度电池体系的重要选择。然而, 金属锂材料自身的高活性给实用化电池体系设计带来了新的挑战。金属锂负极界面不稳定且不均匀沉积形成枝晶, 易引发安全隐患, 限制了金属锂负极的高效利用¹。

金属锂的电化学沉积包括离子传输、锂的形核生长等多个步骤。理解锂沉积规律, 并在此基础上调控金属沉积行为是锂负极研究面临的难题²。当金属锂与电解液接触时, 会在负极表面反应生成电解质界面层。溶剂化的锂离子跨越电解质界面

层, 去溶剂化, 进而在负极表面被还原成金属锂。因此, 金属锂负极的电化学储能特性取决于锂离子在界面层中的扩散与电极表面的电化学反应。

金属锂的沉积速度依赖于由电场和电解质中浓度梯度驱动的锂离子迁移过程。这些因素与电解质特性、界面层特性及外部充放电条件密切相关。采用Sand模型来描述枝晶形核过程, 通过降低浓度梯度、降低电流密度可以有效延长Sand时间, 抑制枝晶形成³。当电流密度较小, 以至于锂沉积由电荷转移过程控制时, 沉积速度与电流密度成正比⁴。在靠近负极侧, 空间电荷驱动稀溶液中金属沉积, 在负极表面阴离子耗尽时, 枝晶即开始生长⁵。高电流密度和低锂离子浓度将进一步导致局部电流密度增加与界面层破裂, 导致不均匀电化学沉积。

1 锂的异相形核过程

锂的初始电化学形核与基体的物理化学特性有关。在金属锂电池中, 导电集流体(例如铜箔、碳材料等)通常作为锂沉积的初始形核基体。异相形核理论指出, 金属锂与基底的相互作用将影响形核过程。随接触角变小, 形核自由能呈现单调降低, 宏观表现为更低的形核过电势。

采用基体的表面化学过程可以调控金属锂的形核过程。以掺杂碳材料为例, 碳原子与杂原子的

电负性差异可形成负电中心, 吸附锂离子。形核位点与锂离子之间形成“局部偶极”, 增加离子-偶极相互作用, 降低锂形核的过电势⁶。

从锂金属的成核机理和载体改性的角度, 本专刊中, 程方益课题组⁷综述了锂金属负极的研究进展, 介绍了锂成核驱动力、动力学和相关模型, 并从降低电流密度、诱导成核、晶格匹配、构建缓冲层抑制死锂等方面介绍负极载体对金属锂的性能提升。熊训辉课题组⁸从聚合物保护膜、无机保护膜、有机-无机复合保护膜和合金保护膜总结了人造保护膜的构建方法、抑制锂枝晶生长机理, 指出合金保护膜与金属锂发生合金化反应, 可以降低锂成核势垒, 诱导均匀的锂沉积。

碳材料密度低、导电性高、比表面积大, 作为负极骨架载体材料有望降低局部电流密度, 调控形核能垒。金属锂负极的三维骨架材料包括碳纤维、卟啉有机骨架、石墨烯及其掺杂物等⁹。聚合物包覆的碳材料骨架构成自调节压力, 可以调节限域空间内的金属锂负极循环行为¹⁰。吕伟课题组¹¹采用一种质量占比较轻的细菌纤维素衍生的三维碳集流体, 其表面均匀分布的含氧官能团可以促进锂的均匀成核和沉积, 有效抑制了枝晶生长, 并呈现出了良好的电化学性能。刘文、周恒辉与合作者¹²提出了一种复合三维集流体构建策略, 设计一种亲锂的三维二硫化锡@碳纤维布复合基底材料, 借助高比表面积的三维碳纤维骨架和表面修饰的 SnS_2 层在锂沉积过程中形成的 Li-Sn 合金界面调控锂的沉积并抑制金属锂负极在充放电过程中的体积膨胀, 降低过电势, 为实现高的电流密度下稳定的循环提供了良好的平台材料。

除了以碳材料为载体的界面改性策略, 王欣然、吴川及合作者¹³将研究目光聚集到金属有机骨架(MOF), 结合金属锂界面的成核模型, 总结了MOF及其衍生材料在解决锂金属负极界面、隔膜界面以及正负极界面稳定性相互作用等方面的研究进展和作用机理, 为解决高比能金属锂电池界面失稳问题提供了解决途径, 并展望了MOF基材料的设计与发展方向。刘文、许海军及合作者¹⁴提出一种多孔泡沫铜和硫脲协同作用的策略, 利用硫脲分子的超填充作用实现了锂金属在多孔泡沫铜表面的均匀沉积, 提高了金属锂负极循环效率。

面向实用化电池, 刘兆平、周旭峰及合作者¹⁵使用机械辊压法, 在金属锂表面通过原位固相反应生成 LiC_6 界面层。在碳酸酯有机电解液体系下, 研究了 LiC_6 界面层对锂电化学沉积和溶解行为的影响, 发现 LiC_6 层能够有效提升锂电化学沉积的

可逆性与均匀性, 从而抑制枝晶生长及维持沉积/溶解界面稳定。彭哲、何海勇、王德宇及合作者¹⁶通过将体积缩小化的氟化石墨颗粒与离子传输网络结合, 原位形成有富氟化位点的三维框架结构, 可显著提升锂金属负极循环稳定性, 为高能量密度金属锂电池负极保护提供了新思路。沈炎宾、陈立桅及合作者¹⁷通过与4-氟苯乙烯的液相反应, 对锂-碳纳米管(CNT)复合负极材料做了表面修饰, 形成了均匀的富含氟化锂的原位聚合修饰层, 抑制空气和电解液对 Li-CNT 复合负极的侵蚀, 显著提高了 Li-CNT 电极的界面稳定性。

针对复合负极调控锂金属形核与电化学循环过程, 罗加严课题组¹⁸从三个层次总结了复合负极进展, 包括负极内部金属与骨架材料复合、电池内部固体电解质与负极复合、电池内部环境与外界操作条件例如电场、磁场、温度场等的复合。

2 锂的金属沉积动力学

扩散与反应过程的相对速率影响金属锂沉积形貌。实验发现, 受扩散控制的金属锂沉积物呈现枝晶形貌, 而当反应控制时, 呈现球状形貌。因此, 通过调控界面层结构可以提高扩散速度, 改变锂沉积形态¹⁹。通过在电解液中添加三氯化铝²⁰、氟代碳酸乙烯酯(FEC)²¹、聚多磷酸²²、多硫化物等在负极表面原位形成界面膜, 以及使用聚丙烯酸²³、偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物²⁴构成柔性、高离子迁移数的人工负极界面层, 可以调控锂离子在界面层中的传输与还原过程, 提升金属锂负极的电化学稳定性²⁵。

理想的固态电解质界面膜(SEI)应具有良好的机械强度、离子传输能力和电子绝缘性。李喜飞课题组²⁶以锂金属枝晶生长机理为出发点, 分析金属锂表面SEI膜的形成过程、功能化SEI的构筑策略, 与不同SEI膜的组成结构对锂负极性能的影响。

界面膜的离子/电子传导特性将显著影响循环过程锂传输动力学过程。李念武、于乐及合作者²⁷从离子/电子混合传导界面、离子导通而电子绝缘层(人工固态电解质界面, SEI层)、纳米界面钝化层三个角度归纳总结了人工界面保护层, 探讨了人工界面层物质结构与电池性能之间的构效关系, 总结了增强界面离子输运、物理化学稳定性、柔韧性、兼容性等的方法, 同时指出了该领域目前的主要挑战和未来的展望。为了提升界面膜的稳定性, 吴晓宏、卢松涛及合作者²⁸使用碳酸双(2,2,2-三氟乙基)酯添加剂, 在锡锂合金/碳纸复合负极表面形成原位氟化保护层, 有效地改善了锂

负极的倍率性能和循环稳定性, 能够有效地抑制锂与电解液之间的副反应, 提高锂负极库伦效率和降低电极的界面阻抗。

对固态电解质界面膜的结构设计可以调控锂金属沉积形貌。程新兵、袁洪与合作者²⁹设计了一种独特的电解槽体系, 实现了柱状锂的沉积。对两种电解液中金属锂沉积物长径比的研究表明, 电解液的组分可以显著地影响金属锂的沉积形貌。FEC的加入增加了负极表面层中氟化锂的含量, 提高了锂离子的迁移速率, 降低了锂的成核密度, 最终沉积出长径比更低的柱状锂。钱江锋课题组³⁰综述了高浓与局部高浓电解液体系的研究进展, 分析了电解液的溶剂化结构和物理化学性质, 探讨了对金属锂界面的稳定机制, 从基础与应用两个层面对目前电解液存在的挑战与未来发展方向进行了探讨。

锂沉积动力学的研究方法包括电化学对称电池极化测试、循环过程交流阻抗谱、电压-电流(CV)测试等。其中, 锂对称电池是评测金属锂界面特性的重要测试对象, 但是对短路的判断仍没有统一标准, 存在一些对短路数据的错误解析。康丹苗与合作者³¹使用原位电池分析了锂枝晶产生导致的短路过程, 并对软短路、硬短路等短路现象进行了分类, 提出了通过电压响应信号结合交流阻抗谱, 判断锂对称电池短路的依据。

3 锂负极失效与安全性

解决金属锂负极的失效问题, 是电池实用化的必经之路。周永宁研究组³²结合先进表征技术, 包括冷冻电镜、中子深度分析、原位表征技术、固态核磁技术等, 从SEI膜、死锂层和锂枝晶三个角度总结了锂金属负极的失效过程。

针对于锂负极存在的易产生枝晶、刺穿隔膜, 引发电池短路、着火、产气爆炸等失效问题, 张耀辉、丁飞及合作者³³以电化学理论为基础, 从浓差极化的角度, 使用有限元模拟结合电化学方法, 分析了金属锂沉积过程枝晶生长、形成死锂和全电池的失效过程。对比多孔电极与平面电极, 研究了多孔电极对枝晶的抑制作用。

锂金属沉积形貌将影响电池库伦效率与循环稳定性。针对循环效率与负极形貌之间的构效关系, 焦淑红课题组³⁴以四种典型的电解液为例, 通过原子力显微镜对锂金属生长过程中的形貌变化进行了系统研究, 发现锂金属沉积物主要有树枝状与颗粒状两种形貌, 颗粒状的金属锂表现出了更好的可逆性, 加深了对锂金属负极电化学行为

的认识和理解。余彦课题组³⁵结合锂枝晶的成核生长模型等机理, 对近些年来在液态和固态电解质体系中改善锂金属负极的主要策略(三维储锂骨架、电解液添加剂、修饰隔膜、人造界面层等)及其作用机理进行了总结与深度分析。

从金属锂电池的热安全角度出发, 陆盈盈课题组³⁶分析了电池热失控的诱因及过程, 介绍了在材料层面上提升电池热安全性的多种策略, 展望了安全型金属锂电池未来的研究方向和研究前景, 为理解金属锂电池的热失控特征及设计更安全的锂电池提供了重要参考。

近年来, 高离子导率固态电解质材料的研发给金属锂的高效利用带来了新的机遇, 例如氧化物、硫化物、聚合物材料等。固态金属锂电池避免使用液态电解液, 有望减少负极界面副反应、大幅提升电池安全性³⁷。

固态电解质和金属锂负极间有限的固固接触导致界面电阻增大问题是固态金属锂负极面临的重要挑战。制备复合电解质与引入界面修饰层在提高电解质与电极间机械与化学相容性方面有众多优势。应用于金属锂负极的复合电解质包括具有功能化聚合物层的非对称氧化物电解质³⁸、多层结构聚丙烯腈-氧化物电解质³⁹、原位聚合的耐高压电解质⁴⁰、自修复聚合物电解质⁴¹等。温兆银课题组⁴²针对锂镧锆氧电解质对水分及空气敏感、产物氢氧化锂、碳酸锂等疏锂杂质导致高的界面电阻问题, 利用石榴石电解质表面的 H^+/Li^+ 交换并原位沉积亲锂层, 在电解质表层沉积了亲锂材料氧化锌, 有效改善了负极界面接触, 提升负极循环稳定性。

在固态电解质与负极界面, 通过构造纳米化三维骨架可以增加接触面积。引入界面缓冲层与使用界面润湿剂有助于构筑共形界面, 提高金属锂与电解质兼容性^{43,44}。黄佳琦课题组⁴⁵为解决金属锂/电解质的固固界面存在的界面接触差、界面电荷传输阻力高等问题, 以固态金属锂软包电池为研究对象, 通过局部高盐电解液润湿金属锂负极与硫化物固态电解质($Li_7P_3S_{11}$)界面, 有效增加锂负极与硫化物固态电解质界面的离子输运通路, 从而实现界面锂离子的快速输运。

4 先进研究方法

全空间尺度下的先进表征手段给金属锂负极的基础科学和应用技术研究带来了新的重要机遇⁴⁶。禹习谦课题组⁴⁷的综述梳理了从原子级到宏观尺度下的电极行为和表征手段的技术特

点, 并重点讨论了各类表征技术在研究固态体系中金属锂负极时的特点与可能的发展方向, 为未来金属锂电极研究和固态锂电池设计提供了重要参考。其中, 中子深度剖析 (Neutron Depth Profiling, NDP) 技术对锂具有高灵敏性, 并且具有定量非破坏性、高穿透特性, 在实时研究锂的电化学行为上有广阔应用前景。杨勇课题组⁴⁸在综述中介绍了NDP的测试原理及提高其空间和时间分辨率的方法, 总结分析了近年来NDP技术在液态/固态电池体系中锂金属负极研究的应用, 并展望了NDP技术今后的发展前景。

与实验相辅相成, 计算模拟有助于认识锂的反应机理、筛选与预测能源材料并优化电池系统设计⁴⁹。张千帆课题组⁵⁰对近年来计算模拟在锂金属电极中的应用进行了综述, 重点在于利用分子动力学、第一性原理计算等计算方法, 研究界面反应、固体电解质膜以及锂形核过程。同时, 对近年来计算模拟在锂金属负极中的应用进行总结, 并展望了该领域的未来发展方向。

金属锂负极研究正迎来蓬勃发展的春天, 先进的研究手段为揭示锂金属的物理化学特性带来了新的机遇, 也为锂离子电池的析锂、补锂提供化学基础。通过化学、材料学、计算科学、工程科学的通力合作, 金属锂负极的基础研究与产业应用将取得更大突破。

此专刊分成两期在2021年第1期和第2期印刷出版。希望《物理化学学报》的读者能喜欢本专刊中的文章, 阅读愉快, 并从中有所启发。

References

- Cheng, X. B.; Zhao, C. Z.; Yao, Y. X.; Liu, H.; Zhang, Q. *Chem* **2019**, 5, 74. doi: 10.1016/j.chempr.2018.12.002
- Yan, C.; Yuan, H.; Park, H. S.; Huang, J. Q. *J. Energy Chem.* **2020**, 47, 217. doi: 10.1016/j.jechem.2019.09.034
- Sand, H. J. S. *Philos. Mag.* **1901**, 1, 45. doi: 10.1080/14786440109462590
- Brissonot, C.; Rosso, M.; Chazalviel, J. N.; Baudry, P.; Lascaud, S. *Electrochim. Acta* **1998**, 43, 1569. doi: 10.1016/S0013-4686(97)10055-X
- Chazalviel, J. N. *Phys. Rev. A* **1990**, 42, 7355. doi: 10.1103/PhysRevA.42.7355
- Chen, X.; Chen, X. R.; Hou, T. Z.; Li, B. Q.; Cheng, X. B.; Zhang, R.; Zhang, Q. *Sci. Adv.* **2019**, 5, eaau7728. doi: 10.1126/sciadv.aau7728
- Qiu, X. G.; Liu, W.; Liu, J. D.; Li, J. Z.; Zhang, K.; Cheng, F. Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2009012. [邱晓光, 刘威, 刘九鼎, 李俊志, 张凯, 程方益. 物理化学学报, **2021**, 37, 2009012.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009012
- Liu, D. D.; Chen, C.; Xiong, X. H. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 202008078. [刘冬冬, 陈超, 熊训辉. 物理化学学报, **2021**, 37, 202008078.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008078
- Li, B. Q.; Chen, X. R.; Chen, X.; Zhao, C. X.; Zhang, R.; Cheng, X. B.; Zhang, Q. *Research* **2019**, 2019, 4608940. doi: 10.34133/2019/4608940
- Shi, P.; Zhang, X. Q.; Shen, X.; Li, B. Q.; Zhang, R.; Hou, L. P.; Zhang, Q. *Adv. Funct. Mater.* **2020**, 20, 2004189. doi: 10.1002/adfm.202004189
- Zhang, Y. B.; Lin, Q. W.; Han, J. W.; Han, Z. Y.; Li, T.; Kang, F. Y.; Yang, Q. H.; Lü, W. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008088. [张云博, 林乔伟, 韩俊伟, 韩志远, 李瞳, 康飞宇, 杨全红, 吕伟. 物理化学学报, **2021**, 37, 202008088.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008088
- Wang, Q.; Wu, K.; Wang, H. C.; Liu, W.; Zhou, H. H. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2007092. [王骞, 吴恺, 王航超, 刘文, 周恒辉. 物理化学学报, **2021**, 37, 2007092.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202007092
- Sun, Y. H.; Gao, M. D.; Li, H.; Xu, L.; Xue, Q.; Wang, X. R.; Bai, Y.; Wu, C. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2007048. [孙宇恒, 高铭达, 李慧, 徐丽, 薛晴, 王欣然, 白莹, 吴川. 物理化学学报, **2021**, 37, 2007048.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202007048
- Qin, J. L.; Ren, L. T.; Cao, X.; Zhao, Y. J.; Xu, H. J.; Liu, W.; Sun, W.; Sun X. M. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2009020. [秦金利, 任龙涛, 曹欣, 赵亚军, 许海军, 刘文, 孙晓明. 物理化学学报, **2021**, 37, 2009020.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009020
- Zhang, Z. B.; Deng, W.; Zhou, X. F.; Liu, Z. P. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008073. [张自博, 邓伟, 周旭峰, 刘兆平. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008073.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008073
- Wang, M. Q.; Peng, Z.; Lin, H.; Li, Z. D.; Liu, J.; Ren, Z. M.; He, H. Y.; Wang, D. Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2007016. [王木钦, 彭哲, 林欢, 李振东, 刘健, 任重民, 何海勇, 王德宇. 物理化学学报, **2021**, 37, 2007016.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202007016
- Liu, Y.; Zheng, L.; Gu, W.; Shen, Y. B.; Chen, L. W. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2004058. [刘亚, 郑磊, 谷巍, 沈炎宾, 陈立桅. 物理化学学报, **2021**, 37, 2004058.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202004058
- Zhao, Y. M.; Ren, L. X.; Wang, A. X.; Luo, J. Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008090. [赵雨萌, 任凌霄, 王澳轩, 罗加严. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008090.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008090
- Chen, X. R.; Yao, Y. X.; Yan, C.; Zhang, R.; Cheng, X. B.; Zhang, Q. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59, 7743. doi: 10.1002/anie.202000375
- Ye, H.; Yin, Y. X.; Zhang, S. F.; Shi, Y.; Liu, L.; Zeng, X. X.; Wen, R.; Guo, Y. G.; Wan, L. J. *Nano Energy* **2017**, 36, 411. doi: 10.1016/j.nanoen.2017.04.056
- Zhang, X. Q.; Chen, X.; Cheng, X. B.; Li, B. Q.; Shen, X.; Yan, C.;

- Huang, J. Q.; Zhang, Q. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 5301.
doi: 10.1002/anie.201801513
- (22) Li, N. W.; Yin, Y. X.; Yang, C. P.; Guo, Y. G. *Adv. Mater.* **2016**, 28, 1853. doi: 10.1002/adma.201504526
- (23) Li, N. W.; Shi, Y.; Yin, Y. X.; Zeng, X. X.; Li, J. Y.; Li, C. J.; Wan, L. J.; Wen, R.; Guo, Y. G. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 1505.
doi: 10.1002/anie.201710806
- (24) Xu, R.; Zhang, X. Q.; Cheng, X. B.; Peng, H. J.; Zhao, C. Z.; Yan, C.; Huang, J. Q. *Adv. Funct. Mater.* **2018**, 28, 1705838.
doi: 10.1002/adfm.201705838
- (25) Zhang, Q.; Liu, S.; Lu, Y.; Xing, L.; Li, W. *J. Energy Chem.* **2020**.
doi: 10.1016/j.jechem.2020.09.030
- (26) Qian, H. M.; Li, X. F. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008092. [钱华明, 李喜飞. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008092.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202008092
- (27) Guan, J.; Li, N. W.; Yu, L. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2009011. [关俊, 李念武, 于乐. 物理化学学报, **2021**, 37, 2009011.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202009011
- (28) Wang, Z. D.; Feng, Y. C.; Lu, S. T.; Wang, R.; Qin, W.; Wu, X. H. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008082. [王志达, 冯元晟, 卢松涛, 王锐, 秦伟, 吴晓宏. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008082.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202008082
- (29) Yang, S. J.; Xu, X. Q.; Cheng, X. B.; Wang, X. M.; Chen, J. X.; Xiao, Y.; Yuan, H.; Liu, H.; Chen, A. B.; Zhu, W. C.; Huang, J. Q.; Zhang, Q. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2007058. [杨世杰, 徐向群, 程新兵, 王鑫萌, 陈金秀, 肖也, 袁洪, 刘鹤, 陈爱兵, 朱万诚, 黄佳琦, 张强. 物理化学学报, **2021**, 37, 2007058.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202007058
- (30) Wu, C.; Zhou, Y.; Zhu, X. L.; Zhan, M. Z.; Yang, H. X.; Qian, J. F. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008044. [吴晨, 周颖, 朱晓龙, 詹恣之, 杨汉西, 钱江锋. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008044.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202008044
- (31) Kang, D. M.; Hart, N.; Xiao, M. Y.; Lemmon, J. P. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008013. [康丹苗, Noam Hart, 肖沐野, John P. Lemmon. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008013.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202008013
- (32) Yue, X. Y.; Ma, C.; Bao, J.; Yang, S. Y.; Chen, D.; Wu, X. J.; Zhou, Y. N. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2005012. [岳昕阳, 马萃, 包戡, 杨思宇, 陈东, 吴晓京, 周永宁. 物理化学学报, **2021**, 37, 2005012.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202005012
- (33) He, Y. T.; Ding, F.; Lin, L.; Wang, Z. H.; Lü, Z.; Zhang, Y. H. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2009001. [何一涛, 丁飞, 林立, 王志红, 吕喆, 张耀辉. 物理化学学报, **2021**, 37, 2009001.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202009001
- (34) Huang, F. Y.; Jie, Y. L.; Li, X. P.; Chen, Y. W.; Cao, R. G.; Zhang, G. Q.; Jiao, S. H. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008081. [黄凡洋, 揭育林, 李新鹏, 陈亚威, 曹瑞国, 章根强, 焦淑红. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008081.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008081
- (35) Liu, F. F.; Zhang, Z. W.; Ye, S. F.; Yao, Y.; Yu, Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2006021. [刘凡凡, 张志文, 叶淑芬, 姚雨, 余彦. 物理化学学报, **2021**, 37, 2006021.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202006021
- (36) Zhang, S. C.; Shen, Z. Y.; Lu, Y. Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008065. [张世超, 沈泽宇, 陆盈盈. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008065.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008065
- (37) Jiang, M.; Zhang, Z.; Tang, B.; Dong, T.; Xu, H.; Zhang, H.; Lu, X.; Cui, G. *J. Energy Chem.* **2020**. doi: 10.1016/j.jechem.2020.10.009
- (38) Duan, H.; Yin, Y. X.; Shi, Y.; Wang, P. F.; Zhang, X. D.; Yang, C. P.; Shi, J. L.; Wen, R.; Guo, Y. G.; Wan, L. J. *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, 140, 82. doi: 10.1021/jacs.7b10864
- (39) Duan, H.; Fan, M.; Chen, W. P.; Li, J. Y.; Wang, P. F.; Wang, W. P.; Shi, J. L.; Yin, Y. X.; Wan, L. J.; Guo, Y. G. *Adv. Mater.* **2019**, 31, 1807789. doi: 10.1002/adma.201807789
- (40) Zhao, C. Z.; Zhao, Q.; Liu, X.; Zheng, J.; Stalin, S.; Zhang, Q.; Archer, L. A. **2020**, 32, 1905629. doi: 10.1002/adma.201905629
- (41) Nomura, Y.; Yamamoto, K.; Hirayama, T.; Ouchi, S.; Igaki, E.; Saitoh, K. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, 58, 5292.
doi: 10.1002/anie.201814669
- (42) Cai, M. L.; Yao, L.; Jin, J.; Wen, Z. Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2009006. [蔡明俐, 姚柳, 靳俊, 温兆银. 物理化学学报, **2021**, 37, 2009006.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009006
- (43) Wang, S.; Sun, Q.; Peng, W.; Ma, Y.; Zhou, Y.; Song, D.; Zhang, H.; Shi, X.; Li, C.; Zhang, L. *J. Energy Chem.* **2020**.
doi: 10.1016/j.jechem.2020.09.033
- (44) Zhao, Q.; Stalin, S.; Zhao, C. Z.; Archer, L. A. *Nat. Rev. Mater.* **2020**, 5, 229. doi: 10.1038/s41578-019-0165-5
- (45) Zhu, G. L.; Zhao, C. Z.; Yuan, H.; Nan, H. X.; Zhao, B. C.; Hou, L. P.; He, C. X.; Liu, Q. B.; Huang, J. Q. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2005003. [朱高龙, 赵辰孜, 袁洪, 南皓雄, 赵铂琛, 侯立鹏, 何传新, 刘全兵, 黄佳琦. 物理化学学报, **2021**, 37, 2005003.]
doi: 10.3866/PKU.WHXB202005003
- (46) Li, L.; Deng, Y.; Chen, G. *J. Energy Chem.* **2020**, 50, 154.
doi: 10.1016/j.jechem.2020.03.017
- (47) Pan, H. Y.; Li, Q.; Yu, X. Q.; Li, H. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008091. [潘弘毅, 李泉, 禹习谦, 李泓. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008091.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008091
- (48) Zheng, G. R.; Xiang, Y. X.; Yang, Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008094. [郑国瑞, 向宇轩, 杨勇. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008094.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008094
- (49) Wang, R.; Cui, W.; Chu, F.; Wu, F. *J. Energy Chem.* **2020**, 48, 145.
doi: 10.1016/j.jechem.2019.12.024
- (50) Hua, G. B.; Fan, Y. C.; Zhang, Q. F. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37, 2008089. [华广斌, 樊晏辰, 张千帆. 物理化学学报, **2021**, 37, 2008089.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008089