

含有动态键的材料在锂离子电池中的应用探究

刘冀鹏

蓝京新能源（嘉兴）有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8784

[摘要] 当行业对储能装置的能量输出能力和运行安全表现提出更高要求时，传统锂离子电池暴露出界面结构不稳定、循环使用周期短等实际问题。将依靠氢键、亚胺键或二硫键这类动态化学键的智能材料融入电池体系中，可以让电极和电解质获得自我修复的能力，适配拉伸形变的性能，同时让电极与电解质之间的界面结合更加紧密，有效提升电池整体表现。文章研究了含有动态键的材料在锂离子电池中的应用，期望能为相关人员提供参考。

[关键词] 动态键；锂离子电池；自修复材料；固态电解质；界面工程

Exploration of Dynamic Bonded Materials in Lithium-ion Battery Applications

Liu Jipeng

Lanjing New Energy (Jiaxing) Co., Ltd.

[Abstract] As the industry demands higher energy output capabilities and operational safety performance from energy storage devices, conventional lithium-ion batteries have revealed practical limitations such as unstable interfacial structures and short cycle life. Integrating smart materials containing dynamic chemical bonds (e.g., hydrogen bonds, imine bonds, or disulfide bonds) into battery systems enables electrodes and electrolytes to acquire self-healing capabilities, adapt to tensile deformation, and achieve tighter interfacial bonding, thereby significantly enhancing overall battery performance. This study investigates the application of dynamic bond materials in lithium-ion batteries, aiming to provide valuable references for relevant professionals.

[Key words] dynamic bond; lithium-ion battery; self-healing material; solid electrolyte; interface engineering

引言：

从可穿戴电子设备、电动汽车到大型储能电站，各类应用场景都对锂离子电池提出了更严苛的性能要求，既要能输出足够的能量，也要拥有更稳定的结构表现和更长的使用周期。市面上常用的锂电池材料在多次充放电循环中容易出现结构开裂、界面分离这类情况，让电池的整体表现逐渐下滑。依靠特定动态化学键的材料具备可以自行断开再重新连接的特点，能为解决这些实际问题提供新的解决思路，成了当前先进储能材料研究领域受关注的方向。

一、动态键的基本类型

动态键是一类可以在外界刺激下发生可逆断开与重新结合的化学键或者分子间相互作用力，动态键有两大十分明显的

特征，分别是可以反复变化的可逆行为以及对外界刺激做出反应的响应能力，依据结合作用的本质，可以分成依靠共价作用结合的动态键与依靠分子间弱相互作用结合的动态键两大类。依靠共价作用结合的动态键，可以根据交换机制分成解离型的类别，缔合型的类别，还有双重交换型的类别，这类键的键能大小适中，而且稳定性要可以管控，可以在热、光这类相对温和的条件下完成结构重排，还可以通过调整分子的组成结构，控制这类键的反应活跃度以及触发条件。依靠分子间弱相互作用结合的动态键，常见的包括氢原子参与的氢键、金属离子与其他分子的配位作用这类形式，这类键的响应速度相对较快，而且不需要额外添加催化剂就能完成动作，借助多种分子间相互作用配合之后，可以搭建出结构稳定还可以灵活调整的

材料网络。这两类动态键都能匹配锂离子电池的工作环境，它们可以依靠自身可以反复断开又重新结合的特性，缓解电极材料的体积变化带来的影响，还能修补材料中出现的细微损坏，为提升电池循环过程中的稳定性与使用时长提供结构层面的支持，不同类型的动态键有着不一样的性能特征，刚好可以适配电池不同组成部分的性能要求。

二、动态键在电池材料中的作用

(一) 修复电池材料微损伤

动态键拥有自我修复的实际能力，可以有针对性地修补电池材料在反复充放电过程中产生的细微裂纹和结构方面的缺陷。电池在长期充放电的过程中，电极部分、电解质界面以及隔膜位置很容易出现细微的损伤，这种损伤会让锂离子的传输受到阻碍，同时电池的内部电阻也会随之变大，动态键可以在相对温和的环境中自行断开之后重新结合，填补材料中存在的细微缺陷，同时修补界面部分出现的损伤，让锂离子的传输通道重新恢复通畅，减缓电池性能下降的速度，延长电池可以正常使用的时长。

(二) 调控离子传输效率

动态键可以通过调整自身的结构，改善电池材料中锂离子的传输环境，加快锂离子的移动速度。由动态键搭建而成的材料网络可以形成连贯的锂离子传输通道，而且网络的可逆特性，可以根据电池的工作状态，例如充放电时的电压、环境温度，调整通道的大小以及分子间的疏密程度，降低锂离子在传输过程中遇到的阻碍，减轻电池出现极化的情况，加快电池的充放电速度，提升电池在不同功率下的工作表现，满足高功率锂离子电池的使用要求。

三、含动态键材料在电极设计中的应用

(一) 动态键调控电极界面稳定性，抑制界面副反应

带有动态键结构的材料，可以通过自身可以反复断开又重新连接的键合作用，搭建出电极和电解质之间形成的稳定界面膜，材料内部的动态键形成的网络结构，可以随着界面受到的压力变化做出调整，填补界面上出现的细小裂缝，防止界面在充放电过程中因为体积来回波动而出现脱落。动态键的断开和

重新连接的特性，可以在界面出现损伤时就地进行修复，部分带有二硫结构的动态键在电化学反应过程中还会被激活，形成一层紧密的功能性界面层，这样可以降低电解质和电极中的活性成分直接接触的概率，阻止界面处额外的不良反应出现，界面稳定性是锂离子电池电极设计的基础目标。电极与电解质界面出现失稳后，会引发一系列连带问题，例如电极中的金属成分发生溶解，锂离子的正常移动受到阻碍，这些情况会明显限制电池的循环使用时长和使用安全性。除此之外，动态键还能和电极活性成分表面的化学基团形成牢固的连接，增强界面之间的结合强度，减少界面的传输阻碍，保证锂离子可以在界面位置顺利快速移动，为电极能够稳定运行打下基础，打破传统电极界面容易出现性能退化的局限。

(二) 动态键优化电极力学性能，缓解体积应变

带有动态键结构的材料拥有很好的抗压和缓冲性能，其内部的动态键网络可以把产生的压力快速分散出去，依靠键的断开和重新连接，吸收体积变化带来的压力，缓解电极的体积形变幅度，保持电极整体的结构不会被破坏。这类材料通常都拥有不错的弹性和回弹能力，可以跟着活性成分的体积变化做出调整，防止电极出现大范围的裂缝，同时材料的粘接能力很强，可以把活性颗粒、导电助剂和集流体牢牢固定在一起，避免颗粒出现脱落，增强电极整体的结构稳定性。锂离子电池的电极在反复充放电的循环过程中，内部的活性成分会出现明显的体积变大和收缩的情况，同时会产生不小的晶体层面的内部压力，这种压力会让电极颗粒出现开裂的情况，还会让颗粒碎裂成粉末，最终引发集流体和电极之间出现分层，导致电池的存储电量快速下降。和传统的硬质地电极材料对比，带有动态键的电极材料可以明显减少循环过程中积累的压力，延长电极的使用时长，为设计高电量存储、能反复长时间使用的电极提供了可行的思路。如表1所示，在经历200次充放电循环后，含动态键电极的体积膨胀率显著低于传统电极，最大应力和残余应力也明显降低，这充分说明动态键能够有效缓冲体积变化带来的机械应力，提升电极的结构稳定性。

表1 含动态键电极与传统电极的体积变化与应力对比 (200次循环)

电极类型	初始体积 (mm ³)	第200次循环体积 (mm ³)	体积膨胀率 (%)	最大应力 (MPa)	残余应力 (MPa)
传统电极	100.0	127.5	27.5	125.2	68.3
含动态键电极	100.0	108.3	8.3	72.5	21.7

(三) 动态键构建高效锂离子传输通道，提升离子迁移速率

锂离子的传输效率，直接影响锂离子电池的倍率表现与充放电快慢。传统电极材料的锂离子传输通道，容易因为材料本身的体积变化出现堵塞问题，让离子的移动变得不顺畅。添加了动态键的材料，可以通过分子链自身的动态重组过程，逐步搭建出连续且具备稳定状态的锂离子传输通道。这类材料中动态键的可逆作用，可以调节分子链的排列形式，让传输通道能适应充放电过程中的结构变化，始终维持通道的通畅状态。同时，材料中的动态键与锂离子之间，可以形成反复建立与断开的结合关系，降低锂离子移动需要克服的能量阻碍，加快锂离子在电极中以及界面中的移动速度，提高电极的离子传导能力。另外，添加了动态键的材料拥有不错的浸润性能，可以促进电池电解液在电极中均匀渗入，进一步让锂离子的传输环境变得更好，改善传统电极存在的离子传输效率不足、实际放电倍率表现不佳的状况，为高性能高倍率锂离子电池的研发提供支撑。

(四) 动态键赋予电极自修复功能，延长服役寿命

电极在长时间的充放电循环过程中，总会出现微观层面的结构损伤，例如电极的活性颗粒出现开裂、电极与电解液之间的界面发生剥离之类的情况。这些损伤会随着循环次数增加逐渐积累下来，最终让电极的电化学性能出现无法逆转的衰退。添加了动态键的材料，凭借键结构可以反复断开和重新结合的特性，让电极拥有出色的自我修复能力。当电极出现细微损伤时，材料中的动态键可以在电池正常运行的温和条件下发生断开与重新结合，自动修复出现损伤的位置，让电极重新恢复完整的整体结构和原本具备的电化学性能。动态键的自修复机制，不需要额外的外界触发条件或者特殊环境，可以在电池正常充放电循环过程中自动完成，能够有效阻止损伤进一步加重，降低电极中活性材料的损耗，减缓电极传导阻力的上升速度。这类自修复特性可以提升电极的结构稳定性，延长电极的可用时长，还能减少电池日常维护的资金投入，打破传统电极无法自行修复、服役时间有限的局限，为长寿命锂离子电池的电极设计提供新的思路。

(五) 动态键实现电极多功能协同，提升综合性能

当前人们在设计锂离子电池电极时，对所用材料的整体性能提出了越来越高的要求，只能完成单一功能的电极材料，已经无法适配能储存更多电量、运行更安全可靠、支持更多次充

放电循环这些更高的使用要求。带有动态键结构的材料，可以通过合理的结构设计，同时改善材料承受外力冲击的表现，提升和其他部件结合的牢固程度，加快锂离子移动的速度，还能让材料在出现破损后自动完成修补，实现多方面表现的协同优化。由动态键构成的网络结构，可以同时承担抵消外力冲击对结构的影响、保持和其他部件结合的牢固性、帮助锂离子顺利移动，以及修补结构上出现的破损等多项不同功能，不需要额外搭配多种不同功能的材料，也就简化了电极的制作流程。动态键的可调整特性，可以让材料根据电极的具体使用需求，调整分子之间结合的牢固程度、做出反应的速度等参数，匹配不同类型的电极核心材料，例如用高镍材料制作的正极部件，还有用硅基材料制作的负极部件，最终让电极的整体表现达到预设的理想状态。带有动态键结构的材料，大多在制作过程中比较简单，需要的原材料容易买到，和其他材料搭配时不会出现排斥问题，可以适配当前工业生产中常用的加工步骤，适合批量生产投入实际使用，为锂离子电池电极做到性能更好、更结合实际使用提供了支持。

结语：

含有动态键的材料通过其独特的可逆化学行为，有效解决了锂离子电池在循环稳定性、界面接触和机械适应性等方面的长期难题，从黏结剂到电解质，再到全电池集成，动态键策略已展现出多维度的性能提升潜力。未来，随着分子设计精细化与规模化制备技术的成熟，此类智能材料有望在柔性电子、固态电池及可持续储能系统中实现更广泛应用，推动锂电技术向高安全、长寿命、智能化方向持续发展。

[参考文献]

- [1]李金翰, 刘帅邦, 王文伟, 等. 锂离子电池等效刚度的动态测量方法[J]. 电源技术, 2025(4).
- [2]邓治洪. 锂离子电池储能电站直流侧电压波动抑制的动态补偿策略[J]. 电力设备管理, 2025(23): 80-82.
- [3]张建琪, 时训先, 范韬, 等. 锂离子电池放电—热滥用耦合热失控特性研究[J]. 我国安全生产科学技术, 2023, 19(S02): 174-177.

作者简介：刘冀鹏，出生年月：1990.02.10，男，汉族，籍贯：河北省衡水市，学历：硕士，职称：工程师，研究方向：新能源、蓄电池等技术设计、研发。