

气候变化与电池： 寻找未来储能解决方案

概要

在净零世界中，低碳运输和稳定的电力供应需要更强大、更持久、更快充电的电池。可持续电池还需要使用丰富的材料和零碳制造工艺。可充电电池是存储可再生电力的最有效方式，尽管重量、体积和成本使某些应用变得不切实际。它们被用于储存能量，为电动汽车、无人机、轻型飞机以及越来越多的大型车辆提供动力，以及在短期内将电力储存在高度脱碳的微型和大型电网上，以确保电网稳定

性。目前，并不认为它们可提供非常大的能量存储，例如平衡季节性电网变化。锂离子电池（LIB）是目前这些应用中最可行的短期电池技术。锂离子电池相关研究的重点是提高能量密度、降低成本、延长寿命以及电池回收和再利用。从长期来看，研究人员正在探索使用其他材料和技术下一代电池，以实现更广泛的经济电气化。

思路

- 对锂离子电池的研究将降低成本、延长使用寿命、提高能量密度、提高电动汽车（EV）和电网应用电池的充电安全性和速度。
- 研究和管理可以使电池更加可持续，更容易回收且使用更久。
- 协调的国际努力应侧重于识别和测试新的地球资源丰富的材料，以降低成本、扩大电池的使用并最大限度地减少电池生产对环境的影响。
- 如果给予足够重视，将会开发出成本更低、能量密度更高的全新类型的电池。

1. 电池储能和气候变化

电池芯价格的成本已从 2010 年的每千瓦时 (kWh) 超过 1,000 美元降至 150 美元/千瓦时以下

1.1 背景

全球零碳能源的主要来源将越来越多地来自可再生能源发电。使用电池储能的能力将成为任何零碳能源系统的关键部分。电池将在脱碳运输方面发挥重要作用，并作为脱碳微电网的主要存储介质、服务于社区规模的自给自足电力系统以及稳定大型电网的方式。它们还将在工业中更广泛地用于为电机、加热器、压缩机和机械提供动力。

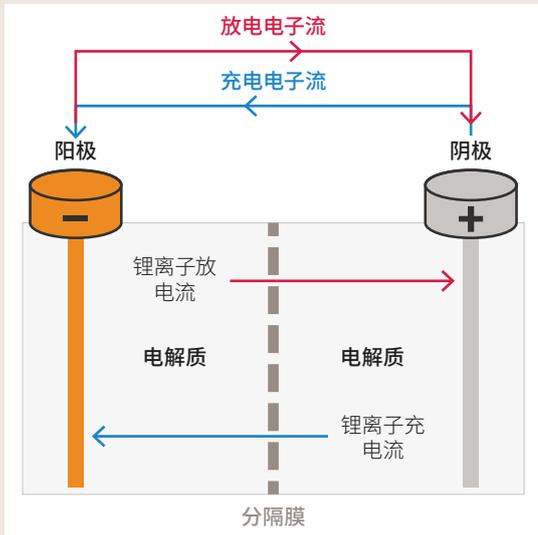
运输占燃料燃烧直接 CO₂ 排放量的 24%¹。由储存在电池中的电力驱动的电机是在多种形式的汽车和轻型车辆中取代化石燃料发动机的主要竞争者。甚至燃料电池驱动的车辆也将配备辅助电池。能量密度，即每单位重量或体积和寿命可容纳多少能量，是所有电池类型的重要参数。使用寿命是根据循环寿命、可以充电和放电的次数以及日历寿命来进行衡量的，它可以存储的时间以年为单位。

用于新应用的可充电电池市场目前由锂离子电池 (LIB) 主导。它们最初是为手机和笔记本电脑而开发的，现在更大规模地用于电动汽车 (EV)、卫星和其他设备。锂离子电池正在为越来越多的电动汽车提供动力，2019 年全球电动汽车车队（包括混合动力车和全电动汽车）超过 700 万辆，预计到 2030 年这一数字将增长到 1.5-2.5 亿²。电池芯价格（即不包括包装成本）的成本已从 2010 年的每千瓦时 (kWh) 超过 1,000 美元降至 150 美元/千瓦时以下³，在一些报告中甚至低至 100 美元/千瓦时⁴。低于 100 美元/千瓦时的成本被广泛预计为代表着电池与 ICE 竞争的起点，最近的报告表明，该成本目标已经在某些行业实现。

新型电动汽车的典型续航里程现在约为 200 英里⁵，但快速充电的能力和更大电池的成本仍然是未攻克挑战。实验室取得了重大进展：例如，研究人员报告称，一种电池预计可持续 10,000 次充放电循环，相当于约 200 万英里的行程⁶，但还需要确保较长的日历寿命，以及在更大的电池组中使用更便宜但能量密度高的商用电池芯。

在电网中，电池的规模和成本已达到高峰需求时间的短期（通常少于 90 分钟）额外电力所需的规模和成本⁷，以支持可再生能源发电。预计到 2030 年，定置型应用的电池总容量将从 11 千兆瓦时左右增加到 420 千兆瓦时⁸。自 2015 年以来，美国公用事业规模电池的成本下降了约 70%⁹。然而，放眼全球，成本的挑战，以及水电和压缩空气等替代品竞争所需的能量密度和大规模挑战，迄今仍使得电池无法长期存储（超过 24 小时）。在电动汽车中使用电池在微型和国家电网的电网存储方面发挥着重要作用，因为它们可用于向电网供电以及从中获取电力。这一发展提出了扩大电网以提供更多能源的挑战，但也提供了访问额外的电网存储和电网平衡资源的机会。

锂离子电池的工作原理



锂离子电池的主要组成部分是两个电极 — 阳极和阴极，电解质 — 一种液体、凝胶或固体物质，以及一个浸泡在电解质中的多孔聚合物隔膜。电解质通常由溶解在有机溶剂中的锂盐形成。电解液中添加各种添加剂以提高安全性和性能。

在使用或放电时，（负）阳极会释放流经外部设备（如电机）的电子，然后返回电池的（正）阴极。为了平衡这种电子流，带正电的离子或阳离子在电池内从阳极通过电解质和隔膜流向阴极，在那里它们与电子重新结合。充电时反向流动，离子返回阳极。

在阴极获得电子被称为还原，在阳极失去电子被称为氧化，整个反应被称为“氧化还原”过程。

值得注意的是，锂离子电池中没有金属锂。锂离子 (Li^+) 能够在大范围电压内快速可逆地插入或嵌入到固体电极中，从而能够构建高压电池芯。阴极通常由锂过渡金属氧化物制成，例如锂镍锰钴氧化物 (NMC) 和磷酸铁锂 (LFP)。阳极通常由石墨制成，因其具有竞争力的成本和可逆储存许多锂离子而不降解的能力而被使用。铝和铜集电器通常分别用于阴极和阳极，以提取或插入电子。它们与电池外部的电子设备相连。

例如，电池在一个循环中提供的能量（其能量密度 - 即容量 \times 电池电压）决定了电动汽车的续航里程或电池对电网平衡的贡献。重量能量密度以瓦时每公斤 (Wh/kg) 表示。电动汽车电池的典型能量密度已从 1990 年的不到 100 瓦时/公斤增加到了现在的 250 瓦时/公斤以上^{10,11}。

最终的净零目标是让电池由回收组件制成，并在零碳制造过程中组装。

1.2 电池实施的高层次挑战

实施电池以实现脱碳能源使用存在几个高层次的挑战。

- **成本：**费用是一个压倒一切的挑战，虽然电动汽车电池的成本已经有所下降，但对于许多消费者来说，具有合理续航里程的电动汽车仍然过于昂贵。在电网存储方面，虽然公用事业规模电池的成本已经降低，但在全球范围内，它们仍然太高，无法与燃气涡轮发动机或使用氢或氨的化学电力存储等选项竞争。但是，它们确实在电压和频率调节等短期电网支持中发挥着至关重要的作用。此外，锂离子电池成本的降低幅度如此之大，以至于目前通常没有经济动力来推动更新电池技术（如氧化还原液流或钠离子电池）的发展。虽然它们目前更贵，部分原因是它们并未投入大规模生产，但随着时间的推移，它们有可能变得更加便宜和更加可持续。
- **能量密度：**虽然锂离子电池的能量密度自发明以来已经增加了一倍多，但仍不足以将其用于重型车辆和飞机¹²。在电网规模的电池中，重量能量密度不太重要，但电池使用的障碍包括成本、与压缩氢或氨相比体积能量密度较低，以及与电网大规模存储电力所需的大尺寸电池相关的资源影响却很重要。但是，它们将继续用于重要的辅助服务和微电网的主要存储。
- **使用寿命：**研究重点是改善循环寿命和日历寿命。两者都是由组件的逐渐降解而决定的，尤其是阳极、阴极和电解质。

- **可扩展性：**锂离子电池由组装成更大电池组的小电池芯组成。在电池芯内部，负责传递能量的离子大小只有 0.2 纳米左右，它们可进出微米级（头发厚度的七十分之一）的粒子。如果要让这些微小尺寸的离子具有实际用途，就需要通过日益高效和自动化的制造过程，逐步扩大在更大的电池芯和电池组中运行，以公顷为单位测量尺度和足迹。
- **可持续性：**可持续性挑战包括有限的原材料、矿工的工作条件、制造的碳足迹以及再利用和可回收性的限制（参见图）。最终的净零目标是让电池由回收组件制成，并在零碳制造过程中组装。
- **快速充电：**更高的充电速度使驾驶员能够克服“里程焦虑”，从而促进电动汽车的普及。虽然现在许多新电动汽车一次充电可以行驶约 200 英里，但目前最快的技术只能在 20-40 分钟内将汽车充电至 80%¹³。如要在不缩短使用寿命的情况下实现更安全、快速的充电，则需要更好的电极设计和潜在的新材料。还需要对充电基础设施进行大量投资。
- **技术移转：**创新从发现到部署往往需要七到十年（或更长时间），例如锂离子电池在 1991 年商业化之前的孵化期约为 20 年。我们需要立即采取行动，才可满足 2050 年的目标。

2. 进展空间与部署机会

研究更强大、更持久的电池有两个主要领域，每个领域都有自己的重点：

- **短期** — 优化锂离子电池技术。
- **长期** — 开发具有在各种关键应用中部署电池潜力的下一代电池。

2.1 锂离子电池优化

2.1.1 进展阻碍

很少有成本足够低、表现出适合高电压电池电位的氧化还原活性而且在多次循环中提取和重新插入锂时具有足够稳定性的锂化合物可用于电极¹⁴。最昂贵的组件是阴极，因为钴和镍等氧化还原活性金属的成本较高，而锂的成本较低，所有这些都需要开采、加工并制成电池电极¹⁵。提高电池组件的稳定性至关重要：组装电池时，组件通常是稳定的，处于最低能量状态。然而，当电池充电时，许多电极材料进入“亚稳态”，具有比它们最稳定（或“平衡”）状态更高的能量。

如今的锂离子电池可以在正常运行期间保持这些亚稳态，同时将降解和副反应降至最低。然而，热量会引发结构向热力学更稳定材料的变化，导致电池逐渐失效。如果阴极材料的结构改变速度太快，就会产生火灾风险，从而释放热量并产生氧气，这一过程在电池短路的情况下尤为严重。阴极侧的降解通常是由降低容量和增加电阻的结构变化而引起，一部分原因是形成阴极电解质界面或 CEI，还有一部分原因是表面和近表面层的结构重排。在阳极侧，电池形成保护层或钝化层，称为固体电解质膜 (SEI)，具有双重效应。它是锂离子电池性能的基础，因为它可以防止电解质降解，保护电解质免受阳极苛刻的还原条件的影响。然而，随着时间的推移，固体电解质膜的生长会消耗并减少可以插入和迁移至阳极和阴极材料中的活性锂，并增加电池电阻。

锂离子电池的能量密度有提高到 350 瓦时/公斤的空间，350 瓦时/公斤被认为是目前锂离子电池的极限。然而，净零经济体将随时需要超过这些限制的电池。尽管有潜在的新正极材料可用，但挑战在于找到不会快速降解或具有潜在安全隐患的材料。进展的最后一个障碍是快速充电，这会导致电池过热，从而引发多个降解过程。它还可能导致短路，进而导致火灾或爆炸。

长期议程涉及“超越锂”以制造具有更高能量密度的电池，这些电池本质上更具可扩展性和可持续性。

2.1.2 进展潜力

电池化学是一个在研究、开发和部署方面正在取得进展的领域。锂离子电池有多种机会可取得渐进式进步，这里提供了一些示例：

- **阳极技术：**使用硅、硅合金或复合材料代替石墨，理论上可以将能量密度提高约40%¹⁶。然而，由于锂被困在阳极的电解质降解产物中，硅阳极的电池容量衰减更快。仅向石墨中添加有限数量的硅或氧化硅(SiOx)可用于提供适度的容量增益¹⁷。锂金属是阳极化学反应的最终产物，目前正在进行大量研究以制定策略防止形成锂金属枝晶，针状结构会导致功率损耗或短路，这是一个严重的安全挑战。
- **阴极技术：**镍锰钴氧化物阴极的运行接近其理论能量密度极限。对于一些电动汽车，正在使用磷酸铁锂，因为其原材料丰富且成本相对较低，并降低了电池组的整体尺寸和重量¹⁸。正在探索和优化的其他结构类型包括无序岩石盐¹⁹，以及如果稳定性问题得以解决，可能提供高达50%（在阴极）能量密度增益的化合物。优化电极颗粒的形态或微观结构为帮助提供性能提供了另一种途径，例如通过帮助防止颗粒开裂。

- **液体电解质技术：**电解质为进展提供了进一步的选择，目前正在对一系列溶剂、盐和添加剂的化学成分进行检查，以了解它们的传输特性和稳定性。这种改进可以提高电池的工作电压和能量密度，延长其使用寿命并提高安全性。这可提供创建“设计师”固体电解质膜的机会，即那些使用定制涂层创建的，而不是依赖于很大程度上不受控制的电解质降解反应的固体电解质膜。

2.2 新一代电池

虽然很多研究都集中在未来十年的锂离子电池改进上，但长期议程涉及“超越锂”以制造具有更高能量密度的电池，这些电池本质上更具可扩展性和可持续性。

- **钠离子电池（SIB，有时也称为 NIB）：**钠具有与锂相似的电荷携带特性，同时是地球上第六大元素，且作为一种资源相对便宜。钠离子电池阴极可由钠与相对丰富且廉价的铁和锰氧化物结合的化合物制成。钠离子电池通常比锂离子电池具有更低的能量密度，但如果它们的成本可以降低，这不会妨碍它们在电网上的广泛部署。它们还可以适用于成本比里程重要的电动汽车应用，例如电动自行车²⁰。中国已经在研究中心部署了世界上第一个使用100千瓦/时钠离子电池系统的储能设施²¹。
- **多价阳离子电池：**使用天然丰度更高的廉价金属的举动引发了一系列关于（按难度升序）镁、钙、锌和铝电池的研究活动。这些统称为多价电池。原则上，使用这种离子的电池可以提供更大的能量密度。这个领域还处于起步阶段，虽然挑战巨大，但对更加可持续的电池的需求意味着有许多研究需要进行。

- **氧化还原液流电池 (RFB):** 液流电池使用两种化学成分（例如不同氧化态的钒离子），它们溶解在不同罐的液体中。如要储存电力，通过一个电化电池泵入液体，其中包含由膜隔开的正极和负极，以最大限度地减少溶液在进入两个新罐前的“交叉”。如要放电，通过电池泵回液体，恢复到原始状态（在电极中产生电流）并返回到原始罐。氧化还原液流电池的前景在于存储（罐中）和发电（电化电池中）之间的解耦，这意味着它们可以通过简单地使用更大的罐来增加容量（兆瓦小时）或更大的电化电池来增加功率输出（兆瓦）以得到扩展。钒氧化还原液流电池具有非常长的循环寿命且使用安全的水性电解质。首个大型（200兆瓦/800兆瓦时）钒流电池正在中国大连建设中²²。然而，钒氧化还原液流电池的能量密度比锂离子电池低，并且在大规模使用时有毒并且存在潜在的资源问题²³。含有更加可持续且更加便宜的有机化学物质（如醌）的电池具有相当大的前景，但组件的长期稳定性问题仍然是一个活跃的研究领域。
- **固态电池:** 使用固体电解质的电池也被视为一条令人兴奋的前进路线。它们具有提高安全性和能量密度的潜力，特别是如果在阳极使用锂金属而不是石墨。所有固态电池主要由陶瓷组件制成。它们必须能够随着阳极在充电和放电时生长和收缩，传导锂离子，同时保持电极和电解质之间的良好接触。如果不对电池施加高压，这将是一个重大挑战。软硫化物基电解质显示出极高的锂离子电导率 — 这对高倍率电池而言很关键 — 但更易反应（阴极和阳极材料都带有水分和空气）。聚合物已被用作电解质，因为它们易于加工并有助于提高安全性，但它们的离子电导率低于液体电解质，这激发了更多的研究。

- **长期选择：**可持续性的考量促使人们对锂硫电池和金属-空气电池进行了大量研究，这些电池具有极高的能量密度和潜在的低成本。锂空气电池 (LAB) — 在锂和氧之间发生反应 — 代表了能量密度的极限。然而，该技术面临着重大挑战，包括严重的电解质降解问题，以及需要通过空气处理来控制二氧化碳和水分含量，这增加了复杂性和成本。不过，最近的进展得出锂空气电池的预测值为 600 瓦时/公斤，包括空气处理。这些数字可能对航空电气化至关重要。可充电锌空气电

池开始显示出可观的前景，例如，在可逆电镀锌金属的能力方面取得了一定的进展。金属硫电池的理论能量密度介于锂空气电池和锂离子电池之间，也更接近商业化 — 但与锂空气电池一样，锂金属负极需要得到保护，并且需要防止副（穿梭）反应。最终，科学家们可能需要开发未知的“未来电池”，它们可能看起来像电池和燃料电池的组合，其中一系列更加便宜、更加可持续的化学物质被可逆地用作“能量载体”或燃料，通过一系列氧化和还原反应产生电力。

专栏 2

可持续性

再利用和回收利用的循环经济原则开始应用于锂离子电池。如今的电池引发了从有限材料的开采到可回收性等一系列关于可持续性的问题。在材料方面，对于镍和钴的未来供应存在一些问题，以及对钴矿工人²⁴的健康、工作条件和人权以及镍提取的污染风险的担忧。如今，锂资源丰富，但如果电池市场按预期增长并且电池没有回收利用，那么已知的供应可能无法满足需求，甚至在几十年内就会耗尽²⁵。而开采点也存在环境问题。电池生命周期的碳足迹几乎完全来自其制造过程，其中大约一半来自生产过程中的电力²⁶。虽然仅针对电池的研究很少见，但该领域的研究表明，当今的电池还不能代表零碳选择。一项研究表明，在典型的欧洲环境中，制造车辆锂离子电池会在其使用寿命中产生每公里 27 克 (g/km) 的 CO₂ 足迹，（如果电池是在亚洲制造，

则增加到 50 克/公里²⁷），是电动汽车总排放量 109 克/公里的一部分，而普通汽油车则为 258 克/公里。需要强调的是，随着新技术的出现，它们必须伴随着完整的生命周期分析，并考虑到任何潜在的新关键资源问题。就其他制造因素而言，尽管越来越多地使用具有更环保的粘合剂的水性工艺作为阳极，但许多电极仍是由易燃和有毒的浆液制成的²⁸。

回收具有一定的挑战性，因为打开电池通常并不安全，这一过程可能会释放有毒气体并且存在火灾危险，并且不同的组件难以分离。英国法拉第研究所 (Faraday Institution) 和世界各地的许多其他机构正在研究安全拆卸电池的方法，包括使用机器人技术和回收可重复使用的材料²⁹。然而，对未来的电池而言，回收至关重要。

3. 未来电池开发的关键领域

有许多关键领域需要进一步开发，以优化现有锂离子电池系统并开发未来电池所需的解决方案。

- **特征：**需要开发更多工具来探测在现实条件下运行的电池中的电池健康状况。还需要更好的工具来描述电池内材料相互作用的特点。
- **计算和建模：**了解电池性能和降解需要建模以连接原子、电池组件和电池组级别的计算。AI 或深度学习有可能加快研究速度，允许对更大的系统进行建模并处理出现的大型数据集，但本质上也需要对不同过程本身进行仔细建模。
- **亚稳态材料的控制：**亚稳态是电池运行的基础，而其中的一项挑战就是找到可以承受更高的温度或具有内在的自我修复能力的材料。
- **多学科合作：**具有持续和长期资助的多学科方法对于电池研究至关重要。学术界和工业界之间的合作在诸如 Batteries Europe³⁰、中国天目湖先进储能技术研究院 (Tianmu Lake Institute of Advanced Energy Storage Technologies)³¹、德国 Batterie 2020³²、美国储能研究联合中心 (Joint Center for Energy Storage Research)³³ 和英国法拉第研究所 (Faraday Institution)³⁴ 等倡议中效果很明显，但为全球利益而加强这种国际合作仍有一定的空间。

3.1 在部署方面，到 2030 年和 2050 年可以实现哪些内容？

到 2030 年，锂离子电池技术将受益于一系列渐进式改进，这些改进降低了成本、延长了使用寿命、提高了能量密度还提高了充电速度，同时朝着超越当前技术的长期目标取得了一定的进展。虽然每次改进可能都能微小，例如，用硅替换整个石墨阳极（仍然极具挑战性），但结合在一起可能使容量增加高达 40%。多方面的性能提升将带来更实质性的进步并有助于提高采用率。

到 2050 年，可能会通过使用钠离子或超越传统可充电形式的新技术，如氧化还原液流电池 (RFB) 或尚不为人知的“未来电池”，在扩大用于电网存储的更大电池方面取得突破。HGV 和航空的电气化需求将超越锂离子电池的电池技术。同时，2050 年的净零世界还应采用由可持续材料制成且完全可回收的电池，如果发现新的化学物质，并进行优化，且降解问题得到解决，可能会使用铁和锰来代替钴和镍。

锂离子电池技术应受益于一系列渐进式改进，这些改进降低了成本、延长了使用寿命、提高了能量密度还提高了充电速度。

总结

在数字世界中，电池将继续成为电网、运输和电力脱碳的关键。锂离子电池的进一步开发在短期内至关重要，它可以完成许多需要电池的任务。然而，对更高能量密度的需求、原材料成本和可用性问题以及安全考虑等固有挑战将继续推动新电池化学物质的开发，以补充现有

的锂离子电池并实现不同细分市场的增长。这些只有通过有针对性的国际合作和协调才能在所需的时间范围内取得成果。这种合作和开发提供了通过增加电气化来加快脱碳速度的可能性。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在2050年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的12个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

要查看简报编著人，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：creativecommons.org/licenses/by/4.0

发布日期：2021年6月 DES7639_6 © The Royal Society

参考文献

1. The IEA. 2020. *Tracking transport 2020*. 参见: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020> (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
2. The IEA. 2020. *Global EV Outlook 2020*. 参见: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
3. Bloomberg NEF. 2019 *Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019*. 参见: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/> (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
4. Bloomberg NEF. 2020 *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh*. 参见: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/> (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
5. Tom Lusher. 2019 *Average electric vehicle range exceeds 200 miles*. Cornwall Insight.
6. Chris Randal. 2020 *Tesla researchers present battery with 2 million mile lifecycle*. Electrive.com. 2020 年 10 月 19 日 参见: <https://www.electrive.com/2020/10/19/tesla-researchers-present-battery-with-2-million-mile-lifecycle/> (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
7. National Grid ESO. *Electricity Explained: Battery storage*. 参见: <https://www.nationalgrideso.com/news/what-battery-storage-and-how-do-batteries-help-us-balance-grid> (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
8. IRENA. 2019. *Utility-scale batteries innovation landscape brief*. 参见: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
9. The US Energy Information Administration. 2020 *Utility-scale battery storage costs decreased nearly 70% between 2015 and 2018*. 参见: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=45596&src=email> (访问日期 2021 年 4 月 22 日)。
10. Crabtree G, Kocs E & Trahey L. (2015). *The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond*. MRS Bulletin. 40.1067-1078. (doi:10.1557/mrs.2015.259).
11. Faraday Institute. 2020. *High-energy battery technologies*. 参见: <https://faraday.ac.uk/wp-content/uploads/2020/01/High-Energy-battery-technologies-FINAL.pdf> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
12. Crabtree G, Kocs E & Trahey L. (2015). *The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond*. MRS Bulletin. 40.1067-1078. (doi:10.1557/mrs.2015.259).
13. ZAP Map (*Connectors and speeds*). 参见: <https://www.zap-map.com/charge-points/connectors-speeds/> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
14. Crabtree G, Kocs E & Trahey L. (2015). *The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond*. MRS Bulletin. 40.1067-1078. (doi:10.1557/mrs.2015.259).
15. Bloomberg Green. 2020. *Why building an electric car is so expensive, for now*. 参见: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-10-22/why-building-an-electric-car-is-so-expensive-for-now-quicktake> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
16. Obrovac, M. N.; Chevri er, V. L. *Alloy Negative Electrodes for Li-Ion Batteries*. Chem. Rev. 2014, **114** 11444–11502. (<https://doi.org/10.1021/cr500207g>).
17. Berhaut C et al. 2020. *Prelithiation of silicon/graphite composite anodes: Benefits and mechanisms for long-lasting Li-Ion batteries*. Energy Storage Materials **29** 190-197. (<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.04.008>).
18. Clean Technical. *Tesla's Efficiency Advantage: Cheap & Abundant LFP Batteries Will Power Mass-Market EVs*. 参见: <https://cleantechnica.com/2020/07/23/teslas-efficiency-advantage-cheap-abundant-lfp-batteries-will-power-mass-market-evs/> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
19. R.J. Clement et al. *Cation-disordered rocksalt transition metal oxides and oxyfluorides for high energy lithium-ion cathodes*. Energy Environ. Sci. 2020, **13**, 345-373 (DOI: 10.1039/C9EE02803J)
20. For example, the Xubaka from Sodium Cycles. 参见: <https://www.xubaka.com/en/the-bike/> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
21. Chinese Academy of Sciences 2019. *China First Demonstrates the 100 kWh Na-Ion Battery System for Energy Storage*. 参见: http://english.cas.cn/newsroom/research_news/201904/t20190401_207399.shtml (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
22. S&P Global. 2018 Green Globe: *China starts building world's largest vanadium flow battery*. 参见: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/trending/1sgv2yl4jn3r-r18pibt0g2> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
23. Forbes. 2020. *Why Vanadium Flow Batteries May Be The Future Of Utility-Scale Energy Storage*. 参见 <https://www.forbes.com/sites/rpapier/2020/10/24/why-vanadium-flow-batteries-may-be-the-future-of-utility-scale-energy-storage/?sh=498c07d52305> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
24. Banza Lubaba Nkulu C et al. 2018. *Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo*. Nat Sustain. **1** 495-504.(doi:10.1038/s41893-018-0139-4).
25. Parakram Pyakurel. 2019. *Lithium is finite – but clean technology relies on such non-renewable resources*. The Conversation. 参见: <https://theconversation.com/lithium-is-finite-but-clean-technology-relies-on-such-non-renewable-resources-109630> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
26. Carbon Brief. 2020. *Factcheck: How electric vehicles help to tackle climate change*. 参见: <https://www.carbonbrief.org/factcheck-how-electric-vehicles-help-to-tackle-climate-change> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
27. Carbon Brief. 2020. *Factcheck: How electric vehicles help to tackle climate change*. 参见: <https://www.carbonbrief.org/factcheck-how-electric-vehicles-help-to-tackle-climate-change> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
28. Li J, Lu Y, Yang T, Ge D, Wood DL 3rd, Li Z. *Water-Based Electrode Manufacturing and Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Electrodes – A Green and Sustainable Manufacturing System*. iScience. 2020. **23**. (doi:10.1016/j.isci.2020.101081)
29. Faraday Institute. *Relib: recycling and reuse of ev lithium-ion batteries*. 参见: <https://faraday.ac.uk/research/lithium-ion/recycle-reuse/> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
30. European Commission, *Batteries Europe is the technology and innovation platform of the European Battery Alliance*. 参见: https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/batteries-europe_en (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
31. Tianmu Lake Institute of Advanced Energy Storage Technologies Co. 参见 <http://en.aesit.com.cn/#page2> (访问日期 2021 年 4 月 23 日)。
32. *German Federal Ministry of Education and Research. Batterie 2020*. 参见: <https://batterie-2020.de/foerderinitiative/foerderungen-der-batterieforschung-durch-das-bmbf/> (访问日期 2021 年 4 月 29 日)。
33. Joint Center for Energy Storage Research. 参见 <https://www.jcesr.org/> (访问日期 2021 年 4 月 29 日)。
34. The Faraday Institution. 参见 <https://faraday.ac.uk/> (访问日期 2021 年 4 月 29 日)。