



储能技术的未来

打造有望全球普及的理想电池

作者：首席执行官 Gene Berdichevsky 和
首席技术官 Gleb Yushin
Sila Nanotechnologies Inc.

2020 年 9 月 2 日

执行摘要

- 在接下来 5 到 10 年，我们将看到一款 50 美元每千瓦时 (kWh) 的锂离子 (Li-ion) 电池，它能够快速充电、充放电循环 10,000 多次、提供 100 万英里以上的行驶里程、使用寿命达 30 年，而且使用世界各地都可找到和回收的丰富原材料生产
 - 虽然目前有些电池声称具备这些属性，但挑战在于将上述各种要求整合到单一电池中，而不是在电池固有的某些的权衡中作出妥协（例如，如果一款能行驶 100 万英里的电池其成本高达 200 美元/kWh，那就不太好）。实现这种融合需要全球 5 到 10 年的创新
- 最具创新理念的储能技术时代刚刚开始，并将持续约 10 年时间
- 从 2030 年到本世纪中叶，这些新技术将以世界罕见的速度和规模普及——我们需要大规模普及这些技术来取代化石燃料
- 对电动汽车 (EV) 的需求将推动这一转型，而自动驾驶汽车和间歇性可再生能源存储将进一步加速这种转型。这需要全球电池产能从 20 GWh 每年增长到 2030 年的 2,000 GWh 每年。再到 2050 年的 30,000 GWh 每年（增长超过 1,000 倍！）来提供电动汽车的全球性普及和基于可再生能源的全球能源和交通系统
- 并非只有锂离子电池就足够了，但它将是重中之重。非锂离子化学技术可能会找到小众应用，但其规模相对于锂离子技术仍然很小
 - 固态电池很可能与这场革命无缘，充其量只是一个小众参与者
- 储能转型的动力不是政策，而是更好的技术、产品和经济。不过，强有力的国家技术和制造政策有助于加速这一变革，并创造长期的结构性经济效益
- 未来的储能创新将主要有两种形式——新材料技术和电池制造工艺创新
 - 先进锂离子技术的第一个关键点是硅负极。其解决方案需使用：
 - 一种可以完全替代石墨的技术，即使最初使用于掺混
 - 先进的工程颗粒设计，以克服关键的体积膨胀挑战
 - 以工业规模实现这种设计的新型批量制造技术
 - 只使用全球大宗商品为原料，从而能以低成本将产能扩大到数百万吨
 - 硅负极能影响其他新材料的创新：
 - 丰富的铁以及可能的铜将取代正极中稀缺的镍和钴
 - 陶瓷隔膜将取代目前的聚合物隔膜
 - 先进的电解液将延长电池循环寿命并提高可靠性
 - 除了新材料和化学技术，全新的制造工艺有助于：
 - 淘汰不环保的有机溶剂
 - 用工程设计的电极替换目前随机的铸膜电极
 - 彻底转变电池的组装、化成、老化过程和电池包集成
- 新的锂离子技术不仅会对汽车市场产生重大影响，对消费电子市场的影响也很大。消费市场由于规模较小、产品要求不高以及客户对当前电池性能的强烈不满，可能更迅速地采用新技术。同时契合这两个市场的技术最有可能获得成功，因为消费电子市场更重视这些改进，并为进入汽车市场开辟了道路。

- 当今占主导地位的汽车电池制造商（宁德时代、LG、松下、三星和 SK）可能被新入者撼动，但如果他们迅速采用与现有锂离子制造工艺兼容的技术，就能掌握自己的命运。一些新的电池制造商将加入他们的行列，如果现有企业在新技术的采用上表现迟缓，新制造商将成为该领域的领导者
- 到 2030 年，随着电池产能提高到 2,000 GWh，将有约 1 亿辆电动汽车上路行驶
- 在这个 10 年的中期，更快地采用电动汽车将对现在没有全力以赴进行电气化改造的汽车制造商造成巨大冲击。许多企业可能不会很快采取行动，而在以后才试图加入电动汽车革命的部分企业将面临重大的破产风险
- 到本世纪中叶，储能领域的这些突破将为更广泛地采用可再生能源发电和世界经济脱碳、改造交通运输部门以及让各国自由使用国内风能和太阳能资源来满足其能源需求铺平道路

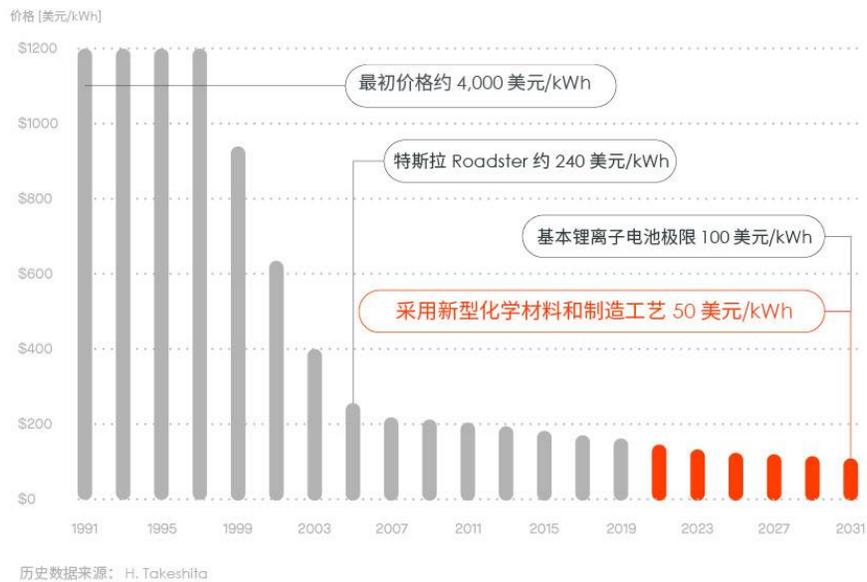


图 1. 锂离子电池的价格在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初急剧下降，特别是 18650 圆柱形电池，该电池生产了数十亿件并且几乎所有笔记本电脑中都使用该款电池。特斯拉使用这种商用笔记本电脑电池制造了第一辆现代电动汽车。

引言 - 展望未来

在过去的 30 年，我们的世界因一种设备的发明而发生了翻天覆地的变化，如今地球上几乎每个人都随身携带这种设备。这种设备年产量数十亿件，到本世纪中叶，年产量很可能达到数万亿件。当然，这种设备就是不起眼的锂离子电池。

正如我们所想的那样，当前的技术时代是由手机定义的，而手机又是由半导体、无线电和互联网实现的——如果没有 Goodenough、Whittingham 和 Yoshino 的发明，这个手机主导的世界就不会到来。2019 年，他们因在 20 世纪 70 年代末和 80 年代初发明了基本锂离子电池荣获诺贝尔化学奖。¹

自 1991 年商用以来，锂离子电池技术的储能能力不断提高，与之前的电池技术相比已经提升了 4 倍。可以想象，如果没有这些改进，您的手机电量可能只能坚持到中午就需要充电，或者手机会变得像笔记本电脑那么大。同样，可以想象您的笔记本电脑键盘下方几乎全是电池，重量非常重，以至于您会将这种电脑放在桌子上永远不会移动。没有锂离子电池，我们根本不会拥有现在的移动和互联世界。

未来，锂离子电池不仅可以让数十亿人连上互联网，还可以应用到现实世界，应用到陆上，在某些情况下应用到海上和空中。现代电动汽车已经向我们展示了可能性，但价格再降低一半（图 1）、存储的能量提高 2 倍（图 2）、充电速度提高 3 倍、寿命延长 10 倍都是可能的，而且会加速从化石燃料向可再生能源的转变。在本文中，我们将讨论预计在这 10 年中该行业将出现的关键创新，以及它们对我们世界的影响。

高级锂离子技术的未来



图 2. 能量密度的增加使电池能够存储更多电荷，同时大规模制造降低了电池成本。这一组合推动企业降低了每 kWh 的价格。然而，今天使用的化学技术已经达到极限，我们需要一条全新的技术曲线。

我们是如何发展到今天的（历史）

自大约 200 年前 Alessandro Volta 推出第一块电池以来，学术界已经发现并测试了数百种可充电电池化学技术，并且已对数十种进行了某种形式的商业开发（许多种从未完全投入生产）。然而，只有 4 种可充电化学技术具有重要的商业意义。这 4 种化学技术中的每一种——铅酸、镍镉、镍金属氢化物和传统的锂离子（嵌入型）——都需要科学突破和大量的商业化努力。未来，第五种化学技术（高级锂离子）还需要人们实现更多的突破和努力。

¹ 除了 John Goodenough、Stan Whittingham 和 Akira Yoshino，还有很多杰出的科学家和工程师为这项技术的实用化和商业化提供了必要的洞见，包括 Michel Armand、Doron Aurbach、Samar Basu、Peter Bruce、Yet-Ming Chiang、Jeff Dahn、Kristina Edström、Robert Huggins、Ned Godshall、Arumugam Manthiram、Koichi Mizushima、Linda Nazar、John Newman、Yoshio Nishi、Emanuel Peled、Jean-Marie Tarascon、Michael Thackeray、Richard Yazami 等等，在此无法一一列出。

电池总是需要人们进行权衡取舍。很多时候，在一种性能方面显示出颇具前景的新技术会在另一种性能方面引发问题——这使得大多数创新只能留在大学实验室。最重要的创新应该可以同时改善多个性能参数，同时不会破坏在其他领域已经很出色的性能。

锂离子技术进入市场后，其更高的性能使其成为优于镍金属氢化物不二之选。起初，高昂的成本不适合大多数应用，但随着电池制造规模的扩大，从 90 年代末开始，锂离子电池经历了一段精彩的性能提高和成本降低期。在 21 世纪 00 年代中期，随着最常生产的 18650 型号不再受欢迎，每种新设备使用更昂贵的定制软包电池成为常态，以及钴和镍的价格暂时上涨，让锂离子电池成本的下降逐渐趋缓。但随着 2010 年电动汽车出货量的攀升推动电池累计历史产量超过 100,000 MWh，成本再次下降。受斯旺森定律^{2,3}（该定律跟踪并预测了太阳能成本的大幅下降）的启发，我们汇编了大量来源的数据并结合我们自己的行业经验对历史进行了回顾，同时对锂离子技术的成本将随规模扩大所发生的变化进行了预测。尽管产能增长速度越来越快，但最近成本曲线趋于平缓，这表明要继续降低电池成本并加速人们对电动汽车的采用，需要的不仅仅是基本锂离子化学技术产量的增加。我们需要创新才能实现到 2030 年让 1 亿辆电动汽车上路的目标（图 3）。



图 3. 尽管达到了以前无法估量的数量规模，但传统锂离子电池的制造学习曲线正在趋于平缓。

² https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s_law

³ Swanson, R.M. (2006 年)，晶体硅光伏的发展前景。Prog. Photovolt: Res. Appl., 14: 443-453。doi: 10.1002/pip.709

当今锂离子电池的局限性和权衡取舍

当今传统锂离子电池（图 4）的生产成本约为 100 美元/kWh，能量密度超过 720 Wh/L，寿命达 10 年，在性能显著下降前可进行最多 5,000 次完整充放电循环，充电时间最短为 10 分钟。但有一个问题：目前的电池无法同时实现所有这些参数。

锂离子电池最重要的参数之间存在着对立关系：所生产的任何锂离子电池都必须牺牲某些方面的性能才能实现其他性能。正因如此，在这个领域进行的许多比较都有误导性或是错误的——它们本质上是将锂离子的不同方面相互比较。

在所有参数中，每 kWh 单价是重中之重，尤其是对于电动汽车应用，而循环寿命和功率等其他参数只需满足一个适度的阈值。这是因为每 kWh 单价决定了电池系统的成本，而电池系统是电动汽车中最大、最昂贵和最重要的组件。电池包进而决定了汽车最重要的参数——续航里程、加速度、充电时间、安全性，当然还有成本。因此，对于我们下面讨论的创新，即使是专注于提高能量密度的创新，也总是根据其降低成本（按每 kWh 单价计算）的能力进行评判。

基础知识与权衡取舍。为了简化对锂离子妥协方案的分解，可以考虑锂离子电池的两种主要风格：能量型电池和功率型电池。锂离子电池方面的大多数妥协方案都可以归结为一项主要的权衡，这种权衡导致了这两种优化电池。第一种电池注重成本和能量密度（如松下电池），我们可以称之为能量型电池。第二种锂离子电池注重循环寿命和充电速度（如宁德时代磷酸铁锂电池），我们可以称之为功率型电池。下面还会介绍其他细微差别，但先进锂离子技术要想充分发挥其潜力，就要打破这种权衡带来的重要妥协。您也可以生产中间版本，既融合了二者的优点，也融合或结合了相应的缺点。

在更为详细地讨论这两种类型的电池之前，让我们讲讲锂离子电池的基础知识，首先从名称讲起（图 5、6）。“锂离子”是一个非常宽泛的总体术语，它表示处于电离（带正电）形态的锂是系统中的能量载体。但是，这种能量载体在没有进行有效的充电或放电时需要一个家，这是负极和正极材料。任何使用锂作为能量载体的电池都可以称为“锂电池”，包括通俗地称为“锂离子”、“LCO”、“磷酸铁或 LFP”、“NCA”、“NCM”、“锂金属”、“固态”、“固态电解质”等的电池，这些名称通常指出了电池的关键差异组件，并暗示其余组件是最标准的锂离子种类。我们将在下面介绍其中的差异（图 7）。

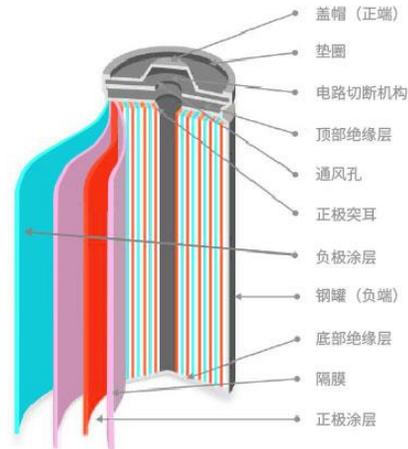


图 4. 典型圆柱形锂离子电池的横截面显示了电极是如何分层然后缠绕的。

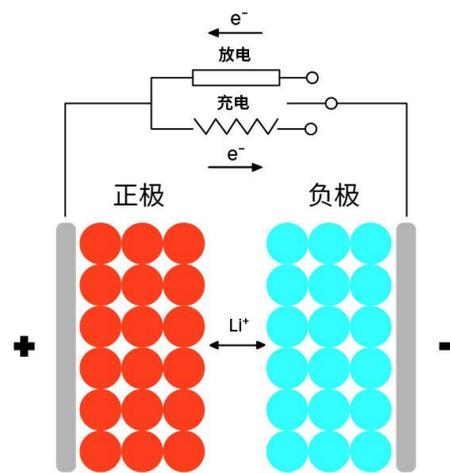


图 5. 锂离子电池的基本原理涉及锂离子在放电期间以带正电（电离）状态从负极移动到正极，在充电期间反方向移动。这种移动过程需通过电解液穿过多孔隔膜。与此同时，锂原子的电子沿外部电路移动，无论是负载还是充电器。

传统的基本锂离子电池通过所谓的“嵌入”机制发挥作用，其中锂原子（处于离子形态）在充电过程中插入（嵌入）到晶体负极材料内的小空隙中；然后在放电过程中移到晶体正极材料内的小空隙中。⁴在这些过程中不会发生化学键断裂，也不会发生重大的体积变化，因此它们几乎完全可逆。借用一个经常使用的类比，负极是一个礼堂，电池充电时锂离子到礼堂中就座 - 正极是大厅对面的第二个礼堂，电池放电时锂离子前往那里就座（我们会再次使用这个不太完美但很有用的类比）。

对于负极，目前的锂离子电池中只有一种材料适合使用——石墨碳。几种类型的石墨占据了约 99% 的锂离子负极市场。

对于正极，有两大类用于汽车锂离子电池的常规材料，其中的第一类有几个子类型。它们是：(i) 电压较高、容量较高的富镍镍钴铝酸锂 (NCA) 或镍钴锰酸锂 (NCM)⁵ 和 (ii) 电压较低、容量较低的磷酸铁锂 LiFePO_4 (LFP)。⁶ 尽管镍和钴金属的成本比铁要高得多，但由于 LFP 的能量密度低得多，因此在相同的能量下（即按 Wh/L 计算）基于 LFP 的电池要比基于 NCA 和 NCM 的锂离子电池大 1.3-2 倍，但基于 NCA 和 NCM 的电池比基于 LFP 的电池便宜约 25%（按美元/kWh 计算）。实际上，尽管采用 NCA 或 NCM 制造的每块电池更昂贵，导致分子“美元”增加，但这些相同的电池在分母能量“kWh”上的增加幅度更高；从而导致美元/kWh 的储能成本更低。

能量型电池。 我们在本节开头介绍过，当今最好的能量型电池具备一些出色的性能：

720 Wh/L 的能量密度和约 100 美元/kWh 的生产成本。然而，它们无法达到 5,000 次的完全充放电循环，在大约 1,000 次完全循环或等效的完全循环后性能就会下降。这意味着对于续航 200-300 英里的电动汽车，行驶 20-30 万英里后性能会显著下降。

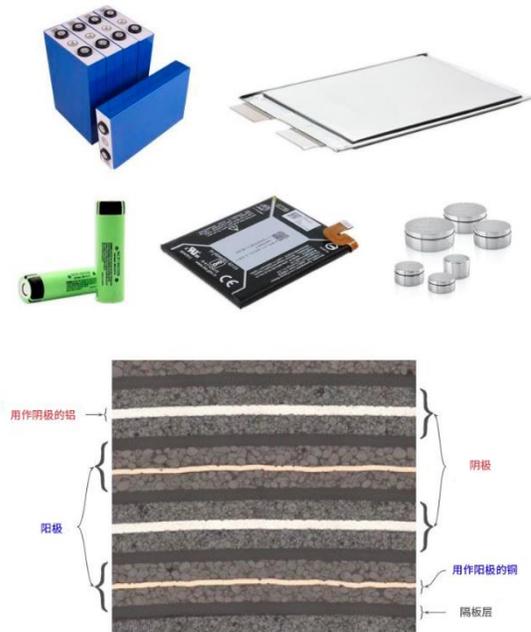


图 6. 前 5 个图显示了锂离子电池的不同形制。用于汽车市场的棱柱形和软包；用于消费市场的圆柱形、软包和纽扣电池。无论锂离子电池的形制或应用是什么，光学横截面图像（底部）代表了当今所有锂离子电池中的分层结构。

⁴ N. Nitta, F. Wu, J.T. Lee, G. Yushin “锂离子电池材料：现在和未来”，Materials Today, 18 (5), 第 252-264 页, 2015 年 (DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040)

⁵ T. Kim, W.T. Song, D.Y. Son, L.K. Ono, Y.B. Qi, “锂离子电池：现在、未来与混合动力技术展望”，Journal of Materials Chemistry A, 7(7), 第 2942-2964 页, 2019 年 (DOI: 10.1039/c8ta10513h)

⁶ J.J. Wang, X.L. Sun, “橄榄石形 LiFePO_4 ：未来储能的剩余挑战”，Energy & Environmental Science, 8 (4), 第 1110-1138 页, 2015 年 (DOI: 10.1039/c4ee04016c)

在汽车领域，这些电池基本都使用 NCA 或 NCM（通常是 NCM-622 或最近的 NCM-811，其中的数字代表镍、钴和锰的相对比例，即 8:1:1 的比例使用的钴比 6:2:2 更少）正极与石墨负极。撰写本文时，所有在产的能量型电池中最好的似乎是特斯拉使用的松下 2170。除了使用的镍含量最高（以提高正极容量），该电池还将约 5% 的硅掺入石墨负极以提高负极容量。除了打造出 720 Wh/L 的最高能量密度电池，它也被证明是最便宜的。原因很简单——我们以每 kWh 的单价来衡量成本，因此即使电池本身的成本保持相对平稳，但随着电池储能的增加 (kWh)，每 kWh 的单价也会降低。您在电池中装入的能量越多，每 kWh 的单价就越低。但是，由于我们接下来介绍的几个原因，能量型电池设计会使电池的循环寿命和充电率变差。

功率型电池。 当今最好的功率型电池可以实现我们在开始时介绍的其他一流特性：5,000 次充放电循环和 10 分钟充满电。但是这些电池无法达到与能量型电池相同的成本——按每 kWh 单价计算要高出 25-50%——并且仅拥有 450 Wh/L 的能量密度，与能量型电池的 720 Wh/L 相比相形见绌。可以通过进一步的礼堂类比来解释功率型电池充电速度快的优点与其能量密度低的缺点组合。想象一下，与 NCA 和 NCM 礼堂相比，LFP 但只安装了三分之一的座位。

其他所有座位都已拆除，在每把椅子之间留出一个过道。因此所有进入礼堂的人（锂离子）更容易跑到他们的座位上，没有太多阻碍。

同时，因为座位减半，礼堂中容纳的电量也减半。

尽管存在每 kWh 的成本高和能量密度低的缺点，但功率型电池在中国一直是电动汽车行业中非常受欢迎的选择，甚至有传言称特斯拉也将在 2021 年于中国市场推出搭载它的产品。在很多情况下，它也可以成为电网应用的最佳选择。尽管能量密度和每 kWh 性能的成本较低，但出于 4 个主要原因，LFP 正极化学技术重新流行起来：

- 首先，NCM 和 NCA 所需的镍和钴都存在供应限制。没有足够的钴和镍供应，无法对于采矿来说在经济上有利可图的价格实现运输行业的完全电气化。这些高品位矿石预计在未来 10-20 年内将会枯竭，这将造成价格波动并导致这些本已相当昂贵的金属价格出现整体上涨。⁷此外，大多数钴和镍矿位于北美、欧洲和东亚的主要电动汽车市场之外。其中一些矿山位于刚果等劳动条件恶劣的国家。⁸

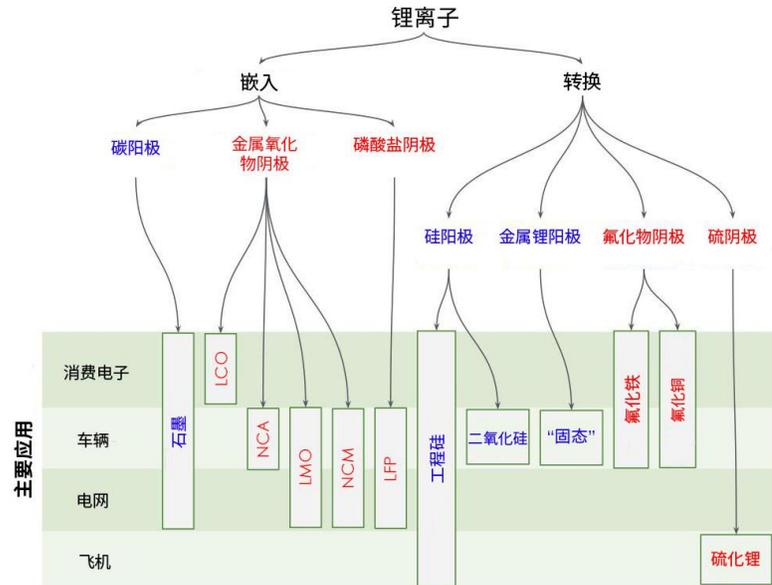


图 7. 锂离子家族树。注意，任何负极和任何正极都可协同工作，形成合适的锂离子电池。汽车电池的下一步将是用工程硅负极代替石墨。

⁷ <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05752-3>

⁸ <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/>

- 其次，LFP 较低的电压最大限度减少了正极上的电解液氧化，并为这种化学技术提供了更长的使用时长和循环寿命（即使简化了冷却系统）。虽然目前 30 万英里以上的电池寿命对于消费类电动汽车来说已经绰绰有余，但自动驾驶汽车、公共汽车和卡车的出现会带来对百万英里以上电池寿命的需求，而 LFP 可以实现这一目标（例如，200 英里续航里程 X 5,000 次循环 = 100 万英里）。电网储能的快速扩张同样推动了需求，其中 5,000 次循环足以满足 15 年的日常使用。

- 第三，LFP 电池不太容易发生“热失控”（一个因自身的能量而起火的电池技术术语），并且它的高功率容量使其在正常使用中的运行温度更低，因为内部电阻较小，不容易导致自发热。正是这些因素让 LFP 电池制成的电池包能够以更简单的冷却技术运行，从而降低了电池包的管理成本、重量和电池管理系统的复杂性。

- 最后，电池制造成本的逐步降低让正极材料的成本成为决定最终电池价格的最主要因素。由于所有这些因素，LFP 电池包的价格可能与基于 NCA 和 NCM 的电池包相比具有竞争力；如果镍或钴的价格因短缺而攀升，LFP 电池包甚至会更便宜。

机遇 - 下一代化学技术与材料

电池性能的理论极限总是受到关键组件的限制——负极、正极、电解液和隔膜。而这些性能目标的实际实现还会受到卓越制造的限制。本节介绍了锂离子电池组件方面预计会出现的创新。我们将在下节介绍组装这些组件的制造创新。

先进的负极 - 硅。近期将产生影响的最重要先进锂离子电池突破是硅负极。由于石墨是电池中的薄弱环节，比任何其他组件占用的空间都大，因此硅负极不仅会带来巨大的收益，还会给其他创新带来产生重大影响的机会。

基本（嵌入型）负极材料是石墨，通常采用天然石墨与人造石墨的混合物。可以完全替代石墨的超高容量硅 (Si) 负极的出现提高了锂离子电池的能量密度，并有可能显著降低锂离子电池的成本，特别是在能量型电池中（图 8）。

硅不使用嵌入机制存储锂离子。相反，它通过所谓的“转换”机制发挥作用，其中硅和锂原子形成电合金，在充放电循环循环中断开和恢复化学键。“转换”名称来自一种结构向另一种结构的转换或转变。可以将基本的嵌入反应想象成将一块布料（被嵌入的锂原子）塞进衬衫口袋，然后将其取出；同样，将转换反应想象成将几块全新的大块布料缝入衬衫中，然后每次将它们剪掉。转换反应中形成的键要强得多（这就是它们储存更多能量的原因），但更难以重复建立和断开而不造成长期损害。

实现硅负极循环能力在技术上更具挑战性。第一个学术见解在 1953-1956 年就已提出^{9,10}，而第一次现代商业化努力在 2006 年才开始。尽管开发时间漫长，但（还）没有出现用硅负极完全取代石墨负极的大容量商用锂离子电池。当它确实出现时，回报会表明等待是值得的。我们预计，在不到 10 年内，具备 NCA 或 NCM 正极与以硅为主的负极的汽车电池会将能量密度提高 50%，从而将每 kWh 单价成本降低 30-40%。

硅负极有助于打破能量和功率型电池之间的权衡关系，它的另一个主要优势在于，通过将锂储存在更小的体积内，更薄的硅负极可以实现更快的充电速度。更薄的电极使锂离子能够更快、更轻松地到达负极颗粒。在理论极限下，开发比石墨负极薄 3 倍的硅负极将使扩散速度提高 9 倍，从而使充电速度大幅提升（由于正极限制，无法达到 9 倍，但仍然很高），从而打破能量和功率型电池之间的一项主要权衡关系。

出现如此显著改善的原因很简单——单个硅原子可有效储存 4 个锂原子；而在石墨负极中，要存储相同的 4 个锂原子，需使用 24 个碳原子。因此，硅负极可提供高达 10 倍的克容量 (mAh/g)，高达 3 倍的体积容量 (mAh/cc) (图 8)。¹¹我们将在这里进一步采用礼堂的类比。想象一下，在硅负极礼堂中，以前在石墨礼堂中的单独座位现在被同一位置堆叠的 10 个座位所取代。当门打开时，有 10 倍的人跑进来坐满这些座位。他们把座位分散开，试图塞进同一个礼堂，但因为没有足够的空间，有些人只能涌出礼堂。

用更专业的术语来说，硅的主要挑战是它在充电过程中与锂反应时会膨胀 3 倍，而在放电过程中又会收缩为原来的三分之一。相比之下，石墨在充电时仅膨胀约 7%，放电时仅收缩 7%。这种膨胀导致的问题阻碍了硅取代石墨的速度。具体来讲，在这些扩张过程中，大颗粒的硅会被粉碎，因此许多公司开发了“纳米硅”材料，这种材料不会产生足以导致破裂的应力。然而，纳米级的颗粒并不能解决更大的问题——硅表面发生的损坏，硅表面通常有一层钝化膜，称为固体电解质相界面膜 (SEI)，可防止不需要的副反应。当 SEI 中发生这种损坏时，不需要的副反应就会捕获锂原子，从而导致容量迅速降低。

	石墨	硅
化学反应	$C_6 \leftrightarrow LiC_6$	$Si_4 \leftrightarrow Li_{15}Si_4$
原子比	1:6	3.75:1 (高 23 倍)
重量容量	372 mAh/g	3,579 mAh/g
体积容量	~700 mAh/cc	~2,100 mAh/cc
充电期间的膨胀	7%	300%

图 8. 石墨和硅负极基本原理比较表。尽管性能显著提高，但迄今为止，硅的商业化仍受到膨胀引起的技术挑战的阻碍。

⁹ C.S. Fuller 和 J.A. Ditzinger, “锂向锗和硅中的扩散”, *Physical Review*, 91 (1), 第 193 页, 1953 年 (DOI: 10.1103/PhysRev.91.193);

¹⁰ A. J. Pietruszkiewicz “锂在掺杂和未掺杂硅中的溶解度，化合物形成的证据”, *Journal of Chemical Physics*, 25 (4), 第 650-655 页, 1956 年 (DOI: 10.1063/1.1743021)

¹¹ X.X. Zuo, J. Zhu, P. Muller-Buschbaum, Y.J. Cheng, “硅基锂离子电池负极：编年史视角的回顾”, *Nano Energy* 31, 第 113-143 页, 2017 年 (DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.11.013); N. Nitta, G. Yushin, “锂离子电池用大容量负极材料：活性颗粒元素和结构的选择”, *Particle & Particle Systems Characterization* 31 (3), 第 317-336 页, 2014 年 (DOI: 10.1002/ppsc.201300231)

为了克服这一挑战，电池制造商将极少的硅混合到石墨负极中，比例不到 10%，通常接近 3-5%。这么做稍微提高了能量密度，但添加更多的硅会降低实际应用中的循环寿命。纯纳米硅负极通常无法实现超过约 100 次的完全充放电循环，除非使用无法大规模且经济地复制的手段。

完全取代石墨需要一种通过设计工程颗粒结构来抵消硅膨胀的材料。如果您能制造出一种颗粒，它允许硅在颗粒内部膨胀和收缩，同时保持电解液留在颗粒外部，就能可逆地循环充放电该材料数千次，甚至是一万次，而没有不需要的副反应出现。需要明确的是，这类材料正是 Sila 已经开发，并且目前正在扩展和部署的材料。Sila 不太可能找到了实现这种效果的唯一方法，但似乎所有基本的纳米硅方法都有问题，无法进入市场。回到我们的类比上，建造一种工程硅负极材料就像建造一个多层礼堂，让您最开始不用堆叠椅子——这是一种可靠得多的设计。

虽然开发这样的颗粒具有挑战性（如果我们在 Sila 的案例中算上早期大学里的研发，大约需要十年和 40,000 次材料合成的迭代），但以必要的成本将制造规模扩大到汽车规模甚至更难。鉴于过去从来没有出现过对这种材料的需求，因此需要全新的化学加工技术来合成这种结构，这对成熟的化学品制造商来说是一个挑战。此外，该过程必须批量完成，因为在这种规模上任何平面处理方法（例如太阳能电池的制造方式）都要贵 10-100 倍。最后，所有投入的材料都必须是现有的全球大宗商品——以免最终出现大规模供应短缺。

值得注意的是，当今全球生产的负极材料中约有 1% 是硅。如上所述，这些硅用作石墨基电池的少量添加剂。最突出的例子是特斯拉自 2015 年以来使用的松下 2170 电池，还有其他一些例子。松下/特斯拉电池含有约 5% 的硅，以氧化硅的形式混合到其石墨负极中。这种方法提供的能量提升非常小。然而，这项技术几乎已达到其极限，需要一种全新的产品（如 Sila 开发的硅）来实现向无石墨负极的跨越。

这并不是说可以替代石墨的工程硅材料必须一步实现。从商业化的角度来看，将该材料与石墨混合的优势包括优化电池性能、提高部署速度、更顺利地进入市场，可以在连续的几代电池中依次混合 25%、50%、100% 的容量。不过，关键在于首先有一项可以达到 100% 使用硅材料的技术。在没有长期战略的情况下，使用 10% 含量就达到其极限的材料需投入大量资源。

先进正极 - 氟化物。如今关于正极的大多数商业工作都专注于减少 NCA 和 NCM 化学技术中的钴含量，增加镍含量。这可以将电池级能量密度提高约 5%，同时通过减少对钴的依赖，将成本降低几个百分点。然而，这些改进不是革命性的。为了实现革命性的改进，正极技术还需要从包括 LFP、NCA 和 NCM 在内的嵌入型材料转向转换型材料（图 9）。

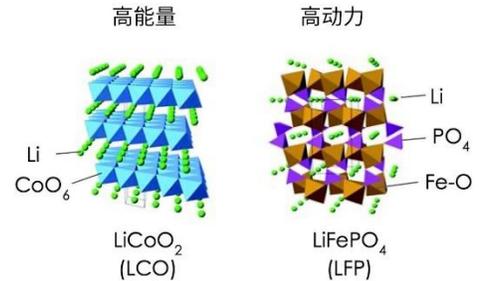
从嵌入型石墨负极到转换型硅负极的成功过渡也将使嵌入型正极向转换型正极的过渡成为可能，从而进一步提高电池能量密度并降低每 kWh 的单位成本。首先需要硅负极的原因与电池的权衡有关 - 目前，正极的所有重大改进都受到负极材料平庸性的限制。一旦负极实现 2-3 倍的改进，正极将成为相对平庸的搭档，需要升级。将这两种新技术结合在一起可使电池的能量密度高达 1400 Wh/L。

两种可能主导市场的主要转换型活性正极材料是 (i) 金属氟化物基正极（如氟化铁或氟化铜）和 (ii) 硫基正极。¹²我们估计，这种过渡方案与硅负极相结合，是到 2030 年将汽车锂离子电池价格降至约 50 美元/kWh 以及到 2040 年降至约 30 美元/kWh 的关键。此外，由于高容量转换型正极不会（像 NCA 和 NCM 正极一样）暴露在高电压下，所以在此类系统中可以避免电解液氧化以及由此产生的让锂离子电池性能下降的气体和酸。因此，通过正确的材料设计和生产工艺，防止转换型活性材料出现溶解，可以获得更长的循环和使用寿命。很有可能通过转换型正极和工程化的低膨胀硅负极，锂离子的循环寿命可延长到 10,000 次完整循环，同时还具有市场上最高的能量密度 - 从而打破功率型电池与能量型电池之间的妥协。

先进的陶瓷隔膜和更好的电解液。我们预计，电解液和隔膜的发展将带来更小但关键的创新。商用锂离子电池中使用的电解液通过在电极表面发生反应和分解而降解。但是在分解时，它们会形成表面层——所谓的负极上的固体电解液相界面膜 (SEI) 和正极上的正极电解液相界面膜 (CEI)——可以降低这些表面的反应性（该过程称为“钝化”）并减缓电解液的进一步降解。未来，电解液将变得更耐降解并形成更稳定的 SEI 和 CEI 钝化层，从而有助于提高电池的稳定性和安全性。在未来 10 年，大多数市场中的电解质不会转变为真正的固态 - 请参阅最后的“额外内容”部分了解原因。

此外，多孔聚合物隔膜将被陶瓷和以陶瓷为主的隔膜所取代，这些隔膜可显著提高热稳定性、压缩强度和离子电导率，从而使电池更安全、更强大、充电速度更快。¹³这里将最后一次使用我们的礼堂类比。打个比方，隔膜就是人们从一个礼堂走到另一个礼堂的走廊。目前的聚合物隔膜就像一个走廊，间隔 2 英尺、直径 4 英尺的柱子遍布在长长的走廊中。当人们从走廊一侧冲到另一侧时，他们必须不断地挤过巨大柱子之间的小间隙。然而，陶瓷隔膜可以开放大部分空间——走廊中使用间隔 6 英尺、直径 1 英尺的小柱子——并且还缩小了走廊的长度，使穿行速度更快。

嵌入型材料示例



转换型材料示例

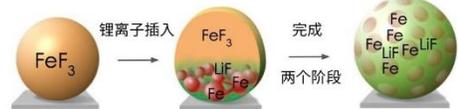


图 9. 嵌入型材料使用稳定的晶体结构主体，锂原子可以轻松进出主体而不会改变或损坏它。转换型材料在反应过程中改变主体材料的原子结构，使得稳定和逆转该过程而没有副作用变得更具挑战性。

¹² N. Nitta, F. Wu, J. Lee 和 G. Yushin, “锂电池材料：现在和未来”，Materials Today, 18 (5), 第 252-264 页, 2015 年 (DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040); F. Wu 和 G. Yushin, “可充电锂和锂离子电池的转换型正极”, Energy & Environmental Science, 10 (2), 第 435-459 页, 2017 年 (DOI: 10.1039/C6EE02326F)。

¹³ D. Lei, J. Benson, A. Magasinski, G. Berdichevsky, G. Yushin, “将大块合金转化为氧化物纳米线”, Science 355 (6322), 第 267-271 页, 2017 年 (DOI: 10.1126/science.aal2239)

通过消费电子市场扩大高性能材料的使用规模。技术人员经常忽视的一个关键创新要素是如何将新技术推向市场。对锂离子电池而言，消费电子市场为所有新技术提供了一条极好而且可能很有必要的上市途径。

判断电池技术是否可用于汽车行业的最佳方法是：首先看看它是否可用于消费行业。我们在基本锂离子技术中就看到了这一点，该技术在进入电动汽车行业之前就开始用于笔记本电脑和手机。我们在 LFP 技术中也看到了这一点，该技术最开始用于电动工具，后来成为混合动力汽车和一些插电式汽车的标配。我们在较小的创新中也看到了这一点，例如更安全的隔膜，这些隔膜也是在 21 世纪 00 年代初为了防止笔记本电脑起火而开发的。

这种市场进入机会主要适用于可提高性能（不仅是降低成本）的材料创新，因为更好的电池性能在我们每天使用的设备中具有非常高的价值。这种推理方式有一个推论——声称可以显著提高性能但没有进入任何消费设备市场的新创新可能仍然更多地属于实验室实验，而不是已准备好进行商业化的技术。

在大多数笔记本电脑和手机中，电池占据了近一半的空间。电池性能提高 50% 可以造就更漂亮的产品，或者为新的、更好的功能腾出空间，比如 5G、改进的相机、更强的声效甚至迷你投影仪。当然，就像锂离子电池是小型手机的关键推动因素一样，更新的电池也将成为我们佩戴而非携带的更小型设备的关键推动因素。与购买早期的电动汽车有助于推动低成本电动汽车的研发不同，购买配备了先进电池的手机将有助于推动研发，加速电动汽车革命。

即将到来的材料创新汇总。最充分地利用这些可产生显著性能改进的组件才是关键，因为它们几乎构成了组装的锂离子电池的全部。当您制造电池的材料具有更高的性能时，电池本身的性能很快就会变得更高——无论您使用的制造工艺或规模如何，或者您所针对的市场如何。然而，除了这些材料改进，我们还设想了对电池制造方式进行重大改进，下一节将讨论此内容。制造方式改进可以同我们刚刚介绍的组件改进密切协同，从而进一步加快成本下降和性能提高。

机遇 - 锂离子制造的改进

制造基础。除组件（材料）、研发成本、销售成本和利润外，电池制造成本的贡献者主要有以下三个：(i) 极片的生产（约占 40%），(ii) 电池组装（约占 20%）和 (iii) 电池精加工（约占 40%）。我们希望在每个方面都能看到重大创新，下面分开介绍三个方面。

当今极片的生产是将活性材料（负极颗粒或正极颗粒）与百分之几的导电添加剂、少量粘结剂和液体溶剂（例如水）混合后形成一种浆料。¹⁴然后将这种浆料在金属箔集流体（铜上是负极，铝上是正极）上镀膜形成约 0.2-0.4 毫米厚的涂层。之后将其缓慢干燥以去除液体溶剂，然后对其加压以将涂层密度提高至约 0.06-0.09 毫米厚度（人类头发直径的一半），最后进行真空干燥以去除表面上残留的任何水分子。

¹⁴ D. Wood, J.L. Li, C. Daniel, “降低锂离子电池加工成本的前景”，*Journal of Power Sources* 275, 第 234-242 页, 2015 年 (DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.11.019)

然后将电极以负极极片、隔膜、正极极片、隔膜等顺序切割并堆叠（或卷绕）在一起。根据我们的类比，每次重复的堆叠类似于中间通过走廊相连的两个礼堂。对于典型的手机电池，可能重复堆叠 20-30 次。对于较厚的汽车电池，可能重复堆叠 100 次。尽管堆叠是最简单的可视化方法，但通过将一对长电极缠绕成圆柱形也可以实现相同的效果。

然后将这组堆叠（或缠绕）的电极和隔膜放在外壳内（铝制硬壳或袋状软壳体）并充满电解质。

然后电池单元经历初始的充电-放电循环以“化成”电池。第一个充电-放电“化成”电池步骤会导致许多一次性副反应，这些副反应“钝化”电池电极，使它们在循环期间保持稳定（即钝化）。“化成”过程完成后，副反应气体会被抽空并且电池被永久密封。最后，电池经历漫长的老化和质量控制测试，然后才能发往电池组装场所。这是一个漫长的过程（图 10）！

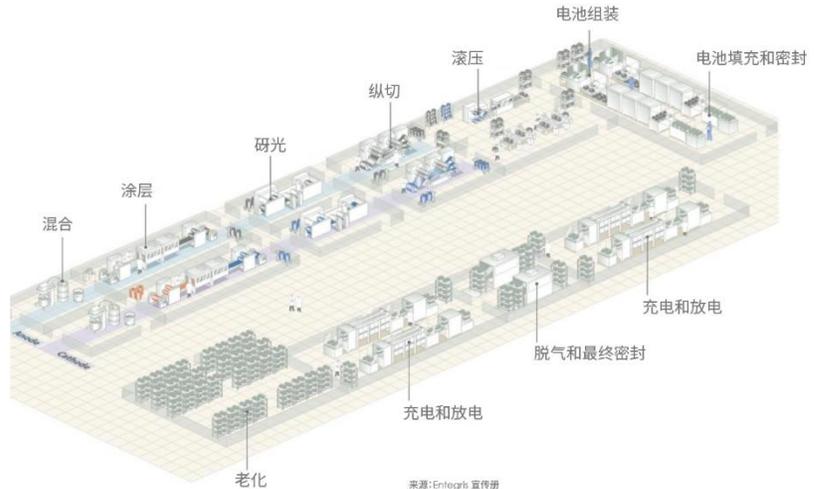


图 10. 一个典型的锂离子工厂工艺流程。该流程从混合开始，在整个工厂中完成处理，最终以老化结束。

先进电极的生产。在接下来的 10 年中，电极生产将出现三项重大改进。首先，该行业将用干法电极加工（无溶剂）或

快干的水基加工（负极生产已经使用了水）替代所有用于电极铸膜的有毒有机溶剂。这可降低干燥机的成本，因为现在需要干燥机来捕获有毒的有机溶剂，以便回收利用。使用水以后，可以消除昂贵的捕获和回收组件（而不会对环境造成危害）。

其次，我们预计电极设计将变得更为复杂。如今的电极是由大小随机、朝向随机且压实相对较差的活性材料制成的——这为锂离子在电解液中的移动形成了弯曲的长路径。在材料科学中，这些路径被描述为“曲折的”。这些曲折的路径就像礼堂中的座位没有成排摆放，只是随意地摆放一样。如今的电极还使用了过量的非活性材料，包括聚合物粘结剂和导电添加剂，因为仅将这些非活性材料分布到电极中需要它们的地方（颗粒相互接触的点）就非常困难。

未来，电极将更多地采用能显著减少曲折路径的设计，以实现更快的离子传输，因为将使用更少量但精确分布的非活性材料（通过新的加工技术）制造它。这可让更均匀和更有序的活性材料颗粒具有更大的厚度和密度，从而减少电池中所需的重复堆叠数量，加速制造过程并降低成本。

最后，具有更高强度和附着力的更好的粘结剂将确保电极的完整性，同时减少粘结剂的用量。这些更强的粘结剂还可以减轻电极的膨胀，最大限度减少电解质与活性材料在粘结剂/颗粒界面上的不良反应，并降低电阻。^{15,16} 总的来说，更好的粘结剂有助于显著扩大电极的设计空间，进而可以提高性能并降低成本。

先进电池的组装。 电池组装上的改进来自于多个组件的组合。例如，隔膜可以并且很可能将集成到负极的顶面中，而不是作为负极和正极之间的独立一层。目前独立隔膜的处理非常困难。它们现在薄至 8 μm （微米），由于多孔性而很难用吸力拾取，由于高度的非导电性和静电荷的频繁移动而很难固定以进行精密组装，并且对可能导致电池灾难性故障（包括起火）的微小缺陷很敏感。更好的方法是在堆叠或缠绕过程前将一层非导电性隔膜材料直接集成到电极上。

我们还期望能够以更快的速度堆叠或缠绕更均匀的电极，让电极具有更好的机械性能和对集流体的粘附性。先进的传感器和在线诊断同样可以在不牺牲质量的情况下最大限度提高电池组装速率。快速激光切割技术的发展最终将取代机械电极切割，因为它提供了更好的边缘质量，并且可以消除会导致短路和降低电池产量的碎片。

先进电池的精加工。 我们预计在电池精加工方面也将出现三项关键改进。首先，陶瓷隔膜的使用和不那么曲折的电极将大大加快电解液填充到干电池中的速度。如今的聚合物隔膜在将电解液吸入电池方面的效率很差，而且只有大约 40% 的孔隙率。陶瓷隔膜的孔隙率最高可达 80%，并具有出色的电解液吸入性能，既提高了充电性能，又加快了制造过程。

其次，使用优化的脉冲或交流充电¹⁷的新型充电算法可以加速电极钝化的形成并提高其质量，延长循环寿命并加快制造速度。最后，改进的电池诊断精度可最大限度减少老化和质量控制步骤的时长。例如，将更精确的电子设备与全新的诊断技术结合使用，例如使用超声波¹⁸，能够比如今的流程更快地检测出电池性能中不想要的非规则性，并提高质量合格率，从而降低了总成本。

¹⁵ D. Bresser, D. Buchholz, A. Moretti, A. Varzi 和 S. Passerini, “可持续电化学储能的替代粘结剂——向水性电极加工和生物衍生聚合物的过渡”, *Energy Environ.Sci.*, 11, 第 3096-3127 页, 2018 年 (DOI: 10.1039/C8EE00640G)

¹⁶ A. Magasinski, B. Zdyrko, I. Kovalenko, B. Hertzberg, R. Burtovyy, C.F.Huebner, T.F.Fuller, I. Luzinov, G. Yushin, “适合锂离子电池硅基负极的高效粘结剂：聚丙烯酸”, *ACS Appl Mater Interfaces*, 2(11), 3004-10, 2010 年 (DOI: 10.1021/am100871y)

¹⁷ S.Q. Zhu, C. Hu, Y. Xu, Y. Jin, J.L.Shui, “通过脉冲电流提高锂离子电池的性能”, *Journal of Energy Chemistry* 46, 第 208-214 页, 2020 年 (DOI: 10.1016/j.jchem.2019.11.007); X.R. Huang, Y.Y.Li, A.B.Acharya, X. Sui, J.H.Meng, R. Teodorescu, D.I.Stroe, “锂离子电池脉冲电流技术综述”, 13(10) A2458, 2020 年 (DOI: 10.3390/en13102458)

¹⁸ C. Bommier, W. Chang, J.L.Li, S. Biswas, G. Davies, J. Nanda, D. Steingart, “NMC/SiGr 复合软包电池中 SEI 的形成和长期循环的 Operando 声学监测”, *Journal of the Electrochemical Society*, 167(2) A. 020517, 2020 年 (DOI: 10.1149/1945-7111/ab68d6)

集成式电池、模组和电池包设计。有些创新可能只适用于决定在内部承担电池制造的原始设备制造商 (OEM)，就像大众和特斯拉似乎正在做的那样，或者适用于寻求更靠近车辆底盘设计的电池制造商，像 CATL 试图做的那样。如果电池与模组和电池包在同一家工厂生产，而不是作为组件出售，就可以将电池、电池包和汽车的制造流程集成在一起，并进一步定制电池设计以适应专有模组（图 11）。

在定制设计过程中，可以将电池形状设计为直接连接到模组中并创建与冷却系统的理想连接，从而无需围绕预先存在的电池来设计模组和冷却系统。更进一步，可将电池外壳设计为模组的基础结构——基本来讲就是将电极直接构建到模组中，而不是构建将要组装成模组的电池。还可以为每辆车定制电池的高度——较大的车辆将使用更高的电池（在电动汽车的地板下垂直排列）以满足 SUV 更高电池容量的需求，而无需改变电池包平台的设计。例如，轿车和 SUV 将具有相同的电池包布局和架构，但 SUV 可以使用高 20% 的电池。对于拥有许多汽车 OEM 客户的独立电池制造商来说，这是困难的，因为每家 OEM 都有自己的模组技术。

从电池到汽车的一体化制造过程允许在将电池组装到模组、电池包或车辆中的同时完成电池的老化。这意味着您可以在电池老化的同时库存更少的电池，从而节省成本。如果在模组集成后发现缺陷的电池（电池老化的好处之一就是发现故障），在容错模组设计中，如果在设计模组时考虑了容错，就可以断开、更换、移除电池。

制造创新汇总。尽管锂离子电池制造工艺

在过去 30 年中得到了极大的改进，但仍有不错的机会简化它、提高性能，以及加快制造速度以降低成本。虽然这些改进的影响力不如材料组件改进那么大，但由于制造改进是互补的，因此其综合影响可能是变革性的。

规模

考虑储能技术的未来时，一定要考虑当今锂离子技术的规模以及未来的需求规模。声称将取代锂离子的技术经常成为头条新闻，但规模限制让这种取代过程在一代人的时间内变得不切实际。正是由于这个原因，到 2050 年，虽然锂离子不会独占全部的储能份额，但它仍将是迄今为止最主要的化学技术，其他的大多数都会沦为小众应用。这些小众应用的规模是几十亿美元的市场，但考虑到整个储能市场的万亿美元规模，它们仍然是小众市场。

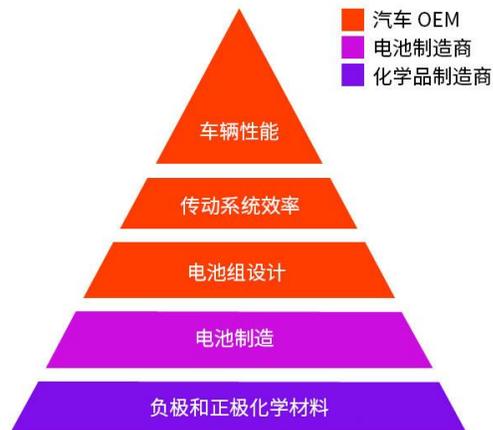


图 11. 制造一流的车辆需要从化学技术到电池制造、电池包和动力系统设计的整个过程中采用一流的技术。任何层面的未达标性能都会抵消其他技术层面的任何优势，并导致更高的车辆成本。

在特斯拉成立之前，锂离子电池几乎只用于消费电子产品——主要是笔记本电脑和手机。2008 年特斯拉推出 Roadster 时，全球锂离子电池总产能约为每年 20 GWh。根据电池制造商已经宣布的计划，到 2030 年，我们预计年产能将超过 2,000 GWh。¹⁹

如果我们假设电池的价格将达到所预测的 50 美元/kWh，那么到 2030 年，电池市场将达到每年 1000 亿美元（而电池包和系统市场将增长 25%-50%）。

从电动汽车革命开始到 2030 年 50 倍以上的生产规模增加将是前所未有的，任何想要取代理离子电池的技术都需要有一个明确的计划，即它在首次登场时如何与这种规模的现有企业进行竞争——这并不容易。

展望 2030 年以后，我们需要约 10,000 GWh 来改造所有轻型运输业，到本世纪中叶，我们需要大约 10,000 GWh 来支持卡车、公共汽车和其他中重型运输业。再加上向 100% 可再生能源转变的日常电网储能需求，结合电力和运输业的全球发展和需求增加，到本世纪中叶，全球对锂离子储能的需求可能会达到 30,000 GWh，市场规模为每年 1 万亿美元以上。如果我们有幸看到储能市场达到这种规模，我们将把经济（电力和交通）从碳密集型燃料来源转变为以可持续的 100% 可再生能源为基础。为了实现这一未来，我们不仅要关注创新，还要关注大规模创新。

为了使用当今的组件达到 30,000 GWh 的容量，我们可以按重量计算每个组件每年的需求：

- 使用石墨负极，我们每年需要约 2300 万吨石墨来支持这一产能
- 然而，使用硅负极，需求将是石墨的五到十分之一（每年 200-400 万吨硅），因为与石墨相比，每千克硅的容量要高得多
- 对于 NCA 或 NCM 正极，假设由 90% 的镍和 5% 的钴组成，该行业将需要 120 万吨钴和 2200 万吨镍
- 这些数字非常高，应该会促使我们致力于走一条能够实现这一规模的道路，同时考虑到当今的环境和可持续性，尽可能地重复利用，在不可能重复利用的地方进行回收利用。作为参考，我们还应该记住，我们每天从地球上开采大约 1200 万吨石油、2100 万吨煤和 700 万吨天然气，而这里的电池材料数字是一年的需求

虽然从全球资源稀缺的角度来看，石墨和硅的数量不存在真正的挑战，但钴和镍的规模将成为挑战。目前，全球每年生产 15 万吨钴和 250 万吨镍，用于不同行业（磁铁、高温合金、钢铁、航空航天等）的多种应用，这些行业也在不断发展。全球可商用的总储量被限制在 150 万吨高品位（开采相对便宜）钴和 3600 万吨 1 级（电池级）镍。根据预计的需求增长，可能在短短的 10 年内，这些金属将出现严重短缺，并由此导致价格大幅上涨。²⁰

首先到 2030 年产能扩大到 2,000 GWh，然后到 2050 年扩大到 30,000 GWh，这也需要大量的资本投资。如今，全球只有少数公司建造了汽车业规模的锂离子生产工厂，最突出的是宁德时代、LG、松下、三星 SDI、SK，以及最新的进入者 Farasis 和 Northvolt（其他几家公司已经成立以期进入该领域，但尚未取得重大进展）。根据行业公告，锂离子制造厂每 GWh 年产能的成本在 5000 万美元至 1 亿美元之间。

¹⁹ <https://www.benchmarkminerals.com/benchmarks-megafactory-tracker-exceeds-2-terawatt-hours-as-solid-state-makes-its-first-appearance/>

²⁰ K. Turcheniuk, D. Bondarev, G. G. Amatucci, G. Yushin, “低成本电力运输的电池材料”，Materials Today（2020 年回顾）

根据这些估计，2020 年到 2030 年，总计将需要 750 亿到 1500 亿美元的额外资本投资，才能扩大到所预计的 2,000 GWh 产能（其中一些投资已经在 2020 年之前投入）。同样，到 2050 年，如果制造设施的成本无法下降，我们可能需要多达 3 万亿美元的投资。这处于估计值的上限，并且由于一些原因可能不太准确。

首先，我们描述的每一种材料改进都会随它所实现的能量密度增加而成比例地降低每 GWh 的车间单位成本。例如，如果新的负极和正极使每个出厂电池的能量增加一倍，那么车间的 GWh 容量就会增加一倍，而工厂的额外投资为零。这意味着仅通过技术升级，工厂的每 GWh 单位资本需求就减少了一半。

其次，前面描述的制造创新将通过加快该过程，在降低制造成本方面发挥重要作用。随着该过程的加速，同一家工厂每年会生产更多的电池和更多的 GWh 容量。虽然很难准确估计总的改进量，我们认为可以合理地假设，到 2030 年比今天的低端水平至少可以提高 2 倍，从 2030 年开始建造的新工厂的成本将低于 2500 万美元/GWh——而且由于建造的每个新工厂的累积，基于这样的成本，2030 年到 2050 年的大规模扩展阶段的成本可能不到 7500 亿美元，而不是数万亿美元，从而进一步加速过渡转变（图 12）。

汽车制造商、电池制造商与垂直整合。所有传统汽车 OEM 都清楚，未来几十年所有乘用车都将电气化，因此动力过渡的主要平衡点正在出现，汽车制造商突然发现他们依赖于自己的供应基础，特别是电池制造商。这不是汽车 OEM 习惯所处的地位，它们在上个世纪已经在传统内燃机方面建立了强大的供应链。

与发动机和机械底盘组件不同，能够以汽车业的规模、质量和成本提供锂离子电池的锂离子电池供应商数量微乎其微——只有之前列出的 6-7 家。需求的快速变化也带来了重大挑战，即电池供应商在没有坚定承诺的情况下不会建造工厂，但汽车制造商在不清楚几年后的需求会是什么样子的情况下会犹豫不决。当对电动汽车的需求超过电池供应时，OEM 将面临供应不足和电池价格上涨问题。



图 12. 世界各地的锂离子电池工厂，从左上角沿顺时针方向：特斯拉在内华达州的 35 GWh 工厂；宁德时代在中国宁德的总部和 45 GWh 工厂；SK 在乔治亚州的 10 GWh 工厂；Northvolt 在建的 16 GWh 设施的渲染图。

结果是我们看到最大的电动汽车制造商通过部分垂直整合来更严格地控制他们的供应链。最初，日产公司为日产 Leaf 汽车生产自己的锂离子电池（但由于对电动汽车的承诺摇摆不定，10 年后出售了该工厂）。特斯拉与松下建立了商界最密切的合作伙伴关系之一——共同建设和运营超级工厂。大众向 Northvolt 投入巨资，而且正在与该公司建立合资工厂。松下和丰田也在朝着这个方向努力，宣布成立合资企业并投入数千名工程师参与该事业。最后，尽管仍然只是传闻，但特斯拉很可能很快宣布完全属于自己的电池生产计划。其他扩大控制的途径包括汽车制造商签署原材料（石墨、镍、锂等）交易合同，确保无论它们的电池供应商是谁，它们都能提供该电池制造商需要的原料。

出于多种原因，这些合作伙伴关系和垂直整合计划在此时非常有益。在一个年轻但发展极快的行业中，快速且相互协调的决策可以实现一个良性循环——准确规划需求并控制必要电池供应的成本。此外，由于核心锂离子制造工艺已经在消费行业发展了 30 多年，主要电池制造商拥有获得成功必不可少的机构知识——汽车 OEM 如果要进行垂直整合，也需要获得这些知识。在该行业于 2030 年成熟后是否还需要这样做，这仍有待观察。

现有电池制造商的机构知识也对电池制造领域的新入者构成了障碍。专注于汽车行业的最新电池制造商 Northvolt 似乎是一个良好的开端，它从现有的全球制造商那里聘请了具有电池制造知识的专家，并有机会获得低成本的可再生电力以及在当地获得镍。它们在供应欧洲市场方面拥有重大的结构优势，并与宝马和大众签订了合同，但只有 5 年以后才能看到结果。Farasis 是另一家雄心勃勃的参与企业，它始于一个现有的电池团队并且已经与戴姆勒展开合作。但所需的关键工程师目前在全球都是一种稀缺资源，而且要获得关键数量的人才也将变得越来越难。

第三个原因是 OEM 拥有使用情况数据，这对于电池制造商设计特定于车辆应用的电池非常有帮助。它们还能够为特定模组协同设计电池，从而更好地优化电池、电池包和车辆的安全性、性能和成本。

对交通和电网的影响

从传统的锂离子电池到先进锂离子电池，未来 10 年的创新将对所有地面交通的电气化产生重大的加速效果。自 2011 年以来，我们已经看到全球电动汽车销量以每年 30-50% 的速度增长——我们预计这种令人难以置信的增长将继续下去。到 2030 年，产能将达到 2,000 GWh，全球将购买 2000-3000 万辆插电式汽车（取决于电池包尺寸）。所有上市新车都是电动汽车还需要更长的时间，之后还需要 10 年才能取代正在流通的内燃机汽车，因此到本世纪中叶，我们几乎不可能让道路上的汽车全部是电动汽车。

另外还有两个交通趋势将会发生融合，并且会加速向电动汽车的转变。第一个趋势是按需叫车服务的大幅扩张——优步、Lyft 和其他公司——它们在不断增加这些车辆的行驶里程数。典型的车主每年可能行驶 12,000 英里，而按需驾驶的司机每年可以行驶 50,000 英里。这使得总体拥有成本偏向于可变成本（保养和燃料）而不是固定成本（车辆折旧）。这就是电动汽车的亮点——每英里的成本，夜间以适当的电费充电的电动汽车约为 2.5 美分/英里。相比之下，一辆每加仑汽油能行驶 25 英里的轿车和 3 美元/加仑（0.66 欧元/升）的汽油成本相当于 12 美分/英里，运营成本高出约 5 倍。这两个数字看起来都很低，但对一名全职司机来说，这两个数字之差相当于每年节省 5000 美元——在汽车的整个生命周期内节省 5 万美元。此外，电动汽车需要的保养也要少得多。当然，关键在于要让电动汽车的前期成本足够低，能够与典型的汽油轿车竞争。

随着交通模式向自动驾驶转变，电动汽车在大量使用时相对于汽油车的主要成本优势将变得更大。很容易想象按需自动驾驶汽车 (AV) 的平均行驶里程是人类司机的两到三倍（有些汽车一天 24 小时都在行驶，但需求会波动，因此在许多时间段，某些自动驾驶汽车会停驶）。这种 2-3 倍的里程增加将转化为在自动驾驶汽车的 10 年寿命中再节省 10-15 万美元。为了使这些成为可能，必须首先实现我们上面讨论的打造 100 万英里以上电池的创新。类似的分析可以扩展到中型和重型卡车，可以让我们弄清楚亚马逊和沃尔玛等公司为何突然对这个话题感兴趣。

虽然我们的分析几乎完全专注于地面交通，但值得注意的是，海上和空中旅行的电气化也有合理的机会，尽管比地面交通要小众得多。由于运营成本更低，当地渡轮可以并且将会转向电气化运营。在航空旅行中，用于当地运输的电动垂直起降 (e-VTOL) 系统的出现不仅将取代传统的直升机，甚至开始扩大市场规模，降低运营成本，并提供一种本质上更安全的设计，在系统由电池供电时，带有备用电气系统的多电机系统就可以实现这种设计。

在电网方面，预期的影响很明确——我们在这里提出的先进锂离子电池的 2030 年愿景将解决大部分间歇性问题，从而实现 100% 使用可再生能源。一块可以充放电循环 1 万次，寿命达 30 年，前期成本为 50 美元/kWh 的电池，将与所有太阳能和风能装置配合使用。这将使昼夜间歇性问题甚至几天间歇性问题不再是问题。仍然需要确保可再生能源在极少数情况下不会导致每周间歇性问题，为此可能需要使用不同的、持久的储能化学方法。然而，锂离子电池仍将是电网上的主要储能方式，因为日常需求要大得多。

结论

储能、先进的锂离子电池和电动汽车的未来非常明朗。化学和材料领域拥有巨大的创新机会，可以设计出更好的锂离子组件，这些组件可以在现有的工厂以及未来 10 年在世界各地建造的许多工厂中投产。锂离子电池能够同时提供 50 美元/kWh 的成本、快速充电、1 万多次循环、100 万英里以上的续航里程和 30 年的寿命，所有这些都是用世界各地可找到的丰富原材料制造的并可回收利用，这一现实在未来 10 年内触手可及。随着世界从基于化石燃料的经济转变为完全以太阳能和风能为动力的经济，对这种电池的需求将达到前所未有的水平，到本世纪中叶，每年的需求量将高达 30,000 GWh。

现在让我们回到实验室和工厂，开始建造吧！

额外内容：固态或锂金属的虚幻希望

过去几年，媒体对固态电池进行了热烈讨论，十几家初创企业的投资总额高达数亿美元。虽然这项技术看起来像电池的圣杯是有技术原因的，但现实是，假设这项技术可行（这是 40 年发展后的一个很大的“假设”），也可能只能在市场上找到小众的机会。

梦想的理由。称该技术为“固态”并不能说明真实的情况——使用“固态”一词指的是用固体取代传统锂离子中的电解液。这样做的原因是能够用锂金属负极来完全取代石墨负极。更好的叫法应该是“锂金属负极”技术，该技术在传统锂离子电池诞生之前就有大约 40 年的技术和商业挑战辉煌历史。

使用纯金属锂的吸引力在于，它存储的锂密度比石墨中存储的密度要高得多，从而提高电池能量密度。纯金属锂的比容量为 2062 mAh/cc，远高于石墨中 600-630 mAh/cc 的额定锂水平（在完全锂化后的材料水平）。从石墨转向纯金属锂可以提高约 50% 的能量密度，从而大大降低每 kWh 的单位成本。

严酷的技术现实。有很多技术理由可以怀疑，经过 40 年不成功的锂金属负极开发，这次除了“固态”品牌之外，还会有什么根本不同的成果。有无数的技术挑战需要克服，首先是锂枝晶析出的风险。锂与其他金属一样，具有使其在析出到电极膜中时附着到高点而不是低点的特性。这会导致在负极上形成锂尖峰（枝晶），这种枝晶会刺穿隔膜，与正极形成短路，并导致电池发生灾难性的热失控（起火）。完全消除这些枝晶是锂金属负极最大的根本性挑战。

金属锂电池发生故障的可能性取决于负极基材（铜箔）、固态电解质和沉积锂的化学和物理均匀性。析锂会导致电池的体积发生变化，如果这些应力集中在任何不均匀的位置，就会产生导致故障的应力。大多数陶瓷或玻璃/陶瓷电解质都具有预先存在的小缺陷，例如晶界、孔隙、杂质、夹杂物、位移等，除非使用非常昂贵的平面蒸镀技术来制造它们。(i) 固态电解质的特性或 (ii) 固态电解质与铜箔之间的接触或 (iii) 铜集流体特性的任何微小变化，在工厂中已发现缺陷电池的最佳情况下会导致产能下降，或者更可能导致在实际使用中过早出现故障。

在一些具有极均匀、无定形和无晶界固态电解质的小电池（电极表面积 $<0.01 \text{ m}^2$ ）中，已经证明了可以实现长循环寿命，因为从统计上讲，制造这样一个没有单一缺陷的小电池是可能的。一些测试表明，这些小电池的循环寿命长，不会形成枝晶，但这通常是在非常低的充电速率下完成的——对于实际的电动汽车使用者来说，这种速率太低了。不幸的是，以电动汽车的相关速率 ($4\text{-}20 \text{ mA/cm}^2$) 充电会显著加速锂枝晶的形成并导致灾难性故障。更具挑战性的是，防止具有约 500 m^2 高容量电极的汽车电池在快速充电后形成危及生命的缺陷，在统计上是不可能避免所有缺陷的 - 这是完全不同的情况。这需要纳米级精度的半导体级设备，以及仅用于制造电子芯片和硅太阳能电池的工艺，但对电池而言，成本要高出几个数量级。没有任何技术能够有意义地降低此类成本。过去 10 年来的很多尝试都未获得成功²¹，而且即使开发出良好的无缺陷电解质，也可能还不够。²²

²¹ K. Kerman, A. Luntz, V. Viswanathan, Y.-M. Chiang, Z. Chen, “综述——阻碍固态锂离子电池发展的实际挑战”, *Journal of The Electrochemical Society*, 164(7) A1731-A1744, 2017 年 (DOI: 10.1149/2.1571707jes); R. Chen, Q. Li, X. Yu, L. Chen, H. Li, “接近实用的固态电池：与固态电解质和界面相关的稳定性问题”, *Chem.Rev.* 120, 第 6820-6877 页, 2020 年 (DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00268)

²² R. D. Schmidt 和 J. Sakamoto, “固态电解质电池的原位非破坏性声学表征”, *Journal of Power Sources*, 324, 第 126 页, 2016 年 (DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.05.062)

如果克服了这些材料和设计挑战，制造挑战将赫然出现。制造中的一个关键考虑因素是正极的压实密度，这对于实现高能量密度和低成本至关重要。将固态电解质与正极颗粒混合时，要在电极中获得高正极比例需要在形成电极时使用高温和高压，同时保持过程中无水分。如果在较低温度和无压力的情况下进行此类加工，会导致正极活性比例较低，从而使能量密度性能更差且成本更高。固态电解质电池实际上需要在含有水分（例如，普通空气）的环境中生产电极以降低生产成本，但由于金属锂与空气中的水蒸气极易发生反应，金属锂负极需要在在组装成电池之前完全放电（无锂）状态 - 极大地限制了可用的技术选择。如果在已充电状态下用金属锂构建固态电池，则需要干燥的空气环境，这既昂贵又与目前全球正在建造的超级工厂不兼容。

此外，固态电解质很重（是液态电解液的 2-4 倍），经常使用有毒、昂贵或稀有的元素，易碎，在加工过程中或在车辆使用过程中即使受到很小的应力，也容易发生微破裂。这一限制导致对使用这些固态电池的电池包的要求更加严格——要求构建较大的机械结构以保持电池处于恒定压力下并非常牢固地固定。

更严酷的市场现实。技术障碍已经带来很大的挑战性，而未来几十年固态技术的市场现实将更糟糕。如上所述，固态电解质与现在世界各地正在建造的超级电池工厂根本不兼容。未来 10 年，固态技术不太可能达到 GWh 规模，到 2030 年，全球将有 2,000 GWh 的产能与之不兼容。如果使用金属锂负极的固态电解质的性能显著提高，特别是按每 kWh 单价计算，肯定会有新工厂建造起来——但实现这一优势的途径尚不明朗。

降低金属锂的每 kWh 单价的途径是增加能量密度——在不增加成本的情况下储存更多能量。不过，目前正在商业化的硅负极能够达到与金属锂所承诺的类似的能量密度改进。纯金属锂的理论密度经常被提及，人们会本能地认为没有比纯锂更能储存锂的了——但实际上，与纯锂相比，硅能够将锂原子拉得更近，硅合金 $\text{Si}_4\text{Li}_{15}$ 可达到 2190 mAh/cc，而纯金属锂只能达到 2062 mAh/cc。为一种新的电池技术建造 1000 亿美元以上的工厂，既不具备每 kWh 成本优势，相对于未来基于硅负极的电池能量密度优势，其能量密度在市场上也不具吸引力。

话虽如此，为了电动汽车革命，我们很乐意在固态电池的讨论上被证明是错的。世界需要更好的电池，如果努力进取的科学家和工程师找到克服这些挑战的方法，将价格降低到 50 美元/kWh 并转变能源行业，我们很乐意他们的技术成功欢呼雀跃并同时在市场上与其竞争。

作者简介

Gene Berdichevsky - 联合创始人兼首席执行官

Gene Berdichevsky 是 Sila Nanotechnologies 的联合创始人兼首席执行官。在共同创立 Sila 之前，Gene 是特斯拉汽车公司的第七位员工，担任 Roadster 电池的首席工程师，领导开发了世界上第一个安全、批量生产的汽车锂离子电池系统。

Gene 拥有斯坦福大学的两个学位：专门研究能源和材料的工程硕士学位，以及机械工程学士学位。Gene 与他人共同拥有 42 项专利并且合著了 4 篇经同行评审的学术文章。Gene 曾入选福布斯 30 岁以下的 30 人名单、麻省理工科技评论 35 岁以下的 35 人名单，并且是保罗和黛西索罗斯新美国人奖学金的获得者。

Gleb Yushin - 联合创始人兼首席技术官

Gleb Yushin 是 Sila Nanotechnologies 的联合创始人兼首席技术官。他还是佐治亚理工学院材料科学教授和 Materials Today 的主编。Gleb 与他人共同拥有 110 多项美国和国际专利以及专利申请，合著了 160 多篇经同行评审的学术文章，这些文章已被引用近 30,000 次。鉴于他对储能材料开发的贡献，Gleb 获得了无数奖项，并被电化学学会公认为世界上最有影响力的科学人物之一。

他当选为材料研究学会会员、电化学学会会员、欧盟科学院院士和国家发明家学会院士，对推进材料和储能研究做出了杰出贡献。Gleb 拥有理工学院物理学学士和硕士学位，以及北卡罗来纳州立大学材料科学博士学位。