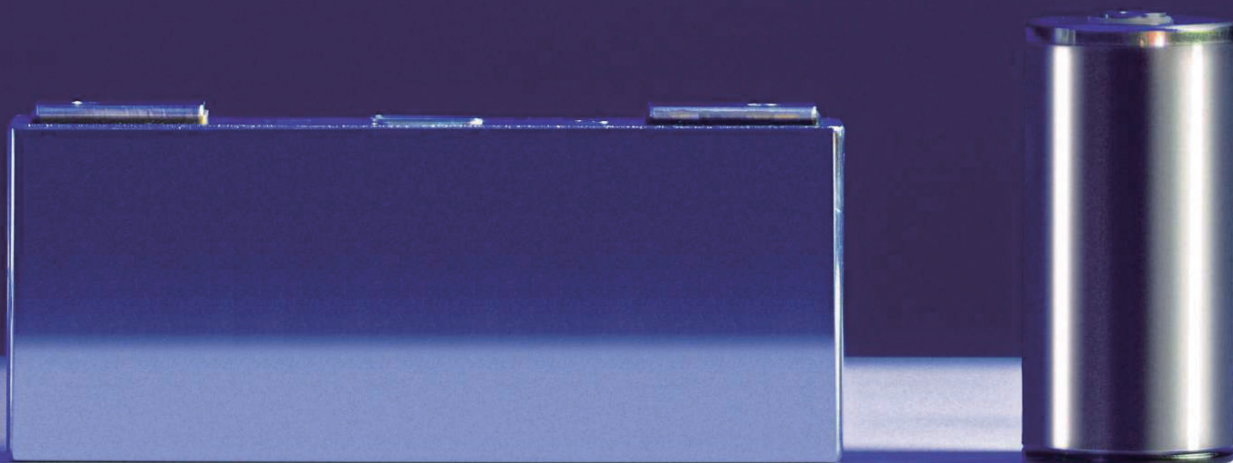




动力电池的进化

Thomas Günnel

(编译自德文版 Automobil Industrie)

摘要: 人们对电动汽车动力电池的期待是续驶里程更远、充电时间更短、成本更低并且可作为储能设施,将来还可以回收再利用。动力电池能否将所有这些优点集于一身呢?目前研发到什么水平了?本文将与您一起讨论动力电池的进化。

关键词: 动力电池;材料;单体电池

0 前言

电动汽车的续驶里程主要取决于动力电池和行驶工况(城市还是高速公路),而且很容易受到温度的影响。无论如何,动力电池价格合适的情况下,功率越大的电动汽车就越有可能受到市场的欢迎。这不仅关系到续驶里程,还涉及充电时长。

作为电动汽车的核心,动力电池的成本约占整车总成本的30%~50%。以当前主流的锂离子动力电池为例,主要原因是锂等金属价格昂贵。有没有性能更好、价格更便宜的替代品呢?

1 寻找替代材料

目前,动力电池和电机所使用的主要原材料包括:

锂、钴、镍、锰和石墨,此外,电机中还会用到钕、镨和镱,这些材料中很多都是稀贵金属。哪些潜在的原材料有可能作为替代品呢?

钠离子电池的出现提供了一种更经济的替代方案,并且在性能方面有着截然不同的表现。宁德时代曾在2021年推出了第一代钠离子电池,虽然能量密度达到了 $160 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,但仍无法与锂离子电池相媲美,不过有很大潜力。力神电池公司2024年2月最新推出的第二代圆柱形钠离子电池,能量密度也是 $160 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 。

宁德时代正在研发第二代钠离子电池,据悉能量密度可能会提升到 $200 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,这个水平跟磷酸铁锂电池差不多,并开始逼近三元锂电池了。三元锂电池的能量密度一般在 $180 \sim 230 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,高镍的三元锂电池很容易达到 $250 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,但是高镍会

增加电池的不稳定性。目前业界三元锂电池系统的能量密度最高已经可以达到 $255 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 了。这里的“三元”是指正极材料包括镍锰钴（NMC）或镍钴铝氧化物（NCA），目前大多数汽车制造商都使用 NMC。

“由于钠离子电池的生产方式与锂离子电池非常相似，因此只需要对生产基础设施进行相对较少的调整和投资就可以转产了。”马丁·温特博士说，他是明斯特 MEET 动力电池研究中心和亥姆霍兹研究所的创始人和科学主任。这倒是一个很好的衔接。不过将来钠离子电池在价格上是否也具有竞争力，还将取决于锂的价格下降趋势。

2 电极的变化

弗劳恩霍夫研究院的一份关于锂离子电池形势发展的研究报告中提到，许多制造商希望使用镍基（Ni）氧化物作为正极和负极材料。

“基于铁（Fe）和锰（Mn）的材料使用可能会越来越广泛，并具有相当大的成本优势。”弗劳恩霍夫国际统计学会在其博客文章《动力电池的变革》中如是说，文中还提到“硅（Si）作为正极材料也将发挥越来越重要的作用。”“硅是目前负极活性材料石墨的可能替代品，因为硅的储量比石墨高 10 倍，它可以显著提高锂离子电池的整体容量。”温特博士说。

这意味着电极的材料和结构正在发生变化。研究人员预计未来 5 ~ 10 年内，电极涂层将更厚，也许会超过 $100 \mu\text{m}$ ，以后常见的电极厚度可能在 $75 \sim 110 \mu\text{m}$ 之间。使用电极堆可以更有效地将更多的能量传递到动力电池包层面。该博客表示这将对热耦合和电耦合产生影响，特别是大尺寸的动力电池。

电解质也是重要一环，就性能而言，基于液态电解质的传统技术，研究机构预计到 2025 年峰值体积能量密度可达到 $870 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ ，到 2030 年可达 $950 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ 。

3 磷酸铁锰锂电池

磷酸铁锰锂电池是替代磷酸铁锂电池的一个切实可行的方案，宁德时代已经开始量产。“与磷酸铁锂电池相比，磷酸铁锰锂电池能提供更高的电压，”温特博士解释道，“当然，是否真的是更好的替代品，还必须从使用寿命的角度进行评估。”

目前，磷酸铁锰锂电池的使用寿命大约在 800 ~ 1000 次循环，具体取决于多种因素。根据温特博士

的说法，采用普通 NMC 的高能量电池一般可达到约 1000 ~ 1500 次循环。而磷酸铁锂电池系统的循环次数已经达到了 3000 ~ 3500 次。

“循环次数取决于使用哪种材料（即使化学成分相同，制造商和类型也各不相同）、哪种电极和哪种单体电池形式。很多情况都有可能发生，但最终还是取决于应用。不过就正极材料而言，磷酸铁锂电池技术已经比较成熟了。”温特博士说。

4 固态电池尚需时日

目前所有动力电池都使用液态电解质，那么固态电池前景如何呢？

弗劳恩霍夫国际统计学会在一份报告中指出：“汽车市场拥有最大的整体潜力，并有可能在中长期内成为固态电池的主要应用领域。”弗劳恩霍夫工业研究所也表示：“预计从 2028 年开始，汽车市场可能是氧化物固态电池的第一个应用领域。”

有些汽车制造商已经在讨论固态电池原型车的试生产了。宝马汽车计划在 2025 年前推出“第一辆采用固态电池技术的样车”，其动力电池很可能来自固态能量公司（Solid Power），该公司的全固态电池的参数是：能量密度为 $930 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ （ $390 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ），充电次数超过 1000 次，充电时间少于 15 min。大众汽车也预计将在 2025 年或 2026 年让大家看到首批批量生产的固态电池新车。大众汽车正在与美国量子景观公司（QuantumScape）合作开发动力电池技术。

5 单体电池形式的发展

尽管方形、圆柱形、棱柱形这三种最重要的单体电池形式的能量密度将继续趋同，但方形单体电池也许将继续引领这一领域的主流发展趋势。

研究人员预测：圆柱形单体电池在 2025 年的体积能量密度能达到 $790 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ ，质量能量密度能达到 $260 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ，2030 年达到 $870 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ （ $295 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ）；利用电极堆和新材料，中容量棱柱单体电池的能量密度在 2025 年有望达到 $770 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ （ $280 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ），到 2030 年可达 $840 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ （ $315 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ）；而大容量磷酸铁锂电池的能量密度预计在 2025 年之前仍将低于 $500 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ 。

而“锂离子电池的发展前景”研究报告预计，基于更高的电压，棱柱形磷酸铁锰锂电池的能量密度到 2030 年可达到 $580 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ （ $230 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ）。比亚迪的扁长型

“刀片电池”其实也是一种磷酸铁锂电池，与长宽比较平衡的电池设计相比，能量密度还较低（ $140 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ），但到 2030 年有望达到 $200 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 以上。

“虽然单体电池形式的选择会对动力电池的性能产生重大影响，但目前似乎还没有找到适合相应应用的完美形式。”弗劳恩霍夫国际统计学会助理研究员克里斯托夫·尼夫（Christoph Neef）评论道，“几年前做出的有关形式或现有供应关系往往在选择过程中起主导作用。”根据弗劳恩霍夫的研究，这三种单体电池形式都具有巨大的发展潜力：“这始于材料的选择、电极和动力电池结构的设计、动力电池的生产，并延伸到动力电池的集成。”

宝马汽车计划从 2025 年起在其新车型中使用圆柱形单体电池，其统一直径为 46 mm，高度为 95 mm 或 120 mm。在之前版本的基础上，其最新采用的电池负极中镍含量更高，钴含量更低，正极的硅含量有所增加。“因此，我们的电池体积能量密度增加了 20% 以上。”宝马汽车的发言人解释说，但他没有给出具体数字。“在开发之初，我们考虑了所有单体电池封装形式：方形、棱柱形和圆柱形。考虑到所有开发目标，最终我们决定在第六代车型上采用圆柱形单体电池。”他们将单体电池集成到动力电池系统中，动力电池组也可以成为车身的承重部分，模组已被省略。在动力电池层面，宝马的目标是将成本减半。

大众汽车将棱柱形单体电池用于其标准化的动力电池系统中。“棱柱形单体电池可以很好地适应我们目前已有的或日后准备投放市场的不同动力电池化学成分，”其发言人解释其背景时说，“根据客户的要求，一旦市场上出现所有相关的动力电池化学成分，我们的动力电池单元就可以配备这些化学成分：NMC、LFP、Hi-Mangan（高锰）等。”这意味着所有要求都能在同一种动力电池产品矩阵中得到满足：从入门级到复杂化学成分的高性能动力电池，直至固态电池。

6 CTP 和 CTC/CTB 结构

由于磷酸铁锂电池能更好地处理热过载和电过载，因此可以做更大的动力电池包，甚至可以省去模组直接做电池包，大幅简化动力电池管理系统，当然总体上可以降低成本和重量，使其有效体积变大。省去模组，意味着单体电池可直接集成到电池包如图中，即 CTP（Cell to Pack）结构，这样显然可以增加电池包的容量。一些制造商已经在系统层面上利用这种方式提高了空间利用

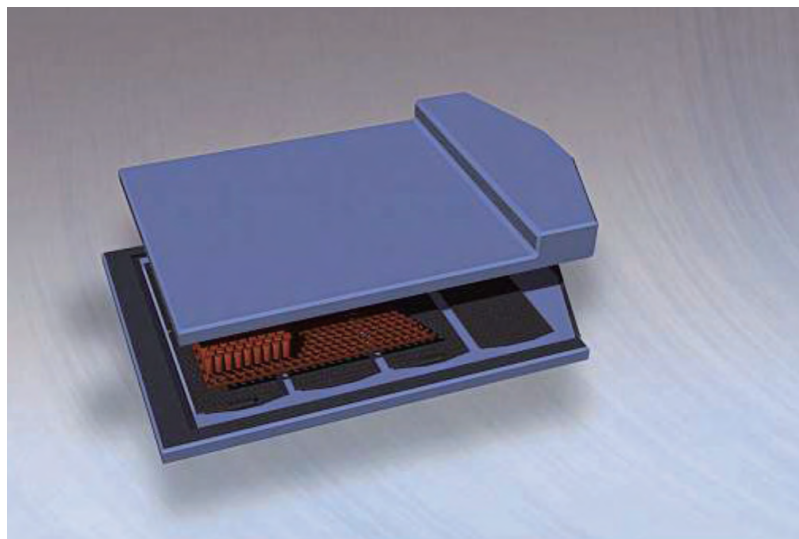


图 CTP 结构的电池包

率。宁德时代采用第三代 CTP 技术的“麒麟电池”在 2023 年已经量产，该电池就完全取消了模组，据称其体积利用率达到了 72%。不能不提的还有 CTC（Cell to Chassis）结构，有的称 CTB（Cell to Body），实际都是指电池车身一体化——将动力电池直接集成到车身底盘当中。比亚迪海豹是其电动汽车 e 平台 3.0 采用 CTB 技术的首款车型，它将电池上盖与车身地板合二为一，动力电池既是能量体，也是承重结构件。这种融合简化了车身结构和生产工艺，是对传统车身设计的一次颠覆性变革。

7 电动汽车作为储能设施

在讨论新能源概念（包括电动汽车）时，人们往往会忽视一点：我们使用的可再生能源越分散，越需要以分散的方式稳定电网。电动汽车的动力电池正好是一个很好的储能设施，用其进行缓冲，公共充电站也能更好地运行。很多地方都在考虑用电动汽车作为暂时不需要的能源存储设施，但研究表明，这种使用方式可能对动力电池的老化影响甚至比单独驾驶更大。

不过我们仍相信，正在发展的很多技术，特别是材料创新技术和智能化创新技术，一定会解决这些问题，让整个电动汽车时代更加美好。