

持续推进平台主线创新 不断抢占技术发展高地

曲国运

要时调整开发目标。在项目发布阶段，主要活动包括审核和交付研发成果，对项目计划和执行阶段的数据进行统计分析，为后续研发提供经验。

基于技术成熟度的成果管理

技术成果是重要的组织过程资产，是平台研发工作的核心价值体现，合理、科学、高效的技术成果管理和评价可以提升技术研发的质量。为此，上电所分阶段开展新技术开发和新品开发，通过建立技术成熟度模型和评价体系，将成果的成熟度进行细化分类，有效识别出研发成果中已经具备转移到产品研发活动条件的部分，提升成果转移转化的效率。针对技术成果建立清楚的指标体系，包括功能、性能、接口以及六性等方面的指标，保证成果应用有的放矢。同时，将技术成果根据重要等级划分为重大、重要和一般等，以更合理地体现成果的价值，并作为成果评价的依据。通过持续发布创新工作简报、召开创新成果发布会、编发新产品手册，让成果转移转化不断提速。

建设专业队伍

上电所鼓励富于创新激情、有较高成长性的员工参与平台建设工作，依托平台发展打造良好的创新生态，实现人力资源核心价值辐射，并以平台所分阶段开展新技术开发，培养一批具有重要影响力、高水平、强攻关能力的重点领域领军人才。在岗位体系建设方面，强化研究序列，设立全球化专家、平台首席、专家研究员、资深研究员、高级研究员、研究员等六大岗位层级，为技术人才队伍打开晋升通道。在人才培养方面，建立多层次、多渠道的创新型人才培养计划。鼓励平台成员在开展技术开发的同时，参与项目竞标、重大科技专项、重点创新项目、型号方案论证等工作，通过与国际标杆企业、高等院校、兄弟单位开展业务合作和交流学习，拓宽技术视野和专业视野，提升平台自主研发能力。在绩效管理方面，鼓励和引导平台技术开发工作成果化、产品化、效益化，建立结果导向的绩效管理机制，并结合平台发展规划及绩效指标达成情况，对平台成员实行“岗位能上能下、薪酬能升能降、人员能进能出”的人才激励机制，通过有序的竞争引导和人才流动，保证团队活力与创新能力的提升。

面向未来，上电所平台主线创新将秉承需求牵引、技术推动、架构赋能、体系支撑的理念，在充分调动所内外人才资源基础上，打造充满活力的创新生态，坚持自主创新，开发具有应用前景和竞争力的新技术、新产品，不断提高在航空领域的核心竞争力。（本文作者单位为航空工业上电所）

斯坦福大学发明锂电池集流体“三明治”结构 比能量密度最高提升26%

从上世纪90年代左右大规模商用开始，锂离子电池的能量密度大约以每年3%的速度提升。在增加能量密度的同时，人们希望锂离子电池能够更轻、更安全。锂电池主要将能量存储在电极材料中。因此，提升能量密度的常用思路就是优化和开发电极材料，或者直接增加活性物质在电池中的比例。

不过最近，锂电池研究领域的明星团队——斯坦福大学的崔屹课题组，通过革新电池中的非活性结构，实现了电池能量密度再增加8%~26%。成果作为封面，发表在Nature Energy上。该成果的第一作者是课题组的博士后叶玉胜和访问学者卓联洋。

的集流体是铝箔，负极则是铜箔。以电动汽车的常用锂电池为例，常用的铜箔厚度是9微米。也有厂家开发了6微米、甚至更薄的铜箔集流体。

“太薄的金属集流体，在机械强度上面临很大的问题。”叶玉胜说，由于电极材料涂附在集流体上，金属箔需要比较好的延展性和强度，否则会容易断裂。除此之外，生产超薄金属膜集流体，也会导致成本增加。

那如何既保持集流体的导电性、维持良好的机械强度，又减轻集流体的重量呢？新设计的方案是将集流体变成“三明治”结构：以轻质的有机物材料作为支撑体，在其两面复合约为500nm的铜薄膜。

由于有机物大大轻于金属，这样

都能够保持稳定。并且它本身是不燃的，这也能够提升电池的本身安全性。由于其化学稳定性强，也能够有效避免集流体与电池中其它组成成分的副反应。

从工艺成熟度上考虑，聚酰亚胺的工业制备已经很成熟，成本低廉。此外，采用碱分解的方式，就可以对聚酰亚胺进行回收，这也为将来回收废旧锂电池中的有机物提供了环保廉价方案。采用聚酰亚胺作为基底，满足了集流体的支撑性能。那么在这一层基底之上的金属箔，只需要满足导电性，不需要再考虑机械强度而做到几微米那么厚。

叶玉胜介绍，“500纳米左右的铜层的电导率，与纯金属薄膜集流体的电导率已经非常接近了。”这样在保持原有导电性能的同时就可以显著降低集流体的重量。

金属薄膜制备目前也有很成熟的工艺。为了控制制备成本，可采用连续溅射、无电镀等方法来制备超薄金属层，这能够为该技术的规模化生产提供广阔前景。

聚酰亚胺、金属膜的单独制备工艺有成熟的方案。因此，新型集流体的另一个问题是如何使金属膜与聚酰亚胺之间稳定地粘附在一起。针对这个问题，研究团队对聚酰亚胺的界面进行改性，增强了聚酰亚胺和金属之间的粘附力。

目前，从材料成本计算，新的集流体每平方米的成本约为1.3美元，而纯铜箔的材料成本约为每平方米1.4美元。这显示了新集流体在大规模生产上的成本优势。这项新技术已经通过斯坦福大学专利申请，团队也正在探索大规模生产的工艺。

有阻燃效果的集流体

研究对这种新型的集流体进行了安全测试。当暴露在明火中，传统的锂电池会立刻被点燃并且持续剧烈燃烧，直到将电解质燃尽。而采用了新型集流体的锂电池，则只能产生微弱的火苗，无法燃烧起来。

这是由于温度升高时，聚酰亚胺中添加的阻燃剂被释放出来，起到了阻燃的效果。通常而言，明火极易



Nature Energy 封面

使锂电池燃烧。“一般的电池安全测试不会这么做，因为直接拿明火去点锂电池是一种很严苛的安全表征方式，我们选择了这种更严苛的方式去评价它的安全性。”叶玉胜介绍。

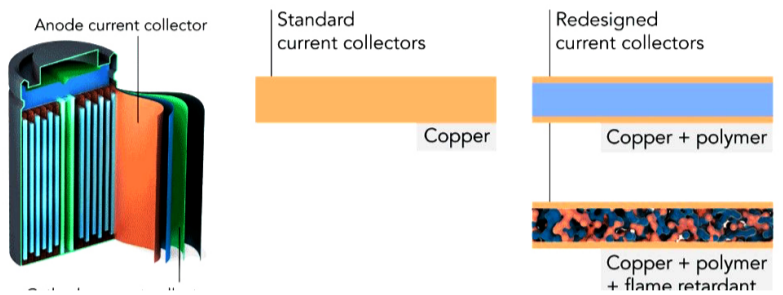
一直以来，高安全性和高能量密度之间，存在着矛盾。无论将阻燃剂添加到电解质、隔膜、或者正负极材料中，都是在锂离子的传输路径中引入了新的物质，从而影响离子传导，进而影响电池性能，最终导致能量密度降低。

从内部的结构来看，在电池充电跟放电过程中，锂离子会从电极材料的某一极，通过电解质，穿过隔膜，到达另外一极。

因此在这个过程中，只要加入新的物质，都会影响电池的性能。例如，将阻燃剂加入电解质中，就会降低电解液的电导率。

那么不参与锂离子运输过程的集流体就是存放阻燃剂的理想部位。但是传统的纯金属薄膜以高纯度的金属为原材料，很难将物质添加到致密的金属层中。新集流体以有机物作为基底，就可以通过不同的工艺，将阻燃剂复合进有机物中。

除了集流体对锂电池内部结构带来的革新，Nature Energy在一篇评论文章中还表示，这种设计理念可以扩展到锂电池的外包装设计。外包装占据锂电池总重约20%，运用这项技术开发更轻的外包装，能够进一步显著提高锂离子电池的能量密度和安全性。（麻省）



传统集流体和新型集流体的结构对比。

这种新型集流体比传统集流体轻80%；并且由于设计中添加了阻燃剂，还能有效防止电池燃烧。与常见的改善电极材料、或增加活性物质的思路不同，这个成果的新颖之处在于，从集流体这个非活性的部分入手，在能量密度、电池重量、安全性能同时实现了明显的优化。

“我们之所以选择集流体，是因为当把整个电池的结构进行拆分之后，发现传统的金属集流体占锂电池比重可达15%甚至更高。它由金属箔膜组成，重量大，功能单一，主要作为电子的传导载体。此外，集流体是电池内唯一不影响锂离子传输的组成部分，具有很大的开发空间。所以我们想通过优化集流体，让电池的能量密度再进一步提升。”叶玉胜介绍。

越来越薄的集流体 创新的“三明治”结构

业界总在不断尝试将集流体越做越薄。这是为了减轻这个非活性成分在锂离子电池重量中所占的比重。锂离子电池在充放电过程中，电解质中的锂离子，在正负极之间往返运动。而集流体作为电池中的非活性成分，不贡献能量。它的作用主要是承载正负极的电极材料，同时收集电流和传导电子。

集流体一般采用高纯度的铜或者铝作为材料，而高纯度的金属比较重。常见的集流体形式是金属薄膜，正极

制备出来的新集流体，总体厚度不增加的情况下（9微米左右），比原来的纯金属集流体变轻了80%。由于集流体的重量占比减轻，电池能量密度就能够提升8%~26%（具体数据依电池类型的不同而不同）。并且，有机物的易调性可以让研究人员在集流体中加入新功能。

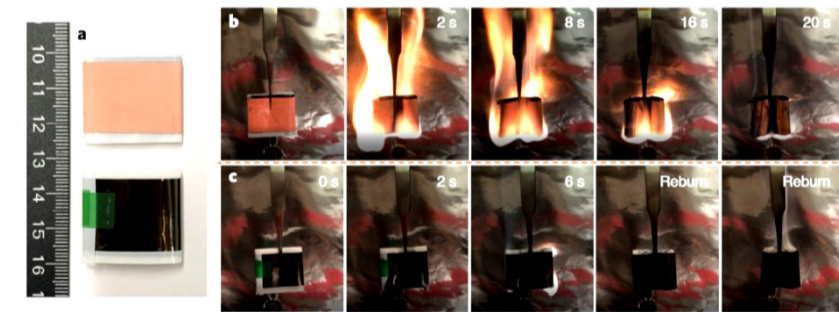
研究团队选择的有机材料是聚酰亚胺，并且在其中加入了阻燃剂。聚酰亚胺是一种常见的工程材料，已经被广泛使用。在上世纪60年代就开始被使用，最早的产品是电机的绝缘槽、电缆绕包材料，后来扩展到微电子航天、航空器及军事领域。它具有耐高温、耐化学腐蚀性、高强度等优点。

“金属密度很大，有机物的密度比较低，所以我们的思路是用有机物作为一个基底，来实现同样导电效果，同样有支撑效果的集流体，来替代现在商业上的纯金属薄膜型的集流体。”叶玉胜表示。

成熟的制备工艺

聚酰亚胺的热稳定性很高，能够承受400摄氏度的高温。相比之下，锂电池隔膜常用的PE、PP材料，在超过120摄氏度时就会发生收缩的情况。

以聚酰亚胺制备出来的集流体，热稳定性能够得到显著提高。甚至在电池出现了热失控的情况时，集流体



安全测试对比，上排是传统锂电池，下排是基于新型集流体的锂电池。

太阳能量来源的拼图终于补齐了

王昱

继2014年发现来自质子-质子链的中微子之后，在最新的《自然》论文中，Borexino又发现了来自太阳内部碳氮氧循环的中微子，补齐了太阳能量来源的最后一块拼图。

不论是远古神话还是现代科学，解释太阳能量来源都是它们重要的使命之一。中国神话的三只鸟，希腊神话的阿波罗，日本神话的天照大神，都是远古人类对太阳能量来源的想象。而近代科学中，从液体球冷却放热到物质引力塌缩，再到衰变元素放热，人类为解答太阳能量来源做了一系列尝试。

随着质能方程的提出，核聚变就成了最可能的太阳能量来源。而直到1938年，汉斯·贝特（Hans Bethe）提出了质子-质子链（pp链，Proton-proton chain）和碳氮氧循环（CNO循环）之后，人类才真正触及了太阳核心的秘密。而今天，位于地下深处的中微子实验室将目标指向九天之上的太阳。继2014年发现来自质子-质子链的中微子之后，在最新的《自然》论文中，Borexino又发现了来自太阳内部碳氮氧循环的中微子，补齐了太阳能量来源的最后一块拼图。

现在我们知道，每秒钟有超过10亿亿个光子，在名为太阳的天然巨型热核反应堆中碰撞反射后，飞过8分钟的路程，洒向地球白天一侧每一平方厘米的土地。核聚变为这个过程提供了能量，而氢原子通过核聚变转变为氦原子核的过程分为两种，分别为



太阳动力观测台拍摄到的太阳照片。

质子-质子链和碳氮氧循环。根据标准太阳模型（standard solar model, SSM），质子-质子链反应占了绝大多数，只有1.7%的4He是由碳氮氧循环产生的。在质量更大、核心金属丰度更高的恒星中，碳氮氧循环会占据更重要的地位。

飘忽不定的中微子

在太阳内部产生的光子可能需要在内部反射上万年的时间才能到达太阳表面，而在太阳核心核聚变过程中产生的中微子，由于只参与引力相互作用和弱相互作用，能几乎不受阻挡地从太阳核心以近光速到达地球表面。这也给了我们直接探测来自太阳核心的物质的机会。

不过也正是出于这个原因，探测中微子本身就是一件难事。地球上每平方厘米每秒会接收到600亿个来

自太阳核心的中微子，但它们几乎都不受影响地穿过地球。探测介质需要足够大、足够灵敏，才可能探测到中微子。同时，太过灵敏的探测器还必须屏蔽宇宙线的影响。因此，中微子探测器大多在地下，用厚重的岩层来屏蔽宇宙中各种高能粒子的影响，同时拥有数量庞大的透明探测介质，用以捕捉中微子在其中产生的零星闪光。

20世纪60年代晚期，在美国南达科他州矿井中的霍姆斯特克实验就探测到了来自太阳的中微子。不过，当时探测到的中微子只有理论预测的1/3，这也是所谓的太阳中微子问题。直到2001年，加拿大萨德伯里中微子观测站（Sudbury Neutrino Observatory, SNO）给出中微子振荡的明确证据，问题才得以解决。但是，这些实验都没能区分探测到的中微子



Borexino中微子探测器，在外侧包裹隔热材料来精细控制探测器温度。

是来自质子-质子链还是碳氮氧循环。

寻找太阳中微子来源

最终解决这一问题的，是意大利的Borexino探测器。Borexino位于意大利中部亚平宁山脉深处，实验设施上方有1400米的岩层覆盖，屏蔽了来自宇宙的大多数粒子。就算μ子仍能穿过其上方1400米的岩层，实验也会将其标记，并消除它的影响。Borexino探测器中包含了280吨超纯有机液体闪烁体，并在其中布置了2212个光电倍增管。中微子可能和闪烁体中的电子发生弹性散射，而被弹性散射的电子会产生光子。光电倍增管检测到这些光子后，反推电子在弹性散射时的能量和位置，就能推测出和其作用的中微子的性质，从而推测中微子来自哪种反应。而Borexino探测器也就此成为全球唯一一个能独立、实时地探测中微子不同成分的探测器。

2014年，Borexino探测到了来自质子-质子链反应的中微子。这是中微子探测领域里程碑式的成就，标志着人类从此可以分辨太阳中微子产生于太阳核心中哪种反应。

相比于质子-质子链反应，要探测到占比只有1.7%的碳氮氧循环就更困难了。探测的主要难度集中在碳氮氧

中微子的低能量和低通量，同时要将其中微子信号中分离出来。通过精确测量中微子的能量和时间分布，可以将太阳中微子和探测器中的放射性污染分离。



Borexino中微子探测器内部。

在这之前，Borexino用多年时间确保其闪烁体中的放射性污染降到最低水平。即使如此，由温度变化引起的微弱电流仍会让放射性污染从探测器外部向内部扩散。研究人员通过精细的温度控制减轻这一影响，从而实现碳氮氧循环中微子的检验。

终于，在经过十多年的测量之后，Borexino终于发现了来自碳氮氧循环的中微子。地球表面每一平方厘米，每秒钟大约有7亿个来自太阳碳氮氧循环的中微子飞过。大约占太阳中微

子总数的1%，和标准太阳模型预测的一致。Borexino科学家安德里亚·波卡尔（Andrea Pocar）表示：“探测到太阳中占比1%的碳氮氧燃烧，增强了我们当前太阳模型的信心。”这一成果发表于最新一期的《自然》杂志。

直达太阳核心

这一结果为解决太阳核心元素构成之谜提供了机会。天文学中，比氮重的元素都被称为金属。恒星核心的金属丰度会影响碳氮氧循环的速率，这反过来又会影响恒星的温度和密度特征，从而影响恒星的演化，以及外层的透明度。

太阳的金属性和不透明度会影响太阳中的声速。数十年来，日震学测量和太阳标准模型对太阳声速的预测一致，让人们模型充满信心。然而，最近对太阳的光谱测量显示外层不透明度明显低于预期，和日震学的数据产生了差异。对于CNO循环中微子的精确测量，为这一研究提供了独立的第三种测量方式，可以进一步揭示恒星的演化过程。

目前数据还不足以支撑对太阳核心元素组成的探测，但至少为实现这一目标提供了一条道路。未来的实验会通过寻找新方法去去除放射性污染造成的背景噪声影响，从而进一步提高Borexino的精度。同时，Borexino合作组织的巨大成就，让我们更加了解太阳，以及大质量恒星的形成过程，并很可能促使我们在这个领域定下一个要实现的目标。