

对比比亚迪刀片电池棱柱形电芯与特斯拉4680圆柱形电芯：设计及性能拆解分析文章

尤利乌斯·施耐德¹、乔纳斯·戈尔施¹、尼克拉斯·基斯勒^{1,*}、弗里德里希·莫里茨·弗里格斯²、多梅尼克·克洛海¹、因里希·海默斯¹

阿希姆·坎普³、玛丽娜·穆诺兹·卡斯泰罗¹、德国埃莱诺·西贝克

主要联系人：明斯特电化学能源技术，明斯特大学，德国明斯特市

3 弗劳恩霍夫陶瓷技术与系统研究所（IKTS），德国德累斯顿市

4

j.gorsch@pem.rwth-aachen.de (J.G.), m.frieges@pem.rwth-aachen.de (M.F.)

<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102453>

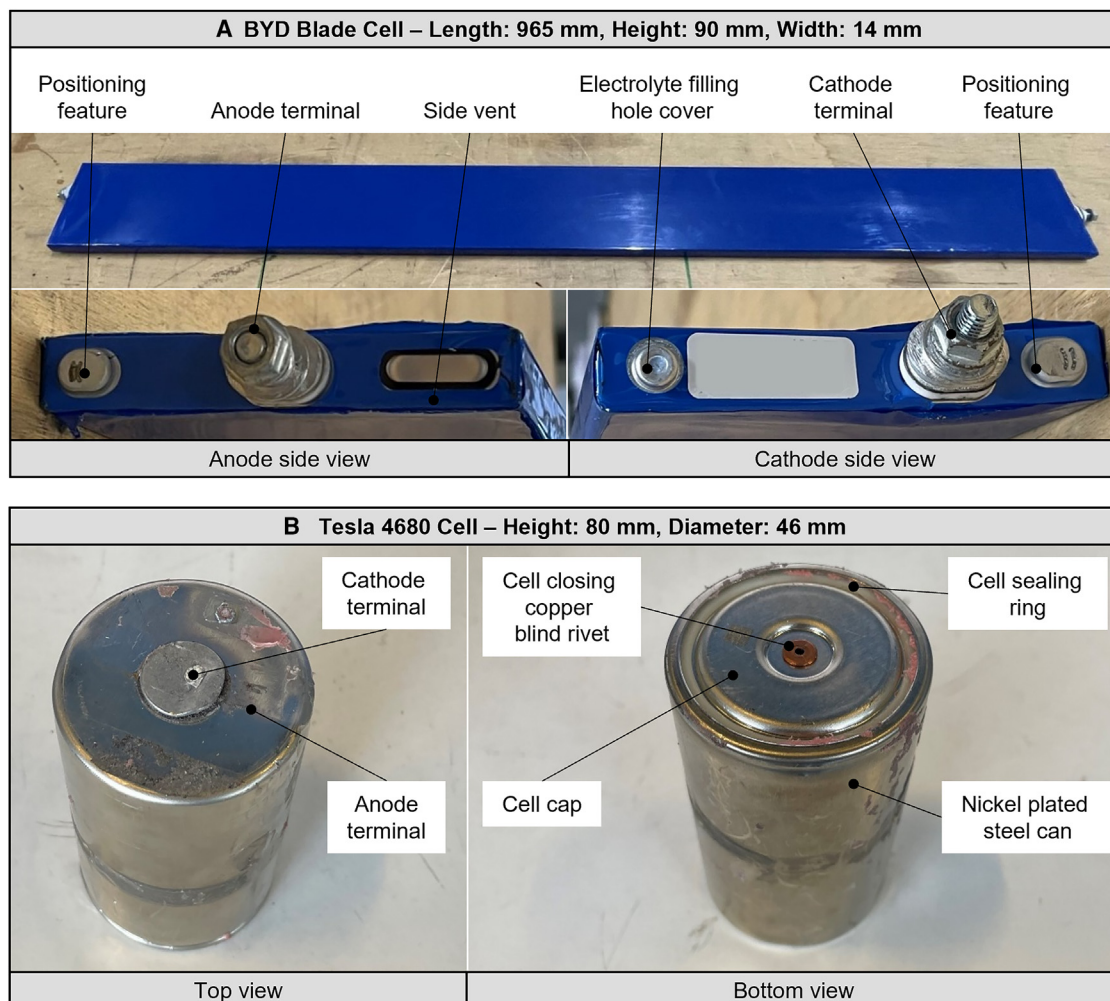
2023年，基于销售车辆数量，两家制造商主导了纯电动汽车（BEV）市场。1 特斯拉作为使用锂离子电池（LIB）的先驱，在2023年在欧洲和北美引领销售。与此同时，比亚迪最初是一家电池电芯制造商，已从电芯到整车级别成为创新领导者，并获得了全球销售的BEV的显著市场份额。2024年，比亚迪在总BEV销量上超过了特斯拉。2 2022年，特斯拉在美国加利福尼亚州和德克萨斯州开始生产4680圆柱形电芯，并从宁德时代（CATL）采购方形电芯。特斯拉4680电芯的体积和容量大约是Model 3之前使用的21700电芯的五倍，这使得能量密度更高，生产成本显著降低。3 特斯拉4680电芯还具有无极耳设计，进一步降低了生产成本。4 比亚迪依赖刀片电池，这是一种电池技术的创新方法。其目标是通过独特的电芯设计，以低成本生产长寿命且高安全性的电芯。5 电芯制造商通常在其电池数据手册中仅发布有限信息。这些数据手册提供测量的性能数据，但由于缺少测试条件细节以及充电限制和电芯老化行为的数据不足，需要更多科学相关性。6–8 关于机械结构和电芯特性的详细信息很少发布。

开发适用于电动汽车的锂离子电池（LIBs）重点关注优化成本、能量密度和功率能力，同时保持其他关键特性，如安全性和耐久性。9–11 电动汽车的电池选择和设计是在这些因素之间进行权衡，其中成本、能量密度和功率能力是基本要求。9–11 不同的电芯化学体系适用于各种应用：磷酸铁锂（LFP）电池具有成本效益并提供长寿命，使其适用于经济型车辆细分市场。相比之下，高镍化学体系（如NMC811）提供更高的能量密度，使其成为高性能和高成本细分市场的理想选择。12 这些化学体系之间的选择取决于重点在于成本、续航里程还是性能。12 近年来，存在一种趋势，即转向更大尺寸的电芯，因为这可以提高每单位电芯生产的能量含量，并降低系统层面的集成复杂性。3

本文旨在基于在提供汽车应用中使用的先进电池数据方面的进展。通过比较一种以成本为中心的电池设计（比亚迪刀片电池）与一种以性能为导向的电池设计（特斯拉4680电池），可以深入了解它们各自的优缺点和权衡。

本文对两个电池进行了机械、电气和材料性能的检测。第一个电池是由制造商特斯拉生产的圆柱形电池（特斯拉4680电池），直径为46毫米，高度为80毫米，用于2022款Y级车型。第二个电池是棱柱形





该电池尺寸为高90毫米、长965毫米、厚14毫米，由比亚迪（比亚迪刀片电池）制造商生产。特斯拉4680电池从一辆全新的2022版特斯拉Model Y电池组中拆卸，并由Munro & Associates公司分发。因此，文章开始时电池的确切老化状态不确定，但预计其健康状态（SOH）为100%。比亚迪刀片电池是从中国分销商处在线购得，其SOH为100%（2023年）。

本文旨在补充Ank等人、Baa-zouzi等人及Borner等人研究，提供特斯拉4680电池在特定设计或性能特征方面的更多信息，并介绍比亚迪刀片电池的设计数据。3, 4, 7 Ank等人的文章补充了4680特斯拉电池特定几何设计特征方面的更多信息，例如电极相对于隔膜的确切位置，以及更新的几何参数，例如隔膜高度。此外，文章还重点关注了制造工艺和顺序、电池电极的确切材料组成，以及

各自的材料成本。电池的电性能通过内部直接电流（直流）电阻的温度依赖性得到补充。Baazouzi 等人和 Borner 等人的研究通过特斯拉 4680 电池的修订生产顺序以及设计细节的补充数据，得到了更详细的电池组装建议生产顺序。两项研究都通过更详细的材料成分和成本数据得到了丰富。3, 4 本文的整体重点也是直接比较两种不同格式和设计方法的车用电池在机械设计、生产特点、电性能和材料成分方面的差异，以更好地理解不同电池设计决策的优缺点。

为下一代棱镜式或圆柱形锂离子电池（LIBs）的设计提供参考，本文比较并分析了以下几点：

- (1) 整体细胞数据，包括外部尺寸和能量密度

	cell	cell
Nominal capacity, Ah	23.125	135
Nominal energy, Wh	85.56	432
Nominal voltage, V	3.7	3.2
Voltage window, V	2.5–4.3	2.6–3.65
Weight	355 g	2.7 ± 0.3 kg
Volume, mL	133	1,216
能量密度（重量比），Wh/kg	241.01	160
能量密度（体积），Wh/L	643.3	355.263
阴极的面积容量 （计算得出），mAh/cm ²	4.99	2.393
Diameter/length, mm	46	965
高度，毫米	80	90
厚度，毫米	–	14 毫米
壁厚（侧边），mm	0.4	0.3
分隔符，mm	10	12
阳极涂层厚度，毫米	125	65
铜基板箔厚度，毫米	10	10
阴极涂层厚度，mm	75	70
铝基板箔厚度，mm	20	20
分隔层数量	2	78
阴极片数量（涂层上） 双方	1	38
阳极片数量（涂层上） 双方	1	39

(2) 细机械设计特点及其对电池组装过程的相关影响 (3) 每个电池部件的材料分布 (4) 材料成本 (5) 电池电极的精确尺寸 (6) 电池组装工艺流程 (7) 电池加热行为和直流电阻 (8) 电极的详细材料组成，包括所使用的粘合剂

本节将首先关注电池的机械设计和生产流程，然后探讨电池的电性能，最后总结电池电极的材料组成。

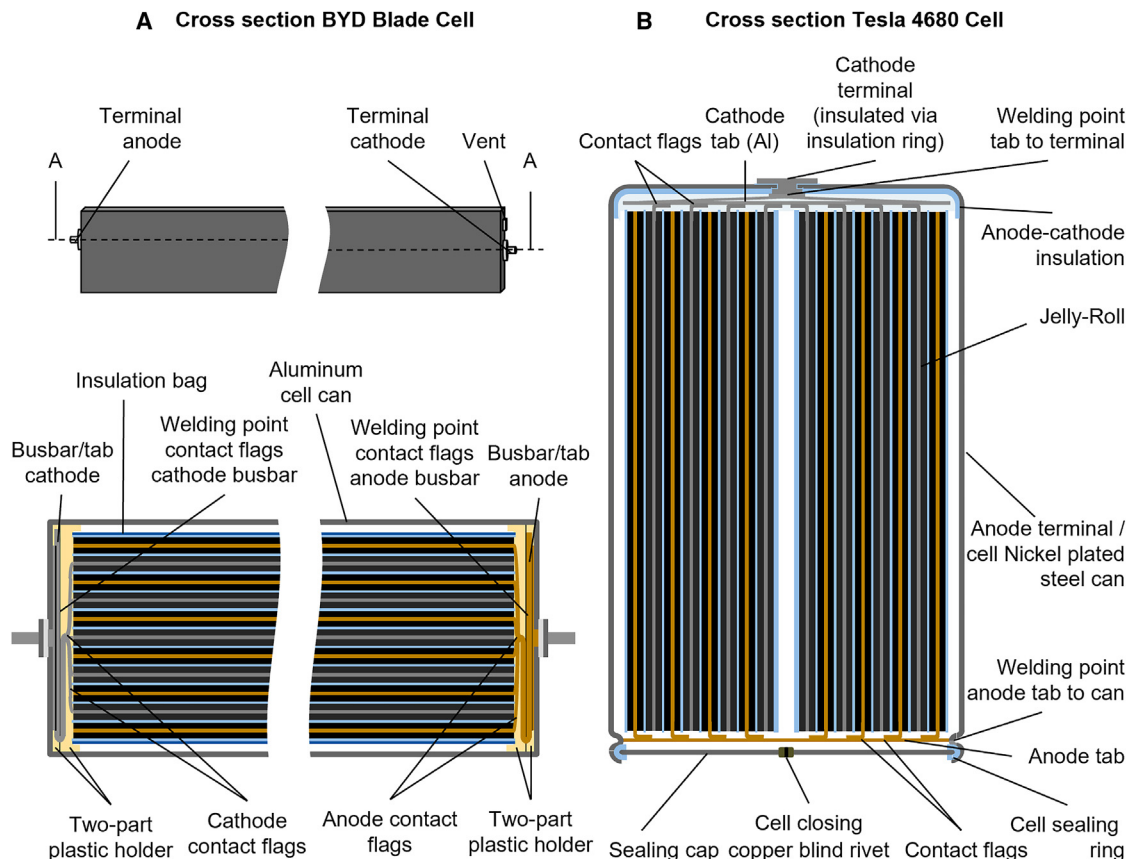
特斯拉4680电芯与比亚迪刀片电池的主要区别在于它们的形状：比亚迪采用大棱柱形电芯，而特斯拉4680电芯是大圆柱形电芯，体积显著更小（图1）。这两种电芯都体现了电芯尺寸增大以及电芯到模組的趋势。13–16 比亚迪电芯采用螺纹侧端子，便于实现电芯间的轻松拆卸连接。棱柱形设计是唯一

允许此类连接的格式。17 此外，它两侧都有销钉，可能用于包配置中的机械定位。比亚迪电池的铝制外壳用粘合聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）箔绝缘，而特斯拉4680电池的（据推测）镀镍钢外壳在电池外壳级别缺乏直接绝缘。18

7（能量色散X射线[EDX]检测结果证实，特斯拉4680电芯采用NMC811化学体系；表S2），而比亚迪刀片电芯使用LFP化学体系（根据电芯数据表规定并由EDX检测结果证实；表S3）。在C/10恒流恒压（CCCV）充放电循环中测量了电芯的容量和标称电压，并以C/20电流下的恒压截止点，平均计算电芯的充放电容量。电压窗口基于LFP和NMC811石墨负极电芯化学体系的极限。在电芯层面比较，特斯拉4680电芯的能量密度在重量和体积上分别比比亚迪刀片电芯高出1.53和1.83（表1）。所应用的负极材料（CAMs）实验获得的材料级能量密度分别为NMC811的720 Wh/kg和LFP的528 Wh/kg。19, 20 当将电芯级能量密度除以这些材料级能量密度时，特斯拉4680电芯和比亚迪刀片电芯的CAM利用率分别为33.45%和30.3%。因此，这两种电芯的CAM重量利用率相对接近。这一点很重要，因为较大的电芯通常由于无源元件比例的降低，能够实现更高的利用率。负极面容量是通过将标称电芯容量除以总负极涂覆面积计算的。表1汇总了主要的电芯级参数。

与18650和21700圆柱形电池21以及特斯拉22使用的方形电池不同，特斯拉4680电池的排气口朝向电池底部，而比亚迪刀片电池的排气口朝向侧面。这允许在发生故障时将排气引离乘客，对于特斯拉电池而言，还可以将其引离电气接触系统。特斯拉4680电池的壳体具有阳极电位，并作为负极。对于比亚迪刀片电池，两个极性都与壳体绝缘——壳体处于自身的电位水平。特斯拉4680电池的电解液注液孔通过铜铆钉封闭，而比亚迪刀片电池则通过焊接封闭。特斯拉4680电池的盖/正极通过密封圈绝缘，而比亚迪刀片电池的极柱通过塑料支架和橡胶O型圈绝缘。

比亚迪刀片电池采用单层Z形折叠电芯结构，包含38片双面涂覆的正极片、39片双面涂覆的负极片以及79层隔膜（由1片连续折叠的隔膜构成）。隔膜边缘经过层压处理——使得Z形折叠隔膜在电芯顶部和底部两侧的开口端被封闭，推测这是为了固定每片正极和负极片。在层压电芯边缘上方，通过胶带固定了一条塑料导轨（见图3）。两端的接触组件也通过胶带固定在电芯上。整个电芯连同接触组件的塑料支架被包裹在一个透明绝缘袋中。

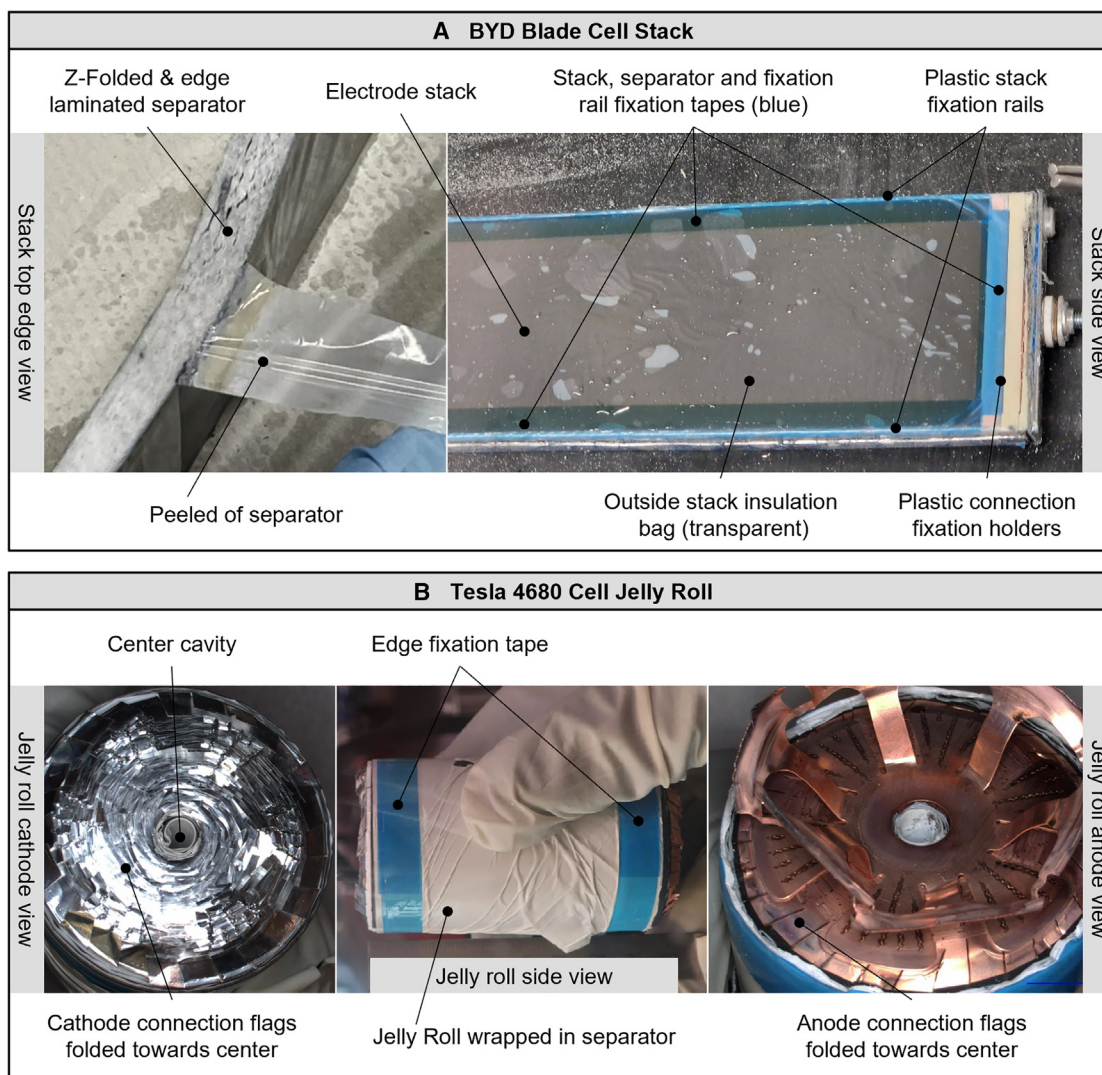


特斯拉4680电芯采用果冻卷式结构，被隔膜包裹，并在顶部和底部通过两条胶带固定（见图3）。果冻卷的中心是空的，据推测在生产过程中，需要通过一个点焊工具穿过此中心空腔，将正极片与电芯端子接触。

特斯拉的无壳电芯专利申请。23 标签的确切几何形状可在Ank等人的研究中找到。7 标签通过激光焊接焊接到凝胶卷上，激光焊接在六个三角形接触面上（图4）。阴极标签通过点焊焊接到端子上，阳极标签通过激光焊接焊接到电芯壳上。

比亚迪刀片电池电极具有典型的接触旗，从电堆中伸出。在两侧，它们被焊接到汇流排上，汇流排再连接到外部端子。接触通过两种焊接技术完成：首先，电极层的接触旗通过超声波焊接连接和压实，然后在下一步中，预先连接的旗通过激光焊接焊接到汇流排（图4）。这种方法的优点是激光焊接只需要从一侧接触汇流排，超声波焊接确保层与层之间的接触，为激光焊接做准备。这使得接触设计非常节省空间（图2），其中接触本身只占用一个电极箔堆叠折叠的空间。特斯拉4680电池电极/接触箔边缘（阳极和阴极）以一定角度被切割，然后折叠到另一个上，为端子创建接触面。这种所谓的无端子设计在

电极尺寸通过在手套箱中拆卸胶体卷堆叠，并使用卡尺和卷尺测量组件来测量。使用薄膜测量装置进行层和箔厚度测量，并计算5次测量的平均值以生成具有代表性的层或箔厚度。图5显示了两个电池的电极尺寸，表1列出了电极厚度和层数。值得注意的是，两个电池的电极箔厚度和阴极涂层厚度相似。在阳极涂层方面，由于电池阴极的比能量更高，特斯拉4680电池的涂层厚度几乎是比亚迪刀片电池的近两倍。两种电池的集流体标志边缘都有涂层——据推测是绝缘涂层，以保护电极边缘免受短路，正如Ank等人7所检测到的。特斯拉4680电池电极的尺寸

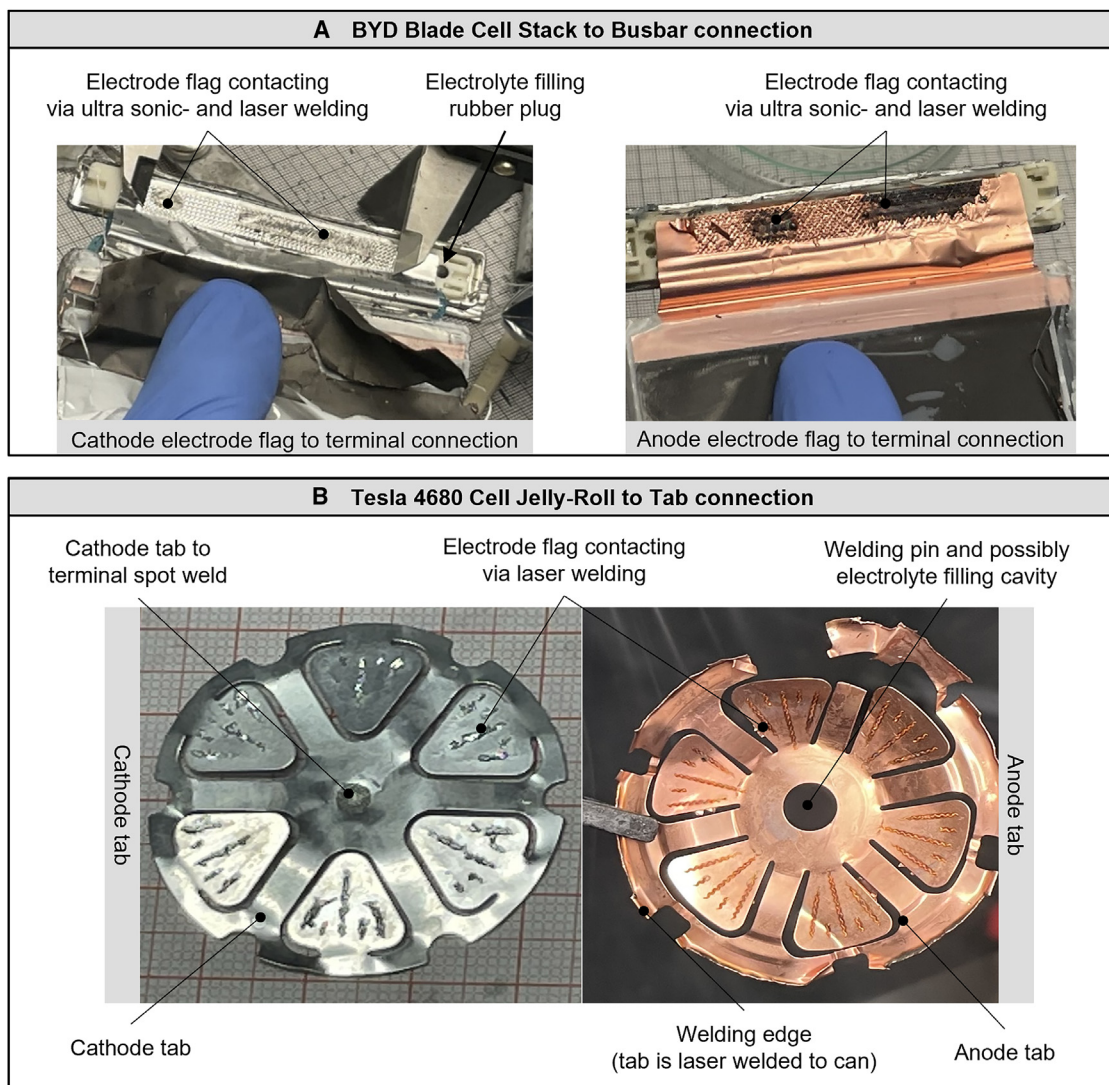


在卷制成 jelly roll 结构之前，显示电极的相对位置。比亚迪刀片电池电极中电流通过电极箔的路径显著长于特斯拉4680电池单元电极中的路径。对于特斯拉4680电池和比亚迪刀片电池，隔膜悬伸至负极的距离均为2毫米。负极悬伸至正极的距离对于特斯拉4680电池和比亚迪刀片电池均为1毫米。

每个电池单元的制造工艺流程，是通过分析电池的机械特性与组件，并与Heimes和刘等人^{24, 25}提出的棱柱形和圆柱形电池的理想工艺流程进行比较后确定的。两种类型电池的电极生产及电池组装的工艺流程如图6所示。虽然两种电池的电极生产预期将...

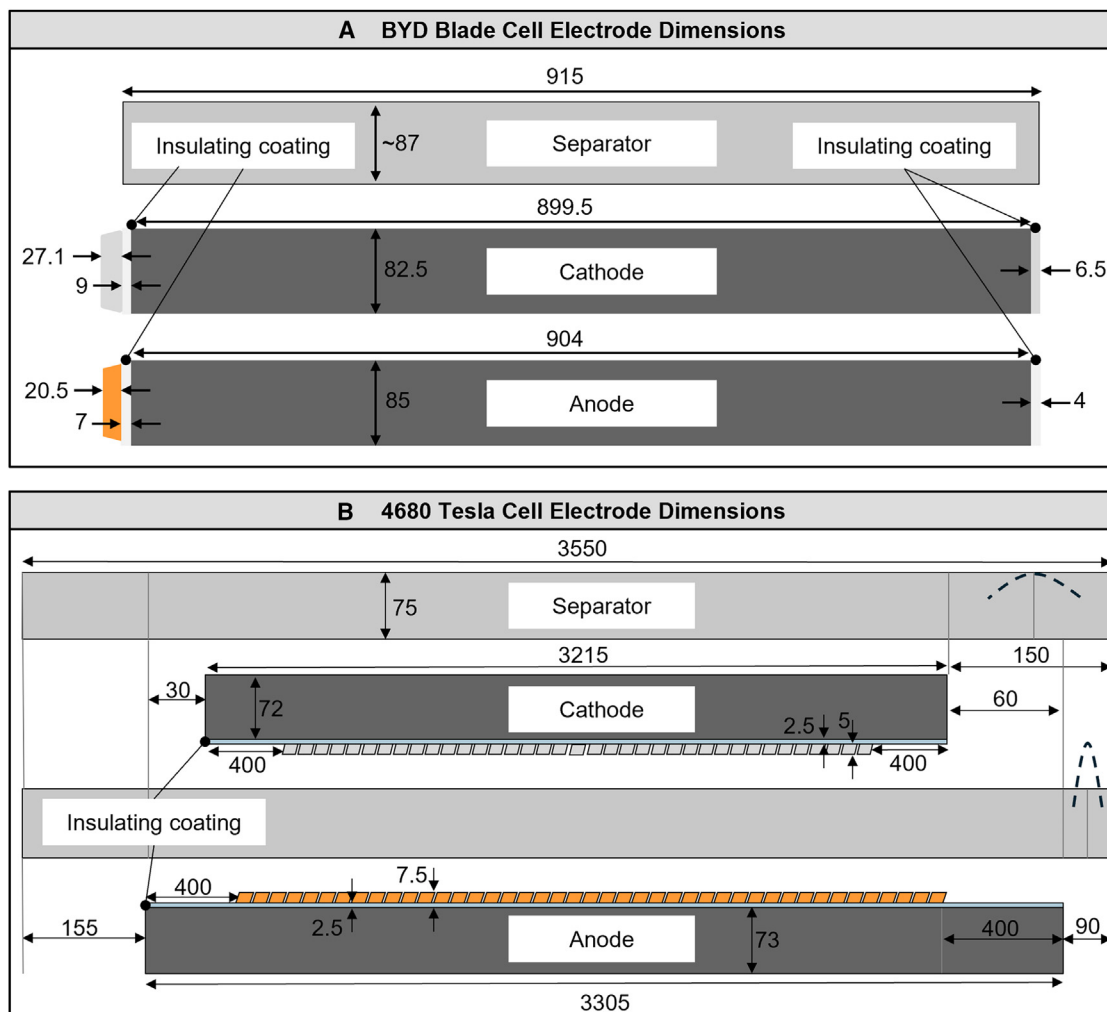
在电芯组装过程中，会采用相似或不同的生产步骤。主要区别包括堆叠/卷对卷构建工艺（卷绕与Z形折叠）、电极旗片接触以及电芯封装技术。特斯拉4680电芯通过边弯工艺进行密封，而比亚迪刀片电芯则需要多个激光焊接步骤。总体而言，棱柱形电芯需要两个额外的组装步骤。然而，单位组装量的能量含量大约高五倍，这意味着要在kWh产量上实现相同的生产输出，比亚迪刀片电芯的生产只需组装五分之一的电芯单元。

为分析电池的重量分布，每个部件单独称重。较大部件（如隔膜片）的重量是通过切割并称重50个3x50毫米的样品，然后计算总重量来确定的。



基于组件总几何形状的组件重量。值得注意的是，特斯拉4680电池的钢壳占总电池重量的比例显著高于比亚迪铝壳。然而，这种重量优势被比亚迪刀片电池的高基板箔重量分数所抵消，导致两个电池的活性材料重量分数相似，约为60%（图7）。因此，对于这些电池而言，较大电池单元具有更小被动组件比例的优势并不明显，并且很大程度上取决于每个电池的具体设计选择。材料成本是通过获取截至2024年8月的免费可用材料价格来估算的。活性材料价格是通过将材料组件进行划分，并汇总每个组件重量分数的成本来估算的。CAM的成本是通过总和...

各部件（镍锰、钴和锂用于NMC811，氧化铁、磷酸和锂用于LFP）的成本按电池计算的比例。对于负极活性材料（AAM），假设石墨含量为100%。然后将每电池的材料成本除以电池的能量，以生成特定的可比V/kWh价格。基于NMC的CAM由于镍和钴的价格高于氧化铁和磷酸的价格，对成本差异化有显著影响。因此，在当前价格水平下，BYD Blade电池的V/kWh价格比更大容量的BYD Blade电池便宜V10/kWh，突显了LFP电池的成本优势（图7）。值得注意的是，BYD Blade电池的AAM每kWh成本高于特斯拉4680电池。当计算每kWh的AAM材料量时，其原因就变得明显了。BYD Blade电池的相对AAM重量



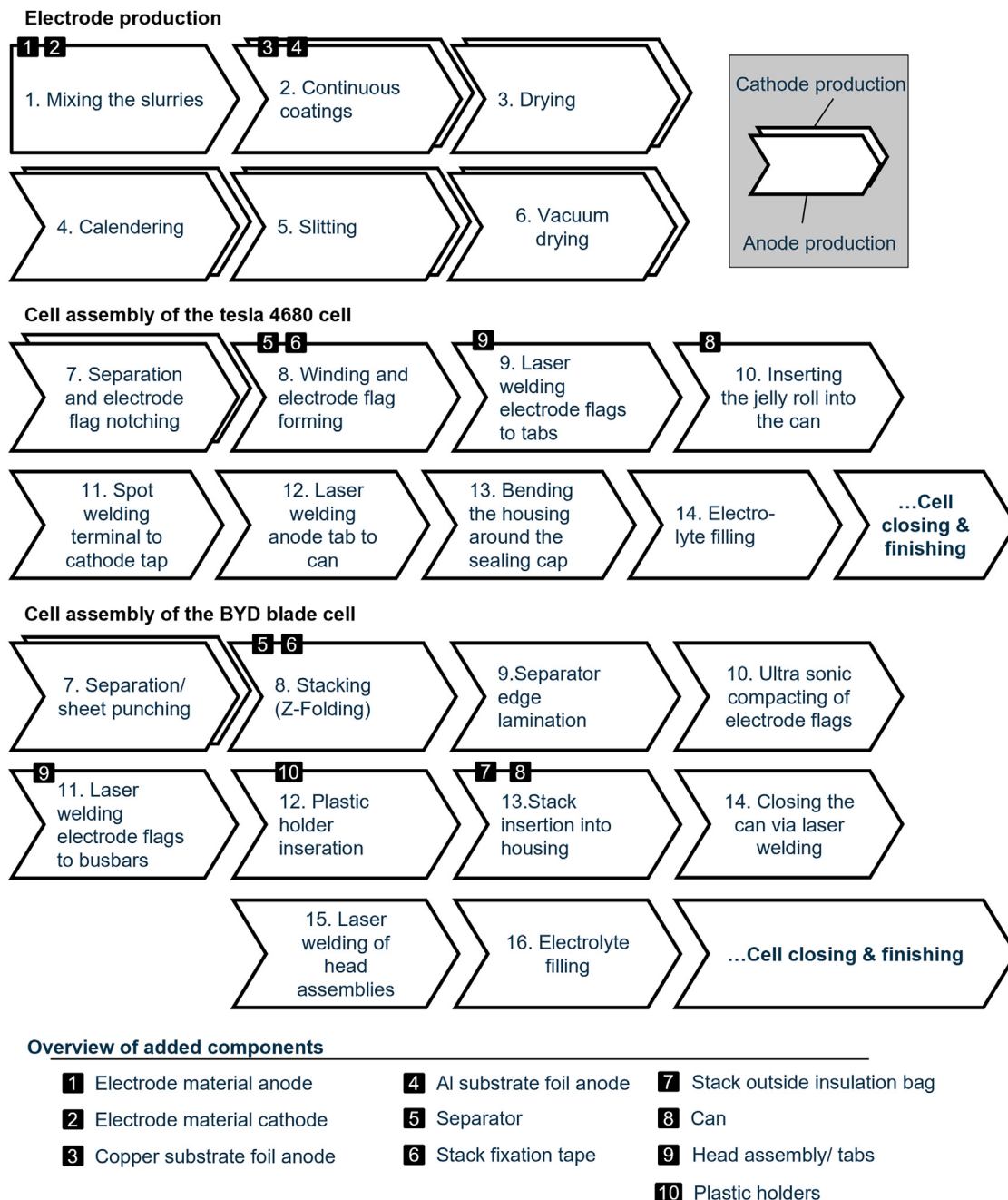
1. 35公斤/千瓦时，而特斯拉4680电芯的相对AAM重量为1.03公斤/千瓦时。这意味着特斯拉电芯采用了更高能量密度的AAM材料，或阳极容量与阴极容量之比（NP比）更低。

在C/10恒流恒压充电和C/20恒流放电循环下测量了电池的容量和额定电压，并以C/20电流进行恒压截止，取电池的充放电容量平均值（表1）。通过比较电池的效率行为来评估其电性能。

为比较电池的热效率，在10%的10步状态充电（SOC）水平下，对两块电池分别以10° C、20° C和40° C的温度进行了电池内部直流电阻特性表征。测量过程遵循ISO 12405-4标准²⁹。平均充放电直流电阻...

1° C时的阻抗数据显示于图8。与锂离子电池（LIBs）的特性一致，两种电池的欧姆电阻均随温度降低而增加。³⁰ 特斯拉4680电池在高SOC值时阻抗增加，尤其是在低温下，而比亚迪刀片电池的阻抗则随SOC升高而降低。这种现象的原因可能是由于高锂浓度导致负极内部及表面电荷转移电阻增加，因为这些电阻往往会随着SOC升高而增大。³¹ 这需要进一步研究；通常情况下，SOC升高时电池总阻抗会上升是不寻常的，因为正极及其表面电荷转移电阻会随SOC升高而降低，从而抵消了负极电阻的增加。^{30, 31} 为了比较电池的比热特性，使用了以下公式：

$$\text{加热} \frac{2\text{A}}{\text{电流}} I R = \text{在 } 1\text{C} \text{ 平均温度下, 其中体积} ; = \frac{\text{电池} - \text{内阻}}{\text{和}} = \text{体积} : R V$$

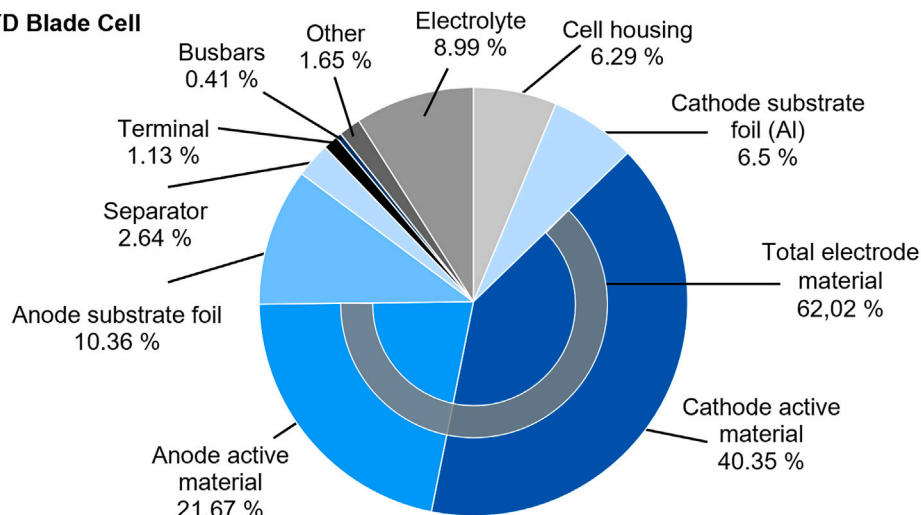


特斯拉4680电芯与比亚迪刀片电芯组装顺序方案对比——基于机械拆解分析与Heimes等人²⁴及刘等人²⁵提出的组装顺序方案

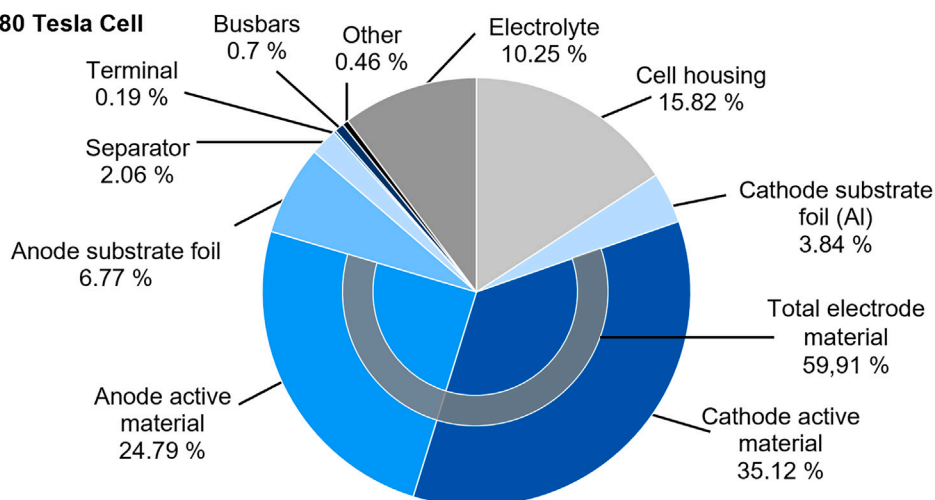
比较这种特定的体积发热量，特斯拉4680电池在1C负载下产生约23%的热量需要散失（图8）。因此，在设计同等功率需求的系统时，为特斯拉4680电池所需的冷却必须比比亚迪电池在同一负载下多散失约23%的体积热量。因此，磷酸铁锂电极设计更有利于设计快速充电的冷却策略。

为了在材料层面更好地理解电池的组成，研究人员使用扫描电子显微镜（SEM）和热重分析（TGA）对电池的正负极进行了检测。在进行任何检测之前，电极用碳酸二甲酯（DMC；无水，纯度：99.5%，Sigma-Aldrich）溶液清洗了三次，以去除表面的电解质残留物。

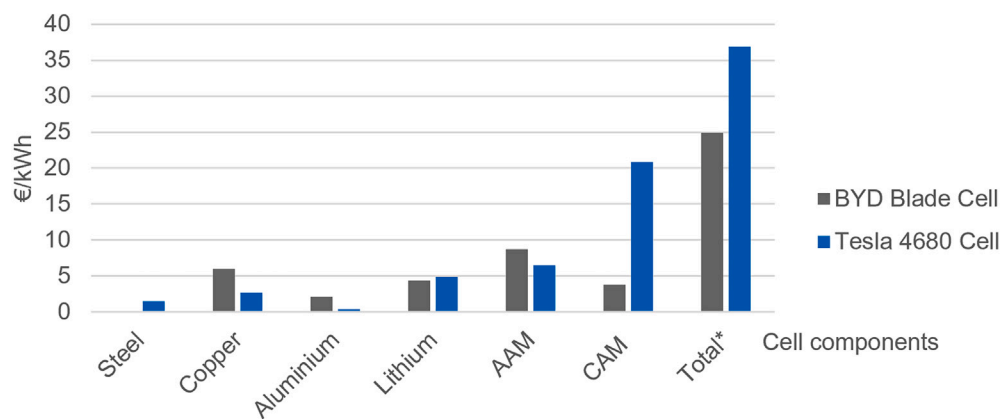
A BYD Blade Cell



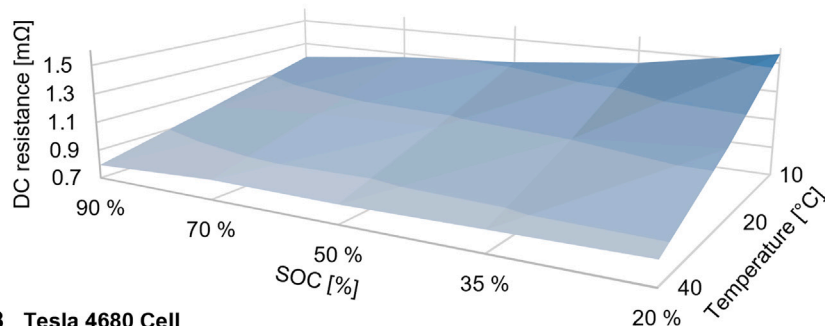
B 4680 Tesla Cell



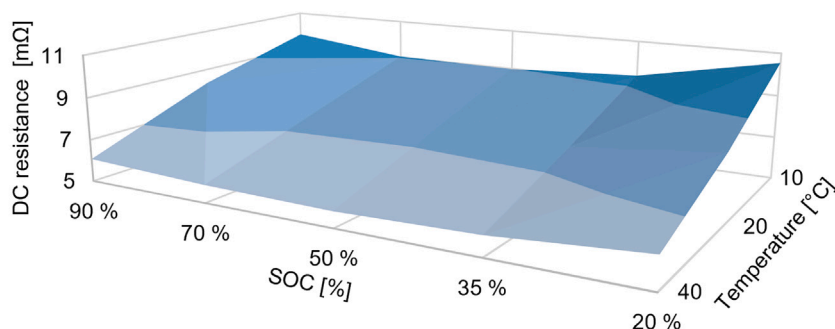
C



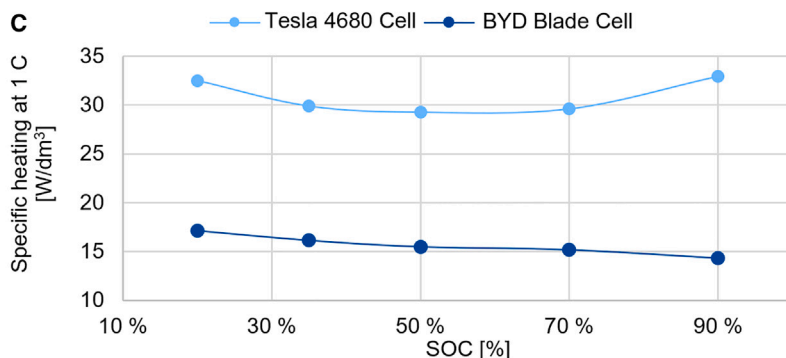
A BYD Blade Cell



B Tesla 4680 Cell



C



(A) 比亚迪刀片电池。

(B) Tesla 4680 cell.

(C) 对两个电池进行1 °C的体积特定加热。

颗粒之间。特斯拉正极含有典型的NMC球形多晶次级颗粒，尺寸约为10微米，其堆积形成微米级空隙。这符合使用多晶材料于富镍正极的趋势。尽管单晶正极可能具有性能优势，但它们对材料合成过程提出了挑战。³³ 在特斯拉正极表面，压型工艺的影响清晰可见，因为外表面的球形颗粒显得扁平。

查看EDX结果（表S3），比亚迪刀片电池正极的相对材料含量显示出一种典型的LFP分布，这与Stock等人检测到的特斯拉在中国用于Model 3的不同汽车方形电池中的分布相似。²² 对于4680特斯拉电池，镍锰和钴的相对分布对应于8:1:1的重量比例（Ni, 81.6%; Mn, 6.4%; Co, 12%），尽管钴含量低于10%，但证实了Ank等人提供的结果。⁷ 检测到的正极上的高碳含量可能是导电添加剂以及材料碳涂层的指标

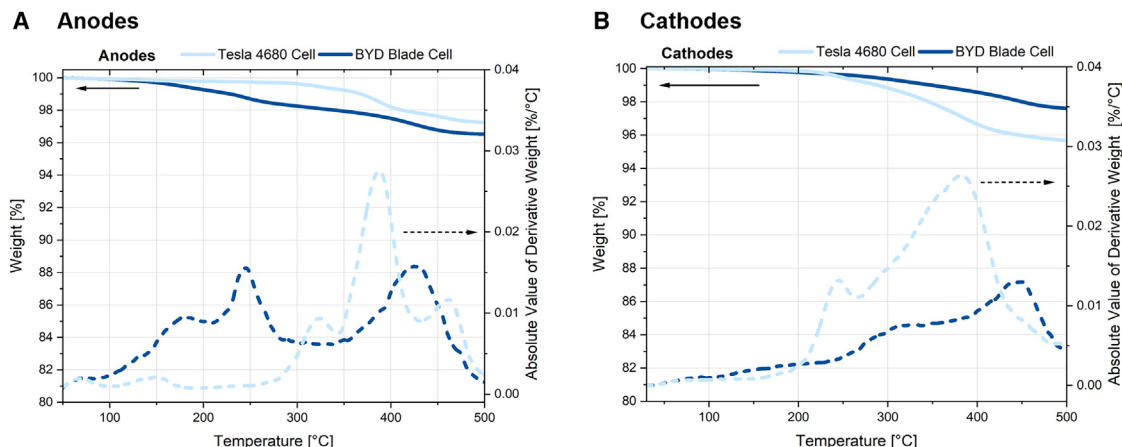
扫描电子显微镜（SEM）分析可深入观察两种电池的电极形貌。在表S2和S3中，各电极位置发现的元素com被列出。电极中未检测到Si或SiO_x。虽然两种阳极均主要由石墨构成，但在图S1A中可以观察到颗粒形貌存在显著差异。比亚迪电池的初级颗粒呈现片状结构。而特斯拉阳极的这些颗粒边缘更圆，且尺寸大于比亚迪电极中的颗粒。这意味着比亚迪阳极所使用的碳材料具有更高的比表面积，这表明需要更高的粘结剂含量以维持稳定的网络结构。³²

比亚迪电池正极呈现出纳米级LFP初级颗粒的分布，其中部分颗粒聚集成几微米的次级颗粒。该颗粒网络包含尺寸小于100纳米的小气孔（类似空腔）以及大量的碳纳米管。这些纳米管可以提高LFP材料的导电性，并充当粘合剂。

颗粒表面。两节电池（表S2）的阳极EDX结果在碳含量方面非常相似，约为90%。两种电池的阳极均未检测到二氧化硅（SiO_x）。

这些曲线展示了电极的热稳定性。质量损失的导数用虚线绘制，用以标示质量损失发生的温度，以便每个峰值可以归因于特定的热分解反应。观察到对于阳极和阴极，每种电池材料都呈现出不同的特征峰。

例如，比亚迪负极呈现两个峰，这可以与羧甲基纤维素粘结剂（CMC）在200 °C至300 °C之间的分解以及苯乙烯丁二烯橡胶（SBR）在300 °C至450 °C之间温度下的分解相对应。³⁴ 这些可能与石墨电极的常规水处理有关。然而，特斯拉负极在不同温度下表现出质量损失。在这种情况下，有两个



阳极和阴极的TGA分析 (A) 阳极。 (B) 阴极。实线：样品的重量损失；虚线：样品的微分重量；箭头指示相应的坐标轴。

不同的粘合剂可以区分。首次质量减少，发生在300°C至350°C之间，可能与聚丙烯酸（PAA）聚合物链的链断裂反应相对应。相比之下，大约450°C附近的失重则符合PAA聚合物链降解为单体的过程。³⁵ 在大约380°C处出现的更显著的峰与聚乙二醇（PEO）的降解相一致。³⁶

在阴极TGA曲线上，比亚迪LFP阴极在400°C至500°C之间出现轻微的质量损失。这种损失可归因于该温度范围内聚偏氟乙烯或聚偏氟乙烯（PVdF）粘结剂的热分解。³⁷ 相比之下，特斯拉阴极在不同温度下显示出降解反应，这表明存在其他类型的粘结剂。对于NMC811阴极，在200°C至300°C之间观察到轻微的质量下降，而在300°C至450°C之间出现更陡峭的下降。这两者可能对应于CMC和SBR的分解反应。这表明特斯拉阴极采用了不同于典型PVdF-N-甲基-2-吡咯烷酮基阴极工艺的替代制造工艺。

本文探讨了用于汽车应用的先进锂离子电池（LIBs）的设计与特性。对特斯拉4680圆柱形电池与比亚迪刀片形电池的比较分析，突显了可能影响未来电池设计迭代的显著机械、电气和材料差异。

观察到内部结构存在关键差异，圆柱形和棱柱形电池需要不同的电极接触方法。结果表明，激光焊接可有效应用于这两种电池格式的制造过程中。此外，还分析了电池的材料组成，包括活性材料、电极结构和粘合剂，为未来的资源和工艺分析奠定了基础。鉴于电池之间内部加热行为存在差异，这些发现还有助于电池热管理或电池级效率提升的潜在改进。

本文提供了这两种电池的材料组成、工艺流程和电性能数据，为后续研究和行业应用提供了基础。文章还提出了未来研究的课题，特别是关于特斯拉4680电池中观察到的粘合剂配方，这可能是一个值得进一步探索的领域。随着特斯拉和比亚迪持续创新和改进其电池技术，本文的发现将成为汽车电池设计未来发展的基准。

本节介绍了为进行电池的机械和电气特性测试所进行的实验。两个电池均使用AMETEK SI-9300R电池分析仪进行电气特性测试，并在Weissttechnik气候箱内进行测试，测试中仅控制温度。接触单元的设计为接触组件提供了超过1.53的电流安全系数。所有测量均使用四点传感法（感线和电源线分离）并使用屏蔽电缆进行。电池使用机械工具拆解，并在氩气环境中MBraun手套箱内进行可视和几何检查。为打开特斯拉4680电池，使用带有钻石盘的Dreme 1工具，切口正好在电池壳体的顶部和底部边缘。比亚迪刀片电池使用钳子在多个切口点进行打开。在拆解前，电池使用AMETEK SI-9300R电池分析仪通过0.1 C恒流放电程序放电至0% SOC。电极探针被取出并在氩气环境中密封于铝塑膜中，用于后续材料分析。所有电极探针使用陶瓷刀或陶瓷剪刀切割。为避免电极样品的颗粒污染，样品仅从内部电极部分切割。

通过扫描电子显微镜（SEM，蔡司AURIGA）研究了电极的颗粒形貌和表面形貌。表面分析使用3 kV加速电压，15–20 kV用于

能谱分析。采用X-max 80 mm² 探测器进行EDX分析，并用INCA软件（牛津仪器）对数据进行分析。

使用TA Instruments的SDT IR Q500进行TGA测试。将5毫米样品穿孔并转移到铂金坩埚中。在等温步骤中，温度平衡时间为30–40分钟，氮气平衡流速为30 mL/min，质量流速为10 mL/min。测量温度最高可达500° C，升温速率为5 K/min。

请将相关信息、资源及试剂的请求提交给主要联系人Jonas Gorsch (j. gorsch@pem.rwth-aachen.de)，将由其负责处理。

本研究未产生新的独特试剂。

数据：本文报告的关于细胞电学行为或机械特性的生成数据，如需，将由主要联系人分享。代码：本文未报告原始代码。
其他所有项目：为重新分析本文报告的数据所需任何附加信息，如需，可向主要联系人获取。

本研究由德国联邦教育与研究部资助（项目编号：03XP0256）。作者还感谢Debbie Staples进行的TGA测量，Lara Kersting进行的EDX数据处理，Lennart Alsheimer进行的样品制备，以及Matthias Konersmann提供的研究支持。

概念化，J. G.、J. S.、M. M.-C. 和 E. S.；调查研究，撰写——初稿，J. G. 和 M. M.-C.；撰写——审阅与编辑，M. F.、D. K. 和 N. K.；资金获取，H. H. 和 A. K.；监督，M. F.、H. H. 和 A. K.

作者声明无利益冲突。

补充信息可在 <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102453> 在线获取。

收到：2024年9月25日
修改：2024年11月25日
接受：2025年1月27日
发表：2025年3月6日

3. Baazouzi, S., Feistel, N., Wanner, J., Landwehr, I., Fill, A., 和 Birke, K.P. (2023). 圆柱形锂离子电池的设计、性能与制造——通用概述. Batteries, 309. <https://doi.org/10.3390/batteries9060309>.

17. Das, A., Li, D., Williams, D. 和 Greenwood, D. (2018). 联合技术用于汽车电池系统制造. WEVJ9, 22. <https://doi.org/10.3390/wevj9020022>.

1. Impey, B. (2024). 全球电动汽车品牌销量排名（2023年）。<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/561568/umfrage/die-groessten-hersteller-von-elektroautos-nach-absatz/>.

18. Bree, G., Horstman, D., 和 Low, C.T.J. (2023). 用于锂离子设备能量密度提升的电池外壳轻量化. 储能期刊 68, 107852. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107852>.

20. Savina, A.A., 和 Abakumov, A.M. (2023). $\text{LiNi}_0.8\text{Mn}_0.1\text{Co}_0.1\text{O}_2$ 正极材料在锂离子电池中的电化学参数基准测试。Heliyon 9, e21881. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21881>.

31. Wu, M.-S., Chiang, P.-C.J., 和 Lin, J.-C. (2005). 通过三电极测量对先进锂离子电池的电化学研究. 电化学学报 152, A47. <https://doi.org/10.1149/1.1825385>.