



储能专用电芯 白皮书

天合芯 为储能系统而生





储能电芯特征与 发展趋势

专用化特征及优势

储能电芯是一种用于储存电能的装置，通过电化学反应将能量存储起来，并在需要时释放；它是储能系统中的最小单元，主要由正极、负极、电解液和隔膜等组成。按照材料类型分为铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池、钠离子电池、燃料电池等（图1）；按照封装形式分为方形、圆柱和软包电池三类（图2）；不同型号和容量的储能电芯也会应用于不同的储能产品，如户用储能、工商业储能、源网侧大型储能电站等。



图1（图片来源于网络）

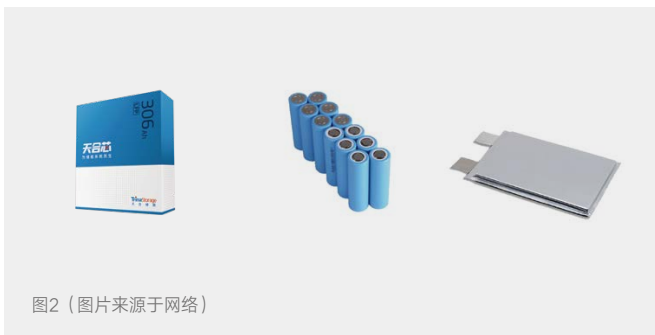


图2（图片来源于网络）

全生命周期度电成本LCOS（Levelized Cost of Storage）是最直接、客观衡量储能系统价值的重要指标，结合客户需求导向和不断拓展的应用场景，在电芯层面，主要有以下几个特征：

— 长循环寿命

随着风光配储场景的加速渗透，光储一体化的行业发展趋势愈好，风光储如何高效协同、深度融合发展，实现光储同寿，对电芯的循环寿命提出了更高要求。

— 高一致性

储能电芯的高一致性使电池系统更具可靠性和稳定性，提高转化效率。高一致性电芯在使用过程中可有效减少容量损失、减少内阻增加趋势、延长使用寿命，使电池系统具有更高稳定性；同时，更高的转化效率可带来系统更高的能量吞吐量，从而降低全生命周期度电成本。

— 优安全性

在储能领域，安全是红线。在激增的市场需求下，近年来全世界各地频发储能电站失火事件，据不完全统计，从2018年至2022年期间，世界范围内储能电站着火事件将近40起，储能系统安全性受到高度关注。电芯本征安全是储能系统安全的前提，提升本征安全才能保障新型电力系统安全稳定运行和“双碳”目标的安全实现。

— 大容量

目前国内百兆瓦级储能项目不断增加，在此背景下，市场对储能系统、电芯的容量要求越来越大。大容量电芯的配套可提高单舱的功率密度，减少项目占地面积，节省投资成本；同时，大容量电芯减少串并联回路数，减少木桶效应带来的容量衰减问题，延长使用年限，提升运行收益。

储能电芯技术路线

储能的本质是为了解决供电生产的连续性和用电需求的间断性之间的矛盾。储能技术将发电与用电从时间和空间上分隔开来，用电和发电不需要实时平衡，突破了电网电能不能存储的限制，彻底改变了电网的调度、运行以及规划等的模式。规模化储能应用于电力系统的发、输、配、用各个环节，可有效减少短时电力中断，缓解高峰供电压力，延缓或者减少电源和电网的投资建设，提升电网的可再生能源的接纳能力，更灵活地实现电力在发电侧、电网侧以及用户侧的稳定运行。因此，储能专用电芯是一类战略性的新能源大基建产品，需具备高安全并且平价的特质，安全和降本将是储能电芯技术发展的永恒主题。从储能全生命周期成本结构剖析，大容量、长寿命、高能量密度、高效及高温技术有助于储能经济性的进一步提高。

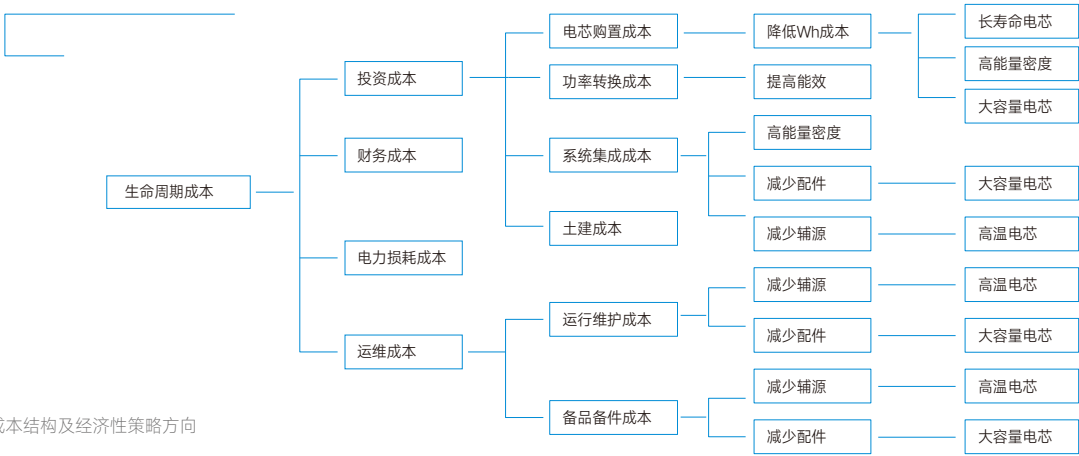


图3 储能全生命周期成本结构及经济性策略方向

— 高安全是储能发展的基石

随着储能单站规模增大，以及储能电芯总体出货和装机规模的快速增长，大众愈发关注储能安全，储能安全政策也愈发趋严。《电力储能用锂离子电池》安全新国标将于2024年7月1日正式实施，储能电芯安全标准进一步完善。在电化学体系选择上，磷酸铁锂电芯具有更为优异的本征安全性能。

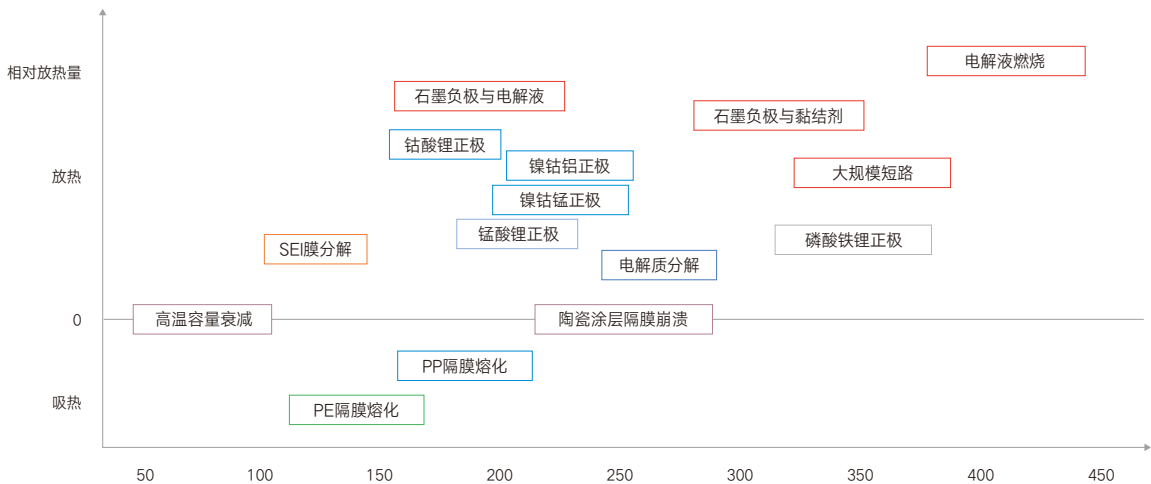


图4 锂离子电池内各组分材料的热失控放热量

— 大容量电芯可以促进极致降本

大容量电芯在电芯设计上可以减少单位Wh结构件用量，并且提高设计的空间利用率，降低电芯BOM成本。在电芯制造上，可以在相同人力及能效下，提高产能。在系统集成端，大电芯能够减少电芯和连接件数量，从而提高一致性和降低运维成本；同时，能够减小占地面积和减小施工工程量。

— 高温电芯可以促进系统极致降本

一般储能系统运行时需要温控系统调控电池舱内温度在25℃左右，高温电芯可以在电池舱内温度极高的情况下正常工作，从而可以减少温控系统的一次投入及运维投入。并且，高温电芯的能量效率更高，可以减少能量损失。

— 长寿命降低LCOS，匹配新能源风、光伏电站设计寿命的储能电芯寿命在10000cls~18000cls

储能是智能电网不可或缺的一环，储能电芯的寿命趋势将向电站核心部件的设计寿命对齐。表1给出了对应不同类型电站的储能电芯寿命。2h储能电芯寿命，每天充放电一次，对应于风、光伏发电站的寿命分别为8000~10000cls；每天充放电两次，寿命分别为15000~18000cls。若为4h储能电芯寿命，每天充放电一次，对应于风、光伏发电站的寿命为8000~10000cls。

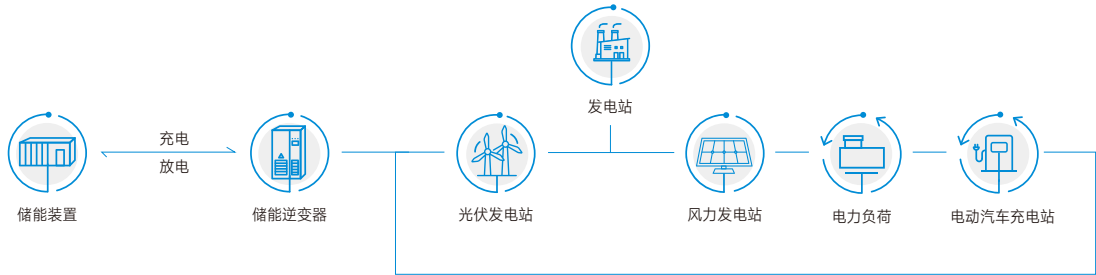


图5 智能电网与储能系统

发电站类型		火力发电机	水力发电机	核电	光伏组件	风力发电机
发电站设计寿命, 年		15~30	20~40	30~40	20~25	20~25
储能寿命	1Cycle/天	5475~10950	7300~14600	10950~14600	7300~9125	7300~9125
	2Cycle/天	10950~21900	14600~29200	21900~29200	14600~18250	14600~18250

表1 匹配发电站的储能电芯寿命

— 从终端用电特征分析，储能配储时长在1-4h的经济性最高

随着智能电网的快速建设，配网中积累了大量的电力数据，这些数据中蕴含着丰富的用户信息，使得精确分析电力用户用电行为成为可能。通过数据挖掘方法，探寻用户用电行为规律，可以为不同用户的负荷预测、用户需求侧响应、个性化电价制定等应用提供数据支持，充分利用用户数据的潜在价值，能够指导储能电池的技术发展，让储能更好地服务于保障用户用电的安全性。用户行为往往受到多种因素的影响，有日特征和季节性，分析时常用的方法是对负荷曲线进行模式提取，迅速、准确地挖掘用户用电行为中隐藏的行为规律。电网运营商需要随时平衡一个地区的发电量和电力需求。在大多数个人消费者休息和许多企业消费者打烊期间，需求在一天之内是最低的。早上，随着人们醒来，企业开始营业，需求开始增加。需求全天保持上升，晚上随着人们下班回家和居民用电量的增加而略有上升，然后在深夜再次下降。从网上可查询的全球各地用电特征零散信息统计来看，一般的用电尖峰时段时长在1-2h，峰时段在2-3h。



图6 用电负荷模型构建及应用

时段		尖峰时段	峰时段	平时段	谷时段
上午	时间	10:30-11:30	8:30-10:30	7:00-8:30 11:30-12:00	-
	时长/h	1	2	2	-
下午	时间	-	-	11:30-18:00	-
	时长/h			6.5	
晚上	时间	19:00-21:00	18:00-19:00 21:00-23:00	-	23:00-7:00
	时长/h	2	3	-	8

表2 一般用电峰时段特征

— 从未来光伏配储分析，2030年前2h-4h为主

一个可持续发展的电网应能在电力能源生产、消费和交易中提供环境 and 经济两方面优势。随着化石能源短缺及环境污染问题的加剧，风、光伏发电技术及产业规模正在世界范围内迅速发展。风、光等新能源具有“极热无风”、“晚峰无光”的反调峰特性，将给电网带来15%-30%的反调峰压力。“鸭子曲线”表明，在极热极寒无风、连续阴雨等特殊天气下，为维持电力系统稳定、保障电能供应质量，新能源并网规模扩大对常规能源迅速进行调峰、调频的要求更高。因此，配置储能的模式为解决调峰调频需求的有效方案。

鸭子曲线意味着两个与太阳能应用增加有关的挑战。第一个挑战是对电网压力。从中午到深夜，传统发电厂对电力的需求急剧波动，此时能源需求仍然很高，但太阳能发电量已经下降，这意味着传统发电厂（如天然气发电厂）必须迅速增加电力生产，以满足消费者需求。这种快速增长使电网运营商更难实时匹配电网供应和电网需求。此外，如果生产的太阳能超过了电网的消纳量，运营商可能不得不减少太阳能发电，以防止过度发电。“鸭子曲线”为能源储存创造了机会。大规模部署电池储能系统，可以将白天产生的部分太阳能储存起来，并在日落后进行释放。白天储存太阳能发电会使鸭子的腹部曲线变平，晚上调度储存的太阳能发电会缩短鸭子的“脖子”，平抑“鸭头”。“鸭腹”储存太阳能的时长跨度在4h-8h，“鸭脖”储能放电时长跨度2h-3h，“鸭头”储能放电时长跨度在2h-3.5h。鸭子曲线并不是加州独有的，它越来越多地发生在美国其他地区 and 世界各地，因为这些地方的太阳能发电份额正在增加。根据IHS的预测，2030年前，配储以2h-4h为主。

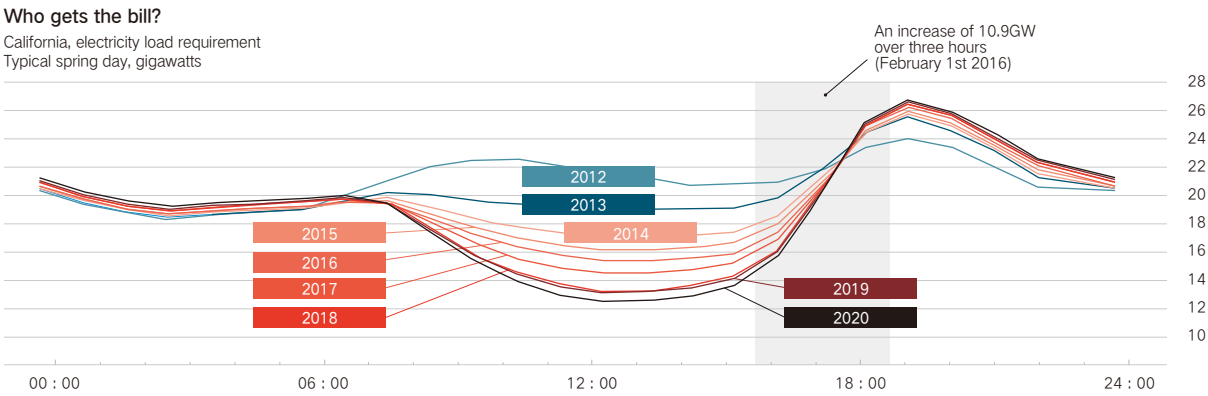
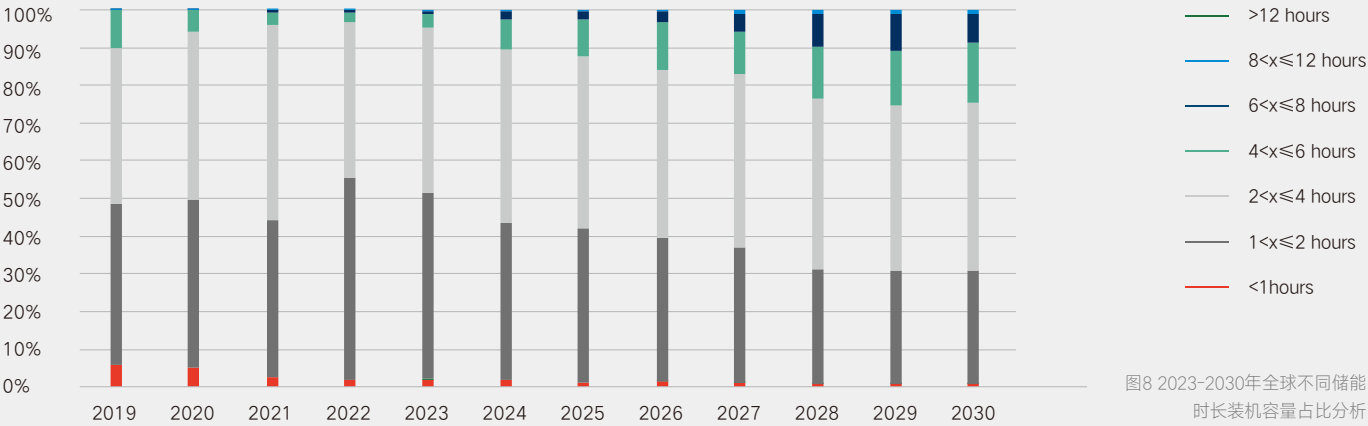


图7 美国加州电力负荷需求的鸭形曲线



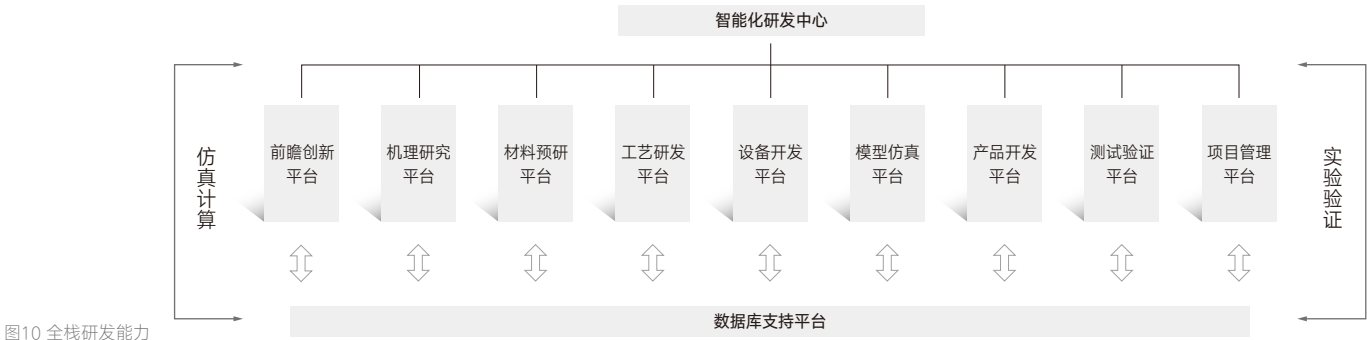
基于上述分析，能够最大化推动储能商业化进一步发展需要的储能电芯的技术路线归纳如下



天合芯技术创新

全栈自研能力

天合芯坚持独立自研，掌握电芯的开发、测试、验证等环节的技术核心，同时结合对“光储一体”应用场景的深刻理解与洞察，转化为储能专用电芯的技术要求、成本控制以及综合性能工况最优解。天合储能先进储能电池研究院以智能化研发中心为牵引，建立了前瞻创新、机理研究、材料预研、工艺研发、设备开发、模型仿真、产品开发、测试验证、和项目管理九大平台，并配置了研发数据库支持平台，实现了机理、材料、工艺、电芯研究全维度覆盖和前瞻技术布局，以“计算+验证”相闭环，让电芯设计更安全、更高效、更低成本。天合芯全栈自研，用领先技术打造优质解决方案，创造更高客户价值。



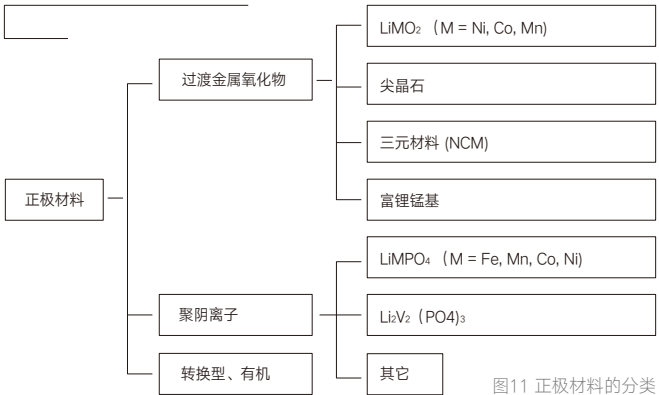
材料创新

目前，在电化学储能市场中，锂离子电池尤其是磷酸铁锂电池占据主要市场。磷酸铁锂具有能量密度高、安全性高、循环性能优异、生产成本低、环境友好等特点，并且我国磷酸铁锂上游资源丰富，近年来发展形势向好。磷酸铁锂电池主要材料包括正极材料、负极材料、电解液、隔膜、粘结剂、集流体、壳体、盖板等，材料的特性直接关系到磷酸铁锂电池的性能。

— 储能用正极材料应用及创新

正极材料是锂电池的重要组成部分，在锂离子电池充放电过程中，伴随着锂离子在正极材料中的脱嵌。正极材料对锂离子电池的能量密度、功率密度、循环性能及安全可靠性影响较大。

常见的锂离子正极材料有三元层状氧化物，包括钴酸锂、磷酸铁锂、锰酸锂等；基于安全考虑和循环寿命需求，储能用电芯正极选用磷酸铁锂材料，该材料是目前最安全的锂离子电池正极材料，晶体结构稳定，优良的热稳定性，且成本较低，无对人体有害的重金属离子，对环境友好。



磷酸铁锂理论克容量为170mAh/g，工作电压范围为3.4V左右，安全性、循环寿命等方面优于其它几类材料。然而，它也有不足之处，其锂离子扩散速率和电子电导率较低，限制了高倍率和低温方面的应用，再因其真密度较低，导致磷酸铁锂电池能量密度与其他材料电芯相比较低。因此在正极方面，我们致力于提升磷酸铁锂材料的容量发挥和压实密度。通过合适的粒径级配和增大粒径占比来提升材料的压实密度，同时限制小粒径的大小来保障循环，通过掺杂改性保证克容量发挥和能效水平，使材料可以兼备高压实和高能效。

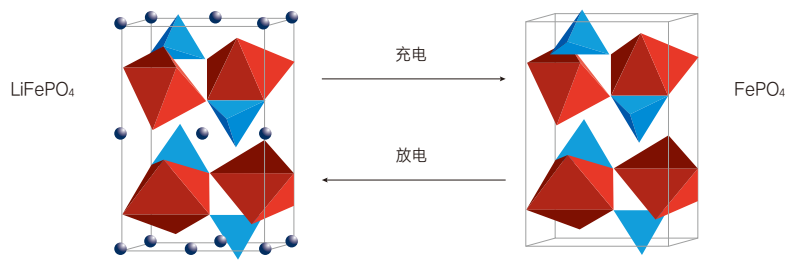


图12 磷酸铁锂结构

为匹配光伏生命周期，目前对电芯的循环和存储要求提升到20年以上，即使磷酸铁锂是目前循环寿命最高的电芯材料，但挑战仍然很大。目前从两方面解决，一为满足存储及循环性能，采用独特碳源包覆，提高有效包覆，增加材料导电性，减少铁锂副反应面积，从而提升电池的生命周期；二磷酸铁锂电芯前期循环衰减较快，为提升用户体验感，满足寿命要求，添加补锂剂以降低前期衰减速率。根据补锂剂添加量可控制前期零衰减，循环寿命可按要求设计。

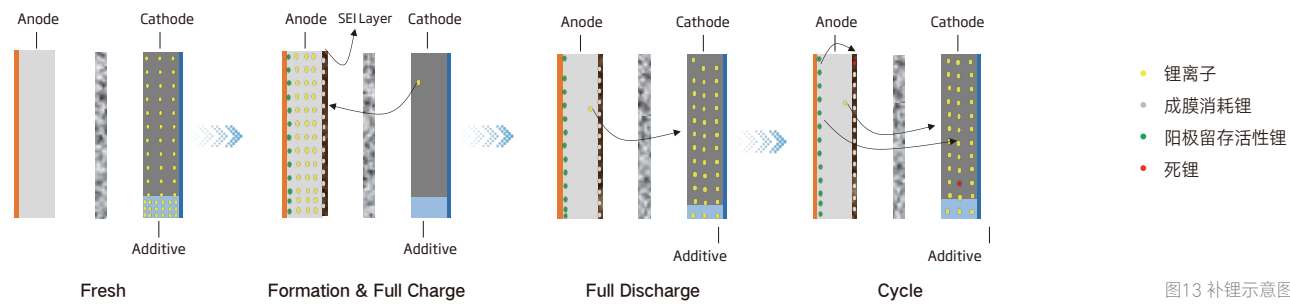


图13 补锂示意图

— 储能用负极材料应用及创新

负极材料在锂离子电池的充放电过程中作为锂离子的载体，起着能量存储与释放的作用。作为储能电芯负极材料应满足以下几点要求：嵌锂电位低且平稳；充放电过程中结构稳定；比容量高；电子/离子电导率高，电荷转移电阻低；工艺简单，环境友好，资源丰富。

负极材料按照其组成成分，可以分为碳负极材料和非碳负极材料。具体分类如图14所示。



为匹配储能电芯的更低度电成本、更长循环寿命、更高安全性能的专属化设计研发需求，负极材料研发朝着极致长循环和低成本两个方向发展。

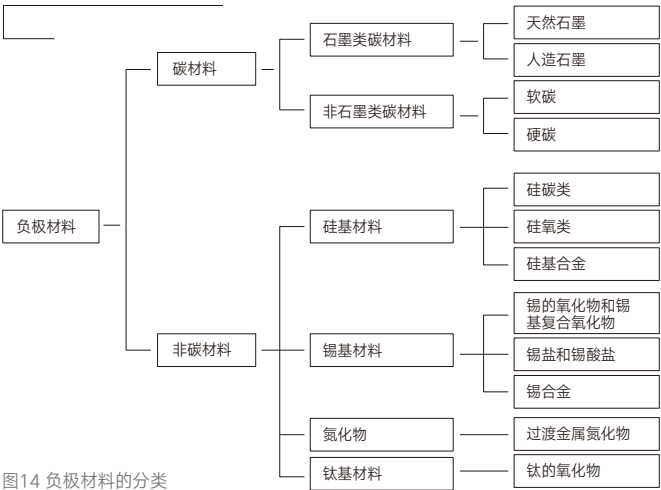


图14 负极材料的分类

长循环 根据石墨循环失效机理，容量衰减主要原因是活性锂的损失，分解到石墨层面主要为动力学不足导致极化增加，缺陷副反应消耗活性锂以及颗粒膨胀导致SEI膜破裂修复消耗活性锂。因此，天合长循环石墨开发更多关注的是“高动力学”、“低缺陷”和“低膨胀”。主要技术路线是选择低缺陷原料焦+优化颗粒结构+降低石墨化度，同时也进一步延伸至定制化原料焦调控的开发工作。

低成本 基于电芯成本核算，负极材料石墨约占电芯成本的8%；在负极材料成本中，原材料（针状焦、石油焦、沥青焦等）约占石墨成本的41%，石墨化加工环节成占比较约51%。因此，对负极材料的成本控制主要体现在这两个环节中。

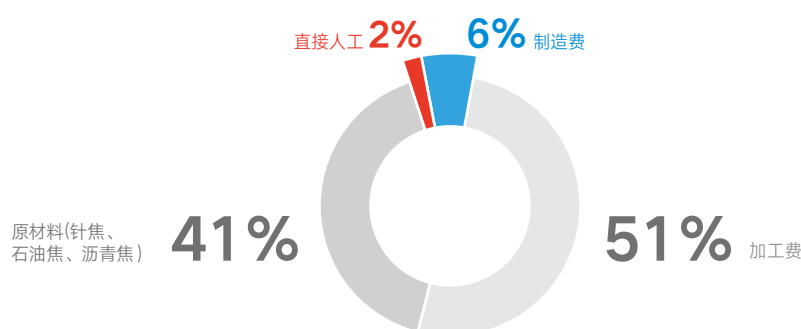


图15 人造石墨成本组成

通过与原料焦厂、石墨负极材料厂进行三方合作，天合自主研发并定制低成本长循环原料焦（包括石油焦、针状焦和沥青焦等），并与负极材料厂合作对低成本石墨化炉（包括厢式炉、连续石墨化炉和大体量坩埚炉）的性能进行验证，完成原料焦-石墨-电芯的全链降本。

— 储能用电解液应用及创新

作为电芯中流动的血液，电解液对电池寿命、功率、能量密度、安全性等性能指标都有显著影响。电解液一般应当具备高离子电导率和电子绝缘性、宽的电化学窗口、高稳定性与高安全性，且对环境友好、无毒。电解液由溶剂、锂盐和添加剂组成，质量占比约分别为80%，10%~15%，5%~10%。电解液的性质与溶剂、锂盐和添加剂的性质密切相关。

天合芯使用了天合储能自研电解液配方，作为储能专用电芯电解液，溶剂方面依据各电芯产品动力学需求特性，精准复配优化溶剂体系粘度和介电常数；锂盐方面采取双盐体系，综合传统商业化锂盐与新型锂盐优势，进一步提升电解液热力学稳定性、传质能力与宽温域适应性；添加剂体系则在传统储能电芯电解液添加剂VC、FEC的基础上，引入并配伍使用了新型硫系成膜添加剂、除酸除水添加剂、防腐蚀添加剂、浸润添加剂等功能型添加剂，自正负极界面膜构造、循环恶化诱因、匹配电芯设计体系等方面全方位塑造储能长循环电芯适配电解液体系，针对性优化了天合芯能效、长循环和高温存储特性。此外，在传统主要成膜添加剂使用方面，天合储能深入分析了成膜添加剂消耗与寿命关系，通过优化注液工艺、梯次化配置的方式保障了后期循环电芯SEI界面修补，同时规避高含量成膜添加剂带来的高阻抗劣势，大幅降低了天合芯在超长期的循环寿命末期的循环跳水风险。

在安全方面，天合芯电解液设计自电解液本体稳定性、外部相关有益因素、界面交互稳定性三个方面出发，综合考虑电解液本体热力学、电化学稳定性，电芯体系产气需求，电解液正负极界面热稳定性&复合反应放热速率，劣化安全诱因中和等方面因素，针对性调节电解液配方体系，实现电芯安全性能的全方位提升，助力天合芯以极高的安全等级通过国内外各系列储能电芯安全认证规范。

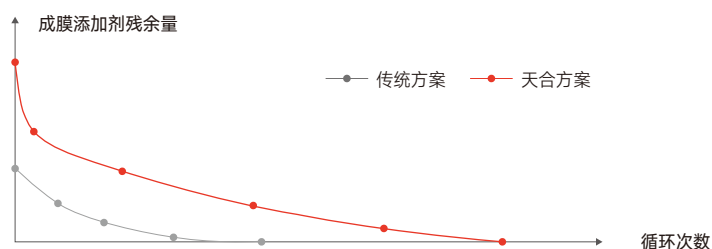


图16 全寿命周期添加剂消耗

— 储能用隔膜应用及创新

隔膜是锂离子电池生产的关键材料之一，主要在于其具有大量曲折贯通的微孔，能够保证电解质离子自由通过形成充放电回路；而在电池过度充电或者温度升高时，隔膜通过闭孔功能将电池的正极和负极分开以防止其直接接触而短路，达到阻隔电流传导，防止电池过热甚至爆炸的作用。

目前储能电池隔膜主要采用湿法隔膜和干法隔膜。湿法隔膜PE孔径均匀，拉伸强度高，综合性能优异；而干法隔膜PP较PE具备较高的熔点，价格低，但横向强度较低。随着储能对安全性需求日益提升，为进一步提升湿法隔膜产品的使用性能，各厂商持续加大对隔膜产品生产工艺的研究，逐步形成了在原有隔膜的基础上涂覆特定材料的涂覆工艺。涂覆本质上是一种改性手段，通过涂覆特定材料，改变基膜的性能，以此满足更加多元化的需求，使用涂覆工艺可以有效的增强隔膜的热稳定性和机械性能。天合采用无机/有机涂覆的方式增加电池隔膜的热稳定性，提高其机械强度，而且可以防止电池隔膜收缩造成的正极和负极之间的大面积接触，且隔膜涂层可以粘结正负极抑制负极充放电膨胀收缩导致的电芯变形，有效提高循环寿命。天合为了进一步提高电芯的能量密度，采用更薄耐高温涂层，通过涂层厚度减薄，提高电芯的能量密度，但不降低隔膜的耐高温性能。另外为了降低隔膜在电芯中的成本，进一步探索更薄的干法单拉隔膜替代湿法涂覆隔膜，并通过电芯应用端工艺改善干法隔膜注液易褶皱的缺点，从而应用干法隔膜降低电芯成本。

— 储能用粘结剂应用及创新

按照分散介质的性质可分为油性粘结剂和水性粘结剂，目前广泛应用的油性粘结剂主要为聚偏氟乙烯（PVDF），水性粘结剂主要包括丁苯橡胶（SBR）乳液和羧甲基纤维素（CMC）。此外，聚丙烯酸（PAA）、聚丙烯腈（PAN）和聚丙烯酸酯等水性粘结剂也占有一定市场。粘结剂一般具备维持正负极活性材料在充放电过程中结构和体积变化，防止活性材料脱落，提升极片的循环稳定性；具备良好的电解液润湿性，促进锂离子在电极和电解液界面传输。

PVDF作为常见的正极粘结剂，天合进行了创新设计，提升聚合物分子量满足更高的粘接性能的同时，调控聚合物链的支化度，进一步提升PVDF的分散能力。

负极粘结剂方面，对SBR乳胶粒子的核壳结构以及单体类型进行改性，调控其动态粒子粒径，抑制高速涂布时SBR上浮，拓宽加工窗口；此外引入了功能单体，提升锂离子的亲和性，提升产品动力学性能。配方中还设计了增柔型PAA，通过引入柔性单体以及新型拓扑结构，保证高粘结的前提下改善PAA的柔韧性；保证低溶胀性能以及较优动态拉伸强度，进一步提升电芯长循环性能。为了保证浆料的稳定性，天合选取高粘CMC Li产品，可以保证电芯高能量密度的前提，进一步提升产品动力学性能和能量转换效率。

— 储能用集流体应用及创新

锂离子集流体的主要作用是汇集和传输活性物质产生的电流，其导电性、化学稳定性以及成本等因素成为选择集流体的关键考虑因素。

储能一般采用铝箔作为正极集流体，电解铜箔作为负极集流体。天合为了进一步提高电芯能量密度，采用更薄的铜铝箔，但是同时对加工工艺和设备提出了更高的要求，天合通过不断的改善工艺和设备来成功应用更薄的铜铝箔。而正极集流体由于磷酸铁锂的导电性较差，天合利用功能涂层对铝箔表面处理，降低正极材料和集流之间的接触电阻，并能提高两者之间的附着能力，从而提升电芯的能量效率和循环性能。除了铜铝箔集流体，复合集流体的应用越来越受到关注，复合集流体主要采用铝塑复合膜或者铜塑复合膜的结构形式，其中内层为聚丙烯、聚酯、聚乙烯等聚合物材料，外层为铜、铝等金属材料，相比于传统的铝箔或铜箔，复合集流体能够显著提高电池的能量密度和安全性能，天合储能也正对复合集流体的应用进行相关探索。



图17 铜箔、涂碳铝箔（图片来源于网络）

结构创新

— 创新演变趋势

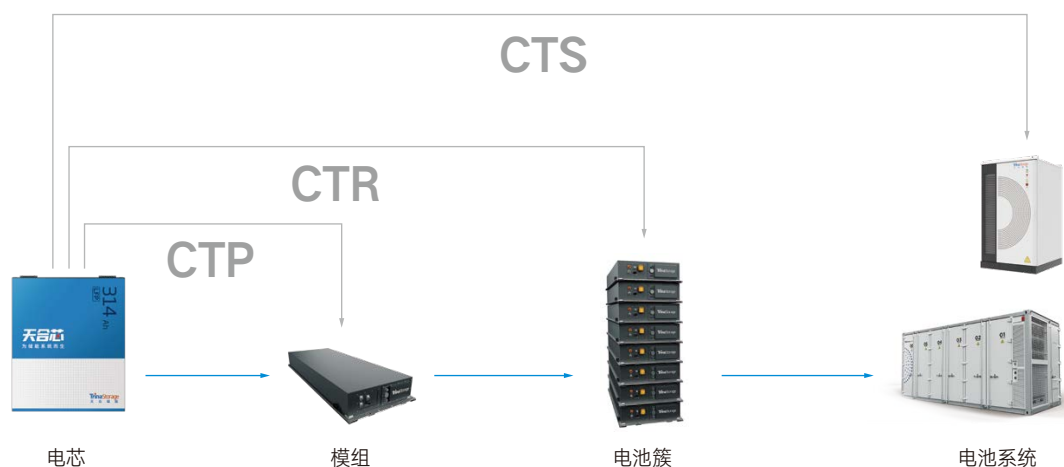


图18 成组方式

提高单位面积的储能电量可以在不恶化储能系统其他性能的前提下，通过降低固定一次性土地投入成本，来降低储能系统的全生命周期度电成本。随着单体电芯技术的不断成熟，产品品质得到提升，可以采用大模组甚至无模组设计以减少内部零部件，提升成组效率，实现电池体积能量密度的提升。

— 天合储能的选择

在方形，圆柱和软包的技术路线中，天合储能基于储能系统成组、长期可靠性、生产效率和电芯性能等综合考量，选择方形作为主要的技术路线，并深耕这一技术路线，实现性能突破和技术突破。

— 280Ah系列增容

在280Ah现有尺寸基础上，推出自研自产的314Ah天合芯，搭载天合芯的新一代柔性液冷电池舱Elementa2系统能量也由原先一代的3.727MWh提升至5.015MWh，能量提升35%。

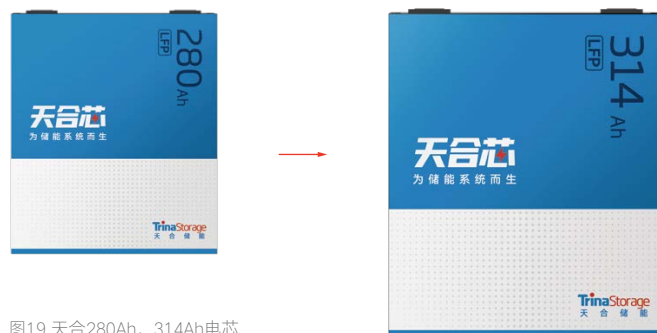


图19 天合280Ah、314Ah电芯

Elementa 2单舱能量容量达到5MWh，极大地降低了包括土地使用、建设投资等多项成本，用户整体投资经济型得到了大幅提升。

TrinaStorage Elementa 2

新一代柔性储能电池柜

5MWh 单开门

20呎 标准柜

314Ah 天合芯

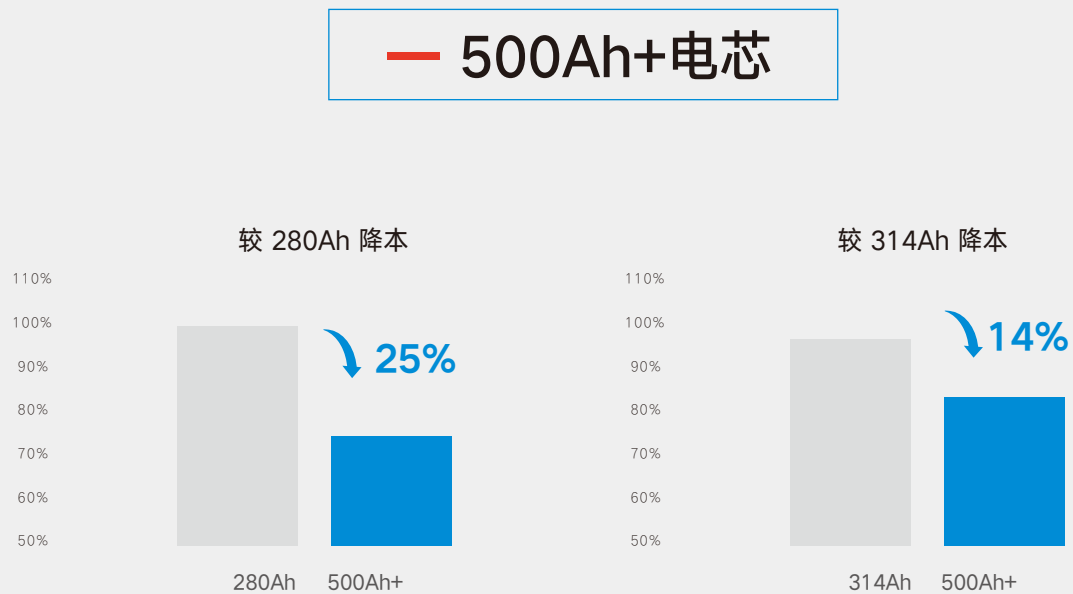
PACK PRO 设计



图20 天合储能Elementa 2产品

— 500Ah+电芯

在满足了现有市场的大容量需求后，天合储能还在探索更大容量电芯的更优技术路线。天合储能从客户角度出发，确定系统的最优容量，并从系统需求分解到电芯需求，确定500Ah+技术路线。





可靠性保障

测试能力建设

天合储能测试中心自取得CNAS资质认可后，又获得了CQC、UL、TUV南德、IEC实验室等权威认证，是CQC全球首家储能电芯目击实验室，检测能力覆盖IEC62619、IEC62620、GB/T36276、UL1973、UL9540A、GB38031等多项标准。



中心构建了完善的实验室体系，拥有材料合成、理化测试、机械测试、电性能测试、安全可靠性测试和系统测试6大实验室，占地11000m²+, 同时配备了一流的测试设备和专业的测试团队，旨在为客户提供全方位一条龙的检测分析解决方案。



图22 天合储能测试中心实验室

为提高实验室管理水平，提升运营效率，实现电芯在测试端全方位的流转与监督，中心自主开发了电芯数字化平台，集数据实时采集与数据自动展示功能于一体，端到端快速抓取目标数据，全面解决了“大数据”存储及分析难题。中心自研的LIMS系统可实现电芯发单-审批-送样-收样-排配-数据处理等全流程数智化管理，具备工步自动化执行、数据自动化导出及判异、报告自动化生成等功能，保证了实验室流程可追溯、数据全入库、数据全加密，极大提升了数据的安全性。



图23 LIMS系统架构展示图

中心拥有完善的测试及开发能力，能够独立开展高低温能效、日历寿命、极柱/防爆阀气密性、针刺、热失控、短路等30+项测试，自主开发有全套产气测试方法、原位膨胀力（恒压力/恒位移）测试方法、体积测试方法和水冷测试夹具，其中原位膨胀力测试的恒间隙模式保证电芯厚度波动值低于 $\pm 1\mu\text{m}$ 可以被精准检测；而双通道恒压力模式则可以同时检测两块电芯，用以评估平行样品的膨胀水平是否一致，能力处于行业领先水平。

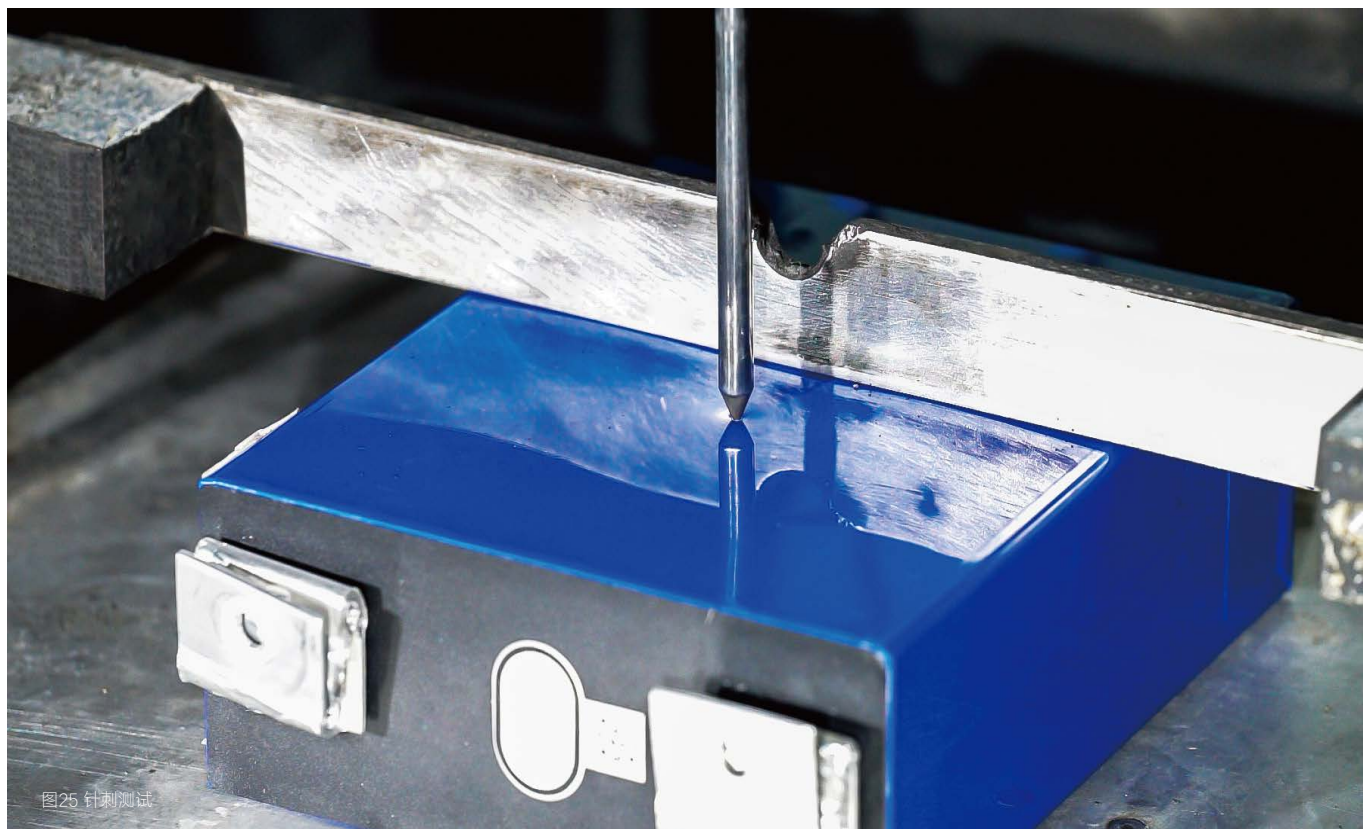


图25 针刺测试

天合储能测试中心技能求精，业务求硬，着力提升实验室的工作效率和生产力，全面优化实验室的检测管理工作，不断帮助客户提升产品的安全性和可靠性，为储能行业保驾护航。

极致可靠性保障

可靠性是指产品在规定的条件下、规定的时间内完成规定功能的能力，包括安全性、适用性、耐久性等。天合储能基于对储能电芯极致可靠的深刻理解，提出安全可靠性、环境适用可靠性、寿命可靠性三大护航思路，以潜在故障模式为牵引，进行全方位的可靠性评估。

— 安全可靠性保障

天合一直秉承以客户为中心的核心价值观，当前电芯的极致的安全设计，是储能用户最大的诉求。因此，天合也将电芯的极致安全设计作为天合芯的终极追求，为保障电芯安全可靠性，天合研发与制造团队从产品的开发、量产、交付等环节，制定了严格的天合开发流程与标准，保证电芯的极致安全。

天合芯在南德等权威机构通过UL 9540A、UL 1642、UL 1973、UN 38.3、IEC 62619、GB/T 36276等多项海内外标准认证。在过充、过放、过载、高/常温外短、内短、挤压、跌落、冲击、针刺、绝热温升等机械、电及热滥用模拟工况安全测试中，天合电芯不起火，不爆炸，已获得了海内外客户广泛认可。



图26 天合芯获得权威检测认证

天合自优化材料选型及电芯设计出发，从源头提升产品的安全可靠性。电解液作为副反应的关键产气产热物质，天合利用原位DSC-MS技术，对电芯电化学体系在高温下的放热与产气行为进行严格把控。同时，针对材料层级的热稳定性能，不仅采用了行业惰性气体氛围下高热分解温度的磷酸铁锂，高温下材料稳定性高。同时，采用高精度界面调控技术，增加材料在高温还原气体氛围下的稳定性，超稳定惰性界面控制技术，使电芯在热失控中极低释氧，有效减少热失控中产热量与可燃气体的产生。通过材料体系优化，UL 9540A认证热失控试验中电芯最高温度低于300℃，热失控产生气体燃爆超压低于0.69MPa，较行业水平降低5%，大大提升了电芯热失控后的安全性。在国际人员伤亡超压标准中，天合电芯在极端事故中为人员安全保障提供了最大的安全距离。

— 环境适用可靠性保障

储能电池的应用场景众多，可能涉及高海拔、热带、寒带、沿海等恶劣环境。锂电池作为一种高性能电池，其性能发挥对环境很敏感，在恶劣环境下可能出现性能不足或者老化过快的情况，无法满足客户需求。为了保障电池的环境适用可靠性，天合深入研究用户现场及运输通道的环境规律，并结合恶劣环境可能对电池造成的不利影响，在电池层级开展了严格的可靠性试验，包括高低温能量及能效测试、高低温放电测试、低温析锂测试、盐雾测试、振动测试等。天合芯的开发目标不止满足国标标准，也通过了相应的第三方权威检测机构标准，这极大保障了电池的环境适用可靠性，有利于客户布局更丰富的商业模式。

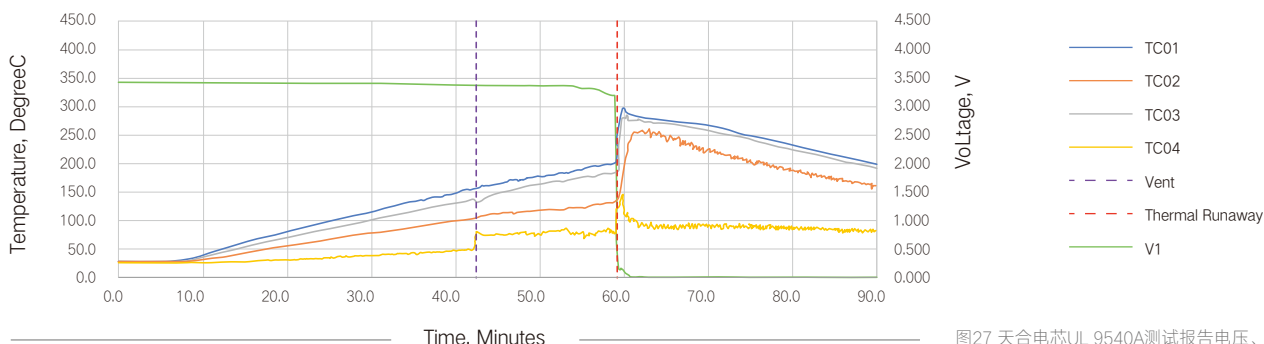


图27 天合电芯UL 9540A测试报告电压、温度曲线展示

— 寿命可靠性保障

电池在储能产品中的作用是电能的储存及释放，客户希望在协议生命周期内保持正常运行，即电池寿命是可靠的。从结构上来看，电池由内部的卷芯和外部的壳体组成，电芯寿命的可靠性由这些部件共同组成，具有典型的木桶效应，任何一个部件失效均会导致电芯寿命缩短。天合基于电池寿命失效机制，将电池寿命系统拆分为辅材寿命、电性能寿命两方面来评估，致力于将产品使用阶段的可靠性变为产品全生命周期的可靠性，给客户带来更多的收益。

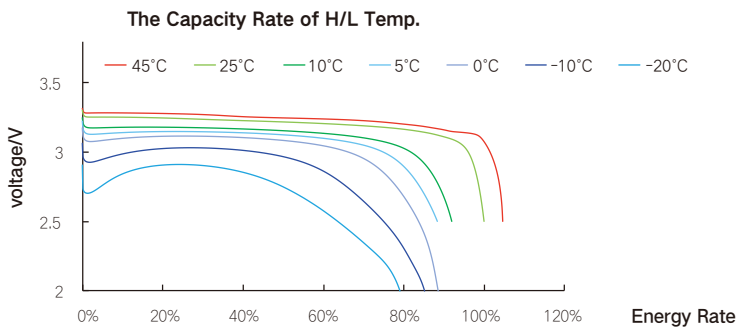


图28 高低温放电测试流程及结果展示

辅材寿命可靠性 卷芯内部材料可分为主材、辅材两类，行业对于主材的寿命特性研究较多，由于辅材的衰减特性很慢且存在较大的评估难度，行业关注不多。随着行业发展，储能场景对电池的寿命需求呈现明显的升级优化态势，在这样的背景下，就必须考虑辅材老化带来的失效风险。天合基于对各类辅材疲劳损伤机理的探究成果，开发了相应疲劳寿命的测试及评估方法。

以粘结剂为例，天合设计极片层级的温度交变加速试验，构建coffin-manson疲劳失效模型，来等效计算电池数十年昼夜温差引起的极片粘附力下降，确保电芯EOL状态时极片-集流体粘接力不失效。天合在辅材可靠性领域收集了大量数据，进而在设计及制造端定向优化参数，降低用户端使用末期出现寿命加速衰减的可能性，保障项目经济效益的达成。

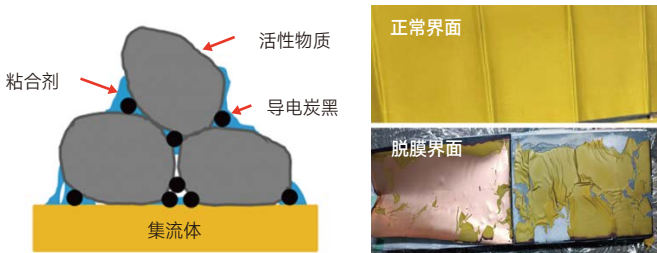


图28 粘结剂作用机制及正常&脱膜界面

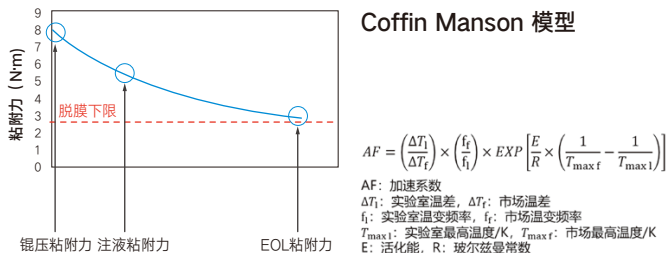
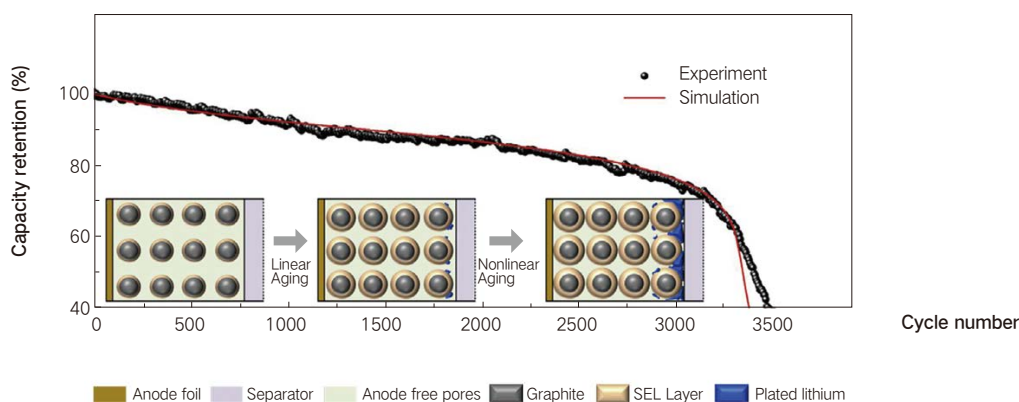


图29 粘附力退化模型搭建

电性能寿命可靠性 用户最关注的还是电池的电性能寿命，即在目标使用场景下电池容量衰减到70%SOH的使用年限。在研发阶段，天合布局了高温循环等加速寿命测试及低SOC存储等边界工况应力测试，基于测试数据库，开发了半经验物理仿真、数据驱动、电化学仿真等多种寿命预测模型，结合客户端工况功率谱的分解，能够输出工况寿命仿真曲线；同时对下机老化电池进行深入的机理探究，能够在项目开发阶段识别客户端使用后期的容量加速衰减风险。电池量产的实际制造水平能否保障设计寿命的有效发挥同样是问题所在，天合考虑到产线、来料批次、环境变化等因素，制定了科学的ORT测试及异常评价机制，能够在第一时间发现寿命异常品，极大减少不良品电池流入市场的概率。



SEI生长及析锂方程实现

— 反应方程

$$j_{SEI} = -aFk_{0,SEI}c_{EC}^{\xi} \exp\left(-\frac{\alpha_{c,SEI}F}{RT}\left(\phi_s - \phi_e - \frac{j_{tot}}{a}R_{film} - U_{SEI}\right)\right)$$

$$j_{lpl} = -a_{lpl} \exp\left(-\frac{\alpha_{c,lpl}F}{RT}\left(\phi_s - \phi_e - \frac{j_{tot}}{a}R_{film}\right)\right)$$

——模型设置

▶ 多孔电极反应 SEI

▶ 多孔电极反应 析锂

$$U_{SEI} = 0.4V$$

$$U_{pl} = 0$$

$$i_{loc,exp} = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right)$$

锂离子在SEI膜中扩散控制反应电流方程实现

——控制方程

$$-D_{EC} \frac{C_{EC}^s - C_{EC}^0}{\delta_{film}} = -\frac{j_{SEI}}{F} \rightarrow C_{EC}^s(t) = Ki_{loc}(t) \delta_{film}(t)$$

——模型设置

4 $\frac{d}{dt}$ 域常微分和微分代数方程 (dode)

- ▷ ^D— 分布式常微分方程 1
- ▷ ^D— 初始值 1

↓ 两边对t求微分

方程
 显示假设方程
 研究 1, 使用分析自动化

$$e_a \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^4} + d_a \frac{\partial C_A}{\partial t} = f$$
 选项

$$f = 1/(8 \cos(x/2) \sin^3(x/2) \sin(3x/2) \cos^3(x/2)) \sin(m \sin(x/2) \sin(3x/2) \cos(x/2))$$

图30 电化学仿真模型预测电池寿命;
X.-G. Yang et al. Journal of Power Sources 360 (2017) 28-40

当前，业主需求呈现明显的升级优化态势，客户对产品品质提出了更高的要求，因此可靠性日渐成为产品竞争力的关键。天合建立完善的可靠性工作体系，通过深化先进可靠性管理工具及方法运用、培育壮大可靠性专业队伍，为业主提供一个高安全高可靠的锂电池解决方案。

4

打造全链生态

先进制造技术

通过自动化、数字化、智能化三位一体的智能制造战略，天合储能搭建工业互联网体系，打造以用户为中心的“灯塔工厂”。依托专业的工艺、质量、设备、制造团队不断推动技术升级优化，实现高效、精准、灵活和可持续的生产模式，提升产品质量和生产效率，进一步降低生产成本。

— 智能极限制制造为产品赋能

自动化产线与智能制造系统 天合储能打造全自动化产线，采用高效制浆分散工艺与三级除磁技术，确保正负极材料与导电剂、粘结剂达到分散均匀、性能稳定的状态，为高品质产品奠定坚实基础。利用高精度涂布技术，在60m/min速度下能达到微米级精度；拥有高速条纹极片滚压、高速极片激光模切与多极耳卷绕技术，实现了产品性能、加工精度与效率的完美结合；采用高效接触式真空烘烤技术，实现能量回馈与综合利用，有效提升能量利用效率；高效真空化成技术有效解决电芯界面差问题，提升电芯的一致性、安全性与化成效率，确保产品质量；MES进行实时追溯管理，全产品周期溯源管控，保障电芯的可靠性；基于ERP与MES集成的工艺路线产品流转管控，有效管理2100+产品工艺控制点，实现毫秒级产线设备-系统间交互。



图31 自动化机械设备

柔性化生产 天合在生产线设计阶段，充分考虑未来产品多样性的需求，实现关键工位的可调整，配备多尺寸工装夹具，使生产线能够快速切换不同规格的电池产品。这种灵活性不仅仅体现在生产设备的可调整性上，更体现在整个生产流程的优化和智能化控制上。除技术优势外，高度重视人员培训和团队协作的深化，确保了从设计到生产的多部门协作，提高整体生产效率。

智能化能源管理 天合储能2024二季度末实现储能电池、直流电池舱、交直流产品组合产能25GWh。生产基地高效利用清洁稳定的绿色能源，同时基于实时精细化用能监测、智能调度和分配能源，确保生产的高效运行。能源优化有助于环境保护，实现绿色减碳，践行ESG理念。

预防性维护与健康监测 设备的高效稳定性对于保障生产顺利运行至关重要。为了减少非计划停机时间，提高产能和生产效率，天合储能采用了智能化、数字化的设备管理系统，实现了设备维护、保养、维修的全生命周期智能化管理。

一 质量管控确保一致性

质量管控体系 天合储能建立了标准化、系统化、规范化的质量管理体系，在产品质量管理方面采取了多项有力措施。产品研发质量引入IPD流程及NPI导入流程，从设计上规避质量问题；供应商来料质量严格执行天合供应商审核及准入原则，并引入汽车行业PPAP流程，确保每一批来料都符合高标准的质量要求；在生产过程及出货环节，依托MES、QMS等系统进行严格把关，确保产品的一致性和质量达到最优；在客户售后方面，基于云平台 and 大数据模型，对售后质量进行实时监控和预警，实现提前预防，为客户提供更加安心、满意的服务。

数字化质量管控 天合储能智慧工厂提供15+的产品生产过程追溯报表及产品下线追溯报表的查询及分析；支持启动产能爬坡后的数十万的电芯在制数据的收集及分析工作；支持在线的产能及良率报表查询，保证数据与实际生产相一致。通过多样化的监控看板及报表开发，提供从线边仓库到现场耗用、产品分析等一系列实时监控工具，满足生产、质量、线边管理人员对现场物料准确性的复核及检查需求。

一 智能交付

基于MES与ERP集成的有效计划管理、MES与WMS/ERP集成的现场物料管理，从材料采购、原材料入库、材料收发、生产制程、成品入库、产品交付、账务处理等全过程的数字化管控，天合储能实现全生产过程计划流程打通、物流环节高效、生产过程可控、全流程信息追溯、系统稳步运行、智能交付。

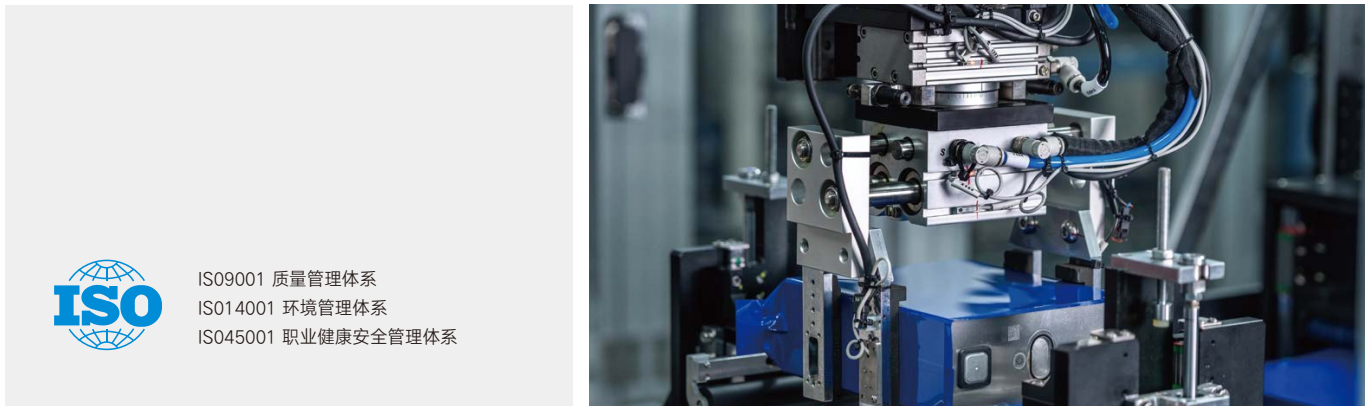


图32 自动包膜机

供应链保障体系

— 搭建高效协同的全球供应链体系

外部环境和内生需求变化催生供应链新挑战，企业数字化变革转型成为关键。内外环境相互叠加致使供应链持续承压，并进一步加大供应链不确定性。从外部环境看，全球化分工模式下供应链风险源随之增多，企业供应链面临着随时断供的可能，供给不确定性加剧。从内生需求看，市场消费需求的不确定性上升，订单碎片化和个性化定制趋势愈发凸显，企业供应链运营压力持续上升。

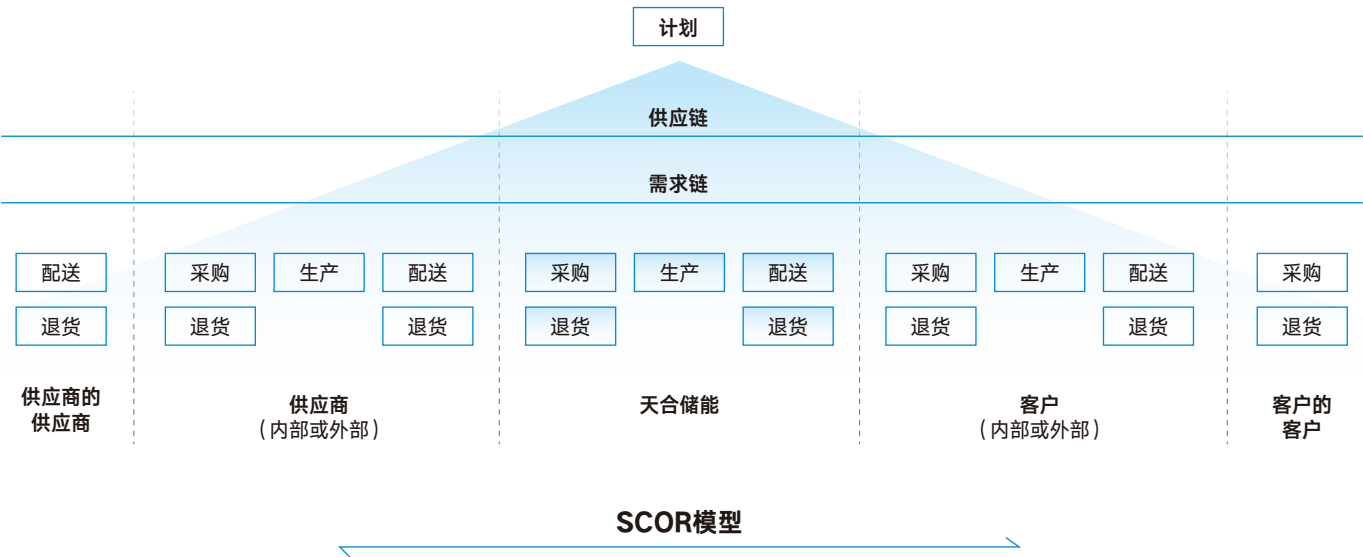


图26 天合芯获得权威检测认证

天合储能承接集团数字化转型变革，建立以客户为中心的集成供应链流程体系，打通计划、采购、制造、交付、物流仓储多部门。供应链流程体系建设遵从SCOR模型（Supply-Chain Operations Reference model供应链运作参考模型）结合成熟变革方法论注入天合基因，多模式全球产销计划协同，采购协同研发、供应商分层分级重点管理供应商从准入到退出全流程管理，制定品类策略，保供策略为后端供应提供保障，成为整条供应链条内外部的桥梁。

— 器件全流程管控 保障柔性生产

柔性供应方面，通过BOM生产类材料保供策略，分析产品类别供应能力，基于年度框架协议及质量保证协议，保供基础上确保整个产品成本最优及产品最优。

通过搭建供应链流程架构和端到端打通采购流程，得到了显著成果。BOM类材料供应方面，应用前期供应体系设计的采购早期介入流程，识别设计供应风险，通过明确的供应商认证流程，严选供应商。供应资源拓展方面，保障成本可控的同时确保供应可靠。秉持全产品成本最优，同步扩展优化潜在在供应商资源池，同时设计场景化采购供应商认证流程，缩短材料供应周期，精简流程，保障供应。

通过数字化供应链建设，从供需匹配优化、供需关系维护和供应质量提升三大方面增强产业链供应链韧性。在供需匹配优化上，上下游企业之间供需匹配概率、效率和质量能够进一步提升，企业有更多的机会、更高效便捷地选择供应商；在供需关系维持上，上下游企业之间建立互利共赢、协同共生的稳定关系；在供应质量提升上，上下游企业关联互动关系有效推动供应商创新能力升级，不断改善产品质量，推动产业链供应链结构像更高层级跃升。



快速响应解决机制

24h_{国内} — **48h**_{海外}

售后服务体系

— 客户服务平台

以客户为中心，倾听客户诉求，天合设立7*24全天候多渠道客户诉求接收通道，通过服务热线、电子邮件、公众号等，确保第一时间接收客户需求，妥善处理。

— 售后技术支持与维修服务

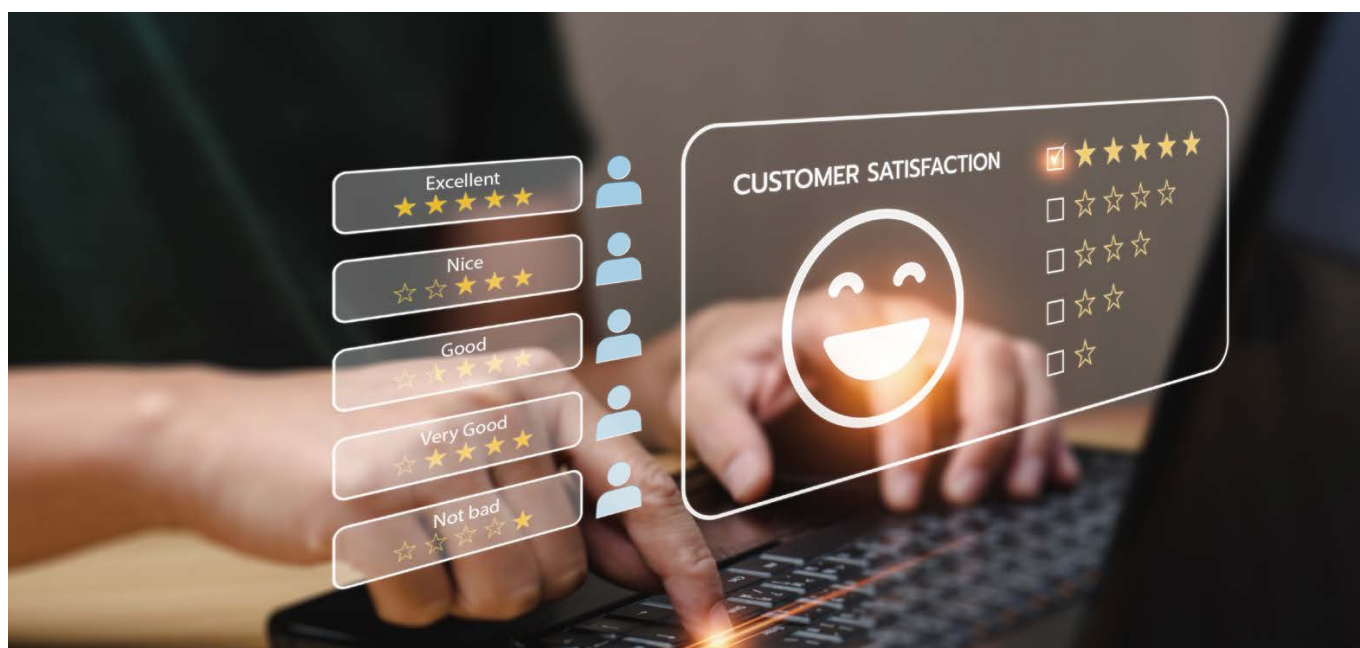
产品全生命周期的服务和技术支持。以专业、高效的服务解决客户遇到的产品问题，如产品信息、技术支持、使用指导及其它产品咨询解答；建立“国内24小时，海外48小时”的快速响应解决机制，提高客户满意度。

— 备件管理

建立独立的备件中心，采用电子化信息管理系统，科学规划和管理全球备件库存，快速响应客户端需求。

— 全球培训中心

建立专业培训中心，打造业内资深专家培训团队，定期组织培训，赋能售后工程师，持续提升服务人员的专业性；同时对客户开放专项赋能培训，帮助客户更好地了解和使用产品。





自研自产电芯 创造更高客户价值

天合储能，根植于天合集团深厚的新能源市场认知与30载的制造经验，凭借对光伏市场的精细耕耘，洞悉客户的多维度、多层次需求。我们坚持以客户需求为引擎，精心打造储能系统产品，并以此衍生产业链条，推动自研自产的天合芯的持续优化与升级。我们的目标，不仅是满足客户的需求，更是超越客户的期待，以卓越的产品与服务，推动储能市场的健康发展。

— 安全可靠

品质把控 自研自产电芯意味着从原材料选择、生产工艺到质量检测等各个环节都能进行严格的把控，确保电芯的品质稳定可靠，为客户提供更加放心的产品。

溯源管理 自研自产电芯具备完整的溯源管理体系，可以追溯到原材料的管控和产品生产全过程，有助于及时发现并解决潜在的安全问题。

— 经济高效

产能保障 天合完善的供应链体系可以确保稳定的电芯产能供应，避免供应不足而影响项目的交付，有助于客户实现持续稳定的业务发展。

效益更优 长寿命、高转化效率的电芯有助于延长整个系统的循环寿命并提升吞吐量，从而增强系统的整体价值，实现储能电站运营效益的提高并有效降低全生命周期度电成本。

— 服务安心

快速响应 天合储能依托集团的全球化售后服务渠道，建立完善的储能售后服务体系，快速响应客户需求，提供有效解决方案。

技术支持 天合储能拥有专业的技术团队，能够为客户提供全方位的技术支持和咨询服务，有助于客户更好地了解和使用产品，提高使用效率和安全性。

接口统一 全栈自研天合储能产品，提供全流程售后服务，从电芯到系统一站式服务，避免多厂家设备引起的责任认定不清，售后协调困难等难题。

在光储融合发展的道路上，天合储能始终坚持科技创“芯”精神，专注光储能量长续。致力于为每一位客户提供安全可靠、高效收益、超长寿命、智慧应用的储能产品和解决方案。通过技术创新引领储能产业发展，助力新型电力系统变革，共同创建美好零碳新世界。





科技创“芯” 能量长续

有“芯”的储能产品及解决方案提供商





江苏天合储能有限公司

常州市新北区天合光伏产业园天合路2号
邮箱: trinastoragecn@trinasolar.com

www.trinasolar.com

