

硅基负极，高能量密度锂离子电池首选

——电动车产业链技术研究专题系列之二

行业专题研究

● 石墨负极潜力挖掘完全

电芯能量密度和负极材料的克容量成正相关关系。目前，高端石墨克容量已经达到 360-365mAh/g，接近理论克容量 372mAh/g。因此从负极材料角度看，电芯能量密度的提升需要开发出具有更高克容量的负极材料。

● 硅基负极材料最具商业化前景

硅基负极材料中 Si 与 Li^+ 产生合金化反应，最高克容量可达 4200 mAh/g，是石墨的 10 倍多。且硅还具有较低的电化学嵌锂电位（约 0.4 V vs. Li/Li^+ ），不存在析锂问题、储量丰富等优点，是非常具有潜力的下一代高能量密度锂离子电池负极材料。

● 硅基负极材料产业化关键点：体积剧烈变化和不稳定的 SEI 膜

在充放电过程中，硅锂合金的生成与分解伴随着巨大的体积变化，最大膨胀可达 320%，而碳材料只有 16%。剧烈的体积变化导致如下的挑战：硅颗粒破裂粉化、负极活性物质从电极片上脱落、因粉化和脱落引起固相电解质层（SEI 膜）持续形成。目前，主要通过材料设计（硅的纳米化、对硅进行碳包覆、加入氧化亚硅等）和电池体系优化（选用电解液添加剂 FEC 和 VC 等、负极材料粘接剂 CMC-SBR 和聚丙烯酸锂等、导电剂的优化）等来应对。

● 碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳商业化程度高

硅基负极材料制备方法多，且较石墨的制备工艺更复杂，产品尚未达到标准化。目前，碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳是商业化程度最高的两种硅基负极材料。量产企业有国内的贝特瑞、天目先导、杉杉等，海外的日本信越化学、大阪钛业、日立化成、昭和电工和韩国大洲等。

● 硅基负极材料产业化时间短；国际上日企领先，国内贝特瑞领先

日本日立、汤浅等企业从 2015 年开始陆续将硅基负极应用到消费电池和动力电池中，促进了硅基负极材料产业化应用。国内方面，根据高工锂电的调研，能够量产硅基负极材料的企业不超过 3 家，其中，贝特瑞国内领先，于 2017 年实现量产出货，现已成功进入松下-特斯拉供应链。

● 投资建议

受益公司有负极材料龙头、硅基负极领域领先的贝特瑞，开启硅基负极产业化的杉杉股份、人造石墨龙头、推进硅基负极产业化的璞泰来。

● 风险提示：疫情对新能源汽车需求的影响，硅基负极产业化应用不及预期

● 重点公司财务及估值

证券代码	股票名称	股价，元	EPS			PE		
			2019	2020E	2021E	2019	2020E	2021E
835185.OC	*贝特瑞	45.91	1.52	2.07	2.84	30.3	22.2	16.2
600884.SH	*杉杉股份	13.83	0.13	0.34	0.43	103.0	40.7	32.1
603659.SH	*璞泰来	92.50	1.41	2.05	2.72	65.5	45.1	34.0

资料来源：Wind，新时代证券研究所（带*为新 wind 一致预期，股价为 2020.6.16 收盘价）

推荐（维持评级）

开文明（分析师）

021-68865582

kaiwenming@xsdzq.cn

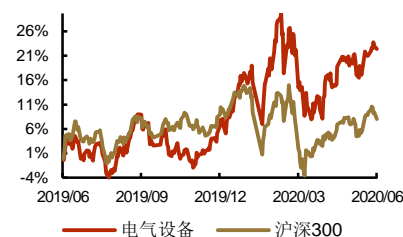
证书编号：S0280517100002

王璠（联系人）

wangjin3@xsdzq.cn

证书编号：S0280119120005

行业指数一年走势



相关报告

《欧洲新能源车高景气确定性强，可再生能源省级消纳责任权重下发》2020-06-14

《新能源车海内外共振景气向上，可再生能源省级消纳责任权重下发》2020-06-07

《光伏新规范强化龙头优势，大众入股国轩凸显国内产业链竞争力》2020-05-31

《欧盟电动车政策有望加码，光伏需求预期向好》2020-05-24

《新能源汽车销量回暖，光伏需求预期向好》2020-05-17

目 录

1、 石墨负极潜力挖掘完全.....	4
1.1、 锂离子电池通过 Li^+ 往返脱嵌于正负极之间实现化学能与电能相互转换.....	4
1.2、 石墨是目前广泛使用的负极材料，通过嵌入的方式储锂.....	4
1.3、 石墨负极克容量接近理论值，不能满足电芯能量密度提升的需求.....	5
2、 硅基负极材料最具商业化前景.....	6
2.1、 硅锂合金的克容量是石墨的 10 倍多，电芯能量密度提升空间大.....	6
2.2、 硅基负极材料产业化关键点：体积剧烈变化和不稳定 SEI 膜.....	6
2.3、 硅基负极材料的制备方法多、产品未标准化.....	9
3、 硅基负极材料的产业化发展.....	10
3.1、 硅基负极产业化时间短，日企处于行业领先.....	10
3.2、 目前碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳商业化程度最高.....	10
3.3、 国内大批量生产企业少，贝特瑞优势明显.....	11
4、 硅基负极厂商将受益于电芯能量密度提升.....	13
4.1、 贝特瑞：负极材料龙头，硅基负极国内领先.....	13
4.2、 杉杉股份：硅基负极开启产业化.....	14
4.3、 璞泰来：人造石墨龙头，推进硅基负极产业化.....	15
5、 风险提示.....	15

图表目录

图 1： 锂离子电池工作原理.....	4
图 2： 负极材料可分为石墨、无定形碳、硅基材料.....	4
图 3： 2019 年动力电池负极材料中石墨占比 97%.....	4
图 4： 负极材料不同储锂方式和对应的典型负极材料.....	5
图 5： 石墨嵌锂形成不同的“阶”结构.....	5
图 6： 锂离子电池能量密度不断提升.....	5
图 7： 锂离子电池能量密度不断提升.....	6
图 8： 硅柱阵列电极在充放电过程中的形貌演变过程.....	7
图 9： 硅基负极电池的失效机理.....	8
图 10： 硅基负极材料渗透率 1.4%.....	11
图 11： 2017-2019 年贝特瑞营收，百万元.....	13
图 12： 2019 年贝特瑞负极材料营收占比 69%.....	13
图 13： 2019 年人造石墨市场格局.....	14
图 14： 2019 年天然石墨市场格局.....	14
图 15： 2017-2019 年杉杉营收，百万元.....	15
图 16： 2019 年杉杉负极材料营收占比 33%.....	15
图 17： 2017-2019 年璞泰来营收，百万元.....	15
图 18： 2019 年璞泰来负极材料营收占比 64%.....	15
表 1： 负极材料克容量与锂离子电池能量密度对应关系.....	6
表 2： 硅及硅锂合金化合物的晶胞参数和对应的储锂比容量.....	7
表 3： 硅锂合金体积变化对电芯性能的影响.....	8
表 4： 硅基负极体积膨胀和不稳定 SEI 膜解决方法.....	8
表 5： 不同材料设计方案对比.....	9

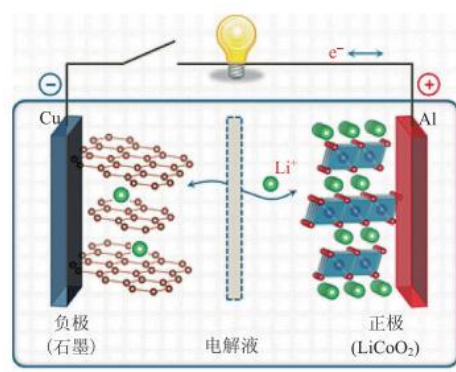
表 6: 硅基负极材料主要制备方法	9
表 7: 硅基负极材料的发展	10
表 8: 碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳是商业化程度最高的两种硅基负极材料	11
表 9: 国内贝特瑞领先其他厂商	12
表 10: 各家部分产品性能情况	12
表 11: 2022 年国内硅基负极材料市场空间超 20 亿元	13
表 12: 硅基负极材料研发进展	14
表 13: 相关公司估值	15

1、石墨负极潜力挖掘完全

1.1、锂离子电池通过 Li^+ 往返脱嵌于正负极之间实现化学能与电能相互转换

锂离子电池主要是由正极、负极、电解液、隔膜等部分组成，其中正、负极为活性组分，是能量存储的载体。**锂离子电池工作原理：**以钴酸锂和石墨负极为例，1) 充电时，电子从正极转移到负极，同时钴酸锂中的锂失去电子成为锂离子进入电解液，锂离子穿过隔膜后进入石墨负极，并在负极接受电子还原成为锂。2) 放电时，锂在负极失去电子后，穿过隔膜回到正极，并在正极接受电子被还原，完成放电。鉴于锂离子的这种传输特点，锂离子电池又被称为“摇椅电池”，其中**电极材料脱嵌性能是锂离子电池性能的决定因素之一**。

图1： 锂离子电池工作原理

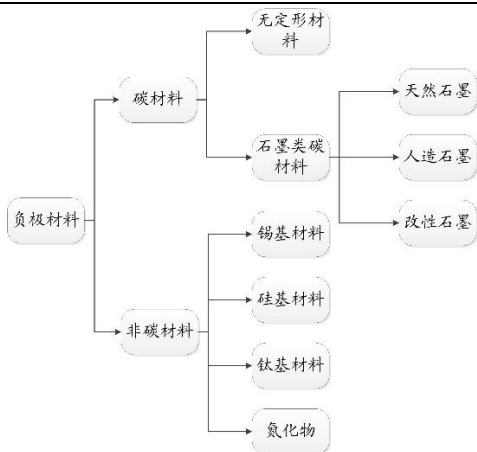


资料来源：《锂离子电池过往与未来》，新时代证券研究所

1.2、石墨是目前广泛使用的负极材料，通过嵌入的方式储锂

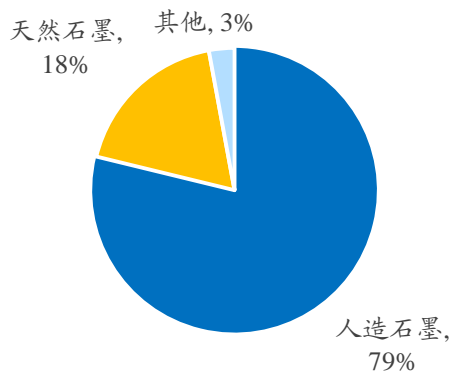
石墨是目前动力电池负极材料商业化应用的主流。目前商业化的负极材料主要有石墨(天然石墨和人造石墨等)、无定形碳(软碳和硬碳)、钛酸锂及硅基材料(纳米硅碳材料、氧化亚硅和无定形硅合金)。2019年动力电池用负极材料中石墨负极材料的出货量占比达97%以上。

图2： 负极材料可分为石墨、无定形碳、硅基材料



资料来源：新时代证券研究所

图3： 2019年动力电池负极材料中石墨占比97%

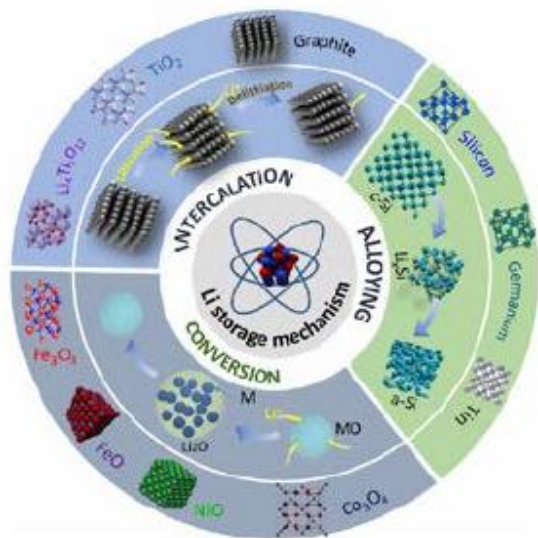


资料来源：GGII，新时代证券研究所

石墨通过嵌入的方式进行储锂。不同的负极材料可以通过嵌入、合金化或者转换反应实现储锂。石墨为嵌入式的典型代表，嵌入的Li插在层状石墨层间，形成

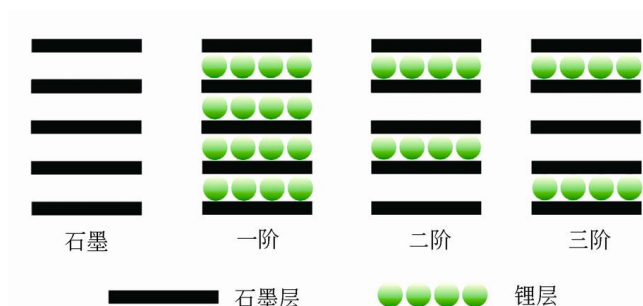
不同的“阶”结构。随着 Li 的嵌入量增加，最终形成 1 阶结构，对应石墨的理论容量为 372mAh/g。

图4： 负极材料不同储锂方式和对应的典型负极材料



资料来源：《锂离子电池高容量硅基负极材料研究》，新时代证券研究所

图5： 石墨嵌锂形成不同的“阶”结构



资料来源：《锂离子电池基础可续问题（VIII）--负极材料》，新时代证券研究所

注：阶是指相邻的两个嵌入原子层之间所间隔的石墨层的个数。

1.3、石墨负极克容量接近理论值，不能满足电芯能量密度提升的需求

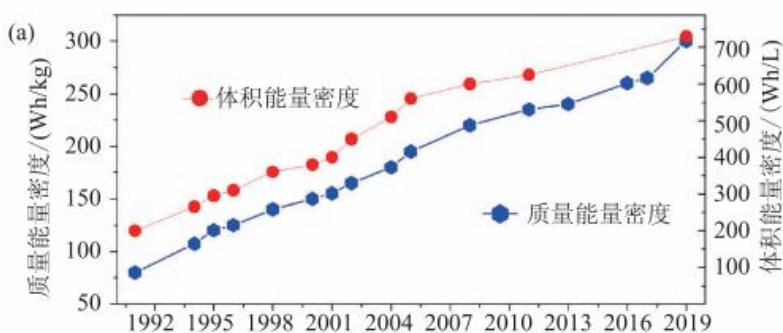
电芯的能量密度为

$$E_m = \frac{k}{\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_a}} (U_c - U_a)$$

其中， E_m 、 Q_c 、 Q_a 、 U_c 、 U_a 、 k 分别为电芯的能量密度、正极克容量、负极克容量、正极平均电位、负极平均电位和正负极活性材料的质量或体积与电池总质量或体积的比值，在实际电池体系中， k 值通常介于 0.42~0.61。

锂离子电池的能量密度不断提升。1991 年索尼公司第一批商业化锂离子电池能量密度相对较低(能量密度 80 Wh/kg 或 200 Wh/L)，现在先进的高能量密度锂离子电池可以实现 300 Wh/kg 或 720 Wh/L。

图6： 锂离子电池能量密度不断提升



资料来源：《锂离子电池过往与未来》，新时代证券研究所

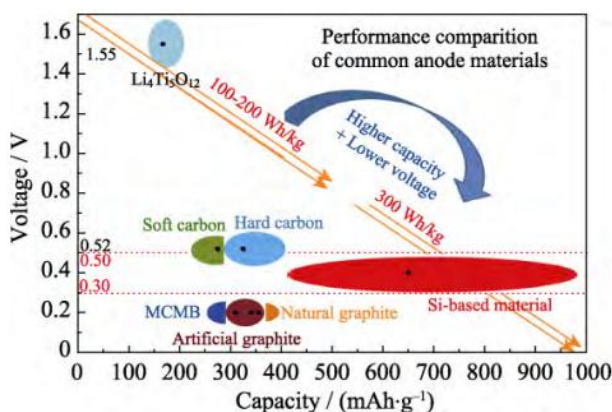
目前，高端石墨克容量已达到 360-365mAh/g，接近理论克容量 372 mAh/g。因此从负极材料角度看，电芯能量密度的提升需要开发出具有更高比容量的负极材料。

2、硅基负极材料最具商业化前景

2.1、硅锂合金的克容量是石墨的 10 倍多，电芯能量密度提升空间大

具有高克容量和低电位等优势，硅基负极材料是最具商业化潜力。硅锂化后具有很高的理论克容量，约 4200 mAh/g，是石墨的 10 倍左右。同时，硅还具有较低的电化学嵌锂电位（约 0.4 V vs. Li/Li⁺），不存在析锂问题、储量丰富等优点，是公认的非常具有潜力的下一代高能量密度锂离子电池负极材料。根据《高能量密度锂离子电池硅基负极材料研究》中指出，如果不使用富锂正极，当电芯能量密度要达到 280Wh/kg 以上时，就必须使用硅基负极。

图7： 锂离子电池能量密度不断提升



资料来源：《高能量密度锂离子电池硅基负极材料研究》，新时代证券研究所

表1： 负极材料克容量与锂离子电池能量密度对应关系

	三元 NCA (190mAh/g)	三元 811 (200mAh/g)	富锂 (300mAh/g)
电芯能量密度, Wh/kg			
纯石墨 (372mAh/g)	268	272	308
硅基负极 (400mAh/g)	272	276	316
硅基负极 (500mAh/g)	283	287	333
硅基负极 (650mAh/g)	292	297	347
硅基负极 (800mAh/g)	297	302	355
电芯能量密度提升 (以纯石墨为基准)			
硅基负极 (400mAh/g)	1%	1%	3%
硅基负极 (500mAh/g)	6%	6%	8%
硅基负极 (650mAh/g)	9%	9%	13%
硅基负极 (800mAh/g)	11%	11%	15%

资料来源：《高能量密度锂离子电池硅基负极材料研究》，新时代证券研究所

2.2、硅基负极材料产业化关键点：体积剧烈变化和不稳定 SEI 膜

Li⁺在脱嵌过程中巨大的体积膨胀效应会导致硅颗粒产生裂纹粉化和结构崩塌。硅表面与电解液接触，重复形成的固相电解质层 (SEI) 使电化学性能恶化。

硅是通过合金化储存锂，合金化反应伴随巨大的体积变化。在充电时，硅被锂化，Si 和 Li^+ 产生一系列的反应，并且体积变化不断增大。首先，硅颗粒外层出现非晶态的 Li_xSi ，内层依然保持晶态硅。随着锂化程度的加大，硅完全锂化生成 $\text{Li}_{22}\text{Si}_5$ 时，其理论容量将达到 4200 mAh/g，体积膨胀 320%，而碳材料只有 16%。放电时， $\text{Li}_{22}\text{Si}_5$ 会分解成 Li+ 和 Si，体积随之变小。

表2: 硅及硅锂合金化化合物的晶胞参数和对应的储锂比容量

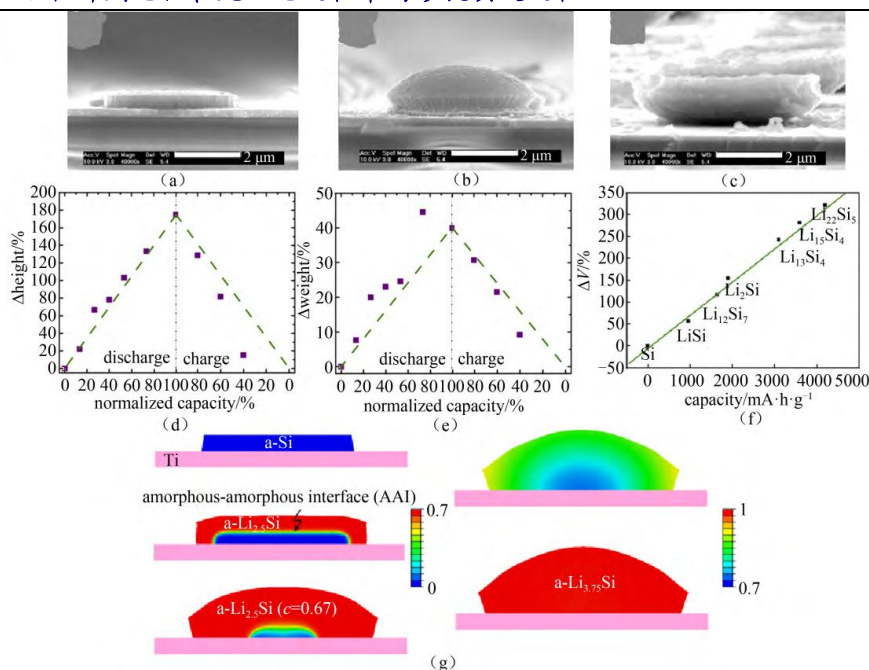
硅的不同嵌锂状态	体积/ \AA^3	理论充容量, mAh/g
Si	19.6	0
LiSi	31.4	954
$\text{Li}_{12}\text{Si}_7$	43.5	1635
Li_2Si	51.5	1900
$\text{Li}_{13}\text{Si}_4$	67.3	3100
$\text{Li}_{15}\text{Si}_4$	76.4	3590
$\text{Li}_{22}\text{Si}_5$	82.4	4200

资料来源:《锂离子电池基础可续问题 (VIII) -- 负极材料》，新时代证券研究所

注: $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$

根据中科院物理所研究发现，硅柱阵列电极在嵌锂过程中（充电）体积膨胀，由初始的圆柱形最终演变成类似于圆屋顶形，而脱锂过程中（放电）体积收缩，最终演变成碗状形貌。

图8: 硅柱阵列电极在充放电过程中的形貌演变过程



资料来源:《锂离子电池纳米硅碳负极材料研究进展》，新时代证券研究所

注: (a) 初始态, (b) 完全嵌锂态, (c) 完全脱锂态的硅柱阵列电极形貌, (d) 硅柱阵列电极在脱嵌锂过程中在竖直方向尺寸变化, (e) 水平方向尺寸变化, (f) 体积变化, (g) 硅柱阵列电极在脱嵌锂过程中形貌以及锂浓度变化示意图

巨大体积变化导致硅颗粒的粉化、负极材料活性物质脱落和 SEI 膜持续形成。

1) 对于整个电极而言，由于每个颗粒膨胀收缩会“挤拉”周围颗粒，这将导致电极材料因应力作用从电极片上脱落，进而导致电池容量急剧衰减，循环寿命缩短。2) 对单个硅粉颗粒来说，嵌锂过程中，外层嵌锂形成非晶 Li_xSi 发生体积膨胀，内层

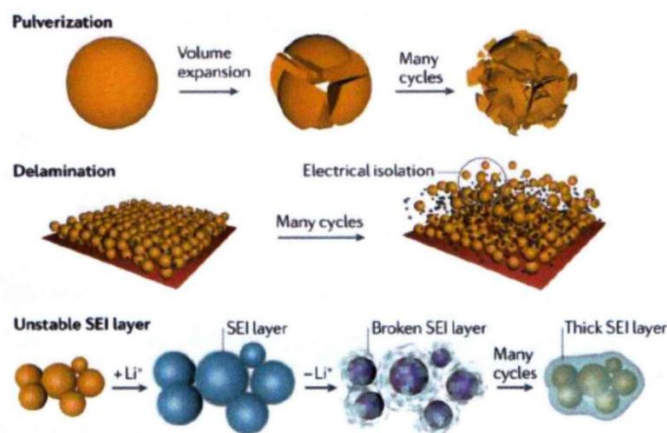
还未嵌入锂不膨胀,导致每个硅颗粒内部产生巨大应力,造成单个硅颗粒开裂粉化。3) 充放电循环过程中,硅颗粒开裂粉化和电极材料的脱落会不断产生新的表面,进而导致固相电解质层(SEI膜)持续形成,不断消耗锂离子,造成电池整体容量持续衰减。

表3: 硅锂合金体积变化对电芯性能的影响

主要问题	具体描述和对电芯性能的影响
硅颗粒的粉化	硅颗粒在反复脱嵌锂过程中承受不了体积形变带来的巨大应力导致自身颗粒破裂,内阻增大,影响电子在电极上的直接传输,硅颗粒严重破裂会使部分活性材料完全失去电化学活性。
负极活性物质的脱落	体积变化导致结构坍塌和电极活性物质剥落,导致硅颗粒之间或者颗粒与集流体之间失去电接触,甚至活性物质从集流体脱落,从而导致容量衰减。
不稳定的SEI膜	形变导致硅表面的SEI膜反复破裂和生成,不断消耗电解液和Li ⁺ 。同时,SEI膜厚度随着电化学循环不断增加,过厚的SEI膜阻碍电子转移和Li ⁺ 扩散,阻抗增大,极化增加。

资料来源:《锂离子电池高容量硅基负极材料研究》,新时代证券研究所

图9: 硅基负极电池的失效机理



资料来源:《刻蚀法制备硅基负极材料及其电化学性能研究》,新时代证券研究所

材料设计和电池体系优化是解决硅基负极材料商业化的主要方式: 1) 材料设计,通过硅的纳米化、对硅进行碳包覆、加入氧化亚硅等方式,减小体积变化带来的负面影响。2) 电池体系,目前主要是通过电解液添加剂、负极材料粘接剂、导电剂的优化来减少硅基负极的膨胀影响。3) 电极结构改进,省去粘接剂或集流体,直接将活性材料复合在导电网络中制得极片,该技术路线处于研发阶段。

表4: 硅基负极体积膨胀和不稳定SEI膜解决方法

方法	技术原理
纳米化	纳米材料往往具有更小的尺寸以及更高的比表面积。同时,纳米材料表面的原子也具有更高的平均结合能。因此,它们可以在体积膨胀过程中更好地释放应力,有效地避免自身结构的坍塌,从而保持电极的壳容量,提升电池的循环性能。
碳包覆	一方面可以将硅表面很好地保护起来,并充当硅体积膨胀的缓冲层,避免硅在充放电体积形变过程中裸露的新鲜硅表面与电解液直接接触反复生成SEI膜;另一方面可以增加颗粒的导电性,促进锂离子和电子在硅颗粒和电解液之间的传输,较少电极的电荷转移阻抗。碳包覆方案有核壳结构、多孔结构和空心核壳型等。

方法	技术原理
氧化亚硅材料	将硅、二氧化硅相混合成一个新的结构。在该结构中存在硅、二氧化硅和一些硅的亚氧化态。氧化亚硅材料由于其中的硅为无定型态或者晶粒减小的晶体硅（一般小于 10nm），而且在首次嵌锂时会形成硅酸锂和氧化锂的缓冲层，一般会表现出更好的循环性。但是同时也由于二氧化硅和硅的一些亚氧化态会在首次嵌锂时不可逆地消耗一些活性锂生成硅酸锂和氧化锂，氧化亚硅材料一般会表现出较低的首周效率。所以， 预锂化也是和氧化亚硅材料密切相关的一个重要话题。
硅/金属合金	某些金属（如 Ge、Sn、Fe 等）与硅合金化使用可以稳定结构，提升电机循环寿命和倍率性能。硅/金属合金生产工艺复杂，尚不能大规模生产。
预锂化	预锂化能够提前在材料内引入活性锂，避免了全电池中有限锂源的过度消耗，可以大幅提高材料的循环性能。预锂化技术主要有三种： 电化学预嵌锂、负极补锂、正极补锂。
电解液的改进	电解液直接影响硅负极的 SEI 成膜过程，一个致密均匀且具有离子电导的 SEI 膜直接影响到硅负极的循环稳定性。一般 EC、DEC、DMC 成分变化不大， 研究发现 FEC、VC、LiBOB 等添加剂对硅基负极有效果。
粘结剂的改进	合适的粘接剂有利于减少硅负极的体积膨胀和在硅表面形成连续的 SEI 膜。选择合适的粘接剂时，首先考虑表面基团，羟基和羧基等极性官能团有利于粘附在硅颗粒表面，如 CMC-SBR 体系；其次，还要考虑粘结剂的碳链结构，碳链较长且没有支链有利于硅负极膨胀收缩过程中的滑动，而不是直接与硅颗粒脱离。 目前，硅负极容量在 500mAh/g 以下，一般选择 CMC-SBR 体系；硅负极容量 550mAh/g 以上，选用新的粘结剂。常用的高容量粘结剂有聚丙烯酸和聚丙烯酸锂。
导电剂的改进	硅基负极的导电性能比天然石墨和人造石墨等石墨类负极材料要差，因此需要添加高性能导电剂来提升其导电性能。碳纳米管导电剂是目前的主要方向之一。
新型硅基电极结构	活性材料直接复合在导电网络中制作极片，省去粘接剂或集流体。目前实验室阶段研发出利用静电纺丝制备出了嵌有硅材料的复合材料直接用作电极，Si/C 复合纤维织成的片状材料容量达 952mAh/g。此外，自支撑无需粘接剂和集流体的电机也处于研发中。

资料来源：《高能量密度锂离子电池硅基负极材料研究》，《锂离子电池硅基负极粘接剂和锂补偿研究》，新时代证券研究所

表5：不同材料设计方案对比

指标	纳米硅碳	氧化亚硅	无定型硅合金
首效	高	低	中
循环	良	优	良
膨胀	高	中	中
压实	中	中	高
成本	中	中	高
改进方案	单分散纳米硅、复合结构设计	均匀包覆、预锂化	调整组分、改进制备工艺

资料来源：《锂离子电池高容量硅基负极材料研究》，新时代证券研究所

2.3、硅基负极材料的制备方法多、产品未标准化

硅基负极材料可以通过多种制备方法获得，主要包括化学气相沉积法、机械球磨法、溶胶-凝胶法等。硅基负极材料相对于石墨负极材料的制备工艺复杂，大规模生产存在一定困难，且每个企业生产工艺不尽相同，产品目前没有达到标准化。

表6：硅基负极材料主要制备方法

制备方法	优点	缺点
化学气相沉积法	循环稳定性好，首次充放电效率高，对设备要求简单，适合工业化生产	总比容量相对较低，成本较高
机械球磨法	明显降低反应活化能；提高材料电/热学性能；粒度较小，分布均匀；工艺简单，成本较低，适合工业	团聚现象严重

制备方法	优点	缺点
	化生产	
溶胶-凝胶法	分散性能好；较高的可逆比容量	碳凝胶较其它碳材料稳定性能差，在循环过程中碳壳会产生裂痕并逐渐扩大，导致负极材料结构破裂；且凝胶中氧含量过高会生成较多不导电的 SiO_2 ，导致负极材料的首次充放电效率较低
高温热解法	空隙结构一般较大，能较好的缓解硅在充放电过程中的体积变化	硅分散性能差；碳层易分布不均匀；易团聚

资料来源：前瞻产业研究院，贝特瑞公开发行股票说明书，新时代证券研究所

3、硅基负极材料的产业化发展

3.1、硅基负极产业化时间短，日企处于行业领先

硅基负极材料由日本企业首先在2015年和2017年陆续推向消费和动力电池领域。1996年开始硅基负极的研究，日本松下2012年推出含硅电池，2015年日立Maxwell的SiO/C负极电池领用到消费电池领域，并在2017年特斯拉采用日立化成的硅基负极应用到电动车中。日本GS汤浅推出硅基负极材料的锂电池，应用在三菱汽车上。

表7：硅基负极材料的发展

时间	重要事件
90年代	1990年，Moli和Sony两大公司推出了以碳为负极的锂离子电池。
1996	有研究关注使用微米与纳米结构的硅颗粒与碳相结合，应用于负极材料。
2009	Park等人在硅纳米管外包覆了纳米碳，将其作为负极，钴酸锂作为正极的电池实现5C高倍率下循环，比容量可达3000mAh/g。同时在1C的大电流下运行了200个循环，容量保持率达到89%。
2012	日本松下发布的NCR18650C型号电池，容量高达4000mAh。
2015	日立Maxwell公司开发出一种以“SiO/C”材料为负极的新型锂电池，并成功应用到智能手机等商业化产品中。
2016	韩国一家研究所通过化学气相沉积法（CVD），有效解决了硅体积膨胀的问题，将有助于推动碳-纳米硅-石墨复合负极材料大规模生产。
2017	特斯拉采用碳包覆氧化亚硅的技术，在人造石墨中加入10%的硅基材料，并将硅基负极材料首度运用在Model3车型上，其电池能量密度达到了300Wh/kg，电池容量可达550mAh/g。

资料来源：前瞻产业研究院，新时代证券研究所

3.2、目前碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳商业化程度最高

目前，商业化的硅基负极材料主要包括碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳、无定型硅合金、硅纳米线四种，其中**碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳是商业化程度最高的两种硅基负极材料**。1) **碳包覆氧化亚硅**，目前较好的碳包覆氧化亚硅产品搭配石墨到450-500mAh/g容量后使用，已经可以做到在钢壳电芯中循环1000-2000周，在软包电芯中循环500-1000周。2) **纳米硅碳**，目前商业化的软包电池和方形铝壳电池对膨胀依然非常敏感，以致纳米硅碳材料仍然较难使用在这类电池上。目前纳米硅碳材料的主要应用领域仍是在圆柱钢壳电池中，以18650和21700型号为代表。

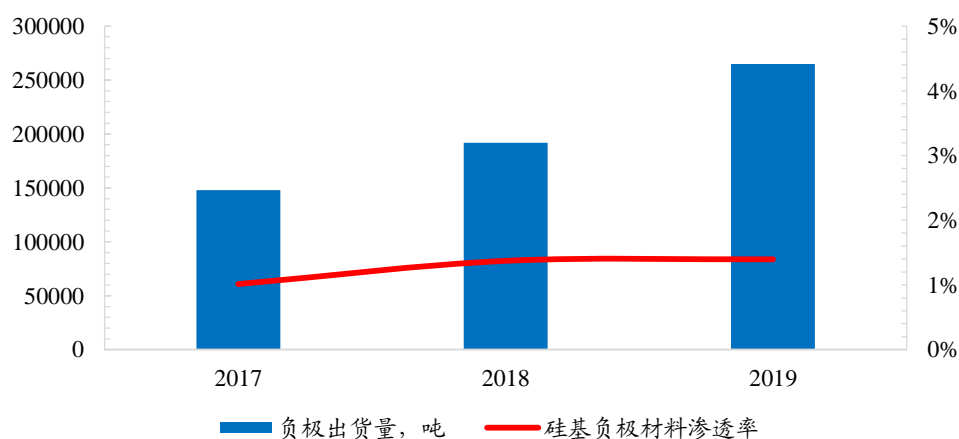
表8: 碳包覆氧化亚硅、纳米硅碳是商业化程度最高的两种硅基负极材料

种类	优点	缺点	批量生产企业
碳包覆氧化亚硅	循环性能较好，膨胀较小，适用范围广，在钢壳电芯（包括 18650、21700 等）、软包电芯、方形铝壳电芯中均可使用	首周效率较低，且倍率性能一般	国内：深圳贝特瑞、溧阳天目先导、上海杉杉等 国外：日本信越化学、日本大阪钛业、日本日立化成和韩国大洲
纳米硅碳	首效更高，倍率性能更好	膨胀相对高，循环性能也相对较差，适用范围较窄	国内：深圳贝特瑞、溧阳天目先导、上海杉杉等 国外：日本昭和电工
无定型硅合金	首效相对较高，循环性好，体积能量密度高	加工工艺需要采用热甩带法，加工难度较大，成本较高。而且，一般仍需要结合碳包覆后才能发挥更好的性能，但是碳包覆过程中所涉及的高温处理步骤有可能使硅结晶长大，从而降低循环性。	国外：美国 3M 和韩国的 MK1，但目前仍处于较小批量试样阶段。
硅纳米线	较高的克容量和首周效率	会持续生成 SEI 膜，不断消耗活性锂，需要和成熟的补锂技术相搭配，同时制备工艺上也存在一定难度	国外：美国安普瑞斯

资料来源：《高能量密度锂离子电池硅基负极材料研究》，新时代证券研究所

3.3、国内大批量生产企业少，贝特瑞优势明显

目前，硅碳负极材料在我国的发展尚处于初级阶段，实际应用还比较小众，市场总体产量较小。根据高工产研统计，2019 年我国硅基（包括硅碳和硅氧）负极材料出货量仅 3700 吨，在负极材料中的渗透率约 1.4%。

图10: 硅基负极材料渗透率 1.4%

资料来源：GGII，新时代证券研究所

国内量产企业少，贝特瑞处于领先地位。根据高工锂电的调研，国内能够量产的企业不超过3家。其中，只有贝特瑞能够大批量供货，贝特瑞已经进入了松下的供应链，间接供应特斯拉。国内其他厂商处于研发或者小批量量产阶段。当前稳定量产硅基负极型号较少，以 420mAh/g、450mAh/g 两款为主。

表9：国内贝特瑞领先其他厂商

厂商	硅基负极材料概况
贝特瑞	2010 年取得研发突破，2013 年通过三星认证， 2017 年实现 1000 吨出货 ，成功切入松下-特斯拉体系。
国轩高科	2016 年 11 月发布公告，将募资不超过 36 亿元用于动力电池项目建设，其中涵盖约 5000 吨的硅基负极材料项目。
天目先导	1996 年开始依托中科院物理所对硅基负极材料开展基础研究，2013-2016 年完成了纳米硅基负极材料的小试放大，2017 年成立天目先导，致力于硅基负极材料的规模生产。
杉杉	硅碳负极产品实现 小规模量产供货 ，2017 年底产能约 4000 吨/年。
正拓能源	2014 年开始研发硅碳新型材料， 2017 年实现量产 ，产能 4000 吨/年。
璞泰来	计划投资 50 亿元于江苏溧阳的隔膜、负极材料项目，同时与中科院物理所合作量产新型硅碳复合负极材料。
斯诺	2017 年硅碳负极材料实现 小批量供货 。
中科星城	处于中试阶段。
东莞凯金	处于小试阶段。

资料来源：前瞻产业研究院，新时代证券研究所

表10：各家部分产品性能情况

厂商	硅基负极材料分类	产品名称	粒度-D50 (μm)	振实密度 (g/cm^3)	比表面积 (m^2/g)	首次容量 (mAh/g)	首次效率(%)
贝特瑞	氧化亚硅复合材料	S420-2A	16.0 ± 2.0	0.9 ± 0.1	<2.0	≥ 420	92.5 ± 1.0
		S450-2A	15.0 ± 2.0	0.9 ± 0.1	<2.0	≥ 450	91.5 ± 1.0
		S500-2A	15.0 ± 2.0	0.9 ± 0.1	<2.0	≥ 500	90.0 ± 1.0
	硅系复合材料	S400	15.0-19.0	0.8-1.0	1.0-4.0	400-499	92-94
		S500	15.0-19.0	0.8-1.0	1.0-4.0	500-599	90-92
		S600	15.0-19.0	0.8-1.0	1.0-4.0	600-650	89-90
溧阳天目 先导	纳米硅碳复合材料	SL400B-SC	11.8	0.99	1.75	400.5	93.9
		SL400A-SOC	12.4	1.06	1.416	402.7	90.99
		SL420A-SOC	12.7	0.93	1.5	423.8	90.1
		SL450A-SOC	12.1	1.1	1.64	445.6	88.53
		SL500A-SOC	10.9	1.19	1.54	497.8	87.4
		SL550A-SOC	11.2	1.11	1.43	558	85.83
		SL650A-SOC	10.9	1.08	1.48	650.9	84.1
江西紫宸	硅碳复合材料	Si/C composite-380mAh/g	18 ± 1	0.9 ± 0.05	1.5 ± 0.1	380 ± 5	91 ± 1
		Si/C composite-400mAh/g	16 ± 1	0.9 ± 0.05	1.6 ± 0.1	400 ± 5	90 ± 1
		Si/C composite-420mAh/g	15 ± 1	0.8 ± 0.05	1.8 ± 0.1	400 ± 5	88 ± 1
		Si/C composite-450mAh/g	18 ± 1	0.8 ± 0.05	2 ± 0.1	450 ± 10	87 ± 1
		Si/C composite-600mAh/g	13 ± 1	0.7 ± 0.05	3 ± 0.1	600 ± 10	84 ± 1
		Si/C composite-600mAh/g	16 ± 1	0.7 ± 0.05	3 ± 0.1	600 ± 10	84 ± 1
杉杉	氧化亚硅纯品	AS2	3~7	/	/	≥ 1550	≥ 75
	氧化亚硅复合材料	G1S-C450	10~20	/	/	≥ 450	≥ 90
斯诺	硅碳复合材料	SN-SC1	20~23	0.8~1	1~3	≥ 450	≥ 87
		SN-SC2	10~13	0.8~1	20~25	≥ 1000	≥ 70
中科星城	硅碳复合材料	GCM450	20.334	1.03	3.22	450	90.2
		GCM-600	22.524	0.95	4.58	600	88.7
正拓能源	硅碳复合材料	SIC400	15~18	≥ 1	1.5 ± 0.5	≥ 400	≥ 91
		SIC420	12~16	≥ 0.9	1~2	≥ 420	≥ 91
		SIC450	12~16	≥ 1	1~2	≥ 450	≥ 90

资料来源：各公司官网，新时代证券研究所

4、硅基负极厂商将受益于电芯能量密度提升

在行业下游，特斯拉已搭载硅基负极电池。近年来随着下游动力电池的行业对高能量密度负极材料需求的增长，硅基负极材料未来将快速增长。根据高工锂电预测，到2022年硅基负极材料需求量将达到2.2万吨，2019-2022年年复合增长率高达80%。目前，稳定量产硅基负极价格介于10-12万元/吨，远高于石墨类负极3.5-7.5万元/吨的价格。价格按照5%年降计算，到2022年，硅基负极材料市场空间有望超20亿元。

表11： 2022年国内硅基负极材料市场空间超20亿元

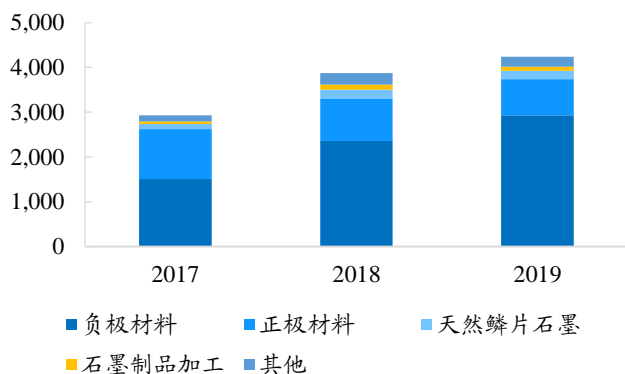
	2019	2020E	2021E	2022E
出货量，万吨	0.37	0.95	1.5	2.2
YOY		157%	58%	47%
价格，万元/吨	11.0	10.5	9.9	9.4
YOY		-5%	-5%	-5%
市场空间，亿元	4	10	15	21

资料来源：GGII 预测，新时代证券研究所

4.1、贝特瑞：负极材料龙头，硅基负极国内领先

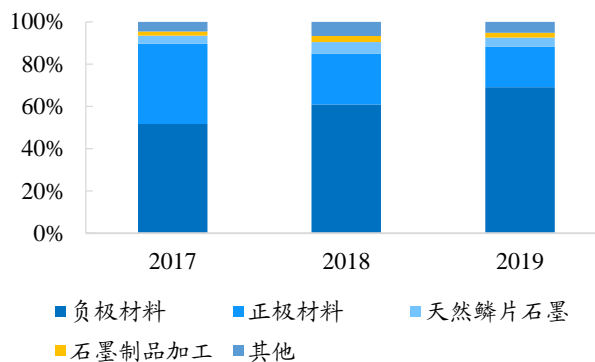
公司主营负极材料和正极材料，其中2019年负极材料营收占比达69%。2019年，公司人造石墨国内市占率11%，排名第四；天然石墨国内市占率63%，排名第一；硅基负极材料出货量国内领先。

图11： 2017-2019年贝特瑞营收，百万元



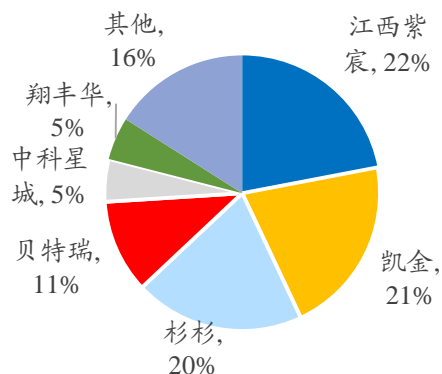
资料来源：Wind，新时代证券研究所

图12： 2019年贝特瑞负极材料营收占比69%



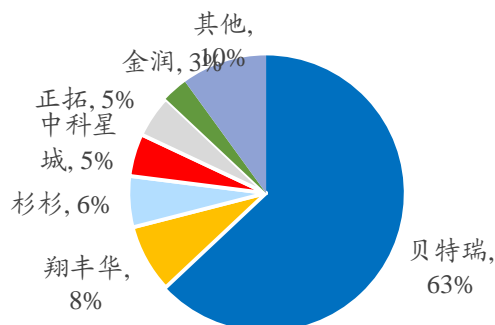
资料来源：Wind，新时代证券研究所

图13: 2019年人造石墨市场格局



资料来源: GGII, 新时代证券研究所

图14: 2019年天然石墨市场格局



资料来源: GGII, 新时代证券研究所

公司硅基负极材料不断升级迭代。1) 硅碳负极材料, 公司已经突破至第三代产品, 比容量从第一代的 650mAh/g 提升至第三代的 1500mAh/g, 且正在开发更高容量的第四代硅碳负极材料产品。2) 氧化亚硅负极材料, 目前公司已完成多款产品的技术开发和量产工作, 部分产品的比容量达到 1600mAh/g 以上。

表12: 硅基负极材料研发进展

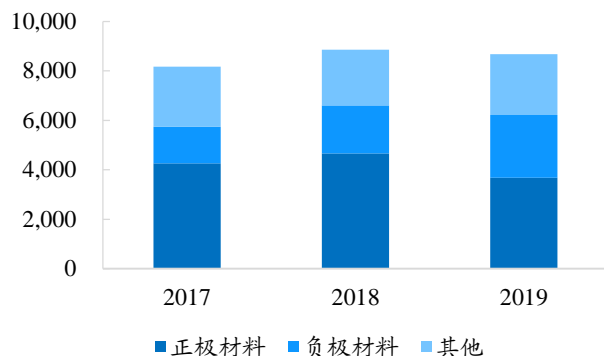
研发项目	所处阶段	项目目标	项目预算, 万元	技术水平比较
硅碳三代品	试量产	通过材料结构优化设计, 制备高容量, 长循环性能优异的硅碳三代产品。	800	属于高能量密度产品, 为行业领先技术。
硅碳四代品	在研	通过材料结构优化设计, 工艺优化制备出高容量, 低膨胀, 循环性能优异的硅碳四代产品。	800	本项目为高容量硅碳开发项目, 属于为预研项目, 技术行业领先。
氧化亚硅二代品	中试	通过对现有的氧化亚硅结构调控达到提高首效的目的。采用首效硅氧负极可进一步提升电池能量密度。	800	目前行业内无相关产品实现商用, 项目技术行业领先。
氧化亚硅三代品	中试	通过材料结构优化调整, 达到进一步提升硅氧负极首次库伦效率的目的。采用高首效硅氧负极可进一步提升电池能量密度	1000	目前行业内无相关产品实现商用, 项目技术行业领先。
超细纳米硅	中试	制备出粒径更小、分散更好的纳米硅颗粒	1000	构成公司的技术壁垒, 行业领先。

资料来源: 贝特瑞公开发行股票说明书, 新时代证券研究所

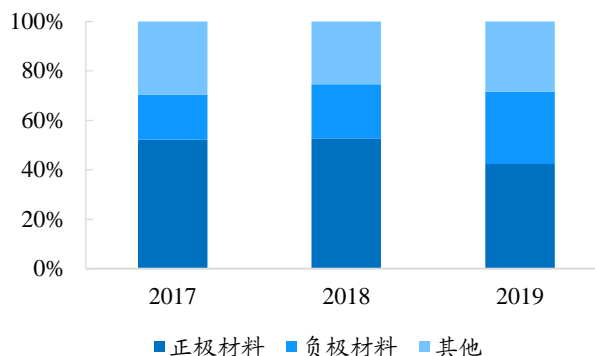
4.2、杉杉股份: 硅基负极开启产业化

2019 年公司营收约 76 亿元, 其中负极材料占比进一步提升至 33%。根据高工锂电数据, 公司人造石墨国内市占率 20%, 排名第三; 天然石墨国内市占率 6%, 排名第三。

公司硅基负极材料和电解液方面均有布局。公司圆柱电池用硅氧材料, 计划进入海外圆柱电池客户, 可用于电动工具和电动汽车, 目前正在进行中试。EV 用硅氧材料, 已进入整车企业测试。硅碳复合材料及宽适配系列电解液已量产。

图15: 2017-2019 年杉杉营收, 百万元

资料来源: Wind, 新时代证券研究所

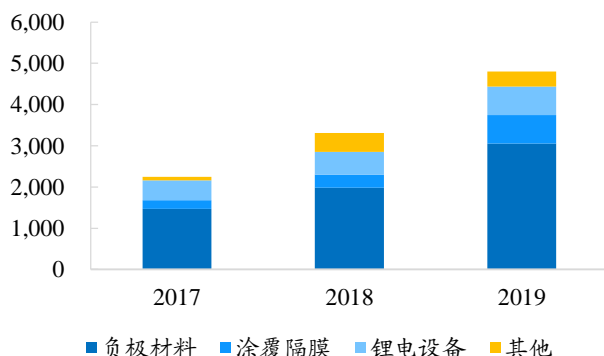
图16: 2019 年杉杉负极材料营收占比 33%

资料来源: Wind, 新时代证券研究所

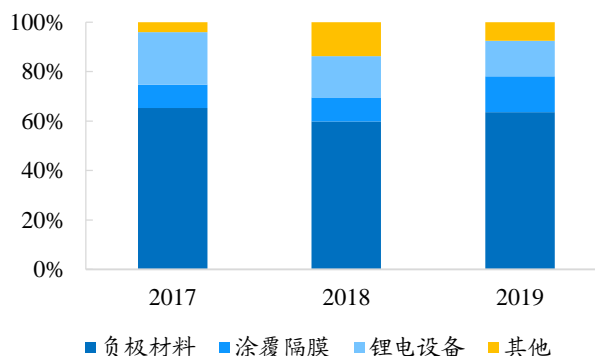
4.3、璞泰来: 人造石墨龙头, 推进硅基负极产业化

2019 年公司营收约 48 亿元, 负极材料占比约 64%。公司下属子公司江西紫宸是人造石墨龙头, 2019 年公司人造石墨国内市占率 22%, 排名第一。

公司推进硅基负极研发和产业化进程。溧阳研究院试验基地和检测中心正抓紧建设中, 其中硅碳试验车间已于 2019 年投入使用。公司与相关单位签署了硅碳专利合作, 重点推进硅碳、硅氧的研发和产业化。

图17: 2017-2019 年璞泰来营收, 百万元

资料来源: Wind, 新时代证券研究所

图18: 2019 年璞泰来负极材料营收占比 64%

资料来源: Wind, 新时代证券研究所

表13: 相关公司估值

股票代码	公司	股价, 元	EPS				PE		
			2019	2020E	2021E	2022E	2020E	2021E	2022E
835185.OC	*贝特瑞	45.91	1.52	2.07	2.84	4.17	22.2	16.2	11.0
600884.SH	*杉杉	13.83	0.13	0.34	0.43	0.51	40.7	32.1	27.1
603659.SH	*璞泰来	92.50	1.41	2.05	2.72	3.49	45.1	34.0	26.5

资料来源: Wind, 新时代证券研究所 (“*” 采用 wind 一致预期, 股价为 2020.6.16 收盘价)

5、风险提示

疫情反复对新能源汽车需求的影响, 硅基负极产业化应用不及预期

特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已于2017年7月1日起正式实施。根据上述规定，新时代证券评定此研报的风险等级为R3（中风险），因此通过公共平台推送的研报其适用的投资者类别仅限定为专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者。若您并非专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研报中的任何信息。

因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

分析师声明

负责准备本报告以及撰写本报告的所有研究分析师或工作人员在此保证，本研究报告中关于任何发行商或证券所发表的观点均如实反映分析人员的个人观点。负责准备本报告的分析师获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户的反馈、竞争性因素以及新时代证券股份有限公司的整体收益。所有研究分析师或工作人员保证他们报酬的任何一部分不曾与，不与，也将不会与本报告中具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

分析师介绍

开文明，上海交通大学学士，复旦大学世界经济硕士，2007-2012年历任光大证券研究所交通运输行业分析师、策略分析师、首席策略分析师，2012-2017年历任中海基金首席策略分析师、研究副总监、基金经理。

投资评级说明

新时代证券行业评级体系：推荐、中性、回避

推荐：未来6-12个月，预计该行业指数表现强于同期市场基准指数。

中性：未来6-12个月，预计该行业指数表现基本与同期市场基准指数持平。

回避：未来6-12个月，预计该行业指数表现弱于同期市场基准指数。

市场基准指数为沪深300指数。

新时代证券公司评级体系：强烈推荐、推荐、中性、回避

强烈推荐：未来6-12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数涨幅在20%以上。该评级由分析师给出。

推荐：未来6-12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数涨幅介于5%-20%。该评级由分析师给出。

中性：未来6-12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数变动幅度介于-5%-5%。该评级由分析师给出。

回避：未来6-12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数跌幅在5%以上。该评级由分析师给出。

市场基准指数为沪深300指数。

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

免责声明

新时代证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批复，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告由新时代证券股份有限公司（以下简称新时代证券）向其机构或个人客户（以下简称客户）提供，无意针对或意图违反任何地区、国家、城市或其它法律管辖区域内的法律法规。

新时代证券无需因接收人收到本报告而视其为客户。本报告是发送给新时代证券客户的，属于机密材料，只有新时代证券客户才能参考或使用，如接收人并非新时代证券客户，请及时退回并删除。

本报告所载的全部内容只供客户做参考之用，并不构成对客户的投资建议，并非作为买卖、认购证券或其它金融工具的邀请或保证。新时代证券根据公开资料或信息客观、公正地撰写本报告，但不保证该公开资料或信息内容的准确性或完整性。客户请勿将本报告视为投资决策的唯一依据而取代个人的独立判断。

新时代证券不需要采取任何行动以确保本报告涉及的内容适合于客户。新时代证券建议客户如有任何疑问应当咨询证券投资顾问并独自进行投资判断。本报告并不构成投资、法律、会计或税务建议或担保任何内容适合客户，本报告不构成给予客户个人咨询建议。

本报告所载内容反映的是新时代证券在发表本报告当日的判断，新时代证券可能发出其它与本报告所载内容不一致或有不同结论的报告，但新时代证券没有义务和责任去及时更新本报告涉及的内容并通知客户。新时代证券不对因客户使用本报告而导致的损失负任何责任。

本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，对于可能涉及的新时代证券网站以外的地址或超级链接，新时代证券不对其内容负责。本报告提供这些地址或超级链接的目的纯粹是为了客户使用方便，链接网站的内容不构成本报告的任何部分，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。

新时代证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。新时代证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

除非另有说明，所有本报告的版权属于新时代证券。未经新时代证券事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式更改、复制、传播本报告中的任何材料，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为新时代证券的商标、服务标识及标记。

新时代证券版权所有并保留一切权利。

机构销售通讯录

北京	郝颖 销售总监 固话：010-69004649 邮箱：haoying1@xsdzq.cn
上海	吕筱琪 销售总监 固话：021-68865595 转 258 邮箱：lyyouqi@xsdzq.cn
广深	吴林蔓 销售总监 固话：0755-82291898 邮箱：wulinman@xsdzq.cn

联系我们

新时代证券股份有限公司 研究所

北京：北京市海淀区北三环西路99号院西海国际中心15楼

邮编：100086

上海：上海市浦东新区浦东南路256号华夏银行大厦5楼

邮编：200120

广深：深圳市福田区福华一路88号中心商务大厦23楼

邮编：518046

公司网址：<http://www.xsdzq.cn/>