

建材

行业研究/深度报告

玻纤碳纤双骄，共享风电增量时代

——大国重材系列（二）

深度研究报告/建材

2021 年 12 月 02 日

报告摘要：

● 风机大型化推动大丝束碳纤维需求

近年来风机厂商大功率机型占比明显提升，风机大型化能从摊薄风机制造成本、摊薄风机非制造成本、提升发电效率等角度降低度电成本。风机大型化叠加海上风电兴起使叶片长度不断突破，而叶片大型化带来的轻量化与强度刚度要求带动碳纤维需求。

● 玻纤为主流风电叶片增强材料

风电叶片增强材料主要包括玻纤、碳纤维，密度、拉伸强度、模量为增强材料关键指标。与传统材料相比，玻纤密度满足轻量化需求、模量强度满足刚度与强度需求，兼具经济性，为主流风电叶片增强材料，玻纤约占风电叶片材料成本的 28%。

● 碳纤维更适用海上大叶片

碳纤维可减轻叶片质量、增强叶片刚度、提高叶片抗疲劳性能，拉挤法应用是近年来叶片需求增加的主因之一，但叶片大规模应用碳纤维仍受制于成本因素。此外 Vestas 碳梁保护专利 2022 年 7 月到期，国内厂商有动力加速布局拉挤法碳纤维。

● 风电叶片领域，玻纤与碳纤将长期共存

碳纤维产能规模无法支持对玻纤的大面积替代；碳纤维成本下降非一日之功；玻纤不断更新换代，高模量玻纤将成为风电纱拳头产品。

● 投资建议

玻纤与碳纤有望共享风电增量。全球风电碳纤维需求从 2014 年 0.6 万吨快速上升到 2020 年 3.06 万吨，CAGR31%，增速明显快于整体。行业性能与成本动态匹配，部分时点不可兼得，当前玻纤性价比优势依然显著。风电领域，玻纤建议重点关注中国巨石、中材科技，碳纤维关注吉林碳谷、吉林化纤、中复神鹰（未上市）。

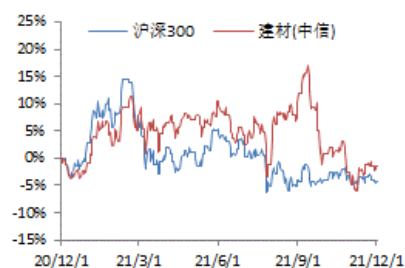
● 风险提示

大丝束碳纤维产能投放进度不及预期；国产拉挤法工艺研发不及预期；海上风电项目进展不及预期。

推荐

维持评级

行业与沪深 300 走势比较



资料来源：Wind，民生证券研究院

分析师：李阳

执业证号：S0100521110008

邮箱：liyang_yj@mszq.com

相关研究

- 1.【民生建材】大国重材系列（一）：聚焦药玻，技术攻关与国产替代
- 2.地产信贷边际放松，消费建材估值有望企稳——建筑材料行业周报 20211128
- 3.【民生建材】本周观点 211121：板块估值偏低，新材料应用提速

盈利预测与财务指标

代码	重点公司	现价	EPS			PE			评级
		12月1日	2020	2021	2022	2020	2021	2022	
600176.SH	中国巨石	17.70	0.69	1.40	1.56	28.9	12.7	11.3	-
002080.SZ	中材科技	36.90	1.22	2.16	2.39	19.8	17.1	15.5	-

资料来源：wind、民生证券研究院（未评级公司使用 wind 一致预期）

目录

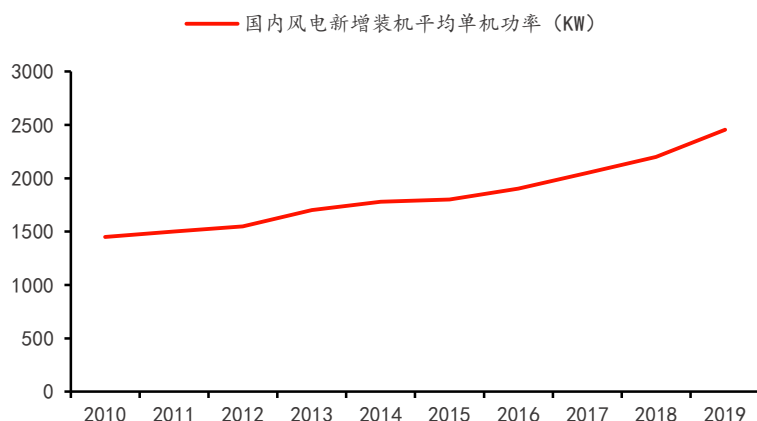
1. 风机大型化推动大丝束碳纤维需求	3
1.1 大功率风机占比明显提升	3
1.2 叶片大型化带动碳纤维需求	5
2. 风电叶片材料：玻纤 VS 碳纤维	6
2.1 玻纤为主流风电叶片增强材料	6
2.1.1 玻纤性价比高	6
2.1.2 各类玻纤因性能差异应用于叶片不同结构	7
2.2 碳纤维更适用于海上大叶片	8
2.2.1 碳纤维性能优异，短期大规模应用受制于成本	8
2.2.2 风电叶片主要使用高性价比大丝束碳纤维	10
2.2.3 拉挤法为风电叶片用碳纤维主要生产工艺	12
2.3 碳纤维产业链较长，生产工艺国产替代空间广阔	14
3. 风电叶片领域，玻纤、碳纤维将长期共存	16
4. 风险提示	17
插图目录	18
表格目录	18

1. 风机大型化推动大丝束碳纤维需求

1.1 大功率风机占比明显提升

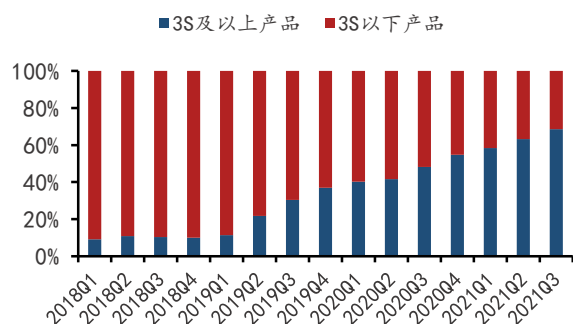
风机厂商大功率机型占比明显提升。CWEA 数据显示，国内风电新增装机平均单机功率从 2010 年 1.45MW 上升到 2019 年 2.45MW，主流机型单机容量不断上升。观察整机厂金风科技、明阳智能的在手外部订单及产量结构，同样可以看出大功率机型是大势所趋，3MW 及以上机型占比从 2018 年较低份额提升到当前主力机型。

图1: 2010-2019 年国内新增装机风电平均单机功率



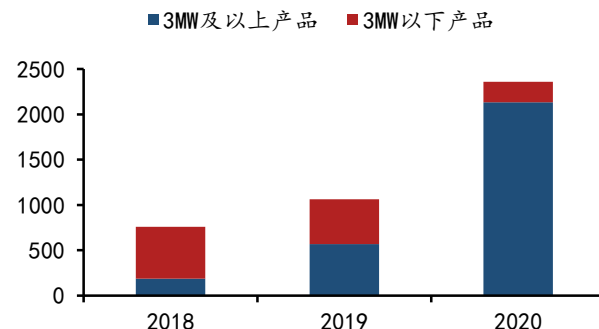
资料来源: CWEA, 民生证券研究院

图2: 金风科技在手外部订单结构占比



资料来源: 公司公告, 民生证券研究院

图3: 明阳智能产品产量结构占比



资料来源: 公司公告, 民生证券研究院

风机大型化能有效降低度电成本。(1) **摊薄风机制造成本**: 国内整机厂提高关键部件输出功率, 而在普通零部件端保持通用设计, 因此零部件材料使用量与风机功率非固定值。参考 Vestas 不同单机容量机型耗用原材料数据, 风机大型化能够降低单 W 原材料制造成本; (2) **摊薄风机非制造成本**: 同等装机规模下, 风电单机功率提升则所需风机数量下降, 对应塔架、土地、道路等建设费用将随之摊薄; (3) **提升发电效率**: 同等风速情况下风电机组发电量与扫风面积成正比, 因此增加叶片长度能够有效提升发电量。

以 3MW 机组为例，叶片加长 5m 单年可提升 208 利用小时，等同于投资节约 600 元/千瓦（数据来源：《平价时代风电项目投资特点与趋势》，下同）。此外，同等风速情况下风电机组切变越大、塔架越高，发电量也越高，因此高切变地区高塔架经济性较好。以 3MW 机组 0.13 切变为例，塔筒增高 5m 单年可提升 26 利用小时。

表1: Vestas 不同单机容量机型耗用原材料

风电机型	Vestas V82	Vestas V80	Vestas V110
单机容量 (MW)	1.65	2	3
塔筒高度 (m)	78	78	84
风轮直径 (m)	82	80	112
钢材耗用量 (kg/KW)	96.3	104.7	81.7
玻纤/树脂/塑料耗用量 (kg/KW)	18.2	12.3	16.3
铁/铸铁耗用量 (kg/KW)	17.8	10.3	21.9
铜耗用量 (kg/KW)	1.8	1.4	1.6
铝耗用量 (kg/KW)	1.9	0.8	1.1
原材料合计耗用量 (kg/KW)	135.9	129.6	122.7

资料来源：《Understanding wind turbine price trends in the U.S. over the past decade》，民生证券研究院

表2: 采用不同单机容量机组项目经济指标

单机容量 (MW)	台数	项目容量 (MW)	静态投资 (元/千瓦)	全投资 IRR	资本金 IRR	LCOE (元/千瓦时)
2.0	50	100	6449	9.28%	18.24%	0.3451
2.2	45	99	6375	9.45%	18.85%	0.3414
2.3	43	99	6279	9.67%	19.66%	0.3366
2.5	40	100	6221	9.82%	20.19%	0.3336
3.0	33	99	6073	10.18%	21.54%	0.3262
4.0	25	100	5767	10.97%	24.63%	0.3108
4.5	22	99	5517	11.68%	27.49%	0.2983

资料来源：《平价时代风电项目投资特点与趋势》，民生证券研究院

叶片长度不断突破。一般风机功率越大、叶片长度越长，风机厂商大功率机型占比明显提升，带动主流新增装机叶轮直径从 2014 年 90-110 米提升到 2018 年 110-130 米（数据来源：CWEA）。

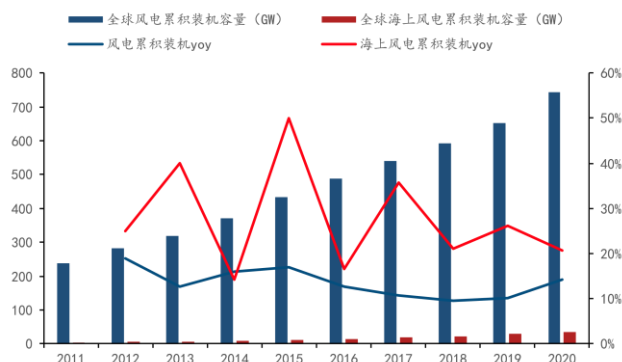
我国风电发展初期，风机多装于陆上富风区域，随着富风区域市场逐渐饱和，以及低风速和海上风电技术发展，在低风速区域和海上建风电厂已具备经济效益。而在低风速区和海上风电场，风机叶轮直径是重要竞争力指标，因为叶轮直径越长，扫风面积越大，发电量越大，以弥补风速不足的缺陷，小叶片已不能充分匹配海上风电需求。**海风未来发展前景较为乐观**，近年来无论是全球还是我国，海上风电累积装机量增速持续高于整体，欧洲多国已制订计划，预备大规模开发利用海上风力资源。

表3: 不同单机容量机组项目对应叶轮直径

金风科技风机机型	叶轮直径
1S	82
2S	150
3/4S	136
5S	165
6/8S	175

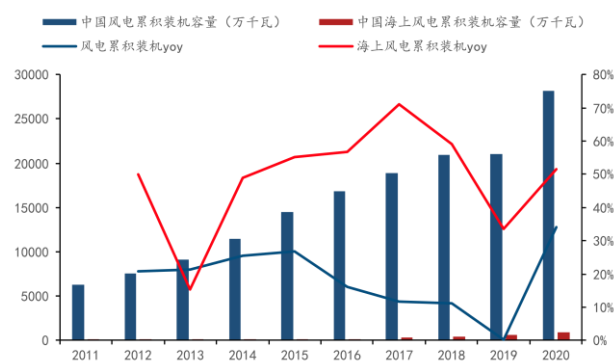
资料来源: 金风科技官网, 民生证券研究院

图4: 全球风电以及海上风电累积装机量



资料来源: 国家能源局, 民生证券研究院

图5: 我国风电以及海上风电累积装机量

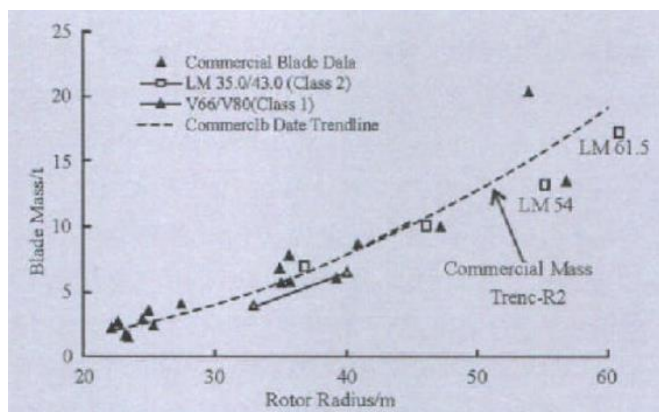


资料来源: 国家能源局, 民生证券研究院

1.2 叶片大型化带动碳纤维需求

叶片大型化提高轻量化与强度刚度要求, 从而带动碳纤维需求。(1) 轻量化: 叶片长度增加时, 由于叶片重量增加与风叶长度立方成正比, 而风机产生电能与风叶长度平方成正比, 因此叶片重量增加快于能量提取。碳纤维由于其减重性能成为平衡叶片长度与重量的新型应用材料。(2) 满足强度刚度要求: 叶片长度增加同时也对增强材料的强度、刚度等性能提出更高要求, 如为保证在极端风载下叶尖不碰塔架, 叶片必须具有足够刚度, 而碳纤维能够起到强度与刚度增强效果。

图6: 商业叶片质量与旋转半径之间的变化趋势



资料来源: 《碳纤维复合材料在风力发电机叶片中的应用》, 民生证券研究院

2. 风电叶片材料：玻纤 vs 碳纤维

2.1 玻纤为主流风电叶片增强材料

2.1.1 玻纤性价比高

风电叶片主要原材料包括树脂基体、增强材料以及粘接剂、芯材等，而增强材料主要有玻璃纤维和碳纤维两种。增强材料（如玻纤）嵌入热固性树脂基体（如环氧树脂）中形成纤维增强复合材料，基体材料提供韧性与耐久度，增强纤维材料则主要提供结构足够的刚度与强度。实现纤维增强复合材料嵌入过程的工艺包括湿法手糊成型(Hand Lay-up)、预浸料成型(Prepreg)、真空导入成型(RIM)，前两者因环境污染、成本较高不适用于大型叶片，目前主流工艺为真空灌注导入。

表4: 复合材料叶片成型工艺比较

工艺名称	特点	优缺点
湿法手糊成型工艺	手工操作、开模成型、生产效率低以及树脂固化程度偏低，适合产品批量小、质量均匀性要求低的复合材料制品生产	叶片在使用过程中易出现含胶量不均匀、纤维/树脂浸润不良及固化不完全等引起的裂纹、断裂和叶片变形问题。此外在叶片制造过程中伴有大量有害物质和溶剂释放，造成环境污染等问题
预浸料成型工艺	综合性能优越，适于制造大型的厚复合材料部件	预浸料成本较高，但所得叶片制品厚度均匀、空隙率低，制品表面光滑平整
真空导入成型工艺	较少依赖工人技术水平，工艺质量仅依赖工艺参数，产品质量易于保证，技术含量高于手糊工艺	闭模成型，因此具备污染小、叶片产品质量稳定、生产效率高等优点

资料来源：《复合材料风电叶片制造技术现状及发展》，民生证券研究院

密度、拉伸强度、模量为风电增强材料关键指标，玻纤为主流风电叶片增强材料。风电叶片增强材料经历早期木材、布蒙皮、铁蒙皮、铝合金蒙皮等材料后，目前已完全使用复合材料，主因玻纤性能优异且具备经济性。

(1) 密度满足轻量化需求。如何平衡叶片长度与重量是解决轻量化问题的核心，而材料密度越小单位体积质量越轻，因此选用低密度材料能满足风电叶片轻量化需求。

(2) 拉伸模量、拉伸强度满足刚度与强度性能需求。叶片由于发电环境艰难必须具备高刚度、强度，拉伸模量指受正应力时弹性模量，拉伸强度指静拉伸条件下最大承载能力。复合材料由于其可设计性，刚度和强度较钢材、铝合金等其他材料更适用于风电叶片。此外正因复合材料如玻纤的可设计性，玻纤厂家可不断优化生产工艺提升拉伸强度与拉伸模量，以重庆国际 TM 规格玻纤为例，较风电叶片常用 E 玻纤可提高 25-35%力学性能、10-17%模量、20-40%动态疲劳性能等。

(3) 价格具备商业化经济性。风电风机材料成本占比在 95%以上，其中叶片占风机材料成本 20%左右，而玻纤又占风电叶片材料成本 28%。成本占比高，叶片厂家在选择复合材料时同样会重点考虑性价比。过去近 10 年缠绕直接纱 2400tex 价格中枢在 4000-7000 元/吨，而 OC 高端风电纱 1200tex 高模量直接纱（H 玻纤）价格大约在 10000-12000 元/吨，价格位于钢

材与铝合金之间，风电叶片大规模使用玻纤不会大幅提升成本。

表5: 各类材料物理性质对比

材料	密度 (g/cm ³)	拉伸强度 (Mpa)	拉伸模量 (Gpa)
ECR 玻纤	2.54-2.60	2100-2500	73-79
ECT 玻纤	2.52-2.60	2300-2700	80-82
TM 玻纤	2.59-2.63	3000-3200	84-86
钢	7.8	1080	210
铝合金	2.8	470	75
钛合金	4.5	1000	110

资料来源:《复合材料风电叶片制造技术现状及发展》，前瞻研究院，民生证券研究院

图7: 风电叶片材料成本占比(国内某主流 1.5MW 机型叶片)

■ 玻纤 ■ 基体 ■ 芯材 ■ 粘接胶 ■ 金属 ■ 涂层 ■ 其他辅助

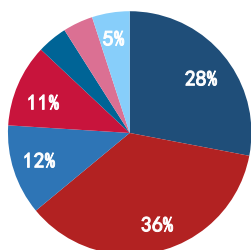
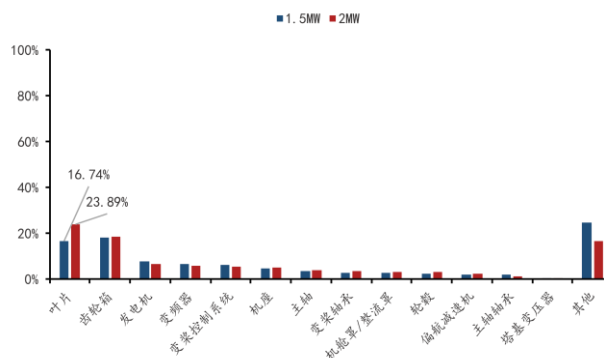


图8: 明阳智能风机材料成本拆分(2018H1)



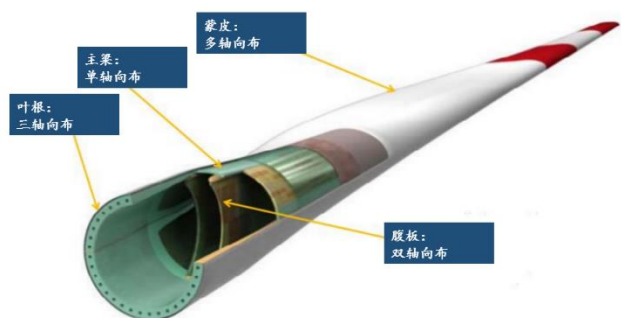
资料来源:《复合材料结构设计对风电叶片成本的影响》，民生证券研究院

资料来源:明阳智能招股说明书，民生证券研究院

2.1.2 各类玻纤因性能差异应用于叶片不同结构

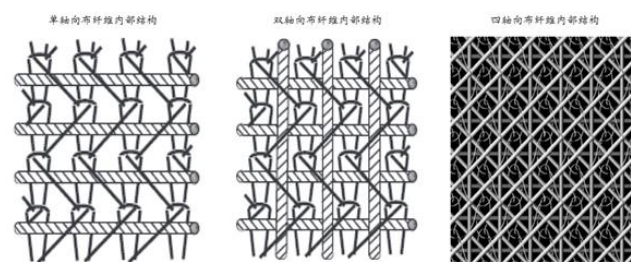
主流风电叶片结构包括主梁系统、上下蒙皮、叶根增强层等：主梁系统包括主梁与腹板，主梁负责主要承载，提供叶片刚度即抗弯和抗扭能力。腹板负责支撑截面结构，预制后粘接在主梁上；蒙皮形成叶片气动外形用于捕捉风能，通常在形成主梁结构后，上下蒙皮通过前、后缘与主梁结构粘接成为叶片；叶根增强层将主梁上载荷传递到主机处。

图9: 风电叶片中玻纤应用

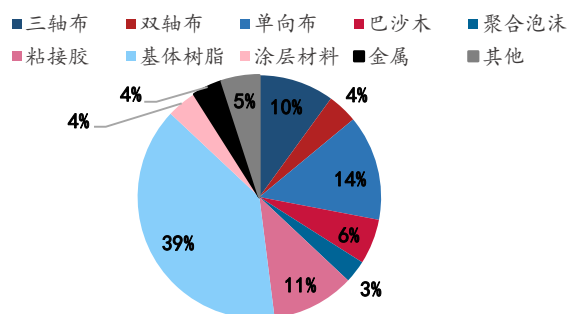
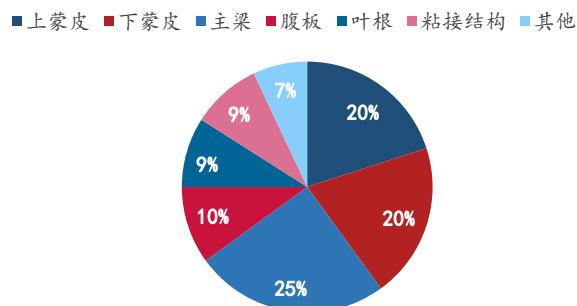


资料来源:聚合科技招股说明书，民生证券研究院

图10: 单/多轴向布玻纤内部结构



资料来源:《风电用多轴向经编织物的结构设计》，民生证券研究院

图11: 风电叶片材料成本占比

图12: 风电叶片各结构成本占比


资料来源:《复合材料结构设计对风电叶片成本的影响》, 民生证券研究院

资料来源:《复合材料结构设计对风电叶片成本的影响》, 民生证券研究院

风电纱以单/多轴向经编织物形式应用于风电叶片中。单/多轴向布因其各自性能差异应用于叶片不同结构。**主玻纤占风电叶片材料成本 28%，其中单轴向布占 14%，双轴向布占 4%，三轴向布占 4%。**

2.2 碳纤维更适用于海上大叶片

2.2.1 碳纤维性能优异，短期大规模应用受制于成本

碳纤维是一种碳主链结构的高性能纤维材料，由有机纤维经高温裂解碳化形成，含碳量超 90%，具有质轻、高强高模、耐腐蚀、低膨胀和抗疲劳等优异性能。目前被广泛应用于航空航天、基础设施、工业应用等多个领域。

叶片大型化带来轻量化与高强高模需求，碳纤维优异性能较为匹配：

(1) 可减轻叶片质量、增强叶片刚度。以高模碳纤维为例，碳纤维密度比玻纤小 30-35%、拉伸强度略大于高端风电纱、拉伸模量高玻纤 3-8 倍。

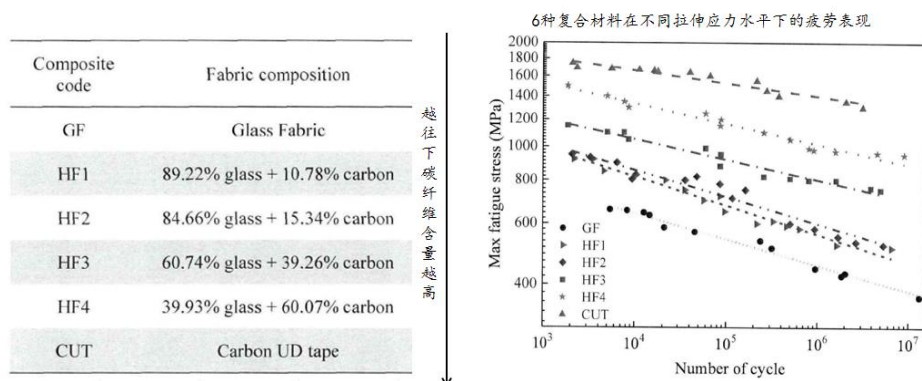
表6: 各类材料物理性质对比

材料	密度 (g/cm ³)	拉伸强度 (Mpa)	拉伸模量 (Gpa)
ECR 玻纤	2.54-2.60	2100-2500	73-79
ECT 玻纤	2.52-2.60	2300-2700	80-82
TM 玻纤	2.59-2.63	3000-3200	84-86
高模碳纤维	1.5-2	2400-3500	350-580
极高模碳纤维	1.5-2	750-2500	460-670

资料来源:《复合材料风电叶片制造技术现状及发展》,《碳纤维/玻璃纤维混杂增强复合材料力学性能研究及风电叶片应用》, 民生证券研究院

(2) 碳纤维应用于风电叶片可提高叶片抗疲劳性能。图 13 展示 6 种复合材料，包括纯玻纤复合材料、纯碳纤维复合材料以及其余 4 种碳玻比例不同的碳玻混复合材料，**结果表明碳含量越高的复合材料其抗疲劳表现越好，能更好适应恶劣气候条件。**

图13: 各复合材料在不同拉伸应力水平下的疲劳表现



资料来源:《碳纤维/玻璃纤维混杂增强复合材料力学性能研究及风电叶片应用》, 民生证券研究院

(3) 可应用于低风速区域和海上风电。在低风速区和海上风电场, 风机叶轮直径是重要竞争力指标, 而碳纤维能有效增加叶片长度, 在富风区域市场逐渐饱和背景下可以有效拓宽风电应用场景。

(4) 具备振动阻尼特性, 可避免叶片自然频率与塔暂短频率间发生任何共振的可能性。

表7: 碳纤维于风电叶片中应用案例

公司	产品	技术状态
西班牙 Gamesa 公司	44m 叶片	2MW 风机叶片, Gamesa 在其旋转直径为 87m、90m 叶轮的叶片制造中采用碳纤维环氧树脂预浸料, 质量约 7t
丹麦 艾尔姆风能公司 (LM)	61.5m 叶片	5MW 风机叶片, 采用玻纤 / 碳纤维混杂复合材料结构, 在横梁和翼缘等要求较高部位使用碳纤维作为增强材料, 单片叶片质量达 17.7t
维斯塔斯公司 (Vestas)	44m 叶片	Vestas 在 V90-3.0MW 机型配套的 44m 叶片主梁上使用了碳纤维, 叶片自身质量只有 6t, 与 V80-2.0MW 机型 39m 叶片自身质量一样
丹麦 NEG Micon 公司	40m 叶片	40m 叶片中采用碳纤维增强环氧树脂
德国 Nordex Rotor 公司	44m 叶片 56m 叶片	2.5MW 风电机组, 44m 长 CFRP 叶片质量为 9.6t。此外还开发了 56m 长 CFRP 叶片。其认为叶片超过一定尺寸后, 碳纤维叶片制作成本并不比玻纤高
德国 Repower 公司	63m 叶片	5MW 风机叶片, 转轮直径 126m, 叶片由碳纤维和玻纤混杂而成, 单叶片质量达 18t, 专门为海洋风电场设计, 年产电量大约 1700 万 kWh

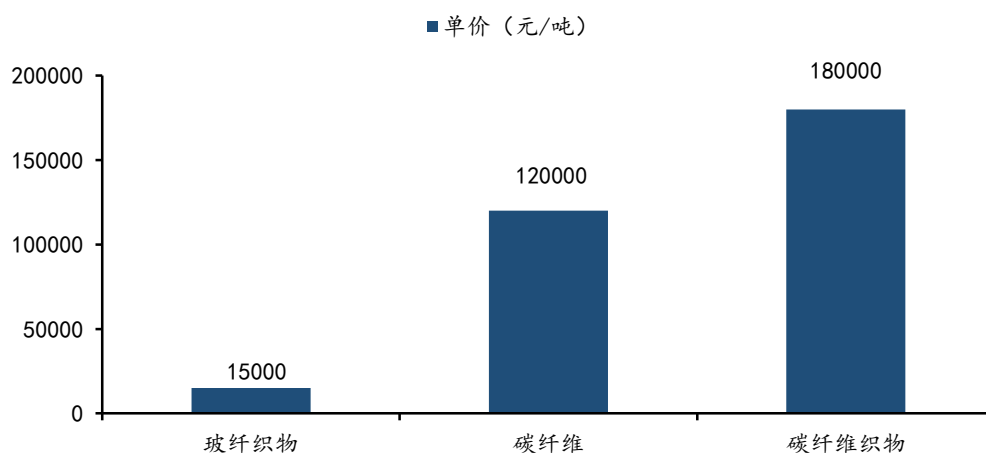
资料来源:《复合材料风电叶片制造技术现状及发展》, 民生证券研究院

但大规模应用仍受成本因素制约:

(1) 根据《碳纤维/玻璃纤维混杂增强复合材料力学性能研究及风电叶片应用》数据, 风电用大丝束碳纤维成本为 12 万元/吨 (约 1.8 万美元/吨, 其他可参考数据区间在 1.4-1.8 万美元/吨), 制成织物成本则需 18 万元/吨, 是玻纤织物价格的 12 倍。当前碳纤维主要用于叶片主梁, 即替换原先主梁中的单轴向玻纤布 (单轴向玻纤布占叶片成本 14%), 替换后可有效减重 20%, 但成本上升 82%。

(2) 碳纤维增强材料比玻纤更脆, 纯碳纤维叶片能否适用于海上风电仍存争议。

图14: 叶片用材料单价比较



资料来源:《碳纤维/玻璃纤维混杂增强复合材料力学性能研究及风电叶片应用》,民生证券研究院

表8: 主梁优化方案对比

编号	方案		重量对比	成本对比
	主梁设计	主梁 UD 材料		
1	原叶片	普通 E 玻纤	基数 1	基数 1
2	原叶片刚度	H 玻纤	-3.4%	+5%
3	原叶片刚度	TM 玻纤	-3.7%	+2%
4	原叶片刚度	碳纤	-20%	+82%
5	原叶片刚度	碳玻混 (8%碳纤)	-10.4%	+9.8%

资料来源:《复合材料结构设计对风电叶片成本的影响》,民生证券研究院

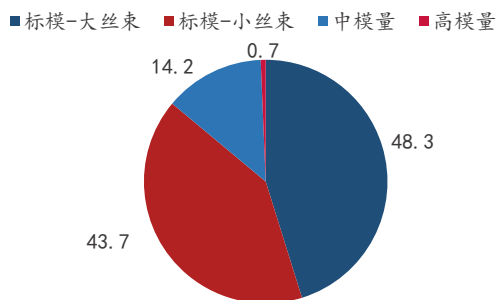
2.2.2 风电叶片主要使用高性价比大丝束碳纤维

大丝束碳纤维每束碳纤维根数大于等于 48000 根(即 48 K),主要应用于工业领域;而 1K、3K、6K、12K 等碳纤维统称为小丝束碳纤维,主要应用于国防军工等高科技领域。主流风电叶片用碳纤维为大丝束碳纤维:

(1) **大丝束碳纤维生产原料来源广、价格低。**原丝是碳纤维生产核心技术之一,价格占碳纤维制备成本约 60%。大丝束碳纤维采用成本较低的民用聚丙烯腈(PAN)作为原丝,其价格仅为制备小丝束碳纤维特种原丝 1/4,因此大丝束碳纤维价格也仅为小丝束碳纤维 50-60%。另外,掌握小丝束碳纤维生产企业其特种原丝不外售,而民用 PAN 在国外市场可自由买卖;

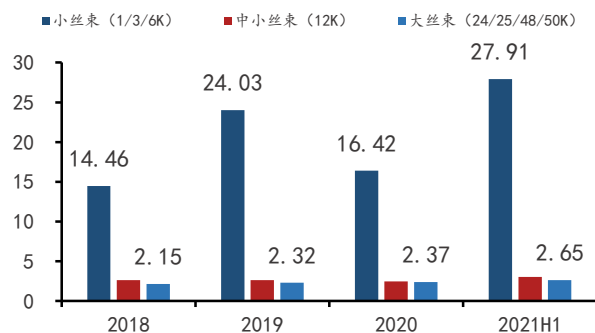
(2) **大丝束碳纤维性价比高。**过去大丝束碳纤维拉伸强度在 2000 MPa 左右,比强度较低,因此未大规模应用;20 世纪 90 年代中后期,大丝束碳纤维技术取得重大突破,拉伸强度达到 3600 MPa,在工业领域性价比凸显。以美国 ZOLTEK 大丝束碳纤维 PANEX 33-0048 和日本东丽小丝束碳纤维 T300-12000 为例,小丝束碳纤维单位美元强度、单位美元模量分别为 107 MPa、7 GPa,分别比大丝束碳纤维低 48%、46%。

图15: 2020 全球碳纤维需求 (千吨)



资料来源: 赛奥碳纤维, 民生证券研究院

图16: 吉林碳谷大丝束碳纤维原丝与小丝束售价比较 (元/吨)



资料来源: 吉林碳谷公告, 民生证券研究院

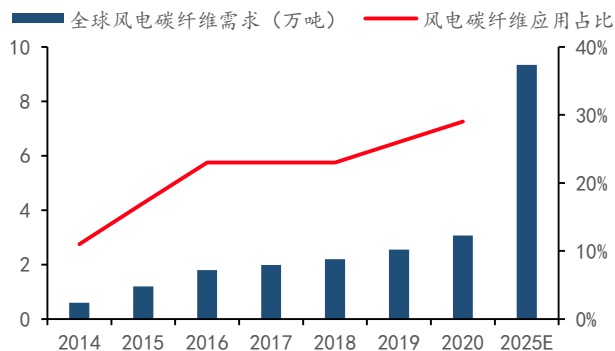
表9: 大丝束碳纤维 PANEX 33-0048 和小丝束碳纤维 T300-12000 的性能价格比

项目	PANEX 33-0048	T300-12000
拉伸强度/MPa	3600	3530
拉伸模量/GPa	228	230
密度/g · cm ⁻³	1.78	1.76
比强度×10 ⁻⁷ /m ² · s ⁻²	2.03	2.00
比模量×10 ⁻⁹ /m ² · s ⁻²	1.28	1.28
价格/\$ · kg ⁻¹	17.64	33.07
单位美元强度/MPa · \$ ⁻¹	205	107
单位美元模量/GPa · \$ ⁻¹	13	7
单位美元比强度×10 ⁻⁷ /m ² · s ⁻² · \$ ⁻¹	0.11	0.06
单位美元比模量×10 ⁻⁹ /m ² · s ⁻² · \$ ⁻¹	0.07	0.04

资料来源: 《大丝束碳纤维产业发展现状及面临的问题》, 民生证券研究院

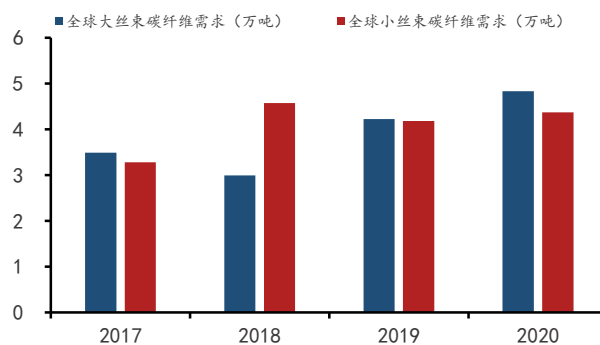
近年来风电叶片是碳纤维主要增量需求。2020 年全球碳纤维需求 10.7 万吨, 近 6 年 CAGR 为 12%; 而全球风电碳纤维需求从 2014 年 0.6 万吨快速上升到 2020 年 3.06 万吨, CAGR31%, 增速明显快于整体行业, 占比从 2014 年 11% 上升到 2020 年 29%。

图17: 全球风电碳纤维需求



资料来源: 赛奥碳纤维, 民生证券研究院

图18: 全球大/小丝束碳纤维需求

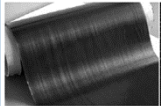
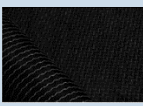
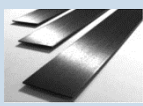


资料来源: 赛奥碳纤维, 民生证券研究院

2.2.3 拉挤法为风电叶片用碳纤维主要生产工艺

风电叶片大梁所用碳纤维存在大克重预浸料、碳纤维织物真空导入、拉挤成型 3 种工艺，近年来风电叶片碳纤维需求增加，主因纤维体积含量高、高效率低成本拉挤法开始采用。

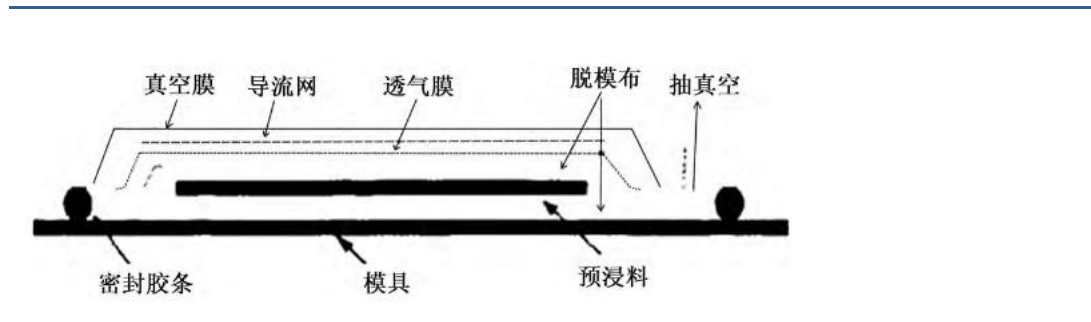
表10: 风电领域碳纤维应用主要工艺

	大克重预浸料	碳纤维织物	加固碳板
图示			
工艺	压力袋	真空导入	拉挤成型
部分	蒙皮、梁帽、叶根	梁帽	梁帽

资料来源：《国产碳纤维在风电叶片产业中的机会》，民生证券研究院

预浸料是碳纤维制备碳纤维复合材料的一种重要中间基材。国外预浸料龙头有东丽、赫氏、氰特、固瑞特等，外企于风电市场主打高面密度（600g/m²）碳纤维预浸料；国产碳纤维预浸料制造商以低面密度（300g/m²）为主，目前高面密度工艺端仍需改进，浸渍不均匀，表观质量较差。此外预浸料长期储存需冷冻环境，额外增加叶片生产成本。

图19: 预浸料成型示意图



资料来源：《风电叶片用国产碳纤维预浸料工艺性能和力学性能研究》，民生证券研究院

表11: 不同工业领域碳纤维、预浸料和制品单价

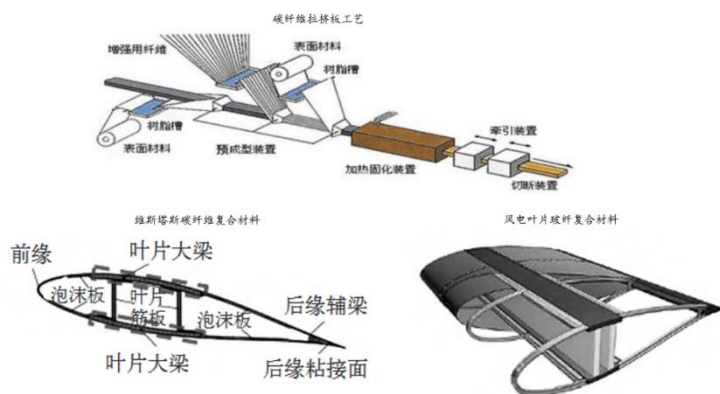
	碳纤维品种	碳纤维	预浸料	制品
体育休闲	T700S-12K	80-140	120-200	300-500
	T300-12K			
风电叶片梁板	T300-≥24K	80	-	150
工业领域高端应用	T700S-12K	80-140	120-200	500-1000
	T300-12K			
武器装备（缠绕用）	T700S-12K	250-300	-	-
通用飞机和无人机	T300-1K, 3K, 6K, 12K	-	800-1000	2000-3000
	T700S-12K			
军用无人机	T300-3K, 6K, 12K	-	1500-2500	5000-8000
	T300-3K, 6K, 12K			
民用航空（国内）	T800-6K, 12K	-	2500-3000	8000-10000
	T800-6K, 12K			
军用航空（结构件）	T300-3K, 6K	3000	5000-7000	10000-15000
	T800-6K, 12K			

资料来源：《从国产碳纤维的处境谈碳纤维“全产业链”》，民生证券研究院

真空灌注是闭模成型工艺，真空灌注准备工作较繁琐，且真空度对材料质量影响大。

拉挤工艺先将碳纤维制成拉挤板材，叶片制作时在设定位置内把拉挤板材黏贴在蒙皮上制成大梁。其设计理念是把整体化成型的主梁主体受力部分拆分为高效率、高质量、低成本的拉挤梁片标准件，然后把标准件一次组装整体成型。

图20: 拉挤板工艺示意图以及风电叶片碳纤维与玻纤应用示意图



资料来源：《国产碳纤维在风电叶片产业中的机会》，吉林化纤公告，民生证券研究院

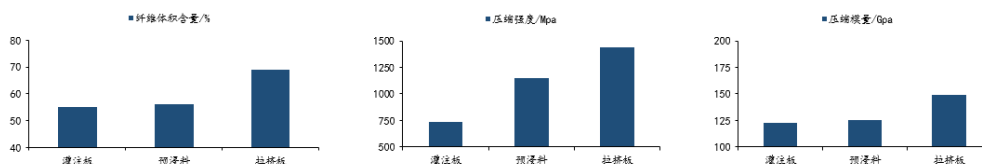
拉挤法具备纤维体积含量高、高效低成本等优点：

(1) 拉挤工艺碳纤维板材体积含量达 69%，明显高于预浸料和真空灌注，纤维含量高使拉挤法碳纤维高强高模轻质效果更好，能应用于刚度要求非常高、主梁疲劳富余量非常大的叶片；

(2) 标准件生产方式明显提高生产效率，保证产品性能一致性和稳定性，同时有效降低运输成本和组装整体成型成本；

(3) 预浸料和真空灌注都有一定边角废料，而拉挤法极少。

图21: 不同工艺碳纤维制品性能对比



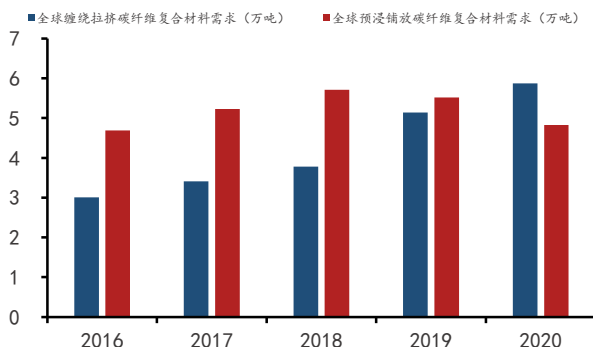
资料来源：《拉挤复合材料板材在风电叶片上的应用研究》，民生证券研究院

注：表中数据引自 Gurit 公司在 2014 年 Wind Turbine Blade Manufacture 大会上的演讲

拉挤法逐步成为风电叶片主流生产工艺。2015 年之前全球碳纤维工艺以预浸料和真空灌注为主，价格高使风电叶片采用碳纤维比例偏低；近年来 Vestas 大丝束碳纤维（主流供应商为 ZOLTEK）拉挤梁片成为主流。2020 年拉挤法碳纤维复合材料需求 5.87 万吨，占比达 36%，

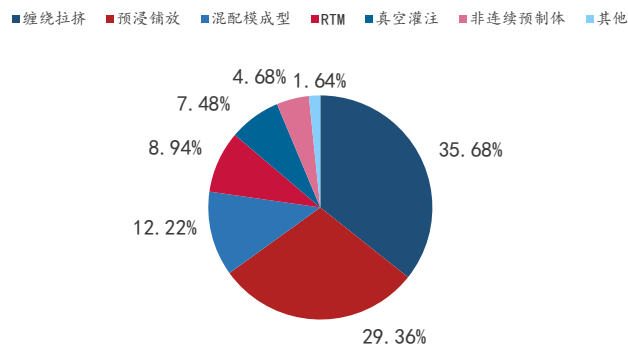
超越预浸料成为碳纤维第一大工艺，2016-2020 年拉挤法需求 CAGR 达 18%。

图22: 2016-2020 年全球缠绕拉挤/预浸铺放碳纤维需求



资料来源：赛奥碳纤维，民生证券研究院

图23: 2020 年全球碳纤维复合材料需求-按应用分类



资料来源：赛奥碳纤维，民生证券研究院

表12: 2014-2018 年风电叶片用碳纤维单价及用量

	碳纤维单价 美元/kg	制品单价 美元/kg	碳纤维用量 万吨	碳纤维制品用量 万吨
2014 年	23	50	0.6	-
2015 年	23	50	1.8	2.77
2016 年	14	18	1.8	2.77
2017 年	14	18	1.98	3.05
2018 年	14	17.5	2.2	3.38

资料来源：《国产碳纤维在风电叶片产业中的机会》，民生证券研究院

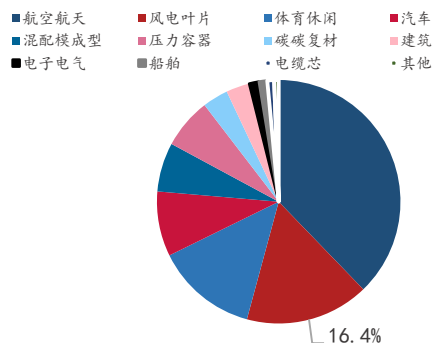
Vestas 碳梁保护专利 2022 年 7 月到期，国内外厂商加速布局拉挤法技术储备。 Vestas 在风电叶片碳纤维领域市占率超 80%（数据来源：《国产碳纤维在风电叶片产业中的机会》，2019 年），国内厂商仍以预浸料工艺为主，除拉挤法技术难度外，专利也是主要原因。Vestas 在 2002 年 7 月 19 日向中国/丹麦等国家知识产权局申请了由碳纤维条带组装风力涡轮叶片的相关专利，国内厂商可使用拉挤法生产大丝束碳纤维及其复合材料，但无法将拉挤法所得碳梁用于制作叶片（除非直接供给 Vestas）。国内外厂家预计会提前布局拉挤法工艺，因此专利到期后，拉挤法工艺有望快速实现普用，带动风电叶片用碳纤维成本下降，进而拉动风电碳纤维需求。

2.3 碳纤维产业链较长，生产工艺国产替代空间广阔

国产替代空间大，风电为我国碳纤维下游需求大头。2020 年全球碳纤维需求达 10.69 万吨，我国碳纤维需求 4.89 万吨，占比 45.7%，其中国产碳纤维供应量仅为 1.85 万吨，占国内总需求 38%，国产替代空间广阔。奥赛碳纤维预测 2025 年国产碳纤维供应量将达 8.3 万吨，预期未来 5 年 CAGR 达 35%。

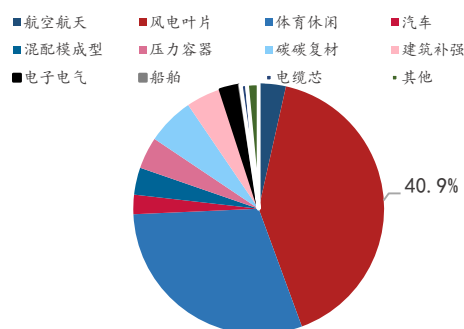
全球与我国碳纤维下游需求结构有所出入，航空航天、风电叶片、体育休闲（高尔夫、自行车、钓鱼竿、球拍等）、汽车为全球碳纤维前四大用途，其中风电叶片占比 16.4%；而从我国碳纤维需求结构来看，风电为下游应用大头，占比 40.9%。

图24: 2020 年全球碳纤维下游需求结构



资料来源: 赛奥碳纤维, 民生证券研究院

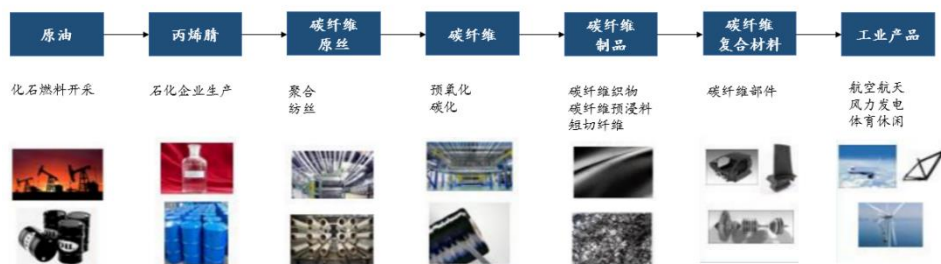
图25: 2020 年中国碳纤维下游需求结构



资料来源: 赛奥碳纤维, 民生证券研究院

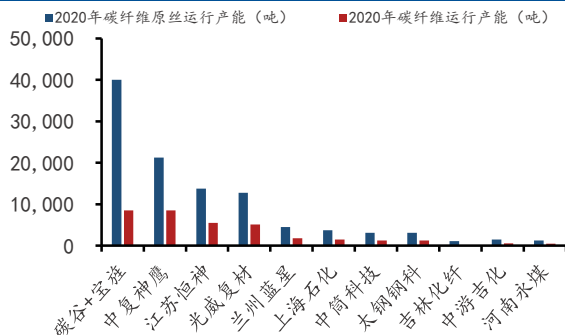
碳纤维产业链包含从原油到终端应用的完整制造过程: 上游企业从石油、煤炭、天然气等化石燃料中制得丙烯, 再经氨氧化后得到丙烯腈; 丙烯腈经聚合和纺丝后得到聚丙烯腈(PAN)原丝; PAN 原丝经过预氧化、低温和高温碳化后得到碳纤维; 碳纤维可制成碳纤维织物和碳纤维预浸料; 碳纤维与树脂、陶瓷等材料结合可形成碳纤维复合材料, 最后由各种成型工艺得到下游应用所需产品。

图26: 碳纤维产业链



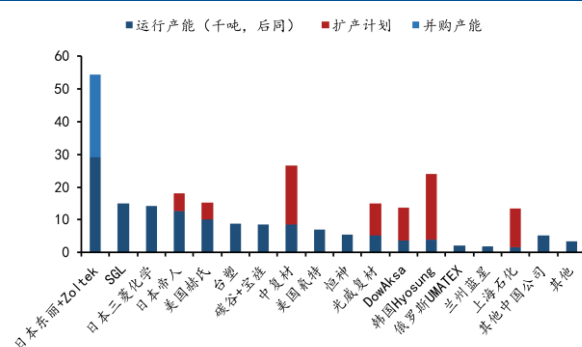
资料来源: 吉林碳谷公开发行业书, 民生证券研究院

图27: 2020 年全球碳纤维运行产能



资料来源: 赛奥碳纤维, 民生证券研究院

图28: 2020 年中国碳纤维运行产能



资料来源: 赛奥碳纤维, 民生证券研究院

3. 风电叶片领域，玻纤、碳纤将长期共存

碳纤维是否会在风电叶片领域大面积取代玻纤？我们认为，玻纤与碳纤将长期共存，共享风电增量。

(1) 碳纤维产能规模不支持大范围替代。奥赛碳纤维数据显示，2020 年底全球碳纤维运行产能为 17.17 万吨，考虑到扩产计划则达 25.21 万吨（此处未计入：吉林化纤宣布“十四五”碳纤维扩产到 6 万吨，其中目前确定有 1.5 万吨碳纤维扩产）。2021-2023 年全球年均新增风电装机量在 90GW 左右，假设 1GW 对应增强材料织物需求 1 万吨，即近 3 年全球风电增强材料织物需求在 90 万吨左右，碳纤维产能供应仍存明显缺口。

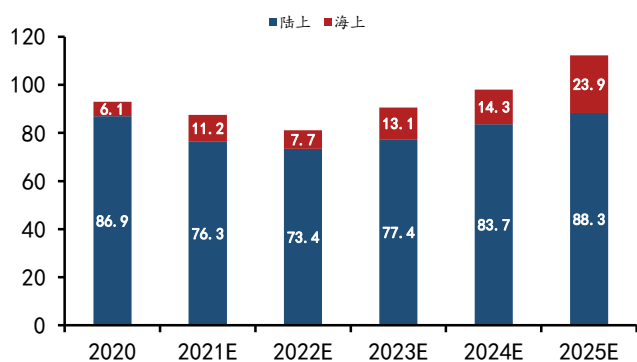
另外，关于碳纤维供给，我们提示 3 点：

1) 并非所有碳纤维产能供应风电，即使远期运行产能达 25.2 万吨，但其中供应风电叶片需求仅为 9.34 万吨（数据来源：赛奥碳纤维，9.34 万吨为 2025 年预测）；

2) 并非所有运行产能为实际产能，如同样宽幅与速度的碳纤维产线生产 3K 与 12K 碳纤维产能有较大出入。统计原因导致存在部分“无效产能”，2017-2020 年总产能与产出有较大出入，反映在数据上即为产能利用率较低；

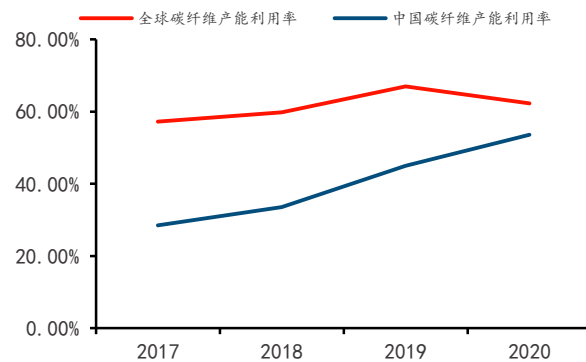
3) 考虑到生产技术壁垒，并非所有扩产计划均可落地。

图29: 2021-2025 年全球预计新增风电装机量



资料来源：GWEC，民生证券研究院

图30: 2017-2020 年全球及中国碳纤维产能利用率



资料来源：赛奥碳纤维，民生证券研究院

注：假设产量=需求量

(2) 参考玻纤，碳纤维成本下降非一日之功。《碳纤维产业化发展及成本分析》数据显示，原丝和碳纤维产线存在明显规模效应，因此随着产能释放，碳纤维成本以及价格大概率呈下行趋势，并影响终端售价。我们认为碳纤维降本可类比较玻纤，耗时较长。因此性价比角度，当前主机厂可能更倾向于玻纤复合材料。

表13: 原丝和碳纤维在不同产能下成本构成 (单位: 万元)

成本费用	原丝		碳纤维	
	产能 250 吨/年	产能 3000 吨/年	产能 100 吨/年	产能 1000 吨/年
直接成本	79.6	86	77.4	85.1
单耗成本	10.3	5.8	47.1	20.7
固定资产折旧	11.3	7.7	13	8.6
流动费用	8.9	6.2	9.6	6.2

资料来源:《碳纤维产业化发展及成本分析》, 民生证券研究院

(3)不断更新换代,高模量玻纤有望成为风电纱拳头产品。以中国巨石E系列玻纤为例,2016年开发出首款实现池窑化量产的高模量玻纤E8,真正实现高模量玻纤规模化工业应用;2020年8月发布E9,模量突破100GPa,拉伸模量比E6提升近25%。

表14: 2014-2018年风电叶片用碳纤维单价及用量

测试样品	测试项目	普通 E	E6	E7	E8	E9
浸胶纱拉伸性能环	拉伸模量 (GPa)	73-75	81-83	89-91	95-98	100-103
氧树脂	拉伸强度 (MPa)	1900-2000	2500-2700	2800-3000	3100-3500	3100-3500
单向织物层压板性能环氧树脂	拉伸模量 (GPa)	-	-	49-50	51-52	54-55
	拉伸强度 (MPa)	-	-	1200-1300	1300-1400	1400-1500
	玻纤体积含量(%)	-	-	55	55	55

资料来源:中国巨石官网, 民生证券研究院

4. 风险提示

大丝束碳纤维产能投放进度不及预期:考虑到生产技术壁垒,并非所有扩产计划均可落地;

国产拉挤法工艺研发不及预期:维斯塔斯专利到期后,碳纤维拉挤大梁国产替代速度不及预期;

海上风电项目进展不及预期:海风未来发展前景较为乐观,但仍存项目进展不及预期风险。

插图目录

图 1:	2010-2019 年国内新增装机风电平均单机功率	3
图 2:	金风科技在手外部订单结构占比	3
图 3:	明阳智能产品产量结构占比	3
图 4:	全球风电以及海上风电累积装机量	5
图 5:	我国风电以及海上风电累积装机量	5
图 6:	商业叶片质量与旋转半径之间的变化趋势	5
图 7:	风电叶片材料成本占比（国内某主流 1.5MW 机型叶片）	7
图 8:	明阳智能风机材料成本拆分（2018H1）	7
图 9:	风电叶片中玻纤应用	7
图 10:	单/多轴向布玻纤内部结构	7
图 11:	风电叶片材料成本占比	8
图 12:	风电叶片各结构成本占比	8
图 13:	各复合材料在不同拉伸应力水平下的疲劳表现	9
图 14:	叶片用材料单价比较	10
图 15:	2020 全球碳纤维需求（千吨）	11
图 16:	吉林碳谷大丝束碳纤维原丝与小丝束售价比较（元/吨）	11
图 17:	全球风电碳纤维需求	11
图 18:	全球大/小丝束碳纤维需求	11
图 19:	预浸料成型示意图	12
图 20:	拉挤板工艺示意图以及风电叶片碳纤维与玻纤应用示意图	13
图 21:	不同工艺碳纤维制品性能对比	13
图 22:	2016-2020 年全球缠绕拉挤/预浸铺放碳纤维需求	14
图 23:	2020 年全球碳纤维复合材料需求-按应用分类	14
图 24:	2020 年全球碳纤维下游需求结构	15
图 25:	2020 年中国碳纤维下游需求结构	15
图 26:	碳纤维产业链	15
图 27:	2020 年全球碳纤维运行产能	15
图 28:	2020 年中国碳纤维运行产能	15
图 29:	2021-2025 年全球预计新增风电装机量	16
图 30:	2017-2020 年全球及中国碳纤维产能利用率	16

表格目录

表 1:	Vestas 不同单机容量机型耗用原材料	4
表 2:	采用不同单机容量机组项目经济指标	4
表 3:	不同单机容量机组项目对应叶轮直径	5
表 4:	复合材料叶片成型工艺比较	6
表 5:	各类材料物理性质对比	7
表 6:	各类材料物理性质对比	8
表 7:	碳纤维于风电叶片中应用案例	9
表 8:	主梁优化方案对比	10
表 9:	大丝束碳纤维 PANEX 33-0048 和小丝束碳纤维 T300-12000 的性能价格比	11
表 10:	风电领域碳纤维应用主要工艺	12
表 11:	不同工业领域碳纤维、预浸料和制品单价	12
表 12:	2014-2018 年风电叶片用碳纤维单价及用量	14

表 13: 原丝和碳纤维在不同产能下成本构成 (单位: 万元)	17
表 14: 2014-2018 年风电叶片用碳纤维单价及用量	17

(本文感谢以下期刊、论文贡献:《碳纤维复合材料在风力发电机叶片中的应用》、《复合材料风电叶片制造技术现状及发展》、《多轴向织物在风力发电机叶片中的应用》、《风电用多轴向经编织物的结构设计》、《高性能玻纤多轴向织物在兆瓦级风电叶片中的应用》、《高模玻纤单向布在风电叶片上的应用》、《复合材料结构设计对风电叶片成本的影响》、《碳纤维/玻璃纤维混杂增强复合材料力学性能研究及风电叶片应用》、《大丝束碳纤维产业发展现状及面临的问题》、《国产碳纤维在风电叶片产业中的机会》、《风电叶片用国产碳纤维预浸料工艺性能和力学性能研究》、《从国产碳纤维的处境谈碳纤维“全产业链”》、《拉挤复合材料板材在风电叶片上的应用研究》、《碳纤维产业化发展及成本分析》等)

分析师简介

李阳，建材建筑行业首席分析师，曾就职于兴业证券、天风证券，2021年11月加入民生证券。

分析师承诺

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求客观、公正，结论不受任何第三方的授意、影响，特此声明。

评级说明

公司评级标准	投资评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价的涨跌幅为基准。	推荐	分析师预测未来股价涨幅 15%以上
	谨慎推荐	分析师预测未来股价涨幅 5%~15%之间
	中性	分析师预测未来股价涨幅-5%~5%之间
	回避	分析师预测未来股价跌幅 5%以上
行业评级标准		
以报告发布日后的 12 个月内行业指数的涨跌幅为基准。	推荐	分析师预测未来行业指数涨幅 5%以上
	中性	分析师预测未来行业指数涨幅-5%~5%之间
	回避	分析师预测未来行业指数跌幅 5%以上

民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路8号财富金融广场1幢5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街28号民生金融中心A座18层； 100005

深圳：广东省深圳市深南东路 5016 号京基一百大厦 A 座 6701-01 单元； 518001

免责声明

本报告仅供民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

本报告所载的全部内容只提供给客户做参考之用，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。客户不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。本公司也不对因客户使用本报告而导致的任何可能的损失负任何责任。

本公司未确保本报告充分考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。本公司建议客户应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。

本公司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参与本报告所提及的公司的金融交易，亦可向有关公司提供或获取服务。本公司的一位或多位董事、高级职员或/和员工可能担任本报告所提及的公司的董事。

本公司及公司员工在当地法律允许的条件下可以向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务以及顾问、咨询业务在内的服务或业务支持。本公司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。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。

未经本公司事先书面授权许可，任何机构或个人不得更改或以任何方式发送、传播本报告。本公司版权所有并保留一切权利。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，均为本公司的商标、服务标识及标记。