

碳纤维技术

# 风力涡轮机叶片的新宠

怎样以更具竞争力的价格生产风电？或许是用碳纤维取代玻璃纤维来制造风力涡轮机叶片？行业内已有越来越多的人认可碳纤维对于提高风力涡轮机投入产出比的重要作用。

文 | Composites Technology Karen Wood

风能产业自建立以来，就不得不与其他发电形式进行竞争。风能生产商不仅要面对这种竞争，还要为了获取风电市场的份额而彼此竞争。两种竞争最终归结为需要通过增加能源捕获来提高风能的经济性。这毫无疑问地促使了陆上和海上风力机系

统和桨叶的大小呈井喷式增长。海上风力发电机正迅速地从额定功率为 3 MW 转变为下一代额定功率为 5 MW 及以上的风力发电机，陆上和海上风力机系统的叶片长度通常都超过 45 m。当叶片变得更长时，把叶片结构区域从 E- 玻璃纤维转变到更刚性、更轻

质的碳纤维的想法开始显得有道理，尽管后者的前期成本比较大。

对于风力机制造商 Vestas 风力系统公司（以下简称“Vestas 公司”，位于丹麦 Aarhus）和 Gamesa 技术公司（位于西班牙 Vizcaya, Zamudio）而言，碳纤维已经被证明是一种有利的技术。数年前，两家公司已在他们叶片的结构部件中应用了碳纤维，并在整个风力涡轮机系统中利用了重量更轻的叶片所带来的优势。更轻的叶片需要强度更低的风力涡轮机和塔架零部件，所以，大量的成本节约证明了碳纤维额外费用的合理性。“Vestas 公司和 Gamesa 技术公司围绕着碳纤维的使用设计了它们的风力涡轮机，而重要的是，整个系统的成本比使用全玻璃纤维叶片的系统低很多。”碳纤维制造商 Zoltek 公司（位于密苏里州圣路易斯）的风能执行副总裁 Philip L. Schell 博士证实了这点。

并且，上述设计要先于通过增加叶片长度来提高风力涡轮机效率的设计（例如，围绕碳纤维的使用进行的设计，最初使 Vestas 公司的叶片在不增加任何重量的情况下，长度增加了 5

虽然 Vestas 公司 V112-3 MW 风力涡轮机上 54.6 m 长的碳纤维 / 玻璃纤维叶片和该公司 44 m 长的叶片具有相同的宽度，但是前者的扫掠面积要比后者大 55%，可提供相对更高的能量输出



m)。Vestas 公司的 V112-3 MW 风力涡轮机，采用了 3 片 54.6 m 长的碳纤维 / 玻璃纤维叶片，专用于中低风速区域。这些叶片和该公司 44 m 长的叶片具有相同的宽度，但是，前者的扫掠面积增加了 55%，其结果是大幅度地提高了能量的输出。

最近，GE 能源公司（位于南卡罗莱那州 Greenville）加入了竞争的行列，该公司指定在其下一代风机叶片中采用碳纤维。然而，GE 能源公司制造技术的高级首席工程师 Nirav Patel，在华盛顿特区召开的“复合材料世界 2011 年度碳纤维会议”上的发言中警告称，碳纤维在成本和供应上的问题可能会阻碍 GE 能源公司在应用中进一步使用碳纤维。

值得一提的是，GE 能源公司可能将通过使用碳纤维来增加其 1.6 MW 风力机系统上的叶片长度，这最终将推动更多的风机制造公司采用碳纤维。“GE 能源公司用直径 100m 的叶轮来配套一台 1.6 MW 风力涡轮机的决定，已经引起了行业内很多公司的关注。”设计风力涡轮机和叶轮的 Wetzel 工程公司（位于堪萨斯州 Lawrence）总裁 Kyle Wetzel 博士说，“因此，一些公司找到我们，希望同样地升级他们的设备。”

## 碳纤维主结构

用包含碳纤维的更长的叶片来改造现有的风力发电机的设计，已成为风能生产商走向市场化的捷径。“最好是做一个系统级的设计——将叶轮、风力涡轮机和塔架作为一个系统来处理，但现实是，能源市场的竞争非常激烈，并且每个人都在担心其竞争对手正在做的事，以至于他们经

常没有时间来做一个系统级的设计。”Wetzel 解释说，“所以，如果一家公司决定在现有的系统上使用一个更大的叶片，那么碳纤维技术将会是一个不错的选择。该技术可以在不增加叶片重量的前提下增加其长度。”

目前，碳纤维主要用于长度超过 45 m 的陆上和海上风力机叶片中的主梁或结构件。碳纤维更高的刚度和更低的密度促使了更薄的叶片外形，从而产生了更刚性、更轻质的叶片。粗略计算，从一个全玻璃纤维叶片转变到一个用碳纤维增强主梁帽的叶片，其重量至少节省 20%。海上风力发电系统中最小的风力涡轮机（额定功率为 3 MW），将特别受益于碳纤维的特性。

“如果海上风电继续朝着正确的方向发展，并且成本仍然受到控制，那么在将来 3 ~ 5 年内，看到 8 ~ 10 MW 风力涡轮机采用 80 ~ 100 m 长的叶片，我会感到很自然。”Schell 说。

一片完全用玻璃纤维制成的 100 m 长的叶片，重量可达 50 t。”Schell 说，“当你考虑通过应用碳纤维来实现 20% ~ 30% 的重量节省时，这就意味着重量将减轻 15 t。将其乘以 3，就可以形成一个明显的重量差异。”

“为了进一步减轻 100 m 长的叶片的重量，我们开始研究在叶片蒙皮上使用碳纤维。”Wetzel 说。但是，

在传统的陆上叶片设计中，Wetzel 建议只在主梁帽区域使用碳纤维。

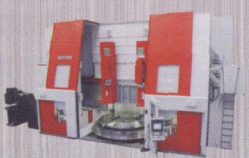
“在一些非常特殊的叶片中，我们已经把碳纤维用于后缘中，以调整叶片的一些固有频率。”Wetzel 说。“并且碳纤维可以在气动弹性调整中发挥作用。”Wetzel 补充道。并指出，这种想法是用叶片蒙皮中不对称的纤维铺层把少量的可扭转性能建立在叶片的负载响应中，以形成功率曲线并降低载荷。这是一个存在了大约 10 年的概念，Wetzel 认为它会很快在一些商用风力发电叶片（非常大的叶片）中找到自己的应用方式。

## 玻纤对碳纤的挑战

用碳纤维更换 E- 玻璃纤维为



**道司机床“捷克梦”，您值得探索**  
www.toshulin.cz  
TOSHULIN 股份公司创始于 1949 年，总部在捷克，长期运营在全球高端机床市场，可进行 7 轴联动加工。

|                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>BASICTURN:</b><br/>经济型系列<br/>最大工件直径<br/>1000-3600mm</p>  | <p><b>POWERTURN:</b><br/>加强型系列<br/>最大工件直径<br/>1000-5800mm</p>  |
| <p><b>EXPERTURN:</b><br/>全能型系列<br/>最大工件直径<br/>1000-5800mm</p>  | <p><b>FORCETURN:</b><br/>重切削系列<br/>最大工件直径<br/>2900-7300mm</p>  |

公司座右铭：传统—精确—可靠

总部地址：Wolkrova, Hulin 捷克  
sale@toshulin.com  
www.toshulin.cz

道司机床(上海)有限公司  
上海市闵行区合川路3051号莱茵虹桥中心B幢609室  
电话：+86 021 34675072 传真：+86 021 34675032

▲反馈服务编码M5105

工艺带来了新的挑战。例如，碳纤维的损伤容限相对较低，并且其抗压强度受纤维排列的影响极大。此外，成型商在真空灌注中实现纤维浸润上遇到了更大的困难，在这种情况下，风机桨叶制造商们都倾向于使用更昂贵的预浸料。

Wetzel 说：“在过去的几年里，我们已经看到碳纤维预浸料在纤维方向的抗压强度上有了显著的改善，有很多进步是来自改进的制造和预浸料工艺。不过，在纤维排列领域仍然需要有更大的进步。”

“碳纤维需要完美的纤维排列，并且必须迅速固化。”已提供风电叶片复合材料超过 20 年的 Hexcel 公司（位于康涅狄格州斯坦福德市）风能业务开发经理 Manfred Schoeflinger 解释说，“即使是很小的不规则排列，也会导致碳纤维的压缩应力和疲劳强度的明显降低。”

Hexcel 公司的品牌产品——HexPly 单向碳纤维预浸料中，采用的专利格栅技术，能帮助厚的碳纤维单向层合板在真空袋压工艺中去除空气。Hexcel 公司采用格栅技术的 HexPly M19G 碳纤维单向预浸料的固化速度要比该公司标准产品快 15%~20%，且固化 HexPly M19G 碳纤维单向预浸料所需的能量更少。

自动铺层的质量也被提高了。一般情况下，主梁帽可能需要 45~50 层的预浸料，但随着叶片尺寸的增加，结构件可能需要 100 层或者更多的预浸料。“在 36.6~61 m 长、600 mm 宽的主梁帽模具中设法铺 80 层预浸料，一层叠在一层上面，这对任何人都将是一个挑战。”Schell 说。这是 Zoltek

公司将一个由它的附属公司 Entec 复合材料机器公司（位于犹他州盐湖城）提供的设备安装到其主梁帽模具上的纤维排列系统中的原因。“该设备能用正确的张力和排列，自动地把每层预浸料放置在模具中适当的位置上。”Schell 解释说。

“织物的铺放更具有挑战性。”Schell 补充说，“我们正在寻找使用一种类似的设备把织物铺放在模具中的方法，预期在 2013 年引入该技术。”通常，没有预浸料黏性的织物，需要一种稍微不同的方法和设备技术。

Wetzel 认为，另一个需要改进的地方是断裂韧性。“断裂韧性主要和所使用的树脂和纤维间的相互作用有关，它非常强烈地影响着零部件的疲劳寿命和分层。”Wetzel 解释说，“我们正在寻求的断裂韧性要比我们现在所看到的高一倍。”

## 供应和需求

鉴于越来越多的风机桨叶所需标准模量碳纤维的绝对数量，叶片制造商在未来 10 年内，可能会使航空航天制造商的碳纤维消费量黯然失色。复合材料预测和咨询公司（位于亚利桑那州 Gilbert）的拥有者和总裁 Chris Red 预测，到 2019 年，全球将生产出 27 000 台风力涡轮机和 82 000 片叶片，碳纤维将在每片叶片中占全部复合材料的 6%。

据 Patel 称，GE 能源公司计划使用 24K 或更大丝束的标准模量碳纤维，以成型 1600 片下一代长为 48.7 m 的叶片的主要结构。他还声称，仅在 2012 年，GE 能源公司就消耗了大约 3000 t 碳纤

维。GE 能源公司和其他指望把碳纤维加到叶片设计中的公司都担心，随着需求的逐渐上升，大丝束标准模量碳纤维是否会有可靠的供应。

“纤维的供应、产能和价格方面的一致性肯定是业内人士关注的一个问题。”Schoeflinger 说，“将会有两个碳纤维市场，一个侧重于航空航天，另一个则侧重于工业应用。”

Schell 同意 Schoeflinger 的看法。实际上，Zoltek 公司在工业领域已展开了行动，它围绕向风能行业和汽车行业供应标准模量碳纤维产品建立了它的业务（供应无捻粗纱、预浸料和织物）。Zoltek 公司目前有 20 000 t 碳纤维应用在世界各地的风力发电机叶片中。

碳纤维的供应问题，以及比 E-玻纤高 10~20 倍的价格，很可能会继续使一些厂家在使用碳纤维设计一个新叶片之前犹豫不决。“我们的一个客户在叶片设计中应用了两个可供选择方案——用或不用碳纤维。”Molded 玻璃纤维公司（以下简称“MFG”，位于俄亥俄州 Ashtabula）风能销售总监 Gary Kanaby 说。

全球风能市场中的竞争非常激烈，尤其是在中国，数十家企业正在争夺这块世界领先的风电市场。这些公司的目光将被吸引到可以为他们提供有竞争力优势的材料和工艺上。Kanaby 相信越来越多的碳纤维将被用在下一代的风力机叶片中。但是，决定碳纤维是否在风力机叶轮中使用的主要因素将是财务报表。“因为，当叶轮在转动的时候，它是由什么制成的无关紧要，它只需要赚钱。”Kanaby 说道。MM