

复合材料

复合材料优化了风力发电设备

能源转换和能源需求唤醒了大功率的风力发电设备。但大功率的风力发电设备需要的是巨大的转子——既能承受巨大的自重，也能承受巨大的负荷（工作环境带来的）。目前，这是一项只能由重量轻的纤维合成材料才能解决的艰巨任务。

文 | Thomas Isenburg

德国有着悠久的历史风能利用历史。早在1900年德国西北部就有大约3万座风力磨房。2012年，23 030台风力发电设备的总发电能力达到了31 308 MW，满足了德国7.3%的电力需求。据TNS Infratest 2012年夏季进行的民意调查，73%的德国民众支持和赞同风力发电，包括在他们住宅附近建造、安装风力发电设备。

总电力需求的36%可以利用风力发电来满足

在涉及到能源转换时会用到这样的计算模型：若联邦德国2%的土地面积都安装上了风力发电设备，则这些风力发电设备发出的总电力可达198 000 MW；而另外一种计算方法得出的结论是：若风

力发电设备的平均发电量为4 MW时，可以满足整个德国36%的电力需求。德国市场绘制出的这种框架条件强调了需要更大功率、更加经济的风力发电设备，而这里的核

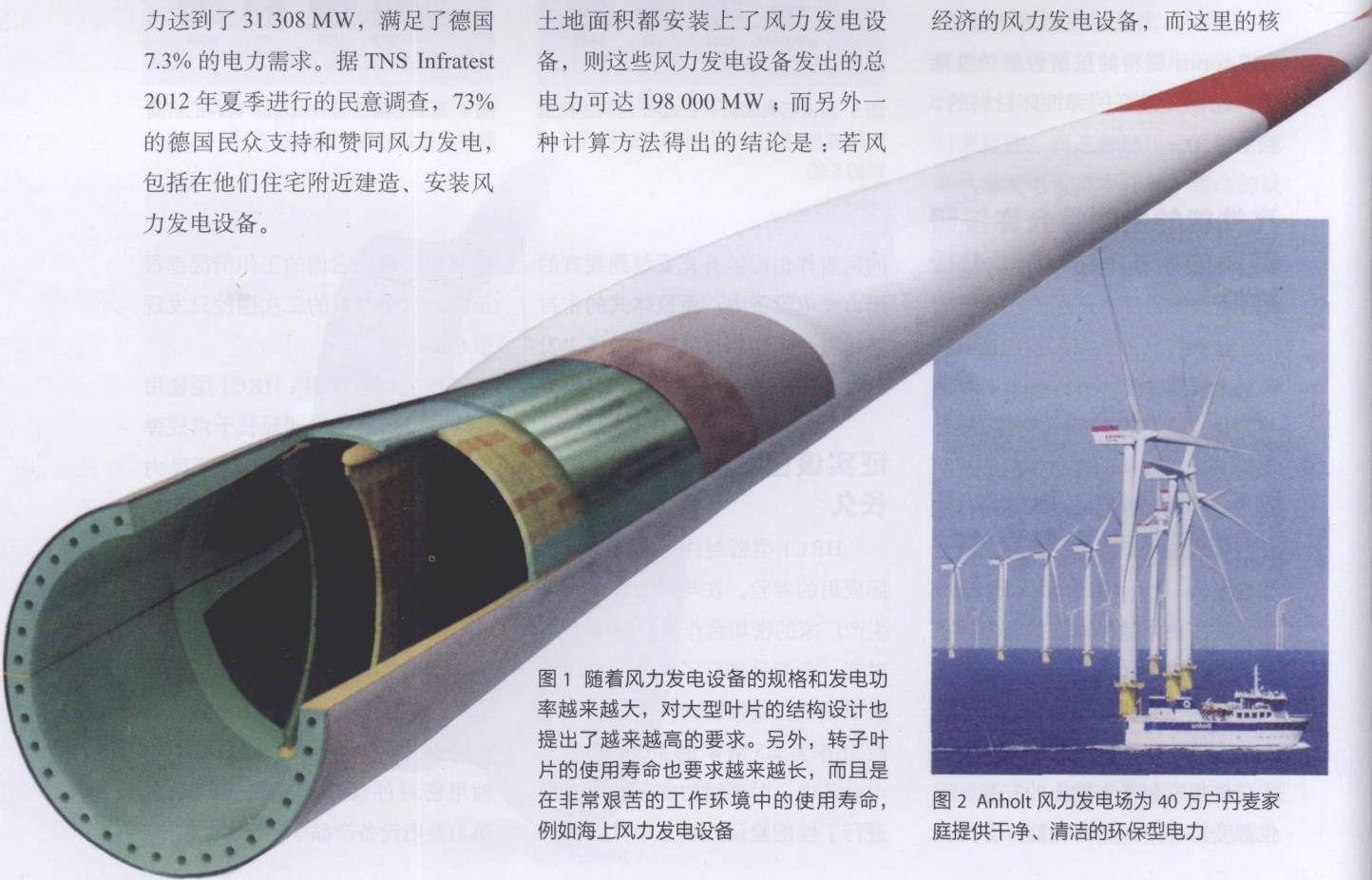


图1 随着风力发电设备的规格和发电功率越来越大，对大型叶片的结构设计也提出了越来越高的要求。另外，转子叶片的使用寿命也要求越来越长，而且是在非常艰苦的工作环境中的使用寿命，例如海上风力发电设备

图2 Anholt 风力发电场为40万户丹麦家庭提供干净、清洁的环保型电力

心关键毫无疑问是风力发电设备的转子，把风力的动能转换为转子旋转的、驱动发电机发电的角动能。风力发电设备功率按转子叶片长度的平方增加，而转子叶片尺寸规格的增加是在三维方向增加的：长度、宽度和厚度。质量、成本的增加是叶片长度的三次幂。尽管风机叶片生产厂家尝试解决这些负面效应、改进提高转子叶片的生产加工质量，但大型转子叶片长度的增加使得生产成本费用很快就超过了得到的收益。

叶片长度增加一倍所获得的风力翻四番

转子叶片的增大提高了风力发电机的发电能力。转子叶片的长度增加一倍，则其受风面积增加四倍，因此可以接收四倍的风力，将其转换为电力。随着风力发电设备的增大和发电能力的增强，对风力发电设备所使用的材料也提出了更高的要求。另外，还要求它有着更长的使用寿命，而且是在非常恶劣的工作环境中，例如在海上使用时，应具有很长的使用寿命。

在将风力动能转换为电能时，风力发电机转子叶片承担着中间枢纽的关键作用，是它把风力的动能转换成旋转的转动能。这时，叶片承受着非常大的负载。迄今为止，为了能够充分利用好可能的风能，海上风力发电设备的塔架高度最高可达 200 m 高，它所配用的转子叶片长度为 75 m，这时测得的叶片顶端的转速高达 300 km/h。另外，它还要承受多种多样的不利天气的影响，例如雨、雪、雷、电以及紫外线对叶片体的照射。而风力发电设备设计的目标是：尽可能在 20 年内无故障连续运行。Bremerhaven 市霍伦霍夫研究所的专家们强调指出：基本上只有纤维增强的复合材料



图3 直径为 $\phi 154\text{ m}$ 的大型风力发电机转子叶片准确地吊装到机舱上



图4 B75 风力发电机玻璃纤维增强转子叶片，就生产时的情况提出了一些新的要求：转子叶片要分成两体，以便于运输

料才是合适转子叶片材料。而这种纤维增强的复合材料只能说是玻璃纤维或者碳纤维与环氧树脂混合起来的混合物。也正因为如此，风力发电设备生产厂家才成为当前环氧树脂和纤维增强材料的最大用户。长期以来，他们使用的环氧树脂都是杜邦化工、Momentive 专业化工或者巴斯夫公司提供的产品。

纤维增强的复合材料是正确的选择

在制作成型的转子叶片时，人们成功研发了真空注入技术。在这一技术中，将干燥的叶片原材料放入半壳型的模具中，在真空状态下注入环氧树脂，在注入环氧树脂之

后，含有纤维增强材料的氧化树脂混合物在叶片模具中硬化成型。不同的纤维种类和纤维织物都按照叶片设计的纹理方向（沿主要受力方向）排好。除了纤维增强环氧树脂的叶片表面之外，叶片还有内部填充物，制造这些结构的材料除了轻质木材之外，还可以使用聚脂基膜系聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）或者聚氯乙烯（PVC）泡沫材料。

当前研发的材料趋向于低密度、高强度或者低成本，这样就可以在能够接受成本增加的情况下生产出大型的转子叶片了。通过加大转子直径，就可以在风力较小的情况下使风力发电设备达到额定的发电能力。这里的一个重要观点就是：



图5 海上风力发电设备是改换了名称的发电设备，它所使用的动力是来自大自然的风



图6 第一台商业性风力发电设备的装机容量为 30 kW。据西门子公司介绍：今天风力发电设备的发电能力是第一台的 200 倍

尽快经济地收回风力发电设备的投资。通过生态学的“足迹”可以清清楚楚地看到研发工作的成果：在一个过程中消耗的能源和资源应尽快地回收起来。一般情况下，风力发电设备的投资回收期在半年到一年之间。也就是说：风力发电设备的投资回收期比其他可再生能源设备要快得多。

近几年来，亚琛鲁尔工业大学的纺织技术研究所 ITA 也参与了风力发电设备原材料的研发。该研究所研究的重点是：纤维含量尽可能多和经济性好的纤维增强系统。长期以来，纤维增强合成材料产品的



图7 利用 Integral-Blade-Verfahren 制造出来的转子叶片几乎无需修正，转子叶片非常坚固、成本低廉

生产一直都是艰苦繁重的人工手工操作。也就是：要用手来一层层地铺好玻璃纤维织物。而在这之前首先要将纤维织物裁剪、下料、成形，运送到巨大的成型模具处，然后由

多个技术工人把一块块裁剪好的纤维织物铺到模具中、确定好它们的位置。转子叶片的这一生产过程精度不高，不可能每次都做得完全一样。而对转子叶片生产过程的要求却越来越高，例如转子叶片在生产过程中常常会夹杂污物，因为在注入树脂时生产工人要来回地在纤维织物上走动。因此，ITA 公司在其研发项目中使用了机器人来对这一生产过程进行了优化。在转子叶片的生产过程中，纤维织物的纤维走向有着决定性的意义和作用。对纤维走向有着严格规定和要求的目的是：使负载方向与纤维方向保持一致。因此铺设的玻璃纤维要按照转子叶片的受力情况铺设。

长期以来，转子叶片生产过程中使用的材料都是玻璃纤维，对于特长的转子叶片使用的材料则是价格更加昂贵的碳纤维，尤其是在转子叶片受力比较大的部位。利用专门的振荡器进行性能测试，例如对转子叶片中心的振动或者膨胀进行检测。同样，也对机器人铺设纤维织物的重复精度进行了测试，并与手工铺设的精度进行了比较。在实验室规模下的测试结果表明：新开发的技术是可行的。由于纤维织物能够被精确地铺设，因此叶片制造过程中的尺寸余量也无需像原来那么大了。2000 年时，慕尼黑的西门子公司（Siemens）开发的 Integral-Blade 技术获得了重大进步，这家专业电气技术公司能够在一次注入中就生产出大型的风力发电设备的叶片。

利用三明治技术生产制造抗暴风雨的转子叶片

玻璃纤维材料是铺设在叶片的两个模具中的。两个模具各制造叶片的一半，固化后再粘接起来，从模具中脱模，灌入树脂，加热，

24 h 之内整个转子叶片就固化成一体了。具体地讲，就是把玻璃纤维铺设在下模里，在两个模具玻璃纤维之间的是软质木材制成的叶片内芯，增强叶片强度的加强筋也铺设在下模里，再把加强筋材料、玻璃纤维织物等放入下模、加入软质木芯之后，合上上模，将整个树脂注入模具密封起来，这时才完成树脂注入前的所有准备工作。再抽成真空、注入树脂。完成上述操作之后，转子叶片就可以在模具中硬化、固化了，最后脱模取出叶片，随室温冷却。叶片冷却之后再把软质木材的内芯取出来。随后就是质量检验，最后涂漆。在这一 Integral-Blade 工艺中，无需两半叶片的粘接，所使用的机器人也非常坚固，明显地降低了转子叶片的生产成本。

在这一技术研发的同时也对新技术的生产过程进行了优化，因为迄今为止，大量的纤维织物铺设工作都还是手工铺设、成型、粘接来固定的。将来，这一生产过程将会更加自动化，只有这样才能有很高的质量稳定性，才可以降低生产成本。在耐久性能试验中对转子叶片的承载能力进行了测试，以保证 20 年的可靠运行。在转子叶片的研发过程中，模拟技术也发挥了非常重要的作用。但真正的空气动力学优化则是根据切合实际的风洞试验之后才进行的。最新研发出来的转子叶片也被称之为空气动力学承载叶片，这种叶片能够在各种不同的风力条件下都发挥其最佳的发电效率。这是为了完美叶片形状和不同控制系统的结合中实现的：控制系统能够根据不同的风力、风向连续地调整转子叶片和风机的迎风角。

聚氨酯重新成为关注的焦点

拜尔材料科技有限公司



图 8 风力发电设备转子叶片供货前的质量检验。在发电过程中，这一 154 m 长的转子叶片 1 s 能承受的风力大约为 200 t

(BAYER) 把聚氨酯 (PUR) 作为复合材料的基质。这家化工集团公司计划把这种材料引进到风力发电设备的制造领域中。这里，真空注入技术也用于 PUR 聚氨酯材料的注入和硬化，同时也利用常规材料来制造转子叶片内部的填充材料。

没有折痕的长玻璃纤维被一层层地铺设在涂有分型剂的叶片模具中，根据转子叶片的大小和几何形状，注入喷嘴分布在模具的合适位置。最后，整个模具被一块塑料薄膜严密地封盖起来，抽成真空。聚氨酯的注入过程是由定量控制机床来完成的，它在一定压力作用下把液态树脂注入到模具中，从而使一层层的玻璃纤维都均匀地与聚氨酯树脂混合在一起，这样就不会混入气泡。随后对转子叶片模具进行加热，开始了化学的固化反应，即树脂硬化。

最长硬化时间为 3 h

在树脂注入技术中，聚氨酯材料是一种相对比较“年轻”的材料，它比环氧树脂系统的流动性更好，

这也就缩短了树脂注入的时间和玻璃纤维“喝饱”树脂的时间。因此，根据注入时的树脂温度，整个转子叶片的生产时间最长只需 3 h，可以缩短生产时间，而一般情况下则需要 16~24 h。与聚酯系统的硬化过程不同，聚氨酯树脂在硬化反应过程中几乎不对外释放热量。这也就明显地提高了风力发电设备的生产效率，因为整套风力发电设备 1/4 的费用是花费在转子叶片的生产制造过程中的。另外，PUR 聚氨酯树脂有着与玻璃纤维更好地相互粘合的性能，这对于提高 PUR 聚氨酯合成材料的机械性能和动态性能都有极大地帮助。原则上，PUR 聚氨酯注入树脂硬化后在玻璃纤维的纵向和横向都有着更高的机械强度。因此，据拜尔材料科技有限公司解释：这种材料也适合于制造要求特大、特长的转子叶片。在与拜尔公司的合作中，Hübers 流程工艺技术机床制造公司开发了一种受控的树脂注入新技术并对这一技术进行了优化，实现了转子叶片模具使受控的树脂连续注入。MM