



# 风机叶片 的发展概况和趋势

国际竹藤网络中心 ■ 黄晓东 孙正军  
中国林业科学研究院 ■ 江泽慧

由于煤炭、石油等化石能源资源有限且存在严重环境污染的危险，人们自然将目光集中在那些污染少、可持续供应的新能源上，因此发展风电成为了解决全球环境与能源问题的重要手段。

在1887~1888年的冬天，美国的Charles F. Brush建造了世界第一座全自动风力发电机并成功发电，此后各国都从小型风力发电机研制开始，逐渐向大中型风力发电机发展过渡。经过10多年的发展，大中型风力发电与自动控制技术逐渐成熟，在风能资源优越的地域，成排有序的风力发电机群在运转，这就是我们所说的“风电场”。在美国和西北欧等工业发达的国家和地区建设的风电场较多，美国加州风力发电的成本已低于核电，接近燃油发电的水平，说明风电已具有与传统常规能源电力竞争的潜力。风力发电装置核心的部分是叶片，叶片的设计及选材决定了发电性能与功率。

## 一 世界风机叶片的发展概况

现代风电叶片的研究在20世纪80年代初期起步，研制各种类型的风电叶片。试用的叶片材料包括了钢材、铝合金、木/环氧(wood/epoxy)和玻璃纤维增强塑料(GFRP)。钢质叶片重量太重，铝质叶片的抗疲劳性能不佳，遭到淘汰；随后，碳纤维增强塑料(CFRP)和混杂材料逐步引入叶片，前西德1957~1968年间研究、设计和制造了10~100kW的风力发电机，成功地使用了复合材料叶片，为复合材料用于制作大型风力发电机叶片奠定了基础。1976年，前西德设计制造了格鲁威恩(Growian)3000kW大型风力发电机，风轮直径100m并成功地用复合材料制作了叶片。目前风力叶片是100%的复合材料产品，由此决定了复合材料工业在风力发电装置中的核心地位。由于风电行业是一个

专业性很强的高科技产业，能够生产大型风电机组和叶片的企业并不多，主要是丹麦和德国的几家企业。目前全球风力发电叶片几乎被三大制造厂瓜分，约占叶片市场的85~95%，它们是丹麦的LM Glasfiber、Vestas Wind Systems A/S及德国的Enercon。

LM Glasfiber是世界最大的风力叶片制造商，2002年销售叶片7232个，相当于2705MW发电电量，占全球40%，销售额高达28.3亿丹麦克朗，该公司拥有5.0kW~2.5MW的系列产品，包括旋角(pitch)控制和失速(stall)控制两种，长度44英尺(13.42m)~128英尺(39m)不等。LM Glasfiber公司在天津武清县建立了LM Glasfiber天津有限公司。

Vestas Wind Systems也是主要风力发电机及叶片制造商，它是世界上第一个制造旋角控制风力发电机的厂商，1995年在丹麦建立世界第一座离岸风力场。该公司总共生产了2.6万个风电机组，在50个国家使用。公司投资2500万欧元在天津独资建立风电桨叶制造厂，于2006年中期生产长39m、2MW的风电机组用桨叶，年生产量为600个桨叶。该公司将桨叶生产厂建在中国，实际上是基于两个出发点：一是中国风电设备市场前景十分广阔；二是中国的制造能力强，生产成本低廉。公司目标是将产品占领中国大型风电桨叶市场。

国内生产风电机组的厂家主要有新疆金风科技股份有限公司和中航(保定)惠腾风电设备有限公司，主要开发、制造系列化的风力发电机组风轮叶片及风力发电机组相关的各种复合材料产品。

在风能装置中采用复合材料的部件有叶片、发动机舱室、流线形抛物面和塔的部件等，其中用量最大的是叶片。典型的31m叶片重约4.5t，而现代

的54m大型叶片重13t。自1978年以来,采用高模量(LG)玻璃纤维的叶片已生产了 $6.8 \times 10^4$ 。美国到2020年的目标是建 $8 \times 10^4$ MW的风能装置,需要约 $7 \times 10^5$ t的叶片,总价值约为 $7 \times 10^5$ 亿美元。到2005年间每年约需 $8 \times 10^4$ t的复合材料用于风能。至于叶片的主要材料,一般较小型的叶片(如22m长)选用量大价廉的E-玻纤增强塑料(GFRP),树脂基体以不饱和聚酯为主,也可选用乙烯酯或环氧树脂,而较大型的叶片(如42m以上)一般采用CFRP或CF与GF的混杂复合材料,树脂基体以环氧为主。

复合材料叶片的设计、结构、选材、工艺方法、制造、测试、实验乃至生产必须紧密结合,其发展趋势朝大功率、大叶片方向迈进,因为每kW风力发电成本随发电功率增大而降低。比如,1992~1999年欧洲风力发电单机功率从200kW增至700kW,叶片长度则从12m增至22m,2000年功率增至900kW,叶片长度增至25m,目前1.5~2.5MW的单机功率叶片长度达50m已不足为奇,甚至朝3.0~5.0MW及叶片长度50m以上的风力发电机迈进。为了达到大叶片轻量化的目的,对复合材料的要求亦愈高。

## 二 复合材料风电叶片发展概况

由于风力发电机叶片的优化设计是一个复杂的系统工程。风力发电机叶片材料有多种生产工艺,有多种因素影响材料的选择,如材料的特性、可靠性、安全性、物理属性及对环境条件的适应性、实用性、报废及回收性能和材料的经济性等。

玻璃钢是一种重要的工程材料,广泛用于风电叶片和小型船舶等行业。由于玻璃钢的废旧产品处理困难,既难以燃烧,又不易分解,属于不可再生材料,因此,应开发出一种新的可回收利用的环保叶片来替代目前大量使用的玻璃钢叶片。

美国人Linscott B.S、Shaltens R.K和Eggers A.G等于1981年12月在新墨西哥州试验了200kW风力发电机Mod-0A的铝制叶片。在使用过程中发现铝制叶片除制造和维护成本较高外,叶片的长期抗疲劳性能较差,不能满足风力发电机连续发电的要求。Gougeon Brothers, Inc(GBI)公司的Gougeon M和Zuteck M等人于1979年开始进行木层积材/环氧复合材料叶片探索性研究,结果发现木层积材/环氧复合材料很好的满足了Mod-0A风力发电机叶片结构要求,随后,美国的NASA又将研制生产DEN3-

101风力发电机叶片的任务交给了GBI公司。公司的第一个Mod-0A风力发电机产品被安装在夏威夷州,在使用过程中发现木层积材/环氧复合材料作为风力发电机叶片具有优异的性能。

当风力达到7~40m/s时,GBI公司生产的花旗松(*Douglas fir*)木层积材/环氧复合材料叶片风力发电机成功产生了平均150kW的电能,叶片安全地运行了18个月(约8000小时),达到预定的材料疲劳性能的要求。研究发现,由于木材的含水率和温度对木材的力学性能有很大的影响,木材含水率增加以及温度升高都对木材的力学性能有不利的影响。例如桦木或花旗松的含水率从10%上升到15%,木材的强度下降了20%。因此,在叶片复合材料中使用环氧树脂能最大限度的降低水分对复合材料力学性能的影响。成功利用木材与环氧复合材料制作叶片,使之能适应不同的外部环境的关键在于加工木单板时将单板干燥的含水率控制在6%左右,并及时用环氧树脂或油漆涂料将木层积材完全密封起来,防止外部环境温度和湿度对木层积材性能产生影响。

在研究中还发现:木材的机械性能具有受热降低、遇冷增加的特点,所以木层积材叶片风力发电机在使用时必须考虑当地的自然环境温度条件。Mod-0A木层积材/环氧复合材料叶片要求的环境温度的上限是120°F(约48.9°C),这样的环境普遍存在于一些沙漠地区。在那里,空气湿度很低,木材的长期平均含水率少于12%,而在美国温暖潮湿的墨西哥湾沿岸各州、夏威夷等地区,木材的含水率大体控制在12%就可以了。

1995年,美国FloWind公司下属的先进叶片制造公司(Advanced Blade Manufacturing)成立,采用木-环氧技术生产AWT-26和AWT-27两种型号的风力发动机叶片。原先ABM公司仅仅利用来自俄勒冈州天然林的高质量等级的花旗松(*Douglas fir*)单板来生产叶片,由于单板成本日益增加、花旗松天然林的日渐减少和保护环境人士的反对,长期生产难以为继。1997年1月,FloWind公司通过Sandia国家实验室获得了美国国家能源部的合同,促使ABM公司改进风力发电机叶片的生产加工过程。Sandia叶片制造项目(BMP)的目标是“促进风力发电机叶片制造的等级化发展、降低叶片成本、改进风力发电机叶片质量和提高可靠性”。

转下页

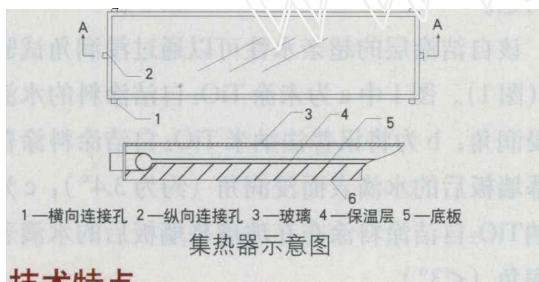
# 一种新型平板式太阳能集热器

■ 欧应成

本产品是采用新型合金材料和特殊结构制造的平板式太阳能集热器。它既可安装成建筑物瓦面和幕墙，也可用于热水工程和家用太阳能热水器，实现了建筑瓦面与散户安装的统一和兼容。

## 一 规格

集热器分为A型B型两种规格。A型：220cm×60cm×8.5cm，主要用于建筑瓦面、热水工程和天台散户式安装；B型：110cm×60cm×8.5cm，主要用于幕墙式太阳能热水系统和家用阳台式太阳能热水器。图为A型结构示意图，把A型的长由220cm改为110cm即为B型。



## 二 技术特点

1 安装时既可横向连通，也可纵向连通，因此，特别适合建筑瓦面、农用太阳房、游泳池水加热和

接上页

桦木层积材/环氧叶片已由丹麦公司研发成功，它采用VARTM方法制作。首先将桦木层积材制成板材，加工成条状斑马木(zebra wood)与玻璃钢共同在模具中成型，关键部位有少量的碳纤维增强。英国等已经用木质复合材料制造叶片并成功投入商业使用。

## 三 发展我国的风机叶片制造业

我国最初的风电叶片以木材为原料，可称为第一代叶片材料。80年代发展的GFRP和桦木层积材叶片为第二代叶片材料，以改性方法制作的先进生物质复合材料为第三代叶片材料，这种复合材料具有性能好、废旧产品易于处理以及刚度高、稳定性好、低温阻尼好、成本低，适合于大型叶片等优点。从工艺上看，由于竹材的用量高达50~70%，环氧树脂用量少，避免了固化过程的过热反应，材料的

热水工程等使用。在建筑瓦面安装时，集热器可附加导水槽，即导水槽可作为一种建筑构件配套生产。

2 直接传热面积比目前铜铝复合式太阳能集热器大得多，用这两种集热器组装成的太阳能热水器在同等条件下进行实验对比，其得热量比铜铝复合式高8%。需要说明的是，由于条件所限，这个数据是在该集热器采用非选择性吸收涂层的情况下得到的，如果它采用吸热性能优良的选择性吸收涂层，用它组装成的太阳能热水器得热量会更高。

3 主体框架采用抗氢化合金金属材料制作，并且使用导热油二次换热，不但解决了太阳能热水器的防冻问题，也有利保护金属内表面，使用寿命可达50年以上，这与建筑物的寿命相近。

4 生产过程不需要焊接工序，这既保证了产品密封性和一致性，也有利自动化和流水线生产。

5 连接头采用特殊专用连接部件，保证连接牢固，密封性能优异，耐老化，安全不漏水。

这种产品有利于推进太阳能与建筑相结合的普及化应用。最佳推广方法是将其做成散件，供国内外太阳能热水器企业组装成品，这不但有利于标准统一和专业化生产，同时有利产品运输。

电话：0758-8633999 13005569335

收缩小。与GFRP叶片相比较，减少了加工时间，更具有市场竞争力。

面对我国日益严峻的能源与环境问题，发展可再生能源，促进可持续发展，大力发展风能产业是重要选择，可以预见未来将会大规模生产风机叶片。研制具有我国自主知识产权的风机叶片，是发展我国风电技术，使之达到世界先进水平的关键之一，开发新一代的生物质复合材料风机叶片将成为一个重要的研究方向。

### 参考文献

- (1) 江泽慧, 孙正军, 任海青. 先进生物质复合材料在风电叶片中的应用. 复合材料学报, 2006, 26(3):127~129
- (2) 董永棋. 国外风力发电机FRP叶片近况. 纤维复合材料, 2001, (3):46~49
- (3) 邱冠雄, 刘良森, 姜亚明. 纺织复合材料与风力发电. 纺织导报, 2006,(5): 56~61
- (4) 叶枝全, 黄继雄, 陈严等. 风力机新系列翼型的气动性能研究. 太阳能学报, 2002(2)