

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.04.029

风电叶片复合材料的研究进展及其应用

常燕¹,王兆增¹,崔元胜²,安运成¹,徐秋红¹,仪海霞¹,高阳峰¹,聂锡铭³

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031; 2. 空军驻山东地区军事代表室,济南 250023;

3. 北方材料科学与工程研究院产业园,济南 250031)

摘要:概述了热固性风电叶片复合材料及其制造工艺的研究进展。针对目前传统材料制备的风电叶片退役后处理起来比较困难,给环境造成了不良影响的情况,着重介绍了可回收利用的热塑性复合材料和生物质复合材料的研究进展。简要介绍了以碳纳米管为增强相的新型风电叶片复合材料的研究进展。

关键词:热固性复合材料;热塑性复合材料;生物质复合材料;碳纳米管

中图分类号:TQ327.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2014)04-0135-05

Research Progress and Application of Wind Turbine Blades Composites

Chang Yan¹, Wang Zhaozeng¹, Cui Yuansheng², An Yuncheng¹, Xu Qiuhong¹, Yi Haixia¹, Gao Yangfeng¹, Nie Ximing³

(1. CNGC Institute 53, Jinan 250031, China; 2. Military Representative Office of PLA Air Force in Shandong Region, Jinan 250023, China;

3. Industrial Garden of China North Material Science and Engineering Technology Group Corporation, Jinan 250031, China)

Abstract : The research progress of thermosetting composites for wind turbine blades and their manufacturing process were reviewed. According to the present status that the retired blades prepared by traditional materials are difficulty to deal with and it has negative effects on environment in future, the research progress of thermoplastic composites and bio-composites which can be recycled were focused. The research progress in carbon nanotube reinforcing new type composite materials of the wind turbine blades was discussed.

Keywords : thermosetting composite ; thermoplastic composite ; bio-composite ; carbon nanotube

风能发电的装置称为风力发电机组,它是由风电叶片、传动系统、发电机、储能设备、塔架及电器系统等组成。其中的风电叶片是风力发电机组的关键部件,要获得较大的风力发电功率,其关键在于要具有能快速旋转的叶片,故风电叶片被视为风力发电系统的关键技术和技术水平代表。

1 热固性风电叶片复合材料及其制造工艺

1.1 热固性复合材料

早期的风电叶片一般采用木材制备,随后出现了金属蒙皮叶片、布蒙皮叶片、铝合金叶片等。随着联网型风力发电机的出现,风力发电进入高速发展时期,日益大型化的风力发电机越来越多,传统材料的叶片在使用时某些性能已达不到要求,于是具有高比强度的复合材料叶片发展起来。目前,几乎所有的叶片均采用复合材料为主体制造,风电叶片使用复合材料具有下列优点^[1]:可根据风电叶片的受力特点设计强度与刚度;翼型容易成型,并达到最大气动效率;抗振性好,自振频率可自行设计;耐疲劳度较高;耐腐蚀性和耐气候性好;维修简便,易于修补。

复合材料的强度很大一部分依赖于增强纤维的强度,增强纤维的发展决定着复合材料的发展。风电叶片复合材

料发展之初,常使用的增强材料是 E- 玻璃纤维 (GF),但随着风电产业的发展和叶片长度的不断增大,这种 E-GF 在某些场合已不能满足要求,故更高性能的纤维进入叶片生产者的视野,如 S-GF, R-GF 和碳纤维 (CF) 等。其中,CF 是比 GF 性能更优异的风电增强材料,在大型风电叶片制造中,由于 GF 逐渐凸显出性能方面的不足,CF 因其优异的性能成为设计者的重要选择,但是 CF 的成本远远高于 GF。

生产风电叶片复合材料用 GF 的公司有:欧文斯科宁、AGY 公司、PPG 工业公司、佳斯迈公司等。2006 年,欧文斯科宁公司^[2]制备的 Wind Strand TM GF 在拉伸和压缩载荷下具有优异的疲劳性能,且耐热性和耐腐蚀性比 E-GF 好,在制备同样设计的风电叶片复合材料时, Wind Strand TM GF 与 E-GF 相比,可减轻 10% 的质量,从而提高发电量 12%,而与 CF/GF 混杂叶片相比,它能节省制造成本 20%。该公司^[3]还在我国推出全新 Ultrablade 高性能织物,与传统的织物相比,该织物与环氧树脂 (EP) 复合后制得的复合材

联系人:常燕,硕士,工程师,主要从事风电复合材料研制和应用工作

收稿日期:2014-01-22

料风电叶片具有长度更长、更轻、刚度更高的优点。生产风电叶片复合材料用CF的公司主要有Zoltek公司,该公司^[2]的Panex 33(48K)和Panex 35(50K)大丝束CF具有良好的抗疲劳性能,已在风电叶片复合材料中得到广泛应用。

在树脂基体方面,目前,风电叶片复合材料市场上使用的大多是热固性树脂基体。热固性树脂的优点是固化温度低、黏度低。最早使用在风电叶片复合材料上的热固性树脂是聚酯树脂,聚酯树脂价格低廉,成型工艺性好,但固化时收缩率大、放热剧烈,成型时会有一定的气味和毒性,且性能一般。随着叶片向大型化发展,EP替代了聚酯树脂,并逐渐成为风电叶片复合材料上最常用的树脂基体。EP价格较高、工艺操作性不好,但是拉伸强度和弯曲强度高。EP制备的复合材料与聚酯树脂制备的复合材料相比,疲劳性能要好,制备过程更环保,但是价格也更高。乙烯基酯的性能和价格一般在聚酯树脂和EP之间。

国外风电行业发展时间长,很多大型风电叶片复合材料用EP都是由国外公司生产,生产风电叶片复合材料用EP较知名的国外公司^[4]有瀚森、亨斯曼、陶氏、巴斯夫等。巴斯夫^[5]最近研发出了制造大型风电叶片复合材料的EP体系,该体系能够减少固化时间从而大大缩短成型周期(约30%)。

我国的风电产业起步较晚,最近几年发展较快,已经有一些院校和企业制备出了风电叶片复合材料用EP。赵伟超等^[6]分别用BH-1、2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚(DMP-30)和2-乙基-4-甲基咪唑(2,4-EMI)3种促进剂促进EP/酸酐固化体系,其中,BH-1为促进剂的EP/酸酐体系具有很好的韧性和综合力学性能,其最大拉伸强度超过80 MPa,他们还分别以这3种EP作为基体树脂制备了具有优异性能的GF增强复合材料。周百能等^[4]研制的DQ200E系列EP,具有黏度低、工艺操作性好、力学性能良好、耐疲劳性优异的特点,适用于真空灌注成型复合材料,并成功地应用在1.5 MW风电叶片上。任六波等^[7]也研制出了真空灌注成型用的低黏度EP体系,该体系对GF的浸润性好,且力学性能和热性能良好。巴陵石化^[8]自2003年开始进行风电叶片复合材料用EP的探索性研究,最终开发出了用于风电叶片复合材料的低黏度双酚FEP,经过七八年改进,该EP可与进口产品性能相媲美。

1.2 成型工艺

风电叶片复合材料发展之初,其制造工艺采用手糊成型。由于环境条件的差异及工人技术熟练程度的不同,手糊工艺生产风电叶片复合材料存在着生产效率低,产品质量均一性不好,产品的动静平衡保证性差,废品率较高等缺点^[9]。

随着成型工艺技术的发展,多种先进的工艺被开发出来,如预浸料工艺、机械浸渍工艺、树脂传递模塑(RTM)工

艺及真空灌注工艺(VARIM)。其中的RTM工艺为闭模生产工艺,高质量风电叶片复合材料成型采用RTM工艺,RTM工艺的具体过程为:首先将增强材料预成型体放入到模具型腔中,用注射设备将低黏度树脂体系注入型腔,由于模具周边是密封的,且模具上设计有注射及排气系统,故型腔内的树脂流动顺畅并排出型腔内的气体以彻底浸润纤维,最后由模具的加热系统使树脂等加热固化成型。在RTM工艺中,树脂基体在压力的作用下,可以更完全的浸渍增强材料,该工艺不仅能够准确地控制树脂含量,充分发挥增强材料的作用,提高风电叶片复合材料的承载能力,而且无需大型专用设备,制造成本较低,污染小,可以一次性整体成型,适用于中小尺寸风电叶片的制备。

VARIM工艺的具体过程为:先将纤维等增强材料铺设到模具上,再铺上低渗透率和低孔隙率的剥离层,然后剥离层上铺放高渗透介质,最后铺上具有密封功能的真空辅助系列,在抽真空后的负压下导入树脂,树脂浸透增强材料并固化成型。该成型工艺,对树脂黏度有严格的要求,一般应控制在 $300 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以下,另外,树脂黏度还影响浸胶速率,黏度越低,树脂流动性越好,浸胶速率也就越高。该成型工艺有机挥发物少,产品质量稳定性好,制造的产品强度比手糊工艺强度高,模具成本比RTM工艺低,适用于大尺寸风电叶片的制备。我国兆瓦级的大型风电叶片大都采用此工艺制备。

2 绿色环保风电叶片复合材料

采用热固性树脂生产的风电叶片既难以燃烧,又很难降解,故退役后的风电叶片大多采用露天堆放处理,占用了大量的土地,且随着风电叶片尺寸的增大和数量的增加,这些叶片退役后易污染环境。因此,面对风电叶片复合材料废弃物对环境造成的危害,一些风电叶片制造商及科研人员开始研究用低成本、可回收利用的绿色环保复合材料来替代目前大量使用的热固性复合材料。目前,较常见的绿色环保复合材料有热塑性复合材料和生物质复合材料。

2.1 热塑性复合材料

一般情况下,与热固性复合材料相比,热塑性复合材料有很多优点,如可重新回收利用,生产周期短,生产效率高,耐腐蚀性强,比强度和比刚度高,耐冲击性能好,环保性好等优点^[10-11],在尺寸相同的情况下,因热塑性复合材料的密度低,叶片更轻,故运输和安装成本也相应地降低。有些热塑性树脂的成本比传统热固性树脂的成本低,如果风电叶片改用热塑性复合材料,原材料的成本也相应降低。

与热固性复合材料相比,热塑性复合材料也有一些缺点:常见的高性能的热塑性树脂如聚醚醚酮(PEEK)、聚醚酰亚胺(PEI)、聚酰胺(PA)和聚丙烯(PP)等,熔融黏度较高($10^2 \sim 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$),为了确保树脂能充分地渗透到连续的长纤

维中,需要较高的加工温度和固化压力,故制备热塑性复合材料的能耗较高,制造成本也较高;由于固化时树脂收缩产生的界面粘接是机械性的粘接,而非化学性的粘接,故热塑性复合材料的疲劳性能差。为了改善疲劳性能,可以加入偶联剂来增强基体与纤维之间的界面粘接力,但是效果甚微。

在传统的热塑性复合材料制备方法——熔融浸渍法中,纤维很难浸润,热塑性树脂熔融需要较高的温度和压力,一般只用于加工一些小的部件(长度在1~2 m,厚度在1~5 mm)^[12],不适合制备风电叶片结构中用到的较长和较厚的大型复合材料,但是,只要是基体(如低黏度树脂)和制备工艺(如真空灌注法)选择合适,用热塑性树脂制备出大型风电叶片复合材料是可以的。目前,真空灌注成型是生产大型热固性复合材料的常用制备方法,但是,此制备方法所用的树脂基体黏度低,而大多数热塑性树脂基体黏度很高,为了利用真空灌注法制备大型热塑性复合材料,研究者们开始寻找低黏度的热塑性树脂,K. V. Rijswijk等^[13-14]开发出的一种低黏度的热塑性PA树脂——阴离子PA6(APA6),它的灌注黏度只有10 mPa·s,比传统的热固性树脂还要低10~100倍。他们用APA6真空灌注纤维制备出了热塑性复合材料,它不仅具有通常的热塑性复合材料的优点,还克服了热塑性复合材料的缺点——耐疲劳性差,耐疲劳性改善的主要原因是由于界面反应发生导致的界面粘接强度提高。他们把APA6, PA6(传统热压法制备)与EP真空灌注GF布层合板制备复合材料进行了对比,结果表明,APA6复合材料的拉伸、压缩和剪切性能高于其它两种复合材料,而其疲劳性能在PA6复合材料和EP复合材料之间。

Yan Chun^[15]等制备APA6/GF复合材料,其拉伸强度和弯曲强度分别为434 MPa和407 MPa,他们还对该复合材料进行了扫描电子显微镜(SEM)分析。结果表明,拉伸断裂面出现的纳米纤维晶体是改进树脂基体力学性能的原因。

美国的Cyclics公司出售的一种低黏度的热塑性工程塑料基体材料——对苯二甲酸丁二酯(CBT)树脂,该树脂最早由通用公司在20世纪80年代末期研究开发出来,这种CBT树脂黏度低,流动性好,容易浸渍增强材料,该树脂制备的复合材料具有良好的韧性。利用此CBT树脂,不仅可以提高叶片的抗冲击能力,还可以大幅度提高成型速度,具有技术和经济上的优势^[16]。还有一种低黏度的树脂——阴离子聚内酰胺-12(APLC-12)被开发出来,它是PA12的前驱体,能成功浸透高体积分数的纤维^[17]。

2.2 生物质复合材料

目前,生物质复合材料已成功用于汽车、航空、建筑、包装和风电等领域。天然纤维根据来源可以分为3类,分别是植物纤维、动物纤维和矿物纤维。在天然纤维中,研究较多

的是植物纤维,植物纤维的力学性能不如CF,但一些天然纤维的力学性能可以和GF媲美。天然植物纤维与合成纤维(特别是GF)相比低成本、低密度、高比强度、高韧性、低耗能、可降解、来源丰富等优点。天然植物纤维也有一些缺点,由于亲水性的植物纤维与憎水性的聚合物基体之间的界面能差大,界面间很难充分熔合,造成复合材料力学性能不高。亚麻、大麻、黄麻、稻草、木材等多种植物纤维已用于制备复合材料^[18-20]。

风电叶片使用生物质复合材料有以下优点^[21]:刚度高、稳定性好、低温阻尼好、成本低、可再生性好,且废旧产品易处理,适合于大型叶片。木质纤维复合材料用于风电叶片在国内外所做的研究也很多。在我国,常用作木质纤维复合材料的木材是来源广泛的杉木和竹子。

杉木具有密度低、强度高和模量高的特点,比较适合作为复合材料的增强相;由杉木层积材研制的风电叶片生物质复合材料力学和加工性能好,价格低,应用前景好。为了更好地指导风电叶片的生产,陈玲等^[22]对杉木薄板的浸渍量进行研究,他们用采自湖南省绥宁县寨市林场的杉木(树龄在40年以上、直径在30 cm以上)制成的杉木薄板分别浸入到固含量为20%和30%的EP中,测试不同浸渍时间下的浸渍量。随着时间的增加,混合浸渍胶进入到薄板内部的浸渍量也增加;杉木薄板的树脂浸渍量的大小与EP混合浸渍胶固含量的大小有关,在相同浸渍时间内,杉木薄板在30%固含量的EP混合浸渍胶中的树脂浸渍量要高;推荐可供选择的浸渍胶固含量和浸渍时间分别30%和30 min。另外,黄晓东等^[23]根据弯曲弹性模量(E_w)的大小,将该杉木分成三个等级($E_w < 10\,000$ MPa为三级, $10\,000 \text{ MPa} \leq E_w \leq 12\,000$ MPa为二级, $E_w > 12\,000$ MPa为一级),并分别以3个等级的杉木为原料制备薄板层积材,后利用万能力学试验机检测。表明,由一、二级杉木制成的风电叶片复合材料,略高于其它材料(如桦木)制成的木材/环氧层积材,但是沿木纹方向的平均拉伸强度、平均压缩强度、拉伸弹性模量、剪切强度,均达到或超过目前国外风电叶片正在使用的常规无接头木材/EP层积材的特性。他们^[24]还指出因为杉木顺纹方向力学性能好,故为了有效地抵抗风电叶片的弯曲载荷,应按其木纹平行于叶片轴向安装。

因竹子来源广泛,且强度和硬度高,韧性好,也适合作为复合材料的增强相。黄晓东等^[25]将采自浙江省新昌县的毛竹作为风电叶片复合材料的增强相,利用动态热机械分析仪进行全面的分析测试,实验证明,5~6年生的毛竹竹青部分具有优良的物理力学性能(低温存储模量为10 GPa左右),一般可以作为风电叶片复合材料的增强相使用。祝荣先等^[26]以四川大邑地区3~4年生慈竹为主要原料,采用热

压法生产工艺,研制风电叶片用竹基纤维复合材料,结果表明:密度在 $1.08 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$ 区间时,竹基纤维复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、比刚度、压缩强度、压缩比强度、压缩弹性模量,均随密度的增大而提高,与一般的 GF 和 CF 复合材料相比,竹基纤维复合材料的比刚度和压缩比模量值介于两者之间。

D. U. Shah 等^[27]认为,小型植物纤维风力发电叶片经过设计可以具有良好的抗疲劳载荷性,这种叶片寿命可达 20 a。他们还对亚麻纤维复合材料叶片替代 E-GF 复合材料叶片的可行性进行研究^[28],分别以亚麻纤维和 E-GF 为原材料,采用 RTM 工艺,制备了同等构造的小型复合材料叶片(长度为 3.5 m,功率为 11 kW),并对两种不同材质的叶片进行了对比。结果表明,在两种叶片中,纤维的体积分数几乎相同,亚麻叶片的质量要比 E-GF 叶片轻 10%;通过叶片的静态弯曲测试,在正常操作载荷和最坏载荷情况下,E-GF 叶片和亚麻纤维叶片都满足了设计和结构整体性的需要;经测试,亚麻纤维叶片和 E-GF 叶片的平均抗弯刚度分别为 24.6 和 43.4 $\text{kN} \cdot \text{m}^2$,可以通过改善叶片设计增强亚麻叶片的刚度;亚麻叶片和 E-GF 叶片的失效方式不同,且亚麻叶片的破坏载荷和相应的叶尖挠度分别为 4.14 kN 和 2300 mm;制备的亚麻纤维叶片的成本是 E-GF 的 8 倍,随着亚麻纤维市场的发展,亚麻纤维的成本也将降低。可见,在小型风电叶片上,亚麻纤维有望成为 E-GF 良好的替代品。

我国的一些公司已经制造出了竹质生物质复合材料叶片。2010 年,山东世纪威能^[29]生产出国内第一支 40.3 m,1.5 MW 竹质复合材料风电叶片,该叶片通过了动载荷及静载荷试验,且已经通过我国新能源领域的权威认证,各项指标达到国际标准。2010 年底,连云港中复连众复合材料集团有限公司^[30]也生产出 1.5 MW 竹纤维复合材料风电叶片。杭州大庄集团^[29]已研制出了以我国天然慈竹为增强相的复合材料风电叶片,使用该竹质复合材料叶片的风电机组已在河北张北县成功安装,同时实现并网发电,竹质复合材料风电叶片的发展已经开始了市场化进程。

3 新型风电叶片复合材料

碳纳米管(CNTs)具有极其优越的性能:强度和刚度特别高,弹性模量超过 1 TPa^[31],拉伸强度达到了 200 GPa^[32]。这些性能可使其作为理想风电叶片复合材料的增强相。

CNTs 可以增强风电用热固性 EP 的拉伸性能、疲劳性能和断裂韧性^[33-34],且随着 CNTs 加入量的不同,所制备复合材料的力学性能也不同。张昊等^[35]以酸化后的多壁 CNTs 为原料,用超声分散法和模具浇注成型法制备了 EP/CNTs 复合材料,研究了 CNTs 的含量对 EP/CNTs 复合材料力学性能的影响,结果表明,随着 CNTs 含量的增加,EP/

CNTs 复合材料的拉伸强度、弯曲强度及弯曲弹性模量先增加后减小;当 CNTs 的质量分数为 0.5% 时,复合材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量分别达到最大值 69.8 MPa,136.9 MPa 和 3.72 GPa,比纯 EP 提高了 33.9%,29.3% 和 4.8%;当 CNTs 的质量分数为 1.5% 时,拉伸弹性模量达到最大值 2050.5 MPa,比纯 EP 提高了 7.3%。Yang Yingkui 等^[36]利用 2,2'-亚乙二氧基-二乙胺改性剂对多壁 CNTs 进行氨基功能化改性,改性后的多壁碳纳米管在 EP 中分散良好,且质量分数 0.5% 的改性多壁 CNTs 可将纯 EP 的拉伸弹性模量、储能模量、拉伸强度、破坏应变和韧性分别提高 28.4%,23.8%,22.9%,24.1% 和 66.1%。徐洪军等^[37]先用浓硫酸和硝酸混合液将 CNTs 纯化,然后用有机胺对 CNTs 进行共价功能化,最后用共价功能化后的 CNTs,EP 低聚物和固化剂制备出 EP/CNTs 复合材料。结果表明,加入质量分数为 1% 功能化的 CNTs 制备 EP 复合材料,可使 EP 的断裂韧性提高 35%。

王静荣等^[38]首先对 CNTs 进行酸改性,然后分别用溶液共混法和原位聚合法制备了聚氨酯(PUR)/CNTs 复合材料,与纯的 PUR 材料相比,这两种方法制备的 PUR/CNTs 复合材料的拉伸强度都有所提高,其中,溶液共混法制备的复合材料拉伸强度提高了 8.8%,原位聚合法制备的复合材料拉伸强度提高了 17.3%。姜宪凯等^[39]利用 CNTs 通过原位聚合法制备了 PUR/CNTs 复合材料,对比了未酸化和酸化后的 CNTs 对改善 PUR 材料力学性能的不同影响。结果表明,与纯 PUR 材料相比,CNTs 的加入可以增强 PUR 材料的拉伸强度,经过酸化的 CNTs 使 PUR 材料的拉伸强度增加得更明显。M. R. Loos 等^[40]还用嵌断共聚物改性 CNTs 制备了 PUR 复合材料。CNTs 的引入增强了 PUR 在高应力幅和周期短条件下的疲劳性能,比不加 CNTs 的纯 PUR 增加到 248%,与 EP 和 EP/CNTs 相比,PUR 体系的拉-拉疲劳性能高,可见 PUR 体系用于风电叶片复合材料应该具有很大优势。用 SEM 研究断裂表面,进一步证明疲劳寿命的增加由于 CNTs 的拔出和断裂表面的裂纹桥联。

美国科学家^[41]已成功制造了 CNTs 增强 PUR 风电叶片,该风电叶片与传统 GF 增强 EP 风电叶片相比,具有质轻、强度大、耐久性好等特点,且已安装在 1 台涡轮风机上进行测试,该 CNTs 增强 PUR 复合材料单位体积的质量轻于 CF 增强复合材料,而其拉伸强度是 CF 增强复合材料的 5 倍。该叶片的寿命及断裂韧性都优于 EP/GF 风电叶片。拜耳材料科技公司^[42]正在探讨用 CNTs 增强 PUR 复合材料来制造 1.5 MW 以上的风电叶片,该 CNTs 增强 PUR 体系可提高比强度 1.5 倍之多。

另外一种有价值的增强材料就是石墨烯^[43],且与 CNTs

作为增强相的复合材料相比,以其作为增强相的复合材料性能更优越,有望用于制备风电叶片。

4 结语

随着风电技术的进步,风电叶片复合材料在材料体系和成型工艺上都有了很大的进展。随着风电叶片越来越大和轻量化,CF因其高弹轻质的优点,将成为制备大型风电叶片的重要材料;热塑性复合材料和生物质复合材料必将成为未来风电叶片用复合材料的发展趋势,但是这两种绿色环保叶片的制备技术还不成熟,其性能还有待进一步研究提高;CNTs因其十分优异的性能,有望成为制备大型风电叶片的另一重要材料,但是,CNTs在树脂中极易产生团聚,这对复合材料的性能有很大影响,故必需找出一种好的方法对CNTs的分散性进行改进。

参考文献

- [1] 李祖华. 高科技纤维与应用,2008,33(3):30-35.
Li Zuhua. Hi-Tech Fiber & Application,2008,33(3):30-35.
- [2] 叶鼎铨. 玻璃纤维,2009(1):33-39.
Ye Dingquan. Fiber Glass,2009(1):33-39.
- [3] 钱伯章. 合成纤维,2011(1):54.
Qian Bozhang. Synthetic Fiber in China,2011(1):54.
- [4] 周百能,等. 东方电气评论,2012,26(2):62-67.
Zhou Baineng, et al. Dongfang Electric Review,2012,26(2):62-67.
- [5] 佚名. 热固性树脂,2009,24(4):54.
Anon. Thermosetting Resin,2009,24(4):54.
- [6] 赵伟超,等. 中国胶粘剂,2010,19(2):1-3.
Zhao Weichao, et al. China Adhesive,2010,19(2):1-3.
- [7] 任六波. 玻璃钢/复合材料,2012(3):51-54.
Ren Liubo. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2012(3):51-54.
- [8] 佚名. 玻璃钢/复合材料,2012(3):104.
Anony. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2012(3):104.
- [9] 王炳雷,等. 工程塑料应用,2008,36(4):76-79.
Wang Binglei, et al. Engineering Plastics Application,2008,36(4):76-79.
- [10] 牟书香,等. 新材料产业,2011(11):1-5.
Mu Shuxiang, et al. Advanced Materials Industry,2011(11):1-5.
- [11] 董永祺. 玻璃钢,2013(1):32-36.
Dong Yongqi. Fiber Reinforced Plastics,2013(1):32-36.
- [12] Joncas S. Thermoplastic composite wind turbine blades[D]. Delft:Technische Universiteit Delft,2010.
- [13] Rijswijk K V. Thermoplastic composite wind turbine blades-vacuum infusion technology for anionic polyamide-6 composites [D]. Delft:Technische Universiteit Delft,2007:131-151.
- [14] Rijswijk K V, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2009,40(1):1-10.
- [15] Yan Chun, et al. Materials & Design,2013,46:688-695.
- [16] 张晓明. 纤维复合材料,2006(2):60-63.
Zhang Xiaoming. Fiber Composites,2006(2):60-63.
- [17] Zingraff L, et al. Composites:Part A,2005,36(12):1 675-1 686.
- [18] Ausias G, et al. Polymer Degradation and Stability,2013,98(6):1 216-1 224.
- [19] Le Duigou A, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2013,48:121-128.
- [20] Scida D, et al. Composites Part B:Engineering,2013,48:51-58.
- [21] 江泽慧,等. 复合材料学报,2006,23(3):127-129.
Jiang Zehui, et al. Acta Materiae Compositae Sinica,2006,23(3):127-129.
- [22] 陈玲,等. 中国木材,2008(1):28-29,34.
Chen Ling, et al. China Timber,2008(1):28-29,34.
- [23] 黄晓东,等. 太阳能,2008(5):38-40.
Huang Xiaodong, et al. Solar Energy,2008(5):38-40.
- [24] 黄晓东,等. 木材工业,2009,23(1):24-27.
Huang Xiaodong, et al. China Wood Industry,2009,23(1):24-27.
- [25] 黄晓东,等. 世界竹藤通讯,2008,6(3):6-9.
Huang Xiaodong, et al. World Bamboo and Rattan,2008,6(3):6-9.
- [26] 祝荣先,等. 木材工业,2012,26(3):7-10.
Zhu Rongxian, et al. China Wood Industry,2012,26(3):7-10.
- [27] Shah D U, et al. JEC Composites Magazine,2012,73:4-51.
- [28] Shah D U, et al. Composites Part B:Engineering,2013,52:172-181.
- [29] 陈晨. 中国科技财富,2011(11):60.
Chen Chen. Fortune World,2011(11):60.
- [30] 中复连众.[2010-12-22].http://www.lzfrp.com/news_content.asp?articleid=752.2010.
Zhong Fulianzhong.[2010-12-22].http://www.lzfrp.com/news_content.asp?articleid=752.2010.
- [31] Wong Eric W, et al. Science,1997,277:1 971-1 975.
- [32] Lau A K, et al. Composites Part B:Engineering,2002,33:263-277.
- [33] Yang Jingting, et al. Polymer Composites,2012,33(3):412-419.
- [34] Loos M R, et al. Polymer Engineering and Science,2012,52(9):1 882-1 887.
- [35] 张昊,等. 北京化工大学学报:自然科学版,2011,38(1):62-67.
Zhang Hao, et al. Journal of Beijing University of Chemical Technology:Natural Science,2011,38(1):62-67.
- [36] Yang Yingkui, et al. Nanotechnology,2012,23(22):225 701.
- [37] 徐洪军,等. 弹性体,2012,22(1):38-41.
Xu Hongjun, et al. China Elastomerics,2012,22(1):38-41.
- [38] 王静荣,等. 合成橡胶工业,2009,32(5):391-394.
Wang Jingrong, et al. China Synthetic Rubber Industry,2009,32(5):391-394.
- [39] 姜宪凯,等. 黑龙江大学自然科学学报,2009,26(6):790-794.
Jiang Xiankai, et al. Journal of Natural Science of Hei Longjiang University,2009,26(6):790-794.
- [40] Loos M R, et al. Composites Part B:Engineering,2013,44(1):740-744.
- [41] 佚名. 军民两用技术与产品,2011(10):29.
Anonymity. Dual Use Technologies & Products,2011(10):29.
- [42] 叶鼎铨. 高科技纤维与应用,2010,35(3):60.
Ye Dingquan. Hi-Tech Fiber & Application,2010,35(3):60.
- [43] Anon. Additives for Polymers,2010(6):10-11.