

35米风电叶片成本分析：灌注工艺和预浸料工艺对比

1. 简介

由于先进复合材料具有性能高和可设计性好等特点，常被用于制造风电叶片等大型结构件。近年来，随着叶片尺寸的增大和叶片产量的增加，材料和制造方式的选择变得尤为重要。在风电行业迅速发展的背景下，为了满足产量、性能和品质要求，两种材料技术的优势日益凸现：预浸料技术和真空灌注技术。

这两种技术目前已十分成熟，而且在风电叶片的制造中应用广泛。然而，随着MW级大型风机的不断研发，叶片尺寸也在一直增大，进而对叶片材料和工艺提出了更严苛的要求。面对如此活跃的市场，业界关于哪种技术最适合制作大叶片的讨论正在变得更加激烈。

材料技术的选择是个很复杂的问题，它关系到整个供应链。本章将建立一个35m叶片模型，对技术选择有较大影响的各种因素逐一对比分析。

1.1 复合材料工艺技术

大部分采用灌注技术的叶片制造商都使用环氧树脂作为基体材料，少数选用不饱和聚酯。预浸料技术则全部使用环氧树脂。本节首先回顾一下两种工艺的基本概念。

1.1.1 灌注工艺

基本上，灌注工艺是指利用真空将树脂导入干的增强纤维，在纤维铺层的一端抽真空形成负压，树脂从另一端开始灌注，灌注的速度和距离取决于以下因素：

树脂粘度	η
纤维铺层的渗透性	D
树脂受到的压力差	ΔP

它们与灌注速度 v 的关系可以简单地用下式表述：

$$v \propto \frac{D \times \Delta P}{\eta}$$

灌注速度随着铺层渗透性和压力差的增大而增加，随着树脂粘度的增加而减小。

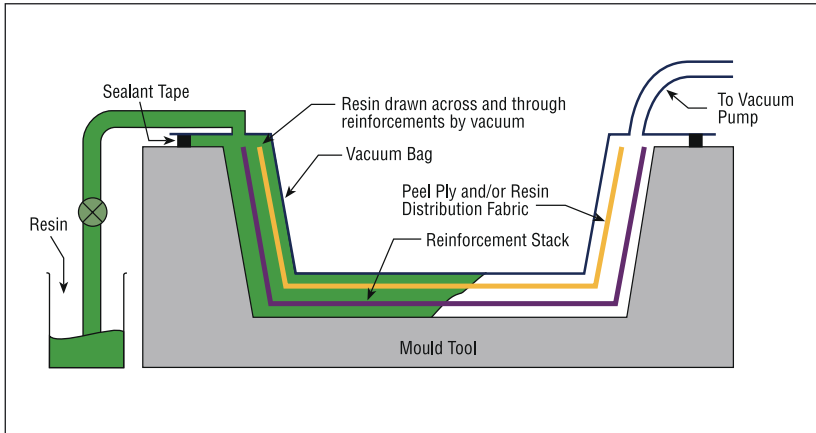


图 1 - 灌注工艺示意图

灌注工艺对树脂低粘度的要求可以用标准的液态环氧树脂或不饱和聚酯去满足。一旦纤维铺层被树脂浸润，将温度升至 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$ ，以加速完成固化进程。

1.1.2 预浸料技术

预浸料Prepreg是“pre impregnation”的缩写，指的是纤维束或纤维布经过树脂浸润后形成的均匀预固化材料，预固化材料可直接用于复合材料结构如风电叶片的制造。预浸料树脂通常粘度较高，在室温下呈固态，便于操作、切割和在模具中铺层，且不需要导入树脂，减小树脂污染。在模具中铺层完成后，预浸料即可在真空下高温固化，工业用预浸料固化温度通常为 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ 之间。

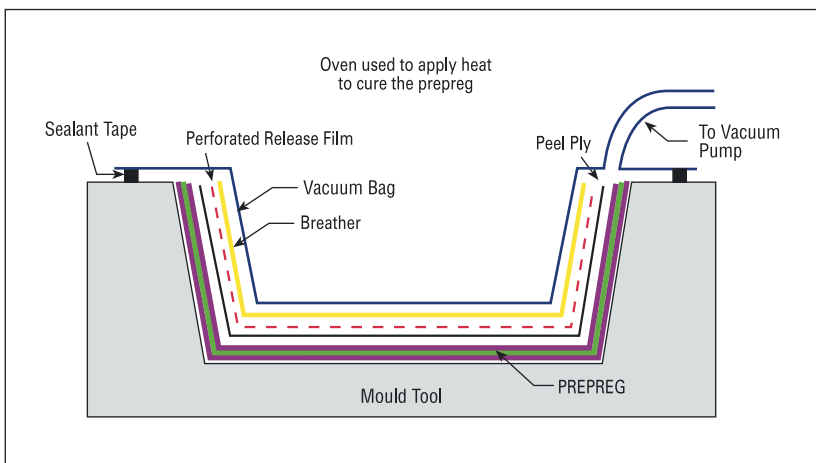


图 2 - 预浸料工艺示意图

预浸料通常以卷状形式供应，与灌注和手糊工艺相比，预浸料树脂含量控制准确，树脂性能优异，单向纤维排布方向可控性好且自动化程度高。然而，由于使用高性能树脂，预浸料的储存和运输均需要低温环境；此外，额外的预浸工艺使预浸料比相同重量的树脂加纤维价格昂贵许多，预浸料对工艺温度提出的更高要求也增加了模具成本。但是，预浸料工艺具有良好的稳定性和可重复性，自动化程度高，力学性能好，以及良好的碳纤维适用性等优点（碳纤维的灌注难度相对较大）。

2. 模型机理

本章建立了一个叶片模型，对两种制造技术进行了财务成本分析。模型中使用了很多假设，因此更适合于定性分析。然而，从财务角度切入该模型，更容易使读者对其中的关键因素以及这些因素对叶片成本的影响有清晰的认识。遗憾的是，建立的模型仅对叶片制造作了重点剖析，并未考虑到叶片的服役寿命和整体性能，而这些恰恰对叶片寿命期内的总体成本有决定性的影响。

模型的构建分为以下几个步骤：

- 基于1级载荷及固定的叶尖偏移进行35m叶片的几何结构设计
- 为预浸料和灌注设计建立了材料用量表
- 依据梁和叶壳的详细制造流程，确定叶片制造所需的直接劳动力数量
- 基于4套模具的产量确定每年的间接劳动力数量和一般管理费用
- 确定工厂的资本性支出和年折旧
- 确定模具的资本性支出和年折旧
- 对工厂年产出进行财务分析：叶片成本、利润、资产周转率、资产总收益率

下面将分别对各个步骤详细阐述，包括假设以及对比结果。

3. 叶片结构设计

3.1 概况

叶片模型基于由叶壳和盒式大梁组成的35m叶片建立，叶片未预弯。盒式大梁为基本承载结构单元，包括两个单轴向梁盖和双轴向夹芯剪切腹板。叶片根部镶嵌在盒式大梁内。

盒式大梁支撑两个空气动力学半叶壳，两个半叶壳在前后翼缘粘成一个完整的叶片翼形。

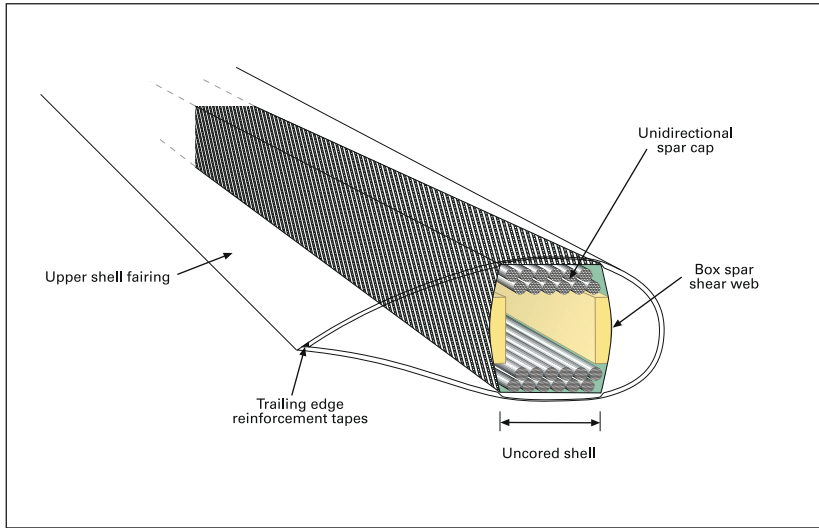


图3 - 叶片结构

3.2 叶片材料

叶片构造基本如上述设计，不同工艺材料选择如下：

- E- 玻纤盒式梁和叶壳，灌注成型
- E- 玻纤盒式梁和叶壳，预浸料成型

3.3 力学要求

此次对比研究以不同工艺的叶片具有相同的刚性为基础，因为刚性是对这种尺寸级别的叶片进行结构设计的依据，尤其是对翼面向的刚性要求更为严苛，以防止叶尖撞到塔架，同时防止叶片的固有弯曲频率接近叶片旋转频率而产生共振。

本研究中选择的相对于塔架的翼面向叶尖偏移值需满足两种成型工艺的设计要求，而且需确保叶片设计强度满足甚至超过最低失效强度要求，因此，刚性设计值远高于其中任何一种成型工艺。设计刚性时未考虑疲劳强度。

强风和风向转变时，叶片受到气流作用产生翼面向弯曲（使叶片靠近或远离塔架弯曲）和翼缘向弯曲（使叶片顺着或逆着旋转方向弯曲），在设定最低失效强度时对此条件下的空气动力学载荷也给予了充分考虑。结构的屈服稳定性则受限于现场条件，暂不予考虑。

本研究借助了空气弹性变形模型来计算相应结构部分的剪切力、弯曲力矩和转矩，失效载荷的安全系数按照德国船级社（GL）要求定为1.5。

需要注意的是，未评估空气弹性变形的重复性对刚性和惯性分布对模型中失效载荷的影响。

3.4 设计容许值

应力/应变的容许值即材料的设计强度 R_d ，由材料的特征值 R_k 除以安全系数 γ_{Mx} 而得：

$$R_d = R_k / \gamma_{Mx} \quad (\text{Equation 1})$$

特征值 R_k 由一个统计学公式计算，将测试数据的可靠性进行量化，因此，测试结果变异（标准差和变异系数）越大，特征值就越低；相反地，标准差和变异系数越小，特征值就越高。特征值的计算公式在德国船级社（GL）的标准中定义如下：

$$R_k(5\%, 95\%, v, n) = x \left[1 - v \left[1.645 + \frac{1.645^2}{\sqrt{n}} \right] \right] \quad (\text{Equation 2})$$

其中， x 是测试结果平均值， v 是变异系数， n 是试样数。试样数减少也会导致特征值降低，但其影响不如变异系数大。

静态强度/刚性分析部分和疲劳分析的部分安全系数 γ_{Mx} 将分别计算，方法如公式3：

$$\gamma_{Mx} = \gamma_{M0} \times \prod C_{ix} \quad (\text{Equation 3})$$

本模型中，静态和疲劳分析的安全系数均为1.35，同样参考GL的规定，见下表，其中N为疲劳载荷循环次数（10,000,000）：

系数	综合强度	疲劳
一般安全系数	1.35	1.35
老化 - C_1	1.35	$N^{1/10}/N^{1/14}$ (E-玻纤或碳纤维)
温度 - C_2	1.1	1.1
制造 - C_3	1.1	1.0/1.1 (未编织或编织)
后固化 - C_4	1.0	1.0
材料总体安全系数	2.21	7.44/8.18

表 1 - GL 部分安全系数

由此，从公式1可以计算得到叶片复合材料层合板的最大设计容许强度。由于不同工艺制得的复合材料性能有所差异，复合材料结构设计通常采用应变值，因为在各向异性的复合材料中应变值仍然保持一致性。应变容许值由强度特征值除以平均模量，再除以部分安全系数而得，表2给出了一些材料的典型容许值。

材料	测试	特征强度 (MPa)	模量	GL 部分安全系数	设计容许值
预浸料 单向 1600g	拉伸强度	952	42.0	2.21	1.02%
预浸料 单向1600g	弯曲强度	687	42.0	2.21	-0.74%
灌注单向 800g	拉伸强度	821	37.8	2.21	0.98%
灌注 单向 800g	压缩强度	511	37.8	2.21	-0.61%
预浸料 单向1600g	疲劳 (10e7)	952	42.0	7.44	0.30%
灌注单向800g	疲劳 (10e7)	821	37.8	8.18	0.26%

表 2 - 材料设计容许值

表2中的数据显示，预浸料的设计容许值高于灌注工艺，特别是弯曲载荷，这是由于预浸料的高性能树脂可以更好地防止纤维屈服，而且单向预浸料的纤维排布优于预浸料工艺。灌注工艺的树脂粘度较低，也降低了树脂的性能；同时，单向纤维为缝织布，波纹形的纤维束影响了纤维受力。最终的结果是，设计者可以利用预浸料的高容许值减少叶片结构铺层。

3.5 叶片设计程序(“BDP”)

叶片设计程序是一个极为周密的悬臂量模型，可以对叶片盒式大梁和叶壳进行有效分析。模型中应用了少许理论假设（不含截面剪切变形），采用多项式曲线拟合方便地地表征叶片几何形状。

叶片模型被分为若干结构单元和插补两个结构单元中间部分的线性次单元（通常单元间隔为0.2m，次单元间隔为1m）。每个叶片单元又被划分为12个基本单元，基本单元被划分为不同的复合材料层合板区，如图4所示。

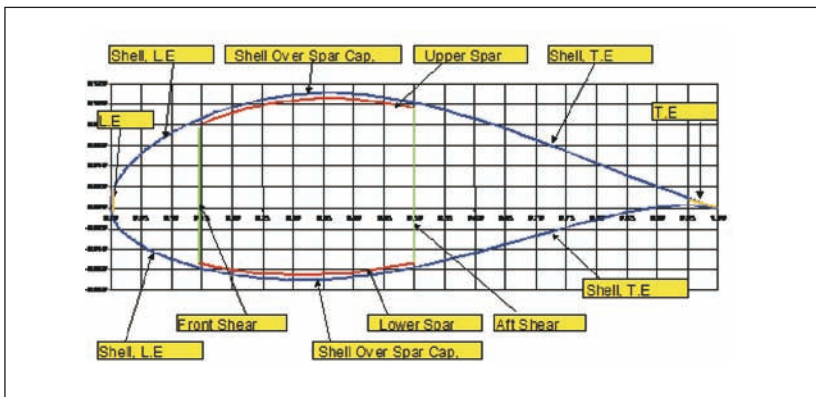


图 4 - 叶片结构单元和基本单元

每个沿叶片轴向的层合板区填充复合材料，材料性能按照传统的层合板理论计算。然后综合附近基本单元的贡献计算结构单元的弯曲刚性 EI_{xx} 、 EI_{yy} 和 EI_{xy} 。类似地，可以计算出每个结构单元剪切受力点和扭转刚性，以及重心位置和质量分布。利用这些信息可以依次计算出每种载荷下的需要输出的参数：

- 偏转曲线
- 弦长方向和顺翼展方向的应变分布
- 第一固有弯曲频率（雷利方程）
- 质量评估
- 材料消耗表 (BOM)

3.6 结果

叶片设计所输出的结果总结如表3，需要注意的是，质量和刚性分布确定后未进行重复载荷计算。预浸料叶片质量的减少降低了叶片收到的动态和静态载荷，重复载荷计算可以其复合材料铺层更加优化。

叶片设计参数	灌注工艺	预浸料
叶尖偏移 (m)	2.53	2.53
超前/滞后偏移 (m)	0.21	0.27
翼面向频率 (Hz)	1.142	1.359
叶片重量 (kg)	6,186	4,987
转动惯量 (kgm ²)	4.87 x10 ⁶	3.79 x10 ⁶

表 3 - 叶片设计输出参数

4. 材料用量清单 (BOM)

根据设计程序计算出的材料用量只表明了净用量，而并未考虑实际生产中的消耗，因此需要加以修正。假定生产中需要的材料总量如下：

- 预留5%的干纤维布和预浸料
- 预留10%的灌注树脂，弥补到芯材和管路中的消耗。
- 预留8%的泡沫，弥补裁切中的消耗
- 预留20%的结构胶，弥补实际粘接中的不同情况。

最终的材料用量清单如表4所示：

材料类别	灌注叶片	预浸料叶片
双向 600gsm (XE600)	960 m ²	588 m ²
三向 900gsm (YE900)	485 m ²	522 m ²
单向 (EGL1600)	1,451 m ²	1,247 m ²
毡层	140 m ²	-
芯材 (PVC/SAN 80kg)	3.38 m ³	3.38 m ³
结构胶	263 kg	263 kg
胶衣	70 kg	70 kg

Table 4 - 材料用量清单 (主材)

除了主材之外还有辅材如真空密封材料等，如表5所示：

Item	BOM 成本 (€)
螺栓套	1,800
避雷针	1,500
喷涂	3,000
真空辅材	€ 1,000/€ 500

表 5 -材料用量清单(辅材)

根据设计得出的材料用量加上预留用量，参照2009年4月的市场价格得出了两种工艺的材料成本，再加上辅材的成本得到最终的材料用量如表6所示：

Material Option	BOM 成本 (€)
灌注工艺	26,849
预浸料工艺	30,312

表 6 -材料成本清单

5. 直接成本

直接人力成本的分析是建立在对叶壳和大梁生产的每道工序进行详细分析的基础上得出的。为了简化分析将叶根的生产 and 连接计入大梁生产部分。因为叶根的设计方式有很多种，所以本文只采用常用的时间和人力成本作为比较标准。

叶壳和大梁生产的每道工序所需要的人力和时间如表7和表8所示：

工序	灌注叶片		预浸料叶片	
	小时	人数	小时	人数
模具准备	0.5	4	0.5	4
胶衣涂覆	0.5	12	0.5	12
胶衣固化	0.5	1	0.5	1
毡层铺放	0.5	12		
纤维布/预浸料铺放	5	12	4	12
真空袋密封	1	4	0.5	4
灌注	2.5	12		
固化	5	1	5	1
移去真空袋	0.5	6	0.5	6
结构胶粘接	1	6	1	6
结构胶固化	5	1	5	1
脱模	1	6	1	6
生产周期	23		18.5	

表 7 - 叶壳的生产周期和人力需求

工序	灌注叶片		预浸料叶片	
	小时	人数	小时	人数
模具准备	0.5	4	0.5	4
纤维布/预浸料铺放	4	6	3.5	6
螺栓套埋入	5	2	5	2
真空袋密封	0.5	4	0.5	4
灌注	1.5	6		
固化	5	1	5	1
移去真空袋	0.5	4	0.5	4
脱模	1	4	1	4
生产周期	18		16	

表 8 - 大梁的生产周期和人力需求

直接人力成本除了计算参与部件生产的劳动力外还加入了裁切纤维布和预浸料的劳动力。为了简化分析假定裁切纤维布和预浸料的人力成本相同。假定2人6小时完成一套，所用人力成本为360欧元。

总的直接人力成本计算标准为30欧元/小时，计算非直接人力成本和厂房与设备折旧需要考量年度产量。总的直接人力成本如表9所示：

	灌注叶片	预浸料叶片
直接人力成本 (€)	6,105	4,245

表 9 - 总人力成本

6. 间接成本

间接成本的分析是以一个拥有四套模具的叶片厂和其运营所需要的间接人力成本作为分析对象。通过一年的总产量计算出平均每个叶片的年度间接成本

6.1 间接人力成本

员工总人数和间接人力成本如表10所示

职位	No
总经理	1
设备经理	1
仓库	1
工艺工程师	2
质量工程师	3
电气技术员	1
设备技术员	1
保安	1
生产经理	1
计划和物流	1
财务	1
总数	€770,000

Table 10 - 间接人力成本

6.2 能源成本

能源成本分析包括电，气，电话费等是以典型的欧洲工厂消耗量作为参照，因为预浸料工艺固化温度较高，所以假定灌注工艺能源消耗量是预浸料工艺的65%。

	灌注叶片	预浸料叶片
能源成本 (€/annum)	549,500	695,500

表 11 - 能源成本

年度间接成本比较见图12，结果归入到第8部分的总结中。

	灌注叶片	预浸料叶片
间接成本 (€/annum)	1,319,900	1,465,500

表12 - 总年度间接成本

7. 成本支出

成本支出分为厂房建筑，模具和相关制造设备。

7.1 厂房建筑

具有4套模具占地面积的叶片工厂，其土地和建筑成本约为550 €/平米，需要的占地面积如表13所示：

占地面积	平方米
库房和办公室	1,000
大梁	4,000
叶壳	6,000
修形	4,000
总计	15,000

表 13 - 厂房占地面积

机械和电气设备支出占土地和建筑总支出的比例分别是：预浸料工艺为66%，灌注工艺为40%。预浸料所占比例较高是因为预浸料的生产和储存条件要求较高，需要更多的机电设备，同时预浸料工艺的自动化性强也需要使用更多的电气设备。按照20年折旧的成本支出如表14所示。

	灌注叶片	预浸料叶片
Total Plant CAPEX (€)	12,150,000	14,350,000

表14 - 厂房成本支出

7.2 模具成本

模具成本分析的对象是首先通过数控设备加工母模，再由母模制造叶壳和大梁阴模的模具系统。

常见的叶片制造工艺是：结构性盒式大梁配以非结构性叶壳，或者是结构性叶壳配以梁帽及抗剪腹板。盒式大梁具有很多制造优点，同时可以保证叶根的整体性。它的缺点是需要专门的阴模大梁模具，增加了成本。在本文中为了简化分析假定预浸料和灌注工艺都采用阴模生产的盒式大梁设计。

预浸料工艺对模具耐温性要求较高，模具成本比灌注工艺预计高出50%，具体数据参见表15

项目	数量	成本 (€)	合计 (€)
预浸料工艺			
叶壳模具	4	650,000	2,600,000
叶壳母模	1	400,000	400,000
大梁模具	4	300,000	1,200,000
大梁母模	1	225,000	225,000
数控设备	2	150,000	300,000
合计		1,725,000	4,725,000
灌注工艺			
叶壳模具	4	433,290	1,733,160
叶壳母模	1	400,000	400,000
大梁模具	4	199,980	799,920
大梁母模	1	225,000	225,000
数控设备	2	150,000	300,000
合计		1,408,270	3,458,080

表 15 - Tooling CAPEX

按照模具部分折旧5年，数控加工设备折旧10年计算出年度折旧率如表16所示:

项目	Depreciation (€/annum)
预浸料工艺	
叶壳模具	520,000
叶壳母模	80,000
大梁模具	240,000
大梁母模	45,000
数控设备	30,000
合计	915,000
灌注工艺	
叶壳模具	346,600
叶壳母模	80,000
大梁模具	160,000
大梁母模	45,000
数控设备	30,000
合计	661,616

表 16 - 年度成本折旧

8. Allocation of Indirect and Depreciation Costs

年度间接成本和年度模具折旧都与产量紧密相关。叶片产量是由叶壳的生产周期计算得出（因为叶壳是瓶颈部件）。年度生产时间按49周无间断计算，叶壳模具利用率为85%。结果如表17所示:

项目	灌注叶片	预浸料叶片
生产周期 (小时)	23.0	18.5
年实际生产天数	340	340
生产效率	85%	85%
模具数量	4	4
年度理论产量	1,206	1,500

表 17 - 叶片产量

按照上述的年产量计算，间接成本和折旧费用分析结果如表18所示，预浸料工艺因产量高于灌注工艺而获得了较低的结果。

	灌注叶片	预浸料叶片
间接成本 (€/叶片)	1,094	977
厂房折旧 (€/叶片)	504	478
模具折旧 (€/叶片)	548	610
总计	2,146	2,065

表 18 - 叶片间接成本和折旧分析

9. 效益和财务比率

针对35米叶片的成本分析结果见表 19。

	灌注叶片	预浸料叶片
原料成本(€)	26,849	30,312
直接人力成本 (€)	6,105	4,245
间接人力成本 (€)	1,094	977
折旧 (€)	1,052	1,089
叶片总成本 (€)	35,101	36,623

表19 - 叶片成本汇总

单从叶片的成本并不能完全掌握两种制造工艺的效益差别，因为两者的产出量有较大差别。这一点可以通过简单的P&L分析和常用的财务比率解释。本文中假定两种工艺生产的叶片售价均为€40,000，P&L分析结果如表20。

	灌注叶片	预浸料叶片
销售总额 (€)	48,240,000	60,000,000
原料成本 (€)	32,380,180	45,467,912
直接成本 (€)	7,362,630	6,367,500
间接成本 (€)	1,319,900	1,465,500
折旧 (€)	1,269,116	1,632,500
息税前利润 (€)	5,908,174	5,066,588
息税前利润%	12.2%	8.4%
总成本 (€)	12,150,000	14,350,000
资产周转率	3.97	4.18
有形资产报酬率 (EBIT x AT)	49%	35%

表 20 - 叶片工厂P&L

预浸料工艺的产量高于灌注工艺，因此单个叶片的间接成本和折旧费用相应降低。这在一定程度上弥补了预浸料的高成本。但是因为材料成本对总成本占有决定性的作用，因此最终35米灌注工艺的叶片成本要低于预浸料工艺的叶片成本。

此外 除了上述分析过的项目之外，还有一些难以量化的影响因子没有被讨论如维修成本，而预浸料工艺因为具有更高的稳定性因此维修成本要低于灌注工艺。而预浸料叶片的重量减轻也对延长使用寿命起到积极的作用。然而轻质的叶片也要搭配风机系统的整体优化才能发挥出最大功效。

模型验证

目前35米灌注叶片的售价大约为50000美元，按照2009年最新汇率(欧元兑美元1.30)计算约合38500欧元。这比模型预计的结果仅高出10%，这表明我们选用的模型预估效果是比较准确的。

10. 总结

我们采用35米的叶片设计模型来进行预浸料和灌注工艺的比较。分析结果如下：

- 根据设计模型得出的价格与当前35米叶片的市场价格比较符合。
- 预浸料具有更高的机械性能，尤其是单向预浸料的高压缩强度使得结构设计中可以减少材料的使用量。
- 预浸料工艺原材料成本高于灌注工艺，这是因为预浸料附加的制造成本较高，且预浸料使用的高性能树脂也增加了成本。
- 预浸料工艺的模具及厂房成本高于灌注工艺，这是因为预浸料工艺对于模具要求较高，且需管控生产和储存环境。
- 预浸料工艺更加适合自动化生产，产量更高，高产量在一定程度上弥补了材料的高成本。
- 财务分析结果表明对于本文采用的35米叶片模型而言，灌注工艺比预浸料工艺具有更高的效益，尽管预浸料工艺可以获得高出灌注工艺24%的产能。

综上所述，我们针对决定35米叶片制造成本的相关因素进行了逐项分析，而其他无法量化分析的项目还包括工艺稳定性，维修频率，服役性能和质量稳定性。这些需要长期使用验证的项目也会对最终的成本产生重要影响，在选择生产工艺时需要重点考量。

本文的所有分析结果都是针对目前市场上的主流35米1.5MW风机进行的，据有较高的参考价值。对于40米以上的叶片重量和性能更为关键，设计的重心就要从材料成本转移到关键部件的性能上来。例如采用高性能的预浸料和采用碳纤维替代玻璃纤维。