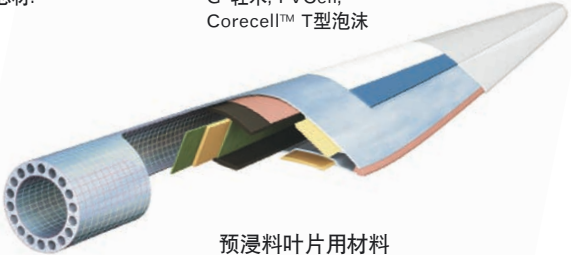


## 固瑞特产品在风电叶片的应用

### 简介

固瑞特从1995年开始为风能市场提供制造风电叶片用的复合材料，随着叶片尺寸和复杂程度的迅速增加，固瑞特积极投身于专用叶片材料的研发，现在已经打入市场的产品系列涵盖了所有叶片制造技术：手糊成型，树脂灌注成型和预浸料成型。随着大型叶片不断下线以及健康和安​​全日益受到重视，叶片主要采用灌注成型和预浸料成型，固瑞特也将重心放在这两种技术和产品的开发上。

灌注叶片用材料	
┆ 灌注树脂:	PRIME™ 树脂体系
┆ 结构胶:	Spabond 340™LV
┆ 结构芯材:	G-轻木, PVCcell, Corecell™ T型泡沫



预浸料叶片用材料	
┆ 预浸料:	WE91 预浸料系列
┆ 胶衣:	CR3400 模内胶衣
┆ 结构胶:	Spabond 340™LV
┆ 结构芯材:	Corecell™ T型泡沫
┆ 先进预浸料:	SPRINT™, SparPreg™

固瑞特的发展理念是通过采用先进材料和先进结构设计，简化叶片制造流程或者使其尽可能高效，从而降低叶片整体成本，最终实现降低风能发电的成本（COE）。风能发电成本的计算需要从风力发电机的整个寿命期去考量，因此，叶片的品质成本是一个关键参数，固瑞特材料产品也是本着为客户提供牢靠稳定、品质一流的工艺而设计的。

叶片设计正在变得精益求精，原材料消耗表中列出的材料清单也在不断增加。然而，行业的发展要求降低COE，亦即要重点找出“过度设计”的原材料，取而代之的是经济合理的产品，这样就衍生出了针对某种需求、具有特殊性能并且成本适中的材料。固瑞特利用自身材料和结构设计方面实际经验丰富的优势，不断发展优化产品体系，始终在风能复合材料领域保持领先地位。

为了进一步减少制程变异，降低COE，成熟的风能市场也对原材料产品提出了类似于汽车工业的六西格马标准。作为航空航天和汽车两大市场的供应商，固瑞特深知如何通过客户的CTQ要求理解客户的需要，并对出厂前产品作最严苛的质量检查，确保品质优良稳定。

复合材料制大型结构件的制造是一个结合了各种材料体系的复杂过程。对于选材标准、原料性能及其相互作用的理解，对于最终结构件的品质有很大影响。固瑞特提供灌注和预浸料叶片所用的全部原材料，因此对叶片材料设计及生产复杂性颇有理解。这一章将概括介绍固瑞特主要的复合材料产品及其技术特性。

## 灌注叶片用材料

采用灌注工艺制造的叶片，其四种主要原材料为：干纤维，灌注树脂，芯材和结构胶。纤维的生产以及将纤维纺织成织物并不属于固瑞特业务范围，因此不予详细讨论。对于其余三种材料，固瑞特拥有最专业的技术，并引领市场发展，致力于为叶片制造者提供一系列高品质产品，具体包括三个种类：

- 灌注树脂: PRIME™ 灌注树脂系列
- 结构胶: Spabond 340™LV
- 泡沫芯材: PG-轻木, PVCell & Corecell™ T型泡沫

## 灌注树脂

对于灌注叶片树脂系统的选择需要谨慎考虑生产工艺、叶片大小、工作环境、增强材料、热力学性能和叶片认证等多方面因素。进一步需要考虑的是工艺优化，模具效率和固化周期对尽量降低成本至关重要，为了实现这一点，灌注树脂体系必须有各种导入速度以满足不同工艺需求，并支持工艺不断改进。

固瑞特有能力强提供这种多样化的树脂体系，以协助客户优化工艺降低成本，即我们的PRIME™ 灌注树脂。PRIME™ 灌注树脂性能优异，有快、中、慢等一系列固化剂，适合不同制造工艺的实际需求。

## PRIME™ 灌注树脂体系

- 超低黏度 - 将灌注时间最小化，减小叶片生产时间
- 可选择的灌注时间 - 不同速度的固化剂适应各种生产工艺要求
- 超低放热，即使在厚度较大的部分 - 增加模具寿命
- 更适合大型结构件的灌注 - 即使在高温环境中
- 国际认证 - 通过GL认证

## 用PRIME™进行灌注生产

PRIME™灌注树脂拥有超低粘度和较长工作时间，更适合复杂纤维铺层的大型结构件生产。其低放热性能容许较厚部件的制造，而不会因放热产生的凝胶过早现象。此外，较低放热对延长模具的寿命也有好处。Prime™灌注树脂体系已经成功运用于游艇桅杆、80英尺游艇船体和风电叶片制造中。在中温（50° C）下，材料即可达到卓越的力学性能，其力学性能介于低温固化预浸料和手糊工艺之间。

PRIME™灌注树脂体系包括不同速率的固化剂，提供较宽范围的固化时间，可灌注UD单向碳纤维梁盖获一次成型叶片等要求很高的固化工艺。固化剂速率可以用树脂停止流动的时间或树脂在层合板内部的胶化时间进行表征，也可以用适用期限或树脂常温下在给定容器中的反应前的盛放时间来定义，以上参数已经总结在下面的表格内，表中同时给出了树脂在真空下停止流动的时间、最早停止抽真空时间和一定温度下的最早脱模时间。

性能	快型固化剂			慢型固化剂			超慢型固化剂		
	20°C	25°C	30°C	20°C	25°C	30°C	20°C	25°C	30°C
起始混合黏度 (cP)	318-338	219-232	127-134	308-328	214-228	172-182	347-369	220-234	155-165
凝胶时间 - Tecam 150g水浴 (hr : min)	01:09	00:30	00:17	05:00	03:20	02:20	10:20	08:00	06:15
适用时间500g 空气中 (hr : min)	00:28	00:23	00:16	01:15	01:00	00:45	06:00	04:05	02:10
真空下最迟流动时间 (薄膜理论值, hr : min)	03:10	02:40	01:50	05:20	04:50	04:10	10:50	08:50	06:40
最早停止真空时间 (薄膜理论值, hr : min)	04:15	03:20	02:15	07:30	06:30	05:50	15:10	11:30	08:50
脱模时间 (hr : min)	06:45	05:00	02:30	21:00*	15:30*	11:50*	88:00*	50:00*	28:00*

\*使用慢型和超慢型固化剂制造的部件，只能经过高温固化后方可脱模。

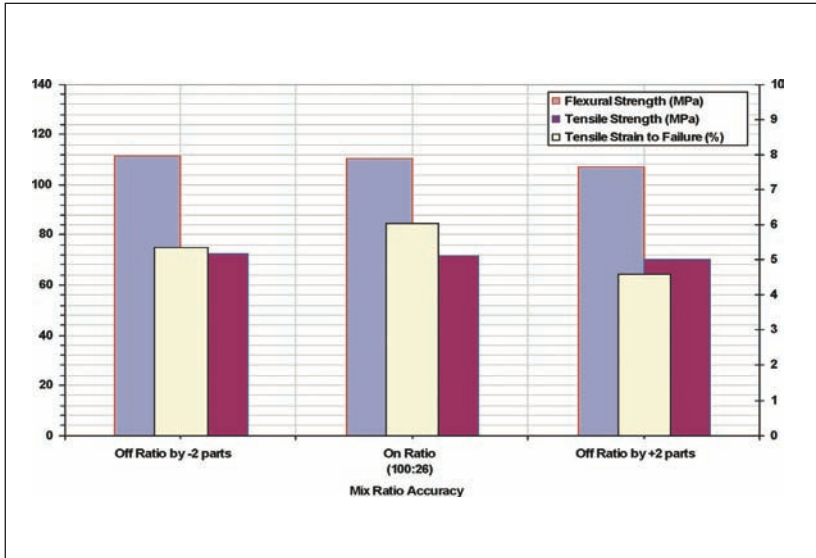
近几年出现了在较高温度环境中灌注制造大型叶片的要求，为了解决这个问题，固瑞特特别开发了两种固化剂来满足这个特别市场需求，相对一般固化剂，其延长的固化时间可达10小时，同时不降低力学和热学性能。需要获得更多信息，请浏览固瑞特网站，联系本地代表。

## 卓越的性能

固化后的PRIME™树脂基体无论使用何种固化剂类型均呈现出良好的力学性能和热学性能。下表总结了各种固化速度下材料的主要性能。

固化剂	快型	慢型	超慢性
固化程序	16hrs @ 50°C		
Tg (DMTA - tan δ峰)	82.8	82.6	82.9
最终Tg (DMTA)	74-76	87-89	90-92
Tg1 (DMTA)	68-70	68-70	69-71
ΔH - DSC (J/g)	1.54	7.3	0
热变形温度	67	68	67
拉伸强度 (MPa)	75	73	69
拉伸模量 (GPa)	3.2	3.5	3.5
失效应变 %	4.1	3.5	3.1
固化后密度 (g/cm3)	1.153	1.144	1.132
线性收缩率 (%)	1.83	1.765	1.541
巴氏硬度	21	27	25

作为灌注工艺的一个步骤，通常用能够精确控制比例的两组分混合设备完成混合，理想地，混合机的精度小于  $\pm 1$  个单位。然而，有时需要少量手动或搅拌混合，用于修补已成型结构，这时，很重要一点就是要精确控制 PRIME™树脂体系的混合比例。快速固化体系允许混合比例偏差为  $\pm 2$  个单位(视客户需求)。



PRIME™灌注体系制作的层合板具有优良的性能，下表给出了用PRIME™灌注树脂和单向缝合纤维制备的5mm复合材料板的力学性能。

Property	Test Standard	PRIME™ Infusion Resin
Normalised Tensile Strength @ 53% FVF (MPa)	DIN EN ISO 527	990
Normalised Tensile Modulus @ 53% FVF (GPa)	DIN EN ISO 527	43.7
Normalised Compression Strength @ 53% FVF (MPa)	DIN EN ISO 14126	645
Normalised Compression Modulus @ 53% FVF (GPa)	DIN EN ISO 14126	42.7
ILSS (MPa)	DIN EN ISO 14129	68.0

## 结构芯材

随着风电市场的日趋成熟，叶片的尺寸和重量不断增加，此时，叶片的优化设计显得尤为重要。因此，一种芯材可以满足现代叶片的所有要求已经不再切合实际。在标准的灌注叶片设计中，结构芯材在结构叶壳和抗剪腹板中均有使用，但以上两个结构对芯材的要求差异很大，即使叶壳的不同位置对芯材要求也不尽相同。所以，为了优化叶片的设计、重量和性能，设计者往往同时使用一系列的芯材产品。

为了满足叶片设计对多种芯材的需求，固瑞特不断丰富产品种类，现在芯材产品已经涵盖了PVC，轻木和SAN等类型，提供了广阔的选择空间。请浏览固瑞特网站，联系本地代表。

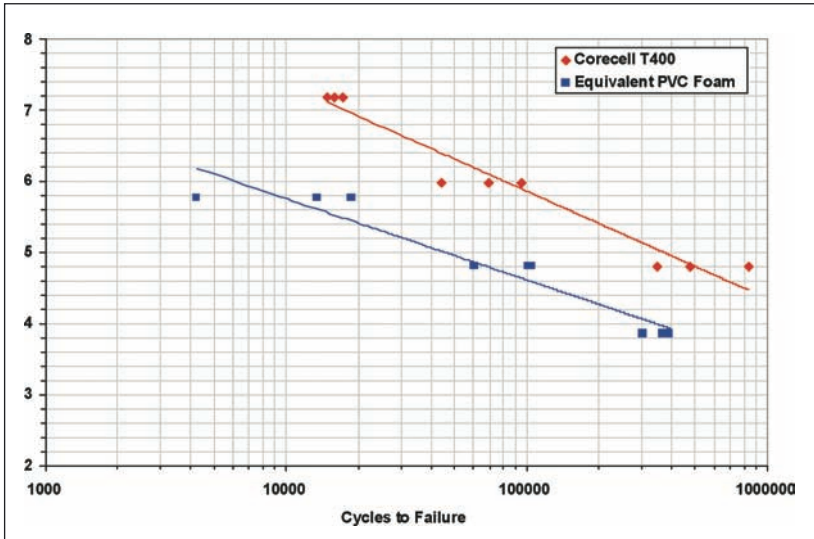
### Corecell™ T型泡沫

- 环境稳定性 - 高耐热性，高化学耐受性
- 韧性良好 - 相比于交联PVC和轻木(Balsa)芯材具有更高延展性和损伤容限
- 泡沫孔径小 - 树脂吸收量小，更好的减轻重量和节约成本
- 优异的均匀性 - 密度均匀性好
- 消除曝气 - Corecell大幅减少了泡沫材料的曝气问题
- 适用性好 - 适合与所有的聚酯、乙烯基酯和环氧树脂配合使用
- 无抑制性 - Corecell对任何环氧树脂固化均无抑制作用
- 可操作性强 - 高韧性，便于机加工

### Corecell T型泡沫简介

Corecell T型泡沫采用了比传统PVC和轻木结构芯材更加先进的制造技术，广泛适用于PVC和轻木芯材可以使用的各种环境。高韧性和热稳定性使Corecell T型泡沫具有优异的抗疲劳性能。这一特点使得在很多对寿命有严苛要求的场合，Corecell T型泡沫无疑是交联PVC或轻木芯材的最佳替代材料。

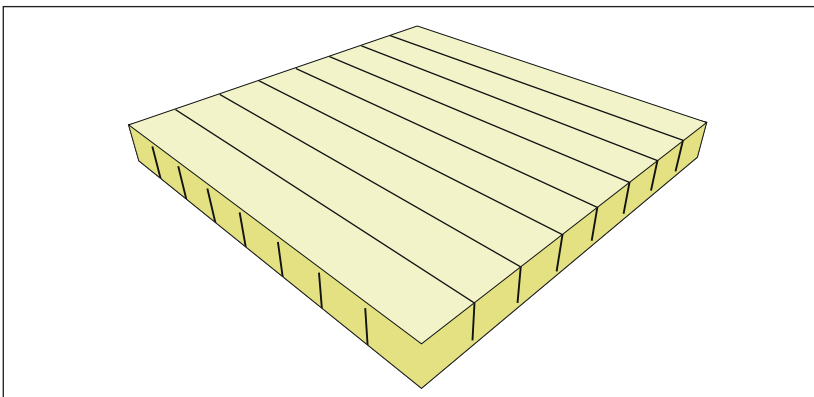
作为高分子泡沫，Corecell T型泡沫的化学组成赋予了它优异的耐热性能。100° C条件下，传统交联PVC泡沫的弯曲强度不及室温下的20%，而Corecell T型泡沫可保持近60%。热稳定性意味着Corecell T型泡沫结构即使经历温度变化也基本不会有泡沫单元下陷现象发生。Corecell T型泡沫的高温稳定性也意味着该产品可用于以下制备工艺：短暂停留在固化最高温度超过150° C的工艺，它是搭配传统预浸料和某些液体灌注工艺的理想选择，因为这些工艺通常会伴有明显的放热产生。



### 着眼于灌注工艺的切缝设计

Corecell T型泡沫适用于各种灌注工艺用树脂，与聚酯、乙烯基酯和环氧树脂均有良好的兼容性。灌注工艺的一个关键性变化因素是，不同叶片中树脂流动的一致性以及由此带来的叶片重量和品质的差异。为了克服这些问题，固瑞特开发了基于用户需求的切割方式，以优化树脂在灌注过程中的流动和分布，确保结构树脂吸收量较低并减少导流网的使用。

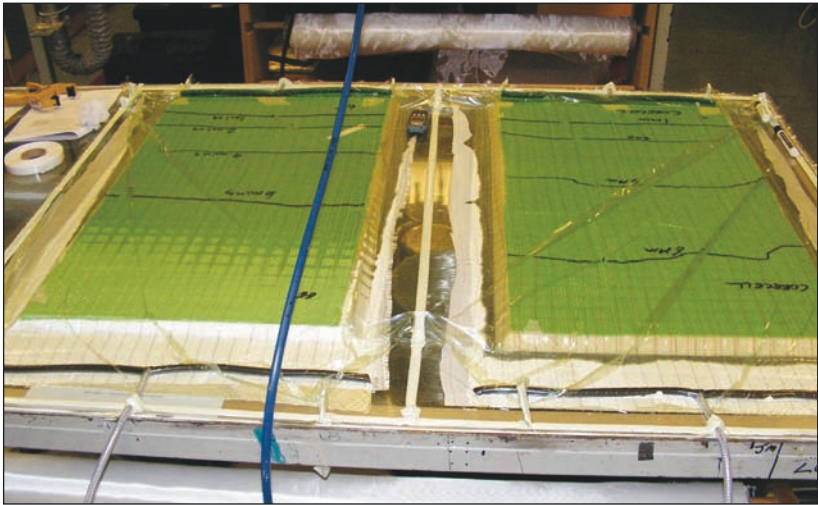
固瑞特开发的切缝方式使用仅0.8毫米厚的刀在芯材的其中一面切割，切割密度为30毫米，然后，以相同的方式在另一面沿正交方向切缝。这种方式使树脂具有优异的流动性，同时也保证芯材在复杂的模具形状内仍具有良好的随形性。



这种切缝方式还具有成本低廉的优势，因为双面正交切割既不需要使用玻璃网纱（玻璃网纱常被用于切割密度较大的灌注用结构芯材），也不必打孔或穿孔，规则的30\*30正交切割在交叉处形成了孔，为芯材上下树脂流动提供了通道。在风电叶片制造中的实际应用证明：

- 总体降低了树脂消耗
- 缩短了灌注时间（约20%）
- 灌注品质稳定，重复性好
- 减少了由于网纱导致的未浸润区域面积
- 交叉切割孔提高了树脂渗透

举个实际的例子，用密度相当的T400 和PVC泡沫同时制作两个测试板，两种芯材的切槽方式相同，树脂体系均为Prime™灌注树脂搭配慢型固化剂。尽管两个测试板同时灌注，但很快Corecell 测试板得到流速度明显超过 PVC。



测试板灌注完成后，对比结果如下：

对比项目	Corecell T400 Panel (g)	PVC Panel (g)
灌注前总重量	2152	2000
灌注后总重量	4530	4625
去掉导流网和剥离布，切边后重量	3055	3170
吸收树脂后重量差异（参考PVC泡沫）	-115	-
每平方米树脂吸收量差异	-250	-
总重量对比	96.37%	100%

由于T400密度偏高，Corecell板初始重量较大，尽管如此，其吸收树脂后重量仍然比PVC轻115g，即每平方米树脂吸收量少250g，相同的材料放大到40 m 叶片中，意味着Corecell树脂吸收量少将减少60kg!

### G-轻木\*

- 种类多样 - 提供各种标准密度和切割方式的产品
- 适用于现有主流叶片设计 - 适用于任何已认证的使用Diab或 Airex PVC 泡沫的叶片设计
- 成套切割能力 - 单独或搭配使用，依照客户需求进行成套芯材的机械切割加工
- 中国制造 - 专为中国市场开发

\* 国内产品商标核对中

### PVCcell

- 种类多样 - 提供各种标准密度和切割方式的产品
- 适用于现有主流叶片设计 - 适用于任何已认证的使用Diab或 Airex PVC 泡沫的叶片设计
- 成套切割能力 - 单独或搭配使用，依照客户需求进行成套芯材的机械切割加工
- 中国制造 - 专为中国市场开发

## 结构胶

对于长时间承受动态载荷的大型风机叶片而言，保证长期稳定的服役是最为重要的课题之一。长期承受动态载荷以及严苛的天气环境对叶片的性能提出了很高的要求。尤其是用来固定叶片各部件的结构胶更需要优异的性能来确保叶片正常工作。

为了获得最佳的粘接性能，需要兼顾粘结强度和韧性，这就需要昂贵的配方或复杂的工艺，而实际使用中又必须考虑到成本的竞争力。在选择结构胶时机械性能是首先要考虑的因素，同时也要考虑叶片制造中相关的工艺问题，这些包括：

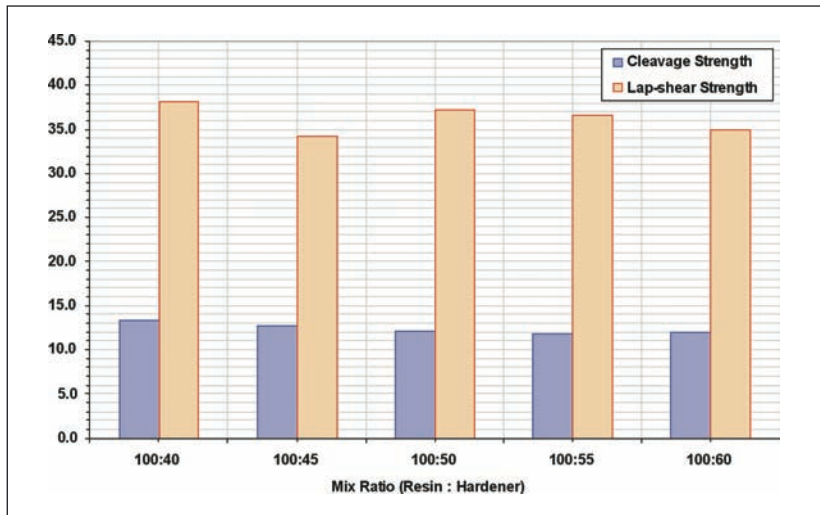
- 待粘接表面的预处理
- 结构胶的准备，混合和涂覆时间以及凝胶速度
- 有效工作时间 - 从开始混合到部件完成粘接的时间，以及影响这一时间的温湿度因素。
- 夹持时间- 在此时间之前结构胶可以继续流动，必须施加压力和粘接部件紧密接触，确保粘接效果符合设计要求。
- 指定温度下的固化速率，热收缩率和软化温度都会影响到固化和脱模的设计。

## Spabond 340 LV

- 优异的间隙填充性能 - 适用于不同厚度的间隙填充
- 高强度和韧性
- 多种夹持时间 - 三种固化剂提供了不同的工作时间
- 低放热低收缩 - 最大程度上减少开裂
- 高耐热温度 - 最高耐热温度达80° C

## 混合与应用

Spabond340LV 是一种增韧， 摇溶性结构胶， 混合比例重量与体积百分比均为2:1。可采用混合机混合， 垂直表面的抗垂度达到30mm。多种固化速度的选择既可用于大尺寸结构件， 也适用于小尺寸部件。为了便于识别混合程度， Spabond340LV结构胶各组分中添加了颜料。先进的配方确保了Spabond340LV具有优异的强度和韧性， 即使混合比例出现少量偏差。

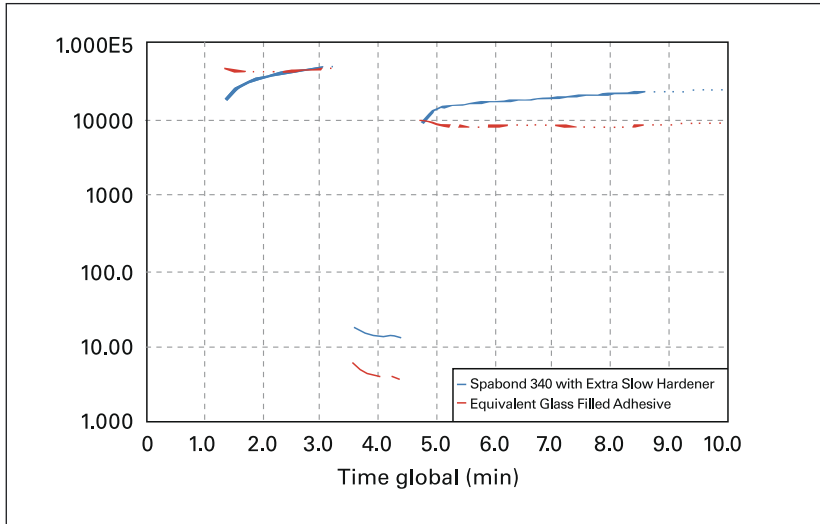


风机叶片中需要的结构胶填充间隙较大，通常为40或50mm，且常用在垂直表面上。这就要求结构胶具有良好的摇溶性以确保在涂覆后到粘接前保持位置不动。Spabond 340不仅具有优异的高温和低温抗垂度，而且具有很好的摇溶性。这项性能经常被忽略，但实际应用中由混合机喷出的结构胶为了达到充分混合的目的，混合机都会采用较高的剪切速率，如果摇溶性很差，结构胶在喷到粘接表面后黏度长时间不能恢复，就会导致垂流。

下图对Spabond 340和玻纤填充型结构胶进行了对比，采用流变仪进行测试：

- 1 施加低剪切速率测定混合后黏度
2. 施加高剪切速率模拟动态或静态混合头测试黏度变化
- 3 恢复到低剪切速率测定经过多长时间黏度恢复到初始混合黏度

可以明显看出Spabond340的黏度在剪切速率降低后可以更加接近的恢复到初始混合黏度。



因为Spabond340独特的先进配方，使其与玻纤增强型结构胶相比具有更加优异的摇溶性和抗垂度，同时不会影响到浸润性和流动性。

### 关注重量问题

叶片生产中结构胶的大量运用又产生了一个重要问题-结构胶消耗量，这里对成本的比较应该以单位体积作为参考标准而不是单位重量，同时还要考虑到结构胶的流动性，流动性差的结构胶会影响粘接的效果，还将增加浪费。选择适当密度和流动性的结构胶可以降低多达50-100kg的叶片重量。

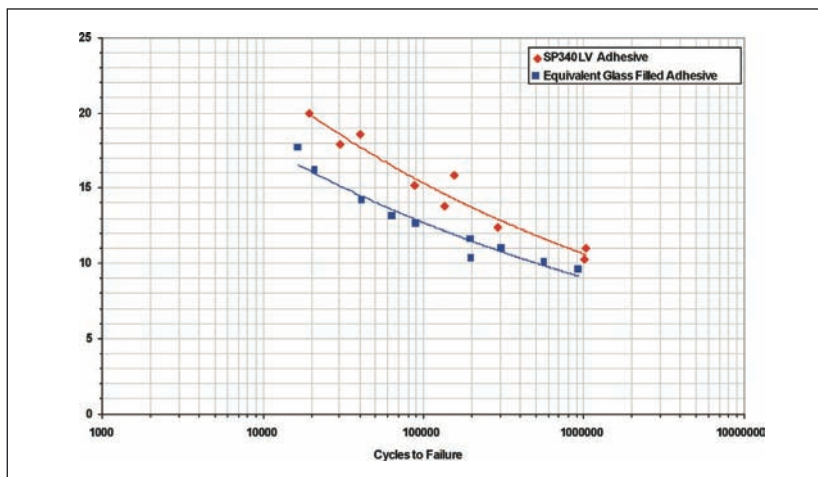
Sample	$\rho_{resin}$	$\rho_{hardener}$	Mix Ratio (R:H)	$\rho_{mixed}$
Spabond 340LV with Extra Slow Hardener	1.120 g/cm <sup>3</sup>	1.060 g/cm <sup>3</sup>	100 : 50	1.099 g/cm <sup>3</sup>
Equivalent Glass Filled Adhesive	1.270 g/cm <sup>3</sup>	1.110 g/cm <sup>3</sup>	100 : 45	1.216 g/cm <sup>3</sup>

低密度结构胶不但可以降低叶片总重，而且可以降低采购成本。

## 降低叶片成本

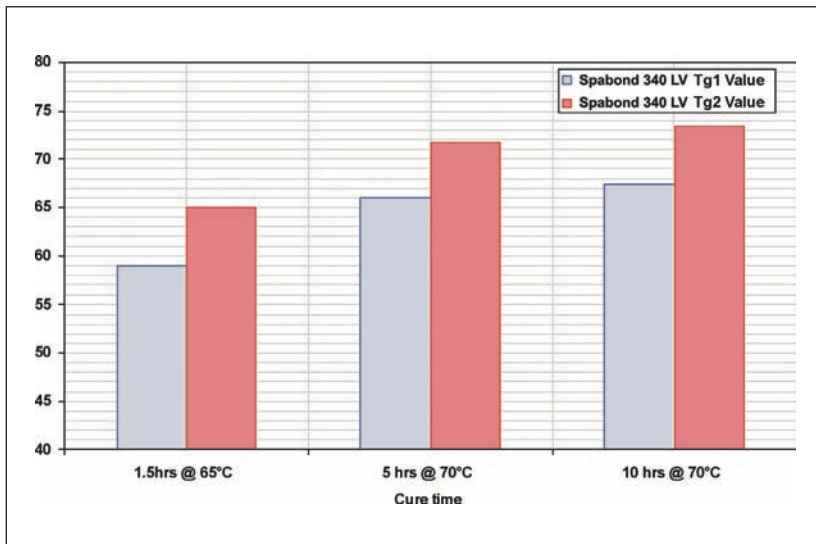
经过持续改进，目前叶片生产的周期大大缩短，如何缩短叶片各个部件的组装时间一直是提高生产效率的重要内容。固化过程中的加热和冷却会在结构胶粘接处产生严重的温度差异并导致内应力集中，尤其是在填充厚度较大的地方，这些内应力会显著影响疲劳性能。

增韧型Spabond™340结构胶具有优异的疲劳性能。下图将Spabond™340配合极慢型固化剂结构胶和玻纤填充型结构胶的剪切疲劳性能进行了对比，玻璃钢层压板由单向玻纤增强环氧构成，测试频率5Hz，测试加载系数5Hz。



叶片制造商期望结构胶可以满足他们的全部要求，既能够充分固化以获得高强度，又要避免收缩产生的应力集中，还要具有较高的玻璃化转变温度。固化过程中的反复加热和冷却过程要求结构胶具有一定的韧性以防止开裂，而提高韧性的同时往往会降低玻璃化转变温度。在30-50m的大尺寸叶片中尺寸的变异较大，需要填充的厚度也会加大。在结构胶填充较厚的部分更加容易产生应力集中。

为了防止结构胶在固化过程中开裂，很多制造商采取了延长固化时间的办法降低内应力集中，这样做不可避免地降低了生产效率。选择增韧型结构胶例如固瑞特Spabond 340有效的解决了这一问题，在不需要延长固化时间的基础上有效的降低了开裂。固瑞特推荐Spabond 340的固化条件是70度5小时，在这样条件下固化后玻璃化转变温度可以达到GL要求的65度。



## 叶片尺寸

随着叶片尺寸的不断加大，叶片的成本越来越多地受到运输成本的制约，因此可以预见不久以后分段组装式叶片会更加普及，对于分段式叶片而言尽管机械连接仍然是人们普遍选择的联结方式，然而为了消除连接处的应力集中，仍然需要用到结构胶进行光滑表面的粘接，即使在某些特定位置例如根部仍然需要机械部件进行连接。解决这一问题仍然需要在结构胶的设计和成本间取得平衡。这需要叶片制造商和结构胶设计人员的共同努力。

## 叶片设计

在结构胶投入应用以前，连接结点的设计是叶片设计的重要课题。众所周知在避免剥离载荷的情况下，结构胶才能发挥出最佳性能，然而在进行迎风一侧的设计时，保证这一点并非易事。多数结构胶生产商都将这个问题留给了叶片制造商。基于赛艇和叶片的设计经验，固瑞特有幸成为具有叶片结构设计能力的少数结构胶生产商之一。我们有能力对粘接结点进行优化设计，最终获得整体性的解决方案。

通过严谨的结构设计和结点设计，同时考虑到生产工艺。过度设计可以被有效避免，从而减少了材料和人员的浪费。我们致力于采用绿色环保的解决方案来满足您的使用要求。

## 预浸料叶片用材料

典型的预浸料叶片由根部，单向碳纤维或玻璃纤维制成的大梁，双向预浸料和结构芯材，以及多向预浸料构成的叶壳再加上模内胶衣组装而成。这些部件再通过结构胶例如 Spabond340LV 或者是非结构性聚氨酯胶（非固瑞特产品序列）粘接而成。

固瑞特长期致力于提供预浸料叶片生产用到的预浸料，芯材，胶衣和结构胶等全套材料，并不断地研发新型的预浸料技术。主要的代表产品有：

- 预浸料: WE91 Prepreg Family
- 胶衣涂层: CR3400 Process Coat
- 结构胶: Spabond 340LV
- 芯材: Corecell™ T-Foam
- 先进预浸料: WE91LE, SPRINT™, SparPreg™

## 预浸料技术

预浸料技术主要应用在对重量，性能和产品稳定性有很高要求的场合。风能预浸料的特点是高克重，大体积，高沉降速率，和精确的纤维取向。

- 玻纤/环氧 多向预浸料 (300-2000gsm)
- 玻纤/环氧 单向预浸料 (150-1600gsm)
- 碳纤/环氧 单向预浸料 (300-800gsm)

选择预浸料工艺极大地简化了叶片生产难度，所有的生产要点包括树脂比例，混合质量，树脂含量，纤维走向和浸润效果都由固瑞特为您准确控制。固瑞特丰富的预浸料生产经验将极大的减轻叶片制造商的负担，使其能够将全部精力集中到生产工艺上。

## WE91 系列预浸料

- 缩短生产周期 - 低放热树脂
- 不含有害组分迪草隆 - 改善了环境安全性能
- 适用性广泛 - 室温下使用期限长，含有多种增强体可选
- 建议固化温度85 - C和120°C - 优异的机械性能，溢胶少

## WE91 系列预浸料介绍

WE91系列是WE和WT系列预浸料，SPRINT®，和AIRSTREAM™产品的一种。这种独特的预浸料具有极高的性价比，可以单独使用或与其它的SP产品配合使用。

WE91系列是一种流动性好，不含迪草隆的环氧树脂预浸料，适合制造厚尺寸部件。可以在85° C下固化，也可以在120° C下45分钟快速固化。在21° C.下的保存期长达60天。

WE91系列适用于真空袋工艺，采用玻纤增强或碳纤维增强都可获得优异的机械性能。WE91包含三种类型：单向，双向和三向，所有类型都以大尺寸成品卷供应，满足经济实用的要求。其它的WE91产品包括预浸剥离布和针垫。

单向玻纤预浸料分为600, 1200, 1500和1600等不同克重的产品, 多样的产品组合更加经济实用。单向预浸料主要承担长度方向上的压缩和弯曲载荷, 多用在桅杆, 球杆或其它杆状结构件, 单向预浸料最大宽度可达1470mm, 单向碳纤维预浸料主要用在要求高机械性能的场所, 可用克重有500或600。

双向预浸料是由 $\pm 45^\circ$ 的玻纤缝合而成。克重分为300, 600, 1000和1800。具有优异的随形性, 既可单独使用, 又可以和单向预浸料搭配使用, 以提高拉伸和扭曲强度及剪切刚性。最大宽度为1250mm。

三向预浸料是由 $\pm 45^\circ$ 的双向纤维布与单向纤维布缝合而成, 克重为900或1200。三向预浸料随形性能好, 在双向纤维布面附有一层纤维毡以减少表面固化皱纹。

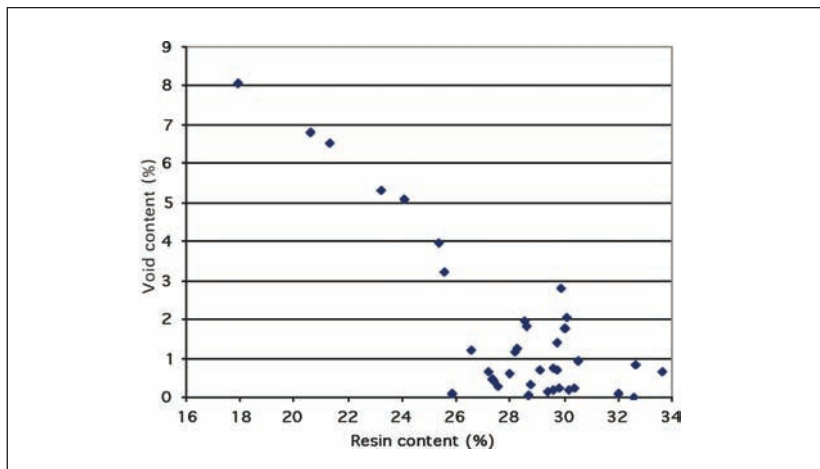
## 粘性

粘性是预浸料的重要性能之一, 粘性结果主要取决于树脂和纤维以及浸润程度和测试方法。预浸料的粘性可以保证在施加真空后预浸料和芯材不会发生移动。粘性的不同也会导致固化后性能的区别。较差的粘性可能会产生分层, 褶皱和孔隙。为了避免这些问题发生, 需要选择具有适当粘性的预浸料。

WE91系列树脂有两种粘性产品, WE91-1 (高粘性) 用于单向或双向预浸料, WE91-2 or WE91-5 (中等粘性) 用于双向, 三向或单向碳纤维预浸料。

## 树脂含量

树脂含量是预浸料的另一项重要性能, 树脂含量与纤维密度和孔隙率密切相关, 并且受到真空压力的影响。高压成型工艺生产的预浸料树脂含量较低。真空袋工艺的预浸料 (如固瑞特预浸料产品), 树脂含量最小为27%重量百分比, 相当于59%体积百分比。低于这个水平的预浸料中孔隙率显著升高。如图所示为双向预浸料中孔隙率和树脂含量的关系曲线, 高孔隙率会显著降低由树脂支配的性能如层间剪切和压缩强度等。



相反地高树脂含量同样会导致高孔隙率，因为铺层中的气泡难以排出。而且实际生产中较少用到单层的高树脂含量的预浸料或用高树脂含量预浸料直接接触芯材，这样会导致过多的树脂被芯材吸收。

下图表明了WE91系列预浸料的大致树脂含量

树脂系统	增强纤维	树脂含量
WE91-1	UD Glass 单向玻纤	32%
WE91-1 or -2	Biaxial Glass 双向玻纤	35 – 50%
WE91-2 or -5	Triaxial Glass 三向玻纤	38 – 43%
WE91-2	UD Carbon 单向碳纤维	32%

### 随形性 (drape)

随形性指预浸料能完好贴合模具表面的能力。这个因素对预浸料很重要，预浸料的纤维/纤维布结构（纤维类型、方向、缝合方式等）以及树脂特性与随形性密切相关。良好的随形性能减小预浸料与模具间出现曲面拐角空隙和不贴合的情况，在保持好的随形性的同时也要保证树脂粘度不能过低，否则预浸料的树脂会被挤压变形或溢出。预浸料柔性是随操作温度的降低而降低的，因为树脂的粘度随温度降低而升高，所以确定获得最佳随形性的温度和可操作的最低温度很重要，需要经过实际操作经验积累获得。反之，温度上升会增大随形性，预浸料树脂粘度减小的同时也会增大表面粘性。Gurit的预浸料树脂是专门为适应实际生产环境设计的，材料的柔性与玻纤布很有关系，如三轴向织布的随形性受到织布和编织线的限制。Gurit的WE91-5是预浸该三轴向织布的理想树脂系统，在平衡表面粘性和浸润性基础上提供最佳的随形性。

### 存储时间 (out life)

预浸料树脂是经过预先催化混合的体系，在混合之初就会有反应发生，而在75 ° C的临界温度以上，每上升10 ° C反应速率增加一倍。在临界温度下混合树脂反应会非常缓慢，但即使在-18° C 下也会维持超慢的反应。存储放置所发生的反应使树脂的粘度随之上升，固化时树脂的流动性也会不断降低。当流动性下降到一个程度，固化浸润受到了影响，最终固化层复合的力学性能必将受到影响。在复合材料结构中，需要一定的树脂流动性去填充铺层间的缺陷和其他材料（如泡沫表面的孔坑、切槽等）。所以，最佳力学性能的获得需要注意预浸料的存储时间，确认在存储期内使用。存储期可以通过了解确定温度下材料粘度上升情况测定，不同温度下存储期大不相同，如WE91预浸料存储期如下表所示：

在特定温度下存储期	
在 -18° C 下(月)	18
在 +5° C 下(月)	6
在 21° C 下(天)	60

预浸料的正常储存需要存放在冷库中以增加使用寿命，低温会减缓混合树脂的反应速度，但即使在 $-18^{\circ}\text{C}$ 下这种存储温度下，缓慢的反应也仍将继续。一些存储案例中，预浸料在冷库中储存很多年，材料的硬化使之最终还是不能使用。预浸料是需要塑料膜密封包装的，使用时需要从冷库拿出常温放置，塑料膜可以防止产品被水和结露污染影响材料性能。

## 反应活性

预浸料的反应活性基本上是由混合树脂中的催化剂含量控制的，它可以定义为在特定混合比下固化反应的总热焓。热焓是被配方中催化剂和促进剂的含量所影响，设计配方既要考虑获得较高的反应速率同时产生较低的热焓。具体到预浸料，必须保证厚层固化时反应活性的最低化，减少因热量过多释放和积累引起的局部集中放热现象。

在收集树脂的特性信息时，测量反应热焓是非常重要的，可以使用DSC方法测量树脂T-onset、T-endset、峰值温度（peak high）以及热焓。这些参数有助于推测树脂在厚层固化时的放热表现，并和已有的数据进行比对分析。树脂的玻璃化转变温度 $T_g$ 是另一个重要参数，它说明了树脂反应后化学键生成的密度，它影响着最终力学性能和热学性能。

WE91 热学属性 (DSC程序: $20^{\circ}\text{C}-250^{\circ}\text{C} @ 10^{\circ}\text{C}/\text{minute}$ )	
Enthalpy热焓 (J/g)	$250 \pm 50$
DSC $T_g2$ 玻璃化转变温度( $^{\circ}\text{C}$ )	110 - 125

与树脂活性相关的其他重要方面包括树脂的流动性和固化度。一旦预测出系统的最大热焓，综合考虑这两个参数有助于定义合适的固化热循环。理论上，树脂应该在最低粘度值时停留较长的时间，因为最低的树脂粘度可以获得最佳的层压效果和排气效果。固化热循环需要综合考虑树脂的最低粘度、最低粘度停留时间，放热峰值，固化时间（影响模具的使用效率）

## 力学性能 Mechanical Properties

许多不同的力学性能参数的测定用于综合衡量材料的力学性能，其中包括：标准化拉伸强度、拉伸模量、层间剪切强度、压缩强度等。还有一些次级属性，包括预浸料与泡沫和胶衣的粘接能力，用来衡量复合材料的整体结构。为了总览复合材料的力学性能，WE91树脂的典型预浸料产品的力学性能下在表中给出：

预浸料	增强纤维				
	1600g UD 玻纤	600g UD 低模量碳纤维	600g 带毡 Biax	1200g 带毡 Triax	测试标准
树脂系统	WE91-1	WE91-2	WE91-2	WE91-2	-
树脂含量 (%)	32	35	43	43	-
表面粘度	高	中等	中等	中等	-
纤维重量 (g/m <sup>2</sup> )	1600	600	600 + 50 薄毡	1200 + 50 薄毡	-
预浸料总重 (g/m <sup>2</sup> )	2353	923	1140	2193	-
0° 拉伸强度 (MPa)	1185	1760	135	600	BS EN ISO 527
0° 拉伸模量 (GPa)	50	120	15	30	BS EN ISO 527
0° 拉伸断裂伸长率 (%)	2.4	1.45	0.76	2	BS EN ISO 527
0° 压缩强度 (MPa)	-	1040	435	-	ISO 14126
0° 压缩模量 (GPa)	-	115	25	-	ISO 14126
0° 压缩失效应变率 (%)	-	0.95	1.45	-	ISO 14126
0° 层间剪切强度ILSS (MPa)	60	75	-	40	BS EN ISO 14130
45° 拉升强度 (MPa)	-	-	490	380	BS EN ISO 527
45° 拉升模量 (GPa)	-	-	25	25	BS EN ISO 527
45° 拉升断裂伸长率 (%)	-	-	1.45	1.5	BS EN ISO 527
45° 层间剪切强度ILSS (MPa)	-	-	35	40	BS EN ISO 14130

预浸料的另一个关键特性是纤维排布的整齐度，因为被树脂预浸的纤维是很难变得散乱排布的，这意味着裁剪、铺层等操作阶段纤维排布不被扰动。整体排布的纤维使增强纤维主导的复合材料力学性能发挥到最大，这也是预浸料高力学性能的原因之一（尤其是UD单向预浸料），为了更好的理解这点可以将灌注工艺的UD材料和预浸料的力学性能加以对比：

属性		预浸料	灌注材料	变动百分比
标准化的拉伸强度 @ 53% FVF (MPa)	均值	1010	989	-2.07%
标准化的拉伸模量 @ 53% FVF (GPa)	均值	44.12	43.68	-1.01%
标准化的压缩强度 @ 53% FVF (MPa)	均值	1036	644	-37.84%
标准化的压缩模量 @ 53% FVF (GPa)	均值	39.2	42.8	+8.97%
层间剪切强度ILSS (MPa)	均值	62.8	68.0	+8.30%

尽管拉升性能和层间剪切性能相当，但材料压缩强度在灌注工艺中大大的降低了，这是由于弯曲的纤维不能很好承受压缩应力。

## 表面涂层

预浸料叶片的生产需要紫外线稳定型模内胶衣（作为叶片表面涂层材料）或工艺涂层（作为适合表面喷漆的涂层材料）。预浸料叶片的叶前沿和叶尾沿需要粘接剂的二次绑定，在此位置在打磨后需要再次涂层，尽管紫外线稳定型胶衣可以一次性成型无需喷漆，但考虑其复杂的配方增加了产品的成本，使用工艺涂层表面打磨后喷漆的工艺更为合适。

除了考虑工艺步骤的节省和工艺时间因素，工艺涂层也会保护模具表面和延长模具寿命。

Gurit是生产和供应环氧工艺涂层（胶衣）和该产品在风能市场的领导者，风电叶片的荣誉产品CR3400普遍适用于预浸料叶片的生产。

## CR3400 工艺涂层

CR3400是为环氧型复合材料层板设计的表面涂层系统，打磨处理后可以作为喷漆的表面。CR 3400具有良好的可打磨性，也可以在脱模后直接喷漆。通过打磨可以消除模具表面的缺陷和铺层表面的印痕，获得喷漆前叶片的平滑表面。

CR3400作为模内胶衣其使用工艺和其他环氧胶衣类似。但是此产品相对同类产品具有更长的再铺层时间：在20°C下使用标准固化剂，容许长达一天的再铺层时间为叶片的制造环境提供了弹性。

属性	15°C	20°C	25°C	30°C
初始混合粘度 (cp)	7655	4780	2930	1830
容放时间 (Pot Life) – 500g 容器内混合 (hrs:mins)	-	01:00	-	00:45
抗垂度 (Sag Resistance) (µm)	550	400	280	200
表面失粘时间 (hrs:mins)	05:50	05:00	04:20	03:40
最短可再铺层时间 (hrs:mins)	61/2	24	16	12
Min. Rec. Thickness (µm)	300	300	300	300

CR3400是环氧层板的表面配套产品，兼容Gurit现有的WE91环氧树脂体系和SPRINT® 产品。更多信息可以联系Gurit的本地销售代表。

## 结构粘结剂

先进复合材料作为风电叶片原材料的应用，最重要的就是要突出叶片整合生命周期中，结构在动态载荷下的力学性能。结构长时间承受的循环载荷和恶劣气候条件下极端载荷都要求材料设计的高性能，其中包括了连接叶片各主要部件的结构粘接剂。

为了获得纯胶粘剂的最佳性能，一些方案考虑了产品的粘合度及粘接强度，基体粘合后在断裂失效前吸收冲击和变形的能力；一些方案通过研究聚合物的化学绑定机理，逾越了配方的成本界限或简化了产品的使用工艺。更多挑战在于寻找到一种适合风电叶片经济性的产品。

### Spabond 340LV

- 卓越的缝隙填充能力 - 更适合厚度不变的粘接带
- 高强度、韧度工业级结构胶 - 即使混交偏差超过了5%。
- 多种起模时间 - 三种速度的固化剂保证一定范围内工作时间的选择
- 低放热、低收缩 - 最大限度减小裂纹产生
- 高温抗性 - 80℃的工作温度

更多Spabond 340LV 的信息和优势可以在前面章节“灌注叶片用材料”中找到。

## 结构芯材

在风能市场不断成熟的今天，叶片设计对优化叶片长度的增加来带的重量增长尤为重要，仅仅使用单一的芯材产品解决现代叶片的所有需求的时代已经过去。结构芯材被应用于叶壳和叶梁剪腹板中，不同位置的承力状态要求的泡沫性能也不尽相同。所以优化叶片设计综合考虑叶片的性能和重量需要设计者开始考虑选择多种芯材产品。

### Corecell™ T型泡沫

- 稳定性 - 对热和其他化学物质的良好抗性
- 建造韧性 - 相对交联PVC和Balsa轻木更好的抗断裂能力和柔韧性
- 细密的发泡晶粒 - 低树脂吸收率，减轻总重
- 均匀性 - 较小的密度偏差
- 消除了气体溢出 - Corecell 客服了传统泡沫加热生产气体的问题
- 兼容性 - 适用聚酯、乙烯基、环氧等多种树脂系统
- 无渗透性 - Corecell的发泡机理决定不吸收任何环氧树脂
- 操作和使用 - 容易被机加工

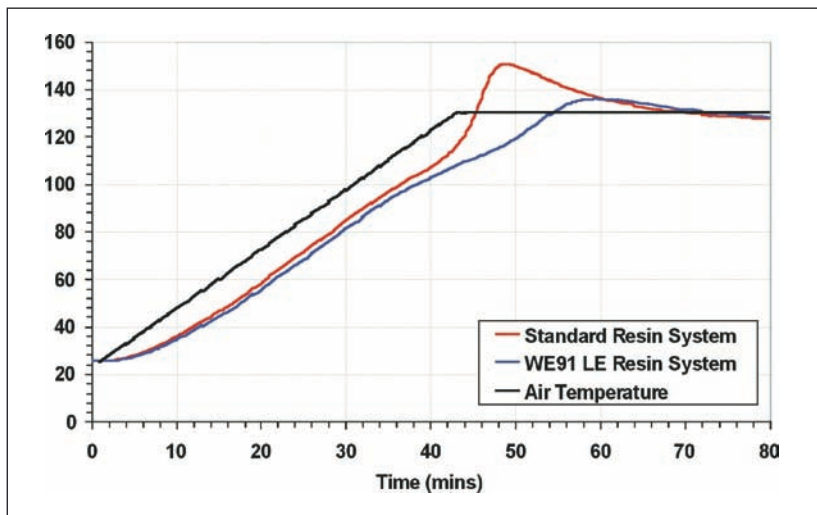
更多T-Foam 的信息和优势可以在前面章节“灌注叶片用材料”中找到。

## 先进预浸料

Gurit拥有生产和供应风电用预浸料的几十年经验和历史，这使得Gurit引领了新一代更快、更简单、更低成本的预浸料制造风电叶片的技术。这部分讲述了Gurit开发的先进预浸料在风电叶片制造业的应用。

### WE91LE

风能预浸料铺层的固化一般会在80-90° C 中温放置，等待放热峰过后才升高温度进行最终固化获得最佳的力学和热学性能。如果省略了中温固化过程，Gurit的 WE91LE预浸料相对一般产品表现出很小的集中放热现象。低放热的WE91LE 容许进一步优化固化程序和温度，减少固化时间增加生产效率。



### SPRINT®

在现代大型叶片的制造中，需要新型预浸料克服传统预浸料在厚层固化中遇到的层板质量问题（高的孔隙率）。Gurit享有专利和声誉的SPRINT® 技术将继续引领预浸料制造工艺应用于超大型厚层结构的制造。以多向纤维布和编织布为增强织物的SPRINT®，可以获得高质量（低孔隙率）的厚层结构，采用工艺和固化程序也与普通的预浸料一致。可以对SPRINT® 和预浸料铺层进行联合设计以获得高品质、高性能的铺层结构。

使用SPRINT® 带来的特别好处包括：

- 用真空袋工艺制造可获得热压模的质量效果
- 材料使用的方便性

- 对健康和安全感考虑
- 快速的铺层
- 铺层无需真空层压工艺
- 可靠性和重复性
- 卓越的固化层板质量
- 成本的降低

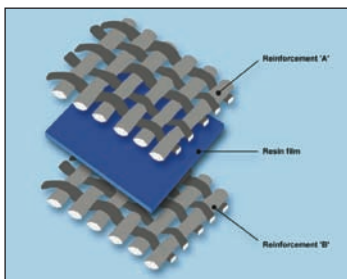


SPRINT 玻纤层板微观图片 - 0.33%的孔隙率

SPRINT® - 主要有两种形式的产品;

1. **标准型 SPRINT®** - 树脂层是夹在上下两层织布间的（可以参照右边的图示）。产品可以成卷的供应或以窄条供应（适用于叶梁缠绕工艺）。同时，产品的成卷供应可以无需表面的保护膜，以减少材料的浪费和成本。

2. **单面型 SPRINT®** - 适合克重较高多向纤维织物。采用一层树脂配一层织物，所形成的单面粘性更适合垂直面的铺层。材料特别适合于模具胶衣表面的第一层，良好的贴合性和高质量的固化表面使得胶衣层的表面打磨更加简单。



SPRINT®另一种使用场合是配合预浸料铺层获得良好的排气效果。通常叶梁盖的铺层需要几十层高克重的单向预浸料，层间的残留空气在抽真空时很难排出。如果采用每隔2,3,4层加铺一层透气性良好的SPRINT®, 厚层的最终固化质量将会得到明显提高（显著减小厚层的孔隙率）。

SPRINT® 开创了对预浸料工艺的优化改进，但不仅仅体现在提高层板的质量上。SPRINT® 不仅能够提供铺层的透气性，对模具的随形性，提高真空压实效果；它还有可以减少透气毡等消耗品的使用，SPRINT® 铺层可以使用无孔隔离膜与透气毡分开，树脂不浸润透气毡使之可以循环使用。

### Sparpreg™

风电叶片的主要承力结构来自与叶梁结构，它可以以叶梁盖的形式整合于叶壳上，也可以采用模具制造成型为叶梁盖和剪腹板联合结构。叶梁盖主要使用贯穿前后的单向纤维增强材料（碳纤维或玻纤）增加结构的整体刚度和抗弯曲能力。梁盖对单向纤维层板质量有较高要求，尤其在近叶根位置厚度可达50mm的铺层处要求质量的稳定型。综合考虑到纤维排布、树脂含量、孔隙率、反应速度、放热控制以及与剪腹板的良好连接，叶梁盖材料和成型技术成为一种挑战。叶片尺寸的增长将不可避免的增加高刚度的纤维（如碳纤维）的用量，同时需要关注纤维的准确排布和层板质量等影响叶片长期运转的关键因素。

当今叶片的制造和市场需求越来越注重质量和性能的稳定型以及整体成本的降低，通过提高关键承力部分叶梁的稳定型是非常关键的，它需要昂贵的设计方案考虑众多变量对厚板质量和性能的影响。使用Gurit 提供的良好真空铺层排气的产品和解决方案，称之为SPRINT®和Airstream，以及一种新开发的单向预浸料产品SparPreg™。该产品可以在传统的真空袋工艺下达到良好的层间抽气效果，而不需要中间真空层压工艺。该材料也可以与SPRINT 多向织物增强材料配合使用，为叶梁结构制造方案再添异彩。

Sparpreg™不仅可以作为预浸料在叶梁两制造中的解决方案，同时也可以作为灌注工艺中叶梁盖分离制造选择材料。

可以采用多种工艺技术制造叶梁：手糊成型、单向或多向纤维灌注、预浸料。叶梁作为关键部件，可以采用分离式制造方案生产高品质的结构，之后再整合在叶壳之上。制造叶梁盖的主要单向纤维增强材料，因为其紧密排布和较大厚度，纤维很难被完全浸润获得高质量的产品，随着铺层厚度的增长成品的孔隙率也会大幅增加。可以采用的解决方案是在厚层单向纤维间铺放浸润能力强的两向编织布，以增加铺层的整体浸润速度。

Sparpreg™ 提供了另一种多功能方案，既可以降低孔隙率又可以缩短单向材料的浸润时间。Sparpreg™可以用来制造叶梁盖的部件，随后可以通过粘接或灌注整合到叶壳中。

