

兆瓦级风电叶片 复合材料体系简介

株洲时代新材

冯学斌

➤ 序言

➤ 增强材料

➤ 基体材料

➤ 夹芯材料

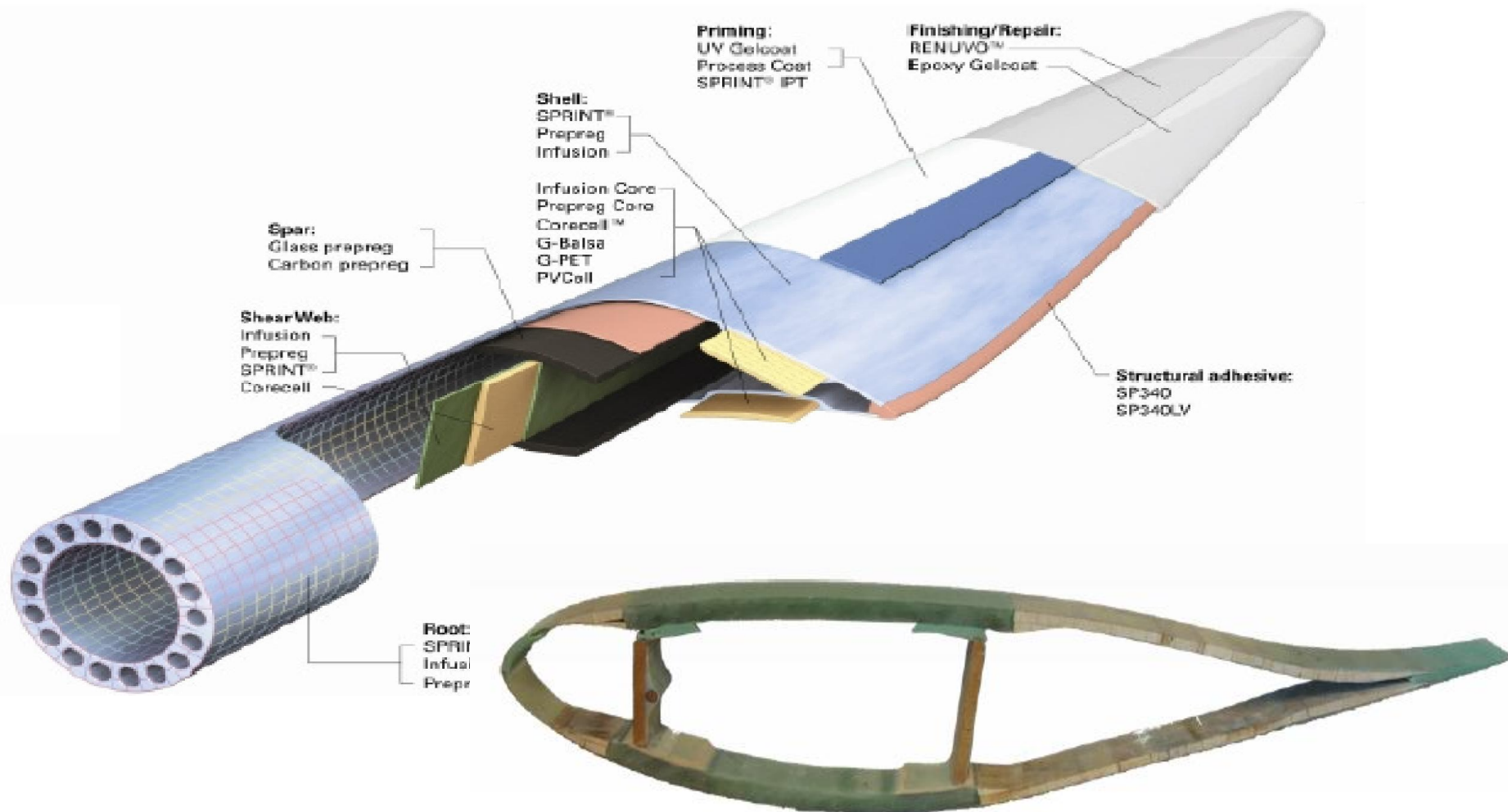
➤ 胶黏剂

➤ 结束语

序言

风电叶片是风电机组的核心部件之一，通常是先在特有的模具上分别成型叶片主梁、腹板及其他部件，然后在主模具上把两个壳体、腹板及其它部件通过结构胶粘剂胶接组装在一起，合模加压固化后制成整体叶片。目前国内以真空辅助灌注工艺为主，其主要材料为增强材料、基体材料、夹芯材料和胶黏剂。

兆瓦级风电叶片材料体系



兆瓦级风电叶片主要材料体系要求

➤ 序言

➤ 增强材料

➤ 基体材料

➤ 夹芯材料

➤ 胶黏剂

➤ 结束语

增强材料

- 增强材料主要起着承载载荷的作用，包括E- 玻璃纤维、H- 玻璃纤维、S- 玻璃纤维、碳纤维以及玄武岩纤维等新型纤维。
- E- 玻璃纤维综合性能优异、适用性强、成本适中，在风电叶片行业得到大量使用，是目前叶片主流增强材料，与许多树脂结合性能好、成型工艺匹配性优良。

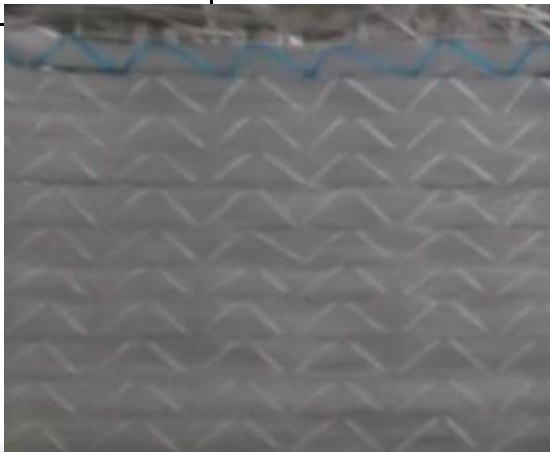
增强材料--玻璃纤维

E-玻璃纤维织物原丝基本性能要求：

- ◆ 要求为无碱玻璃纤维粗纱，符合环氧树脂体系成型要求。
- ◆ 单丝性能满足下列要求：
 - 单丝直径： ≤ 19 (μm)
 - 单丝抗拉强度： ≥ 0.4 (N/tex)
 - 单丝拉伸杨氏模量： >76 (GPa) **>72 (GPa)**
 - 断裂伸长率： $\geq 2\%$
 - 含水率： $\leq 0.2\%$
 - 可燃物含量： $0.4-0.7$ ($\%$)
 - 纤维体密度： ≤ 2.6 (g/cm^3)
 - 纤维线密度： 300、600、1200、2400 (tex)

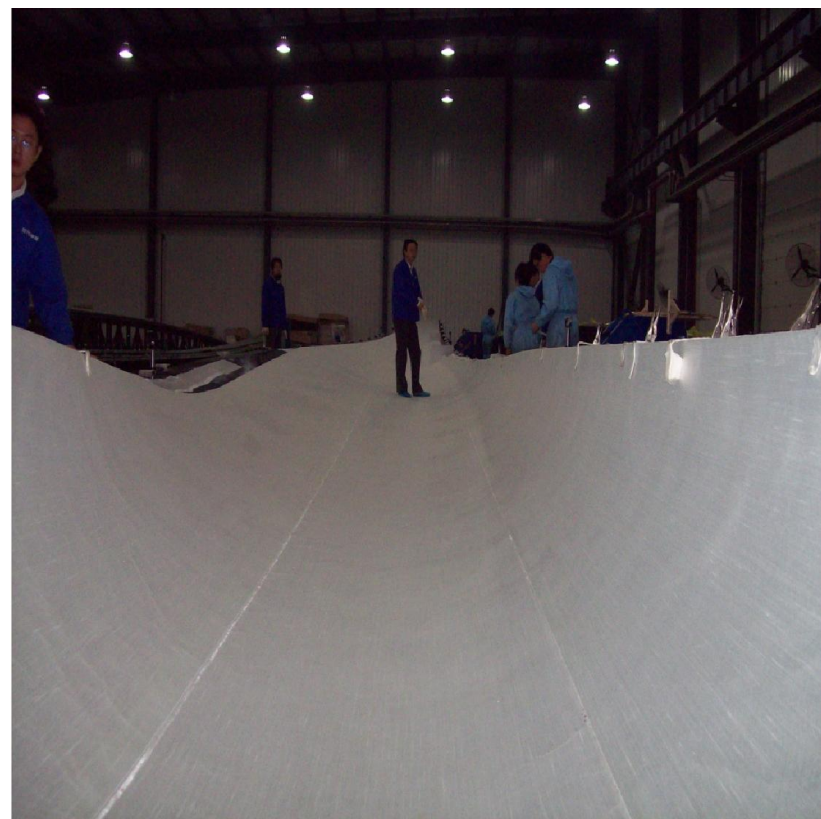
增强材料—纤维织物

目前具有单轴向、双轴向、三轴向、四轴向甚至**三维立体结构**等许多编织形式，以满足不同的需要，使灵活的结构设计得到更好的体现。织物的编织参数如下表（以单轴向织物为例）：

角度	面密度 (g/m ²)	粗纱号数 (tex)	备注
0°	1150	2400	
90°	50	≤200	
捆绑纱	8		编织方式：z型、锯齿型等 材质：PET
短切纱	50		
标准面密度：1258（±3%）g/m ² (ISO3374) 幅宽： 单卷长度： 织物无断丝、毛丝、杂质、缺丝和 丝束排列不均匀等缺陷			

增强材料—纤维织物

铺覆性：在叶片曲面上铺放玻璃纤维织物，观察其是否有褶皱、纤维是否有波折、扭结或起伏等现象，是否与模具贴合紧密。



增强材料—纤维织物

厚板灌注性能：织物的编织还要满足叶片大梁及根端厚制件模拟试验，主要是考察大梁最厚部位和根端的灌注情况。需要有良好的厚板灌注性能，保证适中的灌注时间。（织物的松紧对于工艺性能影响很大）模拟必须有良好的表观质量，不能有气泡、白丝、发热等异常现象发生。



增强材料—单轴向层压板

Material Name		Parameter
UD		Material Name
		mass per unit area
		Thickness per layer
	modulus	Ex_t
		Ex_c
		Ey_t
		Ey_c
		Ez
		Gxy
		Gyz
		Gxz
	poisson ratio	Poison xy
		Poison yz
		Poison xz
	density	Density
	fiber content	Fibre Volume Fraction V_f
		Fibre Masss Fraction W_f
	strengths	sigma x_tension
		sigma x_compression
		sigma_y_tension
		sigma_y_compression
		tau_xy
	strains	failure strain x, tension
		failure strain x, compression
		failure strain y, tension
		failure strain y, compression
		failure strain, gamma

增强材料—双轴向层压板

Material Name		Parameter
Biax		Material Name
		mass per unit area
	type_1	Thickness per layer
		mass per unit area
	type_2	Thickness per layer
		mass per unit area
	modulus	Ex_t
		EX_c
		Ey_t
		Ey_c
		Ez
		Gxy
		Gyz
		Gxz
	poisson ratio	Poison xy
		Poison yz
		Poison xz
	density	Density
	fiber content	Fibre Volume Fraction V_f
		Fibre Masss Fraction W_f
	strengths	sigma x_tension
		sigma x_compression
		sigma_y_tension
		sigma_y_compression
		tau_xy
	strains	failure strain x, tension
		failure strain x, compression
		failure strain y, tension
		failure strain y, compression
		failure strain, gamma

增强材料—三轴向层压板

Material Name		Parameter
Triax		Material Name
		mass per unit area
		Thickness per layer
	modulus	Ex_t
		Ex_c
		Ey
		Ez
		Gxy
		Gyz
		Gxz
	poisson ratio	Poison xy
		Poison yz
		Poison xz
	density	Density
	fiber content	Fibre Volume Fraction V_f
		Fibre Masss Fraction W_f
	strengths	sigma x_tension
		sigma x_compression
		sigma_y_tension
		sigma_y_compression
		tau_xy
	strains	failure strain x, tension
		failure strain x, compression
		failure strain y, tension
		failure strain y, compression
		failure strain, gamma

增强材料—发展趋势

大型叶片的开发对叶片的重量和模量提出新的要求，完全依靠传统的E-玻璃纤维已不能满足叶片发展的需求，新型的玻璃纤维和碳纤维开始应用到叶片中，同时持续改进应用技术，以满足大型叶片的开发需求。

- H和TM玻璃纤维、S- 玻璃纤维（3.0MW及以上）。
- 碳纤维的应用及相关问题的解决（5.0MW及以上）。
- 先进的纤维切割和铺放技术。
- 纤维编制工艺对叶片真空灌注工艺的影响。
- 不同编制角度对于层合板性能的影响，指导叶片设计。

增强材料—发展趋势

实现碳纤维复合材料在大型叶片上的工程应用主要面临几个问题:

- 1、成本问题
- 2、防雷问题
- 3、可靠的成型工艺
- 4、配套的基体树脂
- 5、有效的缺陷分析
- 6、整机配合开发的意愿

增强材料—发展趋势



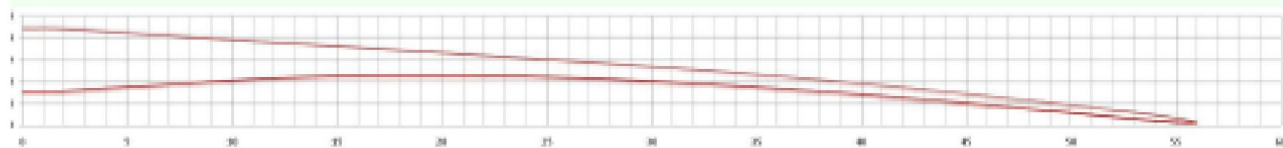
完成的2MW-56.5米碳纤维风电叶片的研制，承担的湖南省“十二五”科技重大专项“碳纤维复合材料超长风电叶片设计与制备技术”项目。该款叶片应用了碳玻混杂、碳纤维液体成型等多项新型技术，叶片重量减轻了15%，叶片载荷显著下降，发电效率进一步提升，有效解决了超低风速超长叶片刚度偏小、载荷偏大的难题。

增强材料—碳纤维叶片经济性分析

Material	E-Glass	Carbon
Process	VARTM	Prepreg
Fiber Volume Fraction	~54%	~59%
Composite density, g/cc	1.9	1.55
Tensile Modulus, E_{11} (GPa)	~42	130
Tensile Strength, UTS (MPa)*	~1000/800	~2050/1750
Tensile Strain, ϵ_{max}	1.9%	1.4%
Compressive Strength, UCS (MPa)*	~750/650	~1300/1150
Compressive Strain, ϵ_{min}	1.5%	~0.9%
Specific Modulus, E/r	20	81
SN Curve Inverse Slope, m	9	20
* First number is mean, second number is 95/5 confidence		

增强材料—碳纤维叶片经济性分析

	Chord Lengths	Airfoil Thickness	Out-of-Plane Prebend	Girder Material
Power Performance	Longer	Thinner		
Loads	Shorter			Carbon
Blade Cost	Shorter	Thicker	Large	Depends
Blade Weight	Shorter	Thicker	Large	Carbon
Deflection		Thicker		Carbon
System Dynamics			Small	Carbon
Manufacturing			Small	Carbon
Handling	Shorter		Small	Carbon



Copyright © 2011 Wetzel Engineering & Zoltek

增强材料—碳纤维叶片经济性分析

Material Usage of Carbon vs Glass <50m Blade

Blade	WEI45-2000G	WEI45-2000C	WEI50-2500G	WEI50-2500C	WEI50-3000G	WEI50-3000C
Length (m)	45.3	45.3	50.5	50.5	50.5	50.5
Rotor Diameter (m)	92.8	93	103.4	103.4	103.4	103.4
Rated Power (MW)	2.0	2.0	2.5	2.5	3.0	3.0
Shell Material	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy
Spar Cap (Girder) Material	Infused Glass	Carbon Prepreg	Infused Glass	Carbon Prepreg	Infused Glass	Carbon Prepreg
Girder Design	Box-beam (2 Web)	I-beam (1 Web)	Box-beam (2 Web)	I-beam (1 Web)	Box-beam (2 Web)	I-beam (1 Web)
Materials Mass (kg)						
Spar Cap Carbon Prepreg	0	900	0	1,150	0	1,235
Spar Cap Dry Glass + Infused Resin	2,817	0	3,487	0	4,571	0
All other glass + resin	5,859	5,405	6,216	5,847	6,490	6,121
Balsa	400	445	570	675	650	750
PVC Foam	150	150	197	115	197	115
Adhesive	230	230	247	247	247	247
Total	9,456	7,130	10,716	8,034	12,155	8,468
Costs per Blade						
Key Material Cost (\$)						
Carbon Prepreg	\$ 23.50 /kg	\$ -	\$ -	\$ 27,025	\$ -	\$ 29,023
Dry Glass	\$ 2.50 /kg	\$ 15,833	\$ 17,705	\$ 10,670	\$ 20,184	\$ 11,170
Epoxy	\$ 7.00 /kg	\$ 16,403	\$ 18,342	\$ 11,054	\$ 20,910	\$ 11,572
Balsa	\$ 15.00 /kg	\$ 6,000	\$ 8,550	\$ 10,125	\$ 9,750	\$ 11,250
PVC Foam	\$ 12.00 /kg	\$ 1,800	\$ 2,364	\$ 1,380	\$ 2,364	\$ 1,380
Adhesive	\$ 13.50 /kg	\$ 3,105	\$ 3,335	\$ 3,335	\$ 3,335	\$ 3,335
Total	\$ 43,141	\$ 52,810	\$ 50,296	\$ 63,588	\$ 56,543	\$ 67,728

25%

25%

30%

增强材料—碳纤维叶片经济性分析

Material Usage of Carbon vs Glass 57m Blade

Blade	WEIS7-3000G	WEIS7-3000G2 Low Deflection	WEIS7-3000C
Length (m)	57	57	57
Rotor Diameter (m)	115	115	115
Rated Power (MW)	~3	~3	~3
Shell Material	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy
Spar Cap (Girder) Material	Infused Glass	Infused Glass	Carbon Prepreg
Girder Design	Box-beam (2 Web)	Box-beam (2 Web)	I-beam (1 Web)
Materials Mass (kg)			
Spar Cap Carbon Prepreg	0	0	1,298
Spar Cap Dry Glass + Infused Resin	4,725	7,201	0
All other glass + resin	8,213	7,904	7,716
Balsa	875	750	926
PVC Foam	235	235	235
Adhesive	286	286	286
Total	14,334	16,376	19,461
Costs per Blade			
Key Material Cost (\$)			
Carbon Prepreg	\$ 23.50 /kg	\$ -	\$ 30,503
Dry Glass	\$ 3.00 /kg	\$ 28,332	\$ 16,896
Epoxy	\$ 7.00 /kg	\$ 24,460	\$ 14,587
Balsa	\$ 13.00 /kg	\$ 11,250	\$ 13,890
PVC Foam	\$ 12.00 /kg	\$ 2,820	\$ 2,820
Adhesive	\$ 13.50 /kg	\$ 3,861	\$ 3,861
Total	\$ 73,999	\$ 79,364	\$ 82,557

27% weight reduction
14% cost increase

For material only

27%

14%

增强材料—碳纤维叶片经济性分析

Material Usage of Carbon vs Glass 74m Blade

Blade	WE174-70000	WE174-70000	WE174-700002
Length (m)	74	74	74
Rotor Diameter (m)	153	153	153
Rated Power (MW)	7	7	7
Shell Material	E-Glass Infused with Epoxy	E-Glass Infused with Epoxy	Carbon/Glass Infused with Epoxy
Spar Cap (Gilder) Material	Infused Glass	Carbon Prepreg	Carbon Prepreg
Gilder Design	Box beam (2 Web)	I-beam (1 Web)	I-beam (1 Web)
Materials Mass (kg)			
Spar Cap Carbon Prepreg	0	3596	3952
Spar Cap Dry Glass + Infused Resin	14281	0	0
All other glass + resin	23413	23,891	18,322*
Core Material	2125	2344	1,377
Adhesives/Fiber/Paint/Mesh	920	1,040	1,040
Root Fasteners	620	460	460
Total	41,360	31,291	25,203
Costs per Blade			
Key Material Cost (\$)			
Carbon Prepreg	\$ 23.50 /kg	\$ -	\$ 75,554
Dry Glass	\$ 5.00 /kg	\$ 82,517	\$ 51,254
Epoxy	\$ 7.00 /kg	\$ 80,490	\$ 52,920
Core	\$ 15.00 /kg	\$ 23,800	\$ 26,250
Adh/FIB/Paint/Mesh	\$ 12.00 /kg	\$ 11,590	\$ 13,414
Root Fasteners	\$ 16.80 /ea	\$ 10,415	\$ 8,054
Total	\$ 208,822	\$ 227,664	\$ 239,730

This is Material Cost only

* Includes 1005kg Carbon in Carbon/Glass Hybrid Skin

24%

30%

9%

5%

增强材料—碳纤维叶片经济性分析

Material Usage of Carbon vs Glass 90m Blade			
Blade	WE90-10K-G1	WE90-10K-C	WE90-10K-C
Length (m)	90	90	90
Rotor Diameter (m)	185	185	185
Rated Power (MW)	10.0	10.0	10.0
Shell Material:	E-Glass	E-Glass	Carbon + E-Glass
	Infused with Epoxy	Infused with Epoxy	Infused with Epoxy
Spar Cap (Girder) Material	Infused Glass	Carbon Prepreg	Carbon Prepreg
Girder Design	Box-beam (2 Web)	I-beam (3 Web)	I-beam (3 Web)
Materials Mass (kg)			
Spar Cap Carbon Prepreg	0	4,500	3,850
Spar Cap Dry Glass + Infused Resin	21,150		
Shell Dry Carbon + resin			3,700
All other glass + resin	27,399	26,747	12,750
Balsa	2,600	2,700	1,950
PVC Foam	815	815	750
Adhesive	991	991	991
Total	52,955	35,753	23,991
Costs per Blade			
Key Material Cost (\$)			
Carbon Prepreg	\$ -	\$ 105,740	\$ 90,475
Dry Carbon	\$ -	\$ -	\$ 56,830
Dry Glass	\$ 106,313	\$ 58,571	\$ 27,920
Epoxy	\$ 91,783	\$ 50,566	\$ 33,076
Balsa	\$ 38,999	\$ 40,500	\$ 29,250
PVC Foam	\$ 9,776	\$ 9,776	\$ 9,000
Adhesive	\$ 13,384	\$ 13,384	\$ 13,384
Total	\$ 260,254	\$ 278,536	\$ 259,935

This is Material Cost only

Carbon Blades have less mass and cost about the same as glass blades

Glass: 53 mt
Carbon 1: 36 mt
Carbon 2*: 24 mt
* C/G Skins

32%

55%

7%

0%

Copyright © 2011 Wipac Engineering & Zorlek

兆瓦级风电叶片主要材料体系要求

➤ 序言

➤ 增强材料

➤ 基体材料

➤ 夹芯材料

➤ 胶黏剂

➤ 结束语

基体材料

基体材料在复合材料中起着粘结、支持、保护增强材料和传递应力的作用，主要包括环氧树脂、不饱和聚酯树脂和乙烯基酯树脂，直接关系到叶片的工作温度、耐环境性能及成型工艺，目前国内主要以环氧树脂为主。

基体材料

为达到叶片性能要求，提高叶片的承载能力以及满足真空灌注成型工艺的要求，叶片行业对基体材料的要求主要包括：

- 固化物力学特性
- 工艺操作特性（配比容差适宜）
- 固化反应特性
- 固化物耐热性能
- 配套层压板性能（静态性能及疲劳性能）

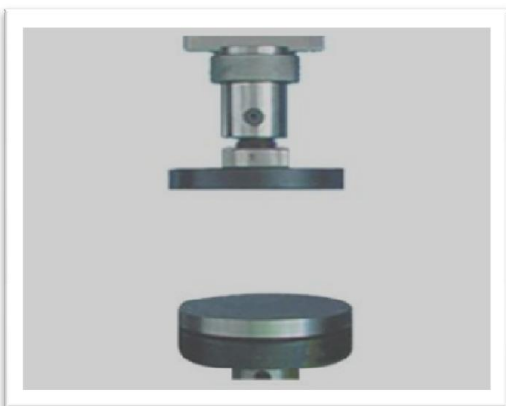
基体材料—固化物力学性能



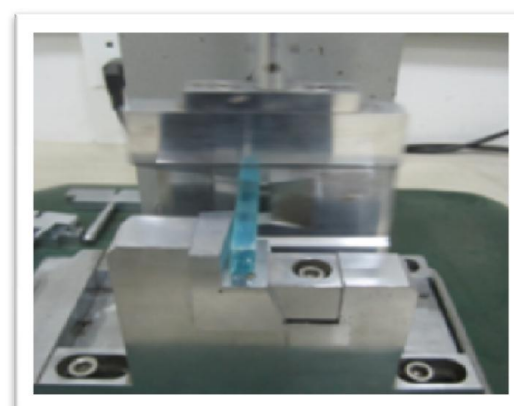
✓拉伸性能



✓弯曲性能



✓压缩性能



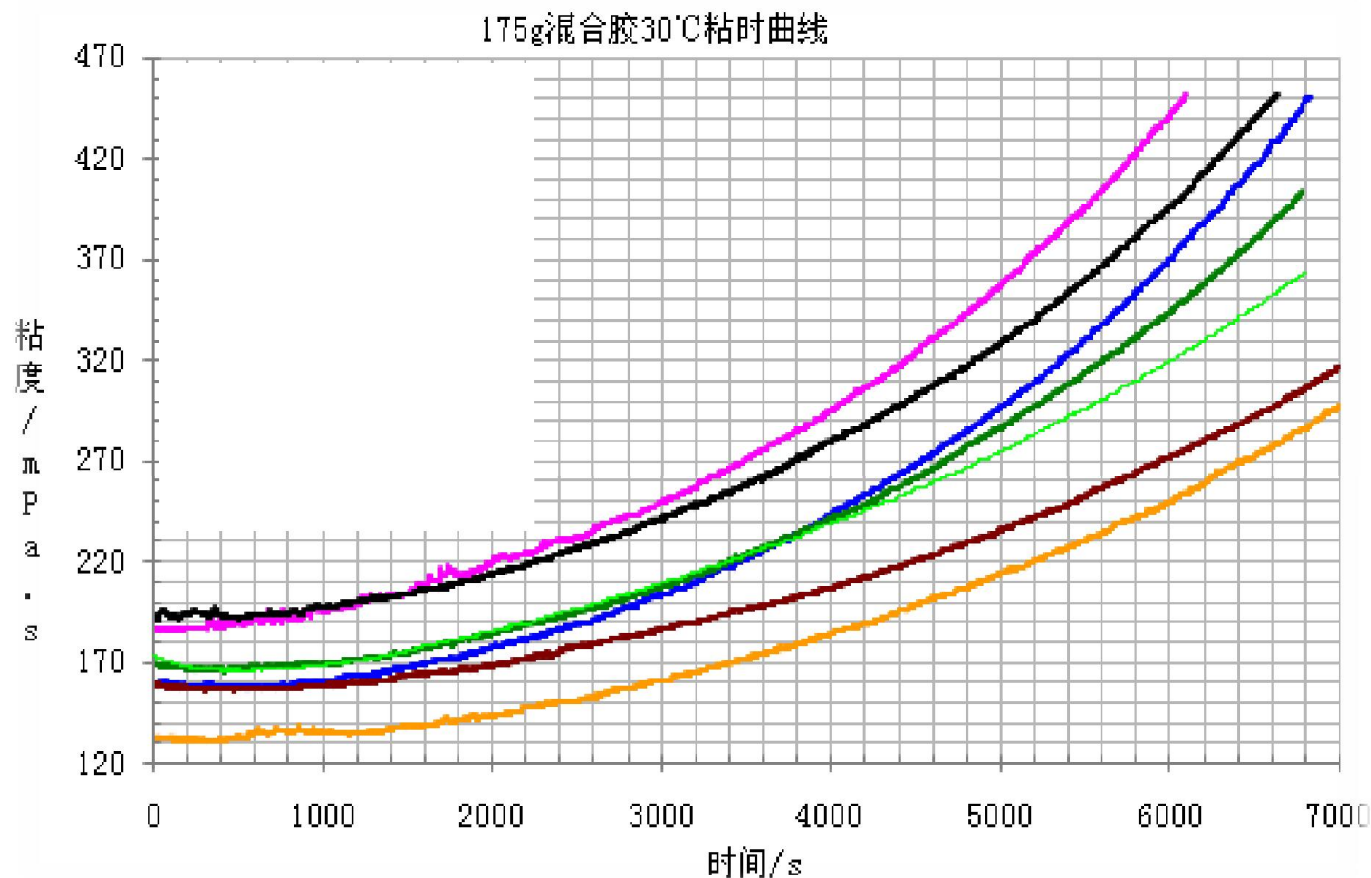
✓冲击性能

基体材料—固化物力学性能

GL要求及某进口树脂对应性能

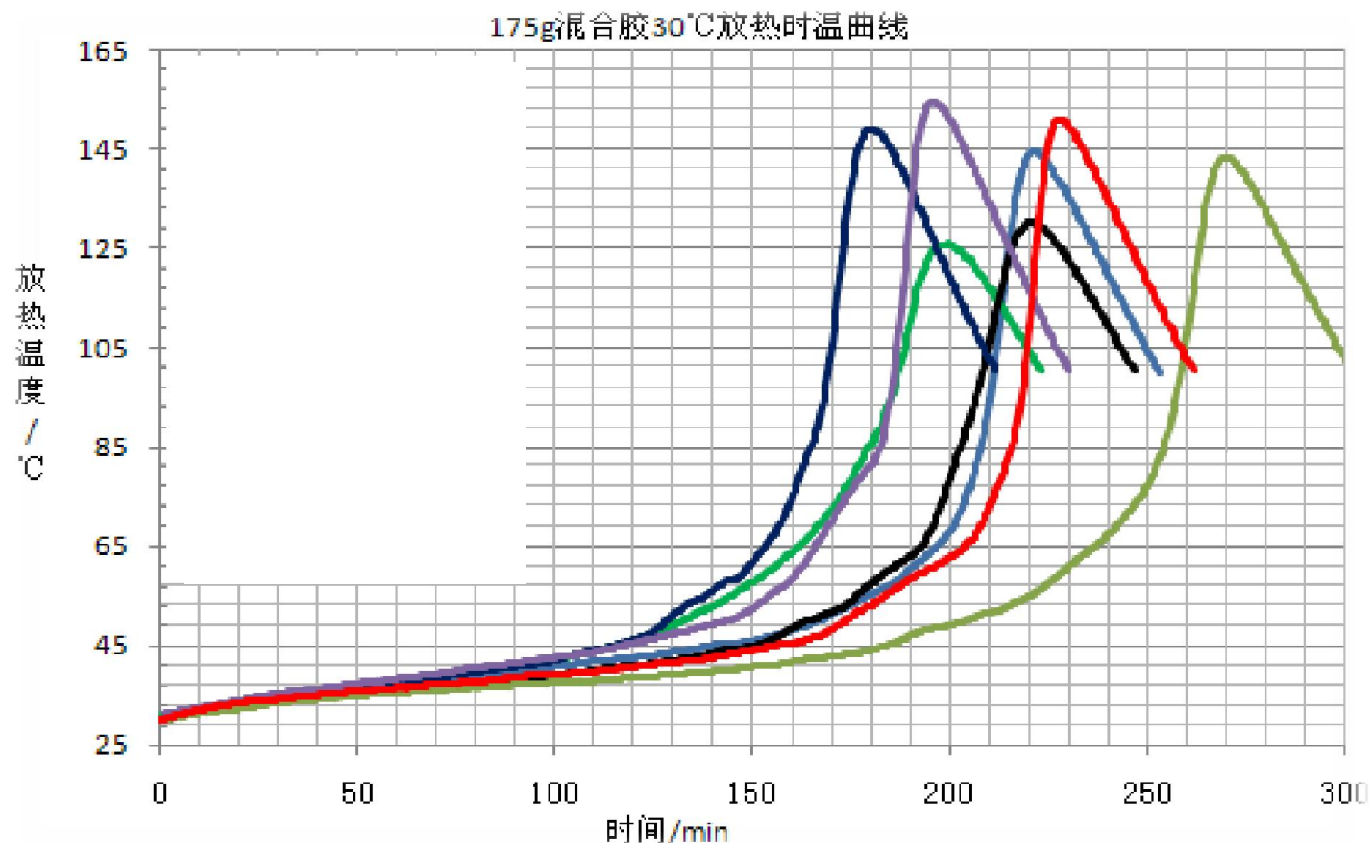
Mechanical data of unreinforced (neat) resin			GL requirements
Density	g/cm ³	1,15 - 1,20	-
Flexural strength	N/mm ²	105 - 135	> 100
Modulus of elasticity	kN/mm ²	3,0 - 3,3	>2,9
Tensile strength	N/mm ²	65 - 75	>55
Elongation ($\epsilon_{\max}$)	%	4 - 5	>2,5
Impact strength	KJ/m ²	35 - 45	>30
Water absorption at 23°C	24h %	0,10 - 0,25	-
	7 d %	0,25 - 0,45	<50
Curing: 24 at RT postcuring: 10 h at 80°C			-

基体材料—工艺操作特性



粘度要求合适：一般控制在300mPa·s以下。树脂粘度影响叶片成型时间，以及与增强材料之间的浸润性。

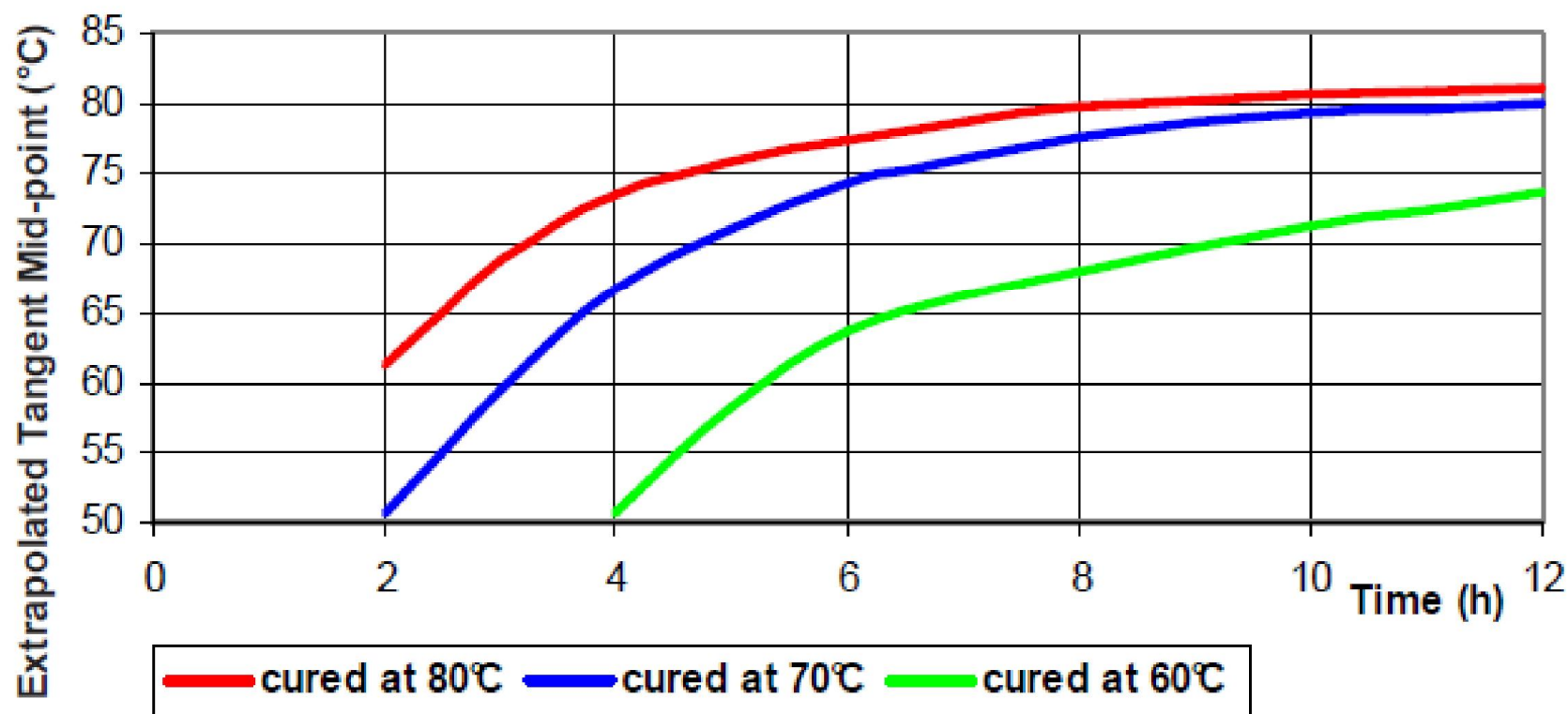
基体材料--固化反应特性



低固化放热峰温度。低的放热峰可大大减少内应力和延长模具的使用寿命，放热峰过高易引起爆聚。

基体材料—固化物耐热性能

树脂Tg点与固化时间温度的关系曲线图



玻璃化转变温度直接影响产品的使用温度。

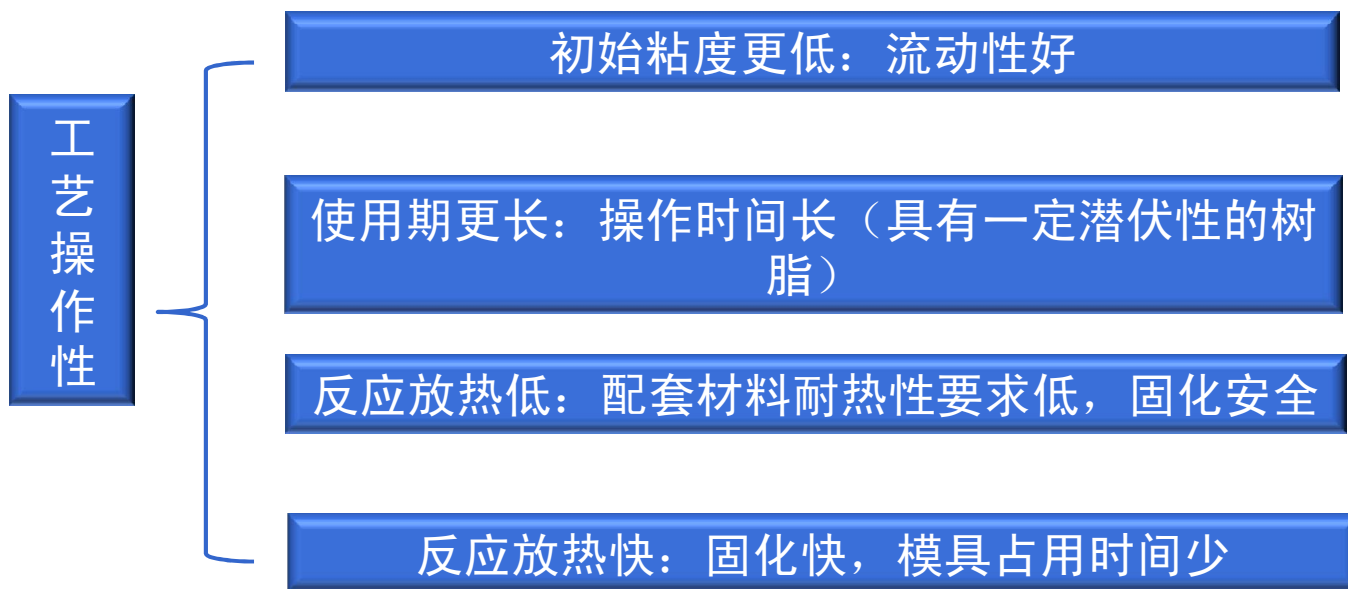
基体材料—配套层压板性能

层压板性能必须满足设计要求：

指标基本要求	层压板类型		
	UD	双轴向织物	三轴向织物
0° 拉伸强度 MPa	≥750	—	≥600
0° 拉伸模量 GPa	39	≥11.4	28
0° 拉伸延伸率 %	≥1.95	≥2.2	≥2.1
0° 压缩强度 MPa	≤550	—	≤500
0° 压缩模量 GPa	40.5~44.55	≥11.4	30~33
0° 压缩应变 %	≤1.25	≤2.5	≤1.75
90° 拉伸强度 MPa	≥40	—	—
90° 拉伸模量 GPa	6.3	—	—
90° 压缩强度 MPa	≤110	—	—
90° 压缩模量 GPa	6.3	—	—
纵横剪切强度 MPa	≥41	≥41	—
纤维质量含量/体积含量 %	72/53	70/50	71/52

基体材料—发展趋势

未来的叶片更大更长，根部和大梁越来越厚。要求灌注树脂在满足基本热性能和机械性能的前提下，对工艺性能持续改进，以低成本高性能满足大叶片的生产要求。



基体材料—不饱和型 VS 环氧型

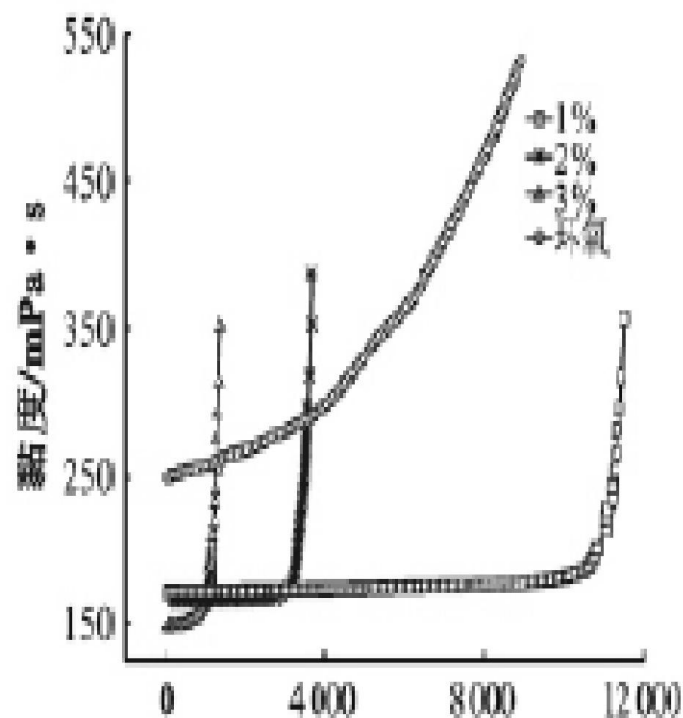
引发剂质量分数/%	1	2	3	环氧树脂
拉伸强度/MPa	48	50	45	68
断裂伸长率/%	2.42	2.36	2.46	8.71
弯曲强度/MPa	116	120	117	103
抗压强度/MPa	118	121	120	82

两种树脂的基本力学性能对比：不饱和聚酯性能脆性更大。固化收缩明显。

不饱和聚酯树脂可以通过加入引发剂的量来控制产品的固化时间，而环氧树脂并不具备这样的条件。

基体材料—不饱和型 VS 环氧型

- 初始粘度：不饱和聚酯树脂低于环氧树脂
- 适用期：不饱和聚酯树脂适用期可调，且在适用期内粘度变化不明显，树脂初期反应完成后黏度突然升高。
- 根部的固化收缩问题，引发剂用量控制，环境问题。



两种树脂的基本工艺性能对比

兆瓦级风电叶片主要材料体系要求

➤ 序言

➤ 增强材料

➤ 基体材料

➤ 夹芯材料

➤ 胶黏剂

➤ 结束语

夹芯材料

- 芯材是叶片的关键材料之一，在叶片的前缘、后缘以及剪切腹板等部位，一般采用夹层结构来增加结构刚度，防止局部失稳，提高整个叶片的抗载荷能力。叶片常用芯材为PVC 泡沫和Balsa。

夹芯材料—PVC泡沫

■ PVC泡沫的本体性能

	材料	密度 kg/m ³	吸水率 vol-%	剪切模量 MPa	剪切强度 MPa	剪切应 变 %	压缩强 度 MPa	压缩模 量 MPa
要求	PVC60	60	<2	>15	>0.6	>4	>0.65	>48

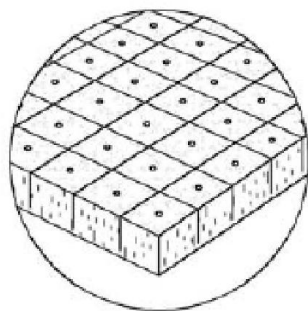
夹芯材料—BALSA 木

■ BALSA木的本体性能

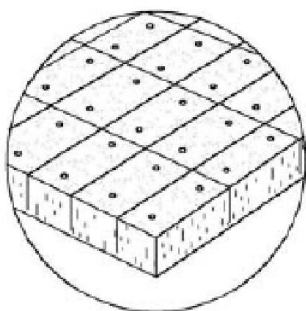
	密度 kg/m ³	含水率 %	0° 压缩 强度 MPa	0° 压缩 模量 MPa	90° 压缩 强度 MPa	90° 压缩 模量 MPa	断裂剪 切 应力 MPa	断裂剪 切应变 %	剪切 模量 MPa
要求	150	≤12	>5	>2275	>0.4	>35	>1.1	>1.5	>105

夹芯材料—工艺导流技术

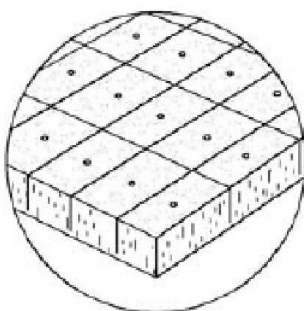
- 夹芯材料不同的开槽打孔方式有不同的导流效果



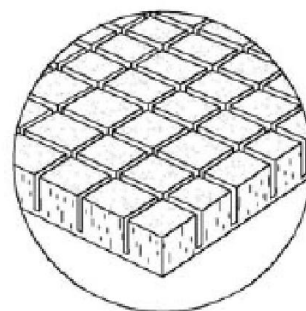
1"X1"小槽打孔板



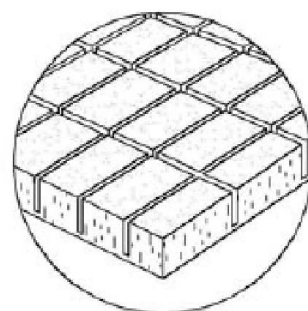
1"x2"小槽打孔板



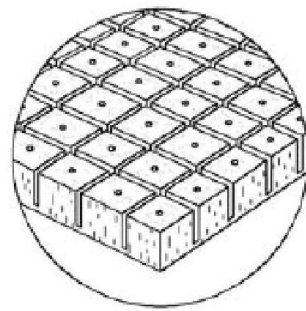
1"x2"小槽单孔板



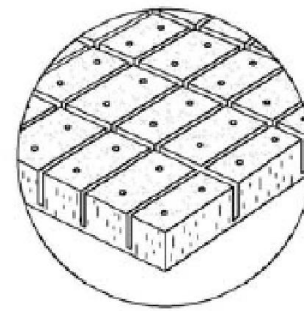
1"X1"大槽板



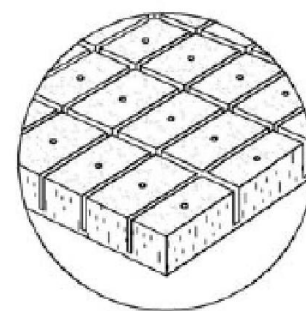
1"x2"大槽板



1"X1"大槽打孔板



1"x2"大槽打孔板



1"x2"大槽单孔板

夹芯材料—工艺导流技术

使用过程中芯材上下表面
切槽为树脂流动通道：

- 泡沫芯材区域不需铺设隔离膜和导流网，辅材用量少；
- 泡沫芯材区域辅材铺设时间短，效率高；
- 自导流芯材上下表面胶液流动均匀，灌注质量好；
- 槽孔体积小，芯材含胶量少；
- 脱模时间短，效率高；

(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102350752 A

(43) 申请公布日 2012.02.15

(21) 申请号 201110259273.4

(22) 申请日 2011.09.05

(71) 申请人 株洲时代新材料科技股份有限公司
地址 412007 湖南省株洲市天元区海天路
18 号

(72) 发明人 梁自禄 王学花 陈煌 路忠林
王树惠

(74) 专利代理机构 上海硕力知识产权代理事务
所 31251
代理人 王法男

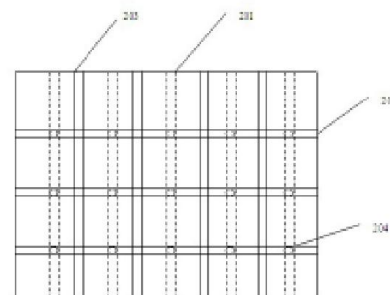
(51) Int. Cl.
B29C 33/00 (2006.01)
B29C 70/36 (2006.01)

权利要求书 1 页 说明书 2 页 附图 2 页

(54) 发明名称
一种自导流型芯材及其加工方法

(57) 摘要

本发明公开了一种自导流型芯材及其加工方法，所述芯材为双面切槽，上表面根据芯材厚度纵向切槽；下表面根据芯材厚度横向切槽且纵向加浅槽，此加工方法的芯材可广泛使用于平面模腔和曲面模腔。适合于真空辅助模塑成型等复合材料成型工艺，并且在材料成型过程中可不铺设导流介质，在节省材料的同时还减少了因辅助材料吸收树脂而产生的胶液浪费。



夹芯材料—发展趋势

PVC泡沫的发展

随着叶片发展，夹芯材料将朝着更高密度、更大厚度方向发展。

同时要求提高泡沫的工艺耐热温度，避免因槽、缝和孔中吸入大量

纯树脂集中放热导致受热变形变色。



PVC泡沫的发展

- 1、 pet, ps, pmi, san等新材料的开发应用
- 2、 3D织物与泡沫结合的复合夹心材料体系，性能可以通过织物设计。
- 3、 全PVC及全balsa结构设计
- 4、 开槽打夹心孔层合板性能研究。

夹芯材料—发展趋势

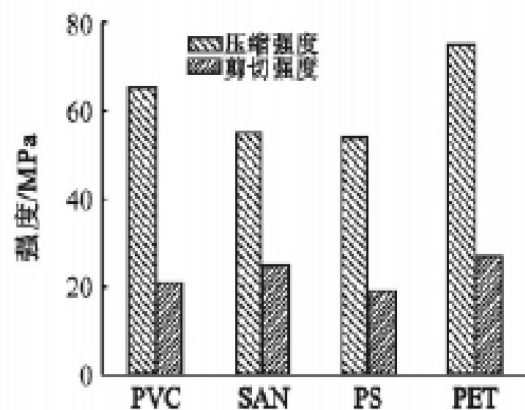
不断涌现的不同材质新泡沫

- PET泡沫。属于热塑性泡沫，生产工艺为挤出发泡，其耐热性好，成本效益好，可为风电叶片提供有益的物理性能，并且可以回收利用。
- SAN 泡沫。属于热固性泡沫，由Gurit公司生产的Corecell T400 型号泡沫密度和本体力学性能与密度为 60 kg/m^3 的 PVC 泡沫十分接近，且具有较好的耐热性。
- PS泡沫。属于热塑性泡沫，目前主要是陶氏公司推出的COMPAXX 700-X 和 COMPAXX900-X 两款型号的泡沫。

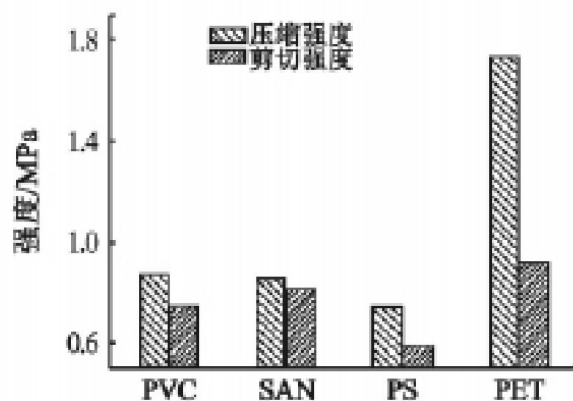
夹芯材料—发展趋势

不断涌现的不同材质新泡沫

样品	PVC	SAN	PS	PET
公司名称	Diab	Gurit	Dow	Gurit
泡沫型号	Divinycell H60	CORECELL T400	COMPAXX 700	TSPET000114C-D
密度 /kg · m ⁻³	62	73	50	115



几种泡沫压缩模量和剪切模量



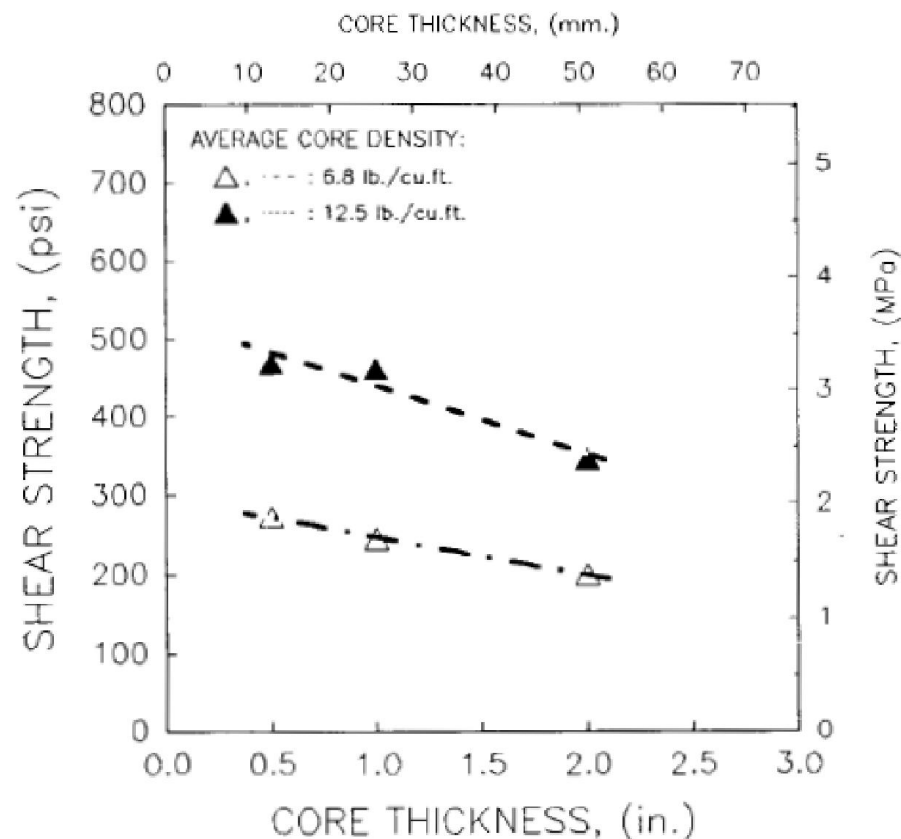
几种泡沫压缩强度和剪切强度

密度较大的 PET 泡沫强度和模量均高于其他三种泡沫，而 PS 泡沫由于密度较低在力学性能上也低于其他三种泡沫，PVC 泡沫和 SAN 泡沫的性能居中。

夹芯材料—发展趋势

BALSA木的发展

- 更厚BALSA的应用限制：有测试数据表明，当BALSA厚度大于50mm时，其剪切强度下降迅速。



Shear strength vs. thickness for end-grain balsa, ASTM C393 flexural methods.

■ 5.8lb./cu.ft=92.8Kg/m³ 12.5lb./cu.ft=200Kg/m³

兆瓦级风电叶片主要材料体系要求

➤ 序言

➤ 增强材料

➤ 基体材料

➤ 夹芯材料

➤ 胶黏剂

➤ 结束语

胶黏剂

目前叶片多采用两个半模胶接合模而成，胶粘剂是叶片的重要结构材料，直接关系到叶片的强度和刚度，要求胶粘剂具有较高的强度、良好的韧性和良好的操作工艺性。叶片用胶粘剂有环氧胶粘剂和聚氨酯胶粘剂，目前以环氧胶粘剂为主。

◆ 环氧结构胶一般特性

◆ 高剪切强度

对风力叶片材料出色的粘接效果

◆ 出色的机械性能

高拉伸模量（刚度）、 高极限抗拉强度

◆ 优越的高温性能

固化后的起点 $T_g > 65^{\circ}\text{C}$

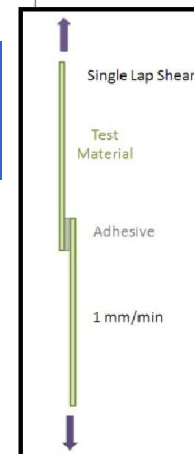
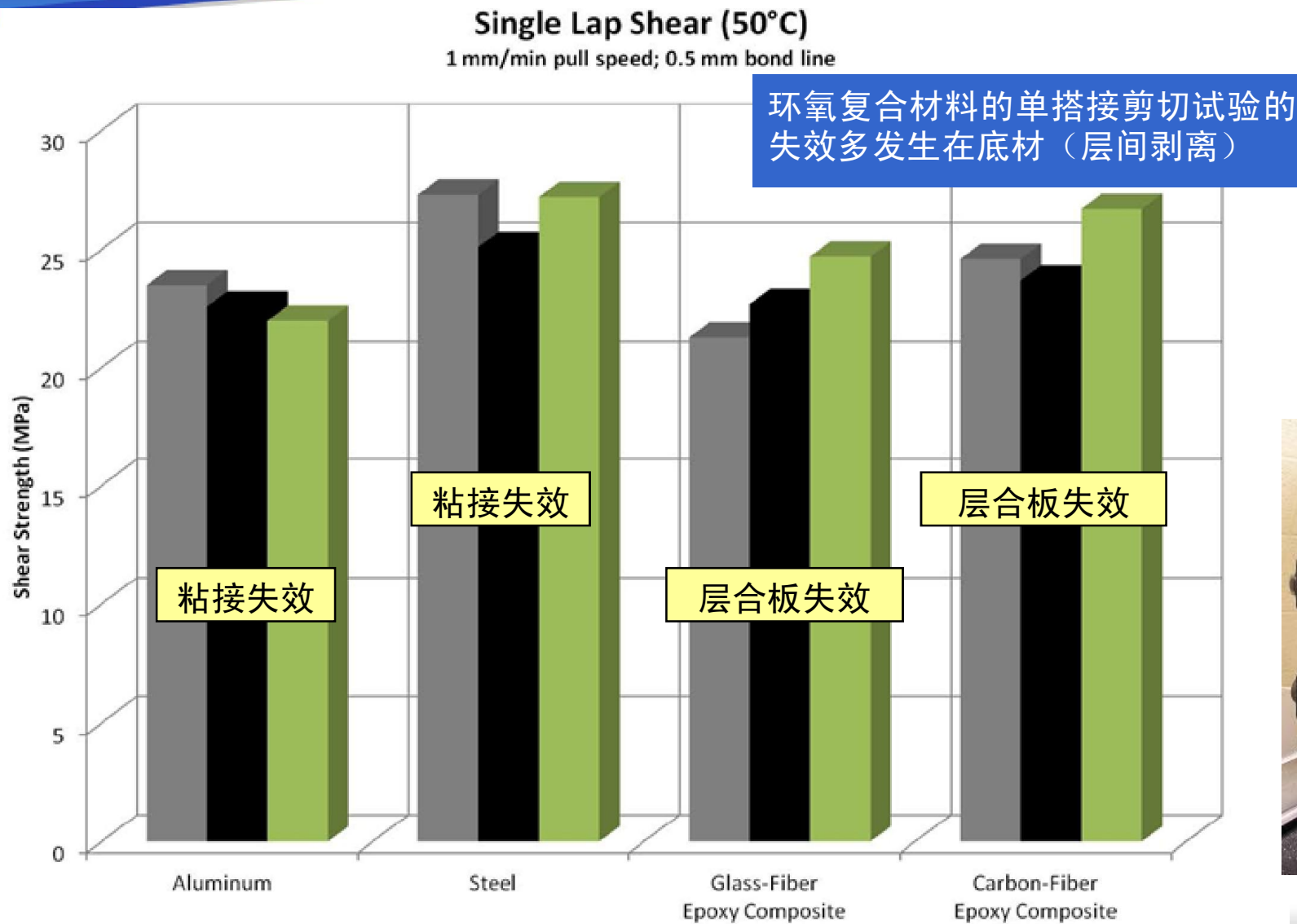
◆ 平缓的放热曲线和粘接温度

◆ 宽的配比容忍度

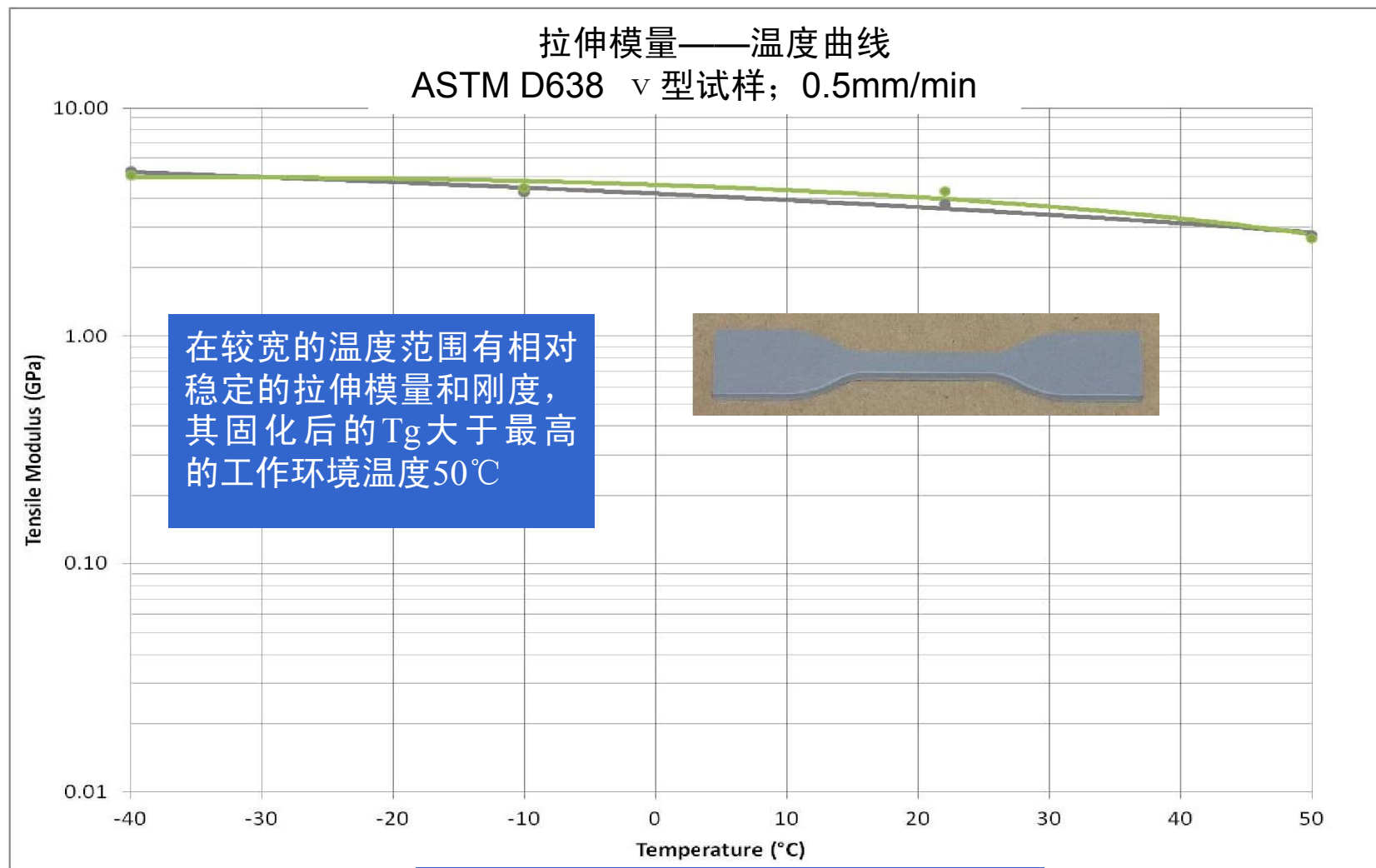
◆ 低得固化线性收缩率

◆ 出色的耐候性

胶黏剂—剪切强度

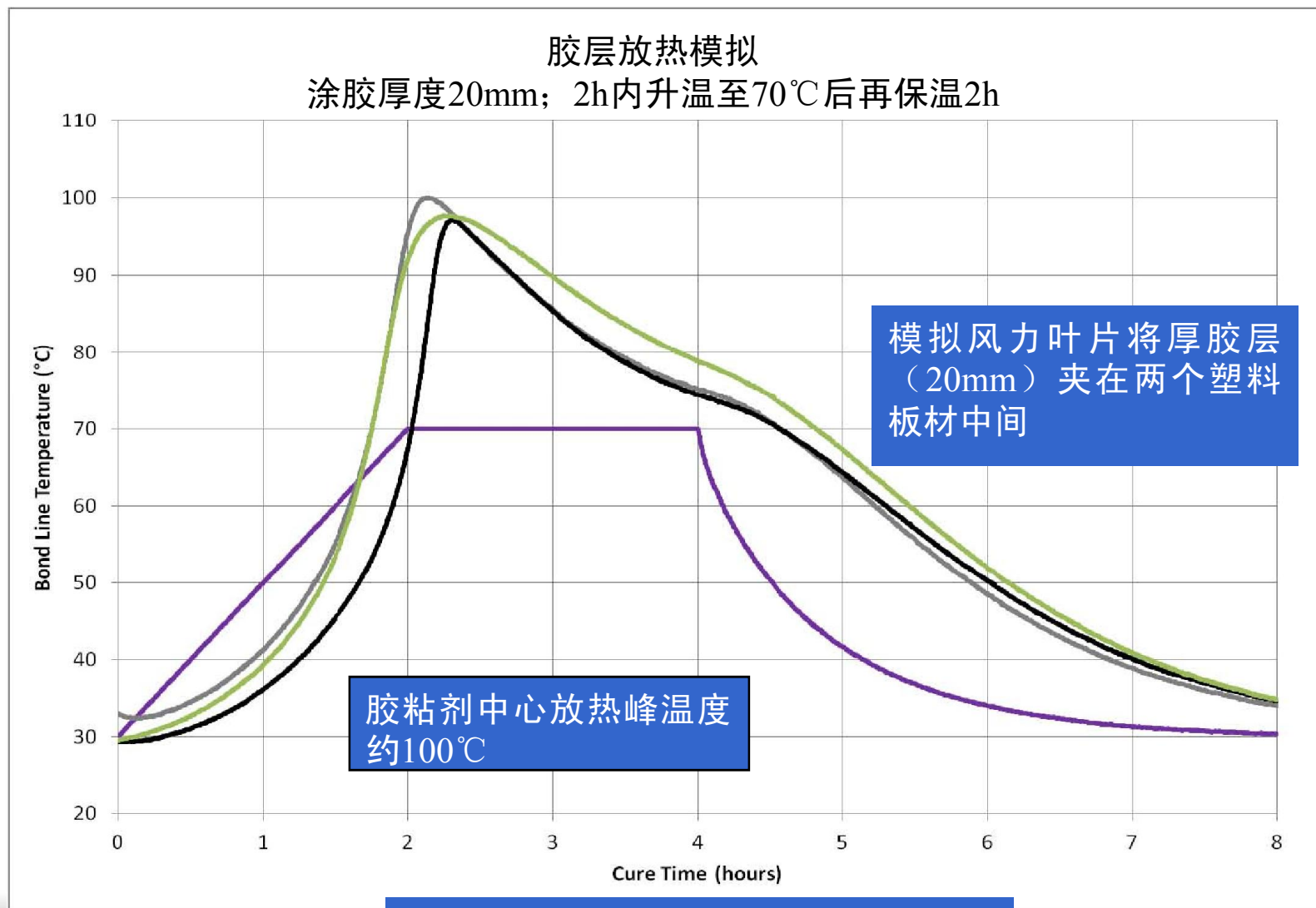


胶黏剂—拉伸性能



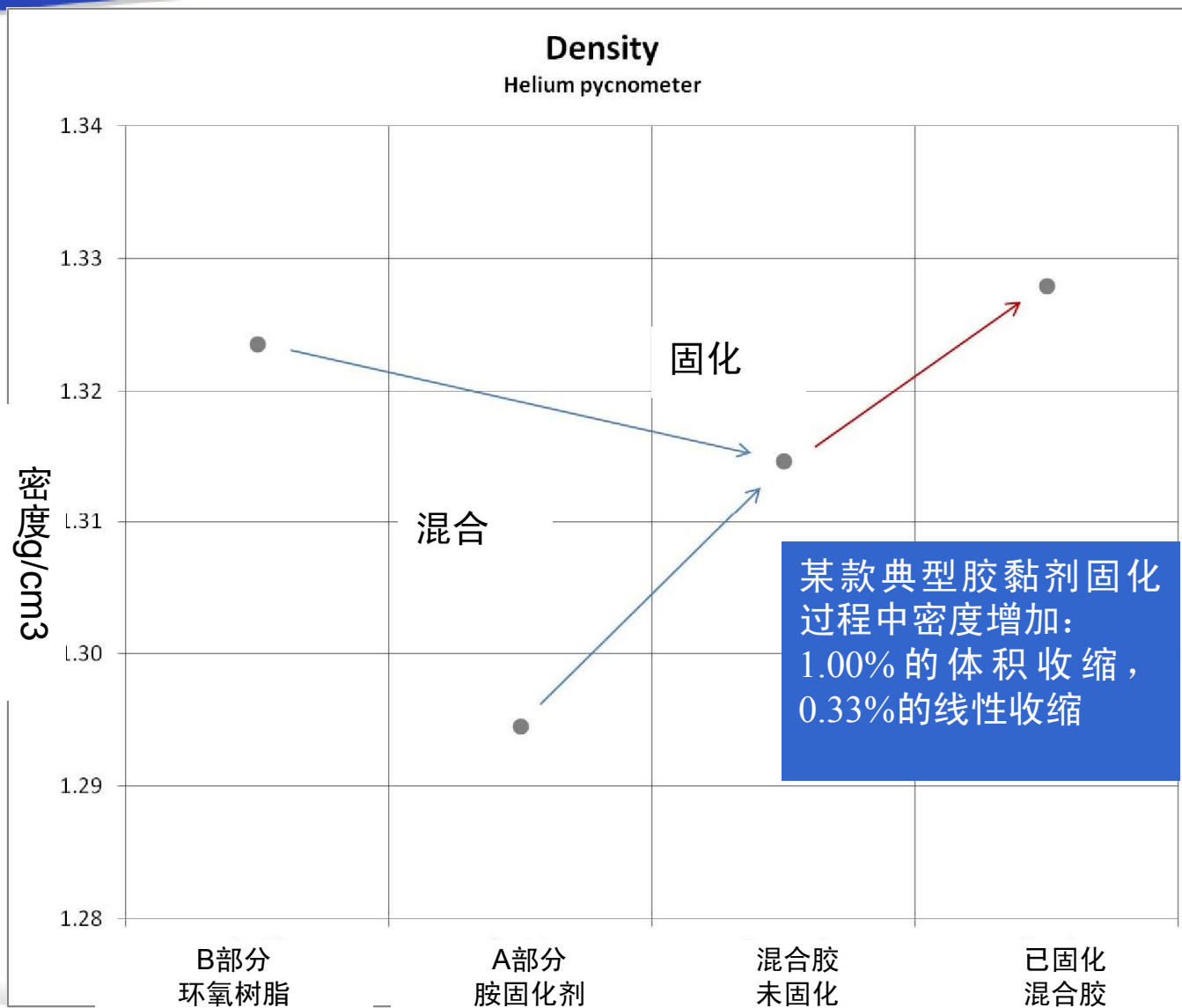
几款典型环氧胶黏剂的拉伸性能实验

胶黏剂—胶层温度



几款典型环氧胶黏剂的模拟放热实验

胶黏剂—固化收缩



胶黏剂—发展趋势

未来的叶片更大更长，叶片粘接区域也越来越长，单支叶片粘接区域刮涂操作时间越来越长，要求胶黏剂的适用期更长。

兆瓦级风电叶片主要材料体系要求

- 序言
- 增强材料
- 基体材料
- 夹芯材料
- 胶黏剂
- 结束语

结束语

随着大型叶片的开发，对材料性能要求越来越高，其相应的技术指标也相应提高，**要不断研究和完善各种材料的性能评估，充分了解各种材料的性能参数。寻求综合性能优异的材料，推动新型叶片的开发，**更好地把材料的性能发挥到最大程度，满足风力机复合材料叶片低成本、轻量化、质量稳定性的需求。

谢谢!

