http://pmse.scu.edu.cn

风电叶片夹芯复合材料的结构设计与性能关系

羊森林[1,2]，贾德壮[1]，李 磊[1]，陈政元[1]，徐家壮[1]，钟淦基[1]
（1. 四川大学 高分子科学与工程学院，四川 成都 610065；2. 东方电气风电股份有限公司，四川 德阳 618000）

摘要：文中研究了风电叶片夹芯复合材料的芯材设计参数（材质、密度和开槽方式）与其力学性能的关系。研究发现，聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）和聚氯乙烯（PVC）发泡芯材的泡孔结构存在显著差异，PET芯材泡孔壁呈规整结构，而PVC芯材泡孔壁含有微孔结构。在力学性能方面，PET芯材表现出较高的强度和模量，PVC芯材则具有较高的韧性。对于PET芯材，密度增加导致力学强度和模量提高，但韧性有所降低。文中还比较了不同的开槽方式对夹芯复合材料四点弯曲性能的影响，结果表明，上表面十字深槽、下表面一字浅槽的开槽方式可能有利于提高夹芯复合材料弯曲过程中的承受载荷。值得注意的是，PVC芯材制备的夹芯复合结构在四点弯曲测试中展现出优异的综合性能，这可能源于PVC芯材的韧性以及加强筋的增强效果。此外，PVC芯材泡孔壁上的微孔结构可能促进了灌注过程中其与环氧树脂的耦合作用，进一步改善了复合材料的性能。研究结果为优化风电叶片夹芯复合材料的结构设计提供了理论参考。

关键词：夹芯复合结构；风电叶片；发泡芯材；弯曲性能
中图分类号：TM315 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）11-0119-08

风电叶片是风力发电机组的关键零部件，起到捕捉风能的作用。在风电叶片设计时，为了降低叶片整体的质量，其壳体一般采用夹芯复合结构，该结构具有比强度和比刚度高、轻量化，且经过合理设计后能够显著提高结构效率、降低结构质量等优点[1,2]，由上下2层蒙皮（玻璃纤维增强环氧树脂）和轻质泡沫芯材构成[3]。其中，轻质泡沫芯材在叶片结构中用以保证稳定性、满足刚度性能要求、降低叶片质量[4]，而夹芯结构可将叶片所受剪切力从表层向内部传递，进而提高叶片的承载能力。但风电叶片在服役期间会受到复杂交变载荷及严苛环境的考验。在实际运行过程中的拉压等交变载荷会对夹芯结构造成疲劳损伤[5,6]。芯材密度、材质及开槽加工方式均会对夹芯复合材料结构的性能产生显著影响。因此，对夹芯及其复合材料的力学性能评估，并分析不同夹芯结构的静态弯曲破坏机制对风电叶片的夹芯结构设计具有十分重要的意义[7]。

目前，风电叶片芯材通常选用Balsa木和高分子发泡芯材。而高分子发泡芯材一般选用聚氯乙烯（PVC）泡沫[8]，铺放玻璃纤维布蒙皮后，再通过灌注环氧树脂固化成型为夹芯复合材料，以进一步满足力学性能的要求。但环氧树脂必须经过高温固化，温度一般要升到70 ℃以上才能达到强度设计要求。同时，环氧树脂材料固化过程中还会释放出热量，导致温度进一步上升（局部可达到100 ℃及以上）。因此，灌注工艺对PVC泡沫的耐温性提出了较高的要求[9]。聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）作为使用量最大的工程塑料，具有可塑性强、加工方便、可回收、成本较低的优点，近年来逐步应用于风电叶片中[10,11]。而且PET芯材具有良好的耐热性，可以解决在灌注过程中PVC耐温性不足的问题。另外，欧洲化学品管理局发布的一项调查结果显示，PVC及其添加剂（如增塑剂）可能会对人类健康和环境造成危害，这将限制PVC的生产和应用。而PET的循环

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0211
收稿日期：2024-04-18
基金项目：东方电气-四川大学联合攻关项目（32H0646）；国家自然科学基金资助项目（U23A20583）
通讯联系人：钟淦基，主要从事高分子材料加工研究，E-mail: ganji.zhong@scu.edu.cn

回收性能较好，在解决PVC泡沫环保问题时表现出优异的潜力[12,13]。

但目前芯材的设计参数，包括芯材材质、密度和开槽方式，对风电叶片夹芯复合材料的结构与性能的影响缺乏系统研究。因此，本文从具有不同发泡密度的PET芯材和PVC芯材的结构与性能关系出发，探究了不同芯材密度及开槽加工方式对夹芯复合材料弯曲性能的影响。本文得到的具有不同设计参数芯材及其制备的夹芯复合材料的结构与性能特点的关系，将为风电叶片夹芯复合材料结构设计与性能优化提供重要的理论依据。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

发泡密度为100 kg/m^3，130 kg/m^3，150 kg/m^{3}和230 kg/m^{3}的PET芯材及发泡密度为60 kg/m^{3}的PVC芯材由东方电气风电股份有限公司提供；夹芯复合结构灌注用环氧树脂型号为DQ230E，环氧固化剂型号为DQ234H，均由四川东树新材料有限公司提供。铺层所用织物为面积质量808 g/m^{2}的EBX808(+45/-45)双轴织物。PET芯材样品标记为PETx，其中x代表芯材的密度，单位kg/m^3；PVC芯材样品标记为PVCx，其中x代表芯材的密度，单位kg/m^3。

1.2 夹芯复合材料的制备

夹芯复合材料的环氧灌注过程控制环境温度在22~30 ℃进行。制备过程的铺层设置如Fig.1所示。在导流网上依次铺上隔离膜、脱模布、2层EBX808织物(+45/－45)、泡沫芯材、2层EBX808织物(+45/－45)、脱模布、隔离膜、导流网。环氧树脂的灌注自一侧向另一侧进行，灌注管路和抽气管路均不与铺层直接接触。灌注所用环氧树脂DQ230E与环氧固化剂DQ234H的配比为100:28。灌注过程中保持气压低于5 kPa，在50 ℃预固化6 h后，在

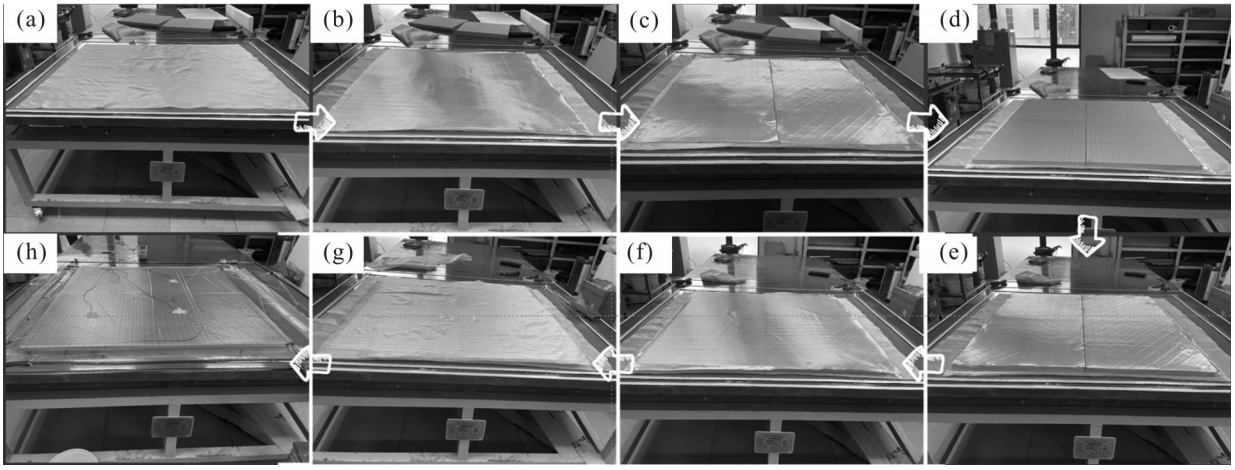


Fig. 1 Layer setup for the epoxy infusion process of sandwich composite products: (a) isolation membrane; (b) release fabric; (c) double-layer ebx808 fabric; (d) core materials; (e) double-layer EBX808 fabric; (f) release fabric; (g) isolation membrane; (h) monitoring of curing temperature

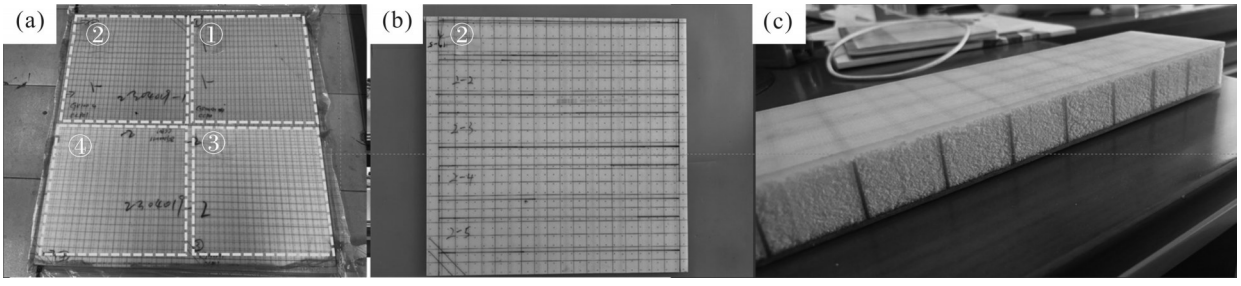


Fig. 2 Photographs of the sandwich composite products: (a) after infusing with epoxy resin and reinforcing ribs, four regions are formed as parallel controls; (b) each region after cutting; (c) sandwich composites samples for four-point bending experiments

75 ℃后固化8 h,得到如Fig.2所示的夹芯复合材料,分为4个区域用于后续平行实验以表征灌注的均匀性,并将夹芯复合材料裁切为长条形用于疲劳实验表征。

1.3　测试与表征

1.3.1　*光学显微镜分析*:取芯材样品于载物台上,利用外光源照射样品表面,通过配备的MicroPublisher 3.3 RTV CCD照相机的光学显微镜(OM,日本奥林匹斯)进行芯材泡孔结构观察。

1.3.2　*扫描电子显微镜分析*:将芯材浸入液氮中充分冷却1 h后进行脆断。对脆断表面进行喷金处理后,采用扫描电子显微镜(FE- SEM,Nova NanoSEM450,美国FEI)在5 kV的加速电压下观察芯材的泡孔结构。利用Nano Measurer v1.2.5软件进行统计,得到不同芯材泡孔孔径及孔壁尺寸分布。

1.3.3　*差示扫描量热分析*:芯材的热力学行为通过Q2000差示扫描量热仪(DSC,美国TA公司)表征。取4~5 mg样品,以10 ℃/min的升温速率从50 ℃升温至300 ℃,得到不同发泡芯材的热流曲线。为避免样品发生降解,实验在氮气氛围中进行。PET芯材的结晶度(X_c)按照式(1)计算

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0} \tag{1}$$

式中:ΔH_m——PET的熔融焓;ΔH_{cc}——冷结晶焓;ΔH_m^0——PET在100%结晶时的标准熔融热焓(140.1 J/g)[14]。

1.3.4　*力学性能*:芯材的力学性能参照测试标准ISO 845:2006进行。拉伸性能、剪切性能及压缩性能均在UTM5105X电子万能试验机(深圳三思纵横科技股份有限公司)上进行;拉伸性能测试及压缩性能测试的应变通过YYU-5/25电子引伸计(济南纳克试验设备有限公司)进行测量;剪切性能测试的应变通过瑞士Sylvac数显千分表(Sylvac SA,瑞士)表征。试验温度为23 ℃。拉伸速率设置为0.5 mm/min,标距设置为25 mm;剪切速率设置为1 mm/min,标距设置为25 mm;压缩速率设置为5 mm/min,标距设置为25 mm。

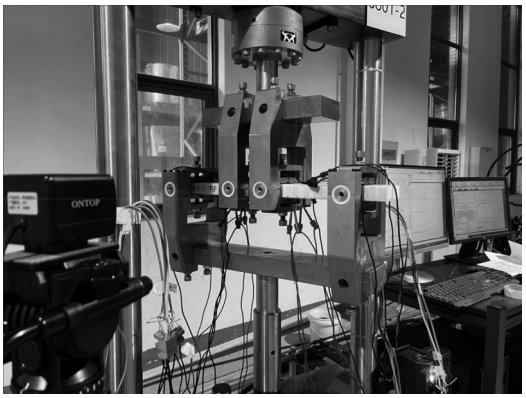


Fig. 3　Setup of four-point bending performance measurement for sandwich composites

夹芯复合结构的四点弯曲性能在自行搭建的设备上(如Fig.3)按照ASTM C393标准进行表征。测试条件为上跨距82 mm,下跨距440 mm,测试速度6 mm/min。

2　结果与讨论

2.1　发泡芯材的结构特点

2.1.1　*发泡芯材的泡孔结构观察*:通过光学显微镜观察泡孔结构,其结果如Fig.4所示。密度较小的PVC60相较于密度较大的PET100在视野内表现出

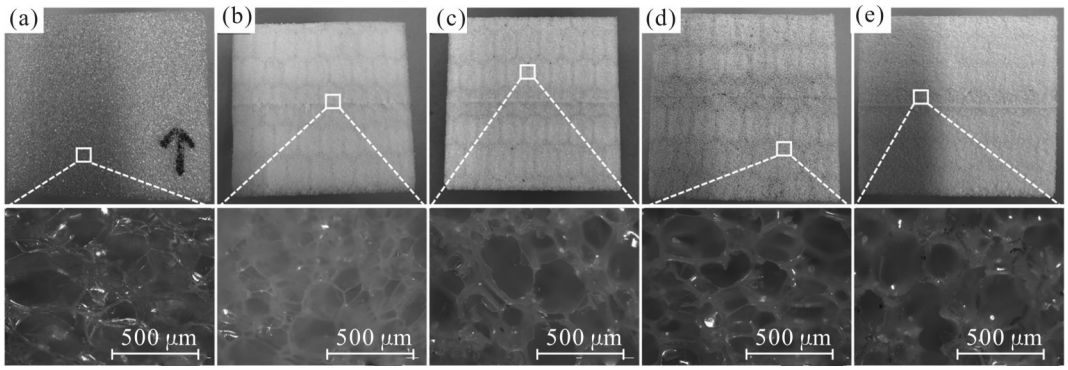


Fig. 4　Digital and OM photographs of cellular structure of core with different materials and foaming densities: (a) PVC60; (b) PET100; (c) PET130; (d) PET150; (e) PET230

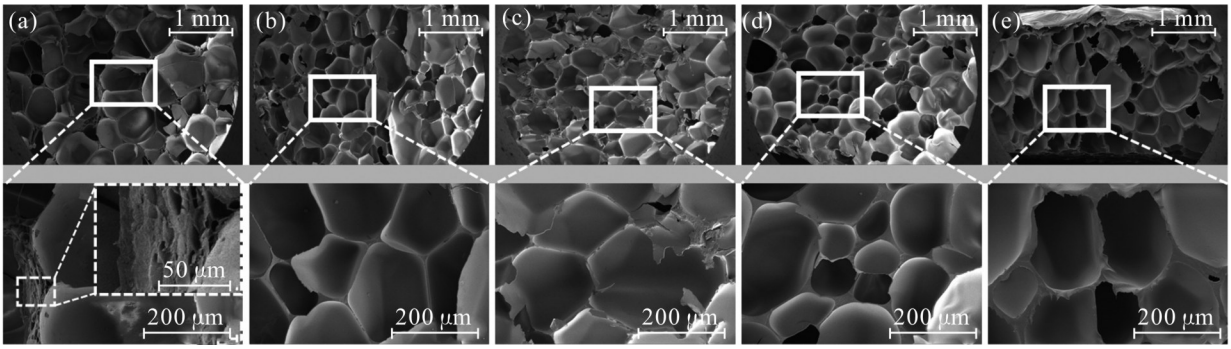


Fig. 5 SEM images of the cellular structure of foam materials: (a) PVC60; (b) PET100; (c) PET130; (d) PET150; (e) PET230. The inset depicts the cellular wall structure of PVC60 foam materials

Tab. 1 Statistical dimensions of cellular structure of foam materials

Sample	Cell size/mm			Cell wall thickness/μm		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
PVC60	0.86	0.15	0.46	12.68	4.01	7.60
PET100	0.52	0.13	0.33	13.38	1.27	6.20
PET130	0.71	0.21	0.41	18.74	3.02	9.12
PET150	0.67	0.11	0.37	17.08	3.37	9.34
PET230	0.64	0.06	0.34	54.63	4.33	22.40

的孔结构更大，且孔壁的厚度更小。另外，相较于PVC，PET芯材的孔壁更加光滑，且PET芯材孔壁的透明性较PVC有所降低，这可能与PET的结晶性能有关。对于不同密度的PET芯材，在显微镜视野内其孔尺寸没有明显差异，主要区别在于低密度的PET芯材表现出较薄的孔壁，而高密度的芯材表现出更厚的孔壁。

为了更清晰地观察不同芯材的泡孔结构，通过SEM进行了进一步表征，其形貌如Fig.5所示；利用Nano Measurer定量统计了孔的结构尺寸信息，其统计结果如Tab.1所示。与OM观察结果相符，PVC60具有最大的孔径尺寸（平均值为0.46 mm），明显大于所有的PET芯材。因此，PVC的低密度主要是由较大的孔尺寸造成的。对于孔壁厚度，PET100芯材的平均壁厚为6.2 μm，而PVC60芯材的壁厚为7.6 μm。另外，PVC孔壁与PET有明显不同，PVC芯材的泡孔壁中存在较多的多孔结构(如Fig.5(a)中插图所示)，而PET芯材的泡孔壁非常规整。对于PET芯材，PET100芯材的平均孔径尺寸为0.33 mm，PET230的孔径尺寸为0.34 mm，说明PET芯材的孔径与发泡密度无直接关系。对于不同发泡密度的PET，其壁厚随着发泡密度的增加而显著增加，例如，PET100芯材的壁厚为6.2 μm，而PET230芯材的壁厚为22.4 μm，约增加了3倍。综上，PVC芯材的微观结构与PET有明显的差异。

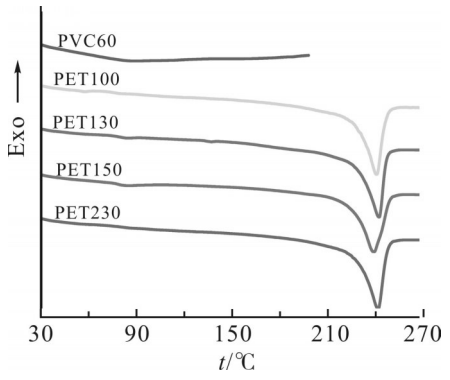


Fig. 6 Heat flow curves of PVC and PET foam materials

2.1.2 发泡芯材的热力学行为：利用DSC表征了不同芯材的热力学行为，其热流曲线如Fig.6所示。不

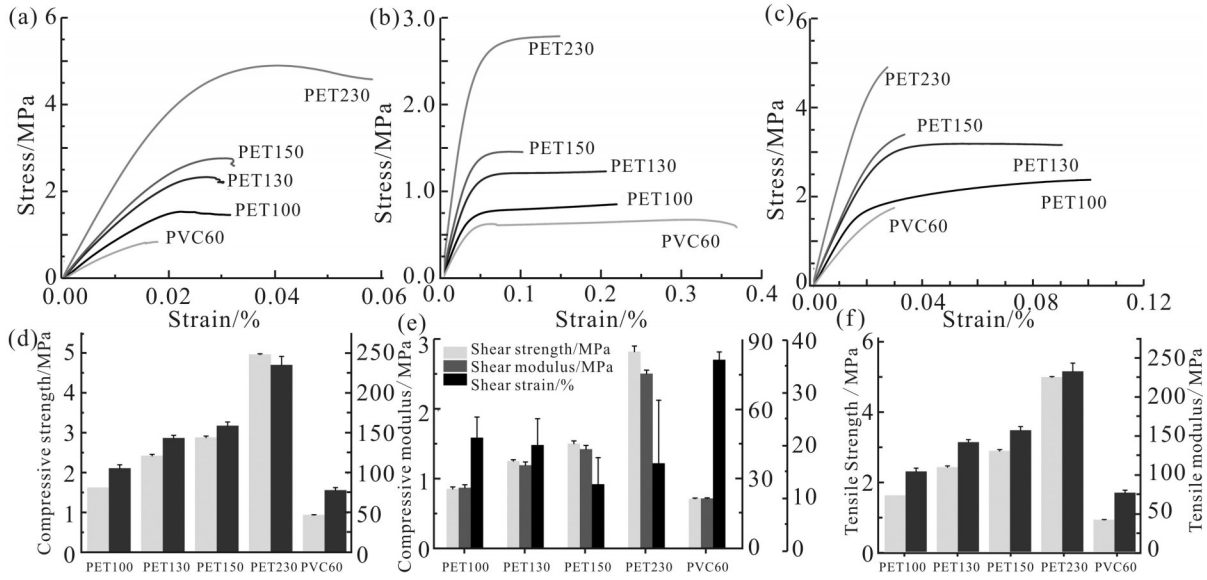


Fig. 7 Stress-strain curves of (a) compression test, (b) shear test, (c) tensile test for core with different materials and foaming densities; summary of (d) compression performance, (e) shear performance, (f) tensile performance for core with different materials and foaming densities

Tab. 2 Thermal behavior parameters of PVC and PET foam materials

Sample	T_g/℃	T_m/℃	ΔH_m/(J·g^{-1})	X_c/%
PVC60	75.4			
PET100	72.0	240.8	44.2	31.55
PET130	76.5	242.4	44.4	31.72
PET150	78.6	239.1	40.8	29.09
PET230	78.5	241.9	47.0	33.58

同材质及密度芯材的热力学行为参数统计如Tab.2所示。其中,PVC的热焓曲线中,在80 ℃附近出现了典型的非晶玻璃化转变。而不同密度的PET芯材的DSC曲线均在240 ℃左右表现出明显的熔融峰,且熔融峰位置基本相同,未发生偏移,也未出现PET的冷结晶峰,表明PET发泡和焊接过程中发生了明显的结晶,获得了较完善的晶体结构。完善的结晶结构是PET芯材耐热性能优于PVC芯材的主要原因。随发泡密度的增加,PET的结晶度整体表现为增加的趋势,从31.55%增加到33.58%。另外,PET玻璃化转变温度随PET芯材发泡密度的增加而显著提高,从72.0 ℃增加到78.5 ℃。可能是因为发泡过程中,低密度PET芯材的发泡介质渗入量较多,在芯材中起到增塑作用,促进了分子链的运动,从而使玻璃化温度降低。

2.2　发泡芯材的力学性能

Fig.7给出了不同材质及发泡密度芯材的力学性能。可以发现,PET芯材的强度均高于PVC60芯材。对于高分子材料,结晶度的提高有利于提高材料强度[15]。而PVC的非晶性,是其强度低于PET芯材的主要原因。另外,PET芯材的模量(压缩模量、剪切模量和拉伸模量)均高于PVC60,但PVC芯材具有较高的韧性,剪切应变高于PET芯材。

对于不同密度的PET芯材,随着发泡密度的增加,PET芯材的压缩模量和压缩强度随之增加(如Fig.7(a)所示)。PET230的压缩模量和压缩强度最高,分别为235.9 MPa和5.0 MPa,相较于PET100分别增加了约2.2倍和3.1倍。结合泡孔结构的分析,更高的发泡密度芯材具有更厚的孔壁,从而能够更好的传递应力,表现出更高的压缩模量和强度。如

Fig.7(b)所示，随着发泡密度的增加，芯材的剪切模量和剪切强度也随之增加。PET100的剪切模量和剪切强度分别为26.6 MPa和0.9 MPa，而PET230的剪切模量和剪切强度分别达到75.7 MPa和2.8 MPa，分别增加了约2.8倍和3.3倍，剪切应变则随发泡密度的增加表现出减小的趋势。随密度增加，玻璃化转变温度提高，表明分子链运动受限，因而导致高密度PET发泡芯材的剪切应变减小。

2.3 夹芯复合材料的力学性能

应用于风电叶片的夹芯复合结构在实际运行过程中，在拉压等载荷的作用下，受到强烈的弯曲作用[16]。因此，表征夹芯复合材料的四点弯曲性能，对于评价其实际应用过程中的服役性能，具有十分重要的意义。

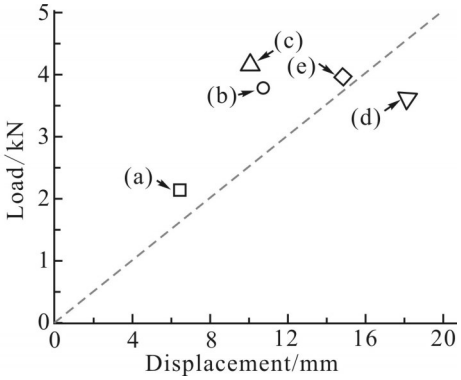


Fig. 8 Four- point bending performance of sandwich composite materials: (a) core material is PET100 foam with a slotting method of intersecting cross grooves on both surfaces; (b) core material is PET100 foam with a slotting method of deep cross grooves on the upper surface and shallow straight grooves on the lower surface; (c) core material is PET150 foam with a slotting method of deep cross grooves on the upper surface and shallow straight grooves on the lower surface; (d) core material is PVC60 foam with a slotting method of intersecting cross grooves on both surfaces; (e) core material is PVC60 foam with a slotting method of deep straight grooves on the upper surface and shallow straight grooves on the lower surface

Fig.8给出了不同芯材结构及开槽方式的夹芯复合材料的四点弯曲性能。当施加静态载荷时，可以发现PVC芯材2种开槽方式的夹芯复合材料均表现出最大的位移，这和PVC芯材较小的发泡密度及非晶结构有关。在相同的开槽方式下，PET100的四点弯曲性能相较于PVC60的最大载荷减小，且最大位移只有PVC60的1/2。当采用相同的开槽方式（上表面十字深槽、下表面一字浅槽）时，随着PET芯材密度的增加，其可承受的最大载荷有所提高，但是最大位移仍不如PVC60芯材的夹芯复合材料，这可能是由于环氧灌注的加强筋提供的力学强度与PVC60芯材的优异韧性相互契合，为PVC60夹芯复合材料带来了优异的综合性能。另外，泡孔结构表明，PVC芯材具有最大的泡孔结构，且泡孔壁上存在很多微孔结构，这有利于灌注过程中环氧树脂的浸润，能增强树脂与PVC芯材的结合力，从而提高夹芯复合材料的力学性能。

对于夹芯复合材料开槽方式对弯曲性能的影响，不同材质和密度的芯材表现明显不同。将开槽方式从双面交叉一字深槽变为上表面十字深槽、下表面一字浅槽后，PET100芯材的夹芯复合材料的最大载荷和位移均有明显提高。但对于PVC60夹芯复合材料，上表面十字深槽、下表面一字浅槽的开槽方式使其可承受载荷略微增加，但最大位移减小。因此，上表面十字深槽、下表面一字浅槽的开槽方式有利于提高弯曲过程中的承受载荷。

3 结论

本文系统对比了不同密度、材质的高分子泡沫芯材结构及其力学性能的关系，并对比了以不同开槽方式灌注环氧树脂制备的夹芯复合材料的四点弯曲性能。通过OM，SEM等表征了发泡芯材的微观结构，发现PVC60芯材具有最大的泡孔尺寸。对于PET芯材，随着芯材密度的增加，在孔尺寸没有明显变化的情况下，泡孔壁厚增加，从而能够承受更大的外力，表现出更高的力学强度和模量。通过DSC表征了芯材的热力学行为，晶区结构是PET芯材相较于PVC芯材具有更高力学强度和耐热性能的原因。最后，将其增加玻璃纤维布蒙皮，通过环氧灌注为夹芯复合材料后，其四点弯曲性能不仅受到发泡芯材结构的影响，还与发泡芯材开槽方式有明显的关系。PVC60夹芯复合材料在四点弯曲测试中表现出最大的韧性和较高的强度，推测是由于PVC60芯材的韧性与环氧加强筋的强度起到互补的作用，且其泡孔壁上的微孔结构加强了环氧树脂与PVC芯材的结合力，PET150夹芯结构具有最高的强度。另外，通过比较相同芯材、不同开槽方式的夹芯复合材料，发现上表面十字深槽、下表面一字浅槽的开槽方式有利于提高弯曲过程中的承受载荷。本文从发泡芯

材结构与性能出发,表征了芯材及开槽方式与夹芯复合材料四点弯曲性能的关系,对风电叶片在实际应用场景下的结构与性能优化具有指导意义。

参考文献:

[1] 张振聪, 张旭, 黄辉秀, 等. 风电叶片夹芯结构的疲劳性能[J]. 塑料工业, 2021, 49(11): 79-84.
Zhang Z C, Zhang X, Huang H X, *et al.* Fatigue behavior of sandwich structure of wind turbine blade[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(11): 79-84.

[2] Brøndsted P, Lilholt H, Lystrup A. Composite materials for wind power turbine blades[J]. Annual Review of Materials Research, 2005, 35: 505-538.

[3] Brondsted P, Nijssen R P L, Goutianos S. Advances in wind turbine blade design and materials[M]. Woodhead Publishing, 2023.

[4] Jureczko M, Pawlak M, Mężyk A. Optimisation of wind turbine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 463-471.

[5] Li D, Ho S C M, Song G, *et al*. A review of damage detection methods for wind turbine blades[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24: 033001.

[6] Du Y, Zhou S, Jing X, *et al*. Damage detection techniques for wind turbine blades: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 141: 106445.

[7] Chou J S, Chiu C K, Huang I K, *et al*. Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 27: 99-118.

[8] Mishnaevsky L, Branner K, Petersen H N, *et al*. Materials for wind turbine blades: an overview[J]. Materials, 2017, 10: 1285.

[9] 王冬生. PET泡沫材料在风电叶片中的应用[J]. 上海建材, 2020 (1): 28-29.
Wang D S. The PET foam using in the wind turbine blades[J]. Shanghai Building Materials, 2020(1): 28-29.

[10] 周文华, 周百能. 夹芯泡沫材料性能及其在风电叶片上的应用[J]. 天津科技, 2023, 50(1): 75-78.
Zhou W H, Zhou B N. Applied research of sandwich foam in wind turbine blades[J]. Tianjin Science & Technology, 2023, 50 (1): 75-78.

[11] Liu H, Antwi-Afari M F, Mi H, *et al*. Research on the feasibility of polyethylene terephthalate foam used in wind turbine blades [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2023, 42: e13956.

[12] Upadhyayula V K K, Gadhamshetty V, Athanassiadis D, *et al*. Wind turbine blades using recycled carbon fibers: an environmental assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56: 1267-1277.

[13] Liu P, Barlow C Y. Wind turbine blade waste in 2050[J]. Waste Management, 2017, 62: 229-240.

[14] Chen H, Cebe P. Vitrification and devitrification of rigid amorphous fraction of PET during quasi-isothermal cooling and heating[J]. Macromolecules, 2009, 42: 288-292.

[15] Gao X R, Li Y, Huang H D, *et al*. Extensional stress-induced orientation and crystallization can regulate the balance of toughness and stiffness of polylactide films: interplay of oriented amorphous chains and crystallites[J]. Macromolecules, 2019, 52: 5278-5288.

[16] Kaboglu C. The effect of different types of core material on the flexural behavior of sandwich composites for wind turbine blades [J]. Journal of Thermal Engineering, 2017, 3: 1102-1109.

Relationship Between Structural Design and Performance of Sandwich Composite Materials for Wind Turbine Blades

Senlin Yang[1,2], Dezhuang Jia[1], Lei Li[1], Zhengyuan Chen[1], Jiazhuang Xu[1], Ganji Zhong[1]

（*1. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*
2. Dongfang Electric Co., LTD, Deyang 618000, China）

ABSTRACT: The relationship between the design parameters of core material (including material, density, and slotting method) and mechanical properties of sandwich composites for wind turbine blades was investigated. The results indicate significant differences in the cellular structure of polyethylene terephthalate (PET) and polyvinyl chloride (PVC) core material. The cellular walls of PET core material are highly regular, while those of PVC core material exhibit microcellular structures. Furthermore, PET core material demonstrates superior mechanical strength and modulus, while PVC core material offers enhanced toughness. For PET core material, an increase in density correlates with higher mechanical strength and modulus, albeit at the expense of reduced toughness. The study also examined the impact of various slotting methods on the four-point bending performance of sandwich composites. The results suggest that the slotting method of deep cross grooves on the upper surface and shallow straight grooves on the lower surface may enhance the load-bearing capacity of sandwich composites during bending. Notably, the sandwich composites fabricated with PVC core material exhibit excellent comprehensive performance measured in four-point bending test, which can be attributed to the inherent toughness of PVC core material and the reinforcement ribs. Additionally, the microporous structures present in cellular walls of PVC core material may contribute to better coupling with epoxy resin during infusion process, further enhancing the properties of sandwich composites. This study provides theoretical guidance for optimizing the structural design of sandwich composite materials for wind turbine blades.

Keywords: sandwich composite structure; wind turbine blades; foam materials; bending performance