

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.09.029

纤维编织增强酚醛树脂基热防护材料研究进展

高守臻¹,任有文¹,马开宝¹,李大勇¹,魏化震¹,孔韬²,王晓立¹,辛全友¹,赵志安¹

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 空军驻山东地区军事代表室, 济南 250023)

摘要:介绍了二维织物、2.5 维织物、三维织物等纤维预制件的结构特性,分析总结了各种纤维预制件的发展及研究状况,综述了三维编织增强酚醛树脂基热防护材料及其树脂传递模塑成型工艺研究进展。总结了目前研究中存在的问题,并对未来的研究趋势进行了展望。指出三维编织复合材料是不分层的整体结构,其比强度、比模量高,力学性能和功能性优异,开展编织复合材料力学性能有限元分析、结构与功能一体化设计、低成本制造工艺等研究是十分迫切的。在此基础上,开展多种编织工艺、多种纤维混合编织也是新的研究方向,特殊形状的一次性编织复合材料的力学性能研究有待进一步深入。

关键词:纤维; 酚醛; 热防护材料; 2.5 维织物、三维织物; 树脂传递模塑

中图分类号: TQ323.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)09-0132-05

Research Progress of Woven Faber Reinforced Phenolic Resin Materials for Thermal Protection

Gao Shouzhen¹, Ren Youwen¹, Ma Kaibao¹, Li Dayong¹, Wei Huazhen¹, Kong Tao², Wang Xiaoli¹, Xin Quanyou¹, Zhao Zhian¹

(1. Shandong Institute of Non-metallic Materials, Jinan 250031, China;

2. Military Representative Office of PLA Air Force in Shandong Region, Jinan 250023, China)

Abstract : The structural characteristics of 2D braid, 2.5D braid and 3D braid were introduced. The development and research status of high performance fiber preform were analyzed and summarized. From visual angle of manufacturing methods, 2D braid, 2.5D braid and 3D braid, the development and production of high performance fiber were introduced. The research progress of 3D woven phenolic resin materials and its resin transfer moulding technology was reviewed. Finally, some problems in present studies were summarized and future investigating trends were proposed. It was pointed out that the three-dimensional braided composite materials was not layered whole structure. It not only had higher specific strength and modulus, but also had excellent mechanical and functional performance. To carry out finite element analysis of mechanical properties of braided composite, structure and function of integration design, low cost manufacturing process research was very urgent. On this basis, it was also a new research direction to carry out a variety of weaving process and fiber mixed weaving. The mechanical properties of one time braided composites with special shape need to be further studied.

Keywords : fabric ; phenolic resin ; thermal protection material ; 2.5D braid ; 3D braid ; resin transfer moulding

酚醛树脂基热防护材料因具有耐烧蚀性能适中、物理力学性能良好、工艺性好、成本低等优良性能,在弹箭武器烧蚀或隔热等热防护结构中被广泛应用^[1]。短纤维增强的高硅氧/酚醛或碳/酚醛是应用最广的热防护材料,随着武器装备向着远程打击、精确制导、高效毁伤等方向的发展,短纤维增强酚醛树脂基复合材料因抗冲刷均匀性差、易剥蚀、损伤容限低等缺点已越来越不能满足新型装备的需求^[2]。提高酚醛树脂基热防护材料力学性能、抗烧蚀性能、增加烧蚀均匀性、发展编织纤维增强技术成为酚醛树脂基热防护材料很重要的发展趋势^[3]。

传统的二维层压复合材料仅依靠基体材料将各层维持在一起,而且容易发生分层。迄今为止,用于改善分层特性的各种全厚度增强方法包括缝合、2.5 维编织和三维编织。缝合方法沿厚度方向将针头插入纤维束对纤维束进行捆绑。

三维编织不会在预先形成的结构上引起任何损坏,能够使各层整体结合在一起,大大提高了材料的层间剪切性能。因此,三维编织复合材料为降低复合材料分层失效的发生和传播提供了一个很有前途的解决方案。2.5 维编织的近期发展成功解决了三维编织技术成本高、生产周期长等缺点,能够生产各种新的架构从而减少分层。2.5 维编织纤维增强酚醛树脂基热防护材料因其具有成本较低、工艺良好、易成型等优异的综合性能,有望成为新一代热防护材料的发展趋势。

笔者分析总结了二维织物、2.5 维织物、三维织物等纤维预制件的发展及研究状况,综述了三维编织增强酚醛树脂基热防护材料及其树脂传递模塑成型工艺研究进展。总结了目前研究中存在的问题,并对未来研究趋势进行了展望。

联系人: 高守臻, 副研究员, 主要从事热防护材料及制品研究

收稿日期: 2016-06-30

1 纤维编织预制件结构特点及应用

1.1 二维织物

二维织物厚度小,需要以叠层铺放或缠绕的方式制备复合材料结构,二维织物可实现低成本、大规模制备,是目前酚醛树脂基热防护材料中应用最广的一类技术。酚醛树脂基热防护材料中使用的二维织物包括二维机织布及经编织物,以管状和平板状结构形式为主。二维机织布主要分为平纹、缎纹和斜纹等,平纹织物结构简单、尺寸稳定,占二维机织布产量的70%,但平纹织物中纤维受力方向为经纬向受力,成型后复合材料抗冲击性和剪切性较差。缎纹织物较平纹和斜纹织物更适于做增强结构材料^[4]。二维机织布经向和纬向上尺寸稳定、力学性能优异,适于模压、缠绕、树脂传递模塑(RTM)等多种成型工艺,已成功应用于航空、航天、军工等武器装备。

经编织物克服了单向预浸料的使用问题,材料的弹性模量和强度能够充分发挥,且能实现低成本制造,在酚醛树脂基热防护材料的性能设计上具有独特的优越性,最为常见的酚醛树脂基热防护材料增强体为双轴、多轴织物。谈昆伦等^[5]介绍了碳纤维经编织物复合材料所用预制件的织物结构、成型工艺特点及应用实例,认为经编织物可设计性强、纤维方向控制精确,可大大增加复合材料的压缩强度、层间剪切强度及冲击韧性,且能降低制造成本,并介绍了国内经编织物设备及研究进展。杨正柱等^[6]研究了以经编织物为增强材料的夹芯复合材料,经过真空浸渍工艺实现了树脂与面板及内芯的良好浸润,大幅度提升了复合材料的力学性能。韩帅等^[7]研究了碳纤维经编织物增强复合材料的拉伸、弯曲、层间剪切性能,测试了三个方向(0° , 90° , 45°)的力学性能。实验发现,在沿纤维方向上的力学性能均优于其它方向,且纤维与树脂的结合性较好,说明了经编织物的独特之处。经编织物成形灵活性好、尺寸稳定,剪切性能好、织物密度高、抗分层、适于多种原材料、效率高、成本低,适于低成本制造小而复杂的结构产品。目前主要用作结构复合材料,在航空、航天、造船以及汽车领域应用广泛。近几年也开始在酚醛树脂基热防护材料中开展相关应用研究。

二维织物增强酚醛树脂基热防护材料具有面内比刚度、比强度高优点,但是同时具有高度的各向异性、层间强度低、层间断裂韧性差、冲击损伤容限低等缺点,限制了其在新一代装备中的应用。

1.2 2.5 维缝合织物

2.5 维缝合技术兼具低成本制造、层间性能和冲击损伤容限优良等优点,扩大了其应用范围。2.5 维缝合技术又称为缝纫技术、穿刺技术,是利用缝合线将二维织物、2.5 维织物及立体织物连接成三维立体织物或整体结构的技术。

该技术可形成三维编织不能一次成型的复杂构件;还可通过设计把平面结构组合成无接点的整体结构进行缝合^[8-9]。

2.5 维缝合技术源于美国航空航天局(NASA)的飞机用先进复合材料研究计划,为了降低制造成本,美国对缝合/树脂传递模塑成型工艺或缝合/树脂膜渗透成型工艺技术进行了重点研究。目前,发达国家2.5 维缝合增强复合材料已应用于飞机制造中。研究主要集中在:先进缝合机器及缝合工艺设计、材料成型方法、材料性能及测试方法等,并在2.5 维缝合材料力学性能分析和试验方法等方面取得了许多重大突破^[10-13]。国内研究集中在缝合工艺参数设计及缝合复合材料性能等方面,研究了缝合对复合材料力学性能的影响,并对比了2.5 维缝合复合材料与传统的铆接复合材料的性能,2.5 维缝合复合材料不但可以明显减重,还能降低铆钉应力集中问题。2.5 维缝合技术在酚醛树脂基热防护材料中尚未广泛应用,但在飞机的机身、机翼加强件、工字梁、汽车部件等方面具有较好的应用前景。

2.5 维缝合技术在酚醛树脂基热防护材料中的广泛应用,尚有许多问题需解决。首先是缝合工艺参数与缝合复合材料力学性能的关系,缝合复合材料失效机制还不清楚。其次是湿热等因素对材料性能影响机制尚待研究,最后曲面等复杂结构的缝合困难,设备昂贵等许多问题值得关注^[14-15]。通过研究,可进一步完善缝合复合材料的性能,扩大材料应用范围。

1.3 2.5 维编织物

2.5 维编织物是为适于低成本、高效率制造而迅速发展的一种复合材料增强体,其特点为经纱与纬纱相互连接,层与层之间连接,形成一个三维整体结构,大大提高了复合材料的层间强度及抗冲击能力。因具有优异的综合性能,2.5 维编织物可广泛用于航天、国防、航空、军工及交通等众多领域^[16]。目前,武器装备向着轻量化、高精度、强威力、快速反应和精确打击发展,酚醛树脂基热防护材料应用环境越来越苛刻,要求其具有轻量化、层间剪切强度和拉伸强度高、抗冲击性能好、耐高温、抗烧蚀、预成型件形状结构多变、可设计性灵活和易加工等特点,2.5 维编织物为解决该问题提供了技术支撑。

2.5 维编织物是最易产业化的酚醛树脂基热防护材料增强骨架材料。玻璃纤维、碳纤维、陶瓷纤维、酚醛纤维、硼纤维和玄武岩纤维等均可用作2.5 维编织物的原材料。2.5 维编织结构分为浅交弯联、浅交直联和深交联等。在织物密度、纤维规格、织物层数三个因素相同的情况下,纤维体积含量为浅交弯联>浅交直联>深交联;酚醛树脂基复合材料拉伸强度远大于压缩强度,并且拉伸和压缩强度为浅交直联>深交联>浅交弯联^[17-19]。天津工业大学增加了2.5 维编织

物法向纱线系统,该2.5维织物复合材料具有更高的层间剪切强度及经向抗压性能。中材科技股份有限公司成功使2.5维浅交弯联结构、衍生结构组合成结构单元体,实现了织物厚度的变化,满足织物整体性及纤维连续性要求,并进行多向可扩展编织,便于形状较复杂织物的整体成型。另外,通过纤维之间的互相交缠可将2.5维浅交弯联和三维多向结构组合成三维多向结构,该结构可满足受力方向复杂构件的使用需求,而且该结构还具有纤维取向复杂、可靠性高、可设计性及力学性能优良、连续纤维多等性能^[20-21]。

2.5维编织物为武器装备选材和产品设计奠定了坚实基础,并在武器装备方面获得了广泛的应用,比如战术火箭、反坦克导弹、导弹隔热套、防护装甲、坦克复合装甲、大口径火炮、发射管、坦克负重轮、穿甲弹等均已开始采用2.5维编织复合材料。采用2.5维封顶织物结构可大大提升战术导弹耐气动烧蚀性能。2.5维织物也可应用于变截面、筒形织物等异构型织物的成型,如火箭喷管、天线罩形状、火箭头与排气管等重要机件^[22-23]。

1.4 三维编织织物

三维编织物去除了“层”,长度、宽度和厚度三个方向由纤维束或纱线贯穿其中,形成了一个三维整体网状结构,具有更为优异的力学和功能性能,有效地解决了“分层”问题,为酚醛树脂基热防护材料广泛应用奠定了基础。目前,三维编织酚醛树脂基热防护材料可以制作耐烧蚀、承力的圆筒型或锥筒型制件,三维编织酚醛树脂基热防护材料比强度高、比模量大,力学结构合理且整体不分层,从而大大减轻了制件质量,提高了装备的综合性能。三维编织酚醛树脂基热防护材料具有独特的生产工艺和空间结构,使其优点众多:①易于加工形状复杂构件。②结构均匀性使其抗分层、抗冲击性能好。③缺口处纱线连续,使材料整体性能好^[24-29]。

国外已进行了大量的应用开发研究,进行了广泛的应用^[30-32]。近年来,国内航空航天及国防系统进行了相关研究,并取得了一定的进展,但因成本高、效率低等原因限制了该织物的批量生产应用。另外,预制件的尺寸问题是限制其广泛应用的另一个问题,目前大多数工业编织机只能以较低的速度编织较窄的预制件(100 mm以下),大型构件仍需手工编织。加工大尺寸制件,须开发大型昂贵的编织机械;国内对编织复合材料性能的研究尚不完善,集中在材料的力学性能包括拉伸、压缩、弯曲、断裂韧性和疲劳性能,而层间剪切性能、层间断裂韧性、蠕变性能等尚无人研究。

2 纤维编织增强酚醛树脂基热防护材料成型工艺

纤维增强酚醛树脂基热防护材料具有较好的耐烧蚀性能,已广泛地用在航空航天、陆军等领域。纤维编织增强酚醛树脂基热防护材料由于增强纤维交织贯穿整个制品使制

品具有整体性,因而具有良好的力学性能及高的可靠性。纤维编织增强酚醛树脂基热防护材料一般采用模压、缠绕、RTM等成型工艺。其中RTM工艺是一种闭模成型工艺,具有原材料利用率高、固化工艺简单、制品尺寸精度高、孔隙率低等优点,适用于三维织物作增强体的复合材料成型。

2.1 RTM用酚醛树脂

RTM用酚醛树脂要求注射温度下的黏度较低($< 800 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)、工艺适用期长、浸润性好、固化过程无小分子产生,固化收缩率小等,以达到快速浸透、减少制品缺陷的目的。传统的酚醛树脂利用RTM注射-加压固化方式成型。李婷等^[33]研究了中科院化学所制备的RTM成型工艺用酚醛树脂的DSC等热学行为,研究了树脂的工艺适应性,并以碳纤维针刺预制体为增强体,制备了RTM成型碳纤维复合材料,经研究,复合材料力学性能、热物理性能、耐烧蚀性能、耐冲刷性能优异,适于制备高性能热防护材料。李建伟等^[34]制备了RTM成型钼酚醛/石英复合材料,研究了复合材料的力学性能和烧蚀性能,认为RTM成型钼酚醛/石英复合材料整体力学性能较好,氧-乙炔线烧蚀率和质量烧蚀率分别为 0.092 mm/s 、 0.0707 g/s ,适于制备短时热防护材料。除此以外,华东理工大学研制的高碳酚醛树脂具有碳含量高、工艺操作平台宽等优势,适于RTM工艺,但该树脂缩合固化中有小分子释放,成型过程中仍需施加压力。

为满足航空、航天、军工、交通等领域产品的发展需求,进一步研制RTM专用酚醛树脂成为近几年的发展趋势。苯并恶嗪树脂是一类具有固化低收缩特性的高性能RTM基体树脂,苯并恶嗪树脂在加热和/或催化的条件下发生开环聚合,生成含氮类似酚醛树脂的网状交联结构。苯并恶嗪树脂具有低熔融黏度、聚合无挥发物、收缩极小等优良特性。其成型的苯并恶嗪树脂基复合材料还有耐热性好、力学性能优良、残炭率高、分子可设计性好等优势。冉启超等^[35]合成了含醛基的单环苯并恶嗪,采用共混的方式制备了RTM用树脂体系,并成功使用RTM工艺制备了复合材料。尹昌平等^[36]研究了RTM成型苯并恶嗪/石英复合材料及工艺参数对复合材料孔隙率的影响,并与钼酚醛/石英复合材料进行了材料性能对比。结果表明,注射压力、温度、纤维体积含量等对RTM复合材料孔隙率影响较大,相同厚度的制件,苯并恶嗪/石英复合材料的孔隙率远小于钼酚醛/石英。苯并恶嗪树脂独特的结构赋予材料灵活的可设计性。双马来酰亚胺改性、含氨基的苯并恶嗪等结构的树脂相继被开发出来,大大提升了模塑料的力学性能、热性能及加工性能,并降低了材料成本。其中双马来酰亚胺树脂改性酚醛树脂具有成本低、可加工以及适于高温下使用($< 300^\circ\text{C}$)等优点,引起了国内外学者的广泛关注。

2.2 RTM 衍生工艺技术

RTM 工艺是指将纤维预制件放置于特定工艺尺寸闭合模具中,在一定的压力下,树脂注入模具,浸渍预制件并固化成型的技术。随着新型树脂及新材料的需求,逐渐衍生出树脂真空灌注固化(VIMP)工艺技术及柔性软模辅助 RTM(FMARTM)工艺技术。

(1) VIMP 工艺技术。

VIMP 工艺是基于 RTM 工艺衍生的适于大尺寸、几何形状复杂的复合材料构件的液相成型技术。VIMP 是将纤维预制件放置于单面刚性模具上,整体用真空袋膜封装,抽真空,在真空压力下驱动树脂流动浸渍纤维预制件,并固化成型复合材料构件。该技术已成功应用于飞机机舱罩、船舶制造、风力发电叶片、国防军工等领域。作为一种低成本复合材料制备技术,VIMP 工艺具有其独有的优势:①单面刚性模具放置,模具成本低;②产品尺寸及几何形状可变;③制品孔隙率低。崔辛等^[37]介绍了 VIMP 的原理及技术要求,并详细描述了 VIMP 工艺树脂流动行为、应用及研究进展。VIMP 工艺适于酚醛树脂热防护材料的制备,近几年,研究 VIMP 工艺中酚醛树脂的物理参数模型不断完善,但是,如何在实践中统一及有效地监控树脂的流动性有待于进一步研究。

(2) FMARTM 工艺技术。

FMARTM 工艺技术主要是通过柔性模对预制件的压实作用制备空心的复合材料构件的成型技术。较之传统的 RTM 工艺,FMARTM 更加适于制备内腔复杂的构件,解决普通 RTM 工艺脱模难的问题,并能大大提高纤维体积含量及复合材料的热力学性能。FMARTM 包括气囊辅助 RTM 工艺及热膨胀软模辅助 RTM 工艺。气囊辅助 RTM 工艺是通过密封气囊压实纤维预制件,实现预制件浸渍成型。气囊辅助 RTM 工艺无需芯模,纤维密实,孔隙率低。然而,气囊辅助 RTM 工艺存在问题是囊壁薄,可能使筋条位置偏移而导致复合材料构件力学性能降低。气囊辅助 RTM 工艺已成功应用于制备复合材料裙段、承力筒、导弹舱段构件等。

热膨胀软模辅助 RTM 工艺是利用软模的热膨胀挤压原理提高复合材料的力学性能和纤维体积含量。且软模易装模、脱模及密封。该工艺优点为不需外加压力,适于整体制备较为复杂的腔体构件。国防科技大学是较早进行热膨胀软模辅助 RTM 工艺研究的,“十一五”期间已完成了热膨胀软模辅助 RTM 工艺在大型构件中的应用研究,成果显著。该工艺技术已用于制备高精度天线测量杆、发动机燃烧室壳体衬、复合材料背架及舱段构件等,软模压力控制、工作模的精确定位成为该工艺技术推广应用亟待解决关键技术^[38]。

2.3 在线监测技术

RTM 工艺中,树脂的注射压力、流动速度、纤维的浸渍程度、孔隙含量的控制、粘滞力以及树脂在纤维预制体中流动时所用的时间等都是 RTM 工艺研究的主要内容。获取这些数据的主要方法就是 RTM 在线监测技术。在线监测的范围主要包括树脂流动、黏度、压力、温度等方面。在线监测技术的开展可解决凭经验确定工艺条件等问题,并能大大减少研究成本。随着产品质量可靠性要求的提高和 RTM 工艺研究的深化,该技术对于工艺优化参数的确定,成型时间的缩短变的越来越重要;因此在线监测技术已成为工艺研究的有力手段。研究 RTM 工艺在线监测技术对于提高 RTM 工艺水平有着重要的意义。

3 结语

(1) 二维编织织物已广泛应用于纤维编织增强酚醛树脂基热防护材料中,存在剪切强度低、抗冲击性差、损伤容限低、断裂韧性低等缺点,二维编织织物结合缝合工艺等多层结构设计成为改善其性能缺陷的主要措施。

(2) 2.5 维编织物以其成本低、效率高等优点成为近几年高速发展的织物结构,多种纤维混编技术、结构及材料一体化设计技术、2.5 维编织复合材料性能预测技术成为近几年的研究热点。

(3) 三维编织复合材料是不分层的整体结构,其比强度、比模量高,力学和功能性能优异,开展编织复合材料力学性能有限元分析、结构与功能一体化设计、低成本制造工艺等研究是十分迫切的。在此基础上,开展多种编织工艺、多种纤维混合编织也是新的研究方向,特殊形状的一次性编织复合材料的力学性能研究有待进一步深入。

(4) RTM 工艺及其衍生工艺中,降低树脂黏度和改进成型工艺是今后的研究方向。低压注射、高压排气也是解决高黏度树脂 RTM 工艺应用技术瓶颈的有效措施。

参考文献

- [1] 刘国勤,等.河南化工,2010(11):5-8.
Liu Guoqin, et al. Henan Chemical Industry, 2010(11):5-8.
- [2] 杨斌,等.纤维复合材料,2013(4):45-47.
Yang Bing, et al. Fiber Composites, 2013(4):45-47.
- [3] 李仲平.复合材料学报,2011,28(2):1-9.
Li Zhongping. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2):1-9.
- [4] 李静,等.产业用纺织品,2013(6):5-8.
Li Jing, et al. Technical Textiles, 2013(6):5-8.
- [5] 谈昆伦,等.玻璃纤维,2013(1):11-14.
Tan Kunlun, et al. Fiber Glass, 2013(1):11-14.
- [6] 杨正柱,等.黑龙江纺织,2013(2):11-15.
Yang Zhengzhu, et al. Heilongjiang Textile, 2013(2):11-15.
- [7] 韩帅,等.复合材料学报,2011,28(5):52-57.

- Han Shuai, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5):52–57.
- [8] 吴扬,等. 天津工业大学学报, 2011(6):24–27.
Wu Yang, et al. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2011(6):24–27.
- [9] 姚振华,等. 西北工业大学学报, 2012, 30(4):518–523.
Yao Zhenhua, et al. *Journal of Northwestern Polytechnic University*, 2012, 30(4):518–523.
- [10] Caprino G. *Composite Structures*, 2011, 93:2 853–2 860.
- [11] Pierre L V, et al. *Composite Structures*, 2013(100):424–435.
- [12] 王春敏. 材料导报, 2010, 24(15):204–206.
Wang Chunmin. *Materials Review*, 2010, 24(15):204–206.
- [13] 毛春见,等. 复合材料学报, 2012, 29(2):160–166.
Mao Chunjian, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(2):160–166.
- [14] Daniele G, et al. *Composites Part B*, 2011(42):2 067–2 079.
- [15] 李嘉禄,等. 固体火箭技术, 2009, 32(1):90–94.
Li Jialu, et al. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2009, 32(1):90–94.
- [16] 杨秋红,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2010(3):44–47.
Yang QiuHong, et al. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2010(3):44–47.
- [17] Liu Yong, et al. *Ceramics International*, 2012(8):795–800.
- [18] Hallal A, et al. *Composite Structures*, 2012(94):3 009–3 028.
- [19] Sun Zhigang, et al. *Applied Composite Materials*, 2014(5):789–803.
- [20] 杨振宇,等. 宇航材料工艺, 2010(2):67–71.
Yang Zhenyu, et al. *Aerospace Materials & Technology*, 2010(2):67–71.
- [21] 段园,等. 轻纺工业与技术, 2014(3):9–10.
Duan Yuan, et al. *Light and Textile Industry and Technology*, 2014(3):9–10.
- [22] Mahmood A, et al. *Composite Structures*, 2011, 93:1 947–1 963.
- [23] Sun Yuguo. *Materials & Design*, 2013, 43:50–58.
- [24] 黄学峰,等. 玻璃纤维, 2011(3):14–17.
Huang Xuefeng, et al. *Fiber Glass*, 2011(3):14–17.
- [25] Green S D, et al. *Composite Structures*, 2014, 108:747–756.
- [26] Martin S E. *Composite Structures*, 2014, 111:122–129.
- [27] 张超,等. 复合材料学报, 2011, 28(2):227–229.
Zhang Chao. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(2):227–229.
- [28] 汪星明,等. 航空学报, 2010, 31(5):914–927.
Wang Xingming, et al. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5):914–927.
- [29] 温卫东. 航空动力学报, 2009, 24(11):2 515–2 520.
Wen Weidong. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(11):2 515–2 520.
- [30] Sztefek P, et al. *Composites Part A*, 2009, 40(3):260–272.
- [31] Gao Yantao. *Applied Composite Materials*, 2013, 20:1 065–1 075.
- [32] Sutcliffe M P F, et al. *Composite Structures*, 2012, 94(5):1 781–1 792.
- [33] 李婷,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(5):89–92.
Li Ting, et al. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2015(5):89–92.
- [34] 李建伟,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2009(3):41–44.
Li Jinwei, et al. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2009(3):41–44.
- [35] 冉启超,等. 复合材料学报, 2011, 28(1):15–17.
Ran Qichao, et al. *Acta Materiae Compositae sinica*, 2011, 28(1):15–17.
- [36] 尹昌平,等. 航空材料学报, 2010, 30(2):82–88.
Yin Changping. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(2):82–88.
- [37] 崔辛,等. 材料导报, 2013(17):23–26.
Cui Xin, et al. *Materials Review*, 2013(17):23–26.
- [38] 孙赛,等. 宇航材料工艺, 2010(6):21–23.
Sun Sai, et al. *Aerospace Materials & Technology*, 2010(6):21–23.

赢创开启高科技帆船运动新篇章

总部位于德国埃森的特种化工公司赢创工业集团,携手来自德国及丹麦的 Gaebler 团队,开启了高科技帆船运动的新篇章。

新型 SpeedFoil 是一艘性能极佳的超轻水翼双体船,采用最新碳纤维和复合材料技术,能够实现船体离开水面飞速前进。赢创为这艘船提供了多种复合材料产品及原材料,包括以 VESTAMIN、VESTANAT、NANOPOX、ROHACELL 为品牌进行销售的产品。这些复合材料应用可以被加工并用于纤维、塑料基质和泡沫芯材中。此外,赢创还提供原材料以及深加工及工艺技术。使用了赢创的原材料及添加剂,复合材料可在实现极高稳固性的同时保持轻质。

Speedfoiler 达到了 C 级多体船的尺寸要求:长 7.62 米,

宽 4.26 米,桅杆高度为 12 米。由于 Speedfoiler 的超轻质材料及革命性设计,它可以由 1 节航速开始瞬时加速前进,其上风限约为 30 节航速。德高望重的多体船和水翼设计师 Martin Fischer 也是该项目成员。

一开始, Roland 和 Nahid Gaebler 将用这艘船参加一些现有的帆船比赛。随后,他们将启动自己的赛船锦标赛,即 Foiling World Cup,这是一项全新的专业帆船类赛事,在欧洲、中东、亚洲和美洲共有十场巡回赛。

赢创工业集团所生产的一系列产品几乎可以在所有的纤维增强复合材料制成的部件中找到。该公司为夹层结构、热塑性塑料和热固性树脂基体提供核心材料,为交联剂、催化剂、冲击强度改性剂或加工过程及工艺中的添加剂等基体提供关键成分。

(中塑在线)