

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.06.011

铺层结构对三维中空夹层复合材料压缩性能的影响

周正亮,张守玉,陈同海,戚洪强,赵大娟

(中材科技股份有限公司,南京 210012)

摘要:采用手糊成型制备了双夹层三维中空夹层复合材料,重点研究了厚度为5 mm和8 mm的三维中空织物ZK5和ZK8铺层顺序对复合材料压缩强度的影响,并从树脂含量、织物厚度匹配性角度进行分析。结果表明,随树脂含量增加,三维中空夹层复合材料的压缩强度明显提高;双夹层三维中空夹层复合材料中,下层的树脂含量明显高于上层;ZK5和ZK8织物铺层顺序对双夹层中空复合材料的压缩强度影响较大,其中将ZK8置于ZK5下层时复合材料的压缩强度为ZK8置于ZK5上层时的1.7倍,即在三维中空夹层复合材料总厚度不变的情况下,将高厚度中空织物置于下层的结构明显优于将其置于上层的结构。通过这一概念可以在保证三维中空夹层复合材料整体厚度尺寸不变、质量不增加的条件下通过铺层结构的匹配设计,最大限度地提高复合材料的力学性能。

关键词:三维中空夹层复合材料;树脂含量;铺层结构;织物厚度;压缩强度

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)06-0056-05

Influence of Layer Structure on Compressive Strength of 3D Hollow Sandwich Woven Composite

Zhou Zhengliang, Zhang Shouyu, Chen Tonghai, Qi Hongqiang, Zhao Dajuan

(Sinoma Science & Technology Co. Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract : 3D hollow sandwich woven composite with double sandwiches was prepared by hand lay-up molding. The effects of layer structures of 3D hollow fabrics ZK5 (5 mm thickness) and ZK8 (8 mm thickness) on compressive strength of the composite were emphatically studied, which were also analyzed from the matching of the resin content and fabric thickness. The results show that the compression strength of the composite increases obviously with the increase of resin content. In the 3D sandwich woven composite with double sandwiches, the resin content in lower layer is higher than that of the upper layer. The layer sequence of ZK5 and ZK8 has a greater influence on the compression strength of the composite with double sandwiches, the compression strength of the composite with the layer structure of placing ZK8 below the ZK5 is 1.7 times of that with the layer structure of placing ZK5 below the ZK8, which indicates that under the condition of invariable total thickness of 3D sandwich woven composite, the layer structure of placing high thickness 3D hollow fabric in the lower layer is better than that of placing it in the upper layer. Through this concept, under remaining the same overall thickness size and same weight of 3D hollow sandwich woven composite, the mechanical properties of the composite can be improved to the most extent through the matching design of the layer structure.

Keywords : 3D hollow sandwich woven composite ; resin content ; layer structure ; fabric thickness ; compressive strength

三维中空夹层复合材料(以下简称三维中空复合材料)是一种新型的夹心材料,其由经纱、纬纱以及连接并贯穿上下面层的Z向纤维组成^[1]。基于三维中空复合材料的轻质、高强、抗分层及可设计性等特点,其在航空航天、轨道交通、船舶和建筑等领域得到广泛的应用^[2]。

飞行器减重控制在结构设计中的地位非常突出,而复合材料夹层结构的轻质、高强、隔音、隔热等特点即注定其在飞行器上的使用会越来越普及。然而传统复合材料夹层结构由上面板、上面板与中间芯层连接层、芯层、下面板与中间芯层连接层、下面板5部分组成。其成型工艺为蒙皮制备后二次胶接

成型。正是由于上下面板与中间芯层连接处弱界面的存在,导致该类复合材料在湿热环境、载荷和低速冲击下引起分层或破坏^[3-4]。三维整体复合材料的结构特点,使得其克服了传统夹层材料的上述不足^[5]。作为航空地板用三维中空复合材料,减重和高抗压能力成为其最核心的设计参数。

近几年,随着三维中空复合材料的结构优势凸显,其受到了广泛关注。祝成炎等^[6]通过中空织物结构设计来提高复合材料的力学性能,其经结构包含‘X’型和‘V’型;Yu Kejing等^[1]为提高三维

联系人:张守玉,硕士研究生,从事高分子及复合材料材料研究
收稿日期:2017-03-13

中空复合材料的压缩强度,设计了“88”结构,并取得了一定成果;A. S. Vaidya 等^[7]采用的提高三维中空复合材料强度的方法为在绒经层填充泡沫;除此之外,三维中空复合材料的力学性能^[8-9],预浸料技术研究^[10],组织结构^[11],电性能研究^[12]和工艺性研究^[13]等方面工作也已成为研究的热点。

三维中空织物增强树脂基复合材料的研究主要集中在绒经倾斜角度、织物组织结构、绒经区域填充、疲劳特性及力学性能等。然而针对航空地板的轻质高抗压要求,进行的工艺性研究较少。由于三维中空织物的结构特殊性和树脂基体自身因重力而向下渗透的因素,导致树脂基体在复合过程中存在厚度方向分布不均的现象。树脂的这种分布特性使得制品上下面层的力学性能存在较大差异。张守玉等^[14]以 8 mm 中空织物为原料研究了树脂含量对中空织物复合材料性能的影响,结果表明,随树脂含量增加,复合材料上下面层树脂含量分布差异化增加、力学性能明显提高。

笔者在上述研究成果基础上,针对航空地板的高抗压要求,利用树脂在三维中空复合材料体系中的分布差异化,探讨双夹层中空复合材料中织物铺层顺序对复合材料压缩性能的影响,为整体三维中空复合材料设计提供指导作用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

三维中空织物:ZK5, ZK8, ZK15,中材科技股份有限公司;

环氧树脂(EP):GT-807,惠柏新材料科技(上海)有限公司;

固化剂:GT-807A,惠柏新材料科技(上海)有限公司。

1.2 主要仪器及设备

鼓风烘箱:DHG-9240(A)型,上海一恒科学仪器有限公司;

万能材料试验机:HF-9005S 性,苏州力高检测设备有限公司。

1.3 试样制备与铺层结构设计

采用手糊成型工艺制备多种铺层结构的三维中空复合材料,其中 EP 与固化剂质量比为 100 / 20,树脂体系混合黏度(25℃)为 350~550 mPa·s,在鼓风烘箱中对树脂体系进行固化,固化工艺为 70℃ +4 h。三维中空织物厚度分别为 5,8,15 mm,三维中空织物结构示意图见图 1,参数如表 1 所示。

设计的铺层结构见表 2。

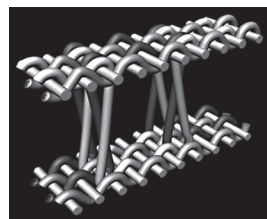


图 1 三维中空织物结构示意图

表 1 三维中空织物结构参数

织物规格	织物厚度 / mm	面层厚度 / mm	芯材结构	单位面密度 / (g·m ⁻²)
ZK5	5	0.36	“8”字形	810
ZK8	8	0.36	“8”字形	920
ZK15	15	0.58	“8”字形	1 580

表 2 三维中空复合材料的铺层结构

编号	铺层顺序 ¹⁾ (中空织物)	测试试样	织物 / EP 质量比
1 [#]	脱模布 + ZK8 + 脱模布	ZK8	1.0 / 0.8
2 [#]	脱模布 + ZK8 + 脱模布	ZK8	1.0 / 1.1
3 [#]	脱模布 + ZK8 + 脱模布	ZK8	1.0 / 1.3
4 [#]	脱模布 + ZK8 + 脱模布	ZK8	1.0 / 2.0
5 [#]	脱模布 + ZK8 + ZK5 + 脱模布	ZK8 + ZK5	1.0 / 1.2
6 [#]	脱模布 + ZK8 + 脱模布 + ZK5 + 脱模布	ZK8 + 脱模布 + ZK5	1.0 / 1.2
7 [#]	脱模布 + ZK5 + 脱模布 + ZK8 + 脱模布	ZK5 + 脱模布 + ZK8	1.0 / 1.2
8 [#]	脱模布 + ZK8 + 脱模布 + ZK5 + 脱模布	下层 ZK8	
9 [#]	脱模布 + ZK8 + 脱模布 + ZK5 + 脱模布	上层 ZK5	
10 [#]	脱模布 + ZK5 + 脱模布 + ZK8 + 脱模布	下层 ZK5	
11 [#]	脱模布 + ZK5 + 脱模布 + ZK8 + 脱模布	上层 ZK8	
12 [#]	脱模布 + ZK15 + ZK5 + 脱模布	ZK15 + ZK5	1.0 / 1.2
13 [#]	脱模布 + ZK5 + ZK15 + 脱模布	ZK5 + ZK15	1.0 / 1.2

注:铺层顺序中从左往右的顺序表示从下层至上层,全文同。

其中试样 1[#],2[#],3[#]和 4[#]为不同树脂含量单夹层三维中空复合材料,主要研究树脂含量对三维中空复合材料性能的影响。

结合其他文献的研究结果:三维中空复合材料压缩强度随树脂含量的增加而增加^[14],随织物厚度的增加而降低^[15];树脂含量在中空复合体系中存在非均匀性分布^[14]。通过对双夹层三维中空复合体系中树脂含量、树脂分布、织物厚度等因素综合考虑,探讨双夹层中空复合材料中织物铺层顺序对复合材料压缩性能的影响,为整体三维中空复合材料设计提供依据。

为深入探讨铺层顺序对复合材料压缩性能影响的原因,尝试在双夹层中空织物中间设置脱模布作为隔离层,为后续双夹层体系中某单层的独立性测试提供可能。试样 6[#]为在试样 5[#]基础上增加中间脱模布隔离层,探究脱模布的引入对复合材料整体性能的影响。试样 6[#]和试样 7[#]为两种厚度织物不同铺层顺序试样,研究铺层顺序对三维中空复

合材料性能影响。试样 8[#]、试样 9[#]、试样 10[#]、试样 11[#] 为试样 6[#] 和试样 7[#] 从脱模布隔离层分离后的独立单元,用于深入分析铺层顺序对三维中空复合材料性能的影响。

为验证上述铺层结构对双夹层三维中空复合材料影响趋势的普适性,追加制备并测试 ZK15 和 ZK5 两种织物在普通铺层顺序下试样 12[#] 和 13[#] 的压缩强度。

1.4 性能测试

(1) 树脂含量测试。

上述各组复合材料树脂含量测试试样尺寸为 500 mm × 500 mm,树脂含量按式 (1) 计算。

$$M_r = (1 - M_0 / M) \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_r ——复合材料体系中树脂的含量, %;

M ——复合材料的面密度, g/m²;

M_0 ——增强织物的面密度, g/m²。

整体三维中空织物增强树脂基复合材料中各层树脂含量的测试方法为:首先在织物铺层阶段将具有层间分离功能的脱模布置于两层中空织物之间,树脂灌注及固化完成后,将上下层中空织物沿脱模布界面分离,按照式 (1) 分别测试上下层中空织物增强复合材料中树脂含量。

(2) 压缩强度测试。

压缩强度按照 GB/T 1453-2005 测试,试样尺寸为 60 mm × 60 mm,测试加载速度为 2.0 mm/min,每组试样测试数量 ≥ 5 件,测试结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 树脂含量对三维中空复合材料压缩强度的影响

经树脂含量测试,试样 1[#]~4[#] 的树脂质量分数分别为 42.87%, 51.19%, 57.40%, 66.92%, 在此基础上测试了试样 1[#]~4[#] 的压缩强度,结果如图 2 所示。

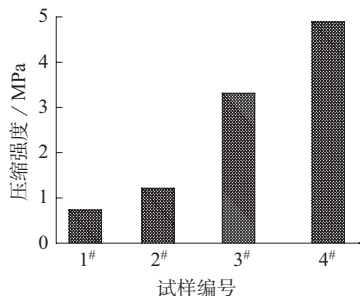


图2 不同树脂含量的三维中空复合材料压缩强度

图2结果显示,相比于传统实心玻璃钢复合材料,中空复合材料的压缩强度随树脂含量变化趋势有较大差异:在保证树脂对纤维浸透前提下,传统玻璃钢复合材料的压缩强度随纤维含量的增加(即

树脂含量的降低)而增加^[16];三维中空复合材料的压缩强度随体系中树脂含量的增加而增加。三维中空复合材料树脂质量分数为 42.87% 时,复合材料的压缩强度为 0.73 MPa,树脂质量分数提高至 66.92% 时,其压缩强度为 4.89 MPa,提高 568%。

实心玻璃钢体系中,增强体提供复合材料的主要力学性能,增强纤维含量随体系中树脂含量的增加而减小,导致实心玻璃钢复合材料力学性能下降;三维中空复合材料的结构特点使得其纤维体积含量不会随树脂含量的提高而明显改变。三维中空复合材料的压缩强度取决于织物结构中绒经纱线的抗压能力。树脂含量增加时,树脂对纤维具有更好的浸透性,在外加载荷作用下,载荷能够更好的通过树脂传递到纤维增强体,从而有效提高中空复合材料的压缩强度;同时随着体系中树脂质量含量的增加,复合体系中绒经区域树脂的体积含量增加,绒经区域承载横截面积增大,绒经纤维的抗压缩失稳能力显著提高,进而宏观上改善复合材料压缩强度。

2.2 铺层结构对双夹层三维中空复合材料压缩强度的影响

研究发现^[14],由于三维中空织物的结构特殊性和树脂体系的自身重力因素,树脂体系在浸透中空织物后的固化过程中,树脂因自身重力作用而从中空织物上层向织物下层流动,导致树脂体系在织物下层树脂含量明显高于上层树脂含量。对于双/多夹层中空复合材料体系中这种树脂分布梯度会更为明显。在相同组织结构条件下,中空复合材料压缩强度随织物高度的增加而降低^[15]。利用上述两方面的因素对双夹层中空复合材料进行铺层优化。

针对试样 5[#] (ZK8+ZK5)、试样 6[#] (ZK8+脱模布+ZK5) 和试样 7[#] (ZK5+脱模布+ZK8) 进行了同炉制备和压缩强度测试,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,在试样 5[#] 基础上增加脱模布制备的试样 6[#],其压缩强度与试样 5[#] 基本一致,因此可以假设脱模布的引入对双夹层中空复合材料力学性能无明显影响。

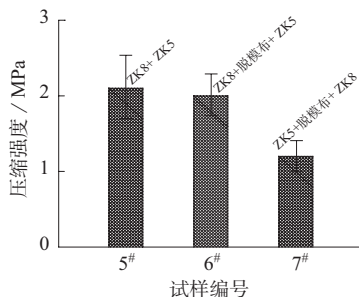


图3 试样 5[#]、试样 6[#] 和试样 7[#] 的压缩强度

试样 6[#] 和试样 7[#] 铺层结构的区别在于 ZK8 和 ZK5 铺层顺序颠倒,其中试样 6[#] 中 ZK5 置于上层,试样 7[#] 中 ZK8 置于上层。两种试样中织物 /EP 体系质量比均为 1 / 1.2,但经树脂含量测试发现试样 6[#] 和试样 7[#] 的树脂质量分数分别为 55.78% 和 52.10%,这是因为双夹层三维中空复合材料的制备工艺为手糊成型,其受到的影响因素较多,可能会导致复合材料中树脂的分布存在一定差异。由于两种试样的树脂含量差异相对较小,可暂不考虑树脂含量的影响。由图 3 可以发现,在不考虑树脂含量的情况下,ZK5 和 ZK8 织物铺层顺序对双夹层中空复合材料的压缩强度影响较大,其中试样 6[#] 压缩强度 (2.0 MPa) 为试样 7[#] 压缩强度 (1.2 MPa) 的 1.7 倍,即采用 ZK8 和 ZK5 织物制备总厚度为 13 mm 的三维中空复合材料时,通过铺层优化,将高厚度中空织物 ZK8 置于低厚度中空织物 ZK5 下层的结构明显优于 ZK8 置于 ZK5 上层的结构。通过这一概念,可以在保证复合材料整体厚度尺寸不变、质量不增加的条件下,利用铺层结构设计最大限度地提高三维中空复合材料的力学性能。

2.3 分型实验

为探究三维中空复合材料铺层结构对复合材料压缩强度影响的本质原因,以脱模布为分型面分别对试样 6[#] 和试样 7[#] 进行上下层中空复合材料分型,其中试样 8[#] 和试样 9[#] 分别为铺层试样 6[#] 中的下层 ZK8 和上层 ZK5 织物层,试样 10[#] 和试样 11[#] 分别为试样 7[#] 中的下层 ZK5 和上层 ZK8 织物层。表 3 为试样 6[#]~11[#] 的铺层顺序和树脂含量,图 4 为试样 6[#]~11[#] 的压缩强度。

表 3 试样 6[#]~11[#] 的铺层顺序和树脂含量

编号	铺层顺序 (中空织物)	测试试样	树脂质量分数 / %
6 [#]	ZK8+脱模布+ZK5	ZK8+脱模布+ZK5	55.78
7 [#]	ZK5+脱模布+ZK8	ZK5+脱模布+ZK8	52.10
8 [#]	ZK8+脱模布+ZK5	下层 ZK8	63.07
9 [#]	ZK8+脱模布+ZK5	上层 ZK5	51.73
10 [#]	ZK5+脱模布+ZK8	下层 ZK5	53.79
11 [#]	ZK5+脱模布+ZK8	上层 ZK8	50.19

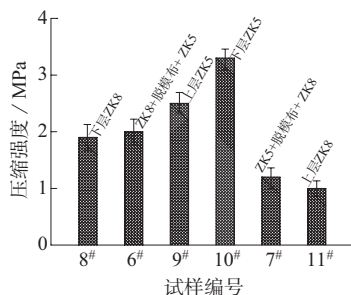


图 4 试样 6[#]~11[#] 的压缩强度

由表 3 和图 4 可以发现以下现象和结果。

(1) 在试样 6[#] 和试样 7[#] 中,下层复合材料树脂含量均高于上层复合材料树脂含量,且试样 6[#] 上下层树脂分布差异明显大于试样 7[#]。基于绒经纱线对树脂的毛细管虹吸作用,三维中空织物的储胶能力随织物高度的增加而增加,即 ZK8 储存树脂的能力要高于 ZK5,当 ZK8 置于下层时,由于树脂在重力作用下的流动,其所储存的树脂的量将会更多。所以相比于将高厚度中空织物 ZK8 置于下层的试样 6[#],试样 7[#] 中的树脂在上下层的分布一致性更好。

(2) 试样 8[#] 和试样 9[#] 的压缩强度 (1.9, 2.5 MPa) 分别为试样 6[#] 压缩强度 (2.0 MPa) 的 95.0% 和 1.25 倍;试样 10[#] 和试样 11[#] 的压缩强度 (3.3, 1.0 MPa) 分别为试样 7[#] 压缩强度 (1.2 MPa) 的 2.75 倍和 83.3%;试样 8[#] 和试样 11[#] 均为 ZK8 织物层,其置于下层时压缩强度 (1.9 MPa) 为其置于上层时压缩强度 (1.0 MPa) 的 1.9 倍;试样 9[#] 和试样 10[#] 均为 ZK5 织物层,其置于下层时压缩强度 (3.3 MPa) 为其置于上层时压缩强度 (2.5 MPa) 的 1.32 倍。当中空织物相同时,三维中空复合材料的压缩强度随树脂含量的增加而增加^[14],单夹层三维中空复合材料或双夹层中空复合体系中的独立单层体系均适合这一趋势,由于下层的树脂含量一般较高,所以试样 8[#] 的压缩强度明显优于试样 11[#],试样 10[#] 的压缩强度优于试样 9[#]。

(3) 试样 6[#] 的压缩强度 (2.0 MPa) 为试样 7[#] 压缩强度 (1.2 MPa) 的 1.7 倍;试样 6[#] 中上下层分别为试样 8[#] (1.9 MPa) 和试样 9[#] (2.5 MPa),其中试样 8[#] (1.9 MPa) 为该复合体系中的抗压短板,所以试样 6[#] 的整体压缩强度与其短板结构 8[#] 的压缩强度接近;同样,试样 7[#] 中上下层分别为试样 10[#] (3.3 MPa) 和试样 11[#] (1.0 MPa),其中试样 11[#] (1.0 MPa) 为体系中的抗压短板,所以试样 7[#] 的整体压缩强度与其短板结构 11[#] 的压缩强度接近。

(4) 对于不同厚度单夹层三维中空复合材料,压缩强度随织物厚度的增加而降低^[15],即排除树脂含量的影响,ZK8 增强的体系压缩强度要低于 ZK5。从表 3 和图 4 可以发现,在 ZK8 置于上层时,试样 11[#] 的树脂含量较试样 10[#] 的低,但差异相对较小,而压缩强度的差异却非常明显,前者的压缩强度明显低于后者;在 ZK8 置于下层时,试样 8[#] 的树脂含量已远高于试样 9[#],在树脂含量差异较大的情况下,前者的压缩强度仍低于后者。这说明在树脂含量较

小的情况下,相对于树脂含量,织物结构从 ZK5 到 ZK8 的变化对压缩性能的影响更大。这在一定程度上表明了尽管试样 6[#] 和试样 7[#] 的树脂含量有所差异,但差异较小,因此三维中空织物厚度的铺层设计对试样 6[#] 和试样 7[#] 整体压缩性能的贡献起决定性作用。

上述实验现象和结果说明三维中空复合材料铺层设计对复合材料力学性能有较大影响,在后续铺层设计中,将同样结构的高厚度中空织物优先置于复合材料下层,低厚度中空织物置于复合材料上层,可以明显提高三维中空复合材料的压缩强度。这是因为,压缩强度随中空织物厚度增加而降低,故高厚度中空织物为双夹层三维中空复合材料中的短板,而复合材料的整体压缩强度主要取决于短板,根据树脂含量越高三维中空复合材料的压缩强度越高以及双夹层三维中空复合材料中下层的树脂含量高于上层的结论,可通过将高厚度中空织物置于下层以提高其树脂含量来改善压缩强度,从而弥补双夹层复合体系中的短板效应,补强高厚度和低树脂含量中空复合材料的短板,最终实现三维中空复合材料在最小质量基础上综合性能的提升。

2.4 验证实验

为进一步验证上述结论的普适性,设计试样 12[#] 和试样 13[#] 并进行压缩强度测试,两种结构均采用 ZK15 和 ZK5 织物,其中试样 12[#] 将 ZK5 置于上层,试样 13[#] 将 ZK5 置于下层。表 4 为试样 12[#] 和试样 13[#] 的铺层顺序、树脂含量及压缩强度,可以发现两组试样中树脂含量基本一致,但相比于试样 13[#] 的压缩强度,试样 12[#] 的压缩强度提高了 50%。再次验证了将高厚度三维中空织物置于低厚度中空织物下层有利于三维中空复合材料整体压缩强度提升这一结论。

表 4 试样 12[#] 和试样 13[#] 的铺层顺序、树脂含量及压缩强度

编号	铺层顺序(中空织物)	测试试样	树脂质量分数/%	压缩强度/MPa
12 [#]	脱模布+ZK15+ZK5+脱模布	ZK15+ZK5	53.21	1.2±0.05
13 [#]	脱模布+ZK5+ZK15+脱模布	ZK5+ZK15	53.93	0.8±0.05

3 结论

(1) 随树脂含量的增加,三维中空复合材料压缩强度明显提高。

(2) 由于三维中空织物的结构特殊性和树脂基体自身因重力因素而产生的流动特性,双夹层三维中空复合材料中下层的树脂含量明显高于上层;三

维中空织物置于双夹层三维中空复合材料下层时,下层材料的压缩强度明显高于三维中空织物置于上层时上层材料的压缩强度。

(3) 对于双夹层三维中空复合材料,利用树脂含量梯度分布和中空织物高度可设计性等因素,在总厚度和总质量不增加的条件下,可以控制织物铺层顺序,将高厚度中空织物优先置于双夹层三维中空复合材料下层,低厚度中空织物优先置于上层,达到实现复合材料最优力学性能的目的。

(4) 双夹层三维中空复合材料性能随织物高度匹配性、树脂含量及其分布、铺层结构等因素影响显著,以此为基础,可以通过集成优化,以最小的自重,最经济的工艺,达到最优的综合性能。

参考文献

- [1] Yu Kejing, Cao Haijian, Qian Kun, et al. Manufacturing and flat-wise compression performance of modified 3D integrated sandwich fabric composites[J]. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 2014, 105(3):98-102.
- [2] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Manufacturing and low velocity impact characterization of foam filled 3D integrated core sandwich composites with hybrid face sheets[J]. *Composite Structures*, 2005, 69(2):167-181.
- [3] Sadowski T, Bec J. Effective properties for sandwich plates with aluminum foil honeycomb core and polymer foam filling-Static and dynamic response[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(4):1 269-1 275.
- [4] Sharma N, Gibson R F, Ayorinde E O. Fatigue of foam and honeycomb core composite sandwich structures:a tutorial[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2006, 8(4):263-319.
- [5] Tien W S, Yu H P. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interply hybrid laminate[J]. *Composite Structures*, 2004, 64(2):189-198.
- [6] 祝成炎,谭冬宜,田伟,等. 三维正交整体夹芯机织物的结构设计及织造[J]. *纺织学报*, 2006, 27(12):9-13.
- Zhu Chengyan, Tan Dongyi, Tian Wei, et al. Structural design and weaving methods of 3D orthogonal integrated cellular woven fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2006, 27(12):9-13.
- [7] Vaidya A S, Vaidya U K, Uddin N. Impact response of three-dimensional multifunctional sandwich composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 472(1-2):52-58.
- [8] 钟崇岩,曹海建,李娟. 组织结构对三维整体中空复合材料压缩性能的影响[J]. *材料导报*, 2012, 26(s2):279-281.
- Zhong Chongyan, Cao Haijian, Li Juan. Influence of organization structures on compressive property of 3-D integrated sandwich composites[J]. *Materials Review*, 2012, 26(s2):279-281.

(下转第 95 页)

新旧标准的承接工作。

参考文献

- [1] 辛明亮, 李茂东, 张术宽, 等. 聚乙烯燃气管道失效模式研究进展[J]. 中国塑料, 2015, 29(3):16-20.
Xin Mingliang, Li Maodong, Zhang Shukuan, et al. Research progress in failure mode analysis of polyethylene gas pipeline[J]. China Plastics, 2015, 29(3):16-20.
 - [2] 华晔, 武志军, 熊志敏, 等. 聚乙烯 (PE) 燃气管道近期发展动态[J]. 全面腐蚀控制, 2014(4):34-40.
Hua Ye, Wu Zhijun, Xiong Zhimin, et al. The developing trends of polyethylene(PE) gas piping systems[J]. Total Corrosion Control, 2014(4):34-40.
 - [3] 叶俊文, 万雨龙, 容伟结. 燃气用聚乙烯管道系统产品的国内外标准研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(5):94-100.
Ye Junwen, Wan Yulong, Rong Weijie. Domestic and foreign standards of polyethylene piping systems' products for the supply of gaseous fuels[J]. China Plastics, 2015, 29(5):94-100.
 - [4] 龚毅斌, 刘广宇, 谌基国, 等. 2015 版国家标准《燃气用埋地聚乙烯 (PE) 管道系统第 1 部分: 管材》分析[J]. 塑料工业, 2016, 44(12):87-90.
Gong Yibin, Liu Guangyu, Shen Jiguo, et al. Analysis on 2015 version of national standard of buried polyethylene (PE) piping systems for the supply of gaseous fuels Part 1: Pipes[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(12):87-90.
 - [5] 施建峰, 郭伟灿, 师俊, 等. 聚乙烯及其复合管道安全检测与评价方法[J]. 化工学报, 2013, 64(2):756-764.
Shi Jianfeng, Guo Weican, Shi Jun, et al. Development of non-destructive testing and safety assessment of polyethylene and composite pipes[J]. CIESC Journal, 2013, 64(2):756-764.
 - [6] 华晔, 武志军. 聚乙烯压力管材快速裂纹扩展 (RCP) 性能的研究[J]. 塑料, 2014, 43(2):106-109.
Hua Ye, Wu Zhijun. Research of rapid crack propagation (RCP) performance of polyethylene pressure pipes[J]. Plastics, 2014, 43(2):106-109.
 - [7] 赵启辉. 聚乙烯承压管道及原料耐慢速裂纹增长测试标准及实验要求[J]. 中国塑料, 2008, 22(10):90-94.
Zhao Qihui. Test standard and requirement of pressurized polyethylene piping and resistance of slow crack growth [J]. China Plastics, 2008, 22(10):90-94.
 - [8] 林海涛, 黄继伟, 凌新龙. 聚乙烯管材料耐慢速应力开裂性能快速评价方法[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(5):185-190.
Lin Haitai, Huang Jiwei, Lin Xinlong. Fast characterization methods of the environmental slow crack resistance of polyethylene pipe materials—A review[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014, 30(5):185-190.
 - [9] 张正有. 聚乙烯燃气管道带气压扁阻断技术[J]. 煤气与热力, 2013, 33(8):42-44.
Zhang Zhengyou. Squeeze-off technology of polyethylene gas pipe [J]. Gas and Heat, 2013, 33(8):42-44.
 - [10] 汪建国. PE 管热熔对接接头的主要缺陷形式和质量检测[J]. 上海煤气, 2014(3):17-18.
Wang Jianguo. Main deficiency forms and quality inspection of butt-fusion welded joints of PE pipes[J]. Shanghai Gas, 2014(3):17-18.
- (上接第 60 页)
- [9] 曹海建, 冯古雨, 俞科静, 等. 碳纤维 / 环氧树脂基中空夹芯复合材料压缩性能的有限元法研究[J]. 纺织学报, 2015, 36(9):50-54.
Cao Haijian, Feng Guyu, Yu Kejing, et al. Compressive properties of carbon fiber / epoxy resin hollow sandwich composites based on finite element software[J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(9):50-54.
 - [10] 匡宁, 李晋, 耿杰, 等. 中空夹芯织物预浸料的制备与性能表征[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(8):39-42.
Kuang Ning, Li Jin, Geng Jie, et al. Preparation and characterization of hollow sandwich fabric prepreg[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(8):39-42.
 - [11] 王梦远, 曹海建, 钱坤, 等. 三维机织间隔复合材料结构对其力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(11):53-58.
Wang Mengyuan, Cao Haijian, Qian Kun, et al. Effect of structure of three dimensional woven distance composites on mechanical [J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(11):53-58.
 - [12] 陈同海, 周正亮, 张守玉. 透波用三维中空复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(9):141-144.
Chen Tonghai, Zhou Zhengliang, Zhang Shouyu. Research progress on three-dimensional hollow composites used for wave-transparent[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(9):141-144.
 - [13] 匡宁, 陈同海, 钱育胜, 等. 中空复合材料的成型工艺及应用进展[J]. 工程塑料应用, 2015, 41(1):120-123.
Kuang Ning, Chen Tonghai, Qian Yusheng, et al. Progress in molding technology and application of hollow composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 41(1):120-123.
 - [14] 张守玉, 周正亮, 耿杰, 等. 树脂含量及分布对三维中空复合材料性能的影响[J]. 材料导报, 2016(S1):376-378.
Zhang Shouyu, Zhou Zhengliang, Geng Jie, et al. The influence of resin content and distribution on the property of 3D sandwich woven composite[J]. Materials Review, 2016(S1):376-378.
 - [15] 王狄辉, 周光明, 刘畅, 等. 整体中空夹层复合材料平压性能的实验[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(10):90-93.
Wang Dihui, Zhou Guangming, Liu Chang, et al. Experiment on flatwise compression performance of integrated hollow sandwich composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(10):90-93.
 - [16] 尚博, 李嘉禄. 纬编双轴向织物增强复合材料压缩性能研究[J]. 针织工业, 2013(12):37-40.
Shang Bo, Li Jialu. Compressive experimental investigation of biaxial weft knitted fabric reinforced composites[J]. Knitting Industries, 2013(12):37-40.