

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.12.010

大曲率复合材料制件用国产高伸级对位芳纶纸性能

陈丽春, 轩立新, 周凯运, 苏韬

(航空工业济南特种结构研究所, 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023)

摘要: 针对国产高伸级对位芳纶纸开展了一系列物理性能、力学性能、结构性能表征, 并与传统蜂窝制造用NOMEX®T412芳纶纸进行了对比, 对国产高伸级对位芳纶纸用于蜂窝芯材制备的工艺适应性进行了研究。结果表明, 国产高伸级对位芳纶纸的横向抗张强度较NOMEX®T412芳纶纸提高了150%, 纸张结构疏松, 具有吸水性和透气度大、热尺寸稳定性好的特点。相同涂胶工艺制造蜂窝叠层板时, 高伸级对位芳纶纸具有更高的纸张吸胶量, 芯条胶宽度小、节点强度偏低; 蜂窝浸渍过程同样具有较高的吸胶量。高伸级对位芳纶纸基蜂窝可实现大曲率变形, 适用于大曲率复合材料制件制造。通过高伸级对位芳纶纸性能表征, 为高伸级对位芳纶纸基蜂窝芯材制备工艺提供优化指导。

关键词: 大曲率; 高伸级; 对位芳纶纸; 性能

中图分类号: V262.415 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)12-0046-05

Properties of Domestic High-Elongation Para-Aramid Paper for Large Curvature Composites

Chen Lichun, Xuan Lixin, Zhou Kaiyun, Su Tao

(Research Institute for Special Structure of Aeronautical Composite, AVIC, The Aeronautical Science Key Lab for high Performance Electromagnetic Windows, Jinan 250023, China)

Abstract : Compared with NOMEX®T412 meta-aramid paper, the physical property, mechanical property, and surface structure property of domestic PCF45 high-elongation para-aramid paper were shown. Furthermore, the adaptability of printing and dipping processes for domestic PCF45 high-elongation para-aramid paper was studied. The results reflect that compared with meta-aramid paper, the transverse tensile strength of domestic high-elongation para-aramid is increased by 150%, and the domestic high-elongation para-aramid paper shows higher characteristics in easy water absorption, air permeability and thermal dimensional stability. Under the same dipping process, the amount of resin absorption is larger and the speed of resin absorption is faster than T412 honeycomb. The PCF45 honeycomb can realize large curvature R-zone deformation, which is suitable for manufacturing large curvature composites. According to these work above, it provides guidance for domestic PCF45 application in honeycomb.

Keywords : large curvature ; high-elongation ; para-aramid paper ; performance

对于航空复合材料制件, 结构强度与质量的综合迭代贯穿整个产品设计过程。芳纶纸蜂窝具有比强度高、比模量高、轻质可设计的特点, 在航空领域应用广泛^[1]。对位芳纶纸具有刚性的大分子结构^[2], 具备高强、高模以及耐温、阻燃、低介电的优异性能, 是间位芳纶纸的升级产品^[3], 可用于高性能蜂窝芯材的制造, 全面提高蜂窝芯材的综合性能, 允许飞机设计过程采用更为轻质的蜂窝芯材实现其结构强度设计目标, 减轻结构质量, 提高飞行作战能力。

国内外研究人员对对位芳纶纸基蜂窝及其夹层结构进行了许多研究工作^[4-7], 但是普通对位芳纶纸基材料由于其刚性分子结构, 纸张断裂时伸长率低, 在制备大曲率复合材料制件时纸张本身变形能力弱, 应力易集中于芯条胶节点处, 容易出现胶条开裂破坏, 不能满足大曲率复合材料制件的加工要求。高伸级对位芳纶纸专为大曲率复合材料制件研制, 通过采用高伸级对位芳纶纤维和纸张结构设计提高对位芳纶纸的断裂时伸长率, 以适应复合材料制件

通信作者: 陈丽春, 硕士, 高级工程师, 主要从事结构功能一体化复合材料 E-mail : happyclc@126.com

收稿日期: 2020-10-08

引用格式: 陈丽春, 轩立新, 周凯运, 等. 大曲率复合材料制件用国产高伸级对位芳纶纸性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(12) : 46-50.

Chen Lichun, Xuan Lixin, Zhou Kaiyun, et al. Properties of domestic high-elongation para-aramid paper for large curvature composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12) : 46-50.

的大曲率变形要求。

目前国内夹层复合材料制件蜂窝芯材应用最成熟的是 NOMEX®T412 型间位芳纶纸,笔者以 NOMEX®T412 芳纶纸为对比,表征了国产高伸级对位芳纶纸的物理性能、结构性能、耐热性、特别是工艺性方面的差异,为国产高伸级对位芳纶纸基蜂窝制造工艺优化提供依据。

1 实验部分

1.1 原材料

高伸级对位芳纶纸:PCF45 型,2 mil,华南理工大学;

间位芳纶纸:NOMEX®T412 型,2 mil,杜邦公司。

1.2 主要设备及仪器

万能材料试验机:INSTRON5882 型,英国 INSTRON 公司;

万能材料试验机:WDW-5C 型,上海华龙测试仪器有限公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪:DSC204F1 型,德国 NETZSCH 公司;

精密电子天平:JJ5000 型,常熟双杰测试仪器厂;

电热鼓风干燥箱:101A-AS 型,上海锦屏仪器仪表有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM):LEO-1530 VP 型,德国 LEO 公司;

厚度仪:J-DHY03A 型,四川长江造纸仪器有限责任公司;

可勃测定仪:SKZ109 型,济南恒品机电技术有限公司;

撕裂强度测试仪:ZY-SL-A 型,三全中石实验仪器有限公司。

1.3 试样制备

分别采用国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 和 NOMEX®T412 芳纶纸按照相同的涂胶工艺和浸胶工艺条件制备纸基蜂窝叠层板和蜂窝芯材,蜂窝芯材制备流程见图 1。

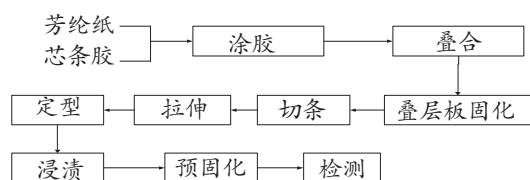


图1 蜂窝芯材制作流程图

对比测试纸张涂胶状态、叠层板芯条胶宽度、节点强度,考察国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 涂胶工艺适应性;通过浸渍过程容重增长情况和酚醛树脂胶液与纸张的浸润情况,考察国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 浸渍工艺适应性。

1.4 性能测试

芳纶纸纵向、横向抗张强度、弹性模量、断裂时伸长率按照 GB/T 12914-2008 测试;

芳纶纸纵横向撕裂度按照 GB/T 455-2002 测试;

芳纶纸厚度按 GB/T 451.3-2002 测试;

芳纶纸定量按 GB/T 451.2-2002 测试

芳纶纸吸水性按 GB/T 1540-2002 测试;

芳纶纸表面强度按 GB/T 22837-2008 测试;

芳纶纸透气度按 GB/T 458-2008 测试;

芳纶纸基蜂窝叠层板节点强度按 JC/T 781 测试;

芳纶纸基蜂窝容重按《夹层结构或芯子密度试验方法》测试;

用 SEM 对浸渍酚醛树脂前后国产高伸级对位芳纶纸与 NOMEX®T412 芳纶纸的截面形貌进行了观察并拍照;

芳纶纸热收缩率测试:样品尺寸纵向 (MD) 400 mm × 横向 (CD) 460 mm,每个方向上间隔 100 mm 标识等间距的标记线。110℃条件下干燥 1 h 后,用高精度钢尺测量标记线的间隔距离。在 280℃条件下保持 15 min 后,快速测量标记线的间隔距离并记录。计算干燥状态到 280℃时芳纶纸纵向和横向收缩率均值。

2 结果与讨论

2.1 国产高伸级对位芳纶纸力学性能

考察国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 的 MD 及 CD 的抗张强度、弹性模量、断裂时伸长率、撕裂度,并与 NOMEX®T412 芳纶纸进行力学性能对比。结果见表 1。

表1 芳纶纸的力学性能

纸张	抗张强度 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)		断裂时伸 长率 / %		弹性模量 / GPa		撕裂度 / mN	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD	MD	CD
高伸级 PCF45	5.51	4.42	2.54	2.23	6.19	4.98	1514	1860
NOMEX®T412	4.02	1.77	8.91	4.71	3.12	1.70	910	1295

从表 1 可以看出,国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 对比 NOMEX®T412 芳纶纸纵向抗张强度提高 37%,横向抗张强度提高 150%;纵向断裂时伸长

率比 NOMEX®T412 芳纶纸的低 71.5%, 横向断裂时伸长率低 52.6%, 纵向弹性模量比 NOMEX®T412 高 98.4%, 横向弹性模量比 NOMEX®T412 高 193%, 纵向撕裂度比 NOMEX®T412 高 66%, 横向撕裂度比 NOMEX®T412 高 43%。由于间位芳纶纸张纤维更倾向于纵向排列, 导致纸张纵向抗张强度高、横向抗张强度低, 而对位芳纶纸纤维由于表面惰性造纸分散过程更倾向于无序, 因此纵向、横向抗张强度差异较小, 纸张横向抗张强度、弹性模量显著高于间位芳纶纸, 这对于制备蜂窝芯材的 T 向性能提高有利。

2.2 国产高伸级对位芳纶纸物理性能

对国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 的厚度、定量、表面吸水性(A面/B面)、透气度(A面/B面)进行了考察, 并与 NOMEX®T412 芳纶纸进行物理性能对比, 测试结果见表 2。

表 2 芳纶纸物理性能表征结果

纸张	厚度 / mm	定量 / (g·m ⁻²)	吸水性(可勃 值) / (g·m ⁻²)		透气度 / [μm·(Pa·s) ⁻¹]	
			A 面	B 面	A 面	B 面
高伸级 PCF45	0.059	45	12.5	13.6	0.081	0.063
NOMEX®T412	0.062	41	1.65	1.52	0.0058	0.0074

从表 2 可以看出, 高伸级对位芳纶纸 PCF45 的表面吸水率是 NOMEX®T412 芳纶纸的 7~9 倍, 透气度是 NOMEX®T412 芳纶纸的 8~14 倍, 这与对位芳纶纸较为疏松的纸张结构有关。

2.3 国产高伸级对位芳纶纸表面强度分析

芳纶纸表面强度是指纸张表面纤维组织与内部纤维之间的结合强度, 表面强度低, 则纸张经涂胶、叠层、固化制备的芳纶纸基蜂窝叠层板在拉伸过程易出现表面纤维扯离或纸张分层破坏, 影响蜂窝叠层板的节点强度^[8]。

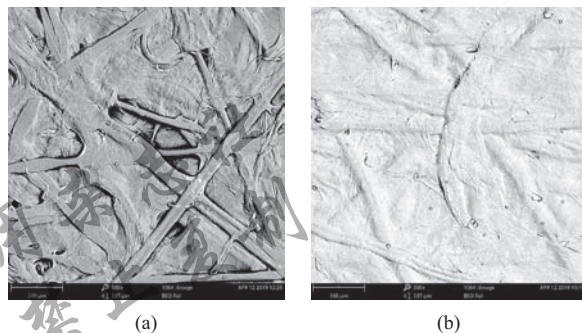
分别测试了 5 批次国产高伸级对位芳纶纸与 NOMEX®T412 芳纶纸的表面强度。结果见表 3。

表 3 芳纶纸表面强度对比

批次	高伸级 PCF45		NOMEX®T412	
	A 面	B 面	A 面	B 面
1	14A	14A	22A	22A
2	18A	18A	22A	22A
3	16A	16A	22A	22A
4	18A	18A	22A	22A
5	18A	18A	22A	22A

由表 3 可见, 高伸级对位芳纶纸的表面强度为 14A~18A, 而 NOMEX®T412 芳纶纸的表面强度为 22A, 两者差别较大, 主要原因是两种纸的纸张结构不同。图 2 为芳纶纸微观结构 SEM 照片。通过 SEM 观察, 国产高伸级对位芳纶纸与 NOMEX®T412 芳纶纸的表面形貌, 可以发现国产高

伸级对位芳纶纸纸张结构较为疏松, 表面有很多空隙, 而间位芳纶纸纸张表面较为致密。因为在成纸过程中, 间位芳纶纸浆粕可以熔融, 将造纸短切纤维紧密粘接在一起, 并形成较为致密的表面层; 高伸级对位芳纶纸的纤维分子主链刚性大, 酰胺键与苯环基团形成共轭结构, 成纸过程不易分散, 且纤维之间的粘结力弱, 且对位芳纶浆粕在成纸过程中没有明显的熔限, 不能将短切纤维有效结合到一起, 纸张表面层和内部结构都相对疏松^[9], 因而导致国产高伸级对位芳纶纸表面吸水率和透气度高的原因, 为后续蜂窝叠层板制备带来较大难度。



a—对位芳纶纸表面(×500); b—间位芳纶纸表面(×500)

图 2 芳纶纸微观结构 SEM 照片

2.4 国产高伸级对位芳纶纸热稳定性

纸张热收缩率是蜂窝芯材热定型过程中尺寸稳定性的关键影响因素, 通过热收缩率表征高伸级对位芳纶纸的热稳定性, 并与 NOMEX®T412 芳纶纸进行对比。国产高伸级对位芳纶纸与 NOMEX®T412 芳纶纸 280℃热收缩率对比见表 4。

表 4 芳纶纸热收缩率对比

纸张	MD	CD
高伸级 PCF45	0.13	0.16
NOMEX®T412	1.52	1.15

根据表 4 中测试结果, 国产高伸级对位芳纶纸的热收缩率小于 NOMEX®T412 芳纶纸, 纵向热收缩率约为 NOMEX®T412 芳纶纸的 8.5%, 横向热收缩率约为 NOMEX®T412 芳纶纸的 13.9%, 具有更优的尺寸稳定性。

2.5 国产高伸级对位芳纶纸工艺适应性

(1) 涂胶工艺适应性。

分别采用国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 与 NOMEX®T412 芳纶纸在相同印胶辊、相同芯条胶种类和涂胶工艺条件下制备格孔边长 2 mm 的蜂窝叠层板, 对国产高伸级对位芳纶纸的涂胶工艺适应性及制备叠层板的胶条宽度、节点强度进行考察。结

果见表 5。

由表 5 可以看出,采用相同浸胶工艺和印胶辊的条件下,国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 的纸张上胶量较 NOMEX®T412 芳纶纸明显提高了 13.3%,而固化后胶条宽度较设计宽度窄了 0.58 mm,叠层板节点强度较 NOMEX®T412 芳纶纸基叠层板降低 15.1%,这是由于高伸级对位芳纶纸纸张结构疏松和透气度高导致的。国产高伸级对位芳纶纸纸张结构疏松、表面和内部空隙率较高,涂胶过程芯条胶渗入到纸张结构内部的比例增大,相同印胶辊涂制的纸张上胶量高于 NOMEX®T412 芳纶纸,加压固化过程,芯条胶在纸张内部的渗透依然大于在纸张表面的流延,芯条胶胶接面积及用于纸张层间胶接的芯条胶比例均低于 NOMEX®T412 芳纶纸,因此,国产高伸级对位芳纶纸制作叠层板的胶条宽度较 NOMEX®T412 芳纶纸小且叠层板节点强度低。

表 5 芳纶纸基蜂窝叠层板性能对比

项目	高伸级 PCF45	NOMEX®T412
纸张上胶量/(g·m ⁻²)	2.22	1.96
固化后胶条宽度/mm	1.42	2.00
节点强度/(N·m ⁻¹)	354	417
拉伸后白蜂窝容重/(kg·m ⁻³)	35.5	29.8

由于纸张定量和涂胶过程上胶量均高于 NOMEX®T412 芳纶纸,国产高伸级对位芳纶纸基蜂窝叠层板拉伸后的白蜂窝容重明显高于 NOMEX®T412 芳纶纸基蜂窝,提高了 5.7 kg/m³。

(2) 浸渍工艺适应性。

分别采用国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 与 NOMEX®T412 芳纶纸基蜂窝叠层板切条至相同厚度后在酚醛树脂体系中同时浸渍、提取、晾晒净化、烘干,每次浸渍烘干后称量蜂窝容重,考察国产高伸级对位芳纶纸的浸渍工艺性。结果见表 6。

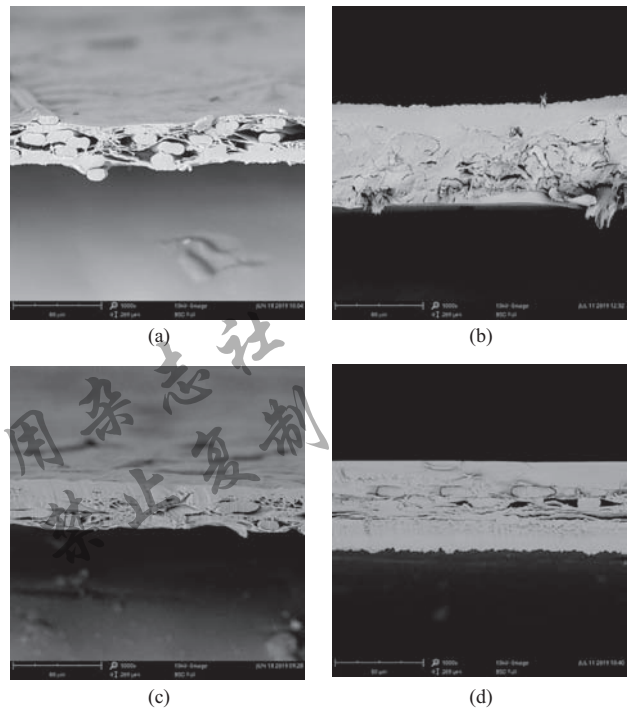
表 6 芳纶纸浸胶工艺性对比

浸渍次数/次	高伸级对位芳纶纸 PCF45 蜂窝容重	NOMEX®T412 芳纶纸 蜂窝容重
0	35.5	29.8
1	55.8	42.5
2	69.5	51.4
3	80.2	58.7
4	91.6	67.2

由表 6 可以看出,采用相同工艺进行浸渍时,国产高伸级对位芳纶纸基蜂窝容重增长较快,第 1 遍浸渍吸胶量较 NOMEX®T412 芳纶纸基蜂窝提高了 59.8%,后续每次浸渍吸胶量均较 NOMEX®T412 芳纶纸基蜂窝提高 34% 以上。这是由于国产高伸级对位芳纶纸纸张孔隙多,透气度大,酚醛树脂易渗透

导致的吸胶快,吸胶量大,蜂窝容重不易控制。

图 3 为浸渍酚醛树脂前后芳纶纸截面微观结构 SEM 照片,放大 1 000 倍。从图 3 看出,国产高伸级对位芳纶纸浸渍后树脂向纸张内部渗透更明显,固化的树脂可以将疏松分散的短切纤维胶接结合为一体,使得对位芳纶纤维高强高模的优势得以发挥,得到更高的蜂窝力学性能。



a—对位芳纶纸浸胶前截面; b—对位芳纶纸浸胶后截面;
c—间位芳纶纸浸胶前截面; d—间位芳纶纸浸胶后截面

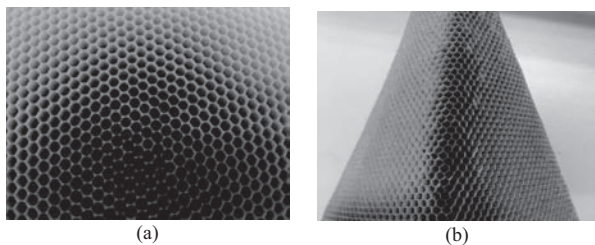
图 3 浸渍酚醛树脂前后芳纶纸截面微观结构 SEM 照片

(放大 1 000 倍)

2.6 国产高伸级对位芳纶纸基蜂窝工艺性

蜂窝芯材在 R 区的变形问题一直是高曲率夹层结构复合材料制件制造的技术难点。对位芳纶纸基材料纤维刚性大,蜂窝比模量高,制备大曲率复合材料制件时变形难度更大。为考察国产高伸级对位芳纶纸基蜂窝的 R 区变形工艺性,按图 1 流程制备厚度 10 mm、容重 80 kg/m³ 的对位芳纶纸基蜂窝,在棱边曲率半径为 3 mm 的工装上进行蜂窝变形试验。图 4 为对位芳纶纸基蜂窝大曲率变形试验。

由图 4 结果显示,10 mm 厚度、80 kg/m³ 高容重高伸级对位芳纶纸基蜂窝芯材可根据工装型面弯折赋型,实现大曲率变形,蜂窝芯材与工装贴合性较好,未出现格孔开裂等问题,说明高伸级对位芳纶纸基蜂窝变形工艺性良好,适用于大曲率夹层结构复合材料制件制造。



a—对位芳纶纸基蜂窝变形前;b—对位芳纶纸基蜂窝大曲率变形后
图4 对位芳纶纸基蜂窝大曲率变形试验

3 结论

采取多种试验方法考察表征了国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 的力学性能、物理性能、热稳定性、表面强度及蜂窝制造工艺适应性,并与目前蜂窝芯材应用最广泛的 NOMEX®T412 芳纶纸进行了对比分析,得出结论如下。

(1) 与 NOMEX®T412 芳纶纸相比,国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 抗张强度、弹性模量、撕裂度均有大幅度提高;国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 纸张结构较为疏松,表面吸水率是 NOMEX®T412 芳纶纸的 7~9 倍,透气度是 NOMEX®T412 芳纶纸的 8~14 倍,表面强度较 NOMEX®T412 芳纶纸低,为 14A~18A。

(2) 国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 在 280℃ 下的热收缩率约为 NOMEX®T412 芳纶纸的 8.5%~13.9%,具有更优的热尺寸稳定性。

(3) 相同涂胶工艺制备国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 基蜂窝叠层板较 NOMEX®T412 芳纶纸基叠层板胶条宽度小、节点强度下降;在相同的浸渍工艺条件下,国产高伸级对位芳纶纸 PCF45 具有吸胶量大,容重增长快,树脂向纸张内部渗透更显著的特点。

(4) 高伸级对位芳纶纸基蜂窝芯材变形工艺性良好,可适用于大曲率夹层结构复合材料制件制造。

参考文献

- [1] 穆举杰,刘玉. 国产芳纶纸蜂窝在雷达罩上的应用[J]. 现代雷达, 2014,36(9):58-60.
Mu Jujie, Liu Yu. Applications of domestic aramid paper honeycomb in radome[J]. Modern Radar, 2014, 36(9):58-60.
- [2] 柳敏静,武湛君. 复合材料蜂窝夹层结构在飞机中的应用[J]. 科技导报, 2016,34(8):21-25.
Liu Minjing, Wu Zhanjun. Application of composite honeycomb sandwich structure in aircraft[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(8):21-25.
- [3] 程文礼,袁超,邱启艳,等. 航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J]. 航空制造技术, 2015(7):94-98.
Cheng Wenli, Yuan Chao, Qiu Qiyan, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(7):94-98.
- [4] 袁晓龙,田卫,高兰宁. 大型复合材料主承力构件制造技术综述[J]. 航空制造技术, 2009(22):32-35.
Yuan Xiaolong, Tian Wei, Gao Lanning. Summary of manufacturing technology of large composite primary-load-carrying structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(22):32-35.
- [5] 刘杰,郝巍,孟江燕. 蜂窝夹层结构复合材料应用研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2013(3):25-29.
Liu Jie, Hao Wei, Meng Jiangyan. Progress in applied research of honeycomb sandwich composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013(3):25-29.
- [6] 张美云,杨斌,陆赵倩,等. 对位芳纶纸性能研究[J]. 中国造纸, 2012,31(8):23-27.
Zhang Meiyun, Yang Bin, Lu Zhaoqing, et al. Study on the properties of para-aramid paper[J]. China Pulp & Paper, 2012, 31(8):23-27.
- [7] 罗玉清,宋欢,陆志远,等. 芳纶蜂窝复合材料的制备及性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2018,43(4):5-11.
Luo Yuqing, Song Huan, Lu Zhiyuan, et al. Study on the preparation and properties of aramid honeycomb composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2018, 43(4):5-11.
- [8] 王厚林,王宜,姚运振,等. 芳纶纸蜂窝力学性能与纸张性能相关性的研究[J]. 功能材料, 2013,44(3):349-352.
Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. The relationship between aramid paper honeycomb mechanical properties and paper performance[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(3):349-352.
- [9] 郝巍,罗玉清,王萌. 国产对位芳纶纸蜂窝与 NH-1 蜂窝性能的对标研究[J]. 高科技纤维与应用, 2011,36(4):17-20.
Hao Wei, Luo Yuqing, Wang Meng. A contrast study on domestic P-Aramid honeycomb and NH-1 honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2011, 36(4):17-20.
- [10] 马春花,刘玉. 国产芳纶纸蜂窝性能的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2013,38(3):20-38.
Ma Chunhua, Liu Yu. Study on the properties and application of China's domestic aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2013, 38(3):20-38.
- [11] 郑付来. 芳纶纸蜂窝酚醛树脂与国产芳纶纸的匹配性研究[J]. 高科技纤维与应用, 2018,43(4):44-49.
Zheng Fulai. Study on the matching of phenolic resin and domestic aramid paper of aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2018, 43(4):44-49.
- [12] 刘杰,郝巍,罗玉清,等. 航空用芳纶纸蜂窝性能差异性研究[J]. 失效分析与预防, 2014,9(2):80-83,93.
Liu Jie, Hao Wei, Luo Yuqing, et al. Study on properties difference of aviation aramid paper honeycomb[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(2):80-83, 93.

- Mechanization, 2009(4):28.
- [7] 杨金魁. 2018年中国造纸网毯行业运行情况[J]. 造纸信息, 2019(5):58-59.
- Yang Jinkui. Operation Situation of China paper-making carpet industry in 2018[J]. Paper Information, 2019(5):58-59.
- [8] Fecine G J M, Rabello M S, Souto-Maior R M. The effect of ultraviolet stabilizers on the photodegradation of poly(ethylene terephthalate)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, 75(1):153-159.
- [9] 易志文. 聚酯纤维的抗紫外老化特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2015:10-12.
- Yi Zhiwen. Anti-ultraviolet aging properties of polyester fiber[D]. Shang Hai: Donghua University, 2015:10-12.
- [10] 钟世云, 许乾慰, 王公善. 聚合物降解与稳定化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002:3-15.
- Zhong Shiyun, Xu Qianwei, Wang Gongshan. Polymer degradation and stabilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002:3-15.
- [11] 翟和生. 抗紫外聚酯纤维的制备和性能[J]. 化工时刊, 2012, 26(5):1-3.
- Zhai Hesheng. Preparation and properties of anti-ultraviolet polyester fiber[J]. Chemical Industry Times, 2012, 26(5):1-3.
- [12] 陈康, 易志文, 周桂强, 等. 抗紫外老化高强聚酯纤维的制备与性能研究[J]. 合成纤维工业, 2017, 40(5):1-6.
- Chen Kang, Yi Zhiwen, Zhou Guiqiang, et al. Preparation and properties of ultraviolet aging resistant high-strength polyester fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2017, 40(5):1-6.
- [13] 刘森林, 易志文, 南建举, 等. 共混纺丝法制备抗紫外老化高强PET纤维的性能研究[J]. 合成纤维工业, 2017, 40(6):12-16.
- Liu Senlin, Yi Zhiwen, Nan Jianju, et al. Properties of anti-ultraviolet aging high-strength PET fiber via blend spinning process[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2017, 40(6):12-16.
- [14] 胡蝶. 抗紫外PET纤维母粒的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018:5-7.
- Hu Die. Study on preparation and properties of uv-resistant masterbatch for polyester fibers[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018:5-7.
- [15] 马海燕. 大直径聚合物单丝成形机理及结构性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2011:7-10.
- Ma Haiyan. Study on forming mechanism structure and properties of large diameter polymer monofilament[D]. Shanghai: Donghua University, 2011:7-10.
- [16] 王城, 马海燕, 马海军. 高强粗旦聚丙烯工业丝加工条件对其结构及性能的影响[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(2):5-8.
- Wang Cheng, Ma Haiyan, Ma Haijun. Effect of processing conditions on structure and properties of High Strength Coarse denier polypropylene industrial yarn[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2020, 43(2):5-8.
- [17] 甘宇, 姬洪, 徐锦龙, 等. 聚酰胺/聚酯皮芯复合纤维的研究开发[J]. 合成纤维, 2020, 49(2):7-12.
- Gan Yu, Ji Hong, Xu Jinlong, et al. Research and development of polyamide/polyester sheath-core composite fiber[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(2):7-12.
- [18] 顾目强, 王珏, 占海华. 全消光异形收缩涤纶FDY的制备与性能[J]. 合成纤维, 2020, 49(1):11-14.
- Gu Riqiang, Wang Yu, Zhan Haihua. Preparation and properties of full extinction profiled polyester FDY[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(1):11-14.
- [19] 郭海洋, 陈康, 张焱, 等. 热定形超喂率对大直径涤纶单丝结构与性能的影响[J]. 合成纤维, 2020, 49(5):1-7.
- Guo Haiyang, Chen Kang, Zhang Ye, et al. Effect of heat setting overfeed rate on structure and properties of large diameter polyester monofilament[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(5):1-7.
- [20] 陆焱邦, 马海燕, 赵化伟, 等. r-PET扩链增粘工艺及其单丝力学性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(11):13-18.
- Lu Yebang, Ma Haiyan, Zhao Huayi, et al. Chain extending process of r-PET and its monofilament mechanical property[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(11):13-18.

(上接第50页)

- [13] 林志娇, 李兰英, 何鑫业, 等. 高伸级对位芳纶的性能、制备及应用概述[J]. 合成纤维, 2020, 49(2):27-31.
- Lin Zhijiao, Li Lanying, He Xinye, et al. Overview of properties, preparation and application of high elongation of para-aramid fibers[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(2):27-31.
- [14] 罗玉清, 王萌, 郝巍, 等. 芳纶纸基结构性能对蜂窝性能影响关系的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2018, 43(5):42-47.
- Luo Yuqing, Wang Meng, Hao Wei, et al. Study on relationships between properties of aramid paper and properties of honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2018, 43(5):42-47.
- [15] 王厚林, 王宜, 姚运振, 等. 芳纶纸结构性能及其对蜂窝力学性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(15):2184-2192.
- Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. Aramid paper's structure and performance and their effect on the mechanical properties of aramid paper[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15):2184-2192.