

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.02.007

三种间位芳纶纸蜂窝力学性能及断口形貌分析

马科峰, 刘杰, 王萌, 郝巍

(中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

摘要: 通过压缩性能、剪切性能和平面拉伸性能试验, 对两种规格、三种牌号国产间位芳纶纸蜂窝与美国杜邦 Nomex 蜂窝的主要力学性能进行了对比分析; 通过芳纶纸抗张强度试验, 分析了芳纶纸性能对纸蜂窝主要力学性能的影响; 通过微观下观察平面拉伸试样断口形貌, 分析了纸蜂窝拉伸时纤维和基体的破坏模式与其拉伸性能的关系。芳纶纸蜂窝主要力学性能试验表明, 同种规格国产间位芳纶纸蜂窝的主要力学性能已基本达到 Nomex 蜂窝水平并且可满足目前国产大型客机选材要求。

关键词: 间位芳纶纸蜂窝; 力学性能; 断口形貌; 芳纶纸

中图分类号: TQ327.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)02-0032-04

Mechanical Properties and Fracture Morphology Analysis of Three Kinds of Meta-Aramid Paper Honeycomb

Ma Kefeng, Liu Jie, Wang Meng, Hao Wei

(AVIC Composite Corporation LTD, Beijing 101300, China)

Abstract : Through the compression, shear and tensile performance test, the main mechanical properties of the two kinds of domestic meta-aramid paper honeycomb and Dupont Nomex honeycomb were compared. By aramid paper tensile strength test, the performance of aramid paper on the main mechanical properties of paper honeycomb was analyzed. Through microscopic observation under the tensile fracture morphology of aramid paper honeycomb, the relationship between failure mode and its tensile properties was analyzed. The results show that the main mechanics performance of the same specifications of domestic meta-aramid paper honeycomb may have reached levels of Nomex honeycomb and can meet the requirements of the current domestic large aircraft.

Keywords : meta-aramid paper honeycomb ; mechanical property ; fracture morphology ; aramid paper

大型客机是目前国内民用航空领域发展的主要方向之一, 国内航空设计和生产院所正在加紧自主研发的步伐。为减少能源消耗从而降低运营成本, 复合材料结构以其优异的比强度、比模量、阻燃、隔音、隔热等性能被广泛应用在大型客机各个零部件中。随着复合材料技术的发展, 复合材料在飞机结构上的应用量不断提升, 其用量已成为评价飞机先进程度的一项重要指标^[1-4]。

芳纶纸蜂窝作为一种复合材料夹芯材料被大量应用到飞机客舱地板、内装饰部件以及部分次受力件中^[5-6]。作为制作芳纶纸蜂窝芯材所使用的重要原材料, 目前国内使用的芳纶纸大多依赖于进口美国杜邦公司的产品, 长期以来存在价格高、订货周期长、货源得不到保证等问题。美国杜邦公司为其间位聚芳酰胺产品注册 Nomex 品牌的商品名, 具有强大的研发能力和多年聚集和沉淀的技术力量, 目前在芳纶纸制造领域仍具有不可撼动的地位^[7-9]。

但近些年国内兴起的众多芳纶纸生产制造企业通过不断的技术改革和工艺完善, 已经可以稳定

地生产出与 Nomex 纸性能相当的间位芳纶纸^[10]。中航复合材料有限责任公司使用国产芳纶纸制备出蜂窝产品, 掌握了成熟的生产技术并形成了规范的材料体系, 实现了重要原材料的国内自主保障, 为国产大型客机复合材料选材提供了重要的方向^[11]。

笔者对使用两家国内公司生产的 YT 牌号、LB 牌号间位芳纶纸与美国杜邦公司生产的 Nomex 纸分别制作的芳纶纸蜂窝芯材的主要力学性能进行了对比分析, 同时分析了芳纶纸抗张强度对成品纸蜂窝主要力学性能的影响, 并通过观察微观条件下三种纸蜂窝的拉伸断口形貌, 得出了微观下拉断形式对纸蜂窝拉伸强度的影响因素。

1 实验部分

1.1 主要原材料

芳纶纸蜂窝(杜邦 T412-2 mil 芳纶纸): NH-1, 中航复合材料有限责任公司;

联系人: 马科峰, 工程师, 主要从事芳纶纸蜂窝和 PMI 泡沫塑料的研制

收稿日期: 2016-12-05

芳纶纸蜂窝(国产 YT812-0.05 mm 芳纶纸):
YT-1,中航复合材料有限责任公司;

芳纶纸蜂窝(国产 L133-0.05 mm 芳纶纸):
LB-1,中航复合材料有限责任公司;

中温环氧结构胶膜:AF 163-2K.060WT,美国
3M 公司。

1.2 主要设备及仪器

电子拉力试验机:5582 型,美国 INSTRON 公
司;

电子引伸计:JD1488 型,美国 INSTRON 公司;

抗张强度试验仪:993703 型,瑞典 LORENTZEN
& WETTRE 公司;

扫描电子显微镜(SEM):Qunata600 型,美国
FEI 公司;

SEM:JSM-6360LV 型,美国 JEOL 公司。

1.3 试样制备

用中温环氧结构胶膜将符合标准规定尺寸的
芳纶纸蜂窝芯和与其大小一致的 1.02 mm 厚的铝
薄板粘结后加压,并在 $(121 \pm 5.5)^\circ\text{C} / (90 \sim 120) \text{ min}$
条件下固化制得压缩性能测试试样。按照与压缩性
能试样制作相同的制备方法,分别使用剪切性能测
试用铝制夹具和平面拉伸强度测试用铝制夹具制得
剪切性能和平面拉伸性能测试试样。

按测试标准要求,将单张芳纶纸裁切为
180 mm × 15 mm 标准尺寸试样,制得芳纶纸抗张
强度测试试样。

芳纶纸蜂窝的平面拉伸强度测试后,在试样断
口处取样,试样尺寸约 10 mm × 30 mm 大小,对其
进行喷金处理,制得微观条件下蜂窝芯拉伸断口形
貌观察试样。

1.4 性能测试

(1) 芳纶纸蜂窝主要力学性能测试。

在电子拉力试验机上,采用专用的压缩/剪切
/平面拉伸夹具放置试样并加载试验力。压缩性能
试验时,夹具保证试样上下两面均匀受载并且加载
方向垂直于试样上下平面;剪切性能试验时,夹具
保证试样左右两面平行并且加载方向与试样厚度中
心平面在一条直线上,将引伸计安装在剪切试样一
侧,测量试样形变数据并进行平均处理,试验机自动
绘制载荷-位移曲线;平拉性能试验时,夹具保证
试样上下两面平行并且加载方向与试样厚度中心平
面在一条直线上。使试验件的受力方向与试验件中
心对齐,并对试验机的载荷进行调零处理。测试前,

试样在相同环境条件下保持 24 h 以上。

(2) 芳纶纸抗张强度测试。

按照测试标准要求,调整抗张强度试验仪上、
下夹子间的距离,将试样装夹在试验仪上,使试样垂
直地夹在两夹子之间。试验仪在恒速加载荷的条件
下,将规定尺寸试样拉伸至断裂,测量其抗张强度。

(3) 蜂窝芯拉伸断口形貌分析。

采用 SEM 观察试样,分析不同芳纶纸制作的
蜂窝芯拉伸断口的差异。

2 结果与讨论

2.1 芳纶纸蜂窝力学性能对比分析

(1) 压缩强度。

在室温条件下对三种牌号的两种规格芳纶纸
蜂窝各进行了一个批次稳定性压缩强度试验,试验
结果如图 1 所示。其中,每个牌号的芳纶纸蜂窝
各选取了 1.83-48 和 2.75-32 两种规格的产品进
行试验。1.83 和 2.75 表示蜂窝的孔格边长,单位
为 mm;48 和 32 表示蜂窝的密度,单位为 kg/m^3 。
图 1~图 3 中指标值为波音 BMS8-124 和中国商飞
CMS402 标准中规定的指标值。

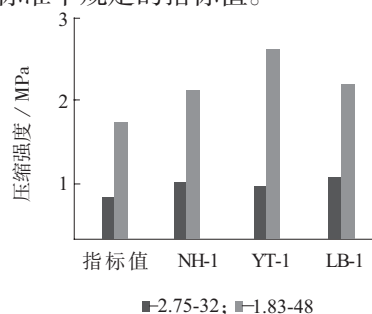


图 1 两种规格、三种不同牌号芳纶纸蜂窝压缩强度

由图 1 可看出,对于 1.83-48 规格蜂窝芯,使用
进口杜邦公司芳纶纸制作的 NH-1 牌号 Nomex 蜂
窝芯和国产芳纶纸制作的 LB-1 牌号蜂窝芯的压缩
强度近似,而另外一种使用国产芳纶纸制作的 YT-1
牌号蜂窝芯的压缩强度明显高于上述两种蜂窝;对
于 2.75-32 规格蜂窝芯,三种牌号蜂窝压缩强度相
差较小。总体看来,使用国产芳纶纸制作的蜂窝芯
的压缩性能略优于 Nomex 蜂窝芯,而且三种蜂窝芯
性能都能够达到中国商用飞机有限责任公司国产大
型客机 CMS-CP-402 (REV): C 标准中对于芳纶纸
蜂窝稳定型压缩强度指标值的要求。NH-1 牌号芳
纶纸蜂窝是目前国内航空、航天以及高速列车等产
业最为常用的纸蜂窝材料,参照 NH-1 芳纶纸蜂窝
压缩性能测试数据, LB-1 和 YT-1 芳纶纸蜂窝芯压
缩性能已经达到了航空用芳纶纸蜂窝材料要求。

(2) 剪切强度及其弹性模量。

在室温条件下对三种牌号的两种规格芳纶纸蜂窝的纵(L)向和横(W)向各进行了一个批次剪切强度及其弹性模量测试,试验结果如图2、图3所示。由图2、图3可以看出,与压缩强度对比结果一致,使用国产芳纶纸制作的蜂窝芯的剪切性能略高于Nomex蜂窝芯,且性能达到中国商飞CMS-CP-402(REV):C标准中芳纶纸蜂窝剪切强度及模量指标值的要求,使用国产芳纶纸制作的蜂窝芯在抗剪切性能方面也达到了航空用芳纶纸蜂窝材料的要求。

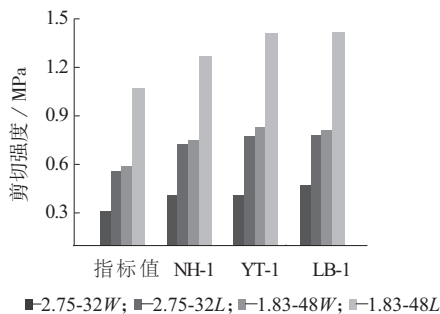


图2 两种规格、三种不同牌号芳纶纸蜂窝剪切强度

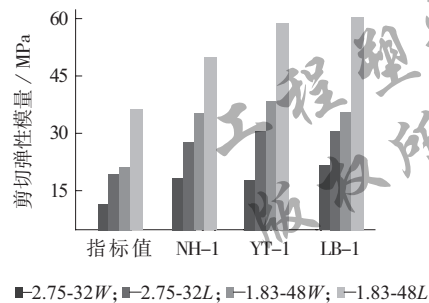


图3 两种规格、三种不同牌号芳纶纸蜂窝剪切弹性模量

(3) 平面拉伸强度。

在室温条件下对三种牌号的两种规格芳纶纸蜂窝各进行了一个批次平面拉伸强度试验,试验结果如图4所示。由图4可以看出,使用国产芳纶纸制作的蜂窝芯的平面拉伸强度高于Nomex蜂窝芯,而且LB-1牌号蜂窝芯的平面拉伸强度明显高于其它二者。

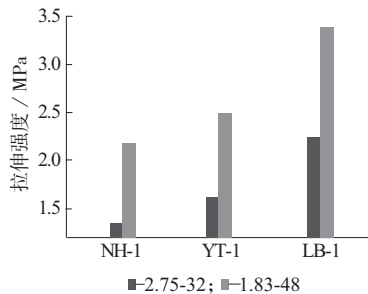


图4 两种规格、三种不同牌号芳纶纸蜂窝平面拉伸强度

2.2 芳纶纸性能对蜂窝主要力学性能的影响

芳纶纸作为制作芳纶纸蜂窝的主要原材料,对芳纶纸蜂窝的力学性能有着至关重要的影响^[12]。在芳纶纸蜂窝的拉伸性能和抗剪切性能方面,从微观方面讲,其与纤维和基体的破坏模式有关;从宏观方面讲,其与芳纶纸的力学性能有密切联系。

通常来讲,芳纶纸开卷方向定义为芳纶纸的纵向,与开卷方向垂直方向定义为横向,如图5a所示;芳纶纸蜂窝拉开的方向定义为横(W)向,与拉开方向垂直的方向定义为纵(L)向,如图5b所示^[13]。

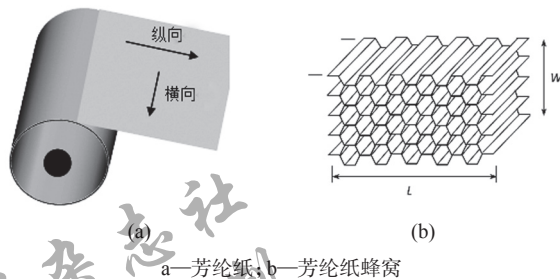


图5 芳纶纸及芳纶纸蜂窝纵/横向示意图

实验中所选取的由三种不同芳纶纸制作的两种规格的芳纶纸蜂窝所用芳纶纸均为厚度约为0.05 mm的芳纶纸,三种0.05 mm厚度的芳纶纸的横向及纵向抗张强度见表1。

表1 三种不同牌号芳纶纸的抗张强度 kN/m		
芳纶纸牌号	纵向抗张强度	横向抗张强度
L133-0.05	4.65	2.68
YT812-0.05	4.32	1.68
T412-2 mil	4.39	1.71

由表1中的测试结果可以看出,同厚度的LB-1牌号芳纶纸蜂窝所使用的L133芳纶纸的横向抗张强度明显高于YT-1牌号的芳纶纸蜂窝所使用的YT812芳纶纸和NH-1牌号芳纶纸蜂窝所使用的T412芳纶纸的横向抗张强度。三种同厚度的芳纶纸的纵向抗张强度相差不多,L133芳纶纸测试结果稍高于另外两种芳纶纸。三种同厚度的芳纶纸的纵向抗张强度相差不多。

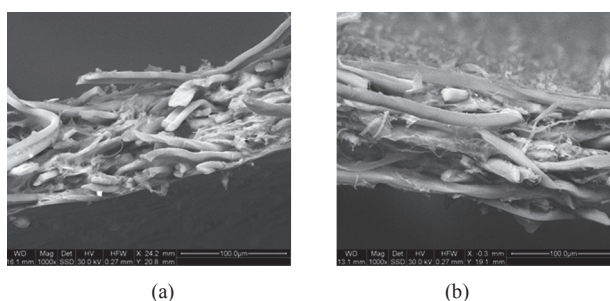
在芳纶纸蜂窝的制作过程中,芳纶纸的横向最终与成品纸蜂窝的高度方向一致,而芳纶纸的纵向最终与成品纸蜂窝的 L 方向一致。由此推断,芳纶纸的横向与纵向抗张强度将分别影响最终成品纸蜂窝的平面拉伸性能和 L 向拉伸剪切性能。

从图4可以看到,LB-1芳纶纸蜂窝测得的平面拉伸强度明显高于YT-1和NH-1芳纶纸蜂窝,这与同厚度三种芳纶纸的横向抗张强度对比保持一

致。从图2可以看到,三种蜂窝的 L 向剪切强度相差不大,同时,同厚度三种芳纶纸的纵向抗张强度之间的差距也远小于横向抗张强度之间的差距。

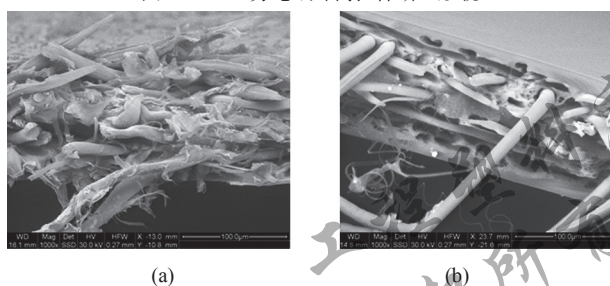
2.3 芳纶纸蜂窝平面拉伸测试断口形貌对比

图6~图8分别为用SEM观察三种不同牌号芳纶纸蜂窝平面拉伸强度试验后所采集到的放大了500~1000倍的蜂窝断口形貌图。



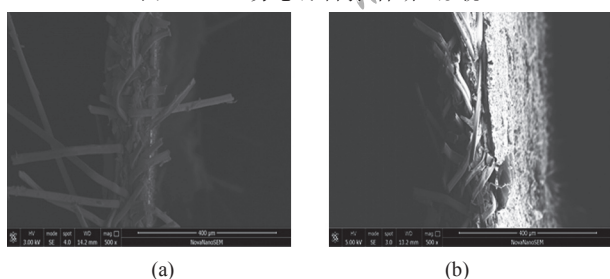
(a) (b)
规格: a—2.75—32; b—1.83—48

图6 LB-1芳纶纸蜂窝拉伸断口形貌



(a) (b)
规格: a—2.75—32; b—1.83—48

图7 YT-1芳纶纸蜂窝拉伸断口形貌



(a) (b)
规格: a—2.75—32; b—1.83—48

图8 NH-1芳纶纸蜂窝拉伸断口形貌

通过对比使用三种不同品牌芳纶纸制作的蜂窝芯材在微观下拉伸端口的形貌可以发现,芳纶纤维的拉断与从基体中拔出的情况有所不同。从NH-1蜂窝芯拉伸断口微观形貌中看出,其拉伸断口不平整,纤维拉断位置不同,大部分纤维在拉伸破坏时被从基体中拔出;从LB-1蜂窝芯拉伸断口微观形貌中看出,其断口在三者之中最为平整,纤维拔出比例较少,绝大部分纤维在拉伸破坏时被齐整的拉断;YT-1蜂窝芯拉伸断口中纤维拔出比例位于前两者之间。

芳纶纸由纤维和浆粕组成,芳纶纸蜂窝在拉伸破坏时,其纤维和基体的破坏模式在很大程度上影响甚至决定了其拉伸强度。

三种牌号的芳纶纸所用的纤维均为间位芳纶纤维,其拉伸强度应处于同一数量级,同一级别的芳纶纤维从基体中抽出时比纤维拉断时所需要的力小。在芳纶纤维大致相同的前提下,拉断时,大部分芳纶纤维被拉断,使得短切纤维本身的强度可以较大程度上转化为芳纶纸的强度,从而进一步转化为芳纶纸蜂窝的拉伸强度,纤维在纸张和纸蜂窝中发挥了其优异的物理强度^[14]。

从平面拉伸强度试验结果可以看出, LB-1 牌号芳纶纸蜂窝平面拉伸强度在三者中最为突出,从而印证了同级别芳纶纸蜂窝在拉伸破坏时,纤维从基体中拔出比例越小,其拉伸强度越高的结论。

3 结论

(1) 使用国产间位芳纶纸制作的纸蜂窝芯材在主要力学性能方面,尤其是拉伸性能方面已经达到同级别的使用进口杜邦公司芳纶纸制作的 Nomex 蜂窝水平,并且达到了国内大型客机对芳纶纸蜂窝芯材选材标准中对主要力学性能的要求。

(2) 国产间位芳纶纸的抗张强度已达到进口杜邦公司的 Nomex 纸的水平,三种芳纶纸蜂窝的平面拉伸强度和 L 向剪切强度与对应的芳纶纸的横向和纵向抗张强度的变化趋势保持一致。三种芳纶纸蜂窝的 L 向剪切强度相近,对应的芳纶纸的纵向抗张强度也相近。

(3) 同级别芳纶纸蜂窝在拉伸破坏时,纤维从基体中拔出比例越小,其拉伸强度越高。拉伸断裂时, LB-1 芳纶纸蜂窝的纤维从基体中拔出的比例在三种纸蜂窝中最少,其拉伸强度也明显高于另外二者。

参考文献

- [1] 吴承思,张振龙.我国民用客机复合材料国产化问题的探讨[J].纤维复合材料,2012(2):30-33.
Wu Chengsi, Zhang Zhenlong. Question on our large commercial aircraft composite localized[J]. Fiber Composites, 2012(2):30-33.
- [2] Wang Jianhe, Tian Jianzhong. Nomex paper t-411 impregnated with adhesive varnish and its application[J]. Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials, 1998, 9:337-339.
- [3] 王汝敏.聚合物基复合材料及工艺[M].北京:科学出版社, 2004.
Wang Rumin. Polymer matrix composite materials and technology[M]. Beijing: Science Press, 2004.

- [4] 黄发荣,焦杨声.酚醛树脂及其应用[M].北京:化学工业出版社,2003.
Huang Farong, Jiao Yangsheng. Phenolic resin and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [5] 杨乃宾,章怡宁.复合材料飞机结构设计[M].北京:航空工业出版社,2002.
Yang Naibin, Zhang Yining. Composite materials for aircraft structural design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.
- [6] 张广成,赵景利.蜂窝夹层结构复合材料的力学性能研究[J].机械科学与技术,2003,22(2):280-282.
Zhang Guangcheng, Zhao Jingli. Study on mechanical properties of honeycomb sandwich structure composite[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2003, 22(2):280-282.
- [7] 胡健,黄一磊,郑焱嵩,等. Nomex 纸基复合材料[J]. 造纸科学与技术,2003,22(4):29-31.
Hu Jian, Huang Yilei, Zheng Zhisong, et al. Review of nomex paper composite[J]. Paper Science and Technology, 2003, 22(4):29-31.
- [8] 王宜,胡健,雷以超,等. Nomex 纸基材料关键技术的分析[J]. 造纸科学与技术,2004,23(3):33-36.
Wang Yi, Hu Jian, Lei Yichao, et al. Key technique analysis of domestic nomex paper[J]. Paper Science and Technology, 2004, 23(3):33-36.
- [9] Yam L H, Yan Y J, Jiang J S. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification[J]. Composite Structures, 2003, 60:403-412.
- [10] 程小炼,王宜,郑焱嵩,等. Nomex 纸和纸板的电气性能及应用研究[J]. 造纸科学与技术,2005,24(5):26-29.
Cheng Xiaolian, Wang Yi, Zheng Zhisong, et al. The electrical properties and their application of nomex paper and pressboard[J]. Paper Science & Technology, 2005, 24(5):26-29.
- [11] 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,2013,43(3):25-29.
Liu Jie, Hao Wei, Meng Jiangyan. Progress in applied research of honeycomb sandwich composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(3):25-29.
- [12] 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):2184-2187.
Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. Aramid paper's structure and performance and their effect on the mechanical properties of aramid paper honeycomb[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15):2184-2187.
- [13] 马科峰,郝巍,罗玉清. 国内外间位芳纶纸蜂窝性能对比研究[J]. 材料开发与应用,2013,28(3):62-68.
Ma Kefeng, Hao Wei, Luo Yuqing. Properties of meta-aramid paper honeycomb at home and abroad[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(3):62-68.
- [14] 金珠. 国内外芳纶纤维及纸的对比研究[D]. 西安:陕西科技大学,2006.
Jin Zhu. Compression of the aramid fiber and paper made in china[D]. Xian: Shaanxi University of Science & Technology, 2006.

合肥研究院在轻质氟塑料屏蔽材料方面取得新进展

近期,中国科学院合肥物质科学研究院应用技术研究先进材料中心研究员田兴友和副研究员张献带领的研发团队在轻质氟塑料基纳米复合材料的制备与抗电磁干扰性能的研究方面取得新进展,相关成果发表在 *Composites Science and Technology* 125(2016)22-29; *Composites: Part A* 90(2016)606-613 上,并申报了国家发明专利一项。

随着现代计算机以及通信技术等的广泛应用,电磁干扰问题日益严重。发展高性能的电磁屏蔽材料,成为众多科研工作者的目标。相比于传统金属屏蔽材料,高分子复合材料因具有质轻、抗腐蚀、易于加工、导电性可调控等突出优点,近些年成为了研究的热点。该研究组选用具有高导电性的多壁碳纳米管(MWCNTs)为功能材料,耐化学腐蚀、耐高温等性能优异的聚偏氟乙烯(PVDF)为高分子基体。一方面,通过调控 MWCNTs 在共混相中的选择性分布,采用热压和刻蚀的方法制备了 PVDF/MWCNTs 纳米复合轻质板材,由于该材料独特的结构设计,具有优异的电磁屏蔽性能。另一方面,采用相分离技术制备了 PVDF 微球,并通过共混与热压的简易方法,获得了具有独特隔离网络结构的氟塑料基纳米复合材料,该材料呈现出了优异的抗电磁干扰性能,并且

是一种以吸波为主要机制的屏蔽机制。

研究组采用的两种方法简单易行,绿色环保,成本低廉,获得的复合材料都体现出较高的电磁屏蔽性能,具有广泛的应用前景。
(中国聚合物网)

石墨烯薄膜产品有望在哈尔滨实现产业化

由哈尔滨万鑫石墨谷科技有限公司投建的万吨石墨烯导电浆料项目将于今年7月投产,可年产导电浆料万余吨。目前万鑫公司的石墨烯产品已销往韩国 LG 及国内的光宇、国轩等全球多家锂电池领军企业。

位于科技创新城石墨谷科技产业园内的万鑫公司石墨烯、碳纳米管两条生产线于2015年投产,年产导电浆料均为1000 t。即将于今年7月投产的万吨石墨烯导电浆料项目,同样位于万鑫石墨谷内,新建的独立厂房建筑面积约1.2万 m²,年产万吨石墨烯,产值达5亿元。据万鑫石墨谷公司负责人介绍,俄罗斯莫斯科大学的石墨特种防火涂料技术也将在哈实现产业化,预计项目于7月份入驻科技园。北大一宝安烯碳科技联合实验室开展的石墨烯薄膜研发产业化项目进展顺利,投产后将推动黑龙江省在石墨产业迈上新台阶。据悉,石墨烯薄膜具备较强导电性、透光性、柔性及微电子等属性,可广泛应用于柔性电子领域应用,将对现有触摸屏市场产生巨大的产业冲击。
(中塑在线)