

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.01.028

聚合物基吸波材料结构设计研究进展^{*}

段磊,温变英

(北京工商大学材料与机械工程学院,北京 100048)

摘要:介绍了目前吸收剂在聚合物基体中的分布特点和类型,通过与单层聚合物基吸波材料的结构对比,重点阐述了聚合物基吸波材料角锥、双层、多层结构的设计原理。同时对聚合物基吸波材料的角锥和层状结构特征与研究进展进行了综述,并对其发展方向提出了展望。

关键词:吸波材料;聚合物;角锥结构;多层结构

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)01-0130-05

Research Progress on Structural Design of Polymer Matrix Microwave Absorbing Materials

Duan Lei, Wen Bianying

(School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract : The distribution characteristics and types of present absorbents in polymer matrix were introduced. Comparing with the structure of single layer polymer matrix microwave absorbing materials, the design principle of pyramidal, double layer and multi layer of polymer matrix microwave absorbing materials was emphasized. The structure feature and research progress on pyramidal and layer structure of polymer matrix microwave absorbing materials were reviewed, and future development trends was also presented.

Keywords : microwave absorbing material ; polymer ; pyramidal structure ; layered structure

近年来,随着局域网、雷达系统的普及以及电脑、移动电话等电子设备的广泛应用,电磁波干扰问题趋于严重,减少电磁辐射污染已成为人们关注的焦点。吸波材料因具有低反射、高吸收、可避免电磁波二次污染等特点而受到青睐。吸波材料的结构是吸波材料发挥吸收电磁波作用的关键。对于目前常见的吸波材料,单层结构吸波材料注重吸收剂的均匀分布,主要依靠加入高效吸波剂来提高吸波性能,但是单层结构的吸波材料很难同时满足大的磁损耗和良好的阻抗匹配,存在吸波能力提高有限、吸收频宽较窄的问题;双层或多层结构吸波材料因具有设计自由度大、吸收能力强且吸收频带宽等优点,弥补了单层结构的不足。因此,双层或多层结构的吸波材料是目前研究的热点。研究人员基于阻抗匹配原理的同时,结合计算机辅助,通过理论分析,计算设计优化,设计出诸如匹配层和吸波层结合的双层结构吸波体、多层渐变结构吸收体、多层泡沫夹芯结构吸收体等具有优异吸波能力的典型模型。

1 聚合物基吸波材料的组成和分布特征

聚合物基吸波材料主要由具有透波能力的聚合物和吸收剂构成。吸收剂担负着吸收电磁波的功能,聚合物材料构筑吸波体的载体,起传输电磁波通道的作用。吸收剂和聚合物的有效搭配是解决阻抗匹配、减小吸波体厚度并提高吸收

效能等的关键。聚合物因其具有设计灵活性强、电阻率可调、成型加工方便等优点,是吸收剂很好的载体,满足吸波材料逐渐向轻量化、高效化、新型化的发展趋势。

常用的吸收剂有铁氧体吸收剂、金属类吸收剂(Ag, Cu, Ni等)、碳系吸收剂(石墨、导电炭黑、碳纳米管、石墨烯等),其形状包括颗粒、纤维、薄片等。目前,不同吸收剂或不同维度尺寸的吸收剂复合使用受到关注,也是当今研究的热点^[1-3]。研究人员致力于开发新型吸收剂的同时,发现吸收剂的分布类型同等重要,因此吸波材料的结构设计尤为重要。目前的吸收剂逐渐向纳米颗粒、片层、纤维方向发展,但是纳米材料的团聚问题不可避免,研究人员在制备聚合物基吸波材料时,利用对填料表面进行处理或声波震荡等方法,使吸收剂微粒(纳米颗粒、片层)或纤维在聚合物基体中呈均匀弥散分布,形成良好的电磁波通道,有效地将电磁波引入吸波体,达到吸收剂更好地吸收损耗电磁波的目的。

^{*} 国家自然科学基金项目(21274007),北京市自然科学基金项目暨北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201110011014),北京市教委科技创新平台项目(PXM2012-014213-000025)

联系人:温变英,教授,博士后,主要从事聚合物基功能复合材料与环境友好高分子材料研究

收稿日期:2013-10-14

多层膜吸波体、多层板吸波体、多层纤维和织物吸波体、具有插层的“三明治”层状吸波体^[4-8]是目前层状分布聚合物吸波材料的最新设计模型。在吸波体中,当相邻层的吸收剂含量分布具有渐变变化时,可以明显提高吸波能力。杜纪柱等^[9]将吸收剂分布在球状透波材料表面,形成连续的导电层或导磁层,构成谐振腔,类似核-壳结构复合微球,这样,吸波体可以由众多的复合微球依照任意形状外壳堆积而成,球与球之间可以有空隙,也可以用具有透波能力的聚合物粘合剂粘接。泡沫吸波材料是聚合物基吸波材料特有的类型,聚合物透波材料呈连续的开放状,具有任意走向的管状腔或孔状腔,吸收剂沿着管或孔的内壁分布,其分布可以是连续的,也可以是非连续的。

2 聚合物基吸波材料的结构特征

聚合物基吸波材料按其结构和形状可划分为角锥(或劈形)吸收体、蜂窝状吸收体、薄膜吸收体、平板吸收体等,常用的加工方法有:喷涂法、薄膜技术、熔混(机械混合)法、浸渍法(纤维或织物吸波材料)。

2.1 角锥结构

角锥结构是微波暗室中普遍使用的结构,如图1a所示。角锥结构能够使电磁波在锥体间多次反射,使吸波效能大大提高。吕述平等^[10]研究发现,吸波性能与角锥高度、顶角角度、入射波的入射角度以及材料的电磁参数等因素存在复杂的关系。目前角锥结构聚合物材料研究的方向是将锥体制成空心结构或角锥型复合结构^[11-13],基体大多为聚乙烯、聚苯乙烯、聚碳酸酯、聚丙烯、聚氨酯等高分子发泡材料。高分子发泡材料作为载体具有极高的空隙率,使吸波材料具有宽频吸收的特性。图1b、图1c是将角锥结构与吸收层(如铁氧体吸收层)复合形成多层复合角锥吸收体,具有拓宽吸收频率的作用,将是今后研究方向。

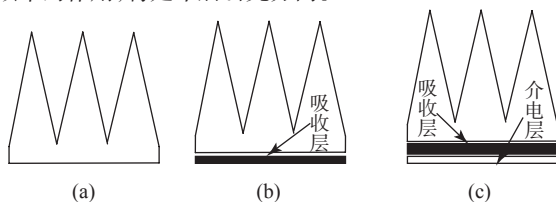


图1 角锥结构示意图

吕述平等^[14]在可发泡聚苯乙烯小球表面包覆一层炭黑作为吸收剂,制备了谐振型聚合物基吸波材料。吸收剂可以在图2所示的角锥结构中均匀分布或梯度分布^[15]。梯度分布能很好地满足阻抗匹配、质轻、高吸收、防潮、防水、阻燃等现代吸波材料的要求。因此,这类谐振型聚合物基吸波材料是很有发展前景的一类吸波材料^[16-17]。

2.2 层状结构

为了达到优异的吸波性能,不同的聚合物基吸波材料

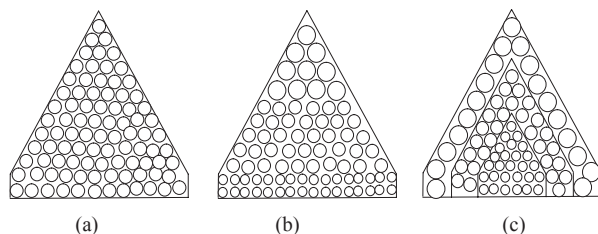


图2 填充型角锥结构示意图

结构有着不同的特点。

(1) 单层。

对于单层结构,目前是将新型吸收剂加入到聚合物基体中制备吸波材料,但是既要实现与空间的波阻抗匹配,又要具有良好的吸波性能,电磁参数的选取难以实现^[18]。为了达到整个吸波体零反射的目的,目前提出的解决办法是在吸波体上覆盖一层强反射板,通过设计吸波材料的电磁参数,让进入吸波体的电磁波在经过底面反射后,在材料与空气的界面处实现全反射。虽然目前有许多单层吸波体的研究报告^[3,19-22],但是无论是添加新型吸收剂或是多种吸收剂复配使用,仍面临无法有效扩展频宽的问题,因此逐渐向双层或多层结构吸波材料研究方向发展。

(2) 双层。

双层结构吸波材料相对于单层结构的优势是引入一层阻抗匹配层,可以使表层与空气之间达到最大可能的阻抗匹配,使空间入射来的电磁波尽可能地进入吸波材料并被损耗吸收掉,弥补单层结构反射多、吸收频率窄的不足。

研究人员结合双层结构的优势,根据不同的阻抗修正公式计算吸收率和反射率,同时与实验值进行对比,对吸波体进行了优化设计。S. H. Kim等^[23]基于电磁波传输理论,制备了以铁氧体作为吸收层和碳纤维作为反射层的环氧树脂(EP)基双层吸波材料,对波阻抗匹配公式进行修正。结果发现,通过频率、吸波层和基体层的尺寸可以判断零反射是否产生,在反射层厚度为2 mm时,随着吸收层厚度增加,最大吸收峰向低频段移动,反射损失值在测试频率为4~12 GHz范围内都大于-20 dB,碳纤维增强EP层替代金属基板可以明显提高材料的吸波性能,解决了薄片双层结构设计的问题。Y. B. Feng等^[24]制备了以乙烯-丙烯-二烯共聚物为基体的双层吸波材料,加入羰基铁粉作为匹配层,钽铁氧体作为吸收层,同时对比两种填料的单层材料,发现单层材料都存在宽频段的反射损失较低的不足,而双层材料反射损失低于-13 dB的频宽为6~18 GHz,反射损失低于-8 dB的频宽为2~18 GHz,且厚度仅有3.6,3.7 mm,因此双层结构与单层结构相比有很大的优势。虽然研究人员在吸波材料的设计方面注重阻抗匹配的原则,制备出具有

匹配层和吸收层的双层或多层结构吸波材料,但是阻抗匹配问题仍为目前研究的重点。Hou Cuiling 等^[25]制备了基体为 PVC 的双层吸波材料,第 1 层填料为掺杂钴、铜、镍的多壁碳纳米管;第 2 层为纯多壁碳纳米管,实验结果显示,反射损失曲线有两个吸收峰,由于复合材料的阻抗匹配使双层结构具有好的吸收特性。Chen Liyang 等^[26]在制备以羰基铁作为匹配层、炭黑作为吸收层的 EP 基双层吸波材料过程中,首次在匹配层中加入 SiO_2 以改善阻抗匹配能力和提供电磁波通道的作用,当羰基铁、炭黑、EP 的配比为 2:5:1 时,反射损失能达到 -17.3 dB。电磁参数的匹配是提高材料的吸波性能、展宽频带的关键。为了使材料达到良好的阻抗匹配,需要借助传输线理论对吸波材料进行结构设计,根据传输线理论提出的双层模型,常见的有 Salisbury 屏模型和 Giannakopoulou 模型。

J. B. Kim 等^[27]提出的 Salisbury 屏模型的工作原理如图 3 所示,其结构特点是吸波层的厚度设计成 $1/4$ 波长的奇数倍,进入吸波层经反射底板反射后出来的电磁波与直接被表面反射的电磁波相差 180° ,刚好被相互抵消,这样可以使材料表面总的反射波达到最低。这种结构一般常用于聚合物涂层吸波材料的设计,采用这种涂层的层状结构可以增加吸收频带的宽度,并且吸收效果较好。I. M. D. Rosa 等^[28]设计的填充多壁碳纳米管和镍包覆碳纤维的聚酯基双层介电 Salisbury 屏复合材料在 10 GHz 和 15 GHz 有最小的反射系数,同时该设计能将材料的厚度减小到 2 mm 以下,同时使小于 -10 dB 的频带宽度超过 6 GHz。另外, R. Suga 等^[29-31]研究了注射成型 $1/4$ 波长吸波体内温度的分布问题,为今后该类吸波体成型加工打下基础。

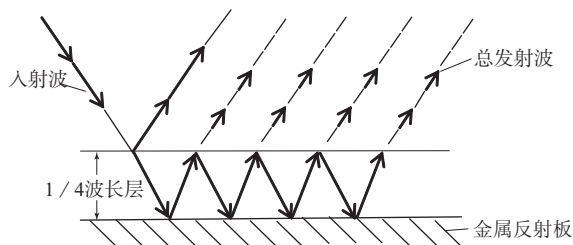


图3 Salisbury 屏模型工作原理

T. Giannakopoulou 等^[32-33]提出的 Giannakopoulou 模型的结构特点是,第 1 层为吸波层,第 2 层为透波层,底层为金属反射底板,这种在吸波层下面添加一层透波层的结构设计可以增加电磁波在吸波体中的传播距离,所采用的损耗介质既有电损耗又有磁损耗。这种结构可以明显提高整个吸波材料的吸波性能。结果表明,对于这种底面为强反射金属板的复合结构吸波体,要实现在材料表面零反射,吸波组分以磁损耗为主的吸波体的厚度要小于具有相同数值参数的电损耗的厚度。

2.3 多层组合

在双层结构的阻抗匹配层与吸收层的界面处,存在大量因阻抗不匹配被反射回去的入射电磁波,因此进入吸收层被吸收损耗掉的电磁波很少,为了解决这个问题,研究人员主要集中在多层阻抗匹配和阻抗渐变结构的研究。为达到提高吸波能力的目的,多层阻抗层可以呈渐变梯度,逐渐与吸收层的阻抗接近,使入射波可以更有效地进入到吸收层被损耗吸收掉。但是电磁波在多层吸波材料中的传播行为和反射率与单层和双层相比复杂得多^[34-35]。目前多层吸波材料的计算方法有跟踪算法^[35]、等效传输线法^[36]、等效电路法^[37]等,等效传输线法是应用比较广泛的一种方法。

薄层材料制备的趋势是在高介电常数、高磁导率的损耗层之间加入无损耗的低介电常数层,损耗层之间形成多次反射和多次吸收,以达到提高吸收率和扩展频带宽的目的。目前研究较多的片层结构大部分是具有阻抗变换层、电磁波损耗层和反射层的 3 层结构^[38],依靠阻抗变换层尽量减少入射电磁波的反射,使电磁波在材料内部被损耗吸收;电磁波损耗层多采用高效吸收剂以提高电磁波在材料内部的衰减;反射层采用导电率较大的屏蔽材料,使电磁波在材料内部经过多重反射、吸收或发生干涉相消,从整体上提高吸波能力。

阻抗匹配型结构的特点是材料的表面输入阻抗与空间的波阻抗匹配,让电磁波能最大限度地进入材料内部并被吸收剂吸收损耗掉^[29]。通过改变各层的厚度、复介电常数、复磁导率等参数,控制各层吸收剂的种类、比例等以调整各层的输入阻抗,实现阻抗匹配,从而获得良好的吸波性能。何燕飞等^[38]制备了基体为 PVC 的双层吸波材料,第 1 层填料为掺杂钴、铜、镍的多壁碳纳米管,第 2 层为纯多壁碳纳米管,实验结果显示,反射损失曲线有两个吸收峰,由于复合材料的阻抗匹配使双层结构具有好的吸收特性。L. de C. Folgueras 等^[39]研究了在聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚丙烯腈表面分别浸渍聚苯胺的单层和多层复合叠层片材的吸波性能。对于单层雷达吸波材料而言,导电高分子吸波材料具有一个窄频率吸收带,而实验结果呈现出一个宽频吸收特性,说明明显提高了吸波效能。由于不同的叠层顺序使材料在电磁波传输的通道上有着不同的阻抗匹配能力,因此有着不同的吸波效果,所以要提高吸波效能,结构设计尤为重要。K. Y. Park 等^[7]提出一种具有三明治结构的多层吸波体的设计,上下表层分别采用添加导电石墨和导电碳纤维的 EP 层,中间层为加入多壁碳纳米管的聚氨酯泡沫层,制备出具有吸波性能的泡沫夹芯结构复合材料,吸波效能与计算机模拟值基本吻合。

2.4 电阻渐变结构

电阻渐变结构吸波材料的特点是通过使用多层介质拓

宽吸收体的频带宽度, Jaumann 吸收体是一典型例子^[37,40]。Jaumann 吸收体是理想导体背衬上介电材料隔离层与电阻片的交错叠层,能有效降低导体平面(或缓变曲面)的镜面反射^[41-42]。首先,为了获得最佳的吸收效果,电阻片的电阻从前至后逐渐减小;其次,为达到最佳的吸波性能,通过调节各阻抗层的阻抗值,并控制填充介质的厚度为吸波材料中心工作频率对应波长的 $1/4$;最后,阻抗片的层数很大程度上影响材料的吸波频带宽度。一般来说,层数越多,吸波频带越宽。一种6层雷达吸波材料,当电阻片间作为隔离层的聚苯乙烯泡沫厚度为3.6 mm时,电阻片的阻值近似二次分布,吸波体在7~15 GHz范围内时,反射损失平均值为-30 dB,说明通过调节电阻片的层数和各层阻值的分布方式,可获得较好的宽频吸收效果。超材料也是吸波材料发展的新方向。Y. Danlée等^[43]提出一种具有9层混有碳纳米管的聚碳酸酯导电层和10层聚碳酸酯绝缘层交替复合的多层超材料梯度吸波体,厚度仅为650 μm ,在8~40 GHz范围内有很高的吸波性能。此外,C. S. Chamberlain等^[44]提出一种对称雷达吸波结构,其两个外表层为纤维增强塑料,中间为多个阻抗层,阻抗层间为低损耗介质,通过合理设计,这种结构的吸波材料在8~18 GHz范围内的反射损失均低于-15 dB。

基于传输线理论,利用阻抗匹配原理制备的各种结构的吸波材料,从实验结果发现该理论依然存在局限性,即吸波材料设计涉及电磁波与材料之间的相互作用,其影响因素是多方面的。在依据传输线理论进行设计时,只有阻抗匹配原理得到理论界的认同与肯定。但是不可否认的是多层结构的设计依然是目前乃至今后吸波材料的发展方向。

3 展望

在今后聚合物基吸波材料的结构设计研究中,首先应考虑如何使吸收剂在聚合物基体中合理地分布,然后再选择合适的结构类型(角锥、层状结构)来提高吸波效能,而层状结构的设计、制备、测试是一项任务量很大的工作,在实验前利用计算机模拟提前预测实验结果,可以有效地避免大量盲目的工作,同时可以对实验进行正确的指导。目前,研究人员相继开展了吸波材料计算机辅助设计的研究工作^[45-47],在获得各组成材料电磁参数的基础上,通过计算机设计其成分、结构,以满足空间匹配和传导损耗的要求,同时指导吸波材料的设计和制备。虽然多层设计仍然面临较多困难,如吸收剂在层状结构中如何最优分布,材料本身的吸收频带宽度、阻抗匹配、聚合物基体的粘接性等因素。但是结合计算机设计优化多层结构使该类材料依然具有很好的前景。今后需从以下几个方面进行研究:

(1) 对于角锥结构,使吸收剂形成更好的梯度分布,结合不同的吸收剂达到优异的吸波效果。

(2) 对于多层结构吸波材料,要达到最优的阻抗匹配,实现材料表面电磁波零反射;更好地优化设计介电梯度结构、Jaumann 结构、Salisbury 屏模型结构和 Giannakopoulou 模型结构。

(3) 计算机辅助吸波材料结构性能的综合设计存在方法多样、计算复杂、与实验值有差距等问题,需通过模拟和设计能够更好地与实验相结合。

参考文献

- [1] Tong Shiyuan, et al. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 550(15):39-45.
- [2] Jia Shu, et al. Physica B: Condensed Matter, 2010, 405(17):3 611-3 615.
- [3] Li Yong, et al. Physica B: Condensed Matter, 2009, 404(8-11):1 343-1 346.
- [4] 马成勇,等. 材料工程, 2008(1):11-13.
Ma Chengyong, et al. Journal of Materials Engineering, 2008(1):11-13.
- [5] Xie Wei, et al. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2007, 22(2):218-220.
- [6] Yang Jie, et al. Carbon, 2004, 42(8):1 882-1 885.
- [7] Park K Y, et al. Composites Science and Technology, 2006, 66(3):576-584.
- [8] He Yangfei, et al. EPL(Europhysics Letters), 2009, 85(5):1-5.
- [9] 杜纪柱,等. 材料科学与工程学报, 2007, 25(1):129-131.
Du Jizhu, et al. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(1):129-131.
- [10] 吕述平,等. 材料科学与工艺, 2007, 15(4):572-574.
Lyu Shuping, et al. Materials Science and Technology, 2006, 24(1):135-138.
- [11] Johansson M, et al. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2005, 53(2):728-736.
- [12] Qian Jian, et al. Novel pyramidal microwave absorbers for outdoor using[C]. // 2000 5th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory Proceedings. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000:347-349.
- [13] Park M J, et al. Magnetism, IEEE Transactions on, 2000, 36(5):3 272-3 274.
- [14] 吕述平,等. 材料科学与工程学报, 2006, 24(1):135-138.
Lyu Shuping, et al. Journal of Materials Science and Engineering, 2006, 24(1):135-138.
- [15] 刘顺华. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
Liu Shunhua. Electromagnetic wave shielding and absorbing materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [16] Lv Shuping, et al. Materials Technology, 2005.20(4):211-213.
- [17] Liu Shunhua, et al. Materials Technology, 2005.20(3):145-148.
- [18] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社,

1998.
Ruan Yingzheng. Radar cross section and stealth technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1998.
- [19] Liu Lidong, et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322(13):1 736–1 740.
- [20] Singh V K, et al. Carbon, 2012, 50(6):2 202–2 208.
- [21] Jung W K, et al. Composite Structures, 2006, 75(1):571–576.
- [22] Al-Ghamdi A A, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 127(3):2 227–2 234.
- [23] Kim S H, et al. Physica Status Solidi(c), 2007, 4(12):4 602–4 605.
- [24] Feng Y B, et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 318(1–2):8–13.
- [25] Hou Cuiling, et al. Materials & Design, 2012, 33(1):413–418.
- [26] Chen Liyang, et al. Materials & Design, 2011, 32(2):570–574.
- [27] Kim J B, et al. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 2012, 54(1):37–42.
- [28] Rosa I M D, et al. Composites Science and Technology, 2010, 70(1):102–109.
- [29] Suga R, et al. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 2005, 47(4):866–871.
- [30] Watanabe S, et al. Study of temperature distribution of $\lambda/4$ type EM-absorber using resistive film under high power injection[C] // Proceedings of the 36th European Microwave Conference. New York:IEEE, 2006:424–427.
- [31] Watanabe S, et al. Temperature distribution of $\lambda/4$ type EM-absorber using resistive film under high power injection[C] // Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. New York:IEEE, 2006:84–88.
- [32] Giannakopoulou T, et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 271(2):224–229.
- [33] Giannakopoulou T, et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 263(1):173–181.
- [34] 李斌玲,等. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4):464–469.
Li Binling, et al. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(4):464–469.
- [35] 亓家钟,等. 金属功能材料, 2006, 13(2):33–36.
Qi Jiazhong, et al. Metallic Functional Materials, 2006, 13(2):33–36.
- [36] Hipp S, et al. Electromagnetic simulation of electrically large scenarios using the incoherent transmission line matrix method:Theory and application[C] // Proceedings of 2009 European Microwave Conference. New York:IEEE, 2009:950–953.
- [37] Li Ke, et al. Analysis and design of multilayer Jaumann absorbers[C] // Proceedings of Microwave Technology & Computational Electromagnetics(ICMTCE). New York:IEEE, 2011: 81–84.
- [38] 何燕飞,等. 无机材料学报, 2006, 21(6):1 449–1 453.
He Yanfei, et al. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(6):1 449–1 453.
- [39] de C Folgueras L, Rezende M C. Hybrid multilayer structures for use as microwave absorbing material[C] // Proceedings of 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. New York:IEEE, 2007:483–487.
- [40] Du Toit L J, et al. A design process for Jaumann absorbers[C] // Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium. New York:IEEE, 1989:1 558–1 561.
- [41] Du Toit L J. Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 1994, 36(6):17–25.
- [42] Motevasselian A, et al. A partially transparent Jaumann absorber applied to an aircraft wing profile[C] // Proceedings of 2010 IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium. New York:IEEE, 2010:1–4.
- [43] Danlée Y, et al. Applied Physics Letters, 2012, 100(21):1–3.
- [44] Chamberlain C S, et al. Electromagnetic radiation absorbing material employing doubly layered particles:US, 5389434[P]. 1995–2–14.
- [45] Goudos S K. Materials & design, 2007, 28(10):2 585–2 595.
- [46] Yuan Jie, et al. Materials & Design, 2006, 27(1):45–52.
- [47] 汪忠柱,等. 磁性材料及器件, 2009, 40(1):28–31.
Wang Zhongzhu, et al. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2009, 40(1):28–31.

德国 IKV 研发纤维增强塑料新工艺

在一项涉及 14 家合作伙伴的项目中,德国工业塑料加工研究院 (IKV) 展示了采用注塑方法加工以热塑性塑料为基体的纤维增强塑料 (FRP)。

该项目将熔体浸渍工艺(可以加工织物预成型件)的优势与热塑性塑料基体的优点结合在一起。研究团队正在开发一种完全自动化的高度集成工艺,其中采用了所谓的原位聚合技术。将系统转换为注塑工艺(原位注塑)后就可将复杂的纤维预成型件与一种单体相结合,直接在注塑机上进行大批量生产。IKV 研究团队选取的展示品为一种足球护脰。

FRP 制品的传统生产工艺有多种缺点。例如,到目前为止仍需要两个独立工序,如对于尼龙复合材料片材:浸渍和模塑。而且只能模塑结构较简单的产品,表面结构变化范围也有限。

IKV 工艺的目标是消除这些缺点。利用原位注塑工艺,织物预成型件由低黏度的己内酰胺单体浸渍,之后进行原位聚合反应生成聚酰胺 6。

除了优化基体配方外,该新工艺的要求还包括:定制的纤维/定型装置,特殊注塑机技术,以及创新模具、密封和工艺工程技术。
(中国聚合物网)