

PMI 泡沫发展现状及其在直升机上的应用

赵秀芬 纪双英 史湘宁 郝巍 刘刚

(中航复合材料有限责任公司/中航工业复合材料技术中心,北京 101300)

文摘 对 PMI 泡沫的制备工艺、性能特点以及国内外发展现状进行了简要综述,重点对其在直升机上的应用进行介绍,以期材料研究人员和直升机复合材料结构选材用材提供帮助。

关键词 直升机,复合材料,泡沫,聚甲基丙烯酸酰胺

中图分类号:TB324

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.01.002

Current Situation and Application of Polymethacrylimide Foams on Helicopters

ZHAO Xiufen JI Shuangying SHI Xiangning HAO Wei LIU Gang

(AVIC Composite Corporation LTD, AVIC Composites Center, Beijing 101300)

Abstract In this paper, preparation process, performance, current situation and application of PMI foam are reviewed on helicopters for reference to the material researchers and helicopter composite structure selection.

Key words Helicopter, Composite, Foam, PMI

0 引言

PMI 泡沫是一种轻质、交联、闭孔的硬质泡沫塑料,具有密度低、比强度和比模量高、良好的热稳定性及耐化学性能、易于加工、热变形温度较高(250℃)、面板与泡沫芯材的结合良好、结构完整性好等特点,由于其优异的性能,被广泛应用于航空航天、兵器、船舶、交通运输、医疗体育器材等方面,尤其是在航空航天领域,与 NOMEX[®] 蜂窝和铝蜂窝一样作为高性能轻质夹层结构复合材料的理想芯层材料广泛应用于飞机结构,例如宽体客机机身气密舱的球面框、翼身整流罩等,尤其是在桨叶、垂尾等先进直升机结构中获得了大量应用^[1-9]。鉴于高性能 PMI 泡沫在直升机结构中的应用需求不断增加,本文对 PMI 泡沫的工艺、性能以及国内外发展现状进行了简要综述,重点对其在直升机上的应用实例进行介绍,以期材料研究人员和直升机复合材料结构选材提供帮助。

1 PMI 泡沫制备工艺和性能特点

1.1 PMI 泡沫制备工艺

PMI 泡沫制备方法主要有高温高压挤出法和自由基预聚体法,高温高压挤出法是用甲基丙烯酸甲酯和伯胺为单体,采用双螺杆挤出机在一定温度和压力条件下反应生成泡沫,由于需要高温高压设备,成本较高,工业生产中较少采用这种方法^[9]。

目前工业生产 PMI 泡沫最常用的方法是自由基

预聚体法,即在自由基引发剂作用下将甲基丙烯酸和甲基丙烯腈类单体低温预聚合,得到共聚物,然后将共聚物在高温下发泡,发泡的同时分子链上的氰基和羧基发生环化反应,得到 PMI 泡沫,具体分两步进行:第一步是将甲基丙烯酸(MAA)、甲基丙烯腈(MAN)、自由基引发剂、发泡剂和交联剂等混合均匀后,注入闭合模腔中,在 40~60℃ 水浴中反应 48~72 h,得到 MAA/MAN 共聚板,然后将共聚板在 80~120℃ 条件彻底聚合;第二步为发泡,将共聚板先在 150~160℃ 下预热,再经过 200~220℃ 发泡,最后再进行热处理,得到 PMI 泡沫^[9-13]。

1.2 PMI 泡沫性能特点

PMI 泡沫具有较低的密度(可控制在 50~150 kg/m³),呈闭孔结构,分子主链为 C—C 链,分子侧链含有酰亚胺结构,其外观及微结构见图 1,主要性能特点分析如下^[10, 14-16]。

(1) PMI 泡沫具有 100% 闭孔结构,相较于其他开孔或半开孔的泡沫材料,可以在大多数溶剂中做到不溶解不溶胀,耐化学腐蚀性能优异,同时在作为芯层材料成型时可以防止树脂浸入导致的增重问题。

(2) 聚甲基丙烯酸酰亚胺分子结构中存在着大量的酰亚胺环以及分子间作用力提供了其优异的力学性能,相同密度下的 PMI 泡沫与其他泡沫塑料如聚醚酰亚胺(PEI)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)等相

收稿日期:2017-04-20

基金项目:航空科学基金(11572102)

第一作者简介:赵秀芬,1986 年出生,硕士,工程师,主要从事先进复合材料技术发展研究工作。E-mail:xfzhao53@126.com

比,在剪切强度、剪切模量和压缩强度等性能方面均更优异。

(3) PMI 泡沫和各种树脂体系相容性良好,界面粘结强度高,适合作为高性能夹层结构复合材料中的芯层材料使用。

(4) PMI 泡沫耐热温度可高达 240 ℃,可承受 180 ℃/0.7 MPa 的苛刻加工环境,可采用高温热压罐成型、真空袋成型、注射成型,实现复合材料夹层结构

与蒙皮的一次性共固化,大大节约夹层复合材料的制造成本。

(5) PMI 泡沫具有较好的切削加工性能,可在木材加工设备上进行机械切削,其操作加工速度是铝蜂窝的 10 倍以上,同时加工过程中具有较好的抗压缩蠕变性能。

(6) PMI 泡沫不含氟里昂和卤素,具有良好的防火性能,燃烧时无毒、低密度烟雾、不释放有害物质。

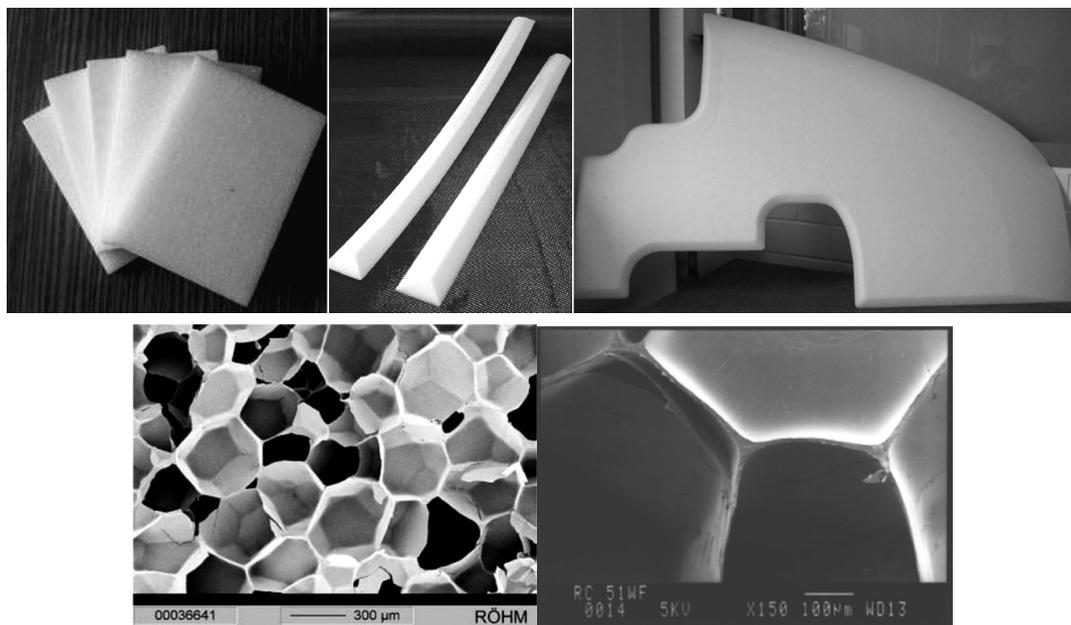


图 1 PMI 泡沫外观及微结构

Fig.1 Appearance and microstructure of PMI foam

2 PMI 泡沫研究发展现状

经过 50 余年的发展,PMI 泡沫材料依靠其优异的性能和日益完善的功能,在泡沫材料领域占据独特的地位,广泛应用于航空、航天、船舶、医疗、风电、交通运输等领域。目前在 PMI 泡沫市场上占据主导地位是德国赢创德固赛 (Evonik Degussa) 公司生产的 ROHACELL[®] 系列 PMI 泡沫,而国内则有西北工业大学、黑龙江石油化工研究院、中国科学院化学所 (浙江中科恒泰)、湖南塑料研究所 (湖南兆恒)、四川大学 (常州天晟新材)、中航工业复合材料技术中心 (福建浩博) 等高校、科研院所和企业在 PMI 泡沫研制方面开展了大量工作,并在市场上逐渐取得一定的地位。

2.1 国外 PMI 泡沫研究发展现状

以行业龙头赢创德固赛公司的 ROHACELL[®] 系列泡沫为例,已经具有 20 余种不同型号的 PMI 泡沫材料。赢创德固赛公司围绕 PMI 泡沫的制备、生产、工艺改进及性能提升进行了非常完善的专利布局,也包括多个中国专利,在改进泡沫制备工艺、提高耐热变形性、提高制品均匀性和降低次品率等方面开展了

大量的研究工作。例如斯特恩等采用两步热空气法进行发泡,改进了一次热空气法发泡导致的次品率高的问题,同时可改进泡沫抗蠕变性;舍布勒等在不使用不溶性成核剂的条件下,制备出均匀尺寸分布的具有耐热变形性的微细孔泡沫,可降低使用不溶性成核剂的成本,降低固化过程树脂吸收量,进而降低夹芯结构的质量;斯特恩等通过在发泡过程中加入多磷酸铵和硫化锌,可降低 PMI 泡沫的阻燃性,而且避免了将含氯或溴的化合物作为阻燃剂所导致的环境污染问题;盖尔等通过采用至少四种具有分级半衰期的引发剂的混合物存在下,将甲基丙烯酸和甲基丙烯酸酯单体共聚,将共聚物后聚合并环化为聚酰亚胺和转化为泡沫材料,可以制得厚度介于 30~80 mm 的 PMI 泡沫块体或板材,解决以往只能制得厚度小于 30 mm 板材的问题;比勒等提供了一种基于甲基丙烯酸系化合物和丙烯酸系化合物的共聚物的新型模内发泡方法,可以获得具有较好粘附性的泡沫,从而与夹层结构的外层良好附着^[17-21]。航空航天常用 ROHACELL[®] 系列 PMI 泡沫的基本力学性能见表 1。

表 1 ROHACELL[®]系列 PMI 泡沫基本力学性能Tab.1 Basic mechanical properties of ROHACELL[®] series PMI foam

| 牌号 | 密度 /kg·m ⁻³ | 压缩强度 /MPa | 拉伸强度 /MPa | 弯曲强度 /MPa | 剪切强度 /MPa | 拉伸模量 /MPa | 剪切模量 /MPa | 断裂伸长率 /% | 热变形温度 /°C |
|-------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 51WF | 52 | 0.8 | 1.6 | 1.6 | 0.8 | 75 | 24 | 3 | 205 |
| 71WF | 75 | 1.7 | 2.2 | 2.9 | 1.3 | 105 | 42 | 3 | 200 |
| 110WF | 110 | 3.6 | 3.7 | 5.2 | 2.4 | 180 | 70 | 3 | 200 |
| 200WF | 205 | 9 | 6.8 | 12 | 5 | 350 | 150 | 3.5 | 200 |

2.2 国内 PMI 泡沫研究发展现状

随着我国航空、航天、船舶、轨道交通以及风电技术的高速发展,国内众多高校、科研院所不断研发了众多具有自主知识产权的国产 PMI 泡沫材料。

刘铁民等^[22-28]采用价格较低且易购的丙烯腈(AN)替代甲基丙烯腈(MAN),并引入第三单体丙烯酰胺(AM),通过自由基本体共聚获得可发泡 MAA/AN/AM 共聚物后,在发泡和热处理过程中运用原位成环机理,制备出低密度、高强度、高模量和高耐热的 PMI 共聚物泡沫,并且对其力学性能、介电性能等进行了表征,并且通过将碳纳米管、导电炭黑等加入 PMI 泡沫,对其吸波性能进行了研究。

陈小强等^[29-31]采用两步法制得 PMI 硬质闭孔泡沫,热处理后压缩强度有 63%~125% 的大幅提高;通过加入反应性阻燃剂对 PMI 泡沫进行改性,明显提高了泡沫的阻燃性能;通过将丙烯酸或甲基丙烯酸、丙烯腈或甲基丙烯腈等本体聚合得到共聚物板材,之后将共聚物板材粉碎、筛分得到用于生产 PMI 泡沫的可发性颗粒,解决了市场上 PMI 泡沫单一板材的产品结构形式的问题,有望扩大 PMI 泡沫的应用范围。

唐红艳等^[32-34]采用含有羧基的丙烯类单体和含有酰胺基的丙烯类单体为主单体,不使用含有剧毒的(甲基)丙烯腈,混料后通过预聚合和热处理制得 PMI 泡沫,具有工序简便,大大降低生产成本的特点;采用高温短时间预聚,然后低温长时间后聚合的方式,有效增加不同单体之间的碰撞接触几率,有助于不同单体之间进行共聚反应,大大改善发泡后 PMI 泡沫塑料的性能。

杨士勇等^[35]将具有特定化学结构的硅磷协同阻燃剂、(甲基)丙烯酸或酯类单体、(甲基)丙烯腈类单体通过自由基共聚反应形成泡沫前驱体共聚物,然后经过热发泡过程形成阻燃、高强高模、高耐热性聚丙烯酰亚胺类泡沫材料,并且在 PMI 泡沫储存期、阻燃性能、废料利用方面开展了大量研究工作^[36-39]。2010 年,中国科学院化学所合作创办浙江中科恒泰新材料科技有限公司,有 Cascell[®] WH、RS、HF、FL、IF 五个系列近 20 种 PMI 产品,具有年产 10⁵ m² PMI 泡沫材料的规模。

谢克磊等^[40-42]采用甲基丙烯酸、甲基丙烯腈为主要单体,制备出具有很好耐热性能的 PMI 泡沫,采用 MgO 和甲基丙烯酸丙酯作为交联剂对 PMI 泡沫进行改性,对其耐热性能、断裂伸长率、密度、压缩强度、剪切强度和弹性模量均有影响。

湖南塑料研究所于 2007 年研制开发出 PMI 泡沫产品,并在 2010 年承担了湖南省属科研机构创新发展专项“大型复合材料构件用聚甲基丙烯酰亚胺(PMI)泡沫材料中试研究机应用推广”,2011 年,作为投资者之一成立了湖南兆恒材料科技有限公司,生产 PMI 泡沫^[10]。

中航工业复合材料技术中心与福建浩博合作,已成功研制出了 ACCPMI[®]系列 PMI 泡沫材料,并建立了年生产能力 3 000 m³ 的 PMI 泡沫生产线。目前 ACC 系列 PMI 泡沫已经完成了多批次全面性能测试,性能与 ROHACELL[®]WF 系列泡沫性能相当,且批次稳定性好,已陆续在多个型号上开展了实际性的应用研究和应用。表 2 所示为 ACCPMI[®]泡沫的基本力学性能。

表 2 ACCPMI[®]系列 PMI 泡沫基本力学性能Tab.2 Basic mechanical properties of ACCPMI[®] series PMI foam

| 牌号 | 密度 /kg·m ⁻³ | 拉伸强度 /MPa | 拉伸模量 /MPa | 压缩强度 /MPa | 压缩模量 /MPa | 剪切强度 /MPa | 剪切模量 /MPa |
|------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ACCPMI-31 | 31±3 | 1.0 | 25 | 0.5 | 21 | 0.4 | 14 |
| CPMI-51 | 52±5 | 2.0 | 82 | 1.0 | 55 | 0.8 | 32 |
| ACCPMI-71 | 75±7 | 2.9 | 122 | 1.8 | 80 | 1.2 | 52 |
| ACCPMI-110 | 110±11 | 4.1 | 181 | 3.5 | 131 | 2.3 | 75 |

3 PMI 泡沫在直升机领域的应用

在飞机结构设计中,既要求设计的构件尽可能轻,同时又要满足刚度的要求,夹层结构复合材料的出现极大地满足了飞机结构设计的需要,夹层结构复合材料由上下面板和夹层芯层组成,芯层材料主要有蜂窝和泡沫两种类型,具有优异的比强度和比模量^[5]。尽管蜂窝材料在高性能航空复合材料结构中取得了相当广泛的应用,但是蜂窝作为芯材,由于其自身结构特点的原因,依然存在一些局限:由于蜂窝为开孔结构,导致固化过程中树脂分布不均匀且面板破损后水汽容易进入蜂窝,造成结构质量加大、性能下降;另外由于具有各向异性,蜂窝纵向和横向性能差异较大,横向力学性能较低,形变能力差,难以成型曲率较大的结构^[3]。

PMI 泡沫夹层由于具有各向同性和闭孔结构,具有良好的抗吸湿特点,可以较好的克服以上问题,特别适用于舰载类和海警类直升机的使用;而且由于其抗疲劳性能,可以承受在使用过程中旋翼产生的高动力载荷。根据贝尔直升机公司(Bell)的一项具体研究表明,一个 PMI 泡沫尾桨叶的制造成本只相当于相同蜂窝桨叶的 20%,这是因为泡沫可以使用共固化工艺,同时 CNC 加工速度较快^[3-4]。

ROHACELL® PMI 泡沫第一次在直升机上的应用可以追溯到 1971 年,欧洲直升机公司(Eurocopter)的 EC120“蜂鸟”轻型直升机上,考虑由金属桨叶改成复合材料桨叶是希望解决原金属桨叶存在的腐蚀问题、提高性能、延长桨叶的使用寿命,其使用泡沫的夹层结构设计,桨叶的使用寿命可以延长 1 000 多飞行小时,相比于金属桨叶的 400~500 飞行小时是非常可观的^[2]。

随着 PMI 泡沫在 EC120 上的成功应用,打开了高性能 PMI 泡沫在更多直升机机型中持续成功使用的开端,欧洲直升机公司在后续所有系列的直升机型号中均大量使用了 PMI 泡沫。如 EC135 的主尾旋翼桨叶、垂尾,采用的是模压固化工艺;EH101 直升机上长度达到 8.5 m 的主尾桨叶均采用 ROHACELL® 71WF、ROHACELL® 51WF 泡沫材料,机身机构中也大量使用了 ROHACELL® 71WF 泡沫材料;NH90 直升机尾桨叶、根部使用的是 ROHACELL® 110WF 泡沫材料,ROHACELL® 51WF 填充橡胶油箱下部支撑筋条之间的空隙,旋翼桨叶,垂尾均使用 PMI 泡沫材料;新一代“虎”式攻击直升机的引擎罩和发动机短舱是使用 ROHACELL® XT 作为芯材,和双马树脂(BMI)预浸料共固化,采用热压罐固化工艺,构件的长期使用温度达到 160℃,降低成本的同时减轻了结构质量^[2-4]。

另外,韦斯特兰直升机公司的 Lynx AH MK9“山猫”多用途直升机、SH-3“海王”反潜直升机的主、尾

旋翼,波音公司与西科斯基公司联合研制的 RAH-66“科曼奇”的旋翼均使用了 PMI 泡沫材料。

国内雏鹰-100 单座轻型直升机研制过程中,为减轻结构质量,泡沫夹层结构占全机复合材料部件的约 90%,采用预浸料与 ROHACELL® 51IG/71IG 泡沫芯材直接共固化,避免使用胶膜,而且为降低制造成本,采用真空压力成型制备夹层结构^[43]。

4 结语

综上所述,虽然 PMI 泡沫材料已经在军用和民用领域得到了广泛的发展和應用,但是目前国内商品化的 PMI 泡沫材料存在种类不全、成本较高、性能不够稳定等问题,在航空航天领域,尤其是直升机上的应用依然是依赖进口居多,在制备方法改进、提高生产效率、提高产品稳定性、降低生产成本以及提高产品性能等方面依然需要进一步努力。同时,针对 PMI 泡沫在直升机上的应用,研发结构功能一体化夹层结构复合材料,如 z 向增强复合材料面板夹层结构、吸波结构,亦具有显著的应用前景。期待国内尽早实现 PMI 泡沫产品的稳定化、系列化、低成本化、高性能化,为我国直升机的研制提供成熟的产品,亦满足航空航天、汽车、轨道交通、医疗、风电等领域的需要。

参考文献

- [1] SCHROEDER G. Verfahren Zurherstellung von poly-methacry-limide; DE, 1494308 [P].1961-04-20.
 - [2] 胡培. ROHACELL® 技术手册. 赢创德固赛特种化学(上海)有限公司, 2005, 28: 65-74.
 - [3] SEIBERT H F. Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures [J]. Reinforced Plastics, 2006, 50(1): 44-48.
 - [4] SEIBERT H F. PMI foam cores find further applications [J]. Reinforced Plastics, 2000, 44(1): 36-38.
 - [5] 高丽红, 杨利. 某型飞机用 PMI 泡沫夹层复合材料的设计 [J]. 航空工程进展, 2010, 1(4): 374-378.
 - [6] 贾欲明, 韩全民, 李巧, 等. 泡沫夹层结构在飞机次承力结构中的应用 [J]. 航空制造技术, 2009(21): 8-12.
 - [7] 胡培, 陈秀华. PMI 泡沫夹芯结构在 A380 后压力框上的应用 [J]. 航空制造技术, 2009(15): 46-49.
 - [8] 赵锐霞, 尹亮, 潘玲英. PMI 泡沫夹层结构在航天航空工业的应用 [J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2): 13-16.
 - [9] 陈青香, 刘未隆, 王鹏, 等. 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫塑料研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(7): 105-109.
 - [10] 李应平, 郑化安, 付东升, 等. 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫材料生产研究进展 [J]. 塑料工业, 2016, 42(6): 8-11.
 - [11] 方勇, 李克迪, 张剑星, 等. 聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫材料的现状及发展趋势 [C]//2015 年(第九届)商用飞机复合材料应用国际论坛, 2015-9-10.
 - [12] SERVATY S, et al. Method for producing block-shaped poly-methacrylimide foamed materials; US. 6670405 [P]. 2003-12-30.
 - [13] STEIN P, SERBERT H, MAIERL. Method of producing PMI foams [P]. US, 40235973, 2004-11-25.
- 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 1 期

- [14] 胡培.PMI 泡沫:夹层结构的芯材[J].玻璃钢,2003(2):9-17.
- [15] 达姆施塔特.PMI 硬质泡沫[J].玻璃钢,2000(2):35-36.
- [16] 赵飞明,安思彤,穆晗.聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)研制现状[J].宇航材料工艺,2008,38(1):1-9.
- [17] 斯特恩 P,盖尔 W,巴特尔 T.具有降低的可燃性的聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫塑料及其生产方法[P].中国,CN1610719A,2005-4-27.
- [18] 斯特恩 P,瑟比尔特 H,麦尔 L,等.聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫材料的制备方法[P].中国,ZL 02814315.9,2006-1-18.
- [19] 舍布勒 J,盖尔 W,赛贝特 H,等.耐热变形性的具有微细孔的聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫[P].中国,ZL 200480027210.4,2008-5-28.
- [20] 盖尔 W,克里格 M,拉乌 N,等.制备块状聚(甲基)丙烯酸酯亚胺泡沫材料的方法[P].中国,CN 101381427 B,2013-6-26.
- [21] 比勒 S,克拉茨 A,皮奥特洛夫斯基 I,等.包含粘合促进剂的基于聚(甲基)丙烯酸酯亚胺的发泡共聚物的制备方法[P].中国,CN 103814068 B,2016-1-20.
- [22] 刘铁民,张广成,梁国正,等.高性能 MAA/AN/AM 共聚物泡沫制备过程中的“原位成环”反应研究[J].材料工程,2007(6):20-25.
- [23] 刘铁民,张广成,梁国正,等.“原位成环”法制备高性能 MAA/AN 泡沫塑料的研究[J].工程塑料应用,2006,34(7):9-12.
- [24] 陈挺,张广成,刘铁民,等.AN/MAA 共聚物泡沫塑料泡体结构研究[J].材料工程,2007(6):15-19.
- [25] 陈挺,张广成,刘铁民,等.丙烯腈/甲基丙烯酸共聚物泡沫塑料的制备与表征[J].中国塑料,2006,20(3):70-74.
- [26] 张广成,陈挺,张翠,等.丙烯腈/甲基丙烯酸共聚物及其泡沫塑料的力学性能[J].西北工业大学学报,2006,24(5):629-633.
- [27] 马科峰,张广成,刘良威,等.吸波性 PMI 泡沫塑料的制备及性能研究[J].应用化工,2011,40(1):38-41.
- [28] 燕子,张广成,马科峰,等.碳纳米管填充 PMI 泡沫的制备及其吸波性能研究[J].应用化工,2012,41(5):844-847.
- [29] 陈小强,张曼,雷毅.聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫的制备及其压缩性能[J].塑料工业,2011,39(6):60-63.
- [30] 杨洋,袁协尧,刘卫平,等.反应性阻燃剂 N-(2,4,6-三溴苯基)马来酰亚胺改性聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫的制备与性能研究[J].上海塑料,2015(1):21-25.
- [31] 雷毅,陈小强,任洪燕,等.用于生产聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫材料的可发性颗粒及应用[P].中国,CN 101857656 B,2011-8-31.
- [32] 唐红艳,郭玉海,陈建勇,等.聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫材料及其制备方法[P].中国,CN 101628954 B,2011-4-6.
- [33] 唐红艳,张毅.一种聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫塑料的制备方法[P].中国,CN 104045764 B,2016-4-13.
- [34] 丁虹耀,张毅,唐红艳.甲基丙烯酸丁酯/丙烯酸酯共聚物泡沫塑料的交联改性研究[J].浙江理工大学学报,2016,35(3):361-366.
- [35] 杨士勇,胡爱军,陶志强,等.阻燃性聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫材料及其制备方法与应用[P].中国,CN101463107A,2009-1-15.
- [36] 李克迪,方勇,胡爱军,等.储存期对聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫性能的影响研究[J].玻璃钢/复合材料,2016(3):70-74.
- [37] 胡爱军,王志媛,金净,等.泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料的发展趋势[J].宇航材料工艺,2009,39(1):1-4.
- [38] 徐文生,范晓庆,李克迪,等.一种聚甲基丙烯酸酯亚胺微发泡材料的制备方法及其产品[P].中国,CN104497343 A,2015-4-8.
- [39] 徐文生,李克迪,方勇.一种阻燃的高强度、耐热型聚(甲基)丙烯酸酯亚胺泡沫塑料[P].中国,CN104086695 B,2016-6-1.
- [40] 谢克磊,曲春艳,王德志,等.聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫塑料的制备及研究进展[J].化工新型材料,2008,36(10):34-36.
- [41] 曲春艳,谢克磊,马瑛剑,等.聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫塑料的制备与表征[J].材料工程,2008(11):19-23.
- [42] 谢克磊,曲春艳,马瑛剑,等.交联剂对 PMI 泡沫塑料结构与性能的影响[J].材料工程,2009(4):23-27.
- [43] 成理,陈蔚,袁正华.雏鹰-100 直升机复合材料部件研制中几个问题及其解决方法[J].高科技纤维与应用,2004,29(1):26-29.