

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.10.003

PVA 纤维改性酚醛泡沫的研究^{*}

罗霞,俞科静,王梦蕾,钱坤

(江南大学生态纺织教育部重点实验室,江苏无锡 214122)

摘要: 为了改善酚醛泡沫的性能,选用聚乙烯醇(PVA)纤维作为酚醛泡沫的增强材料,研究了不同 PVA 纤维含量和长度对酚醛泡沫的泡孔结构、压缩性能、弯曲性能的影响。结果表明,PVA 纤维可以有效改善酚醛泡沫的力学性能和泡孔结构,随着 PVA 纤维含量的增加,酚醛泡沫的力学性能呈现先增大后减小的趋势。当 PVA 纤维的用量为酚醛树脂质量的 3% 时,酚醛泡沫的力学性能达到了最大值,泡孔结构达到了小且均匀的状态。PVA 纤维的长度对酚醛泡沫的泡孔结构也有一定的影响,当 PVA 纤维长度为 6 mm 时,酚醛泡沫具有最好的泡孔结构,但 PVA 纤维长度增加时,酚醛泡沫的压缩性能、弯曲性能减小。

关键词: 酚醛泡沫;聚乙烯醇纤维;泡孔结构;压缩性能;弯曲性能

中图分类号: TQ328.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)10-0012-05

Research of PVA Fibers Reinforced Phenolic Foams

Luo Xia, Yu Kejing, Wang Menglei, Qian Kun

(Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to improve the performance of phenolic foams, polyvinyl alcohol fiber (PVA fiber) was used as padding material to prepare PVA fibers reinforced phenolic foams. The influences of different content and length of PVA fibers on the microstructure, compression properties and flexural properties of the phenolic foams were investigated. The results show that PVA fiber can improve the mechanical properties and the pore structure of phenolic foams effectively. The compression and flexural properties of the phenolic foams increase with the fiber content increasing at first and then dropping afterwards. When the content of PVA fiber is 3% of the phenolic resin mass, the phenolic foams show the best mechanical property, the cells diameter shows most regular distribution and small. The length of the PVA fiber has a certain influence on the performance of phenolic foams, the phenolic foams show the best cells structure when PVA fiber is 6 mm, but when PVA fiber length increases, the compression performance and bending performance of phenolic foams decrease.

Keywords: phenolic foam; polyvinyl alcohol fiber; cells structure; compression property; flexural property

酚醛泡沫是一种新型的保温隔热材料。作为应用最广泛的阻燃隔热材料之一,酚醛泡沫具有很多优异的性能,例如耐高温、耐热、结构稳定、低烟、难燃。酚醛泡沫的原材料来源丰富,生产工艺简单,成本低廉,酚醛泡沫成本仅相当于聚氨酯泡沫的三分之一。酚醛泡沫的质量轻,但是比强度很大,尺寸较稳定,甚至可以在 -30℃ 的条件下长期使用,且此时的尺寸变化率仅为 1%,酚醛泡沫能长期在 150℃ 的条件下使用^[1]。酚醛泡沫相关产品用途非常广泛,被广泛应用于管道、冷库、建筑等领域。然而由于酚醛泡沫结构中酚羟基和亚甲基易氧化,延伸率低,导致普通酚醛泡沫脆性大,极易掉渣粉化,这大大限制了其在很多领域的应用,酚醛泡沫的改性成为了研究热点^[2]。纤维改性是一种常用的改性酚醛泡沫的手段^[3-4]。聚乙烯醇(PVA)纤维作为一种高强高模

的高性能纤维,具有耐酸碱性,耐腐蚀性,耐日光等优异的特点,且 PVA 纤维具有不粘结,在水中的分散性好,与塑料的亲性好,粘结强度高等优点^[5]。笔者使用 PVA 纤维对酚醛泡沫进行改性研究,探讨了 PVA 纤维的含量和长度对酚醛泡沫泡孔结构、压缩性能和弯曲性能的影响。

^{*} 江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(BY2015019-33, BY2016022-07),中央高校基本科研业务费专项基金项目(JUSRP51505),江苏省研究生培养创新工程(KYLX15_1182),连云港市产业前瞻与共性关键技术科技项目(CG1520),江苏省自然科学基金-青年基金项目(BK20160157),江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

联系人:俞科静,博士,副教授,主要研究方向为高分子材料以及复合材料

收稿日期:2016-07-24

1 实验部分

1.1 主要原材料

可发性酚醛树脂:苏州美克思科技发展有限公司;

吐温-80:分析纯,阿拉丁试剂有限公司;

正戊烷、硅油:化学纯,国药集团化学试剂有限公司;

苯酚磺酸:化学纯,南京大唐化工有限责任公司;

PVA 纤维:直径 12 μm ,长度 3,6,12 mm,永安市宝华林实业发展有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电热鼓风干燥箱:W1A-4S 型,南京沃环科技实业有限公司;

万能材料试验机:3385H 型,美国 Instron 公司;

扫描电子显微镜 (SEM):SU1510 型,日本 Hitachi 公司。

1.3 PVA 纤维改性酚醛泡沫的制备

先制备不同含量 PVA 纤维增强酚醛泡沫,选取长度为 3 mm 的 PVA 纤维,PVA 纤维用量分别为酚醛树脂质量的 1%,3% 和 5%,在酚醛树脂发泡前,将模具在 75℃ 条件下预热 20 min,在 PVA 纤维增强酚醛泡沫的制备过程中,首先将不同含量的 PVA 纤维加入 100 g 酚醛树脂中,搅拌均匀,再向体系中加入 2 g 吐温-80 (匀泡剂),5 g 硅油 (表面活性剂),7 g 正戊烷 (发泡剂) 和 14 g 苯酚磺酸 (固化剂),搅拌均匀后放入模具中,在 75℃ 条件下发泡 30 min,即得 PVA 纤维增强酚醛泡沫;再制备不同长度 PVA 纤维增强酚醛泡沫,选取的 PVA 纤维长度分别为 3 mm,6 mm,12 mm,PVA 纤维的用量为酚醛树脂质量的 3%,实验步骤和其它原料用量与不同含量 PVA 纤维改性酚醛泡沫的制备方法相同。

1.4 测试方法

(1) 泡孔结构分析。

使用 SEM 观察 PVA 纤维增强酚醛泡沫的截面,观察泡孔的分布、孔径、闭合情况等。

(2) 压缩性能分析。

按照 ASTM D1621-2010 进行压缩性能测试,压缩速率为 2.5 mm/min。

(3) 弯曲性能分析。

弯曲性能按照 GB/T 8812.1-2007 测试,测试速率为 2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 PVA 纤维含量对酚醛泡沫性能的影响

(1) 对酚醛泡沫泡孔结构的影响。

选取长度为 3 mm 的 PVA 纤维加入酚醛泡沫基体中,探究 PVA 纤维的加入量对酚醛泡沫性能的影响。图 1 为不同含量 PVA 纤维对酚醛泡沫泡孔结构的影响。

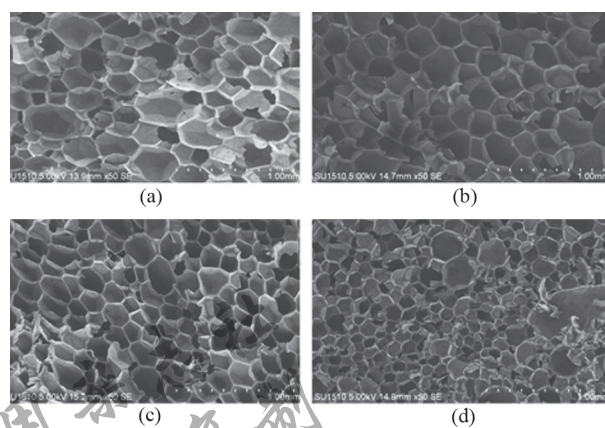


图 1 不同含量 PVA 纤维增强酚醛泡沫的泡孔结构
a—纯酚醛泡沫;b—1% PVA 纤维增强酚醛泡沫;
c—3% PVA 纤维增强酚醛泡沫;d—5% PVA 纤维增强酚醛泡沫

从图 1 可以看出,随着 PVA 纤维含量的增加,酚醛泡沫的泡孔直径在不断的减小,酚醛泡沫的泡孔形状由六边形趋向于圆形。原酚醛泡沫的大部分泡孔直径分布在 200~300 μm 之间,部分较大的泡孔直径在 500~600 μm 之间,当 PVA 纤维用量为酚醛树脂质量的 1% 时,酚醛泡沫泡孔直径分布范围为 90~180 μm ,泡孔分布更加均匀,大尺寸泡孔数量减小,当加入 PVA 纤维的含量增加至 3% 时,酚醛泡沫的泡孔直径变小,泡孔尺寸分布在 150~250 μm 之间,基本无大尺寸泡孔存在,当加入 PVA 纤维的含量增加至酚醛树脂质量的 5% 时,酚醛泡沫的平均泡孔虽然变得更小,泡孔直径大部分在 80~200 μm 之间,但是泡孔的均匀程度变差,直径大小比较悬殊,大于 300 μm 的泡孔开始出现。因此在酚醛泡沫中加入少量 PVA 纤维可以使酚醛泡沫的泡孔变小且均匀,这是因为随着 PVA 纤维的引入,PVA 纤维在基体中作为异相成核剂,减小了泡孔形成所需要的自由能,形成了更多的小泡孔,致使泡孔的密度增加,导致基体的泡孔变小且均匀^[6]。但是随着加入的 PVA 纤维含量的不断增加,酚醛泡沫的泡孔直径分布范围也变大,当加入 PVA 纤维占酚醛树脂质量的 5% 时,极大泡孔和

极小泡孔开始出现,这是因为当加入 PVA 纤维过多时, PVA 纤维无法在粘稠性的酚醛树脂中均匀地分散开,这一现象使得过量 PVA 纤维不仅不能对泡沫的泡孔结构起到改善作用,反而破坏了酚醛泡沫原本的结构,从而导致泡孔大小和结构形成较大的差异^[7]。

(2) 对酚醛泡沫压缩性能的影响。

不同 PVA 纤维含量下酚醛泡沫的压缩性能如图 2 所示。

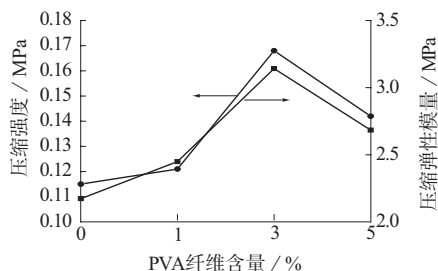


图2 不同 PVA 纤维含量下酚醛泡沫的压缩性能

由图 2 可以看出,加入了 PVA 纤维的酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量都高于未加入 PVA 纤维的酚醛泡沫原样。未添加 PVA 纤维的酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量分别是 0.115, 2.173 MPa; 而 PVA 纤维含量分别占酚醛树脂质量的 1%, 3%, 5% 的酚醛泡沫的压缩强度分别为 0.121, 0.168, 0.142 MPa; 压缩弹性模量分别为 2.449, 3.142, 2.684 MPa, 在一定范围内增加 PVA 纤维的含量, 可以提高酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量, 而当 PVA 纤维的含量过多时, 酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量反而随着 PVA 纤维含量的增大而减小。当加入的 PVA 纤维的含量为酚醛树脂的 3% 时, 酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量最高。因为当加入的 PVA 纤维含量较少时, 酚醛泡沫的泡孔结构开始变小且均匀, 泡孔密度增加, 泡沫棱柱作为泡沫中承受应力的主要部分, 随着泡孔变小, 棱柱变多, 泡沫的压缩性能提高, 同时 PVA 纤维使得酚醛泡沫中沿纤维轴向的若干个泡孔形成了一个包围在纤维体周围的体系, 在承受压缩载荷时, 先要使纤维与泡沫体系脱胶分离然后再使泡孔受到挤压而变形, 因此酚醛泡沫的压缩能力得到了加强^[8]。但是当加入的 PVA 纤维含量过多时, 酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量不仅不增加, 反而还有一定程度的下降, 这可能是因为随着 PVA 纤维含量的增加, 大量的 PVA 纤维很难在酚醛树脂中均匀地分散开来, 而使 PVA 纤维在黏度很高的酚醛树脂中

的分散性变差, 形成粘结, 使酚醛泡沫的泡孔结构破坏, 在基体中形成贫脂区, 酚醛泡沫的泡孔壁出现缺陷和裂缝, 在泡沫中形成应力集中点, 使酚醛泡沫在压缩过程中出现崩塌现象, 压缩性能减弱^[9]。

(3) 对酚醛泡沫弯曲性能的影响。

不同 PVA 纤维含量下酚醛泡沫的弯曲强度和弯曲弹性模量如图 3 所示。由图 3 可以看出, 加入了 PVA 纤维的酚醛泡沫的弯曲强度和弯曲弹性模量都高于纯酚醛泡沫。未添加 PVA 纤维的酚醛泡沫的弯曲强度和弯曲弹性模量分别是 0.027, 1.745 MPa; 而 PVA 纤维含量分别占酚醛树脂质量的 1%, 3%, 5% 的酚醛泡沫的弯曲强度分别为 0.077, 0.131, 0.104 MPa; 弯曲弹性模量分别为 2.507, 4.735, 3.701 MPa, 随着 PVA 纤维的增加, 酚醛泡沫的弯曲强度和弯曲弹性模量都有了明显的增大, 当 PVA 纤维占酚醛树脂质量的 3% 时, 酚醛泡沫的弯曲性能达到了较好的状态。而 PVA 纤维的含量继续增加时, PVA 纤维的弯曲性能反而随着 PVA 纤维含量的增大而减小。这是因为酚醛泡沫在承受外力时, PVA 纤维与基体会发生脱粘, PVA 纤维从基体中抽拔出来, 此时酚醛泡沫的尖端产生应力松弛, 从而减缓了裂纹的扩展, 而且在断裂的过程中, PVA 纤维的抽拔需要外力做功从而消耗大量的能量, 因此提高了酚醛泡沫的弯曲强度。当增加 PVA 纤维含量时, PVA 纤维与酚醛树脂基体脱粘, 拔出所需要的能量就越多, 则增韧效果就越好。而当 PVA 纤维加入过多时, PVA 纤维在酚醛树脂中不能均匀地分散开, 过多的纤维还会破坏基体原来的结构, 从而使酚醛泡沫的弯曲性能下降^[10]。

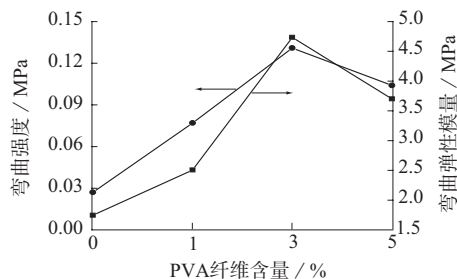


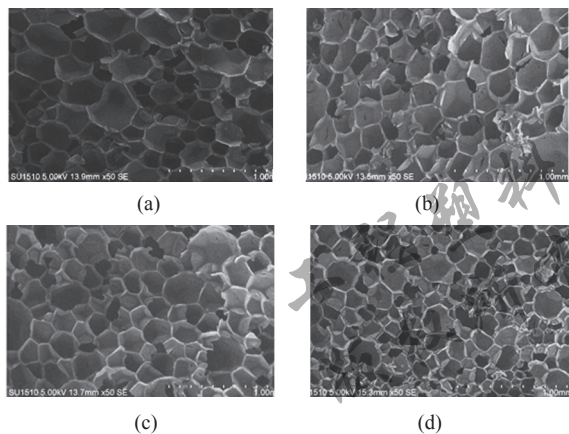
图3 不同 PVA 纤维含量下酚醛泡沫的弯曲性能

2.2 PVA 纤维长度对酚醛泡沫性能的影响

(1) 对酚醛泡沫泡孔结构的影响。

图 4 为不同长度 PVA 纤维改性酚醛泡沫的 SEM 照片。由图 4 可以看出, 当加入含量为酚醛树脂质量的 3% 的长度为 3 mm 的 PVA 纤维之后, 泡

孔的孔径开始减小,当纤维长度为 6 mm 时,泡孔的孔径分布最均匀,此时泡孔的尺寸最小,尺寸分布在 200~300 μm 之间,这是因为当纤维长度过短时会在基体中形成增强盲区,从而达不到较为理想的效果,当纤维长度适当增加时,PVA 纤维在酚醛泡沫中作为异相成核剂,改善了基体的泡孔结构;当 PVA 纤维的长度为 12 mm 时,平均泡孔尺寸虽然较小,但是泡孔结构开始变得不均匀,有较大泡孔开始出现,这是因为当 PVA 纤维长度过长时,纤维容易在基体中缠结粘附在一起,导致分散不均,不仅不能改善酚醛泡沫的泡孔结构,反而影响了泡孔原本的形态,所以会出现泡孔大小不均匀的情况,缠结的 PVA 纤维对泡孔的挤压还有可能使酚醛泡沫的泡孔破裂,因此周围可以发现有些细小的碎裂情况^[11]。



a—纯酚醛泡沫;b—3 mm PVA 纤维增强酚醛泡沫;
c—6 mm PVA 纤维增强酚醛泡沫;
d—12 mm PVA 纤维增强酚醛泡沫

图 4 不同长度 PVA 纤维改性酚醛泡沫的泡孔结构

(2) 酚醛泡沫压缩性能的影响。

图 5 为不同 PVA 纤维长度下酚醛泡沫的压缩性能。

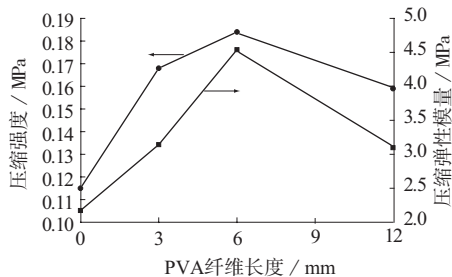


图 5 不同 PVA 纤维长度下酚醛泡沫的压缩性能

由图 5 可以看出,未添加 PVA 纤维的酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量分别是 0.115, 2.173 MPa;而添加了含量为酚醛树脂质量的 3%

长度为 3,6 mm 和 12 mm 的 PVA 纤维的酚醛泡沫的压缩强度分别为 0.168,0.184,0.159 MPa;压缩弹性模量分别为 3.142,4.539,3.097 MPa,从这些数据中可以看出,在一定范围内,随着 PVA 纤维长度的增加,酚醛树脂泡沫的压缩强度和压缩弹性模量都相应增大,而当加入酚醛树脂泡沫中 PVA 纤维的长度过长时,PVA 纤维的压缩性能反而有所下降,当加入的 PVA 纤维的长度为 6 mm 时,酚醛泡沫的压缩强度和压缩弹性模量达到了最大值。

当 PVA 纤维增长时,酚醛泡沫的泡孔结构变得均匀,泡孔尺寸减小,纤维表面和酚醛树脂的接触面积更大,能够更好地粘附在一起,PVA 纤维增加了酚醛泡沫的形变难度,所以增强效果就会随着纤维的增长而变大^[12]。但是,当 PVA 纤维的长度过长,PVA 纤维容易产生粘结,从而无法与酚醛树脂进行良好的融合,甚至会破坏泡孔结构,使得其压缩应力和压缩弹性模量都变小^[13]。

(3) 对酚醛泡沫弯曲性能的影响。

图 6 为不同 PVA 纤维长度下酚醛泡沫的弯曲性能。PVA 纤维长度的变化对酚醛泡沫的弯曲性能也有一定的影响。当 PVA 纤维长度由 3 mm 增加至 12 mm 时,酚醛泡沫的弯曲性能呈现先增大后减小的趋势,当占酚醛树脂 3%,长度分别 3 mm,6 mm,12 mm 的 PVA 纤维加入酚醛泡沫中,酚醛泡沫的弯曲强度分别为 0.131,0.164,0.157 MPa,弯曲弹性模量分别为 4.735,5.987,3.142 MPa。当 PVA 纤维加入泡沫基体中时,纤维贯穿泡沫,承担着基体的扭转变形,材料的弯曲强度增加^[14]。当纤维的长度增加到一定程度时,由于纤维长度过长,纤维在基体中缠结,与基体的界面效应变差,纤维容易从基体中脱落,使酚醛泡沫材料弯曲性能下降^[15]。

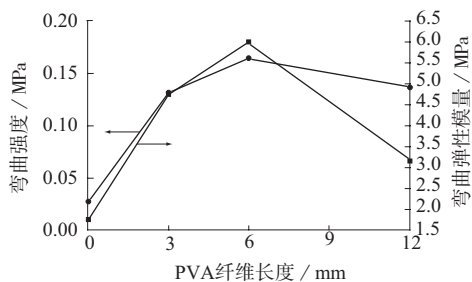


图 6 不同 PVA 纤维长度下酚醛泡沫的弯曲性能

3 结论

(1) 添加 PVA 纤维可以有效地改善酚醛泡沫的泡孔结构,当 PVA 纤维的含量为酚醛树脂质量的 3% 时,酚醛泡沫的结构达到了小且均匀的状态。

(2) PVA 的含量会影响酚醛泡沫的压缩性能和弯曲性能,当 PVA 纤维的含量为酚醛树脂质量的 3% 时,酚醛泡沫的压缩和弯曲性能达到了较好的状态。该含量下的 PVA 纤维改性的酚醛泡沫具有较均匀的泡孔结构,随着纤维含量的增加,泡孔结构被破坏,纤维在基体中分散不匀,造成团聚,使酚醛泡沫的压缩和弯曲性能下降。

(3) PVA 纤维的长度对酚醛泡沫的泡孔结构也有一定的影响,当 PVA 纤维的长度为 6 mm 时,酚醛泡沫的泡孔结构达到较小且均匀的状态。当 PVA 纤维长度增加为 12 mm 时,纤维在基体中缠绕,造成泡孔结构破坏。

(4) PVA 纤维的长度对酚醛泡沫的力学性能有一定影响,当纤维长度为 6 mm 时,PVA 纤维的压缩和弯曲性能都达到了较好的状态,当纤维长度增加为 12 mm 时,酚醛泡沫的力学性能开始下降。

参考文献

- [1] 高卫卫. 酚醛泡沫塑料的增韧研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2013.
Gao Weiwei. Study on toughening phenolic foam[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [2] 何斌, 杨振国. 纳米 SiO_2 改性酚醛泡沫的制备及表征 [J]. 石油化工, 2007, 36(12): 1 266-1 270.
He Bin, Yang Zhenguo. Preparation and characterizations of phenolic foam modified with nano- SiO_2 [J]. Petrochemical Technology, 2007, 36(12): 1 266-1 270.
- [3] 宋寒, 吴晓青. 短玻璃纤维、 $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ 晶须改性酚醛泡沫的性能研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(4): 62-65.
Song Han, Wu Xiaoqing. Study on chopped glass fibers and $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ whiskers modified phenolic foam [J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(4): 62-65.
- [4] 庄晓伟, 张伟, 王春鹏, 等. 薄竹面竹纤维增强酚醛泡沫夹芯复合板制备研究 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(6): 10-14.
Zhuang Xiaowei, Zhang Wei, Wang Chunpeng, et al. Manufacturing of sliced bamboo veneer faced bamboo fiber reinforced phenolic foam sandwich panels [J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(6): 10-14.
- [5] 李明星, 王凯. 高强高模聚乙烯醇 (PVA) 纤维的研究进展 [J]. 合成纤维, 2003(1): 21-23.
Li Mingxing, Wang Kai. The research progress of PVA fiber with high strength and high modulus [J]. Synthetic Fiber in China, 2003(1): 21-23.
- [6] 孙洁, 李华强, 冯古雨, 等. 短切芳纶纤维增强酚醛泡沫性能的研究 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4): 12-16.
Sun Jie, Li Huaqiang, Feng Guyu, et al. Research on properties of chopped aramid fiber reinforced phenolic foams [J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4): 12-16.
- [7] 高卫卫, 曹海建, 钱坤. 玻纤增强酚醛泡沫的制备及性能研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2013(9): 17-20.
Gao Weiwei, Cao Haijian, Qian Kun. Properties and manufacture of glass-fiber reinforced phenolic foam [J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2013(9): 17-20.
- [8] 严毓珣. 中空玻璃微珠 / 玻璃纤维增强聚氨酯泡沫塑料的微观结构与性能分析 [D]. 苏州: 苏州大学, 2006.
Yan Yuxun. Performance and microstructure research on the microsphere / glass fiber reinforced polyurethane foam's composites [D]. Suzhou: Suzhou University, 2006.
- [9] 卢子兴, 邹波, 李忠明, 等. 玻璃纤维束增强聚氨酯泡沫的拉压力学性能 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 36-39.
Lu Zixing, Zou Bo, Li Zhongming, et al. Tensile and compressive mechanical properties of polyurethane foam plastics reinforced by glass fiber bundles [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1): 36-39.
- [10] 卢杰, 杨中甲, 顾轶卓, 等. 玻璃纤维增强体形式对酚醛泡沫性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(6): 1 394-1 401.
Lu Jie, Yang Zhongjia, Gu Yizhuo, et al. Effects of glass fiber reinforcement type on property of phenolic foam [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(6): 1 394-1 401.
- [11] 孙洁, 李华强, 冯古雨, 等. 芳纶浆粕纤维增强酚醛泡沫的微观结构及性能 [J]. 机械工程材料, 2015, 39(7): 86-90.
Sun Jie, Li Huaqiang, Feng Guyu, et al. Microstructure and properties of aramid-pulp fiber reinforced phenolic foams [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(7): 86-90.
- [12] 孙洁, 李华强, 冯古雨, 等. 芳纶纤维增强酚醛泡沫的性能 [J]. 塑料, 2015, 44(4): 83-86, 100.
Sun Jie, Li Huaqiang, Feng Guyu, et al. Performance of aramid fiber reinforced phenolic foam [J]. Plastics, 2015, 44(4): 83-86, 100.
- [13] 杨彦峰, 何继敏, 陈同海, 等. 玻璃纤维改性酚醛泡沫塑料的研究 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(8): 35-38.
Yang Yanfeng, He Jimin, Chen Tonghai, et al. Research on glass fiber modified phenolic foam plastics [J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(8): 35-38.
- [14] 张蔚, 陈丰, 孙宇, 等. 长玻纤增强聚氨酯复合材料弯曲强度-应变试验研究 [J]. 塑料工业, 2011, 39(9): 77-80.
Zhang Wei, Chen Feng, Sun Yu, et al. Flexural stress-strain test of long glass fiber reinforced polyurethane composites [J]. China Plastics Industry, 2011, 39(9): 77-80.
- [15] 殷锦捷, 戴英华. 增韧酚醛泡沫塑料的制备及填料对其性能的影响 [J]. 上海塑料, 2010(2): 37-40.
Yin Jinjie, Dai Yinghua. Study on phenolic foam toughening modification and influence of filler on the properties [J]. Shanghai Plastics, 2010(2): 37-40.