

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.011

竹纤维 / 纳米 SiO_2 改性 PUR 泡沫制备及其性能

曾盛渠,王琼裕,阳慧倩,杨璇,毛颖

(湖南工学院材料科学与工程学院,湖南衡阳 412000)

摘要: 将 KH-550 偶联剂改性的纳米 SiO_2 和竹纤维加入到黑料 [二苯基甲烷二异氰酸酯 (MDI) 混合物] 和白料 (组合聚醚多元醇) 中,充分搅拌后,采用一步法发泡工艺制备了不同配比的改性硬质聚氨酯 (PUR-R) 泡沫复合材料。对改性的纳米 SiO_2 和 PUR-R 泡沫进行了红外光谱分析;对改性前、后的 PUR-R 泡沫进行热重分析和压缩性能测试。热性能测试表明, PUR-R 泡沫经纳米 SiO_2 和竹纤维双重改性后其热分解温度提高了 14°C 。压缩性能测试表明, 纳米 SiO_2 对 PUR-R 泡沫塑料有一定的增强作用,黑料和白料配比为 1.4 : 1,改性纳米 SiO_2 和竹粉的含量均为聚醚多元醇的 4% 时,泡沫的压缩强度提高了 30%。综合数据发现, SiO_2 和竹纤维双重改性后的 PUR-R 泡沫力学性能和热性能都得到了明显提高。

关键词: 硬质聚氨酯泡沫塑料; 竹纤维; 纳米 SiO_2 ; 力学性能

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0055-05

Preparation and Properties of Bamboo Fiber / Nano- SiO_2 Modified PUR Foam

Zeng Shengqu, Wang Qiongyu, Yang Huiqian, Yang Xuan, Mao Ying

(School of Materials Science and Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 412000, China)

Abstract : Nano- SiO_2 modified by KH-550 coupling agent and bamboo fiber were added into black material [diphenylmethane diisocyanate (MDI) mixture] and white material (combination polyether polyol). After full stirring, the modified polyurethane (PUR-R) foam composites with different ratio were prepared by one-step foaming process. The infrared spectra of the modified nano- SiO_2 and the prepared PUR-R foam were analyzed. The thermogravimetric analysis and compression performance of PUR-R foam before and after modification were carried out. The thermal performance test show that the thermal decomposition temperature of PUR-R foam are increased by 14°C after modification of nano- SiO_2 and bamboo fiber. The compression performance tests show that nano- SiO_2 has a certain strengthening effect on rigid polyurethane foam. When the ratio of black material to white material is 1.4 : 1, and the content of modified nano- SiO_2 and bamboo fiber is 4% of white material, the compression strength of the foam is increased by 30%. The results show that the mechanical and thermal properties of PUR-R foam are improved obviously.

Keywords : rigid polyurethane foam ; bamboo fiber ; nano SiO_2 ; mechanical property

由于硬质聚氨酯 (PUR-R) 泡沫的隔热性能好、质量比较轻、稳定性强、便宜等优点,因而被广泛应用^[1-4]。然而 PUR-R 泡沫的力学强度和模量不足,导致其在一些对力学性能要求较高的领域不能广泛应用,如风电叶片等,另外,如引擎盖泡沫夹芯等场合,则表现出耐热性能不足的问题。因此提高 PUR-R 泡沫力学性能和耐热性成为 PUR-R 改性的重要研究方向。许昆鹏^[5]将新型碳纤维 (CF)/ 纳

米黏土作为复合改性增强填料,填充改性 PUR-R 泡沫塑料。实验结果表明,改性后 PUR-R 泡沫表面空隙减小,颗粒分布更加均匀。用热机械分析法测定,填充改性后的泡沫材质的弹性下降,力学性能得到了显著提升。盖广清等^[6]采用秸秆纤维作为增强材料,将 PUR-R 泡沫材料进行改性,研究秸秆纤维掺量对增强 PUR-R 泡沫力学性能的影响。研究结果表明,秸秆纤维对 PUR-R 塑料的压缩性能有

基金项目: 湖南省大学生创新创业训练项目 (17060640225), 湖南省教育厅科学研究项目 (18B463), 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ4262)

通信作者: 曾盛渠,副教授,主要从事树脂基复合材料的制备、改性与成型研究

收稿日期: 2021-07-02

引用格式: 曾盛渠,王琼裕,阳慧倩,等. 竹纤维 / 纳米 SiO_2 改性 PUR 泡沫制备及其性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):55-59, 72.

Zeng Shengqu, Wang Qiongyu, Yang Huiqian, et al. Preparation and properties of bamboo fiber / nano- SiO_2 modified PUR foam[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):55-59, 72.

增强作用。丁友江等^[7]用木质纤维来增强 PUR-R 泡沫,并测试了木质纤维对 PUR-R 泡沫的力学性能、压缩性能等的影响。当木质纤维含量为 10%、长径比为 40 : 1 时,增强的 PUR-R 泡沫的压缩性能达到最佳。从以上实验来看,天然纤维对 PUR-R 泡沫塑料的力学性能有一定的增强作用,然而相关研究均未提及对热性能的改善。

V. Yakushin 等^[8]分别研究了磨碎的 CF 增强改性 PUR-R 泡沫的压缩性能,当 CF 长度为 50 ~ 150 μm 、质量分数为 10% 时, PUR 泡沫的压缩弹性模量提高了 30%,压缩强度提高了 20%。张超群^[9]主要使用 KH-550 对纳米 SiO_2 进行表面处理改性,制备了 PUR/ SiO_2 ,结果表明:经过表面处理的纳米 SiO_2 的加入提高了 PUR 的热稳定性。当 SiO_2 含量为 1% 时,复合材料的热分解温度最高,为 320 $^{\circ}\text{C}$ 。崔亚平等^[10]相关研究表明水玻璃可改性各种 PUR 复合材料,并深入研究不同含量的水玻璃对其整体热力学性能的影响,结果表明:随着水玻璃的增加, PUR 的受热分解温度向高温方向偏移了 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上。王圣程等^[11]利用玻璃纤维 (GF) 与空心玻璃微珠 (HGM) 对 PUR-R 泡沫进行热改性。结果表明,当 HGM 添加 5 g、GF 添加 10 g 时,制得的 PUR 泡沫热力学性能最好。杨春光等^[12]利用发泡剂 HFC-365 mfc 制备了一种环保型的 PUR-R 泡沫,同时也探讨了亲水型: a200,疏水型: r974, r972 共三种 SiO_2 颗粒的添加对 PUR-R 泡沫力学性能方面的影响。研究结果显示:在 PUR-R 泡沫添加了疏水型纳米 SiO_2 后,随其添加量增加, PUR-R 泡沫的压缩强度就会呈现出先降低再上升而后减弱的现象,且当疏水型纳米 SiO_2 的质量浓度为 3% 时, PUR-R 泡沫材料的压缩强度会达到最大。从以上实验来看, GF, SiO_2 等一些无机物可以增强 PUR-R 泡沫的热稳定性,但对其力学性能的增强一般。

国内外学者针对纳米材料或纤维来对 PUR-R 进行改性已经有了一定研究,但是运用纳米 SiO_2 和纤维双重改性 PUR-R 泡沫研究较少。纳米 SiO_2 具有多孔性、耐高温性、良好的化学稳定性、电绝缘性好等性能,用来改性 PUR-R 泡沫可以起到良好的机械补强作用;而竹纤维增强 PUR-R 泡沫^[13],具有高硬度、冲击强度、柔顺性等性能^[14],价格便宜,而且 PUR-R 泡沫易于降解和回收利用^[15-21]。

因此笔者采用超声分散和一步法发泡工艺,用纳米 SiO_2 粒子和竹纤维对 PUR-R 泡沫双重改性,并主要研究其力学性能和耐热性。

1 实验方法

1.1 主要原材料

黑料 [二苯基甲烷二异氰酸酯 (MDI) 和聚合 MDI 混合物]: 工业级, 山东烟台万华集团有限公司;

白料 (组合聚醚多元醇, 即已加入发泡剂、稳泡剂等助剂): 工业级, 山东烟台万华集团有限公司;

纳米 SiO_2 颗粒: 99.5%, (30 $\pm$ 5) nm, 上海麦克林生化有限公司;

竹纤维: 100 目 (125 μm), 龙门县胜龙竹木工艺制品厂;

无水乙醇: 湖南汇虹试剂有限公司;

偶联剂: KH-550, 东莞市山一塑化有限公司。

1.2 主要设备及仪器

万能试验机: CMT4103 型, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

热失重 (TG) 分析仪: TGAQ50 型, 美国梅特勒-托利多公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Nicolet6700 型, Thermo Fisher 公司。

1.3 PUR 泡沫复合材料制备

由于本实验的变量较多,若采用控制单一变量来进行实验,试验次数过多,所以采用正交实验来设计方案。采用一步法发泡工艺制备 PUR-R 泡沫。通过查阅相关文献,根据白料 20 g 不变,计算黑料、竹粉和 SiO_2 的用量,设计正交试验,见表 1。

表 1 实验配方

实验组	黑、白料配比			g
	黑	白料	SiO_2	
空白-1	24 : 20	0	0	0
空白-2	26 : 20	0	0	0
空白-3	28 : 20	0	0	0
A1	24 : 20	0.6	0.8	0.8
A2	24 : 20	0.8	1	1
A3	24 : 20	1.0	1.2	1.2
B1	26 : 20	0.6	1	1
B2	26 : 20	0.8	1.2	1.2
B3	26 : 20	1.0	0.8	0.8
C1	28 : 20	0.6	1.2	1.2
C2	28 : 20	0.8	0.8	0.8
C3	28 : 20	1.0	1	1

样品制备过程如下:

(1) 纳米 SiO_2 的改性。

用偶联剂 KH-550 对纳米 SiO₂ 进行表面改性处理。首先按照 1 : 3 的比例配置无水乙醇的水溶液 120 mL,再将 0.48 g KH-550 偶联剂加入混合液中,水解搅拌 30 min,接着将 12 g 纳米 SiO₂ 加入混合液中,在 80℃水浴条件下搅拌 3 h,反应完成后将产物取出并抽滤干燥,得到改性纳米 SiO₂。

(2) 发泡。

PUR-R 泡沫塑料基本配方:白料 20 g;黑料 24~28 g;纳米 SiO₂ 0.6~1 g;竹粉 0.8~1.2 g。首先将竹粉与纳米 SiO₂ 放置 120℃烘箱中干燥 16 h 后取出备用。在常温下将竹粉和纳米 SiO₂ 微粒通过超声均匀分散在黑料中,搅拌均匀使其混合,再倒入白料,立刻用电动搅拌器高速搅拌使其混合,然后将物料倒在模具中,待发泡完成并冷却至室温后于 100℃干燥箱中熟化 4 h,取出并冷却至室温,脱模即得到产品。

1.4 性能测试

压缩性能:按 GB/T 8813-2008 测试,压缩速度 5 mm/min,样品尺寸为 5 cm×5 cm×5 cm,压缩强度为压缩量为 10% 时的测试值,每组测试取四个试样,数据取平均值。

表观密度:按 GB/T 6343-2009 测定。

FTIR 分析:采用溴化钾压片法,在 400~4000 cm⁻¹ 范围进行测试。

热重(TG)分析:测试前将样品在 N₂ 气氛中,100℃恒温 5 min 除去水分,再从 30℃开始以 20℃/min 升温速率升温至 800℃进行测试。

2 结果与讨论

2.1 压缩性能

通过正交试验求得 k 值,k 值即某因素(黑、白配料比、竹纤维和纳米 SiO₂ 含量)各水平的平均值,不同配比下的 PUR-R 泡沫材料压缩强度及表观密度见表 2。

图 1 是不同改性纳米 SiO₂ 含量时 PUR-R 压缩强度,由改性纳米 SiO₂ 不同含量时的 k 值绘得。由图 1 可知,当改性纳米 SiO₂ 含量为 0.6 g 时,压缩强度最大, SiO₂ 含量为 0.8,1.0 g 时,压缩强度逐渐降低。降低原因主要是纳米 SiO₂ 对 PUR-R 泡沫塑料具有快速增稠、固化作用,黑料黏度迅速增加,导致 PUR 原液发泡反应困难,从而造成泡沫塑料颗粒结构不均匀,使其压缩强度明显下降。

表 2 正交实验结果分析

实验组	黑、白配料比	纳米 SiO ₂ 含量 / g	竹纤维含量 / g	压缩强度 / MPa	表观密度 / (g·cm ⁻³)
空白 -1	24 : 20(1.2 : 1)	0	0	0.153	
空白 -2	26 : 20(1.3 : 1)	0	0	0.128	
空白 -3	28 : 20(1.4 : 1)	0	0	0.215	
1	24 : 20(1.2 : 1)	0.6	0.8	0.205	0.060
2	24 : 20(1.2 : 1)	0.8	1	0.1675	0.066
3	24 : 20(1.2 : 1)	1	1.2	0.1875	0.062
4	26 : 20(1.3 : 1)	0.6	1	0.1425	0.062
5	26 : 20(1.3 : 1)	0.8	1.2	0.145	0.059
6	26 : 20(1.3 : 1)	1	0.8	0.1725	0.062
7	28 : 20(1.4 : 1)	0.6	1.2	0.25	0.065
8	28 : 20(1.4 : 1)	0.8	0.8	0.28	0.065
9	28 : 20(1.4 : 1)	1	1	0.19	0.067
k1	0.187	0.199	0.219		
k2	0.153	0.198	0.167		
k3	0.24	0.183	0.194		
R(极差)	0.087	0.016	0.054		
优化组合	3 组	1 组	1 组		

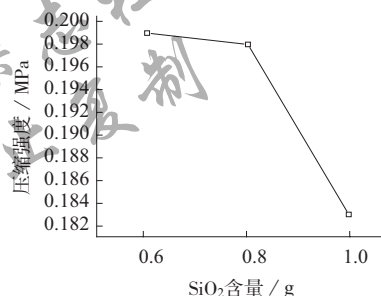


图 1 不同改性纳米 SiO₂ 含量时 PUR 压缩强度

图 2 是不同黑、白料配比时的 PUR-R 泡沫压缩强度,由黑、白料不同配比(1.2 : 1,1.3 : 1,1.4 : 1)时的 k 值绘得。

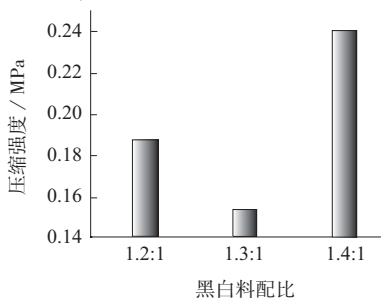


图 2 不同黑白料配比时 PUR 压缩强度

由图 2 可知,压缩强度先减小后增大。当黑、白料配比为 1.4 : 1 时压缩强度,即 10% 应变时的压缩应力最大。当黑、白料配比为 1.3 : 1 时,压缩强度最小。PUR-R 泡沫的压缩强度主要取决于泡沫孔间的支柱数量和刚性。黑料相对白料的占比增大,一方面增加了 PUR-R 分子链中硬段含量,提高了支柱的刚性;另一方面影响发泡黏度导致 PUR-R 密度的变化。经测量,黑、白料配比为 1.4 : 1 时密

度最大。密度较高的 PUR-R 泡沫中所含的支柱占比较大,所以支柱增强效应表现更明显,有较高压缩强度。通过计算发现,当黑、白料配比为 1.4 : 1, 改性纳米 SiO₂ 和竹纤维含量分别为白料的 4% 和 4% (即 0.8 g) 时效果最佳,泡沫压缩强度提高 30%。

图 3 是不同竹纤维含量时 PUR 压缩强度,由竹纤维含量 (0.8, 1.0, 1.2 g) 时的 k 值绘得。由图 3 可知,压缩强度先减小后增大。当竹纤维含量为 0.8 g 时,压缩强度最强;当其含量为 1.0 g 时,压缩强度最低。

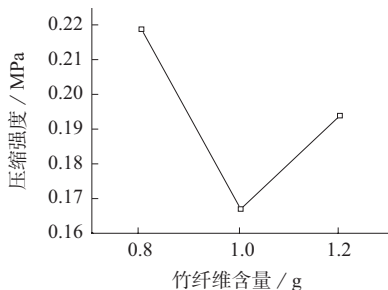


图 3 不同竹纤维含量时 PUR 压缩强度

2.2 耐热性

图 4 是改性前、后 PUR-R 泡沫的 TG 曲线。图 5 是改性前、后 PUR-R 泡沫的 DTG 曲线。

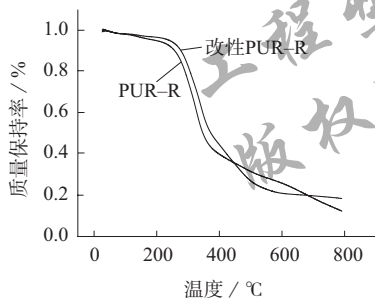


图 4 改性前、后 PUR-R 泡沫的 TG 曲线

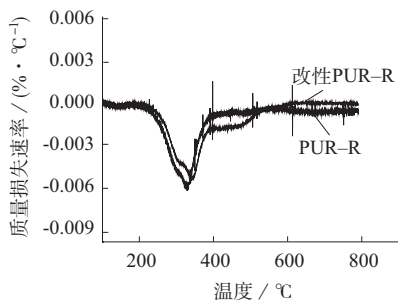


图 5 改性前、后 PUR-R 泡沫的 DTG 曲线

由图 4 可以看出, PUR-R 样品有四段明显的不同速率的质量损失, 纯 PUR-R 的第一段失重百分比为 7.3%, 改性 PUR-R 的失重百分比为 6.3%, 说明纳米 SiO₂ 和竹纤维双重改性后的 PUR-R 泡沫减少了对水的吸附作用。PUR-R 的第二段失重百分比为 47.75%, 改性 PUR-R 的失重百分比为 35.86%,

该段主要是由于异氰酸酯开始热解, 可发现通过纳米 SiO₂ 和竹纤维双重改性使得 PUR-R 泡沫热性能增强。PUR-R 的第三段失重百分比为 19.1%, 改性 PUR-R 的失重百分比为 36.45%, 该段主要是由大量的多元醇开始分解并生成水蒸气、CO、CO₂ 等气态物质, 其次是由于改性 PUR-R 泡沫表面纳米 SiO₂ 颗粒有机分子链和竹纤维被高温分解引起的质量损失。PUR-R 的第四段失重百分比为 13.48%, 改性 PUR-R 的失重百分比为 3.39%, 这是由于之前剩余的残渣中的炭化物少量氧化所导致。由图 5 可以看出, 改性 PUR-R 与未改性 PUR-R 的最大失重速率时的温度不同。

表 3 是 PUR-R 和改性 PUR-R 泡沫的热解温度参数。由表 3 可知, PUR-R 初始分解温度 241 ℃ 时, 剩余质量百分比为 12.37%, 改性 PUR-R 初始分解温度为 255 ℃ 时, 剩余质量百分比为 18%。初始分解温度由 241 ℃ 提升到 255 ℃, 提高了 14 ℃, 说明改性后的 PUR-R 泡沫热稳定性提高。

表 3 PUR-R 和改性 PUR-R 泡沫的热解温度参数

材料	失重温度范围 / ℃	失重百分比 / %	剩余质量百分比 / %	初始分解温度 / ℃	终止分解温度 / ℃
PUR-R	28 ~ 241	7.3	12.37	241	601
	241 ~ 365	47.75			
	365 ~ 601	19.1			
	601 ~ 790	13.48			
改性 PUR-R	31 ~ 255	6.3	18.0	255	588
	255 ~ 351	35.86			
	351 ~ 588	36.45			
	588 ~ 790	3.39			

2.3 红外分析

图 6 是 KH-550 改性 SiO₂ 前、后的红外光谱图。

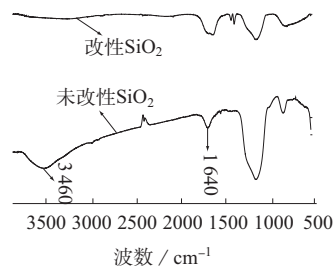


图 6 KH-550 改性 SiO₂ 前、后的红外光谱图

由图 6 可看出, 改性后的纳米 SiO₂ 与改性前纳米 SiO₂ 曲线相比, 3460 cm⁻¹ 处的 —OH 伸缩振动吸收峰变小, 说明纳米 SiO₂ 表面游离的羟基减少, 这表明有部分 —OH 已经与 KH-550 反应而覆盖; 1640 cm⁻¹ 处是氨基甲酸酯的吸收峰。测试所用的样品, 经过洗涤、干燥处理, 且测试前还在小型烘干

箱再干燥过一次,排除了物理因素的影响,由两个红外光谱图可见,纳米 SiO₂ 表面改性成功,可见通过 KH-550 改性,氨基成功接枝到了纳米 SiO₂ 表面。

图 7 是纳米 SiO₂ 改性 PUR-R 前、后的红外光谱图。由图 7 可看出,3 390 cm⁻¹ 处为氨基的 N—H 伸缩振动吸收峰;1 600 cm⁻¹ 处对应氨基基团中 N—H 的弯曲振动吸收;1 410 cm⁻¹ 对应的是硬段上的 C—H 的摇摆作用;1 230 cm⁻¹ 处为 C—O—C 伸缩吸收峰。以上均说明实验中改性的纳米 SiO₂ 基团成功接枝在 PUR-R 上,有利于增强 PUR-R 的力学性能。

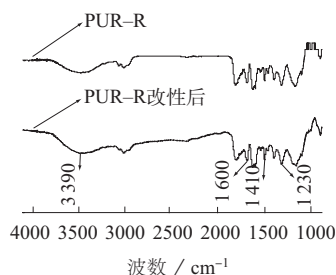


图 7 纳米 SiO₂ 改性 PUR-R 前、后的红外光谱图

3 结论

(1) 对压缩性能的测试结果进行分析可以看出,改性后的纳米 SiO₂ 可一定程度地增强 PUR-R 泡沫塑料。当改性纳米 SiO₂ 的添加量达到 3% 左右时, PUR-R 泡沫塑料的压缩强度显著提高。

(2) 竹纤维对提高 PUR-R 泡沫塑料压缩强度和韧性有一定影响,当其添加量达到 4% 左右时, PUR-R 泡沫的压缩性能显著增强。

(3) 热性能测试表明, PUR-R 泡沫经纳米 SiO₂ 和竹纤维双重改性后其热分解温度提高了 14℃。

(4) 综合数据发现,当黑白料配比为 1.4 : 1, 改性纳米 SiO₂ 和竹粉竹纤维的含量均为白料的 4% (均为 0.8 g) 时的改性效果最佳,泡沫的压缩强度提高了 30%。

参考文献

- [1] 矫立超,戎贤,孔祥飞,等. 聚氨酯泡沫在节能建筑中的应用[J]. 工程塑料应用,2019,47(3):140-143.
Jiao Lichao, Rong Xian, Kong Xiangfei et al. Application of polyurethane foam in energy-saving building[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):140-143.
- [2] 张毅. 浅析聚氨酯硬泡在外墙保温体系中的应用研究[J]. 当代化工研究,2019(6):120-121.
Zhang Yi. Brief analysis on the application of polyurethane hard foam in external wall thermal insulation system[J]. Modern Chemical Research, 2019(6):120-121.
- [3] 王鹏. 聚氨酯硬泡仪表台在新能源客车上的应用[J]. 汽车实用技术,2019(14):34-36.
Wang Peng. Application of polyurethane hard bubble dashboard on new energy passenger car[J]. Automobile Applied Technology, 2019(14):34-36.
- [4] 郭桂宏,丛林,杨帆,等. 聚氨酯材料在路面工程中的应用进展[J]. 公路交通科技,2020,37(6):1-10.
Guo Guihong, Cong Lin, Yang Fan, et al. Application progress of polyurethane material in pavement engineering[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(6):1-10.
- [5] 许昆鹏. 碳纤维/纳米黏土增强聚氨酯泡沫塑料的研究[J]. 中国胶粘剂,2017,26(9):38-41.
Xu Kunpeng. Study on carbon fiber/nanoclay reinforced polyurethane foam[J]. China Adhesives, 2017, 26(9):38-41.
- [6] 盖广清,王立艳,王大壮. 植物纤维增强硬泡聚氨酯性能的研究[J]. 新型建筑材料,2011,38(12):78-79.
Gai Guangqing, Wang Liyan, Wang Dazhuang. Research on properties of rigid polyurethane foams strengthen by plant fiber[J]. New Building Materials, 2011, 38(12):78-79.
- [7] 丁友江,朱征,安淑英,等. 聚氨酯泡沫/木质纤维复合材料的制备及其性能初探[J]. 建筑节能,2010(11):62-64.
Ding Youjiang, Zhu Zheng, An Shuying, et al. Preparation of polyurethane foam/wood fiber composite and its performance[J]. Building Energy Efficiency, 2010(11):62-64.
- [8] Yakushin V, Stirna U, Bel'kova L, et al. Properties of rigid polyurethane foams filled with milled carbon fibers[J]. Mechanics of Composite Materials, 2011, 46(6):679-688.
- [9] 张超群. 表面改性纳米粒子/聚氨酯复合材料制备及性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
Zhang Chaoqun. Study on preparation and properties of surface modified nanoparticles/polyurethane composites[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [10] 崔亚平,沙丽荣,陈文龙. 水玻璃改性聚氨酯的制备及性能研究[J]. 塑料科技,2021,49(5):12-15.
Cui Yaping, Sha Lirong, Chen Wenlong. Preparation and properties of sodium silicate modified polyurethane[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(5):12-15.
- [11] 王圣程,姜慧,张云峰,等. EG 改性聚氨酯硬泡的力学性能增强研究[J]. 聚氨酯工业,2020,35(5):12-14.
Wang Shengcheng, Jiang Hui, Zhang Yunfeng, et al. Study on mechanical properties enhancement of EG modified polyurethane rigid foam[J]. Polyurethane Industry, 2020, 35(5):12-14.
- [12] 杨春光,徐鹤,杜长明. 纳米 SiO₂ 对以 HFC-365 mfc 为发泡剂的硬质聚氨酯泡沫的性能影响研究[J]. 中国塑料,2014, 28(9):30-35.
Yang Chunguang, Xu He, Du Changming. Study on influence of

- thermoplastic composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(5):1 149–1 157.
- [9] Aghababaei T O, Van Hoa S, Shadmehri F, et al. Determination of convective heat transfer coefficient for automated fiber placement (AFP) for thermoplastic composites using hot gas torch[J]. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2020, 6(2):86–100.
- [10] 单毫, 陈宇, 李俊杰, 等. 红外加热缠绕成型工艺参数对 CF / PEEK 复合材料层间剪切性能的影响 [J]. *复合材料科学与工程*, 2020(1):39–46.
- Shan Hao, Chen Yu, Li Junjie, et al. Effect of infrared heating winding forming process parameters on interlaminar shear properties of CF / PEEK composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(1):39–46.
- [11] Khandan R, Noroozi S, Sewell P, et al. The development of laminated composite plate theories: a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(16):5 901–5 910.
- [12] Yassin K H M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018, 31(12):1 676–1 725.
- [13] 黄生江. 连续玻璃纤维增强聚丙烯的两步法拉挤成型工艺研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- Huang Shengjiang. Study continuous glass fiber reinforced polypropylene by two-step pultrusion[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [14] 陈同海, 贾明印, 杨彦峰, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料制备与熔融浸渍机理研究 [J]. *工程塑料应用*, 2013, 41(7):52–56.
- Chen Tonghai, Jia Mingyin, Yang Yanfeng, et al. Study on preparation of continuous fiber Reinforced thermoplastic composites and melt impregnation mechanism[J]. *Engineering Plastics Application*, 2013, 41(7):52–56.
- [15] 方立. 连续纤维增强热塑性复合材料制备及其性能的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- Fang li. Study on preparation and characters of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [16] Alsinani N, Ghaedsharaf M, Lebel L L. Effect of cooling temperature on deconsolidation and pulling forces in a thermoplastic pultrusion process[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108889.
-
- (上接第 59 页)
- nano-SiO₂ on properties of rigid polyurethane foam with blowing agent of HFC-365 mfs[J]. *China Plastics*, 2014, 28(9):30–35.
- [13] 夏敏, 李萍, 刘俊聪, 等. 纤维增强改性聚氨酯泡沫研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(6):137–139.
- Xia Min, Li Ping, Liu Juncong, et al. Research progress of fiber reinforced polyurethane foam[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(6):137–139.
- [14] 魏建国, 马端人, 柳佳, 等. 玻纤增强聚氨酯泡沫的研制 [J]. *聚氨酯工业*, 2020(1):33–35.
- Wei Jianguo, Ma Duanren, Liu Jia, et al. Development of glass fiber reinforced polyurethane foam[J]. *Polyurethane Industry*, 2020(1):33–35.
- [15] Jihwan Park, Insang Jung, Kibae Lee, et al. Case study in Korea of manufacturing SRF for polyurethanes recycling in e-wastes[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(4):1 950–1 960.
- [16] 梁术, 顾晓华, 张晓华, 等. 废旧聚氨酯的回收与高端发泡胶的研究 [J]. *齐齐哈尔大学学报: 自然科学版*, 2020, 36(1):75–77, 94.
- Liang Shu, Gu Xiaohua, Zhang Xiaohua, et al. Study on recovery of waste polyurethane and high-end foam[J]. *Journal of Qiqihar University: Natural Science*, 2020, 36(1):75–77, 94.
- [17] Aleksandra Kemona, Malgorzata Piotrowska. Polyurethane recycling and disposal: methods and prospects[J]. *Polymers*, 2020. doi: 10.3390/polym12081752.
- [18] 佚名. 新的回收方法可使聚氨酯材料具有可持续性 [J]. *橡塑技术与装备*, 2021, 47(12):59–62.
- None. The new recycling method can make the polyurethane material sustainable[J]. *China Rubber / Plastics Technology and Equipment*, 2021, 47(12):59–62.
- [19] Aleksandra Kemona, Malgorzata Piotrowska. Polyurethane recycling and disposal: methods and prospects[J]. *Polymers*, 2020, 12(8):245–252.
- [20] 赵淑景, 顾晓华, 杜星, 等. 聚氨酯废旧材料的降解回收再利用的研究 [J]. *齐齐哈尔大学学报: 自然科学版*, 2017, 33(2):39–42.
- Zhao Lianjing, Gu Xiaohua, Du Xing, et al. Study on degradation and recycling of polyurethane waste material[J]. *Journal of Qiqihar University: Natural Science*, 2017, 33(2):39–42.
- [21] Diego Simón, Ana Maria Borreguero, Antonio Lucas. Novel polyol initiator from polyurethane recycling residue[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2014, 16(3):525–532.