

水对硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫泡孔结构与性能的影响

Effect of Water on Cellular Structure and Properties of Rigid Polyurethane-imide Foams

安 曼¹,陈兴刚^{1,2},侯桂香¹,桑晓明¹

(1 河北联合大学 材料科学与工程学院 河北省无机非金属材料重点实验室, 河北 唐山 063009;2 河北联合大学 轻工学院,河北 唐山 063000)

AN Man¹,CHEN Xing-gang^{1,2},HOU Gui-xiang¹,SANG Xiao-ming¹

(1 Hebei Province Key Laboratory of Inorganic Nonmetallic Materials,College of Materials Science and Engineering,Hebei United University,Tangshan 063009,Hebei,China;
2 Qinggong College,Hebei United University,Tangshan 063000,Hebei,China)

摘要: 采用PI预聚体法合成硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料,分析了发泡剂水对泡沫塑料密度、表面粉化程度以及力学性能的影响。运用幂次法则建立了力学性能与密度之间的关系,并利用体视显微镜和偏光显微镜对泡沫塑料的泡孔结构进行了研究。结果表明,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的密度、抗压强度与压缩模量、冲击强度以及泡孔棱厚随水用量的增加逐渐减小;孔径和表面粉化程度随水用量的增加而逐渐增大;密度与抗压强度、压缩模量、冲击强度之间的密度指数分别为1.78,1.55和0.72。

关键词: 聚氨酯-酰亚胺;水;幂次法则;泡孔结构;性能

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.04.008

中图分类号: TQ328.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)04-0039-06

Abstract: PI prepolymerization method was adopted to synthesize rigid polyurethane-imide foams. The effect of content of water on the density, surface chalking degree and mechanical properties was analyzed. The relationship between the mechanical property and density was established following the power law. In addition, the cellular structure was observed using stereomicroscope and polarizing microscope. The results showed that, with the increased content of water, the density, compressive strength, compressive modulus, impact strength and cell edge thickness of rigid polyurethane-imide foams decreased, and average cell diameter and surface chalking degree of foams increased. The density exponent value was calculated as 1.78, 1.55 and 0.72 for compressive strength, compressive modulus and impact strength, respectively, for polyurethane-imide foams.

Key words: polyurethane-imide; water; power law; cellular structure; property

泡沫塑料是以气体为填料的复合材料,具有质轻、隔热、隔音、热导率低、抗化学腐蚀、比强度高并能吸收冲击载荷等优点^[1,2]。随着航空航天和航海等特殊领域对泡沫塑料性能要求的不断提高,开发高性能泡沫塑料已成为该领域的研究方向和热点之一^[3-5]。聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料具有优异的耐高、低温性能和隔热保温吸声性能,同时又具有良好的承载性能,可作为泡沫夹层复合材料的芯材广泛应用于航空领域中^[6-8]。

硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料是最近几年新兴起来的一种高性能泡沫塑料,其分子链中既含有聚氨酯的软、硬段结构,又含有酰亚胺的氮杂环结构,兼具聚

氨酯泡沫塑料和聚酰亚胺泡沫塑料的优异性能^[9-12]。目前硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的制备主要是采用一步法^[13]和PI预聚法^[14,15]。一步法成型简单,但原料配比对泡孔结构大小影响很大,且很难控制发泡过程中大量热量的释放。PI预聚法在分子结构设计、泡孔结构控制方面比一步法制备聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料更易于实现,同时还可以减少副反应的发生,并有效缓解因酰亚胺杂环的引入而带来的黏度增加过快、过大的问题,从而提高硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的综合性能。

在泡沫塑料的制备中,发泡剂的种类和用量都对

获得理想泡沫起到非常关键的作用。詹茂盛等^[16]研究了水发泡对聚酰亚胺泡沫结构与性能的影响。W. Yamsaengsung 等^[17]和 N. N. Najib 等^[18]分析了发泡剂对橡胶泡沫泡孔形态和力学性能的影响。Zhu B. 等^[19]研究了超临界 CO₂ 作为发泡剂对 PS/层状硅酸盐纳米复合微孔泡沫材料泡孔大小及密度的影响。丁雪佳等^[20]分析了水对硬质聚氨酯泡沫塑料性能的影响。从上述研究可以看出,无论是对于橡胶泡沫体系还是塑料泡沫体系,了解发泡剂对其泡孔结构及性能的影响规律尤为重要。硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料作为一种新兴的高性能泡沫塑料,目前仍缺乏对它的系统研究。水作为一种既环保又经济实用的发泡剂应用在硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料中,不仅决定了 CO₂ 气体产生量的多少,同时也影响到泡沫化学结构中脲键基团的数目。因此,本工作采用 PI 预聚法以水为发泡剂制备了硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料,并研究了水对其泡孔结构和性能的影响规律。

1 实验

1.1 主要原料

多亚甲基多苯基异氰酸酯(Polyaryl Polymethylene Isocyanate, PAPI), PM-200, 山东烟台万华聚氨酯股份有限公司;聚醚 4110, 羟值(430±30), 南京拓瀚商贸实业有限公司;3,3',4,4'-二苯酮四酸二酐,纯度>99.5%, 北京马尔蒂科技有限公司;三乙醇胺,分析纯,天津市北方天医化学试剂厂;N,N-二甲基甲酰胺,分析纯,天津市福晨化学试剂厂;丙三醇,分析纯,天津市天力化学试剂有限公司;二甲基硅油,分析纯,天津市大茂化学试剂厂;辛酸亚锡,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;蒸馏水。

1.2 试样制备

硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的制备:首先将 3,3',4,4'-二苯酮四酸二酐溶解到 N,N-二甲基甲酰胺中,然后与 PAPI 反应形成 PI 预聚体。将水、辛酸亚锡、三乙醇胺、二甲基硅油和丙三醇加入到聚醚多元醇中搅拌均匀,然后与 PI 预聚体混合,经快速搅拌倒入模具之中,80℃下熟化 24h,开模取出泡体制得硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料。

1.3 实验仪器与性能测试

泡孔结构采用 Axioskop 40A Pol 型偏/反两用研究型偏光显微镜和 M125 型体视显微镜进行观察并拍照;密度(表观芯密度)的测定参照 GB/T 6343—2009 标准进行测定;压缩性能在 AGS-X 型电子万能拉伸试验机上进行测定,压缩试样尺寸为 50mm×50mm×

50mm,压缩速率为 5mm/min,测试标准为 GB/T 8813—2008;冲击性能采用简支梁组合冲击试验机,按 GJB 1585A—2004 标准进行测试,实验跨度为 62mm,样品尺寸为 80mm×15mm×10mm,摆锤速率为 2.9m/s;表面粉化程度测定参考相关文献中的测试方法^[21],样品尺寸为 30mm×30mm×30mm。

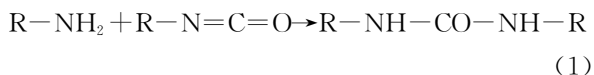
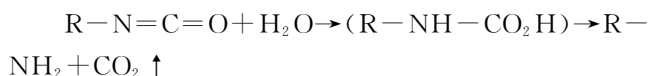
2 结果与讨论

2.1 水对泡孔结构的影响

2.1.1 水对孔径的影响

不同水用量对硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料泡孔结构影响的体视显微镜照片如图 1 所示,进一步采用 Image-Pro Plus 图像分析软件对其孔径大小及分布进行了统计,结果如表 1 所示。由图 1 和表 1 可知,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的泡孔结构均匀,泡孔直径随水用量的增加而逐渐增大。以 100 份多元醇为基准(下同),当水用量为 1.5 份时,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的平均泡孔直径为 357.44μm;当水用量为 3.0 份时,其平均泡孔直径为 430.85μm,增幅为 20.54%。

在硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的发泡反应中,异氰酸酯与水先形成不稳定的氨基甲酸,然后分解成胺和二氧化碳,氨基进一步和异氰酸酯基团反应生成脲。反应方程式如下:



(1)

水的用量从根本上决定了反应过程中气体产生量的多少。随着水用量的增加,产生的 CO₂ 量随之增多,根据泡沫塑料的成核机理,气泡在形成的过程中彼此之间的碰撞、合并的概率也会相应增大,容易并泡而形成大孔,使泡沫孔径尺寸增大^[22]。

2.1.2 水对泡孔棱厚的影响

图 2 为不同水用量下硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料泡孔结构的偏光显微镜照片。可知,随着水用量的增加,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的泡孔棱厚逐渐减小。进一步利用 MIAS-1 图像分析系统对其进行统计,结果如图 3 所示。当水用量为 1.5 份时,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的平均泡孔棱厚为 83.426μm;当水用量为 3.0 份时,其平均泡孔棱厚为 55.417μm。随着水用量的增加,基质消耗增多,水与异氰酸酯反应生成 CO₂ 气体的速率加快,气体量增多,泡孔变大,孔壁减薄趋势增大,泡孔棱厚随之减小。

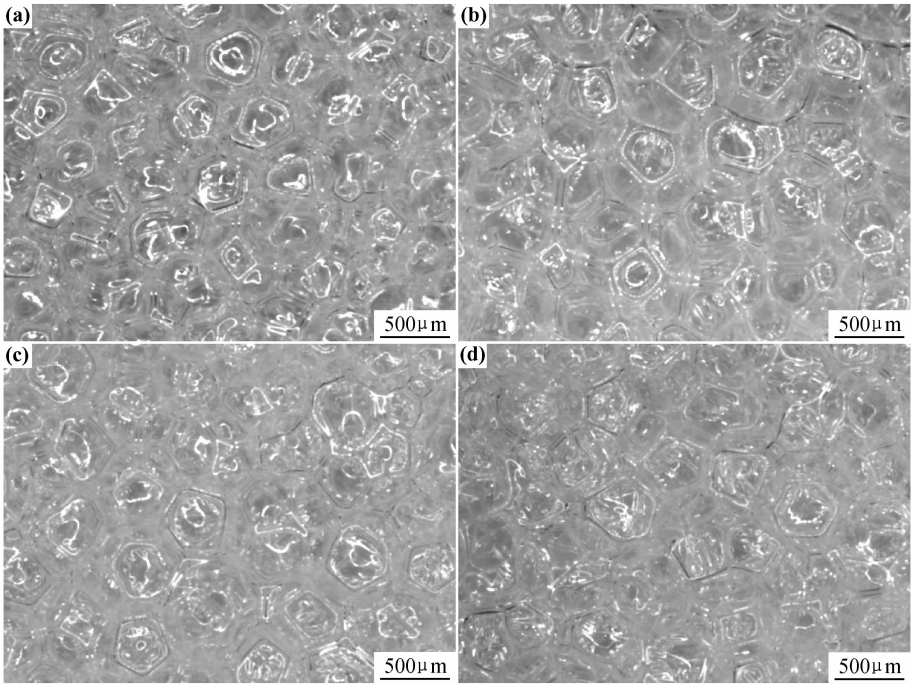


图 1 水用量对聚氨酯-酰亚胺泡沫孔结构影响的体视显微镜照片
(a)1.5 份;(b)2.0 份;(c)2.5 份;(d)3.0 份

Fig. 1 Stereological micrographs of the effect of water content on the cell structure of polyurethane-imide foams
(a)1.5share;(b)2.0share;(c)2.5share;(d)3.0share

表 1 聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的平均泡孔直径及其孔径分布
Table 1 Average cell diameter and diameter distribution
of polyurethane-imide foams

Water content/share	Average cell diameter/ μm	Cell diameter distribution/ μm
1.5	357.44	271.19-442.07
2.0	403.97	291.21-465.40
2.5	424.85	356.08-489.69
3.0	430.85	386.56-467.10

2.2 水对表面粉化程度的影响

图 4 为水用量对硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料表面粉化程度的影响。可以看出,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的表面粉化程度随着水的加入明显地增大,当水添加量为 1.5 份时,表面粉化程度为 2.90%;当水用量增加到 3.0 份时,表面粉化程度为 6.08%,增幅为 109.66%。

由于发泡反应中会放出大量的热,在高温下异氰酸酯基除了会与水反应生成 CO_2 气体和脲,还会与脲基和氨基甲酸酯基反应分别生成含有缩二脲和脲基甲酸酯链节的聚合物^[23]。随着水用量的增加,分子中的取代脲和缩二脲等亦随之增加,缩二脲化合物是一种刚性化合物,能使泡沫整体结构变脆,所以硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的表面粉化程度随水用量的增加

而逐渐增大。

2.3 水对密度的影响

图 5 为水对硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料密度的影响。可以看出,随着水用量的增加,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的密度急剧下降。当水用量为 1.5 份时,密度为 $47.73\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;当水用量达到 3.0 份时,密度下降到 $33.99\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,为水用量 1.5 份时的 71.21%。由此可知,水的用量对硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的密度有直接的影响。这是由于随水用量的增加,生成的 CO_2 气体含量增多,单位体积内聚合物基质的质量降低,导致密度也随之减小。在实际应用中可通过调节水用量来获取不同密度的泡沫。

2.4 水对力学性能的影响

水用量对硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料抗压强度、压缩模量和冲击强度的影响如表 2 所示。可以看出,随着水用量的增加,硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的抗压强度和冲击强度逐渐减小。当水用量为 1.5 份时,抗压强度和冲击强度分别为 0.325MPa 和 $0.19\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$;当水用量为 3.0 份时,抗压强度和冲击强度分别为 0.177MPa 和 $0.15\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$,降幅分别为 45.54% 和 21.05%。压缩模量随水用量的增加也呈下降趋势,当水用量由 1.5 份增加到 3.0 份时压缩模量下降了 41.06%。

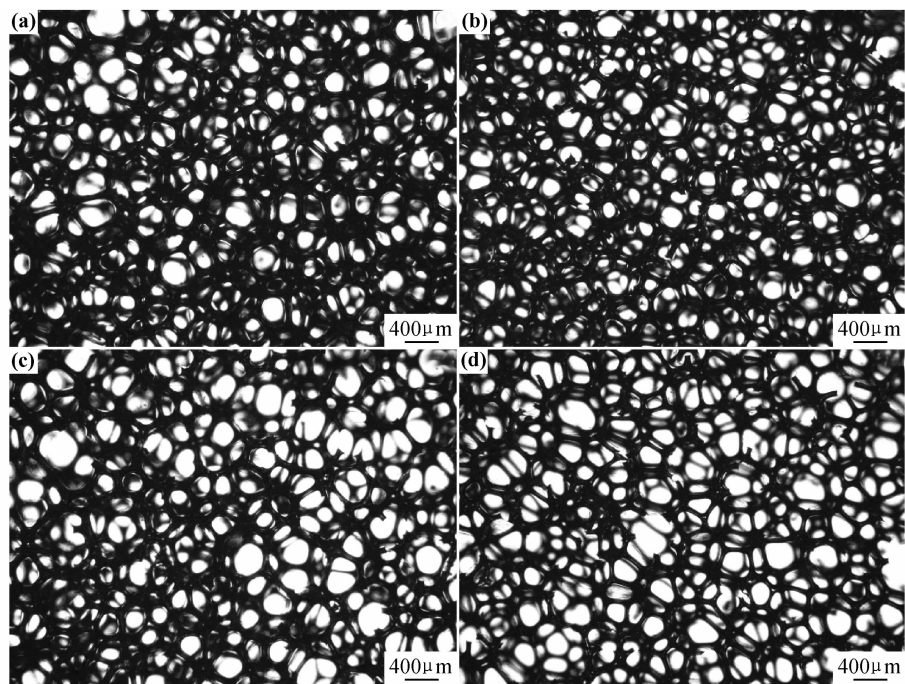


图 2 水用量对聚氨酯-酰亚胺泡沫孔结构影响的偏光显微镜照片
(a)1.5 份;(b)2.0 份;(c)2.5 份;(d)3.0 份

Fig. 2 Polarizing micrographs of the effect of water content on the cell structure of polyurethane-imide foams
(a)1.5share;(b)2.0share;(c)2.5share;(d)3.0share

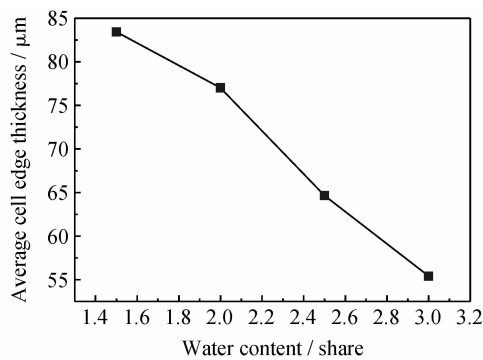


图 3 水对聚氨酯-酰亚胺泡沫棱厚的影响

Fig. 3 Effect of water on the cell edge thickness of polyurethane-imide foams

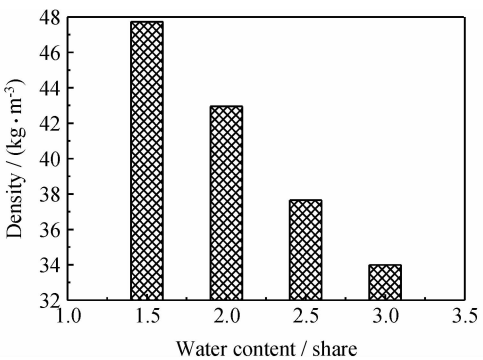


图 5 水对聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料密度的影响

Fig. 5 Effect of water on the density of polyurethane-imide foams

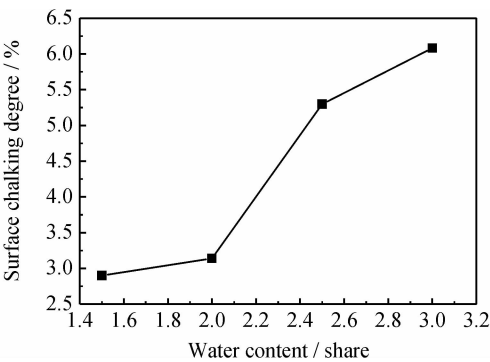


图 4 水对聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料表面粉化程度的影响

Fig. 4 Effect of water on the surface chalking degree of polyurethane-imide foams

表 2 水对聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料力学性能的影响				
Table 2 Effect of water on the mechanical properties of polyurethane-imide foams				
Water content/ share	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Compressive strength/ MPa	Compressive modulus/ MPa	Impact strength/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
1.5	47.728	0.325	5.241	0.19
2.0	42.956	0.276	4.185	0.18
2.5	37.653	0.220	3.432	0.16
3.0	33.985	0.177	3.089	0.15

泡沫材料的性能主要取决于泡沫密度,其权重超出其他所有因素的影响,密度的下降对力学性能的降

低起了决定性的作用^[24-26]。力学性能(抗压强度、压缩模量、冲击强度等)与密度之间的关系可以用幂次法则(power law)来进行描述^[27,28]：

$$\lg(\sigma_m, E, a_n) = \lg A + B \lg \rho \quad (1)$$

式中： σ_m 为抗压强度，MPa； E 为压缩模量，MPa； a_n 为冲击强度， $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ； ρ 为密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； A 是与温度和树脂物理性能相关的常数； B 与泡沫材料的力学形变相关，称为密度指数。密度指数所对应的数值为所

拟合出直线的斜率。将表 2 中的数据带入公式(1)可得出聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料密度与抗压强度、压缩模量和冲击强度之间的拟合直线，如图 6 所示。可知，泡沫塑料密度与抗压强度、压缩模量和冲击强度之间的密度指数分别为 1.78, 1.55 和 0.72。密度指数越大，则力学性能受密度的影响越大，从而依赖性越强。从幂次法则的计算结果可知压缩性能对于密度的依赖性要大于冲击性能对于密度的依赖性。

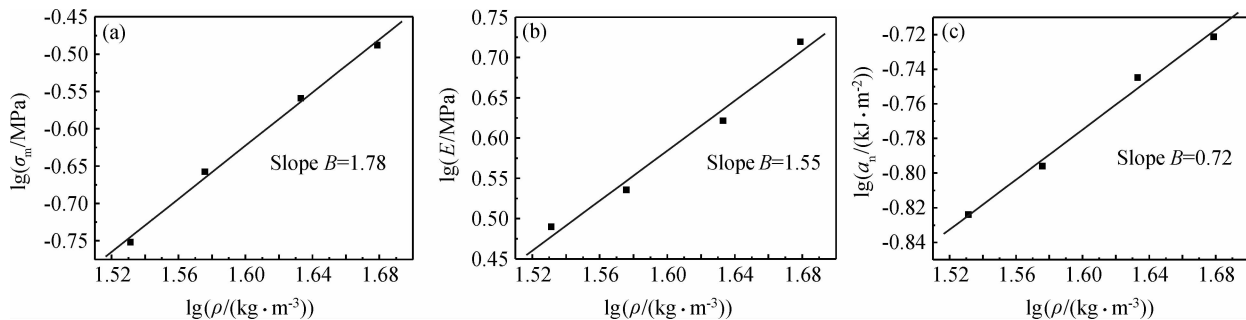


图 6 聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料密度与力学性能的关系

(a)抗压强度；(b)压缩模量；(c)冲击强度

Fig. 6 Density dependence on the mechanical properties of polyurethane-imide foams

(a)compressive strength; (b)compressive modulus; (c)impact strength

力学性能除了受密度的影响，聚合物本身的化学结构对其影响也很大。随着水用量的增加，胺基化合物产率增大，使生成脲基的反应更易进行，刚性基团的生成导致硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料整体结构变脆。密度降低和表面粉化程度增大的共同作用使硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的抗压强度、压缩模量及冲击强度逐渐降低。

3 结论

(1)随水用量的增加，水与多异氰酸酯反应产生的 CO_2 气体含量增多，发泡速率加快，硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的泡孔直径逐渐增大，泡孔壁厚逐渐减小，密度也逐渐降低。

(2)水用量的增加会生成更多的脲键，从而导致硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料变脆，随水用量从 1.5 份增加到 3.0 份，表面粉化程度从 2.90% 增加到 6.08%。

(3)硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的压缩性能和冲击性能随水用量的增加而逐渐变差。幂次法则表明压缩性能对于密度的依赖性要大于冲击性能对于密度的依赖性。力学性能的下降是密度降低和表面粉化程度增大共同作用导致的结果。

参考文献

- [1] LEE S T, PARK C B, RAMESH N S. Polymeric Foams: Science and Technology[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2007. 8.
- [2] LEE L J, ZENG C, CAO X, et al. Polymer nanocomposite foams [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(15-16): 2344-2363.
- [3] 齐锴亮, 张广成, 礼嵩明, 等. 聚酰亚胺泡沫塑料的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2011, 25(4): 67-70.
QI K L, ZHANG G C, LI S M, et al. Research progress of the polyimide foam[J]. Materials Review A: Review Article, 2011, 25(4): 67-70.
- [4] 李光珠, 沈燕侠, 詹茂盛. 芳香族聚酰亚胺泡沫的隔热性能研究[J]. 材料工程, 2009, (7): 43-46.
LI G Z, SHEN Y X, ZHAN M S. Study on performance of thermal insulation of aromatic polyimide foams[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (7): 43-46.
- [5] 乌云其其格, 张连鸿, 廖子龙. 硬质泡沫塑料在航空结构中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2009, 34(3): 41-44, 56.
WUYUNQIQIGE, ZHANG L H, LIAO Z L. The application of rigid foam in aviation construction[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2009, 34(3): 41-44, 56.
- [6] 周成飞, 郭建梅, 翟彤. 聚(氨酯-酰亚胺)泡沫材料的研究[J]. 化工新型材料, 2005, 33(11): 24-25.
ZHOU C F, GUO J M, ZHAI T. Preparation and properties of poly(urethane-imide) foam[J]. New Chemical Materials, 2005, 33(11): 24-25.

- [7] SANG X M, CHEN X G, YU S W, et al. Preparation and properties of rigid polyurethane-imide foams[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 150—151: 1119—1122.
- [8] SANG X M, WANG R Z, CHEN X G, et al. Structure and compression properties of polyurethane-imide foams[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 117—119: 1117—1120.
- [9] YEGANEH H, MEHDIPOUR-ATAEI S, GHAFARI M. Preparation and properties of novel poly (urethane-imide)s via blending of reactive polyimide and epoxy-terminated urethane prepolymers[J]. *High Performance Polymers*, 2008, 20 (2): 126—145.
- [10] LIU D, ZENG S, HU Q, et al. Synthesis and properties of highly branched poly(urethane-imide) via $A_2 + B_3$ approach[J]. *Polymer Bulletin*, 2010, 64(9): 877—890.
- [11] QIN X M, YANG X, WANG X, et al. Synthesis and characterization of poly(imide-urethane) based on novel chain-extender containing both imide and sulphone functions[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2005, 43(19): 4469—4477.
- [12] 秦秀敏, 杨晓慧, 王新灵, 等. 酰亚胺改性聚氨酯的合成和表征[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(7): 1253—1256.
QIN X M, YANG X H, WANG X L, et al. The preparation and characterization of imide-modified polyurethane[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(7): 1253—1256.
- [13] 周成飞, 翟彤, 曹巍, 等. SiO_2 气凝胶/PUI 复合硬泡的制备及其特性研究[J]. *橡塑技术与装备*, 2010, 36(7): 24—26.
ZHOU C F, ZHAI T, CAO W, et al. Study on preparation and properties of SiO_2 aerogel/PUI composite rigid foam[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2010, 36(7): 24—26.
- [14] SANG X M, CHEN X G, HOU G X, et al. Preparation of rigid polyurethane-imide foams[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 150—151: 1123—1126.
- [15] JIANG B B, HAO J J, WANG W Y, et al. Synthesis and thermal properties of poly(urethane-imide)[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 81(3): 773—781.
- [16] 詹茂盛, 许小强, 潘玲英. 水发泡剂对聚酰亚胺泡沫结构与性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(3): 55—60.
ZHAN M S, XU X Q, PAN L Y. Effect of water blowing agent on structures and properties of polyimide foams[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(3): 55—60.
- [17] YAMSAENG SUNG W, SOMBATSOMPOP N. Effect of chemical blowing agent on cell structure and mechanical properties of EPDM foam, and peel strength and thermal conductivity of wood/NR composite-EPDM foam laminates[J]. *Composites; Part B*, 2009, 40(7): 594—600.
- [18] NAJIB N N, ARIFF Z M, MANAN N A, et al. Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam[J]. *Journal of Physical Science*, 2009, 20(1): 13—25.
- [19] ZHU B, ZHA W, YANG J, et al. Layered-silicate based polystyrene nanocomposite microcellular foam using supercritical carbon dioxide as blowing agent[J]. *Polymer*, 2010, 51(10): 2177—2184.
- [20] 韩海军, 丁雪佳, 张丽娟, 等. 水对硬质聚氨酯泡沫塑料性能的影响研究[J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(1): 18—20.
HAN H J, DING X J, ZHANG L J, et al. Research on the effect of H_2O on the properties of the rigid polyurethane foam[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(1): 18—20.
- [21] 闾宏志, 姜志国, 王海侨, 等. 戊二醛改性酚醛树脂及对泡沫塑料性能的研究[J]. *化工新型材料*, 2009, 37(3): 100—102.
DUN H Z, JIANG Z G, WANG H Q, et al. Study on glutaraldehyde modified phenolic resin and phenolic foam properties[J]. *New Chemical Materials*, 2009, 37(3): 100—102.
- [22] 赵勤. 聚氨酯泡沫塑料/纳米 SiO_2 复合材料的制备与研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007.
ZHAO M. Preparation and investigation of polyurethane foam/nano SiO_2 complex material[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2007.
- [23] YIN B, LI Z M, QUAN H, et al. Morphology and mechanical properties of nylon-1010-filled rigid polyurethane foams[J]. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2004, 36(4): 333—349.
- [24] 李小斌, 曹宏斌, 张懿. 全水发泡硬质聚氨酯泡沫塑料技术研究进展[J]. *中国塑料*, 2004, 18(7): 1—4.
LI X B, CAO H B, ZHANG Y. Progress of research on rigid polyurethane foams with water as the sole foaming agent[J]. *China Plastics*, 2004, 18(7): 1—4.
- [25] 马忠雷, 张广成. 泡沫塑料的微观结构与性能[J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(11): 96—100.
MA Z L, ZHANG G C. Microstructure and properties of foam plastics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(11): 96—100.
- [26] GIBSON L J, ASHBY M F. *Cellular Solids: Structure and Properties* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [27] THIRUMAL M, KHASTGIR D, SINGHA N K, et al. Effect of foam density on the properties of water blown rigid polyurethane foam[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 108(3): 1810—1817.
- [28] YUAN J, SHI S Q. Effect of the addition of wood flours on the properties of rigid polyurethane foam[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 113(5): 2902—2909.

基金项目: 河北省科技支撑计划项目资助(11215121D); 河北省高等学校科学技术研究重点项目资助(ZH2012014)

收稿日期: 2012-05-06; 修订日期: 2012-12-10

作者简介: 安曼(1988—), 女, 硕士研究生, 从事复合材料和新型泡沫塑料研究, E-mail: amman0001@126.com

通讯作者: 桑晓明(1969—), 男, 教授, 从事复合材料和新型泡沫塑料研究, 联系地址: 河北省唐山市新华西道 46 号河北联合大学材料科学与工程学院(063009), E-mail: xmsang@heuu.edu.cn