

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.02.030

聚乙烯醇发泡材料研究进展

李鹏珍,李凤红,师岩,笄伟,王哲,姜天赐,陈立鑫

(沈阳工业大学石油化工学院,辽宁辽阳 111003)

摘要:从化学发泡剂和物理发泡剂两个方面综述了聚乙烯醇(PVAL)发泡材料的发泡工艺,着重介绍了无机发泡剂和有机发泡剂两种化学发泡剂以及超临界CO₂物理发泡剂对PVAL发泡材料泡孔尺寸、孔径、力学性能等的影响,不同发泡剂具有不同的特点,绿色环保的超临界CO₂发泡剂将是今后研究的重点。此外,对PVAL发泡材料在生物医学领域、污水处理及包装领域的应用现状进行了介绍。

关键词:聚乙烯醇;化学发泡剂;物理发泡剂;超临界CO₂;发泡材料

中图分类号: TQ325.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)02-0172-05

Research Progress of Polyvinyl Alcohol Foaming Materials

Li Pengzhen, Li Fenghong, Shi Yan, Da Wei, Wang Zhe, Jiang Tianci, Chen Lixin

(School of Petrochemical Engineering, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111003, China)

Abstracts : The foaming process of polyvinyl alcohol (PVAL) foaming materials were reviewed from two aspects of chemical foaming agent and physical foaming agent. The effects of inorganic foaming agent and organic foaming agent, as well as supercritical CO₂ physical foaming agent on the cell size, pore size and mechanical properties of PVAL foaming materials were emphatically introduced. The different foaming agents have different characteristics, the green and environmentally friendly supercritical CO₂ foaming agents will be the focus of future research. In addition, the application status of PVAL foaming materials in biomedical, sewage treatment and packaging fields were introduced.

Keywords : polyvinyl alcohol ; chemical foaming agent ; physical foaming agent ; supercritical CO₂ ; foaming material

聚合物发泡材料^[1-5]由于其具有质轻、耐冲击、隔热隔音效果好及耐腐蚀等优异特性,成为一种不可替代的结构功能材料,在包装、生物医药、农业、建筑、隔热材料等领域应用广泛,引起了工业界和学术界的广泛关注。

目前,常见的发泡材料^[6]有聚乙烯醇(PVAL)发泡材料、聚乙烯(PE)发泡材料、聚丙烯(PP)发泡材料、聚苯乙烯(PS)发泡材料、聚乳酸(PLA)发泡材料及淀粉基发泡材料等。但传统的PP, PE, PS发泡材料在自然界中难以生物降解,会对环境造成“白色污染”; PLA发泡材料^[7]成本高、脆性大等缺陷限制了其进一步发展;淀粉基发泡材料^[8]发泡技术不成熟,且耐水性和力学性能较差,限制了其应用。在绿色环保、经济可持续发展的大环境下,开发出一种成本低、绿色环保、多功能性的新型可降解发泡材料具有重要的现实意义。PVAL^[9-13]是新一代典型的多羟基环境友好型可生物降解材

料,其原料丰富、成本低,具有良好的生物相容性、气体阻隔性、力学性能、耐溶剂等综合性能,是制备可生物降解发泡材料的一种理想原料,在包装、生物医药、污水处理等领域具有突出优势。

笔者主要从两方面介绍PVAL发泡材料,一方面介绍了有机和无机两种化学发泡剂发泡法和超临界二氧化碳(scCO₂)作为物理发泡剂发泡法的研究进展;另一方面介绍了PVAL发泡材料在生物医学、污水处理及包装领域的应用进展。

1 发泡材料的发泡方法

PVAL发泡材料是以PVAL为主要原料,加入发泡剂、交联剂、催化剂或表面活性剂等物质,经交联发泡而成型的发泡材料。发泡可改善其某些性能且降低材料耗损^[14]。目前,PVAL发泡材料的发泡工艺方法有很多种,主要介绍化学发

基金项目: 辽宁省高等学校基本科研重点项目(LZGD2017040)

通信作者: 李凤红,博士,教授,硕士生导师,主要从事可降解功能材料的研究 E-mail: lfhy@aliyun.com

收稿日期: 2020-11-11

引用格式: 李鹏珍,李凤红,师岩,等. 聚乙烯醇发泡材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(2): 172-176.

Li Pengzhen, Li Fenghong, Shi Yan, et al. Research progress of polyvinyl alcohol foam materials[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2): 172-176.

泡剂发泡法及物理发泡剂发泡法两种方法。

1.1 化学发泡剂发泡法

化学发泡剂^[15-16]是指在发泡过程中,能够通过热分解或化学反应快速分解释放出类似 CO_2 、 N_2 、 NH_3 或 H_2O 等小分子气体的物质,气体在体系中形成细孔促进聚合物发泡。化学发泡剂又可分为有机发泡剂和无机发泡剂两种。

(1) 无机发泡剂。

无机发泡剂相对安全、分解效果好、扩散速度快,产生的气体为 CO_2 。常见的无机发泡剂主要是碳酸盐,如: NaHCO_3 、 CaCO_3 、 Na_2CO_3 等。

F. Kahvand等^[17]以 NaHCO_3 为发泡剂,甘油和水为增塑剂,采用熔融挤出法将PVAL和热塑性淀粉(TPS)共混制备了PVAL/TPS发泡材料。实验结果表明,PVAL/TPS发泡材料具有均匀的泡孔形态、低泡孔尺寸及高泡孔密度。与纯TPS发泡材料相比,泡孔密度提高了约60倍,最高泡孔密度可达到 830×10^4 个/ cm^3 ,泡孔尺寸降低了277 μm ,膨胀率提高了约256%。

Zeng Guangsheng等^[18]以 NaHCO_3 为发泡剂,淀粉和PVAL为原料,采用熔融挤出发泡法制备了性能良好的PVAL/淀粉复合发泡材料。结果表明,复合发泡材料具有良好的熔体黏弹性,从而可产生更好的气泡。复合发泡材料的拉伸强度先减小后增大,当发泡剂含量为1份时,拉伸强度达到5.5 MPa左右。

曾广胜等^[19]、张礼等^[20]以 NaHCO_3 为发泡剂,甘油和NaOH为复合增塑剂,制备了PVAL/淀粉复合发泡材料。研究表明,随着 NaHCO_3 含量的增加,发泡材料的泡孔数量呈现先增加后减少的趋势,孔径增大。当 NaHCO_3 含量为3%时,发泡材料的泡孔分散均匀,泡孔孔径在700 μm 左右,具有良好的缓冲性能。

赵博文等^[21]以 NaHCO_3 和柠檬酸为复合发泡剂,以甘油、二乙醇胺和山梨醇为复合增塑剂,利用模压成型发泡制备PVAL/改性淀粉复合发泡材料。实验结果表明,复合发泡剂质量分数为4.0%时,PVAL/改性淀粉发泡材料泡孔分布均匀,泡孔结构良好,发泡倍率为10.12倍,拉伸强度为2.134 MPa,断裂伸长率为79.1%。

无机化学发泡剂在聚合物体系中难以分散均匀,难以控制分解释放出的 CO_2 气体所需要的温度,并且 CO_2 容易从聚合物基体中逃逸出去,有待进一步改善。

(2) 有机发泡剂。

有机发泡剂主要是通过加热过程中产生的 N_2 及 NH_3 进行发泡。有机发泡剂产生的气泡在聚合物体系中分散均匀,分解温度易控制。有机发泡剂主要是结构上具有偶氮基、肼基等官能团的化合物,如:偶氮二甲酰胺(AC)、苯磺酰肼

(BSH)等。

柳月等^[22]以AC和 NaHCO_3 为发泡剂,制备了三维蜂窝状结构的PVAL/玉米淀粉复合发泡材料。实验结果表明,AC和 NaHCO_3 发泡剂的质量分数分别为1.5%、1.4%时,制得的复合发泡材料的泡孔分布均匀,吸水率和密度都达到最佳状态,吸水倍率为3.84倍,密度为0.3307 g/cm^3 。与 NaHCO_3 为发泡剂的发泡材料相比,使用AC发泡剂时制备的发泡材料密度、吸水率分别降低了0.0571 g/cm^3 、0.14倍。此外,复合发泡材料具有良好的相容性和可生物降解性能,在土埋60~75 d时,其失重率可达到39%左右。

陈禾木等^[23]以BSH为发泡剂,甲醛为交联剂,制备了高性能的PVAL/碱木质素发泡材料(PLFM)。实验结果表明,相对于PVAL用量,当BSH用量为0.5%、甲醛用量为0.8 mL/g时,PLFM发泡材料整体发泡效果较好,泡孔分散均匀,孔隙结构均一、规则,拉伸强度达到最大,为28.94 MPa,吸水倍率最低,为2.455倍。

李祥刚等^[24]以AC为发泡剂,甘油作为增塑剂,采用间歇式挤出发泡工艺制备PVAL/淀粉复合发泡材料。研究表明,随着发泡剂含量的增加,PVAL/淀粉复合发泡材料的泡孔孔径从50 μm 增加到200 μm ,发泡倍率从190%增加到290%左右,吸水率稳定在20%左右。当添加PVAL的质量分数为30%、发泡剂的质量分数为1%时,复合发泡材料的综合性能最佳。

化学发泡剂发泡工艺简便、耗时短,但是发泡的温度、时间等条件难以控制,进而导致制得的发泡材料在外观和性能上均不是很理想^[25]。

1.2 物理发泡剂发泡法

物理发泡剂自身因受外界环境影响,发生物理形态变化,气体在蒸发过程中被聚合物体系包裹,在聚合物发泡制备过程中产生气泡,内部形成细微的气孔从而使聚合物自发膨胀发泡,可被用来制备综合性能优良的发泡材料。目前,物理发泡剂主要为低沸点的可溶性液体、易升华的固体发泡剂等。常见的有^[26]:烷烃类和氟碳类化合物(如氢氟碳类、氯氟碳类)等。烷烃类发泡剂易燃、有毒且对设备的要求高;氯氟碳类化合物破坏臭氧层,使用受到限制。因此,需寻求一种环境友好型的物理发泡剂。

scCO_2 ^[27-30]是目前使用最为普遍的绿色环保型发泡剂,价格低廉、储量丰富,具有气体的扩散性和液体的溶解能力等优良性能,在制备微孔聚合物发泡材料中崭露头角,被认为是具有应用潜力的物理发泡剂之一。

Liu Pengju等^[31]以 scCO_2 为物理发泡剂,采用超临界流体发泡技术制备了一种新型细孔结构的PVAL/氧化石墨烯(GO)纳米复合发泡材料。研究表明,PVAL/GO纳

米复合发泡材料的泡孔尺寸较小、泡孔密度较大且泡孔分布均匀。相比于纯 PVAL 发泡材料, PVAL/GO 复合发泡材料的泡孔密度增加了 8.6×10^7 个/cm³, 当 GO 质量分数为 0.5% 时, 平均泡孔尺寸下降了 19.3 μm, 且泡孔密度达到最大值, 为 3.4×10^8 个/cm³, 压缩强度和拉伸强度分别达到 256 kPa 和 113 MPa, 在结构部件方面应用潜力巨大。

Sun Jiacheng 等^[32]以 scCO₂ 为物理发泡剂, PVAL 和 SiO₂ 为发泡基体, 制备了具有可控孔结构的微孔 PVAL/SiO₂ 纳米复合发泡材料。结果表明, 较纯 PVAL 发泡材料, 制得的 PVAL/SiO₂ 纳米复合发泡材料的泡孔均匀, 泡孔尺寸较小, 约为 15 μm, 泡孔密度较大, 为 3.3×10^8 个/cm³。当 SiO₂ 质量分数为 0.5% 时, 复合发泡材料的拉伸强度为 20 MPa, 增加了 150%, 气泡性能和气泡坍塌现象得到改善。

Yin Duoyuan 等^[33]以 scCO₂ 为物理发泡剂, 乙二醇为增塑剂, 采用超临界流体技术制备了环境友好型 PVAL 发泡材料。结果表明, 当增塑剂含量为 30% 时, PVAL 发泡材料泡孔分散均匀, 泡孔尺寸最大, 为 12.75 μm, 泡孔密度为 1.51×10^9 个/cm³, PVAL 发泡材料的发泡效果明显改善。

2 发泡材料应用

2.1 在污水处理领域的应用

PVAL 发泡材料由于其超高的比表面积而具有更高的吸附容量, 在去除废水中的重金属离子、离子染料、化学需氧量(COD)、氨氮量等方面, 具有广阔的应用前景。

(1) 去除阴离子和阳离子染料

Gao Xiangqian 等^[34]采用冷冻干燥的方法将一维多孔氮化硼生物纳米纤维(BNNFs)与 PVAL 混合, 制备了一种新型多孔蜂窝空间网络结构的 PVAL/BNNFs 复合发泡材料。结果表明, PVAL/BNNFs 复合发泡材料具有优异的柔韧性和疏水性, 可用于油水分离。当 BNNFs 质量分数为 60% 时, PVAL/BNNFs 复合发泡材料对 CO₂ 的吸附能力达到 0.77 mmol/g, 吸附能力大约是纯 PVAL 发泡材料的 5 倍, 对阳离子、阴离子染料的吸附容量分别可达到 11.7 mg/g 和 5.4 mg/g。

贾玉春^[35]以 PVAL 和甲醛为原料, 制备了多孔聚乙烯醇缩甲醛(PVFM)发泡材料。实验结果表明, PVFM 发泡材料可吸附亚甲蓝和碱性品红两种阳离子染料, 吸附率分别达到 93% 和 97%, 对阳离子染料具有很好的吸附性能, 可以应用于污水处理领域。

(2) 去除废水中的重金属离子

Pu Lian 等^[36]以水为增塑剂和物理发泡剂, 通过热塑性发泡技术制备了 PVAL/贝壳粉(SP)新型多孔复合发泡材料。结果表明, 由于 SP 在 PVAL 基体中能够较好地分散以及 PVAL 发泡材料的高亲水性, 随着 SP 含量的增加, 复合发

泡材料对 Pb²⁺ 的吸附量增大, 可达到 31.1 mg/g, 该复合发泡材料可作为重金属离子废水处理的候选材料。

谢页平等^[37]以水为增塑剂及物理发泡剂、硼酸为交联剂, 制备了 PVAL/SP 复合发泡材料, 研究了其对重金属离子的吸附性能。研究结果发现, 当 SP 含量为 10%, 交联剂含量为 0.5% 时, 复合发泡材料泡孔结构最优, 对 Pb²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺ 等重金属离子的吸附率分别为 90%, 70%, 70%, 最佳吸附 pH 值分别为 3, 6.5 和 6。

Wang Xiao 等^[38]以戊二醛为交联剂, 制备了大孔壳聚糖(CS)/PVAL 发泡材料。测试结果表明, CS/PVAL 发泡材料为多孔结构, 不仅孔径大、泡孔分布均匀和孔隙率高, 而且具有良好的溶胀性能和吸附性, 可很好地吸附废水中的 Cu²⁺, 吸附量可达到 103.25 mg/g。

邓莉等^[39]以甲醛为交联剂, 将一定量的 CS 与 PVAL 共混, 制备了新型大孔 PVAL/CS 发泡材料。测试结果表明, PVFM/CS 为三维网状结构, 具有良好的亲水性和吸附性且可循环利用, 能够很好地吸附废水中 Cu²⁺, Pb²⁺ 等重金属离子, 最大吸附能力分别可达到 340.28 mg/g 和 96.57 mg/g, 可作为性能优异的理想吸附剂, 广泛应用于处理工业废水。

(3) 去除废水中的 COD、氨氮量

牛首飞^[40]以 PVAL 和淀粉为原料, CaCO₃ 为发泡剂, 甲醛为交联剂, 制得 PVAL/淀粉发泡材料。实验结果表明, 在最佳比例条件下, 制备的 PVAL/淀粉发泡材料泡孔分布均匀, 孔隙率为 77.5%、交联度为 90.2%, 可很好地去除废水中 COD 及氨氮量, 平均重铬酸盐需氧量(CODCr)去除率可达到 93.19%, 最高氨氮去除率达到 79.11%, 平均氨氮去除率达到 59.48%。

王妨茶^[41]以 PVAL 和粗纤维素(或纤维素)为原料, 甲醛为交联剂, 制备了 PVFM/粗纤维素(CC)和 PVFM/纤维素(C)两种复合发泡材料。实验结果表明, PVFM/CC 复合发泡材料的 COD、氨氮的平均去除率分别为 92.84%, 96.66%, PVFM/C 复合发泡材料的 COD、氨氮的平均去除率可达 93.26%, 96.77%, 两种复合发泡材料的出水 COD 均小于 50 mg/L, 出水氨氮均小于 5 mg/L, 两者的污水处理效果并无明显区别, 但 PVFM/CC 复合发泡材料制备过程较简单, 性能更为优良。

2.2 在生物医学领域的应用

PVAL 发泡材料为多羟基及多孔网络结构, 具有高疏水性、高透气性、优良力学性能等特性, 在组织模拟、人工软骨和混合支架^[42-43]、伤口治疗、抗菌止血等生物医学领域具有广阔的应用前景。

(1) 用作支架

A. A. Ashraf 等^[44]以 PVAL 作为基质, 羟基磷灰石(HA)

作为辅助试剂,制备了交联 PVAL/HA 复合发泡材料。研究表明,交联 PVAL/HA 复合发泡材料孔隙率高达 71%,吸水量从自身质量的 5.9 倍增加到 9.1 倍,致密化应力为 4.38 MPa,可作为三维支架。

(2) 抗菌止血。

He Miaomiao 等^[45]制备了一种含抗菌药物硬脂基三甲基氯化铵(STAC)与亚甲蓝(MC)的智能多层 PVAL 发泡材料。结果发现,负载 STAC 的 PVAL 发泡材料可吸收高达自身质量 7 倍的液体,对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的抑菌率高达 99.99%,90.63%,在 650 nm 激光照射下,对大肠杆菌的抑菌率也可达到 99.99%,可作为网状伤口敷料,用于伤口处理和感染监测。

Zhao Yifan 等^[46]制备了一种新型 PVAL/CS 复合发泡材料。研究表明,在出血伤口中,PVAL/CS 发泡材料可迅速吸收血液,并在周围组织和血管上产生压力,减少凝血时间,防止引起继发性出血,可替代传统止血剂,广泛应用于入院前急救,提高伤员存活率。当 CS 与 PVAL 质量比为 3:7 时,发泡材料凝血时间最快,具有很好的抑菌止血作用。

Yang Qinghao 等^[47]以甲醛为交联剂、 Na_2CO_3 为发泡剂、 H_2SO_4 为酸催化剂、十二烷基硫酸钠(SLS)为表面活性剂,制备了 PVFM 发泡材料。结果表明,加入适量的交联剂、发泡剂、催化剂以及表面活性剂,PVFM 发泡材料在 15 s 内的吸水率可高达 900%,可广泛用于创面伤口敷料、止血等方面。

2.3 在包装领域的应用

PVAL 发泡材料具有优异的力学性能和气体阻隔性能,应用于包装领域是大势所趋。

翟伟坤等^[48]采用熔融挤出法制备了 PVAL 发泡材料。结果表明,PVAL 发泡材料的吸水率为 5.01 g/g,保水率为 95.52%。PVAL 发泡材料能防止细菌滋生,有效抑制鱼肉菌类繁殖、腐败变质和营养流失,从而维持了鱼肉的感官品质,可延长鱼肉货架期 2 d,对生鲜产品具有抑菌保鲜效果。

C. Adu 等^[49]以硼砂为交联剂,纤维素纳米纤维(CNF)为增强材料,制备了 PVAL 多孔发泡材料。结果显示,发泡材料具有蜂窝状多孔结构,泡孔分散均匀,泡孔密度为 0.03 g/m^3 ,孔隙率为 97.9%,孔径为 3.2 mm,在 10% 和 20% 应变下的平均压缩强度分别为 82 kPa 和 100 kPa,在发泡材料表面涂上一层疏水膜或喷雾可以缓解吸水效果,能够支撑超过自身质量 2000 倍的质量,可应用于一次性包装材料领域。

罗瑜莹^[50]以 AC 为发泡剂、滑石粉为成核剂、甘油为增塑剂,制备了 PVAL/多孔杨木纤维发泡材料。结果表明,该发泡材料的泡孔结构细密而均匀,当木纤维用量为 6.8%,发泡剂用量为 1.6%,PVAL 用量为 3.3% 时,复合发泡材料的

力学性能和缓冲性能达到最佳,缓冲系数大约为 6,最大应力约为 0.35 MPa,可作为多孔缓冲包装材料。

3 结语

通过加入发泡剂,显著改善了 PVAL 发泡材料的泡孔尺寸、孔径、力学性能等性能,极大地推动了 PVAL 发泡材料在生物医学、污水处理、包装等领域的实际应用。目前,化学发泡剂的发泡工艺操作较简便、耗时短,国内外主要以相对安全的碳酸盐类无机发泡剂为主,与无机发泡剂相比,有机发泡剂成本较高,不稳定,使用相对较少。近几年, scCO_2 作为绿色环保的物理发泡剂,在聚合物合成及发泡中已取得一些成果,但 scCO_2 的使用还处在探索阶段。使用无毒、成本低、环境友好的 scCO_2 是 PVAL 发泡材料发展的重要方向。随着研究的不断深入和应用领域的不断拓展,PVAL 发泡材料将具有广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 刘惠,等. 包装工程,2017,38(23):71-77.
Liu Hui, et al. Packaging Engineering, 2017, 38(23):71-77.
- [2] Jin Fanlong, et al. Polymers, 2019, 11(6):953-975.
- [3] Rezgar Hasanzadeh, et al. Journal of Thermal Science, 2020, 29(1-3):159-168.
- [4] Rezgar H, et al. Journal of Thermal Science, 2019, 28(4):745-754.
- [5] Guo Dan, et al. Journal of Cellular Plastics, 2015, 51(2):145-163.
- [6] 卢佳欣,等. 绿色包装,2017(3):41-47.
Lu Jiaxin, et al. Green Packaging, 2017(3):41-47.
- [7] 陈立鑫,等. 塑料,2020,49(5):92-95,101.
Chen Lixin, et al. Plastics, 2020, 49(5):92-95, 101.
- [8] 刘峰松. 聚乙烯醇对淀粉基发泡材料制备及性能的影响[D]. 广州:华南理工大学,2020.
Liu Fengsong. Effect of PVAL on processing and properties of starch-based foaming material[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2020.
- [9] Hou Qiupeng, et al. Cellulose, 2017, 24(11):4939-4948.
- [10] Aslam M, et al. Polymer Engineering & Science, 2018, 58(12):2119-2132.
- [11] Marin E. African Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2014, 8(24):674-684.
- [12] Lin Meichen, et al. Journal of Polymer Research, 2018, 25(4):101-109.
- [13] 翟伟坤,等. 包装工程,2019,40(7):96-102.
Zhai Weikun, et al. Packaging Engineering, 2019, 40(7):96-102.
- [14] Bao Jinbiao, et al. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 111:63-73.
- [15] 范兰兰,等. 化工管理,2019(16):62.
Fan Lanlan, et al. Chemical Enterprise Management, 2019(16):62.
- [16] 王冬梅,等. 深圳职业技术学院学报,2013,12(5):49-53.
Wang Dongmei, et al. Journal of Shenzhen Vocational and technical college, 2013, 12(5):49-53.

- [17] Kahvand F, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157:359–367.
- [18] Zeng Guangsheng, et al. Polymer Composites, 2019, 40(10): 3 923–3 928.
- [19] 曾广胜, 等. 塑料, 2016, 45(2):37–39, 43.
Zeng Guangsheng, et al. Plastics, 2016, 45(2):37–39, 43.
- [20] 张礼, 等. 包装学报, 2016, 8(1):25–29.
Zhang Li, et al. Packaging Journal, 2016, 8(1):25–29.
- [21] 赵博文, 等. 工程塑料应用, 2017, 45(10):103–107.
Zhao Bowen, et al. Engineering Plastics Applications, 2017, 45(10):103–107.
- [22] 柳月, 等. 现代化工, 2020, 40(6):107–113.
Liu Yue, et al. Modern Chemical Industry, 2020, 40(6):107–113.
- [23] 陈禾木, 等. 北京林业大学学报, 2015, 37(7):109–116.
Chen Hemu, et al. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(7):109–116.
- [24] 李祥刚, 等. 包装学报, 2020, 12(5):35–44.
Li Xianggang, et al. Packaging Journal, 2020, 12(5):35–44.
- [25] 周先敏, 等. 山东化工, 2019, 48(9):95–96, 100.
Zhou Xianmin, et al. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(9): 95–96, 100.
- [26] 孙佳成. 聚乙烯醇发泡材料的制备及性能研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019.
Sun Jiacheng. Study on preparation and properties of polyvinyl alcohol foams[D]. Ningbo: Ningbo University, 2019.
- [27] Guo Gangjian. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(26): 48 829–48 836.
- [28] 杨晨光, 等. 辐射研究与辐射工艺学报, 2019, 37(1):3–10.
Yang Chenguang, et al. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2019, 37(1):3–10.
- [29] 刘俊霞. 超临界二氧化碳发泡制备热塑性聚氨酯泡沫及其结构调控与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
Liu Junxia. Study on structural adjustment and properties of thermoplastic polyurethane foam fabricated by supercritical carbon dioxide foaming[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [30] Moghadam M Z, et al. Materials, 2017, 69:115–127.
- [31] Liu Pengju, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 107:675–684.
- [32] Sun Jiacheng, et al. European Polymer Journal, 2018, 105:491–499.
- [33] Yin Duoyuan, et al. Journal of Polymers and the Environment, 2019, 27(12):2 878–2 885.
- [34] Gao Xiangqian, et al. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 604.doi:10.1016/j.colsurfa. 2020.125287.
- [35] 贾玉春. PVFM 泡沫塑料对阳离子染料吸附性能的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
Jia Yuchun. Adsorption properties of cationic dyes on PVFM foam [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [36] Pu Lian, et al. Polymer Composites, 2019, 40(12):4 658–4 668.
- [37] 谢页平, 等. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(3):124–130.
Xie Yeping, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(3):124–130.
- [38] Wang Xiao, et al. Polymer International, 2006, 55(11):1 230–1 235.
- [39] 邓莉, 等. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(8):125–129.
Deng Li, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(8):125–129.
- [40] 牛首飞. 污水处理载体材料的制备及应用[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
Niu Shoufei. Preparation and application of the carrier material used in sewage treatment[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.
- [41] 王妨茶. 秸秆纤维复合材料 PVFM 的制备及应用研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
Wang Fangcha. Preparation and application of the straw fiber composite PVFM[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019.
- [42] de Laia A G S, et al. Journal of Materials Science, 2020, 55:8 710–8 727.
- [43] Colosi C, et al. Langmuir: The ACS journal of Surfaces and Colloids, 2013, 29:82–91.
- [44] Ashraf A A, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(3):3 149–3 157.
- [45] He Miaomiao, et al. Materials and Design, 2020, 194.doi:10. 1016/j.matdes.2020.108913.
- [46] Zhao Yifan, et al. Journal of materials chemistry B, 2019, 7: 1 855–1 866.
- [47] Yang Qinghao, et al. Advanced Materials Research, 2011, 152–153:1 650–1 659.
- [48] 翟伟坤, 等. 弹性体, 2020, 30(1):32–36.
Zhai Weikun, et al. China Elastomerics, 2020, 30(1):32–36.
- [49] Adu C, et al. Materials Letters, 2019, 253:242–245.
- [50] 罗瑜莹. 杨木纤维多孔缓冲包装材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
Luo Yuying. Study on preparation and properties of poplar fiber porous cushioning packaging materials[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.

勘误声明

本刊 2020 年第 11 期《不同抗氧化体系的玻纤增强 PA66 的热氧老化性能》文章中, P109 页右栏下数第 8 行, “由图 6 可知, GF 增强 PA66 材料” 及该段落句首两个空格删去, 并与左栏最后一行合并为一段, 特此声明, 对此给广大读者造成困惑和不便, 特致歉。