

先进材料

植物纤维基包装材料中纤维悬浮体流变行为研究

赵西坡^{1,2}, 李培东¹, 熊金松¹, 吴灿阳¹, 林真³, 彭少贤^{1,2}

(1.湖北工业大学 a.绿色轻工材料湖北省重点实验室 b.新材料与绿色制造湖北省引智创新示范基地, 武汉 430068; 2.湖北隆中实验室, 湖北 襄阳 441000; 3.雅丽日化实业(惠州)有限公司, 广东 惠州 516265)

摘要: **目的** 采用可再生的植物纤维机械搅拌制备植物纤维悬浮体系, 探究纤维悬浮液的流变性影响因素和体系中纤维的分散与取向, 为后续工业化产品的加工和运输设计奠定基础。**方法** 利用旋转流变仪测试纤维质量分数、长径比(纤维长度)、温度和水溶性高分子等各个因素对体系流变性能的影响。**结果** 纤维悬浮体系为非牛顿流体, 表现剪切变稀现象。溶液的黏度随温度的变化经线性拟合符合 Arrhenius 方程。纤维质量分数、长径比(纤维长度)的提高均会增加体系表观黏度, 促进纤维的分散及网络结构形成, 而温度的提高, 黏度会呈指数形式减小。加入水溶性高分子 PVA 和聚丙烯酰胺分散剂均会提高体系黏度, 有助于纤维的分散; PVA 醇解度越高, 亲水基团越多, 易与纤维产生更多氢键作用, 形成纤维网络结构, 有助于后续发泡结构控制, 醇解度过高则易凝胶化。阳离子型 CPAM 有助于改善纤维表面负电荷, 破坏纤维静电吸附, 使得纤维分散更均匀。**结论** 纤维质量分数、长径比(纤维长度)、体系温度等因素会影响纤维悬浮液流变特性, 水溶性 PVA 和分散剂聚丙烯酰胺的加入有助于纤维的分散, 对工业化纤维浆料配比加工具有参考意义, 同时体系的黏流特性有利于生产线浆料输送系统的设备设计。

关键词: 植物纤维; 纤维悬浮液; 流变行为

中图分类号: TB484.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)03-0001-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.03.001

Rheological Behavior of Fiber Suspension in Plant Fiber based Packaging Materials

ZHAO Xi-po^{1,2}, LI Pei-dong¹, XIONG Jin-song¹, WU Can-yang¹, LIN Zhen³, PENG Shao-xian^{1,2}

(1. a. Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry b. New Materials and Green Manufacturing Talent Introduction and Innovation Demonstration Base, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei Longzhong Laboratory, Hubei Xiangyang 441000, China; 3. Yali Household Chemical Industry (Huizhou) Co., Ltd., Guangdong Huizhou 516265, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare plant fiber suspension system by mechanical stirring of renewable plant fiber, explore the factors affecting the rheology of the fiber suspension and the dispersion and orientation of the fiber in the system, so as to lay a foundation for the processing and transportation design of subsequent industrial products. The effects of fiber mass fraction, aspect ratio (fiber length), temperature and water-soluble polymer on the rheological properties of the system were tested by rotary rheometer. The fiber suspension system was a non-Newtonian fluid, showing shear

收稿日期: 2022-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51273060)

作者简介: 赵西坡(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多相聚合物体系结构设计、生物可降解材料结构调控及高性能化与功能化。

thinning. The change of viscosity of solution with temperature was in line with Arrhenius equation through linear fitting. The increase of fiber mass fraction and aspect ratio (fiber length) would increase the apparent viscosity of the system, promote the dispersion of fibers and the formation of network structure, while the viscosity would decrease exponentially with the increase of temperature. The addition of water-soluble polymer PVA and polyacrylamide dispersant would improve the viscosity of the system and help to disperse the fiber; The higher the alcoholysis degree of PVA, the more hydrophilic groups, and it was easy to generate more hydrogen bonds with the fiber, forming a fiber network structure, which was helpful for the subsequent foam structure control. The higher the alcoholysis degree, the easier gel. Cationic CPAM could improve the negative charge on the fiber surface, destroy the electrostatic adsorption of the fiber, and make the fiber disperse more evenly. Factors such as fiber mass fraction, aspect ratio (fiber length), and system temperature will affect the rheological properties of fiber suspension. The addition of water-soluble PVA and dispersant polyacrylamide can help to disperse the fiber, which is of reference significance for the industrial fiber slurry proportioning process. At the same time, the viscous flow characteristics of the system are convenient for the equipment design of the slurry conveying system of the production line.

KEY WORDS: plant fiber; fiber suspension; rheological behavior

塑料发泡产品具有缓冲性能好、轻便、成本低等优势,被广泛应用于包装材料^[1-5]。随着行业的发展,传统塑料不可降解所引发的白色污染问题日益突出,低碳环保可持续的呼声越来越大,绿色环保材料越来越受到重视^[6-9]。

植物纤维作为天然材料,来源广、价格低廉、可降解,能够缓解资源稀缺以及环境污染与生活质量改善之间的矛盾,引起了大量学者的关注^[10-14]。在缓冲包装领域,纤维基的瓦楞纸板、蜂窝板、模塑纸浆实现了环保生物可降解,但由于包装的成本及特定要求,如湿度、温度、质量、体积等,并不能满足所有的包装材料^[15]。与发泡聚苯乙烯(EPS)泡沫和其他纤维素基包装相比,发泡成型的植物纤维材料具有良好的保温隔热和抗震缓冲性能,且成本低,有望替代传统发泡塑料^[16-17]。对此,近年来国内外多有研究和开发。郭巍等^[18]以稻壳纤维和纳米碳酸钙为填料,偶氮二甲酰胺(AC)为发泡剂注塑制备一种纤维增强聚丙烯(PP)发泡材料,减少了不可降解材料PP的使用,其形成的泡孔致密均一,冲击强度达到 23.93 kJ/m^2 ,在不损失力学性能的前提下实现了材料轻量化。Wang等^[19]以木纤维(WF)和PLA为原料,偶氮二甲酰胺为发泡剂,采用热压发泡法制备一种轻质WF/PLA复合发泡材料,冲击强度和抗压强度分别为 3.16 kJ/m^2 和 34.12 MPa ,在建筑领域有很高的应用价值。Luo等^[20]采用化学发泡热压成型制备一种多孔的、基于木纤维的包装缓冲材料,探讨了初始含水量对植物纤维多孔缓冲材料发泡质量和力学性能的影响。结果表明,当初始含水量为69.3%时,初始胚黏度最适合气泡生长,样品的孔隙率、孔径和分布最为理想。

机械液体发泡工艺简单、成本低,容易工业化生产,在植物纤维发泡中十分具有应用前景^[21-22]。发泡原理遵循“微桁架”结构理论,使得材料多孔形成三维

网状结构,具有轻量、力学性能和缓冲性能优异等特点^[23]。然而,由于纤维具有亲水易凝絮、缠结等特点,植物纤维发泡材料的产业化尚未成熟,无论是在配方优化,浆料的加工、运输,到后续发泡结构控制生产都存在一定的问题^[24-25]。植物纤维悬浮体(浆料)作为发泡产品的前体,其决定着产品的加工难易和性能好坏,具有十分重要的研究价值。通过流变学测试研究纤维悬浮体系的流动状态与纤维的分散,对产品原料检验、加工运输的设计和发泡结构控制等具有指导意义^[26],因此,国内对植物纤维悬浮体流变性也有相关研究。沈苏华等^[27]利用理论分析和数值模拟研究了纤维悬浮槽道湍流中纤维取向分布和流变特性,推导出了纤维取向的平均概率分布函数的方程。余妙春等^[28]利用模糊关系方程法建立了估计模型,分析了浆料长径比、温度、剪切率对各体系流变行为的影响。

本文对纤维悬浮体的流变行为进行研究,采用可再生的植物纤维机械搅拌制备纤维悬浮体,利用旋转流变仪系统研究纤维浓度、长径比(纤维长度)、温度及水溶性高分子对纤维悬浮液流变性的影响,分析体系中纤维的分散与取向,为后续工业化产品运输及加工奠定基础。

1 实验

1.1 原料与仪器

主要原料:植物纤维,美国进口红松木;阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM,相对分子质量为300万)、阴离子型聚丙烯酰胺(APAM,相对分子质量为300万)、非离子型聚丙烯酰胺(NPAM,相对分子质量为300万),化学纯,国药集团化学试剂有限公司;聚乙烯醇1750(PVA1750)、聚乙烯醇1788(PVA1788)、聚乙烯醇1799(PVA1799),化学纯,国药集团化学试剂有限公司。

主要仪器: ME204E 分析天平, 托利多仪器(上海)有限公司; R-02 高速中药粉碎机, 永唐市屹立工具厂; Rct Basic 加热磁力搅拌器, 艾卡(广州)仪器设备有限公司; DHR-2 旋转流变仪, TA 仪器有限公司。

1.2 纤维悬浮体的制备

前处理植物纤维: 将植物纤维通过高速粉碎机解离为蓬松植物纤维丝, 用 200、100、50 目的网筛筛分不同长径比(纤维长度)的纤维; 制备纤维悬浮体溶液: 先将特定聚乙烯醇水溶液或聚丙烯酰胺水溶液混合均匀, 再将一定量植物纤维加入混合水溶液, 机械搅拌, 分散均匀, 制得植物纤维悬浮体系。

1.3 流变性测试

采用 DHR-2 型旋转黏度仪, 在 20 °C 条件下测定植物纤维悬浮体的流变行为, 流变速率控制在 $10^{-2} \sim 20 \text{ s}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 纤维悬浮体系流变行为的影响因素

2.1.1 纤维质量分数

图 1、图 2 分别是不同纤维质量分数纤维悬浮体的剪切速率与体系黏度($\gamma-\eta$)流变曲线和剪切速率与剪切应力($\gamma-\tau$)流变曲线。

由图 1 看出, 纤维悬浮体属于假塑性流体, 出现明显剪切变稀特点, 且剪切速率越高, 悬浮体的黏度降低越平缓。根据 Chaouche 等的理论^[29], 可能的原因是, 当剪切速率较低时, 机械力作用小, 纤维未能大部分取向, 而是纤维之间由于某种作用如静电吸附, 出现聚集和缠绕, 或者是形成一定空间网状结构, 取向混乱, 增大了与流体之间的摩擦力, 使得表观黏度较大; 当升高剪切速率时, 机械力作用变大, 破坏了先前的纤维交错结构, 对流体的阻力减小, 同时更多纤维顺着切向力取向, 体系黏度降低, 表现剪切变稀; 当再增大剪切速率时, 体系的大多数纤维已经按着切向力方向排列, 难以继续对黏度造成大的影响, 继而出现牛顿平台区。

从图 2 可以看出, 曲线呈现非牛顿流体性质。在低纤维质量分数下的分散体系中, 纤维之间可彼此独立, 互不干扰。随着纤维质量分数的升高, 纤维粒子在分子水溶液中更密集, 纤维间的距离缩小, 碰撞及相互作用增多, 更容易出现交叉、缠绕, 使流体与纤维的作用力增大, 体系黏度上升, 剪切力变大。

2.1.2 纤维长径比(纤维长度)

图 3a、b、c 分别为 50、100、200 目的网筛选的不同长径比(纤维长度)纤维原料的扫描电镜图, 分别代表长纤维、中长纤维、短纤维。

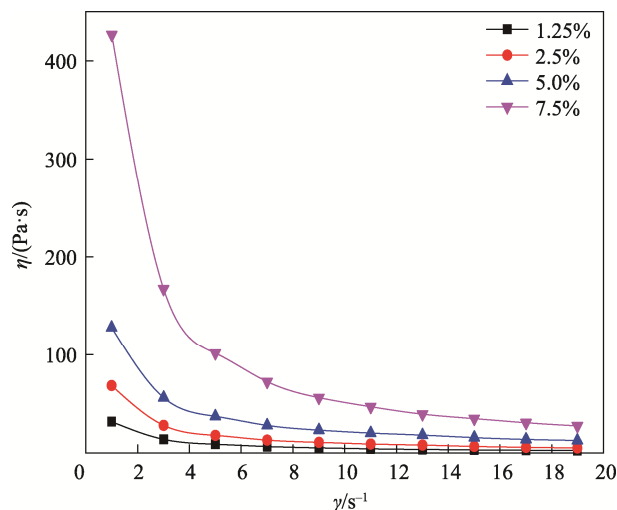


图 1 不同纤维质量分数下悬浮体 $\gamma-\eta$ 流变曲线
Fig.1 $\gamma-\eta$ rheological curve of suspensions at different fiber Concentrations

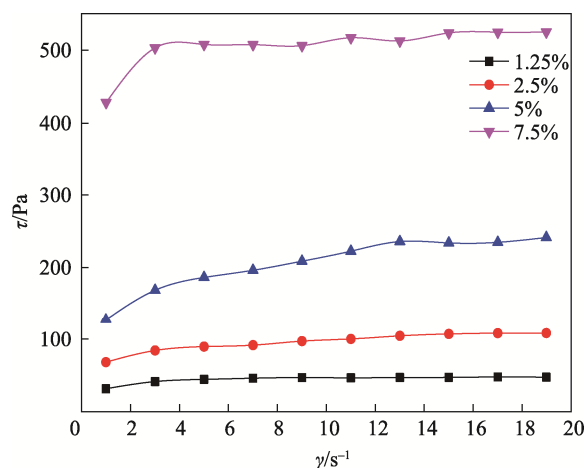


图 2 不同纤维质量分数下悬浮体 $\gamma-\tau$ 流变曲线
Fig.2 $\gamma-\tau$ rheological curve of suspensions at different Fiber Concentrations

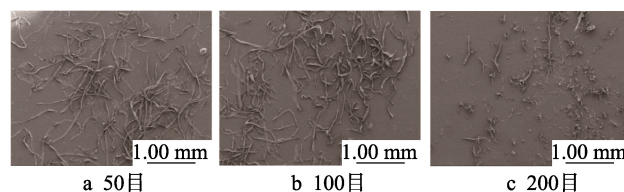


图 3 不同网筛筛选的纤维原料扫描电镜图
Fig.3 SEM of fiber raw materials screened by different screens

图 4、图 5 分别是不同长径比(纤维长度)纤维在纤维悬浮体系中的 $\gamma-\eta$ 与 $\gamma-\tau$ 流变曲线。图 4—5 中可以看出纤维悬浮体系仍为非牛顿流体, 体系的黏度随着纤维长径比(纤维长度)的变长而变大, 同时剪切变稀的流变行为更明显。根据细长体理论, 在 $r/L \ll 1$ 时, 高长径比的纤维与流体接触面积多, 混乱取向的纤维对流体的作用力大, 表观黏度上升; 同时高长径比意味着纤维之间的交织和凝絮机会也越多,

纤维之间的作用力增大,使得需要的剪切应力增大。

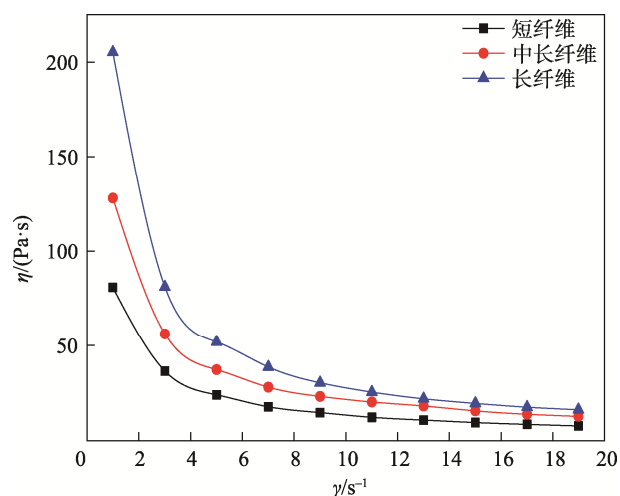


图 4 不同长径比(纤维长度)下悬浮体
 γ - η 流变曲线

Fig.4 γ - η rheological curve of suspensions at different aspect ratio (fiber length)

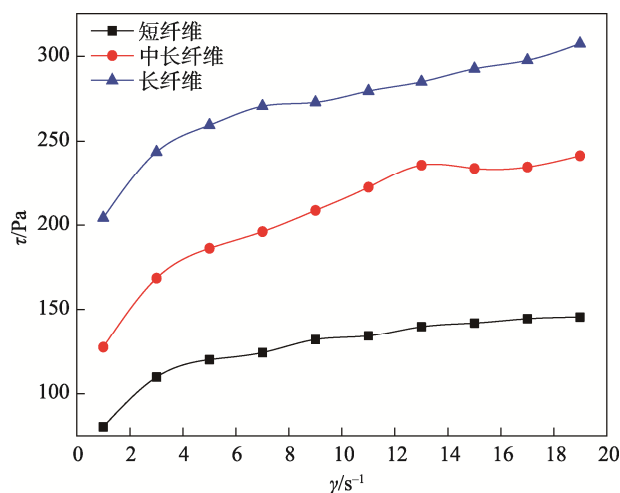


图 5 不同长径比(纤维长度)下悬浮体
 γ - τ 流变曲线

Fig.5 γ - τ rheological curve of suspensions at different aspect ratio (fiber length)

2.1.3 温度

图 6 为温度对纤维悬浮体的流变曲线。从图 6 中可以看出温度升高,黏度呈现下降趋势。可能归结于分子的热运动现象,高温使得这些纤维更加“活跃”,静电作用、内聚力等不足以束缚纤维,从而减少了缠结、凝絮及空间网状结构的形成,自由体积增加,体系表观黏度下降;升温会导致纤维柔性增加,易于其随剪切方向取向,减少了流体流动的阻力,表观黏度降低。

为进一步考察材料温度与黏度的关系,用黏流活化能表示材料黏度对温度的敏感性。参照阿伦尼乌斯方程^[30]:即 $\eta_0 = A \exp(\Delta E_a/RT)$ 或 $\lg \eta_0 = \lg A + \Delta E_a/(2.303RT)$, 其中 ΔE_a 为黏流活化能, J/(mol·K); R 为

气体常数, $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为温度, K。将 $\lg \eta_0$ 与 $1/T$ 的关系作图,进行线性拟合见图 7,结果表明纤维悬浮体的黏度与温度的关系符合阿伦尼乌斯方程。当纤维质量分数为 5% 时,纤维悬浮液的黏流活化能 ΔE_a 为 $11.3 \text{ kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。同时根据幂律方程 $\tau = K\gamma^n$ 中的稠度系数 K 和非牛顿指数 n 绘表,见表 1。可以看出温度升高,流体的假塑性减弱,体系的流动性增强。

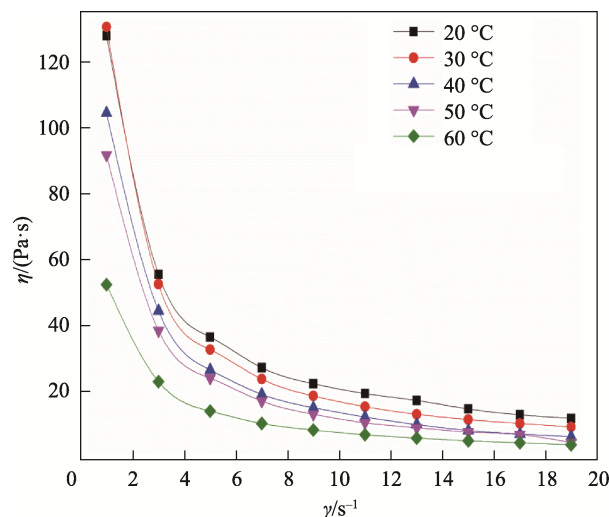


图 6 不同温度下纤维悬浮体 γ - η 流变曲线

Fig.6 γ - η rheological curve of suspensions at different temperatures

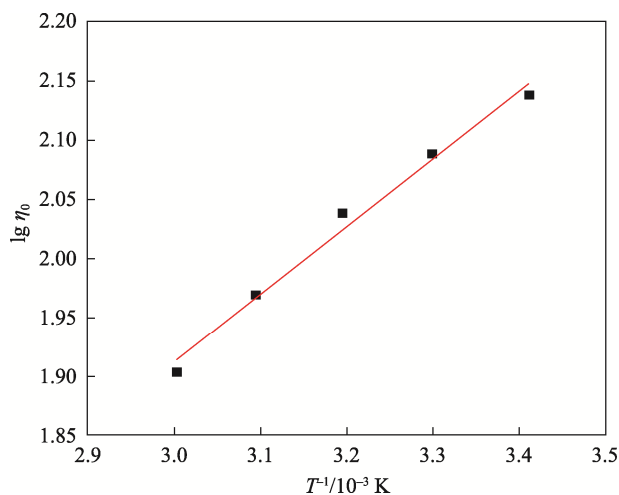


图 7 质量分数为 5% 的纤维悬浮液的黏度与温度的依赖关系

Fig.7 Relationship between suspension viscosity and temperature of fiber with mass fraction of 5%

2.1.4 PVA 分散剂

在纤维悬浮体系中,由于纤维素表面含有大量的 $-\text{COO}^-$, 所以呈现电负性,纤维素之间产生静电效应,彼此分开困难,使得纤维的分散性差,往往会加入分散剂改善纤维的分散性^[31]。图 8 为在 20 °C、

纤维质量分数为 5% 时, 不同醇解度聚乙烯醇水溶液 (质量分数为 1%) 纤维悬浮体 γ - η 流变曲线。

表 1 不同温度下纤维悬浮液稠度系数 K 与非牛顿指数 n
Tab.1 Fiber suspension viscosity coefficient K and non-Newtonian index n at different temperature

温度/°C	$K/10^3$	n
20	2.1	0.77
30	2.08	0.81
40	2.05	0.86
50	1.97	0.9
60	1.8	0.92

图 8 可以看出, 随着分散剂 PVA 的添加, 纤维悬浮体表观黏度升高, 体系中纤维与溶液中高分子链相互作用增强。不同型号的 PVA 对悬浮体黏度有不同影响。根据醇解度和聚合度的不同, PVA 可以分成诸多型号, 如常用低聚合度的 3 种型号为 1750-PVA、1788-PVA、1799-PVA, 聚合度均为 1 700, 醇解度分别为 50%、88%、99%^[32]。醇解度越高, 羟基百分比越高, 与纤维可生的氢键能产越多, 更有利于形成致密的网络结构。1799-PVA 醇解度最高, 几乎完全醇解, 大量的氢键往往容易交联形成凝胶体, 黏度极不稳定, 而且在水中溶解度有限, 通常只溶解在 90 °C 以上的水中。在机械力作用下呈块状, 对流体的作用面积少, 因此黏度没有剧增。1788-PVA 对纤维悬浮体黏度增黏效果好, 可能原因是氢键密度较为合适, 没有交联, 溶于水中, 而且在部分纤维表面可能会附着一层薄膜, 起到润滑作用, 减少纤维之间相互作用, 有利于纤维的分散。

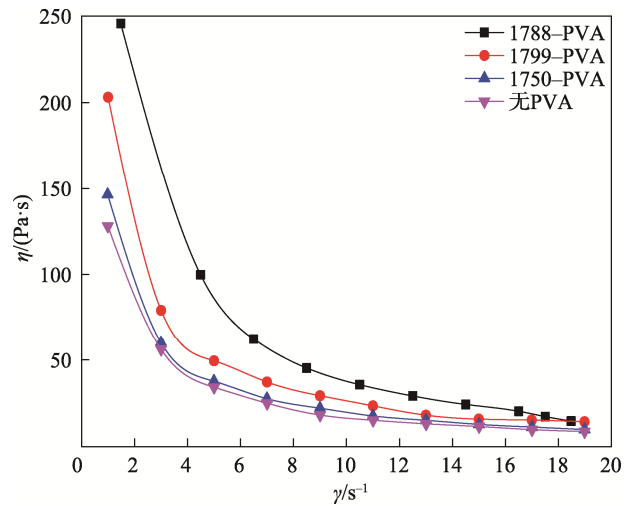


图 8 在纤维质量分数为 5% 条件下不同醇解度 PVA 对纤维流变影响
Fig.8 Effect of different degrees of hydrolysis of PVA on fiber rheology at a fiber mass fraction of 5%

2.1.5 聚丙烯酰胺分散剂

图 9 为纤维质量分数为 5% 条件下, 不同型号质量分数为 1% 的 PAM 水溶液纤维悬浮 γ - η 流变曲线。聚丙烯酰胺是一种常见的水溶性高分子化合物, 按照离子度分为: 阳离子 (CPAM) 聚丙烯酰胺、阴离子 (APAM) 聚丙烯酰胺、非离子 (NPAM) 聚丙烯酰胺等^[33]。从图 9 可以看出, 加入聚丙烯酰胺后, 悬浮体系的黏度均有所增加, 流体呈现剪切变稀现象。理论上, 体系黏度增高, 可以限制纤维的运动, 使纤维之间无法接触, 减少凝絮, 同时增加了纤维在介质中的悬浮时间。阴离子 (APAM) 聚丙烯酰胺所在体系黏度过大, 相同剪切速率需要更大的剪切力, 不利于机械搅拌分散。阳离子 (CPAM) 聚丙烯酰胺和非离子 (NPAM) 聚丙烯酰胺体系的纤维悬浮体黏度相近, 但阳离子型的 CPAM 可与带负电纤维作用, 削弱纤维表面负电荷, 减少纤维之间静电作用, 分散纤维效果更好。

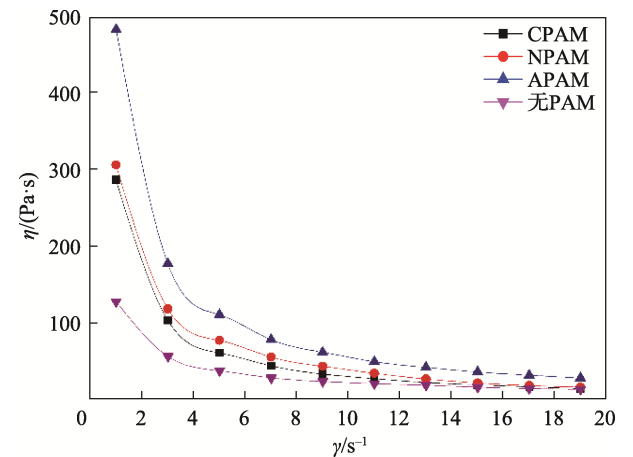


图 9 在纤维质量分数为 5% 条件下不同种类 PAM 对纤维流变影响
Fig.9 Effect of different types of PAM on fiber rheology at a fiber mass fraction of 5%

3 结语

文中利用旋转流变仪系统研究纤维质量分数、长径比 (纤维长度)、温度和水溶性高分子对纤维悬浮液流变性的影响。结果表明纤维悬浮体系为非牛顿流体中的塑型流体, 表现剪切变稀。纤维质量分数、长径比 (纤维长度) 的提高均会增加体系表观黏度, 促进纤维的分散及网络结构形成, 而温度的提高, 黏度会以指数形式减小。加入水溶性高分子 PVA 和聚丙烯酰胺分散剂均会提高体系黏度, 有助于纤维的分散; PVA 醇解度越高, 亲水基团越多, 易与纤维产生更多氢键作用, 形成纤维网络结构, 有助于后续发泡结构控制, 醇解度过高则易凝胶化。阳离子型 CPAM 有助于改善纤维表面负电荷, 破坏纤维静电吸附, 使得纤维分散更均匀。

参考文献:

- [1] HJELT T, KETOJA J, KIISKINEN H, et al. Foam Forming of Fiber Products: A Review[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2022, 43(10): 1462-1497.
- [2] COMBRZYŃSKI M, ÖZMEN Ö. Foamed Bioplastics: A Review[J]. *International Agrophysics*, 2021, 35(4): 375-388.
- [3] 郭彦峰, 付云岗, 张伟. AB 型双瓦楞纸板的蠕变与回复特性研究与分析[J]. *包装工程*, 2007, 28(3): 13-15.
GUO Yan-feng, FU Yun-gang, ZHANG Wei. Study on Creep Properties and Recoverability of Double-Wall Corrugated Paperboard[J]. *Packaging Engineering*, 2007, 28(3): 13-15.
- [4] SUETHAO S, SHAH D U, SMITTHIPONG W. Recent Progress in Processing Functionally Graded Polymer Foams[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(18): 4060.
- [5] TONG Hui-yan, ZHONG Xiao-cong, DUAN Zheng-hang, et al. Micro- and Nanoplastics Released from Biodegradable and Conventional Plastics during Degradation: Formation, Aging Factors, and Toxicity[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155275.
- [6] 吴彤彤, 吴金卓, 王卉, 等. 缓冲包装材料经济性与环境影响评价研究进展[J]. *包装工程*, 2021, 42(9): 17-24.
WU Tong-tong, WU Jin-zhuo, WANG Hui, et al. Research Progress on Technology Economy and Environmental Impact Assessment of Buffer Packaging Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(9): 17-24.
- [7] WILLIAMS A T, RANGEL-BUITRAGO N. The Past, Present, and Future of Plastic Pollution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 176: 113429.
- [8] GLISCINSKA E, DE AMEZAGA J, MICHALAK M et al. Green Sound-Absorbing Composite Materials of Various Structure and Profiling[J]. *Coatings*, 2021, 11(4): 407.
- [9] ASHORI A. Wood-Plastic Composites as Promising Green-Composites for Automotive Industries[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11): 4661-4667.
- [10] SEKI Y, SELLI F, ERDOĞAN Ü et al. A Review on Alternative Raw Materials for Sustainable Production: Novel Plant Fibers[J]. *Cellulose*, 2022, 29(9): 4877-4918.
- [11] LI Z, LI K, CHEN W et al. Investigation on the Characteristics and Effect of Plant Fibers on the Properties of Asphalt Binders[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 338.
- [12] DAI Lei, CHENG Ting, DUAN Chao, et al. 3D Printing Using Plant-Derived Cellulose and Its Derivatives: A Review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 203: 71-86.
- [13] RAMESH M, PALANIKUMAR K, . Plant Fibre Based Bio-Composites: Sustainable and Renewable Green Materials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 558-584.
- [14] 罗瑜莹, 肖生苓, 李琛, 等. 植物纤维多孔缓冲包装材料的研究现状与展望[J]. *包装工程*, 2016, 37(7): 17-22.
LUO Yu-ying, XIAO Sheng-ling, LI Chen, et al. Research Status and Prospect of Plant Fiber Porous Cushioning Packaging Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(7): 17-22.
- [15] MA C B, WANG Y W, ZOU G P et al. The Main Factors that Influence the Mechanical Properties of Honeycomb Board[J]. *AMR*, 2015, 1119: 812-817.
- [16] NECHITA P, NĂSTAC S M. Overview on Foam Forming Cellulose Materials for Cushioning Packaging Applications[J]. *Polymers*, 2022, 14(10): 1963.
- [17] WANG H, CHIANG P, CAI Y et al. Application of Wall and Insulation Materials on Green Building: A Review[J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2018, 10(9): 3331.
- [18] 郭巍, 周晓玉, 王秀梅, 等. 稻壳纤维/聚丙烯复合材料性能分析及发泡行为研究[J]. *塑料工业*, 2022, 50(6): 155-161.
GUO Wei, ZHOU Xiao-yu, WANG Xiu-mei, et al. Performances Analysis and Foaming Behaviors Research of Rice-Husk Fiber/Polypropylene Composite[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(6): 155-161.
- [19] WANG Bai-wang, QI Zhong-yu, CHEN Xiao-jian, et al. Preparation and Mechanism of Lightweight Wood Fiber/Poly(Lactic Acid) Composites[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 217: 792-802.
- [20] LUO Yu-ying, XIAO Sheng-ling, LI Shi-lei. Effect of Initial Water Content on Foaming Quality and Mechanical Properties of Plant Fiber Porous Cushioning Materials[J]. *Bioresources*, 2017, 12(2): 4259-4269.
- [21] FRANCUCCI G, RODRIGUEZ E. Processing of Plant Fiber Composites by Liquid Molding Techniques: An Overview[J]. *Polymer Composites*, 2016, 37(3): 718-733.
- [22] JIN Fan-long, ZHAO Miao, PARK M, et al. Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review[J]. *Polymers*, 2019, 11(6): 953.
- [23] GU X R. *Surface Chemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [24] 李博, 张新昌, 曹景山, 等. 混合植物纤维微波发泡

- 缓冲材料的制备工艺研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(4): 1-6.
- LI Bo, ZHANG Xin-chang, CAO Jing-shan, et al. Preparation Technology of Mixed Plant Fiber Cushion Packaging Material[J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(4): 1-6.
- [25] JARPA-PARRA M, CHEN L. Applications of Plant Polymer-Based Solid Foams: Current Trends in the Food Industry[J]. Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(20): 9605.
- [26] 蓝骏山. 水溶型黏结剂增强桉木闪爆纤维板材性能及结合机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- LAN Jun-shan. Properties and Bonding Mechanism of Steam Explosion Eucalyptus Fiberboard Reinforced with Soluble Adhesive[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [27] 沈苏华, 林建忠. 纤维悬浮槽道湍流中纤维取向分布和流变特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(12): 2093-2097.
- SHEN Su-hua, LIN Jian-zhong. Orientation Distribution of Fibers and Rheological Property in Turbulent Channel Flow of Fiber Suspensions[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(12): 2093-2097.
- [28] 余妙春, 谢拥群. 基于模糊理论的植物纤维浆料的流变特性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2011, 40(4): 427-430.
- YU Miao-chun, XIE Yong-qun. Rheological Properties of Plant Fiber Pulp Based on Fuzzy Theory[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 40(4): 427-430.
- [29] CHAOUICHE M, KOCH D L. Rheology of Non-Brownian Rigid Fiber Suspensions with Adhesive Contacts[J]. Journal of Rheology, 2001, 45(2): 369-382.
- [30] CEPEDA E, VILLARÁN M C. Density and Viscosity of Malus Floribunda Juice as a Function of Concentration and Temperature[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 41(2): 103-107.
- [31] 王高升, 李建, 陈夫山. 聚合电解质在纸浆纤维表面多层沉积的研究[J]. 中国造纸学报, 2006, 21(3): 52-55.
- WANG Gao-sheng, LI Jian, CHEN Fu-shan. Layer-by-Layer Deposition of Polyelectrolytes on the Surface of Pulp Fibers[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2006, 21(3): 52-55.
- [32] KABOORANI A, RIEDL B, BLANCHET P, et al. Nanocrystalline Cellulose (NCC): A Renewable Nano-Material for Polyvinyl Acetate (PVA) Adhesive[J]. European Polymer Journal, 2012, 48(11): 1829-1837.
- [33] 李宇. 两性聚丙烯酰胺“水包水”乳液的合成与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- LI Yu. Synthesis and Application of Amphoteric Polyacrylamide "Water-in-Water" Emulsion[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

责任编辑: 曾钰婵