

研究论文

## 漂白化学针叶木泡沫浆料流变性能的研究

陈婷婷<sup>1,2</sup> 王晨<sup>1,2</sup> 程金兰<sup>1,2,\*</sup> 张辉<sup>1,2</sup> 宜勇钢<sup>1,2</sup>

(1. 南京林业大学江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室, 江苏南京, 210037;

2. 南京林业大学江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏南京, 210037)

**摘要:** 采用浆式转子流变仪测量并分析研究了漂白化学针叶木泡沫浆料的流变曲线及流变参数变化规律。结果表明, 未起泡时, 加入聚乙烯醇(PVA)的针叶木浆料为Herschel-Bulkley塑性稀化流体, 其表观黏度大于普通浆料。起泡后, 针叶木浆料流变曲线分为剪切变稀阶段和剪切增稠阶段。纤维质量浓度为1.5%、2.0%和2.5%时, 针叶木泡沫浆料流变性能转折点对应的剪切速率分别约为120、150和190 s<sup>-1</sup>。PVA质量浓度对针叶木泡沫浆料的流变性能影响较小。针叶木泡沫浆料的质量浓度越高, 其剪切应力和表观黏度越大。随着针叶木泡沫浆料含气率的提高, 其剪切变稀阶段的黏滞系数 $K_1$ 呈线性递增, 剪切增稠阶段的黏滞系数 $K_2$ 呈幂函数递减; 而剪切变稀阶段的流动指数 $n_1$ 呈线性降低, 剪切增稠阶段的 $n_2$ 与之变化规律相反。

**关键词:** 泡沫浆料; 聚乙烯醇; 表观黏度; 黏滞系数; 流动指数

中图分类号: TS721; O373

文献标识码: A

DOI: 10.11981/j.issn.1000-6842.2020.04.35

浆料流变性能对于制浆造纸生产过程稳定高效的运行<sup>[1-3]</sup>及制浆造纸工艺和机械设备的设计与优化具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。传统纸张抄造过程均是以水为载体分散纤维, 形成固-液两相悬浮液。当纸浆纤维质量浓度一定时, 浆料流变性能基本符合Herschel-Bulkley塑性流体模型, 即存在屈服应力, 并且随着剪切速率的增大, 浆料表现出剪切稀化行为<sup>[7-10]</sup>。

泡沫成形技术应用于造纸过程始于20世纪70年代<sup>[11-13]</sup>, 其初衷是为了提高浆料上网浓度并有效防止纤维絮聚。在最近10年的持续探索中, 研究者发现, 利用水基泡沫形成的气-液-固三相浆料在纸张成形过程中不仅可以减少水资源、原料及能源的消耗, 且产品还具有高孔隙率、高松厚度等特点<sup>[14-16]</sup>。现有关于泡沫浆料的研究主要集中于气泡在浆料中的状态及其对纤维网络结构和纸张性能的影响<sup>[17-20]</sup>, 涉及其流变性能的报道相对较少。VTT研究中心对泡沫浆料的流动形态学、流动特性进行观测分析发现, 纤维的加入改变了水基泡沫的流变性能, 同时改变了滑移层的动力学<sup>[21]</sup>。王伟等<sup>[22]</sup>研究了泡沫浆料在不同纤维种类、不同浆料浓度时的流动特性, 发现泡沫浆料开始流动后, 浆料在沿着流动方向的

压头损失呈递减趋势, 且其充分流动后的压头损失比水的小。余妙春等<sup>[23]</sup>对影响竹纤维悬浮泡沫浆料流变性质的主要因素进行了研究发现, 当剪切速率在0~61 s<sup>-1</sup>范围内, 竹纤维悬浮泡沫浆料出现剪切稀化现象。

目前, 将泡沫成形技术应用于纸张的大规模实际生产还处于不断摸索阶段, 需要大量基础研究的数据支持。本研究在已有研究基础上, 采用浆式转子流变仪测量了漂白化学针叶木泡沫浆料的流变性能, 并分析了纤维、聚乙烯醇(PVA)的质量浓度及含气率对其影响规律, 对后期泡沫浆料基本性质的研究提供一定的借鉴, 同时为泡沫成形技术在纸张抄造过程中的实际应用提供一定参考和支持。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

纤维原料: 漂白化学针叶木浆(铁杉, 加拿大), 经纤维形态分析仪(Morfi Comapet, 法国)测得的纤维形态特性如表1所示。实验中, 针叶木浆的质量浓度 $C_m$ 分别为1.5%、2.0%和2.5%。实验样本初始体积均为1 L, 其中液相为去离子水。

收稿日期: 2019-08-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07402004); 国家自然科学基金(31770627); 江苏省高校优势学科建设工程(PAPD); 南京林业大学轻工与食品学院青年教师科研基金。

作者简介: 陈婷婷, 女, 1994年生; 在读硕士研究生; 主要研究方向: 纸浆悬浮液流体力学及新型高效制浆造纸装备。

\*通信联系人: 程金兰, 博士, 副教授; 主要研究方向: 制浆造纸工程与生物质精炼; E-mail: nfcj@njfu.edu.cn。

表 1 针叶木浆纤维形态特性

长度 /mm	直径 /mm	粗度 /mg·m <sup>-1</sup>	卷曲 度/%	扭结 角/(°)	折断 率/%	帚化 率/%	细小纤维 含量/%
1.85	0.027	0.152	13.5	129	36.1	0.346	21.90

通常, 泡沫生成过程中需要加入表面活性剂以增加气泡的稳定性<sup>[24]</sup>。PVA 是一种具有大量强亲水性羟基的水溶性高分子聚合物, 在制浆造纸工业中主要用作黏合剂和施胶剂, 可以有效改善制浆造纸生产中浆料和纸张的性能<sup>[25-27]</sup>。同时, PVA 作为一种表面活性剂, 被证明具有良好的起泡效果, 可以应用于泡沫成形技术<sup>[28]</sup>; 因此, 本研究也采用 PVA 作为起泡剂, 其性质如表 2 所示。为了降低溶液的表面张力, 获得稳定的泡沫, 表面活性剂浓度应大于临界胶束浓度。本研究样本中 PVA 在浆料中的质量浓度  $C_m'$  分别为 0.75%、1.00% 和 1.25%。已有文献<sup>[28]</sup>表明, 此 PVA 质量浓度范围适用于泡沫浆料的形成。

表 2 PVA 的性质

牌号	水解度/%	聚合度	黏度/mPa·s
17-99	99	1700	45-55

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 PVA 水溶液表面张力测定

配制一定量质量浓度分别为 0.75%、1.00% 及 1.25% 的 PVA 水溶液, 采用光学接触角测试仪 (T200-Auto3 Plus, 瑞典) 分别测量其表面张力, 每一质量浓度的 PVA 水溶液均测量 3 次取平均值, 以确保实验结果的可靠性。

### 1.2.2 浆料起泡及流变性能测定

将针叶木浆和一定比例的 PVA 加入到内径为 120 mm 的有机玻璃容器中。采用带有四叶片桨式转子 (单叶片宽度 20 mm, 高度 80 mm) 的 OS40-Pro 数显型顶置式电子搅拌器 (DLAB, 中国) 对样品进行快速搅拌以起泡, 转速为 1800 r/min。当样品达到实验所需含气率时, 停止搅拌。含气率  $\varphi$  是指浆料起泡之后的体积增加量与初始浆料的体积之比<sup>[29-30]</sup>。

配备起泡过程所用的相同桨式转子, 在控制剪切速率 ( $\gamma$ ) 模式下, 使剪切速率由 0 逐步提高至 250 s<sup>-1</sup>, 在此过程中, 采用 Brookfield 触屏式流变仪 (RST-SST, 美国) 测量并记录泡沫浆料的流变曲线, 测量装置如图 1 所示。所有测试过程均维持在室温 (20℃) 下进行。同一实验条件进行 3 次平行实验, 以确保实验结果的可靠性。

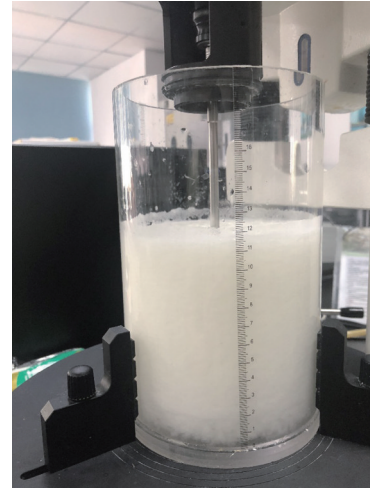


图 1 泡沫浆料流变性能的测量装置

## 2 结果与讨论

### 2.1 泡沫浆料流变行为分析

图 2 为普通浆料与加入 PVA 但未起泡浆料的流变曲线及表观黏度曲线。从图 2 可以看出, 普通浆料和加入 PVA 但未起泡浆料的流变曲线斜率随剪切速率的增大逐渐减小, 表观黏度均逐渐降低, 表现出剪切变稀现象。加入 PVA 的浆料, 在相同剪切速率时对应的

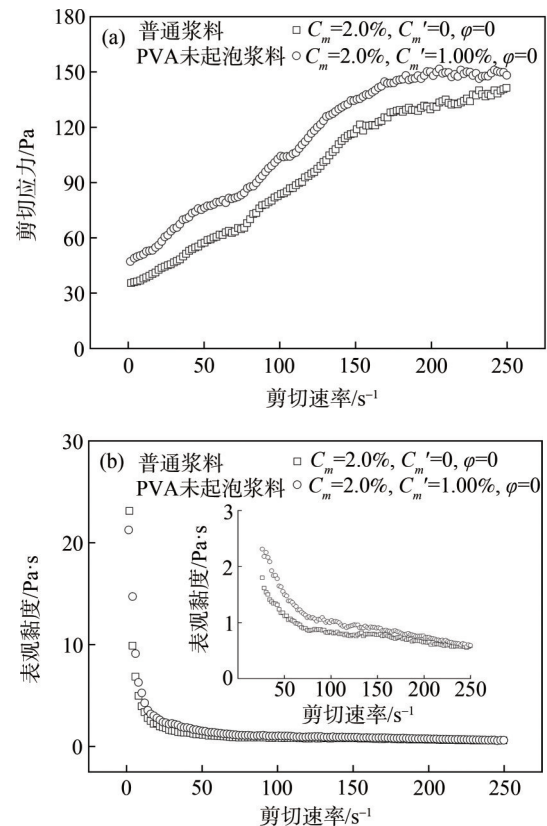


图 2 普通浆料和加入 PVA 未起泡浆料的流变曲线(a)和表观黏度曲线(b)

剪切应力比普通浆料的大，因此表观黏度也略高。这是由于 PVA 是一种高分子聚合物，具有较多的羟基<sup>[31]</sup>，易与纤维形成氢键作用架桥，增大了纤维间的结合力，从而使得相对运动过程中的内摩擦力增大，宏观表现为表观黏度的增大。

图 3 为泡沫浆料的流变曲线及表观黏度曲线。由图 3 可知，在较低剪切速率范围内 ( $0\sim 180\text{ s}^{-1}$ )，随着剪切速率的增大，泡沫浆料的剪切应力增大，而其表观黏度不断降低，出现剪切变稀现象，这与余妙春等<sup>[23]</sup>的研究结论相同。其原因是，剪切速率较低时，浆料中的纤维取向趋于一致，纤维之间的内摩擦力减小，表现为浆料表观黏度降低；当剪切速率提高到一定值后，浆料中密度较小的气泡出现了湍动，改变了被泡沫包围的纤维的取向，使得纤维无法再正常定向排列；同时也造成了水分的分布不均，使其不能填满纤维之间的空隙，纤维与纤维、纤维与气泡之间没有水层的滑动作用，导致了黏性阻力的增大<sup>[32]</sup>，因此出现剪切增稠现象。

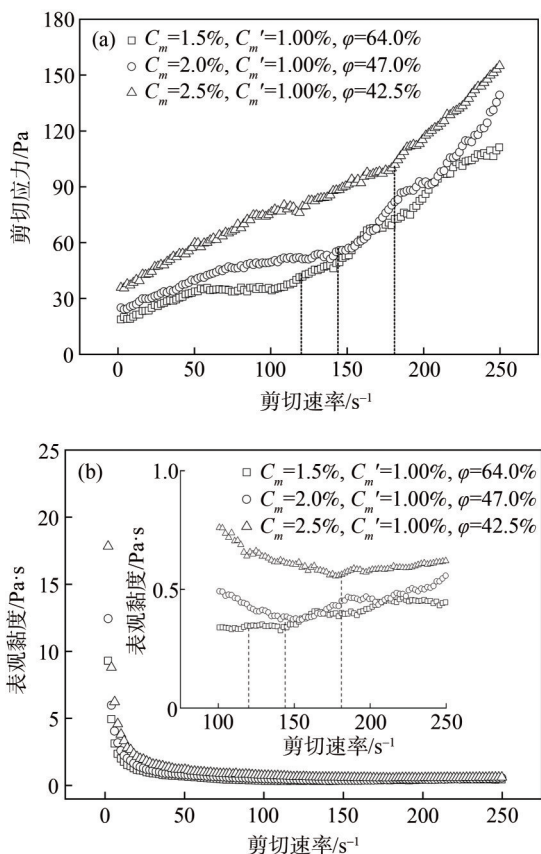


图 3 泡沫浆料流变曲线(a)和表观黏度曲线(b)

表 3 为泡沫浆料流变曲线及转折点对应的剪切速率。从表 3 可以看出，泡沫浆料从剪切变稀转变为剪切增稠时对应的剪切速率主要与纤维的质量浓度有

表 3 泡沫浆料流变曲线及转折点对应的剪切速率

纤维质量浓度/%	0.75% PVA		1.00% PVA		1.25% PVA	
	含气率/%	剪切速率/ $\text{s}^{-1}$	含气率/%	剪切速率/ $\text{s}^{-1}$	含气率/%	剪切速率/ $\text{s}^{-1}$
1.5	21.0	124	21.0	124	21.0	122
	30.1	112	30.1	112	31.2	120
	42.5	112	40.2	118	41.4	120
	47.0	112	47.0	110	47.0	139
	60.6	122	64.0	120	64.0	129
2.0	21.0	169	21.0	151	24.4	140
	32.3	165	30.1	147	30.1	145
	41.4	144	35.7	144	41.4	167
	47.0	159	47.0	144	47.0	157
	51.6	167	52.7	161	58.3	140
2.5	61.7	169	60.6	167	64.0	130
	13.1	185	18.8	195	21.0	183
	22.2	195	30.1	179	30.1	181
	30.1	215	42.5	181	41.4	179
	41.4	207	47.0	183	47.0	181
	47.0	213	52.7	187	52.7	185
	60.6	172	62.9	195	64.0	189

关，而与 PVA 的质量浓度及浆料含气率的关系不大。

### 2.2 PVA 质量浓度对泡沫浆料流变性能的影响

在相同纤维质量浓度 (2.5%) 和含气率 ( $\varphi=47.0\%$ ) 条件下，不同 PVA 质量浓度下泡沫浆料的流变曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出，泡沫浆料中 PVA 质量浓度不同时，其对应的浆料流变曲线几乎重叠在一起，表明 PVA 的质量浓度对泡沫浆料的流变性能基本没有影响。这可能是因为，不同质量浓度 PVA 水溶液的表面张力相近 (见表 4)；且泡沫浆料含气率相同时，PVA 质量浓度对浆料中的气泡尺寸及其分布影响不明显<sup>[27]</sup>，从而导致 PVA 质量浓度对泡沫浆料的流变性能影响甚微。因此，后续实验中选择 PVA 水溶液的质量浓度为 1.00%。

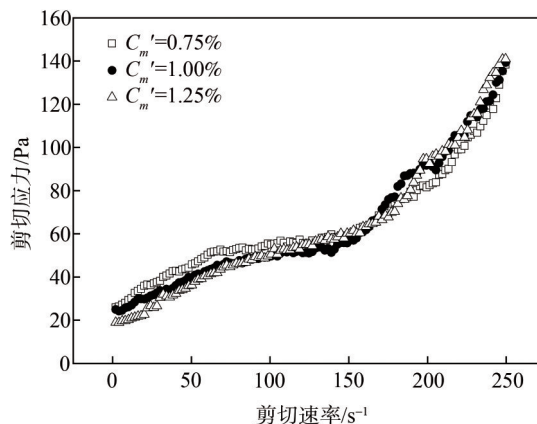


图 4 PVA 质量浓度对泡沫浆料流变曲线的影响

表 4 PVA 水溶液的表面张力

PVA 质量浓度/%	表面张力/mN·m <sup>-1</sup>
0.75	34.11
1.00	34.73
1.25	35.74

### 2.3 纤维质量浓度及含气率对泡沫浆料流变性能的影响

在相同含气率(47.0%)和 PVA 质量浓度(1.00%)条件下,纤维质量浓度对泡沫浆料流变性能和表观黏度的影响如图 5 所示。由图 5 可知,纤维质量浓度越大,泡沫浆料中纤维间的距离越小,纤维更易交织、缠绕形成更多或更大的纤维絮团,纤维间内聚力和结合力变大,纤维间相对运动时内摩擦力也相应增大<sup>[33]</sup>。因此,纤维质量浓度越大,相同剪切速率时泡沫浆料的剪切应力越大,表观黏度也越大。

采用式(1)所示的 Herschel-Bulkley 模型<sup>[34-35]</sup>对实验所得泡沫浆料流变曲线进行分段拟合分析。

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为剪切应力, Pa;  $\tau_0$  为屈服应力, Pa;  $K$  为黏滞系数;  $n$  为流动指数。当  $0 < n < 1$  时,流体的表

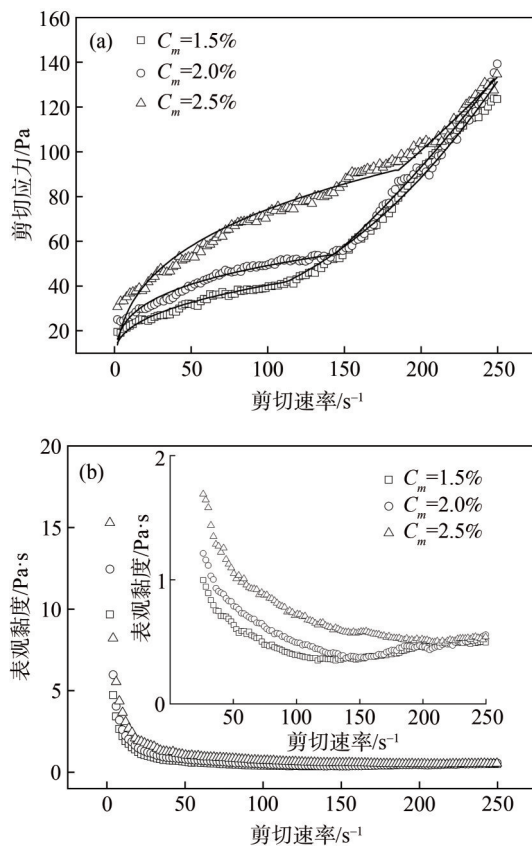


图 5 纤维质量浓度对泡沫浆料流变性能(a)和表观黏度(b)的影响

观黏度随着剪切速率的增大而减小,表现为剪切变稀;当  $n > 1$  时,其表观黏度随剪切速率的增大而增大,表现为剪切增稠。泡沫浆料的流变曲线拟合结果如图 5(a)中的实线所示。

在浆料纤维质量浓度(2.5%)和 PVA 质量浓度(1.00%)相同的条件下,含气率对泡沫浆料流变性能和表观黏度的影响如图 6 所示。由图 6 可知,泡沫浆料含气率越高,相同剪切速率下泡沫浆料的剪切应力和表观黏度越低。这说明泡沫浆料的流变行为主要是受到纤维之间的相互作用所控制。浆料含气率的增加意味着浆料中气泡的增多,使得纤维间距离增大,减少了纤维间直接接触、碰撞以及交织缠绕的几率,最终降低纤维在流体作用下发生相对运动时的摩擦力。

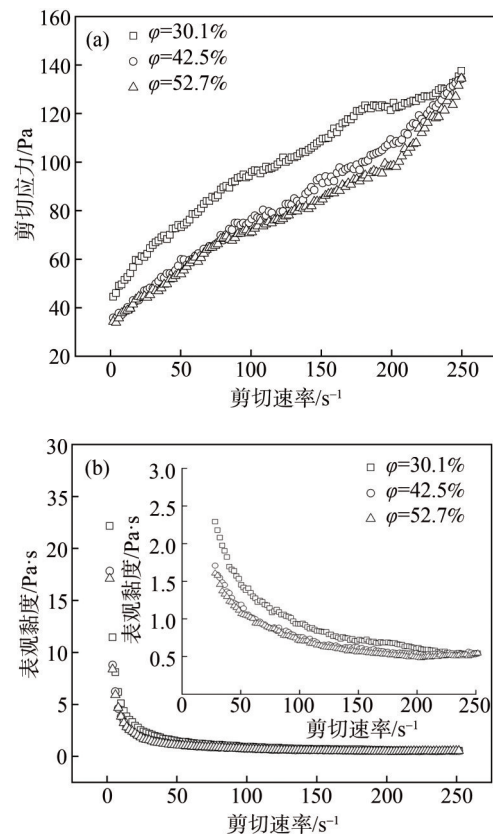


图 6 含气率对泡沫浆料流变性能(a)及表观黏度(b)的影响

图 7(a)和图 7(b)为拟合得到的不同纤维质量浓度的泡沫浆料剪切变稀阶段黏滞系数  $K_1$  和流动指数  $n_1$  随含气率的变化,拟合度  $R^2$  范围为 0.927~0.993;图 7(c)和图 7(d)为拟合得到的不同纤维质量浓度的泡沫浆料剪切增稠阶段黏滞系数  $K_2$  和流动指数  $n_2$  随含气率的变化,拟合度  $R^2$  范围为 0.919~0.992。

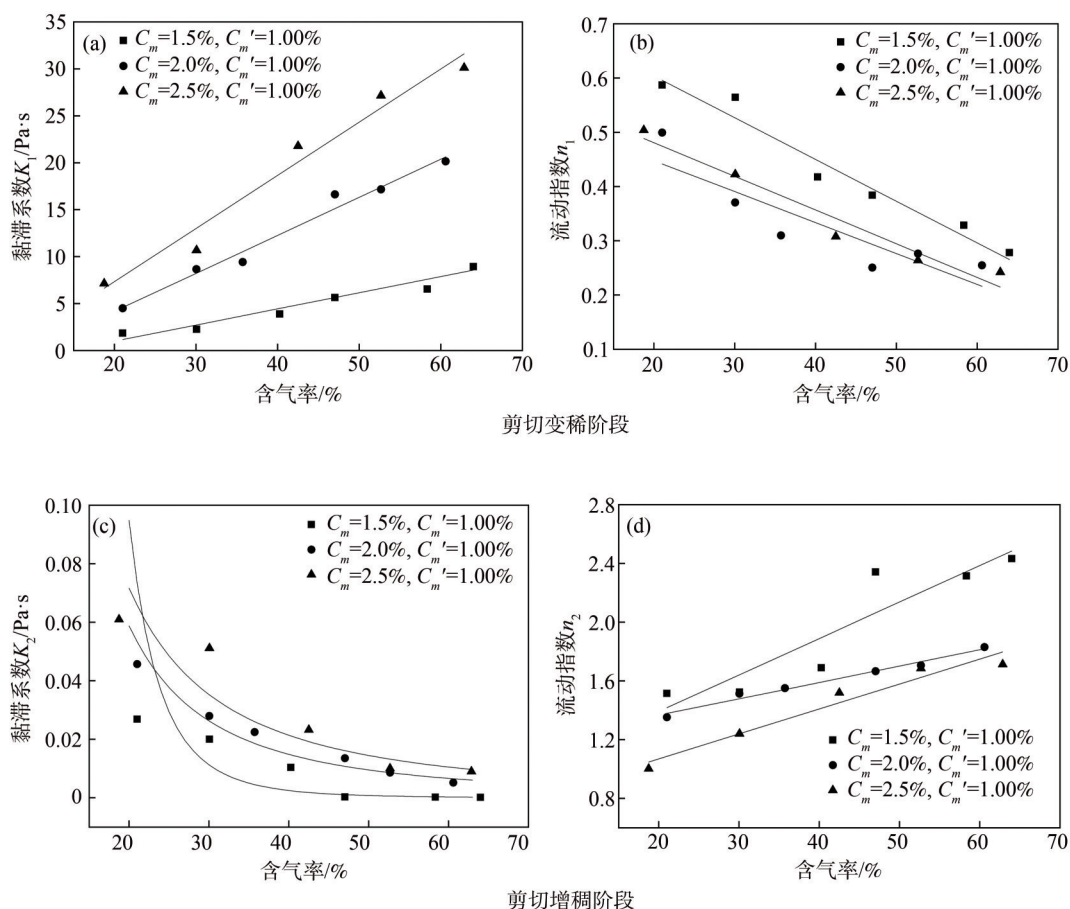


图7 泡沫浆料黏滞系数、流动指数与纤维质量浓度和含气率的关系

从图7可以看出,含气率相同时,随着纤维质量浓度的增加,泡沫浆料剪切变稀阶段和剪切增稠阶段的黏滞系数 $K_1$ 和 $K_2$ 均增大,而流动指数 $n_1$ 和 $n_2$ 都在减小。而随着含气率的增加,剪切变稀阶段的黏滞系数 $K_1$ 和流动指数 $n_1$ 分别呈线性递增和线性递减趋势。但是在剪切增稠阶段,情况则完全不同;随着含气率的增加,黏滞系数 $K_2$ 呈幂函数递减,而流动指数 $n_2$ 则呈线性递增趋势。

### 3 结论

在漂白化学针叶木浆料中加入聚乙烯醇(PVA)搅拌形成泡沫浆料,采用桨式转子流变仪研究了其流变行为,对比分析了纤维质量浓度、PVA质量浓度及含气率对泡沫浆料流变性能的影响,主要结论如下。

**3.1** 未起泡时,加入PVA的浆料与普通浆料一样,在剪切速率测试范围内表现出具有屈服应力的剪切稀化,为Herschel-Bulkley塑性流体。加入PVA在一定程度上提高了浆料的表观黏度。

**3.2** 当浆料通过搅拌起泡后,泡沫浆料的流变行为

随剪切速率的增大呈现出剪切变稀和剪切增稠两个阶段。两个阶段之间的转折点与泡沫浆料纤维质量浓度有关。泡沫浆料中PVA质量浓度的变化对其流变性能的影响较小。

**3.3** 泡沫浆料的含气率相同时,纤维质量浓度越大,其对应的剪切应力和表观黏度越大;相同纤维质量浓度和PVA质量浓度的泡沫浆料,随着含气率的增加,其剪切应力和表观黏度均降低。对泡沫浆料的流变性能进行拟合可知,在剪切变稀阶段,黏滞系数 $K_1$ 随含气率的增大而呈线性递增趋势,流动指数 $n_1$ 变化趋势与之相反;而在剪切增稠阶段,黏滞系数 $K_2$ 与含气率呈幂函数递减关系,流动指数 $n_2$ 则表现为线性增大。

### 参考文献

- [1] Sha J L, Wang C, James O, et al. Research Progress About the Yield Stress of Pulp Fiber Suspension and Its Application in Pulp and Paper Industry [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2016, 31(3): 50.  
沙九龙,王晨,James O,等. 纸浆纤维悬浮液屈服应力及其在造纸工业中的应用研究进展[J]. 中国造纸学报, 2016, 31

- (3): 50.
- [2] Bhole M, Ford C, Bennington C P J. Characterization of Axial Flow Impellers in Pulp Fibre Suspensions[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009, 87(4): 648.
- [3] Bennington C P J. Mixing in the Pulp and Paper Industry [M]// *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [4] Ein-Mozaffari F, Bennington C P J, Dumontb G A. Suspension Yield Stress and the Dynamic Response of Agitated Pulp Chests[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(8): 2399.
- [5] Wikström T, Rasmuson A. Yield Stress of Pulp Suspensions: The Influence of Fibre Properties and Processing Conditions[J]. *Nordic Pulp & Paper Resource Journal*, 1998, 13(3): 243.
- [6] He J, Chen S R, Sha J L, et al. Influence of the Addition of CMC on the Yield Stress of NBKP Suspension and Its Application in Pulp Transporting and Mixing[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2017, 32(1): 27.  
何晶, 陈树润, 沙九龙, 等. CMC对漂白针叶木浆悬浮液屈服应力的影响及其应用[J]. *中国造纸学报*, 2017, 32(1): 27.
- [7] Daisuke T, Satoshi I, Takayoshi M. Effect of Fiber Concentration and Axial Ratio on the Rheological Properties of Cellulose Fiber Suspensions[J]. *Journal of Society of Rheology*, 2002, 30: 27.
- [8] Sha J L. The Yielding and Thixotropic Flow Behavior in Pulp Fiber Suspensions[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.  
沙九龙. 纸浆纤维悬浮液的屈服应力与触变特性的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- [9] Jäsberg A, Selenius P, Koponen A. Experimental Results on the Flow Rheology of Fiber-laden Aqueous Foams [J]. *Colloids Surfaces A: Physicochem Engineering Aspects*, 2015, 473: 147.
- [10] Qiu R H, Huang Z T, Wang K Q. Rheological Properties of Low Consistency Chemical Pulp of Bagasse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 145.  
邱仁辉, 黄祖泰, 王克奇. 低浓度甘蔗渣化学浆流变特性的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 145.
- [11] Radvan B, Gatward A P J. The Formation of Wet-laid Webs by a Foaming Process[J]. *TAPPI Journal*, 1972, 55: 748.
- [12] Smith M K, Punton V W, Rixson A G. The Structure and Properties of Paper Formed by a Foaming Process[J]. *TAPPI Journal*, 1974, 57: 107.
- [13] Kidner T. The Radfoam Process for Fine Papers[J]. *Paper Technology*, 1974, 15(6): 346.
- [14] Smith M K, Punton V W. Foam Can Improve Formation[J]. *Pulp & Paper Canada*, 1975, 76(1): 55.
- [15] Rosen M J, Kunjappu J T. Surfactants and Interfacial Phenomena [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [16] Wang W, Yang Y J, Yu G Q, et al. Distribution of Foam Pore Size in the Paper Based on Foam Forming[J]. *Paper and Paper Making*, 2015, 34(6): 33.  
王伟, 杨玉洁, 郁国强, 等. 泡沫成形法制备纸页泡沫尺寸分布[J]. *纸和造纸*, 2015, 34(6): 33.
- [17] Lappalainen T, Lehmonen J. Determinations of Bubble Size Distribution of Foam-fiber Mixture Using Circular Hough Transform [J]. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2012, 27(5): 930.
- [18] Al-Qararah A M, Hjelt T, Koponen A, et al. Bubble Size and Air Content of Wet Fiber Foams in Axial Mixing with Macro-instabilities [J]. *Colloids Surfaces A: Physicochem Engineering Aspects*, 2013, 436: 1130.
- [19] Al-Qararah A M, Ketoja J A, Hjelt T, et al. Exceptional Pore Size Distribution in Foam Formed Fiber Networks[J]. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2012, 27(2): 226.
- [20] Al-Qararah A M, Ekman A, Hjelt T, et al. A Unique Microstructure of the Fiber Networks Deposited from Foam-fiber Suspensions [J]. *Colloids Surfaces A: Physicochem Engineering Aspects*, 2015, 482: 544.
- [21] Qiu R H, Wang K Q, Huang Z T. Rheological Properties of Low Consistency TMP from Thinning Wood of Chinese Fir[J]. *Journal of Forestry Research*, 2006, 17(2): 145.
- [22] Wang W, Wu L Q. Research on the Rheology Characteristics of Foamed-pulp and Pilot Platform [J]. *Paper and Paper Making*, 2016, 35(9): 10.  
王伟, 吴立群. 泡沫浆料的流动特性及其中试平台研究[J]. *纸和造纸*, 2016, 35(9): 10.
- [23] Yu M C, Xie Y Q, Zhang D Z. Rheological Properties of Foaming Pulp Solution from Bamboo Fibers [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(1): 119.  
余妙春, 谢拥群, 张德智. 竹纤维悬浮发泡浆料流变特性的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(1): 119.
- [24] Rosen M J. Surfactants and Interfacial Phenomena [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2004, 68(6): 347.
- [25] Xu Q L, Hu H R. Polyvinyl Alcohol (PVA) and Its Application in Paper Industry[J]. *Southwest Pulp and Paper*, 2000, 33(4): 12.  
徐青林, 胡惠仁. 聚乙烯醇(PVA)及其在造纸工业中的应用[J]. *西南造纸*, 2000, 33(4): 12.
- [26] Wan H A. Trademark and Application of Water-soluble Polymers—Polyvinyl Alcohol[J]. *Paper Chemicals*, 2003, 15(3): 45.  
万洪安. 水溶性高分子化合物——聚乙烯醇类型牌号及应用[J]. *造纸化学品*, 2003, 15(3): 45.
- [27] Yang S Z. Application Mechanism of PVA in Heat-sensitive Paper Coating[J]. *China Pulp & Paper*, 2016, 35(6): 69.  
杨树忠. 热敏纸涂料中PVA的作用机理与应用[J]. *中国造纸*, 2016, 35(6): 69.
- [28] Hou Q P, Wang X W. The Effect of PVA Foaming Characteristics on Foam Forming[J]. *Cellulose*, 2017, 24: 4939.
- [29] Cohen-Addad S, Höhler R, Pitois O. Flow in Foams and Flowing Foams[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2013, 45: 241.
- [30] Song S X, Zhen X L, Zhang M Y, et al. Foam Forming: An Effective Method to Prepare Polyimide Fiber-based Paper[J]. *Paper and Biomaterials*, 2019, 4(3): 39.
- [31] Yu H H. Application of PVA Water Soluble Fiber in Paper-making [J]. *World Pulp and Paper*, 2002, 21(1): 19.  
余河海. PVA水溶纤维在造纸中的应用[J]. *国际造纸*, 2002, 21(1): 19.
- [32] Tu K, Jiang S, Zhu W X. Physical Properties of Foods [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2006.

- 屠康, 姜松, 朱文学. 食品物性学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006.
- [33] Zhang D Z. Study on Rheological Properties of Plant Fiber Pulp of Buffering Material [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- 张德智. 植物纤维缓冲材料浆料流变特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [34] Ventura C, Blanco A, Negro C, et al. Modeling Pulp Fiber Suspension Rheology[J]. TAPPI Journal, 2007, 6(7): 17.
- [35] Derakhshandeh B, Hatzikiriakos S G, Bennington C P J, et al. Rheology of Pulp Suspensions Using Ultrasonic Doppler Velocimetry[J]. Rheologica Acta, 2010, 49(11/12): 1127.

### Study on Rheological Properties of Bleached Chemical Softwood Foam-fiber Suspension

CHEN Tingting<sup>1,2</sup> WANG Chen<sup>1,2</sup> CHENG Jinlan<sup>1,2,\*</sup> ZHANG Hui<sup>1,2</sup> YI Yonggang<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Key Lab of Pulp and Paper Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu Province, 210037; 2. Jiangsu Co-Innovation Center for Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu Province, 210037)

(\*E-mail: nfucjl@njfu.edu.cn)

**Abstract:** The rheological curves and rheological parameters of bleached chemical softwood foam-fiber suspension were measured by the rheometer with a propeller-type rotor. The results showed that the fiber suspension with polyvinyl alcohol (PVA) was Herschel-Bulkley plastic shear-thinning fluid when it was not foamed, but its apparent viscosity was higher than that of general fiber suspension. The rheological curves indicated two-stage rheological behavior of the foam-fiber suspension with PVA, shear thinning stage and shear thickening stage. The corresponding shear rate of each rheological turning points between the two stages were about 120, 150, and 190 s<sup>-1</sup>, respectively when the fiber mass concentration was 1.5%, 2.0%, and 2.5%. The PVA content had little effect on the rheological property of foam-fiber suspension. The foam-fiber suspension with higher fiber mass concentration had higher shear stress and apparent viscosity. Increasing air content increased the viscosity coefficient  $K_1$  linearly in the shear thinning stage, but reduced viscosity coefficient  $K_2$  followed power-law trend in the shear thickening stage; decreased the flow index  $n_1$  linearly in the shear thinning stage, but increased low index  $n_2$  linearly in the shear thickening stage.

**Keywords:** foam-fiber suspension; polyvinyl alcohol; apparent viscosity; viscosity coefficient; flow index

(责任编辑: 杨 艳)