http://pmse.scu.edu.cn

海藻酸钠/四硼酸钠水溶液的流变性能

朱 雷[1]，程 敏[2]，李晓俊[2]，程春祖[1,2]，徐纪刚[2]
（1. 东华大学 材料科学与工程学院，上海 201620；2. 中国纺织科学研究院有限公司 生物基纤维材料全国重点实验室，北京 100025）

摘要：在海藻酸钠(SA)/四硼酸钠(STB)水溶液中，STB会影响SA分子间及分子内化学键的形成，进而改变其溶液的流变响应。为探究SA/STB溶液的流变性与可纺性变化规律，研究了STB浓度、体系温度、SA单元组成等因素对溶液流变行为的影响。结果表明，SA与STB发生了共价交联，SA/STB溶液为假塑性流体。表观黏度、结构黏度指数、黏流活化能和动态模量随温度升高而减小，随STB浓度增大而增大，非牛顿指数则相反。高M/G比值的SA/STB溶液可纺性较好、对温度更敏感，升温和提高剪切速率可改善低M/G比值溶液的流动性，加工成型时可按实际情况选择合适的交联剂浓度和温度条件。

关键词：海藻酸钠；温度；M/G比值；四硼酸钠浓度；稳态流变；动态流变
中图分类号：TQ340.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）05-0104-09

海藻酸钠(SA)由α-L-古洛糖醛酸(G)和其差向异构体β-D-甘露糖醛酸(M)构成[1,2]，2种单元及其序列的不同导致其流变性质有所差异。在2种单元结合组成的分子链中，G单元易与二价阳离子形成“蛋盒”结构，所形成的凝胶具有更好的强度和稳定性，不易与其他离子进行离子交换。海藻酸钠溶液流变特性对后续海藻纤维的制备及性能有重要影响，流变特性与甘露糖醛酸/古洛糖醛酸比值(M/G比)、相对分子质量、浓度、温度、pH等因素密切相关[3,4]。近些年来，众多学者从多个角度研究了海藻酸钠溶液的流变特性。陈昌威等[5]采用响应曲面试验考察海藻酸钠溶液流变学行为时证明海藻酸钠浓度与溶液黏度呈正相关。Jiao等[6]发现低分子量的海藻酸钠溶液经酸处理后黏度会明显降低。张杨等[7]考察了NaCl，KCl，Na_2CO_3等电解质对海藻酸钠溶液流变行为的影响，结果表明，Na_2CO_3对体系流变影响最弱；闵洁等[8]发现Ca^{2+}，Cu^{2+}，Fe^{3+}相对Mg^{2+}对海藻酸钠动态黏弹性的影响更大。有研究表明，将海藻酸钠溶液与聚丙烯酸钠（PAAS）、聚氧乙烯（PEO）或聚乙二醇二丙烯酸酯（PEGDMA）等物质混合，能够降低海藻酸钠复合溶液的零剪切黏度和剪切应力，提高溶液可纺性的同时改善湿纺海藻纤维的力学性能[9~12]。

四硼酸钠(STB)是一种具有良好反应活性、水溶性的无机化合物，将硼离子引入海藻酸钠分子中能增强分子间作用力[13]，抑制海藻纤维与碱性溶液接触时离子交换现象的发生，增强海藻纤维的耐盐碱稳定性，目前已成功应用于海藻纤维的制备[14]，但尚无四硼酸钠对海藻酸钠溶液流变行为影响的相关研究。本文首先对2种海藻酸钠原料的M/G比进行测定，使用旋转流变仪详细考察了不同M/G比SA/STB溶液的流变行为，分析了STB浓度、体系温度和SA单元组成（M/G比值）对其流变特性的影响，以期促进海藻纤维纺丝成型性能的提升。

1 实验部分

1.1 原料和仪器

海藻酸钠（HM，HG）：青岛奥极科技有限公司；十水合四硼酸钠：西陇科学股份有限公司。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0069
收稿日期：2024-04-17
通讯联系人：程春祖，主要从事生物源纤维及其工程化研究，E-mail: chunzuc@163.com

红外光谱仪(FT-IR):Nicolet 5700型,美国Thermo Nicolet公司;核磁共振波谱仪:Bruker AV 500型,瑞士Bruker公司;旋转流变仪:Haake MARS III型,德国Haake公司。

1.2　海藻酸钠原料M/G的分析

1.2.1　傅里叶红外吸收光谱分析:将海藻酸钠烘干至恒量,与KBr以1:100质量比混合均匀,在500～4000 cm^{-1}范围内扫描,分峰拟合计算其面积比。

1.2.2　^{13}C交叉极化魔角自旋核磁共振(^{13}C CP-MAS NMR)分析:将海藻酸钠填充至氧化锆转子中,选用4 mm交叉极化魔角自旋核磁探头,测试频率^{13}C设为125.77 MHz、^{1}H设为500.12 MHz,以15 kHz的频率转动。扫描宽度62.5 kHz、采集时间10 ms、循环延迟时间2 s、接触时间2 ms。对谱图分峰拟合。

1.3　SA/STB溶液的制备

取一定量四硼酸钠固体颗粒加入去离子水中,充分搅拌直至完全溶解,制备STB浓度分别为0.00%,0.03%,0.05%和0.10%的交联溶剂体系;加入海藻酸钠粉末,于25 ℃恒温搅拌3 h至其完全溶解,制备海藻酸钠质量分数为5.0%的SA/STB混合溶液,静置脱泡12 h。

1.4　测试与表征

1.4.1　SA/STB的FT-IR表征:将SA/STB溶液于60 ℃真空干燥24 h,研磨成粉后编号测试,与KBr以1:100质量比混合均匀,使用傅里叶变换红外光谱进行表征,利用谱图分析其结构。

1.4.2　SA/STB溶液流变性能测试:采用旋转流变仪对SA/STB溶液进行流变性能测试。半导体控温,温度范围-20～200 ℃,控温精度±0.01 ℃。选择直径为60 mm的转子,间距为1 mm。稳态扫描剪切速率为0.1～100 s^{-1},动态流变测试扫描频率为0.1～100 Hz,测试温度为25～55 ℃,间隔温度为10 ℃。

2　结果与讨论

2.1　海藻酸钠原料M/G比的测定

根据文献[15,16],M和G分别在红外光谱808 cm^{-1}和787 cm^{-1}处存在特征吸收带,通过分峰计算其谱带面积比即可得出M/G比值。Fig.1为海藻酸钠原料HG和HM特征吸收带的红外光谱分峰图,对其分峰积分计算M/G面积比分别为0.51和1.10。

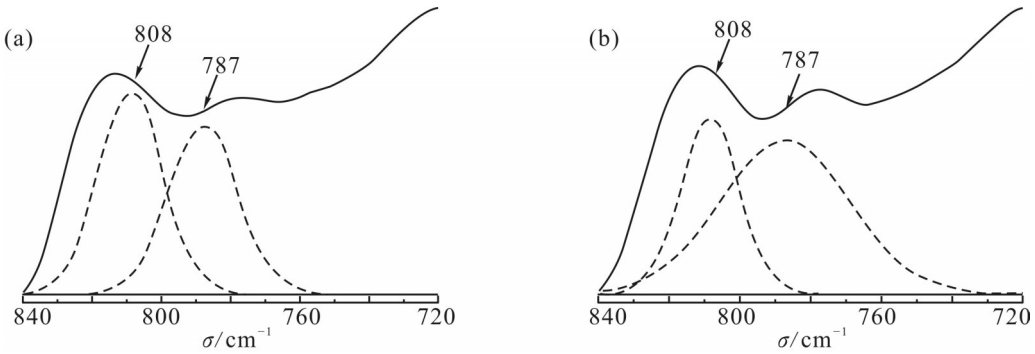


Fig. 1 Infrared spectra of the characteristic absorption bands of alginate samples and the peak splitting results: (a) HG; (b) HM

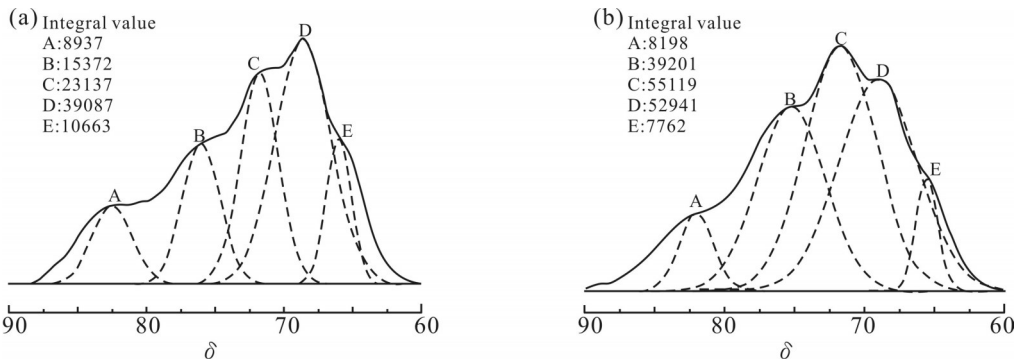


Fig. 2 ^{13}C CP-MAS NMR spectra and split-peak fitting curves of two sodium alginate raw materials: (a) HG; (b) HM

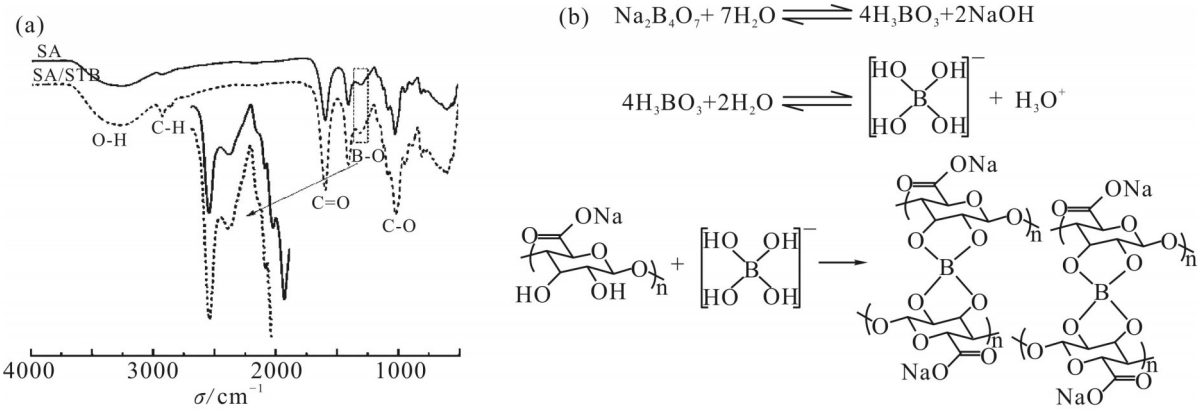


Fig. 3 (a) Infrared spectra of SA/STB and (b) reaction of sodium alginate $Na_2B_4O_7$[14]

Tab. 1 Non-Newtonian index (*n*) and consistency coefficient (*K*) of SA/STB solutions

	t/℃	0.00%		0.03%		0.05%		0.10%	
		HM	HG	HM	HG	HM	HG	HM	HG
n	25	0.735	0.598	0.717	0.597	0.695	0.540	0.576	0.448
	35	0.768	0.637	0.753	0.636	0.734	0.579	0.604	0.503
	45	0.796	0.669	0.784	0.666	0.770	0.617	0.657	0.542
	55	0.821	0.710	0.818	0.696	0.814	0.645	0.666	0.570
K	25	42.658	98.175	57.412	101.158	64.565	138.676	110.154	202.302
	35	34.594	77.983	45.082	78.343	47.534	113.501	95.499	147.011
	45	27.290	63.387	35.237	62.951	36.475	87.700	71.121	122.462
	55	20.701	47.534	24.660	53.211	25.061	73.282	64.863	114.288

海藻酸钠的^{13}C CP-MAS谱图中的峰主要由M或G单元上的1个以上不同碳的峰叠加而成，利用多元曲线分辨对六元环碳（δ60～90）范围曲线进行分峰拟合，能够准确得出2种单体含量，拟合结果准确性高[17]。Fig.2给出了2种海藻酸钠原料^{13}C CP-MAS NMR谱图及分峰结果，通过拟合计算M/G=(B+C)/(A+D+E)，可知HG和HM的M/G比分别为0.65和1.37。

2.2 SA/STB的FT-IR表征

Fig.3(a)中SA溶液与SA/STB溶液的吸收峰基本一致，在3262 cm^{-1}附近出现羟基的O—H伸缩振动峰，在2926 cm^{-1}附近有六元环的C—H伸缩振动峰，在1025 cm^{-1}附近出现C—O伸缩振动峰，在1314 cm^{-1}附近出现了较弱的B—O—C伸缩振动峰，且在750 cm^{-1}和1150 cm^{-1}附近未出现STB特征吸收峰，表明STB成功与SA的邻羟基发生反应，形成了新的共价结构，从而会改变SA溶液的流变响应，并对海藻纤维稳定性产生影响[14]，反应机理如Fig.3(b)所示。

2.3 SA/STB溶液的稳态流变性能

温度、STB浓度是影响SA/STB溶液流变特性的重要因素。Fig.4为不同STB浓度的SA/STB溶液在不同温度下的τ-$\dot{\gamma}$，η_a-$\dot{\gamma}$稳态流变曲线。（$\dot{\gamma}$为剪切速率，单位s^{-1}；η_a为表观黏度，单位Pa·s；τ为剪切应力，单位Pa）

2.3.1 温度对溶液稳态流变性能的影响

（1）温度对非牛顿指数的影响：由Fig.4可知，各SA/STB溶液流变曲线具有相同的变化规律，$\dot{\gamma}$越大、η_a越小，呈“剪切变稀”现象，符合假塑性流体特征，可通过Ostwald-De Wale幂律方程来描述溶液流动行为，方程如式(1)[18]所示。（τ为剪切应力，单位Pa；K为稠度系数；$\dot{\gamma}$为剪切速率，单位s^{-1}；n为非牛顿指数）

对假塑性流体，n<1。n偏离1的程度越大，表明材料的假塑性越强；黏度越大、K值越大。依据式(1)，对数据进行线性拟合，计算斜率可得出非牛顿指

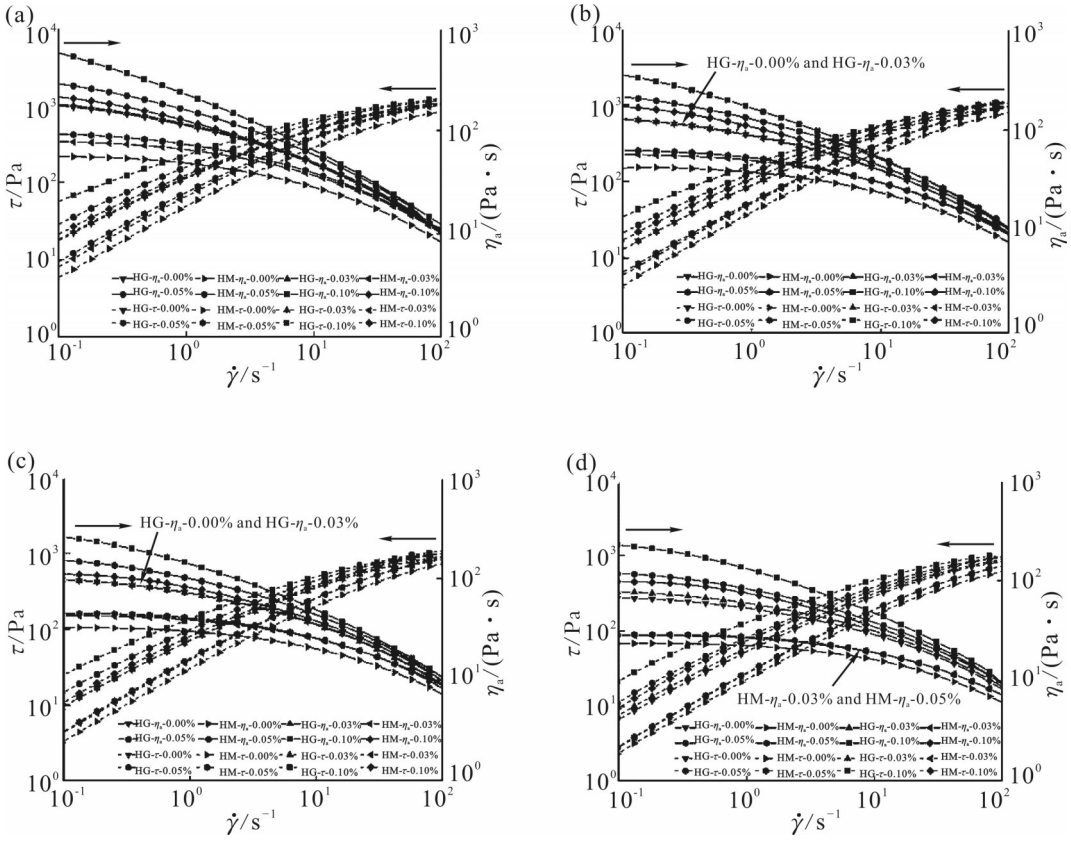


Fig. 4 τ-$\dot{\gamma}$, η_a-$\dot{\gamma}$ rheological curves of SA/STB solutions: (a) 25 ℃; (b) 35 ℃; (c) 45 ℃; (d) 55 ℃

Tab. 2 Structural viscosity index ($\Delta\eta$) of SA/STB solution at different temperatures and concentrations

t/℃	0.00%		0.03%		0.05%		0.10%	
	HM	HG	HM	HG	HM	HG	HM	HG
25	8.965	12.981	9.535	13.019	10.135	14.678	13.523	16.963
35	7.939	11.838	8.412	11.846	8.912	13.629	12.662	15.452
45	7.024	10.888	7.397	10.949	7.884	12.428	11.147	14.363
55	6.291	9.621	6.350	10.022	6.483	11.556	10.828	13.282

数(n),计算直线截距即可得出稠度系数(K),拟合结果如Tab.1所示,

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

从Tab.1中可知,SA/STB溶液的非牛顿指数n<1,属于假塑性流体,在同一温度下,n值随STB浓度增大而减小,K值随STB浓度增大而增大,这是因为STB的加入使原有的分子链构象发生变化,各分子链在硼配位化合物作用下产生了更多的缠结点,分子间形成了更多的氢键,溶液黏度增大,并逐渐向牛顿流体偏离。在同一浓度下,随着温度的升高,n值逐渐增大,K值逐渐减小,这是由于温度升高加剧了分子链的热运动,分子间作用力减弱,缠结点部分打开,导致溶液黏度下降。相同条件下,高M型溶液的n值均大于高G型溶液,K值则相反,可能是因为GG嵌段相比MM嵌段结构更刚性、空间凹陷更明显,在剪切力作用下的旋转位阻更大,不易发生分子滑移,从而导致高G型溶液黏度更高。

(2)温度对结构黏度指数的影响:结构黏度指数$\Delta\eta$是衡量纺丝液可纺性好坏的重要尺度。一般来说,$\Delta\eta$越小,纺丝液的结构化程度越小,可纺性越好。依据式(2),以$\lg\eta_a$对$\dot{\gamma}^{1/2}$作图,即可求得溶液的$\Delta\eta$值,计算结果如Tab.2所示,

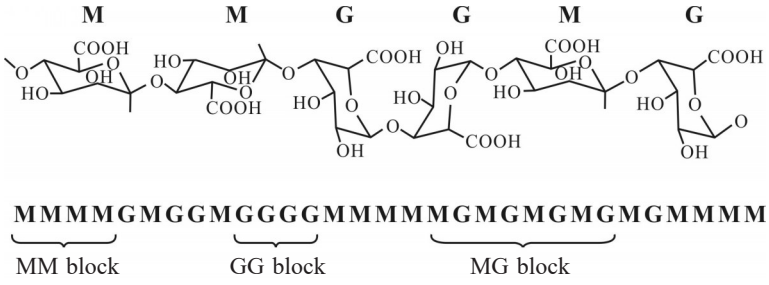


Fig. 5 Module distribution of alginate MM block, GG block, MG block

Tab. 3 E_η of SA/STB solution at different shear rates

	0.03%		0.05%	
	HM	HG	HM	HG
0.010	26.843	23.103	30.987	24.584
0.180	26.223	21.608	30.008	22.363
0.470	24.924	19.558	27.935	19.610
1.230	22.999	17.488	25.239	17.360
4.440	20.089	14.342	21.247	13.746
16.130	15.416	10.776	16.437	9.617
30.420	13.003	7.925	13.957	7.640
57.450	10.571	5.829	11.454	6.091

$$\Delta\eta = -(\mathrm{d}\lg\eta_a/\mathrm{d}\dot{\gamma}^{1/2})\times10^2 \quad (2)$$

式中：$\Delta\eta$——结构黏度指数；η_a——表观黏度，Pa·s；$\dot{\gamma}$——剪切速率，s^{-1}。

在Tab.2中，各浓度的SA/STB溶液的$\Delta\eta$值均大于1，符合“剪切变稀”的流体特征。$\Delta\eta$值随温度升高而降低，随STB浓度增加而升高。这是因为温度升高，海藻酸钠大分子链运动能力增强，新共价结构的形成改变了大分子链构象，导致溶液流动性、可纺性发生变化。

（3）剪切速率对黏流活化能的影响：黏流活化能（E_η）是描述材料黏-温依赖性的物理量，其值越大，说明黏度和流动性对温度的依赖越敏感，依据式(3)[18]，分别选取STB浓度为0.03%和0.05%的SA/STB溶液在不同剪切速率下的黏度值进行拟合，计算其E_η

$$\ln\eta_a(T) = \ln A + E_\eta/RT \quad (3)$$

式中：η_a——表观黏度；A——材料常数；T——绝对温度；R——摩尔气体常数，8.314 J/(mol·K)；E_η——黏流活化能，J/mol。

溶液的黏流活化能不仅与浓度有关，还与原料的相对分子质量、嵌段结构组成及分布等因素有关，具有复杂的多样性[19]。在本文给定的条件下，由Tab.3可知，SA/STB溶液总体上呈现出剪切速率越大、黏流活化能越小的变化趋势。当剪切速率较小时，溶液黏流活化能随STB浓度的增加而增加；当剪切速率较大后，STB浓度对溶液黏流活化能影响作用减弱，这说明提高剪切速率能够有效减轻或消除STB浓度对溶液黏流活化能的影响。从表中还可看出，高M型溶液的黏度更易受温度影响。在制备不同浓度和相对分子质量体系的SA/STB溶液及对其进行湿法纺丝过程中应加强温度控制，减少黏度波动。

2.3.2 STB浓度对溶液稳态流变性能的影响：在Fig.4中，相同温度、相同剪切速率下，STB浓度越大，溶液表观黏度越高，这是因为STB水解后生成的硼的配位化合物与海藻酸分子链上的羟基相结合，促使多条分子链结合形成更高分子量的海藻酸钠组合体，并带来溶液中缠结点密度的增加，分子链段的滑

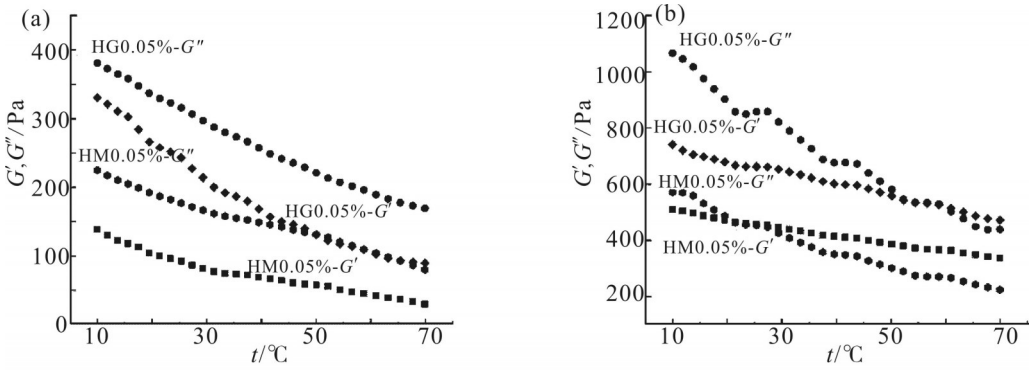


Fig. 6 Dynamic curves of *G'-T*, *G″-T* of SA/STB solution at a specific frequency *ω*: (a) 1.0 Hz; (b) 10.0 Hz

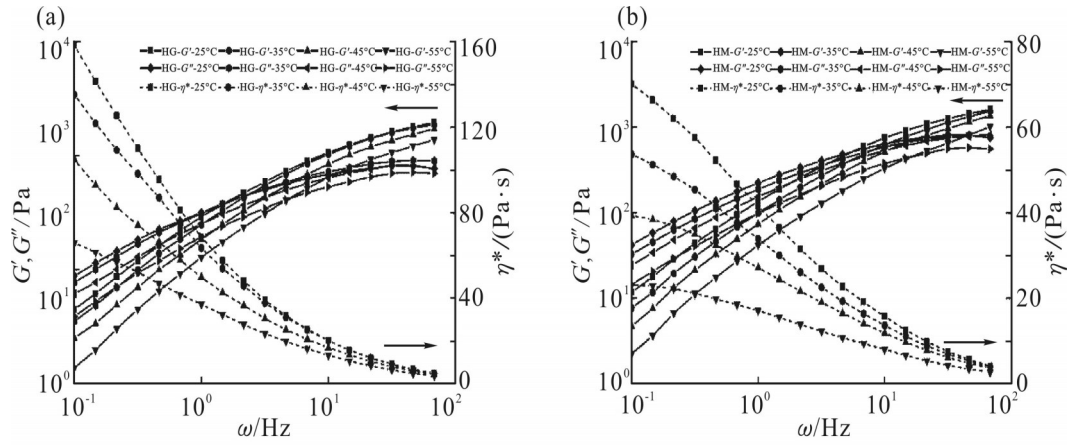


Fig. 7 Dynamic curves of *G'-ω*, *G″-ω*, and *η*-ω* of SA/STB solution at 0.05% sodium tetraborate concentration: (a) HG; (b) HM

移阻碍增大,使得体系黏度增大。随着STB浓度升高,剪切应力和剪切黏度升高。其中,高G型溶液在STB浓度超过0.05%时、高M型溶液在STB浓度超过0.03%时,剪切应力和黏度升高的速度增大,当STB浓度降低到一定程度时,溶液黏度基本不发生变化,说明溶液的交联程度不大,适于纺丝过程中的流动成型。

同一STB浓度的SA/STB溶液流变曲线随温度升高而下移,这是因为随着温度的升高,分子链热运动加快,分子间氢键作用力减小,分子链沿流动方向取向,且溶液体积膨胀、分子间间距增大,使SA/STB溶液剪切应力减小、流动性增强。相同条件下,M/G比值越大,溶液表观黏度越低,这可能是因为多个G单元以1α-4α直立键键合形成的GG嵌段具有更大的旋转位阻,不易发生分子链段滑移,从而为高G型SA/STB溶液提供了更高的黏度(Fig.5)。

结合非牛顿指数、结构黏度指数和黏流活化能与剪切速率、温度的变化规律可知,STB浓度和G单元含量增加会导致SA/STB溶液的表观黏度增大,流动性和可纺性降低。因此,在纤维生产过程中,须合理控制四硼酸钠添加量、选择特定M/G比值的海藻酸钠原料、保持加工温度恒定,在保证纺丝液稳定性、可纺性较好的基础上实现海藻纤维的性能优化。

2.4　SA/STB溶液的动态流变性能

2.4.1　*温度对溶液动态流变性能的影响*:海藻酸钠溶液是弹性与黏性的复合体,即储能模量(*G'*)的变化主要与溶液内部弹性形变相关,损耗模量(*G″*)的变化主要与溶液黏性变化相关。Fig.6示出了STB浓度为0.05%时,SA/STB溶液在变温条件下其储能模量和损耗模量的变化,Fig.7示出了SA/STB溶液在不同温度时其储能模量、损耗模量和复数黏度(*η**)随频率(*ω*)的变化情况。

在同一频率下,随着温度的升高,储能模量和损耗模量均降低,这是因为温度升高加剧了分子链无

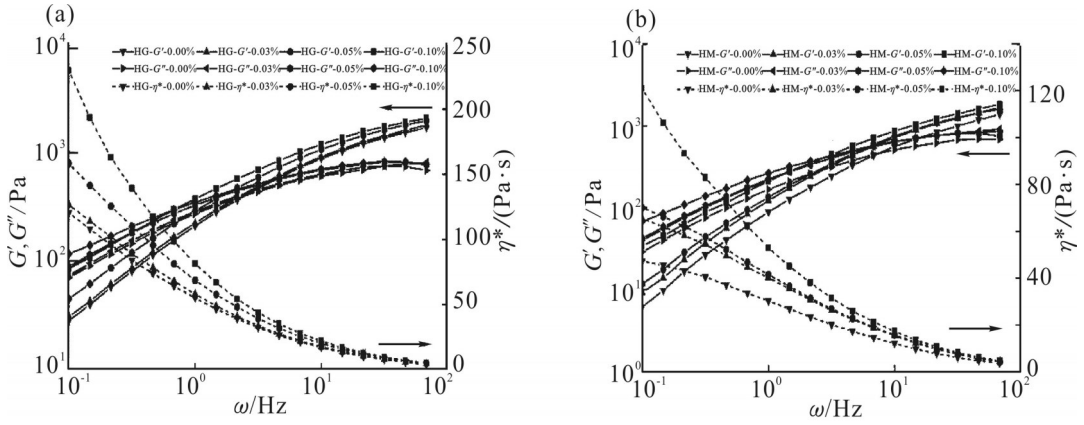


Fig. 8 Dynamic curves of *G*'-*ω*, *G*''-*ω*, and *η-*ω* of SA/STB solution at a temperature of 25 °C: (a) HG; (b) HM**

规则运动，溶液发生形变所需的力变少，储能模量降低；随着缠结点数量变少，分子链运动更加容易，需要消耗的能量变少，损耗模量降低[20]，如Fig.6所示。在STB浓度不变的情况下，频率相同时，复数黏度随温度升高而减小，说明温度升高，体系黏度降低，与稳态流变时表观黏度变化规律相同。溶液损耗模量与储能模量的比值，即损耗因子（tan δ）随频率的增大而减小，且当频率较低时，在外界剪切应力作用下，链段开始松弛，溶液保持液态状态，此时tan δ > 1，说明溶液黏性占主导地位；当频率增大至一定程度后，tan δ < 1，说明此时溶液弹性占主导地位，有向固体转变趋势，且温度越低越有利于这种转变。

2.4.2 STB浓度对溶液动态流变性能的影响：Fig.8示出了不同STB浓度的SA/STB溶液在25 ℃的动态流变曲线。温度恒定时，同一频率下的SA/STB溶液储能模量和损耗模量随STB浓度增大而增大。这说明硼离子的引入使得体系中缠结点密度增加，分子链运动受到阻碍，溶液发生形变所需的力和所消耗的能量增加。且由于GG嵌段具有更高的结构刚性，不易发生链段滑移，进而需要更高的能量维持分子链运动，导致在低频率下高G型溶液储能模量和损耗模量均较高。在相同频率下，溶液复数黏度随STB浓度增加而增加，这说明STB浓度越大，体系缠结点或交联点越多，溶液的流动阻力越大。不同浓度SA/STB溶液的复数黏度均随频率的增大而减小，这是因为随着频率的增加，溶液中的剪切应力同步增加，分子链间缠结点更易被打开，从而呈现出“剪切变稀”现象。

3 结论

（1）STB通过与SA结构单元的邻羟基脱水缩合形成具有稳定结构的“B—O”共价键，使空间缠结点数目增加，分子链间相互作用力增强，进而影响SA/STB溶液的流变特性。研究表明，SA/STB溶液属于具有“剪切变稀”特征的假塑性非牛顿流体。

（2）SA/STB溶液黏度和模量随体系温度升高而降低，随STB浓度和G单元含量增加而增大。高M型溶液具有更好的流变性和可纺性，升高温度或提高剪切速率能够削弱GG嵌段刚性结构的影响，改善高G型溶液流动性，有利于纺丝加工中的流动成型。

（3）在对溶液加工成型时，可利用本文工作原理指导不同M/G比值SA/STB溶液的纺丝温度、交联剂浓度及剪切速率的选择，实现海藻纤维的高品质制备。

参考文献：

[1] Madsen M, Westh P, Khan S, *et al*. Impact of alginate mannuronic- guluronic acid contents and pH on protein binding capacity and complex size[J]. Biomacromolecules, 2021, 22: 649-660.

[2] Varaprasad K, Jayaramudu T, Kanikireddy V, *et al*. Alginate-based composite materials for wound dressing application:a mini review[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 236: 116025.

[3] 王元兰, 李忠海, 张乐华. 低浓度海藻酸钠的流变性及影响因

素研究[J]. 食品与机械, 2008, 24(1): 29-31.
Wang Y L, Li Z H, Zhang L H. Study on the rheology and the influence factor of low-concentration sodium alginate solution[J]. Food & Machinery, 2008, 24(1): 29-31.

[4] Yang L J, Guo J, Yu Y, *et al*. Hydrogen bonds of sodium alginate/antarctic krill protein composite material[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 142: 275-281.

[5] 陈昌威, 付靖雯, 沈祥皓, 等. 海藻酸钠的流变学特性及影响黏度因素研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(1): 99-108.
Chen C W, Fu J W, Shen X H, *et al*. Study of rheological properties of sodium alginate and influencing factors on its viscosity[J]. China Food Additives, 2024, 35(1): 99-108.

[6] Jiao W X, Chen W X, Mei Y Q, *et al*. Effects of molecular weight and guluronic acid/mannuronic acid ratio on the rheological behavior and stabilizing property of sodium alginate[J]. Molecules, 2019, 24: 4374-4385.

[7] 张杨, 梁洪超, 刘海祥, 等. 不同电解质对海藻酸钠水溶液流变性能的影响[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2013, 26(2): 57-61.
Zhang Y, Liang H C, Liu H X, *et al*. Effect of electrolyte on the rheological behaviors of sodium alginate solutions[J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2013, 26(2): 57-61.

[8] 闵洁, 王莉莉. 金属离子对海藻酸钠糊料黏弹性行为的影响[J]. 纺织学报, 2011, 32(6): 79-86.
Min J, Wang L L. Effect of metal ions on viscoelastic behavior of sodium alginate paste[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32 (6): 79-86.

[9] Dodero A, Vicini S, Alloisio M, *et al*. Sodium alginate solutions: correlation between rheological properties and spinnability[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 8034-8046.

[10] Dodero A, Vicini S, Castellano M. Depolymerization of sodium alginate in saline solutions via ultrasonic treatments: a rheological characterization[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106128.

[11] Li S S, Chandra Biswas M, Ford E. Dual roles of sodium polyacrylate in alginate fiber wet-spinning: modify the solution rheology and strengthen the fiber[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 297: 120001.

[12] Zhou W D, Zhang H, Liu Y F, *et al*. Sodium alginate-polyethylene glycol diacrylate based double network fiber: rheological properties of fiber forming solution with semi-interpenetrating network structure[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 142: 535-544.

[13] 夏延致, 田星, 成芳芳, 等. 一种耐盐 耐洗涤剂海藻纤维的制备方法:中国, 201510178880.6[P]. 2017-01-18.

[14] 田星, 徐为, 沙源, 等. 耐盐耐洗涤剂海藻纤维的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(1): 147-151.
Tian X, Xu W, Sha Y, *et al*. Preparation and properties of salt-tolerant and detergent- resistant alginate fiber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(1): 147-151.

[15] Mackie W. Semi-quantitative estimation of the composition of alginates by infra-red spectroscopy[J]. Carbohydrate Research, 1971, 20: 413-415.

[16] Mollah M, Faruque M, Bradley D, *et al*. FTIR and rheology study of alginate samples: effect of radiation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, 202: 110500.

[17] Salomonsen T, Jensen H M, Larsen F H, *et al*. Alginate monomer composition studied by solution- and solid- state NMR- a comparative chemometric study[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23: 1579-1586.

[18] 郑强. 高分子流变学[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 22-27.

[19] 郭静, 陈前赫, 陈立岩, 等. 海藻酸钠的流变性及其纤维性能研究[J]. 合成纤维工业, 2013, 36(1): 28-31.
Guo J, Chen Q H, Chen L Y, *et al*. Rheological behavior of sodium alginate and its fiber properties[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2013, 36(1): 28-31.

[20] 余美琼, 袁红梅, 陈礼辉. 纤维素/氯化锂/N,N-二甲基乙酰胺溶液的流变性能[J]. 纺织学报, 2021,42(5):23-30.
Yu M Q, Yuan H M, Chen L H. Rheological properties of cellulose/LiCI/N,N- dimethylacetamide solution[J]. Journal of Textile Research, 2021,42(5):23-30.

Rheological Properties of Sodium Alginate/Sodium Tetraborate Aqueous Solution

Lei Zhu[1], Min Cheng[2], Xiaojun Li[2], Chunzu Cheng[1,2], Jigang Xu[1,2]

(*1. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;*
2. State Key Laboratory for Bio-Based Fiber Materials, China Textile Academy, Beijing 100025, China)

ABSTRACT: In sodium alginate (SA)/sodium tetraborate (STB) aqueous solution, STB can affect the formation of inter and intramolecular chemical bonds of SA, which in turn changes the rheological response of its solution. In order to investigate the changing rules of rheology and spinnability of SA/STB solutions, the effects of STB concentration, system temperature, SA unit composition and other factors on the rheological behavior of their solutions were investigated. The results show that covalent cross-linking occurs between SA and STB, and the SA/STB solution is a pseudoplastic fluid. The apparent viscosity, structural viscosity index, viscous flow activation energy and dynamic modulus decrease with increasing temperature and increase with increasing STB concentration, while the opposite is true for the non-Newtonian index. The SA/STB solution with a high M/G ratio has better spinnability and is more sensitive to temperature. Increasing temperature and shear rate can improve the fluidity of solutions with a low M/G ratio, and the appropriate cross-linking concentration and temperature control interval can be selected according to the actual situation when processing and molding.

Keywords: sodium alginate; temperature; M/G ratio; concentration of sodium tetraborate; steady state rheology; dynamic rheology