

文章编号:1006-9941(2025)08-0836-11

低分子凝胶剂和金属颗粒对JP-10凝胶燃料流变特性的影响

徐一清,杨卫娟,张帆,刘建忠,樊建人

(浙江大学热能工程研究所,能源高效清洁利用全国重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘要: 为了研究铝粉粒径和凝胶剂浓度对含能凝胶燃料流变性能的影响规律,以双丙酮-D-甘露糖醇为低分子凝胶剂,改变凝胶剂浓度、铝粉粒径及添加量,制备了系列JP-10基含能凝胶燃料。采用旋转流变仪系统测试了凝胶的稳态剪切特性、触变回复性能和动态振荡特性等,分析了凝胶剂浓度、铝粉浓度、铝粉粒径、温度以及表面活性剂浓度对体系流变行为的作用机制。结果表明,凝胶具有显著的剪切变稀特性,当剪切速率从 0.01 s^{-1} 增至 100 s^{-1} 时,表观黏度下降约4个数量级。提高凝胶剂浓度可同步增强凝胶的剪切黏度、触变回复率及屈服应力,使模量的频率依赖性增强。添加铝粉会明显增加凝胶黏度和松弛时间,且纳米铝粉的影响较微米铝粉更明显,并随着铝粉浓度的增加而提升。此外,表面活性剂和温度对凝胶流变性能也有一定的影响。随着表面活性剂浓度和温度的升高,凝胶体系的黏度、储能模量及耗能模量均呈现下降趋势。

关键词: 凝胶;含能燃料;低分子凝胶剂;流变特性;黏度

中图分类号: TJ5;V231.1

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025091

0 引言

凝胶作为一种新型含能燃料,兼具液体燃料和固体燃料的优点,具有广泛的应用前景^[1]。凝胶剂的选择直接影响燃料的流变特性及其长期储存稳定性^[2],其中,低分子凝胶剂的应用具有重要意义。研究表明,低分子凝胶剂能显著降低凝胶体系的最低凝胶浓度(CGC)。例如,Liu等^[3]合成的自制低分子凝胶剂CGC降远低于传统的二氧化硅(SiO_2)和改性氢化蓖麻油(Thixatrol ST),表明低分子凝胶剂具有明显的优势。此外,低分子凝胶剂制备的凝胶燃料具有独特的热可逆特性,在相变点温度时凝胶将转变为液相,有利于雾化燃烧,而常态下恢复凝胶状态保障储存安全^[3]。Cao等^[4]发现以甘露醇衍生物凝胶化的JP-10燃料表现出更强的剪切变稀行为,这对燃料喷射过程具有积

极意义,进一步提升了凝胶燃料在实际应用中的可操作性。凝胶剂含量和温度对流变性能的影响已得到广泛研究。Sun等^[5]研究表明,提高凝胶剂含量可显著增强凝胶的稳定性,而温度升高则会减弱凝胶网络对分子的限制作用,从而影响体系的流变特性。金属颗粒添加剂的浓度和种类是影响凝胶流变性能的另一关键因素。研究证实,随着纳米铝颗粒浓度的增加,凝胶燃料的稠度系数和幂律指数逐渐提升,凝胶黏度大幅增加^[6],剪切变稀特性更加显著^[7]。Chen等^[8]通过对比不同种类和浓度的含能颗粒发现,纳米铝粉对凝胶结构的强化作用明显优于纳米硼粉。凝胶黏度过高,雾化及燃烧过程会受到阻碍,影响金属化凝胶推进剂的应用。Zhao等^[9]将少量纳米碳粉添加到高浓度含铝凝胶配方中,有效增强了含铝凝胶的剪切变稀性能,降低凝胶的触变性。

在实际工程应用中,凝胶剂、金属颗粒和表面活性剂等因素通常相互作用,综合影响凝胶燃料的流变特性及其雾化燃烧性能。针对含能凝胶燃料流变性能影响因素的系统研究仍有待完善,因此,开展系统化多因素的研究,深入探讨凝胶剂与金属颗粒之间的相互作用及其对凝胶流变行为的影响机制,是当前科研中的重要课题。

收稿日期:2025-05-07;修回日期:2025-06-10

网络出版日期:2025-08-24

基金项目:国家自然科学基金(U2341283)

作者简介:徐一清(2001-),女,硕士生,主要从事含能燃料流变研究。e-mail:22327146@zju.edu.cn

通信联系人:杨卫娟(1976-),女,博士生导师,主要从事高能燃料燃烧。e-mail:yangwj@zju.edu.cn

引用本文:徐一清,杨卫娟,张帆,等.低分子凝胶剂和金属颗粒对JP-10凝胶燃料流变特性的影响[J].含能材料,2025,33(8):836-846.

XU Yi-qing, YANG Wei-juan, ZHANG Fan, et al. Influence of Low-molecular-weight Gelators and Aluminum powder Powders on the Rheological Properties of JP-10 Gel Fuel[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(8):836-846.

JP-10(挂式四氢双环戊二烯,化学式 $C_{10}H_{16}$)因其优异的综合性能而成为应用最广泛的高能燃料之一^[10]。具体而言,JP-10 具有较高的能量密度($0.94\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、极低的凝固点($-79\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及显著的热值($42\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$),因此在航空航天推进系统等领域具有重要的应用价值。铝粉具有熔点低、金属活性适中、贮存稳定性好、耗氧量低、密度高等特点,原材料丰富且成本较低,是一种理想的金属燃料。双丙酮-D-甘露糖醇作为一种低分子化合物,具有优异的化学稳定性以及与 JP-10 的相容性,展现出良好的凝胶形成能力,可以作为新型低分子凝胶剂使用。针对上述问题,本研究以 JP-10 为基础燃料、双丙酮-D-甘露糖醇为凝胶剂、铝粉为金属添加剂,系统研究凝胶剂与铝粉对 JP-10 凝胶剪切特性、触变特性及线性黏弹的影响,并分析表面活性剂与温度带来的性能变化,旨在为后续含能凝胶燃料的雾化燃烧设计提供理论依据。

1 实验部分

1.1 试剂及仪器

材料:JP-10(99%,武汉迈凯瑞化工有限公司),双丙酮-D-甘露糖醇(97%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司,以下简称凝胶剂 DA),微米级铝粉(99.95%, $25\text{ }\mu\text{m}$,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)及纳米级铝粉(99.9%, 50 nm 、 500 nm ,上海茂果纳米科技有限公司),Span-80(失水山梨糖醇脂肪酸酯,99.5%,源叶生物)。

主要仪器:85-2 数显恒温磁力搅拌器,杭州仪表电机有限公司;JT2003DA 精密电子天平,上海力辰仪器科技有限公司;SK5210HP 超声清洗仪,上海科导超声仪器有限公司;Anton Paar MCR302 流变仪,Anton Paar。

1.2 凝胶燃料的制备

研究制备了含铝粉与不含铝粉的两种 JP-10 凝胶燃料。

将 20 g JP-10 燃料预热至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,加入质量分数为 $2\%\sim 4\%$ 的凝胶剂 DA,在磁力搅拌器中以 $1000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速搅拌 15 min ,随后超声处理 10 min ,获得均匀分散的 JP-10 凝胶。将样品转移至样品瓶,静置 1 h 后倒置观察,若 1 min 内无液体流动现象,判断为凝胶形成^[11],得到凝胶燃料 JP-10/ x DA($x=2\%,3\%,4\%$)。在室温下,凝胶呈现静止的固体状态。制备的凝胶燃料如图 1 左图所示。

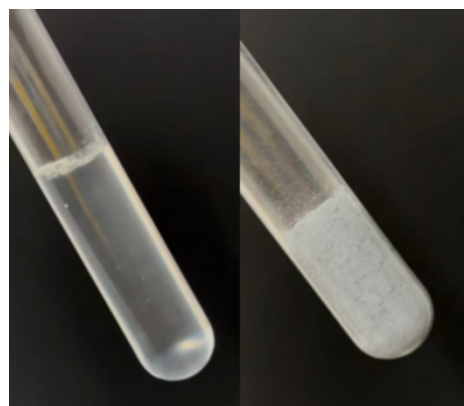


图 1 JP-10/3% DA(左)和 JP-10/3% DA/10% Al($25\text{ }\mu\text{m}$)(右)
Fig.1 JP-10/3% DA(left) and JP-10/3% DA/10% Al($25\text{ }\mu\text{m}$)(right)

同理,将 JP-10 燃料预热加入凝胶剂 DA,搅拌混合 15 min ,再将凝胶转移至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴环境中,分别称取粒径为 $25\text{ }\mu\text{m}$, 500 nm 以及 50 nm 、质量分数为 $5\%\sim 25\%$ 的铝粉,缓慢添加至凝胶中,在磁力搅拌器中以 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速混合搅拌 15 min ,随后超声处理 10 min ,使金属颗粒均匀分散,得到凝胶燃料 JP-10/ x DA/ y Al(w),其中 $x=2\%,3\%,4\%$; $y=5\%,10\%,15\%,20\%,25\%$, w 为铝粉粒径,分别为 $25\text{ }\mu\text{m}$, 500 nm 以及 50 nm 。

为探究表面活性剂的影响,在 JP-10/3% DA/10% Al($25\text{ }\mu\text{m}$)中同步加入质量分数为 $0.1\%\sim 1.0\%$ 的 Span-80,得到凝胶燃料样品为 JP-10/3%DA/10%Al($25\text{ }\mu\text{m}$)/ z Span-80($z=0.1\%,0.4\%,0.7\%,1.0\%$)。

1.3 测试方法

凝胶的流变行为主要源于其内部三维网络结构的普遍存在以及微观尺度的非均质特征。在诸多流变特性中,剪切变稀特性、触变特性以及动态黏弹特性是研究重点,这些特性与胶体颗粒间的相互作用直接相关^[12]。凝胶燃料的剪切变稀特性在工程应用作用显著,是凝胶推进剂的装载效率优化的重点。具体而言,凝胶燃料在静态条件下黏度越高,在运输和储存过程中的稳定性越高;在动态输送过程中,黏度经过剪切作用降低,有利于液滴的分散,从而提升了雾化燃烧性能^[13]。为此,研究采用流变仪在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下进行流变学表征。测试过程中流变仪采用平行板转子,平行板直径为 50 mm ,平行板间距设定为 1 mm 。每次实验待凝胶恢复为稳态后再进行测试。

(1) 稳态剪切测试:控制流变仪剪切速率在 $0.01\sim 100\text{ s}^{-1}$ 之间,测定不同剪切速率下黏度;

(2) 触变回复测试:在 $10\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的固定角频率下,分 3 个阶段连续对凝胶燃料施加剪切应变。阶段

一先施加应力,使凝胶燃料剪切应变达到0.1%,持续100 s;阶段二施加应力,使凝胶剪切应变达到300%,持续100 s;阶段三施加应力,使凝胶剪切应变达到0.1%,持续200 s,观察凝胶的回复情况;

(3)振幅扫描测试:振荡角频率控制在 $10 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,剪切应变范围在0.01%~100%间变化,记录应变数据;

(4)应力松弛测试:持续施加200 s的1%剪切应变,测试凝胶在恒定应变下的松弛模量;

(5)频率扫描测试:应变控制在0.01%,振荡角频率范围在 $0.5\sim 100 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 间变化,观察凝胶模量。

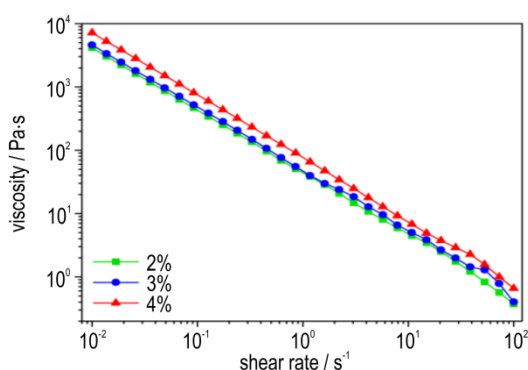
2 结果与讨论

2.1 凝胶剂浓度及铝粉颗粒对剪切变稀特性的影响

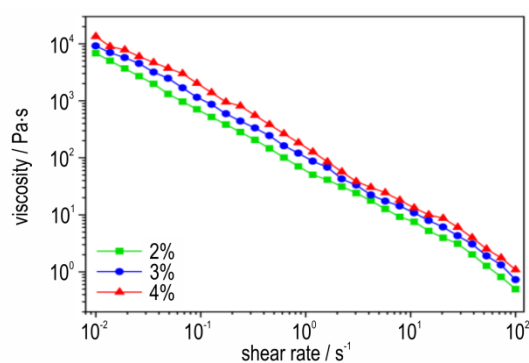
为了观察凝胶在不同剪切速率下黏度的剪切变稀行为,实验采用稳态剪切测试对不同的样品进行性能表征,得到不同样品的黏度曲线如图2所示。所有测试凝胶样品表现出典型的剪切稀化行为,剪切黏度随剪切速率的增加呈显著下降趋势,当剪切速率从 0.01 s^{-1} 增至 100 s^{-1} 时,凝胶的黏度下降至初始值的0.1%以下

($<1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$),降幅达4个数量级。这一现象表明,凝胶体系在剪切作用下,其内部网络结构逐渐遭到破坏,导致黏度大幅降低。此外,还可以看出凝胶体系的剪切黏度与凝胶剂浓度呈正相关关系,这是由于高浓度凝胶剂能够形成更紧密的内部网状结构,增加分子键之间的联结^[14]。如图2a所示,JP-10/4% DA的黏度显著高于JP-10/2% DA和JP-10/3% DA。JP-10/3% DA的黏度约为JP-10/2% DA的1.12倍,而JP-10/4% DA的黏度达到JP-10/2% DA的1.68倍。然而,不同凝胶剂浓度导致的黏度差异随剪切速率的提高而减小。且当剪切速率为 0.01 s^{-1} 时,JP-10/3% DA的黏度较JP-10/2% DA增加11.09%,当剪切速率为 100 s^{-1} 时,增幅降至8.17%。这一现象可归因于高剪切速率下,凝胶三维网络失去刚性^[14],凝胶剂与JP-10之间的氢键发生了断裂,削弱了对凝胶内部体系黏度的增强作用,从而导致不同凝胶剂浓度凝胶黏度差异减小。

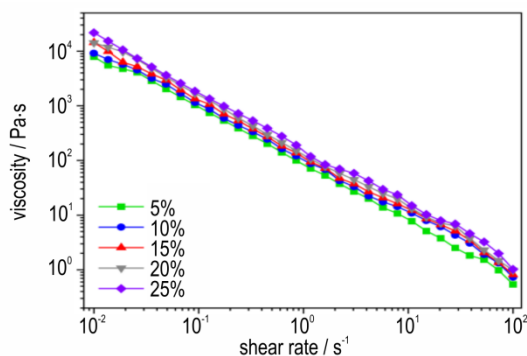
为对比铝粉对凝胶燃料的影响,研究参考Chen等^[8]的研究结果,即铝粉质量分数为10%时,凝胶燃料的机械强度最大,测试了JP-10/xDA/10% Al($25 \mu\text{m}$)凝胶燃料的剪切稀化行为,结果如图2b所示,可以看



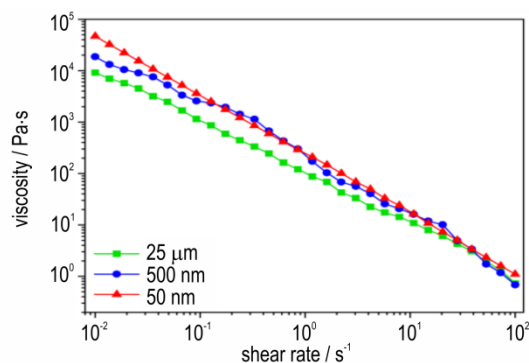
a. JP-10/xDA ($x=2\%, 3\%, 4\%$)



b. JP-10/xDA/10% Al ($25 \mu\text{m}$) ($x=2\%, 3\%, 4\%$)



c. JP-10/3% DA/ γ Al ($25 \mu\text{m}$) ($\gamma=5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$)



d. JP-10/3% DA/10% Al (w) ($w=25 \mu\text{m}, 500 \text{ nm}, 50 \text{ nm}$)

图2 凝胶剪切黏度曲线

Fig.2 Viscosity curve of different gel fuel

到,铝粉的加入大幅提高了凝胶体系的黏度,当剪切速率为 0.01 s^{-1} 时,与未添加金属时相比(图 2a),JP-10/xDA/10% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 凝胶黏度分别增加 64.57%,98.91% 和 87.14%,当凝胶剂浓度为 3% 时,铝粉颗粒对凝胶燃料黏度的增强效果最显著。为此,研究进一步探究了铝粉含量对凝胶流变性能的影响,测试了 JP-10/3% DA/ γ Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 的黏度曲线,结果如图 2c 所示,观察到黏度随铝粉含量的增加而递增,铝粉对凝胶的影响在低剪切速率下尤为突出。以剪切速率 0.01 s^{-1} 为例,JP-10/3% DA/5% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 和 JP-10/3% DA/20% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 较未添加铝粉的凝胶分别提升了 70.93% 和 208.17%。当剪切速率增加到 100 s^{-1} 时,JP-10/3% DA/5% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 和 JP-10/3% DA/20% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 的黏度增幅相应减少至 34.30% 和 143.65%。铝粉颗粒质量分数的增长带动凝胶体系中固相比比例大幅度提升,减少了液相分子间的自由接触^[15],颗粒-颗粒相互作用和颗粒-凝胶网络的协同效应共同引发黏度的增加。

研究同时对比了铝粉粒径分别为 $25\text{ }\mu\text{m}$, 500 nm 和 50 nm 的微米级和纳米级铝粉对凝胶燃料的影响,结果如图 2d 所示。当铝粉粒径为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 时,凝胶整体黏度更小,这一结果与文献^[16]报道一致。纳米级铝颗粒的加入增大了凝胶的比表面积,导致颗粒间相互作用力增强,进而使体系黏度升高,因此,铝粉粒径为 50 nm 和 500 nm 时,凝胶黏度更大,其中 50 nm 铝粉对黏度的增强效应最为显著。铝粉粒径对黏度的影响随着剪切速率的提高而减弱,剪切作用可有效抑制粒径对流变性能的影响。随着剪切速率的增大,添加 500 nm 和 $25\text{ }\mu\text{m}$ 铝粉的凝胶黏度与 50 nm 的差异逐渐缩小。

为定量说明其影响作用,研究使用非牛顿流体幂律模型来表征不同凝胶燃料的剪切特性^[17],公式见式(1),并得到不同凝胶燃料的幂律曲线拟合值见表 1。

$$\eta = K \cdot \gamma^{n-1} \quad (1)$$

式中, η 为表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; K 为稠度指数, $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$; n 为剪切指数; γ 为剪切速率, s^{-1} 。

通常剪切指数 n 位于 $0\sim 1$ 之间, n 越趋向于 1 表明燃料的牛顿特性越明显, n 越趋向于 0 表明燃料的剪切变稀性能越好^[3]。稠度指数 K 是衡量流体黏度大小的指标, K 值越大,黏度越大。因此,由表 1 可以看到, n 基本均小于 0.02,表明凝胶燃料剪切稀化能力良好。铝粉颗粒加入后, K 值增加,但 n 由正变为负,表现出更突出的稀化能力。在不同凝胶剂浓度条件

下,JP-10/3% DA 的剪切稀化能力相对较弱;在不同铝粉颗粒浓度下,JP-10/3% DA/20% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 的 n 值最低,其次分别为 JP-10/3% DA/5% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$) 和 JP-10/3% DA/25% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)。此外,当剪切速率提升至 0.1 s^{-1} 以上时,添加 500 nm 与 50 nm 铝粉的凝胶燃料在黏度表现上差异极小,并且添加 50 nm 铝粉时的剪切稀化能力更优异。

表 1 凝胶燃料幂律曲线拟合参数

Table 1 Coefficient values of gel fuel fitted with power law mode equation

sample	K	n	R^2
JP-10/2% DA	44.28	0.0104	0.9995
JP-10/3% DA	50.47	0.0218	0.9991
JP-10/3% DA	75.20	0.0047	0.9997
JP-10/2% DA/10% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)	68.56	0.0057	0.9985
JP-10/3% DA/10% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)	105.83	-0.0039	0.9985
JP-10/4% DA/10% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)	151.95	-0.0213	0.9973
JP-10/3% DA/5% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)	84.10	-0.0338	0.9989
JP-10/3% DA/15% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)	122.46	-0.0213	0.9986
JP-10/3% DA/20% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)	181.34	-0.0424	0.9961
JP-10/3% DA/25% Al ($25\text{ }\mu\text{m}$)	169.36	-0.0286	0.9983
JP-10/3% DA/10% Al (500 nm)	192.30	-0.1001	0.9910
JP-10/3% DA/10% Al (50 nm)	237.90	-0.1497	0.9998

Note: K is consistency coefficient. n is flow behavior index. R^2 is determination coefficient.

2.2 凝胶剂浓度及铝粉颗粒对触变特性的影响

稳态剪切测试是研究凝胶流变性能的基础实验,能够揭示凝胶在不同剪切条件下的流动行为。然而,稳态剪切测试无法表征其动态响应和结构恢复能力。因此,在稳态剪切测试的基础上,研究进行了触变回复测试,以探究凝胶在剪切作用后的结构恢复行为。触变性是一种随时间变化的流变特性,在凝胶燃料的进料和雾化过程中起着至关重要的作用^[18]。凝胶结构的重新建立将会增加黏度,造成燃料系统的压力损失^[3],因此,相对较弱的触变回复能力对凝胶应用更有利。采用触变回复实验测量凝胶复数剪切模量,以评估凝胶触变回复能力。复数剪切模量^[19]定义如式(2)所示:

$$G^* = G' + iG'' \quad (2)$$

其中, G' 代表储能模量, G'' 代表损耗模量, i 是虚数单位。 G' 反应由于应力储存的能量,代表弹性部分; G'' 反应由于剪切引起的散热导致的能量损失,代表黏性部分。凝胶的触变回复行为可以通过 G' 和 G'' 的变化来表征。图 3 给出了 JP-10/xDA 凝胶的触变回复曲线,不同凝胶剂浓度凝胶的 G' 和 G'' 在触变回复过程

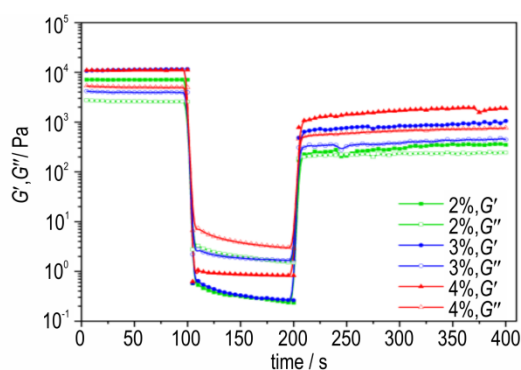


图3 JP-10/xDA($x=2\%$, 3% , 4%)的触变回复曲线

Fig.3 The failure and recovery curve of JP-10/xDA($x=2\%$, 3% , 4%)

中表现出相似的变化趋势。凝胶按照受到的剪切应变分为三个阶段,阶段一为 0.1% ;阶段二为 300% ;阶段三为 0.1% 。在阶段一, G' 和 G'' 维持在 $10^3\sim 10^4$ Pa左右,基本保持稳定;在阶段二,凝胶在 300% 的应变作用下遭到破坏, G' 和 G'' 急剧下降到 10 Pa以下;当阶段三应变减小至 0.1% 时,凝胶能够瞬时回复,但回复后的 G' 和 G'' 均低于阶段一,集中在 $10^2\sim 10^3$ Pa左右。

研究采用回复率(定义为触变回复测试阶段三和阶段一的平均 G' 比值)定量表征了凝胶剂浓度、铝粉添加及其粒径对凝胶触变回复能力的影响,结果如图4所示。

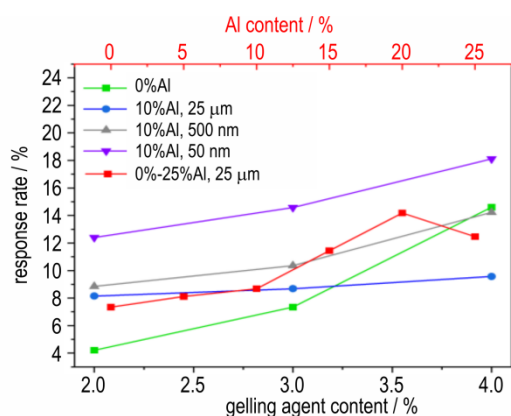


图4 JP-10/x DA($x=2\%$, 3% , 4%), JP-10/3% DA/10% Al(w)($w=25\ \mu\text{m}$, $500\ \text{nm}$, $50\ \text{nm}$)和 JP-10/3% DA/ y Al($25\ \mu\text{m}$)($y=0\%$, 5% , 10% , 15% , 20% , 25%)的凝胶回复率曲线

Fig.4 Recovery rate curve of JP-10/x DA($x=2\%$, 3% , 4%), JP-10/3% DA/10% Al(w)($w=25\ \mu\text{m}$, $500\ \text{nm}$, $50\ \text{nm}$) and JP-10/3% DA/ y Al($25\ \mu\text{m}$)($y=0\%$, 5% , 10% , 15% , 20% , 25%)

不同凝胶剂浓度的凝胶回复率存在显著差异。经过剪切破坏后,JP-10/xDA凝胶回复率分别为 4.21% , 7.34% 和 14.60% ,表明凝胶剂浓度增加有利于内部分子间的联结,产生更多的分子链或交联点,形成更稳定

的弹性结构,增强凝胶的触变回复能力。添加铝粉后,JP-10/2% DA和JP-10/3% DA的回复率上升,但JP-10/4% DA的回复率大幅度下降。此外,当铝粉质量分数从 0% 增至 25% 时,回复率呈现先上升后下降的趋势,峰值出现在中间浓度。可见铝粉的添加对凝胶的触变回复能力具有双重影响。在低凝胶剂浓度下,铝粉的添加显著提升了回复率,而在高凝胶剂浓度下,其提升效果减弱甚至出现降低。分析认为当铝粉浓度低于临界值时,凝胶内部的交联性得到增强,铝粉颗粒促进凝胶三维网络结构的生成。但当铝粉浓度高于临界值时,过量铝粉颗粒引发团聚,压缩了凝胶网络^[20],破坏分散均匀性,凝胶网络结构被扰乱,凝胶整体的稳定性和弹性降低,最终导致凝胶回复能力下降^[21]。铝粉的添加会削弱凝胶剂浓度对回复率的影响,在纳米铝粉体系中尤为明显。

铝粉粒径对凝胶的触变回复能力具有明显影响,当添加 $50\ \text{nm}$ 铝粉时,JP-10/3% DA凝胶的 G' 回复率提升至 14.57% ,显著高于JP-10/3% DA/10% Al($25\ \mu\text{m}$)。当添加 $500\ \text{nm}$ 铝粉,相同凝胶剂浓度下的回复率为 10.35% ,介于JP-10/3% DA/10% Al($25\ \mu\text{m}$)和JP-10/3% DA/10% Al($50\ \text{nm}$)之间。较小的铝粉颗粒更有利于增强凝胶的网络结构,提高凝胶的稳定性和弹性。

总体而言,凝胶剂浓度的增加和铝粉的适量添加均有助于增强凝胶的触变回复能力,但过量铝粉或大粒径铝粉会降低凝胶网络结构稳定性,导致回复能力下降。

2.3 凝胶剂浓度及铝粉颗粒对线性黏弹特性的影响

凝胶的黏弹性特性是决定凝胶燃料机械稳定性和强度的关键因素^[18]。为了更全面地研究凝胶的流变性能,研究进一步进行了振幅扫描测试,通过 G' 和 G'' 探究凝胶在不同应变振幅下的黏弹特性,考察凝胶机械稳定性和强度。实验在固定 $10\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率下进行振幅扫描,设定剪切应变范围为 $0.01\%\sim 100\%$,得到结果如图5所示。由图5可以看出,不同凝胶燃料样品均表现出相似的黏弹性行为特征:在低剪切应变下(0.1% 以下), G' 和 G'' 保持稳定,表明凝胶具有稳定的三维网络结构;当剪切应变达到临界值时, G' 和 G'' 急剧下降,表明凝胶内部氢键和其他非共价键发生断裂。如图5a中剪切应变达到约 0.5% 时, G' 和 G'' 急剧下降,此时凝胶内部分子链内相互作用持续减少。当 G' 和 G'' 曲线相交时,交点代表临界应变,此时凝胶受到的应力为屈服应力^[22]。剪切应力低于屈服应力时, G' 值始终大于 G'' 值,代表凝胶表现出一定的弹性特性,分子间相互作用更强,具有自组装的三维网络。其

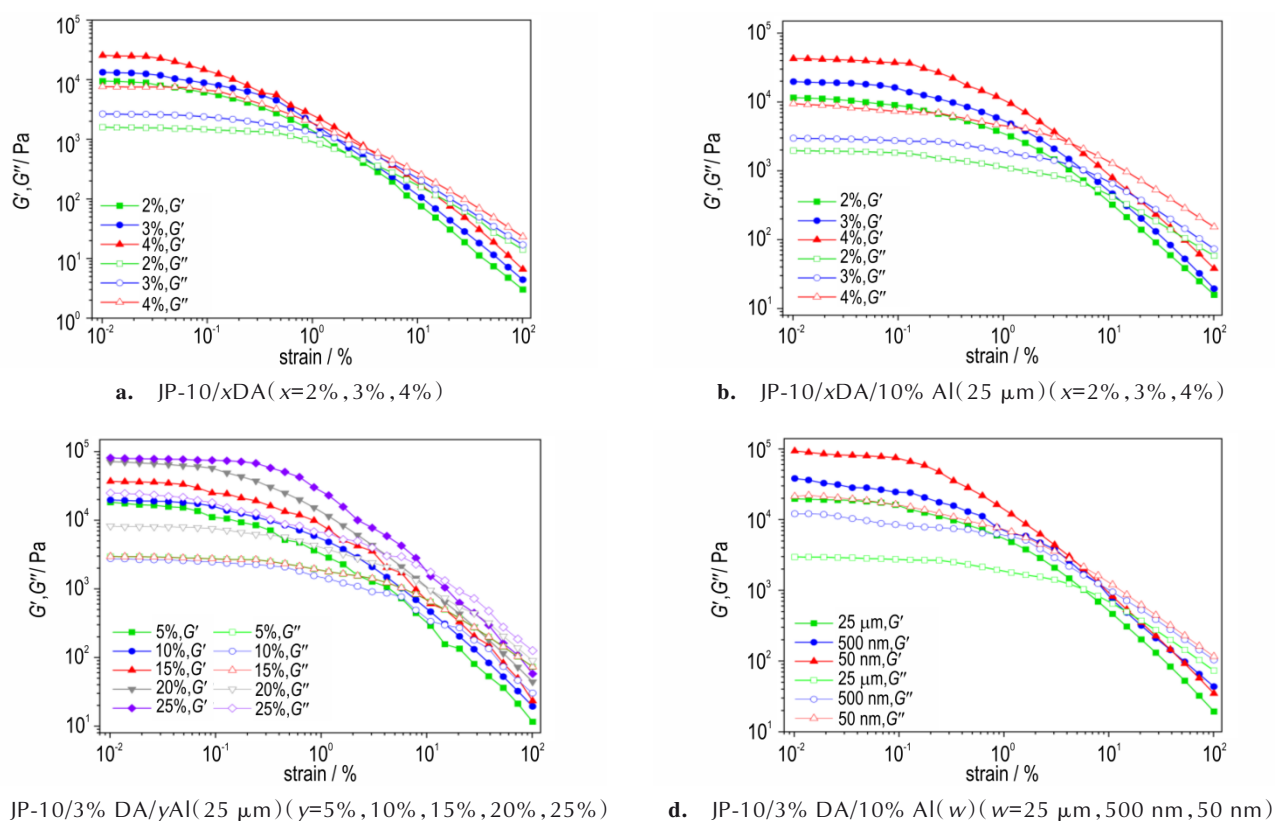


图5 凝胶应变扫描曲线

Fig.5 Strain scanning of gel fuel

中, JP-10/xDA ($x=2\%, 3\%, 4\%$) 凝胶屈服应力分别为 33.26, 54.45 和 70.35 Pa (图 5b)。可见, 随着凝胶剂浓度的增加, 凝胶内部形成了更密集的交联网络, 分子间作用力随交联密度增长, 导致凝胶的屈服应力越大, 凝胶抗变形能力相应增强^[23]。

铝粉可显著增强凝胶的机械强度, 表现为 G' 和 G'' 的同步提升。对比 5b~d 可以发现, 引入铝粉的凝胶燃料 G' 、 G'' 均明显高于未添加铝粉的凝胶, 且铝粉含量越多, 凝胶机械强度越强, 如对于 JP-10/3% DA, 当应变处于 0.01% 时, 未添加铝粉的 G' 为 13449 Pa, 添加 10% 铝粉后 G' 增加了 54.15%。同时, G'' 由 2656.1 Pa 增加至 2961.6 Pa, 提升了 11.50%。这一点与 Chen 等^[8] 得出的结论不同。分析认为铝粉颗粒对凝胶 G' 和 G'' 的增加源于铝粉颗粒浓度对凝胶网络的影响, 一方面铝粉颗粒间的范德华力增加了凝胶网络中分子链的相互作用^[24], 形成更加密集的缠结, 增强了材料的弹性特性, G' 同步增加。另一方面铝粉的阻碍作用导致能量耗散增加, 使得 G'' 得到相应提高。

图 6 展示了添加铝粉前后 JP-10/xDA/10% Al 以及 JP-10/3% DA/yAl ($25\ \mu\text{m}$) 的屈服应力, 由图 6 可以观察

到铝粉对燃料的屈服应力及其他机械强度参数具有显著影响^[25], 屈服应力随铝粉颗粒浓度的升高而增大。当添加 25% 铝粉时, 相较于 JP-10/3% DA/20% Al ($25\ \mu\text{m}$), 屈服应力提升了 65.97%, 提升幅度最显著。当添加 $25\ \mu\text{m}$, 500 nm 和 50 nm 铝粉时, JP-10/3% DA/10% Al 凝胶的

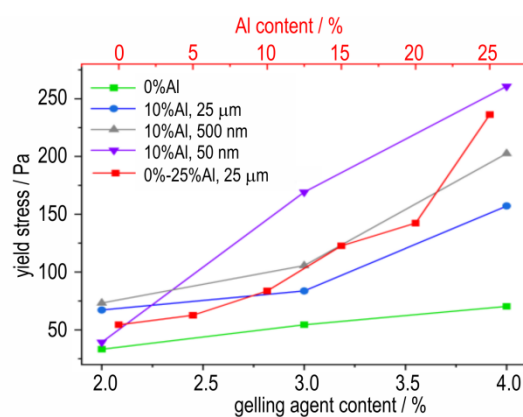


图 6 JP-10/x DA ($x=2\%, 3\%, 4\%$), JP-10/3% DA/10% Al (w) ($w=25\ \mu\text{m}, 500\ \text{nm}, 50\ \text{nm}$) 和 JP-10/3% DA/yAl ($25\ \mu\text{m}$) ($y=0\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$) 的屈服应力曲线

Fig.6 Yield stress curve of JP-10/x DA ($x=2\%, 3\%, 4\%$), JP-10/3% DA/10% Al (w) ($w=25\ \mu\text{m}, 500\ \text{nm}, 50\ \text{nm}$) and JP-10/3% DA/yAl ($25\ \mu\text{m}$) ($y=0\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$)

屈服应力较未添加铝粉凝胶提升0.5~2.5倍。所有测试的凝胶燃料样品中,添加JP-10/3% DA/25% Al(50 nm)的机械强度最高。

为了进一步描述凝胶剂浓度对凝胶内部结构的影响,采用分形维数模型进行幂律依赖性计算^[26]。在应变变化范围内保持不变的区域被视为燃料样品的线性黏弹性区(LVE),通过引入A、B、β等参数拟合了凝胶线性黏弹区与凝胶剂浓度之间的关系:

$$G'_0 \propto \omega^A; \gamma_0 \propto \omega^B \tag{2}$$

$$A = \frac{\beta}{3 - D}; B = \frac{2 - \beta}{3 - D} \tag{3}$$

$$\beta = 1 + (2 + \chi)(1 - \alpha) \tag{4}$$

式中, G'_0 为线性黏弹区的储能模量,Pa; γ_0 为线性黏弹区的最大应变,%; ω 为凝胶剂的质量分数,%; χ 为絮凝体骨架分形维数,通常取值为1; D 为絮凝体分形维数,通常大于 χ ; α 为絮凝体内部结构的连接强度, $\alpha=0$ 代表凝胶处于强连接状态, $\alpha=1$ 代表凝胶处于弱连接状态, $0<\alpha<1$ 则处于过渡态连接状态^[27]。

将铝粉颗粒作为絮凝体结构的组成单元,对添加不同粒径铝粉的JP-10/3% DA/10% Al进行拟合分析,结果如表2所示。数据表明,铝粉的添加使凝胶燃料的力学性能得到提升,且纳米铝粉的增强效果最显著。分形维数D值与凝胶内部结构致密度呈正相关,D值越大表明絮凝体堆叠结构越致密。当添加纳米级铝粉,尤其是50 nm铝粉时,其较大的比表面积使得颗粒在较低负载下即可有效构建三维网络结构,使得絮凝体网络更加致密。相比之下,微米级铝粉形成的网络结构相对松散。本研究制备凝胶燃料体系的A值集中在2左右,实验所用凝胶剂在2%~4%范围内对凝胶强度的影响相对较弱,凝胶力学性能受到的增强作用有限。

表2 凝胶分形维数拟合参数

Table 2 Fractal dimension model parameters of gel fuel

Sample	A	B	D	α
JP-10/3% DA	1.39	0.45	1.91	0.83
JP-10/3% DA/10% Al(25 μm)	1.83	0.91	2.27	0.89
JP-10/3% DA/10% Al(500 nm)	2.35	0.96	2.40	0.86
JP-10/3% DA/10% Al(50 nm)	2.16	1.39	2.44	0.93

Note: A, B, D, α is the parameter.

为定量表征凝胶在恒定应变下的抵抗能力,测量了添加10% Al(25 μm)前后JP-10/xDA的应力松弛曲线,研究凝胶在恒定应变下的应力松弛行为,结果如图7所示。凝胶燃料从初始应力降低到初始应力的

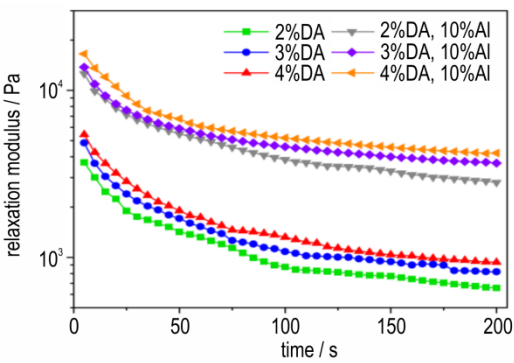


图7 JP-10/x DA(x=2%, 3%, 4%) 和 JP-10/xDA(x=2%, 3%, 4%)/10% Al(25 μm)的应力松弛曲线

Fig.7 Stress relaxation curve of JP-10/x DA(x=2%, 3%, 4%) and JP-10/xDA(x=2%, 3%, 4%)/10% Al(25 μm)

1/e所经历的时间被定义为松弛时间,其中e为自然常数。未添加铝粉颗粒时,凝胶剂浓度在2%~4%范围内对松弛行为无显著影响,JP-10/xDA的松弛时间分别为50,45,45 s。铝粉颗粒通过强化凝胶的三维网络结构,减缓体系应力松弛过程,JP-10/xDA/10% Al的松弛时间延长至75,80,70 s,增幅达50%~78%,其中JP-10/3% DA/10% Al表现出最优的延迟松弛效应。松弛模量衰减曲线分析表明,添加铝粉颗粒后,模量的衰减速率明显降低,表现出更加平缓的下降行为。

频率扫描测试用于研究凝胶在不同频率下的黏弹特性,测定G'和G''的频率依赖性,揭示凝胶结构的黏弹性和振荡角频率间的关系。根据应变扫描实验,选择将应变控制在0.01%,此时凝胶处于线性黏弹区内。图8展示了JP-10/xDA的频率扫描结果。实验结果表明,在实验频率范围内,G'始终高于G'',且两条曲线无交叉点,表明凝胶网络结构稳定,未发生松弛转变,弹性行为始终占据主导地位。随着振荡角频率增加,G'呈现上升趋势,而G''逐渐降低。这一现象源于高频下凝胶的松弛时间缩短,分子链的运动受到限制,导致更

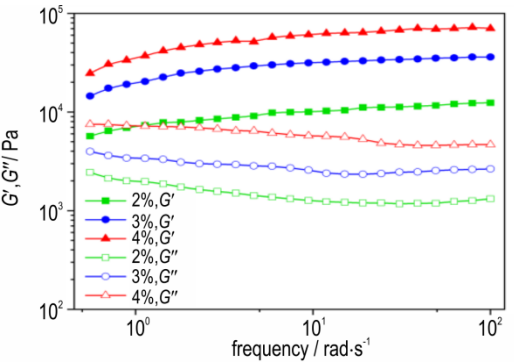


图8 JP-10/xDA(x=2%, 3%, 4%)的频率扫描曲线

Fig.8 Frequency scanning curve of JP-10/xDA(x=2%, 3%, 4%)

多能量以弹性变形形式储存,能量耗散过程相应减弱。当角频率大于 $50 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, G'' 出现小幅度回升,回升幅度不超过 13%。

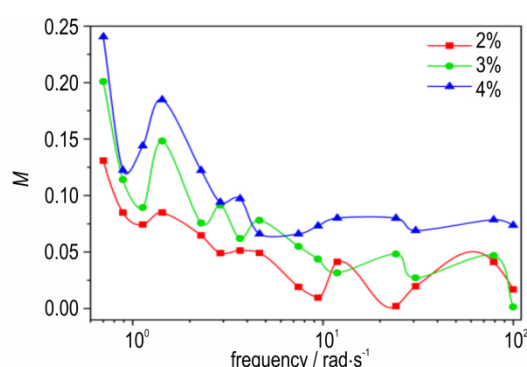
为系统比较不同凝胶的频率响应特性,图 9 展示了各凝胶 G' 随扫描频率的变化曲线。定义参数 M 为不同频率下凝胶 G' 的相对变化梯度,用于量化凝胶的频率依赖性。计算公式如式(5)所示:

$$M = \Delta G' / G'_1 \times 100\% \quad (5)$$

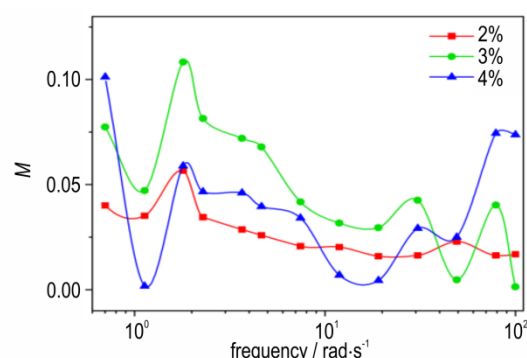
式中, $\Delta G'$ 为 G' 的变化量, Pa; G'_1 为初始频率下的储能模量, Pa。

由图 9 可以看到, JP-10/xDA 凝胶随着扫描频率增

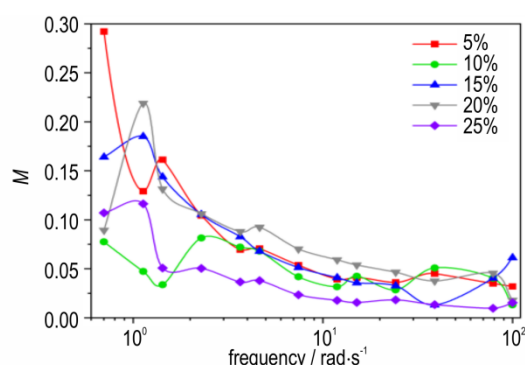
加,其 M 值呈现波动性下降,在低频 ($0.1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下) 时 M 值可达 25% 以上,高频 ($50 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上) 时降至 5% 以下。高浓度凝胶样品表现出更强的频率依赖性,其中 JP-10/4% DA 凝胶样品在低频区的 M 值约为 JP-10/2% DA 的 2 倍(图 9a)。铝粉质量分数和铝粉粒径对凝胶的频率依赖性具有显著影响。当铝粉质量分数为 25% 时,凝胶的频率依赖性最弱(图 9c),表明较高铝粉质量分数能够稳定凝胶的网络结构,降低其对频率变化的敏感性。当添加 500 nm 铝粉的凝胶表现出最强的频率依赖性,性能的不稳定更强(图 9d)。



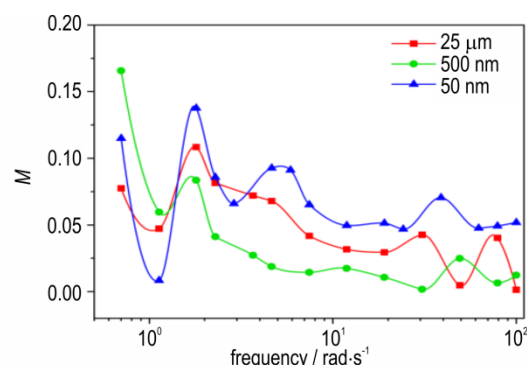
a. JP-10/xDA ($x=2\%, 3\%, 4\%$)



b. JP-10/xDA/10% Al ($25 \mu\text{m}$) ($x=2\%, 3\%, 4\%$)



c. JP-10/3% DA/ γ Al ($25 \mu\text{m}$) ($\gamma=5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$)



d. JP-10/3% DA/10% Al (w) ($w=25 \mu\text{m}, 500 \text{ nm}, 50 \text{ nm}$)

图 9 不同频率下 G' 的相对变化梯度

Fig.9 The relative variation gradient of G' at different frequencies

2.4 表面活性剂含量及温度对流变特性的影响

为了提升含能颗粒在凝胶燃料中的悬浮稳定性,可以在凝胶中引入表面活性剂。表面活性剂在颗粒表面发生吸附作用,通过增加空间位阻效应,显著增强了颗粒间的相互排斥力,同时降低了颗粒的表面能^[28]。实验选用非离子型表面活性剂 Span-80,通过对 JP-10/3% DA/10% Al/zSpan-80 ($z=0\%, 0.1\%, 0.4\%, 0.7\%, 1.0\%$) 进行稳态剪切测试,研究了表面活性剂浓度对凝胶黏度随剪切速率变化的影响,结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出,表面活性剂浓度的增加显著降低了凝胶的黏度,并削弱了其黏弹性网络结构。这一现象表明,表面活性剂分子通过促进铝粉颗粒的分散,有效降低凝胶黏度。经过表面活性剂改性后的凝胶燃料在高剪切速率下的剪切黏度差异较小。当表面活性剂浓度达 1.0% 时,凝胶在 0.01 s^{-1} 剪切速率下的黏度较未添加表面活性剂的凝胶下降约 27.13% (图 10a)。

由图 10b 可以看到,当表面活性剂浓度为 1.0% 时, G' 和 G'' 在 0.01 s^{-1} 剪切速率下的黏度较未添加表

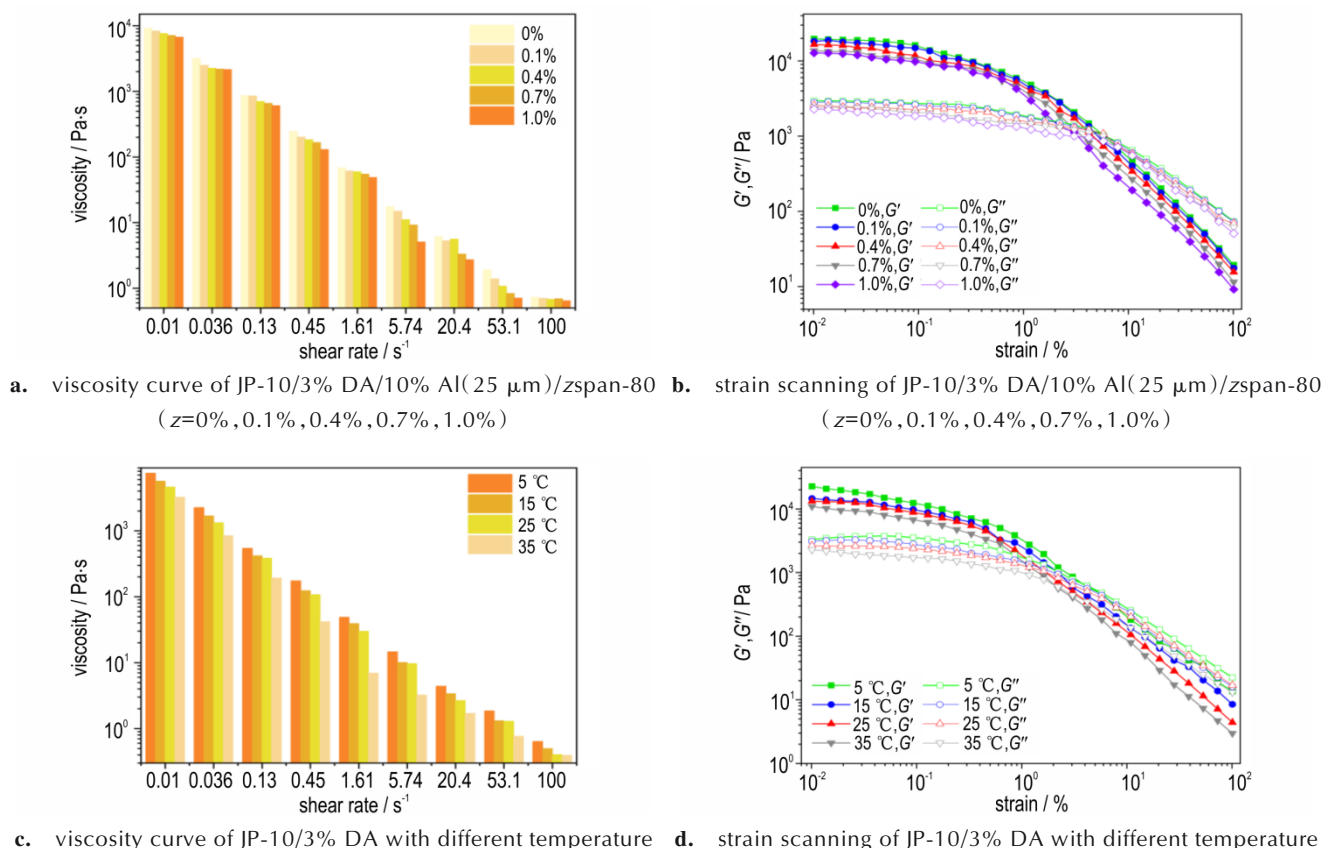


图10 不同表面活性剂浓度和温度下的黏度曲线和应变扫描

Fig.10 Viscosity curve and strain scanning with different surfactant contents and temperatures

面活性剂的凝胶分别下降35.54%和22.93%,证实表面活性剂可有效破坏凝胶的黏弹性网络结构,降低凝胶的 G' 和 G'' 。分析认为这是由于表面活性剂分子会干扰聚合物链间的交联点,使得凝胶的弹性响应减弱,弹性和黏性降低,整体表现为体系流动性增强和内耗能量减少。

由于温度是影响凝胶流变性能的关键因素之一,通过研究温度对凝胶性能的影响,可以优化凝胶在不同温度条件下的应用效果。图10c、10d为实验探究了JP-10/3% DA凝胶燃料在5~35 °C温度范围内流变性能温度依赖性的结果,可以看到,随着温度的增加,凝胶黏度、 G' 和 G'' 均不断减小,且应变扫描曲线的交点向低应变方向移动,凝胶网络在更小的应变下发生破坏。这主要是由于凝胶的三维网络结构依赖氢键等非共价相互作用。温度升高时,分子热运动加剧,分子间作用力被削弱,氢键被解离,导致网络结构松散甚至断裂^[30]。此外,凝胶燃料内部热能增加,提升了分子链的流动性,从而能够克服分子间的吸引力,并削弱了流体的半刚性结构,凝胶整体能量耗散减少^[29-30]。

3 结论

以JP-10、双丙酮-D-甘露糖醇以及铝粉作为原料,系统探究了凝胶剂浓度、铝粉浓度、铝粉粒径、温度以及表面活性剂浓度对凝胶流变特性的影响,通过分析三维网络结构的作用机制,为优化凝胶燃料的制备和应用提供了理论基础,研究总结如下:

(1)常规的JP-10燃料可以使用低分子凝胶剂形成稳定的凝胶。结果表明,凝胶始终保持显著的剪切变稀特性,当剪切速率由 $0.01 s^{-1}$ 提高到 $100 s^{-1}$ 时,凝胶黏度下降约4个数量级,有利于凝胶的运输应用。凝胶剂浓度的提高使体系黏度略有上升,而铝粉颗粒,尤其是纳米铝粉的加入能够显著增强凝胶的黏度。

(2)随着凝胶剂浓度的提高,凝胶的触变回复能力得到增强。增加凝胶剂浓度和降低铝粉粒径均使得凝胶燃料的回复率增加,当添加20%铝粉颗粒时,JP-10/3% DA的触变回复能力最强。

(3)凝胶燃料屈服应力随着凝胶剂浓度和铝粉含

量的增加而提升。此外,引入铝粉大幅度增加了凝胶的松弛时间。通过频率扫描测试发现,所有凝胶的 G' 均表现出频率依赖性,且随频率的不断增加而持续减弱,高凝胶剂浓度的凝胶频率依赖性更加明显。铝粉粒径为 500 nm 时,凝胶燃料表现出最强的频率依赖性,性能的不稳定更显著。

(4) 表面活性剂浓度和温度对凝胶流变参数同样具有影响。随着表面活性剂浓度和温度的升高,凝胶燃料的黏度、 G' 和 G'' 均呈现下降趋势,其中温度带来的影响更加明显。

致谢:感谢国家自然科学基金(U2341283)对项目的支持,同时感谢热能所高含能颗粒碳氢燃料燃烧项目组的老师和同学给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] GLUSHKOV D, PAUSHKINA K, PLESHKO A. Gel fuels: preparing, rheology, atomization, combustion [J]. *Energies*, 2023, 16(1):1-35.
- [2] 靳雨树, 徐旭, 杨庆春. 含能碳氢燃料燃烧特性及发动机应用研究进展[J]. 航空学报, 2023, 44(5): 6-25.
JIN Yu-shu, XU Xu, YANG Qing-chun. Research progress in combustion characteristics and engine applications of energetic hydrocarbon fuels[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(5): 6-25.
- [3] LIU Y, ZHANG H Z, PAN L, et al. High-energy-density gelled fuels with high stability and shear thinning performance [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 43: 99-109.
- [4] 曹锦文, 潘伦, 张香文, 等. 含纳米铝颗粒的 JP-10 凝胶燃料理化及流变性能 [J]. 含能材料, 2020, 28(5):382-390.
CAO Jin-wen, PAN Lun, ZHANG Xiang-wen, et al. Physico-chemical and rheological properties of Al/JP-10 gelled fuel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(5): 382-390.
- [5] SUN H, JIANG J, ZHANG L, et al. Rheological and atomization behavior of glycyrrhizic acid based supramolecular gel propellant simulant[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 640: 128460.
- [6] LIU Q Y, LI P H, SUN H, et al. Spray characteristics of gel containing nanoparticles in impinging jet injectors[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 232: 94-102.
- [7] LI P H, YANG D, FANG Z X, et al. Atomization characteristics of gelled fuels containing different contents of metal particles[J]. *Aerospace*, 2023, 10(3): 221-232.
- [8] CHEN Y, XUE K, LIU Y, et al. Preparation and properties of high-energy-density aluminum/boron-containing gelled fuels [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2023, 65(1): 230-242.
- [9] CHEN J Y, ZHAO H, LI W F, et al. The impact of nanocarbon powder on the characteristics of a gel propellant system with a high content of aluminum[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2024, 128(49): 12197-12208.
- [10] XIE J W, ZHANG H D, JIA T H, et al. Synthesis and fuel properties of high-density and low-freezing-point asymmetric cyclo-alkyl adamantane [J]. *Fuel Processing Technology*, 2023, 244: 107707.
- [11] 鄂秀天凤, 潘伦, 张香文, 等. 高触变性高密度凝胶碳氢燃料的制备及性能[J]. 含能材料, 2019, 27(6): 501-508.
E Xiu-tian-feng, PAN Lun, ZHANG Xiang-wen, et al. Synthesis and performance of high-density and high-thixotropy gelled hydrocarbon fuels[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(6): 501-508.
- [12] STOKES J R, TELFORD J H. Measuring the yield behaviour of structured fluids[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2004, 124(1): 137-146.
- [13] DENNIS J D, KUBAL T D, CAMPANELLA O, et al. Rheological characterization of monomethylhydrazine gels [J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2013, 29(2): 313-320.
- [14] NANDAGOPALAN P, JOHN J, BAEK S W, et al. Shear-flow rheology and viscoelastic instabilities of ethanol gel fuels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 99: 181-189.
- [15] HU H, WENG C, BAI Q. Experimental investigation on rheological characteristics of gelled fuels with gasoline and fumed silica [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(10): 1414-1419.
- [16] YANG D, XIA Z, HUANG L, et al. Synthesis of metallized kerosene gel and its characterization for propulsion applications[J]. *Fuel*, 2020, 262: 116684.
- [17] SHI Z, WU E, YAO F, et al. Research progress on spray characteristics of gelled propellants [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(12): 2652-2666.
- [18] JOHN J, NANDAGOPALAN P, BAEK S W, et al. Rheology of solid-like ethanol fuel for hybrid rockets: Effect of type and content of gellants [J]. *Fuel*, 2017, 209: 96-108.
- [19] 杨泽宇, 李建, 何桂标, 等. 基于流变特性的含铝凝胶燃料制备工艺研究[J]. 爆破器材, 2023, 52(3): 1-9.
YANG Ze-yu, LI Jian, HE Gui-biao, et al. Preparation process of aluminium-containing gel fuel based on rheological properties [J]. *Explosive Materials*, 2023, 52(3): 1-9.
- [20] HUANG L, GONG M, ZHANG J, et al. High-energy-density metallized gel propellant by hydrogen-bonded polymer-small molecules for enhanced stability and shear-thinning performance [J]. *Acta Astronautica*, 2024, 214: 356-365.
- [21] JYOTI B V S, BAEK S W. Formulation and comparative study of rheological properties of loaded and unloaded ethanol-based gel propellants [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2015, 33(2): 125-139.
- [22] CHEN A Q, GUAN X D, LI X M, et al. Preparation and characterization of metallized JP-10 gel propellants with excellent thixotropic performance [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2017, 42(9): 1007-1013.
- [23] TREGGER N A, PAKULA M E, SHAH S P. Influence of clays on the rheology of cement pastes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(3): 384-391.
- [24] JYOTI B V S, BAEK S W. Rheological characterization of metallized and non-metallized ethanol gel propellants [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2014, 39(6): 866-873.
- [25] MEIER J, REYNOLDS J, WHALEN S, et al. Improved hybrid rocket performance by additively manufactured gel-infused solid fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2022, 10(6): 500-533.

- [26] WU X J, WANG Y, WANG M, et al. Structure of fumed silica gels in dodecane: enhanced network by oscillatory shear [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2012, 290(2): 151–161.
- [27] 叶伟东, 乔治军, 李嘉颖, 等. 含铝凝胶燃料的流变特性研究[J]. 爆破器材, 2022, 51(2): 17–25.
- YE Wei-dong, QIAO Zhi-jun, LI Jia-hao, et al. Rheological properties of aluminium-containing gel fuel[J]. *Explosive Materials*, 2022, 51(2): 17–25.
- [28] 潘伦, 李怀宇, 薛康, 等. 含能纳米流体燃料研究进展[J]. 推进技术, 2023, 44(9): 6–19.
- PAN Lun, LI Huai-yu, XUE Kang, et al. Research progress of energetic nanofluid fuel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(9): 6–19.
- [29] ZHANG J, DUAN B, LIAO Y, et al. Rheological properties and propulsion performance of an ammonium dinitramide-based gel propellant with sustainable reignition and adjustable thrust flexibility [J]. *Acta Astronautica*, 2025, 235: 554–569.
- [30] CARER C, DRIEVER L X, KÖBBEN S, et al. Effect of parameter variation on the viscosity of ethanol gel propellants [J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2021, 13(9): 1196–1208.

Influence of Low-molecular-weight Gelators and Aluminum powder Powders on the Rheological Properties of JP-10 Gel Fuel

XU Yi-qing, YANG Wei-juan, ZHANG Fan, LIU Jian-zhong, FAN Jian-ren

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The gelation of gel fuel is achieved by incorporating varying content of low-molecular-weight gelling agent. The rheological properties of the resulting gels are systematically investigated by introducing Al powder with different particle sizes. Key rheological parameters, including shear-dependent viscosity, thixotropic behavior, and linear viscoelastic properties, are analyzed to evaluate the effects of gelling agent content, Al powder content, and particle size. The results demonstrate a pronounced shear-thinning behavior, with the gel viscosity decreasing by approximately four orders of magnitude as the shear rate increased from 0.01 s^{-1} to 100 s^{-1} . Increasing the gelling agent content led to enhanced viscosity, improved recovery ability, and higher yield stress, with a more pronounced frequency dependence observed at higher content. The incorporation of Al powder significantly increases both gel viscosity and relaxation time, with nano-sized Al particles exerting a more substantial effect than micron-sized particles. Furthermore, the addition of surfactants and elevated temperatures results in a marked reduction in gel viscosity, accompanied by a concurrent decrease in both the storage modulus (G') and loss modulus (G''). The incorporation of aluminum powder reduces the dependence of recovery rate on gelling agent content. Also, both surfactants and temperature significantly influence the rheological properties of the gel. The viscosity, storage modulus, and loss modulus of the gel system decrease with increasing surfactant content and temperature.

Key words: gel; energetic fuel; low molecular weight gelator; rheological properties; viscosity

CLC number: TJ5; V231.1

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025091

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. U2341283)

(责编: 姜梅)