

火箭煤油减阻剂的研究进展

孙彬¹, 陈雪娇², 孙海云², 郭永胜¹, 方文军¹

(1. 浙江大学 化学系, 浙江 杭州 310058;

2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要: 在火箭煤油中加入减阻剂是提高其在管道中的流动能力和降低能耗的有效手段, 具有成本低、工艺简单、效果显著和可靠性高等特点。综述了减阻剂的种类、添加量、相对分子量、管径、流体流速、雷诺数、流体温度和热流密度等工况参数对火箭煤油减阻和换热特性的影响, 从分子动力学模拟和计算流体动力学模拟两个方面介绍了火箭煤油减阻剂对减阻和换热数值模拟的研究进展, 实验研究和数值模拟结果都指出了减阻与传热恶化相矛盾的核心科学问题亟待解决, 总结了黏弹性聚合物的减阻率提升机制、聚合物分子断裂和解聚的减阻率退化机制, 进一步从实验研究、数值模拟和机理探究这3个角度指出减阻研究的发展方向, 期望为新型高效减阻剂的开发和应用提供参考。

关键词: 火箭煤油; 聚合物; 减阻率; 减阻剂; 作用机制

中图分类号: O63

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)05-0023-10

Research progress of drag reduction agent for rocket kerosene

SUN Bin¹, CHEN Xuejiao², SUN Haiyun², GUO Yongsheng¹, FANG Wenjun¹

(1. Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Adding drag reduction agent to rocket kerosene is an effective means to improve its flow capacity in pipelines and reduce energy consumption, which is characterized by low cost, simple process, significant effect and high reliability. The type, addition amount and relative molecular weight of drag reduction agent, as well as the working condition parameters such as pipe diameter, flow rate, Reynolds number, fluid temperature and heat flow density on the drag reduction and heat transfer characteristics of rocket kerosene are reviewed. The progress of numerical simulation of the drag reduction and heat transfer by rocket kerosene drag reduction agent is introduced from the aspects of molecular dynamics simulation and computational fluid dynamics simulation. Both experimental studies and numerical simulation results have pointed out the core scientific problem of drag reduction in contradiction to heat transfer deterioration

收稿日期: 2024-02-23 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(22127802)

作者简介: 孙彬(1997—), 男, 博士, 研究领域为航空航天推进剂化学。

通信作者: 方文军(1967—), 男, 博士, 教授, 研究领域为液体推进剂化学。

引用格式: 孙彬, 陈雪娇, 孙海云, 等. 火箭煤油减阻剂的研究进展[J]. 火箭推进, 2024, 50(5): 23-32.

SUN B, CHEN X J, SUN H Y, et al. Research progress of drag reduction agent for rocket kerosene[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(5): 23-32.

that urgently needs to be solved. The enhancement mechanism of drag reduction of viscoelastic polymer and the degradation mechanism by molecular scission and de-aggregation of polymer are summarized. The direction of drag reduction research are further pointed out from the aspects of experimental studies, numerical simulations and mechanism investigations. The aim is to provide necessary reference information for the development and application of novel drag reduction agents with high-efficiency.

Keywords: rocket kerosene; polymer; drag reduction; drag reduction agent; mechanism

0 引言

液氧/煤油发动机具有高比冲、低成本、绿色环保等优势,是新一代重型运载火箭的主动选择之一^[1]。美、苏(俄)等航天国家研制了 Merlin-1、RD180、RD191 等具有重大意义的液氧/煤油发动机,确立了其航天强国的地位。我国研究液氧/煤油发动机是从 20 世纪 90 年代开始的,到目前为止已成功研制了 YF-100、YF-115 等发动机,陆续用于 CZ-5、CZ-6、CZ-7 系列运载火箭^[2]。随着我国航天技术的不断发展以及载人航天、深空探测等重大航天任务的进一步开展实施,大推力液氧/煤油发动机和重型运载火箭成为未来的技术发展方向^[3-5]。

随着液氧/煤油发动机的运载能力不断增大,火箭煤油的流量也随之增大,高流速的火箭煤油在经过发动机组件时受不规则湍流扰动的影响,不可避免地带来了从涡轮泵到燃烧室管路流阻大幅增加和泵后负载大的问题,使得涡轮泵功率和发生器工作负荷提高,影响了发动机的工作可靠性,进而限制了发动机性能的提升^[6-8]。降低系统流阻的有效方法是优化涡轮泵或管路组件结构,例如某型发动机研制中,为了降低推力室燃料管路流阻,对推力室结构进行了多次迭代优化设计,取得了显著成效^[9-10]。

但目前继续通过结构设计显著提升发动机性能难度较大。根据国外同类发动机研制经验,在火箭煤油中加入少量高分子聚合物,能够将火箭煤油输送管路的流阻降低 20% 以上,燃油泵效率提高 13% 以上,涡轮功率降低 7% 以上,燃气温度降低 300 K 以上。Borovik 等^[11]在莫斯科航空研究所试验台的 GOX/煤油火箭发动机上进行的燃烧试验表明,火箭煤油中加入聚异丁烯减阻剂对燃烧效率无影响,使用减阻煤油进行气膜冷却比使用纯煤油更有效,可以提高燃烧室冷却效率,从而提高其可靠

性和重复使用性。因此,火箭煤油减阻剂研究具有重要科学意义和工程应用价值。但是,目前减阻剂多用于重质原油和成品油管道输送^[12-15],在火箭煤油等特种燃料中的应用仍十分有限。本文通过综述火箭煤油用减阻剂的研究进展,指出减阻剂研制的若干科学问题和发展方向,期望为新型高效聚合物减阻剂的开发和应用提供参考。

1 聚合物减阻剂的研究进展

1.1 实验研究

1.1.1 减阻剂对减阻的影响

目前应用比较广泛的油品减阻剂主要为聚异丁烯(PIB)^[16]、聚 α 烯烃^[17]、聚甲基丙烯酸酯^[18]和乙烯-丙烯嵌段共聚物(EP)^[19]等线性高分子聚合物,这些高分子聚合物所具有的非牛顿黏弹性会影响油品的物理性质。俄罗斯的火箭发动机制造商“NPO Energomash”中完成的项目调查表明,火箭煤油中添加 PIB 可使液压发动机水力损失降低 20% 以上^[20]。其中,流体的密度和黏度是影响流体流动阻力特性的重要参数。杜宗昱等^[21-22]探究了减阻剂种类和添加量对火箭煤油流动阻力特性的影响,发现减阻煤油与火箭煤油的密度相近,而减阻煤油的黏度都高于火箭煤油,且减阻剂的相对分子质量 M 越大,减阻煤油的黏度越高,减阻率越高。选择 $M = 10^5$ 的聚丙烯腈为减阻剂,减阻率为 35.94%; $M = 2 \times 10^6$ 的 PIB 和 $M = 5 \times 10^4$ 的反式聚异戊二烯按质量比 1:1 混合作为减阻剂,减阻率为 51.66%; $M = 4 \times 10^6$ 的聚丙烯为减阻剂,减阻率为 72.85%。随着煤油中减阻剂添加量的升高,减阻率先快速升高后趋于平缓,最佳添加量为 1×10^{-3} ,原因可能是减阻煤油的黏度达到了峰值,不再随添加量的增加而增加。Ivchenko 等^[13]总结了聚 α 烯烃减阻剂的性能,发现从 C6 开始的高分子量 α 烯烃或其混合物可作为有效的减阻剂,减阻的效果不仅取决于 M ,还

取决于大分子的长度,因此,在 M 相等的情况下,聚(1-己烯)可能比聚(1-癸烯)更有效;此外, α 烯烃混合物在相同 M 下的性能可能优于均聚物。罗玉宏等^[23]采用电加热试验探究了不同 M 的减阻剂对高流速条件下火箭煤油的流动阻力与换热特性的影响,结果也表明不同 M 的减阻剂对火箭煤油密度均未发生明显改变, M 越大,减阻煤油的黏度越高,两种减阻煤油的减阻率分别提高了 33.1%~48.4% 和 60.3%~76.4% (后者 M 大于前者)。减阻剂的添加抑制了涡流生成,但是增加了层流底层的厚度,降低了火箭煤油的传热特性,且减阻剂 M 越大传热恶化越明显,在流速 50 m/s、温度在 323.15 ~ 448.15 K 范围,两种减阻煤油的传热系数分别下降了 8.3%~39.1% 和 32.8%~62.1% (后者 M 大于前者)。阳倦成等^[24]使用黏弹性铜纳米流体作为减阻液,进行了流阻与换热的实验研究,结果表明体积分数为 1% 的铜纳米粒子添加到质量分数为 6×10^{-4} 的基液中形成的纳米流体在 45 °C 的湍流状态下表现出很好的减阻性能和传热强化。Sun 等^[25]研究了在 $2 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4$ 雷诺数 (Re) 范围内纳米减阻流体的对流换热系数和流动阻力系数,在不同浓度下,其对流换热增强作用强于降低流动阻力的作用,当 Cu 纳米颗粒添加量为 4×10^{-3} 时具有最佳的减阻和传热特性,可用于解决减阻流体的换热恶化问题。因此,制备金属基火箭煤油纳米流体或制备含有金属的聚合物减阻剂来提升减阻与换热特性是一个潜在的研究方向。

1.1.2 工况参数对减阻的影响

杜宗罡等^[21]对火箭煤油在常温管道中的流动阻力特性进行了实验研究,在相同的流量下,直管的管径越小,流速越高, Re 越大,减阻率越高;在相同的管径下,流速越高,减阻率先快速升高后缓慢降低,直管中流速为 54.748 m/s 时最大减阻率为 75.05%。罗玉宏等^[23]的研究得出了类似的结论,他们认为 M 较大的减阻剂分子链较长,在流速较小时其分子链之间相互缠绕卷曲,随着流速增加分子链伸展,当流速升至 50 m/s 左右时分子链完全展开并发生断裂,导致减阻率先升高后降低;而 M 较小的减阻剂在流速较小时便能完全展开,且其分子不易被高速剪切而断裂,减阻率随流速的变化不大。张赞坚等^[26]研究了减阻剂对高温高压火箭煤油减

阻率的影响,最高减阻率可达 60%,随着流体温度升高,减阻率降低, Re 小于 6.3×10^4 时减阻效果大于传热恶化效果,大于 6.3×10^4 时结果相反,减阻率最低下降至约 20%;在超临界压力的试验工况下,火箭煤油传热机理为单相类液态强制对流换热。陈彦伯^[27]采用电加热试验探究了热流密度和流速变化对减阻煤油和火箭煤油在实验通道内流动和换热特性的影响,随着加热功率的升高,减阻煤油与火箭煤油的压力降逐渐接近;减阻煤油和火箭煤油在较低的热流密度和流速下的吸热量无明显差距,当热流密度分别升高至 9 MW/m^2 、 15 MW/m^2 和 20 MW/m^2 ,对应流速分别为 20 m/s、40 m/s 和 60 m/s 时,火箭煤油的换热系数逐渐升高并高于减阻煤油,火箭煤油的吸热能力明显强于减阻煤油。因此,减阻煤油虽然能够降低流动阻力,但其换热性能明显弱于火箭煤油。

综上所述,目前对于火箭煤油减阻剂的实验研究仍存在缺陷。首先还需进一步开发新型高效减阻剂,能同时满足减阻和换热性能的提升;其次是国内减阻火箭煤油的研究缺乏同时考虑液膜冷却和主动冷却的模拟发动机试验研究以及缺乏减阻剂对火箭煤油其他性能的影响研究;最后是缺乏系统的试验研究,目前的研究难以横向对比各影响因素的重要性及不同影响因素之间的关系,只有剥离复杂的工程条件和孤立各种影响因素,才能发现更有价值的科学规律和理论。

1.2 数值模拟

数值模拟方法能够处理各种复杂的问题,并对研究对象反复模拟,不断改进,节约时间成本和经济成本,目前关于减阻火箭煤油的数值模拟包括分子动力学模拟和计算流体动力学模拟。

1.2.1 分子动力学模拟

Guo 等^[28]通过粗粒度分子动力学模拟研究了 PIB 减阻剂对火箭煤油在稳定剪切流动条件下的流变行为和聚合物分子的构象变化。选取了正十三烷、正庚基环己烷和十氢 2,6-二甲基萘作为火箭煤油的代表性组分。采用 Müller-Plathe 法^[29]计算剪切黏度,该方法的核心思想是通过施加难以测量的动量通量,计算易于测量的剪切速率或速度剖面来获得剪切黏度。结果表明,减阻煤油溶液的黏度普遍高于火箭煤油,且煤油溶液的剪切黏度随 PIB 链

长和添加量的增加而增加,随着剪切速率的增加,减阻煤油溶液的黏度迅速下降,最终趋于与火箭煤油相似。为了直观地理解在剪切作用下聚合物分子的构象变化,单个聚合物分子中的假原子团、溶液中聚合物分子在弱剪切流和强剪切流条件下,单个分子在不同剪切速率下的溶液中的演化过程如图 1 所示。

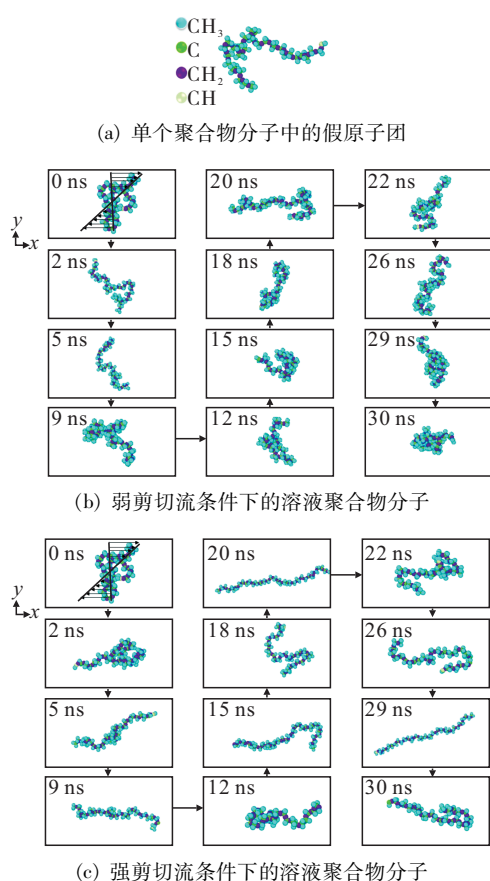


图 1 单个聚合物分子中的假原子团、溶液中聚合物分子在弱剪切流和强剪切流条件下的快照^[29]

Fig. 1 The pseudoatomic groups in a single polymer molecule, the snapshots of polymer molecules in solution under conditions of weak shear flow and strong shear flow^[29]

在低剪切速率下,PIB 分子容易发生卷曲并相互缠结,形成椭球状或网状结构,且缠结程度随 PIB 添加量和 M 的增加而增加。这种缠结现象增加了煤油分子运动的阻力,导致在低剪切速率下溶液黏度增加。而随着剪切速率的增加,PIB 分子沿湍流流动方向被拉伸,其形态在卷曲和拉伸状态之间交替,当剪切速率增加到一定值,分子间的缠结状态

被完全破坏,相应的阻力迅速减小,导致减阻煤油溶液的黏度与火箭煤油溶液的黏度相似,这与实验研究所得出的结论相同。Len 等^[30]采用分子动力学模拟方法研究了 PIB 对基础油黏度的影响,模拟研究了聚合物增加溶液黏度的 3 种可能机制。结果表明,线圈膨胀和聚合物-聚合物缔合都不是提高黏度的原因,对接近添加剂分子的溶剂重定向测量表明,添加剂分子对溶剂的改性有助于增强黏度,这一机制可能也适用于其他聚合物/油品组合,但是还需在其他模型系统中验证以确定该机制的普遍适用性。Kim 等^[31]通过动态模拟研究了湍流结构与减阻聚合物构象之间的基本动力学相互作用。研究发现,聚合物应力引起的扭矩通过对抗涡旋运动来降低涡旋强度,抑制了聚合物减阻剂流体在流动中新涡旋的自生和涡包的形成,从而降低了湍流阻力。

1.2.2 计算流体动力学模拟

计算流体动力学模拟(CFD)为火箭煤油流动与换热过程中流场与温度场的分布及机理分析提供了很好的方法^[32-34]。杜宗昱等^[35]采用 CFD 方法对添加聚合物减阻剂与否的火箭煤油减阻机理与传热规律进行三维数值模拟分析。结果表明,相比于火箭煤油,减阻煤油减小了摩擦阻力系数,实现了减阻增输效应,减阻剂的黏弹性在湍流减阻作用中占主要作用。但是减阻煤油的温度边界层厚度大于火箭煤油,增加了传热热阻,降低了减阻煤油的传热速率。在相同工况下,模拟结果与实验数据比较接近,最大相对偏差为 7.77%。Li 等^[36]采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和增强壁面函数进行有限体积 CFD 数值模拟,研究了减阻剂对火箭煤油在再生冷却微通道内超临界流动传热特性的影响,结合煤油物理性质的 10 组分模型(6% 正辛烷、10% 正癸烷、20% 正十二烷、8% 正十三烷、10% 正十四烷、10% 正十六烷、20% 甲基环己烷、8% 反式-1,3-二甲基环戊烷、5% 正丙苯和 3% 1-甲基萘)^[37]和流变测量的 Carreau 非牛顿流体模型,探讨了煤油中减阻剂的影响。计算结果表明,影响火箭煤油超临界流动和换热特性的主要因素有入口温度、入口流速和通道壁面热流密度。压力对传热的影响可以忽略不计。添加聚合物减阻剂后,超临界煤油的压降损失和换热性能分别降低 46.8% 和 37.5%。唐明^[38]同样采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型、10 组分物性模

型,以及流变测量所获得的 Carreau 非牛顿流体模型,采用 FLUENT 软件数值研究了添加减阻剂与否的火箭煤油在不同工况下的流动与换热特性。计算结果表明,影响火箭煤油流动与换热最大的因素是流速,在低于 60 m/s 的流速条件下增加流速可以显著提升冷却效果,减阻率也随着流速增加而增加;而当流速高于 60 m/s 时,增加流速对冷却效果的提升作用不大,反而使阻力损失急剧增大,当流速增大到 100 m/s 时,壁面的温度减小 67.9%,阻力损失达到了 1 700%。一般来说,煤油的 10 组分替代物能很好地描述煤油的超临界物理性质。但由于火箭煤油裂解和焦化的复杂反应,使高温下的计算值和实际物性误差增大。

综上所述,尽管通过数值模拟方法对减阻和换热有了一定研究,但是未来还需进一步优化减阻火箭煤油的替代模型,提高数值模拟精度,缩小与实际值的误差。

2 减阻机理

由于流体的复杂性,对减阻率的提升机制有伪塑说^[39]、有效滑移说^[40]、黏弹说^[41]、湍流脉动解耦说等^[42],而减阻率退化机制的观点主要是聚合物分子断裂^[43]和解聚^[44]。

2.1 减阻率提升机制

目前,普遍认可的聚合物减阻机制是黏弹说^[45-46],聚合物本身具有黏弹性,随机卷曲的聚合物被平均剪切流和湍流漩涡拉伸,将一部分湍流动能转变成聚合物分子的弹性势能并储存起来,减少缓冲层中湍流的能量消耗和流动中的摩擦损失,进而起到了减阻的效果。研究表明,有效的减阻剂是具有线性结构的黏弹性聚合物,在给定 M 下具有较大的延展性和优异的溶解度^[47-48]。例如,随着 EP 减阻剂的 M 逐渐增大,表观黏度从 13.6 mPa·s 增大到 24.6 mPa·s,煤油的减阻率也从 41.4% 增加到 59.8%^[49]。在一定的流动速度下,湍流消耗更高的能量,因为能量没有完全用于克服相对阻力,而是一部分消耗在搅拌液体上[见图 2(a)]。聚合物添加剂的存在,可使流体的层流底层增厚,减少了能量消耗和摩擦损失,从而使平均速度增加[见图 2(b)]^[50]。

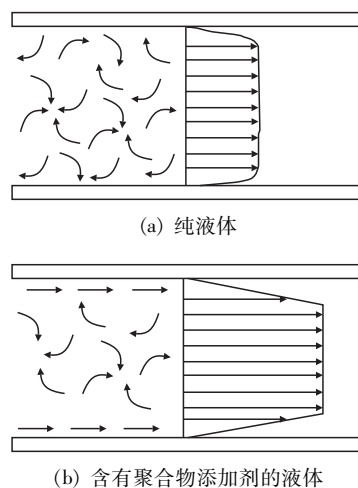


图 2 湍流速度分布^[50]

Fig. 2 Velocity profiles of the turbulent flow^[50]

2.2 减阻率退化机制

2.2.1 聚合物分子断裂

大量实验研究表明,剪切效应和温度等因素会造成聚合物减阻率退化^[51-53],研究者认为聚合物的分子被平均剪切流和涡流拉伸,当完全伸展的聚合物不能承受流体所施加的动力时,就会发生分子断裂^[54],如图 3 所示。长链分子主要在其中心断裂,使 M 减少到初始值的一半。聚合物的 M 越高,它在静止状态下包裹得越多,越容易发生分子断裂。在拉伸流中聚合物的中心受力最大,链上的力平衡作用于其中心,得到

$$f \propto \varepsilon \eta M^2 \quad (1)$$

式中: ε 为平均伸长率; η 为溶液黏度; M 为相对分子质量。

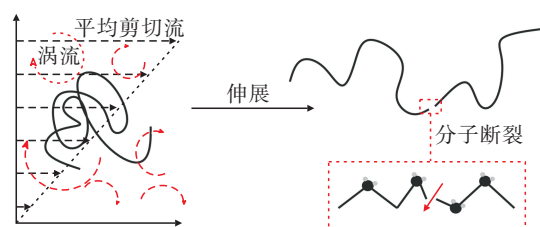


图 3 平均剪切流和涡流下聚合物分子断裂示意图^[54]

Fig. 3 Sketch of polymer molecular scission in mean shear flow and vortex^[54]

有大量实验证据表明,聚合物在湍流条件下会发生非常强烈的分子断裂,例如 Horn 等^[55]分析了通过直管的湍流流体,借助色谱法比较了通过系统

一次后的溶液与初始溶液的 M 分布。不仅证明了聚合物在湍流流动下分子间发生断裂,而且很好地论证了断裂主要发生在聚合物分子的中点。经过一次剪切后,溶液中相对分子质量较小的分子数量明显增多,以 $M_w = M_{w0}/2$ 为中心, M 分布峰向相对分子质量低的方向移动,比初始溶液减少了一半。Lee 等^[16]使用旋转圆盘装置测试了 PIB 在煤油中的湍流减阻率的时间依赖性,随着圆盘转速增加,即初始作用力越强,PIB 减阻越有效,减阻率随时间衰减越慢;此外,初始减阻率随流体温度的升高而增加,但随着温度的升高,减阻率随时间的衰减更快。这是因为热能加剧分子热运动,加速了聚合物链的断裂,温度越高,聚合物断裂数量越多。煤油溶液在 3 h 内分批次加入 6×10^{-4} PIB 比一次性加入具有更高的减阻率。因此,认为保持较高减阻率的有效方法是在溶液中逐次加入减阻剂。通过对 PIB 煤油溶液进行色谱分析进一步支持了聚合物中点断裂的观点(见图 4),初始态的 M 分布范围非常宽泛,高速旋转 5 min 后 M 峰值基本降低了一半,15 min 和 30 min 后的 M 分布都倾向于一个狭窄的形状,这意味着 M 达到一个渐近值。

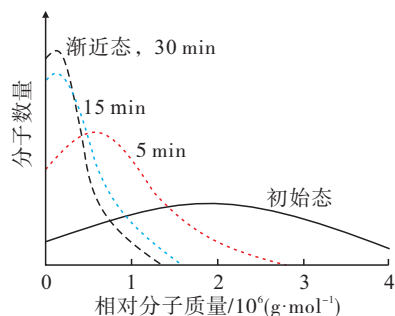


图 4 煤油中 10^{-4} 聚异丁烯溶液的相对分子质量分布演变图^[16]

Fig. 4 Evolution diagram of relative molecular weight distribution of 10^{-4} polyisobutylene solution in kerosene^[16]

但值得注意的是,分子断裂重点指的是线性聚合物链,线性聚合物的分子断裂速率与 M 成线性关系,聚合物形状的变化会引起 M 分布的变化,这反过来又会影响分子断裂速率。星型聚合物^[56]或支链聚合物^[57]在抵抗分子断裂方面表现出更高的稳定性,它们很难发生中点断裂,在拉伸或湍流过程中只会失去

分支,造成 M 的小幅下降^[58-59]。例如,与相同总分子量的线性聚苯乙烯相比,星型聚苯乙烯显示出更高的剪切稳定性。笔者认为这种效应是由于星型聚合物分支“臂”的 M 远低于聚合物的总分子量,从而使星型聚合物具有较低的有效分子量,因此链的断裂速度较慢^[60]。因此,具有高剪切稳定性结构的聚合物有潜力作为火箭煤油减阻剂的候选者。

2.2.2 聚合物解聚

减阻率退化不仅仅是由于聚合物分子断裂造成的,另一种减阻退化机制为聚合物解聚^[54],如图 5 所示。聚集是由分子间范德华力维持的,是一种很弱的分子间作用力,很容易被平均剪切流和涡流所破坏。因此,诱导解聚所需的动力远小于引起机械分子分裂所需的动力。由于聚集体与分子间作用力有关,如果分子间作用力被流动剪切破坏,那么经过足够的时间,部分分子可以在静止的溶液中再次聚集。Cussuol 等^[61]使用聚丙烯酰胺(PAM)、聚氧化乙烯(PEO)和黄原胶(XG)探究了聚合物解聚对减阻率下降所起的作用。对于 PAM 和 PEO 这两种柔性聚合物, 1.5×10^{-4} 的溶液中解聚的作用几乎是分子断裂作用的 3 倍。但这种解聚是可逆的。随着时间的推移,分子重新聚集,柔性聚合物溶液的减阻率部分恢复,再次聚集的速度很慢,在预剪切后 21 d, 1.5×10^{-4} PAM 的减阻率恢复到初始值的 83%。XG (刚性聚合物)的减阻率完全恢复了,因此,认为 XG 溶液减阻率的下降完全与聚合物解聚有关。目前,用于减阻研究的刚性聚合物都是水溶性的,合成油溶性的刚性减阻剂应用于火箭煤油是一个新方向。

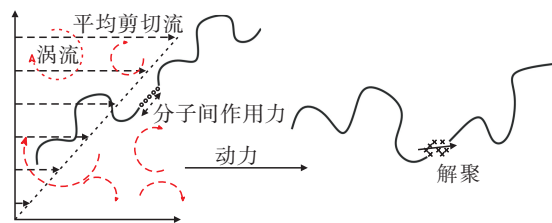


图 5 平均剪切流和涡流下聚合物解聚示意图^[54]

Fig. 5 Sketch of polymer de-aggregation in mean shear flow and vortex^[54]

综上所述,目前讨论的减阻率提升和退化都是普通工况下的可能机制,它还取决于许多变量,如流体动力学和热力学变量等^[62],再结合火箭煤油极

端的应用环境,其机制更为复杂,还需要研究者继续深耕挖掘。

3 结论与展望

1)在实验研究方面,目前我国对火箭煤油减阻剂的开发不够;缺乏同时考虑液膜冷却和主动冷却的模拟发动机试验研究,缺乏减阻剂对火箭煤油的燃烧、裂解和结焦等其他性能影响研究;缺乏系统的试验研究,研究的工况和影响因素不全面不充分。因此,对火箭煤油减阻剂的实验研究提出如下建议:尝试开发同时具有减阻性能和传热强化的新型高效减阻剂,如制备金属基火箭煤油纳米流体或制备含有金属的聚合物减阻剂;搭建模拟发动机试验系统,考虑液膜冷却和主动冷却等其他参数,对火箭煤油各种工况进行全面系统的试验;对减阻性能的试验评价值得加强,发展现代测试,例如粒子图像、高速摄影、激光测速、迹线测速等技术,更深层次地挖掘减阻剂对流场结构的影响机制,尤其是在高温的条件下,减阻剂的化学反应、物理性质变化以及火箭煤油燃烧、裂解和结焦等复杂情况带来的影响;剥离复杂的工程条件和孤立各种影响因素进行全面研究并建立火箭煤油减阻性能与换热性能的评价体系。

2)在数值模拟方面,由于减阻剂是分子量为几万到十几万的高分子化合物、火箭煤油是数千种物质的混合物,一方面在构建分子动力学模型和计算流体动力学模型时存在很大难度,另一方面是准确模拟减阻剂浓度场的不均匀性、减阻剂分子断裂或解聚等非牛顿流体演变过程仍存在巨大的挑战。建议进一步优化现有减阻剂和火箭煤油替代模型,同时提高计算准确度和效率,并结合实验研究开发高精度非牛顿流体本构模型,提高减阻火箭煤油数值模拟精度。

3)在机理研究方面,由于湍流的复杂性,普遍接受的聚合物减阻机制仍远未达成。需深入微观,研究减阻剂和火箭煤油的组成、结构和相互作用机制,将火箭煤油极端的应用环境考虑在内,为获得高效稳定减阻、减少盲目尝试提供理论指导;进一步优化减阻剂的分子结构,如开发抗剪切性能好的支链聚合物或星型聚合物,或开发油溶性的刚性聚合物等,解决因聚合物分子断裂或解聚所导致的减

阻率下降问题。

参考文献

- [1] DINDA S, VUCHURU K, KONDA S, et al. Heat management in supersonic/hypersonic vehicles using endothermic fuel: perspective and challenges [J]. ACS Omega, 2021, 6(40): 26741-26755.
- [2] 张晓军,高玉闪,杨永强,等. 我国液氧煤油发动机技术发展概述[J]. 中国航天, 2023(5): 9-15.
ZHANG X J, GAO Y S, YANG Y Q, et al. Overview of the development of liquid oxygen/kerosene engine technology in China [J]. Aerospace China, 2023(5): 9-15.
- [3] LIU Y Y, CHEN R, LIU J, et al. Research progress of catalysts and initiators for promoting the cracking of endothermic hydrocarbon fuels [J]. Transactions of Tianjin University, 2022, 28(3): 199-213.
- [4] WANG C, DU C P, SHANG J X, et al. A comprehensive review of the thermal cracking stability of endothermic hydrocarbon fuels [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 169: 105867.
- [5] ZUO J Y, ZHANG S L, WEI J F, et al. Effects of inflow parameters on thermal protection and drag reduction characteristics for hydrocarbon fueled supersonic film with combustion [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 43: 102822.
- [6] 赵宏亮,张蒙正. 超燃冲压发动机推阻力特性研究综述[J]. 火箭推进, 2014, 40(6): 44-50.
ZHAO H L, ZHANG M Z. Investigation of thrust/drag property of scramjet [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(6): 44-50.
- [7] 唐亮,李平,周立新. 液体火箭发动机液膜冷却研究综述[J]. 火箭推进, 2020, 46(1): 1-12.
TANG L, LI P, ZHOU L X. Review on liquid film cooling of liquid rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(1): 1-12.
- [8] CHENG X, BI Q C, LAN H P, et al. Flow and heat transfer characteristics of coal-based rocket kerosene in mini-tube with ultra-high parameters [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 135: 106099.
- [9] 潘利生,郝亨隆,姚子康,等. 高速飞行器减阻降热研究进展[J]. 力学进展, 2023, 53(4): 793-818.
PAN L S, HAO H L, YAO Z K, et al. Current status of research on reducing drag and cooling of high-speed air-

- craft [J]. *Advances in Mechanics*, 2023, 53 (4): 793-818.
- [10] WEI J F, ZHANG S L, WANG H Y, et al. Effects of fuel conversion ratio on cooling and drag reduction performance for supersonic film using gaseous hydrocarbon fuel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216: 119181.
- [11] BOROVIK I, STROKACH E, KOZLOV A, et al. Influence of polyisobutylene kerosene additive on combustion efficiency in a liquid propellant rocket engine [J]. *Aerospace*, 2019, 6(12): 129.
- [12] RUSHD S, FERROUJDI H, YOUSUF H, et al. Applications of drag reducers for the pipeline transportation of heavy crude oils: A critical review and future research directions [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2024, 102(1): 438-458.
- [13] IVCHENKO P V, NIFANTEV I E, TAVTORKIN A V. Polyolefin drag reducing agents (review) [J]. *Petroleum Chemistry*, 2016, 56(9): 775-787.
- [14] GUERSONI V C B, BANNWART A C, DESTEFANI T, et al. Comparative study of drag reducers for light hydrocarbon flow [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2015, 33(8): 943-951.
- [15] HASSANEAN M H, AWAD M E, MARWAN H, et al. Studying the rheological properties and the influence of drag reduction on a waxy crude oil in pipeline flow [J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, 25(1): 39-44.
- [16] LEE K H, ZHANG K, CHOI H J. Time dependence of turbulent drag reduction efficiency of polyisobutylene in kerosene [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2010, 16(4): 499-502.
- [17] GLUSHKOV D O, KUZNETSOV G V, NIGAY A G, et al. Influence of gellant and drag-reducing agent on the ignition characteristics of typical liquid hydrocarbon fuels [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 177: 66-79.
- [18] 李文端, 李天华, 张洁辉, 等. 聚甲基丙烯酸酯溶液的减阻性能和抗剪切性能的研究 [J]. *油田化学*, 1990, 7(2): 156-161.
- LI W D, LI T H, ZHANG J H, et al. Studies on drag reduction effectiveness and resistance to degradation of poly (decyl methacrylate) solution [J]. *Oilfield Chemistry*, 1990, 7(2): 156-161.
- [19] 杨士林, 朱勤勤, 吴国光, 等. 油品流动减阻剂的研制(I): EP 型减阻剂 [J]. *油田化学*, 1985, 2(2): 123-130.
- YANG S L, ZHU Q Q, WU G G, et al. Reduction of turbulent drag in the flow of fuel oils by dilute polymer solutions (I): By ethylene-propylene copolymers [J]. *Oilfield Chemistry*, 1985, 2(2): 123-130.
- [20] GAPONOV V D, CHVANOV V K, FATUEV I Y, et al. The investigation of influence polyisobutylene additions to kerosene at the efficiency of combustion [J]. *Heat Analysis and Thermodynamic Effects*, 2011, 14: 295-312.
- [21] 杜宗昱, 朱成财, 吴金, 等. 火箭煤油降阻技术研究 [J]. *火箭推进*, 2017, 43(6): 32-37.
- DU Z G, ZHU C C, WU J, et al. Investigation on drag-reduction technology of rocket kerosene [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(6): 32-37.
- [22] 杜宗昱, 符全军, 韩伟, 等. 液体火箭降阻煤油及其制备方法: CN106929109A [P]. 2017-07-07.
- [23] 罗玉宏, 游岳, 蒋榕培, 等. 添加减阻剂的火箭煤油流阻与传热特性研究 [J]. *火箭推进*, 2018, 44(5): 66-70.
- LUO Y H, YOU Y, JIANG R P, et al. Study on flow resistance and heat transfer characteristics of rocket kerosene adding drag reducer [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(5): 66-70.
- [24] 阳倦成, 李凤臣, 周文武, 等. 黏弹性流体基铜纳米流体流动与传热实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(2): 366-370.
- YANG J C, LI F C, ZHOU W W, et al. Experimental investigation on flow and heat transfer of a viscoelastic fluid based Cu nanofluids [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(2): 366-370.
- [25] SUN B, ZHANG Z M, YANG D. Improved heat transfer and flow resistance achieved with drag reducing Cu nanofluids in the horizontal tube and built-in twisted belt tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 95: 69-82.
- [26] 张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 等. 低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(1): 129-134.
- ZHANG Z J, LIU Z H, PAN H, et al. Flow and heat transfer characteristics of low-flow resistance rocket kerosene under supercritical pressure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(1): 129-134.
- [27] 陈彦伯. 超临界压力下降阻煤油换热特性实验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- CHEN Y B. Experimental study on heat transfer characteristics of kerosene with supercritical pressure drop resistance [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and

- Technology, 2019.
- [28] GUO X D, CHEN X J, ZHOU W J, et al. Effect of polymer drag reducer on rheological properties of rocket kerosene solutions [J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3343.
- [29] MÜLLER-PLATHE F. Reversing the perturbation in non-equilibrium molecular dynamics: An easy way to calculate the shear viscosity of fluids [J]. *Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 1999, 59(5): 4894-4898.
- [30] LEN M, RAMASAMY U S, LICHTER S, et al. Thickening mechanisms of polyisobutylene in polyalphaolefin [J]. *Tribology Letters*, 2017, 66(1): 5.
- [31] KIM K, ADRIAN R J, BALACHANDAR S, et al. Dynamics of hairpin vortices and polymer-induced turbulent drag reduction [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(13): 134504.
- [32] PEREIRA A S, MOMPEAN G, SOARES E J. Modeling and numerical simulations of polymer degradation in a drag reducing plane Couette flow [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2018, 256: 1-7.
- [33] WHITE C M, MUNGAL M G. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40(1): 235-256.
- [34] DIMITROPOULOS C D, DUBIEF Y, SHAQFEH E S G, et al. Direct numerical simulation of polymer-induced drag reduction in turbulent boundary layer flow [J]. 2004, 17(1): 011705.
- [35] 杜宗罡, 史雪梅, 单世群, 等. 减阻航天煤油减阻机理与传热规律数值模拟 [J]. *火箭推进*, 2022, 48(1): 76-82.
- DU Z G, SHI X M, SHAN S Q, et al. Numerical study on flow drag reduction mechanism and heat transfer process of polymer drag reducing rocket kerosene [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2022, 48(1): 76-82.
- [36] LI B, LI W X, ZHENG X, et al. Numerical study on influences of drag reducing additive in supercritical flow of kerosene in a millichannel [J]. *Energies*, 2021, 14(20): 6758.
- [37] ZHONG F Q, FAN X J, YU G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(3): 543-550.
- [38] 唐明明. 减阻剂对煤油超临界流动与换热特性影响的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [39] 张文华. 黏弹性流体湍流减阻机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [40] 李巍, 黄伟, 开金河. 减阻剂发展现状及在庆咸管道的应用[J]. *化学工程与装备*, 2012(9): 140-142.
- LI W, HUANG W, KAI J H. Development status of drag reducer and its application in Qingxian pipeline [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2012(9): 140-142.
- [41] ABUBAKAR A, AL-WAHAIBI Y, AL-WAHAIBI T, et al. Effect of pipe diameter on horizontal oil-water flow before and after addition of drag-reducing polymer (part I): flow patterns and pressure gradients [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 153: 12-22.
- [42] ABDULBARI H A, AMIR R. Drag reduction performance and stability of an organic polymer, surfactant, and their complexes [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2021, 44(12): 2333-2340.
- [43] ELBING B R, WINKEL E S, SOLOMON M J, et al. Degradation of homogeneous polymer solutions in high shear turbulent pipe flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 47(6): 1033-1044.
- [44] SHETTY A M, SOLOMON M J. Aggregation in dilute solutions of high molar mass poly(ethylene) oxide and its effect on polymer turbulent drag reduction [J]. *Polymer*, 2009, 50(1): 261-270.
- [45] ZHAO M W, LIU S C, DAI C L, et al. Development and drag reduction behaviors of a water-in-water emulsion polymer drag reducer [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(5): 3707-3716.
- [46] ASIDIN M A, SUALI E, JUSNUKIN T, et al. Review on the applications and developments of drag reducing polymer in turbulent pipe flow [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, 27(8): 1921-1932.
- [47] VARSHNEY A, STEINBERG V. Drag enhancement and drag reduction in viscoelastic flow [J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3(10): 103302.
- [48] TOMS B A, STRAWBRIDGE D J. Elastic and viscous properties of dilute solutions of polymethyl methacrylate in organic liquids [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1953, 49(1): 1225-1232.
- [49] 张波. 管道减阻剂实验评价系统[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [50] NESYN G V, MANZHAI V N, SULEIMANOVA Y V, et al. Polymer drag-reducing agents for transportation of hydrocarbon liquids: Mechanism of action, estimation of

- efficiency, and features of production [J]. *Polymer Science Series A*, 2012, 54(1): 61-67.
- [51] 钱锦文, 王甦珍, 刘晓林, 等. 乙丙共聚物减阻和抗剪切性的研究[J]. *浙江大学学报*, 1986, 20(3): 25-32.
QIAN J W, WANG S C, LIU X L, et al. Studies on reduction effectiveness and shearing resistance of ethylene-propylene copolymer [J]. *Journal of Zhejiang University*, 1986, 20(3): 25-32.
- [52] DOS SANTOS W R, SPALENZA CASER E, SOARES E J, et al. Drag reduction in turbulent flows by diutan gum: A very stable natural drag reducer [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2020, 276: 104223.
- [53] STEELE A, BAYER I S, LOTH E. Pipe flow drag reduction effects from carbon nanotube additives [J]. *Carbon*, 2014, 77: 1183-1186.
- [54] SOARES E J. Review of mechanical degradation and deaggregation of drag reducing polymers in turbulent flows[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2020, 276: 104225.
- [55] HORN A F, MERRILL E W. Midpoint scission of macromolecules in dilute solution in turbulent flow [J]. *Nature*, 1984, 312: 140-141.
- [56] YASUDA K, ARMSTRONG R C, COHEN R E. Shear flow properties of concentrated solutions of linear and star branched polystyrenes [J]. *Rheologica Acta*, 1981, 20(2): 163-178.
- [57] KIM O K, LITTLE R C, PATTERSON R L, et al. Polymer structures and turbulent shear stability of drag reducing solutions [J]. *Nature*, 1974, 250: 408-410.
- [58] CHURCH D C, PETERSON G I, BOYDSTON A J. Comparison of mechanochemical chain scission rates for linear versus three-arm star polymers in strong acoustic fields [J]. *ACS Macro Letters*, 2014, 3(7): 648-651.
- [59] O'NEILL R T, BOULATOV R. Experimental quantitation of molecular conditions responsible for flow-induced polymer mechanochemistry [J]. *Nature Chemistry*, 2023, 15(9): 1214-1223.
- [60] STRIEGEL A M. Influence of chain architecture on the mechanochemical degradation of macromolecules [J]. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 2003, 56(1/2/3): 117-139.
- [61] CUSSUOL J D, SOARES E J, SIQUEIRA R N, et al. Polymer drag reduction regeneration [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2023, 321: 105126.
- [62] KALASHNIKOV V N. Degradation accompanying turbulent drag reduction by polymer additives [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2002, 103(2/3): 105-121.