

“十二五”国家重点图书

Advances
in
Materials
and
Mechanics

表面活性剂 湍流减阻

Turbulent Drag Reduction
by Surfactant Additives

李凤臣 宇波 魏进家 川口靖夫 著



SEU 2625334

262533

“十二五”国家重点图书

0357.5
14

表面活性剂湍流减阻

Turbulent Drag Reduction
by Surfactant Additives

BIAOMIAN HUOXINGJI TUANLIU JIANZU

李凤臣 宇波 魏进家 川口靖夫 著



图书在版编目(CIP)数据

表面活性剂湍流减阻/李凤臣等著. -- 北京:
高等教育出版社, 2012.6

(材料与力学进展/孙博华主编)

ISBN 978-7-04-034315-1

I. ①表… II. ①李… III. ①表面活性剂: 助剂-应用-湍流-减阻-研究 IV. ①O357.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 011823 号



策划编辑 刘剑波
责任校对 刘 莉

责任编辑 焦建虹
责任印制 毛斯璐

封面设计 刘晓翔

版式设计 范晓红

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京中科印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 14.5
字 数 270 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012 年 6 月第 1 版
印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷
定 价 49.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34315-00

前言

本书基于表面活性剂减阻剂湍流减阻流动研究领域最新的实验、数值模拟和理论分析方面的研究成果,详细阐述有关表面活性剂湍流减阻流动的湍流特性、理论、特殊技术及实际应用方面的问题。

近半个世纪以来,添加剂湍流减阻流动现象已吸引了多个学科(如化学工程、湍流、流体力学、流变学等)内众多研究人员的兴趣。由于湍流减阻流动具有的极其复杂的本质(主要缘于湍流本身的复杂性以及流体黏弹性与湍流之间相互作用所致的湍流减阻现象的复杂性两个方面)和减阻现象所具有的巨大工业应用潜力,各交叉学科的研究人员一直在付出不懈努力来研究添加剂湍流减阻机理,为该特殊现象发展独特的研究方法,为减阻流体的流变学性质和其流动的减阻现象建立更详尽的理论描述,推动湍流减阻效应在实际应用系统中的推广应用等。本书为读者提供与表面活性剂湍流减阻有关的丰富而重要的信息,尤其是涵盖了应用激光技术(激光多普勒测速仪和粒子图像测速仪)的实验研究、应用特殊处理的黏弹性流体本构方程和数值模拟技术的直接数值模拟研究、考虑减阻剂溶液内部微观结构的布朗动力学模拟研究、系统测试实际应用研究,以及详细介绍和总结这些研究中所取得的最新结果。本书述及的是与添加剂湍流减阻流动相关的交叉学科团体所感兴趣的核心内容。

李凤臣编写了第1章1.1~1.3节,第2章2.1节、2.2节、2.4节,第3章及第6章6.1节,并负责全书统稿;宇波编写了第4章;魏进家编写了第1章1.4节、第2章2.3节、第5章和第6章6.2~6.4节;川口靖夫是书中所述大部分研究内容的主要参与者之一,共同制订了本书的结构和内容设置。王艺博士、吴轩博士生、张成伟博士生、庞明军博士和王剑锋硕士在本书撰写过程中的资料收集与整理方面提供了帮助,在此表示感谢。感谢国家自然科学基金项目(编号:51121004、51076036、10872060、50506017、50876114、51134006、50821064、51076124)和哈尔滨工业大学基础研究杰出人才培养计划项目(编号:HIT.BRET.2010008)对本书研究工作的资助。

作者在此声明,本书并未包罗与添加剂湍流减阻现象相关的所有方面,尤其是对于有减阻效应的非壁面湍流、高分子聚合物溶液湍流减阻流动、减阻剂的化学性质等方面,或者未有涉及,或者未详细描述。

希望本书能够对从事湍流研究及湍流减阻研究的广大科技工作者有所帮助,如有不当之处敬请读者不吝斧正。

作者

2011年6月

目录

第 1 章 概论	1
1.1 背景	1
1.2 表面活性剂溶液	3
1.3 表面活性剂减阻机理及理论	7
1.3.1 从微观结构角度对表面活性剂湍流减阻机理的解释	7
1.3.2 从湍流物理角度对湍流减阻机理的解释	8
1.4 表面活性剂减阻的应用技术	11
参考文献	12
第 2 章 表面活性剂减阻流的减阻与换热性能	16
2.1 湍流减阻的基本概念	16
2.2 表面活性剂减阻性能及其影响因素	19
2.2.1 表面活性剂湍流减阻流动特性	19
2.2.2 表面活性剂减阻流动特性的影响因素	22
2.3 表面活性剂减阻的尺度效应及尺度放大方法	25
2.3.1 尺度效应及其影响	25
2.3.2 尺度放大方法的研究	27
2.3.3 各种尺度放大方法的适用性评价	39
2.4 表面活性剂的换热性能及其强化措施	43
2.4.1 表面活性剂减阻流动的对流换热特性	43
2.4.2 表面活性剂减阻流动的强化对流换热方法	45
参考文献	51
第 3 章 表面活性剂减阻流的湍流结构	55
3.1 减阻流湍流结构的测量方法	56
3.1.1 LDV	56
3.1.2 PIV	58
3.2 减阻流速度场及温度场统计特性	59
3.2.1 平均量分布	59
3.2.2 脉动强度分布	63
3.2.3 脉动量相关性分析	65
3.2.4 脉动量能谱分析	66
3.3 减阻流内湍流涡结构特性	71
3.3.1 湍流的识别方法——旋转强度法	72

3.3.2	$x-y$ 平面内湍涡分布特性	73
3.3.3	$y-z$ 平面内湍涡分布特性	75
3.3.4	$x-z$ 平面内湍涡分布特性	78
3.4	雷诺剪切应力与壁面法向湍流热流密度	85
	参考文献	87
第 4 章	表面活性剂减阻流的数值模拟	91
4.1	减阻流动的直接数值模拟	92
4.1.1	减阻流动数学模型	92
4.1.2	减阻流动数值模拟方法研究	95
4.2	减阻流动的雷诺平均	97
4.3	减阻流动直接数值模拟控制方程及数值方法	99
4.3.1	控制方程	99
4.3.2	数值计算方法	102
4.4	减阻流动直接数值模拟结果及讨论	106
4.4.1	表面活性剂减阻与传热的直接数值模拟	106
4.4.2	表面活性剂减阻直接数值模拟中流变参数的影响	134
4.4.3	表面活性剂减阻直接数值模拟的分层模型	146
4.5	减阻流动数值模拟小结及展望	149
	参考文献	150
第 5 章	表面活性剂溶液的微观结构及其流变特性	154
5.1	表面活性剂溶液的微观结构及其观测方法	154
5.1.1	表面活性剂溶液的微观结构	154
5.1.2	表面活性剂溶液内微观结构的观测方法	158
5.2	表面活性剂溶液的流变特性及其测量方法	160
5.2.1	流变特性参数	161
5.2.2	流变参数的测量方法	164
5.2.3	稀薄表面活性剂减阻溶液流变特性	168
5.3	表面活性剂溶液流变特性影响因素	174
5.4	自由面旋转流表征表面活性剂减阻溶液黏弹性的方法	177
5.5	表面活性剂溶液的分子动力学和布朗动力学数值模拟	182
5.5.1	模拟方法简述	183
5.5.2	WK 势作用模型的布朗动力学数值模拟	187
	参考文献	195
第 6 章	表面活性剂减阻应用技术	198
6.1	工程应用中需要解决的问题	198
6.1.1	表面活性剂减阻剂对换热器传热性能的影响及对策	199

6.1.2	表面活性剂减阻剂对环境的影响	200
6.1.3	尺度放大的问题	201
6.2	表面活性剂溶液的分离技术	201
6.3	表面活性剂减阻系统稳定性的研究	203
6.4	表面活性剂减阻的应用实例	209
6.4.1	表面活性剂在集中供暖系统中的应用	209
6.4.2	表面活性剂在中央空调系统中的应用	216
6.4.3	实际应用中表面活性剂的选取	218
参考文献		219

第 1 章

概 论

能源问题是伴随着我国乃至世界各国国民经济发展的最重要问题之一。而节约能源措施本身,已被我国专家视为继煤炭、石油、天然气和电力之后的“第五能源”,可以大大节省常规能源开发的投资^[1]。尤为重要的是,对节约能源这一“第五能源”的利用,不仅不会产生诸如 CO_2 、 NO_x 等有害气体的排放,而且是获得了多少“节约能源”,就相应地减少了多少当量的有害气体的排放。在我国,无论是产品能耗还是产值能耗都比发达国家高出许多,因此,在很多个环节如能采取有效措施,其节能潜力巨大。添加剂湍流减阻技术即是在长距离液体输运或者液体循环系统中可被有效利用的节能措施之一,有着光明的应用前景。

1.1 背景

湍流减阻技术对提高能源利用效率、保护生态环境等都有着重要的意义。近年来国际学术界对湍流减阻的基础和应用研究十分重视,每年都要召开有关湍流减阻的专门学术会议,或者在国际流体力学或流体工程大会上都要开设有关减阻方面的分会,湍流减阻已经发展成为当今流体力学及流体工程界的一个

热门学科。添加剂湍流减阻技术作为湍流减阻领域的一个重要分支,是指在管道中的液体湍流流动中加入微量(一般以百万分之一量级计)添加剂,从而使湍流摩擦阻力显著降低的流体输送技术,与其他湍流减阻技术相比,其特点是湍流减阻效果最为明显,也最为廉价且容易操作。

早在1931年,Forrest和Grierson^[2]就发现当水的管道湍流中有纸浆纤维悬浮时,其流动阻力在相同流量下会减小,但这一现象在当时并未引起足够重视。首次发现聚合物湍流减阻现象的是美国学者Mysels^[3]。Mysels和他的助手发现汽油在管道中流动时,当在其中溶入双脂肪酸铝(aluminum disoap)后,在相同流量下其流动阻力会降低^[4],但由于第二次世界大战的影响,这一发现直到1949年才得以发表出来。在1948年举行的第一届国际流变学大会上(其会议文集发表于1949年),英国学者Toms报道了高分子聚合物稀薄溶液的湍流减阻现象^[5],于是后来常把添加剂湍流减阻现象称为Toms效应(Toms effect)。从那以后,在全世界范围内对湍流减阻机理及湍流减阻技术的实际应用开展了大量的研究工作,对湍流减阻现象已有了充分的认识,并在实际应用方面也有了长足进展。

Toms效应的一个典型商用成功实例是1982年报道的利用高分子聚合物添加剂在美国阿拉斯加输油管道中获得了减阻增输作用^[6]。在输油管道沿程4个不同泵站位置分别注入较高浓度的高分子聚合物溶液,使管道内原油流量提高25%,对于1.2 m内径的阿拉斯加输油管道,其每天输油能力提升了10万桶。目前,高分子聚合物湍流减阻效应已被广泛应用于长距离原油输运管道的减阻增输。然而,在强剪切力、高温等因素的作用下,对湍流减阻效应起主要作用的高分子聚合物的柔性分子长链结构将被破坏,而且破坏后无法自动修复,导致其湍流减阻效应永久性丧失,所以高分子聚合物减阻剂一般不适用于有泵循环系统。

20世纪70年代前后开始,某些表面活性剂也被发现具有减小湍流摩擦阻力的作用。后来的研究中发现,表面活性剂溶液湍流减阻流体流动中产生减阻效应的因素是溶液流动内部生成的微观结构,即所谓的剪切诱导结构(shear induced structures, SIS),这是由于表面活性剂溶于水后,在稳定剂(例如对于阳离子表面活性剂,可提供抗离子)的帮助下,其小分子会形成棒状微观结构,在适度的切应力作用下又形成网状微观结构。与高分子聚合物溶液中的柔性长链微观结构一样,表面活性剂减阻溶液内部的网状微观结构也能够产生一种称之为“黏弹性”的流变学物性,表现出特殊的非牛顿流体性质,该类流体也被称为黏弹性流体。也正是由于溶液流动内部产生了黏弹性,继而与湍流之间发生作用,产生湍流减阻功效。由于表面活性剂溶液内部的微观结构归根到底是由其小分子单元形成的,在遭到强切应力作用(例如,在液体循环系统中每次通过离心泵时的情形)后,溶液内部的网状微观结构也会被解离、破坏,但在强剪切作用消失后,微观结构会在秒的时间量级内自动重新生成,即有自修复功能,同样,其湍流减阻功效也会得到恢复。基于此,在实际的有泵液体循环系统中,表

面活性剂减阻剂更适合用来达到长效的减小流动摩擦阻力、节约驱动泵功耗的目的。另外,表面活性剂减阻剂也有其适用的温度范围,但超过适用温度后,表面活性剂减阻剂只是暂时失去减阻效果,在温度回到适用范围之内之后减阻能力会自动恢复。

表面活性剂的减阻效应在工业和日常生活中最大的潜在应用场所为区域集中供热或供冷循环系统,国际上已有成功的应用实例。例如,日本索尼公司栃木工厂的一个总容积为 60 m^3 的空调冷水系统,在 2002 年 7 月开始应用表面活性剂减阻之后,第一年期间平均减阻率达到 57%,节约驱动泵用电能量 $61 \text{ kW} \cdot \text{h}$,以当时当地电价 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 12 日元计算,一年间节省资金 732 万日元(约合 55 万元人民币)^[7]。而第一次投入添加剂费用只有 64.8 万日元(约合 5 万元人民币)。目前索尼公司栃木工厂的该空调冷水系统仍在正常运行中。尽管由于系统或多或少的泄漏现象,以及添加剂本身的有效寿命等原因,为保证系统中添加剂浓度满足减阻的需要,必须定期向系统中追加投入添加剂,但因节约驱动泵功耗而节省的资金远远大于添加剂的消耗费用。作者于 2007 年 12 月在我国首次完成了在实际集中供热系统中,应用表面活性剂减阻剂获得节能效果的试验研究^[8],获得了预期的节能效果,同时也发现了需要解决的实际问题,为添加剂湍流减阻技术在集中供热系统中的应用推广奠定了基础。第 6 章中将对此次试验进行详细描述。

本书主要围绕表面活性剂减阻剂的特性、湍流减阻机理、湍流减阻流动的对流换热特性、应用研究、湍流减阻流动实验研究技术、湍流减阻流动数值模拟研究技术等多个方面,结合作者多年来的研究成果,对湍流减阻理论与技术进行系统的总结归纳,力图形成较为完整的体系。

1.2 表面活性剂溶液

表面活性剂溶液流动是否具有减阻效应取决于溶液内部能否形成剪切致棒状,继而网状的微观结构,而这类微观结构归根到底是由表面活性剂小分子形成的胶束(micelle)结构。多篇综述性文章中已经对表面活性剂减阻溶液内部的微观结构特性进行了详细的描述^[9-11]。表面活性剂分子同时具有疏水性的尾部和亲水性的头部,一般来说,疏水性尾部是一碱基长链,而亲水性头部却是可离子化、有极性或者可极化。当表面活性剂分子处于水环境中时,亲水性头部乐于存在于水相当中,而疏水性尾部则试图远离水相,那么只有两种选择可避免疏水性尾部与水相接触:一是疏水性尾部指向无极性的相,例如气相、无极性的固相或者具有疏水性的液相;二是表面活性剂分子集团之间进行排列、重组,形成胶束结构,使得无极性的部分(疏水性尾部)汇集于胶束结构的中心部位,而有极性的部分(亲水性头部)位于胶束结构的表面与水相接触,形成了如图 1.1 所示的微观结构。

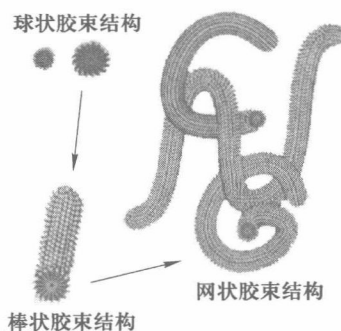


图 1.1 表面活性剂溶液内部的微观结构示意图。表面活性剂分子聚集构成球状、棒状胶束结构,继而由于流动中的剪切作用形成网状结构

能够形成胶束结构是表面活性剂溶液浓度在超过其临界胶束浓度 (CMC) 时表现出的典型特征, 浓度超过 CMC 之后, 表面活性剂单个分子与其所形成的胶束之间总是处于热力学平衡状态。图 1.2 示意了表面活性剂水溶液的一个简单相图, 当温度低于所谓的 Kraft 点时, 溶液中的表面活性剂部分处于晶体或者胶体形态, 温度高于此点之后, 表面活性剂分子在溶液浓度超过 CMC 后聚集在一起形成球状胶束, 进一步增大溶液浓度超过 CMC_{II} 后, 又会形成棒状胶束。图 1.2 也表明表面活性剂水溶液的 CMC 几乎不随温度变化, 而 CMC_{II} 随温度升高而增大。根据表面活性剂分子的亲水性或极性头部, 可将其分成两大类: 离子型 (ionics) 和非离子型 (nonionics)。离子型表面活性剂又可进一步分成阴离子型 (anionics) 和阳离子型 (cationics) 两种, 非离子型表面活性剂则可进一步分成双离子型 (zwitterionic)、半极性 (semipolar) 和单一键结构 (single-bond) 三种类型^[12]。

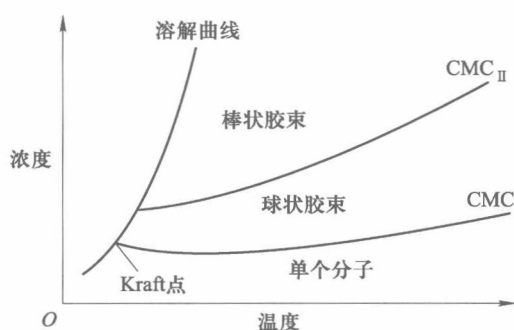


图 1.2 表面活性剂溶液的相图示意图^[9]

早些时候, 阴离子型和非离子型表面活性剂被认为可作为湍流减阻剂, 而在直到目前的实验研究中, 绝大多数研究人员采用阳离子型表面活性剂结合其他添加剂作为湍流减阻剂来进行湍流减阻流动机理等方面的研究。但是, 由于

阳离子表面活性剂分子中一般含有季铵基,其厌氧降解过程较为缓慢,于是,一些环境监察机构已经开始不愿让阳离子型表面活性剂作为湍流减阻剂在集中供热/供冷系统中使用。因此,过去的十几年期间,人们致力于开发一些替代的表面活性剂减阻剂,并发现双离子型和两性(amphoteric)表面活性剂更适合于集中供热/供冷系统节能之用。文献[10]中对不同类型可用做湍流减阻剂的表面活性剂分别做了综述和总结。

1. 阴离子型表面活性剂

在较早期的湍流减阻流动实验研究中,有几种阴离子型表面活性剂被用做减阻剂。例如,Pilpel研究了油酸钠(sodium oleate)/氯化钠和 $C_6 \sim C_{12}$ 醇所具有的黏弹性流变学物性,发现盐类和醇类都有助于使表面活性剂分子形成的胶束由球状转变成圆柱状结构^[13]。尽管Pilpel并未测量所研究的表面活性剂溶液流动的湍流减阻特性,但黏弹性物性的存在本身就表明该种流体可被作为湍流减阻剂。Savins于1967年最早报道了用阴离子型表面活性剂获得湍流减阻的实验结果^[14],他用0.2%的油酸钠溶于10%的氯化钾水溶液,测得了高达82%的湍流减阻率。Tsujii等报道了部分中和的链烯基丁二酸(alkenyl succinates)溶液也表现出很强的黏弹性流变学物性,也可能被用做湍流减阻剂^[15]。但这种表面活性剂溶液的最佳黏弹性表现在pH为6左右,因此用在钢管中的水流减阻方面已经基本被排除,因为酸性条件下溶液对钢管的腐蚀性很强。

2. 阳离子型表面活性剂

阳离子型表面活性剂作为减阻剂使用时通常要辅助于另外的添加剂以提供抗离子。White于1967年发表的文章是有关阳离子型表面活性剂水溶液湍流减阻流动的最早报道之一^[16],该研究中所用的减阻剂是浓度为508 mg/L的十六烷基三甲基溴化铵(cetyltrimethylammonium bromide)和1-萘酚(1-naphthol)的水溶液,他当时已发现了一个重要现象,即一定直径的管道内,一定浓度的表面活性剂溶液湍流减阻现象会终止于某一临界雷诺数。这一现象后来被证明是由于产生黏弹性、继而产生湍流减阻效应的表面活性剂溶液流动内部的微观结构会在某一临界雷诺数(临界剪切率)下遭到完全破坏,使溶液失去黏弹性和减阻功效。后来,包括本书作者在内在所进行的大量表面活性剂溶液湍流减阻流动实验研究中也再现了这一现象^[17-20],这对湍流减阻效应在实际系统中应用时确定最终减阻剂溶液浓度和相应的流动参数(管径、流速等)尤为重要。阳离子型表面活性剂减阻方面研究的一个重要进展是用芳香族化合物取代1-萘酚来作为四元铵基表面活性剂的辅助添加剂,例如,Gravsholt于1976年发表的文章中报道了十六烷基三甲基水杨酸铵(cetyltrimethylammonium salicylate)水溶液在67 mg/L浓度下即表现出了黏弹性流变学物性^[21],表明该种流体有湍流减阻功效。后来的有关阳离子型表面活性剂减阻剂湍流减阻流动的实验研究中,多采用芳香族化合物作为辅助添加剂来提供抗离子,如本书作者所进行的系列湍流减阻流动实验研究中采用

水杨酸钠 (sodium salicylate, NaSal) 来为表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵 (cetyltrimethylammonium chloride, CTAC) 提供抗离子, 共同配置成具有湍流减阻功效的减阻剂溶液^[17-20]。

3. 非离子型表面活性剂

Zakin 和 Chiang 于 1972 年第一次报道非离子型表面活性剂减阻剂的湍流减阻特性^[22], 他们用 C_{12} 醇和 C_{14} 醇的羟乙基混合物溶于水, 得到 1% 浓度的水溶液, 再辅之以不同量的硫酸钠。结果发现, 当温度保持在 303 K 时, 溶液中所加盐的浓度从 0.1 mol/L 开始, 其流动才表现出明显的湍流减阻现象, 当盐浓度达到 0.175 mol/L 时, 湍流减阻效果最好。这类非离子型表面活性剂属于羟乙基脂肪醇类 (fatty alcohol ethoxylates)。另一类有湍流减阻功效的非离子型表面活性剂为羟乙基脂肪酸酰胺类 (fatty acid amide ethoxylates)。单乙醇胺脂肪酸羟乙基混合物中, 当羟乙基化的部分处于某一比例时, 该种物质的水溶液流动即可表现出湍流减阻性质, 而且其湍流减阻效应的适用温度甚至可以达到零摄氏度以下。以上两种非离子型表面活性剂的混合物也能表现出很好的湍流减阻功效^[10]。

4. 两性表面活性剂

两性表面活性剂是指同时有酸碱性的表面活性剂。烷烃的环氧化物 (alkane epoxide) 与肌氨酸钠 (sodium sarcosinate) 之间发生反应可以产生两性表面活性剂, 当这类产物的水溶液在 pH 小于 9 时被发现表现出黏弹性, 意味着其流动能够产生湍流减阻效果, 如 Harwigsson 和 Hellsten 在其实验研究中就得到了两性表面活性剂水溶液流动的湍流减阻特性^[23]。

5. 双离子型表面活性剂

由于 2 羟基烷基肌氨酸盐 (2-hydroxyalkyl sarcosinates) 只在其双离子型结构形式下才表现出黏弹性, 继而有湍流减阻特性, 于是提醒人们对双离子型表面活性剂减阻剂的研究与开发。Saul 等研究了十六烷基二甲基铵丙磺酸内酯 (hexadecyl dimethyl ammoniopropanesulfonate) 和十二烷基硫酸钠 (sodium dodecyl sulfate) 的混合物, 发现其水溶液中两种物质的配比为 1.7:1 时表现出了明显的黏弹性^[24]。Tsujii 等^[25] 和 Iwasaki 等^[26] 也分别研究了不同种类的双离子型表面活性剂和阴离子型表面活性剂混合物的黏弹性特性。Harwigsson 和 Hellsten^[23] 及 Myska 和 Chara^[27] 在其实验研究中测量了 *N*-烷基甜菜碱 (*N*-alkylbetaine) 和十二烷基苯磺酸钠 (sodium dodecyl benzenesulfonate) 的摩尔比为 4:1 的混合物水溶液的湍流减阻特性。后来的研究中发现烷基硫酸盐 (alkyl sulfates) 和烷基聚二醇醚硫酸盐 (alkyl polyglycol ether sulfates) 均可与 *N*-烷基甜菜碱一起作为阴离子型表面活性剂减阻剂^[10]。

1.3 表面活性剂减阻机理及理论

尽管目前对化学减阻剂(这里主要指高分子聚合物减阻剂和表面活性剂减阻剂)已经有了相当规模的实际系统应用研究或工业化应用,并且对影响减阻效果的一些因素已有了一定的了解,但由于对湍流本身的了解还不够全面,添加剂在湍流中产生减阻的原因至今尚不十分清楚。围绕减阻机理,曾提出一些假说和模型,但没有一种理论可以圆满解释添加剂湍流减阻流动中的所有实验现象,减阻机理还有待深入研究。对于从湍流物理的角度出发给出的湍流减阻机理的解释,既适用于高分子聚合物减阻剂,也适用于表面活性剂减阻剂,因此,在下面这方面的叙述中不分化学减阻剂的种类,尽管有的对湍流减阻机理的解释是针对高分子聚合物而得来的。而从减阻剂溶液内部微观结构的角度出发,对减阻机理进行定性解释时,前面已经提及过,高分子聚合物减阻剂和表面活性剂减阻剂之间是不同的。本书只针对表面活性剂减阻剂的减阻机理在这方面进行叙述。

1.3.1 从微观结构角度对表面活性剂湍流减阻机理的解释

表面活性剂减阻溶液中的微观结构形式可能是传统的蠕虫状胶束结构(worm-like micelles)、有分支的虫状胶束构成的网状结构,或者是囊泡状结构,每一种结构形式的微观结构都可能给溶液本身带来不同的流变学物性以及不同程度的减阻效应。Zakin 等^[11]根据如上三种可能存在的静态微观结构形式,把表面活性剂减阻溶液分为三类,并分别把溶液流动的减阻效应与流变学物性关联在一起。

绝大多数的表面活性剂减阻溶液处于静止状态时,内部都会形成蠕虫状胶束结构,当有剪切力作用时,蠕虫状胶束结构很容易就会倾向于与流动方向排列一致,这种效果导致湍流减阻效应的产生,而且导致较大的临界剪切力或临界雷诺数(减阻率首先随流动雷诺数增大而增大,在临界雷诺数下达到最大值,之后便随雷诺数增大而减小,直至消失)。内部有蠕虫状胶束结构的表面活性剂减阻溶液一般来说会表现出明显的流变学物性,如较大的零剪切黏性、剪切稀释特性(剪切黏性随剪切率增大而减小)、较大的黏弹性、旋转流动停止驱动后的快速反弹现象、较大的拉伸黏性与剪切黏性之比(一般大于 100)等。

有一些表面活性剂湍流减阻系统会形成有分支的蠕虫状胶束结构,即三路分支交接在一起的蠕虫状结构,当胶束结构形成半圆形端头所需能量高到足以克服形成鞍形分支接头所需的能量时,即可以形成分支结构,此时比起前面一种情况,溶液内的蠕虫状胶束微观结构的端头数目变少。研究表明,分支结构的接合点能够沿着蠕虫状胶束结构的轴向方向自由移动,这样当受到剪切率作用时能够迅速把切应力松弛掉,从而减小溶液的剪切黏性^[28]。形成分支结构的表

面活性剂溶液的减阻效果也很明显,但是其最大减阻率比无分支蠕虫状胶束结构的情形要小,然而,这种情况下的临界雷诺数却比后者要大,而且分支中的接点可沿胶束轴向自由移动的复杂行为也导致了这时的表面活性剂溶液表现出更为复杂的流变学物性。

也有几种表面活性剂溶液在处于静止状态时内部会形成囊泡或液晶状态,在湍流流动中,当受到的剪切率超过临界值后,这些形态可以转化成蠕虫状胶束结构,从而使该类表面活性剂溶液流动表现出湍流减阻现象。此时,因剪切而引起的表面活性剂溶液从无减阻功效向具有减阻功效的转变过程,类似于湍流流动中的湍流减阻现象的起始诱发过程,所不同的是,当引起溶液内部微观结构变化的临界剪切率小于流动从层流向湍流转捩的临界壁面剪切率时,湍流减阻的起始诱发过程将观察不到。对于一般的流变学物性测量,由于流变仪所能加上的剪切率不够大,即达不到溶液内部微观结构发生变化的临界剪切率时,这类表面活性剂溶液可能表现出牛顿流体的性质,即较小的剪切黏性、无网状结构(SIS)产生、第一正应力差保持为0、拉伸黏性与剪切黏性的比值较小等^[29]。

1.3.2 从湍流物理角度对湍流减阻机理的解释

到目前为止,已发表的几种较有代表性的理论总结如下。

1. 伪塑说

Toms^[5]最早提出,聚合物溶液具有伪塑性,剪切速率越大,表观黏度越小,溶液通过管道流动时,壁面附近剪切速率大,黏度降低,从而使流动阻力降低。经过后来大量的实验和理论研究表明,聚合物添加剂湍流减阻机理要复杂得多,目前这种理论已被否定。

2. 有效滑移说

Virk根据管流速度分布测量的结果提出了弹性缓冲层的流动模式^[30]。他认为聚合物的加入在管壁的层流底层和湍流核心之间生成一弹性缓冲层,此层的速度梯度较大,使湍流核心部分的速度分布曲线相对于牛顿流体的速度分布曲线向上移动了一个距离,即湍流核心部分的速度增大值。将此数值称为“有效滑移”(见图1.3,图中横坐标 y^+ 和纵坐标 U^+ 分别为应用壁面摩擦速度来进行量纲一化的无因次长度和速度)。由于湍流核心部分速度加大,相同条件下通过的流量增加,故发生减阻。弹性底层是聚合物分子与流动发生作用的区域,也就是发生减阻的区域。

根据Virk的假说,减阻剂浓度增大,弹性层厚度也增大,当弹性层扩展到管轴时,减阻就达到了极限。该假说成功地解释了最大减阻现象,而且也可以解释管径效应。但按照Virk的假说,最大减阻时的浓度应与最大传热减小(maximum heat transfer reduction)时的浓度相等,可实验结果证明是不等的。

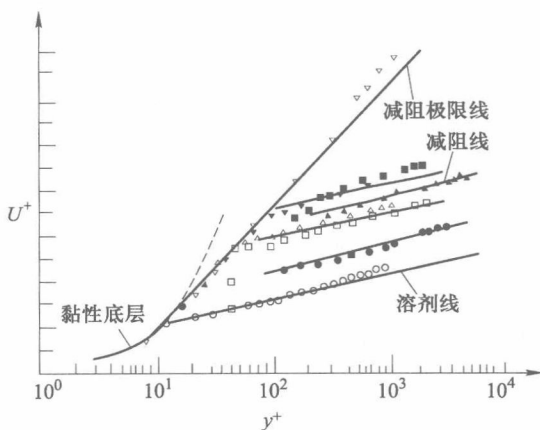


图 1.3 弹性底层模型

3. 湍流脉动抑制说

由于高聚物和表面活性剂减阻剂只对流动处于湍流时才有减阻效果, 故有人提出, 减阻是由于溶液中的减阻剂抑制了湍流旋涡的产生, 从而使脉动强度降低, 减少了能量损失, 最终结果是发生了湍流减阻现象。针对这一观点的正确性, 曾有两种不同的判断。到目前为止所有有关添加剂湍流减阻流动的研究结果中, 都得到了垂直于壁面方向上湍流速度脉动强度降低的结论, 一部分学者认为在流向上的湍流强度却有所加强, 这是基于比较牛顿流体湍流和减阻湍流中主流向无因次脉动速度强度而得出的结论^[31-34], 这里的无因次速度脉动强度是通过除以自身工况下的摩擦速度得到的。Li 等在其文章中对此进行了分析^[17], 认为用各自工况下的摩擦速度作为无因次参数并不确切, 而应该用各自工况下的平均速度 (同时反映了流动雷诺数)。用平均流速作无因次参数重新检验前人的研究结果发现, 所有的湍流减阻流动中各个方向上的湍流度都是降低的。因此, 用湍流脉动抑制说来解释湍流减阻在定性上可认为是正确的, 但必须指出减阻剂的作用并不只是减弱了湍流脉动的强度, 同时也改变了湍流的结构^[19,20,35-37]。

4. 湍流脉动解耦假说

目前很多的研究表明, 减阻剂对湍流的作用是降低了轴向脉动和径向脉动的相关性, 这种作用称为“解耦”。由于湍流脉动的解耦减小了雷诺应力, 根据 Fukagata 等推导出的雷诺剪切应力与摩擦阻力系数之间的直接关系式 (FIK 公式)^[38] 可知, 雷诺剪切应力的减小直接导致湍流流动的摩擦系数降低, 发生减阻现象。实际上, 雷诺剪切应力的减小是湍流脉动解耦和湍流脉动抑制两方面共同作用的结果^[17,33,39-41]。这一假说在定性上也是正确的。

5. 黏弹说

具有减阻效果的高聚物溶液和表面活性剂溶液一般都表现出黏弹性这种流变学物性。随着黏弹性流体力学的发展, 有人提出高聚物和表面活性剂减阻剂

溶液的减阻作用是其黏弹性和湍流旋涡之间发生相互作用的结果。位于高应变速率区的减阻剂溶液内微观结构(高聚物分子链或表面活性剂溶液内的网状结构)可以将载能涡旋区中由小尺度涡旋耗散的能量吸收并存储在伸展的微观结构中。当储能微观结构扩散或对流到低应变速率区后,将松弛至无规则线团状,其存储的能量则以弹性切应力波的形式释放给低波数涡旋(大尺度涡旋),大大减小了流体的流动动能的耗散,实现湍流减阻。

减阻剂湍流减阻机理的黏弹性理论是 DeGennes 提出的^[42]。黏弹性假设不仅能解释许多具有黏弹性的高分子聚合物和表面活性剂溶液的减阻现象,而且还能定量计算减阻率,也是从湍流物理的角度研究减阻机理、发展新的湍流减阻流动的定量分析理论的有力工具。然而 Den Toonder^[43]的应力各向异性理论的研究使之受到了挑战。

6. 应力各向异性假说

该假说认为,聚合物分子在湍流边界层中受到拉伸而取向,从而引起的应力各向异性是聚合物减阻的主要原因。为了证实这种观点,Den Toonder^[43]利用激光多普勒测速仪测量了近壁区的湍流统计量及湍动能谱,构建了两种模型:一种是黏性应力各向异性模型(VA),另外一种黏弹各向异性模型(VEA)。通过直接数值模拟(DNS)分析了聚合物结构对近壁区应力张量的影响。计算表明,VA模型的计算结果和实验数据符合得很好,而引入聚合物弹性因素的VEA模型的计算结果和实验数据出入较大。这样的研究结果很好地支持了Den Toonder应力各向异性假说的观点,对传统的黏弹说是一个挑战。

Bewersdoff等^[44]应用冷中子小角度散射测量技术,观察了一种表面活性剂溶于重水中所成胶束的变形特点。发现溶液静止时,胶束呈现椭球形,椭球的长短轴随机取向,而溶液在湍流时,椭球长轴的取向具有一定的方向性。该结论也与应力各向异性假说相符。目前该方向上的研究并未最终定论,与黏弹说究竟孰对孰错仍有待继续深入研究。

7. 涡旋稳定假说

在湍流中,流体的流动阻力主要是由尺度大小随机、运动随机的旋涡形成的。尽管旋涡的形成是随机的,但旋涡总是逐渐分解而产生尺度越来越小的旋涡(能量级联),直至分解到相对于该流动雷诺数下的最小尺度涡(Kolmogorov尺度涡),旋涡能量最终因流体的黏性变成热能而耗散掉。

该假说指出,减阻剂的存在将使湍流中的能量级联发生极大变化,即当紊动流体的雷诺应力与减阻剂溶液的弹性应力处于同一个数量级时,能量传递链就被“截断”了,能量耗散无法达到最终状态,于是流动阻力就下降了^[45-47]。

8. 表面随机更新假说

对于壁面湍流,其边界层可分成三层:黏性底层、过渡层和湍流核心区。黏性底层是靠近壁面的薄层,其中存在间歇性的湍流脉动。如果把壁面湍流流动的动量传递边界层看成是由一块块的动量传递块所组成,那么这些动量传递块会随机地被来自主流的流体微团所更新,分解成新的流体单元而产生旋涡,产