

添加剂减阻及其在供热系统中的应用

哈尔滨工业大学 朱蒙生[☆] 邹平华 蔡伟华[△]

摘要 简要介绍了添加剂减阻的国内外研究概况,详细介绍了减阻剂的特性、减阻机理、流场湍动测量、减阻效果对传热的影响及添加剂减阻在集中供热系统中的应用。

关键词 减阻 特性 机理 传热 供热系统

Application of additive drag reduction to heating systems

By Zhu Mengsheng[★], Zou Pinghua and Cai Weihua

Abstract Gives a brief presentation of the research status at home and abroad of drag reduction by additives and a detailed description of the characteristics, drag reduction mechanism, measurement of flow field turbulent motion, influence of drag reduction effect on heat transfer and the application of drag reduction by additives to central heating systems.

Keywords drag reduction, characteristic, mechanism, heat transfer, heating system

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

添加剂减阻是指在液体中加入少量的高分子聚合物或表面活性剂以大幅度减小其湍流摩阻的方法。该方法具有减阻剂投放量少、减阻效率高等优点,对于节能或提高水中物体的运动速度具有重大意义。在 20 世纪 50 年代及 60 年代初期,减阻研究多局限于流变学及石油化工领域,60 年代中期以后,添加剂减阻开始引起流体力学研究者的注意,研究工作更加广泛地开展起来^[1]。目前减阻剂已应用于水下武器发射、原油管道输送、泄洪、消防等领域,在原油管道输送领域,近 20 多年来先后研制出了聚氯乙烯、乙烯-丙烯共聚物、聚甲基丙烯酸等一系列油溶性减阻剂^[2]。1979 年美国某公司生产的 CDR 减阻剂开始应用于横贯阿拉斯加的原油输送管道中,取得了良好的节能效果^[3]。80 年代末至 90 年代中期在国外出现了将减阻剂应用在区域供热系统中的实验,取得了良好的节能和环保综合效益^[4]。近几十年,我国城市集中供热与空调系统发展迅速,其输配管网中水泵的能耗占总能耗的比例较大,若能在集中供热与空调水系统中应用减阻剂,节能环保效果将会十分显著^[5]。本文拟对添加剂减阻的国内外研究概况以及在供热工程中的

应用作简要介绍。

1 国内外研究概况

在添加剂减阻研究领域,具有代表性的成果是 1948 年第一届国际流变学会议上 Toms 发表的第一篇减阻论文,该文指出以少量的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)溶于氯苯,沿程阻力可降低 50%^[6]。此后,这种高分子减阻现象被称为 Toms 效应。Fabula 等人发现质量分数约为 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 的 PEO(聚氧化乙烯)水溶液与纯水相比最大减阻率可达 80%^[7]。Oliver 等人利用超大分子量聚丙烯酰胺 E-10 和 MG-200 作减阻剂,在 1×10^{-6} 质量分数下达到了 80% 的最大减阻率^[8],充分证明了减阻剂的减阻高效性。减阻率又可称为减阻百分比,计算式为

①☆ 朱蒙生,男,1963 年 9 月生,博士研究生,博士,副教授
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院
(0451) 82307642
E-mail: zmszkg@sina.com

△ 150001 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院
(0) 15846300827
E-mail: caiwh@hit.edu.cn

收稿日期:2008-01-03

一次修回:2008-10-28

二次修回:2009-06-05

$$E = \frac{f - f'}{f} \times 100\% \quad (1)$$

式中 E 为减阻百分比; f 为加入减阻剂前流体的范宁摩阻系数; f' 为加入减阻剂后同一雷诺数下流体的范宁摩阻系数。

1974 年召开了第一次国际减阻会议,早期的主要研究成果由 White 和 Virk 等人进行了总结^[1,9]。国内的研究起步于上个世纪 70 年代,大多以实验研究为主,最早发表在公开刊物上的研究成果见文献^[10]。国内外有关添加剂减阻的研究主要体现在减阻剂的特性、减阻机理、实验研究及工程应用等方面。

1.1 减阻剂特性

目前,已发现的减阻剂种类很多,但能用于集中供热系统的减阻剂只有两类:第 1 类为高分子聚合物,例如 PEO, PAM(聚丙烯酰胺)等人工合成聚合物;第 2 类为表面活性剂,分为非离子、阳离子、阴离子和两性表面活性剂,例如 CTAC(十六烷基三甲基氯化铵)阳离子表面活性剂。

具有减阻效果的高分子聚合物应具有以下特点:1) 分子量一般要达到百万量级,这主要是因为分子量越大,减阻效果越好;2) 分子链为直线形结构,主链越长,支链越少,减阻效果越显著,这主要是因为分子链的支化会大大降低高分子聚合物的减阻效果;3) 用量少,也就是说添加极少量的高分子聚合物就会获得明显的减阻效果。

高分子聚合物存在明显的缺点:易降解、抗剪切性能差、受温度影响大。在湍流流动的高剪切力(或高温)以及泵的机械剪切作用下,其分子链极易断裂,从而降低甚至丧失减阻能力,这种降解是永久的不可逆过程^[11-12]。最近对 PAM 水溶液进行实验研究的结果表明, PAM 水溶液在低温条件下具有很好的减阻效果,但在高温条件下存在明显的降解^[13-14]。

与高分子聚合物相比,表面活性剂的相对分子量较小,而且具有良好的光、热、机械稳定性和可控性,适用于闭路循环水系统,并且对水质要求不高,有着更广泛的使用范围,因而受到极大的关注。一定浓度的表面活性剂在稳定剂和剪切力的作用下,大量的分子会聚集形成棒状结构,进而相互交织成网状结构,发挥减阻功效。与高分子聚合物不同的是,表面活性剂具有很强的抗剪切性能,在泵的机

械剪切作用下,其棒状结构即使会暂时断裂,但是经过泵之后(机械剪切消失),又可恢复为原来的棒状结构,仍具有较好的减阻效果^[15-17]。

减阻剂的减阻效果还受以下几个因素的影响:

1) 减阻流体溶液的浓度。Virk 认为减阻剂的浓度影响管道内流动的弹性底层的厚度,浓度越大,弹性底层越厚,减阻效果越好^[9]。最近对 PAM 和 CTAC 水溶液进行的减阻实验研究表明,在相同温度和雷诺数下,减阻效果随着溶液浓度的增加而变好;但是当浓度增加到一定程度后,减阻效果开始变差,这说明减阻流体存在一个最佳浓度^[13,18]。

2) 减阻流体溶液的温度。减阻剂都有其自身的适用温度范围,也就是说都存在着临界温度,并且在适用温度范围内随着温度升高减阻效果变差,一旦温度超过临界温度,即会出现减阻完全失效的现象。最近对 PAM 水溶液的减阻实验研究表明,在相同浓度和雷诺数下,减阻效果随着溶液温度的升高而减弱^[13-14]。

3) 流动雷诺数。只有当流动处于湍流时才会出现添加剂减阻现象,而且在一定范围内减阻率会随着雷诺数的增大而增大。对于一定浓度的减阻剂溶液来说,存在临界雷诺数,在该雷诺数下减阻效果最好,如果继续增大雷诺数,减阻效果开始减弱直至消失。

4) 流动通道的影响。一般来说,流道当量直径越小,越容易发生湍流减阻现象,减阻效果越明显。孙寿家等人对聚丙烯酰胺和聚乙二醇两种高聚物在 90°弯头中进行阻力测试,结果表明没有减阻现象出现^[19]。焦利芳对减阻流体 CTAC 水溶液在三通、弯头、变径管、散热器中的减阻效果进行研究,也发现没有明显的减阻现象^[20]。

5) 水中的杂质。水中含有的金属离子(如钙、镁离子等)和金属氧化物(如水循环系统中因生锈而混入的铁的氧化物)对表面活性剂、减阻剂的减阻效果有负面影响。Hu 等人研究了水中金属离子和化合物对阳离子表面活性剂显现出剪切诱导结构的流变参数的影响,结果表明,金属离子和化合物对减阻流体流变参数的影响可能会对减阻效果产生一定的影响,从而导致阳离子表面活性剂在工程中的应用受到一定的限制^[21]。Suksamranchit 等人在 PEO 和 CTAC 混合减阻剂

水溶液中添加 NaCl, 研究结果表明此举具有增强减阻效果的作用^[22]。

1.2 添加剂减阻机理

添加剂减阻机理的研究已经持续了半个多世纪, 但到目前为止, 还没有一种单一的理论 & 所有的实验证据相吻合^[23]。

最早的减阻论文由 Toms 发表, 他认为高聚物溶液可能是剪切稀化流体(伪塑性流体)。在壁面高剪切层内, 黏度较小, 因此能够减阻^[6]。事实上, 聚氧化乙烯等优良减阻剂的稀溶液并没有剪切稀化特性, 用通常的非牛顿测黏方法可以证明, 它们都是牛顿流体。Walsh 的研究结果显示, 聚甲基丙烯酸溶液虽是剪切稠化流体, 但在碱性环境中却具有较强的减阻作用^[24], 从而彻底推翻了 Toms 的理论。

因聚合物具有黏弹性, 许多理论工作者认为, 聚合物溶液的黏弹性通过某种方式起到了减阻作用, 法向应力差就可能是这样的一种机制。Elata 等人对剪切方向黏度较小而横向黏度很大的流体, 导出了剪切湍流的动量方程^[25]。此方程除了包含牛顿流体方程中的项, 还出现了代表附加应力的新项, 一种观点认为这些应力减少了湍流边界层内的动量传递, 从而使摩擦阻减小。但是, Gadd 测量了 PEO, PAM 和瓜胶溶液在相同减阻百分比下的法向应力, 发现只有 PEO 溶液与牛顿流体有差异, 因此 Gadd 认为法向应力差与减阻无关^[26]。

微涡尺度效应理论主要考虑添加剂与小漩涡的相互作用, 然而很难获得准确可靠的聚合物松弛时间。Millward 和 Lilley 提出了分子应变能贮藏理论, 要点是大漩涡向小漩涡层叠的能量传递过程中, 一部分高频能谱传给大分子, 改变了湍流的能量平衡^[27]。然而, 这一论点应用于固体粒子时却没有说服力^[1]。

此外, 还有狭义黏弹性理论、拉伸黏度理论等等, 均存在各种各样的无法解释的矛盾^[23]。一个较有希望的理论模型是哈佛大学 Abernathy 小组提出的椭球及有限伸展的非线性珠簧杂交模型^[28-29]。何钟怡等人改进了 Abernathy 小组提出的杂交模型, 建立了线性剪切流中大分子的运动方程及变形诱导的流场方程并进行了数值求解^[30], 目前这一理论仍在发展当中。正如 Hoyt 等人所指出的: “迄今为止用以解释减阻现象的一些理论,

都很容易受到挑剔, 然而提出其他可取的方法却又非常困难”^[31]。添加剂减阻机理的研究仍然是一个艰难的课题。

1.3 流场湍动测量

对减阻液流场进行湍动测量有利于添加剂减阻机理的探索。Abernathy 等人使用激光测速方法进行了低湍动度圆管流动实验, 在直径为 5.2 mm 的圆管内用人工扰动控制 PEO 溶液的流动状态, 结果发现, Zakin 等人所提到的湍动现象^[32]实际上是减阻液在低背景湍动度下一种普遍存在的非牛顿现象, 沿程阻力系数-雷诺数曲线图中层流曲线与 Virk 线之间的点(LV 区, 见图 1)即对应于此种状态。该区内阻力系数略大于同一雷诺数下的牛顿层流, 但远小于牛顿湍流。同时该区内存在很明显的速度脉动, 其速度分布与牛顿层流更为接近^[28]。他们还使用小散射体激光测速装置及超微轻气泡技术, 发现了减阻液在过渡到湍流之前存在特殊的速度波动, 经测量, 波动能谱的频段比较窄, 主要能量集中在峰值邻域, 能谱峰值的频率约为 100 Hz, 且高分子稀溶液略呈伪塑性^[29]。何钟怡等人用具有可调频、调幅人工扰动装置的低背景湍动管流系统, 研究了图 1 中 LV 区内流动的稳定性, 成功地在区内各状态点通过人工扰动激发出 Emmons 湍斑, 这是由层流向湍流过渡的典型表现, 从而证明了 Abernathy 等人的推测, 即 LV 区内的未扰动流为非牛顿层流^[33]。

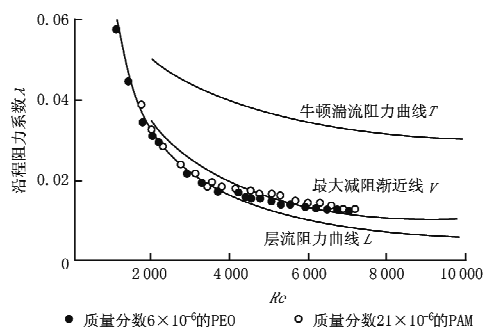


图 1 阻力系数曲线及 LV 区

以上各组实验的结果表明, Virk 线实际是减阻液非牛顿湍流区与非牛顿层流区的分界线, 因此湍流减阻必然以 Virk 线为渐近线, 典型实验曲线如图 1 所示^[34]。实验显示, 添加剂减阻存在最大极限, 达到此极限, 即使浓度再增加, 减阻百分比也不会增加, 这一现象称为最大减阻效应。虽然不同

的高分子聚合物达到最大减阻时所要求的浓度各不相同,但最终的摩阻曲线却是相同的。最大减阻的摩阻系数与雷诺数的关系曲线称为最大减阻渐近线。该曲线与聚合物的种类、分子量、溶液浓度、管径等因素无关。Virk 针对高分子溶液提出了最大减阻渐近线方程^[9]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19.0 \lg(Re \sqrt{f}) - 32.4 \quad (2)$$

需要指出的是,在某些文献中最大减阻渐近线会以沿程阻力系数与雷诺数的关系曲线形式表示^[31],此时式(2)变为

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 9.5 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 19.0 \quad (3)$$

式(2)和式(3)对于其他类型的减阻剂(表面活性剂、悬浮固体颗粒等)亦适用,因此得到了广泛承认^[1]。

许鹏等人关于低浓度 CTAC 阳离子表面活性剂减阻流体流动性能试验的研究发现,处于最大减阻状态的溶液,其横向速度脉动和主流方向速度脉动均明显小于牛顿流体;减阻流体主流方向速度脉动和横向速度脉动之间的关联被抑制,其雷诺应力与牛顿流体相比显著降低,而且两者主要在壁面附近存在最大的差别^[36]。王德忠等人应用 PIV 和 PDA 在二维流道内对 CTAC 减阻流体湍流流场进行了试验研究,结果发现在完全减阻区内,减阻流体的减阻性能随雷诺数的增大而变好;在过渡减阻区内,减阻流体的摩擦系数则随着雷诺数的增大而逐渐增大,直至与溶剂的摩擦系数相当;减阻流体的速度分布曲线在近壁面处与牛顿流体层状速度曲线趋近,但二者并不完全重合;在流道近壁面处,水湍流流动时所能观测到的强烈的旋涡波动在减阻流体中基本消失^[36]。近年来, Li 等人使用 PIV 通过实验研究间接测量了通道内湍流(牛顿流体湍流和表面活性剂溶液湍流减阻流动)的近壁拟序结构的发生频率和强度,相比牛顿流体,表面活性剂湍流流动中的近壁拟序结构的发生频率和强度大大降低,直接导致摩擦系数的湍流项大大降低,即湍流减阻的发生^[37-38]。

1.4 减阻效果对传热的影响

由于表面活性剂(或胶束)具有减阻可逆性并且能耐一定的高温而不降解,在城市大型集中供热系统中具有较好的应用前景^[39]。研究表明,当表

面活性剂在溶液中的浓度超过某一临界值时,会出现多个分子聚集形成胶束的情况,只有胶束形成之后才能够发挥其减阻效力。因此,表面活性剂减阻也被称为胶束减阻^[40]。

张维佳对阴离子型表面活性剂油酸钾的研究显示,温度为 60℃ 时,油酸钾在剪切力作用下持续循环 8 h 以上,未出现降解现象,最大减阻百分比一直保持在 80% 以上^[41]。马祥瑞等人利用国产阳离子型表面活性剂复配成减阻剂,并进行了水泵循环系统的减阻实验,结果显示,质量分数为 0.2% 时减阻有效温度范围大约为 40~70℃,质量分数为 0.5% 时温度高达 100℃ 仍可减阻^[42]。

Schmitt 得到的胶束减阻的典型实验结果如图 2 所示^[43]。由图可见,在 50~100℃ 高温条件下胶束仍具有很高的减阻效力。德国科技部资助了一项添加剂减阻合作研究计划,整理了实验室数据,得到了一套适合于管道定量计算的经验方程式;研究了热量传输系统的操作测量控制原理、减阻剂水溶液的循环与再生、金属材料设备的腐蚀修补技术,并在实际供热系统中全面使用表面活性剂进行减阻。合作研究单位包括区域供热公司、热力设备厂家、研究院校、区域供热协会和国际能源机构(IEA),研究结果显示最大减阻率达到 80%,可提高生产能力 30%^[44]。

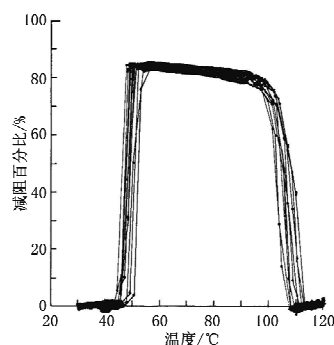
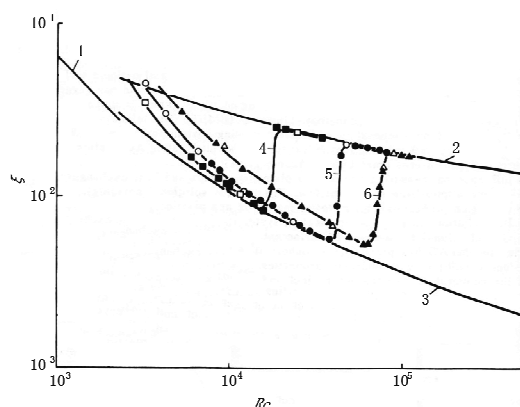


图 2 质量分数为 1.000×10^{-6} 的 SB452/2 水溶液
在直径为 8 mm 的管道中持续 110 h 情况
下的温度与减阻百分比关系曲线

对聚合物溶液的大量研究表明,在闭式工程热力系统中不可避免地存在机械剪切和热应力造成的降解,如果不维持某一持续加药剂量就无法获得足够稳定的减阻效力。因此,一般认为聚合物减阻剂不适用于闭式热力系统。表面活性剂则完全不同,它对于高剪切具有减阻可逆性,控制适当的剪

切力可以避免减阻对传热的不利影响。长期的观察显示,在高温下表面活性剂仍具有减阻效果,阳离子型表面活性剂特别适用于区域供热系统中^[44]。表面活性剂制造厂商制造了 3 种适用于区域供热系统的表面活性剂,其适用温度范围为 30~150 °C,管内流速范围为 0.1~4 m/s。Paul-Michacel 等人对由 C₁₆ TABr 制成的 Habon 溶液进行了减阻和传热的实验研究,发现阻力降低 20% 的同时传热效果下降 10%。当质量分数为 250×10⁻⁶ 时, Habon 溶液的有效减阻温度范围为 40~100 °C。他们强调指出,由于决定换热设备传热系数大小的是空气侧而不是液体侧的换热系数,因此投放减阻剂实际上不会明显抑制传热效果,典型实验曲线如图 3,4 所示^[45]。图 3 中横坐标为雷诺数 Re ,纵坐标为沿程阻力系数 ξ ,其中曲线 1 为层流 Hagen-Poiseuille 曲线,曲线 2 为湍流 Prandtl 曲线,曲线 3 为 Virk 线,其余 3 条曲线为质量分数为 250×10⁻⁶ 的 Habon 溶液在不同管径下的减阻效果曲线(曲线 4 管径 $d=8$ mm,曲线 5 管径 $d=$



■ $d=8$ mm ● $d=15$ mm ▲ $d=16$ mm

图 3 Habon 溶液在不同管径下的减阻效果

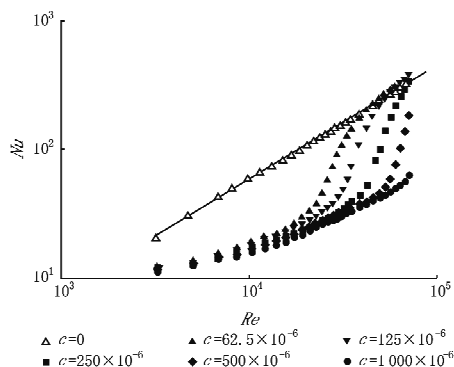


图 4 Habon 溶液在不同质量分数 c 下的传热效果(温度 60 °C)

15 mm,曲线 6 管径 $d=16$ mm),由图 3 可以看出该溶液有减阻效果时雷诺数的范围和管径对减阻效果的影响。图 4 中横坐标为雷诺数 Re ,纵坐标为努塞尔数 Nu 。由图 4 可以看出 Habon 减阻液质量分数的变化对传热性能的影响。

关于换热设备传热效果下降程度的问题,也有不同的研究结论,如 Gasljevic 等人对表面活性剂减阻的研究显示,阻力降低的同时传热效果会出现明显下降,阻力降低幅度与传热效果降低幅度的比值达 1.06 : 1^[46]。

董正方等人采用压差测定装置和热电偶测温系统分别对二维流道内不同的减阻流体的减阻性能及传热性能进行了试验。结果显示,当 CTAC 减阻流体的减阻率稳定时,随着雷诺数的增大,考尔朋因子与阻力系数比值小于 0.5,且随雷诺数增大缓慢减小;达到临界雷诺数后,考尔朋因子与阻力系数之比波动较大,并且迅速增大到接近 0.5;增大热流密度,靠近加热板的减阻流体的温度升高到一定程度后,会出现阻力系数增大,同时传热性能增强的现象,使得减阻流体的考尔朋因子与阻力系数的比值趋于没有添加减阻剂时的水平^[47]。这里的考尔朋因子是指量纲一传热系数,它是努塞尔数、雷诺数及普朗特数的函数,具体表达式见文献^[47]。

除了研究高温下的减阻效果外,还有的研究人员对低温下的减阻效果进行了一定的探索。近年来, Li 等人使用 PIV 测量技术对 CTAC 在二维槽道中的减阻流动进行了研究^[48-53],结果表明,质量分数为 75×10⁻⁶ 的 CTAC 水溶液在温度为 30 °C、 Re 为 11 000 时其减阻百分比可达 51%,这充分说明了 CTAC 水溶液具有很好的减阻效果。周静瑜等人实验测得 CTAC 减阻流体的减阻率为 67%^[54]。Zhou 等人在湍流完全发展的二维槽道内研究 CTAC 水溶液的减阻及传热效果,结果显示温度为 30 °C,质量分数分别为 30×10⁻⁶, 70×10⁻⁶, 80×10⁻⁶, 90×10⁻⁶ 时,其最大减阻百分比分别为 7%, 30%, 50%, 55%;当质量分数为 30×10⁻⁶ 时,并未出现传热效果变差的现象,质量分数增加到 90×10⁻⁶ 时,传热量减少高达 55%^[55]。魏进家等人对一种新合成的两性界面活性剂 N,N,N' -三甲胺- N' -油酸酰亚胺在二维通道内进行了减阻实验,以 20% 的甘醇不冻液为溶剂,溶液质量分数为 5×10⁻⁵~1×10⁻³,测试温度为 -5 °C 和 25

℃。结果显示两性界面活性剂 N,N,N' -三甲胺- N' -油酸酰亚胺溶液表现出明显的流动减阻性能, 25℃时的减阻效果要好于-5℃时的减阻效果, 最大减阻值可达 83%。而且在低温、低浓度情况下加入 NaNO_2 能有效改善减阻效果, 而在常温和高浓度情况下减阻效果变差^[56]。此外, 川口靖夫研究组将高分子添加剂用于热水及冷水、冷却水输送系统中, 实验结果显示可以减少一半以上的泵耗^[5]。

1.5 添加剂减阻在区域供热系统中的应用研究

Fernwärme-Verbund Saar GmbH 首次在区域供热系统中进行了大尺度的减阻试验。该系统管径为 DN450, 管长为 2 400 m, 循环水泵的流量为 1 450 m³/s, 水泵的扬程为 67 m, 其中一个换热站的输入功率为 30 MW。采用电磁感应流速仪、温度传感器、微分压力仪等仪器测量。试验结果显示, 系统压力减小 70%, 局部速度增加 30%^[4]。添加剂由瑞典某化学公司生产, 类似于前述的 Habon 溶液减阻剂, 主要适用于封闭式大型区域供热系统的热水输送管线^[38]。

1995—1998 年, 丹麦能源部资助了一项关于“应用光滑水在经济、能源以及环境领域的意义”的研究项目, 1999 年春, 研究成果应用于实际供热系统中。在欧共体能源示范计划中, 第一个项目建在荷尔宁 40 km 的输配管网中, 长度约为 2.8 km, 2×DN200 的管线通过一个蒸汽-水板式换热器与系统的其他部分分隔开来。此外, 还设置了相应的温度、压力和流量等参数的测量仪器。添加剂首次注入不久, 管道中的沿程阻力减小了 80% 以上, 即便在包括换热器、阀门、弯头等局部阻力部件的供热系统中, 也取得了使沿程阻力减小 70% 以上的效果^[4]。但系统中所使用的板式换热器出现了传热量减小的情况, 这是一个有待研究解决的重要问题。在德国 Dortmund 大学和丹麦 Elsamprojekt 公司的合作项目中, 在换热器管道中安装简单的螺旋弹簧以实现了对水流的扰动, 从而增加换热量。一年的运行结果显示, 在换热器内壁以简单的方式安装弹簧对管道没有损坏, 但阻力损失明显增大^[4]。在荷尔宁有一个主热源通过长 40 km 的输送系统向位于荷尔宁的 10 个供热站和荷尔宁周边的城镇供热。这种情况下使用光滑水, 可以减少水泵消耗的能量, 在 20 年中可获得大约 900 万丹麦克朗

(130 万美元)的巨大经济效益。在欧洲共同体, 发展热电联产以减少 CO₂ 等污染物的排放量是一项长期性政策。将该项目中荷尔宁与哥本哈根间的热力管道系统作为模型进行计算, 发现光滑水的使用将间接导致 CO₂ 等污染物的排放量大幅度减少^[4]。以上研究结果表明, 减阻剂的使用可以减少供热系统的运行费用和减少 CO₂, NO_x 和 SO₂ 等的排放量, 达到节约能源和提高环境质量的目的。

焦利芳等人在我国首次进行了在实际集中供热系统中加入 CTAC 阳离子表面活性剂从而实现湍流减阻、增输和节能目的的应用试验研究。结果显示, 获得了最高为 11.7% 的增输率, 假定通过变频调节的方法使系统总流量维持在加表面活性剂前的水平, 主供水泵运行功率减小率可达 28.4%; 该集中供热系统换热站的板式换热器以及各分散热用户内的散热器没有受到明显的影响, 但出现的问题是 CTAC 水溶液对系统有一定的腐蚀性^[57]。

2 结语

减阻剂在供热工程中应用可大幅降低流动阻力。今后应该深入开展以下方面的研究工作, 以获得良好的节能和环保综合效益。

1) 开发具有抗剪切和抗高温性能的高分子聚合物和表面活性剂, 对于表面活性剂还要进一步解决其对系统管道的腐蚀问题。

2) 减阻剂使用后换热设备传热效果下降问题普遍存在, 这一问题需要进一步研究、妥善解决。

3) 减阻剂的大规模使用对环境产生的影响也应在评估范围内。

参考文献:

- [1] White B, Hemming J A G. Drag reduction by additives (review and bibliography) [M]. Bedford: BHRA Fluid Engineering, CranAeld, 1976
- [2] 宋昭峰, 张雪君, 葛际江. 原油减阻剂的研究概况[J]. 油气田地面工程, 2000, 19(6): 7-9
- [3] 胡通年. 减阻剂在我国输油管道上的应用试验[J]. 油气储运, 1997, 16(6): 11-14
- [4] Flemming H. Friction reduction in district heating systems in Denmark[OL]. <http://dbdh.dk/images/uploads/pdf-distribution/friction-reduction.pdf>
- [5] 罗兴, 刘靖, 张子平. 减阻技术在集中供热与空调水输配系统中的应用[J]. 节能, 2004 (12): 14-15
- [6] Toms B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers [C] // Proceeding of First

- International Congress on Rheology. Amsterdam, 1948;135-138
- [7] Fabula A G, Hoyt J W, Crawford H R. Turbulent-flow characteristics of dilute aqueous solutions of high polymers[J]. American Physical Society, 1963 (8);63-70
- [8] Oliver O R, Bakhtiyarov S I. Drag reduction in exceptionally dilute polymer solution[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1983 (12); 113-124
- [9] Virk P S. Drag reduction fundamentals[J]. AICHE Journal, 1975, 21(4): 625-656
- [10] 哈尔滨建筑工程学院水力学教研室. 应用聚氧化乙烯降低湍流阻力的实验研究[J]. 力学, 1976 (4): 213-219
- [11] 沃良华, 廖其莫. 添加剂分子结构对减阻性能的影响及减阻效果的试验结果[J]. 上海机械学院学报, 1991,13(1): 9-10
- [12] 王耀林, 代加林. 高分子减阻剂——结构与性能[J]. 油田化学, 1990(7): 98-106
- [13] 蔡伟华. 聚丙烯酰胺水溶液减阻特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008
- [14] Zhu Mengsheng, Cai Weihua, Wang Hui, et al. Experimental study of drag reduction by aqueous polyacrylamide solution [C] // 7th International Conference on Sustainable Energy Technologies. Seoul, Korea, 2008
- [15] Li P W, Daisaka H, Kawaguchi Y, et al. Turbulence structure of drag reduction surfactant solution in two-dimensional channel with additional enhancement method[C] // ASME Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference. San Diego, USA, 1999;15-19
- [16] White A. Some observations on the flow characteristics for certain dilute macromolecular solutions [C] // Proc Symp on Viscous Drag Reduction, Dallas, USA; Plenum Press, N Y, 1969: 297-311
- [17] Virk P S, Lwagger D. Aspects of mechanisms in type B drag reduction structure of the turbulence and drag reduction[C] // IUTAM Symposium. Zurich, Switzerland; Springer-verlay, 1989;25-28
- [18] 王辉. 表面活性剂减阻特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008
- [19] 孙寿家, 王军, 毛莹. 层流附面层粘性减阻作用分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994,26(1): 53-58
- [20] 焦利芳. 添加剂减阻技术在集中供暖系统中的节能应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008
- [21] Hu Yuntao, Matthys E F. Effect of metal ions and compounds on the rheological properties of a drag-reducing cationic surfactant solution exhibiting shear-induced structure formation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997,186;352-359
- [22] Suksamranchit S, Sirivat A. Influence of ionic strength on complex formation between poly(ethylene oxide) and cationic surfactant and turbulent wall shear stress in aqueous solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 128: 11-20
- [23] 何钟怡. 高分子稀溶液减阻机理的研究进展[J]. 水动力学研究与进展, 1993,8(4): 381-387
- [24] Walsh M. On the turbulent flow of dilute polymer solutions [D]. California: California Institute of Technology, 1967
- [25] Elata C, Poreh M. Momentum transfer in turbulent shear flow of an elastic-viscous fluid[J]. Theological Acta, 1966(5);148-155
- [26] Gadd G. Differences in normal stress in aqueous solutions of turbulent drag reducing additives [J]. Nature, 1966,212;1348-1350
- [27] 沈仲棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989;240-241
- [28] Abernathy F H, He Z Y. Polymer induced velocity fluctuations in dilute drag reducing pipe flow[J]. Drag Reduction, 1984(B-8)
- [29] Abernathy F H, He Z Y. Velocity and spectra measurements with a small scattering volume LDV system[C] // Bienial Symposium on Turbulence, 1984
- [30] 何钟怡, 史守峡. 线性剪切流中大分子的动力模型[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999,32(1): 51-56
- [31] Hoyt J W, Fabula A G. The effect of additives on fluid friction[C] // Proc 5th Nav Hydrodynamics. Bergen, Norway, 1964; 947-951
- [32] Zakin J C, Ni C C, Hansen R J. Laser doppler velocimetry studies of early turbulence[J]. Physics of Fluids, 1977, 20(10): 585-588
- [33] He Z Y. Experimental study of characteristic of the maximum asymptote in drag reduction [C] // Proceeding of China-Japan International Conference on Rheology, 1991; 288-292
- [34] 何钟怡. 聚合物溶液的两种层流状态与减阻机理[J]. 力学进展, 1992(3): 310-317
- [35] 许鹏, 王德忠. 低浓度 CTAC 减阻流体流动性能试验研究[J]. 热能动力工程, 2002,17(6): 585-588
- [36] 王德忠, 胡友情, 王松平, 等. 表面活性剂减阻流体湍流空间结构试验研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19 (2): 140-143
- [37] Li F C, Kawaguchi Y, Yu B, et al. Experimental study of drag-reduction mechanics for a dilute

- surfactant solution flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 835-843
- [38] Li F C, Kawaguchi Y, Hishid K, et al. On the turbulence contribution to frictional drag in wall-bounded turbulent flow[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(5): 1226-1229
- [39] Harwigsson I, Hellsten M. Environmentally acceptable drag-reducing surfactants for district heating and cooling[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1996, 73(7): 32-47
- [40] Martin H. Drag-reducing surfactants[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2002, 5(1): 302-310
- [41] 张维佳. 胶束溶液减阻的实验研究[J]. 东北力学, 1992(8): 123-125
- [42] 马祥瑞, 陶进. 表面活性剂管道减阻及传热特性的研究[J]. 水动力学研究与进展, 1993(8A)(增刊): 636-642
- [43] Schmitt K F. Surfactant additives in pipe flows under cyclic heating conditions[M]. Drag Reduction in Fluid Flow. Boca Raton: CRC Press, 1989: 205-213
- [44] Myka J, Stern P. Properties of a drag reducing micelle system[J]. Colloid & Polymer Science, 1994, 272: 542-547
- [45] Steiff A, Althaus W, Weber M, et al. Application of drag reducing additives in district heating system—present state of investigations[M]// Drag Reduction in Fluid Flow. Boca Raton: CRC Press, 1989: 247-254
- [46] Gasljevic K, Matthys E F. Improved quantification of the drag reduction phenomenon through turbulence reduction parameters [J]. J Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999(84): 123-130
- [47] 董正方, 顾卫国, 张红霞, 等. 表面活性剂减阻流体传热与阻力关系试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(4A): 494-498
- [48] Li F C, Kawaguchi Y, Hishida K. Investigation on the characteristics of turbulence transport for momentum and heat in a drag-reducing surfactant solution[J]. Physical of Fluids, 2004, 16(9): 3281-3295
- [49] Li F C, Kawaguchi Y, Hishid K, et al. Investigation of turbulence structures in a drag-reduced turbulent channel flow with surfactant additive using stereoscopic particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2006, 40: 218-230
- [50] Li F C, Kawaguchi Y, Segawa T, et al. Reynolds-number dependence of turbulence structures in a drag-reducing surfactant solution channel flow investigated by particle image velocimetry [J]. Physics of Fluids, 2005, 17(7): 75-104
- [51] Li F C, Wang D Z, Kawaguchi Y. Simultaneous measurements of velocity and temperature fluctuations in thermal boundary layer in a drag-reducing surfactant solution flow[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(1): 131-140
- [52] Li F C, Kawaguchi Y, Hishid K. Structural analysis of turbulent transport in a heated drag-reducing channel flow with surfactant additives [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(5): 965-973
- [53] Li F C, Kawaguchi Y, Hishid K. Structural analysis of turbulent transport in a heated drag-reducing channel flow with surfactant additives[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(5): 465-473
- [54] 周静瑜, 王德忠, 张伟骏, 等. 集中空调水系统减阻流体力学性能研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 82-87
- [55] Zhou T, Leong K C, Yeo K H. Experimental study of heat transfer enhancement in a drag-reducing two-dimensional channel flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 1462-1471
- [56] 魏进家, 川口靖夫, David J H. 一种新型两性界面活性剂的减阻特性[J]. 化工学报, 2006, 57(11): 2750-2754
- [57] 焦利芳, 李凤臣, 苏文涛, 等. 表面活性剂减阻剂在集中供热系统中的应用试验研究[J]. 节能技术, 2008, 26(3): 195-201

· 简讯 ·

《暖通空调》被评为“RCCSE 中国核心学术期刊”

科学出版社、龙门书局于 2009 年 3 月出版的《中国学术期刊评价研究报告——RCCSE 权威、核心期刊排行榜与指南》一书, 正式发布了中国科学评价研究中心(RCCSE, Research Center for Chinese Science Evaluation)等单位研发的中国学术期刊评价研究课题成果。此次评价对象明确限定为中国内地出版的中文学术期刊, 经过界定和筛选, 共

有 61 个一级学科的 6 170 种期刊列为评价对象。在土木工程学科的 146 种学术期刊中,《暖通空调》名列核心期刊(A 等)第 2 位, 居暖通空调相关专业各学术期刊之首。中国学术期刊评价委员会近日向《暖通空调》杂志社颁发了证书。

(本 刊)