

减阻力学

侯晖昌 著

科学出版社

减阻力学

侯晖昌 著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书第一次把减阻作为一门学科进行系统论述,全书共十八章,概括了减阻研究的历史和现状,阐明了减阻的基本原理,确立了层流附面层稳定性与减阻之间的联系,介绍了明流和管流弹性膜减阻与层流附面层增厚减阻的计算方法和若干减阻中的扩散图形,探讨了细粒浑液的物化特性及减阻和载运工具的双重作用。

本书可供从事水利、航运、化工、机械、船舶、军工的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

减 阻 力 学

侯晖昌 著

责任编辑 杨嘉福 张英娥

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年9月第一版 开本:787×1092 1/32

1987年9月第一次印刷 印张:12 1/2

印数:0001—2,400 字数:283,000

统一书号:13031·3890

本社书号:5180·13—2

定价: 2.95 元

前 言

自从 Toms^[1], Kramer^[2] 先后发现高分子稀溶液或弹性材料护面都能实现粘性减阻以来,已经过去二十多年.由于在工业建设中到处都存在粘性流动,而减阻技术又能直接为节约能源、提高效率服务,而且减阻现象与边界剪切湍流产生的基本规律密切相联,因此,近年来减阻研究取得了较大的发展,减阻技术已应用在一些民用和军工部门.早期的应用是在减小消防系统阻力、增大喷射高度、城市下水道的污水和洪水排污、船舶和水下运动的武器等方面.随着对减阻研究认识的深化(它导致材料用量大为减少而仍保持减阻效能的结果),以及一些关键工艺的解决,使减阻技术今天已扩展到离岸的石油勘探、开采以及原油管道的长距离运输等方面.虽然截止到 1976 年的国外文献已由 White^[3] 汇编了.除此之外,减阻的国际性学术讨论会也开过多次^[4,5,6,7].但作者认为,直到现在,人们对减阻现象仍还没有获得较清晰、完整的物理图形,认识还有分歧,尚缺乏一本针对此问题进行系统阐述的书籍.一句话,减阻作为一门新学科至今尚未建立起来.

作者认识到,减阻现象不仅与依附于边界上的层流附面层的动态、大尺度(低频)湍动起源等许多基本问题密切相关,而且还与分子微观力学联系在一起.所以,减阻问题是十分复杂的.为了把减阻研究“升华”为学科,要求把许多既重要但又各不相同的减阻现象从理论上和物理图形上统一地加以阐明,这就大大超出了作者的能力,似乎也超越了目前的文献

所可能提供的条件。因此,完成本书不仅是一次大胆尝试,也是勉为其难的工作,在本书的叙述中不能不夹杂着作者自己设想的大量物理图形和推演。也许,全书最多只能给减阻力学勾画出一个大致的轮廓,且其中很多部分可能还是不真实的。谬误之处,尚企读者不吝指正。

当前,高分子稀溶液减阻虽然得到较广泛的应用,但仍受阻于高分子在受到流动剪力或其它机械力作用下易产生降解,从而降低和丧失减阻性能的缺陷。除此之外,当某系统需长期和大量使用高分子时,也不能不权衡较高昂的费用与经济效益之间的利弊,从而使人裹足不前。高分子稀溶液作为减阻剂在这方面是其中一个缺点。如使用天然无机材料——粘土、细粒矿砂、细煤粉等等的浑液作为减阻剂,则可克服高分子的上述缺点。当然,无机材料在减阻中的应用也有其本身的缺点,即在实现减阻时,一般由于浓度较高,增加了体系的物理粘性,增大了粘性耗散能量,从而增阻。除此之外,天然细颗粒浑液还具有对物料输运的承载能力,还可能利用来作为防止磨损的物料。但是,目前有关文献对细颗粒减阻及其物理、力学特性的研究,比之高分子稀溶液减阻研究来说,却落后得多了。本书将对用细沙作为减阻剂的各方面特性进行详细阐述。作者期望,这对普及减阻技术于其它领域也许会起到一些促进作用。

如果本书的出版能对减阻作为学科的建立和节能技术之一在更大范围推广起到一点“催化”作用的话,则撰写的目的也就算达到了。

侯晖昌

目 录

前言.....	v
---------	---

I 内外流阻力的组成

第一章 导论.....	1
§1.1 问题的提出	1
§1.2 阻力与减阻的分类和组成	9
§1.3 粘性减阻的基本图形	14
§1.4 减阻的表现形式和表达式	15
第二章 内流阻力.....	22
§2.1 阻力系数与雷诺数的关系	22
§2.2 边界光滑减阻	24
第三章 外流阻力.....	28
§3.1 球体和柱体的阻力	28
§3.2 平板阻力	31
第四章 层流边界层的控制.....	39
§4.1 层流边界层的控制与减阻的关系	39
§4.2 平板均匀吸气减阻计算	42
§4.3 研究减阻的回顾与展望	46

II 层流附面层稳定性

第五章 层流附面层流速分布.....	48
§5.1 管内层流附面层流速分布	48
§5.2 层流附面层厚度与稳定性	57

§5.3	明流层流附面层流速分布	59
§5.4	无限半平面层流附面层流速分布	60
§5.5	层流附面层雷诺数的不变性	63
第六章	刚性边界层流附面层稳定性	66
§6.1	抛物线分布的附面层稳定性	66
§6.2	实验印证	72
§6.3	稳定性与减阻的关系	75
第七章	柔顺边界稳定性问题	79
§7.1	柔顺边界的图形和解决方法	79
§7.2	柔顺边界与减阻的关系	83

III 粘性减阻的条件

第八章	弹性膜同步波动的条件	86
§8.1	物理图形概述	86
§8.2	弹性膜波动方程及边界、初始条件	88
§8.3	数值计算	104
§8.4	关于弹性膜材料优选问题	112
第九章	高分子溶液减阻的条件	114
§9.1	高分子稀溶液减阻图形	114
§9.2	高分子稀溶液对层流附面层的影响	120
§9.3	糙率对减阻的影响	126
§9.4	ΔB 值的影响因素和减阻材料优选	129
§9.5	有关 ΔB 的数学模型	135
第十章	细沙泥浆减阻的条件	142
§10.1	泥浆减阻与絮凝的关系	142
§10.2	絮凝与流变的关系	149
§10.3	絮凝的粒径界限与浓度界限	156
§10.4	悬移质泥沙对水流能量耗散的影响	160
§10.5	泥沙絮凝对水流能量耗散的影响	166
§10.6	细沙减阻与高分子减阻的比较	168

§10.7 优化级配与浆液浓度问题	173
-------------------------	-----

IV 减阻计算

第十一章 弹性膜减阻计算	178
§11.1 弹性膜减阻图形	178
§11.2 平直边界弹性膜减阻计算	181
§11.3 圆管减阻计算	184
§11.4 平板层流边界层减阻计算	189
第十二章 高分子稀溶液减阻计算	192
§12.1 层流附面层的能态	192
§12.2 附面层增厚与中性稳定特征值的关系	197
§12.3 高分子稀溶液减阻计算的图形	200
§12.4 内流减阻率计算	202
§12.5 减阻率近似计算	212
§12.6 最终分布的减阻率计算	217
§12.7 阻力系数与雷诺数关系计算	218
第十三章 泥沙减阻计算	225
§13.1 泥沙减阻计算的图形	225
§13.2 明流泥沙减阻率计算	227
§13.3 泥沙与高分子减阻率的比较	235
§13.4 阻力系数与雷诺数的关系	238
§13.5 明流减阻与能量耗散	239
§13.6 管、明流层流宾汉阻力	243
§13.7 旋转圆盘的阻力	248
§13.8 天然河流泥沙减阻	266

V 减阻中的扩散问题

第十四章 减阻物沿层流附面层的扩散	273
§14.1 概说	273
§14.2 平板缝喷减阻的实验简介	275

§14.3	点源扩散求解	286
§14.4	常数流速情形解	295
第十五章	扩散过程的近似计算	300
§15.1	线性流速分布情形解	300
§15.2	常数流速情形解	305
§15.3	半经验理论的解法	310

VI 减阻应用

第十六章	坝堰流量系数与减阻	316
§16.1	流量系数与阻力系数的关系	316
§16.2	脱流的类别及其对流量系数的影响	322
§16.3	流量系数增值率计算	328
§16.4	流量系数增值率与流态的关系	330
第十七章	减阻在水力机械中的应用	337
§17.1	粘性减阻与水力机械功率增益的关系	337
§17.2	水机各通流部分减阻的差别	342
§17.3	泥沙减阻与磨损的关系	347
§17.4	减阻与气蚀的关系	351
§17.5	减阻与减磨	353
第十八章	管道矿浆高浓度输送与减阻	360
§18.1	概说	360
§18.2	管内水流的能量平衡	362
§18.3	离散颗粒对能量耗散的影响	365
§18.4	絮凝颗粒对能量耗散的影响	370
§18.5	管道输送的最优化	373
结语		378
参考文献		381

I 内外流阻力的组成

第一章 导 论

§1.1 问题的提出

当粘性流体(水、空气、原油以及其它化学溶液等等)沿一固定边界流过时,不论其是属内流(管流,明流)还是外流(机翼、船舶或其它在粘性流场中运动的物体),或其它运动形式与边界形式更为复杂的运动,由于在边界面上流速 u 为零,边界面上法向流速梯度异于零,亦即由于边界面上存在流速梯度,故存在流体对边界的剪力。令流体作用于边界面的剪力以 τ_0 表示,令流体流型属牛顿体系,则由牛顿定律可知, τ_0 值应为

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_{y=0} \quad (1.1)$$

这边壁剪力做功的结果便要消耗掉流体中一部分能量,并最终以热量形式向周围发散。为了抵消这部分散失的能量,以维持流体的运动(或者说,对外流来说,维持物体的运动),就需要外加能源。

对不同形式的内、外流来说,对不同的学科领域和不同的科技问题,流体的能量发散的数量、途径及其表现形式又是各不相同的。从经验上看,这些差别集中表现在“系数”的不同和其数值的不同上面。例如,对管流来说,能量散失值表现为压力梯度或 Fanning 摩阻系数 f 的数值;对机翼、叶栅或其它

流线型体来说,表现为阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 值;对水利技术中的溢流坝和深水闸孔来说,表现为坝的流量系数和闸孔的流量系数 m (或符号 μ) 值;对复杂的内流流道来说,表现为流速水头的局部损失系数 ζ 值;对水力机械来说,还表现为综合的效率 η (有效利用系数)的大小,等等。

长期以来,从航空到水下运动的广阔领域,也可以说,在一切涉及到有粘性流体运动的领域,从内流到外流,人们都在找寻减少流体阻力的方法。然而,注意力也都只是集中和局限在型体方面,即探索物体的流线型方面,包括由于型体改变对保持层流边界层的影响方面。自本世纪始,即从 Prandtl 创立边界层理论开始,几十年来,在确立形成内、外流阻力的物理图形方面和在建立对这些阻力的计算方法方面都取得了很大成绩。这些研究成果对减阻研究无疑起到了奠基作用。然而,也可能是由于粘性减阻问题复杂,人们对与减阻密切联系的层流附面层的动力特性的了解不深,直到五十年代,例如,在机翼研究方面,减阻研究的主要思想都在于保持层流边界层,并不使它发展为湍流边界层,以达到保持较小阻力的方法(通过吸气或其它方法)。

所以,如果从术语“减阻”字面上来理解减阻,即“广义”的减阻,那么,可以说减阻的研究早就开始了。但是,目前的文献对减阻的理解是狭义的,只是针对由于添加剂引起的阻力减小而言。

对减阻认识的进一步深化,特别对外流(水下运动物体)减阻来说,仿生学的研究起了促进作用,其中特别重要的启示来自对海豚的研究。人们发现,海豚的游泳速度比快速航行的船只还快得多。分析发现,海豚和一些鱼类皮肤在海水压力下会分泌出一种油状液体,使其游泳时所受阻力大大降低。其次,海豚的皮肤分为两层,外层很薄,且富有弹性,里层则是

充满微小管道系统的乳头层,这一层像消振器一样,阻止其表面层流转化为湍流,使水的阻力明显降低。再次,当海豚游泳速度很高时,海豚的皮下肌肉还能作波浪运动,以达到进一步减小阻力,延缓层流向湍流的过渡。

六十年代初, Kramer^[2] 就是出于上述仿生学的考虑,提出了一种特殊的减阻方法。他仿造出一种“人造海豚皮”用密封的橡胶包裹着细长型物体做成了弹性覆盖层(外套),并用销钉将这一层固定在物体的表面上。在外套与物体之间的空间充填不同粘度的液体。将这样的物体放在水中作拖曳运动时,与同体型、同尺寸的光洁硬壳模型相比,阻力就减小了。这使得在消耗同功率情况下运动速度能提高近一倍。

考虑到 Kramer 的研究具有科学渊源性质,而其试验技术简单,又具有一定的精度,现仍有参考意义,故以下详细介绍其内容。其外流模型为首部尖锥的柱状流线型体,柱身長 26.5 英寸 (67.3cm), 外径 2.5 英寸 (6.35cm)。尖锥的形态尺寸列于表 1.1。

表 1.1

距尖端距离 (cm)	0.63	1.27	2.54	5.08	7.62	10.16	15.24
锥直径 (cm)	0.76	1.14	1.73	2.54	3.07	3.53	4.24
距尖端距离 (cm)	20.32	25.40	30.48	35.56	40.64	45.72	
锥直径 (cm)	4.80	5.28	5.66	5.97	6.19	6.32	

尖锥流线体模型有两种:一种是高度光洁,且具有刚性表面;另一种则是包以橡胶外套的模型。外套的结构示于图 1.1。

图中数字单位为 10^{-3} 英寸 (0.0254cm)。橡胶隔膜用一系列橡胶销钉支持,并固定于模型内壁,在销钉之间的空间充填

不同粘度的即不同阻尼的液体。原作者进行了不同型式外套的力学试验；这些外套在结构上的差异最后都综合表现在其弹性模量或硬度及其内部阻尼数值的不同上面。不同型式外套的不同硬度值的量纲为磅/英寸³ (kg/m³)。衬套材料的弹性模量为在刚性平板上置放 1 英寸² (6.45cm²) 的外套物质后，由于其受荷载产生线性压缩 1 英寸 (2.54cm) 时的荷载值。Kramer 实测的试样变形值范围为 $\frac{5}{1000} \sim \frac{1}{10000}$ 英寸 (0.01225—0.000245cm)。材料的内部阻尼用如下方法确定：量测以一直径为 1/2 英寸 (1.27cm)、重量为 1/2 盎士 (14.17g) 的柱状金属活塞从 2 英寸 (5.08cm) 高处自由跌落于外套表面时的弹跳高度，以其高度衰减百分数代表外套内部阻尼。试验时外套置放于刚性平板上。外套里面空间充填物为空气。

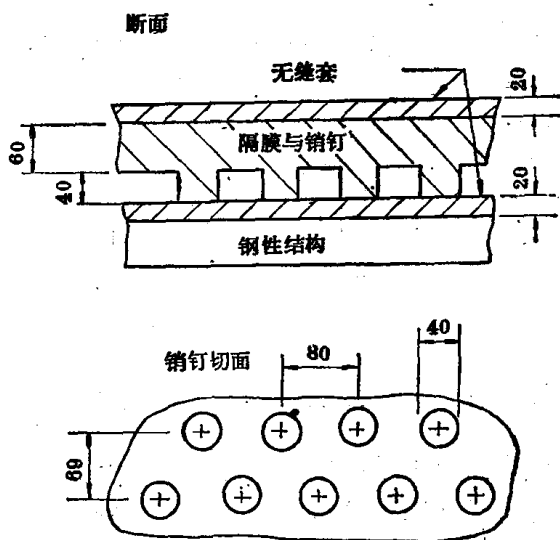


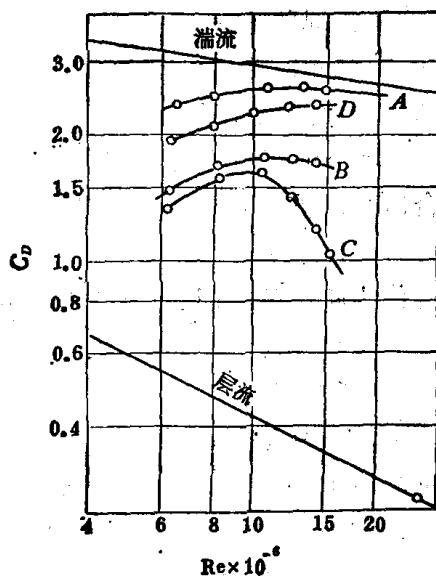
图 1.1 Kramer 人造减阻衬套结构

模型在下述三段是无衬套的：(1) 6 英寸 (15.24cm) 长

• 4 •

的尖端首部；(2) 从锥尖转换为柱体的 0.5 英寸 (1.27cm) 长过渡段；(3) 离柱体尾部 1.5 英寸 (3.81cm) 段。

试验时模型在水中拖曳前进,最高航速达 30 海里 (55.56 km), 以弹簧应变仪量测其所受阻力及计算相应的雷诺数 Re 值。减阻衬套柱体及刚性柱体所受阻力的比较结果如图 1.2。



$A:E = \infty$ $B:E = 44\text{kg/cm}^2$ $C:E = 22\text{kg/cm}^2$ $D:E = 17\text{kg/cm}^2$

图 1.2 减阻柱体阻力曲线

图中, A 曲线代表高度光洁表面但为刚性模型试验结果; B、C、D 曲线为具弹性外套的模型资料。各自的综合力学指标列于表 1.2。

表 1.2

模型	材料硬度	内部阻尼	充填液体粘性系数	备注
B	25629kg/m ³	44%	1200cm ² /s	不同粘液对阻力无影响
C	12814kg/m ³	59%	300cm ² /s	
D	9611kg/m ³	10%	10~200cm ² /s	

从图可见,对不同弹性模量的材料来说,其减阻值是不同的. 尤其有趣的现象是,在弹性材料中,弹性模量 E 处于 $\sim 22 \text{ kg/cm}^2$ (或硬度处于 $\sim 12814 \text{ kg/m}^3$) 数量附近时,减阻达到近似最大值,而当

$$E > \sim 22 \text{ kg/cm}^2 \text{ 或 } E < \sim 22 \text{ kg/cm}^2$$

时,减阻值都比前述情况为小.

但是,不管弹性模量值为何,所有弹性材料护面物体所受的阻力值都比刚性表面的物体所受阻力为小.

当然,上述 Kramer 的仿生学模拟只具有经验的性质,海豚的这种综合减阻功能,是值得从理论上深入研究下去的.

与上述进行仿生研究的同时,从五十年代至六十年代,由于流体力学与高分子化学研究的进展,使内流、外流减阻问题的研究进入了一个新的阶段.

对于内流减阻,1949年 Toms^[1] 进行了这样的试验:在湍流内流的有机溶液中,溶解少量的聚甲基丙烯酸甲酯,其阻力大幅度地降低. 从此,在有关文献中便常常把这种减阻现象简单地以 Toms 现象来命名.

在后来的有关文献中,高分子稀液内流减阻的试验也揭示出,在分子减阻中同样存在减阻的极限趋近的特性. 所以,减阻问题从一开始提出来,就已揭示出减阻存在极限与优选的性质. 这一特性后来从实验上得到充分的证实^[2]. 明确高分子减阻的“极限趋近”的概念及其物理涵义和数学表达式是 Virk^[3] 首先提出来的. 本书作者认为^[4],高分子减阻是存在极限的,但这个实际存在的极限与 Virk 所推想外延方法是有出入的.

总之,新的减阻研究方向是由参考文献 [1,2] 开始的. 减阻,作为一个新的学科或领域,不论从其研究内容和方法看,

还是从它对许多领域的影响看,都是与经典的减阻(广义的)有区别的。

从表面上看,以上 Toms 与 Kramer 所进行的试验之间有很大差异:其一,这两位作者实现减阻所采用的方法是不同的, Kramer 采用的方法是改变边界材料性质,即使边界材料(膜)具有柔顺性,而 Toms 减阻则是采用高分子稀液(后来的有关文献揭示,当把高分子稀液注入清水中以实现减阻时,仅仅是从近边界区域注入才有效)。其二,二人实现减阻的流动图形也是不同的, Kramer 研究的是外流,而 Toms 研究的则是内流,尽管有这些表面上的差别,但都同样达到了减阻的目的。这就说明,在实现减阻问题上存在一些共同的规律。简略地说,减阻是通过或从外部改变流体运动边界条件,或从内部改变其边界条件,都是为改变附壁流体运动性质来实现的。

为了明瞭减阻问题的研究现状,不能不简单地回顾一下从减阻问题提出来的五十年代初到现在的研究过程。

当上述经典性试验^[2]结果发表后,在初期曾引起对所谓的流体柔顺边界稳定性进行研究^[11,12]。柔顺边界稳定性的数值计算表明,对同一图形来说,柔顺情形临界雷诺数比相应刚性情形的临界雷诺数为大。这就是说,中性稳定曲线因此右移,流动更稳定了。现在看来,中性稳定曲线由于边界柔顺而变动,这对高分子稀液减阻分析具有根本意义。当然,对把减阻作为一个完整的问题来说,层流边界层或层流附面层柔顺边界稳定性研究和数值计算只能是其中的组成部分,尤其对弹性材料护面减阻如此。在上述文献对柔顺边界层流稳定性研究中,联系材料特性的方法过于简单。因此想对边界材料进行具体选择显然是不够的。近来有些文献开始接触到了边界材料^[13,14],但采用的物理图形与减阻实际图形还有出入,而且,还没有经受试验结果的检验,也缺乏具体数值结果。因

此,问题还远未得到解决,以高分子稀液和弹性护面材料作为减阻工具的广泛的实验研究(特别是内流),极大地促进了人们对减阻实质认识的发展。从这些实验得到的普遍结论和数量概念大致是:只有当高分子稀液注入管壁区域时,减阻才能实现,而注入流核区则是无效的^[15]。进一步的测试还发现,当内流中注入高分子溶液实现减阻时,层流附面层的厚度就增加了;并且,层流附面层的动力特性也改变了,包括在附壁出现的流动条纹的平均频率和湍源猝发的平均频率也作相应的改变^[16]。然而,在高分子稀液实现减阻时,层流附面层内流速分布并没有改变,仍遵循近似直线分布率。与此同时,流核区的流速分布规律亦没有改变,即仍遵循半对数律,虽然流速分布线的截距因减阻而改变了,总之,改变的好象仅仅是层流附面层的厚度。这是高分子稀液减阻中一个很重要的特征。对内流来说,弹性膜减阻的最大减阻值约为35%,但对高分子稀液内流减阻率来说,则视高分子类别与使用浓度而异。对外流则可减小阻力系数40—50%^[17]。减阻值随高分子溶液浓度、注入流量与其它有关因素不同而变化。在合适的情况下趋近于一最大值。

随着这方面实验结果的大量累积,利用高分子稀液减阻在国外已广泛应用于各个领域^[17,18,19]。由于减阻问题密切联系着节约能源、材料、提高速度、消声消振、提高效率等方面,故近年来减阻研究得到了迅速的发展。然而,尽管关于减阻在国外已得到各方面实验的证实,但目前对减阻的实质认识 and 理论研究状况方面,许多基本问题还没有圆满、正确地解答。即:为什么只是橡皮类弹性材料能实现减阻?为什么高分子稀液减阻只是在稀液注入近边界区域时才能实现?为什么少量高分子稀溶液能使附面层增厚?其增厚与减阻又如何联系?减阻如何计算?等等。