

高等学校规划教材

油气管道减阻技术

DRAG REDUCTION TECHNOLOGY FOR OIL AND GAS PIPELINE

徐莹 姜涛 毕国军◎著

中国建筑工业出版社

高等学校规划教材

油气管道减阻技术

徐莹 姜涛 毕国军 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

油气管道减阻技术/徐莹, 姜涛, 毕国军著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 2
高等学校规划教材
ISBN 978-7-112-23133-1

I. ①油… II. ①徐… ②姜… ③毕… III. ①油气运输-管道运输-减阻-高等学校-教材 IV. ①TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 295812 号

油气管道减阻技术是实现长距离输油、输气管道节能运行的关键技术。本书从减阻机理着手, 详细介绍了天然气输送管道、原油管道和成品油管道减阻技术的关键问题和发展趋势。

本书可作为高等学校油气储运工程专业的课程教材以及石油工程专业和建筑环境与能源应用工程专业的教学参考书, 也可供相关专业从事科研、教学及实际工程的广大技术人员使用, 对管道工程技术人员有极强的参考与借鉴作用。

责任编辑: 李笑然 王美玲

责任校对: 李美娜

高等学校规划教材

油气管道减阻技术

徐 莹 姜 涛 毕国军 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9 $\frac{3}{4}$ 字数: 239 千字

2019 年 3 月第一版 2019 年 3 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-23133-1

(33214)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是为高等学校油气储运工程专业油气管道减阻技术课程编写的教材，也可作为石油工程专业和建筑环境与能源应用工程专业的教学参考书。

本书的编写广泛吸收了国内各类优秀输油管道和输气管道教材的精华，力求有所发展和提高。为适应油气储运工程专业发展和培养目标的需要，加强了必要的理论基础并做到与专业密切结合；根据油气储运工程专业教学大纲的要求，精心设计了全书的知识体系和内容；旨在由浅入深、循序渐进地培养学生应用基本理论解决油气管道中减阻问题的思维习惯和方法。

全书共分9章，具体编写分工如下：第1~5章由徐莹编写，第6、7章由姜涛编写，第8、9章由毕国军编写。硕士研究生焦晶在本书的编写过程中付出了辛勤的工作，在此致以谢意。

鉴于编者水平有限，书中难免会有疏漏和不妥之处，恳请有关专家和读者批评指正。

编 者

2018年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 减阻机理	2
2.1 紊律流体管流的减阻机理	2
2.2 脊状表面减阻机理	4
2.3 壁面微结构流动控制技术的减阻机理	5
第 3 章 天然气管道减阻技术	10
3.1 输气管道减阻机理	10
3.2 内覆盖层产生的效益	15
3.3 天然气管道的内覆盖层	17
3.4 典型应用实例	18
3.5 新的发展	22
第 4 章 内涂层减阻技术原理及工艺计算	25
4.1 输气量与输送压力的计算公式	25
4.2 摩阻系数 λ 的确定	26
4.3 管内壁粗糙度的取值	29
4.4 输气功率	33
4.5 减阻内覆盖层的经济效果	33
4.6 减阻内覆盖层的适用范围	36
4.7 减阻内覆盖层的方案比较	37
4.8 内涂层管道的工艺计算	38
4.9 涂料与覆盖层的性能指标和检验方法	45
第 5 章 减阻内涂涂料	60
5.1 涂料组成及分类	60
5.2 减阻内涂涂料性能的基本要求	64
5.3 内涂涂料的选择	65
第 6 章 内涂涂覆工艺	74
6.1 总则	74
6.2 基本技术要求	74
6.3 内涂覆工艺的生产设备	75
6.4 表面处理	83
6.5 工艺要求	90
6.6 涂敷工艺	99
第 7 章 减阻内涂的经济性	109
7.1 费用现值法 (CPVCOS)	109

7.2	费用输量比率法 (ADUCOS)	111
7.3	差额投资净现值法 (ΔNPV)	111
7.4	追加投资回收期法 (ΔP_1)	112
7.5	干线输气管道采用内覆盖层的经济判据	113
第 8 章	石油管道减阻技术	120
8.1	我国石油运输现状	120
8.2	石油管道运输减阻剂减阻技术	120
8.3	新型原油管道减阻技术	122
8.4	石油磁处理减阻技术	124
8.5	其他石油管道运输改进技术	124
8.6	仿生减阻技术在油气管道中的应用	125
第 9 章	成品油管道内涂层减阻性能研究与应用	139
9.1	管道内涂减阻技术	139
9.2	管道内涂层的好处	140
9.3	涂层减阻机理	141
9.4	管道减阻内涂涂料的基本要求	142
9.5	成品油管道内涂层的减阻效果	143
	参考文献	147

第 1 章 绪 论

随着石油工业的发展，原油及各种燃料油的管道输送量日益增加，降低管路系统的摩擦阻力、提高输送量，对节约能源和投资，加速原油的开发利用，具有重要意义。对于输油管道及输气管道两种不同输送介质的管道进行减阻技术研究，降低运输成本，提高运输效率，具有显著的节能减排作用。

输油管道的减阻主要有两种途径：减阻剂减阻和管道涂层减阻。其中，管道涂层减阻技术，需要对管道进行内涂敷，减阻工艺复杂，减阻效果不佳。所以，石油管道减阻主要采用减阻剂减阻。减阻剂减阻是向流体注入减阻剂，通过减阻剂在管壁上形成的化学剂涂层，使接近管壁的流体紊流减弱，从而降低流体流动阻力。该方法与管道涂层减阻技术相比除了具有成本低、见效快、减阻效果明显和应用简便灵活的特点，还可以在管道达到最大输量后不进行设备增输改造的条件下增加输量，具有显著的经济效益。

输气管道的减阻方式主要是采用管道内涂层减阻技术，通过在管道表面涂覆减阻涂料，使管道的粗糙度降低，从而减少管道中输送气体时的摩阻消耗，达到减阻增输的目的。同时，内涂层技术还是减少管道内腐蚀的防护措施。内腐蚀是由输送介质的腐蚀性而引起，如石油和成品油输送过程中的水分、天然气输送时的冷凝水。在许多实际情况中，唯一有效的防护措施就是内涂层。

本书将从输油管道减阻技术和输气管道减阻技术两个方面进行介绍。

第 2 章 减阻机理

节约能源消耗是人类一直追求的目标，其主要途径之一就是各种运输工具的设计中，尽量减少表面摩擦阻力。表面摩擦在运输工具的总阻力中占有很大的比例，在这些运输工具表面的大部分区域，流动都处于湍流状态，所以研究湍流边界层减阻意义重大，已引起了广泛的重视，并已被 NASA 列为 21 世纪的航空关键技术之一。在油气输运、航空航天、航海、流体机械等领域中，由于摩擦阻力的存在，极大地降低了能源的利用效率。面对大范围存在的阻力损失，有效地减少工作部件受到的阻力、提高能源的利用效率将具有重要的工程实际意义。

有关减阻的研究可追溯到 20 世纪 30 年代，但直到 20 世纪 60 年代中期，研究工作主要是减小表面粗糙度，隐含的假设是光滑表面的阻力最小。20 世纪 70 年代阿拉伯石油禁运和由此引起的燃油价格上涨激起了持续至今的湍流减阻研究的高潮。经过 20 多年的努力，特别是湍流理论的发展，使得湍流减阻理论和应用取得了突破性的进展。就减阻技术讲，有助条减阻、黏性减阻（它包括柔顺壁减阻、聚合物添加剂减阻以及微气泡减阻等）、仿生减阻、壁面振动减阻等。最近，还出现了综合运用多种减阻方法的研究尝试。

2.1 幂律流体管流的减阻机理

幂律流体的管流现象十分普遍。然而，幂律流体一般来说由于黏性较大，导致在管流过程中阻力较大，这是人们所不愿见到的。各种试验表明，如果在这种流体中加入某些减阻剂或者改变流体边界材料特性，流体流动过程中的阻力是可以减少的。遗憾的是，到目前为止，这方面的研究大多处于较盲目的试验探索阶段，正是基于此开始了探讨幂律流体减阻的机理。

2.1.1 减阻机理

分子理论认为，物质分子间总是存在作用力，这种作用力主要是 Van der Waals（范德华）力。流体和与之接触的固体壁面之间也是这种作用。要分离这种作用，必须做适量的功来克服分子间的作用力，这种功可称之为粘附功。

基于如下两个假设：(1) 壁面是物理光滑的；(2) 流体作恒温流动。

图 2-1 是幂律流体在几种不同流速下的速度分布。流体在管中的速度分布从小到大，呈抛物线形状，开始比较扁平，如速度分布 v_1 所示。随着速度逐渐增大，速度分布线由开始的扁平状态逐渐变得尖锐起来。由于固体壁面与流体分子之间存在粘附功，流体在管中流动时与管中接触的那一层与管壁是有作用的，否则流体流动不会有阻力。与壁面接触的这一薄层流体称为界面层（不是流体动力学中常指的附面层）。壁面与界面层内的流体分子之间的作用大小可用它们之间的粘附功来表示，即 $W_{sl} = 2 \sqrt{T_s T_l}$ ，其中， T_s 是固体管壁的表面张力值， T_l 是流体分子的表面张力值。 W_{sl} 越大，表示固-液之间的作用越

强, 要将固—液分开或使液体与固体之间有相对滑动就会越难; 反之 W_{sl} 越小, 固—液两相作用越弱, 它们之间就越容易产生滑动。如果 W_{sl} 足够小, 固体壁面分子对流体分子的作用力已不能完全将界面处液体分子粘附于表面, 界面层内流体分子将受主流速度的牵引, 一起向前流动。这时界面层内流体分子将与壁面之间出现一个速度差, 即出现一个滑移速度 v_s , 如图 2-1 中的速度分布 v_3 。 v_s 的出现是减阻的本质。减阻现象发生后, 流体实际平均流速 $v' = v + v_s$, v 为减阻发生前流体的平均流速。速度分布 v_2 是由无滑移向出现滑移现象的临界速度分布。

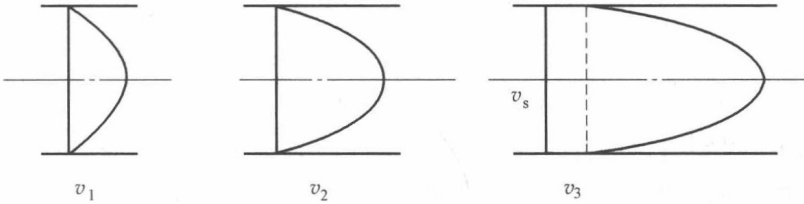


图 2-1 管流中不同流速下的速度分布

2.1.2 影响减阻率的因素

影响幂率流体减阻率的因素有 5 个: 管径 R 、稠化系数 k 、压力梯度倍数 J 、临界压力梯度 M 以及滑移速度对壁面剪应力的比率 c 。

1. 管径对减阻率的影响

由式

$$\frac{\partial Z}{\partial R} = \frac{-2c(J-1) \left[\frac{J}{2k} \right]^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{1}{1+3n} \cdot \frac{1}{n} R^{\frac{1-n}{n}}}{\left[2 \left(\frac{J}{2k} \right)^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{1}{n}} + c(J-1) \right]^2} < 0 \quad (2-1)$$

这说明减阻率是与管径成减函数关系的。也就是说, 在小管径输送的场合下, 减阻更具有实用价值。

2. 稠化系数对减阻率的影响

由式

$$\frac{\partial Z}{\partial R} = \frac{2c(J-1) M^{\frac{1-n}{n}} \frac{1}{1+3n} \cdot \frac{1}{n} R^{\frac{1}{n}} \left[\frac{J}{2} \right]^{\frac{1}{n}} \left[\frac{1}{k} \right]^{\frac{n+1}{n}}}{\left[2 \left(\frac{J}{2k} \right)^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{1}{n}} + c(J-1) \right]^2} > 0 \quad (2-2)$$

这说明幂率流体的减阻率与它的稠化系数是成增函数关系的, 即稠化系数越大, 减阻率就越大。反之, 减阻率就越小。

3. 压力梯度倍数对减阻率的影响

由式

$$\frac{\partial Z}{\partial R} = \frac{c \left(\frac{1}{2k}\right)^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{1}{1+3n} R^{\frac{1}{n}} \left[\left(2 - \frac{1}{n}\right) J^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{n} J^{\frac{1-n}{n}} \right]}{\left[2 \left(\frac{J}{2k}\right)^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{1}{n}} + c(J-1) \right]^2} > 0 \quad (2-3)$$

这说明减阻一旦发生，减阻率将随轴向压力梯度或流速的增大而增大。

4. 临界压力梯度对减阻率的影响

由式

$$\frac{\partial Z}{\partial R} = \frac{-2c \frac{1-n}{n} (J-1) \left[\frac{J}{2k}\right]^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{1}{n}}}{\left[2 \left(\frac{J}{2k}\right)^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{1}{n}} + c(J-1) \right]^2} \quad (2-4)$$

从上式我们可以知道，当 $n > 1$ 时，导数大于零，说明剪切稠化流体的减阻率随临界压力梯度 M 的增大而增大，随 M 的减小而减小；当 $n < 1$ 时，导数小于零，说明剪切稀化流体的减阻率随临界压力梯度 M 的减小而增大，随 M 的增大而减小；当 $n = 1$ 时，流体性质为牛顿流体，此时导数等于零，说明牛顿流体的减阻率不随临界压力梯度的变化而变化。

5. 滑移速度对壁面剪应力的比率对减阻率的影响

由式

$$\frac{\partial Z}{\partial R} = \frac{2(J-1) \left[\frac{J}{2k}\right]^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{1}{n}}}{\left[2 \left(\frac{J}{2k}\right)^{\frac{1}{n}} M^{\frac{1-n}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{1}{n}} + c(J-1) \right]^2} > 0 \quad (2-5)$$

这说明减阻率与 c 是成增函数关系的。也就是说，滑移速度对雷诺数的比率越大，减阻率就越大；比率越小，减阻率就越小。

综上所述可知：

(1) 减阻现象发生的前提是流体在流动过程中必须产生滑移，滑移是减阻的本质。

(2) 减阻发生的临界速度与固液之间的相互作用粘附功 W_{sl} 有关。 W_{sl} 越小，固液间作用越弱，临界速度越小，越容易发生滑移；反之亦然。

(3) 粘附功的大小与固体壁面的表面张力和流体的表面张力之积成增函数关系。要减小粘附功，就应该尽量减小固体壁面与流体的表面张力。这为低能固体壁面减阻和添加剂减阻提供了理论依据。

(4) 影响减阻率的因素有 5 个：管径 R 、稠化系数 k 、压力梯度倍数 J 、临界压力梯度 M 以及滑移速度对壁面剪应力的比率 c 。在小管径的流动中，实施滑移减阻效果显著。另外，减阻率还会随着稠化系数 k 、压力梯度倍数 J 和滑移速度对壁面剪应力的比率 c 的增大而显著提高。

2.2 脊状表面减阻机理

自从发现脊状表面具有减阻效果之后，国内外的诸多学者采用试验或者仿真的方法来

对脊状表面的减阻机理进行探索研究。但是由于流体微团本身运动的复杂性和试验仿真条件的局限性,对脊状表面减阻机理的研究难以形成一个定论。从脊状结构布置方式来分,有纵向布置和横向布置两种情况。

对于纵向布置的脊状结构减阻机理,目前相对来说得到普遍认可的有两种;“第二涡群论”和“突出高度论”。第二涡群论由 Bacher 等提出,他将阻力的减少归于沟槽两侧反向旋转的流向涡与尖顶形成的二次涡的相互作用,认为二次涡削弱了与低速条带相联系的流向涡对的强度,抑制了流向涡对在展向聚集低速流体的能力,使得低速条带保留在沟槽内并减少了低速条带的不稳定性,削弱了低速条带向外的喷射过程。流向涡与脊状结构相互作用产生二次涡。

目前关于横向沟槽减阻机理的研究比较少,潘家正将流体流经横向布置的脊状结构后产生的漩涡,理解为“微空气轴承”。这种涡结构改变了流体与物面之间的摩擦力作用方式,由“滑动摩擦”变为了“滚动摩擦”。除此之外,产生的涡结构与物面之间的摩擦与主流方向相反,同样起到减阻的作用。

脊状结构布置于带翼型表面的大型回转机械还集中于研究单个叶片的流动情况,与实际存在一定差距,且数值模拟研究过于集中在对减阻效果的追求。脊状结构的存在对边界层分离现象有一定的抑制作用,可为防止风机旋转失速和降低噪声提供研究方向。

2.3 壁面微结构流动控制技术的减阻机理

流动控制技术是被动或主动采用某种装置使得壁面有界流动或自由剪切流动获得有益的改变,这些有益的改变包括减阻、增升、混合增强和流噪声抑制。壁面微结构减阻技术研究是近壁面湍流流动控制技术研究领域的一个重要组分,此项技术研究起步于 20 世纪 30 年代初,60 年代中后期具有成效的研究工作普遍展开。王晋军等通过利用 LDV、PIV 流动测试技术发现:微结构壁面湍流边界层内部湍流强度减弱,并且边界层厚度增厚。黄桥高等通过对脊状表面减阻的试验测量和数值模拟得出:脊状结构表面边界层流场涡结构存在着“二次涡”,近壁区处黏性底层厚度比光滑壁面的要厚得多,湍流度显著降低。

以往的研究大多集中在具有壁面微结构的平板的外部流动,而对于管道内流动研究的比较少。Dean 通过压降测量的方式发现方形管道内肋条壁面微结构没有显著的减阻效果,但其试验并没有对边界层内部结构和对应的参数进一步测量。通过压降测量和粒子图像测速法 (Particle Image Velocimetry, PIV) 相结合的方法来研究方形管道内壁面微结构的湍流减阻性能。通过压量初步确认壁面微结构的减阻性能,然后通过 PIV 测量出边界层内部结构和对应的参数,从机理上分析壁面微结构的减阻效果和性能。

2.3.1 试验装置

1. 水循环系统

试验在水循环系统内进行,装置如图 2-2 所示。该循环系统包括方形测试管段、泵、流量计、差压变送器、收缩管段、扩张管段、稳流板和循环水罐等部分。方形管道用有机玻璃制成,测试段长 2800mm,方管横截面尺寸为 100mm×60mm。通过调节电机变频器

来调节流量，利用差压变送器（量程 0~3kPa，测量误差±3Pa）测量不同流量下测试管段的压降，通过电磁流量计（测量误差±0.01m³/h）测量循环管路的流量。试验流体为普通自来水，水温控制在 25±0.5℃。试验所用方管段底面上的微结构为 V 形肋条和 V 形沟槽，是采用激光在有机玻璃平板上雕刻而成，肋条和沟槽顺流向布置。试验分别选取了相同沟宽（*s*）不同沟深（*h*）的 3 种沟槽和相同肋宽（*s*）不同肋深（*h*）的 3 种肋条，其结构与尺寸如图 2-3 和表 2-1 所示。

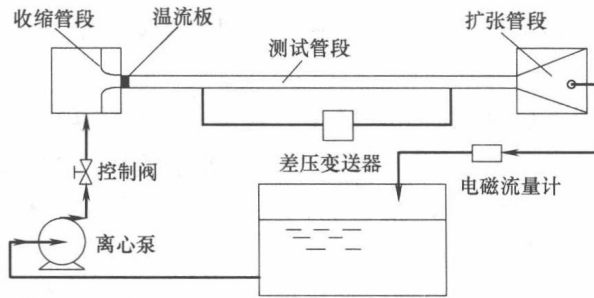


图 2-2 试验装置示意图

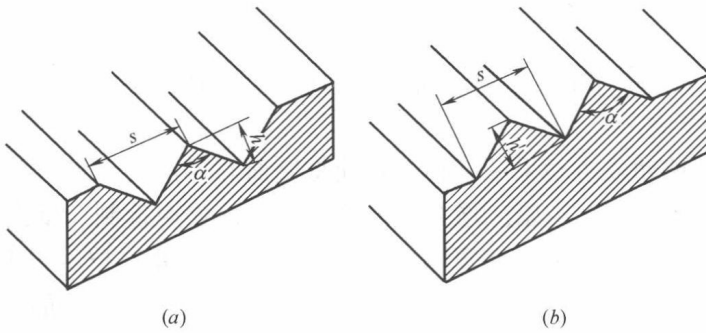


图 2-3 壁面微结构示意图

(a) 沟槽；(b) 肋条

微结构的尺寸

表 2-1

微结构类型	编号	<i>h</i> (mm)	<i>s</i> (mm)	$\alpha(^{\circ})$
沟槽	1	0.3	1	118
	2	0.5	1	90
	3	0.7	1	71
肋条	1	0.3	1	118
	2	0.5	1	90
	3	0.7	1	71

2. 粒子图像测速仪

本试验用到的 PIV 系统包括：双脉冲激光发射器、CCD 相机、图像处理软件、激光臂和同步器。采用 Micro Vec 软件对图像进行记录，利用 Tecplot 软件对互相关处理后的

数据进行分析。试验时激光片光源、CCD 相机和平板相对位置见图 2-4。拍摄过程中，激光片光源平面与平板垂直，与两侧壁平行，片光源位于矩形管道展向中心线处，CCD 相机镜头与片光垂直。PIV 所用的激光器为 KSP200 系列双通道 Nd: YAG 激光器，最大工作频率为 100Hz，可见光波长 532nm，每个脉冲能量 200mJ，脉冲宽度 5ns。CCD 相机 (ICDA-IPX-4M15-LMFN082702) 分辨率 1549×1697 像素，微距镜头焦距为 60mm。采用 Tecplot 软件对图像进行处理。本试验所测的流速中，对应的最小跨帧时间约为 120 μ s，判读区间有 80 %重合度，图像采集频率为 15Hz。

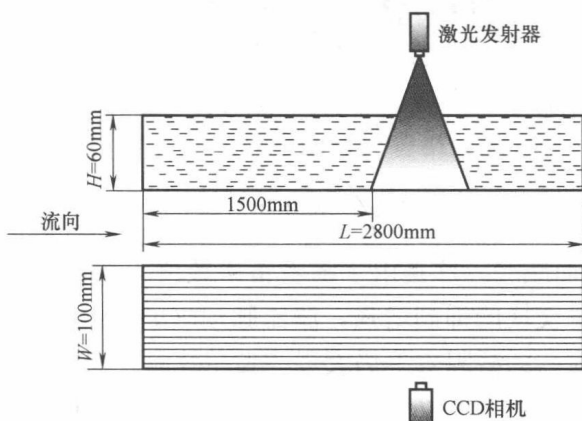


图 2-4 PIV 布置图

2.3.2 减阻机理

壁面微结构是否具有减阻效应与流体的流动状态密切相关。当流体处于层流状态时，壁面微结构不具备减阻效应，甚至会增加流动阻力；而当流动状态处于湍流时，壁面微结构就有可能具有减阻效应。

1. “突出高度”理论

相较于光滑壁面，微结构壁面流向无量纲速度分布对数率中 A、B 值均有不同程度的增大，反映到边界层的结构就是其黏性子层相比光滑壁面增厚，即所谓的“突出高度”。Bechert 等研究认为这是由于微结构低谷内存在一种作用类似于润滑剂的流体，类似于将黏性子层向远离壁面的方向移动使得此层厚度增加，另外它们的存在使得流场中流向涡结构与壁面之间存在了距离，抑制了流向涡结构的演变过程，从而达到减阻的目的。

2. “第二涡群”理论

壁面微结构的减阻效果与“尖端效应”“约束效应”两种基本现象有关，并且以上两种现象只在微结构壁面的流场中才存在，光滑壁面流场中并不存在。以图 2-5 中的沟槽壁面 2 为例，分析这两种效应的作用结果。

当 $s^+ < 15$ 时，壁面微沟槽减阻效果随着 s^+ 的增大而增强；特别当 $s^+ < 10$ 时体流速较小，雷诺数小，而湍流涡结构尺寸很大，对沟槽低谷流体与外部流体动量交换抑制较弱，此时壁面微沟槽的减阻效果较差，如图 2-6a 所示。当 $10 < s^+ < 15$ 时，壁面微沟槽

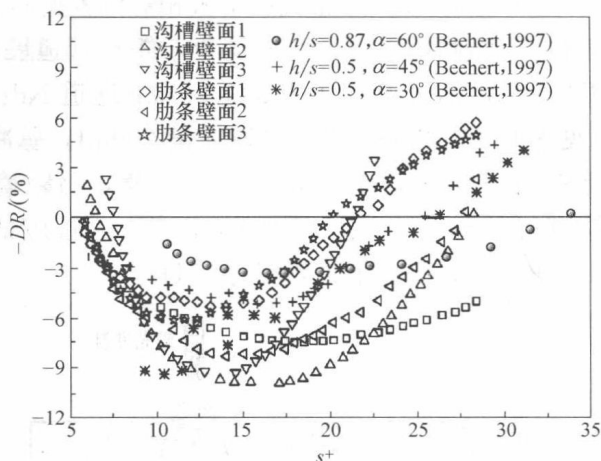


图 2-5 减阻率对比

减阻效果随着 s^+ 的增大而减弱，这是由于随着雷诺数增大湍流强度增大，而壁面微沟槽对于沟槽尖端与沟谷动量交换的抑制增强，湍流脉动 (u' 、 v') 增强，雷诺切应力增大，但壁面微沟槽“约束效应”的减阻效果仍大于“尖端效应”的增阻效果，所以最终壁面微沟槽仍呈现出减阻的效果，如图 2-6b 所示。当 $s^+ \approx 15$ 时，沟槽尖端与沟谷动量交换抑制作用达到最强，同时湍流脉动强度、雷诺切应力适宜，最终使得沟槽减阻效果达到最佳，如图 2-6c 所示，同时在沟槽内形成了“第二涡群”，此涡结构的形成会抑制槽内流体与外部流团之间的动量交换，从而使得槽内流体的流动变得更加稳定，流动阻力减小，增强了壁面微沟槽的减阻效果。当 $s^+ \approx 22$ 时，壁面微沟槽的减阻率值为 0，表明“约束效应”的减阻效果与“尖端效应”的增阻效果相中和，壁面微沟槽没有减阻效果，对流场阻力总的影响效果与光滑壁面相同。当 $s^+ > 22$ 时，随着雷诺数的增大，湍流脉动进一步增强，沟槽尖端与沟谷交换频繁，涡结构增大，尺度变小，壁面微沟槽对管道起到了增阻的作用，如图 2-6d 所示。

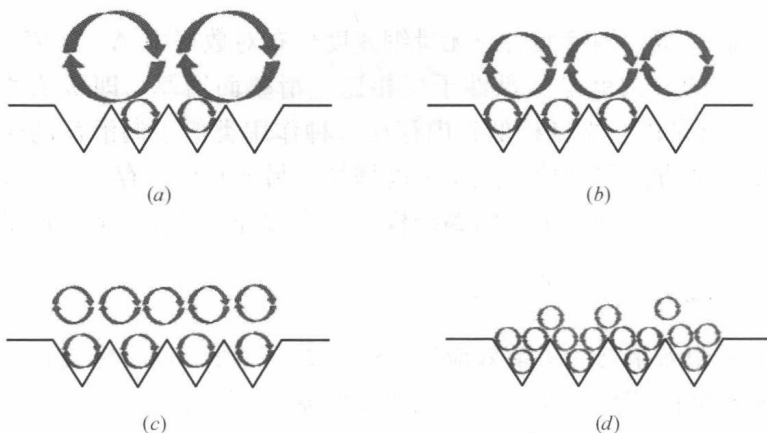


图 2-6 微沟槽壁面近壁区涡结构变化过程

(a) 低流速下，减阻效果差；(b) 流速增大，减阻效果增强
(c) 流速适宜，减阻效果最佳；(d) 流速继续增大，减阻效果变差

2.3.3 小结

研究对微结构壁面和光滑壁面作为底面的矩形管道的湍流特性进行了对比试验,通过对比分析减阻率、平均流速、雷诺应力和湍流强度等流动参数,得到如下结论:

(1) 在一定的 s^+ 范围内,6 种不同的微结构壁面都具有减阻效果。不同微结构壁面的减阻效果与 h/s 、 s^+ 相关。研究发现不同微结构壁面的减阻效果都随着 s^+ 的增大,呈现先增大后减小的趋势,其中沟槽壁面 2 的减阻效果最好,最大减阻率为 9.90 %。

(2) 不同壁面微结构通过“尖端效应”及“约束效应”两种现象的相互作用,从而使壁面微结构具有减阻或增阻效果。壁面微结构通过影响湍流脉动强度、雷诺切应力、平均流速等,从而使得壁面微结构具有减阻效果。

(3) 微结构壁面的无量纲流向速度分布曲线对数率区的 A 、 B 值比光滑壁面得大,黏性底层相对于光滑壁面增厚。

第 3 章 天然气管道减阻技术

3.1 输气管道减阻机理

目前,天然气管道输送减阻技术研究取得了较大的进展,就研究结果而言,减阻技术大致可归纳为两大类:管道内涂层减阻技术和天然气减阻剂减阻技术。

3.1.1 管道内涂层减阻技术

管道内涂层减阻技术的核心是降低内壁的粗糙度,其关键的前提条件为:一是天然气流动处于完全紊流区,二是管壁表面粗糙度要有显著的减小。

理论分析表明,对管内流动而言,光滑减阻的潜力是最大的。一些文献的试验结果表明,光滑减阻率能达到百分之十几甚至几十,光滑减阻的效果是惊人的。对管道而言,要实现内壁面光滑的方法很多,目前从经济、实用的角度来讲,内壁减阻涂层是最有效的方法之一,国内外已有多篇关于内涂层减阻方面的报道。图 3-1 是管道内壁涂层减阻的模拟图。

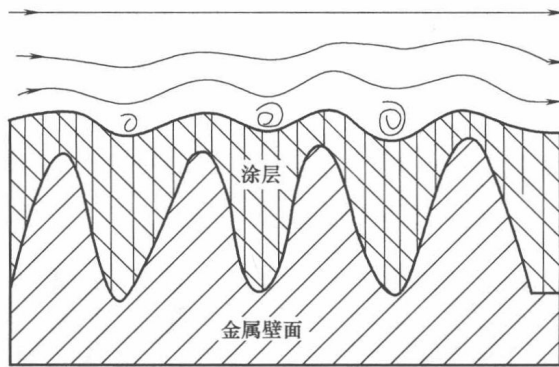


图 3-1 管道内壁涂层减阻模拟图

内涂层技术最早主要应用于水管道,以确保获得高纯度的水;或用于气体管道,以期最大限度提高输送能力。研究人员后来发现,内覆盖层不仅可以有效地防止管道内腐蚀,而且还是提高输量的有效手段,对于干线输气管道的增输效果尤为显著。因此,20 世纪 60 年代以来,以减阻为目的的内涂技术有了较快的发展。

20 世纪 60 年代内覆盖层的最早使用是在 1940 年美国德克萨斯州在酸性原油油井套管进行的内涂酚醛树脂作业;1947~1948 年,内涂技术第一次应用于含硫原油管道和含硫天然气管道;1953 年,美国首次在一条直径为 508mm 的天然气管道上使用内涂层;1955 年,美国第一次采用胺固化环氧树脂覆盖层材料对长距离输气管道进行内覆盖作业。

此后,在世界范围内应用内涂减阻的著名干线输气管道的典型例子不胜枚举。

Tennessen 公司在 1958 年首次进行了典型的 Refugio 天然气输送管道内涂层试验。试验的结果表明,管道涂覆内涂层后的流动效率提高了 6%。Transcontinental 公司也于 1959 年将内涂覆管线投入实际应用。经过几十年的应用发展,管道内涂层的涂料生产和施工技术日趋成熟,欧美许多油气管道公司也开始认识到管道内涂层减阻的优越性,并对天然气管道的主干线涂覆内涂层,包括横跨欧洲的马格里布管道、世界上最长的海底管道和加拿大到美国的联盟管道等。1968 年,美国石油协会制定了 API RP 5L2《输气管道内涂层的推荐准则》,对内涂层的材料、施工和质量都做了严格的规定,之后许多国家也制定了相关的标准,包括英国的 CM1、CM2 等。在管线建设中,内壁涂层的费用只占到钢管费用的 2%~3%,只要输气量能提高 1%,就能很快回收投资。

目前,内涂层技术处于领先地位的国家包括美国、德国、英国、意大利等欧美国家,已普遍采用内涂层减阻技术来提高输气压力,增加输气量。

在国内,内涂层技术已开发多年,但主要是应用于油气田腐蚀性介质的集输管道和注水管道上,用于防腐蚀目的。石油工程研究院对适合应用于大口径管道的减阻内涂层进行了专项调研,管道局和工程院的技术专家对内涂层的减阻效果进行了定量的经济性分析。1977 年,石油工程建设施工专业标准化委员会制定了《钢质管道熔结环氧粉末内防腐层技术标准》SY/T 0442—2010 和《钢制管道液体环氧涂料内防腐层技术标准》SY/T 0457—2010 两个行业标准,使国内的内涂层技术逐步走向规范化。

管道内涂层的物质基础是涂料,适合于天然气管道内涂的涂料品种有很多,包括环氧树脂涂料、环氧聚氨酯涂料、环氧酚醛涂料以及煤焦油环氧涂料等。内涂涂料应具有以下特征:有良好的防腐蚀性能,具有耐压性,易于涂装,化学性质稳定,有良好的粘结性及耐弯曲性,有足够的硬度和耐磨性,有良好的耐热性,涂层光滑。

环氧树脂涂料是广泛使用的长效防腐涂料,它是由涂料中的环氧树脂分子和固化剂发生交联反应固化而成,利用环氧基的反应活性,可以用各种树脂对环氧树脂进行改性,制得各种具有良好使用性能的涂料。1957 年,美国天然气协会的管道研究会曾经进行过一个研究项目,对天然气管道内表面的涂料进行研究和筛选,在对各种涂料进行研究后发现,最终认为环氧树脂型液体涂料,特别是聚酰胺固化的环氧树脂,最适合于天然气管道的内涂。国外目前常用的天然气管道减阻类涂料都采用环氧树脂作为成膜基料,包括英国伊伍德公司的 COPON BP2306HF、德国 Permecor337 和丹麦 Hempel 85442 等产品,具有附着力好、减阻效果好等特点。

我国管道内涂层专用涂料的研究也有二十多年的历史。中国石油天然气总公司施工技术研究院和华北油田设计院于 1982 年和 1984 年先后研制了防腐型环氧粉末涂料,此后有关单位又研发了 H87、H8701 等液体环氧涂料。目前,中国石油集团工程技术研究院已经研制出天然气管道减阻耐磨涂料。该涂料以新型改性树脂为基料,具有表面光滑、减阻效果突出、附着力好等特点,特别适用于天然气输送管道的内壁涂覆,可以大幅度降低管道输送压力,提高管道输送效率。AW-01 型涂料制作的减阻内覆盖层能达到 API RP 5L2 标准的要求,在西气东输工程中后期得以应用,这是国产减阻涂料的首次工业化应用。此外,中科院金属研究所国家技术腐蚀控制工程技术研究中心也研制开发出一种管道内减阻涂料。与国外相比,国内内涂层的各项技术在技术水平和应用范围上存在较大的差距,特