输气管道减阻增输技术研究进展及展望

樊朝阳[1]　李敬法[1]　田　坤[2]　秦守强[3]　胡　涛[4]　肖佳乐[1]　宇　波[1]

1. 长江大学石油工程学院，　湖北　武汉　430100；
2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院，　新疆　克拉玛依　834000；
3. 北京石油化工学院机械工程学院，　北京　102617；
4. 长庆工程设计有限公司，　陕西　西安　710018

摘　要：随着中国天然气管网规模的扩大及纯氢/掺氢天然气管道输送需求的增长，管道摩擦阻力导致的输送效率下降问题日益突出。回顾了近年来输气管道减阻增输技术的研究进展，重点分析了内涂层技术与减阻剂技术的应用现状、机理及局限性。内涂层技术适用管径受限、施工复杂且难以修复的工况；减阻剂技术具有灵活经济的特点，但分子结构优化、机理研究及现场验证仍需突破。此外，沟槽和自适应表面等非光滑表面减阻技术通过改变近壁流动特性展现出发展潜力，但机理尚未统一。研究发现现有输气管道减阻增输技术普遍面临机理不完善、评价方法局限等问题。未来需结合多学科深化减阻机理研究，优化材料与工艺，提高输气管道的输送能力，助力“双碳”目标下清洁能源的高效输送。

关键词：输气管道；减阻增输；内涂层；减阻剂；发展现状
DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2026.03.001

Research progress and prospect of gas pipeline drag reduction and throughput enhancement technologies

Fan Chaoyang[1], Li Jingfa[1], Tian Kun[2], Qin Shouqiang[3], Hu Tao[4], Xiao Jiale[1], Yu Bo[1]

1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei, 430100, China;
2. Engineering School, China University of Petroleum(Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang, 834000, China;
3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing, 102617, China;
4. Changqing Engineering Design Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract: With the expansion of China's natural gas pipeline network and the increasing demand for pure hydrogen and hydrogen-blended natural gas transportation, the decline in transmission efficiency caused by pipeline frictional resistance has become increasingly prominent. This paper reviews recent research progress on drag reduction and throughput enhancement technologies for gas pipelines, focusing primarily on the application status, mechanisms, and limitations of internal coatings and drag reduction agents. Internal coatings technology are constrained by pipe diameter limitations, complex construction processes, and difficulties in repair; drag reduction agent technologies offer flexibility and cost-

收稿日期：2025-09-20
基金项目：国家自然科学基金项目“城镇掺氢燃气管道掺混/分层传质机理及高精度随动流量掺氢调控机制研究”(52372311)；福建省“揭榜挂帅”引导性项目“城镇中低压管道燃气掺氢及燃烧关键技术与装备研发”(2023H0054)；中国石油天然气集团有限公司科技项目“清洁供能关键技术研究与应用”(2023ZZ31YJ04)
作者简介：樊朝阳(2001-)，男，硕士研究生，主要从事掺氢天然气管输方向的研究工作。E-mail：2314441924@qq.com
通信作者：李敬法(1990-)，男，教授，博士，主要从事氢能安全高效输送技术方面的研究工作。E-mail：lijingfa@yangtzeu.edu.cn

effectiveness but still require breakthroughs in molecular structure optimization, mechanism elucidation, and field validation. Additionally, non-smooth surface drag reduction techniques—such as grooves and adaptive surfaces—show potential by modifying near-wall flow characteristics, although their mechanisms remain inconclusive. The study finds that existing drag reduction and throughput enhancement technologies generally face challenges including incomplete mechanistic understanding and limited evaluation methods. Future research should adopt multidisciplinary approaches to deepen the understanding of drag reduction mechanisms, optimize materials and processes, improve pipeline transmission capacity, and facilitate efficient clean energy transportation in support of China's "dual carbon" goals.

Keywords: Gas pipeline; Drag reduction and throughput enhancement; Internal coating; Drag reduction agent; Current development status

0 前言

中国天然气管道、掺氢天然气管道、纯氢管道等蓬勃发展,全国天然气管道形成了"一张网"格局。由于管道内壁并非完全光滑,且气体在输送过程中需通过阀门、压缩机、弯管等,存在沿程阻力和局部阻力损失。通常输气管道输送的能耗较高,压缩机能耗及成本占管道投资及运营费用的比例较大。如何在额定压缩机功率下减小管输阻力提高输气量,或者在额定输气量下降低压缩机输送功率,是输气管道运营管理的重点任务之一。

由于制造工艺和材料固有的特性,输气管道内壁存在粗糙凸点,当气体流过凸点时会发生脱流现象,在凸点后形成涡流,导致凸点前后形成压差,压差的大小与凸点高度(粗糙度)相关,当管壁粗糙度越大时,压差越大,流动产生的阻力也越大[1]。

学者根据减阻机理,从管材壁面粗糙度、流体的流动状态等多角度出发,分析不同因素对阻力损失的影响,进而实现减阻。例如,张其滨等人[2-3]通过对减阻剂结构特征以及减阻机理的探索,研制了有效的输气管道减阻剂,并建立了减阻剂减阻效果评价方法。Reidy L 等人[4]通过分析研究沟槽表面边界层,发现控制边界层可降低湍流强度,达到减阻目的。Kramer M O[5]通过仿生海豚体表,使用天然乳胶制成自适应表面进行了实验研究,获得了减阻效果。综上,现有研究分析了不同因素对输气管道减阻效果的影响,为输气管道减阻提供了一定的理论和技术支撑,但相关研究主要聚焦于传统天然气输送,缺乏系统性,研究结论也尚不统一。随着氢能产业的快速发展,纯氢管道和掺氢管道的减阻增输问题也成为研究焦点。相较于天然气,氢气更难压缩,适用于天然气管道的减阻理论及技术对氢气管道的适应性还有待进一步研究和验证。因此,迫切需要综合分析目前输气管道减阻增输技术,为技术改进提供参考。

1 输气管道阻力来源

输气管道阻力来源包括沿程阻力和局部阻力。其中,沿程阻力是由气体与管道内壁的摩擦以及气体分子之间的黏性剪切作用产生,而局部阻力则由管道局部结构变化引起的流动分离、涡旋和动能耗散等产生。沿程阻力可用达西—魏斯巴赫公式量化,见式(1)。

$$h_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \tag{1}$$

式中:h_f 为沿程阻力损失,m;λ 为达西摩阻系数;L 为管道长度,m;D 为管道直径,m;v 为气体流速,m/s;g 为重力加速度,m/s^2。

对于固定的输气管道,管道长度、管径不再改变,气体流速为经济流速,因此影响沿程阻力的主要因素是摩擦系数。长距离输气管道有管径大、压力高和流速快的特点,气体在管道中的流动状态基本处于完全湍流的"阻力平方区"[6]。在该流动状态下时,达西摩阻系数符合舍夫林松公式[7],见式(2)。

$$\lambda = 0.111\left(\frac{K}{D}\right)^{0.25} \tag{2}$$

式中:K 为管道内壁粗糙度,m。

可见摩阻系数和管道内壁粗糙度成 0.25 次方的正比关系,减小粗糙度可减小摩阻系数,进而降低输送过程中的能量损失,提高输气量。

在输气管道中,弯头、阀门、变径管等管件会对流动产生影响,都会产生局部摩阻损失,局部阻力计算见式(3)。

$$h_j = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \tag{3}$$

式中:h_j 为局部阻力损失,m;ζ 为局部阻力系数,ζ 值通常通过实验测定或工程手册查表获得,与管件几何形状、表面粗糙度及流动状态相关。

在长距离输气管道中,局部摩阻损失相比于沿程摩阻损失小得多。因此,降低沿程摩阻损失是降低输气管道阻力的重点。降低沿程摩阻损失主要通过减小管道内壁粗糙度从而达到减阻效果,目前减小管道内壁粗糙度的主流方法有内涂层技术和减阻剂技术。内涂层技术的原理是通过在管道内壁涂覆光滑涂层,减小管道内

壁粗糙度，从而降低气体流动时的摩阻。该技术较为成熟，已在国内外天然气管道中广泛使用，但一般应用于大口径、高压力的长输管线上。减阻剂技术的减阻机理目前尚未统一，现阶段研究表明，减阻剂既可通过减小管道内壁粗糙度来降低气体流动阻力，也可以改变近壁面湍流强度达到减阻效果，二者减阻机理不同。减阻剂技术不仅能应用于长输管线，也可应用于集输管线，应用范围更广泛。此外，沟槽和自适应表面等非光滑表面可通过改变近壁面流动特性，达到减阻目的。

2　光滑表面减阻技术

2.1　内涂层减阻特性

内涂层技术是管道输运中应用最广泛的减阻增输技术之一，通过在管道内壁涂覆光滑涂层，填补管道内壁的“凹坑”，减小管道内壁粗糙度，改善气体流动状态，减少能量损失，达到减阻增输的目的。涂覆在管道内壁的涂层还可阻止流体中的腐蚀性物质与管壁接触，减缓对管壁的腐蚀，延长管道使用寿命。输气管道内涂层的作用机理是光滑减阻，即通过在管道内表面涂覆涂层形成光滑表面，显著减小管道内壁粗糙度，减小涡流区范围，从而有效降低气体分子与管壁间的摩擦阻力，实现减阻增输，光滑减阻机理示意图见图 1。

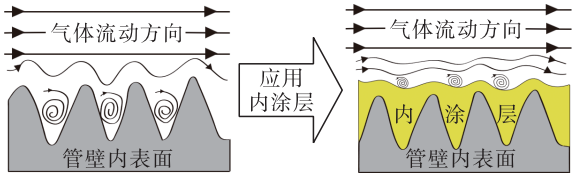

图 1　光滑减阻机理示意图

Fig. 1　Smooth drag reduction mechanism

美国 Transco 公司对管径为 914 mm 的天然气管道进行实验，结果表明内涂层技术对气体介质流动效率影响较为显著[8]。该技术可有效提升输气管道输送效率，经济性与安全性较好，但涂层失效会影响管道生产运行。日常生产运行过程中清理管壁及气体流动等因素会导致涂层产生凹坑、针孔、气泡及厚度不均匀等缺陷[9]。涂层失效脱落后会随管道中的气体自上游移动到下游，对沿线阀门、压缩机及其他设备产生影响。因此在输气管道应用内涂层时不仅要评估涂层质量，还要论证涂层失效对管道生产运行的影响。

2.2　内涂层技术应用

1953 年，美国第一次将内涂层技术应用在输气管道干线上，之后对多种内涂层材料进行了实验研究，结果表明最适合作为天然气管道内涂层的材料是环氧树脂[8]。此后各国相继颁布了内涂层材料技术规范，例如美国石油学会颁布了 API RP 5L2—2002（R2015）《非腐蚀性气体输送用管线管内涂层推荐作法》（以下简称 API RP 5L2），此标准对内涂层的质量和施工都作了严格规定；英国天然气协会颁布了 GBE /CM1《钢管和管件内涂层施工方法》和 GBE /CM2《钢管和管件内涂层材料技术规范》，经过 1993 年修订后，此标准得到了欧洲各国的广泛认可。1980 年后，国外内涂层技术已相对成熟，普遍应用于大管径天然气管道。国内内涂层技术应用较晚，在西气东输工程中首次提出应用。当时我国还没有管道内涂层相关技术标准，西气东输天然气管道工程内涂层技术的应用参照了 API RP 5L2[10]。但近年来，国内研究人员进行了管道内涂层新型材料的研究，取得了多项研究成果，国家能源局发布了相关标准 SY /T 0442—2018《钢质管道熔结环氧粉末内防腐层技术标准》和 SY /T 0457—2019《钢质管道液体环氧涂料内防腐层技术标准》，规范内涂层性能和施工要求。该两项标准在西气东输二线、川气东送以及陕京二线等天然气管道工程中得到了应用。国内西气东输工程应用内涂层后，输气能力得到了较大提升，有内涂层的管道输气能力为 128.5×10^8 m^3 /a，无内涂层的管道输气能力为 121.2×10^8 m^3 /a，输气量增加 7.3×10^8 m^3 /a，全线减少功率 19.2%，全线总耗气减少 1.61×10^8 m^3，产生了巨大的经济效益[11]。

随着内涂层技术的持续发展，管道内涂层材料呈多样化趋势，不同类型的内涂层材料在性能、适用场景及经济性等方面各有侧重。目前常用的输气管道内涂层材料按元素组成可分为有机和无机两类，优缺点和应用分别见表 1、表 2。

表 1　有机内涂层材料的优缺点和应用表

Tab. 1　Advantages，disadvantages and applications of organic internal coating materials

材质	优点	缺点	应用
液体环氧涂料	经济性好、涂敷效率高、附着力强	液体环氧涂料的固化过程需要特定的环境和时间	挪威北海天然气管道马格里布—欧洲天然气管道
粉末环氧涂料	耐腐蚀性强、附着力强、绝缘性能良好	安装周期长、成型工艺复杂	技术不成熟，实际应用不多
酚醛环氧树脂	耐化学腐蚀性强、黏接性优异、耐高温性卓越	柔韧性和抗冲击性相对较差、固化条件苛刻	1940 年美国原油管道首次使用酚醛环氧树脂材料作为内防腐涂层

表 2　无机内涂层材料的优缺点和应用表

Tab. 2　Advantages, disadvantages and applications of inorganic internal coating materials

材质	优点	缺点	应用
耐腐蚀金属涂层	防腐效果好	对气体增输影响小	多用于小管径、低压力管道的内防腐
陶瓷类涂层	具有耐高温性、耐磨性、耐冲刷性以及高绝缘性	生产工艺复杂	实际应用不多
类金刚石碳膜	摩擦系数极低、硬度超高	成本极高、内应力大、脆性及抗冲击性差	技术不成熟，实际应用不多
玻璃钢涂层	具有全面耐腐蚀性，适用于复杂工况、使用寿命长	施工复杂、初始成本高	在钢质管道外防腐层应用较多

有机内涂层材料发展时间长，技术成熟，具有经济性，应用于大部分输气管道。无机内涂层材料的相关研究近年才开始，无机内涂层材料多用于管道防腐，在大管径、长输气体管道中极少应用[8]。

2.3　减阻剂减阻特性

管道内的气体呈湍流状态，减阻剂通过改变流体流变特性来降低流动阻力，其减阻核心在于通过抑制湍流能量耗散或改变流体黏弹性，从而减小壁面摩阻。减阻剂具有高黏弹性，通常为碳氢化合物，因此其添加不会影响气体的物理性质。减阻剂技术相较于内涂层技术展现出多项优势：经济性好，节省了内涂层高昂的初始投资和运营成本；注入工艺简单，不同于内涂层技术的施工繁杂，减阻剂通过喷雾泵注入管道，还可根据需求控制加注量；广泛适用于各类管道，新建管道和内涂层脱落的旧管道都可通过加注减阻剂提高输气量。

减阻剂的发展同样起源于美国，20 世纪 50 年代，美国石油协会提出了应用减阻剂为输气管道减阻的可能性，但当时尚未出现真正的减阻剂[12]。20 世纪 80 年代，西方一些发达国家开展了输气管道减阻剂研究并通过室内实验取得了不错的研究成果，但并没有工业化应用[13]。1990 年，美国学者 Lowther F E[14] 将减阻剂应用于实际输气管道，通过现场应用试验取得了减阻效果。1998 年，Li Y H 等人[15] 分别在实验室和现场开展了应用实验，采用环道筛选了可能作为气体减阻剂的物质，并在一条干气管道上开展了 Nalco945 缓蚀剂现场试验。结果表明，该缓蚀剂具有良好的减阻效果。21 世纪初，Chen H J 等人[16] 在海底天然气管道进行天然气减阻剂试验并取得了成功，试验管道长 58.05 km，试验了多种类型的减阻剂。挪威科技大学的 Naess R[17-18] 从两个角度进行了实验研究，使用了成膜剂和和黏弹剂两种类型的减阻剂，发现成膜剂可减小内壁面粗糙度，而黏弹剂可抑制亚湍流层的发展。2003 年，Li Guomin[19] 通过失重、电化学极化和电化学阻抗谱测试，研究了松香胺对低硫气体腐蚀的抑制作用。结果表明，松香胺化合物是一种有效的缓蚀剂，抑制效率随抑制剂浓度的增加而增加，同时松香胺衍生物及咪唑啉化合物有作为天然气减阻剂的可能。综上所述，大部分减阻剂的研究都基于缓蚀剂的开发，包括脂肪胺类、脂肪酸类、氨化物和酰胺类 4 大类化合物[20]。

中国减阻剂研究始于 21 世纪初，中国石油集团工程技术研究院、中国石油管道科技研究中心及多所高校相继投入研发，成功合成了多种减阻剂，并开展了表面成膜特性测试、室内环道实验评价以及现场应用验证。中国开发的减阻剂类型见表 3[21]。关于合成减阻剂的检验和筛选，鲍旭晨等人[22] 研制了雾化型减阻剂 BIB 型曼尼希碱化合物，其减阻率较稳定，减阻效果持续时间长。山东大学科研团队张雷[23]、邢文国[24] 分别在 2009 年、2010 年进行了不同类型减阻剂的研究，推荐使用咪唑啉类及聚合物类减阻剂。中国石油大学（华东）研究团队研制合成了多种减阻剂，其中，减阻效果较好的减阻剂类型是脂肪醇聚氧乙烯醚磷酸酯铵盐减阻剂（磷酸酯类化合物）[25-27]。

表 3　中国开发的减阻剂类型表

Tab. 3　Types of drag reduction agent developed by domestic organizations

研究单位	减阻剂类型	减阻效果评价手段
中国石油集团工程技术研究院	液态减阻剂	室内环道实验
中国石油管道科技研究中心	曼尼希碱化合物、磷酸酯类化合物、咪唑啉类化合物、聚合物型、酰胺类化合物	室内环道实验、现场管道试验
山东大学	咪唑啉类化合物、聚合物型、酰胺类化合物	室内环道实验
中国石油大学（华东）	曼尼希碱化合物、咪唑啉类化合物、磷酸酯类化合物	室内环道实验、现场管道试验

近年来,新型减阻剂相继问世。李鑫源等人[28]制备了天然气减阻剂 1,3,5-苯三甲酸三-十二酰胺(1,3,5-benzenetricarboxylic acid tridodecanamide, BATD),以雾化时间和 BATD 加量为变量,辅以扫描电镜,综合评价了 BATD 在天然气管输过程中的成膜情况和减阻性能。结果表明,BATD 可牢固吸附在钢材表面,明显减小钢材表面粗糙度,显著提升输气管道输送效率,并兼具缓蚀效果。赵巍等人[29]合成了新型添加剂双-2-二丁基胺基-4-N-吗啉-6-N-乙二胺基-1,3,5-三嗪(bis-2-dibutylamino-4-N-morpholine-6-N-ethylenediamine-1,3,5-triazine, BDMET),采用氢核磁共振谱图(1H nuclear magnetic resonance spectrum,1HNMR)和元素分析对产品进行结构表征;应用 BDMET 的甲醇溶液作为缓蚀型减阻剂进行现场加注试验,并评价了减阻增输效果和缓蚀效果,其减阻率为 8% ~13% 。韩学圣等人[30]通过酯化苯二甲酸与甲醇,再与直链胺酰胺化,研制了 1,4-苯二甲酸二十二酰胺(1,4-benzoate docosanide, BADD)主剂,并以 1% JSC-1150 附着力促进剂为助剂,减阻率达到 13.7% 。Li Feng 等人[31]首次合成并表征了不同酰胺基团 /正十二烷链数目(1 ~3)的多烷基化芳香酰胺(Multialkylated Aromatic Amides, MAA)低聚表面活性剂,通过界面活性分析、成膜性能测试、电化学极化曲线测量和室内循环试验,研究了 MAA 作为输气管道减阻剂的潜在效能。结果表明,MAA-1 形成的膜太薄而不能覆盖表面粗糙度,减阻率(0 ~2%)最低;MAA-3 形成的膜最厚且最光滑,因此减阻率(10% ~14%)最大;MAA-2 形成的膜较厚但不光滑,减阻率(4% ~6%)居中。

2.4　减阻剂减阻机理

目前,大多数关于减阻剂减阻机理的研究仅能从特定领域角度解释减阻剂减阻现象。鉴于湍流本身的复杂性,再加上各实验采用的变量与参数存在差异,目前尚无一种被广泛认可的模型能全面阐释完整的减阻机理。由于几乎无法精准预测湍流的复杂特性,本节分析国内外减阻剂减阻机理研究现状,旨在探讨相关理论假说与潜在作用机理,而非阐述一套成熟定型的理论体系。当前,学者们提出了多种减阻机理,主要包括光滑减阻机理、黏弹减阻机理以及综合减阻机理。

光滑减阻机理是减阻剂在管壁形成相比固体壁面更小粗糙度的液膜,减小涡流区,显著降低气体流动摩阻。但有学者对此持不同观点,例如王铭浩[32]指出利用减阻剂分子来填充管道内壁面“凹坑”是不太可能的,若考虑减阻剂分子和管道内壁面粗糙度的大小关系,减阻剂分子长度为纳米级,即使达到微米级也和管壁粗糙度的毫米级相差几个数量级。

除了光滑减阻机理之外,还有研究人员提出黏弹减阻机理。张金岭等人[33]认为减阻剂分子结构包含吸附管壁的极性端,以及在界面处形成弹性液膜的非极性长链端,见图 2。界面处的长链分子吸收近壁湍动能,减少流体能耗。这些能量随后耗散至流体中,抑制气体湍流,最终降低管道输送阻力与能耗。Najman M N 等人[34]开展了磷酸酯铵盐在钢片表面吸附形态研究,发现减阻剂分子并不能填充管道内壁的粗糙“凹坑”,但是依靠弹性薄膜的缓冲特性,仍能实现天然气输送阻力的降低。

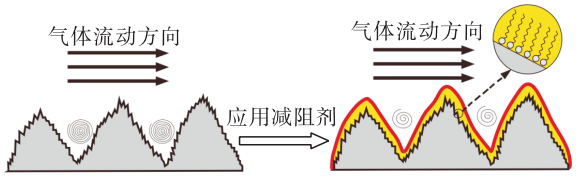

图 2　黏弹减阻机理示意图

Fig. 2　Viscoelastic drag reduction mechanism

综合减阻机理是光滑减阻机理和黏弹减阻机理的结合,见图 3。

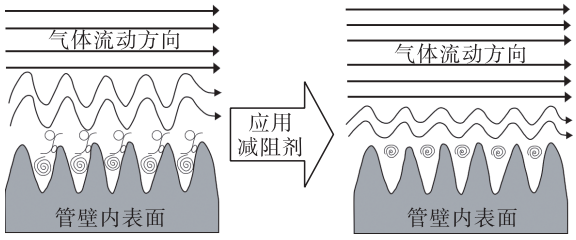

图 3　综合减阻机理示意图

Fig. 3　Integrated drag reduction mechanism

刘兵等人[35]针对减阻剂黏附在管道内壁形成的高分子层,阐释了其两方面特征,一是该高分子层填补管道内壁存在的凹陷,减小了壁面粗糙度;二是该高分子层具有弹性,能够抑制径向脉动,增大时均速度梯度,从而实现减阻增输。2005 年,Olivares-Xometl O 等人[36]通过实验研究,指出减阻剂减阻的原理是减阻剂吸附在金属表面形成弹性液膜,减小金属壁面粗糙度。吸附过程是减阻剂分子中 N 和 O 原子与金属表面 Fe 原子之间形成配位键,化合物的分子大小和结构影响液膜覆盖率。徐吉展等人[37]认为减阻剂的作用机理也可从两方面考虑:一方面减阻剂分子填充管壁处的“凹坑”,形成光滑壁面,降低湍流发生的概率和强度;另一方面弹性薄膜可延长层流转变为湍流的时间,使黏性底层增厚,比刚性壁面边界层稍宽,还可吸收湍流猝发过程中的运动能量,降低湍流脉动的强度,但减阻剂形成的管壁液膜厚度需适中,过薄则无法充分填充壁面“凹坑”且缺乏弹性,过厚易产生积液和液膜波动,增加流动阻力。

2.5　减阻剂技术应用

当前关于气体减阻剂的现场应用研究多为短周期、

小规模试验，对其减阻率及有效作用距离缺乏深入探究。值得注意的是，尽管长距离输气管道对减阻剂需求迫切，但尚未见大口径管道使用减阻剂的实验报道，当前主要在原油管道[38-39]以及油气田开发[40-41]中有较成熟的应用实例。

3 非光滑表面减阻技术

3.1 微沟槽技术

微沟槽技术的产生是受到鲨鱼表皮微观结构的启发，输气管道可通过采用微沟槽结构设计达到减阻效果。20 世纪 70 年代美国航空航天局兰利研究中心的研究颠覆了“表面越光滑摩阻越小”的传统认知，揭示了微沟槽表面在降低壁面摩擦阻力方面的显著效果。目前，国际上对微沟槽减阻机理尚未形成共识，其中“突出高度”论和“第二涡群”论接受度较高，见图 4 ~ 5[42-43]。“突出高度”论由 Bechert D W 等人[42,44]提出，他指出微沟槽尖端处几何形状的改变，使得速度突变，表观起点下方流体速度梯度较小。相当于增加了黏性底层的厚度，降低了壁面处剪切应力，从而实现减阻。“第二涡群”论由 Bacher E 等人[43]提出，该理论从湍流产生机理出发，指出微沟槽尖端会与流向涡相互作用，诱导产生与旋转方向相反的第二涡流。这种第二涡流能有效减弱流向涡的强度，并有助于维持低谷区流体的低速状态，即第二涡流的形成抑制了流向涡，限制了近壁低速条带在流向的发展[43]。

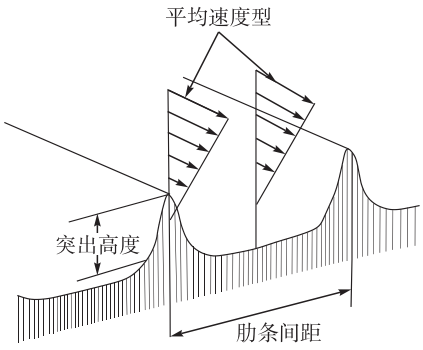

图 4 “突出高度”论示意图

Fig. 4 The “salient heights” theory

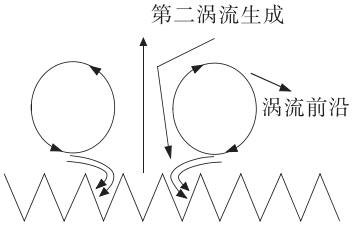

图 5 “第二涡群”论示意图

Fig. 5 The “second vortex group” theory

针对微沟槽减阻效果的影响因素，学者们从微沟槽的形状入手，探究肋条间距和肋条高度对减阻效果的影响。通常使用无量纲数来描述肋条设计以及肋条结构与流体的相互作用，其定义见式(4) ~ (5)。

$$s^+ = \sqrt{\frac{C_f}{2}} \cdot \frac{su_\infty}{v} \tag{4}$$

$$h^+ = \sqrt{\frac{C_f}{2}} \cdot \frac{hu_\infty}{v} \tag{5}$$

式中：s^+、h^+为无量纲数；s 为肋条间距，m；h 为肋条高度，m；v 为运动黏度，m^2/s；u_∞ 为自由流速度，m/s；C_f 为壁面摩擦系数。

Walsh M J 等人[45-49]对不同形状的微沟槽进行了减阻实验研究，探究微沟槽高度及肋条间距对减阻效果的影响。实验结果表明，肋条高度≤30 m 和肋条间距≤15 m 时，微沟槽存在减阻效果，并指出在肋条间距 = 30 m、肋条高度 = 15 m 时减阻效果最佳，减阻率可达 7% ~ 8%。此外，丛茜等人[50]采用有限体积法对三角形、刀刃形和扇贝形微沟槽进行了数值模拟，发现刀刃形沟槽的减阻效果最优，而三角形沟槽的减阻效果最弱。李贝贝等人[51]研发了一种具有微沟槽结构的薄膜，将该薄膜敷设在管道内壁，不需要其他附加设备就可实现减阻效果。Bechert D W 等人[52]通过将微沟槽结构布置在长 16 km 的天然气管道内，实验得到减阻率约为 10%。通过以上学者对微沟槽的研究可预见微沟槽技术在大管径、长距离输气管道中有较大应用潜力[53]。

3.2 自适应表面技术

自适应表面是指在流体的冲击下会被动发生形变的柔性表面。自适应表面可更好地适应流体流过，使流体中引起转捩发生的不稳定波变弱，进而推迟层流在表面的转捩，使得层流区域在表面扩大，从而实现减阻[54]。20 世纪 60 年代，Kramer M O[5]仿制出一种“人工海豚皮”自适应表面，见图 6。

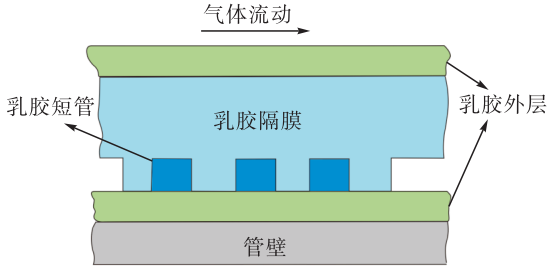

图 6 Kramer M O 自适应表面横截面示意图

Fig. 6 Schematic cross-section of Kramer M O adaptive coating

Kramer M O 将该自适应涂层覆盖在圆柱表面，测试了其减阻性能。实验结果表明，该自适应涂层取得了减阻效果，且当自适应表面材料的弹性模量为 22 kg/cm^2 时，减阻效果最好。这是因为气体在自适应表面上的扰动不同于在刚性表面上的扰动，自适应表面可使受到扰

动的流体恢复至层流，有较好的层流保持性，进而减小流动中受到的阻力[55]。Carpenter P W 等人[56]依据边界层稳定理论证明了 Kramer 研制的自适应表面可推迟层流至湍流的转捩，并在后续研究中发现自适应表面可以有效减弱 Tollmien-Schlichting 波（TSW）的增长，但其阻尼效应会促进不稳定波的增长[57-59]。例如，1984 年，Gad-el-hak M 等人[60]指出了行波减阻过程中的色散会导致非线性效应；1990 年，Carpenter P W[54]指出行波颤振对减阻效果的影响，并改进了自适应表面模型，考虑了自适应表面对流体剪切的响应。

当前，优化自适应表面减阻效果的核心在于抑制 TSW 的增长，同时减小行波颤振以及色散效应的影响[61]。进入 21 世纪后，学者们更加倾向于理论模拟研究，利用理论模拟指导实验。2017 年，Tsigklifis K 等人[62]通过对自适应表面局部及全局稳定性的模拟研究，发现无论是 TSW 失稳还是行波颤振失稳，都会引发全局失稳。2018 年，Nagy P T 等人[63]研究了顺流方向运动的自适应表面的展向运动，发现自适应表面的展向运动不会影响 TSW 的不稳定性。综上所述，实验和理论研究都表明自适应表面在减阻方面有巨大潜力，对于气体来说，想要达到一定的减阻效果，需要更加精细的自适应表面，这在实际应用中还面临着诸多挑战。

3.3　非光滑表面减阻技术应用

非光滑表面技术除了微沟槽减阻和自适应表面减阻外，还包括凹坑、微气泡、壁面振动减阻等，但这些方法在油气管道领域的研究较少，其是否适用于减阻仍不确定。沟槽减阻方面除了上述提到的实验案例，并没有真正在输气管道应用的案例，且沟槽减阻性能受其几何特性影响，减阻率与其尺寸呈正相关，但难以制备出实现最大减阻率的理想沟槽结构。该方法面临的最常见问题是安装成本高，且目前尚未形成关于其减阻机理的统一认识。

4　输气管道减阻技术的不足及挑战

4.1　内涂层技术

经过半个多世纪的实践应用，虽然内涂层技术在输气管道减阻中的工程应用较多，也取得了良好效果，但依然存在一定的不足及挑战。

适用管径范围有限。国外应用经验表明，内涂层技术通常适用于管径 > 500 mm 的管道。对于小管径输气管道，由于施工难度和成本的限制，内涂层技术的应用并不可行或经济。

使用寿命受限。内涂层的使用寿命受多种因素影响，快速泄压、清管作业及其他外力作用都可能导致涂层起泡或剥离，从而降低其减阻效果和使用寿命，例如大庆油田某单位现有 25.6 km 的管道施加了有机内涂层，但内涂层在 1 年内开始大面积脱落[64]。

需要一次性施工完成。内涂层通常在管道出厂前完成涂覆，并在现场完成管道连接。一旦内涂层因外力作用剥离或脱落，在现场很难实现再次涂覆，限制了其在实际应用中的灵活性。

不适用于旧管道。对于早期建成且未实施减阻措施的管道，内涂层技术难以应用。这是因为旧管道的内壁可能存在腐蚀或其他损伤，难以保证涂层的均匀性和附着力。

施工工艺复杂。内涂层施工需要严格控制涂覆过程中的温度、湿度和涂层厚度等参数，以确保涂层的质量和性能。这不仅增加了施工成本，对施工人员的技术水平也提出了较高要求。

4.2　减阻剂技术

目前国内外研究团队开发了多种减阻剂，进行了室内环道评价与现场试验，得到了多种可作为实际工业应用潜力的减阻剂。但是减阻剂减阻机理以及分子结构等方面还有许多技术难题尚未攻克，还没有真正意义上的减阻剂问世，目前仍存在不足和挑战。

减阻机理研究方面，当前减阻机理没有形成具有明确指导意义的理论框架和统一认识。现有研究常借鉴缓蚀剂理论，缺乏针对减阻剂自身特点建立的理论体系，难以全面阐释其在复杂实际工况中的作用机制。

分子结构设计方面，减阻剂性能的核心在于其分子构型。研究揭示，分子极性端的吸附能力至关重要，而非极性端的柔性则显著影响减阻效率。前者主要取决于原子电负性，关乎吸附强度与耐久性；后者则受柔性链的长度和数量调控，直接影响减阻效果。优化分子结构以提升性能仍是亟待深入研究的课题。

评价方法方面，受限于减阻剂研究的复杂性与前瞻性，现有评价体系存在不足。例如，环道测试多采用小口径直管，限制了结果的准确性与工况适用性。此外，当前测试方法的可靠性、普适性仍需加强验证与改进，以期更真实地反映减阻剂在实际应用中的性能表现。

现场应用方面，当前关于减阻剂的现场应用研究多为短周期、小规模试验，对其减阻率及有效作用距离缺乏深入探究。因此，有待进一步验证与评估减阻剂在大规模、长周期应用中的实际效果和稳定性。

4.3　非光滑表面减阻技术

非光滑表面减阻是主要的表面改性方法之一，学者们对其减阻机理也开展了广泛研究，但仍存在很多难题需要进一步解决。

减阻效果对工况敏感，适用范围受限。非光滑表面的减阻效果体现在特定条件下，当流动条件（如流速、流

向、流体性质）改变时，其减阻效果通常会减弱，甚至可能会出现增阻的情况。如何拓展非光滑表面的有效适应工况范围，或确保其在设计工况下保持稳定的减阻性能，仍是亟待解决的关键问题[55]。

表面结构脆弱，易受损伤与污染。非光滑表面结构的微观尺度使其减阻功能极易受物理损伤和环境污染的影响。以海洋船舶为例，船体表面微生物附着会显著削弱甚至完全破坏非光滑表面的减阻作用，并可能产生负面影响。开发集可监测性与智能化于一体的表面防护技术，需依赖多学科交叉理论与方法的突破，目前仍面临巨大挑战。

工程应用验证与大面积制备工艺不足。当前大部分试验与理论研究仍局限于实验室环境，亟需在真实复杂工况下深入研究减阻行为的影响机制，并揭示多物理场耦合作用下的流变与流动规律。目前关于三维打印技术还未能实现大面积制备微沟槽结构，而滚动热压方式的精度还需提高，这些研究对提升非光滑表面的运行可靠性和预测其全寿命周期服役性能至关重要。

5 结论和展望

“双碳”目标的提出给以天然气、氢气为主的清洁能源运输提出了更高要求。输气管道减阻增输技术一直是世界性难题，目前无论在理论还是技术上均无突破性进展。当前，输气管道减阻增输技术以内涂层技术与减阻剂技术为核心，辅以微沟槽及自适应表面等非光滑表面减阻技术，初步实现了降低摩阻、提升输送效率的目标。然而，内涂层技术受限于管径适用范围、施工复杂度及不可修复性；减阻剂技术因机理模糊、分子结构优化不足及现场验证缺乏，大规模应用受限；微沟槽减阻技术与自适应表面减阻技术虽展现潜力，但减阻机理尚未统一，实际工程效果仍需深入验证。此外，现有评价方法难以全面反映复杂工况下的减阻性能，长周期应用数据匮乏成为技术推广的主要瓶颈。

为突破现有技术局限，未来输气管道减阻增输研究建议聚焦以下关键方向：一是基础理论的突破，需跨学科深化减阻机理认知，构建可靠理论模型；二是开发新型高性能减阻材料，如兼具缓蚀功能的多效减阻剂或机械性能好、寿命长的无机涂层；三是完善动态评价体系，建立涵盖大口径管道、多工况的标准化测试平台；四是推动技术集成与智能化应用，例如结合数字孪生技术实现减阻效果的实时监测与调控。此外，通过企业创新平台加速产学研协同，促进技术向工程转化。随着高效、低碳的输气技术逐渐成为能源转型的重要支撑，减阻增输技术的突破将显著提升清洁能源的输送能力，助力“双碳”目标的实现。

参考文献：

[1] Zhang Xueyuan, Wang Fengping, He Yufang, et al. Study of the inhibition mechanism of imidazoline amide on CO_2 corrosion of Armco iron [J]. Corrosion Science, 2001, 43 (8): 1417-1431.

[2] 张其滨，范云鹏，林　竹，等. 天然气管道输送减阻剂研究[J]. 天然气技术，2008(1)：48-50.
Zhang Qibin, Fan Yunpeng, Lin Zhu, et al. Research on drag reduction agent for natural gas pipeline [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2008 (1): 48-50.

[3] 张其滨，范云鹏，林　竹，等. 天然气输送管道用减阻剂及制造方法：CN101074344B[P]. 2010-09-01.
Zhang Qibin, Fan Yunpeng, Lin Zhu, et al. Drag reduction agent for natural gas pipeline and its manufacturing method: CN101074344B [P]. 2010-09-01.

[4] Reidy L, Anderson G. Drag reduction for external and internal boundary layers using riblets and polymers [C]// 26th Aerospace Sciences Meeting, January 11-14, 1988, Reno, NV, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988: 138.

[5] Kramer M O. Boundary-layer stabilization by distributed damping [J]. Journal of the Aerospace Sciences, 1960, 27 (1): 69.

[6] 刘广文，钱成文，于树清，等. 天然气管道内涂层减阻技术[M]. 北京：石油工业出版社，2001：13-15.
Liu Guangwen, Qian Chengwen, Yu Shuqing, et al. Drag reduction technology of internal coating for natural gas pipeline [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 13-15.

[7] 博布罗夫斯基. 天然气管路输送[M]. 北京：石油工业出版社，1985：182-191.
Bobrovski C A. Pipeline transportation of natural gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985: 182-191.

[8] 李　宁. 天然气管道内涂层的应用[J]. 化工生产与技术，2021，27(2)：31-34.
Li Ning. Application research on inner coating of natural gas pipeline [J]. Chemical Production and Technology, 2021, 27 (2): 31-34.

[9] 乔军平，张　涛，李生军. 钢质管道液态环氧内涂层成型过程常见缺陷分析[J]. 焊管，2009，32(1)：48-52.
Qiao Junping, Zhang Tao, Li Shengjun. Analysis familiar flaw on resistance-reducing internal coating with liquid epoxy formed process for steel piping [J]. Welded Pipe and Tube, 2009, 32 (1): 48-52.

[10] 崔　超. 天然气管道内涂层评价问题探讨[J]. 涂装与电镀，2008(4)：23-25.
Cui Chao. On the evaluation of the gas pipe line undercoat

[J]. Painting and Electroplating, 2008 (4): 23-25.

[11] 胡士信,董　旭,窦宏强. 西气东输干线管道减阻内涂技术[J]. 材料保护,2001,34(10):1-4.
Hu Shixin, Dong Xu, Dou Hongqiang. Friction-reducmg internal coating technology for the west-east gas transmission pipeline [J]. Journal of Materials Protection, 2001, 34 (10): 1-4.

[12] Smith R V, Miller J S, Ferguson J W. Flow of natural gas through experimental pipe lines and transmission lines [J]. Field Crops Research, 1956, 48 (2-3): 209-222.

[13] 尹晓云,敖加强,范峥嵘,等. 天然气管输减阻剂研究进展[C]//2018 年全国天然气学术年会,2018:229-248.
Yin Xiaoyun, Jing Jiaqiang, Fan Zhengrong, et al. Advance on drag reduction agents for natural gas pipeline [C]//2018 National Natural Gas Academic Annual Meeting, 2018: 229-248.

[14] Lowther F E. Drag reduction method for gas pipelines: US4958653A [P]. 1990-09-25.

[15] Li Y H, Chesnut G R, Richmond R D, et al. Laboratory tests and field implementation of gas-drag-reduction chemicals [J]. SPE Production & Facilities, 1998, 13 (1): 53-58.

[16] Chen H J, Kouba G E, Fouchi M S, et al. Field application of a drag reducing agent to increase gas production [C]//the Corrosion 2000, March 26-31, 2000, Orlando, Florida, USA. Houston: NACE, 2000.

[17] Naess R. Pressure loss in gas pipe with adsorbed layers [R]. Trondheim: Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics of NTNU, 1999: 73-79.

[18] Naess R. Drag reduction agents for natural gas flow in pipelines [R]. Trondheim: Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics of NTNU, 1999: 131-136.

[19] Li Guomin. Inhibition of CO_2 corrosion of carbon steel by rosin amide [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2003, 50 (6): 410-413.

[20] 陶亮亮,胡　瑞,马　雄,等. 油气管输中减阻剂的应用现状及发展趋势[J]. 石油化工应用,2011,30(4):8-12.
Tao Liangliang, Hu Rui, Ma Xiong, et al. Application and development trends of the DRA in oil and gas pipelines [J]. Petrochemical Industry Application, 2011, 30 (4): 8-12.

[21] 王　琴,李　昂,谢　萍,等. 天然气减阻剂开发应用现状及研究展望[J]. 油气田地面工程,2018,37(10):6-9.
Wang Qin, Li Ang, Xie Ping, et al. Development and application status and research prospects of natural gas drag reduction agents [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37 (10): 6-9.

[22] 鲍旭晨,张金岭,张秀杰,等. BIB 天然气减阻剂研制与应用[J]. 油气储运,2010,29(2):113-117.
Bao Xuchen, Zhang Jinling, Zhang Xiujie, et al. Synthesis and application of BIB natural gas DRA [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29 (2): 113-117.

[23] 张　雷. 天然气减阻剂的研制及减阻性能测试[D]. 济南:山东大学,2009.
Zhang Lei. The development of natural gas DRAs and drag reduction performance test [D]. Jinan: Shandong University, 2009.

[24] 邢文国. 天然气减阻剂的研制及其减阻性能的研究[D]. 济南:山东大学,2010.
Xing Wenguo. Development of natural gas DRAs and studying on the drag reduction performance [D]. Jinan: Shandong University, 2010.

[25] 叶天旭,王铭浩,曹　云,等. 基于十八醇磷酸酯单乙醇铵盐的天然气减阻剂室内评价[J]. 天然气工业,2010,30(11):92-96.
Ye Tianxu, Wang Minghao, Cao Yun, et al. Laboratory evaluation of a natural gas drag reduction agent(DRA) based on octadecanol phosphate ester monoetha-nolammonium [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (11): 92-96.

[26] 曹　云. 天然气减阻剂室内性能评价及现场应用试验[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2011.
Cao Yun. Indoor property evaluation and field application test of natural gas drag reduction agent [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2011.

[27] 张　梦. 天然气减阻剂的开发及其减阻性能评价[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2011.
Zhang Meng. Development and evaluation of drag reduction agents for natural gas pipeline [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2011.

[28] 李鑫源,卢　旺,朱　琰,等. 1,3,5-苯三甲酸三-十二酰胺在天然气管道中的减阻与缓蚀性能[J]. 油田化学,2023,40(1):123-128..
Li Xinyuan, Lu Wang, Zhu Yan, et al. Drag reduction and corrosion inhibition performance of 1, 3, 5-benzenetricarboxylic acid tridodecanamide in natural gas pipeline [J]. Oilfield Chemistry, 2023, 40 (1): 123-128.

[29] 赵　巍,赵德银,李世瀚,等. 三嗪型天然气管道缓蚀型减阻剂合成与应用[J]. 化工进展,2023,42(增刊1):391-399.
Zhao Wei, Zhao Deyin, Li Shihan, et al. Synthesis and application of triazine drag reducing agent for nature gas pipeline [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42 (S1): 391-399.

[30] 韩学圣,赵嘉烽,田大园,等. 1,4-苯二甲酸二十二酰胺的

研制及性能评价[J]. 山东化工,2024,53(11):50-53.
Han Xuesheng, Zhao Jiafeng, Tian Dayuan, et al. Development and performance evaluation of natural gas drag reducer [J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53 (11): 50-53.

[31] Li Feng, Yao Bo, Li Chuanxian, et al. Synthesis and performance evaluation of multialkylated aromatic amide oligomeric surfactants as corrosion inhibitor /drag reducing agents for natural gas pipeline [J]. ACS Omega, 2024, 9 (43): 43977-43985.

[32] 王铭浩. 天然气管输减阻剂的开发与评价[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2010.
Wang Minghao. Development and evaluation of drag reducing agents for natural gas pipeline [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2010.

[33] 张金岭,张秀杰,鲍旭晨,等. 天然气减阻剂及其减阻机理的研究进展[J]. 油气储运,2010,29(7):481-486.
Zhang Jinling, Zhang Xiujie, Bao Xuchen, et al. Research progress in natural gas DRA and its drag reduction mechanism [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29 (7): 481-486.

[34] Najman M N, Kasrai M, Bancroft G M, et al. Study of the chemistry of films generated from phosphate ester additives on 52100 steel using X-ray absorption spectroscopy [J]. Tribology letters, 2002, 13 (3): 209-218.

[35] 刘 兵,崔 涛,李国平,等. 油气管道减阻增输与高聚物应用[J]. 油气储运,2007,26(10):7-14.
Liu Bing, Cui Tao, Li Guoping, et al. Drag reduction and throughput increase of oil /gas pipeline and the application of high polymer [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26 (10): 7-14.

[36] Olivares-Xometl O, Likhanova N, Domínguez-Aguilar M, et al. Surface analysis of inhibitor films formed by imidazolines and amides on mild steel in an acidic environment [J]. Applied Surface Science, 2006, 252 (6): 2139-2152.

[37] 徐吉展,王 娜,刘 丽,等. 天然气减阻剂减阻机理探讨[J]. 应用化工,2012,41(8):1417-1421.
Xu Jizhan, Wang Na, Liu Li, et al. Discussion on mechanism of drag reduction of natural gas drag reduction agent [J]. Applied Chemical Industry, 2012, 41 (8): 1417-1421.

[38] Khadom A A, Abdul-Hadi A A. Performance of polyacrylamide as drag reduction polymer of crude petroleum flow [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2014, 5 (3): 861-865.

[39] 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.

[40] 孟 强,范锦锋,艾生军,等. 新型高效减阻剂研究及应用[J]. 钻采工艺,2020,43(4):97-100.
Meng Qiang, Fan Jinfeng, Ai Shengjun, et al. Research and application of a new type of effective drag reducer for shale gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43 (4): 97-100.

[41] 吴 琼,曹红燕,黄 敏,等. 新型低伤害清洁减阻水压裂液体系研究及应用[J]. 钻采工艺,2019,42(6):94-97.
Wu Qiong, Cao Hongyan, Huang Min, et al. Research and application of a low-damage environmental friction-reducing fracturing fluid system [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42 (6): 94-97.

[42] Bechert D W, Bartenwerfer M, Hoppe G. Drag reduction mechanisms derived from shark skin [C]//The 15th International Council of the Aeronautical Sciences Congress, September 7-12, 1986, London, England. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986, 2: 1044-1068.

[43] Bacher E, Smith C. A combined visualization anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications [C]//Shear Flow Control Conference, March 12-14, 1985, Boulder, CO, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985: 548.

[44] Bechert D W, Bruse M, Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin [J]. Experiments in Fluids, 2000, 28 (5): 403-412.

[45] Walsh M J, Lindemann A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction [C]//22nd Aerospace Sciences Meeting, January 9-12, 1984, Reno, Nevada, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984: 347.

[46] Walsh M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets [C]//20th Aerospace Sciences Meeting, January 11-14, 1982, Orlando, Florida, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1982: 169.

[47] Walsh M J. Riblets as a viscous drag reduction technique [J]. AIAA Journal, 1983, 21 (4): 485-486.

[48] Walsh M J. Effect of detailed surface geometry on riblet drag reduction performance [J]. Journal of Aircraft, 1990, 27 (6): 572-573.

[49] Walsh M J, Weinstern L M. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins [C]//11th Fluid and Plasma Dynamics Conference, July 10-12, 1978, Seattle, Washington, USA. Reston: American Institute of

Aeronautics and Astronautics, 1978: 1161.

[50] 丛　茜,封　云,任露泉. 仿生非光滑沟槽形状对减阻效果的影响[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2006,21(2):232-238.
Cong Qian, Feng Yun, Ren Luquan. Affecting of riblets shape of nonsmooth surface on drag reduction [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21 (2): 232-238.

[51] 李贝贝,胡旭月,沈小雄,等. 一种应用于管道上的微沟槽及具有该结构的管道: CN201620336248. X [P]. 2016-09-21.
Li Beibei, Hu Xuyue, Shen Xiaoxiong, et al. Micro groove applied to pipeline and pipeline with the structure: CN201620336248. X [P]. 2016-09-21.

[52] Bechert D W, Bruse M, Hage W, et al. Biological surfaces and their technological application: Laboratory and flight experiments on drag reduction and separation control [C]// 28th Fluid Dynamics Conference, June 29-July 02, 1997, Snowmass Village, CO, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.

[53] 李炳炘,张　浩,玄克勇,等. 微沟槽减阻技术研究现状与进展综述[J]. 煤气与热力,2023,43(12):21-27.
Li Bingxi, Zhang Hao, Xuan Keyong, et al. Review on research status and progress of micro-groove drag reduction technology [J]. Gas & Heat, 2023, 43 (12): 21-27.

[54] Carpenter P W. Status of transition delay using compliant walls [M]//Bushnell D M, Hefner J N. Viscous drag reduction in boundary layers. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1990: 79-113.

[55] 秦立果,龚朝永,孙红江,等. 非光滑表面减阻研究进展[J]. 表面技术,2022,51(8):107-122.
Qin Liguo, Gong Chaoyong, Sun Hongjiang, et al. Review of research on drag reduction of non-smooth surface [J]. Surface Technology, 2022, 51 (8): 107-122.

[56] Carpenter P W, Garrad A D. The hydrodynamic stability of flow over Kramer-type compliant surfaces. Part 1. Tollmien-Schlichting instabilities [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 155: 465-510.

[57] Bushnell D M, Hefner J N, Ash R L. Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers [J]. The Physics of Fluids, 1977, 20 (10): S31-S48.

[58] Carpenter P W, Morris P J. The effect of anisotropic wall compliance on boundary-layer stability and transition [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 218: 171-223.

[59] Yeo K S. The stability of boundary-layer flow over single-and multi-layer viscoelastic walls [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 196: 359-408.

[60] Gad-el-hak M, Blackwelder R F, Riley J J. On the interaction of compliant coatings with boundary-layer flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 140: 257-280.

[61] 刘明杰,吴青山,严　昊,等. 仿生减阻表面的进展与挑战[J]. 北京航空航天大学学报,2022,48(9):1782-1790.
Liu Mingjie, Wu Qingshan, Yan Hao, et al. Progress and challenges of bionic drag reduction surfaces [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48 (9): 1782-1790.

[62] Tsigklifis K, Lucey A D. The interaction of Blasius boundary-layer flow with a compliant panel: Global, local and transient analyses [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 827: 155-193.

[63] Nagy P T, Szabó A, Paál G. The effect of spanwise and streamwise elastic coating on the boundary layer transition [J]. Journal of Fluids and Structures, 2022, 110: 103521.

[64] 汪　岩. 无溶剂减阻管道内涂层的制备与应用效果评价[J]. 石油石化节能与计量,2025,15(6):58-62.
Wang Yan. Evaluation of preparation and application effect of inner coating for solvent-free resistance-reducing pipe [J]. Energy Conservation and Measurement in Petroleum & Petrochemical Industry, 2025, 15 (6): 58-62.