

文章编号: 1672-9897(2010)06-0006-06

纳米颗粒在储层微流道中的减阻机理实验研究

顾春元^{1,2}, 狄勤丰^{1,2}, 施利毅³, 王新亮^{1,2}, 张任良^{1,2}

(1. 上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072; 2. 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海 200072; 3. 上海大学纳米科学与技术研究中心, 上海 200072)

摘要:用 SNP1-1、SNP2-2 和 SNP2-4 三种疏水纳米材料分别与柴油配制成 3 种油基纳米液, 用 SNP2-2 分别与 ND3 和 ND4 配制成 2 种水基纳米液, 通过岩心流动实验测试了这 5 种纳米液的减阻效果。实验结果显示, 3 种油基纳米液使岩心水相渗透率提高了 42%、49% 和 24%, 2 种水基纳米液分别使岩心水相渗透率提高了 17.5% 和 75%, 5 种纳米液都具有减阻效果, 但不同纳米液的效果差异明显, 这说明增注液不具有唯一性, 但纳米粒径、修饰剂和分散剂对减阻效果有明显的影响。测试了 SNP2-2 油基纳米液处理岩心的耐冲刷能力, 岩心经 180 倍孔隙体积(PV)水的驱替, 仍具有一定的效果, 说明纳米边界层流道壁面有较强的吸附能力。现场采用 SNP2-2 和 ND4 配制的纳米液进行了三口井的增注试验, 注水压力最大降幅 12.5MPa。研究结果与实验前的设想相符, 较好地说明了纳米减阻机理。

关键词:疏水纳米材料; 减阻机理; 吸附; 耐冲刷能力; 岩心流动实验

中图分类号: O357.3 **文献标识码:** A

Experiments on the drag-reduction mechanism of hydrophobic nanomaterial in reservoir microchannel

GU Chun-yuan^{1,2}, DI Qin-feng^{1,2}, SHI Li-yi³, WANG Xin-liang^{1,2}, ZHANG Ren-liang^{1,2}

(1. Shanghai University, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy and Environment Engineering, Shanghai 200072, China; 3. Research Center of Nano Science and Nano Technology, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Three oil-based nanomaterial fluids (NFs) were made up of three various hydrophobic nanomaterials SNP1-1, SNP2-2, SNP2-4 (SNP1-1 and SNP2-2 are same size of nanomaterials modified by two different modifiers. SNP2-2, SNP2-4 are different sizes of nanomaterials modified by same modifier) respectively and diesel oil, and two water-based nanomaterial fluids (NFs) were made up of SNP2-2 and two water-based dispersions ND3, ND4 respectively, the drag reduction effects of these five NFs were tested in core microchannel by core displacement experiments (CDEs). The results show that, water-phase permeabilities of cores (WPPC) treated by three oil-based NFs were increased by 42 percent, 49 percent, and 24 percent respectively. WPPC treated by two water-based NFs were increased by 17.5 percent and 75 percent respectively. In other words, five NFs all have drag reduction effects but significant difference of different NFs. It indicates NFs for enhancing water injection are not unique but multiple, and although drag reduction effects are influenced by nanoparticle size, surface modifier and nanomaterial dispersion. The experiment of wash-resistant ability of the cores treated by NFs of SNP2-2 dispersed in diesel oil were tested by CDEs. Its results show that the cores still have certain effect after they were washed by flooding water about 180 times core pore volume (PV), it indicates the adsorption capacity of boundary layer of hydrophobic nanomaterial SNP2-2 on porous wall is strong. Field trials of three injection wells with NFs made up of SNP2-2 and ND4 were done, the largest decrease of injection pressure come up to 12.5MPa. The results are in agreement with the prediction views before experiment and to better verify the drag-reducing mechanism.

收稿日期: 2009-12-10; 修订日期: 2010-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(50874071); 国家 863 计划项目(2008AA06Z201); 中国博士后科学基金(20090450687); 上海市重点学科建设项目(J50102); 上海市委重点科技攻关项目(071605102)

Key words: hydrophobic nanomaterial; drag-reduction mechanism; adsorption; wash-resistant ability; core displacement experiment

0 引言

高压欠注问题是低渗透油田注水开发过程中普遍存在的一个难题,纳米减阻技术是针对这个难题开发的一项多学科交叉新技术。2000年,中国从俄罗斯引进该技术进行现场试验取得成功^[1],随后多家单位开展了相关研究工作,主要包括增注纳米材料的制备与表征、水基分散液的研制、室内减阻效果测试、数值模拟研究和减阻机理研究^[2-6]。但对于纳米减阻机理的研究较少,且存在不同的观点^[7-9]。由于注入纳米液后,纳米颗粒吸附层一方面使孔道表面由亲水变为疏水,另一方面又使物理孔径缩小,而最终要达到减阻的目的,必然存在特殊作用使流速大幅提高。2002年,Derek C等认识到表面具有微纳米结构和疏水性的综合作用更容易引起水流速度滑移,且比光滑疏水表面产生的滑移长度更大^[10-12],国内学者也相继开展了亲、疏水表面微管道的微流动实验,研究了表面的疏水性和粗糙度对于水流减阻效果和速度滑移效应的影响^[13-15]。狄勤丰研究组基于微纳米结构表面的水流滑移这一观点,提出了纳米边界层的水流滑移减阻机理^[9,16]。研究组已经从竞争吸附机制、吸附层的检测、超疏水特性实验研究等方面给出了结果^[17-18]。这一机理合理地阐释了纳米材料的特殊作用,物理边界减少而减阻效果显著的根源,得到多数专家的认同。根据这个减阻机理,减阻效果的关键是形成纳米吸附层和表面具有强疏水特性。这意味着,满足与孔壁的吸附和具有强疏水性的纳米材料都可能具有减阻效果,即有效地增注纳米材料不具有唯一性,但是改变纳米颗粒粒径、表面疏水修饰剂等影响吸附和疏水性的因素又必然会使效果产生差异。笔者用不同材料配制的多种增注液开展了减阻效果实验,并根据实验结果来说明纳米材料非唯一性的观点,进而阐释对水流滑移减阻机理。

1 实验方案

1.1 目的与内容

(1) 不同修饰剂改性的纳米材料的减阻效果

根据机理,满足可与孔壁产生强吸附、具有强疏水性的纳米材料都具有明显的减阻效果。因此,该实验采用2种表面修饰剂改性 SiO_2 得到纳米粉体SNP1-1和SNP2-2,将其配制成2种油基纳米液,并测试纳米液的分散性能和减阻效果。

(2) 不同粒径对减阻效果的影响

不同粒径的纳米颗粒通过岩心微孔道的能力不同,与孔壁吸附的能力也不同,因此,减阻效果会有明显差异。采用修饰剂B改性的2种不同粒径的纳米 SiO_2 ,得到疏水纳米材料SNP2-2和SNP2-4,分别用柴油配制成2种油基纳米液,测试减阻效果。

(3) 不同水基分散剂配制的纳米水液的减阻效果

根据机理,不改变纳米材料的特性、能很好地分散并携带其到达地层孔道中的分散剂均可以作为水基载体。实验配制了2种水基分散液ND3和ND4,分别与SNP2-2配制成2种水基纳米液,测试这2种水基纳米液的减阻效果。

(4) 纳米吸附层耐冲刷能力测试

纳米颗粒必须与岩心孔壁产生牢固吸附才能形成超强疏水的纳米吸附层。该实验通过向纳米液处理后的岩心不间断注水,测试水流量-压力关系,判断纳米颗粒的有效吸附能力。

1.2 实验装置及原理

主要实验仪器有隔热式高温高压岩心流动实验仪、变频高速搅拌机及配套设备若干。岩心流动实验仪包括高精度ISCO驱替泵、3~4个中间容器、岩心夹持器、电子天平、环压泵、恒温加热箱、隔热箱、4级压力传感器、高压氮气瓶、数据采集与分析软件,以及配套连接线路和管路,见图1。其中驱替泵为ISCO100DX,流量精度为 $0.01\mu\text{L}/\text{min}$,天平为OHAUS-EXPLORER,精度0.001g。

工作原理是:通过环压泵加压将圆柱状岩心四周包裹,开启驱替泵将中间容器中的液体(水、柴油、纳米液等)分别驱替进入岩心夹持器内的岩心,由多级压力传感器来记录岩心进口段的压力,液体从岩心出口端流出后,进入天平进行称量,并由数据采集与分析软件采集,同时可绘制压力、流量随时间的变化曲线。

实验所用材料见表1。

表1 纳米减阻流动实验材料
Table 1 Materials of drag-reduction experiments of NFs

序号	材料	型号	规格	备注
1	岩心	天然	$\varnothing 25 \times (50 \sim 100) \text{mm}$	洗油
2	纳米注剂1号	SNP1-1	15 nm	表面修饰剂A
3	纳米注剂2号	SNP2-2	15 nm	表面修饰剂B
4	纳米注剂3号	SNP2-4	40 nm	表面修饰剂B
5	油基分散剂	柴油		硅胶过滤
6	水基分散剂1号	ND3		
7	水基分散剂2号	ND4		
8	驱替液	NH_4Cl 溶液	0~3%	

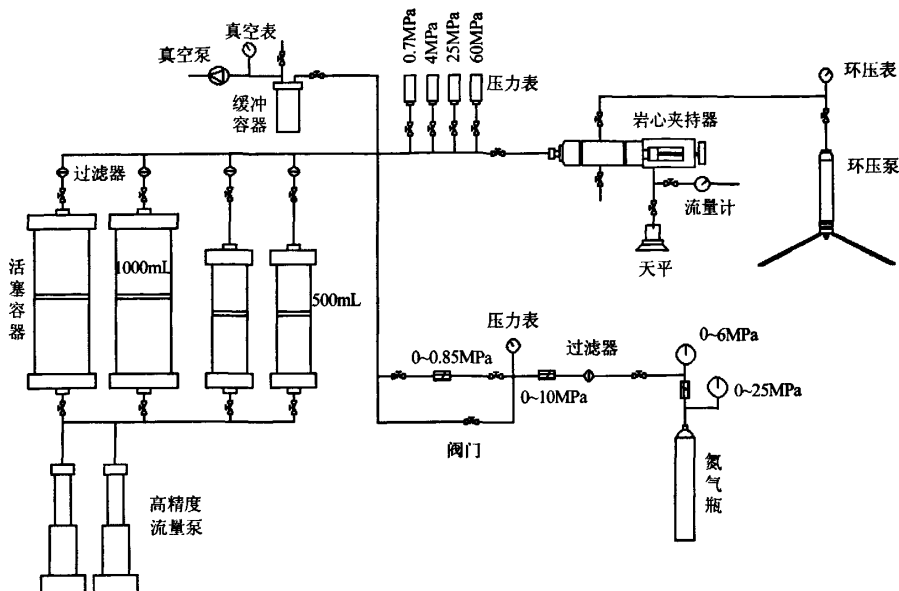


图1 隔热式高温高压岩心流动实验仪
Fig. 1 Thermal insulation HTHP core testing apparatus

1.3 实验方法

采用石油行业评价驱替剂效果的主要模拟手段——岩心流动实验法,结合纳米减阻的实际过程,增加了纳米增注液驱替和静置吸附两个步骤,模拟了纳米降压增注现场试验全过程。

岩心中的流动属于微尺度流动,采用高精度微量泵和天平配合测试流量,通过测量纳米液驱替前后水流量与驱替压力,计算水相渗透率,以水相渗透率的变化来表征减阻效果。主要步骤如下:

(1) 将洗过油的岩心地层水饱和,装入岩心流动实验仪,调整围压和温度,开泵将水驱入岩心,测试水流量和压力,计算岩心初始单相水的渗透率;

(2) 调节流程,用柴油驱替岩心,形成束缚水;再用水驱油,建立残余油;

(3) 继续用水驱替,测试一组水流量和压力,计算纳米处理前的水相渗透率;

(4) 在低流量下注入预定浓度和体积(1.5~5PV)的纳米液,然后关井,恒温静置24~48h;

(5) 开启流程,用水低速驱替,直至驱出流体中无纳米液后,再继续水驱,并测试一组水流量和压力,计算纳米处理后的水相渗透率。

1.4 数据处理方法

由于单点测试稳定时间较长,但不能反应不同压力下的物性变化趋势。该测试均采用多点法测试流量—压力,用回归分析法找出流量与对应压力之间的关

系。该方法不仅可以得到岩心渗透率,对于低渗透岩心,还能得到启动压力,理论上基于扩展的达西定律:

$$Q = -\frac{kA_{rk}}{\mu}(\nabla p - \nabla p_0) = -\frac{kA_{rk}}{\mu}\left(\frac{\Delta p}{L_{rk}} - \frac{\Delta p_0}{L_{rk}}\right) \quad (1)$$

式中, ∇p_0 为启动压力梯度(Pa/m); Δp_0 为启动压力(Pa); A_{rk} 为岩心横截面积(m²); L_{rk} 为岩心长度(m)。

对于存在启动压力的低渗透岩心,选择不同的测试流量,会得到不同的渗透率,采用回归分析法可以克服这一缺点。

将实测压力转化成压力梯度,绘制出 Q 与 $-\nabla p$ 的关系,通过数据回归,得到公式:

$$-\nabla p = b_k Q + b_c \quad (2)$$

式中, b_k 为斜率(Pa·s/m⁴); b_c 为纵坐标轴上的截距(Pa/m)。

根据公式(1)和(2),可得

$$k = \frac{\mu}{b_k A_{rk}} \quad (3)$$

$$-\nabla p_0 = b_c \quad (4)$$

由水流量—压力的直线关系,求得 b_k 和 b_c ,进而求得渗透率 k 和 $-\nabla p_0$ 。

2 纳米液减阻实验结果

2.1 纳米油基分散液的减阻性能

将 SNP1-1、SNP2-2 和 SNP2-4 三种纳米粉体分

别分散在柴油中,用高速搅拌机分散 10~15min,配制成 1.5g/L 的纳米液。

将 3 种纳米液在常温下放置,观察发现,SNP1-1 液在 15min 左右开始出现沉降物,30min 杯底有少许沉淀;而 SNP2-2 和 SNP2-4 悬浮液比较稳定,30min 未见沉降物。说明修饰剂 B 改性的纳米样品在柴油中的稳定性较好。

通过岩心流动实验测试了以上 3 种油基纳米液的减阻效果,实验结果见表 2。

表 2 三种纳米材料油基纳米液的减阻实验结果
Table 2 The results of drag reduction experiment of three oil-based NFs

实验号	纳米注剂	水相渗透率 $k_w/\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		渗透率比 k_{wh}/k_{wq}
		驱替前 k_{wq}	驱替后 k_{wh}	
1	SNP1-1	5.62	8.65	1.54
2	SNP1-1	9.16	12.98	1.42
3	SNP1-1	5.07	6.61	1.30
平均		6.62	9.41	1.42
4	SNP2-2	17.44	32.56	1.87
5	SNP2-2	7.64	12.48	1.63
6	SNP2-2	1.13	1.44	1.27
平均		8.74	15.49	1.59
7	SNP2-4	0.79	1.14	1.44
8	SNP2-4	0.54	0.61	1.11
9	SNP2-4	0.85	1.00	1.17
平均		0.73	0.92	1.24

由表 2 的数据结果可知:

(1) 纳米 SNP1-1、SNP2-2 和 SNP2-4 配制的油基纳米液处理后的岩样,渗透率平均增幅为 42%、59%和 24%,这说明三种纳米材料均具有明显的减阻效果;

(2) 修饰剂 A 改性的 SNP1-1 和修饰剂 B 改性的 SNP2-2 相比,减阻效果相差 17%,且 SNP2-2 的稳定性更好;

(3) 大粒径的 SNP2-4 和 SNP2-2 相比,平均减阻效果相差 35%,且小粒径 SNP2-2 处理的 3 块岩心,减阻效果均比较好;

(4) 图 2 是 5 号样的流量-压力梯度关系趋势线。流量与压力梯度呈直线关系,满足达西渗流规律。纳米液驱替后,流量-压力梯度关系趋势线明显偏离压力梯度轴,说明流量越大,驱动压力梯度降幅越大。根据回归曲线和公式(2)~(4),纳米液处理前水相渗透率为 $7.64\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,启动压力梯度为 0.21MPa/m,纳米液处理后的水相渗透率为 $12.48\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,启动压力梯度为 0.54MPa/m,这表明纳米液驱替后的 5 号岩心启动压力梯度有所降低。由于纳米颗粒吸附层取代水化层,成为强疏水的边界层,大幅降低了孔道

的水流阻力,也使得水流的启动压力有所降低。

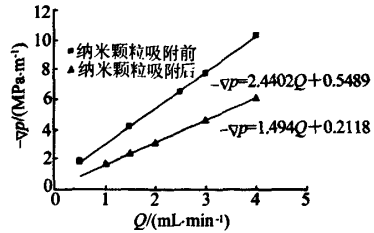


图 2 5 号样流量与压力梯度的关系曲线
Fig. 2 Relationship between pressure gradient and flux of sample 5

2.2 纳米 SNP2-2 水基纳米液的减阻实验结果

研究并复配了两种水基分散剂 ND3 和 ND4。这两种分散剂的乳化液和纳米分散液色泽均一,分散性都较好,常温下稳定时间大于 24h。采用 SNP2-2 分别与这两种水基分散剂配制成浓度为 1.5g/L 的水基纳米液,驱替用液为清水或 3%NH₄Cl 水溶液。实验方法同上,结果见表 3。

(1) 10~14 号用 ND3 为分散剂,水相渗透率提高幅度平均为 67.4%;其中 3%NH₄Cl 水溶液测试的岩心水相渗透率提高幅度平均为 100.7%,而清水测试的水相渗透率提高幅度平均为 17.5%。这说明岩心水敏性较强,纳米处理后,仍存在水敏,也说明纳米颗粒在孔壁的吸附是非均匀全覆盖。

(2) 15~17 号用 ND4 为分散剂,清水测试水相渗透率提高幅度为 23%~127%,平均为 75%。

(3) 排除驱替液和岩心物性的影响,在清水驱替和岩心水相渗透率相近的条件下,ND3 分散的纳米水液(13~14 号)仅使水相渗透率提高 17.5%,而 ND4 使岩样的水相渗透率提高了 75%,说明 ND4 具有一定的抗水敏作用。

以上分析说明,ND3 和 ND4 作为分散剂配制的纳米液都具有较好的减阻效果;但是,ND4 效果更好,尤其更适用于注清水的注水井。

表 3 两种纳米水液减阻实验结果
Table 3 The results of drag-reduction experiment of two water-based NFs

实验号	水基分散剂	纳米试剂	水相渗透率 $k_w/\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		渗透率比 k_{wh}/k_{wq}	备注
			驱替前 k_{wq}	驱替后 k_{wh}		
10	ND3	SNP2-2	20.76	43.57	2.10	3%NH ₄ Cl
11	ND3	SNP2-2	17.93	28.97	1.62	3%NH ₄ Cl
12	ND3	SNP2-2	1.58	3.64	2.30	3%NH ₄ Cl
13	ND3	SNP2-2	1.49	1.78	1.19	清水驱
14	ND3	SNP2-2	1.57	1.82	1.16	清水驱
15	ND4	SNP2-2	0.66	1.51	2.27	清水驱
16	ND4	SNP2-2	0.65	1.15	1.75	清水驱
17	ND4	SNP2-2	0.86	1.06	1.23	清水驱

3 纳米吸附耐冲刷能力评价实验

纳米颗粒与孔壁的结合强度关系到减阻时性。当纳米颗粒被注入水从孔壁剥离时,减阻效果会不断下降。实验采用不间断注水的方法来评价纳米颗粒吸附层的耐冲刷能力。用 SNP2-2 分散液处理岩心,实验方法同上文,但是步骤(5)要求保持流量不变,且连续注水,直到水相渗透率下降到纳米液处理前的值,或者注水量达到 200PV 以上(相当于单井 1 年的注水量)。图 3 和 4 是 Zhu4-2 和 An9-4-10 2 块岩心耐冲刷实验结果。

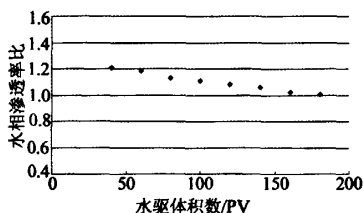


图 3 纳米颗粒在岩样 Zhu4-2 孔道中的耐冲刷性能
Fig. 3 Wash-resistant ability of nanomaterial in core Zhu4-2 microchannel

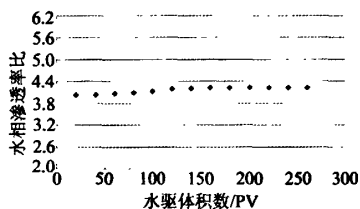


图 4 纳米颗粒在岩样 An9-4-10 孔道中的耐冲刷性能
Fig. 4 Wash-resistant ability of nanomaterial in core An9-4-10 microchannel

图 3 显示,随水驱体积的增加,水相渗透率缓慢下降,累计注入 180PV 时,渗透率下降到纳米液处理前的值;图 4 显示,随水驱体积的增加,水相渗透率起初还略有上升,累计注入 260PV,水相渗透率也几乎未变。测试结果说明在岩心微孔道孔壁吸附的纳米层耐冲刷能力较强。

现场根据相关试验工艺优选参数,采用纳米材料 SNP2-2 和水基分散剂 ND4 配制了纳米增注液,在天 83-9 和沙 26-9 井进行了纳米减阻试验,注水压力 $P_{注}$ 最大降幅达 12.5MPa,减阻有效期在 7 个月以上。

4 结论与讨论

(1) 经实验配制的 3 种油基纳米液和 2 种水基纳米液处理后,岩心水相渗透率均明显上升,均具有较好的减阻效果。说明纳米增注液不具有唯一性,能与岩心发生牢固吸附并改变其润湿性的疏水纳米材料均有作为纳米增注剂的可能;

(2) 2 种修饰剂改性的纳米材料相比,2 种粒径的纳米材料相比,水基分散剂 ND3 和 ND4 相比,产生的减阻效果均有一定的差异,这说明修饰剂、颗粒粒径和分散液对减阻效果有明显影响,原因是这些因素会影响纳米材料与岩心的吸附以及吸附层的疏水性。因此,要达到最佳的减阻效果,需要优选参数,使纳米液与岩心物性相匹配;

(3) 纳米液处理过的岩心经足够量的水驱替洗刷后,仍具有减阻效果,表明纳米吸附层具有较强的耐冲刷性能,纳米颗粒与孔壁吸附比较牢固;

(4) 矿场试验结果表明,纳米增注液可使注水压力最大下降 12.5MPa。

综合分析,通过注入具有强吸附和强疏水性的纳米材料,虽然使地层物理孔径缩小,但也使孔道表面具有超强疏水性,从而使水流产生较大的速度滑移,最终达到了减阻的目的。

参考文献:

- [1] 苏咸涛,闫军,吕广忠,等. 纳米聚硅材料在油田开发中的应用[J]. 石油钻采工艺,2002,24(3): 48-51.
- [2] JU Binshan, DAI SNPgao, LUAN Zhian, et al. A study of wettability and permeability change caused by adsorption of nanometer structured polysilicon on the surface of porous media[J]. SPE 77938, 2002: 1-12.
- [3] 高瑞民. 活性 SiO_2 纳米粉体改善油田注水技术研究[J]. 油田化学, 2004, (3): 248-250.
- [4] 陆先亮,吕广忠,栾志安,等. 纳米聚硅材料在低渗透油田中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 110-112.
- [5] GU Chunyuan, DI Qinfeng, FANG Haiping, et al. Slip velocity model of porous walls absorbed by hydrophobic nanoparticles SiO_2 [J]. Journal of Hydrodynamics SB, 2007, 19(3): 365-371.
- [6] 曹智,张治军,赵永峰,等. 低渗透油田增注用 SiO_2 纳米微粒的制备和表征[J]. 化学研究, 2005, 16(1): 32-34.
- [7] 易华,孙洪海. 聚硅纳米材料在油藏注水井中降压增注机理研究[J]. 哈尔滨师范大学学报, 2005, 21(6): 66-69.
- [8] 贺承祖,华明琪. 油气藏中水膜的厚度[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 75-77.
- [9] 狄勤丰,顾春元,施利毅,等. 疏水性纳米 SiO_2 增注剂的降压作用机理[J]. 钻采工艺, 2007, 30(4): 91-93.
- [10] DEREK C T, CARL D M. Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls[J]. Physics of fluids, 2002, 14: 9-12.
- [11] CÉCILE cottin-bizonne, JEAN-louis barrat, Lydéric bocquet. low-friction flows of liquid at nanopatterned interfaces [J]. Nature Material Letters, 2003, 2: 237-240.

(下转第 15 页)

建议实桥斜拉索的结构阻尼应不低于 0.6%;

(3) 螺旋肋条和表面压花两种气动措施对斜拉索的雨振均有良好的减振或抑制效果。应用于实际工程时,应综合考虑其他因素(包括风荷载),选择合适的抑(减)振措施。

参考文献:

- [1] HIKAMI Y. Rain-wind induced vibrations of cables in cable stayed bridges[J]. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 1988, 29: 409-418.
- [2] LAROSE G L, TANAKA H. On rain-wind induced vibration of cables[R]. A Review, Danish Maritime Institute, Tech. Rept. No 91123.01, Oct. 1992.
- [3] FLAMAND O. Rain wind induced vibration of cables[J]. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 1995, 57: 353-362.
- [4] MATSUMOTO M. Response characteristics of rain wind-induced vibration of stay-cable of cable stayed bridges[J]. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 1995, 57: 323-333.
- [5] OLIVARI D. Wind and rain induced oscillations of cables of stayed bridges[J]. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 1996, 64: 171-185.
- [6] 何向东, 奚绍中, 周述华. 抑制斜拉索雨振气动措施的风洞试验研究[A]. 第十届全国结构风工程学术会议论文集[C]. 桂林, 2001.
- [7] LI Ming-shui, LIAO Hai-li, HE Xiang-dong, et al. Wind tunnel investigation on drag loading and rain/wind vibration of stay cables of stonecutters bridge. Part II: Rain/Wind Vibration Tests of Cables, CARD C[R]. Tech. Rept. TN200308.02, 2003.
- [8] LI Ming-shui, LIAO Hai-li, HE Xiang-dong, et al. Wind tunnel investigation on drag loading and rain/wind vibration of stay cables of sutong bridge Part II: Rain/Wind Vibration Tests of Cables, CARD C[R]. Tech. Rept. TN20031218, 2003.
- [9] 何向东, 廖海黎. 斜拉索风雨振动分析及机理初探[J]. 空气动力学报, 2005, 23(4): 480-483.
- [10] 李明水, 黄汉杰. 斜拉索的雨振动现象及风洞试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2005 年增刊, 2005.
- [11] SCOTT R Phelan. Full scale measurements to investigate rain wind induced cable stay vibration and its mitigation[J]. Bridge Eng. ASCE, 2006, 11(3): 293-304.
- [12] LAUGA Eric, MICHAEL P brenner, HOWARD A stone. Microfluids; the no-slip boundary condition[J]. Handbook of Experimental Fluid Dynamics, 2005, 15: 1-17.
- [13] 李战华, 崔海航. 微尺度流动特性[J]. 机械强度, 2001, 23(4): 476-480.
- [14] 余永生, 魏庆鼎. 疏水性材料减阻特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2005, 19(2): 60-66.
- [15] 郝鹏飞, 汪幸愉, 姚朝晖, 等. 疏水微槽道内层流减阻的实验研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(3): 7-15.
- [16] 顾春元, 狄勤丰, 施利毅, 等. 纳米粒子构建表面的超疏水性能实验研究[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 3071-3076.
- [17] 狄勤丰, 余祖斌, 顾春元, 等. 纳米颗粒吸附微管道水流特性的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(2): 104-108.
- [18] 狄勤丰, 沈琛, 王掌洪, 等. 纳米吸附法降低岩石微孔道水流阻力的实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 92-97.

作者简介:



李明水(1966-),男,河南人,教授。研究方向:桥梁、建筑结构抗风。通讯地址:四川省成都市二环路北一段西南交通大学风工程试验研究中心(610031),E-mail: lms_rewe@126.com

作者简介:



顾春元(1970-),男,江苏兴化人,博士,高级工程师。1993 年参加工作,2008 年获工程力学博士学位,随后进入上海大学博士后科研流动站工作,主要从事工程力学、油气田开发以及纳米减阻机理及技术研究。通讯地址:上海市延长路 149 号 189 信箱(200072),E-mail: wein1989@163.com.

(上接第 10 页)