

含 AMPS-NNDMA/AM 二元聚合物顶管润滑泥浆的减阻和流变性能研究

周慧慧^{1,2}, 杨伟彪³, 陈艳萍⁴

(1.昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650000; 2.云南新创新交通建设股份有限公司, 云南 昆明 650000; 3.云南交发咨询有限公司, 云南 昆明 650000; 4.云南省禄丰市交通运输局, 云南 禄丰 651200)

摘要: 顶管泥浆相当于顶管施工的“血液”, 其性能的好坏决定着工程能否顺利进行。为此研究了 5 种聚合物, 包括 WRA-97、WRA-70、WRA-61 (AMPS-NNDMA 聚合物) 和 WRA-104、WRA-116 (AMPS-AM 聚合物) 掺入后对顶管泥浆减阻性能和流变性能的影响。结果表明: WRA 聚合物泥浆的基本性能、减阻性能和流变性能均与聚合物类型、相对分子质量及其结构相关; AMPS-NNDMA 聚合物的抗滤失性能优于 AMPS-AM 聚合物, 而 AMPS-AM 聚合物泥浆比 AMPS-NNDMA 聚合物泥浆具有更优良的润滑减阻性能; WRA 聚合物泥浆具有良好的触变性和剪切变稀性, 其流变曲线可以采用幂律流体的本构方程来描述, 其流变参数的变化规律与漏斗黏度的变化规律一致。

关键词: 顶管; WRA 聚合物泥浆; 流变性; 润滑减阻性能

中图分类号: U454

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0242-05

0 引言

在公路、铁路、市政道路、城市管网等现代工程项目实施过程中, 经常采用顶管施工技术来穿越现状建筑、道路、构筑物等。而顶管施工技术能否顺利有效实施, 往往成为了项目顺利、安全、经济完成的关键环节。为此, 本文针对顶管施工关键技术之一的顶管泥浆性能进行研究, 为该技术提供相关技术支持。

在现代顶管施工技术中, 为了减小管壁与土体间的摩阻力, 通常需要在管节外壁注入泥浆, 以达到润滑减阻和支撑土体, 并悬浮顶管的目的^[1-2]。顶管泥浆已成为顶管施工中不可或缺的重要环节, 其润滑减阻性能和流变性能的好坏是长距离工程能否顺利进行的关键^[3-5], 对于施工过程具有重要指导意义。

目前顶管施工现场使用的泥浆品种和技术要求较多, 且各具特点。本文研究了常用的 5 种聚合物(两类 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸 (AMPS) 二元共聚物) 对顶管泥浆基本性能、流变性能和润滑减阻性能的影响; 同时根据顶管泥浆基本性能、流变性能和摩擦阻力的变化规律, 确定了 2-丙烯酰胺基-2-

甲基丙磺酸 (AMPS) 二元共聚物的适合分子结构, 以期开发出具有良好地层适应性和润滑减阻性能的顶管施工浆液材料, 供相关单位参考。

1 试验部分

1.1 原材料

膨润土 (安吉胜利膨润土厂); WRA 系列聚合物 (自制); 自来水。

1.2 测试方法

泥浆基本配方分为低浓度泥浆 (25 g 膨润土 + 800 g 水) 和高浓度泥浆 (50 g 膨润土 + 800 g 水), 调节泥浆 pH 值为 9~10。添加的 5 种聚合物分别为 WRA-97、WRA-70、WRA-61、WRA-104、WRA-116, 前 3 种为 AMPS-NNDMA 聚合物, 后 2 种为 AMPS-AM 聚合物, 其用量按照膨润土质量的 1%~5% 添加。待泥浆充分水化后测试其各项性能。

1.2.1 泥浆基本性能

(1) 滤失水量: 使用 NS-1 型泥浆失水量测定仪, 在 0.7 MPa 下持续 30 min, 测定泥浆失水量。

(2) 漏斗黏度: 使用 1006 型泥浆黏度计, 测定从其中流出 500 mL 泥浆所经历的时间, 即为泥浆漏斗黏度。

1.2.2 泥浆润滑减阻性能

为了评价顶管泥浆在动态情况下的润滑性, 本实

收稿日期: 2023-10-18

作者简介: 周慧慧 (1985—), 男, 硕士在读, 高级工程师, 从事道路与桥梁设计工作。

通信作者: 陈艳萍 (1985—), 女, 学士, 高级工程师, 从事公路工程管理。电子邮箱: 305323608@qq.com

实验室设计搭建了泥浆润滑减阻性能评价装置,见图1所示。试验时,先在圆柱形容容器底部铺上一层砂子来模拟土层,上盖表面选用砂浆来模拟管道表面;然后在土层和砂浆之间注入泥浆,再打开电机,使圆柱形容器以200 r/min的转速平稳转动,上盖则用绳子牵拉住,通过数显拉力计显示出的拉力大小来表征泥浆润滑效果。



图1 泥浆润滑减阻性能评价装置

1.2.3 泥浆流变性能

用滴管吸取一定量的泥浆置于R/S-CPS锥板旋转流变仪(美国Brookfield公司生产)的平板上,并调整椎板距离;在 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 剪切速率下预剪切30 s后,静止30 s;然后在2 min内将剪切速率由0上升到 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$,再在2 min内由 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 降到0,测得此期间泥浆的流变曲线,即泥浆的表观黏度-剪切速率关系曲线和触变性曲线。

测试泥浆流变性能时,根据泥浆黏度的不同用到2种转子:C75-1(直径75 mm,锥角 1°)、C50-1(直径50 mm,锥角 1°)。

2 结果与讨论

2.1 泥浆基本性能研究

泥浆的基本性能主要包括漏斗黏度、滤失水量、泥皮厚度等指标。泥浆的滤失水量主要表征浆液体系的抗滤失性能,一般来说体系的滤失水量越小且形成的泥饼越薄,表明其护壁性能越好。

5种WRA聚合物泥浆的漏斗黏度见图2,滤失水量见图3。

由图2可知,与未掺入WRA的纯膨润土泥浆相比,WRA聚合物泥浆的漏斗黏度均随着WRA用量的增大而增大,其中WRA-61聚合物泥浆的漏斗黏

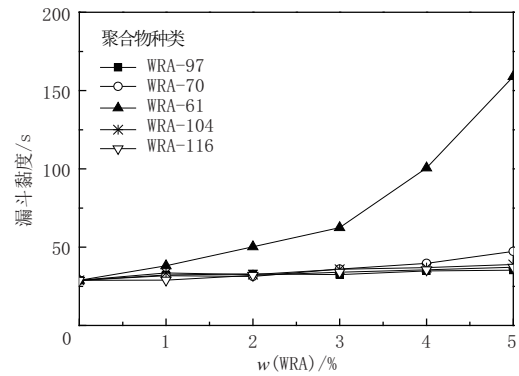


图2 WRA聚合物泥浆漏斗黏度的比较

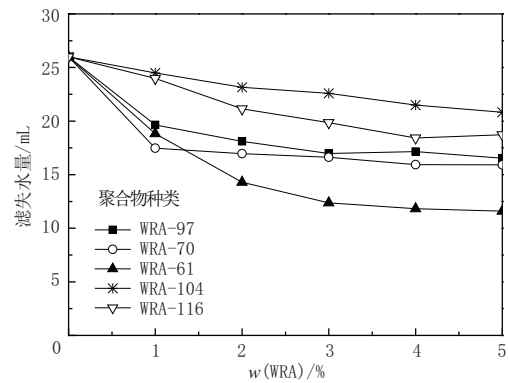


图3 WRA聚合物泥浆滤失水量的比较

度增长速率最大,其他4种聚合物泥浆的漏斗黏度仅略有增加。5种WRA聚合物泥浆的漏斗黏度排序中,WRA-61最大,WRA-70次之,而WRA-97、WRA-104和WRA-116则相差不大。

由图3可知,对于同一WRA用量的泥浆来说,5种WRA聚合物泥浆的滤失水量由低到高的排序为:WRA-61、WRA-70、WRA-97、WRA-116和WRA-104,即AMPS-NNDMA聚合物的抗滤失性能优于AMPS-AM聚合物。WRA-97、WRA-70、WRA-61的相对分子质量依次增大,表明随着相对分子质量的增大,WRA聚合物泥浆的抗滤失性能增强。另外,根据测定结果可知,WRA聚合物泥浆的泥皮厚度随着WRA用量及其种类的变化没有明显规律,但均在0.76~1.00 mm范围内波动。

2.2 泥浆润滑减阻性能研究

本文采用自制的泥浆润滑减阻性能评价装置来评价不同WRA用量下高浓度泥浆的润滑减阻性能,得到仪器显示的拉力值即相当于顶管施工顶进时的摩擦阻力。泥浆拉力 F 随时间 t 的变化曲线见图4。

由图4可以看出,加入WRA聚合物后,泥浆的摩擦阻力明显降低。当WRA聚合物用量在3%以下时,5种WRA聚合物泥浆的拉力相差不大;当用量大于4%后,其拉力之间出现明显差距,WRA-61、

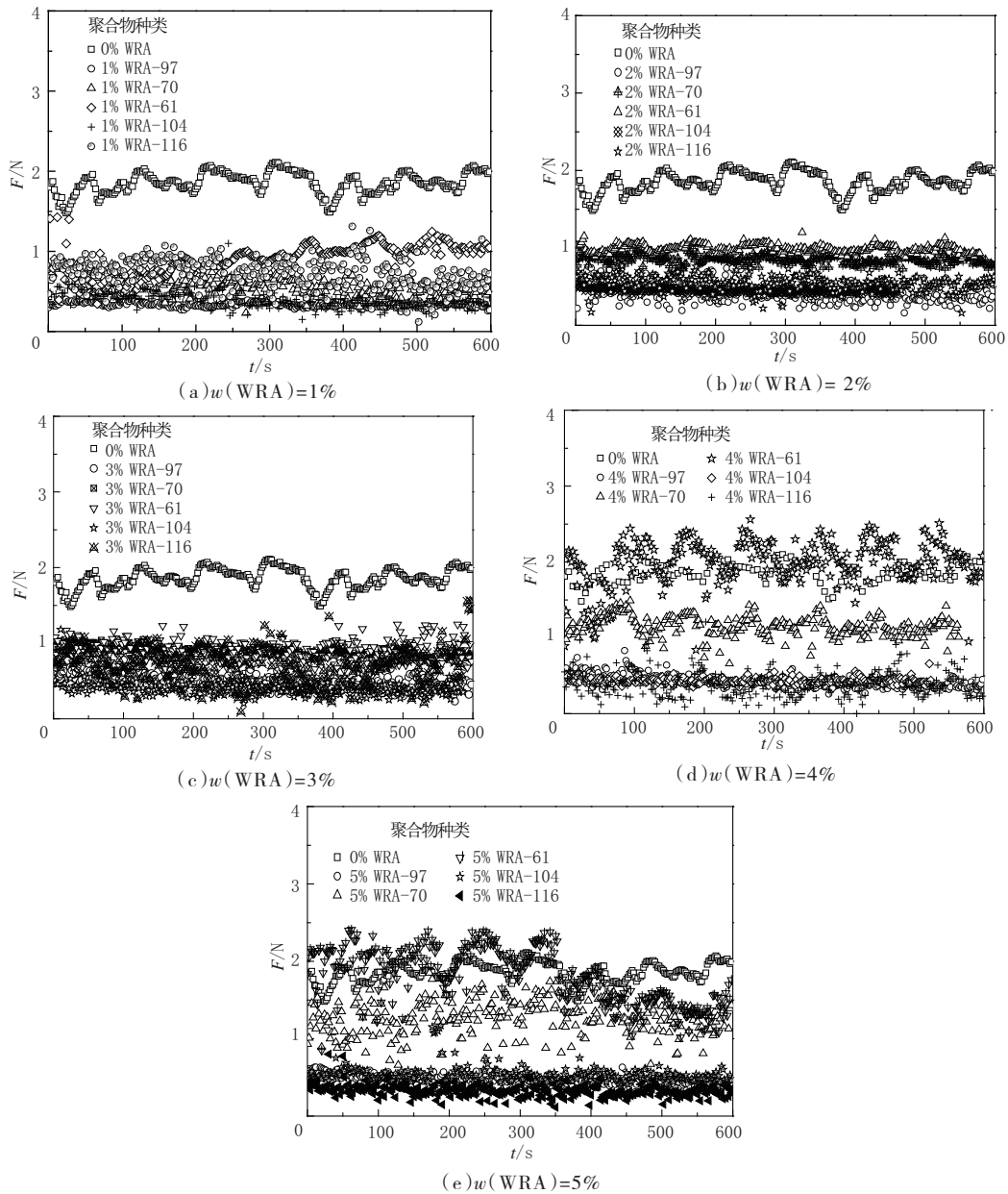


图4 WRA 聚合物泥浆润滑减阻性能比较

WRA-70 这 2 种聚合物泥浆的拉力要大于 WRA-97、WRA-104 和 WRA-116 聚合物泥浆; 同样用量下, 对于 APMS-NNDMA 聚合物泥浆来说, WRA-61 泥浆的润滑性最差, WRA-97 泥浆最优, WRA-70 泥浆居中, 原因与这几种聚合物的相对分子质量大小有关; 而对于 AMPS-AM 聚合物泥浆来说, WRA-104 泥浆的润滑性能略优于 WRA-116 泥浆; 总体来说, AMPS-AM 聚合物泥浆比 AMPS-NNDMA 聚合物泥浆具有更优良的润滑减阻性能。故可以认为, 聚合物泥浆的润滑减阻性能与聚合物组成有关, 还与其结构和相对分子质量相关。

加入 1%~3% WRA-61 聚合物的泥浆所需拉力低于纯膨润土泥浆, 但当 WRA-61 聚合物用量增至 4%~5% 时, 其所需拉力大于纯膨润土泥浆。原因可能

是 WRA-61 的相对分子质量是 3 种 AMPS-NNDMA 聚合物中最大的, 其溶液黏度也最大, 当 WRA-61 用量超过 4% 时, 泥浆的润滑减阻性能下降所致。

泥浆浓度不同时, WRA-61 聚合物泥浆的润滑减阻性能比较见图 5。

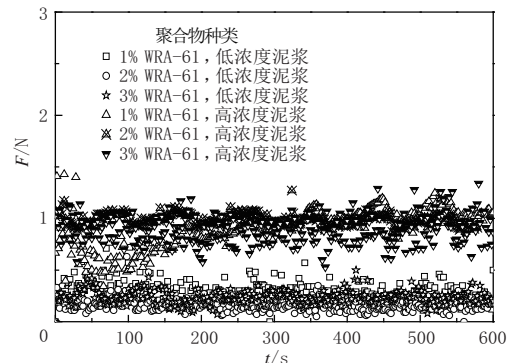


图5 WRA-61 聚合物泥浆润滑减阻性能比较

由图 5 可知,在加入 1%~3%WRA-61 聚合物后,低浓度泥浆所需拉力降低,且低于高浓度的 WRA-61 聚合物泥浆,即聚合物泥浆的润滑减阻性能还与泥浆浓度有关。当泥浆浓度大于一定范围时,泥浆浓度越大,润滑减阻性能越差。

2.3 泥浆流变性能研究

顶管施工对泥浆流变性的要求是:具备一定的剪切变稀性和触变性,即在泥浆输送和灌注过程中具有流动性并呈胶状,表现出润滑减阻作用^[6-7];经过一定时间的静置,泥浆固结成胶凝状,可对土体起到支护作用;当管节顶进时,泥浆被扰动,又成为呈胶状的液体^[8-9]。

2.4 WRA 聚合物泥浆的触变性

由上述可知,WRA-104、WRA-116、WRA-97 这 3 种聚合物泥浆的润滑性能较优。测定这 3 种泥浆的触变曲线,见图 6,其触变环面积见表 1。

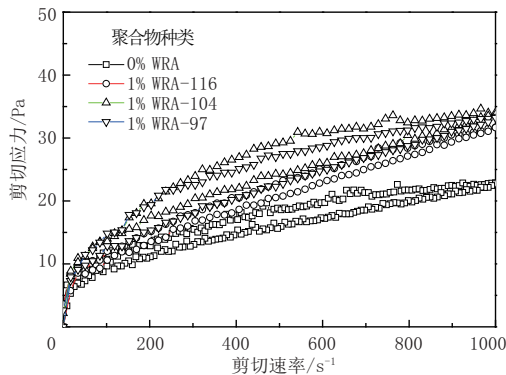


图 6 WRA 聚合物泥浆的触变性

表 1 WRA 聚合物泥浆的触变环面积

$w(\text{WRA})=$	$w(\text{WRA-104})=$	$w(\text{WRA-116})=$	$w(\text{WRA-97})=$
0%	1%	1%	1%
1 922	3 070	1 411	3 199

由图 6 和表 1 可知,3 种聚合物泥浆在受到外力作用后,其触变曲线的上行线和下行线不重合,形成了触变环,表现出一定的触变性。与纯膨润土泥浆的触变环面积相比,加入 1% 聚合物后,WRA-104 和 WRA-97 泥浆的触变环面积增大,而 WRA-116 泥浆的触变环面积减小。

原因主要是当一个 WRA 高分子同时吸附在几个颗粒上,而一个颗粒又可同时吸附几个高分子时,就会形成网络结构,受到外力时,网络结构遭到破坏,而当外力减小或是消除时,网络结构又逐渐恢复。高分子链在颗粒上吸附的状态不同,产生的作用也不同,当 WRA 聚合物用量增大时,高分子链与颗粒相互作用增强,形成的颗粒会较大,泥浆则会产生絮凝,表现为泥浆内部结构较为松散,触变环面积减

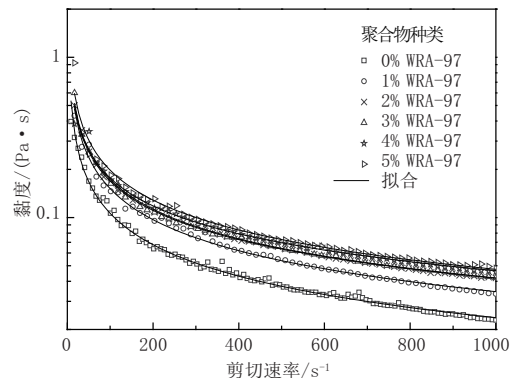
小。WRA 聚合物的触变性与 WRA 聚合物的类型和相对分子质量相关。

2.5 流变曲线

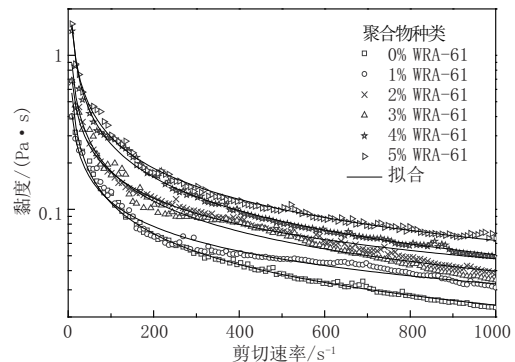
配制不同 WRA 用量的高浓度泥浆,研究其流变曲线随着泥浆组成变化的规律。在剪切速率 0~1 000 s⁻¹ 的范围内测定体系的表观黏度随着剪切速率的变化情况,结果见图 7。由图 7 可见,5 种高浓度 WRA 泥浆溶液均表现出了剪切变稀的特性。高浓度 WRA 泥浆流变曲线可以用幂律流体的本构方程来描述,其表达式为:

$$\eta = K \cdot Dn^{-1} \quad (1)$$

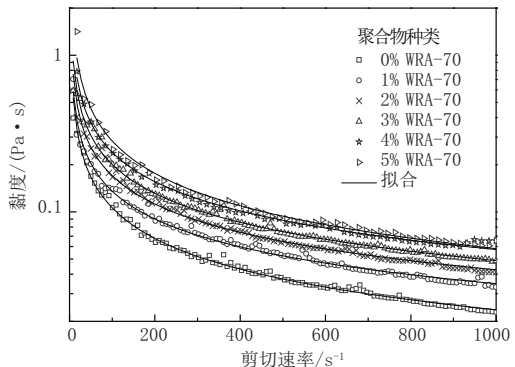
式中: η 为表观黏度; K 为稠度系数,它是黏度的度量,但不等于黏度值,黏度越高, K 值也越大; D 为剪切速率; n 为数值介于 0 和 1 之间的流性指数,其大小表示该泥浆体系剪切变稀性的强弱。



(a) 高浓度 WRA-97 泥浆

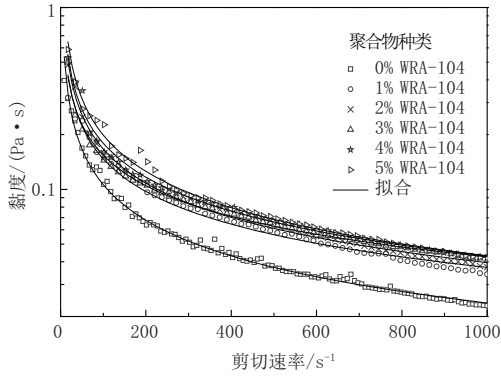


(b) 高浓度 WRA-61 泥浆

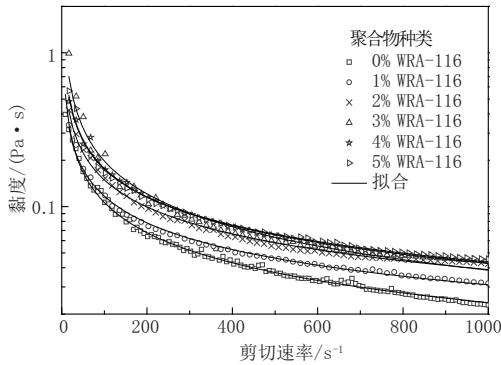


(c) 高浓度 WRA-70 泥浆

图 7 高浓度 WRA 泥浆流变模型拟合曲线



(d)高浓度 WRA-104 泥浆



(e)高浓度 WRA-116 泥浆

图 7 高浓度 WRA 泥浆流变模型拟合曲线

由图 7 可得高浓度 WRA 泥浆流变模型拟合参数 K 、 n 和线性相关系数 R ,如表 2 所列。

由图 7 和表 2 可知,WRA 泥浆的流变曲线符合幂律流体的本构方程,其拟合的线性相关系数大于 0.98。对于同一种高浓度 WRA 聚合物泥浆来说,随着 WRA 用量的增加, K 值呈增大趋势, n 值则呈减小趋势;与未加 WRA 聚合物的纯膨润土泥浆相比,加入 1% WRA 聚合物的泥浆 K 值较小;当 WRA 用量不小于 2%时,WRA 聚合物泥浆的 K 值随着 WRA 用量的增大而增大, n 值则逐渐降低,且其 K 值均大于纯膨润土泥浆, n 值略小于纯膨润土泥浆。对于不同类型的 WRA 聚合物泥浆来说,WRA-97 和 WRA-104 聚合物泥浆的 K 值随着 WRA 用量增加而变化的幅度小于另外 3 种 WRA 聚合物泥浆;当 WRA 用量一定时,在 AMPS-NNDMA 聚合物中,WRA-61 泥浆的 K 值最大,WRA-97 泥浆的 K 值最小;在 AMPS-AM 聚合物中,WRA-104 泥浆的 K 值略大于 WRA-116 泥浆;由此可知 5 种聚合物中 WRA-61 的增黏能力最强。这与前面泥浆漏斗黏度的测试数据一致,进一步说明 WRA 聚合物泥浆的流变性与聚合物类型密切相关。

3 结 语

(1)5 种 WRA 聚合物泥浆中,WRA-61 泥浆的

表 2 高浓度 WRA 泥浆流变模型拟合参数

高浓度 WRA 泥浆	$K/(Pa \cdot s^n)$	n	相关系数 R
$w(WRA)=0\%$	2.131	0.430	0.997 0
$w(WRA-97)=1\%$	2.508	0.387	0.996 8
$w(WRA-61)=1\%$	1.454	0.451	0.976 5
$w(WRA-70)=1\%$	2.067	0.409	0.995 8
$w(WRA-104)=1\%$	2.019	0.441	0.982 9
$w(WRA-116)=1\%$	1.662	0.423	0.998 0
$w(WRA-97)=2\%$	2.749	0.394	0.999 5
$w(WRA-61)=2\%$	2.912	0.391	0.992 2
$w(WRA-70)=2\%$	2.731	0.398	0.996 4
$w(WRA-104)=2\%$	2.302	0.403	0.997 8
$w(WRA-116)=2\%$	2.180	0.417	0.996 1
$w(WRA-97)=3\%$	2.920	0.386	0.998 2
$w(WRA-61)=3\%$	3.530	0.350	0.986 9
$w(WRA-70)=3\%$	3.401	0.386	0.994 4
$w(WRA-104)=3\%$	2.953	0.376	0.996 6
$w(WRA-116)=3\%$	2.839	0.395	0.988 5
$w(WRA-97)=4\%$	2.945	0.397	0.996 7
$w(WRA-61)=4\%$	6.463	0.329	0.996 5
$w(WRA-70)=4\%$	4.198	0.379	0.997 1
$w(WRA-104)=4\%$	3.122	0.380	0.995 9
$w(WRA-116)=4\%$	3.035	0.383	0.997 5
$w(WRA-97)=5\%$	3.416	0.381	0.992 1
$w(WRA-61)=5\%$	7.286	0.281	0.996 3
$w(WRA-70)=5\%$	6.729	0.312	0.993 7
$w(WRA-104)=5\%$	4.223	0.337	0.996 5
$w(WRA-116)=5\%$	5.204	0.290	0.996 7

漏斗黏度最大,且滤失水量最小;WRA-104 和 WRA-116 泥浆的滤失水量则较大。这说明 AMPS-NNDMA 聚合物的抗滤失性能优于 AMPS-AM 聚合物;且 AMPS-NNDMA 聚合物中 WRA-97、WRA-70、WRA-61 的相对分子质量是依次增大的,表明聚合物的抗滤失性能随着相对分子质量的增大而增强。

(2)同样 WRA 用量下,对于 APMS-NNDMA 聚合物泥浆来说,WRA-61 泥浆的润滑减阻性最差,WRA-70 泥浆居中,WRA-97 泥浆最优,这与它们的相对分子质量由大到小相关;而对于 AMPS-AM 聚合物泥浆来说,WRA-104 泥浆的润滑减阻性能略优于 WRA-116 泥浆;总体来说,AMPS-AM 聚合物泥浆的润滑减阻性能比 AMPS-NNDMA 聚合物泥浆优良。

(下转第 252 页)

