

# 液体黄原胶水包油钻井液研究

常珑严

(中国石化华北石油工程有限公司五普钻井分公司, 河南 新乡 453700)

**摘要:**水包油钻井液作为一种深井低密度欠平衡钻井液流体,适用于低压低渗透地层的施工。通过调研国内外低密度水包油钻井液的发展状况,进行液体黄原胶水包油钻井液的室内试验。根据钻井液体系的不同,将试验分为5组,试验研究了液体黄原胶不同添加量对各组钻井液体系乳化性和流变性的影响。试验结果表明,随着液体黄原胶量的增加,各钻井液体系乳化性逐渐变好,流变性能得到了改善。通过对试验结果的分析,优选出聚磺水包油钻井液体系配方,该体系润滑性比较好,现场施工工艺较为简单;优选出低密度充气钻井液体系配方,该体系适用于欠平衡压力钻井,能够有效地保护储层。

**关键词:**液体黄原胶;欠平衡钻井;深井;低密度;水包油钻井液

**中图分类号:**P634.6      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-7428(2015)08-0006-07

**Research on Liquid Xanthan Gum Oil-in-water Drilling Fluid/CHANG Long-yan** (Wupu Drilling Company of North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Xinxiang Henan 453700, China)

**Abstract:** As a low-density under balance drilling fluid liquid for deep well, oil-in-water drilling fluid is suitable for the construction in low pressure and low permeability formations. By the investigation on development situation of oil-in-water drilling fluid both in China and abroad, the laboratory experiments were made on liquid xanthan gum oil-in-water drilling fluid. According to the different drilling fluid systems, the test was divided into 5 groups to test and study the effect of different additions to emulsifying property and rheology of each drilling fluid system. The experimental results show that with the increase of the liquid xanthan gum amount, the emulsifying property of each drilling fluid system is gradually improved, and so is the rheology. Through the analysis on the test results, the formula of polysulfonate oil-in-water drilling fluid system is optimized, which has good lubricity with simple construction process; and the formula of low density aerated drilling fluid system is optimized, which is suitable for under balance pressure drilling to effectively protect the reservoir.

**Key words:** liquid xanthan gum; under balance drilling; deep well; low density; oil-in-water drilling fluid

## 1 研究目的及意义

面对石油地质储量被开采得日益减少以及社会对石油资源的需求逐渐加剧的现状。为更好地发现和开发油藏,多实施欠平衡钻井作业,以最大限度地保护储层。

作为一种深井低密度欠平衡水基钻井流体,水包油钻井液既保持了水基钻井液的特点,又具备了油基钻井液的特点,适合于深井欠平衡钻井作业。

其主要优点如下:

(1)体系性能稳定,抗温能力强,流动性好,滤失量低,稳定井壁能力较强;

(2)其密度低于普通钻井液体系,欠平衡钻进时对储层损害极小,有利于解放油气层,提高油气井产能;有助于防止井漏的产生和机械钻速的提高,不

影响电测和核磁测井;

(3)润滑作用好,可减少泥浆泵的损害;

(4)较之泡沫和充气钻井液体系而言,其在使用过程中不需配备复杂设备,且性能上容易监测、控制和调整;较纯油基钻井液成本低,对橡胶件的损害小,对环境污染小。

正因水包油钻井液有着以上优良的性能,已经广泛的投入到石油工业中。液体黄原胶是近几年新开发的一种新型钻井液流变性调节剂,在国外已经开始应用于钻井液,在国内几乎还没有人进行室内评价和现场使用。由于国外对这种新型黄原胶产品的使用方法进行了保密,因此在我国它的应用几乎处于一片空白。本文通过探索研究液体黄原胶对5种钻井液体系乳化性和流变性的影响,优选液体黄

原胶水包油钻井液体系配方,以解决钻井中的难题,提高钻井效率。

## 2 黄原胶的物理化学性质

### 2.1 黄原胶的分子量

黄原胶是一种具有超高分子量的细菌胞外多糖,只溶于水中。由于其侧链上含有可电离的三糖基团,表现出很强的聚电解质行为,因而给分子量及分子量分布的测定带来许多困难。

许多学者对黄原胶的分子量进行了研究,但由于测试方法和试验条件以及样品的差异,得到的结果不尽相同。综合多家数据得出黄原胶分子量的大致范围是  $2 \times 10^6 \sim 50 \times 10^6$ 。

### 2.2 黄原胶单分子的形貌

它的侧链较大且成螺旋,所以分子链较粗,加之电镜分辨率较高(1.4 Å),因而其分子在电镜下清

晰可辨。经电镜观察并从其变性后的形态变化推测出黄原胶分子的二级结构是由 40 余个亚基组成的直径为 4 nm 的右手双螺旋(见图 1)。



图 1 黄原胶分子的多亚基双螺旋

### 2.3 黄原胶组分结构特点

黄原胶的分子式  $(C_{35}H_{49}O_{29})_n$ ,它是一种线型高分子聚合物,它的  $\beta$ -主链上含有 D-葡萄糖、D-甘露糖、D-葡萄糖醛酸。这种聚合物可能的最简单的结构模式如图 2 所示。

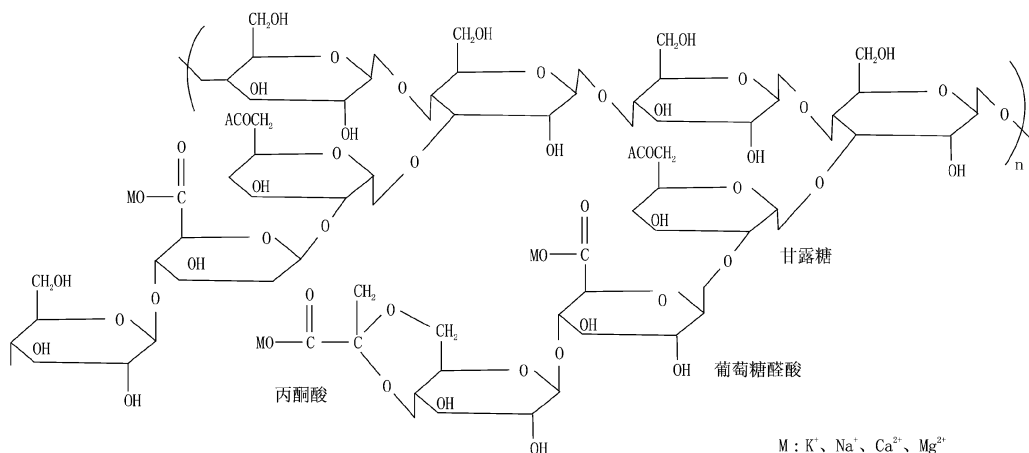


图 2 黄原胶最简单的结构模式

结构中丙酮酸和葡萄糖醛酸带有阳离子基,分子链呈自由卷曲状态;但在多数情况下,由于大分子内部氢键的存在而成双螺旋麻花状的立体构型,进而有序地排列成聚合体结构(超会合结构)。

由于它具有这种超会合结构,如图 3 所示,即使它的水溶液在较低的浓度时,仍具有较高粘度。这种立体构型在温度和剪切速率的变化下可以互相转化。

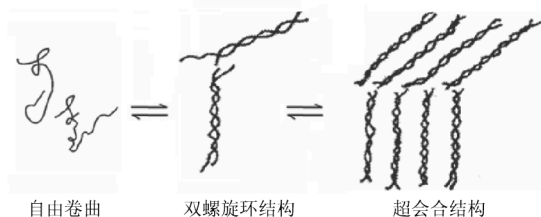


图 3 黄原胶的双螺旋环结构

### 2.4 黄原胶的物理化学性质

黄原胶是一种集增稠、悬浮、乳化、稳定于一体、性能较为优越的生物胶。它在水溶液中呈多聚阴离子且构象是多样的,不同条件下表现出不同的特性,具有独特的理化性质。

(1) 稳定性。黄原胶溶液具有很强的抗温性和抗酸碱能力。许多酶如蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶和半纤维素酶等都不能使黄原胶降解。

(2) 假塑流变性。黄原胶溶液是一种典型假塑性流体,具有很好的剪切稀释性。

(3) 增稠性。黄原胶具有良好增稠性能,特别是在低质量浓度下具有很高粘度,0.3 g/L 黄原胶溶液即能产生 0.09 Pa·s 有效粘度。与大多数合成或

天然增稠剂配伍,混溶后使混合胶粘度显著提高。

(4)悬浮性和乳化性。由于黄原胶理化性质稳定,因而具有良好悬浮性和乳化性。

3 黄原胶钻井液体系试验

3.1 试验方案

本试验的主要目的是探索液体黄原胶对钻井液乳化特性的影响,通过研究液体黄原胶对柴油-清水体系、柴油-清水-充气剂体系、原油-清水-充气剂体系、原油-聚合物钻井液体系和原油-聚磺钻井液水包油钻井液 5 种钻井液体系性能的影响,分析总结液体黄原胶对钻井液乳化特性的影响。具体试验方案见表 1。

按照试验方案把液体黄原胶加入到钻井液体系,测量其混合密度、体系的上下部密度以及流变性能和其他一些性能,试验的原始数据见表 2。

3.2 试验结果

对原始试验数据进行处理得试验结果见表 3 ~ 7。

表 1 试验设计方案

| 钻井液体系         | 试验号 | 试 验 配 方                |
|---------------|-----|------------------------|
| 柴油-清水体系       | 1   | 柴油-清水体系+0.4% 液体黄原胶     |
|               | 2   | 柴油-清水体系+0.6% 液体黄原胶     |
|               | 3   | 柴油-清水体系+0.8% 液体黄原胶     |
|               | 4   | 柴油-清水体系+1% 液体黄原胶       |
|               | 5   | 柴油-清水体系+1.2% 液体黄原胶     |
|               | 6   | 柴油-清水体系+1.4% 液体黄原胶     |
| 柴油-清水-充气剂体系   | 7   | 柴油-清水-充气剂体系+0.6% 液体黄原胶 |
|               | 8   | 柴油-清水-充气剂体系+0.8% 液体黄原胶 |
|               | 9   | 柴油-清水-充气剂体系+1% 液体黄原胶   |
| 原油-清水-充气剂体系   | 10  | 原油-清水-充气剂体系+0.8% 液体黄原胶 |
|               | 11  | 原油-清水-充气剂体系+1% 液体黄原胶   |
|               | 12  | 原油-清水-充气剂体系+1.2% 液体黄原胶 |
| 原油-聚合物钻井液体系   | 13  | 原油-聚合物钻井液体系+0.8% 液体黄原胶 |
|               | 14  | 原油-聚合物钻井液体系+1% 液体黄原胶   |
|               | 15  | 原油-聚合物钻井液体系+1.2% 液体黄原胶 |
| 原油-抗高温聚磺钻井液体系 | 16  | 原油-聚磺钻井液体系+0.8% 液体黄原胶  |
|               | 17  | 原油-聚磺钻井液体系+1% 液体黄原胶    |
|               | 18  | 原油-聚磺钻井液体系+1.2% 液体黄原胶  |

注:(1)聚合物钻井液配方为 3% 膨润土浆+0.3% CMC+0.1% K-PAM+0.1% JT-888+0.2% 铵盐;(2)抗高温聚合物钻井液配方为聚合物钻井液基浆+3% SMP-2+3% 腐植酸钾+0.4% NaOH。

表 2 试验原始数据

| 试验号 | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\phi 600$ | $\phi 300$ | $\phi 200$ | $\phi 100$ | $\phi 6$ | $\phi 3$ | API 失水量/<br>[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚度/<br>mm |
|-----|--------------------------------------|---|---|------------|------------|------------|------------|----------|----------|--|-------------|
| 1   | 0.82                                 | 0.81  | 0.89  | 15         | 7          | 5          | 3          | 1        | 1        | 230  | 0.0         |
| 2   | 0.80                                 | 0.81  | 0.91  | 13         | 6          | 3          | 2          | 1        | 1        | 230  | 0.0         |
| 3   | 0.79                                 | 0.79  | 0.84  | 30         | 14         | 11         | 7          | 1        | 1        | 230  | 0.0         |
| 4   | 0.79                                 | 0.87  | 0.80  | 96         | 70         | 59         | 44         | 16       | 13       | 230  | 0.0         |
| 5   | 0.91                                 | 0.82  | 0.79  | 67         | 50         | 42         | 32         | 14       | 12       | 230  | 0.0         |
| 6   | 0.90                                 | 0.82  | 0.83  | 50         | 38         | 33         | 26         | 12       | 11       | 230  | 0.0         |
| 7   | 0.82                                 | 0.79  | 0.91  | 14         | 7          | 4          | 2          | 1        | 1        | 230  | 0.0         |
| 8   | 0.83                                 | 0.81  | 0.81  | 54         | 40         | 34         | 27         | 13       | 11       | 14.2   | 0.5         |
| 9   | 0.85                                 | 0.84  | 0.84  | 42         | 32         | 28         | 22         | 10       | 9        | 12.7   | 0.4         |
| 10  | 0.90                                 | 0.79  | 0.92  | 80         | 44         | 32         | 20         | 3        | 2        | 0.5  | 3.0         |
| 11  | 0.92                                 | 0.87  | 0.92  | 153        | 80         | 55         | 32         | 5        | 4        | 1.8  | 1.8         |
| 12  | 0.90                                 | 0.84  | 0.86  | 27         | 19         | 16         | 13         | 5        | 4        | 4.4  | 2.0         |
| 13  | 0.88                                 | 0.85  | 0.89  | 195        | 117        | 89         | 57         | 13       | 10       | 0.2  | 2.8         |
| 14  | 1.02                                 | 0.93  | 1.09  | 85         | 60         | 53         | 37         | 11       | 8        | 2.0  | 5.0         |
| 15  | 0.98                                 | 0.87  | 0.88  | 87         | 61         | 52         | 40         | 16       | 14       | 1.8  | 4.0         |
| 16  | 1.40                                 | 0.98  | 1.23  | 140        | 75         | 33         | 24         | 25       | 20       | 0.5  | 1.5         |
| 17  | 0.95                                 | 0.90  | 0.98  | 70         | 54         | 42         | 26         | 17       | 13       | 1.0  | 1.8         |
| 18  | 0.94                                 | 0.89  | 0.89  | 89         | 57         | 39         | 24         | 6        | 6        | 1.5  | 1.4         |

注: $\rho_{\text{上}}$ 、 $\rho_{\text{下}}$  取测试 3 组数据的平均值,每组数据测试时间间隔为 1 h,下同。

3.3 试验分析(见图 4~17)

3.3.1 液体黄原胶在柴油-清水体系中的乳化性能(60℃)

由图 4 可看出,在柴油-清水体系中加入液体黄原胶,随着体系液体黄原胶量的增加,表观粘度、

塑性粘度和动切力均增大,液体黄原胶调节了体系的剪切稀释性。

由图 4 可看出,体系有一段动切力为负值,这可能是旋转粘度计的机械摩阻影响,导致塑性流体动切力测值偏低。

| 表 3 液体黄原胶在柴油-清水体系中乳化性能试验(60 ℃) |           |           |                                      |   |   |  |  |            |  |        |
|--------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|--------|
| 序号                             | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切力/<br>Pa | API 失水量/<br>[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 动塑比    |
| 1                              | 80        | 20        | 0.82                                 | 0.81  | 0.89  | 7.5                                    | 8                                      | -0.51      | 230(全漏)  | -0.064 |
| 2                              | 70        | 30        | 0.80                                 | 0.80  | 0.91  | 6.5                                    | 7                                      | -0.51      | 230(全漏)  | -0.073 |
| 3                              | 60        | 40        | 0.79                                 | 0.79  | 0.84  | 15.0                                   | 16                                     | -1.02      | 230(全漏)  | -0.064 |
| 4                              | 50        | 50        | 0.79                                 | 0.87  | 0.89  | 48.0                                   | 26                                     | 22.48      | 230(全漏)  | 0.86   |
| 5                              | 40        | 60        | 0.91                                 | 0.82  | 0.82  | 33.5                                   | 17                                     | 16.86      | 230(全漏)  | 0.99   |
| 6                              | 30        | 70        | 0.90                                 | 0.82  | 0.82  | 25.0                                   | 12                                     | 13.29      | 230(全漏)  | 1.10   |

注:基液配方为 100 mL 清水 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80。

| 表 4 液体黄原胶在柴油-清水-充气剂体系中乳化性能试验(60 ℃) |           |           |           |                                      |   |   |  |  |            |  |             |         |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|-------------|---------|
| 序号                                 | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | 充气<br>剂/g | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切<br>力/Pa | API 失水量/<br>[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚<br>度/mm | 动塑<br>比 |
| 7                                  | 70        | 30        | 3         | 0.82                                 | 0.79  | 0.91  | 7                                      | 7                                      | 0.00       | 230(全漏)  | 0.0         | 0.00    |
| 8                                  | 60        | 40        | 3         | 0.83                                 | 0.81  | 0.81  | 27                                     | 14                                     | 13.28      | 14.2   | 0.5         | 0.95    |
| 9                                  | 50        | 50        | 3         | 0.85                                 | 0.84  | 0.84  | 21                                     | 10                                     | 11.24      | 12.7   | 0.4         | 1.12    |

| 表 5 液体黄原胶在原油-清水-充气剂体系中的乳化性能试验(60 ℃) |           |           |           |                                      |   |   |  |  |            |  |             |         |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|-------------|---------|
| 序号                                  | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | 充气<br>剂/g | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切<br>力/Pa | API 失水量/<br>[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚<br>度/mm | 动塑<br>比 |
| 10                                  | 60        | 40        | 3         | 0.90                                 | 0.79  | 0.92  | 40.0                                   | 36                                     | 4.08       | 0.5  | 3.0         | 0.110   |
| 11                                  | 50        | 50        | 3         | 0.92                                 | 0.87  | 0.92  | 76.5                                   | 73                                     | 3.58       | 1.8  | 1.8         | 0.049   |
| 12                                  | 40        | 60        | 3         | 0.90                                 | 0.84  | 0.86  | 13.5                                   | 8                                      | 5.62       | 4.4  | 2.0         | 0.700   |

| 表 6 液体黄原胶在原油-聚合物钻井液体系中的乳化性能试验(60 ℃) |           |           |           |                                      |   |   |  |  |            |  |             |         |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|-------------|---------|
| 序号                                  | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | 充气<br>剂/g | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切<br>力/Pa | API 失水量/<br>[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚<br>度/mm | 动塑<br>比 |
| 13                                  | 60        | 40        | 3         | 0.88                                 | 0.85  | 0.89  | 97.5                                   | 78                                     | 19.93      | 0.2  | 2.8         | 0.26    |
| 14                                  | 50        | 50        | 3         | 1.02                                 | 0.93  | 1.09  | 42.5                                   | 25                                     | 17.89      | 2.0  | 5.0         | 0.72    |
| 15                                  | 40        | 60        | 3         | 0.98                                 | 0.87  | 0.88  | 43.5                                   | 26                                     | 17.89      | 1.8  | 4.0         | 0.69    |

注:基液配方为 100 mL 聚合物钻井液 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80。

| 表 7 液体黄原胶在原油-聚磺钻井液体系中的乳化性能试验(60 ℃) |           |           |           |                                      |   |   |  |  |            |  |             |         |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|-------------|---------|
| 序号                                 | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | 充气<br>剂/g | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切<br>力/Pa | API 失水量/<br>[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚<br>度/mm | 动塑<br>比 |
| 16                                 | 60        | 40        | 3         | 1.40                                 | 0.98  | 1.23  | 70.0                                   | 65                                     | 5.11       | 0.5  | 1.5         | 0.079   |
| 17                                 | 50        | 50        | 3         | 0.95                                 | 0.9   | 0.98  | 35.0                                   | 16                                     | 19.42      | 1.0  | 1.8         | 1.210   |
| 18                                 | 40        | 60        | 3         | 0.94                                 | 0.89  | 0.89  | 44.5                                   | 32                                     | 12.78      | 1.5  | 1.4         | 0.400   |

注:基液配方为 100 mL 聚磺钻井液 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80。

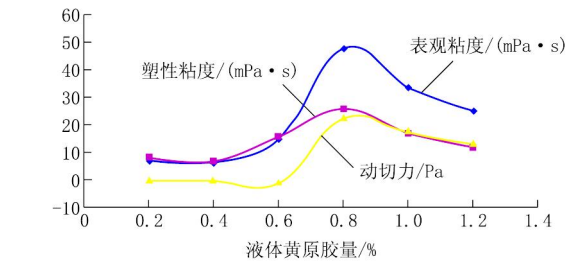


图 4 液体黄原胶在柴油-清水体系中流变曲线图

由图 4 可看出,在体系液体黄原胶量 1% 时,继续增加液体黄原胶量,体系流变曲线呈下降趋势,原因可能是由于液体黄原胶量的持续增大,导致分子

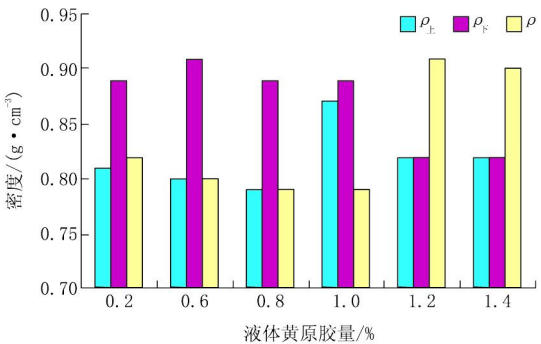


图 5 柴油-清水体系密度变化图



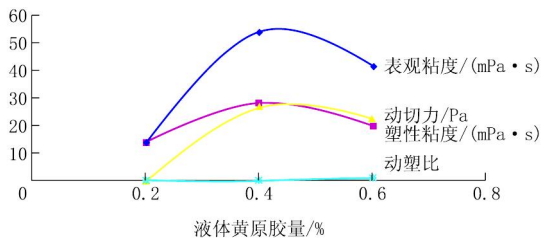


图 6 液体黄原胶在柴油-清水-充气剂体系中的流变曲线图

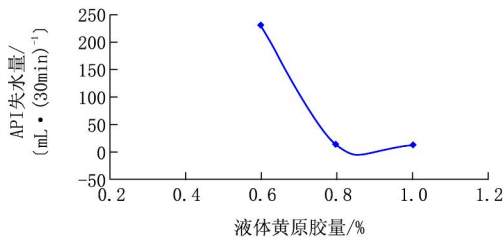


图 7 液体黄原胶在柴油-清水-充气剂体系中 API 失水量

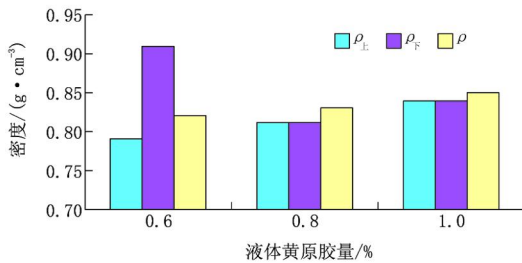


图 8 柴油-清水-充气剂体系密度变化图

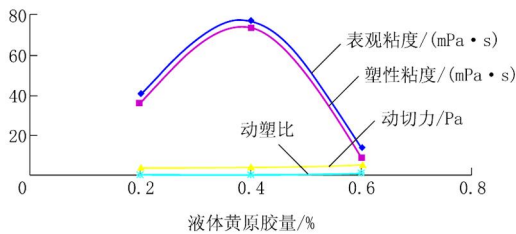


图 9 液体黄原胶在原油-清水-充气剂体系中的流变曲线图

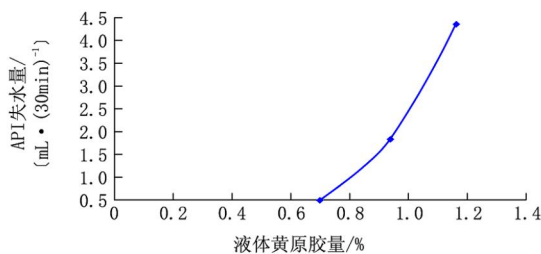


图 10 液体黄原胶在原油-清水-充气剂体系中的 API 失水量

排列成线的趋势增加,另外有些长链分子可能断裂。

由图 5 可看出,随着体系液体黄原胶量的增多,体系上下部液体密度差异在逐渐减小,但是与混合密度差异比较大。

3.3.2 液体黄原胶在柴油-清水-充气剂体系中的乳化性能(60℃)

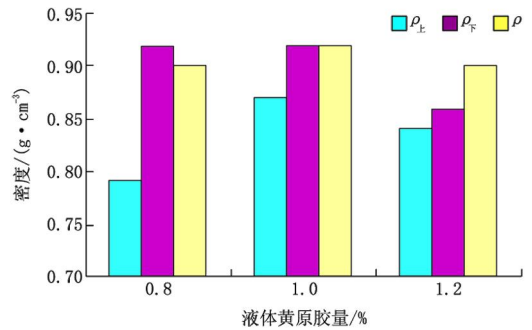


图 11 原油-清水-充气剂体系密度变化图

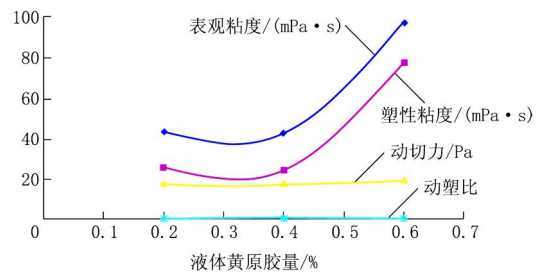


图 12 液体黄原胶原油-聚合物钻井液体系中的流变曲线图

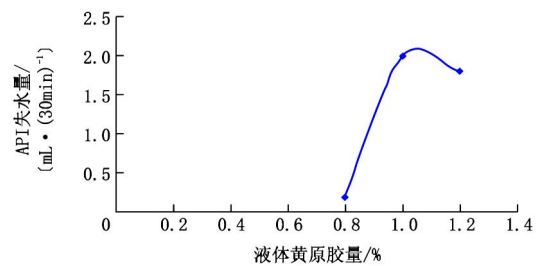


图 13 液体黄原胶原油-聚合物钻井液体系中的 API 失水量

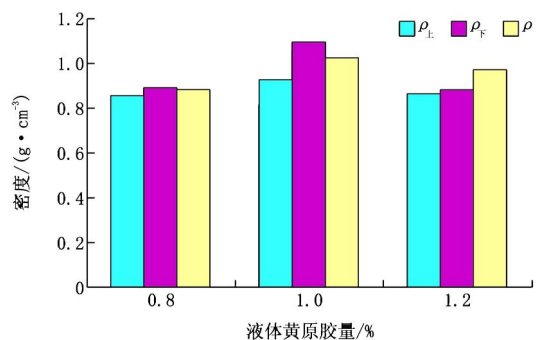


图 14 原油-聚合物钻井液体系密度变化图

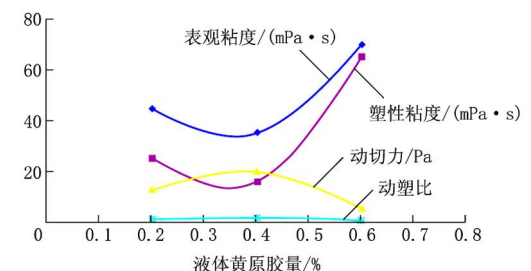


图 15 液体黄原胶在原油-聚磺钻井液体系中的流变曲线图

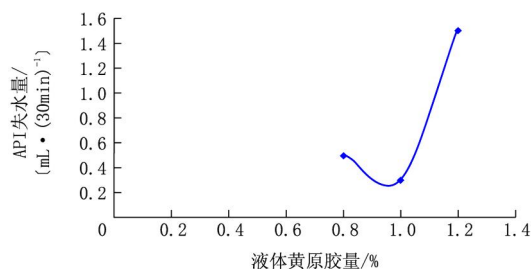


图 16 液体黄原胶在原油 - 聚磺钻井液体系中的 API 失水量

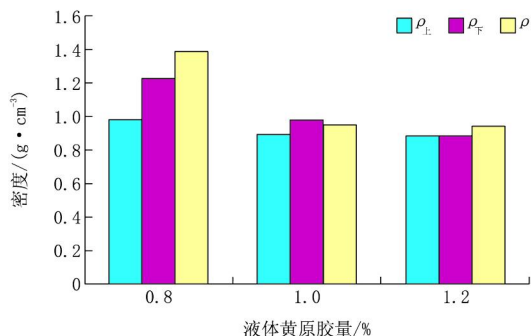


图 17 原油 - 聚磺钻井液体系密度变化图

(1)由图 6 可看出,在柴油 - 清水 - 充气剂体系中加入液体黄原胶,随着液体黄原胶量的增多,表观粘度、塑性粘度和动切力均先增后减,液体黄原胶调节了体系的剪切稀释性。在体系液体黄原胶量 0.4% 时,继续增加液体黄原胶量,体系流变曲线呈下降趋势,原因可能是由于液体黄原胶量的持续增大,进而导致分子排列成线性的趋势增加,另外有些长链分子可能断裂。

(2)由图 7 可看出,体系中液体还原胶量增多,滤失逐渐减小,慢慢趋于稳定,说明在柴油 - 清水 - 充气剂体系中加入液体黄原胶,形成了比较好的泥饼,能够有效地防止滤失。

(3)由图 8 可看出,体系中随着液体黄原胶量的增加,上下部密度逐渐趋于相同,并且与混合密度差异非常小,体系逐渐趋于稳定,体系乳化比较好。

### 3.3.3 液体黄原胶在原油 - 清水 - 充气剂体系中的乳化性能(60 ℃)

(1)由图 9 可看出,在原油 - 清水 - 充气剂体系中加入液体黄原胶,随着液体黄原胶量的增加,体系表观粘度和塑性粘度变化趋势一致,均是先增大后减小,动切力变化幅度比较小。

(2)由图 10 可看出,随着体系液体黄原胶量的增大,滤失量在逐渐增大,说明体系未能形成好的泥饼,不能有效地防止滤失。

(3)由图 11 可看出,随着体系液体黄原胶量的

增加,体系上下部密度差异逐渐减小,但是与混合密度差异比较大,体系乳化效果不好。

### 3.3.4 液体黄原胶在原油 - 聚合物钻井液体系中的乳化性能(60 ℃)

(1)由图 12 可看出,在原油 - 聚合物钻井液体系中加入液体黄原胶,随着液体黄原胶量的增加,体系表观粘度和塑性粘度先减小,慢慢趋于稳定,动切力变化幅度不变。

(2)由图 13 可看出,随着体系液体黄原胶量的增加,失水量先增大后减小。

(3)由图 14 可看出,随着体系液体黄原胶量的增加,上下部密度差异逐渐减小,与混合密度差异比较小,体系乳化比较好。

### 3.3.5 液体黄原胶在原油 - 聚磺钻井液体系中的乳化性能(60 ℃)

(1)由图 15 可看出,在原油 - 聚磺钻井液体系中加入液体黄原胶,随着液体黄原胶量的增加,体系表观粘度和塑性粘度先减小,慢慢趋于稳定,动切力先增大后减小。

(2)由图 16 可看出,随着体系液体黄原胶量的增加,失水量先减小后增大。

(3)由图 17 可看出,随着体系液体黄原胶量的增加,体系上下部密度差异逐渐减小,并且与混合密度差异比较小,体系乳化效果比较理想。

## 3.4 水包油钻井液体系优选

优选液体黄原胶水包油钻井液体系配方时,把乳化稳定性、流变性、动塑比和 API 滤失量作为重要的指标,但是还得兼顾其他的性能指标,而在有些加量的选取上,如果在某一性能上变化不大,就可以在考虑其他性能的基础上选择其加量,从而得出试验组,从试验的各项数据结果中,优选出比较好的配方,见表 8 ~ 11。

## 3.5 小结

由以上乳化对比试验可以得出以下结论。

(1)在柴油 - 清水体系中,优选的体系配方较原配方有着较高的表观粘度,较低的塑性粘度,但是试验结果表明 API 全漏,未能形成泥饼,所以要使用该体系的话,要在其中加入降滤失剂。

(2)在柴油 - 清水 - 充气剂体系中,优选的体系配方较原配方有着较高的表观粘度、较高的动塑比和较低的 API 失水量,说明形成了良好的泥饼,在钻井过程中能够有效地防止滤失,保护井壁。

表 8 液体黄原胶在柴油-清水体系中乳化对比试验(60℃)

| 序号   | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切力/<br>Pa | API 失水量/<br>[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 动塑比  |
|------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|------|
| 1(优) | 40        | 60        | 0.82                                 | 0.82  | 0.82  | 33.5                                   | 17                                     | 16.86      | 230(全漏)  | 0.99 |
| 2原   | 50        | 50        | 0.89                                 | 0.87  | 0.89  | 48.0                                   | 26                                     | 22.48      | 230(全漏)  | 0.86 |
| 3原   | 30        | 70        | 0.82                                 | 0.82  | 0.82  | 25.0                                   | 12                                     | 13.29      | 230(全漏)  | 1.10 |

注:基液配方为 100 mL 清水 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80。

表 9 液体黄原胶在柴油-清水-充气剂体系中乳化对比试验(60℃)

| 序号   | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | 充气<br>剂/g | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切<br>力/Pa | API 失水量/[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚<br>度/mm | 动塑<br>比 |
|------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|-------------|---------|
| 4(优) | 58        | 42        | 3         | 0.83                                 | 0.82  | 0.82  | 28                                     | 14.7                                   | 14.90      | 0.5  | 0.4         | 1.15    |
| 5原   | 50        | 50        | 3         | 0.85                                 | 0.84  | 0.84  | 21                                     | 10.0                                   | 11.24      | 12.7   | 0.4         | 1.12    |
| 6原   | 60        | 40        | 3         | 0.83                                 | 0.81  | 0.81  | 27                                     | 14.0                                   | 13.28      | 14.2   | 0.5         | 0.95    |

表 10 液体黄原胶在原油-聚合物钻井液体系中的乳化对比试验(60℃)

| 序号   | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | 充气<br>剂/g | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切<br>力/Pa | API 失水量/[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚<br>度/mm | 动塑<br>比 |
|------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|-------------|---------|
| 7原   | 40        | 60        | 3         | 0.98                                 | 0.87  | 0.88  | 43.5                                   | 26                                     | 17.89      | 1.8  | 4.0         | 0.69    |
| 8原   | 50        | 50        | 3         | 1.02                                 | 0.93  | 1.09  | 42.5                                   | 25                                     | 17.89      | 2.0  | 5.0         | 0.72    |
| 9(优) | 60        | 40        | 3         | 0.88                                 | 0.85  | 0.89  | 97.5                                   | 78                                     | 19.93      | 0.2  | 2.8         | 0.26    |

注:基液配方为 100 mL 聚合物钻井液 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80。

表 11 液体黄原胶在原油-抗高温聚磺钻井液体系中的乳化对比试验(60℃)

| 序号    | 柴油/<br>mL | 基液/<br>mL | 充气<br>剂/g | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{上}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\rho_{\text{下}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 表观粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 塑性粘度/<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) | 动切<br>力/Pa | API 失水量/[ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ] | 泥饼厚<br>度/mm | 动塑<br>比 |
|-------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|--|-------------|---------|
| 10(优) | 54        | 46        | 3         | 0.92                                 | 0.89  | 0.89  | 44.5                                   | 25                                     | 12.78      | 0.4  | 1.4         | 0.60    |
| 11原   | 50        | 50        | 3         | 0.95                                 | 0.90  | 0.98  | 35.0                                   | 16                                     | 19.42      | 1.0  | 1.8         | 1.21    |
| 12原   | 60        | 40        | 3         | 1.40                                 | 0.98  | 1.23  | 70.0                                   | 65                                     | 5.11       | 0.5  | 1.5         | 0.08    |

注:基液配方为 100 mL 聚磺钻井液 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80。

(3)在原油-聚合物钻井液体系中,优选体系具有较高的表观粘度、塑性粘度和较高的动切力,API 失水较低,能够形成泥饼。

(4)在原油-聚磺钻井液体系中,优选的体系配方较原配方有着较高的表观粘度、较高的动切力、API 失水量较低和有着较高的动塑比,说明该优选体系具有较好的剪切稀释性能。

通过以上乳化对比试验,优选出以下 4 组优选方案,见表 12,其中优选出的柴油-清水-充气剂体系配方更适合作低密度充气钻井液。

表 12 液体黄原胶水包油钻井液体系优选方案

| 钻井液体系     | 试剂/<br>mL | 试剂/<br>mL | 充气<br>剂/g | 液体黄原<br>胶量/% |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 柴油-清水     | 柴油 40     | 基液 A 60   | 0         | 1.20         |
| 柴油-清水-充气剂 | 柴油 58     | 基液 A 42   | 3         | 0.84         |
| 原油-聚合物    | 原油 60     | 基液 B 40   | 3         | 0.80         |
| 原油-聚磺钻井液  | 原油 54     | 基液 C 46   | 3         | 1.08         |

注:基液 A 配方为 100 mL 清水 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80;基液 B 配方为 100 mL 聚合物钻井液 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g

SP-80;基液 C 配方为 100 mL 聚磺钻井液 + 2.0 g 液体黄原胶 + 0.3 g SP-80;聚合物钻井液配方为 3% 膨润土浆 + 0.3% CMC + 0.1% K-PAM + 0.1% JT-888 + 0.2% 铵盐;聚合物钻井液配方为聚合物钻井液基浆 + 3% SMP-2 + 3% 腐植酸钾 + 0.4% Na<sub>2</sub>O。

该钻井液体系的特点:表观粘度与动切力较高,塑性粘度较低,动塑比较高,表明其具有较好的剪切稀释性能,其能充分发挥钻头的水马力,有利于提高钻速,在环形空间能很好地携带岩屑;API 滤失量低,具有良好的降滤失性能,能够形成薄而致密的泥饼,进而有效地阻止钻井液进入地层,减轻对油气层的侵害。

4 结语

(1)试验结果表明,在配制超低密度充气钻井液时,更适合用柴油,而不宜选用原油。

(2)优选的柴油-清水-充气剂体系,密度很低,适合作低密度充气钻井液。

(下转第 21 页)

(5) 在施工构造破碎带时, 由于该孔段坍塌破碎严重, 在征得地质方面同意后换用 4% LBM 低粘增效粉冲洗液, 配合 SYZX95 绳索取心液动锤钻进, 有效提高了钻速, 增加了回次进尺长度, 采取率由之前的 57% 提高至 91%, 得到了业主的一致认可。

## 6 结语

AKT1-1 孔自 2014 年 6 月 6 日开孔, 11 月 10 日钻进至 1407.28 m 终孔, 历时 5 个月, 台月效率 281.46 m, 综合钻速 1.79 m/h, 岩心采取率为 97.8%。AKT1-1 孔的施工, 建立了一套适合温泉地区破碎坍塌地层施工的冲洗液技术体系; 同时试验应用了 SYZX 系列绳索取心液动锤钻进技术, 并取得了较为明显的成效; 在钻探施工组织设计及钻孔结构布置上积累了宝贵的经验, 尤其是小口径钻杆配合大口径钻铤与大口径钻头施工的钻具级配, 优化钻进参数和辅以高效冲洗液, 在实际施工中取得了较好的效果。

通过 AKT1-1 孔的施工, 为后续施工积累了宝贵的经验; 在地层稳定的情况下, 钻进大口径钻孔, 尽量使用大排量钻进, 避免岩粉重复破碎, 实现快速钻进; 合理设计钻孔结构和钻具级配, 对异常破碎地层, 采用多径钻孔结构和最优冲洗液; 孔内事故是影响钻进效率的直接因素, 施工中要充分考虑各种因素, 制定详细且具有可操作性的施工技术方案、尽量

避免孔内事故的发生; 采用管外灌注水泥止水时, 尽量增大管外环状间隙, 起到保证止水效果的同时, 可以避免灌注水泥时发生憋压憋泵现象。

## 参考文献:

- [1] 李之军, 陈礼仪, 贾军, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔 (WFS-1) 断层泥孔段泥浆体系的研究与应用 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2009, 36(12): 13-15, 19.
- [2] 董海燕. 绳索取心液动锤在中国岩金勘查第一深钻的应用和最新进展 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2013, 40(10): 9-12.
- [3] 贾军, 李旭东, 樊腊生, 段晓青, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFS-2 孔钻探施工技术 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 6-11.
- [4] 胡郁乐, 杨涛, 董海燕. 金川科学深钻预导孔钻井液技术研究 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2012, 39(S1): 13-15.
- [5] 董海燕, 王鲁朝, 杨芳, 等. 国产 CNH(T) 绳索取心钻杆在中国岩金勘查第一深钻工程中的应用分析 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2014, 41(1): 49-53.
- [6] 陈师逊, 张英传, 翟玉峰. 山东莱州三山岛金矿区 ZK112-1 钻孔施工技术 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2012, 39(S2): 217-220.
- [7] 王达, 张伟. “科钻一井” 钻探施工技术概览 [J]. 中国地质, 2005, 32(2): 184-194.
- [8] 孙丙伦, 陈师逊, 陶士先. 复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术探讨与实践 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2008, 35(5): 13-16.
- [9] 丁同领, 高嵩. 武汉-1 超深地热井钻井成井工艺 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2012, 39(8): 23-25.

## (上接第 12 页)

(3) 优选的原油-聚合物体系, 密度比较低, 且流变性比较好。

(4) 优选的原油-聚磺钻井液体系, 体系比较稳定, 流变性比较好, 滤失量低。

(5) 液体黄原胶作为一种新型钻井液流变性处理剂, 具有良好的水溶性, 耐温, 抗酸碱, 优良的增粘性, 并起一定的降滤失作用, 良好的配伍性。目前深井和超深井井底地层情况复杂, 井底温度高, 因此适合应用液体黄原胶处理钻井液。液体黄原胶应用广泛, 但在我国石油工业中的应用还需要更多、更深层次的探索和研究。

## 参考文献:

- [1] 刘榆. 水包油型乳化完井液的研究与应用 [J]. 钻井液与完井

液, 1989, 6(4): 62-66.

- [2] 左凤江, 庄立新, 杨洪, 等. 低密度水包原油钻井液的应用 [J]. 钻井液与完井液, 1996, 13(5): 35-37.
- [3] 耿晓光. 抗高温水包油钻井液研究与应用 [D]. 黑龙江哈尔滨: 黑龙江大学, 2001.
- [4] 赵大键, 扬建华, 于宪潮, 等. 黄原胶的分子量 [J]. 应用化学, 1989, 6(5): 86-88.
- [5] 石宝忠. 黄原胶调研报告 [J]. 化工科技市场, 2003, (11): 23-24.
- [6] Jansson, P. - E., L. Kenne, and B. Lindberg. Structure of the extracellular polysaccharide from *Xanthomonas campestris* [J]. Carbohydrate research, 1975, 45: 275-282.
- [7] 里景伟. 微生物多聚糖——黄原胶的生产与应用 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [8] 杨新亭. 黄原胶的性能及其应用 [J]. 河南农业大学学报, 1999, 33(S1): 137-139.
- [9] 章泽英, 张静, 周全. 黄原胶水溶液结构流变性质的研究 [J]. 北京联合大学学报, 1995, (3): 42-47.