

油田三次采油中静态混合器的优选

何浩森¹ 黄雄斌¹ 肖世新¹ 徐德刚² 周鸿雁² 赵 强²

(1. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029; 2. 大庆石油管理局物资装备总公司, 黑龙江 萨尔图 163453)

摘要: 文中选择了三种静态混合器, 对它们的降解和混合进行了实验研究, 得到了在不同的流速下, 三种元件对质量分数为 0.5% 聚丙烯酰胺溶液的黏度降低率, 不同浓度下三种元件压降与雷诺数的关系, 以及在工业流速下 (0.5 m/s), 压降与元件个数关系式 (3[#] 元件), 实际元件数与每组元件个数关系 (3[#] 元件)。结果表明: 三种混合元件降解和混合性能都达到了生产要求, 2[#] 和 3[#] 元件优于 1[#] 元件。

关键词: 静态混合器; 聚丙烯酰胺; 降解; 混合

中图分类号: TQ051.71

引言

在油田三次采油中, 需将聚合物母液和水经由静态混合器混合后注入井下, 由于聚合物是一种高分子物质, 分子链特别长, 受剪切作用易被剪断, 剪断后的高分子聚合物使井下油层中的驱油效果明显下降^[1]。在工业生产中, 一般要求当聚丙烯酰胺溶液通过静态混合器时, 其黏度降低率应小于 2%。目前, 用于油田聚合物站上的静态混合器大体有 SMV 型、SMX 型、SML 型、K 型和 K 型与 SMX 型组合型, 这些混合器大都是从化工行业移植过来的, 没有针对注聚合物溶液的特殊要求进行专门研究。从现场使用效果来看, 这些静态混合器对于聚合物黏度的降低过大^[2]。本文以低降解静态混合器为研究对象, 根据对各种静态混合器元件结构的分析, 初步选择了一种 KENICS- 型 (以下简称 1[#] 元件), 一种 ROSE- 型 (以下简称 2[#] 元件) 和立交盘静态混合器 (以下简称 3[#] 元件), 选择这三种静态混合器, 是因为它们与其它静态混合器相比, 结构简单, 容易制造, 流通截面积大, 阻力损失小。1[#] 和 2[#] 元件是比较成熟的两种混合元件, 3[#] 元件是新开发出来的混合元件。通过实验, 优选出至少一种不仅混合效果好, 而且黏度降低率小于 2% 的静态混合器, 在其基础上对优化的静态混合器再进行重点研究。

收稿日期: 2003-12-29

第一作者: 男, 1977 年生, 硕士生

E-mail: lhhn2001@163.com

1 实验部分

三种静态混合元件见图 1, 2, 3。

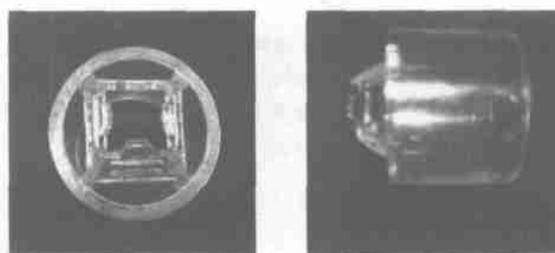


图 1 1[#] 元件结构图

Fig. 1 Type 1[#] mixing element configuration

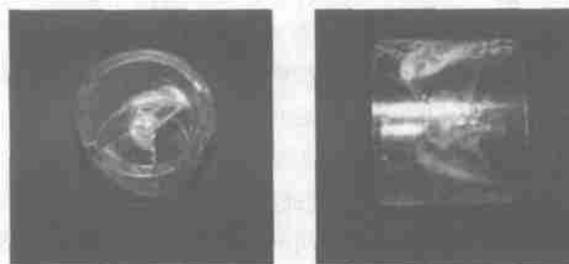


图 2 2[#] 混合元件

Fig. 2 Type 2[#] mixing element configuration

实验流程如图 4 所示。

实验原料为聚丙烯酰胺干粉 (相对分子质量为 1800 万)、水; 实验压力为常压; 实验温度为常温。实验时用泵使聚丙烯酰胺溶液在闭合回路内循环, 用转子流量计测定流量, 用 U 型管压差计测定静态混合器两端的压力降。所用元件的个数: 1[#] 和 2[#] 元件个数分别为 5 个, 3[#] 元件为 4~8 个。

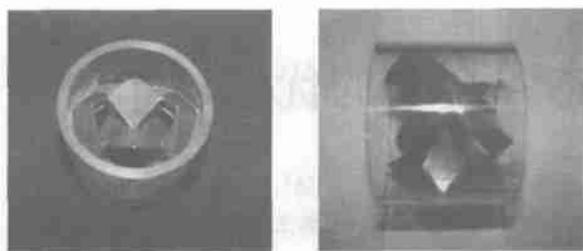


图3 3#混合元件

Fig. 3 Type 3# mixing element configuration

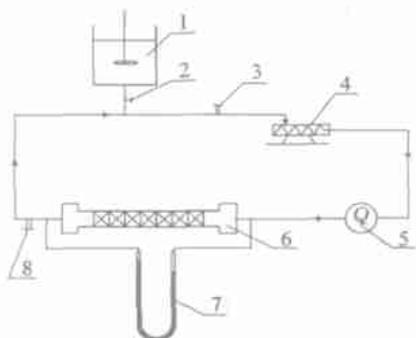
1. 配料槽;2. 控制阀;3. 进料口;4. 泵;5. 流量计;
6. 静态混合器;7. 压差计;8. 取样口

图4 实验流程图

Fig. 4 Flow chart of experimental apparatus

2 结果与讨论

2.1 降解实验

实验方法是在闭合回路中充满质量分数为 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液,使其在该回路中循环一定的时间,然后停泵,在混合器出口处取样,用 RV-旋转黏度计测量溶液的黏度,然后作图计算,分析泵和空管以及元件对该溶液的降解。

为了便于比较三种混合元件对质量分数为 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液的降解大小,使聚丙烯酰胺溶液通过的元件数是相同的。实验测定了两个流速 (0.4 m/s, 0.6 m/s) 下的降低率。由于 1# 和 2# 元件的直径相同,所以流体在装有 1# 和 2# 元件的闭合回路内的循环时间是相同的,以 1# 和 2# 元件在流速为 0.4 m/s 下的混合时间为基准,设定在该流速下,循环时间为 40 min,通过计算,流体通过的元件数为 585 个。以此元件数为基准,可以算出,当流速为 0.6 m/s 时,流体在 1# 和 2# 元件的闭合回路内的循环时间为 26 min,对于 3# 元件,在 0.4 和 0.6 m/s 的流速下,循环时间分别为 27 和 18 min。聚丙烯酰胺溶液在空管和泵内的循环时间分别与上述时间相

同。

首先测定泵和空管对质量分数为 0.5% 聚丙烯酰胺溶液的降解情况,在每次计算出静态混合元件的黏度总降低率后,要扣除泵和空管的平均黏度降低率,才是静态混合元件对质量分数为 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液的实际黏度降低率。

混合元件对聚丙烯酰胺溶液的降解。在静态混合器中,分别放入 5 个 1#、2# 和 3# 元件,循环时间与上述时间相同,对所得数据进行处理,所得数据见表 1。表 1 中,空管和泵黏度降低率是指在不装入混合元件的条件下,当 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液在闭合回路内循环时,空管和泵对该溶液的降低率。元件总降低率是指在装入混合元件的条件下,空管和泵以及混合元件共同对该溶液的降低率。实际降低率是指对于相同的循环时间和混合元件,元件总降低率减去泵和空管的降低率。

表 1 三种混合元件的实际降低率

Table 1 Factual degradation rates for different mixing element

元件名称	个数	循环时间/min	流速/(m/s)	空管和泵降低率/%	元件总降低率/%	实际降低率/%
1#	5	40	0.4	0.613	0.793	0.18
		26	0.6	0.756	1.69	0.934
2#	5	40	0.4	0.613	1.48	0.867
		26	0.6	0.756	2.11	1.354
3#	5	27	0.4	0.37	0.643	0.273
		18	0.6	0.568	0.956	0.388

从表 1 中数据可以看出,三种元件对质量分数为 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液都产生了降低作用,在溶液流经相同的元件个数的条件下,随着流速的增大,元件对溶液的降低率也会相应的增大,这是因为当溶液流经混合元件时,元件产生的速度梯度对溶液产生了剪切作用,使聚丙烯酰胺的分子链断裂,当速度增大时,元件所产生的速度梯度也相应的增大,对溶液的剪切也随着变大。从表中还可以看出,2# 元件的降低率要大于其他两种元件的降低率,这是因为 2# 元件内部的速度梯度要大于其他两种元件。这三种混合元件之所以对聚丙烯酰胺溶液黏度产生黏度降低,还是因为线性柔性链的聚丙烯酰胺溶液在剪切条件下呈假塑性,属非牛顿流体。当溶液受到剪切时,大分子链的部分缠结点被破坏,同时原已

渗透到大分子内部的内含溶剂,在剪切作用下被迫挤出而导致无规线团尺寸减小,由于在线团之间分布了更多的溶剂,而使大分子流动阻力减小,表现为黏度下降^[3]。

当流体通过的元件数不超过 585 个时,三种元件的实际降低率均小于 2%,2%为工业生产所要求的黏度最大降低率。

2.2 压降实验

2.2.1 压降与雷诺数 Re 的关系

在静态混合器中分别放入 5 个 1#、2# 和 3# 元件,在质量分数 w_A 为 0.5% 和 0.1% 的聚丙烯酰胺溶液中,在不同的雷诺数下,分别测量了这三种元件的压降值,将实验结果在对数坐标系下作图,如图 5 所示。由于混合元件内部结构比较复杂,流体在元件内部流动时,雷诺数无法估计,所以就以流体在空管中的雷诺数来表示流经元件时的流动状况。

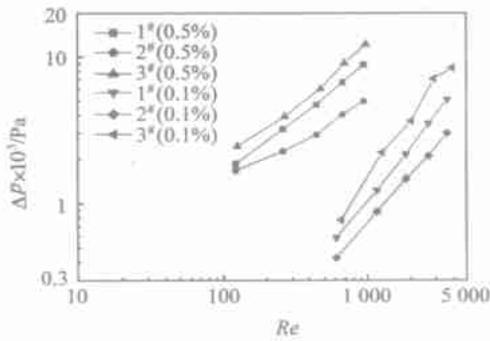


图 5 不同浓度下三种元件压降 p 与雷诺数关系
Fig. 5 Relations between pressure drop and Re for three types of mixing elements at different concentrations

从图 5 中可以看出,对一定浓度的聚丙烯酰胺溶液,随着雷诺数的升高,静态混合器出、入口压降增大,在双对数坐标下,三种元件的压降值与雷诺数基本呈线性关系。根据图 5,可得出不同浓度的聚丙烯酰胺溶液中,三种混合元件的压降值与雷诺数的函数关系式,分别为

$$p = \left\{ \frac{2.802 \times 10^3}{Re^{0.235}} w_A^{0.196} \right\} \frac{u^2}{2g} \quad (1\# \text{ 元件}) \quad (1)$$

$$p = \left\{ \frac{5.517 \times 10^3}{Re^{0.436}} w_A^{0.0153} \right\} \frac{u^2}{2g} \quad (2\# \text{ 元件}) \quad (2)$$

$$p = \left\{ \frac{2.226 \times 10^3}{Re^{0.165}} w_A^{0.084} \right\} \frac{u^2}{2g} \quad (3\# \text{ 元件}) \quad (3)$$

式中, u 为流速, g 为重力加速度, ρ 为密度。

静态混合器中非牛顿流体流动的压降与流体流变行为指数,溶液浓度,静态混合器的几何尺寸和流动雷诺数等因素有关^[4]。由于在实验过程中,静态

混合器的尺寸与流体流变行为指数均为常数,可以将这些常数合并为一项,则压降就只与雷诺数 Re 和质量分数 w_A 有关。可以用公式(1)~(3)来估算在层流区和过渡区内,在质量分数为 0.1% 和 0.5% 时,聚丙烯酰胺溶液在三种混合元件(5 个)中所产生的压降。

由 p 与 Re 之间的关系式(1)~(3)可以看出,在层流区与过渡区内,非牛顿流体压降与雷诺数的关系与牛顿流体有明显的不同。

从图 5 中可以看出,在元件个数都为 5 个的条件下,在不同浓度的聚丙烯酰胺溶液中,随着雷诺数不断增大,三种元件的压降都不断增大。由式(1)~(3)可以看出,当雷诺数相同时,3# 元件 Re 的指数最大,2# 元件的最小。这说明在元件个数、 Re 相同的条件下,3# 元件的能耗最大,2# 元件的能耗最小。流体压降的大小与元件的构型有密切的关系,3# 元件的构型要比 1# 和 2# 元件的构型复杂的多,当流体连续通过 5 个混合元件时,对于 3# 元件,流体在元件内部通过的实际长度不仅要大于通过 1# 和 2# 元件的长度,而且 3# 元件的流通面积小于 1# 和 2# 元件的流通面积,所以消耗于流体与壁面间的摩擦要大于 1# 和 2# 元件,流体产生更多的压力损失,在宏观上表现为能耗增大。

1# 比 2# 元件的压降大,是因为 1# 元件的流通面积比 2# 元件的流通面积小,当流体通过静态混合元件时,流体产生了摩擦阻力损失,其损失值在宏观上表现为压降。

2.2.2 压降与元件个数的关系(3# 元件)

在静态混合器中分别放入 4, 5, 6, 7 和 8 个 3# 元件,在工业流速(0.5 m/s)的实验条件下,根据实验所测数据做出图 6。

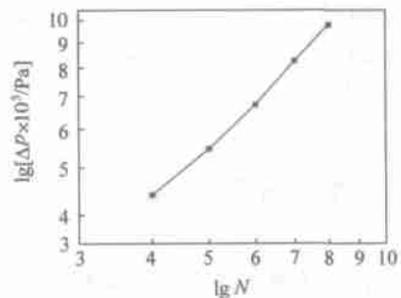


图 6 压降与元件个数 N 关系图(3# 元件)
Fig. 6 Relation between pressure drop and mixing element number (Type 3#)

由图 6 可以看出,在双对数坐标下,压降与元件个数大致呈直线关系,两者之间的函数关系式可写为

$$p = 8.586 \times 10^2 N^{1.162} \quad (4)$$

其中, p 代表压降, Pa, N 代表元件个数。当在静态混合器内,放入不同个数的 3[#] 元件时,可以根据公式(4)估算出在工业流速(0.5 m/s)下,3[#] 元件所产生的压降,最大误差为 2.36%。

2.3 混合实验

2.3.1 取样方法和依据 混合实验的实验方法是在闭合回路内先充满水,然后根据 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液与水质量比为 1:4 的比例,先排出一定量的水,再加入相同量的聚丙烯酰胺溶液,使聚丙烯酰胺溶液在回路内的质量分数为 0.1%,采用一次性加料方式,使该二元溶液在回路内循环一定的时间,然后停泵,在混合器出口处取样,测量混合液的黏度,取相近的间隔时间,重复此实验步骤,测定黏度值随混合时间(循环时间)的变化,当混合时间较短时,由于物料浓度的不均匀,导致其黏度值随时间变化。当混合时间增加到某一时刻之后,黏度值不再随时间变化。如果连续三次取样,所测混合液的黏度值相等,认为该二元溶液已经混合均匀。

在降解实验中可以看出,在相当长的一段时间内,这三种混合元件对聚丙烯酰胺溶液的降解很小,在混合实验中,流体在闭合回路内的循环时间很短,这三种混合元件对聚丙烯酰胺溶液的降解影响可以忽略不计,可以认为溶液的黏度值不发生变化。

图 7 为某次取样结果,可以看出,从 $t = 130$ s 开始,溶液黏度值不再随时间变化,可认为混合达到均匀,混合时间为 130 s。

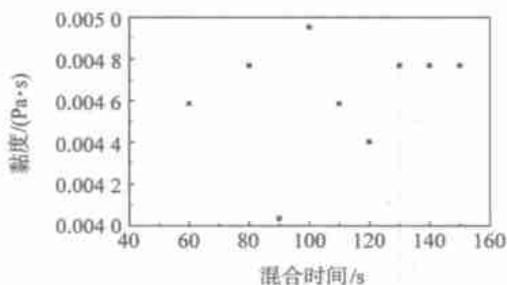


图 7 黏度与混合时间关系曲线图

Fig. 7 Relation between viscosity and mixing time

2.3.2 不同元件的混合时间及混合效果图 在静态混合器中分别放入 5 个 1[#]、2[#] 和 3[#] 元件,测得混合时间见表 2。

表 2 三种元件混合性能对比表

Table 2 Mixing performances for three types of mixing elements

元件名称	每单元个数	混合时间/s	Re	总元件数
1 [#]	5	480	1 189.94	158
2 [#]	5	440	1 189.94	128
3 [#]	5	200	1 294.64	62

表 2 中的混合时间是指 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液和水在闭合回路内循环时,达到混合均匀时,所需要的时间。可以看出,当完成相同的混合任务(黏度值不再随时间变化)时,3[#] 元件所需要的元件数最少,混合时间最短,所以,3[#] 元件的混合效果最好,同样,1[#] 元件的混合效果最差。此外,采用摄像方法,拍摄示踪剂在不同静态混合器中的流动与混合状态。三种元件的混合效果如图 8 所示。

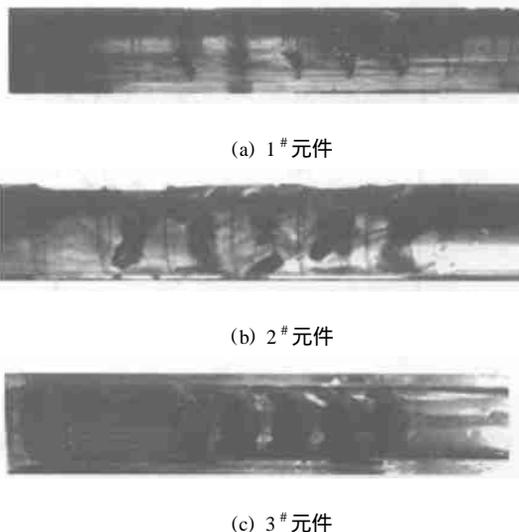


图 8 元件混合效果图

Fig. 8 Mixing effect chart of type

在图 8 中,示踪溶液均从右端进入混合器,再从左端离开混合器。对于 1[#] 元件,当流体通过元件时,元件对流体进行了切割,并没有对流体产生旋转,只是细化了流束,质点在管道内的相对位置没有发生很大的变化,流体的流动方向基本没有改变,还会沿着原来的流动方向继续通过下一个混合元件,致使流体之间不能进行充分的混合,并没有加剧对流体的湍动,所以两相流体之间的接触面积并没有增大,传质速率没有提高,所以混合效果最差;对于 2[#] 元件,当流体通过静态混合元件时,混合元件对流体进行了切割,使流体时而左旋,时而右旋,不断改变流体的方向,流体流过多个混合元件时,流动方

向不断的发生变化,流动的剧烈程度不断增大,增大了流体之间的接触面积,提高了传质效果,促进了流体之间的进一步混合,虽然此混合元件对流体产生的旋转作用比较明显,但是其切割作用不是很明显,两相流体之间的接触面积并不是很大,但是要强于 1[#] 静态混合元件。3[#] 元件的混合方式是当两相流体通过元件时,元件对流体产生切割的同时,还使流体流动方向发生变化,不但将周边的流体推向中心,而且将中心的流体推向周边,从而获得良好的径向混合效果,管内无死区亦不发生短路现象。与此同时,在相邻元件连接处的界面上流体亦会发生自旋,这种完善的径向环流混合作用,使流体在管子横截面上的速度梯度明显降低,从而获得良好的两相流体的混合效果。

根据压降和混合实验数据和混合效果图进行对比,在工业中,推荐使用 2[#] 和 3[#] 元件。

2.3.3 实际单元个数与每单元元件个数关系(3[#] 元件) 在工业流速的实验条件下,改变每组单元元件的个数,进行混合实验,测定达到相同混合程度所需的混合时间,并计算出实际所需单元数,实验结果见图 9。

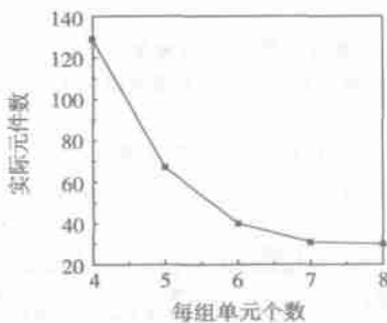


图 9 实际元件数与每组元件个数关系(3[#] 元件)

Fig. 9 Relation between factual numbers and each unit numbers of type 3[#] mixing element

对聚丙烯酰胺溶液和水起混合作用的不仅有混合元件还有泵,可以把泵对该二元体系的混合折算成相当于多少个混合元件对该二元体系的混合,当流体在闭合回路内循环时,可以计算出流体通过混合元件的总个数,再加上所折算的混合元件的个数,就是流体通过的总混合元件个数。

图 9 表示,在完成相同的混合任务时,不同的单元个数的组合所需要的实际单元数。从图 9 中可知,随着一组单元数的增加,实际元件个数逐渐减

少。当一组组合单元数超过 7 个时,再增加每组混合元件个数,所需的实际元件个数已基本不再变化,所以每组单元个数最少不低于 7 个。当元件个数超过 7 个时,每组单元的个数对混合效果没有影响。实验结果表明,当元件个数为 7 个时,混合时间为 50 s,混合均匀,所经过的最少实际单元数为 30 个。

3 结论

(1) 三种混合元件都是低降解的静态混合器,当混合元件的个数不超过 585 个时,黏度降低率均小于 2%,都达到了工业生产的要求,其中 3[#] 元件的降解最小,2[#] 元件的降解最大。

(2) 混合实验表明:对于聚丙烯酰胺溶液,3[#] 元件的混合效果最好,1[#] 元件最差,所以综合起来,推荐使用 2[#] 和 3[#] 元件。

(3) 在质量分数为 0.5% 和 0.1% 的聚丙烯酰胺溶液中,三种元件的压降与雷诺数和浓度有关。在相同的 Re 和 w_A 下,其中 3[#] 元件的压降最大,2[#] 元件的压降最小。

(4) 对于 3[#] 元件,压降与元件个数的 1.162 次方成正比。

(5) 对于 3[#] 元件,当一组组合单元数达到 7 个时,所需的实际元件个数降至最少,建议在工业中应用时,一组单元个数应取 7 个。对 0.5% 的聚丙烯酰胺溶液与水质量 1:4 混合,达到混合均匀时,所需元件个数不少于 30 个。

参 考 文 献

- [1] 朱锡锋. 低剪切静态混合器的研究与设计[J]. 化工装备技术, 1998, 19(1): 1 - 3
- [2] 石在虹, 潘国臣, 张大伟, 韩义, 张秋丽. 旋流与分割相结合式静态混合器实验研究[J]. 钻采工艺, 1999, 22(1): 35 - 37
- [3] 张凤莲, 张贞浴, 陈九顺, 冯忠梅. 聚丙烯酰胺溶液黏度的研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 1996, 13(2): 106 - 109
- [4] 许国军, 冯连芳, 李允明, 王凯. 静态混合器中非牛顿流体的压力降和摩擦因子[J]. 合成橡胶工业, 1996, 19(2): 97 - 99
- [5] 阳洁. 静态混合器的选择及设计应用[J]. 化工装备技术, 1999, 20(2): 24 - 28

(下转第 31 页)

解出的微碳粒子也就越多,颜色也就越深。修饰剂中不饱和基团受紫外-可见光辐射产生 $n \rightarrow \pi^*$ 跃迁在近紫外区和可见光区形成吸收峰。其中在可见光区形成的吸收峰即导致产品呈肤色而不是白色。

(5) 该法合成的肤色 ZnO 平均粒径为 70 nm, 类球形, 分散性好, 有机物含量少, 在化妆品、医药、涂料等领域有较好的应用前景。

参 考 文 献

[1] 李国辉, 李春忠, 朱以华. 防晒化妆品用纳米氧化钛的

表面处理及紫外吸收性能[J]. 化学世界, 2000(5): 59 - 63

[2] 李士英, 路凯, 阮红洁. 紫外线对人体的伤害与防晒化妆品[J]. 卫生研究, 2001, 30(5): 319 - 320

[3] 顾达, 顾艳芳, 胡黎明. 超细肤色氧化锌制备的新工艺研究[J]. 粉体技术, 1996, 2(3): 27 - 30

[4] 李晓娥, 屈宪军, 韩胜, 等. 纳米肤色氧化锌的制备新工艺研究[J]. 化学工程, 2002, 30(2): 41 - 44

[5] 王宗孝, 张维祥, 高霏如. 简明仪器分析[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1989

Preparation of nanometer complexional ZnO by high gravity and its characterization

Cai Yi-wen Wu wei Chen Jian-feng

(Research Center of the Ministry of Education for High Gravity Engineering and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A new technics for preparation of nanometer complexional ZnO was studied. The modification and anti-UV radiation mechanisms were analyzed on the basis of characterization of IR spectrum, TEM and XRD techniques. The nanometer complexional ZnO prepared by high gravity possesses small nano-size, better dispersion ability and stronger anti-UV radiation ability. The nanometer complexional ZnO can be extensively used in the fields of cosmetic, medicine and paint.

Key words: high gravity; complexional zinc oxide; characterization

(责任编辑 云志学)

(上接第 27 页)

Choice of static mixers for the third oil extraction

He Hao-miao¹ Huang Xiong-bin¹ Xiao Shi-xin¹ Xu De-gang²
Zhou Hong-yan² Zhao Qiang²

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Daqing EOR Equipment Corporation, Heilongjiang Saertu 163453, China)

Abstract: Three types of static mixers were selected. Experiments were carried out on the processes of shear thinning and mixing. In this paper, the effect of different types of mixing elements on the shear thinning of PAM solution with a concentration of 0.5% (mass percentage) and the relations between pressure drop and Re with different mixing elements at different concentrations were obtained. The mixing effects of different mixing elements were investigated. In industrial velocity of flow (0.5 m/s), the relation between pressure drop and number of mixing elements (Type 3 # element) and the relation between factual numbers and each unit numbers of Type 3 # element were obtained. The result showed that the degree of shear thinning and mixing effects of them reached the industrial requests. Finally, Type 2 # and Type 3 # element were recommended in industry.

Key words: static mixer; polyacrylamide; shear thinning; mixing

(责任编辑 云志学)