

《注水井调驱用聚合物微球》

编制说明

(征求意见稿)

编制单位：长庆油田分公司油气工艺研究院
中国化工学会、西安长庆化工集团有限公司
西安石油大学、中科院理化技术研究所

编制日期：2025 年 11 月

《注水井调驱用聚合物微球》

编制说明

一、任务来源

（一）任务来源

本标准由中国化工学会提出并归口，由长庆油田分公司油气工艺研究院牵头制定。

（二）标准制定的目的和意义

低渗透油田受储层致密、非均质性强等特征限制，水驱效率明显低于中高渗油田，常规调驱剂难以有效注入。为改善水驱开发效果，自 2010 年起，长庆油田率先开展了低渗透油田改善水驱技术研究，形成了以聚合物微球为核心关键产品的深部调驱技术，截止目前，已累计实施微球深部调驱 3 万余井次，药剂使用量超过 20 万吨，累计增油超过 250 万吨，累计降水超过 200 万方，实施区自然递减率由 13.4%↓10.8%，被认为是长庆老油田持续稳产的关键利器之一。近年来，受长庆油田低渗透油田聚合物微球改善水驱技术示范影响，华北油田、辽河油田也在开展聚合物微球改善水驱的试验，华北油田工作量 500 口，辽河油田工作量 74 口。新疆油田、吐哈油田等低渗透油藏，聚合物微球改善水驱技术还属于起步阶段，年工作量 50 口以下，至此，该项技术的应用范围已扩大至全国各大油田。

为确保聚合物微球产品质量，保障调驱控水效果，前期严格依据行业标准 SY/T 7812-2024、中石油企业标准 Q/SYCQ 8024-2023 中的技术指标要求及评价方法，开展产品质量检测，实现了年均超 20 万吨的聚合物微球产品的质量管控。随着油田开发的深入，以及聚合物微球调驱技术在全国各大油田规模化应用，现有标准在耐盐性能、无机盐含量控制、油藏深部封堵效能等关键指标方面亟待进一步强化。为此，有必要制定一套适用于低渗透油藏调驱用聚合物微球的专项检测与评价技术规范，以持续提升产品质量一致性、增强调驱开发效果，为油田稳产增产提供技术支撑。

总之，通过制定注水井调驱用聚合物微球团体标准，一是全面提升企业竞争力和品牌影响力，增强市场竞争力；二是通过制定团体标准，能够整合多个企业的资源和研发力量，促进聚合物微球深部调驱技术持续发展和技术创新，推动科技成果的市场化和产业化；三是通过制定团体标准，可以进一步规范产品设计、生产制造、现场使用全过程质量控制的要求；四是通过团体标准还可以进一步规范不同国家和地区企业之间的技术差异，促进技术交流和国际合作，为后期技术规范升级为国际标准积累前瞻性应用数据。

二、起草工作简要过程

按照中国化工学会标准制修订程序的要求，《注水井调驱用聚合物微球》团体标准的编制完成了以下工作：

（一）资料的收集

在标准编制过程中，起草工作组收集了以下资料：

- 《注水井调驱用聚合物微球》团体标准的适用范围、规范性引用文件、术语和定义、技术要求、仪器与试剂、检验方法、检验规则、健康安全环境控制要求等资料；
- 注水井调驱用聚合物微球的产品性能、调驱机理、研制配方等技术资料；
- 关于聚合物微球产品技术指标的室内实验数据、现场应用数据；
- 现行行业标准 SY/T 7812-2024《调驱用聚合物微球评价方法》、中石油企业标准 Q/SYCQ 8024-2023《注水井调驱用纳米聚合物微球技术规范》及其他相关规范性引用文件；
- 应用市场调研数据及相关专利信息。

（二）标准的起草

- 1. 2024 年 8 月至 2024 年 12 月，项目组完成了相关资料调查收集，完成标准的前期预研工作。
- 2. 2025 年 1 月，召开标准启动会，成立起草工作组，编写了项目的工作进度安排表，制定了各个阶段工作目标并落实到人员，正式启动《注水井调驱用聚合物微球》的团体标准编制工作。
- 3. 2025 年 2 月至 2025 年 9 月，工作组成员根据启动会讨论内容和要求，开展验证试验，按照标准指标项要求，开展了产品指标数据验证试验，并在此基础上统一各方意见，形成标准征求意见稿。

（三）主要参加单位和工作组成员

标准起草单位为长庆油田分公司油气工艺研究院、西安长庆化工集团有限公司、中国化工学会、西安石油大学、中科院理化技术研究所具体情况如表 1 所示。

表 1 主要参加单位和工作组成员表

成员姓名	所在单位	专业方向	邮箱
郑力军	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	zhlj_cq@petrochina.com.cn
杨海恩	西安长庆化工集团有限公司	油气田开发	yhe_cq@petrochina.com.cn

武宝强	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	wubaoqiang_cq@petrochina.com.cn
吕宝强	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	lbaoq_cq@petrochina.com.cn
吴天江	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	wutianjiang_cq@petrochina.com.cn
刘云龙	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	liuyunl_cq@petrochina.com.cn
程芳	西安长庆化工集团有限公司	油气田开发	chenfang_cq@petrochina.com.cn
张荣	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	zhangr2_cq@petrochina.com.cn
王腾	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	wangtengl_cq@petrochina.com.cn
朱家杰	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	zhjj2_cq@petrochina.com.cn
王骏	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	wangj297_cq@petrochina.com.cn
陈佳俊	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	chjj_cq@petrochina.com.cn
曾立祥	西安长庆化工集团有限公司	油气田开发	zlixiang_cq@petrochina.com.cn
叶智	西安长庆化工集团有限公司	油气田开发	yez0_cq@petrochina.com.cn
赵文景	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	zhaowenjingl_cq@petrochina.com.cn
王燕	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	wyan100_cq@petrochina.com.cn
高辉	西安石油大学	油气田开发	ghtopsunl@163.com
任建科	长庆油田分公司油气工艺研究院	油气田开发	rjk725_cq@petrochina.com.cn
施盟泉	中科院理化技术研究所	水溶性 高分子材料	shimengquan@mail.ipc.ac.cn
南宇	西安长庆化工集团有限公司	油气田开发	nanyu_@petrochina.com.cn

三、编写原则和确定标准主要内容的依据

（一）标准的编写原则

- 本标准内容符合现行的国家法律、法规及强制性国家标准，与相关的石油行业标准、化工行业标准呈协调衔接性。
- 本标准所述技术内容均建立在科学理论和实验验证的基础上，并代表了当前技术的先进水平。
- 本标准所述内容适用于国内大多数生产企业、设备与检测能力，具有可执行、可操作性。
- 本标准的文本结构、编写格式，严格遵守 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定。

（二）确定标准主要内容的依据

注水井调驱用聚合物微球的技术要求如表 2 所示：

表 2 聚合物微球产品的技术指标

项 目		指 标		
		WQ50	WQ100	WQ300
外观		淡黄色至黄色均匀透明液体		
密度（25℃） / （g/cm ³ ）		0.900~1.100		
原液粘度（25℃） / （mPa·s）		2000		
初始粒径	粒径中值 D ₅₀ /nm	设计值×（1±40%）		
	最频粒径的频度/%	12		
可分离固形物含量/%		18	20	20
低剪切速率粘度/mPa·s （25℃，1wt%，SSA18/13R，0.01rpm）		250000	60000	500
聚合物固形物粉末分散液电导率/（μS/cm）		20		
硫元素含量/%		2.0		
封堵性能/%		80.0		

调驱用聚合物微球的具体技术指标论证依据如下：

1. 对聚合物微球外观指标进行论证

（1）聚合物微球外观指标评价方法

在自然光下，取 50.0 mL 试样于 100 mL 比色管中目测。

（2）测试结果及论证说明

从聚合物微球的外观能够初步界定产品形态、提供快速直观的质量判据，并确保产品的应用可靠性。

由图 1 可知，三种聚合微球的外观均呈现淡黄色至黄色均匀透明液体。由于聚合过程中使用的偶氮类引发剂微量分解产物、单体中微量的杂质（如铁离子），均属于黄色来源，该颜色特征是此类合成工艺的典型特征。根据胶体与界面化学的丁达尔效应，当颗粒粒径小于可见光波长时，光线会发生散射，使得乳液呈现半透明或乳光状态，成功的反相乳液聚合微球粒径介于几十到几百纳米之间，粒径越小、分布越窄，体

系越均一，宏观上则表现为“均匀透明”的液体。

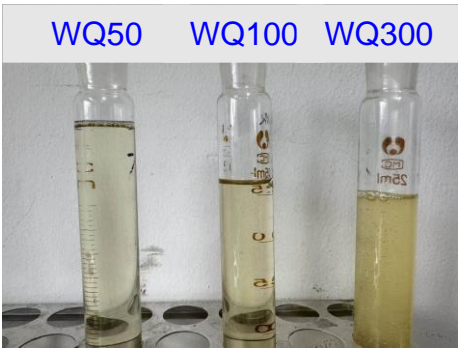


图 1 不同类型聚合物微球产品的外观图

2. 对聚合物微球原液粘度指标进行论证

(1) 聚合物微球密度指标评价方法

按 GB/T 4472—2011 中 4.3.3 密度计法的规定在 25℃下进行测定。

(2) 测试结果及论证说明

聚合物微球的密度指标决定了聚合物微球注入液在地面配制和井下注入过程中是否具备良好的悬浮稳定性，从而保障均匀注入和深部运移。根据斯托克斯沉降定律，当颗粒密度与悬浮液流体密度无限接近时，沉降速率接近于 0。设置指标下限为 0.9g/cm³ 目的在于防止密度过低导致产品上浮分层，且制备密度过低的产品技术难度大，即需要引入空心结构或超轻填料，可能牺牲产品的机械强度、增加成本投入；因聚丙烯酰胺材料的密度普遍略大于水，存在沉降风险，不同粒径的聚合物微球，密度增加 100kg/m³，沉降速率呈正比例增加趋势，以 300nm 微球为例，在清水中的沉降速率为 0.42mm/天，短期稳定性较好，长期静置储存将缓慢分层。同时，收集多个生产厂家的三种聚合微球产品，检测的密度指标均处于 0.9~1.1g/cm³ 之间，因此，设置指标上限为 1.1g/cm³。

表 3 不同类型、不同密度的聚合物微球产品在清水中的沉降速率

项 目	密度	清水体系沉降速率	
	g/cm ³	×10 ⁻⁹ m/s	mm/天
WQ50	1.1	0.136	0.0118
	1.2	0.272	0.0235
	1.3	0.408	0.0353

WQ100	1.1	0.54	0.047
	1.2	1.09	0.094
	1.3	1.63	0.141
WQ300	1.1	4.9	0.42
	1.2	9.8	0.85
	1.3	14.7	1.27

表 4 不同单位的聚合物微球产品密度指标

项 目	单位	指 标		
		WQ50	WQ100	WQ300
长庆油田	g/cm ³	0.984	0.998	0.997
		0.989	0.997	1.013
		0.992	0.997	1.008
甘肃中科	g/cm ³	0.986	0.994	0.998
		0.99	1.015	0.101
西安万德	g/cm ³	0.980	0.991	
		0.982	0.988	
		0.980	0.991	
爱森	g/cm ³	0.998	0.992	0.995
		0.996	0.993	0.991
		0.997	0.990	0.997
陕西日新	g/cm ³	1.020	0.982	0.976
		1.020	0.985	0.981
		1.025	0.987	0.979
江苏富淼	g/cm ³	0.989	0.978	
		0.987	0.980	

		0.990	0.979	
焦作宏达力	g/cm ³	0.990	0.985	
		0.989	0.984	
		0.980	0.985	
		0.974		
		0.981		
咸阳石化	g/cm ³	0.970		
		0.971		
		0.973		

3. 对聚合物微球原液粘度指标进行论证

(1) 聚合物微球原液粘度评价方法

量取 100.0mL 试样,精确至 0.01mL,置于 250mL 烧杯中。将烧杯置于 25℃水浴锅中保温 30min 后取出,待气泡消失后备用。开启布氏粘度计,将 UL 转子与粘度计相连,设定转速为 6r/min,量取 15.0mL 试样,精确至 0.01mL,置于测量筒中。将测量筒安装至粘度计,恒温 10min 后开始测试,待显示值相对稳定后读取粘度数值。

取 3 次平行测定结果的算术平均值为测定结果,3 次平行测定结果的相对标准偏差应不大于 5.0%。

(2) 测试结果及论证说明

聚合物微球的原液粘度决定了聚合物微球的注入性,现场施工过程中通常使用柱塞泵、搅拌器将微球原液输送至管道进行稀释、混合。根据达西-韦斯巴赫公式,摩擦损失与液体的粘度成正比,粘度越高,液体内部以及液体与管壁之间的剪切力越大,流动阻力就越大。原液粘度过高,流动阻力增大,超过注入泵的额定压力,将导致无法正常施工,需要更换大功率的输送设备,额外增加设备成本。此外,高粘度的原液配液分散性不足,聚集体无法有效进入孔隙喉道,在岩心剖面形成滤饼,污染地层。注入液在地面配制和井下注入过程中是否具备良好的悬浮稳定性,从而保障均匀注入和深部运移。设置在 25℃、6rmp 的转速下原液粘度<2000mPa·s,确保了低剪切条件下流体泵送的启动流动性,将柱塞泵的系统工作压力控制在一个安全、合理且经济的范围内,确保注入过程的平稳、高效,并保护设备免于过载损坏。

表 5 不同单位的聚合物微球产品表观粘度指标

项 目	单位	指 标		
		WQ50	WQ100	WQ300
长庆油田	g/cm ³	265	158	324
	g/cm ³	347	247	456
	g/cm ³	142	1912	378
甘肃中科	g/cm ³	294	416	658
	g/cm ³	169	158	324
西安万德	g/cm ³	146		

4. 对聚合物微球初始粒径指标进行论证

(1) 聚合物微球初始粒径评价方法

称取 0.5g 试样，精确至 0.01g，置于洁净的 250mL 烧杯中，加入 100mL 的正十五烷，设置磁力搅拌器转速为 $300\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，搅拌 10min，随后放入超声波清洗机中超声分散 5min 备用。按照激光粒度仪操作规程测定试样的粒径中值，记为 D50，并记录最频粒径的频度。

(2) 测试结果及论证说明

“初始粒径”是指聚合物微球颗粒的初始平均尺寸，决定了产品的可进入孔喉尺度大小与深部运移能力，是评价聚合物微球产品至关重要的一项指标。对初始粒径的控制应体现在对其粒径大小和粒径分布两方面。粒径中值和最频径的频度分别反映聚合物微球粒径的大小和分布状态，其中，粒径中值是指一个样品的累计粒度分布百分数达到 50%时所对应的粒径，对限制粒径中值进行能够保证聚合物微球的产品质量，最频径的频度是指频率分布曲线的最高点对应的粒径数量占微球所有颗粒总数量的比值，是衡量粒径分布集中与否的关键指标。

参考行业标准 SY/T 7812-2024《调驱用聚合物微球评价方法》，选择正十五烷作为分散溶剂，对西安长庆化工集团等单位提供的 130 个聚合物微球样品初始粒径指标进行测试，对测试结果中的粒径中值相对于设计值的相对偏差百分数进行统计，测试结果如图 2 所示，130 个聚合物微球样品中有 11 个样品的粒径中值相对于设计值的相对偏差百分数超过 $\pm 40\%$ ，对于本标准所述聚合物微球产品，粒径中值 D_{50} 设置为“设

计值 $\times(1\pm 40\%)$ ”能保证80%以上的产品符合指标要求。

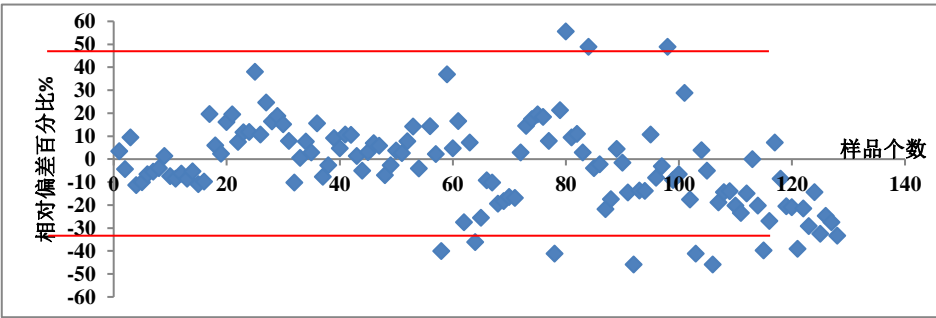


图 2 聚合物微球样品初始粒径测试结果离散程度统计

图 3 展示了不同聚合物微球样品的粒径分布曲线。当分布曲线的最高点对应的粒径数量占微球所有颗粒总数的比值，即最频径的频度大于等于 12.0%时，粒径分布曲线呈现出单峰，服从正态分布，产品质量较好。最频径的频度设置为“ $\geq 12.0\%$ ”能保证80%的产品符合指标要求。

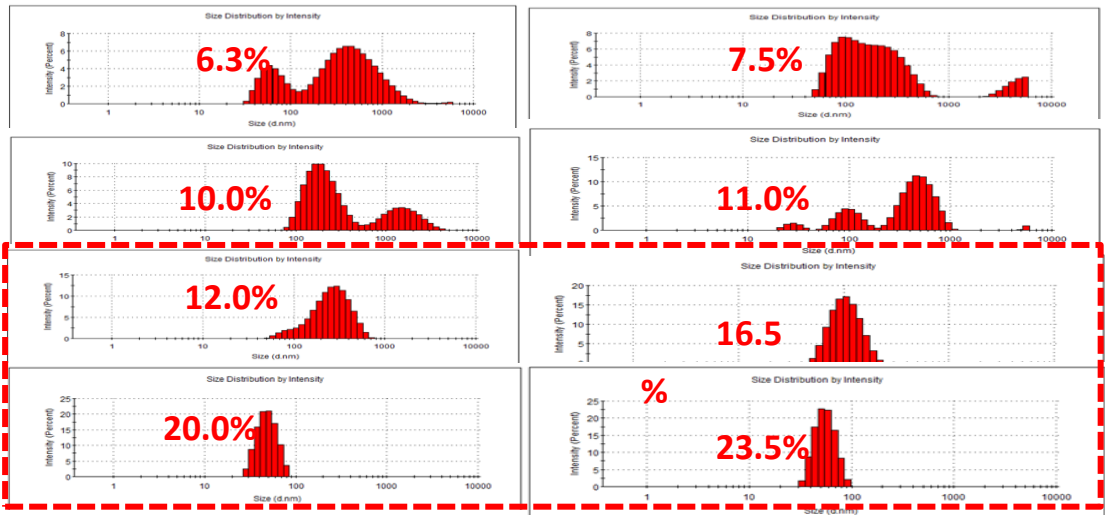


图 3 不同类型的聚合物微球样品粒径分布结果

5. 对聚合物微球的可分离固形物含量指标进行论证

(1) 聚合物微球可分离固形物含量评价方法

将称量瓶和一张定量滤纸置于 105℃ 的电热恒温干燥箱中干燥 2h, 称其总质量, 记作 m_1 , 精确至 0.0001g。

称取 10g (记为 m) 试样, 精确至 0.0001g, 置于烧杯中, 在玻璃棒搅拌下一次性加入无水乙醇 100mL, 持续搅拌 5min, 备用。

安装抽滤装置开始过滤, 按照 10mL/次量取无水乙醇, 洗涤烧杯及玻璃棒三次, 将试样溶液完全转移

至滤纸表面。抽滤结束，将滤渣及滤纸同时转移至称量瓶中，置于 75℃恒温干燥箱中 2h，取出后置于干燥器中冷却至室温，称量其总质量（记为 m_2 ），精确至 0.0001g。

可分离固形物含量 C ，以%（质量分数）表示，按式（1）计算：

$$C = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

m_2 ——烘干后滤饼、称量瓶和滤纸的总质量，单位为克（g）；

m_1 ——空称量瓶和滤纸质量，单位为克（g）；

m ——试样质量，单位为克（g）。

取 3 次平行测定结果的算术平均值为测定结果，3 次平行测定结果的相对标准偏差应不大于 2.0%。

（2）测试结果及论证说明

可分离固形物是指聚合物微球产品中实际发挥作用的微凝胶颗粒含量的多少，从驱油性能要求来看，可聚合物微球产品分离固形物含量越高，驱油性能越好。受聚合工艺影响，反相乳液聚合法合成的聚合物微球可分离固形物含量一般在 25%以下（可分离固形物含量超过 25%时，在聚合过程中易发生暴聚），但是为了保证聚合物微球充分发挥调驱作用，控制产品质量，需设置合理的指标控制要求。参考行业标准 SY/T 7812-2024《调驱用聚合物微球评价方法》，选择乙醇作为有机萃取剂，对西安长庆化工集团等单位提供的不同聚合物微球样品的可分离固形物含量进行测试，结果如表 6-8 所示，规格为 WQ50 的 75 个检测样本，可分离固形物含量均大于 18%，WQ100 与 WQ300 的所有检测样品可分离固形物含量均大于 20%，因此，设置 WQ50、WQ100 与 WQ300 的可分离固形物含量分别大于 18%、20%、20%。

表 6 聚合物微球 WQ50 样品可分离固形物含量

微球样品	可分离固形物含量 (%)			微球样品	可分离固形物含量 (%)		
陕西日新	18.8	19.96	18.82	长庆油田	21.72	24.57	22.22
甘肃中科	22.94	21.60	21.67		24.44	22.42	22.56
西安凯尔文	21.75	21.98	21.31		23.56	20.54	20.51

大连天源基	21.27	21.58	21.45		/		
江苏富淼	21.81	18.82	20.41	焦作宏达力	20.93	22.15	21.10

表 7 聚合物微球 WQ100 样品可分离固形物含量

微球样品	可分离固形物含量 (%)			微球样品	可分离固形物含量 (%)		
山东诺尔	25.64	23.87	24.51	长庆油田	23.45	24.46	23.54
山东科兴	24.11	24.40	25.45		29.07	25.68	28.96
西安凯尔文	23.81	25.36	26.24		26.29	26.28	27.70
大连天源基	27.40	30.09	28.68	河北光大	30.23	31.80	29.32
陕西日新	27.95	28.65	28.16	江苏富淼	24.16	26.19	24.93

表 8 聚合物微球 WQ300 样品可分离固形物含量

微球样品	可分离固形物含量 (%)			微球样品	可分离固形物含量 (%)		
爱森	26.94	27.48	27.33	长庆油田	23.44	24.78	23.68
陕西日新	24.69	25.76	25.68		24.89	24.43	25.04
长庆油田	28.82	27.05	28.64		26.54	26.62	26.35

6. 对聚合物微球低剪切速率粘度指标进行论证

(1) 聚合物微球低剪切速率粘度评价方法

称取 19.8g 去离子水，精确至 0.01g，置于 100 mL 烧杯中。将烧杯置于磁力搅拌器上保持 $400\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速，搅拌下产生稳定旋涡，将 0.2 g 称量好的固形物粉末缓慢倒入旋涡中，确保无粘壁和团聚，持续搅拌 5 h，置于 25°C 水浴锅中保温 30min 后取出，待气泡消失后备用。

开启布氏粘度计，将 UL 转子与粘度计相连，设定转速为 0.01r/min，量取 6.7mL 试样于 SSA18/13R 样品测量筒中，安装至粘度计，水浴 25°C 恒温 15 min 开始测试，待显示值相对稳定后读取粘度数值。

取 3 次平行测定结果的算术平均值为测定结果，3 次平行测定结果的相对标准偏差应不大于 5.0%。

（2）测试结果及论证说明

低剪切速率粘度，指低转速下聚合物微球水溶液（质量浓度为 1%的）的表观粘度，能够模拟和预测聚合物微球在油藏深部多孔介质中真实流动与封堵行为。由于流体在油藏深部微米级孔隙中流动极慢，剪切速率很低，通常小于 10s^{-1} ，大量的微球聚集体容易形成可逆的动态物理网络结构，且微球水化膨胀进一步增强空间网络结构，产生“结构粘度”，增加该指标，有利于评价颗粒间聚集堆积产生的粘滞阻力对扩大水驱波及的贡献。由表 9 可知，随着粒径的减小，低剪切速率显著增加，粘滞阻力越明显，基于检测结果设置低剪切速率粘度指标要求，即：WQ50 的低剪切速率粘度均大于 $250000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，WQ100 的低剪切速率粘度均大于 $60000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，WQ100 的低剪切速率粘度均大于 $500\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

表 9 聚合物微球样品低剪切速率粘度

单位	低剪切速率粘度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)		
	WQ50	WQ100	WQ300
长庆油田	287100	64300	900
甘肃中科	293450	65100	780
西安万德	291580	61800	850

7. 对聚合物微球固形物粉末分散液电导率指标进行论证

（1）聚合物微球固形物粉末分散液电导率评价方法

称量 0.10g 固形物粉末置于 100mL 烧杯中，加入 99.9g 去离子水配制成质量浓度为 0.1%的固形物粉末去离子水分散液，放在磁力搅拌器上，设置转速为 $800\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，恒速搅拌 3 小时，采用电导率仪测定试样的固形物粉末电导率。

每个样品做 3 个平行样，取算术平均值为测定结果，单个试样测定值与算术平均值的相对偏差不大于 5%，否则应重新取样测定。

（2）测试结果及论证说明

固形物粉末分散液，指经过乙醇萃取的纳米聚合物微球，干燥得到的固体粉末重新分散在水相中，形成的分散液体系。由于现用乙醇沉淀法难以有效去除无机盐、硫脲等杂质组分，严重影响聚合物微球的分离固形物含量、硫元素含量等指标的检测准确性，并且过量添加丙烯酸单体加剧聚合物微球团聚与降解，评价其电导率能够监测微球产品中无机盐杂质与丙烯酸的含量，从而判断产品的纯度，确保产品耐盐性和

长效封堵性。由表 10 可知，三种规格的聚合物微球的固形物粉末电导率均小于 20 μS/cm，因此，设置该指标范围，能确保 90%以上的产品符合指标要求。

表 10 聚合物微球样品固形物粉末分散液电导率

单位	固形物粉末分散液电导率 (μS/cm)		
	WQ50	WQ100	WQ300
长庆油田	11.44	4.29	5.61
甘肃中科	11.48	4.12	5.58
西安万德	11.43	4.38	5.61

8. 对聚合物微球硫元素含量指标进行论证

(1) 聚合物微球硫元素含量评价方法

首先，取一定量试样的固形物粉末碾碎，然后用 100 目标准筛过滤，收集过滤出的粉末置于 105℃烘箱中 1h，转移至干燥器中冷却至室温，备用。

称取 0.003g 磺胺嘧啶，精确至 0.0001g，按照元素分析仪操作规程对其进行标定。

称取 0.004g 过筛的固形物粉末（记为 m_0 ），精确至 0.0001g，放入自动进样器，对样品进行自动检测，结果记为 m_1 。

硫元素含量 S，以%（质量分数）表示，按式（2）计算：

$$S = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

m_1 ——硫元素质量，单位为克（g）；

m_0 ——试样质量，单位为克（g）。

取 3 次平行测定结果的算术平均值为测定结果，3 次平行测定结果的相对标准偏差应不大于 5.0%。

(2) 测试结果及论证说明

对于聚合物微球而言，硫元素含量与耐盐单体 AMPS 添加量存在一致性，硫元素含量决定了产品的耐盐性，且检测固形物中硫元素含量，能够有效避免溶剂中含硫杂质的干扰，通过元素分析仪能够快速、准确地检测 S 元素含量，被认为是最快捷简便的方法，考虑到转化率的影响，检测结果往往与理论值存在偏差，

室内实验表明，当硫元素含量要求 $\geq 2.0\%$ 时，AMPS 的添加量需 $\geq 4.8\%$ ，此时，产品的耐盐性接近 10g/L 。

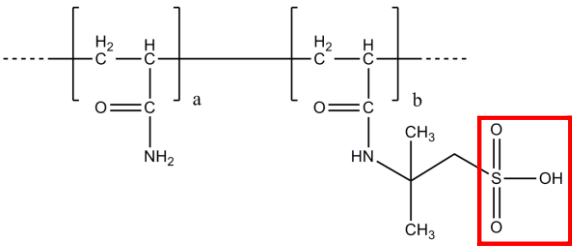


图 4 聚合物微球的分子结构

表 11 元素分析仪测试结果与理论值的比对

AMPS 占原液含量 (%)	S 元素占固形物理论值 (%)	美国热电 (%)	德国元素 (%)
0	0.000	0.06	0.536
3.7	2.696	1.106	1.391
5.6	3.781	3.383	3.349
7.4	4.992	3.739	3.589

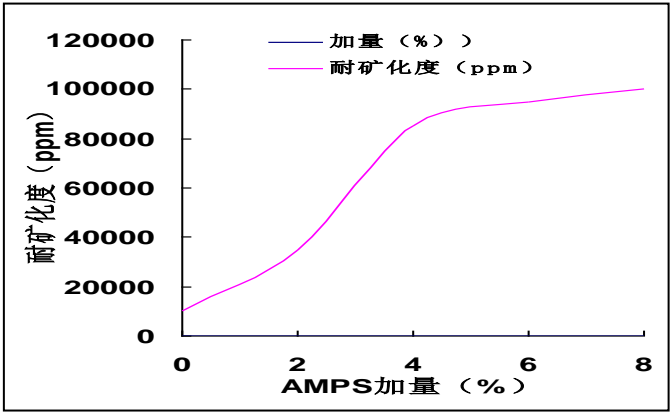


图 5 AMPS 加量与耐盐性能的关系曲线

9. 对封堵率指标进行论证

(1) 聚合物微球封堵率指标评价方法

称量 999g 标准盐水 III，精确至 0.01g，置于 2000 mL 烧杯中。将烧杯置于磁力搅拌器上保持 $300\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速，搅拌下产生稳定旋涡，将 1.0g（精确至 0.01g）称量好的试样缓慢倒入旋涡中，持续搅拌 20min，

配制成质量浓度为 0.1% 的聚合物微球分散液，转移至 2000mL 聚四氟乙烯广口试剂瓶中，室温下放置 4 天，备用。

在过滤因子测定仪中放入 0.2 μ m 的滤膜，加入 500mL 标准盐水 III，设置测试压力为 0.2MPa，测量 3min 的滤液体积，记作 V_1 ；更换新滤膜后加入 500mL 聚合物微球分散液，保持测试压力为 0.2MPa，测量 3min 的滤液体积，记作 V_2 。

称取 999.00g 标准盐水 III 置于 2000mL 烧杯中，设置磁力搅拌转速为 300r \cdot min⁻¹，加入 1.00g 试样后持续搅拌 20min，配制成质量浓度为 0.10% 的聚合物微球分散液，放入 2000mL 聚四氟乙烯广口试剂瓶中，在现场地层温度或 70 $^{\circ}$ C \pm 1 $^{\circ}$ C 的电热恒温干燥箱中恒温老化 4 天，备用。

在过滤因子测定仪中放入 0.2 μ m 的滤膜，加入 500mL 老化后的聚合物微球分散液，保持测试压力为 0.2MPa，测量 3min 的滤液体积，记作 V_3 。

封堵率 E_I ，以%（体积分数）表示，按式（3）计算：

$$W_1 = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

V_1 ——标准盐水 III 滤液体积，单位为毫升（mL）；

V_2 ——标准盐水 III 中微球分散液的滤液体积，单位为毫升（mL）。

老化后的封堵率 E_0 ，以%（体积分数）表示，按式（4）计算：

$$E_0 = \frac{V_1 - V_3}{V_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

V_1 ——去离子水的滤液体积，单位为毫升（mL）；

V_3 ——标准盐水 III 配制的微球分散液的滤液体积，单位为毫升（mL）。

封堵保留率 E_d ，以%表示，按式（5）计算：

$$E_d = \frac{E_0}{E_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

取 3 次平行测定结果的算术平均值为测定结果，3 次平行测定结果的相对标准偏差应不大于 5.0%。

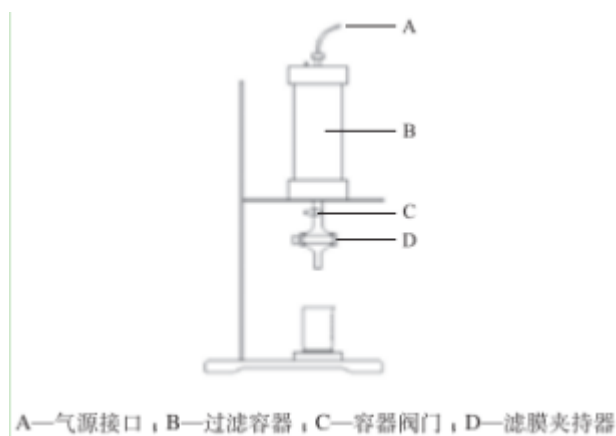


图 6 过滤因子测定仪

(2) 测试结果及论证说明

① 聚合物微球分散液浓度与滤膜规格的筛选

对于 WQ50 而言，保持测试压力为 0.2MPa，改变聚合物微球分散液浓度和滤膜规格，测试聚合物微球的封堵率，结果如表 12 所示。

表 12 WQ50 的封堵率测试

微球分散液浓度 (wt%)	测试时间 (min)	滤膜孔径 (μm)	微球分散液滤液体积 / (mL)	去离子水滤液体积 / (mL)	封堵率 (%)
0.01	1	0.4	62.6	140	55.29
	2		89.6	279	67.89
	2.5		100	340	70.59
0.02	1	0.4	79.6	140	43.14
	2		95.4	279	65.81
	3.5		100	441	77.32
0.03	1	0.4	16.0	140	88.57
	2		21.8	279	92.19
	3		26.4	419	93.70
	4		29.9	500	94.02
	5		33.1	500	93.38
	6		36.1	500	92.78
	7.5		40.1	500	91.98

0.01	1	0.2	33.0	117	71.79
	2		39.2	231	83.03
	3		43.5	342	87.28
	4		59.2	451	86.87
	5		70.8	500	85.84
	6		79.4	500	84.12
	7		82.38	500	83.52

滤膜孔径为 $0.4\ \mu\text{m}$ ：当 WQ50 分散液浓度为 0.01wt% 或 0.02wt% 时，封堵率较小；当 WQ50 分散液浓度为 0.03wt% 时，测试时间超过 1min 后，封堵率均大于 90%。由于封堵率过高，变化范围小，导致误差较大，将该测试条件指定为测试标准的可行性较差。

滤膜孔径为 $0.2\ \mu\text{m}$ ：当 WQ50 分散液浓度为 0.01wt% 时，测试时间介于在 3–4min，能够保证去离子水不滤完，并且测试的封堵率值大于 80%；测试时间为 3min 时的封堵率值最大。因此，确定封堵率的测试条件为：测试压力 0.2MPa、滤膜孔径为 $0.2\ \mu\text{m}$ 、聚合物微球分散液浓度为 0.01wt%、测试时间 3min。

不同聚合物微球的封堵率测试结果如表 13 所示。

表 13 不同聚合物微球的封堵率测试结果

压力 (MPa)	滤膜孔径 (μm)	微球浓度 (wt%)	样品来源	微球型号	滤液体积 (0–3.0min) /mL	封堵率 (%)
0.2	0.2	空白样 (去离子水)	/	空白	342	/
		0.01	长庆油田	WQ50	41.8	87.78
					42.2	87.67
					43.5	87.28
				WQ100	51.4	84.97
					52.5	84.65
					51.9	84.82
				WQ300	53.3	84.41
					53.8	84.26
					54.0	84.21

从表 13 中可以看出，在使用 0.2 μm 的滤膜测试不同类型的聚合物微球样品的封堵率时，测试得到的结果均大于 80%，因此，设置封堵率值“ $\geq 80\%$ ”。

四、技术经济分析论证和预期的经济效益

（一）技术经济效益

1. 提升了产品质量的一致性，通过刻画多个产品关键指标要求，并提供统一、科学的评价方法，使不同厂商的产品性能可比，淘汰不合格产品，促进行业整体质量提升。

2. 保障现场效果，标准化的产品质量评价方法，指导采油单位更精准地优选产品、优化注入参数（如微球浓度、粒径和段塞大小），从而提高调驱成功率与效果稳定性。

3. 降低综合成本与无效措施概率，减少因产品性能不稳定导致的无效作业，避免对储层的伤害风险，提升作业的成功率和经济性。

4. 推动技术迭代升级，为技术创新提供了基准和方向。

（二）预期经济效益

聚合物微球调驱技术，作为长庆油田控含水、降递减的主体技术之一，已累计实施 3 万余井次，药剂使用量超过 20 万吨，累计增油超过 250 万吨，累计降水超过 200 万方，产投比大于 2，展现出了显著的经济价值，本标准的实施，将进一步提升措施有效率和有效期内增油量，有力支撑效果效益的持续扩大，助力油田开发的高水平稳产。同时，统一的标准简化了采购流程，降低了因标准不一产生的协商和验证成本，促使企业将竞争焦点从价格转向质量和创新，推动产业链向高端化发展。

五、采用国际标准和国外先进标准情况及水平对比

关于调驱用聚合物微球技术规范，尚未形成相关的国际标准和国外先进标准。对比现行的行业标准 SY/T 7812-2024《调驱用聚合物微球评价方法》，本标准新增了“低剪切速率粘度”与“聚合物固形物粉末分散液电导率”、“硫元素含量”三项指标。一是从油藏深部微球水化膨胀后聚集体的粘滞阻力角度，阐述了油藏深部、低剪切作用下，小粒径微球以较高的粘滞阻力改善水驱、扩大波及作用机制，通过对比不同浓

度、不同剪切作用下，粘滞阻力大小，进一步论证了合理的指标检测参数；二是通过测量固形物粉末分散液的电导率，对聚合物微球的中无机盐、硫脲、丙烯酸等杂质的含量进行检测，从而，确保了产品的品质、和长效封堵性；三是借助硫元素与耐盐单体 AMPS 之间的对应关系，通过快速、准确的元素分析仪对 S 元素含量进行检测，论证了硫元素含量与 AMPS 的添加量之间的关系，为聚合物微球产品的耐盐性提供了有力保障。

六、与现行法律、法规、政策及相关标准的协调性

聚合物微球调驱技术是提高原油采收率的重要手段，制定该技术规范，旨在提升产品质量和应用效果，直接服务于油田“增储上产”的战略需求，为保障国家能源安全、推动油气核心需求自给提供了有力的技术支撑。

本标准文件结构严格按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定编写，符合标准化工作的基本规则，并且标准前言中的“专利声明”，符合《标准化法》及《国家标准涉及专利的管理规定（暂行）》的要求，保障了标准的合法性，避免了潜在的专利纠纷。标准第2章引用了多项 GB（国家标准）和 SY（石油天然气行业标准），标准正文中的试验方法（如密度、粘度测定、数值修约等）均严格遵循规定，确保了方法的一致性和结果的可靠性，其中，行业标准 SY/T 5862-2020 的引用，显示了与石油行业标准的同步性。

对比行业标准 SY/T 7812-2024，本团体标准对“纳米级”调驱用聚合物微球的技术指标、检验规则、包装贮存等进行了详细要求，新增的“低剪切速率粘度”、“固形物粉末电导率”、“硫元素含量”等指标，进一步补充了行业的技术指标规范内容，对产品的内在质量、应用效能提出了更高要求，体现了标准的先进性。本标准通过更严格、更全面的要求，以满足特定市场或技术联盟对高品质产品的需求，完全符合团体标准“鼓励创新、瞄准高端”的定位，有助于淘汰低质产品，引导行业技术升级，是推动产业高质量发展的具体举措。

经检索，本标准与国家标准、行业标准、地方标准、团体标准一致度不超过 25%。

七、贯彻实施标准的措施和建议

（一）宣传、培训与能力建设

1. 编写宣贯材料：制作标准解读手册、关键指标释义（如低剪切粘度的重要性）、应用案例集等。
2. 分层级培训：对生产商进行质量控制与合规性培训；对油田用户进行产品验收与性能评价培训；对检测机构进行统一操作规范培训。
3. 建立专家库：由中国化工学会牵头，组建标准宣讲与技术支撑专家团队，提供咨询和答疑。

（二）产业链上下游协同

1. 生产企业对标升级：微球生产商需依据新标准改造工艺（如纯化工艺以降低电导率）、升级质检实验室。
2. 严格采购与应用：油田公司在采购合同中明确引用本标准，并依据标准指标进行入库验收和使用效果评价。
3. 检测机构能力认证：推动第三方检测机构获得本标准相关检测项目的资质认定（CMA/CNAS），确保检测结果的公信力。

（三）监督、反馈与持续改进

1. 搭建信息反馈平台：设立线上平台，收集标准实施中遇到的问题（如某项指标测试方法的重现性），由归口单位定期汇总分析。
2. 定期修订机制：设定（如 3-5 年）标准复审周期，根据技术发展和反馈意见，对标准进行必要修订和更新。

八、其他应予以说明的事项

无