

# 高密度钻井液加重材料及流变调控技术研究

王西江<sup>1,2</sup>, 冯永超<sup>3,4</sup>, 王超<sup>4,5</sup>

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 中国石化华北油气分公司, 河南 郑州 450006; 4. 中国石化石油工程致密油气技术中心, 河南 郑州 450006; 5. 中国石化华北石油工程有限公司, 河南 郑州 450006)

**摘要:** 针对深井超深井钻探中高密度钻井液固相含量高、流变性控制困难的问题, 系统研究了不同加重材料的基础性能, 分析了密度、粒径及粒度级配等因素对钻井液流变性的影响, 并基于材料密堆积理论开展加重剂粒度级配设计与室内试验验证。结果表明, 加重材料密度越高, 达到相同钻井液密度所需的固相体积分数越低, 流变性越好; 粒径越小、比表面积越大, 黏度效应越显著, 重晶石粉中粒径小于 20  $\mu\text{m}$  的细颗粒会导致表观黏度大幅升高; 采用优化级配后的重晶石粉配制密度为 2.3  $\text{g}/\text{cm}^3$  的钻井液, 其塑性黏度较未优化样品降低了 19%, 且动切力提高, 流变性显著改善。该研究为高密度钻井液流变性控制提供了基于粒度级配优化的物理调控方法, 具有较强的工程应用价值。

**关键词:** 高密度钻井液; 加重材料; 粒度级配; 流变性; 重晶石粉; 密堆积理论; 黏度效应

**中图分类号:** TE254; P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0087-08

## Research on weighting materials and rheological control technology for high-density drilling fluids

WANG Xijiang<sup>1,2</sup>, FENG Yongchao<sup>3,4</sup>, WANG Chao<sup>4,5</sup>

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 2. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing 102206, China; 3. SINOPEC North China Oil and Gas Co., Ltd, Zhengzhou Henan 450006, China; 4. SINOPEC Petroleum Engineering Tight Oil and Gas Technology Center, Zhengzhou Henan 450006, China; 5. SINOPEC North China Petroleum Engineering Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450006, China)

**Abstract:** To address the challenges of high solid content and difficult rheological control in high-density drilling fluids for deep and ultra-deep well drilling, this study systematically investigates the fundamental properties of various weighting materials. The effects of density, particle size, and particle size distribution (PSD) on drilling fluid rheology were analyzed. Based on the dense packing theory, the particle size distribution of weighting agents was designed and validated through laboratory experiments. The results indicate that higher material density leads to a lower solid volume fraction required to achieve the target fluid density, thereby yielding better rheological properties. Smaller particle sizes and larger specific surface areas result in more significant viscosity effects, with fine particles smaller than 20  $\mu\text{m}$  in barite powder causing a substantial increase in apparent viscosity. A drilling fluid with a density of 2.3  $\text{g}/\text{cm}^3$ , formulated using barite with an optimized PSD, exhibited a 19% reduction in plastic viscosity compared to the non-optimized sample, along with an increased yield point and significantly improved rheological properties. This study provides a physical control method based on particle size distribution optimization for high-density drilling fluids, demonstrating strong engineering application value.

收稿日期: 2025-09-23; 修回日期: 2026-02-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.03.011

基金项目: 国家重点研发计划课题“井筒稳定性闭环响应机制与智能调控方法”(编号: 2019YFA0708303)

第一作者: 王西江, 男, 汉族, 1978年生, 高级工程师, 石油工程专业, 硕士, 从事钻完井液技术研究及管理工作, 北京市昌平区沙河镇中石化科研中心, wangxj.sripe@sinopec.com。

引用格式: 王西江, 冯永超, 王超. 高密度钻井液加重材料及流变调控技术研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(3): 87-94.

WANG Xijiang, FENG Yongchao, WANG Chao. Research on weighting materials and rheological control technology for high-density drilling fluids[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 87-94.

**Key words:** high-density drilling fluid; weighting material; particle size grading; rheology; barite powder; dense packing theory; viscosity effect

## 0 引言

随着油气勘探开发的深入,钻遇地层日趋复杂,深井、超深井钻探数量逐年增加,高压地层钻井中高密度钻井液使用越来越多。埋藏深、厚度大、蠕变速度快的泥岩地层通常用高密度钻井液钻穿盐层,但由于膨润土和劣质固相含量过高,造成钻井液黏切升高,以至于失去流动性,高密度钻井液还存在抗温、抗盐污染能力差的特点<sup>[1]</sup>。高密度钻井液的流变性控制困难,很大一部分原因在于其含有大量的固相加重材料。钻井液体系的胶体化学性质受钻井液黏度、总固相含量、固相颗粒分散程度等影响,且在高密度钻井液中,固相含量较高,固相颗粒间距离小,固相颗粒间相互作用产生的黏

度效应较大。在密度高于 $1.8\text{ g/cm}^3$ 的钻井液中,若采用 $4.2\text{ g/cm}^3$ 的重晶石粉加重,其体积占钻井液总体积的40%以上,当密度高于 $2.5\text{ g/cm}^3$ 时,其体积占钻井液总体积的60%以上<sup>[2]</sup>。如此高含量的固相加重材料在钻井液中易聚结和沉淀,严重影响钻井液流变性,导致滤饼质量差,黏附系数大,易造成卡钻事故。故流变性控制是高密度钻井液技术中需要克服的核心难题<sup>[3]</sup>。

## 1 加重材料的基本性能评价

室内收集的加重材料包括五个厂家的8种重晶石粉,以及微锰、铁矿粉和铁粉等,主要分析了不同厂家重晶石粉的密度、碱土金属含量、粒度分布及其在水溶液中的黏度效应,见表1。

表1 加重材料  
Table 1 Weighting materials

序号	名称	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	颜色	碱土金属含量/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	厂家	简称
1	重晶石	4.34	黄白色	38	贵州凯里龙腾矿业有限责任公司	贵州凯里
2	重晶石	4.21	土灰色	33	四川宣汉宝路石油钻井材料公司	宣汉宝路
3	重晶石	4.36	浅黄白色	34	成都上城石油科技有限公司	成都上城
4	重晶石	4.34	土灰色	28	四川安县华西矿粉有限公司	安县华西
5		4.29	黄白色	33		胜利物华1
6	重晶石	4.16	土灰色	50	胜利物华非金属材料厂	胜利物华2
7		4.05	土灰色	113		胜利物华3
8	重晶石粉尘	3.91	灰色			胜利物华4
9	微锰	4.80	棕红色	0	挪威埃肯工业集团公司	微锰
10	铁矿粉	5.00	褐色	0	唐山海港远大超细材料有限公司 (超细赤铁矿粉500目)	铁矿粉
11	铁粉	7.00	棕黑色	0	苏州市金穗粉末冶金有限公司	铁粉
12	锰矿粉	3.47	红褐色	0	辽宁瓦房子锰矿集鑫锰砂厂	锰矿粉1

### 1.1 重晶石粉的密度

如图1所示,贵州凯里、成都上城和安县华西的重晶石密度较高,达到 $4.3\text{ g/cm}^3$ 以上,在钻井液中的加重能力强,但其重晶石矿源较少,不易得到,低于 $4.3\text{ g/cm}^3$ 的重晶石在钻井液中较为常用。从加重能力角度,高密度钻井液配制时应尽量选用密度较高的重晶石。

### 1.2 重晶石粉的碱土金属含量

用重晶石粉加重钻井液时,其含有的可溶性碱

土金属溶解于钻井液中,对高密度钻井液的性能有一定影响。依据《钻井液材料规范》(GB/T 5005—2010)中规定的水溶性碱土金属含量测定方法,测定了重晶石粉的可溶性碱土金属的含量(以钙计)。由于重晶石粉中的石膏、菱铁矿、白云岩等天然矿物在水中微溶,并释放出金属离子,如石膏释放出钙离子、白云岩释放出镁离子等,且在钻井液的碱性环境下氢氧根离子会促进这些矿物释放出碳酸根离子、硫酸根离子等,对钻井液的性能带来不利

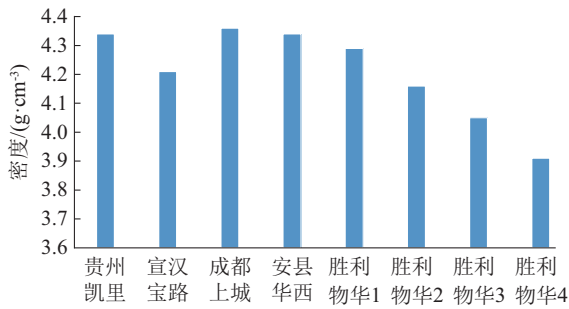


图 1 不同厂家重晶石的密度

Fig.1 Density of barite from different manufacturers

影响<sup>[4]</sup>。

### 1.3 重晶石粉的粒度分布

将重晶石粉分散于 0.2% 六偏磷酸钠水溶液中,超声分散 5 min,在 GSL-101BL 型激光颗粒分布测量仪上测定重晶石粉的粒度分布,结果见表 2。

表 2 重晶石粉的粒度分布情况

Table 2 Particle size distribution of barite powder

来源	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{10}/\mu\text{m}$	比表面积/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	分散度
贵州凯里	36.1	84.4	12.2	943.3	2.000
宣汉宝路	9.5	26.6	2.25	2234.7	2.561
成都上城	9.9	33.3	2.54	3100.6	3.114
安县华西	35.8	78.2	11.4	1270.2	2.412
胜利物华 1	14.3	40.9	2.49	2904.1	2.696
胜利物华 2	7.4	32.3	2.01	4128.1	4.073
胜利物华 3	12	43.6	2.31	3213.5	3.427
胜利物华 4	2.5	5.2	1.77	8013.0	1.342

从表中的测试数据可以看出,不同厂家的重晶石的粒度分布有较大差别。贵州凯里  $4.34 \text{ g/cm}^3$  的重晶石粉粒径中值最大, $D_{50}$  达到  $36.1 \mu\text{m}$ ,比表面积最小,分散度较小;而成都上城密度  $4.36 \text{ g/cm}^3$  的重晶石粉的粒径小很多, $D_{50}$  只有  $9.9 \mu\text{m}$ ,比表面积达到  $3100.6 \text{ cm}^2/\text{g}$ ;胜利物华 4 号是收集的旋风分离的粉尘,粒径很小, $D_{50}$  为  $2.5 \mu\text{m}$ ,但是由于含有较多的黏土性杂质,密度较小。

### 1.4 重晶石粉的黏度效应

重晶石粉的密度、粒度分布及可溶性碱土金属含量等特征都会反映到重晶石粉的黏度效应中。依据《钻井液材料规范》(GB/T 5005—2010)中规定的黏度测定方法,测定了重晶石粉配制的密度为

$2.5 \text{ g/cm}^3$  的蒸馏水悬浮液在加硫酸钙前后的表观黏度。在 250 mL 蒸馏水中加入重晶石,搅拌 15 min 后养护 24 h,再搅拌 15 min 测密度,在密度为  $2.5 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$  时转入浆杯,玻璃棒搅拌后测 600 转读数,再向其中加入  $2.5 \text{ g}$  通过  $0.175 \text{ mm}$  筛孔的无水硫酸钙,搅拌 5 min、静置 30 min 后再搅拌 15 min,测 600 转读数,结果如图 2 所示。

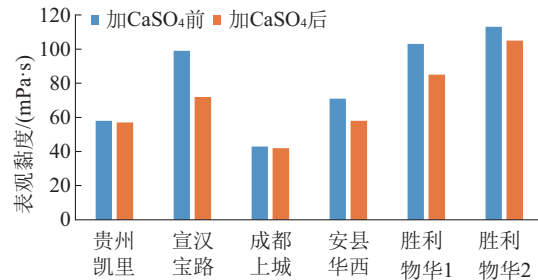


图 2 重晶石粉加硫酸钙前后的黏度效应

Fig.2 Viscosity effect of crystal powder before and after adding calcium sulfate

所收集的重晶石粉中,密度较高的贵州凯里、成都上城和安县华西 3 种重晶石的黏度效应较低,这 3 种重晶石碱土金属含量较低,且粒度稍粗,分布范围较广。宣汉宝路粒度较细,在加硫酸钙前黏度效应较高,且可溶性碱土金属的含量很低,故加硫酸钙后黏度降低较多。而胜利物华的 2 种重晶石黏度效应最高,但也都低于标准中要求的  $250 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

## 2 不同密度加重剂对高密度钻井液流变性的影响

粉体加重材料对钻井液性能的影响首先表现在加重材料的密度上,密度越高,加重后的钻井液性能变化幅度越小。这是因为随着粉体材料密度升高,密度增加相同幅度时所消耗的加重材料越少,亦即使用高密度粉体材料能够有效降低浆体的总固相含量,减小固相颗粒对流变性能的影响。试验考察了不同密度的重晶石、微锰等加重材料对钻井液流变性的影响<sup>[5-6]</sup>。

密度为  $2.0 \text{ g/cm}^3$  的钻井液试验配方为:1.8% 膨润土+2.4% 磺化酚醛树脂(SMP-2)+2.4% 磺化褐煤(SMC)+2.4% 降黏剂铁铬木素磺酸盐(FCLS)+2.8% 降失水剂抗高温磺酸盐聚合物(DSP-2)+1.2% KOH+加重剂。先按照配方配制基浆,然后用不同产地及密度的加重剂加重到  $2.0 \text{ g/cm}^3$ ,搅拌 20 min 后测试其流变性及其滤失量,经  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  老化

16 h后再次测试其流变性及滤失量,结果见表3。

表3 不同种类加重剂对钻井液流变性的影响

配 方	试验条件	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$FL_{API}/mL$	$AV/(mPa \cdot s)$	$PV/(mPa \cdot s)$	YP/Pa
基浆+锰矿粉( $\rho=3.47$ )	室温	1.89	1.0	136	78	58
	150 °C、16 h			79	61	18
基浆+重晶石( $\rho=4.21$ )	室温	2.03	3.2	52.0	42.0	10
	150 °C、16 h			49.5	46.0	3.5
基浆+微锰( $\rho=4.8$ )	室温	2.04	16.4	35.5	24	11.5
	150 °C、16 h			31	25	6
基浆+铁矿粉( $\rho=5.0$ )	室温	2.00	17	38.5	27	11.5
	150 °C、16 h			30	27	3

从上述的试验结果可以看出,用不同密度的加重材料对同配方基浆加重后,所配得的钻井液的流变性相差很大。用密度较高的微锰和铁矿粉进行加重的高密度钻井液,表观黏度和塑性黏度较小,而用密度较低的锰矿粉配制的钻井液黏切大。故

配制流变性好的高密度钻井液宜选用高密度加重材料。

用不同密度的重晶石配制  $2.0 g/cm^3$  钻井液并测试其性能,结果见表4。

表4 重晶石密度对钻井液流变性的影响

配 方	试验条件	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$FL_{API}/mL$	$AV/(mPa \cdot s)$	$PV/(mPa \cdot s)$
基浆+胜利物华重晶石( $\rho=4.05$ )	室温	2.01	3.4	55	45
	150 °C、16 h			43	39
基浆+胜利物华重晶石( $\rho=4.16$ )	室温	2.00	3.2	46	40
	150 °C、16 h			41	35
基浆+胜利物华重晶石( $\rho=4.29$ )	室温	2.01	5.0	39	34
	150 °C、16 h			35.5	34
基浆+宣汉宝路重晶石( $\rho=4.21$ )	室温	2.03	3.2	52	42
	150 °C、16 h			49.5	46
基浆+贵州凯里重晶石( $\rho=4.34$ )	室温	2.01	3.6	44	38
	150 °C、16 h			40	37

注:1、2、3为同次试验,老化后六速测试温度约为40 °C;4、5为同次试验,老化后六速测试温度约为50 °C。

从上述2组试验的结果可以看出,随着所用重晶石密度的增加,所配得的钻井液表观黏度及塑性黏度均有所降低。

高密度钻井液施工中,加重材料的用量非常大,选用时需要考虑多种因素,除了钻井液的综合性能外,还必须考虑加重剂的来源、价格及对施工过程的影响等。如微锰,主要成分是四氧化三锰,纯度高、密度大,由特殊工艺制备成微球形状,在密度钻井液中具有自悬浮、低增稠、低磨损的特点,

但是价格高昂;而铁矿粉带有的磁性会磨损钻具、增加摩阻<sup>[7]</sup>。相较来说,我国的重晶石矿较为丰富,价格较低,是钻井液加重材料的首选。但是随着开采程度的加深,品位高的重晶石矿越来越少,密度在  $4.3 g/cm^3$  以上的重晶石已经较难得到,钻井施工中较多应用的是密度为  $4.0 \sim 4.3 g/cm^3$  的重晶石。

### 3 加重材料粒度级配研究

由上述试验,加重材料的密度、粒径、碱土金属

含量等都影响其在溶液中的黏度效应。将不同密度的贵州凯里和四川宣汉重晶石粉分别进行筛分,在保证密度及碱土金属含量基本相同的条件下,研究粒径大小对高密度钻井液流变性的影响。

### 3.1 重晶石粉的筛分

贵州凯里和四川宣汉重晶石粉的粒度分布见图 3。

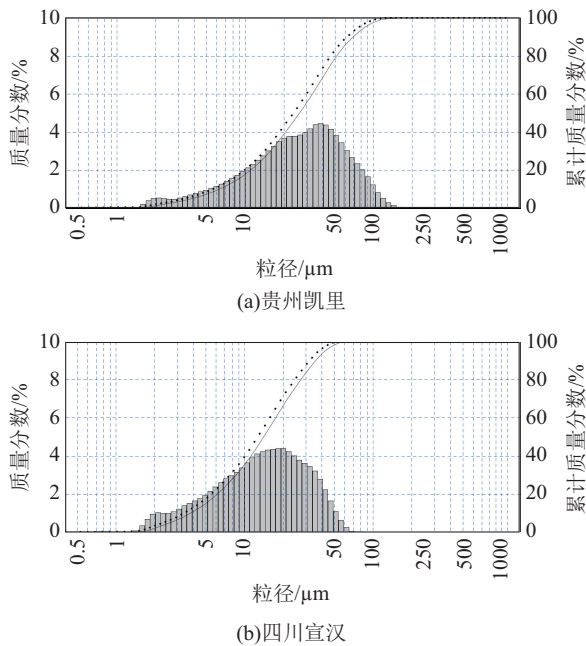


图 3 贵州凯里和宣汉宝路重晶石粉的粒度分布

Fig.3 Particle size distribution diagram of barite powder

通过粒度分布测量可知,贵州凯里重晶石粉的比表面积为  $1039.29 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $D_{50}=26.4 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $D_{90}=69.22 \text{ }\mu\text{m}$ ;宣汉宝路重晶石粉的比表面积  $1663.92 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $D_{50}=14.09 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $D_{90}=35.84 \text{ }\mu\text{m}$ 。将贵州凯里重晶石粉和宣汉宝路重晶石粉烘干,用筛分仪对重晶石粉进行分级,同时也测定了重晶石粉中不同粒度范围的质量分数。结果见表 5。

从筛分的试验结果看出,2种重晶石粉都是粒径在  $53\sim 20 \text{ }\mu\text{m}$  占多数,相较来说,贵州凯里的重晶石粉粒度相对较粗,  $>100 \text{ }\mu\text{m}$  的颗粒有  $1.23\%$ ,  $<$

$20 \text{ }\mu\text{m}$  只有  $6.5\%$ ,而宣汉宝路的重晶石粉  $37\sim 25 \text{ }\mu\text{m}$  的颗粒最多,占  $30.86\%$ ,  $<20 \text{ }\mu\text{m}$  的有  $14.44\%$ ,而  $>75 \text{ }\mu\text{m}$  只有  $0.14\%$ ,没有  $>100 \text{ }\mu\text{m}$  的颗粒。

将上述分级的不同粒度的宣汉宝路重晶石粉在蒸馏水中配成  $2.5 \text{ g}/\text{cm}^3$  的悬浮液,测试其表观黏度,结果见表 6。

结果表明,筛分后大粒径重晶石粉配制的悬浮液,其表观黏度低于未筛分重晶石粉配制的悬浮液;而小粒径重晶石粉的黏度效应则显著更高,特别是粒径  $<20 \text{ }\mu\text{m}$  的重晶石粉,其悬浮液表观黏度最大。上述结论也体现出 Einstein 黏度公式中固相颗粒数量对悬浮体系黏度的影响,因小粒径固相将水溶液加重至相同密度时,体系中固相颗粒数量会大幅增多,再考虑到颗粒的溶剂化效应,必然有较高的黏度效应;大量细小颗粒在导致悬浮液表观黏度增大的同时,也会提高体系的沉降稳定性。

上述试验的溶剂是蒸馏水,在钻井液体系中还需要加入各种处理剂,特别是分散剂,对体系中的大量固相颗粒具有较强的分散稀释作用,使体系的表观黏度大大降低,需对加入超细颗粒重晶石粉钻井液的性能进行进一步研究。

### 3.2 粉体密堆积级配原则

在工业用水煤浆领域的研究中,煤粉的粒度级配是影响水煤浆稳定性、流动性和黏度的重要因素。已有研究表明,水煤浆制浆过程中采用合理的粒度级配不但可使煤粒达到较高的堆积密度,而且可使浆体具有较好的流动性和较低的黏度<sup>[7]</sup>。根据这一思路,可通过改变粒度级配,降低高密度钻井液体系的黏度,提高其流动性。

实际颗粒的粒度分布有连续分布和不连续分布两种,连续分布的颗粒是由某一粒度范围内的所有尺寸的颗粒所组成,而不连续分布是由代表该范围的有限尺寸的颗粒所组成。在研究不连续尺寸颗粒的堆积行为时,目前学术界和工程领域最常用的理论是 Westman-Hugill 理论及其提出的计算多尺寸颗粒最大堆积率的方法,经典的描述连续尺寸颗粒

表 5 重晶石粉中不同粒度范围的质量分数

Table 5 Mass percentage of different particle size ranges in barite powder

粒径/ $\mu\text{m}$	$>100$	$100\sim 75$	$75\sim 53$	$53\sim 37$	$37\sim 25$	$25\sim 20$	$<20$
贵州凯里	1.23%	4.10%	12.52%	24.38%	36.02%	15.25%	6.50%
宣汉宝路	0	0.14%	10.92%	25.62%	30.86%	18.02%	14.44%

表6 重晶石粉中不同粒径的黏度效应  
Table 6 Viscosity effect of barite powder  
with different particle sizes

粒径/ $\mu\text{m}$	>75	75~53	53~37	37~25	25~20	<20
表观黏度/( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	98	68	80	107	136	179

堆积的理论是 Gaudin-Schuhmann 粒度分布方程。

$$Y = \left( \frac{D}{D_L} \right)^m \times 100 \quad (1)$$

式中:  $Y$ ——小于颗粒  $D$  的含量, %;  $D_L$ ——颗粒中最大粒径,  $\mu\text{m}$ ;  $m$ ——分布参数, 无量纲。

描述紧密堆积的主要有 Horsfield 和 Fuller 的紧密堆积理论、Alfred 方程、隔级堆积理论。理论上讲, 当颗粒间空隙填入无穷小及无穷多的小球时, 空隙能被完全填满, 但实际上, 物料半径变得非常小时, 粒间的相互作用不可忽视。Fuller 通过实验得出, 当模数  $m$  在 0.33~0.5 时可得到最小的空隙率。Dinger 和 Funk 改进了 Gaudin-Schuhmann (高登-舒兹曼) 粒度分布方程 (Alfred 方程)。

$$Y = \frac{D^m - D_s^m}{D_L^m - D_s^m} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $D_s$ ——最小粒径,  $\mu\text{m}$ 。

依据上述方程理论, 计算不同最大粒径时紧密堆积粒度级配数据, 取  $D_s=0$ ,  $m=0.37$  ( $m=0.37$  时堆积率最高), 结果见表 7。

表7 计算密堆积时不同粒径的百分比  
Table 7 Calculate the percentage of different  
particle sizes in dense packing

粒径尺寸/ $\mu\text{m}$	质量分数/%					
150~100	13.92					
100~75	8.70	10.10				
75~53	9.57	10.80	12.06			
53~37	8.23	9.90	10.95	12.45		
37~25	8.05	9.33	10.39	11.82	13.50	
25~20	4.08	4.74	4.28	6.00	6.86	
<20	47.45	55.13	61.32	69.73	79.64	

颗粒最紧密堆积和颗粒的性质有密切关系, 实际生产中很难以数学模型表征出各种粒度分布和堆积率的关系, 根据经验得出:

(1) 采用单一尺寸颗粒不能达到密堆积;

(2) 采用多组分进行密堆积时, 组分颗粒尺寸相差越大越好, 一般相差 4 倍以上效果更显著;

(3) 较细颗粒的数量应足够多, 充填于紧密排列颗粒的空隙中;

(4) 适当增加粗粒组分的含量, 可适当增加堆积密度, 在可能的情况下适当增大临界颗粒尺寸, 使各组分颗粒尺寸相差大一些;

(5) 实际颗粒并非都是球形, 堆积也不都是规则的, 而是完全随机的, 堆积状态受多种因素影响;

(6) 潮湿物料由于表面有吸附水, 颗粒间形成液桥, 使颗粒间附着力增大, 形成二次、三次颗粒的团粒;

(7) 空隙率随物料圆形率的降低而增大, 当处于松散堆积时, 有棱角的颗粒空隙率较大<sup>[8]</sup>。

尽管高密度钻井液中含有较高含量的固相材料, 但它们的存在状态及方式与单纯固相颗粒的堆积是不同的, 以高密度固相材料为加重剂配制的高密度钻井液是一种悬浮体, 作为钻井流体更关注其流变性, 而粒度级配对流变性的影响也更加复杂。

### 3.3 重晶石粉两级级配试验

在两级级配试验中, 用实验室内密度  $4.21 \text{ g/cm}^3$  的重晶石粉, 粒度级配如下: 级配方式 1 号为  $>53 \mu\text{m} : <53 \mu\text{m} = 2:1$ , 级配方式 2 号为  $>53 \mu\text{m} : <40 \mu\text{m} = 2:1$ , 级配方式 3 号为  $>53 \mu\text{m} : <25 \mu\text{m} = 2:1$ , 级配方式 4 号为  $>53 \mu\text{m} : <25 \mu\text{m} = 1:1$ 。

基浆配方: 1.8% 膨润土 + 2.4% SMP-2 + 2.4% SMC + 2.4% FCLS + 2.8% DSP-2 + 1.2% KOH。用上述 4 种两级级配的重晶石粉将基浆加重至  $2.3 \text{ g/cm}^3$  后, 测试钻井液流变性能, 结果见表 8。

高温老化后将高密度钻井液降至室温, 在  $25^\circ\text{C}$  下测六速。从表中试验结果可见, 与不分级重晶石粉加重的高密度钻井液相比, 用级配方式 1 号加重的钻井液表观黏度相当、塑性黏度稍大, 用级配方式 2 号、3 号、4 号加重的钻井液表观黏度和塑性黏度更低, 级配方式 3 号加重的钻井液的表观黏度、塑性黏度最低, 且切力最大, 塑性黏度降低 17%。

### 3.4 根据方程理论的级配试验

(1) 加重材料颗粒级配设计。在对实验室中密度为  $4.21 \text{ g/cm}^3$  的重晶石进行筛分时, 150 目的筛余为 0, 即该重晶石粉的最大粒径  $\geq 100 \mu\text{m}$ ,  $>100 \mu\text{m}$  的重晶石颗粒无法通过筛分现有重晶石粉获

表8 重晶石粉的两级级配试验

Table 8 Two level grading test of barite powder

配 方	$\Delta\rho/(g\cdot cm^{-3})$	$\rho/(g\cdot cm^{-3})$	$AV/(mPa\cdot s)$	$PV/(mPa\cdot s)$	YP/Pa	PV降低率
基浆+不分级的重晶石	0.01	2.28	47	41	6	
基浆+级配方式1号的重晶石	0.01	2.28	50	44	6	-7%
基浆+级配方式2号的重晶石	0.02	2.28	45	49	6	4.8%
基浆+级配方式3号的重晶石	0.02	2.28	45	34	11	17%
基浆+级配方式4号的重晶石	0.01	2.28	46	36	10	12%

得。依据密堆积理论进行设计时,分别以100、75  $\mu m$ 为最大粒径,如以更小粒径(如53  $\mu m$ )为最大粒径时,则需进一步增加细小颗粒的含量,考虑到

细颗粒比表面积对钻井液体系黏度有较大影响,仅设计了分别以100、75  $\mu m$ 为最大粒径的重晶石的粒度级配,如表9所示。

表9 设计的粒度级配方式

Table 9 Granularity grading method of the design

粒径/ $\mu m$	100~75	75~53	53~37	37~25	25~20	<20
原粉(不分级)	0.14%	10.92%	25.62%	30.8%	18.0%	14.4%
级配方式1号	25%	22%	16%	12%	2%	23%
级配方式2号		29.3%	21%	16%	2.7%	31%

(2)重晶石颗粒级配试验。依照上表中级配方式1号和2号重晶石粉配制了密度为2.3  $g/cm^3$ 的高密度钻井液,基浆配方同上,测试钻井液的流变性

能,并与用不分级重晶石加重的高密度钻井液进行对比,结果见表10。试验中严格控制测试六速的温度。

表10 重晶石粒度级配试验

Table 10 Barite particle size distribution test

配 方	试验条件	$\rho/(g\cdot cm^{-3})$	$AV/(mPa\cdot s)$	$PV/(mPa\cdot s)$	YP/Pa	老化后状态	PV降低率
基浆+不分级的重晶石	150 $^{\circ}C$ 、16 h	2.28	47	41	6	稳定	
基浆+级配方式1号的重晶石粉	150 $^{\circ}C$ 、16 h	2.29	44.5	33	11.5	稳定	19%
基浆+级配方式2号的重晶石粉	150 $^{\circ}C$ 、16 h	2.29	46	36	10	稳定	12%

高温老化后将高密度钻井液降至室温,在25  $^{\circ}C$ 下测六速。从试验结果可知,与不分级重晶石粉加重的高密度钻井液相比,用级配方式1号加重的钻井液塑性黏度降低了19%,切力增大。用级配方式2号加重的钻井液表观黏度降低了12%。用级配方式2号加重的钻井液比用级配方式1号的黏度稍高,反映出微细颗粒增加引起的黏度效应。

在上述的粒度级配方式,级配方式1号中粒径在100~37  $\mu m$ 的颗粒大约占总量的63%,级配方式2号中粒径在100~37  $\mu m$ 的颗粒大约占50%,而原重晶石粉中这一粒度范围占36%。可见,该粒度范围颗粒越多,改善高密度钻井液流变性的效果越好,但是也必须要有适量的小颗粒填充空隙才能在有

限的空间加入更多的加重材料,减小大颗粒间的摩擦,兼顾体系的悬浮稳定性<sup>[9]</sup>。

#### 4 结论

(1)应用材料密堆积理论,设计了加重剂的粒度级配,并以试验表明设计的加重剂的粒度级配能降低高密度钻井液的黏度,提高钻井液的切力,改善钻井液的流变性能。与未优化粒度级配的加重剂相比,优化后的加重剂可使密度2.3  $g/cm^3$ 的钻井液的塑性黏度降低19%。

(2)通过研究加重材料的粒度级配对钻井液黏度和沉降稳定性的影响,优选合理的粒度级配方案,实现高密度钻井液流变性的优化控制,最终形

成可支撑现场应用的高密度钻井液流变性调控技术体系。

### 参考文献(References):

- [1] 胡德云. 超高密度( $\rho \geq 3.00 \text{ g/cm}^3$ )钻井液的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2001, 18(1): 6-11.  
HU Deyun. Study and application of ultra-high density drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2001, 18(1): 6-11.
- [2] 黄维安, 邱正松, 钟汉毅, 等. 高密度钻井液加重剂的研究[J]. 国外油田工程, 2010, 26(8): 37-40.  
HUANG Weian, QIU Zhengsong, ZHONG Hanyi, et al. Study of weighting admixture for high density drilling fluid[J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010, 26(8): 37-40.
- [3] 王富华, 王瑞和, 刘江华, 等. 高密度水基钻井液高温高压流变性研究[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 306-310.  
WANG Fuhua, WANG Ruihe, LIU Jianghua, et al. Rheology of high-density water-based drilling fluid at high temperature and high pressure[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 306-310.
- [4] 张明, 李天太, 赵金省, 等. 高密度钻井液粒度分布特征研究[J]. 钻采工艺, 2011, 33(4): 83-85.  
ZHANG Ming, LI Tiantai, ZHAO Jinsheng, et al. Research on the particle size distribution characteristics of high-density drilling fluid [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 33(4): 83-85.
- [5] 黄维安, 邱正松, 徐加放, 等. 重晶石粒度级配对加重钻井液流变性的影响[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(4): 23-25.  
HUANG Weian, QIU Zhengsong, XU Jiafang, et al. Effect of partial sizing barite on weighted drilling fluid rheology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(4): 23-25.
- [6] 董悦, 盖姗姗, 李天太, 等. 固相含量和密度对高密度钻井液流变性影响的实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(4): 36-40.  
DONG Yue, GE Shanshan, LI Tiantai, et al. Experimental study on the effect of solid content and density of high density drilling fluid on its rheological properties[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 36-40.
- [7] 赵福, 王平全, 刘常旭, 等. 不同粒径的加重剂对水基钻井液黏度效应的影响[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(3): 74-76.  
ZHAO Fu, WANG Pingquan, LIU Changxu, et al. The influence of weighting agents with different particle sizes on the viscosity effect of water-based drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25(3): 74-76.
- [8] 周成华, 王平全, 王进涛, 等. 不同级配活化铁矿粉对高密度水基钻井液黏度效应的影响[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(1): 21-23, 26.  
ZHOU Chenghua, WANG Pingquan, WANG Jintao, et al. The influences of different sized ground iron ores on the viscosity of high density water base muds[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25(1): 21-23, 26.
- [9] 蔡利山, 林永学, 田璐, 等. 超高密度钻井液技术进展[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(5): 70-77.  
CAI Lishan, LIN Yongxue, TIAN Lu, et al. Overview of ultra-high density drilling fluid technology progress[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(5): 70-77.

(编辑 王跃伟)