

# 基于紧密堆积理论的低密度固井水泥浆设计

郑少军<sup>1,2</sup>, 王凯伦<sup>1</sup>, 刘思雨<sup>1</sup>, 刘天乐<sup>\*1,2</sup>, 蒋国盛<sup>1,2</sup>, 白世卿<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)非常规固井与特种加固实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**合理的颗粒级配是提高固井水泥环内部密实度、早期力学强度和界面胶结能力的关键。基于此,本文从几种典型的连续颗粒级配紧密堆积理论中优选出DFE进行固井水泥浆体系设计,并通过大量实验首次确定了适宜G级油井水泥基深水固井水泥浆体系设计的 $n$ 值最优范围:0.33~0.40。结合激光粒度分析仪实测结果,在粒径 $\leq 3.38\ \mu\text{m}$ 、 $3.38\sim 70.70\ \mu\text{m}$ 、 $\geq 70.70\ \mu\text{m}$ 三个范围内依次采用纳米 $\text{CaCO}_3$ (nano  $\text{CaCO}_3$ ,以下简称“NC”)、G级油井水泥和漂珠,并按DFE( $n=0.33\sim 0.40$ )体积分布曲线进行混配。在此基础上,提出一种密度为 $1.50\ \text{g}/\text{cm}^3$ 的低成本低温早强三元固相级配水泥浆体系,并与漂珠二元固相水泥浆体系和NC二元固相水泥浆体系的性能进行对比。研究表明:该三元体系水泥石的抗压强度、抗折强度和二界面胶结强度相比于漂珠二元体系和NC二元体系分别提高了7%~21.1%、13.4%~51.9%和41.4%~122.2%。三元体系的固井水泥石在垂向上的最大密度差为 $0.022\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。基于DFE设计的三元体系具有良好的流变性、稳定性和力学性能。DFE对于多元固井水泥浆体系的设计和应用具有一定的指导意义,在保证低密度的前提下能够有效地提高固井水泥石的早期强度和综合性能。

**关键词:**固井水泥浆;紧密堆积理论;Dinger-Funk方程;粒度分布;力学性能

**中图分类号:**TE256   **文献标识码:**A   **文章编号:**2096-9686(2021)03-0094-07

## Design of low density cementing slurry based on close packing theory

ZHENG Shaojun<sup>1,2</sup>, WANG Kailun<sup>1</sup>, LIU Siyu<sup>1</sup>, LIU Tianle<sup>\*1,2</sup>, JIANG Guosheng<sup>1,2</sup>, BAI Shiqing<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Unconventional Cementing & Special Reinforcement Laboratory, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Reasonable particle size distribution is the key to improve the internal compactness, early mechanical strength and interfacial bonding ability of cementing cement sheath. Based on this, Dinger-Funk equation (hereinafter referred to as “DFE”) is selected to design cementing slurry system from several typical close packing theory of continuous particle gradation. Through a large number of experiments, the optimal range of  $n$  value suitable for the design of cement slurry for oil and gas wells is determined for the first time: 0.33~0.40. Combined with the measured results of laser particle size analyzer, nano  $\text{CaCO}_3$  (hereinafter referred to as “NC”), grade G oil well cement and floating beads are successively used in the three particle size ranges of  $\leq 3.38\ \mu\text{m}$ ,  $3.38\sim 70.70\ \mu\text{m}$  and  $\geq 70.70\ \mu\text{m}$ , and mixed according to the volume distribution curve of DFE ( $n=0.33\sim 0.40$ ). On this basis, a low-cost, low-temperature and early strength ternary solid-phase graded cement slurry with a density of  $1.50\ \text{g}/\text{cm}^3$  was proposed, and its performance is compared with that of the floating bead binary cement slurry and NC binary cement slurry. The results show that: the

收稿日期:2020-10-29; 修回日期:2021-01-21   DOI:10.12143/j.ztgc.2021.03.013

基金项目:国家重点研发计划项目“乳品废水乳糖母液基微生物固井技术”(编号:2016YFE0204300);国家自然科学基金项目“水合物分解对深水固井水泥环孔隙特征与力学性质的影响机制研究”(编号:42072343)

作者简介:郑少军,男,汉族,1993年生,博士研究生,主要研究方向为水泥基材料紧密堆积、多场耦合作用下水泥基材料水化过程中孔隙特征的时空演变规律,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,sjzheng203@163.com。

通信作者:刘天乐,男,汉族,1984年生,副教授,主要研究方向为非常规固井与特种加固技术、钻完井过程中井内传热传质规律、井下电热蒸汽发生器,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,liutianle2008@163.com。

引用格式:郑少军,王凯伦,刘思雨,等.基于紧密堆积理论的低密度固井水泥浆设计[J].钻探工程,2021,48(3):94-100.

ZHENG Shaojun, WANG Kailun, LIU Siyu, et al. Design of low density cementing slurry based on close packing theory[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):94-100.

compressive strength, flexural strength and interfacial bonding strength of the ternary system are increased by 7%~21.1%, 13.4%~51.9% and 41.4%~122.2% respectively compared with the binary system of floating beads and NC. The maximum vertical density difference of cementing cement is 0.022g/cm<sup>3</sup>. The ternary system based on DFE has good rheology, stability and mechanical properties. DFE has certain guiding significance for guiding the design and application of multiple cementing cement slurry system, and can effectively improve the early strength and comprehensive performance of cementing cement under the premise of ensuring low density.

**Key words:** cement slurry; close packing theory; Dinger-Funk equation; particle size distribution; mechanical properties

## 0 引言

随着油气资源勘探与开发向深水区域的逐步拓展,油气井固井质量问题受到了更加广泛的关注和重视。然而,在深水低温条件下,水泥石早期强度发展缓慢,水泥环内部密实度不高,储层封隔能力不强,难以满足油气井固井要求<sup>[1-2]</sup>。此外,随着深海低温地层中天然气水合物的不断发现,因固井过程扰动而引起井壁附近水合物分解所产生的高压天然气和自由水,对弱固结或未固结的水泥浆会产生严重危害,甚至可导致固井失效<sup>[3-4]</sup>。因此,开发具有低温早强能力的优质固井水泥浆是解决深水固井难题的当务之急<sup>[5-6]</sup>。

目前,国内外常见的深水固井水泥浆技术主要有如下4种:水泥粒径优化技术(PSD)<sup>[7-8]</sup>、高铝水泥浆技术<sup>[9]</sup>、快凝石膏水泥浆技术<sup>[10]</sup>、泡沫水泥浆技术<sup>[11]</sup>。其中,应用最为广泛的当属PSD技术,该技术基于紧密堆积理论,通过合理优化固相材料的颗粒级配,在保证水泥浆具有良好流变性的前提下来提高材料的堆积密实度和水泥浆体系中的固相含量,并且可以有效地提高水泥环的力学强度和对储层的封隔能力,增强水泥环的耐腐蚀和抗渗性能,延长油气井服役寿命,降低开采成本<sup>[12]</sup>。

紧密堆积理论通过优化水泥浆中固相颗粒的粒度分布和改善材料的紧密堆积程度来提高水泥石的早期强度,对于提高固相混合料宏观力学性能具有明显的指导作用,已成为研发多元体系固井水泥拌合料的主要技术支撑<sup>[13-15]</sup>。Schlumberger、Halliburton、BJ等公司基于紧密堆积理论相继开发出了适合深水固井的水泥浆体系,并在全世界被广泛应用<sup>[12, 16-17]</sup>。

紧密堆积理论成功应用于现场固井的报道近年来逐渐增加,但大多用于优化二元固相组分的水泥浆体系。然而随着深海洋底浅表层固井对水泥浆密度、体系稳定性和固结性能的要求越来越严

苛,向水泥浆中添加一种固相粉体材料通常难以满足现场的实际要求<sup>[18-19]</sup>。兼顾固井质量与生产成本的平衡,经常需要向水泥浆中添加2种、3种甚至多种不同粒度的固相粉体材料以取得更为理想的效果。基于此,本文在对比分析几种经典紧密堆积模型的基础上,选择Dinger-Funk方程(Dinger-Funk equation,简称“DFE”)作为基础模型,结合室内实验优化控制参数的取值范围,从而得出更适合低密度固井水泥浆的粒度分布曲线。并在此基础上设计了一种密度可调的三元固相级配低温早强固井水泥浆体系,并对其性能进行了室内评价。

## 1 紧密堆积理论模型的优选

1896年,Feret对混凝土的宏观性能和堆积密实度进行了研究<sup>[20]</sup>。随后,Furnas<sup>[21]</sup>、Fuller<sup>[22]</sup>和Thompson等相继在最大密实度理论、混凝土的骨料颗粒级配和骨料密实度等方面进行了研究。乔龄山<sup>[23-24]</sup>对细粉材料颗粒特性、堆积密度的表述、检测和计算方法作了较为详细的归纳介绍,并研究讨论了国外学者应用紧密堆积理论的部分研究成果和存在的问题。在混凝土领域,已经提出Horsfield模型、Aim-Goff模型、Toufar模型、Stovall模型、Furnas模型、Dewar模型和Larrard模型等紧密堆积理论模型<sup>[25-27]</sup>。从颗粒级配连续性的角度来分,主要有连续级配堆积模型和间断级配堆积模型两种,间断级配模型利用材料的平均粒径来描述各级填充料的颗粒特征,如Horsfield模型和Husdon模型,不能完整体现材料的粒径分布特征,实际应用较少。而连续级配堆积模型主要针对连续粒度分布的颗粒体系,比较典型的模型主要有Fuller曲线、DFE和分形特征方程等,与实际更加符合。本文主要以这些经典的连续堆积理论为基础进行分析。

### 1.1 Fuller曲线

1907年,Fuller和Thompson提出理想筛析曲

线<sup>[28]</sup>(即 Fuller 曲线),用来计算砂浆和混凝土中集料达到最佳堆积密度时所需要的颗粒分布:

$$U(x) = 100(x/x_{\max})^n \quad (1)$$

式中: $U(x)$ ——筛孔尺寸为 $x$ 时的筛析通过量(按其体积计算),%; $x$ ——筛孔尺寸,mm; $x_{\max}$ ——集料的最大颗粒直径,mm; $n$ ——Fuller 指数, $n=0.5$ ,适用于连续粒度分布的球形颗粒。

### 1.2 Andreasen 方程

1928年,Andreasen<sup>[29]</sup>以“统计类似”为基础来描述颗粒的粒度分布状况,提出了如下堆积模型:

$$U(D) = 100(D/D_L)^n \quad (2)$$

式中: $U(D)$ ——小于粒径 $D$ 颗粒的体积百分含量,%; $D_L$ ——体系中最大颗粒的粒径, $\mu\text{m}$ ; $D$ ——与 $U(D)$ 对应的颗粒尺寸, $\mu\text{m}$ ; $n$ ——分布模数,无量纲,与 Fuller 指数意义相同。

Andreasen 认为,各种分布的孔隙率随方程中分布模数 $n$ 值的减小而下降,当 $1/2 \leq n \leq 1/3$ 时,孔隙率最小,而 $n$ 远小于 $1/3$ 是没有意义的。

### 1.3 DFE

Funk 等<sup>[30]</sup>和 Dinger 等<sup>[31]</sup>通过在颗粒分布中引入有限小颗粒尺寸,考虑当 $D=D_s$ 时 $U(D)=0$ ,对 Andreasen 方程进行了修正,得到如下方程:

$$U(D) = 100 \frac{D^n - D_s^n}{D_L^n - D_s^n} \quad (3)$$

式中: $D_s$ ——粉体中最小颗粒的粒径, $\mu\text{m}$ ;其它同上。

Funk 和 Dinger 利用计算机进行模拟,得出当 $n=0.37$ 时,符合此分布的粉体可获得最小的孔隙率。

### 1.4 分形特征方程

唐明等<sup>[32]</sup>用颗粒形状的分形维数 $D$ 描述颗粒特性,基于小于某一尺寸的颗粒累积体积分数与分形维数之间的关系,推导出分形特征方程为:

$$V(x) = 100 \frac{x^{3-D} - x_{\min}^{3-D}}{x_{\max}^{3-D} - x_{\min}^{3-D}} \quad (4)$$

式中: $V(x)$ ——混合料体积分布函数; $x$ ——颗粒直径, $\mu\text{m}$ ; $x_{\max}$ ——最大颗粒尺寸, $\mu\text{m}$ ; $x_{\min}$ ——最小颗粒尺寸, $\mu\text{m}$ ; $D$ ——颗粒分形维数,当 $D$ 在 $2.515 \sim 2.697$ 范围内取值时,可实现集料的紧密堆积。

上述4种模型从结构上看,Fuller 曲线和 Andreasen 方程、DFE 和分形特征方程是一致的。Fuller、Andreasen 在描述理想的颗粒尺寸分布时,忽略了小尺寸颗粒材料对颗粒级配效果的影响,但实际

情况却是小尺寸颗粒占有一定的比例且对孔隙结构具有一定的影响。DFE 和分形特征方程结构上是一样的,且都考虑小尺寸颗粒的影响,虽然指数 $n$ 和 $3-D$ 的含义略有不同,但它们表示的粒径分布实际具有相同的结果,Fuller 曲线和 Andreasen 方程是 DFE 和分形特征方程的特例。从影响范围和应用的广度来讲,DFE 更具代表性。因此,选取 DFE 作为设计深水固井水泥浆体系的紧密堆积理论,并结合实验对方程控制参数 $n$ 的取值进行优选。

## 2 基于 DFE 的水泥浆设计

### 2.1 实验材料

选取 G 级油井水泥、漂珠和 NC 作为级配原材料。液体添加剂主要包括降失水剂 UCSRL-203、分散剂 UCSRL-204、早强剂 UCSRL-205 和消泡剂 UCSRL-206。实验用水为武汉市自来水。

利用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪测定的各粉体材料的粒度分布曲线如图 1 所示。

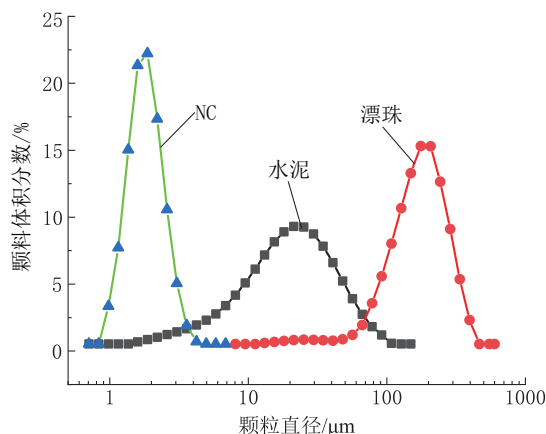


图 1 实验材料的粒度分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curves of experimental materials

### 2.2 实验设备

实验中使用了 Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪、抗压抗折强度测试仪、二界面胶结强度试验机、Chandler-8240 型高温高压稠化仪、恒温恒湿箱、变温变压养护釜、高速搅拌机、水泥浆密度计、分析天平等。

### 2.3 实验方法

水泥石的力学性能、稠化性能、失水量、游离液

含量等试验方法按《油井水泥》(GB/T 10238—2015)、《油井水泥试验方法》(GB/T 19139—2012)、《油井水泥浆性能要求》(SY/T 6544—2010)等标准、规范进行。为避免漂珠高速搅拌时发生剪切破碎,水泥浆制备过程采用低速(4000 r/min)搅拌的方式。

#### 2.4 水泥浆设计原理

对材料的粒径分布进行分析:漂珠的平均粒径为195  $\mu\text{m}$ , 70.70~336  $\mu\text{m}$ 的颗粒体积占95.46%, 充当骨架;水泥的平均粒径为21.90  $\mu\text{m}$ , 3.38~70.70  $\mu\text{m}$ 的颗粒体积占94.33%, 充当第二级填充骨料;NC的平均粒径为1.94  $\mu\text{m}$ , 0.833~3.38  $\mu\text{m}$ 的颗粒体积占96.67%, 充当第三级填充骨料, 构成三元固相体系堆积结构。

根据3种材料的粒径分布特点,选择混合料的边界条件为:最大颗粒尺寸 $D_L=336 \mu\text{m}$ , 最小颗粒尺寸 $D_s=0.833 \mu\text{m}$ , 并将混合料粒度分为3级, 即0.833~3.38、3.38~70.70、70.70~336  $\mu\text{m}$ 。通过改变DFE的粒径极值和 $n$ 值, 可调整NC和漂珠的含量, 得到不同紧密堆积程度的颗粒粒度分布曲线如图2所示。由图2分析可知, 随着 $n$ 值的增大, 漂珠的含量逐渐增大, NC的含量逐渐减小。当 $n$ 值恒定不变时, 漂珠体积含量随 $D_L-D_s$ 的增大而增大, NC体积含量随 $D_L-D_s$ 的增大而减小。

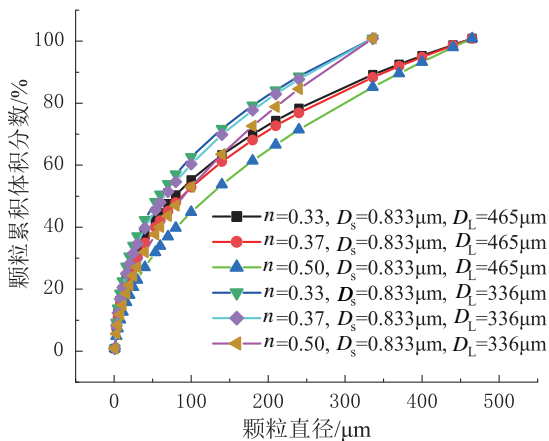


图2 不同 $n$ 值下的颗粒分布曲线

Fig.2 The cumulative volume distribution curves of materials under different  $n$  values

Funk等<sup>[30]</sup>和Dinger等<sup>[31]</sup>认为, 当 $n$ 的取值在0.37左右时, 满足该理论的颗粒堆积相对最为紧密。据此, 在0.37附近取值, 分别取 $n$ 值为0.33、0.35、

0.37、0.39、0.41和0.43进行配方设计。

根据DFE计算各掺料的体积分, 利用材料密度(G级水泥、漂珠和NC的密度分别为3.10、0.70、2.55  $\text{g}/\text{cm}^3$ )以及材料粒度分布曲线, 换算出漂珠和NC的质量加量, 可得漂珠和NC的质量加量随 $n$ 值的变化情况。在配制低密度水泥浆体时, 若 $n$ 值较大, 则漂珠含量多, 混合料密度低, 强度损失较大; 若 $n$ 值较小, 则NC含量多, 混合料密度较高, 减轻效果不明显。在水灰比一定的情况下, 通过调节 $n$ 值, 可获得不同密度的紧密堆积体系, 以此满足不同目的层的固井需求。

程荣超等<sup>[33]</sup>研究表明,  $n$ 值在0.303~0.488范围内取值时, 可实现材料的紧密堆积。基于此, 在保持体系水固比( $w/s=0.50$ )和UCSRL系列液体添加剂加量固定的基础上, 利用试算法(改变 $n$ 值)并结合试验评价, 最后确定 $n$ 值为0.353并代入DFE, 可得三元固相体系的粒径分布和3种材料的等效体积含量, 进行质量换算后即可得G级油井水泥、漂珠和NC的质量配比为100:25:16。结合试验筛选的外加剂, 设计出密度为1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ 的低密度水泥浆体系配方I: G级水泥+25%漂珠+16%NC+1%降失水剂(UCSRL-203)+2%分散剂(UCSRL-204)+3%早强剂(UCSRL-205)+0.5%消泡剂(UCSRL-206), 水固比为0.510。

### 3 水泥浆性能试验评价

#### 3.1 力学性能评价

在水泥浆密度都为1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ 和养护条件相同的情况下, 分别测试三元固相体系(配方I)、漂珠二元固相体系(配方II)和NC二元固相体系(配方III)的抗压强度、抗折强度和二界面胶结强度, 结果如表1所示。由表1分析可知, 在1、3、7 d三个龄期内, 配方I的抗压强度、抗折强度和二界面胶结强度均高于相同密度的配方II和配方III。配方I水泥石1、3和7 d的抗压强度分别达到了6.26、16.48和20.94 MPa, 较配方II分别提高了7.0%、10.8%和12.4%, 较配方III分别提高了21.1%、12.7%和20.0%。配方I水泥石1、3和7 d的抗折强度分别为2.34、3.01和3.48 MPa, 较配方II分别提高了51.9%、21.9%和22%, 较配方III分别提高了46.3%、29.7%和13.4%。配方I水泥石3 d和7 d的二界面胶结强度分别为1.40 MPa和2.05 MPa, 较



配方Ⅱ分别提高了122.2%和60.2%，较配方Ⅲ分别提高了45.8%和41.4%。表明利用DFE所设计的颗粒填充体系具有较强的实用性，形成的三元固相紧密堆积效应可提高水泥石密实度和早期强度。NC在三元固相混合料体系中主要起填充微孔隙、增强结构和增加结晶成核位点的作用，使水泥石结构趋于致密，水泥石中的孔径得到细化，孔隙度得到降低，在宏观上表现出优异的力学性能。

表1 三元与二元固相级配固井水泥石力学强度对比

Table 1 The comparison between ternary and binary solid phase systems cement stone of mechanical strength

力学强度/ MPa	养护 时间/d	配方		
		I	II	III
抗压强度	1	6.26	5.85	5.17
	3	16.48	14.87	14.62
	7	20.94	18.63	17.45
抗折强度	1	2.34	1.54	1.60
	3	3.01	2.47	2.32
	7	3.48	2.85	3.07
二界面胶结强度	3	1.40	0.63	0.96
	7	2.05	1.28	1.45

注：配方Ⅱ：G级水泥+30%漂珠+1%降失水剂(UCS-RL-203)+2%分散剂(UCSRL-204)+3%早强剂(UCS-RL-205)+0.5%消泡剂(UCSRL-206)，水固比为0.487；配方Ⅲ：G级水泥+23%NC+1%降失水剂(UCSRL-203)+2%分散剂(UCSRL-204)+3%早强剂(UCSRL-205)+0.5%消泡剂(UCSRL-206)，水固比为0.561。养护条件：温度15℃，标准大气压，水浴养护。

### 3.2 水泥浆流变性能评价

为了保证现场施工的顺利进行，固井水泥浆还需要具有良好的流变性能和可泵送性能。基于此，在实验室内对所设计的固相混合料固井水泥浆进行了流变性能测试，实验结果如表2所示。由表2可见，所设计的三元固相体系固井水泥浆体系的流性指数稠度系数分别为0.63和1.59 Pa·s<sup>n</sup>，与同密度的二元固相体系配伍性能相比，整体差异不大，浆体失水量为22 mL/30 min，游离液含量为0，浆体30~100 Bc的稠度发展较快。

分析认为，固相混合体系的堆积效应明显，颗粒之间紧密接触，降低了充填于混合料颗粒间的自由水的含量，使体系水化产物的结构强度得到明显改善。同时，紧密堆积形成的致密网架结构，不仅

表2 三元和二元固相混合料固井水泥浆的流变性

Table 2 Rheological properties of ternary and binary cement slurry systems

浆体性能参数		配方 I	配方 II	配方 III
流变性能	流性指数 $n$	0.63	0.65	0.64
	稠度系数 $K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	1.59	1.51	1.55
稠化性能/min	常压、75℃	30 Bc	426	392
		100 Bc	483	446
失水量/[mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]		22	40	51
游离液含量/mL		0	3	5

使体系的比表面积明显增大，还可产生多层笼形立体包裹效应，增强了对自由水的束缚能力，从而使水泥浆的失水和游离液含量得到有效控制。此外，NC颗粒像滚珠一样充填在漂珠和水泥颗粒之间，改善了整个体系的润滑性和流动性，易于浆体的混合和泵送。

### 3.3 浆体沉降稳定性评价

为了保证固结过程中的体系稳定和储层封隔质量，固井水泥浆需具有良好的浆体沉降稳定性。实验中，先将配制好的固相混合料固井水泥浆注入直径50 mm、长200 mm的PVC管(底部密封)中制成实验试件。之后，将试件竖直放置于水浴箱中，在20℃的常压环境下养护24 h。然后取出试件并将其平均锯成6段，从上到下依次编号为a、b、c、d、e、f，分别测试各段的密度，实验结果如表3所示。

由表3可知，三元固相级配固井水泥石在垂向上的最大密度差只有0.022 g/cm<sup>3</sup>，较漂珠二元固相体系和NC二元固相体系的0.040 g/cm<sup>3</sup>和0.027 g/cm<sup>3</sup>来说，上下密度差更小，沉降稳定性更好。由此可见，所设计的三元固相混合料固井水泥浆具有良好的浆体沉降稳定性，与二元固相体系相比，三元固相体系的堆积更紧密，形成的空间网架结构更牢固，因而所产生的体系稳定效应更好。

## 4 现场应用情况

应用三元体系固井水泥浆在中国南海某井进行浅表层固井2口。固井作业施工顺利进行，固井过程中监控水泥浆的密度，密度范围为1.47~1.51 g/cm<sup>3</sup>。应用密度为1.50 g/cm<sup>3</sup>三元固井水泥浆有效降低了水泥浆的液柱压力，并可有效防止固井漏

表3 三元和二元固相级配固井水泥石的纵向密度变化

Table 3 Longitudinal density changes of ternary and binary cement slurry systems

配方	水泥浆 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	分段水泥石密度/(g·cm <sup>-3</sup> )						最大密度 差/(g·cm <sup>-3</sup> )
		a	b	c	d	e	f	
I	1.50	1.506	1.513	1.510	1.519	1.515	1.528	0.022
II	1.50	1.503	1.511	1.521	1.528	1.536	1.543	0.040
III	1.50	1.509	1.516	1.521	1.525	1.529	1.536	0.027

失。测井结果表明,2口井固井质量均合格,目的层段固井质量优质,水泥上返至泥线,合格率达100%,取得了良好的应用效果。截止目前,试验井生产一切正常,固井质量优异。

## 5 结论

(1)在对比分析国内外经典紧密堆积理论研究成果的基础上,优选出DFE作为固井水泥浆体系设计的紧密堆积理论,并通过实验对其控制参数 $n$ 的取值进行了合理优化,最终确定适宜G级油井水泥基深水固井水泥浆体系设计的 $n$ 值范围为0.33~0.40。

(2)利用DFE和优选的参数控制范围,通过分析水泥、NC和漂珠的粒度分布,设计出一种密度为1.50 g/cm<sup>3</sup>的三元固相混合料低温早强固井水泥浆体系。与同密度的漂珠二元固相体系和NC二元固相体系相比,在低温条件下该体系的早期强度发展更快。与此同时,浆体的稠化性质、流变性和稳定性与二元体系相比整体差异不大。基于DFE设计的水泥浆在中国南海固井2口,现场应用效果良好。

(3)DFE对于多元固井水泥浆体系的设计和应用具有一定的指导意义,在保证低密度的前提下能够有效提高固井水泥石的早期强度和综合性能。

## 参考文献(References):

- [1] 步玉环,侯献海,郭胜来.低温固井水泥浆体系的室内研究[J]. 钻井液与完井液,2016,33(1):79-83.  
BU Yuhuan, HOU Xianhai, GUO Shenglai. Study on low temperature cementing slurry[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016,33(1):79-83.
- [2] Oort E V, Hoxha B B, Hale A. Thermal wellbore strengthening through managed temperature drilling-Part II: Chemical system design and laboratory testing[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2018,58:275-284.
- [3] Kiran R, Teodoriu C, Dadmohammadi Y, et al. Identification and evaluation of well integrity and causes of failure of well integ-

rity barriers (A review)[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017,45:511-526.

- [4] 刘天乐,郑少军,王韧,等.固井水泥浆侵入对近井壁水合物稳定的不利影响[J].石油学报,2018,39(8):937-946.  
LIU Tianle, ZHENG Shaojun, WANG Ren, et al. Negative effect of cementing slurry invasion on gas hydrate stability around borehole wall[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018,39(8):937-946.
- [5] 许明标,曾晶,唐海雄,等.适于海洋深水固井的零稠化转化时间低温水泥浆体系研究[J].石油天然气学报,2007(3):104-107.  
XU Mingbiao, ZENG Jing, TANG Haixiong, et al. Research on a cement slurry for deepwater cementing operation in zero thickening transition period at low temperature[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007(3):104-107.
- [6] 王成文,王瑞和,步玉环,等.深水固井水泥性能及水化机理[J].石油学报,2009,30(2):280-284.  
WANG Chengwen, WANG Ruihe, BU Yuhuan, et al. Properties and hydration mechanism of deepwater cementing system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(2):280-284.
- [7] Le R D, Sylvaine. Cementing compositions and applications of such compositions for cementing oil wells or the like: EP19990963494[P]. 2003-10-12.
- [8] 周仕明,李根生,王其春.超高密度水泥浆研制[J].石油勘探与开发,2013,40(1):107-110.  
ZHOU Shiming, LI Gensheng, WANG Qichun. Research and preparation of ultra-heavy slurry[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(1):107-110.
- [9] Biezen E, Ravi K. Designing effective zonal isolation for high-pressure/high-temperature and low temperature wells[J]. Society of Petroleum Engineers, 1999(1):57583-MS.
- [10] Weerd A, Aghbari S, Hanshi S, et al. Innovative application of foamed cement for zonal isolation of a tieback casing across highly corroded casing [C]. Society of Petroleum Engineers. 2010(1):128261-MS.
- [11] 席方柱,屈建省,吕光明,等.深水低温固井水泥浆的研究[J].石油钻采工艺,2010,32(1):40-44.  
XI Fangzhu, QU Jiansheng, LV Guangming, et al. Study of deepwater low-temperature cement slurry [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010,32(1):40-44.
- [12] 刘慧婷,刘硕琼,齐奉忠.紧密堆积优化固井水泥浆体系研究进展[J].硅酸盐通报,2014,33(9):2269-2274.

- LIU Huiting, LIU Shuoqiong, QI Fengzhong. Research progress of cement slurry system optimized by dense packing theory [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(9): 2269-2274.
- [13] 唐明,陈勇.论混凝土材料的高功能化[J].混凝土,2001(3):14-18.  
TANG Ming, CHEN Yong. Discussion high functional concrete material [J]. Concrete, 2001(3):14-18.
- [14] 黄柏宗.紧密堆积理论优化的固井材料和工艺体系[J].钻井液与完井液,2001,18(6):1-9.  
HUANG Baizong. New cementing materials and technique developed on the concept of high packing density [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2001, 18(6):1-9.
- [15] 滕兆健,龚智宇,燕平,等.紧密堆积在HFY油田盐膏层固井水泥浆中的应用[J].西部探矿工程,2019(1):17-20.  
TENG Zhaojian, GONG Zhiyu, YAN Ping, et al. Application of close packing theory in cementing slurry of salt gypsum layer in HFY Oilfield [J]. West-China Exploration Engineering, 2019(1):17-20.
- [16] Piot B, Ferri A, Mananga S P, et al. West africa deepwater wells benefit from low-temperature cements [C]. Society of Petroleum Engineers, 2001.(67774-MS).
- [17] Tsubasa S, Kenichi S, Muhannad A. Water absorption and shrinkage behavior of early-age cement in wellbore annulus [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 169: 205-219.
- [18] 齐志刚.低温低水化热固井水泥浆体系研究[D].青岛:中国石油大学,2009.  
QI Zhigang. Research on a low temperature and low hydration heat cement slurry system [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [19] 顾军,陶雷,干品,等.天然气水合物钻探低温低密度水泥浆体系优选试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(1):24-27.  
GU Jun, TAO Lei, GAN Pin, et al. Optimization test of low-temperature and low-density cementing slurry system for natural gas hydrate drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(1):24-27.
- [20] Rao G A. Generalization of Abrams' law for cement mortars [J]. Cement & Concrete Research, 2001, 31(3):495-502.
- [21] Furnas C C. Grading Aggregates I. Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density [J]. Ind.Eng.Chem, 1931, 3:1052-1058.
- [22] Fuller W B, Thompson S E. The laws of proportioning concrete [J]. Journal of the Society for Chemical Industry, 1934, 53(2):107-115.
- [23] 乔龄山.水泥的最佳颗粒分布及其评价方法[J].水泥,2001(8):1-5.  
QIAO Lingshan. The optimum particle size distribution of cement and its assessment method [J]. Cement, 2001(8):1-5.
- [24] 乔龄山.细粉材料颗粒特性、堆积密度和混凝土泌水性的新检验方法[J].水泥,2007(5):1-8.  
QIAO Lingshan. A new test method for particle characteristics, bulk density and concrete bleeding of fine powder materials [J]. Cement, 2007(5):1-8.
- [25] Horsfield H T. The strength of asphalt mixtures [J]. Journal of the Society for Chemical Industry, 1934, 53(2):107-115.
- [26] Goltermann P, Johansen V, Palbol L. Packing of aggregates: An alternative tool to determine the optimal aggregate mix [J]. Aci Materials Journal, 1997, 94(5):435-443.
- [27] Jones M R, Zheng L, Newlands M D. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio [J]. Materials & Structures, 2002, 35(5): 301-309.
- [28] Bonneau O, Poulin C, Dugat J, et al. Reactive powder concretes: From theory to practice [J]. Concrete International, 1996, 18(4):47-49.
- [29] Andreasen A H M. Zur kenntnis des mahlgutes [J]. Kolloidchemische Beihefte, 1928, 27(6-12):349-358.
- [30] Funk J E, Dinger D R. Particle packing, part 1: Fundamentals of particle packing monodisperse spheres [J]. Inter-ceram, 1992, 41(1):10-14.
- [31] Dinger D R, Funk J E. Particle packing, part V: Computational methods applied to experimental distributions [J]. Inter-ceram, 1994, 43(2):87-89.
- [32] 唐明,潘吉,巴恒静.水泥基粉体颗粒群分形几何密集效应模型[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005, 21(5): 515-518.  
TANG Ming, PAN Ji, BA Hengjing. The model of the cementing matrix powder group fractal geometry denseness effect [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Edition of natural Science), 2005, 21(5):515-518.
- [33] 程荣超,王瑞和,王成文,等.基于分形级配理论的油井水泥体系设计及评价[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008, 32(6):83-87.  
CHENG Rongchao, WANG Ruihe, WANG Chengwen, et al. Design and evaluation of oil well cement system based on fractal grading theory [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6):83-87.

(编辑 荐华)