

# 水合物地层低热固井水泥浆用相变微胶囊的制备及应用

杨国坤, 汪爱明, 尹舒婷, 代天, 刘天乐, 蒋国盛  
(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:**当深海固井遇到天然气水合物地层时,由于水泥浆水化放热,导致水合物的相变平衡条件发生改变,诱发水合物分解,引起二界面胶结质量下降等问题。为提高水合物地层固井质量,可向水泥浆中添加具有吸热控温作用的相变微胶囊,可有效降低固井水泥浆的水化升温。基于此,以配比石蜡为控温芯材、碳酸钙为壁材,利用自组合法制备了一种用于深水水合物地层固井水泥浆控温微胶囊。由于固井水泥浆在达到水合物地层的过程中,外界温度环境复杂,单一相变温度的控温芯材极易失效。为扩展控温区间,选用切片石蜡与白油作为混合芯材,控温区间达到14.8~39.8℃。研究表明,该微胶囊表观形态良好、彼此无团聚,在热循环过程中,不易发生泄漏。与水泥浆复配后,对水泥浆流变性能无明显影响。在低掺加量时,微胶囊主要起降低水泥浆峰值温度的效果,并提升水泥石整体力学强度;高掺加量时,微胶囊既可以有效降低水泥浆峰值温度,也可以明显地延缓水泥浆放热速率。

**关键词:**固井水泥浆;天然气水合物;水合物地层;相变微胶囊

**中图分类号:**TE256<sup>+</sup>.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)03-0118-07

## Preparation and application of phase change microcapsules for low heat cement slurry for well cementing in hydrate formation

YANG Guokun, WANG Aiming, YIN Shuting, DAI Tian, LIU Tianle, JIANG Guosheng  
(Unconventional Cementing & Special Reinforcement Laboratory, China University of Geosciences,  
Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** When deep-sea cementing is performed in the natural gas hydrate formation, hydration heat release of cement slurry will change the phase transition equilibrium conditions of hydrate, and induce hydrate decomposition, causing the quality of cementation at the two interfaces to decrease. In order to improve the cementing quality in hydrate formation, phase change microcapsules with endothermic temperature control can be added to cement slurry to effectively reduce the hydration temperature of cementing slurry. Based on this, a temperature-controlled microcapsule for cementing slurry in deep water hydrate formation was prepared with the self-assembly method. The temperature-controlled core material with single phase transition temperature is easy to fail due to the complex external temperature environment of cementing cement slurry in the process of reaching hydrate formation. For expanding the temperature control range, paraffin and white oil were selected as the mixed core material with the temperature control range from 14.8°C to 39.8°C achieved. Study shows that the microcapsule has good apparent morphology and no agglomeration with each other, so it is not prone to leakage during thermal cycling. After mixed with cement slurry, it doesn't affect obviously the rheological properties of cement slurry. At low dosage, microcapsules mainly reduces the peak temperature of cement slurry and improves the overall mechanical strength of cement stone. At high dosage,

**收稿日期:**2020-10-30; **修回日期:**2021-01-31 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2021.03.017

**基金项目:**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:**杨国坤,男,汉族,1996年生,在读研究生,地质工程专业,研究方向为低热水泥浆用控温微胶囊,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,Yangguokuncug@163.com。

**引用格式:**杨国坤,汪爱明,尹舒婷,等.水合物地层低热固井水泥浆用相变微胶囊的制备及应用[J].钻探工程,2021,48(3):118-124.

YANG Guokun, WANG Aiming, YIN Shuting, et al. Preparation and application of phase change microcapsules for low heat cement slurry for well cementing in hydrate formation[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):118-124.

microcapsules can not only effectively reduce the peak temperature of cement slurry, but also delay the heat release rate of cement slurry.

**Key words:** cementing slurry; natural gas hydrate; hydrate formation; phase change microcapsules

## 0 引言

全球天然气水合物资源丰富,被世界各国视为未来石油的战略接替能源<sup>[1-3]</sup>。目前为止,中国、美国、加拿大、日本、印度等国政府投入了大量的资金用于天然气水合物的资源勘探和基础物性研究。同时,加拿大、美国、日本先后进行了天然气水合物的试开采,以期早日实现水合物的商业利用<sup>[4]</sup>。进入“十三五”后,中国海油深水勘探全面迈进超深水勘探领域,并实现了从深水探井向深水开发井的转变<sup>[5-8]</sup>,2017年5月中国在南海神狐海域实现了水合物的60天成功试采,创下了平均日产气量超过5000 m<sup>3</sup>的记录,并在2020年3月第二轮试采中创造了产气总量86.14万m<sup>3</sup>、日均产气量2.87万m<sup>3</sup>两项新的世界纪录<sup>[9-16]</sup>。天然气水合物仅在高压低温环境下稳定存在<sup>[17-21]</sup>。当海洋深水表层紧邻水合物地层时,在固井水泥浆水化放热的影响下,井眼周围环境温度升高,改变了周围水合物层的温度条件,易造成水合物大量的分解,释放出的大量气体会侵入水泥浆内,导致本已胶结良好的水泥环与井壁之间出现微环空等使固井质量下降的问题,且气体不断地向上喷发,导致井喷事故,严重的可能发生局部塌陷,甚至破坏整个层位,形成恶性循环,使周围的水合物全部分解,最终导致固井的失败等一系列问题<sup>[21-26]</sup>。因此,减缓固井水泥浆水化放热速率是保障水合物地层固井安全的重要因素。

相变材料是一种通过自身相态的变化对热能进行存储,从而对材料周围的环境温度进行调节的新型功能材料<sup>[27-28]</sup>,当水泥浆水化温度上升至相变点时,相变材料熔化吸热,使自身温度保持不变,从而控制水泥浆体系水化过程中的温度。目前,相变材料广泛应用于航空航天热控制系统、电动汽车的热管理、太阳能锅炉的性能提升、建筑节能等<sup>[29-32]</sup>。Duan和Naterer<sup>[33]</sup>以圆柱形加热棒模拟电池产热,利用PCM热管理对比空气自然对流冷却时减少了约30℃。王传涛等<sup>[34]</sup>利用金属波纹管封装石蜡后蛇形敷设于墙体中,墙体温度衰减倍数为普通墙的1.25倍,其对环境温度变化的敏感度更

低,温感舒适性更好。Karthick等<sup>[35]</sup>将无机盐水合物组成的相变材料与PV电池结合,并研究其自身的电热性能及对于建筑的影响,经计算,如果建筑使用此种PV-PCM立面系统,累计可以减少1.74 t二氧化碳排放。由于相变材料吸热控温的过程中,相变致使自身力学强度急剧下降并且产生流变性,从而使水泥环内部裂缝产生的可能性大幅提高,对固井的安全保障极为不利,因此相变材料不宜直接掺加在水泥浆体系中。利用微胶囊技术可以较好地解决相变材料相变时对固井水泥环带来的损伤问题。微胶囊技术是指利用具备一定力学强度的致密壁材将芯材进行包覆,形成性质相对稳定的微粒技术,有效隔绝了芯材与外界环境的接触。然而,到目前为止,相变微胶囊在深水固井领域的研究和应用都相对较少。

基于上述问题,本工作利用配比石蜡作为相变控温材料、碳酸钙为壁材,利用自组装法制备了一种深水水合物地层低热固井水泥浆用微胶囊,并对其相关性能进行了评价。

## 1 实验

### 1.1 材料

白油(上海迈瑞尔化学技术有限公司)、切片石蜡(上海迈瑞尔化学技术有限公司)、十二烷基苯磺酸钠(阿拉丁试剂)、无水氯化钙(阿拉丁试剂)、碳酸钠(上海迈瑞尔化学技术有限公司)。

### 1.2 制备工艺

采用自组装工艺制备了以白油、切片石蜡混合物为芯材,碳酸钙作为壁材的相变控温微胶囊。称取5 g配比石蜡(白油:切片石蜡=0.2:0.8),并将配比石蜡融化成透明状。取0.25 g SDBS溶于50 mL去离子水中,搅拌溶解,加至熔融配比石蜡中,置于磁力搅拌器上,以300 r/min转速搅拌20 min,得到W/O乳液,记为体系1。向体系1中滴加70 mL溶有3.5 g/mL CaCl<sub>2</sub>的去离子水溶液,并加入质量比为1:1的司盘-吐温表面活性剂以200 r/min的转速搅拌1 h,记为体系2。向体系2中滴加70 mL溶有

3.5 g/mL  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  去离子水溶液,以 300 r/min 的转速搅拌 30 min。将得到的浑浊液过滤、洗涤、干燥,得到配比石蜡-碳酸钙微胶囊。

## 2 微胶囊描述

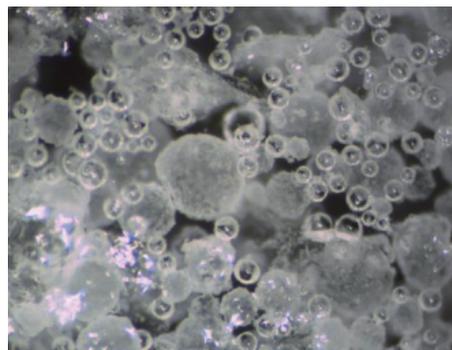
使用蔡司体视显微镜观察微胶囊的表观形态。使用电热鼓风恒温干燥箱对配比石蜡-碳酸钙微胶囊进行泄露试验,经 20 次热循环,温变区间为常温至 200  $^{\circ}\text{C}$ 。使用综合热分析仪测定微胶囊的热物性能。使用水泥石抗压抗折测试机测量水泥石力学强度。

### 2.1 表观形态分析

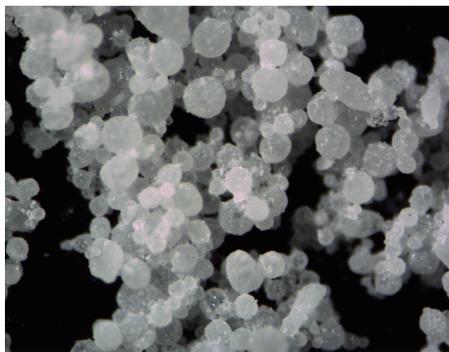
石蜡-碳酸钙微胶囊未过滤前的体视显微镜图如图 1(a)所示,观察可知微胶囊彼此分散,无团聚现象,表观形态良好,整体呈球霰状。由于与  $\text{CO}_3^{2-}$  反应迅速,为避免其在溶液中提前反应,而未能充分包覆在石蜡小液滴表面,需控制表面活性剂的添加量和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的滴加速率。表面活性剂 SDBS 一端为亲油基团烷基基团,贴近石蜡液滴表面,另一端亲水基团则向外端整齐排列,熔融石蜡表面张力减小,在剪切力的作用下,分散成粒径与转速负相关的石蜡小液滴。 $\text{Ca}^{2+}$  受配位键作用力,向 SDBS 的亲水基团苯磺酸根靠近,包覆在石蜡小液滴表面,并在离子键作用下与后续添加的  $\text{CO}_3^{2-}$  形成难溶物  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  壁材。图 1 中白色小颗粒量极少,说明  $\text{CO}_3^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  主要发生在微胶囊表面,壁材包封利用率较高。如图 1(b)所示,微胶囊在过滤过程中,未发生壁材破碎,表观形态良好,整体依旧呈现为球霰状,平均粒径为 150  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 热循环和泄露试验

微胶囊的包封率与热稳定性是微胶囊应用于实际生产的关键因素。将芯壁比为 1:2(P1)、1:1(P2)微胶囊与配比石蜡(P3)制样(如图 2 所示),置于电热鼓风干燥箱,在 0~80  $^{\circ}\text{C}$  区间内均匀升降温度,并循环 20 次。热循环后,未微胶囊化的配比石蜡完全熔融,芯壁比为 1:1 的微胶囊样品外形几乎没有变化,样品表面出现具有光泽的油性物质,自身力学强度大幅下降,说明此时微胶囊的壁材对芯材的封装效果不佳,存在芯材泄露的现象。芯壁比为 1:2 的微胶囊样品外形未发生变化,且整体力学强度良好,壁材起到了保护芯材泄露、提供力学强度的功能。适量增加微胶囊壁材的质量分数有利



(a) 过滤前



(b) 洗涤干燥后

图 1 蔡司体式显微镜下微胶囊过滤前和洗涤干燥后

Fig.1 Microcapsule under the Zeiss microscope before filtration and after washing and drying

于对芯材更好的包封,但过厚的壁材可能会影响微胶囊的导热性能,使芯材对环境温度的敏感性下降。

### 2.3 差示扫描量热计(DSC)

利用综合热分析仪(德国耐驰)测量石蜡-碳酸钙微胶囊的相变潜热及相变温度点。经文献调研及实验室内研究,不同相变点的烷烃有机物混合,混合物的相变区间并不是单纯的将单一物质的相变区间进行叠加,其各个单一物质的相变点相互靠近,相变区间相互交融。根据此性质,将白油与配比石蜡按一定比例配比成微胶囊相变芯材。由图 3 可知微胶囊从 14.8  $^{\circ}\text{C}$  开始相变,35.07  $^{\circ}\text{C}$  时达到相变峰值,39.8  $^{\circ}\text{C}$  相变结束,对曲线积分可得微胶囊相变潜热  $\Delta H_m$  为 103 J/g。由于南海海面温度常年维持在 20  $^{\circ}\text{C}$  上下,深水水合物地层温度在 10  $^{\circ}\text{C}$  左右,从固井水泥浆进入套管开始,海面至地层表面区间的外界温度持续下降,由地层表面顶替至水合物地层区间的过程中,外界温度先上升后下降,外界温度变化较为复杂。经实验室内模拟,水泥浆在外界温

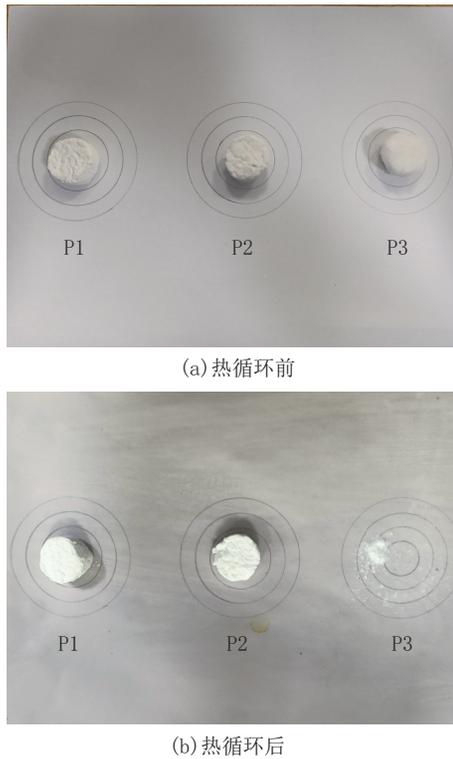


图 2 热循环前与热循环后样品泄露情况  
Fig.2 Leakage of samples before (a) and after (b) thermal cycling

度变化的环境下,自身温度区间为 10~30 °C,因此该微胶囊的相变温度点完全包含了水泥自身的温变区间,适合水合物地层低热固井水泥浆体系。

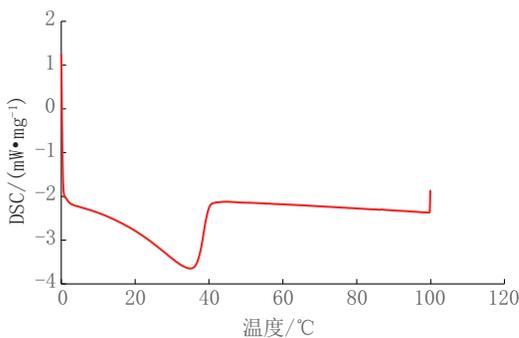


图 3 相变微胶囊的 DSC 曲线  
Fig.3 DSC curve of phase change microcapsules

### 3 微胶囊与水泥浆配伍性描述

水泥浆配方:提粘剂(CMC)+减水剂(RC-800)+膨胀剂(SEP-1)+纳米 SiO<sub>2</sub>+G 级水泥+Mic; Mic 芯壁比:1:2;水灰比:0.5;养护环境:温度为 20.0 °C,空气湿度为 90.0%;水泥块尺寸:40

mm×40 mm×40 mm。

### 3.1 水泥浆流变性

使用六速旋转粘度计测试配制浆液的流变系数  $n$ 。水泥浆不存在静剪切力,当施加极小的剪切力就能流动,故将水泥浆视为假塑形流体,其流变模式为幂律模式。稠度系数计算公式如下:

$$K = \frac{0.511\theta_{300}}{511^n}$$

式中: $K$ ——稠度系数,Pa·s <sup>$n$</sup> ;  $\theta_{300}$ ——转速为 300 r/min 的度数。

由图 4 可知,随着微胶囊质量分数的增加,水泥浆的稠度指数和流变系数分别在 0.62 Pa·s <sup>$n$</sup> 和 0.7 上下变化,变化幅度分别低于 5%和 4%。可以得出石蜡-碳酸钙微胶囊不会明显影响水泥浆的流变性能。

### 3.2 水泥浆控温性能评价

利用水泥浆水化热测试仪测量不同微胶囊添加量水泥浆的升温情况。如图 5 所示,未添加微胶囊组在 20 h 左右时达到峰值温度,峰值温度为 25 °C。1%微胶囊添加量的实验组到达峰值温度的时间同空白组相比,变化不大,但峰值温度下降了 3 °C 左右。当微胶囊加量较多时,如 5%、7%加量时,水泥浆温度下降近 10 °C,峰值温度下降 8 °C 左右,且升温波峰平坦,温度变化缓慢。综合图 5 水泥浆体系温度曲线变化规律,可以得出,当微胶囊掺加量较小时,微胶囊的控温作用主要体现在对峰值温度的控制。当微胶囊掺加比例较大时,微胶囊不仅可以明显降低水泥浆水化放热的峰值温度,也可以较好地延缓放热速率,这主要是因为微胶囊在水泥浆水化放热升温过程中自身相变,吸收周围的热量,使水泥浆整体升温减缓,并且由于高掺加比例的微胶囊替代一部分水泥熟料,降低了熟料在水泥成分中的有效含量,因而降低了水泥的整体水化热。

### 3.3 水泥石力学性能测试

使用抗压抗折力学测试仪对水泥试块进行抗压强度和抗折强度测试,每组试块测试 3 个平行试样,取测试的平均值。由图 6 和图 7 可知,水泥试块的抗压、抗折强度随着微胶囊掺加量的增加,大致呈先上升、后下降的趋势。这是因为微胶囊的平均粒径在 150 μm 左右,固井水泥灰平均粒径为 19.50 μm,而纳米 SiO<sub>2</sub>平均粒径为 7.01 μm,可填充在二元

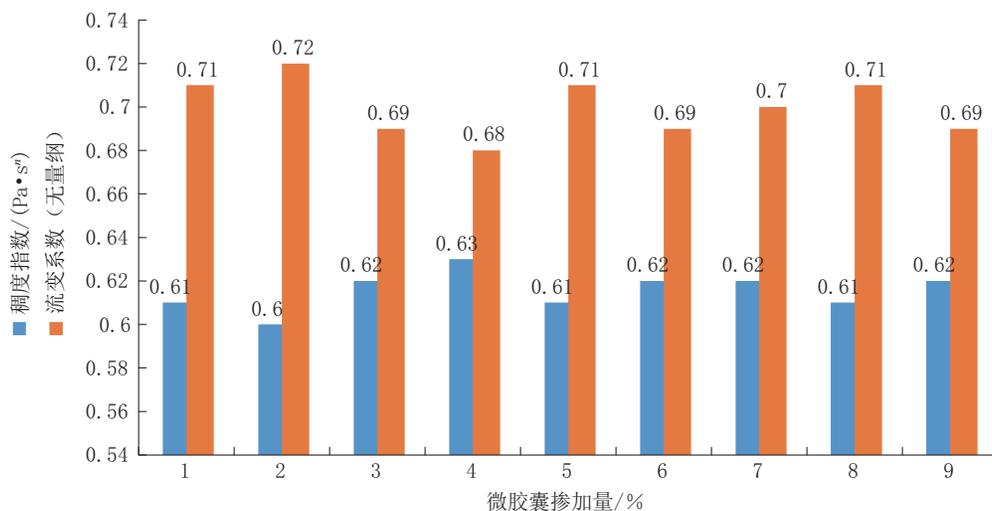


图4 相变微胶囊对水泥浆流变性能的影响

Fig.4 Effect of phase change microcapsules on rheological properties of cement slurry

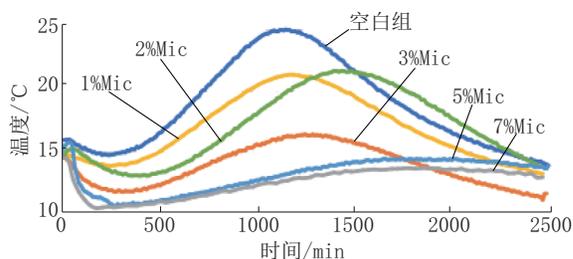


图5 水泥浆水化放热温度-时间曲线

Fig.5 Temperature vs time curve of hydration heat release

体结构的孔隙内或者充当水泥部分材料的作用,构成三元堆积体。研究表明<sup>[22-23]</sup>,2%~5%的NS加量可明显降低水泥石的渗透率,改善孔隙结构,提高水泥石的力学性能。因此,相变微胶囊与纳米SiO<sub>2</sub>在水泥浆体系中承担着粗细骨料的作用,使得水泥试块整体力学强度在低微胶囊添加时得到增强。当微胶囊掺加量达到3%时,水泥试块强度与微胶囊掺加量呈负相关,这可能是由于微胶囊自身体积相较于水泥灰颗粒较大,在高掺加量时,彼此团聚,颗粒与颗粒间存在较大孔隙,并且部分微胶囊壁材破裂,内部石蜡芯材润湿微胶囊表面,使破裂微胶囊整体呈现疏水性,阻碍水泥浆液对于微胶囊团聚间隙的填堵,因此当微胶囊掺加量过大时,水泥试块整体力学强度呈下降趋势。

#### 4 结论

采用自组装法制备了以配比石蜡为芯材、碳酸钙为壁材的控温微胶囊。微胶囊表现形态良好,整

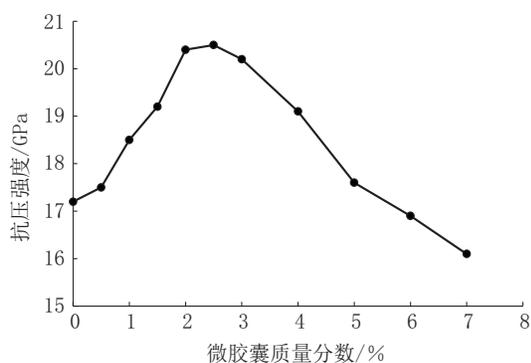


图6 水泥试件抗压强度

Fig.6 Compressive strength of cement specimens

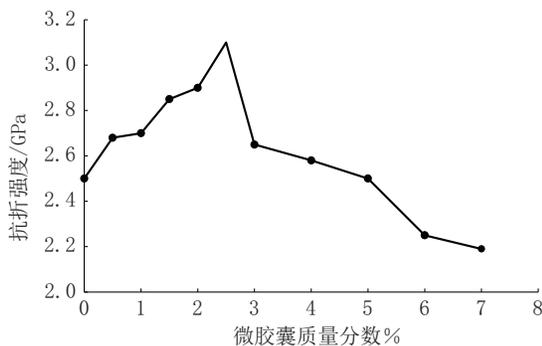


图7 水泥试件抗折强度

Fig.7 Bending strength of cement specimens

体呈球霰状,无团聚现象,从14.8℃开始相变,35.07℃时达到相变峰值,39.8℃相变结束,相变温度点较低,具有较广的相变控温区间,适用于低热水泥浆体系。该微胶囊对水泥浆流变性能无明显

影响。随着微胶囊质量分数的增加,水泥试块的力学强度先增加后下降。在控温性能方面,低掺加的微胶囊的作用主要体现在对水泥浆峰值温度的控制上,而高掺加量的微胶囊既可以有效地降低水泥浆峰值温度,也可以明显延缓水泥浆水化放热速率。该微胶囊的研究为水合物地层低热固井水泥浆体系的制备提供了新的思路。

### 参考文献(References):

- [1] 李文龙,高德利,杨进.海域含天然气水合物地层钻完井面临的挑战及展望[J].石油钻采工艺,2019(6):681-689.  
LI Wenlong, GAO Deli, YANG Jin. Challenges and prospect of the drilling and completion technologies used for the natural gas hydrate reservoirs in sea areas[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019(6):681-689.
- [2] 杜垚森,冯起赠,许本冲,等.海域天然气水合物试采研究现状及存在的问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):6-9.  
DU Yaosen, FENG Qizeng, XU Benchong, et al. Research status and existing problems in oceanic gas hydrate trial production [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(4):6-9.
- [3] 李彦龙,胡高伟,刘昌龄,等.天然气水合物开采井防砂充填层砾石尺寸设计方法[J].石油勘探与开发,2017(6):961-966.  
LI Yanlong, HU Gaowei, LIU Changling, et al. Gravel sizing method for sand control packing in hydrate production test wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017 (6) : 961-966.
- [4] 骆汀汀.天然气水合物开采过程粉质沉积物力学特性研究[D].大连:大连理工大学,2020.  
LUO Tingting. Study on mechanical behaviors of silty sediments during natural gas hydrate recovery[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [5] 罗宇维,肖伟,赵军.“十三五”中国海油固井技术研究进展与发展建议[J].中国海上油气,2020(5):145-151.  
LUO Yuwei, XIAO Wei, ZHAO Jun. Research progress and development suggestions on cementing technology of CNOOC during the 13th Five-Year Plan Period [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020(5):145-151.
- [6] 侯林,李斌,陈思桥,等.海洋平台大排量双混浆固井双机双泵橇的设计与应用[J].机床与液压,2019(8):82-87.  
HOU Lin, LI Bin, CHEN Siqiao, et al. Design and application of large displacement double mixture sludge cementing dual machine and dual pump sled for offshore platform [J]. Machine Tool & Hydraulic, 2019(8):82-87.
- [7] 罗宇维,赵琥,宋茂林,等.中国海油固井技术发展现状与展望[J].石油科技论坛,2017(1):32-36.  
LUO Yuwei, ZHAO Hu, SONG Maolin, et al. Current conditions and outlook of CNOOC cementing technological develop-  
ment[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2017(1): 32-36.
- [8] 侯林,李斌,雷彪,等.国内外深水固井设备及国产化方向[J].当代化工,2015(3):590-591,594.  
HOU Lin, LI Bin, LEI Biao, et al. Domestic and foreign deep-water cementing equipments and its localization direction [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015(3):590-591,594.
- [9] 申志聪,王栋,贾永刚.水合物直井与水平井产气效果分析——以神狐海域 SH2 站位为例[J].海洋工程,2019,37(4):107-116.  
SHEN Zhicong, WANG Dong, JIA Yonggang. Analysis on gas hydrate exploitation response between the horizontal and vertical wells at SH2 site in the Shenhu area of the South China Sea [J]. The Ocean Engineering, 2019,37(4):107-116.
- [10] 光新军,王敏生.海洋天然气水合物试采关键技术[J].石油钻探技术,2016,44(5):45-51.  
GUANG Xinjun, WANG Minsheng. Key production test technologies for offshore natural gas hydrate [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,44(5):45-51.
- [11] Taoutaou S., Ashraf S., Takahashi U. Implementation of a fit-for-purpose cementing technology for the first gas hydrate production in Japan[C]// 2014 International Petroleum Technology Conference. Kuala Lumpur: 2014:1-15.
- [12] 李常茂,耿瑞伦.关于天然气水合物钻探的思考[J].探矿工程,2000(3):5-8.  
LI Changmao, GENG Ruilun. Pondering over gas hydrates exploration drilling [J]. Exploration Engineering, 2000(3):5-8.
- [13] Liu L P, Sun Z L, Zhang L, et al. Progress in global gas hydrate development and production as a new energy resource [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2019, 93 (3) : 731-755.
- [14] 万义钊,吴能友,胡高伟,等.南海神狐海域天然气水合物降压开采过程中储层的稳定性[J].天然气工业,2018,38(4):117-128.  
WAN Yizhao, WU Nengyou, HU Gaowei, et al. Reservoir stability in the process of natural gas hydrate production by depressurization in the Shenhu area of the South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2018,38(4):117-128.
- [15] 吴时国,王吉亮.南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J].科学通报,2018(1):2-8.  
WU Shiguo, WANG Jiliang. On the China's successful gas production test from marine gas hydrate reservoirs [J]. Chinese Science Bulletin, 2018(1):2-8.
- [16] 阮徐可,李小森,杨明军,等.天然气水合物二次生成及渗透率变化对降压开采的影响[J].石油学报,2015(5):612-619.  
RUAN Xuke, LI Xiaosen, YANG Mingjun, et al. Influences of gas hydrate reformation and permeability changes on depressurization recovery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015 (5) : 612-619.
- [17] Marin-Moreno, Hector, Giustiniani, Michela, Tinivella, Um-

- berta, et al. The challenges of quantifying the carbon stored in Arctic marine gas hydrate [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 76-82.
- [18] Oka Fusao, Kimoto Sayuri, Fushita Tomohiko. A chemo-thermo-mechanically coupled analysis of ground deformation induced by gas hydrate dissociation [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, 52(2): 365-376.
- [19] Tupsakhare, Swanand S, Kattakola, et al. An application of the results from the large-scale thermal stimulation method of methane hydrate dissociation to the field tests [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(15): 4588-4599.
- [20] 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.
- [21] Ruppel C., Jones E., Boswell R. Scientific results from Gulf of Mexico Gas Hydrates Joint Industry Project Leg 1 drilling: Introduction and overview [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 819-829.
- [22] Tetsuya Fujii, Kiyofumi Suzuki, Yuhei Komatsu. Sedimentary facies and paleoenvironments of a gas-hydrate-bearing sediment core in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66(Pt.2): 358-367.
- [23] 白玉湖, 李清平, 周建良, 等. 天然气水合物对深水钻采的潜在风险及对应性措施 [J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(3): 17-21.
- BAI Yuhu, LI Qingping, ZHOU Jianliang, et al. The potential risk of gas hydrate to deepwater drilling and production and the corresponding strategy [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(3): 17-21.
- [24] 郭辛阳, 步玉环, 李娟, 等. 井下复杂条件下固井水泥环的失效方式及其预防措施 [J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 86-91.
- GUO Xinyang, BU Yuhuan, LI Juan, et al. Modes and prevention of cement sheath failures under complex downhole conditions [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 86-91.
- [25] Nabipour A., Joodi B., Sarmadivaleh M., et al. Finite element simulation of downhole stresses in deep gas wells cements [C]// Deep Gas Conference and Exhibition. Manama, Bahrain; 2015: 577-589.
- [26] Hampshire Kenneth, McFadyen Mike, Ong Dominic, et al. Overcoming deepwater cementing challenges in South China Sea, East Malaysia [C]// IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 2004: 1-8.
- [27] 宋建建, 许明标, 王晓亮, 等. 新型相变材料对低热水泥浆性能的影响 [J]. *钻井液与完井液*, 2019(2): 218-223.
- SONG Jianjian, XU Mingbiao, WANG Xiaoliang, et al. The effects of a new phase change material on the properties of low heat cement slurries [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019(2): 218-223.
- [28] 邢希金, 许明标. 低热水泥吸热储能材料研究 [J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2016(5): 100-102.
- XING Xijin, XU Mingbiao. Study on endothermic energy-storage material of low thermal cemen [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2016(5): 100-102.
- [29] 王婷玉. 碳酸钙包覆石蜡基相变微胶囊的调温及强化传热研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- WANG Tingyu. Research on microencapsulation of paraffin based core with calcium carbonate shell for temperature regulation and heat transfer enhancement [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [30] Huang K D, Tzeng S C, Chang W C. Energy-saving hybrid vehicle using a pneumatic-power system [J]. *Applied Energy*, 2005, 81(1): 1-18.
- [31] King J. The king review of low-carbon cars: part I: the potential for CO<sub>2</sub> reduction [M]. 2007.
- [32] Fontaras G, Pistikopoulos P, Samaras Z. Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(18): 4023-4035.
- [33] Duan X, Naterer G F. Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 5176-5182.
- [34] 王传涛, 刘松阳, 韩杰, 等. 石蜡基相变储能墙结构设计与控温实验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(11): 3691-3696.
- WANG Chuantao, LIU Songyang, HAN Jie, et al. Structural design and experimental study on temperature control of paraffin-based latent thermal energy storage wall [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(11): 3691-3696.
- [35] Karthick A, Murugavel K. performance enhancement of a building integrated photovoltaic module using phase change material [J]. *Energy*, 2018, 142: 803-812.

(编辑 荐华)