

适用于浅表层固井的新型水泥浆体系研究

陆沛青

中石化石油工程技术研究院有限公司 北京 102206

摘要: 我国油气资源丰度低, 开发效益差, 低成本路线是刚性需求。在油气井工程成本中, 特种金属套管占比超过 40%, 主要消耗在大尺寸厚重浅层套管, 其一般在钻井中后期不再发挥作用, 造成极大浪费, 制约了油气资源高效开发。为有效降低工程成本, 结合传统固井技术工艺特点, 迫切需要研发一种适用于浅表层低成本套管固井的新型水泥浆体系, 用以替代部分金属套管。基于紧密堆积优化设计方法, 通过优选、复配聚羧酸分散剂、微米、亚微米填充材料和纳米活性材料, 开发了 1 套高强水泥浆体系, 密度 2.05g/cm³、稠化时间>300min、流动度>22cm、抗压强度 63MPa/48h, 抗拉强度 5.5MPa, 高强水泥环抗内压强度较常规提高 118.2%以上, 满足固井施工需求, 为浅表层低成本固井提供了良好的水泥浆体系基础。研究成果可望为低成本高质量固井技术优化提供参考与指导。

关键词: 固井; 高强; 水泥浆; 体系构建; 性能测试

Research on new cement slurry system suitable for shallow surface cementing

Peiqing Lu

Sinopec Petroleum Engineering and Technology Research Institute Co., LTD , Beijing 102206

Abstract: China's oil and gas resources have low abundance, poor development benefit, and the low cost route is a rigid demand. In the cost of oil and gas well engineering, special metal casing accounts for more than 40%, which is mainly consumed in large size and thick shallow casing, which generally no longer plays a role in the middle and late stage of drilling, resulting in great waste and restricting the efficient development of oil and gas resources. In order to effectively reduce the engineering cost and combine the characteristics of traditional cementing technology, it is urgent to develop a new cement slurry system suitable for low cost casing cementing in shallow surface to replace part of the metal casing. Based on the close accumulation optimization design method, through the optimization and combination of polycarboxylic acid dispersant, micron, submicron filling material and nanoactive material, a high strength cement slurry system was developed, density of 2.05 g/cm³, thickening time> 300min, flow degree of> 22cm, compressive strength of 63MPa / 48h, tensile strength of 5.5MPa, internal pressure strength of high strength cement ring increased more than 118.2% to meet the construction requirements, and provided a good cement slurry system foundation for low cost cementing in the shallow surface. The research results are expected to provide reference and guidance for the optimization of low cost and high quality cementing technology.

Keywords: Cementing; High strength; Cement slurry; System construction; Performance test

在油气井工程中, 为了保持井筒稳定性, 传统固井技术需要在裸眼地层中下入套管, 并在套管与岩层的环空中注入水泥浆, 以支撑套管, 封隔高压油气、水、层, 为油气开采提供安全的井筒环境^[1]。在工程成本中, 特种金属套管占比超过 40%, 主要消耗在大尺寸、厚重表层和技术套管。表层套管主要用以封隔地表浅水层、浅部疏松和易塌岩层, 直径在 508 mm~244.5 mm, 多采用 K55 或 N80 钢级^[2-4]; 技术套管又称中间套管, 在复杂地层的钻进过程中, 当遇到坍塌层、油层、气层、水层、漏失层、盐膏层等复杂部位时, 需要下技术套管进行封固, 保持井筒完整, 直径在 244.5~177.8 mm^[5]。事实上, 表层和技术套管都是油气井建井的中间套管程序, 在建井完成前, 还要再下入一层生产套管为油气生产创造良好的井筒环境^[6]。因此, 通常情况下, 浅层套管(表层和部分技术套管)在下一开作业结束后即不再发挥作用。

此时, 在全井均采用高钢级无缝金属套管, 将极大浪费钻井成本。

为有效降低工程成本, 结合传统固井技术工艺特点, 需要研发一种适用于浅表层低成本套管固井的高强水泥浆体系, 以高强水泥替代高成本无缝金属套管、支撑井壁, 为低成本高质量固井技术优化提供参考与指导。

一、高强水泥浆体系组份

在常规水泥浆体系的基础上, 通过复配、优选聚羧酸分散剂、微米、亚微米填充材料和纳米活性材料的一种或多种, 形成高强水泥浆体系。

(1) 常规水泥浆体系

以 G 级油井水泥和淡水为主, 淡水占比 20%~40% (相对水泥质量)。根据固井工况需要, 可添加一定比例的降失

水剂与缓凝剂。降失水剂质量占比 3%~8% (相对水泥质量), 缓凝剂质量占比 1%~3% (相对水泥质量)。常规水泥浆密度区间 1.80~2.00g/cm³。

(2) 聚羧酸分散剂

以丙烯酸 (AA) 和甲基烯丙醇聚氧乙烯醚 (HPEG) 为主要合成原料, 控制酸谜比 (AA: HPEG) 在 2~8 之间, 结合硅氧烷与磺酸基等特殊官能团 (增加吸附性能, 提高分散性和配伍性), 采用聚羧酸分子结构 (图 1), 研发高效聚羧酸分散剂, 粘均分子量 30000~36000, 聚合物含量在 70%~80%, 在水泥中的加量为 0.5%~2% (相对水泥质量)。

利用梳状结构空间位阻和静电斥力作用, 解聚带正负电荷水泥颗粒的吸引团聚, 释放出自由水, 减少填充水量, 降低拌合水的用量, 减水率达 40% 以上, 从而减少水泥石中由拌和水被反应后形成的孔隙率, 增加高强水泥石的致密性, 并保持水泥浆良好流动性, 显著提高水泥石的强度。

(3) 微米、亚微米填充材料

微米、亚微米填充材料均为非金属矿物, 整体加量 20%~50% (相对水泥质量)。

微米填充材料粒径范围 5~500 μm, 亚微米填充材料是材料工业新概念, 粒径范围一般为 0.1~5 μm, 整体加量 3%~10% (相对水泥质量)。

粉体材料优选范围: 铁矿粉 (350~500 μm)、硅粉 (120~180 μm)、菱镁石 (45~75 μm)、矿渣 (1~5 μm)、粉煤灰 (0.5~300 μm)、微硅 (0.3~1 μm)、石灰石等 (0.1~1 μm)。

(4) 纳米级活性材料

纳米级活性材料粒度直径范围 1nm~100nm, 金属氧化物整体加量 0%~4% (相对水泥质量), 非金属氧化物整体加量 0%~1% (相对水泥质量)。

优化活性粉末材料, 与水泥的晶体水化产物发生二次火山灰反应, 消除对强度有害的大尺寸晶体, 生成更多的对强度有利的大比表面积水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶, 从微观结构上改善水泥石形貌和组成, 进一步提高水泥石的强度。

纳米活性材料优选范围: 碳纳米管 (310~370nm、230~290nm)、纳米碳酸钙 (120~180nm)、纳米氧化钛 (60~100nm)、纳米二氧化硅 (40~80nm)、纳米氧化镁 (30~70nm)、纳米氧化铁 (20~60nm)、纳米三氧化二铝 (10~50nm) 等。

二、高强水泥浆体系构建方法

如前所述, 为了提升水泥浆体系综合性能, 填充材料种

类较多, 室内评价实验难以确定材料配比。可利用粉体材料颗粒级配原理^[7-9], 进行多粒径颗粒级配, 基于紧密堆积 MAA 模型 (式 1), 计算组份加量, 实现多级粉体颗粒材料的最紧密堆积, 增加水泥石的增加密实性, 提高水泥石的强度。

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^q$$

(1)

其中, P(D) 是粒径为 D 时的填充物百分含量, %; D 是填充物粒径, μm; D_{max} 是各类材料中的最大粒径, μm; q 是分布模数, 大小取决于体系中大颗粒和小颗粒的比值, 且大颗粒越多分布模数越大。

该模型描述尺寸无限小的颗粒连续堆积的理想状态, 未考虑颗粒最小尺寸的影响, 因此, 实际堆积状态可用下式 (式 2) 进行描述。

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q}$$

(2)

其中, D_{min} 是各类材料中的最小粒径, μm。

采用最小二乘法, 调整填充物材料中微米、亚微米、纳米尺度材料的质量比例, 计算不同原料比例下混合物累计分布曲线与理想模型目标曲线之间的偏差, 并用残平方和 (RSS) 进行表征 (式 3)。当体系混合粒径分布曲线与目标曲线的 RSS 最小时, 说明材料的堆积密实程度最大, 以此优化不同尺度填充材料配比。同时, 要保证水泥浆流动性, 密实程度同浆体流动度负相关, 可根据水泥浆流动度实验 (依据 API 标准), 在流动度 ≥ 20cm 的前提下, 进一步优化填充材料配比。

$$RSS = \sum_{i=1}^n \left(P_{\text{mix}}(D_i^{i+1}) - P_{\text{tra}}(D_i^{i+1}) \right)^2$$

(3)

其中, RSS 为残差平方和, P_{mix} 和 P_{tra} 分别为目标级配曲线和实际堆积曲线。

利用紧密堆积模型计算得出了四元粒径粉体的配比, 测试评价了由该配比拌合的水泥浆。由于此配比中小粒径填充材料微硅的占比为 7%, 其需水量较大, 达到较好流动性时的拌合水量为 36%, 养护后水泥石的强度未达到指标要求。可见, 按紧密堆积模型计算形成的最紧密堆积配比, 虽然堆积密度较大, 但流动性较差, 需水量高, 并未获得较高的强度。因此, 在紧密堆积模型计算的配比基础上, 进行个粒径

颗粒配比的调整。首先,按硅粉 40%掺量测试评价,在满足流动性的情况下,拌合水量为 34%,常温养护下抗压强度 51MPa,未达到指标要求。分析主要原因是硅粉的粒径大,常温下没有胶凝性,掺量较大时影响了强度发展。降低硅粉掺量为 25%,拌合水量为 31%,抗压强度 53MPa,有所提升。分析认为粉煤灰属于潜在活性材料,在常温下早期没有充分发挥火山灰反应,掺量大影响早期强度。因此,降低粉煤灰掺量为 15%,拌和水量降至 29%,抗压强度有所提高至 56MPa,接近指标要求。分析认为微硅的掺量稍高,微硅比表面积大,需水量高,导致达到要求流动性下的拌合水用量较大,增加水灰比,使得强度不够高。降低微硅掺量至 5%,拌合水用量降低至 5%,水泥石的抗压强度达到 63MPa,满足的指标要求。通过各级粉体材料掺量的调整和测试评价,形成了满足指标要求的粉体材料配比为硅粉:油井水泥:粉煤灰:微硅=25%:100%:15%:5%。

表 1 粉体材料配比调试

配比及性能	紧密堆积	最大硅粉量	最大粉煤灰量	最大微硅量	调整后
油井水泥, %	54	100	100	100	100
硅粉, %	22	40	25	25	25
粉煤灰, %	17	30	30	15	15
微硅, %	7	10	10	10	6
拌合水, %	36	34	31	29	30
抗压强度, MPa	47	51	53	56	63

经过配方调试和评价,得出的满足性能要求的超高强水泥浆的配方为:100%G级油井水泥+25%硅粉(70~100目)+15%粉煤灰+6%微硅+0.2%碳酸钙晶须+2%高效减水剂+1.0%无机早强剂+0.05%有机促凝剂+0.5%消泡剂+30%水。水泥浆的力学性能为抗压强度为 63MPa/48h,抗拉强度为 5.5MPa。水泥浆的密度 2.05g/cm³,稠化时间>300min,流动度>22cm。通过上述方法,建立了可泵性良好、稠化时间可控、早期强度发育迅速的固井水泥浆体系,抗压、抗冲击性能较常规水泥石大幅提高。

三、高强水泥环密封完整性评价

利用非金属套管井筒室内评价装置,测试、对比净浆与高强水泥环抗内压能力与密封完整性。

实验装置:非金属套管井筒室内评价装置总长 456mm,非金属塑形管外径 244.5mm,水泥环厚度 33.3mm。基于该装置,可开展非金属管抗内压测试、“非金属管+水泥环”整体抗内压测试,装置如图 1 所示。为了测试单纯的水泥环抗内压能力,采用抗内压较低 PVC 管作为塑形管,管材抗内压值仅为 0.35~0.40MPa。



图 1 非金属套管井筒室内评价装置实物图与测试界面

水泥浆配方:

- ①净浆: 100%油井水泥+44%自来水
- ②高强水泥浆体系: 100%油井水泥+25%硅粉+15%粉煤灰+5%微硅+28%自来水+2.0%聚羧酸减水剂+1%早强剂+0.05%促凝剂+0.05%无机纤维+0.05%聚丙烯纤维

实验方法:将配置好的水泥浆倒入搅拌器中,搅拌均匀,倒入装置环空中,养护温度为 60℃,养护 72h 后拆模,利用井筒完整性装置阶段性注入清水,养护温度为 60℃,养护 72h 后拆模,利用井筒完整性装置阶段性注入清水,流量 30~50mL/min,观察压力峰值。不同体系水泥环的抗内压数据如表 2 所示,压力数据随时间变化曲线如图 2 所示。

表 2 不同水泥环抗内压数据对比

体系名称	密度 g/cm ³	流动度 cm	注入流量 mL/min	抗内压峰值强度 MPa
净浆体系	1.88	23	30mL	4.14
高强体系	2.05	21	50mL	9.05

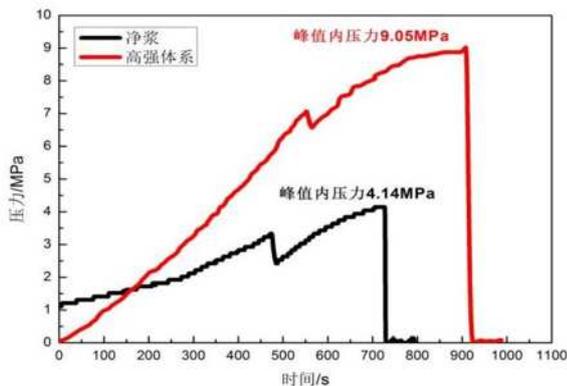


图2 不同体系水泥环抗内压曲线对比

由实验结果可知,净浆体系流动度较高强体系高,但两者均大于 20cm,满足水泥浆施工需求。净浆水泥环抗内压峰值 4.14MPa,高强水泥环峰值内压 9.05MPa,高强水泥环抗内压较常规提高 118.2%,机械强度提高显著。

从水泥环破坏后的形态也可以看出,净浆水泥环受内后呈脆性破裂,纵向裂缝较为光滑,如图 3(a)所示。高强水泥环呈多尺度裂缝,纵向裂缝边缘粗糙,水泥碎块之间存在纤维牵连,韧性较强,如图 3(b)所示。局部破裂后,水泥环依然保持了较好的完整性,未发生贯穿裂缝。可以与非金属管材结合,为井壁提供良好支撑。



(a) 净浆水泥环脆性纵向裂缝 (b) 高强水泥环脆性纵向裂缝

图3 不同水泥环破裂状态对比

四、 结论与建议

(1) 在常规水泥浆体系的基础上,优选出聚羧酸分散剂、微米、亚微米填充材料和纳米活性材料作为高强水泥浆体系组份构成。

(2) 基于紧密堆积优化设计方法,开发了高强水泥浆体系,密度 2.05g/cm³、稠化时间>300min、流动度>22cm、抗压强度 63MPa/48h,抗拉强度 5.5MPa,高强水泥环抗内压强度较常规提高 118.2%,以上,满足固井施工需求,为浅表层低成本套管固井提供了良好的水泥浆体系基础。

(3) 在下一步研究中,应在高强水泥浆体系开发的基础上,攻关低成本套管研选、加工、联入方法及配套固井工艺,形成中浅层低成本非金属套管固井技术。

参考文献:

- [1]曾义金. 中国石化深层超深层油气井固井技术新进展与发展建议[J/OL]. 石油钻探技术.
- [2]高振东. 石油钻井中的人工表层固井与实践[J]. 西部探矿工程,2003,(04):79-80.
- [3]周英操,闫铁,刘玉民,金志富. 大庆油田表层套管钻井技术[J]. 石油钻探技术,2006,(05):79-80.
- [4]姬玉平,石建军,刘国卫. 大直径工程井套管完井关键技术应用研究[J]. 西部探矿工程,2019,31(06):22-26.
- [5]唐志军. 井身结构优化设计方法[J]. 西部探矿工程,2005,(06):78-80.
- [6]管志川,李春山,周广陈,刘瑞文. 深井和超深井钻井井身结构设计方法[J]. 石油大学学报(自然科学版),2001,(06):42-44+6.
- [7]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,(06):4-12.
- [8]周仕明,魏娜,陈玉辉. 紧密堆积水泥浆体系的堆积率计算[J]. 石油钻探技术,2007,(04):46-49.
- [9]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(09):2269-2274+2279.