

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.01.004

## MTA 防窜固井技术原理及现场应用分析

顾 军<sup>1</sup>, 杨亚馨<sup>2</sup>, 张鹏伟<sup>3</sup>, 高玉堂<sup>4</sup>, 李延伟<sup>2</sup>, 于三跃<sup>5</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国石化胜利石油管理局黄河钻井总公司, 山东东营 257064; 3. 中国石化河南油田分公司石油工程技术研究院, 河南南阳 473132; 4. 中国石化大庆油田有限责任公司采油工程研究院, 黑龙江大庆 163453; 5. 中国石化河南石油勘探局钻井工程公司, 河南南阳 473132)

**摘 要:**泥饼仿地成凝饼(MTA)法防窜固井,是针对MTC固井技术的不足、为更好地提高固井二界面胶结质量而提出的新技术。该方法是钻开封固段前50~200 m,在钻井液中加入0.5%~3.0%的泥饼改性剂并维持该比例至完井,固井时以凝饼形成剂为基础配置3~4 m<sup>3</sup>前置液,注入该前置液后随之注入水泥浆,不改变油井水泥浆体系,但对钻井液泥饼进行了处理。其整体固化胶结机理是,用凝饼形成剂对泥饼界面进行修饰、处理并使其与泥饼改性剂初步反应生成凝饼胶结物,再逐渐形成致密凝饼。为了验证MTA方法的实际固井效果,在大庆油田、胜利油田和河南油田的23口老区调整井(常规油井16口,稠油井7口)中进行了现场应用。应用结果表明,固井一、二界面质量合格率100%,其中大庆油田应用井固井质量优质率和合格率分别提高13.01个百分点和1.15个百分点,胜利油田应用井固井二界面质量合格率提高约30个百分点,河南油田应用井平均总井段优质率达到90.48%。

**关键词:**固井二界面 防窜固井 MTA方法 固井质量

**中图分类号:**TE256<sup>+</sup>.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)01-0017-05

## Principle of Anti-Channeling Cementing Technology with MTA Method and Field Applications in Daqing/Shengli/Henan Oilfields

Gu Jun<sup>1</sup>, Yang Yaxin<sup>2</sup>, Zhang Pengwei<sup>3</sup>, Gao Yutang<sup>4</sup>, Li Yanwei<sup>2</sup>, Yu Sanyue<sup>5</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei, 430074, China; 2. Huanghe Drilling Company, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257064, China; 3. Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Henan Oilfield Company, Nanyang, Henan, 473132, China; 4. Research Institute of Oil Production Engineering, Daqing Oilfield Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163453, China; 5. Drilling Engineering Company, Henan Petroleum Exploration Bureau, Nanyang, Henan, 473132, China)

**Abstract:** The MTA (mud cake to agglomerated cake) method is a new anti-channeling cementing technology in order to overcome the shortcomings of MTC (mud to cement) method and improve the cement quality of cement-formation interface. The procedure of MTA method can be divided into two steps: (1) The mud cake modifier ranging from 0.5% to 3% (which shall be kept until well completion) was added into the drilling fluid before 50-200 meters above the cementing interval is drilled. (2) The pre-pad fluid (3-4 m<sup>3</sup>), which was prepared based on the agglomerated cake forming agent, was injected followed by cement slurry injection. The cement slurry system is not changed in this new technology. Its principle is that, the agglomerated cake forming agent is used to modify and dispose the mud cake interface and make it react with mud cake modifier initially to form agglomerated cake cement and finally to form tight agglomerated cake. In order to verify the actual effect of MTA method, the field application was done in 23 adjustment wells (including 16 conventional oil wells and 7 heavy oil wells) in the old area of Daqing Oilfield, Shengli Oilfield and Henan Oilfield. The application results showed that the qualification rate of cement-formation interface and casing-cement interface was 100%, the high-quality rate and qualification rate of cementing quality in Daqing Oilfield increased by 13.01 and 1.15 percentage points, respectively. The qualification rate of cement-formation interface increased by 30 percentage points in Shengli Oilfield, the average high-quality rate of all intervals reached 90.48% in Henan Oilfield.

**Key words:** cement-formation interface; anti-channeling cementing; MTA method; cement quality

固井二界面若不能实现整体固化胶结,导致其存在界面缺陷且强度不够,极易造成固井二界面封隔失效,因此固井二界面胶结质量差是引起环空窜流的主要原因之一<sup>[1-5]</sup>。为了解决固井二界面的胶结问题,20世纪90年代初出现了钻井液转化为水泥浆(MTC)技术,采用钻固一体化实现固井二界面整体固

**收稿日期:**2011-08-25;**改回日期:**2011-12-07。

**作者简介:**顾军(1966—),男,云南大理人,1986年毕业于西南石油学院钻井工程专业,2003年获成都理工大学油气田开发工程专业博士学位,教授,主要从事固井完井理论与层间封隔技术研究。系本刊编委。

**联系方式:**(027)67848569, gujun2199@126.com。

**基金项目:**国家自然科学基金项目“非MTC方法提高固井二界面封隔能力的技术基础研究”(编号:50774071)、国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“低渗透油田高效开发防止薄隔层间窜流新技术研究”(编号:2007AA06Z205)资助。

化胶结,该技术既可显著提高固井二界面的胶结强度和胶结质量,也可缓解钻后处理钻井液的环保问题。但 MTC 存在的固化体易脆裂、高温性能易变异等问题<sup>[6-7]</sup>,又可能会因射孔等作业而导致更严重的层间互窜,影响油气开采效果甚至报废井<sup>[8]</sup>。因此,目前 MTC 大多只用来封固技术套管段或作充填浆,能否封固油层套管段则国内外学者尚未达成共识,且自 2000 年以来国外已鲜见研究和应用 MTC 的相关报道。为了实现采用非 MTC 方法进行固井二界面整体固化胶结,基于从 MTC 技术原理得到的启示,提出了泥饼仿地成凝饼(mud cake to agglomerated cake, MTA)的科学构想<sup>[9]</sup>,获得了 MTA 方法固井二界面整体固化胶结的实验证据<sup>[10]</sup>,研究了 MTA 的地质学依据<sup>[11]</sup>,创立了 MTA 固井新理论,并研制出 2 种新材料,形成了 MTA 防窜固井新技术。2008 年 9 月至 2010 年 6 月,共试制出泥饼改性剂 180 t,凝饼形成剂 20.5 t,然后在大庆油田、胜利油田和河南油田的 23 口老区调整井(其中定向井 14 口,水平井 1 口)固井中进行了应用。

## 1 MTA 的技术原理与作用机理

### 1.1 技术原理

#### 1.1.1 凝饼的概念

凝饼是以地学理论为基础,以石油开采需要为目的,利用地壳上最丰富的硅铝质物料为主要原料,配以少量由多种物质复合成的材料,模仿大地成岩过程,利用微晶二元形成原理凝结而成的硅铝基胶凝质。

#### 1.1.2 技术原理

原固井工艺及水泥浆、钻井液体系均不变,只需在钻开封固段前 50~200 m,向钻井液中加入 0.5%~3.0%的泥饼改性剂并维持该比例至完井(作用是对钻井液泥饼进行改性;若必要,可同时缓慢加入 0.5%左右的降黏剂),固井施工时,以凝饼形成剂为基础配置前置液 3~4 m<sup>3</sup>(即保证该前置液与泥饼的接触时间 $\geq 2$  min),且该前置液注入后随之注入水泥浆(作用是对钻井液泥饼进行处理和修饰)。

### 1.2 作用机理

固井二界面整体固化胶结必须具备 2 个前提:  
1)水溶液中有足够数量的极性分子和离子,且能渗

入泥饼,再进入改性矿物玻璃体内部并依靠它们与阳离子的作用,使改性矿物分散、溶解和解体;2)水溶液中能建立起对新形成的水化产物来说是高度过饱和的溶液,且能维持足够的时间来实现水化产物的成核、生长并彼此交叉搭接,形成结构网而固化泥饼。因此,实现 MTA 方法固井二界面整体固化胶结有如下条件:一是利用油井水泥水化产生的可用离子,二是研制凝饼形成剂修饰界面并提供可溶性离子。正是利用凝饼形成剂和油井水泥水化初期产生大量发生水化反应所必须的可溶性离子基团,诸如  $\text{OH}^-$ 、 $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ 、 $\text{H}_3\text{AlO}_4^-$  和  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  等可溶性离子基团与改性钻井液泥饼的成岩反应作用,实现了固井二界面整体固化胶结。

#### 1.2.1 凝饼形成剂对界面的修饰和处理

首先,碱交代泥饼黏土矿物,可发生硅溶蚀、铝置换、层间阳离子交换等反应,达到对泥饼界面的修饰和处理;其次,以泥饼改性剂为基础的成岩组分复合体(含膨润土等)在油井水泥浆水化离子的作用下,其连续相结构键能被破坏,释放出活性硅和铝。

#### 1.2.2 凝饼胶结物的生成

活性硅、铝富集在水泥浆滤液中发生成岩反应生成 I 型水化硅酸钙[C—S—H(I)]凝胶和沸石类凝胶。凝饼的形成过程包括诱导激活、表面微晶化和界面耦合;诱导激活是介稳态复合相在水化过程中相互诱导对方能态,越过反应势垒,使介稳体系活化,其中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  是主要的离子;表面微晶化效应是指凝胶体系中的水化产物,若无外部动力,则只能通过热力学作用在某局部区域形成,即新相只能通过成核才能形成,当有另一复合相存在时,其微晶核作用降低了成核势垒,产生的非均匀成核使水化产物在另一复合相表面沉淀析出,加速了泥饼变凝饼的进程;界面耦合效应是指泥饼复合体系通过诱导激活、水硬化形成稳定的凝聚体系,其显微界面的凝胶强度与其宏观物理力学性能密切相关。

#### 1.2.3 致密凝饼的形成

在油井水泥水化后期,凝饼网状结构单元的孔隙水溶液中,由于富含碱土元素以及 S、Mg、Fe、Ca 和 Si 等元素富集到一定浓度,受孔隙水环境的影响,这些元素自由络合形成新的矿物充填在原孔隙水空间;泥饼改性剂的粒径在 10  $\mu\text{m}$  左右,均匀分散于凝饼孔隙和凝胶体中并填充毛细管和孔隙裂缝,改善了凝饼孔

结构,提高了凝饼的密实度。同时,未参与水化的颗粒分散于凝饼中起到骨架作用,进一步优化了凝饼结构,改善凝饼各组分之间的胶结性能和凝饼的微观结构,从而改善了固井二界面的宏观综合性能。

2 现场应用与效果分析

2.1 大庆油田的应用情况

2.1.1 应用区的基本情况

大庆油田杏北 1-3 区和杏南 8 区是大庆油田的主力油区,经过几十年的分层注采开发,压力系统分布复杂,给三次加密调整井固井增加了很大难度。

该油田近几年的固井质量合格率约 98.85%,优质率 44.13%,固井二界面问题突出。

2.1.2 应用情况与分析

MTA 防窜固井技术在杏树岗区块应用了 7 口井,应用情况见表 1。

从表 1 可以看出:1)固井质量合格率 100%,固井质量优质率 57.14%,与同区块对比,应用井固井质量优质率和合格率分别提高 13.01 个百分点和 1.15 百分点;2)应用井 BI 值 $\geq 0.8$ 的井段占 76.01%,而同区块 BI 值 $\geq 0.8$ 的井段占 60.09%,与区块对比应用井 BI 值 $\geq 0.8$ 的井段提高 15.92 百分点。

表 1 大庆油田应用井与邻井固井质量对比

Table 1 Comparison of well cementing quality of application wells and adjacent wells in Daqing Oilfield

序号	类别	井号	封固长度/m	BI $\geq 0.8$ 的井段/m	BI $\geq 0.8$ 的井段所占比例,%	固井质量
1	应用井	杏 8-3-537	339	292	86.14	优质
	对比井	杏 8-丁 3-737	350	210	60.00	合格
2	应用井	杏 1-40-E923	357	210	58.82	合格
	对比井	杏 1-40-E924	355	198	55.77	合格
3	应用井	杏 1-33-E926	516	464	89.92	优质
	对比井	杏 1-33-斜 E927	415	220	53.01	合格
4	应用井	杏 2-丁 3-E917	509	428	84.09	优质
	对比井	杏 2-丁 3-E916	385	190	49.35	合格
5	应用井	杏 2-33-E920	385	340	88.31	优质
	对比井	杏 2-33-E921	379	339	89.45	优质
6	应用井	杏 3-丁 2-E929	425	280	65.88	合格
	对比井	杏 3-丁 2-E928	332	254	76.51	优质
7	应用井	杏 2-丁 2-E926	379	198	52.24	合格
	对比井	杏 2-1-斜 E926	540	245	45.37	合格

2.1.3 存在的问题

MTA 防窜固井技术在大庆油田的应用存在 2 个问题:1)泥饼改性剂加入现场钻井液后存在一定的增稠现象,需加入 0.5%左右的降黏剂方可满足钻井施工要求;2)目前该技术能满足二界面泥饼厚度不超过 1.5 mm 时的固井要求。若现场实际钻井液泥饼太厚,采用该技术或其他技术固井均难以达到理想效果,即厚泥饼条件下的固井二界面问题有待进一步研究。

2.2 胜利油田的应用情况

2.2.1 应用区的基本情况

目前,胜利油田的调整井固井二界面质量合格率约 70%<sup>[12]</sup>,部分固井二界面不合格井窜流严重,产量下降明显。

2.2.2 应用情况与分析

MTA 防窜固井技术在胜利油田 9 口井进行了应用,基本情况见表 2。

表2 胜利油田应用井固井质量情况

Table 2 Well cementing quality of test wells in Shengli Oilfield

井号	井深/m	封固段长/m	固井质量
纯6-更15	2 375	975	合格
永3-163	2 335	2 335	合格
坨3-6-斜630	2 219	1 332	合格
坨3-7-斜939	2 200	1 276	合格
营66-斜78	2 301	1 101	合格
永3-斜178	2 327	2 327	合格
永3-平6	2 327	2 327	合格
永3-斜177	2 346	1 512	合格
永3-斜更13	2 316	1 209	合格

从表2可以看出,9口应用井的固井质量合格率达到100%,较常规技术提高了约30百分点。

### 2.2.3 存在的问题

该技术在胜利油田应用过程中,泥饼改性剂加入现场钻井液后存在一定的增稠现象,需加入0.5%

左右的降黏剂方可满足钻井施工要求。

## 2.3 河南油田的应用情况

### 2.3.1 应用区的基本情况

MTA防窜固井技术在河南油田的应用区块为井楼稠油热采区,热采老区调整井固井难度较大,年平均汽窜井在220口以上,影响生产时间575 d,影响产量2 945 t;出砂严重井88口,影响生产时间1 986 d,影响产量2 658 t。开发新区年汽窜27井次,影响生产时间143 d,影响产量598 t;因出砂严重停井10口,影响产量3 000 t。

应用区稠油井固井质量问题较为严重,研究认为,主要原因是固井二界面窜槽。由于井浅,地层疏松,形成的泥饼厚且疏松,固井时不能固化,注汽开发后容易形成汽窜。

### 2.3.2 应用情况与分析

MTA防窜固井技术在河南油田应用了7口井,现场应用情况见表3。

表3 河南油田应用井固井质量情况

Table 3 Well cementing quality of application wells in Henan Oilfield

井号	井型	井深/m	应用井段/m	总井段(优质井段)/m	井段优质率, %	固井质量
L13191	定向井	323	75~345	270.0(200.0)	74.1	合格
L11020	直井	226	107~215	108.0(108.0)	100	合格
LJ7918	定向井	558	150~553	403.0(284.0)	70.5	合格
LJ71003	定向井	512	140~504	364.0(339.0)	93.1	合格
LJ7802	定向井	446	140~435	295.0(293.5)	99.5	合格
LJ7502	定向井	389	140~392	252.0(252.0)	100	合格
新1072	定向井	861	90~850	760.0(742.0)	97.6	合格

从表3可以看出,7口应用井的固井质量合格率为100%,应用井平均总井段优质率达到90.48%,其中2口井应用井段为全优。应用过程中,泥饼改性剂与现场钻井液的配伍性良好,满足钻井施工要求。7口井从投产至2011年6月,均已进行6轮注蒸汽热采,未发现纵向层间汽窜现象。

### 2.3.3 典型井例

L11020井是一口稠油热采井,井深226 m,生产套管下深221 m,要求水泥返至地面。二开后分3次共加入泥饼改性剂1.75 t,约占钻井液质量的3%,固井时以凝饼形成剂为基础配置前置液4 m<sup>3</sup>,施工正常。声波变密度测井解释结果表明:1)一开

井段(0~106 m),固井一界面使用MTA技术井段和未使用井段的胶结质量均为优质,固井二界面使用MTA技术井段胶结质量全部为优质,而未使用井段的胶结质量则较差;2)二开井段(包括全部油层段)采用MTA技术的固井一、二界面胶结质量均为优质,而未采用该技术的固井一、二界面胶结质量均较差,尤其是主力油层及其隔层。与邻井相比,应用MTA技术后固井一、二界面胶结质量显著提高。

## 3 结论与认识

1) 固井二界面的MTA法整体固化胶结机理是:先用凝饼形成剂对泥饼界面进行修饰、处理并使



其与泥饼改性剂初步反应,反应生成凝饼胶结物,再逐渐形成致密凝饼。

2) MTA方法未改变油井水泥这一国内外公认的最佳固井材料,就能达到与MTC方法相当的现场固井实施效果,为解决固井二界面胶结质量问题提供了一种新途径。

3) 三个油田23口老区调整井的现场应用表明,MTA防窜固井技术不仅现场施工较简单,而且固井质量合格率达到100%,固井质量优质率(尤其是固井二界面的胶结质量)显著提高。

4) MTA方法需要进一步完善和改进,比如减小泥饼改性剂的加量、改善钻井液的配伍性等。

5) 厚泥饼(厚度不小于1.5 mm)条件下的固井二界面整体固化胶结问题尚待进一步探索和研究。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 顾军,高德利,石凤歧,等.论固井二界面封固系统及其重要性[J].钻井液与完井液,2005,22(2):7-10.  
Gu Jun, Gao Deli, Shi Fengqi, et al. The two contacts cementing system in cementing job and its importance[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(2): 7-10.
- [2] Gu J, Wang B, Yang B. The influences of interface missing and formation property on shearing strength at cement-formation interface[J]. Petroleum Science and Technology, 2011, 29(6): 633-639.
- [3] 顾军,陈雪峰.隔层厚度与第二胶结面抗剪切强度关系研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(2):219-222,258.  
Gu Jun, Chen Xuefeng. Study of relationship between interlayer thickness and shearing strength at cement-formation interface[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(2): 219-222, 258.
- [4] 顾军,杨卫华,秦文政,等.固井二界面封隔能力评价方法研究[J].石油学报,2008,29(3):451-454.  
Gu Jun, Yang Weihua, Qin Wenzheng, et al. Evaluation method for isolation ability of cement-formation interface [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 451-454.
- [5] 黄河福,步玉环,田辉,等.MTC固井液二界面胶结强度实验研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(6):46-50.  
Huang Hefu, Bu Yuhuan, Tian Hui, et al. Bonding strength experiment of mud to cement fluid on the second interface[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(6): 46-50.
- [6] 丁士东,高德利,胡继良,等.利用矿渣MTC技术解决复杂地层固井难题[J].石油钻探技术,2005,33(2):5-7.  
Ding Shidong, Gao Deli, Hu Jiliang, et al. Solving cementing challenges in complicate formations via the MTC technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(2): 5-7.
- [7] 徐滨.矿渣MTC固井技术在大港油田的应用[J].石油钻探技术,2003,31(4):23-24.  
Xu Bin. Applications of MTC cementing technology in Dagang Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(4): 23-24.
- [8] Mueller D T, Dickerson J P. Blast furnace slag technology: features, limitations, and practical applications [R]. SPE 28475, 1994.
- [9] 彭志刚,何育荣,刘崇建,等.矿渣MTC固化体开裂的本质原因分析[J].天然气工业,2005,25(5):72-74.  
Peng Zhigang, He Yurong, Liu Chongjian, et al. Basic causes analysis of cracking of MTC solidified body with cinder [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 72-74.
- [10] 张宏军,杨启伟.胜利油田固井技术研究及应用现状与发展[J].钻采工艺,2010,33(5):39-43.  
Zhang Hongjun, Yang Qiwei. Research and development status of cementing technology in Shengli Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(5): 39-43.
- [11] 顾军.固井二界面问题与泥饼仿地成凝饼科学构想[J].石油天然气学报,2009,31(1):71-74.  
Gu Jun. Isolation problems of cement-formation interface and scientific conception of mud cake to agglomerated cake [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 71-74.
- [12] 顾军,秦文政.MTA方法固井二界面整体固化胶结实验[J].石油勘探与开发,2010,37(2):238-243.  
Gu Jun, Qin Wenzheng. Experiments on integrated solidification and cementation of the cement-formation interface based on Mud Cake to Agglomerated Cake (MTA) method [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 238-243.
- [13] 顾军,杨卫华,张玉广,等.固井二界面泥饼仿地成凝饼与凝灰岩成岩的关联性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):64-68,73.  
Gu Jun, Yang Weihua, Zhang Yuguang, et al. Association between tuff diagenesis and mud cake to agglomerated cake (MTA) at cement-formation interface [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2011, 35(2): 64-68, 73.
- [14] 荆延亮,刁胜贤.滤饼转化凝饼技术在胜利油田首次应用[J].石油钻采工艺,2009,31(4):48-51.  
Jing Yanliang, Diao Shengxian. First application of the technology of turing mud cakes into gel cakes in Shengli Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(4): 48-51.