

刘崇建 黄柏宗 徐同台 刘孝良 等编著

油气井注水泥

理论与应用



石油工业出版社



油气井注水泥理论与应用

刘崇建 黄柏宗 徐同台 刘孝良 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据国内外近年来固井方面的关键技术和最新研究成果,全面地论述了提高注水泥质量的理论基础、影响因素和设计方法。全书包括总论、油井水泥、油井水泥性能、油井水泥外加剂、外掺料及作用原理、特种水泥体系、水泥浆流变学、注水泥顶替技术、环空窜流及控制技术、水泥浆对储层的影响、注水泥设计、特殊注水泥技术及注水泥质量评价等内容。

本书可供从事固井技术的研究人员和现场工程技术人员借鉴与使用,亦可作为油田技术人员的培训教材和高等院校有关专业师生的学习和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

油气井注水泥理论与应用/刘崇建等编著.

北京:石油工业出版社,2001.9

ISBN 7-5021-3202-3

I.油…

II.刘…

III.①采油井-注水泥-固井-研究

②采气井-注水泥-固井-研究

IV.TE256

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第78241号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 33.5印张 851千字 印1—3000

2001年9月北京第1版 2001年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3202-3/TE·2429

定价:66.00元

前 言

提高注水泥质量是保证油气井寿命,提高采收率及合理开发油气田的关键技术之一。提高注水泥质量需要解决的中心问题是替净和封严。替净是指滞留在环形空间的钻井液如何被水泥浆完全顶替干净,封严则是要求水泥环具有良好的密封性能。解决这些问题的关键技术在于套管居中和压稳油、气、水层。所涉及的内容包括:油井水泥及外加剂材料、水泥浆及钻井液的动态和静态特性、注水泥质量评价及有关工艺技术等。把这些因素作为一项系统工程有机地结合起来,是当前提高注水泥质量的方向,也是编著本书的目的。

本书的主要特点和内容为:

1. 总结分析国内外最新研究成果、现场实际经验及提高注水泥质量的关键技术;介绍固井方面的新思想、新观点和新方法。

2. 重点编写注水泥基本原理、设计方法、影响注水泥质量的因素和实际应用,注重理论与实际、概念与方法、分析与应用相结合。

3. 书中主要内容包括,油井水泥及外加剂的应用、特种水泥体系及注水泥工艺技术、水泥浆流变学、钻井液—水泥浆的两相流动、环空窜流及控制技术、注水泥设计和质量评价等。

本书由刘崇建、黄柏宗、徐同台、刘孝良等编著。编写内容在广泛征求有关专家、教授的意见后,经反复讨论和修改,最后制定出编写大纲细则。全书共分十二章,第一、七、八、九章由刘崇建、刘孝良编写,第一章由马兴峙审定,第七章由杨勋尧、李章亚审定,第八章由郝俊芳、孙景淳审定,第九章由郭小阳、李章亚审定;第二章由黄柏宗、徐同台、吕光明、佟曼丽、李立荣编写,朱宗培审定;第三章由黄柏宗、刘崇建、林恩平、安耀彬、孙富全编写,郑开华审定;第四章由佟曼丽、黄柏宗、吕光明、罗长吉、谭文礼、徐同台、门廉魁编写,朱宗培审定;第五章由黄柏宗、徐同台、佟曼丽、刘崇建、曲建省、林恩平、孙维林、吴达华、李宝德、许树谦、魏作斌、邢秀平、杜伟程、邹建龙编写,李章亚、郭小阳审定;第六章由刘绘新、刘崇建编写,孙景淳、郝俊芳审定;第十章由徐璧华编写,谭树仁、张仲珉审定;第十一章由徐惠峰、刘孝良、李毅、李宝贵、刘大为、喻大明、罗长吉、杨全盛编写,张仲珉、谭树仁审定;第十二章由赵军、雷惠博编写,陈福煊审定。全书最后由刘崇建、徐同台定稿。

本书是在原中国石油天然气总公司钻井局、科技局的领导和同仁们的大力支持和帮助下完成的。书稿完成后,由四川石油管理局教授级高级工程师马兴峙、杨勋尧、孙景淳及中海石油技术服务公司谭树仁总工程师进行了审查,还有很多油田领导和技术人员提供了许多宝贵意见和技术资料,谨此一并致谢。

由于作者水平有限,经验不足,在编著中难免有不妥之处,敬请广大读者不吝指正。

编著者

2000年8月

目 录

第一章 总 论	(1)
第一节 油气井注水泥的目的	(1)
第二节 固井工程的特点	(2)
第三节 注水泥质量的基本要求	(2)
第四节 注水泥技术发展概况	(3)
参考文献	(5)
第二章 油井水泥	(6)
第一节 概 述	(6)
第二节 油井水泥的主要成分	(19)
第三节 油井水泥的凝结与硬化	(23)
第四节 API 油井水泥的类别	(39)
参考文献	(55)
第三章 油井水泥浆与水泥石性能	(56)
第一节 油井水泥浆性能	(56)
第二节 水泥石性能	(61)
第三节 影响水泥浆及水泥石的因素	(64)
第四节 水泥浆及水泥石的试验方法	(69)
参考文献	(71)
第四章 油井水泥外加剂	(73)
第一节 概 述	(73)
第二节 油井水泥分散剂及其作用原理	(74)
第三节 油井水泥促凝剂及其作用机理	(81)
第四节 油井水泥缓凝剂及其作用机理	(84)
第五节 油井水泥降失水剂及其作用机理	(90)
第六节 减轻剂与加重剂	(107)
第七节 固井外加剂的选择	(111)
第八节 水泥浆前置液	(113)
参考文献	(124)
第五章 特种水泥体系	(126)
第一节 低密度水泥	(126)
第二节 泡沫水泥	(137)
第三节 耐高温水泥	(147)
第四节 含盐水泥浆体系	(166)
第五节 防气窜水泥	(171)
第六节 不渗透水泥	(176)

第七节 抗腐蚀水泥·····	(184)
第八节 膨胀水泥·····	(189)
第九节 微细水泥·····	(193)
第十节 纤维水泥·····	(202)
第十一节 触变性水泥·····	(212)
第十二节 钻井液转化为水泥浆技术·····	(219)
第十三节 磁处理水泥浆·····	(234)
第十四节 镁氧水泥·····	(240)
参考文献·····	(247)
第六章 水泥浆流变学 ·····	(252)
第一节 流体流动的基本概念·····	(252)
第二节 流体的分类及其流变性能·····	(253)
第三节 水泥浆流变方程·····	(255)
第四节 水泥浆流变参数的测量·····	(262)
第五节 层流水力参数计算·····	(271)
第六节 流态判别·····	(278)
第七节 紊流水力参数计算·····	(282)
第八节 注水泥计算与现场应用·····	(286)
参考文献·····	(291)
第七章 油井注水泥顶替技术 ·····	(292)
第一节 顶替流动的基本概念·····	(293)
第二节 影响水泥浆顶替效率的因素·····	(295)
第三节 水泥浆顶替钻井液的数学模型·····	(299)
第四节 注水泥顶替实验装置·····	(304)
第五节 水泥浆顶替钻井液的模拟试验分析·····	(308)
第六节 结 论·····	(314)
参考文献·····	(314)
第八章 环空气窜及控制技术 ·····	(316)
第一节 环空窜流的危害·····	(316)
第二节 水泥浆凝固过程中井筒内压力的变化·····	(317)
第三节 水泥浆的凝固特性与气窜的关系·····	(328)
第四节 环空气窜的预测·····	(330)
第五节 控制气窜的方法·····	(339)
参考文献·····	(345)
第九章 水泥浆对地层的作用与影响 ·····	(347)
第一节 水泥浆的动失水·····	(347)
第二节 水泥浆凝固过程中的静失水·····	(350)
第三节 动失水与静失水的对比·····	(352)
第四节 井下钻井液及水泥浆失水量的测定·····	(353)
第五节 水泥浆对地层的损害·····	(355)

参考文献	(364)
第十章 注水泥设计	(365)
第一节 概 述	(365)
第二节 注水泥设计基本资料	(366)
第三节 注水泥设计原则	(369)
第四节 注水泥设计方法	(383)
参考文献	(389)
第十一章 特殊井注水泥技术	(390)
第一节 概 述	(390)
第二节 大斜度井与水平井注水泥	(392)
第三节 漏失井注水泥	(401)
第四节 高压油气井注水泥	(408)
第五节 又喷又漏的高压气井注水泥	(413)
第六节 超深井注水泥	(420)
第七节 调整井注水泥	(427)
第八节 盐岩及盐膏层井注水泥	(432)
第九节 稠油热采井注水泥	(435)
第十节 挤水泥及注水泥塞	(445)
参考文献	(455)
第十二章 固井质量评价	(456)
第一节 水力测试	(456)
第二节 噪声测井	(457)
第三节 井温测井	(459)
第四节 声波测井	(462)
参考文献	(487)
附录 A 油井水泥浆及水泥石的试验	(488)
附录 B 国内外油井水泥外加剂品类一览表	(521)

第一章 总 论

油气井注水泥技术是一门多学科组成的应用科学，包括地质、石油、机械、化学、流体力学和电子等学科。所要解决的中心问题是如何提高井壁与套管间水泥环的密封质量。最早使用水泥浆固井是在 1903 年，目的是封堵油层上部的水层。1910 年，A.A.Perkins 在加利福尼亚油田发展和完善了这项技术^[1]，使用了双塞固井，从而形成了现代的注水泥技术。A.A.Perkins 使用的上塞由生铁制成，上面装有密封的胶皮垫板，用以刮掉和清除套管内壁的泥饼糊。当时采用注入蒸汽的办法，顶替上胶塞向下移动。一旦套管内水泥浆被顶替完后，上塞即被阻挡在井底套管内某一位置，压力随之增高，关闭蒸汽泵，注水泥作业结束。随着勘探开发的需要和钻井技术的发展，深井和特殊井不断增加，固井技术也在不断发展，但双塞注水泥技术仍然是成功注水泥最通用的一种方法。

第一节 油气井注水泥的目的^[2]

套管注水泥、尾管注水泥、挤水泥和打水塞等注水泥作业，其目的和要求完全不同，但究其基本要求有以下三方面的问题：一是如何使环形空间完全充满水泥浆；二是如何使水泥浆在注替和凝结过程中压稳油、气、水层，不产生井漏，并封隔好油、气、水层；三是保护生产管柱（各类型套管柱）。总括起来，注水泥可分为以下两类，即正常注水泥（一般称为一次注水泥）和补救注水泥（或称二次注水泥）。

一、正常注水泥

不同套管类型和不同地层情况，注水泥的目的是完全不一样的，归纳起来，主要有以下几方面：

- (1) 封隔油、气、水层，阻止地层间流体相互窜流，保护生产层；
- (2) 封隔严重漏失层或其它坍塌等复杂地层；
- (3) 支撑套管和防止地下流体对套管的腐蚀。

二、补救注水泥（或二次注水泥）

1. 挤水泥

挤水泥是在压力作用下，强行将水泥浆挤入地层，或一次注水泥封固质量需要补救的部位。该作业既可在钻井和完井过程中进行，也可在修井时进行。挤水泥的主要原因如下：

- (1) 减少水—油比、气—水比，控制气—油比，从而提高原油产量；
- (2) 封堵非产层，或油、气枯竭层；
- (3) 弥补一次注水泥封固质量未达到层间封隔要求的部位；
- (4) 弥补套管和尾管一次注水泥时水泥返高未达到要求的井；
- (5) 分段对生产层上下的地层挤水泥，防止非生产层流体向生产层窜流；
- (6) 修补套管泄漏、穿孔、裂缝—断裂或腐蚀等；
- (7) 封堵漏层。

2. 打水泥塞

一口油气井由于各种工程要求需要打一段水泥塞。其目的如下：

(1) 封堵报废层。通过在预定深度打水泥塞封闭干井或枯竭井的某些层位，防止地层之间流体窜通以及其它流体向开发层渗流。

(2) 侧钻。水泥塞常常是用以堵死报废井段或井下落物。然后，在水泥塞顶部重新钻直井或用造斜器侧钻。目前在干井中打水泥塞裸眼侧钻或开窗侧钻，以寻找新的油、气层或钻多底分枝井，提高采收率，这是一种经济有效的方法。

(3) 堵漏。发生井漏时，有时在漏失层位打一段水泥塞，再钻穿之后，往往就可以解除井漏。为了增加堵漏效果，一般可在水泥中加入加强纤维和堵漏剂。

(4) 回堵地层。在一个枯竭层之上重新完井时，在枯竭层上方或正对枯竭层打水泥塞，这对开采新生产层是十分必要的。在裸眼完井中打水泥塞，其主要作用是封堵井底水层或无开采价值油气层。

(5) 弃井。海洋对已测试有价值待开发的井，或无价值井，以及为躲避台风的井，需要平台撤离时，可打水泥塞封井，以保护海洋环境。

3. 重新注水泥

为了保护套管，使未封固段的套管重新注上水泥，需将要封固的套管两端射孔，形成循环通路，使水泥浆从下孔眼进入环形空间，并从上孔眼替出其它液体。重新注水泥的主要原因如下：

- (1) 弥补一次注水泥未封固的井段；
- (2) 提高水泥返高，加强对套管的保护。

第二节 固井工程的特点

固井工程的内容包括下套管和注水泥两大部分。固井质量涉及的内容较多，其复杂性和特殊性主要表现在以下几方面：

(1) 固井作业是一次性工程，如质量不好一般难以补救，即使采用挤水泥的办法补救，却耗时、耗物，造成不必要的经济损失；

(2) 固井作业是一项系统工程、隐蔽工种，涉及的学科多、内容多，且主要流程在井下，施工时未知因素较多，有一定风险；

(3) 固井质量直接影响油气田安全合理开发或后继钻井的正常进行；

(4) 固井工程是一项时间短（1~2h），费用高（占整个钻井成本的15%~30%），工序内容多，工作量大和技术性强的工程。

要优质、低成本完成一口井的固井作业，就必须作到精心设计、精心准备、精心施工，只有这样才能圆满地完成固井工程的任务。

第三节 注水泥质量的基本要求

一、注水泥质量的基本要求

根据注水泥封隔油、气、水层，保护生产层和加固井壁的主要目的，注水泥质量的基本要求如下：

(1) 水泥浆返高和套管内水泥塞高度必须符合地质和工程设计要求，过高和过低都是不允许的；

(2) 注水泥段环形空间的钻井液应全部被水泥浆顶替干净,即在封固井段无钻井液窜槽存在;

(3) 水泥环与套管和井壁间有足够的胶结强度,能经受住酸化压裂等增产措施。影响胶结强度的因素有以下几方面:

①水泥的类型和使用的添加剂。如膨胀水泥和加砂水泥有利于提高胶结强度。

②井壁状况。井壁有泥饼时,水泥环与井壁胶结强度显著降低。

③套管表面状况。套管外有砂粒涂层,水泥环与套管胶结强度增加;有油或沥青,胶结强度下降。

(4) 水泥石应具有良好的密封性能和低渗透性能,能较好地防止油、气、水窜及油、气、水的长期侵蚀和破坏。

二、注水泥常出现的问题

目前,油、气井注水泥还不能完全符合以上要求,常出现以下几方面问题:

(1) 井口有冒油冒气现象;

(2) 开采时,高压油气层向低压油气层或非生产高渗透层窜流;上部气层向油层侵入或下部底水侵入淹没油层;

(3) 不能完全满足酸化、压裂等增产措施的要求;

(4) 水泥候凝过程中,油、气、水窜入,破坏了水泥环的封隔作用;

(5) 套管挤扁、破裂或腐蚀。

第四节 注水泥技术发展概况

在本世纪初期,1910年已开始在600~900m的浅井中进行固井^[1,3]。现在已能较好地在7000m和上10000m的深井中进行注水泥作业^[4]。注水泥技术随着科技进步在不断发展完善。根据国内外多年的研究和现场经验总结,提高注水泥质量的总目标是替净和封严。具体研究的主要内容有:

(1) 驱替环空滞留的钻井液,提高水泥浆的顶替效率;

(2) 压稳地层,防止水泥浆在凝结过程中,因失重而造成的油、气、水窜和水泥浆漏入地层等问题;

(3) 提高水泥石在不同环境下(高温、腐蚀水)的封固质量;

(4) 减少或消除水泥浆对油、气层的损害。

针对上述问题,国外进行了大量的研究工作,其主要内容有下述几方面:

一、重视油井水泥系列及外加剂的研究

早期的油井水泥只有1~2种,水泥外加剂到1940年也只有三种。经过50余年之后,油井水泥已按API规范10(1986年)生产和检验,形成了九个不同级别(A, B, C, D, E, F, G, H和J级)的API油井水泥^[5],每种水泥都有不同性能的要求和相适应的井深与温度。水泥外加剂的发展速度较快,用量很大,美国水泥外加剂的用量占油田化学总用量的38%。水泥外加剂的使用,对调节水泥浆性能,满足不同井深的固井起着重要作用。现已发展到9类上百种产品,配制的水泥浆性能可在井底温度238℃中使用。水平井和其它复杂井同样可以加入不同外加剂达到注水泥的要求。

二、提高水泥浆的顶替效率

清除环空滞留钻井液是提高水泥浆顶替效率的主要目的。从1940年Jones等人^[6]开始研究

以来,水泥浆与钻井液相互顶替流动的研究,已从不考虑流变性与时间关系到考虑液体流变性与时间有关的情况^[7]。研究指出,影响注水泥顶替效率的主要因素有:套管居中、紊流顶替、合理的隔离液和冲洗液的性能及用量、紊流接触时间、活动套管、水泥浆与钻井液流变性能的合理匹配、增加水泥浆与钻井液的密度差、降低钻井液的触变性及滤失性能等。

三、防止环空气窜技术^[8]

注水泥后,井口冒油、冒气是固井中时而遇到的问题。最初认为,这种现象的产生是由于水泥浆窜槽和凝固时交界面形成的微间隙引起。70年代以后,逐渐认识到,水泥浆凝结过程中浆柱压力的降低是造成油、气、水窜的主要原因。前苏联和美国分别在1974年和1982年公布了他们在井下的实测数据,进一步说明注水泥及候凝过程中浆柱压力的变化和失重的情况。研究说明,水泥浆失重是由于水泥浆胶凝、体积收缩及桥堵所引起。L.Sabins等提出的过渡时间概念是非常有意义的。气窜的危险时刻是在过渡时间内,因为这时水泥浆正从塑液态转变为固态,失重速度非常迅速。如能在此段时间内,使高压层上的液柱压力大于或等于气层压力,则可防止环空气窜。根据这些研究及现场实践,他们提出了预防环空气窜的七项措施^[9]:限制水泥浆返高、采用多凝水泥浆或多级注水泥、水泥浆候凝时环空憋压、增加环空钻井液密度、增大水泥浆混合水密度、使用充气水泥浆和不渗透等改性水泥浆。

关于气窜预测问题,1984年Sutton提出的气窜潜力系数(G_{FP});1989年P.Rae等提出的四个综合因子,即地层因素(F_F)、静液柱压力系数(H_F)、钻井液清除系数(M_{RF})及水泥浆性能系数(S_{PN});1990年Harris等提出的水泥浆性能系数(S_{RN})都对水泥浆凝结过程气窜的定量预测起到积极的作用。

四、注水泥流变学计算机软件的应用^[8]

不同密度的水泥浆和钻井液在顶替流动时,不仅受到自身流变性能的影响,而且还受到密度差引起的重力的影响。由于重力的大小不是恒定的数值,且随两种液体在不同井深位置而发生变化,从而造成液体在不同井深的环空中,流速、流量及压耗的不断变化。这些变化过程难以用一般的计算方法进行表述。为此,只有合理地应用水泥浆及钻井液的流变学原理,编制计算机软件,才能实现注水工艺设计实时控制,较好地提高水泥浆的顶替效率,保证注水泥质量。Halliburton, DS, AMCO等公司研制的计算机软件独具特色,包含了水泥浆性能及试验设计、压力平衡设计、流态设计、紊流接触时间设计、隔离液与前置液设计等内容。这些计算机软件都考虑了U型管效应对环空流量及压耗的影响,并提出了一口井的施工计划进度表。为减少或消除U型管效应对水泥浆顶替效果的影响,国外对非牛顿液体流变模式作了大量的研究工作。研究表明,钻井液和水泥浆更符合带静切应力的三参数幂律模型,包括赫谢尔—巴尔克莱(H—B)流变模型和罗伯逊—斯蒂夫(R—S)流变模型。

五、水泥浆对油、气层的损害

钻井液及完井液对油、气的损害,国内外都作了大量工作,结论也较清楚。由于水泥浆的失水量比钻井液的滤失量大数十倍,一般可达500~2000mL/30min(7MPa),这对渗透性和水敏性的储层损害就特别大。为了减少水泥浆失水对油、气层的损害,美国不少公司提出了技术套管和油层套管固井时,水泥浆失水量应分别控制在200mL/30min(7MPa),和50~100mL/30min(7MPa)的范围内。水泥浆失水量对油、气层的损害是一个十分复杂的问题,国外还正在研究之中,需进一步做工作。

我国在“六五”、“七五”期间,保护油、气层的固井完井技术有了全面的发展^[4],国

产油井水泥已逐步按 API 系列进行生产, 水泥外加剂有了较大发展, 现所形成的 9 类 70 余种产品, 已能满足不同井况注水泥工艺技术和保护油层的要求。研制的特殊水泥, 如低密度水泥、充气水泥、泡沫水泥及不渗透水泥等新产品, 对低压力易漏地层, 高压油、气层和保护油气层的固井, 起到了很好的作用。

西南石油学院及中国石油天然气总公司工程技术研究院对水泥浆凝结过程的油、气、水窜问题作了大量的研究工作^[10], 研究弄清了水泥浆“失重”的原因、规律及影响因素。研制的 KQ 防气窜剂及不渗透水泥外加剂, 对弥补水泥浆和增加孔隙阻力是非常有效的, 具有较强的防气窜效果, 现已在国内普遍使用。

西南石油学院应用研制的激光测速仪、核辐射密度计和混浊三向流速测试仪, 进行了水泥浆顶替过程的动态模拟实验研究。研究表明, 提高套管居中度、活动套管、使用旋流扶正器、调节水泥浆与钻井液的流变性能、实现紊流顶替、合理地使用隔离液和冲洗液、控制紊流接触时间不小于 8~10min 等, 是提高水泥顶替效率的主要措施。

应用注水泥流变学设计软件是提高注水泥质量的必不可少的内容。院校所研究的计算机软件, 除了吸取国外计算机软件的优点外, 还补充了液体流变模式选择, 水泥浆失重及防气窜设计等新内容。

关于水泥浆对油、气层损害的研究, 国内作了大量工作^[11]。研究了模拟动态井下的情况: 岩心经受钻井液和水泥浆的双重污染过程, 得出了水泥浆对地层的损害较钻井液对地层的损害轻微得多的结果。由于钻井液所形成的内外泥饼的阻挡作用, 水泥浆滤液污染深度一般不超过 5cm, 渗透率下降率在 10% 左右。

参 考 文 献

- [1] Tough, F.B. Method of Shutting off Water in Oil and Gas Wells. Bull.136, USBM; Petroleum Technvlogg (1981) 46, 122
- [2] 徐惠峰主编. 钻井技术手册 (三) 固井. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [3] Swigert, T.E, and Schwarzenbek, F.X. Petroleum Engineering in the hewit oil Field, Oklahoma. USBM, State of Oklahoma and Ardmore Chamber of Commerce (Jom.1921)
- [4] 倪荣富、张祖兴等编. 80 年代国内外深井钻井技术. 北京: 石油工业出版社, 1992
- [5] 钻井手册 (甲方) 编写组. 钻井手册 (甲方) 上册. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [6] Jones, P.H. et al. Oil - well Cemeting - Factors Influencing Bond Between Cement and Formation. Drill and prod prac, API (1940) 45
- [7] haut, R.C> and Crook, R.J. Primary Cementing: The mud Displacement process. paper SPE8553
- [8] Erik B. Nelson. Well Cementing. Elsevier Amsterdam - Oxford - New York - Tokgo 1990, chap8, 11 - 6
- [9] Levine, D.C. et al. Annular Gas Flow After Cementing: A look at practical Sdutions. Paper SPE 8255, 1979
- [10] 中国石油天然气总公司工程技术研究所. 固井水泥外加剂论文集. 石油工程建设, 1992 (2) 53 - 72
- [11] 郭小阳、刘崇建等. 水泥浆对地层损害的研究. 西南石油学院学报, 1996: (4) 19 - 27

第二章 油井水泥

第一节 概 述

一、油井水泥的定义

凡将石灰质物质与粘土物质或其它含氧化硅、氧化铝及氧化铁的物质均匀混合，在烧结温度下煅烧，并将所得的熟料粉磨，制得的产品称为波特兰水泥，即硅酸盐水泥^[1]。

油井水泥是指应用于各种钻井条件下进行固井、修井、挤注等作业的硅酸盐水泥（波特兰水泥）和非硅酸盐水泥，包括掺有各种外掺料或外加剂的改性水泥或特种水泥的油井水泥体系。

通常将包括 API 各级波特兰油井水泥称为基本油井水泥，其它如触变水泥、膨胀水泥、抗腐蚀水泥等称作特种油井水泥。

油气井注水泥的施工条件与建筑、水工、海工、隧道、巷道等用的硅酸盐水泥所使用的施工条件是不相同的。由于油气井地质情况非常复杂，井的类别多（浅井、深井、超深井、直井、斜井、水平井、分支井、热采井等），因而固井水泥使用温度范围广，它用于井下温度从永冻层的低于冰点至高达 350℃ 的热采井，承受的压力从接近常压至高达 200MPa，还要满足松软地层，盐岩、盐泥地层，坍塌与漏失地层，高压油、气、水层，腐蚀性液体等复杂条件及不同类别井注水泥的特殊要求。因此对固井水泥的性能要求与建筑等行业所使用的硅酸盐完全不同，其不同之处主要有^[2]：

（1）油井水泥的稠化时间与初凝时间较长，要求严格，而且可调，用以满足不同井下条件、不同类别井的施工要求；

（2）为了确保固井质量，减少对油气层的损害，对油井水泥的密度、流变性能、失水量、高、低温水泥石的抗压强度等均有严格要求；

（3）要求油井水泥石与套管和井壁胶结强度好，渗透率低，安定性好；

（4）长期处于井底温度、压力下性能稳定，并能承受继续钻井所引起的振动；

（5）固井水泥石还必须能保护套管，防止井下液体侵蚀，预防井下由于岩石蠕变造成塌陷而损坏套管，延长油、气井使用寿命等功能。

为了满足油气井固井对油井水泥的特殊要求，油井水泥的生产与建筑水泥有共同之处，亦有所不同，表现在以下几方面。

1. 水泥类别

油井水泥中属于建筑水泥体系的只有 API 的 A, B, C 等三级水泥（相当于建筑水泥 ASTM 的 I, II, III 型），而其它级别或类型的基本水泥均不属于建筑水泥体系。

2. 生产工艺

生产 G, H, D, E, F 级油井水泥及其它各类基本水泥时，对原料选用、水泥熟料烧成工艺和水泥制备条件等的控制均比建筑水泥严格，油井水泥生产质量检验亦比建筑水泥繁多而且更为严格。

3. 化学组分要求

抗硫酸盐油井水泥的化学组分要求与抗硫酸盐的建筑水泥不相同，见表 2.1^[3]。

表 2.1 油井水泥与建筑水泥化学组分对比

化学组分	油井水泥	建筑水泥
C ₃ S (硅酸三钙), %	46~56	46 左右
C ₃ A (铝酸三钙), %	中抗硫低于 8, 高抗硫低于 3	<3.5
C ₄ AF (铁铝酸四钙) + C ₃ A, %	<24	没有特殊要求
MgO, %	<6	没有特殊要求
SO ₃ , %	<3	<2.5
烧失量, %	<3	<3
总碱量, %	<0.75	<0.6

4. 物理性能要求的差异

建筑水泥需要满意的早期强度和凝结时间，而油井水泥必须按照所需进行注水泥井段的地层特点、温度和压力范围等，要求严格确定水泥浆稠化时间、强度、失水、流变参数和渗透率等性能。

油井水泥与建筑工业所用的水泥的物理、化学性能测试仪器和测试方法不相同，详见第三章。

二、油井水泥发展概况

在公元前 2000~3000 年，人们开始用火煅烧石灰、石膏，并将其制成砂浆用作胶凝材料。我国的万里长城，埃及的金字塔、狮身人面像等建筑，就是用这种胶凝材料建造的^[4~6]。

由于生产的发展，人们要求强度较高的胶凝材料，1756 年出现了水硬性石灰，1796 年出现了罗马水泥。这对人们认识到欲制成水硬性高的胶凝材料，必须磨细含有适量（20%~25%左右）粘土的石灰，并经过煅烧后方能获得，但制造这种材料的天然原料是不易获得的，必须进行人工配料才行。

19 世纪初（1810~1825 年）已出现用人工配料高温煅烧和粉磨等方法来制造水硬胶凝材料，并开始组织生产。1824 年英国瓦匠约瑟夫·亚斯波丁（Joseph Aspdin）制造水泥成功并建立了工厂，而且以“改进人造石块的生产方法”一方申请获得专利权，由他制成的水泥称为波特兰水泥，在我国称之为硅酸盐水泥。

硅酸盐水泥出现后，应用日益普遍。一百多年来，由于各国科学家和水泥生产者的不断研究探索及生产工艺的改进，使硅酸盐水泥的性能不断提高和完善，它不仅可用于地面、海洋、港口、地下隧道及巷道建设，而且也广泛用于钻井、完井、修井工程中，因此就出现了早期的油井水泥。1948 年美国制订了第一份规程（API 规程 32），并于 1952 年首次颁布，此后美国开始组织生产各类油井水泥，用于各类油气井的固井作业。

我国四川自贡的盐井开采，早在 1840 年前已使用木质套管下入井中，用桐油和石灰加固封隔环空。

我国 50 年代就开始了油井水泥的研究和生产，按照当时苏联油井水泥标准生产 45℃，90℃，120℃，150℃水泥。

1981 年我国按照 API 油井水泥国际标准研制成功 A 级和 G 级油井水泥，并在各油气田注水泥作业中应用。1992 年底我国使用的 API 油井水泥的数量已占使用水泥总量的 90.44%，1993 年底已实现全部转化。我国生产的 G 级水泥（四川嘉华、夹江油井水泥厂）及 A 级水泥（大连水泥厂）已获得 API 认可，并取得 API 画押商标。

目前世界基本油井水泥发展很快，特种油井水泥也取得很大的发展。现将世界石油 1999 年“固井”专刊所列世界七大公司固井用基本水泥和特种油井水泥混合物列表 2.2^[8]。

表 2.2 基本水泥

类 型	说 明
波特兰水泥	API A, B 水泥, ASTM I 或 II 水泥
	API G 或 H 级
	API C 级, ASTM III 型
高铝水泥	铝酸钙水泥
市售低密度水泥	Trinity 低密度水泥 (TLW) 或 TXI 减轻剂或等材料
市售膨胀水泥	Chem Comp, ASTM K 型或相似材料
微细波特兰水泥	MC—300 或等材料
微细波特兰水泥和微细高炉矿渣混合物	MC—500 或等的材料
高炉矿渣 (BFS)	细磨粒状或球状的高炉矿渣
高细水泥	比正常水泥细, 但没有微细水泥细
微细高炉矿渣	MC—100 或等的材料
波特兰水泥和高炉矿渣混合物	在某些地区可改善波特兰水泥质量, 提高对外加剂的适应能力
可贮存的液体水泥浆	水基液体水泥浆
酸溶水泥	非波特兰无机水泥, 在酸中完全溶解
合成树脂水泥	环氧树脂水泥

注：API：美国石油学会；ASTM：美国材料试验学会；MC—100，MC—300 和 MC—500 是由 Ridgewood, NJ. 地球化学公司提供的。

从表 2.2 可以看出：基本水泥有了很大发展，共有 13 类水泥。过去曾经有的 API A, B, C, D, E, F, G, H, J 九种基本水泥，现已简化或取消而成 A, B, C, G, H 五种，而且在表中归结为一类水泥。D, E, F 级水泥，可由 G, H 级水泥加入缓凝剂来实现。取消 J 级水泥的主要原因是 J 级水泥在 62℃ 以下基本不水化，初始反应活性低。除第一类油井水泥（波特兰水泥）外，还有高铝水泥（300℃ 以上热采井、地热井固井用），市售低密度水泥（低压油气井、漏失井固井用），市售膨胀水泥（改善胶结性能提高固井质量），微细波特兰水泥和微细高炉水淬矿渣混合物（主要用于小间隙井，套管微缝修补以及挤注、修井用），高炉水淬矿渣，微细高炉水淬矿渣（主要用于钻井液转化为水泥浆 [MTC] 以及多功能钻井液 [UF] 和 MTC 联合使用，可提固井质量，防止循环漏失，提高采收率）。固井基本水泥的变化，反映出固井技术的重大发展，它表明：

(1) 多种固井胶结材料已成功地用于固井；

(2) 随着时间的推移，API 各级水泥种类不断减少，而且在固井工业中的作用和地位也在变化；

(3) 高炉水淬矿渣在钻井液及固井液中的应用已在兴起，并显示出潜在优势和好的应用前景；

(4) 在高于 350℃ 的热采井、地热井中，采用加硅粉的技术已不适用，而需应用高铝水泥来代替；

(5) 超细水泥在小井眼，小间隙注水泥，挤注和修补套管中日益增加。

最近，特种油井水泥混合物也获得很大发展，见表 2.3。这些特种水泥混合物概括起来共 17 种，包括低密度水泥、膨胀水泥、触变水泥、高寒地区水泥、提高胶结强度的水泥、抗 CO₂ 腐蚀水泥、抗酸溶水泥和合成树脂水泥等。

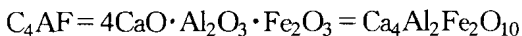
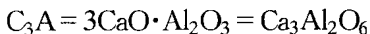
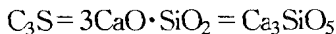
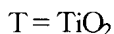
表 2.3 特种油井水泥混合物

编 号	配 方	特殊配方
1	波特兰水泥和市售低密度水泥的混合物如 TXI 低密度水泥	
2	波特兰水泥粉煤灰和凝胶（膨润土）的混合物	粉煤灰水泥固定的配比 15:85，另加 8% 的膨润土
		粉煤灰：水泥为 50:50，另加 4% 膨润土
		粉煤灰：水泥为 35:65，另加高达 6% 膨润土
3	水泥粉煤灰和硅灰的混合物	
4	含有水泥、硅灰、火山灰微珠混合物	
5	含有低密度火山灰、微珠的混合物	
6	含有低密度玻璃珠的混合物	
7	水泥、粉煤灰、石灰和硅粉的混合物，用于高温	
8	含有半水石膏或类似材料的膨胀水泥	
9	含有金属氧化物膨胀剂的膨胀水泥	
10	含有发气剂的膨胀水泥	
11	触变水泥	含有半水石膏或石膏；交联聚合物复合物
12	高寒区水泥	
13	提高胶结强度的水泥	含有聚合物外加剂，如苯乙烯丁二烯胶乳、丙烯酸胶乳、聚乙烯醇等
14	提高与盐地层胶结强度的水泥	含盐或饱和盐水泥；改进与盐地层胶结的专用外加剂
15	抗 CO ₂ 腐蚀水泥	
16	抗酸溶水泥	波特兰水泥加外加剂，以减少酸溶
17	合成树脂水泥	环氧树脂水泥

本章所采用的水泥化学组分、单矿物及水化产物名称如下：

(1) 水泥化学组分、单矿物代号：

C = CaO	H = H ₂ O	A = Al ₂ O ₃	F = Fe ₂ O ₃
S = SiO ₂	$\bar{C}$ = CO ₂	$\bar{S}$ = SO ₃	N = Na ₂ O
P = P ₂ O ₅	M = MgO	K = K ₂ O	L = Li ₂ O



(2) 形成的水化物代号:

①C-S-H 代表无定形非化学计量的水化硅酸钙, 用连字号代表没有确定的化学组成。

②在水化过程中, 硫酸钙与 C_3A , C_4AF 反应, 形成的 AFt 相:

A——铝酸盐;

F——铁酸盐;

t——三硫铝酸盐。

③单硫酸盐—— $\text{C}_4(\text{AF})\text{H}_{13}$ 固溶体通常可简单地称作单硫酸盐或 AFm 相:

A——铝酸盐;

F——铁酸盐;

m——单硫铝酸盐。

三、油井水泥的生产^[4~6]

严格地说, 油井水泥的生产, 决不是指狭义的波特兰 API A, B, C, G, H 级水泥的生产, 而应是指上述表 2.2 中所述的 13 种基本水泥及表 2.3 中的特种水泥的生产。13 种基本水泥除 API 各级波特兰油井水泥, 高铝水泥、高炉矿渣市售膨胀水泥外, 其余都是无需再煅烧混合制品, 而高铝水泥、市售膨胀水泥的生产与 API 各级波特兰水泥相似, 故本文只介绍 API 各级油井水泥的生产工艺, 以及高炉水淬矿渣的生产工艺。

油井水泥的生产与普通水泥生产没有多大差别, 只是由于注水泥工程对油井水泥的化学—物理性质提出了较高的控制要求, 反映在生产上对原材料的选用、水泥熟料的烧成工艺和水泥制备条件的控制比较严格, 生产中的质量控制检验比较繁多。

1. 原料与辅助原料

制备硅酸盐水泥的原料中含有多种化学成分, 其中主要的有四种, 即氧化钙 (CaO)、二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铝 (Al_2O_3) 和三氧化二铁 (Fe_2O_3), 并且要求它们之间有一定比例。但是在自然界很难找到符合上述成分要求的单一原料, 一般都是采用几种原料调配使用, 使化学成分符合要求。

1) 石灰质原料

石灰质原料是水泥熟料中氧化钙的主要来源, 提供水泥碱性成分, 水泥生产中石灰质原料耗用量最大, 每烧成 1t 熟料约需 1.2~1.4t 石灰质原料。用于生产油井水泥的石灰石要求氧化钙含量高些, 一般要求大于 52%, 而 MgO 等杂质应该尽量少些。

2) 粘土质原料

粘土质原料主要提供水泥中的酸性成分, 如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等, 粘土质原料的用量一般随石灰质原料的情况而定, 生产 1t 水泥需 0.2~0.3t。粘土是由长石 ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) 或云母 ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) 等矿物风化而成。粘土中的主要矿物是高岭土 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、蒙脱土 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)、叶蜡石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 等, 还常常夹