

〔美〕 D·K·史密斯著



美国油井注水泥技术

石油工业出版社

美国油井注水泥技术

〔美〕D·K·史密斯 著

郝俊芳 译 李自俊 施太和 张绍槐 校

石油工业出版社

Dwight K. Smith

Cementing

Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME

Society of Petroleum Engineers of AIME

New York 1976 Dallas

*

美国油井注水泥技术

〔美〕D·K·史密斯著

郝俊芳译

李自俊 施太和 张绍槐 校

*

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

大厂县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 $13 \frac{1}{2}$ 字数426千字 印数1—2,900

1980年9月北京第1版 1980年9月北京第1次印刷

书号15037·2152 定价1.50元

内 容 提 要

本书译自美国矿冶学会石油工程师协会出版的石油工艺专著——〔美〕D.K. 史密斯著《Cementing》（1976年版）一书。

书中较全面地介绍了美国油井注水泥技术工艺的历史和现状。全书共十四章，内容主要包括：油井水泥的成分与性能、水泥添加剂、油井注水泥设备、各种注水泥方法与原理、注水泥质量的影响因素及检查、挤水泥原理和工艺等；讨论了各种注、挤水泥方法的适用条件与局限性，并附有注、挤水泥的计算实例；各章之后都附有较详细的参考文献目录。

此书的特点在对美国近年来油井注水泥的研究成果以及大量技术文献进行了综合评述。

本书可供石油院校师生、油田工程技术人员或工人使用。也可供水泥科研与生产单位参考。

译文第一章至第五章由李自俊校订；第六章至第九章由施太和校订；第十章至第十四章以及附录由张绍槐校订。

目 录

第一章 绪 论

1-1 本书范围	1
1-2 本书目的	1
1-3 注水泥步骤	1
1-4 历史回顾	1
1-5 小结	6

第二章 油井水泥的生产、 化学性能与种类

2-1 引言	9
2-2 水泥生产	9
2-3 水泥化学性能	10
2-4 水泥分类	11
2-5 API油井水泥的性能	12
2-6 别国的水泥标准	17
2-7 特种水泥	18

第三章 油井水泥添加剂

3-1 引言	24
3-2 速凝剂	25
3-3 减轻剂	29
3-4 加重剂	34
3-5 缓凝剂	35
3-6 防漏剂	37
3-7 降失水剂	37
3-8 减阻剂(分散剂)	39
3-9 含盐水泥的使用	41
3-10 水泥特种添加剂	42
3-11 小结	45

第四章 影响水泥浆设计的因素

4-1 引言	50
4-2 温度、压力和可泵时间	50

4-3 水泥浆的粘度和加水量	53
4-4 稠化时间	55
4-5 支持套管柱所需的水泥强度	55
4-6 配浆用水	57
4-7 水泥对钻井液及泥浆处理剂 的敏感性	58
4-8 水泥浆密度	59
4-9 漏失	60
4-10 水化热	60
4-11 渗透率	62
4-12 失水量控制	62
4-13 抗井内盐水腐蚀	63
4-14 小结	64

第五章 对井眼和套管所 应考虑的问题

5-1 引言	65
5-2 套管柱设计	66
5-3 井眼准备和下套管	67
5-4 套管的座放	68
5-5 井内套管断裂	69
5-6 小结	69

第六章 地面和井内套管 附属设备

6-1 引言	71
6-2 浮力和导引设备	71
6-3 地层封隔接箍和地层封隔套管鞋	73
6-4 多级注水泥工具	74
6-5 水泥头和注水泥胶塞	75
6-6 套管扶正器	76
6-7 套管刮泥器	78
6-8 特种设备	78
6-9 小结	79

第七章 一次注水泥

7-1 引言	81
7-2 计划注水泥所应考虑的问题	82
7-3 注水泥过程中所应考虑的问题	85
7-4 注水泥方法	92
7-5 顶替——注水泥的关键时刻	95
7-6 多管注水泥	96
7-7 定向井注水泥	97
7-8 注水泥后的漏气问题	98
7-9 可溶性地层注水泥	100
7-10 注水泥后所应考虑的问题	100
7-11 小结	101

第八章 深井注水泥

8-1 引言	104
8-2 深井注水泥所应考虑的问题	106
8-3 深井尾管固井	107
8-4 尾管悬挂器	109
8-5 裂缝地层尾管注水泥	110
8-6 异常高压地层尾管注水泥	111
8-7 低压井尾管注水泥	112
8-8 设计深井水泥浆所应考虑的问题	113
8-9 深井下尾管和注水泥检查项目表	115

第九章 挤水泥

9-1 引言	118
9-2 挤水泥目的	118
9-3 挤水泥术语	119
9-4 挤水泥方法	121
9-5 挤水泥压力要求	122
9-6 裂缝性地层挤水泥	123
9-7 错误的挤水泥理论	124
9-8 作业计划	124
9-9 水泥浆设计	125
9-10 挤水泥封隔器	127

9-11 挤水泥压力计算	128
9-12 水泥候凝时间	129
9-13 挤水泥效果检验	129
9-14 小结	129
9-15 挤水泥应用公式	131

第十章 裸眼水泥塞

10-1 引言	133
10-2 水泥塞的用途	133
10-3 打水泥塞注意事项	134
10-4 泥浆系统	134
10-5 水泥浆体积和设计	135
10-6 打水泥塞方法	136
10-7 水泥塞检验	138
10-8 重晶石塞	138
10-9 小结	139

第十一章 流动计算

11-1 引言	141
11-2 井内流体流动性能	143
11-3 测定流体流动性能的仪器	146
11-4 顶替理论——塞流和紊流	147
11-5 流动计算公式	148
11-6 小结	151

第十二章 水泥固结、测井和射孔

12-1 引言	153
12-2 对水泥固结的考虑	153
12-3 水泥对套管的固结	154
12-4 水泥对地层的固结	156
12-5 确定套管外水泥位置	156
12-6 射孔对水泥环的影响	160
12-7 射孔设备和方法	161
12-8 气层射孔	165
12-9 影响射孔的因素	165
12-10 小结	166

第十三章 注水泥规程

13-1 引言	168
---------	-----

13-2	井内注水泥管理机构	168
13-3	典型注水泥规程	171
13-4	许可证	173
13-5	强制和罚款	174
13-6	小结	174

第十四章 注水泥的特殊应用

14-1	引言	175
14-2	大井眼注水泥	175
14-3	水井注水泥	177
14-4	废污处理井	178
14-5	蒸汽井注水泥	179
14-6	永久冻土带注水泥	181

附录A 一次注水泥作业实例

A-1	某石油公司 1 号作业	187
A-2	某石油公司 2 号作业	187

A-3	某石油公司 3 号作业	189
-----	-------------------	-----

附录B 挤水泥作业实例

B-1	某石油公司 1 号作业	191
B-2	某石油公司 2 号作业	192

附录C 井下打水泥塞计算

C-1	某石油公司平衡法打水泥塞 计算实例	194
C-2	打水泥塞所需水泥量(袋)	194

附录D 一次注水泥流动计算实例

D-1	某石油公司 1 号作业	196
D-2	某石油公司 2 号作业	197

专用名词表

国际标准单位和米制单位换算系数表

第一章 绪 论

1-1 本 书 范 围

油井注水泥方法已在全世界范围内普遍使用，现在已成为有多数人员和机构参加及使用多种技术的复杂工艺。为有助于现场工程师们进行注水泥设计与评价，本专著写成了包括各种油井注水泥技术与多种注水泥材料有关资料的综合性参考书。

本书分为以下数章：油井水泥、水泥添加剂、试验方法、注水泥设计、一次注水泥作业、尾管注水泥、挤水泥及打水泥塞方法等。在注水泥设计中对达到层间隔绝的重要性给予了足够的注意。对注水泥机械泵送设备、混合器、水泥散装设备以及为把水泥浆泵送到合适位置所用的各种井下工具等也给予了一定的篇幅。为给石油工程师提供良好注水泥施工的实际知识，本书依现场注水泥施工的逻辑顺序而编写。

1-2 本 书 目 的

本书目的有二：

1. 对负责注水泥工作的工程师提供有助于他评价各种注水泥技术作用及判断预期效果的资料；
2. 对注水泥工艺现状给予综合性叙述。

1-3 注 水 泥 步 骤

油井注水泥方法是把水泥与水混合成水泥浆并把它沿套管向下泵送至套管外环形空间的重要部位或套管柱下部的裸眼内（见图 1-1）。

一次注水泥方法的两个主要作用是阻止地层之间流体窜流及固结与支持套管柱。

除隔绝油、气、水层外，注水泥还有助于：（1）防止套管腐蚀；（2）借迅速形成密封而阻止井喷；（3）减少钻进下部井段时套管所受的冲击载荷；（4）封隔漏失层或低压层。

1-4 历 史 回 顾

早期注水泥工作

美国石油工业传统上系以1859年追克井的钻进为起点。但直到1903年才在加利福尼亚劳木波斯油田使用水泥浆封堵井内油层上部的水层。据说是法兰克和联合石油公司把50袋纯硅酸盐水泥混合好后，用捞砂筒送到井内的^(1,2)。28天以后把井内水泥钻掉，再钻穿油层后完井，而水层已被有效封闭。于是该法成为可行，不久便在加利福尼亚州有同样问题的油田中传播使用起来。

早期的捞砂筒法及油管法不久便在1910年被A·A·贝尔金斯（A.A.Perkins）在加利福尼亚油田提出的双塞注水泥法所代替⁽³⁾。近代注水泥技术也就由此而产生。第一个塞子（或

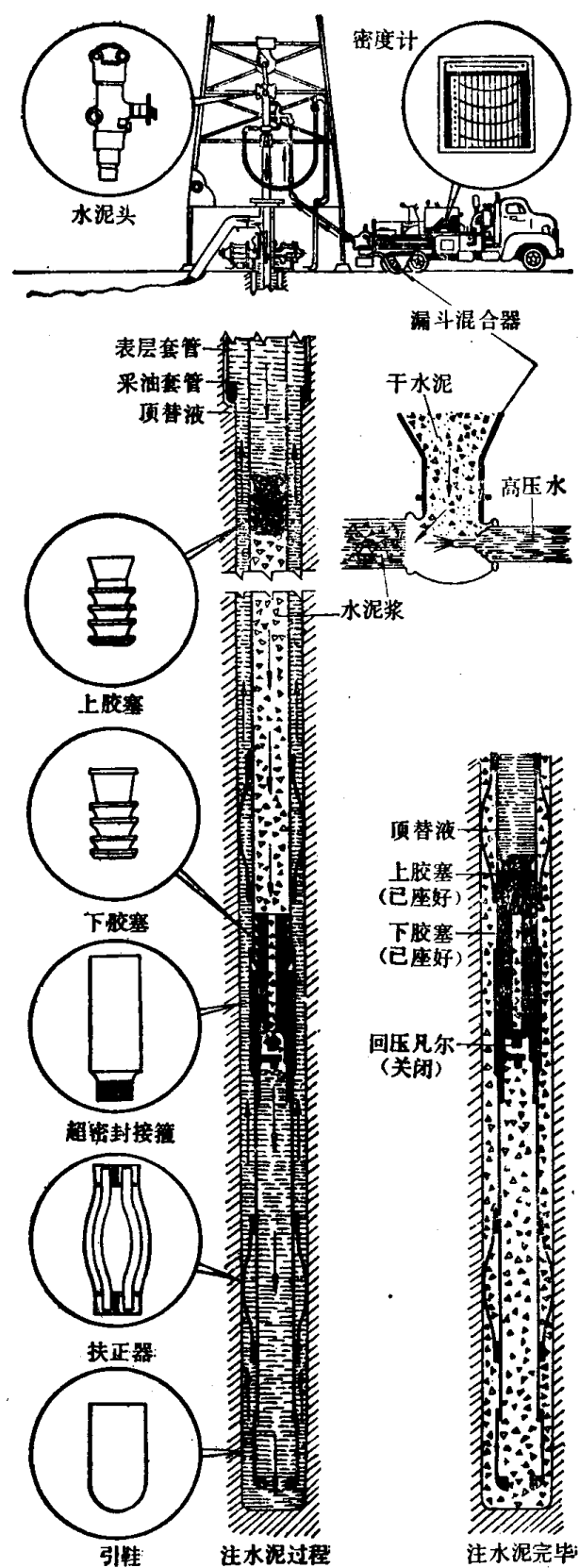


图1-1 典型的一次注水泥

叫分隔塞)系生铁制成,其上装有皮板用以刮擦套管内壁上的泥浆。当用蒸汽泵把套管内水泥浆替完时,由于塞子被阻挡,引起压力增加,从而使蒸汽泵停止工作。

贝尔金斯专利的特点是使用两个塞子。后来法院规定该专利包括在水泥浆前面或后面使用能阻止水泥浆与泥浆混合的任何分隔塞⁽⁴⁾。

由于贝尔金斯公司的服务范围仅限于加利福尼亚州以内,所以其它地区的注水泥方法系以不同方式出现。在俄克拉何马州,它是在1920年由E·P·哈力伯顿(Erle P·Halliburton)在海威特油田提出的。

俄克拉何马州的方法是把套管下在油层顶部,在旋转法钻的井内,套管一般下的较高,以避免钻开生产层⁽⁵⁾。斯开雷的追拉1号井由于钻入了油层,在下套管时发生了井喷。直到哈力伯顿用原始的混浆和注水泥设备自套管内泵入约250袋硅酸盐水泥和水之后,井喷才被停息。候凝10天以后,钻穿井内水泥,而油井在没有多少水、气情况下进行生产。在以后几个月内,用这种方法又钻了61口井⁽⁶⁾(见图1-2)。



图1-2 1920年初期注水泥作业
(俄克拉何马州,海威特油田)

散装水泥的使用和水泥添加剂

1940年以前油井都用袋装水泥注水泥(图1-3)。当时,水泥添加剂的种类也很少。在1930年,一种添加剂也没有,只有一种水泥。到1940年已发展到两种水泥和三种添加剂。

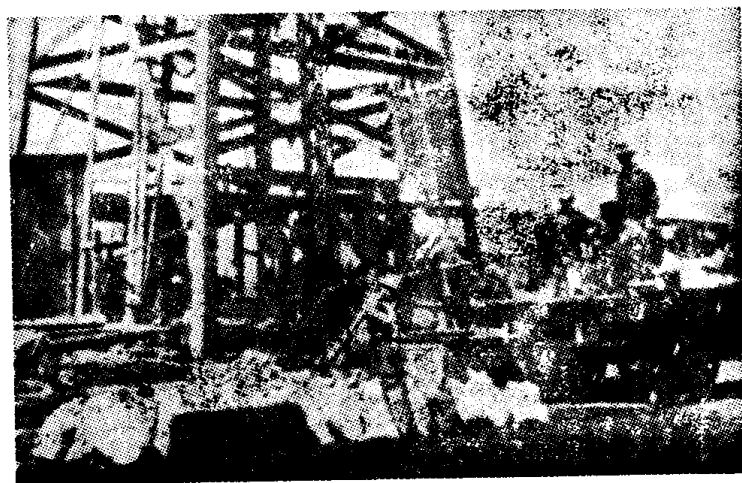


图1-3 早期用袋装水泥注水泥

经二十五年以后到1965年市场上已有 8 类 API 水泥及 38 种添加剂出售。到1975年，虽然常用的API 水泥已减少到 4 类，但添加剂却增加到 44 种。

随着1940年散装水泥的使用，使添加剂也更便于应用，且消除了水泥浪费及节省了人力。为取消袋装水泥，于1940年在赛莱姆 ■ 附近建设了第一座散装水泥库。其它一些早期散装水泥库则建设在加里福尼亚及得克萨斯。这些水泥库从铁路火车上把散装水泥输送到高位水泥罐内，从该处可直接向散装水泥卡车装水泥。散装水泥处理方法在四十年代已很成熟，但直到1949年开始使用火山灰以后，才进入了散装水泥使用的新时代。

标准化

1937年 API (美国石油学会) 成立了第一个水泥研究委员会。当时已有好几个水泥试验室。它们装有强度试验机以及可在井内温度条件下测定水泥浆流动性能或可泵性的搅拌试验装置(7~10)。1939年法里斯 (Farris) 和斯坦诺林德油气公司设计的温度压力水泥稠化时间测定仪是一种更为新颖的水泥性能试验仪器。

随着水泥试验室的建立，在1937~1950年间油井水泥有了不少新进展。于是就产生了制订水泥标准试验方法的必要。为此，中州API水泥委员会于1948年拟出了第一份草稿 (API 规程32)(13)。该规程在1952年首次公布，以后则由1953年成立的全国API水泥标准委员会定期修订。

有关水泥标准的文件每年以两种小册子的形式出版：油井水泥标准以“API Spec. 10A”形式出版；《API 油井水泥及添加剂建议试验方法》以 “API RP10B” 形式出版。到现在它们已分别出了第19版和第20版。

注水泥设备

多年来注水泥设备一直在不断变更以增加其轻便性及提高马力，使之能产生高压（见表 1-1 及图 1-4）。为改善一次注水泥作业，已使用多种机械方法，以便能更有效地在套管四周形成均匀水泥环。这些方法有：注水泥胶塞、计量管线、扶正器、刮泥器、浮鞋及多级注水泥接箍等。

表1-1 油 井 用 泵 的 演 变

泵 类 型	使 用 年 代	泵压(磅/英寸 ²)	排量 (桶/分)	马 力	磅/马力
蒸 汽 双 缸	1921~1940	2,250	6	60	32
蒸 汽 双 缸	1936~1947	3,500	9	100	24
动力 驱动 双缸	1939~1955	4,000	7	135	23
立式双缸双作用	1939~1954	6,000	8	200	24
反向 活塞 摆式	试 验 性	10,000	6	200	40
柱 塞 三 缸	1947~	10,000	10	330	14.5
柱 塞 三 缸	1957~	20,000	24	600	9
柱 塞 三 缸	1965~	12,000	13	400	9.2
柱 塞 三 缸	1975~	10,000	6	250	10

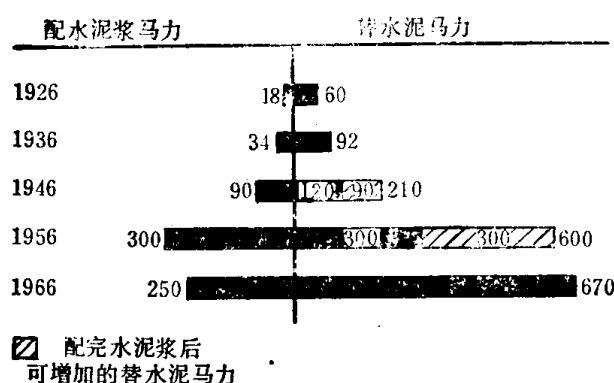


图 1-4 水泥车马力

现场实践——一次注水泥

由于钻井深度增加及钻井技术进步,使注水泥方法也随之发生了变化(18~21)。在1910~1920年期间,象2,000~3,000英尺(609~914米)的井就已认为是深井。到二十年代后期,已有好几口井钻过6,000英尺(1,828米)。较高的温度和压力给注水泥带来了困难。由于速凝,在2,000英尺(609米)用的水泥已不能适用于更深的井内。

当时由于还没有水泥试验设备,现场注水泥施工只好试着去干。为在较高的温度下使水泥缓凝,有时曾把好几吨冰加在泥浆内以降低井内温度。但这种方法并未能完全有效。当时只有尽快混合及泵送水泥才是唯一可靠的办法。

等候水泥凝固所占用的时间被认为是非生产时间。过去一旦注水泥失败,就认为是候凝时间短及水泥质量不好所造成。水泥速凝剂曾以多种商业名称出售,大部分为氯化钙溶液。当人们较清楚地了解了水泥成分、试验方法及化学速凝作用后,水泥候凝时间就缩短了。起初一般认为套管鞋附近的水泥要有12小时候凝时间,这几乎被当时石油工业制订规章的机构所一致采用。1946年法里斯发表了他关于时间与压力对水泥固结性能影响的发现(22)。当现场实践证实了该发现之后,制订规章的机构就把水泥候凝时间减少到24~36小时。

早期对注水泥成功与否系以封闭水层试验结果为依据(23、24)。如试验中未发现水,则法律上认为注水泥成功。但仍经常封固不好。对早期注水泥工作的研究表明:欲使注水泥成功,水泥必须达到一定的强度和硬度。1928年汉布莱(Humble)发表了他对墨西哥湾沿岸油井注水泥工作的研究成果(6)。从大批深井取出的岩芯表明:大多数注水泥失败是由于泥浆污染。于是,为了提高注水泥质量,注意到要调整泥浆性能、注水泥前要充分洗井以及在水泥浆与泥浆之间加一段水作隔离液等。

挤水泥和打水泥塞

在早期注水泥阶段所用的井内堵水方法和设备经历了许多变更。起初,系把水泥浆送入井内,然后施加一定压力。据说早在1905年福兰克希尔(Frank Hill)即把油管及封隔器下至套管底部,再泵送水泥浆至管外以封隔水层。虽然此法堵水有效,但当水泥浆内的水被挤出之后,则往往发生卡油管及封隔器事故。

在某些注水泥作业中,系把水泥浆倒入井内,再灌满水以产生挤水泥压力。有时还用泵对充满水的井加压,以便能更有效封隔水层。

当使用大量水泥浆时,套管外水泥浆液柱压力要大于管内,于是就需要用压力来使水泥浆保持在既定位置。长套管柱的下部装有回压凡尔,但一个回压凡尔往往失效。于是在水泥

凝固之前就要一直施加着泵压,对此一般有时也称之为“挤水泥”。

用高压向井内挤数百袋水泥的施工曾引起广泛讨论。一般认为这时水泥浆可以:(1)把原来注水泥时套管外面未被水泥浆替走的残存泥浆顶替走;(2)对裸露地层加压;(3)沿层面压裂地层。

早在1912年就使用过可钻水泥承转器^(25、26),但直到1939年才在工业上使用可提取式水泥承转器。把原来用于冲洗筛管或炮眼的约威尔器(Yowell tool)重新加以设计,就成了可提取式水泥承转器。由于这种承转器既省钱又省时间,所以在水泥凝固之前不需保持压力的场合下获得了广泛的应用。

当射开的地层产水或出气过多时,可对它挤水泥,钻穿水泥塞后再进行射孔。这种挤水泥并再射孔使用的很多,特别在墨西哥湾沿岸地区。因为大多数操作者在射孔完井之前愿意进行“保护性挤水泥”(“protection squeeze”)或“分段挤水泥”(“block squeeze”)(24)。

1-5 小 结

表1-2总结了油井注水泥历史上的重要事件。

表1-2 油井注水泥历史上重要事件年表

- 1903: F.F.希尔(F.F.Hill) 混合并倒入井内50袋水泥的纯水泥浆,用以封堵井底水层。
- 1910: A.A.贝尔金斯、贝尔金斯注水泥公司——在加利福尼亚用双塞法进行了第一次油井注水泥。
- 1912: R.C.贝克(R.C.Baker)、贝克石油工具公司——发明了第一个封隔套管与油管环形空间的水泥承转器。
- 1914: F.W.欧特曼(F.W.Oatman)——据说曾使用氯化钙来加速水泥凝固及减少水泥候凝时间。
- 1915: 矿山局、加利福尼亚——成立了堵水试验检查组。
- 1918: A.A.贝尔金斯——在洛杉矶盆地成立了油井服务处。
- 1919: E.P.哈力伯顿——在北得克萨斯成立了注水泥事务所。
- 1920: E.P.哈力伯顿——在俄克拉何马州威尔逊附近为W.G.斯开雷(W.G.Skelley)第一次用注水泥方法压井。
- 1920: 库因塔那石油公司——在50口井内注水泥时旋转套管。
- 1920: E.P.哈力伯顿——发明了射流水泥混合器。
- 1921: J.T.白奇曼(J.T.Bachman)、散塔克鲁兹水泥公司——发明了初期水泥试验技术。
- 1922: 哈力伯顿——提出了双塞注水泥法专利。
- 1924: 哈力伯顿——许可贝尔金斯使用射流水泥混合器。
- 1924: 俄克拉何马联合委员会——提出了使用速凝剂时油井水泥候凝时间可自10天减少到7天的规定。
- 1925: 第一次用多层纸袋包装水泥。
- 1926: D.比奇(D.Birch)、巴木斯达尔石油公司——制造了用于特种套管和浮箍的体部和凡尔。
- 1927: 独星水泥公司——在印地安那首次制造了高细度抗硫水泥。
- 1927~28: 汉布莱石油与炼制公司——对墨西哥湾沿岸注水泥失败情况进行了调查。
- 1929: 太平洋硅酸盐水泥公司——首次介绍了缓凝水泥。
- 1929: 哈力伯顿——建立了第一个测定油井水泥性能的试验室。
- 1930: 哈力伯顿、汉布莱石油与炼制公司、加利福尼亚标准石油公司——开始进行油井水泥研究工作。
- 1930: H.R.依尔文(H.R.Irvine)——取得了在套管外用扶正器方法的专利。

- 1930: 搬土被引进到石油工业, 用于钻井泥浆及水泥。
- 1932、1934: 威拉姆兰诺与瓦尔特威尔斯——在加利福尼亚及墨西哥湾沿岸使用了射孔枪。
- 1934: 施伦姆伯杰 (Schlumberger) ——取得了用井温测量仪确定水泥返高顶部位置的专利。
- 1934: B·C·克拉夫特等 (B. C. Craft *et al.*) ——提出了大量油井水泥试验报告(8)。
- 1935: E·F·希尔考克斯 (E. F. Silcox)、加利福尼亚标准石油公司——提出了水泥稠化时间测定仪结构的报告(7)。
- 1935: M·M·肯莱 (M. M. Kinley) ——发明了井径仪。
- 1935: T·W·波尤 (T. W. Pew) ——取得高压挤水泥法的专利。
- 1935: 通用阿特拉斯水泥公司——介绍安阿夫洛 (Unaflo) 缓凝水泥到工业界。
- 1936: 独星水泥公司——介绍了斯塔克尔 (Starcor) 缓凝水泥。
- 1937: J·E·外勒尔、哈力伯顿——制造了测定油井水泥性能的双容器装置。
- 1937: API——成立了油井水泥研究委员会。
- 1938: R·F·法里斯、斯塔诺林德油气公司——制造了第一台高温高压水泥稠化时间测定仪。
- 1939: 哈力伯顿——发明了可取回式水泥承转器。
- 1939: 汉布莱石油与炼制公司——在水泥内混入少量卡诺特石 (钒钾铀矿) 以便用伽玛测井法来确定套管外水泥返高顶部的位置。
- 1939: 肯艾斯瑞特与布鲁斯巴基斯——在加利福尼亚第一次使用市售井壁刮泥器。
- 1940: 美国石膏公司——首次介绍石膏水泥。
- 1940: 哈力伯顿——购买了加利福尼亚贝尔金斯注水泥公司。
- 1940: M·M·肯莱——第一次用电缆进行井径测井, 以确定所需水泥量。
- 1940: 哈力伯顿——采用散装水泥。
- 1946: R·F·法里斯、斯塔诺林德油气公司——发表了对水泥候凝时间的研究报告(22)。
- 1946: 得克萨斯铁路委员会——修改了水泥候凝时间规程, 由72小时减少到24~36小时。
- 1946: A·J·太波力兹 (A. J. Tepplitz) 与W·E·哈赛布洛克 (W. E. Hassebroek) ——发表了注水泥扶正器的研究报告(20)。
- 1948: G·C·侯瓦尔德与J·B·克拉克、斯塔诺林德油气公司——发表了关于水泥顶替效率的研究成果(27)。
- 1948: 哈力伯顿——发表了关于含盐水泥的公司研究报告。
- 1951: 汉布莱石油与炼制公司——在永久完成法井内首次使用改性水泥。
- 1952: API——批准了关于油井水泥试验的API规程32 (第一版) (13)。
- 1953: J·M·布哥比 (J. M. Bugbee) 壳牌石油公司——发表了关于井漏的资料(28)。
- 1953: 菲利普石油公司——把降失水剂和硅藻土介绍到工业界。
- 1957: 哈力伯顿——介绍了加重剂。
- 1957: 道威尔公司——出售用于水泥的胶乳添加剂。
- 1958: 哈力伯顿和道威尔公司——介绍了硬沥青和煤。
- 1958: A·科雷因和G·E·特罗克塞尔——发表了关于膨胀水泥的研究成果(30)。
- 1960: 道威尔公司——介绍了新品种降失水剂。
- 1961: H·J·比奇、海湾研究与开发公司——发表了挤水泥研究成果(29)。
- 1962: 服务公司——发明了水泥分散技术并使用了水泥减阻剂。
- 1968: 道威尔公司——介绍了低速注水泥技术。
- 1969: API、工业界——发表了关于基本水泥的概念。
- 1972: 埃索开发研究公司与哈力伯顿——发表了关于水泥浆顶替机理的研究(31)。

参考文献

1. "California's Oil," API (1948) 12.
2. "On Tour," Union Oil Co. of California (Nov.-Dec. 1952).
3. Tough, F. B.: "Method of Shutting off Water in Oil and Gas Wells," *Bull. 136, USBM; Petroleum Technology* (1918) 46, 122.
4. Perkins, A. A., and Double, E.: "Method of Cementing Oil Wells," U. S. Patent No. 1,011,484 (Dec. 12, 1911), filed Oct. 27, 1909.
5. Swigert, T. E., and Schwarzenbek, F. X.: "Petroleum Engineering in the Hewitt Oil Field, Oklahoma," USBM, State of Oklahoma, and Ardmore Chamber of Commerce (Jan. 1921).
6. Millikan, C. V.: "Cementing," *History of Petroleum Engineering*, API Div. of Production, Dallas (1961) Chap. 7.
7. Silcox, D. E., and Rule, R. B.: "Special Factors Must Be Considered in Selection, Specification, and Testing of Cement for Oil Wells," *Oil Weekly* (July 29, 1935) 78, No. 7, 21; "Cement for Oil Wells," *Petroleum Times* (Aug. 24, 1935) 34, 195-197.
8. Craft, B. C., Johnson, T. J., and Kirkpatrick, H. L.: "Effects of Temperature, Pressure, and Water-Cement Ratio on the Setting Time and Strength of Cement," *Trans., AIME* (1935) 114, 62-68.
9. Weiler, J. E.: "Apparatus for Testing Cement," U. S. Patent No. 2,122,765 (July 5, 1938), filed May 15, 1937.
10. Davis, E. L.: "Specifications for Oil-Well Cement," *Drill. and Prod. Prac.*, API (1938) 372.
11. Farris, R. F.: "Effects of Temperature and Pressure on Rheological Properties of Cement Slurries," *Trans., AIME* (1941) 142, 117-130 (reprint, Page 306).
12. Robinson, W. W.: "Cement for Oil Wells: Status of Testing Methods and Summary of Properties," *Drill. and Prod. Prac.*, API (1939) 567-591.
13. "Code for Testing Cement Used in Wells," *API Code* 32, 1st ed., API, Dallas (1948).
14. Halliburton, E. P.: "Method and Means for Cementing Oil Wells," U. S. Patent No. 1,369,891 (March 1, 1921), filed June 26, 1920.
15. Halliburton, E. P.: "Method of Hydrating Cement and the Like," U. S. Patent No. 1,486,883 (March 18, 1924), filed June 20, 1922.
16. Burch, D. D.: "Casing Shoe," U. S. Patent No. 1,603,447 (Oct. 19, 1926), filed Feb. 25, 1926.
17. Baker, R. C.: "Plug for Well Casings," U. S. Patent No. 1,392,619 (Nov. 18, 1913), filed Nov. 20, 1911.
18. Mills, B.: "Rotating While Cementing Proves Economical," *Oil Weekly* (Dec. 4, 1939) 95, No. 13, 14-15.
19. Reistle, C. E., Jr., and Cannon, G. E.: "Cementing Oil Wells," U. S. Patent No. 2,421,434 (June 3, 1947), filed Nov. 27, 1944. See also K. E. Wright: "Rotary Well Bore Cleaner," U. S. Patent No. 2,402,223 (June 18, 1946), filed June 26, 1944.
20. Teplitz, A. J., and Hassebroek, W. E.: "An Investigation of Oil Well Cementing," *Drill. and Prod. Prac.*, API (1946) 76-101; *Pet. Eng. Annual* (1946) 444.
21. Jones, P. H., and Berdine, D.: "Oil-Well Cementing — Factors Influencing Bond Between Cement and Formation," *Drill. and Prod. Prac.*, API (1940) 45-63.
22. Farris, R. F.: "Method of Determining Minimum Waiting-on-Cement Time," *Trans., AIME* (1946) 165, 175-188.
23. Oatman, F. W.: "Water Intrusion and Methods of Prevention in California Oil Fields," *Trans., AIME* (1915) 48, 627-650.
24. Doherty, W. T., and Manning, M.: "Gulf Coast Cementing Problems," *Oil and Gas J.* (April 4, 1929) 43, *Oil Weekly* (April 12, 1929) 53, No. 4, 47-48.
25. Baker, R. C.: "Cement Retainer," U. S. Patent No. 1,035,674 (Aug. 13, 1912), filed Jan. 29, 1912.
26. Huber, F. W.: "Method and Composition for Cementing Oil Wells," U. S. Patent No. 1,452,463 (April 17, 1923), filed May 24, 1922.
27. Howard, G. C., and Clark, J. B.: "Factors To Be Considered in Obtaining Proper Cementing of Casing," *Drill. and Prod. Prac.*, API (1948) 257-272; *Oil and Gas J.* (Nov. 11, 1948) 243.
28. Bugbee, J. M.: "Lost Circulation — A Major Problem in Exploration and Development," *Drill. and Prod. Prac.*, API (1953) 14-27.
29. Beach, H. J., O'Brien, T. B., and Goins, W. C., Jr.: "Formation Cement Squeezed by Using Low-Water-Loss Cements," *Oil and Gas J.* (May 29 and June 12, 1961).
30. Klein, A., and Troxell, G. E.: "Studies of Calcium Sulfoaluminate Admixtures for Expansive Cements," *Proc., ASTM* (1958) 58, 986-1008.
31. Clark, C. R., and Carter, L. G.: "Mud Displacement With Cement Slurries," *J. Pet. Tech.* (July 1973) 775-783.

第二章 油井水泥的生产、化学性能与种类

2-1 引言

在人类文明的最初阶段就已在建筑中对砖、石等使用了胶粘与固结材料。现在在欧洲、非洲、中东及远东仍可找到这些早期水泥质残余物。埃及（石膏水泥）、希腊（烧石灰）及意大利（火山灰石灰水泥）等地保存的某些残余水泥至今仍处于良好状态，则是它们耐久性的明证。最早的水硬性水泥（与水混合后可发生凝固与硬化的物质）可在地中海附近古罗马船坞及海岸建筑物中找到。这些物质系由火山喷出物的硅质残渣与石灰及水混合而成。在意大利的波组里附近可找到这种最早的火山灰水泥⁽¹⁾。

自中世纪起直到十字军时代水泥工艺进展很少。历史上一般认为一位英国瓦匠约瑟夫·亚斯波丁（Joseph Aspdin）是硅酸盐水泥的发明者。他在1824年发表了一份关于类似灰色岩石物质称为“水泥”的专利⁽²⁾。该成分在水中能够水化和硬化，所以称之为水硬性材料。这是现在我们所知道的最早的硅酸盐水泥（见表2-1）。

在没有水泥条件下进行钻井和完井将是难以想象的。但远在加利福尼亚第一次用水泥固井之前，美国东部却早已完成了许多口井。

表2-1 古代水泥的发展

埃及	熟石膏 ($\text{CaSO}_4 + \text{热}$)
希腊	石灰 ($\text{CaCO}_3 + \text{热}$)
罗马帝国	火山灰与石灰混合物
英国	天然水泥 (1756, 约翰·斯密东)
	硅酸盐水泥 (1824, J·亚斯波丁)
美国	硅酸盐水泥 (1872年第一次生产) (3,4)

2-2 水泥生产

石灰石（碳酸钙）和粘土或页岩是生产硅酸盐水泥的主要原料。如粘土和页岩中铁、铝的含量不够时，还要补加含铁、铝成分高的原料⁽⁴⁾。把这些材料用干法或湿法混合好后，即可送进旋转窑内，在 $2,600 \sim 3,000^\circ\text{F}$ ($1,427 \sim 1,649^\circ\text{C}$) 的高温下被煅烧成一种称为水泥熟料的物体。冷却之后，进行磨细并混入少量石膏，用以控制水泥产品的凝结时间（见图2-1）。

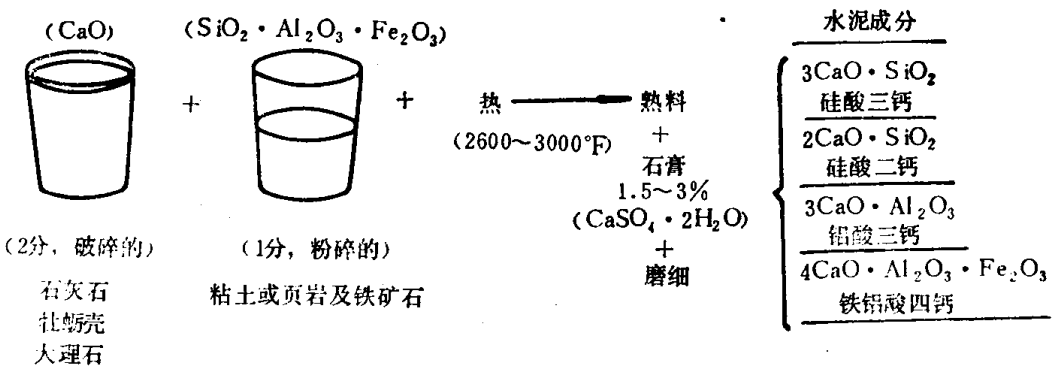


图2-1 硅酸盐水泥生产过程⁽³⁾

2-3 水泥化学性能

表 2-2 给出了油井用硅酸盐水泥典型的氧化物分析。

表2-2 硅酸盐水泥典型的氧化物分析
(API G类或H类水泥)

氧 化 物	百 分 比
二 氧 化 硅 (SiO_2)	22.43
氧 化 钙 (CaO)	64.77
三 氧 化 二 铁 (Fe_2O_3)	4.10
三 氧 化 二 铝 (Al_2O_3)	4.76
氧 化 镁 (MgO)	1.14
三 氧 化 硫 (SO_3)	1.67
氧 化 钾 (K_2O)	0.08
烧 失 量	0.54

当这些熟料成分与水发生水化时，将生成四种主要化合物。表 2-3 和 2-4 给出了它们的化学式和性能。

表2-3 凝固硅酸盐水泥中的化合物(5)

化 合 物	化 学 式	标 准 代 号
铝 酸 三 钙	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
硅 酸 三 钙	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
B-硅 酸 二 钙	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
铁 铝 酸 四 钙	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

表2-4 API硅酸盐水泥的标准成分和性能(6)

API 水 泥	化 合 物 百 分 比				瓦 格 聂 尔 细 度 (厘米 ² /克)
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
A 类	53	24	8+	8	1,600~1,800
B 类	47	32	5-	12	1,600~1,800
C 类	58	16	8	8	1,800~2,200
D和E类	26	54	2	12	1,200~1,500
G和H类	50	30	5	12	1,600~1,800
性 能	实 现 方 法				
高 早 期 强 度	增加 C_3S 含量，细磨				
缓 凝 性 能 好	控制 C_3S 与 C_3A 含量，粗磨				
低 水 化 热	限制 C_3S 与 C_3A 含量				
抗 硫 能 力	限制 C_3A 含量				