

美国油井水泥

〔苏联〕M·C·維納斯基 編
胡湘炯 周万江 譯

中国工业出版社



本书指出了根据井内条件选择水泥类型的原则，以求保证注水泥质量。书中列举了测定水泥和水泥浆基本性能的方法，和所用的仪器，并以较大篇幅阐述了调整水泥浆性能参数（比重、稠化时间、渗透速度等）的问题。书中说明深井的特殊条件（高温、腐蚀环境等）对水泥浆性能的影响，并列举了最广泛应用的有添加剂的水泥浆成份及其性能特点与配制方法。

本书可供石油钻井及油气井大修理工人员参考。

М. С. Винарский
ЦЕМЕНТЫ
В НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ США

ГОСИНТИ МОСКВА · 1959

* * *
美国 油 井 水 泥
胡湘炯 周万江 译

*
石油工业部石油科学技术情报研究所图书编辑室编辑

（北京北郊六铺炕）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店经售

*
开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $2\frac{13}{16}$ · 字数55,000
1964年12月北京第一版 · 1964年12月北京第一次印刷
印数0001—1,220 · 定价（科六）0.36元

*
统一书号：15165 · 3708（石油-308）

序

正确进行固井工作，对于成功地完井，并保证在油井整个生产期间采油条件良好，都有很大的意义。随着井深增加，改善固井质量的措施在很大程度上决定于所用水泥浆的性质。

最近几年，深井数量不断增加，如美国在1950到1956年间，共钻了957口井深超过3,800米的深井，其中有142口超过4,570米，部分井的深度到达7,000米。井底温度达到 200°C ，井底压力则高达1,250大气压。在这种条件下，若用普通的水泥浆，则在注水泥结束前它就可能凝固了。

由于深井注水泥工作相当复杂，人们对水泥浆性质的评价问题，以及它在高温高压下的性能变化给予很大的注意，并且设制了专门的仪器来测量水泥浆在高温高压下保持流动特性的时间。根据科学研究和矿场试验的结果，拟定了缓凝水泥及其它油井水泥的配方。

本书主要介绍美国对油井水泥提出的要求，以及在一定的油井注水泥的地质—技术条件下，选择油井水泥添加剂的原则；同时也着重描述了模拟井下条件试验水泥浆性能的方法。

油井注水泥时，经常发生不能保证管外水泥浆返到预定高度的困难。这个问题可以采用特殊的低比重水泥浆来解决。这种水泥浆具有很低的失水量，并且能形成致密不透水的水泥石。它在腐蚀性介质中及高温条件下长期养护，都具有很好的稳定性。

目前广泛应用的 水泥浆添加剂 有： 搬土 、 珍珠石 、 硅藻土 和 火山灰 。 緩凝剂 中最常用的是 木质素 ，其中 亚硫酸酒精废液 (CCB) 应用的最广泛。此外，尚使用有 油基水泥浆 ， 混油水泥浆 以及其它液体調配的水泥浆。近几年来，由于采用了調配水泥浆的机械化設備，以上这些新型水泥浆和添加剂都得到了进一步推广。使用这些設備可以把水泥和各种添加剂均匀混合，配成合乎固井要求的水泥浆。

近来，美国对水泥强度的要求有了改变。現在认为，使用强度較低的水泥，已能满足固井工作中对水泥石强度的要求。作者建議，根据国外資料中所列举的各种添加剂成分，利用当地材料去应用时，应事先进行試驗鉴定。

本书中列举了計算水泥浆混合組分的例子，并指出了調节水泥浆主要性能的方法。

本书的附录中，列出了一个各种英制与公制单位的换算比例，以便在采用外国資料时查閱使用。

目 录

序

§ 1	对水泥浆性能的要求	1
§ 2	油井水泥浆的物理-机械性质	3
§ 3	美国石油工业用水泥	8
§ 4	深井注水泥的特殊条件	12
§ 5	緩凝水泥	15
§ 6	水泥混合物的組份	18
§ 7	水泥浆比重及水灰比的調节	23
§ 8	美国石油学会制定的油井水泥实验规程	28
§ 9	水泥和水泥浆的一些試驗方法	30
§ 10	水泥浆稠化时间的測定	31
§ 11	泥浆污染或地层水侵入时水泥浆性能的变化	37
§ 12	添加搬土和珍珠石的水泥混合物	43
§ 13	添加硅藻土和火山灰的水泥混合物	54
§ 14	用不同液体配制的水泥浆	64
§ 15	加速水泥浆凝固的新方法	70
§ 16	最短候凝时间的确定	72
附录		80
参考文献		82

§ 1. 对水泥浆性能的要求

在1907~1908年間，第一次試用波特兰水泥封固套管、防止地下水侵入油层。当时的实验是用非常原始的设备进行的。实验结果证明，波特兰水泥能够满足封隔油水层的要求。此后便开始生产专门的油井水泥〔1〕。

最初在油井注水泥作业中使用普通的波特兰水泥。当时，这种水泥没有固定的矿物成分，它的颗粒较大——比表面还不到1200~1300厘米²/克。粗粒的硅酸盐水泥在温度和压力都比较低的条件下（那时的油井一般都比较浅），凝固非常缓慢，因而停工候凝的时间很长，并使油井投产的时间相应推迟。

起初，在油气井内利用水泥来封隔地层时，注水泥质量经常不能达到预期的要求。因为当时对水泥质量和井下条件还不太了解。到1910年才提出了第一个改善油井固井注水泥质量的建议〔2〕。

本世纪二十年代中期，只有一种水泥可供使用。虽然它并不是很好的固井材料，但在各种材料中这是最便宜的一种。当时选择水泥的唯一要求是：不是陈货和没有结块。

从那时起曾进行了许多研究工作，以求深入了解在井内条件下水泥浆的工作性能。

配制和注入水泥浆的方法，以及井底条件都会影响水泥浆的性能。根据油井注水泥工作的特点，必须用泵把纯水泥浆注入井内。因此水泥浆内水的含量不能小于40%，有时还会被井内的泥浆继续冲稀。在最初半小时或更长的时间内，

水泥浆被泵搅混，并在套管内处于紊流状态。在水泥浆凝固以前，它的完整性可能被侵入的天然气所破坏。地下的矿化水又会影响水泥浆的凝固。水泥浆内一部分水又可能渗入到地层中去。以上列举的任何一个因素都会显著改变水泥浆的性能，影响油井的注水泥质量。

对于油井水泥常提出以下几点基本要求：

1. 水泥能配成流动性好的水泥浆，这种性能应在注入和把水泥浆送到管外空间去的整个过程中始终保持；

2. 水泥浆应在井下的温度和压力条件下保持其稳定性；

3. 水泥浆注入井内后，应即开始凝固，凝固后仍应保持原始体积不变；

4. 凝固的水泥石应该很快硬化，形成致密的固体，并在短期内达到足够的强度；

5. 对于地层深处的碱水和硫酸盐水溶液，水泥石应具有一定的抗蚀性；

6. 凝固的水泥石不能有渗透性，以防不同地层内的液体相互窜通和套管受腐蚀性地下水的侵蚀；

7. 水泥石在硬化初期应有一定的塑性，以免射孔时产生裂缝。

没有一种水泥能够满足在油井内所可能遇到的各种不同条件所提出的全部要求。钻井工作者的任务，是在各种型号的水泥内，选择一种能够较好地满足某些具体条件的水泥。

§ 2. 油井水泥漿的物理-機械性質

一、稠化時間

稠化時間是水泥漿的最重要的參數之一〔3〕。它決定於水泥的化學成分、水泥粉細度、水泥漿內水和其他物質的含量，以及井內的溫度和壓力。顯然，不能用改變井下條件的辦法來調節這一參數，而只能選用合乎油井要求的水泥漿成分。

在一定的實驗條件下，水泥漿保持流動特性的時間稱為稠化時間。在現場，為了把水泥漿注到管外的預定位置，應該有足夠的稠化時間。

在水泥漿變稠以後仍繼續加以攪拌，則水泥石的強度將降低而滲透性增加，這也就會損害套管、水泥石和岩石之間的聯結。稠化時間說明攪拌和注水泥工作的持續時間可為多久，也就是在這時間內水泥漿還保持着可泵性。

測定稠化時間時，把水泥漿放在可以轉動的圓筒內，筒中間放有不動的葉片，轉動圓筒時水泥漿傳給葉片的扭矩，即為水泥漿的稠度。目前可利用三種標準儀器中的任何一個來測定水泥漿的稠度（參閱“水泥漿稠化時間的測定”部分）。一般都把水泥漿的粘度升高到 100 泊的時間算作水泥漿的可泵性時間範圍。

水泥漿的稠化時間應較注水泥工作時間長 1 小時。以計算的注水泥工作時間，與在實驗室內測定的各種水泥的稠化時間進行比較，便可選用一種成分最為合適的水泥或其混

合物。

二、粘 度

粘度是水泥浆的基本性质之一，它决定水泥浆沿管子流动的可能性。这个参数有时也称为初粘度或流动度。

刚配制成的水泥浆，其粘度决定于水泥的物理性质和水的性质。由于水泥颗粒的水化作用，水泥浆的粘度将随着时间的延长而上升，并逐渐变稠。粘度可增长到不可流动的程度以致不能泵送。油井注水泥时，如果水泥浆的粘度过高，则因流动阻力很大而会将疏松地层压裂；渗入可渗性岩层中的少量失水，也将导致水泥浆的过早凝固。

改变水泥浆内的含水量，可以调节水泥浆的粘度和稳定性。

三、凝 固 时 間

水泥浆的凝固时间决定于水泥成分、配合水量、加入的添加剂数量，以及井下条件。初凝和终凝时间通常用维卡仪进行测量。以油井注水泥工艺的观点看来，理想的水泥浆是在注入到管外的预定位置以前保持液体状态，然后便很快地凝固硬化。这样就减少水泥浆被污染的可能性，并使油井可在最短时间后投入生产。

四、水泥浆比重

比重的大小应根据油井的具体条件进行相当精确的调节。在很多情况中，如果水泥浆的比重与泥浆的比重大致相等，注水泥工作就可非常顺利，并能获得满意的结果〔4〕。水泥浆比重能在 $1.5 \sim 2.2$ 克/厘米³的范围内变化便可完全满

足大多数注水泥工作的要求。需要降低水泥浆比重时可以加入低比重的充填料。

五、失 水 量

应用泥浆失水量的测量仪器，测定普通波特兰水泥浆失水量的实验结果证明，水泥浆具有很大的渗滤速度（在30分钟内达400~600厘米³）。这对注水泥质量是相当有害的。

在井内的液柱压力和各种地层压力之间的压差作用下，水泥浆内的混合水便将渗入某些渗透性岩层，因而在不同井段的水泥浆柱，其实际的水灰比就各不相同。这样将使各段水泥的凝固时间和水泥石强度可能不同，并且有可能出现“水带”（特别在水泥浆柱上部）。

在某些情况下（井内有高渗透性岩层，压差较大），水泥浆可能脱水，而在井壁上形成很厚的水泥饼，把套管卡住。因此，在这种条件下建议采用特殊的低失水的水泥浆。

为了提高注水泥质量防止这种偶然事故，特别在使用泥饼刷清除泥饼时，最好转动或上下活动套管。采用低失水的水泥浆，显著地减少了由于水泥浆脱水而卡住套管的危险；并可防止水泥浆突然凝固（假凝固）的危险。低失水的水泥浆一般保持体积不变，因而能很好地充满整个环形空间〔5〕。

低失水的水泥浆，按美国石油学会测定泥浆失水的标准测定时，其失水量在30分钟时不能大于100厘米³。应要求降低水泥浆失水量的添加剂并无过大的缓凝作用。使用不同水泥进行实验后发现：泵注普通的水泥浆时，泵压在1.5小时内渐渐的上升，然后便急剧增长；泵注低失水的水泥浆时，泵压在3小时内并无显著变化。采用低失水的水泥浆注水泥，在

旋轉和活动套管时沒有发生过遇阻現象。在某些地区采用普通水泥固井时，很难消除各地层內的液体相互窜通的現象，而在部分油井內采用低失水的水泥浆后却获得了显著成效〔6〕。

六、水泥石的强度

注入井內的水泥浆应当在一定的時間內（24~48小时）硬化。一般认为，水泥石的合适的强度是抗拉为3.5~7公斤/厘米²，或抗压为14~35公斤/厘米²。井下的溫度和压力是重要的影响因素。溫度上升到93.5°C和压力增加到140大气压以前，强度的增长率随着增加。这些因素的影响很难估計，因此在注水泥前，必須根据井內溫度和压力进行实验。

近几年，对水泥石强度的要求有了很大的改变。过去认为必須有很高的强度，但是长期的实践和研究工作証明，根据很多理由最好是較低强度。自从费利斯发表了关于确定支持套管柱所需的水泥石最低强度的文章以后〔7〕，便降低了对水泥石强度指标的要求。

在石油工业中希望使用低比重的水泥浆，并形成低强度和低脆性的水泥石。而在几年以前还要求使用比重高、稠度大的水泥浆；稠度和比重的限度是只要保証能用泵注入井內即可。現在，則认为只要水泥浆硬化以后的强度，能保証24小时后繼續开工就已合乎要求。所謂“足够的强度”这个术语，并不是固定不变的。过去，大多数公司采用的抗拉强度指标是21公斤/厘米²，現在則认为抗拉强度为7、3.5、1.4，甚至0.7公斤/厘米²就足够了。根据新的强度标准，就有可能使用經过处理变质的水泥浆来满足某些油井的具体要求。使用低强度的变质水泥浆，能够减少射孔时在水泥石內产生

的裂縫，取得合适的水泥漿比重和凝固時間，并可降低成本。

七、水泥石的滲透性

在油井內注入水泥主要是为了隔离水层，因此水泥石应当是致密而不透水的。水泥石的滲透率随水泥粉細度的提高而下降，随着水灰比的增加而升高。水泥漿的含水量較大和凝固時間較長时，水泥顆粒可能下沉而使上部水泥石的滲透率大于下部較致密的部分。随着水泥石內水化作用的繼續进行，其滲透率相应下降。井底高溫能使水泥石的滲透率很快下降。

大多数水泥試样的滲透率在 1 千分达西以內，但是当水灰比很大时，可以达到 20 千分达西〔2〕。

八、水泥石射孔

对水泥石射孔的难易程度，以及射孔时所产生裂縫的特征和数量，是評價油井用水泥漿的重要性质。实验結果指出，使用变质的水泥漿形成的水泥石，比用普通水泥漿制成的水泥石容易射孔〔8〕，射孔后裂縫也很少，或者不发生裂縫；而在普通水泥漿凝結成的水泥石內，射孔后将出現很大的裂縫。在較淺的井內射孔时得到了类似的結果。可以认为，射孔时水泥石的特性，直接决定于水泥石的强度。經過处理而变质的水泥石强度随時間的变化很小。如果在固井后經過几个月需要进行二次射孔时（同一井段或其他井段），这个性质是非常重要的。

§ 3. 美国石油工业用水泥

按照美国石油学会的标准，把油井用的水泥分成六級，分屬普通水泥和緩凝水泥兩組。

第一組水泥分成 *A*、*B*、*C* 三級，适用于井深不超过 1800 米的油井。它分別相当于美国材料試驗协会 (ASTM) C-150 标准的 I、II、III 三种类型的标准波特兰水泥。*A* 級水泥 (I 型) 适用于对水泥质量沒有特殊要求的油井；*B* 級水泥 (II 型) 是抗硫酸盐水泥；*C* 級水泥 (III 型) 具有較高的早期强度。

現代波特兰水泥的化学-矿物成分見表 1。

表 1

成 分		水 泥 型 号		
		I	II	III
化 学 成 分 (%)	石灰(CaO)	64.00	63.00	65.00
	二氧化硅(SiO ₂)	21.00	22.00	20.00
	氧化鋁(Al ₂ O ₃)	6.50	5.00	5.50
	氧化鉄(Fe ₂ O ₃)	2.50	4.00	3.00
	氧化鎂(MgO)	2.50	3.00	2.30
	硫酐(SO ₃)	2.10	1.50	2.50
	烧失量	1.30	1.10	1.50
	不溶物质	0.02	0.02	0.02
矿 物 成 分 (%)	硅酸三鈣(C ₃ S)	48.00	43.00	57.00
	硅酸二鈣(C ₂ S)	27.00	30.00	20.00
	鋁酸三鈣(C ₃ A)	12.00	7.50	11.00
	鉄鋁酸四鈣(C ₄ AF)	8.00	12.00	7.00

注：水泥矿物成分和熟料的名称及代号取自 В.Н.Юнга [идр.] “Технология вяжущих веществ” М., 1952.

第二組緩凝水泥分成 *D*、*B*、*F* 三級，分別适用于 3600 米、4300 米和 4900 米的深井。在這些深井的井底溫度和壓力的條件下，若用普通的波特蘭水泥漿，則在注到管外空間之前就會開始凝固。*D* 級水泥在高压和中等溫度下使用；*B* 級水泥在高压高压下使用；*F* 級水泥則在特別高的溫度和壓力條件下使用。

不同型號的水泥主要根據水泥的化學成分和細度來區分。這些因素的不同就使水泥具有不同的性質（如水泥漿的稠化時間、水泥石強度和抗化學腐蝕能力）。在生產水泥過程中，由於化學成分不同而有快凝、緩凝和早期強度較高等不同性質的水泥。除了波特蘭水泥以外，有時還使用特種水泥：石膏水泥、矾土水泥、氧化鐵含量高的水泥等。

1. 标准波特蘭水泥 這種水泥內鋁酸三鈣($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)的含量較高，因而與硫酸鹽的水溶液接觸時容易被腐蝕。這種水泥的比表面通常在 $1500 \sim 1900$ 厘米²/克範圍內變動。各種波特蘭水泥的稠化時間在 $1.3 \sim 2.5$ 小時之間變化。三晝夜後的抗拉強度可達 35 公斤/厘米²，而且可用適當的添加劑來提高水泥塊的硬化速度。

2. 油井水泥 這種水泥的顆粒通常都比較粗（它的比表面在 $1100 \sim 1900$ 厘米²/克之間變化）。其中鋁酸三鈣的含量較少，而鐵鋁酸四鈣的含量則比較多。它的稠化時間在 $1.7 \sim 2.3$ 小時之間。這種水泥的強度增長比較緩慢，但在必要時可用催凝劑處理。除了在高溫的深井內，這種油井水泥适用于各種油井的注水泥工作。

3. 早期強度高的水泥 它的特点是鋁酸三鈣的含量較高，細度也比其它水泥大（比表面為 $2000 \sim 2400$ 厘米²/克）。這種水泥的稠化時間為 1 小時，三晝夜後水泥石的抗拉強度

达35~50公斤/厘米²。它适用于浅的油井（以及表层套管注水泥等）。

水泥浆在井内被水剧烈冲得很稀时，便会延长其凝固时间。在这种情况下，使用早期强度高的快硬水泥则比较有利。这种水泥浆被泥浆污染时会提高其强度，因而能补偿由于水泥浆被冲淡而引起的强度下降。

快硬水泥或是加有催凝剂的普通波特兰水泥，只适用于注水泥条件许可的油井。

4. 缓凝水泥 它是专为深井使用的水泥，在这种井内井底的温度和压力很高；或者是在要求很快配制大量的水泥浆之处使用。这种水泥用普通的方法制造，但在生料（粘土或頁岩）中加入了铁矿石，因此它具有较高的含铁量和很低的含铝量。水泥粉的颗粒较粗。由此配成的水泥浆，比重较高，凝固和硬化时间较长。硬化后的水泥石不易受腐蚀性水的侵蚀。

5. 矾土水泥 矾土水泥是将石灰石和铁矾土的混合物煅烧熔化，然后把冷却后的熟料磨成细粉后制成。这种水泥浆的凝固时间接近于普通的波特兰水泥，但是凝固后的强度增长速度很快。它在24小时后的强度，可以达到普通波特兰水泥48小时后才能达到的强度。

6. 纤维质水泥 为了堵塞井壁岩层中的裂隙，以及在高的静液柱压力下防止水泥浆漏失，可以使用纤维质水泥。能够直接加在水泥粉或水泥浆内的纤维质材料有：棉籽皮、碎纸、云母粉、石棉纤维、甘蔗纤维，以及由絮网状纤维素中专门制造出来有机充填料。

7. 砂子-水泥混合物 它已成功地用于石油井内。例如在侧钻新井眼时可用它打水泥塞。这种水泥浆中可有1/5的固

相是砂子（砂子顆粒的大小一般为 $0.6 \sim 0.85$ 毫米）。硬化后的砂子-水泥混合物比純波特兰水泥石更难破碎，因而使钻具更容易从原来的井眼方向斜钻出去。配制这种混合物时通常使用标准波特兰水泥。

8. 石膏-水泥混合物 它是在水泥中加入半水石膏后配成的混合物〔3〕。半水石膏会从水泥浆內吸收部分清水，因而这种水泥的凝固速度快，早期强度較高。凝固1小时后石膏-水泥石的抗压强度等于 170 公斤/厘米²。这种水化产物具有膨胀性。由石膏-水泥配成的水泥浆能在原油或盐水中凝固，而且在搅拌过程中也会凝固。

封隔高压水层时可用石膏-水泥和水溶性树脂的混合物。这种混合物也有膨胀性和較高的早期强度，形成的水泥石不会被水侵蚀。

9. 树脂水泥浆 这种水泥浆由合成树脂、波特兰水泥和水混合而成。它在外表上与純水泥浆相似，比重大約为 1.7 克/厘米³。配制这种水泥浆时先把树脂溶于水中，然后按普通方法配制水泥浆。在液柱压力的作用下，井壁上会复盖一层由少量树脂胶結着水泥顆粒所形成的滤餅。这层滤餅可以限制水泥浆渗入岩层深处。

油井中套管第一次注水泥作业，加固尾管和挤水泥工作，一般都可使用树脂水泥。

10. 在酸中溶解的水泥 普通硅酸盐水泥只能在酸中部分溶解。被酸溶解的水泥将立即在水泥石表面形成一层不透水的硅胶膜，它能阻止酸对水泥石的繼續作用。加入 $40 \sim 45\%$ 的石灰粉，并水泥仔細混合后，由此形成的水泥石会在 15% 的盐酸溶液中很快溶解，接触10分钟后便将只剩下一些淤泥状的沉淀〔2〕。

这种水泥已经广泛使用在封住其他夹层而保持生产层的流通孔道的挤水泥工作中。在打临时性的水泥塞时也可使用这种水泥，以便在完成任务后可以很快地清除水泥塞。

§ 4. 深井注水泥的特殊条件

近年来美国的深井数量不断增加，因而对井底温度很高的深井注水泥问题的研究很感兴趣。

美国石油学会油井水泥小组，在各个矿场的不同井段进行了多年的现场实验以后，综合整理了大量的实际资料。并由此得出结论：在海湾地区各油井的井下条件最为恶劣，它比其它地区同样深度的油井具有更高的温度和压力。油井水泥的研究小组根据实际资料，确定了试验各种水泥时应该采用

表 2

井深 (米)	井底温度(°C)		泥浆在循环时加热到 井底温度的时间 (时-分)	泥浆出口 温度 (°C)	井底压力 (大气压)
	静止温度	循环温度			
305	35	27	0—23	—	71
610	43	33	0—27	—	108
1220	60	39	0—37	38	180
1830	77	45	0—46	42	270
2440	93	52	0—55	47	360
3050	110	62	1—05	54	525
3660	127	78	1—14	63	720
4265	143	97	1—24	75	940
4875	160	120	1—31	93	1130
5485	177	149	1—40	116	1320