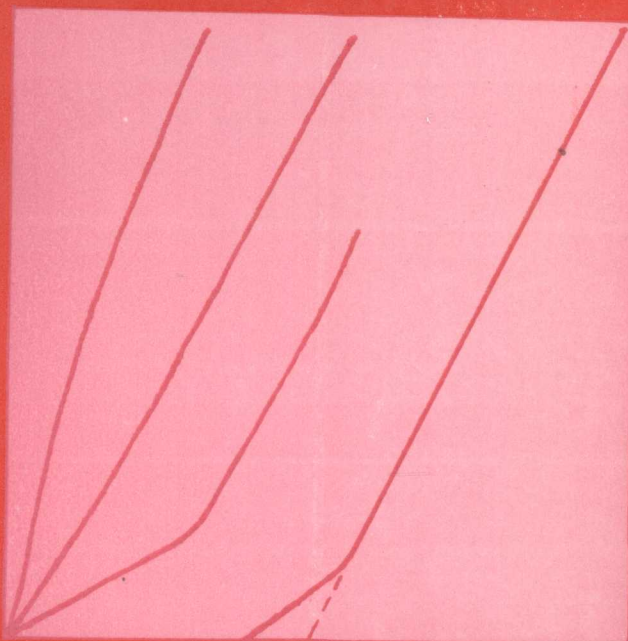


深

井

深井泥浆

徐同台 陈乐亮 罗平亚 编著



石油工业出版社

泥

浆

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书全面阐述了我国对深井泥浆的机理研究和室内系统试验,重点介绍了根据这些研究和试验所得到现场应用结果。对国外的一些先进技术,特别是近期新发展也做了叙述。其主要内容有高温水基泥浆、抗高温油基泥浆和深井复杂情况下的泥浆工艺。

图书在版编目(CIP)数据

深井泥浆 / 徐同台等编著
—北京: 石油工业出版社, 1994.12
ISBN 7-5021-1087-9

I. 深…

II. 徐…

III. ①深井—泥浆 ②泥浆—深井

IV. TE254

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 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 18 印张 450 千字 印 1-2500

1994 年 12 月北京第 1 版 1994 年 12 月北京第 1 次印刷

定价: 19.00 元

前 言

当今世界的科学技术日新月异，对生产的发展起着极其重要的作用，促进了生产的迅速发展。“科学技术是第一生产力”的观点，已为愈来愈多的实践所证实，愈来愈为人们所接受和重视。因而，学习科学，掌握技术，已成为人们的迫切愿望。综合国内外本专业的研究成果和有价值的经验，编著本专业系列丛书是时代进步和科技发展的需要，亦是专业同行的共识。经业务主管、各石油学院、油田及出版部门的协商研究，初步决定邀请某些专家学者共同来完成编著系列丛书的计划，而“深井泥浆”则是其中之一。

全书共分绪言、高温水基泥浆、高温油基泥浆及深井复杂情况的泥浆等四章。其内容包括我国在这个方面的机理研究、室内系统试验和现场实际应用经验，国外的一些先进技术，特别是近期新发展。它是各个不同岗位上本专业和有关专业人员学习的一本极有价值的参考书。

由于本书编著人员水平有限，原始资料收集得不够全面和完整，综合分析不尽合理，一定有不妥之处，甚至错误，敬请广大读者提出宝贵的意见。

本书编著中参考了大量在各种专业和业务会议上发表或提供过的有关资料、各种科研报告及实际应用总结，在此，向有关作者和实验人员表示感谢。

目 录

第一章 绪言	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 深井泥浆特点	(3)
第二章 高温水基泥浆	(9)
第一节 高温水基泥浆作用原理	(9)
第二节 我国常用高温泥浆处理剂简介	(19)
第三节 国外常用抗温处理剂简介	(33)
第四节 深井水基泥浆的现场应用	(40)
第三章 抗高温油基泥浆	(78)
第一节 概述	(78)
第二节 乳状液的稳定性	(80)
第三节 高温高压对油基泥浆流变性的影响	(87)
第四节 高温高压对油基泥浆密度的影响	(93)
第五节 油包水泥浆的基本组分	(98)
第六节 油包水型泥浆的配方及性能	(110)
第七节 油包水泥浆现场应用	(118)
第八节 纯油泥浆的组成、现场应用及实例介绍	(131)
第九节 国外油基泥浆的新进展	(139)
第四章 深井复杂情况下的泥浆工艺	(146)
第一节 深井井塌问题	(146)
第二节 钻进盐膏层的泥浆工艺技术	(220)
第三节 深井压差卡钻的泥浆工艺	(254)

第一章 绪 言

第一节 概 述

随着世界能源需求的增加和钻探技术的发展,深井和超深井的钻探已成为今后钻探工业发展的一个重要方面。由于井愈深,技术上的困难愈多,因此,世界各国都把钻井深度和速度作为钻井工艺技术水平的重要标志。目前国内外超深井技术发展很快,世界深井纪录已超过 101000m (前苏), 5000~6000m 的井也较为普遍。我国在钻完一批 5000~6000m 的深井后顺利钻成两口超过 7000m 的超深井,达到了世界先进水平。国内外超深井实践证明,超深井泥浆质量对超深井的成败、钻速和成本有着极其重要的意义。因此,超深井泥浆工艺技术水平已被公认为泥浆工艺水平高低的重要标志。也是世界各先进国家当前泥浆研究的主要课题。

泥浆工艺从来就是钻井工艺的重要组成部分,对钻井成败、质量好坏、速度高低起着保证作用。由于深井的特点使其钻井工程对深井泥浆工艺技术的重要作用,更加得到重视,具有更为特殊的意义。这些特点体现在下列几个方面:

①井愈深,井下温度压力愈高,钻井中泥浆在井下停留和循环的时间愈长。泥浆在低温条件下不易发生的变化、不明显的作用和不剧烈的反应都会因深井高温的作用而变得易发和敏感,从而使得深井泥浆的性能变化和稳定性成为一个突出的问题,而且井愈深,井下温度愈高,问题就愈突出。

②深井钻井裸眼长,地层压力系统复杂,泥浆密度的合理确定和控制则更为困难,且使用重泥浆时,压差大因而经常出现井漏、井喷、井塌,压差卡钻以及由此而带来的井下复杂问题,从而成为深井泥浆工艺技术的难点之一。

③深井钻遇地层多而杂,地层中的油、气、水、盐、粘土等的污染可能性增大,且会因高温作用对泥浆体系的影响而加剧,从而增加了泥浆体系抗污的技术难度。

④泥浆对深部油层的损害,因高温而加剧,从而对打开油层钻井完井液的技术要求更加严格。

⑤浅井已取得成效的各种先进钻井工艺技术(如喷射钻井、优化钻井等)及先进工具,在深井井段应用受到很大的限制。因此,在深井井段(特别是在重泥浆的情况下)如何应用各种先进的钻井技术以提高深井钻井速度和保证井下安全,提高钻井效益,至今仍是国内外钻井、泥浆技术界的一个攻关内容。

⑥井深起下钻作业时间长,各种与泥浆性能有关的井下事故更容易诱发和恶化。因此,必须对泥浆性能有更高的要求。

⑦泥浆对钻具的腐蚀因高温而加剧。

综上所述,深井和超深井对泥浆工艺技术的要求和影响不仅仅是量的问题而且是质的提高。从而产生不同于浅井的新的泥浆体系和泥浆工艺技术。

超深井使用的泥浆分为水基和油基两种。统计数据说明,超过 8000m 的超深井多数采用油基泥浆,而 8000m 以内者则为水基泥浆。而世界最深的几口 9000m 以上的超深井都是

使用水基泥浆钻成的。这两类泥浆自成体系，各有各的优缺点及使用规律。我国的深井虽曾成功地使用过油基泥浆，但目前仍以水基泥浆为主。

与水基泥浆相比，油基泥浆性能受高温影响较小而受压力的影响较大，高温性能较易控制且抑制页岩水化能力很强。因此，是解决深井泥页岩、盐、膏泥岩层井段井壁不稳定问题的最有效的办法。其次，地层中的盐、钙和粘土等对泥浆性能的污染小，泥浆的润滑性及滤失性好，能有效的降低深井钻具扭矩，防止腐蚀，保护钻具以及有效地预防深井重泥浆压差卡钻。因此，在国外的深井中被广泛使用，特别是在超深井复杂井中应用更多。但与水基泥浆相比，有以下缺点：其初始成本高，条件苛刻；对环境污染严重，消除费用高；更易发生地层漏失；气溶性好易造成井涌但钻速较慢等，因而其使用受到了限制。特别是 80 年代以来，由于油价下跌，深井钻井的发展受到影响。故深井钻井泥浆体系出现由油基泥浆向水基泥浆发展的趋向。希望能从技术上解决水基泥浆的高温稳定性以及增强对深部页岩、盐层、盐膏层等复杂情况的解决能力，而获得成本较低，效果好，对环境污染少，钻速快的水基泥浆应用技术。因此，80 年代中，后期国外深井水基泥浆处理剂及泥浆体系有明显的发展。相继出现了一批抗高温、钙、盐，性能良好的水基泥浆处理剂如 S.S.M.A. (美)，改进性的 Resinex (美)，H₂₈₂₅ (西德)，Thermchack (美)，Thermthin (美)，Metac (前苏) 等和一批抗高温的水基泥浆体系。

根据国情，我国的深井一直以水基泥浆为主。自 1975 年泥浆磺化处理剂及其体系获得成功以后，在全国被广泛使用并成为我国深井通用的泥浆体系。80 年代以来，它与聚合物泥浆相结合发展成为现在国内广为使用的聚—磺泥浆体系，基本上形成了能满足我国深井钻井要求的水基泥浆的高温处理剂和体系系列，为我国深部油气资源的勘探提供了必要的技术条件。

近 20~30 年来，国内外深井泥浆技术得到了很大的发展，研制和开发出种类繁多的处理剂，建立起适用于各种地层和钻井工程要求的泥浆体系及应用工艺。就其技术思路而言，可以概括为以下两种：

其一，以解决高温破坏性能问题为主攻方向而研制处理剂和建立泥浆体系。按这种思路，首先是研制、评选耐高温破坏的处理剂，而后研究由其优化组配而成的耐高温泥浆体系，把高温对泥浆体系的不利影响和损害减到最小。确保在应用中具有符合要求的性能。实践证明，按这种技术路线发展的泥浆工艺技术是行之有效的，解决了国内外大量深井泥浆的技术难题。但它在使用中不可避免地会表现出以下现象：随着深度的增大，温度升高，使用时间加长，泥浆性能将逐渐变坏。而且深度越大，性能变坏愈剧烈，速度变换也愈快，因而导致了处理频繁，用量增多，技术难度增大，成本增高，要求的技术水平就更高。

其二是在保证处理剂抗温能力的基础上研究高温对泥浆体系的作用机理，找出有利于性能改善的影响因素，并在体系的建立和应用中充分利用和发挥有利因素而抑制不利因素，从而有可能形成利用高温改善泥浆性能的泥浆体系及应用工艺。此种体系必然会表现出，井愈深，温度愈高，使用时间愈长则性能变得愈好，愈稳定，因而，处理次数和用量减少，成本降低。我国的磺化泥浆及聚磺泥浆体系若使用适当都可能达到这个水平。这已为国内深井实践所证明。

事实证明，无论用哪一种技术路线都能获得行之有效的深井泥浆技术，但都需要认真研究高温泥浆的作用机理，才能使其进一步地发展。因此，进一步深入研究高温泥浆的作用机理及其应用仍然是今后国内外深井泥浆技术发展的重要内容。

第二节 深井泥浆特点

超深井泥浆的最大特点是使用于高温高压的条件下,按一般情况,5000m 深井的井底温度可达 150~250℃。井愈深,地层愈老,愈可能出现温度梯度异常,井底温度更高。而一般 5000m 以上深井的井底压力可能达到 100MPa 以上。如此高温高压必然会对泥浆体系发生严重的影响。对于水基泥浆,压力影响较小而高温的影响是最主要的。而油基泥浆,压力的影响不能忽视。由于油基和水基泥浆有较大的区别,故分别叙述如下。

一、高温水基泥浆的主要特点

1. 高温恶化泥浆性能

随着温度增加,泥浆的各种性能随之发生变化。一般而言,升温使泥浆的造壁性能变坏,即泥饼变厚,渗透性变大,滤失量增高。而这种变化趋势与 API 滤失量的大小无直接的必然联系,即 API 滤失量小的泥浆在高温高压条件下的滤失量不一定就小。这说明,具有不同的作用机理。

高温对泥浆的流变性的影响比较复杂,其影响情况可从粘度(包括有效粘度 $\eta_{\text{有效}}$ 、塑性粘度 $\eta_{\text{塑}}$ 及动切力 τ_0 等)与温度的关系曲线详加研究。常见的此种粘度——温度曲线有以下几种典型形式(见图 1-1)。

其中曲线①表示了抗温能力较强的粘土含量较低的分散泥浆。这类泥浆流变性的构成中,非结构粘度(如 $\eta_{\text{塑}}$)所占的比重大于结构粘度,如由高分子处理剂提高体系塑性粘度的体系。而聚结性强,粘土含量高的泥浆,一般有可能表现为曲线③,此种泥浆的结构很强(包括“卡片房子结构”和聚合物—粘土粒子的空间网架结构),大大超过塑性粘度对于粘度的贡献。

而各类水基泥浆在较宽的温度范围内(常温—高温)普遍表现出曲线②的变化规律,只是不同泥浆体系表现不同的 $\eta_{\text{塑}}$ 和温度(t_B)极小数值而已。若 t_B 大于泥浆的使用温度则成为

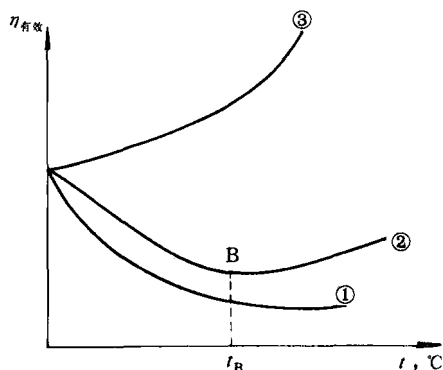


图 1-1 水基泥浆常见的几种粘温曲线

曲线①类型,若 t_B 低于室温,则体系的粘—温曲线表现为曲线③。可以说曲线③是各类水基泥浆的普遍规律,而曲线①、②是其两种特例。研究表明,这种因温度而变化的性质有可能是可逆的。因此,它能较好地反映泥浆使用中从井口→井底→井口的循环过程中泥浆性能的实际变化情况。它是泥浆体系能否满足深井井段工程和地质要求的关键问题。显然这种高温变化的特性可造成井底高温与井口低温下泥浆性能的极大的差异,故绝不能用常规仪器测出的泥浆井口性能来衡量井下泥浆在高温下的实际性能。它只能用模拟井下实际高温高压条件的仪器来测定,并以此作为设计和维护深井泥浆性能参数及判断井下情况决定工程措施的依据。

2. 高温降低泥浆的热稳定性

高温使泥浆中各组分本身及各组分之间在低温下本来不易发生的变化、不剧烈反应、不

显著的影响都变得激化了,同时也使长段裸眼钻进不可避免的地层污染(盐、钙、钻屑、酸性气体等)加剧。所有这些作用的结果必然严重地改变、损害以致完全破坏泥浆原有性能,而这种影响是不可逆的永久性变化。它表明了泥浆体系受高温作用后的稳定能力(或泥浆抵抗高温破坏的能力),特称为泥浆体系的热稳定性。一般用泥浆经高温作用前后性能(同一条件测定)的变化来实际反映泥浆在使用过程中的井口性能的变化(有时甚至就是进、出口性能的变化)。

泥浆的热稳定性涉及泥浆所有性能,它主要表现为以下几个方面。

1) 高温对泥浆流变性热稳定性的影响

(1) 高温(后)增稠(指不增减泥浆组成时、纯粹为高温所引起的变化)

泥浆经高温作用后视粘度、塑性粘度、动切力及静切力上升的现象,属不可逆的变化。若泥浆经高温作用后丧失流动性则称为泥浆高温(后)胶凝。显然可以把它看作是一种严重的高温增稠现象。高温增稠是深井泥浆最常见的现象,在使用中表现为泥浆井口粘、切力不断上升,特别在起下钻后升幅更大。因此,造成泥浆性能不稳定,处理频繁。常常给深井泥浆(特别是重泥浆)的使用带来麻烦,而且对于高温增稠严重的泥浆,使用稀释剂一般不能有效,甚至反而更加严重,这是一个突出的特点。

凡泥浆中粘土含量高,分散性强的泥浆则常表现出这种现象。

(2) 高温(后)减稠

泥浆经高温作用后,动、静切力下降的现象称为高温(后)减稠。主要表现为动静切力下降。在劣土、低土量、高矿化度盐水泥浆中经常观察到这类现象。它不是由于泥浆组分变化而纯系高温引起的变化。在实际使用中它表现为泥浆井口粘、切逐渐缓慢下降。而这种下降用常规的增稠剂也难以提高。由于严重的高温减稠可导致加重泥浆重晶石沉淀,因此,在使用中也应充分注意。一般可采用表面活性剂或适当增加泥浆中粘土含量的办法加以解决。

(3) 高温(后)固化

泥浆经高温作用(后)成型且具有一定强度的现象称为高温固化。凡发生高温固化的泥浆不仅完全丧失流动性而且失水猛增。此种情况多数发生在粘土含量多、 Ca^{2+} 浓度大, pH 高的泥浆中。

实践证明,该泥浆经高温作用后,常表现出四种不同的现象,即高温增稠、胶凝、固化及减稠。这些现象不仅发生在不同的泥浆体系中,而且同一泥浆体系在不同条件下,都有可能出现。这充分说明了高温对泥浆影响的复杂性。

2) 高温对泥浆体系造壁性、热稳定性的影响

泥浆经高温作用后,失水增加,泥饼增厚是常见的现象。其增加程度视泥浆体系不同而异。但有的泥浆体系,如 SMC—SMP 盐水泥浆体系却表现出相反的结果即高温作用后泥浆滤失量降低,泥饼质量变好。前者表现为井口温度下的滤失或 HTHP 滤失增加,井愈深,温度愈高,增加愈多。后者则泥浆愈用性能愈好,且表现出井愈深,温度愈高,使用时间愈长,效果愈好的趋势(即呈现出高温改善泥浆性能的趋向)见表 1-1。

3. 高温降低泥浆的 pH 值

实践证明,泥浆经高温作用后 pH 值下降,其下降程度视泥浆体系不同而异。泥浆矿化度愈高,其下降程度愈大,经高温作用后的饱和盐水泥浆 pH 值一般下降到 7~8。这种 pH 下降必然会恶化泥浆性能,影响泥浆的热稳定性,使用中泥浆体系这种经高温后 pH 值下降的趋势,一般不能用加烧碱的办法来解决,加碱愈多, pH 值下降愈厉害,泥浆性能愈不稳

定。一般采用表面活性剂则可抑制体系 pH 值的下降或采用较低 pH 的泥浆体系。

表 1-1 高温对泥浆造壁性的影响

泥 浆 类 型		某井 FCIS—CMC 盐水重泥浆	某井 SMC—SMP 盐水重泥浆
泥 浆 性 能			
API 滤失量, mL	高温老化前	4.0	6.0
	180℃ 老化 24h	25.0	4.0
泥 饼, mm	高温老化前	1.0	1.0
	180℃ 老化 24h	3.0	0.5
HTHP 滤失量, mL	高温老化前	15.0	16.0
	180℃ 老化 24h	>100.0	10.0

4.高温增加了处理剂耗量

经验表明，高温泥浆比浅井常规泥浆消耗多得多的处理剂，表 1-2 是美国的统计数据。

表 1-2 不同温度时处理剂的耗量变化

温度变化范围, ℃	处理剂耗量增加值, %
由 93 增至 121	50
由 121 增至 148.9	100
由 148.9 增至 176.7	100

虽然此资料记载的数据不一定适用于各类泥浆，但是随着井深增加温度升高，泥浆处理剂耗量明显增加的总趋势是相同的。其原因有二：其一是为维持高温高压下所需的泥浆性能要比低温消耗更多的处理剂；其二是为弥补高温的破坏作用所带来的损失而作的必要的补充。因此，温度愈高，使用时间愈长，处理剂耗量必然愈大，且增加了深井泥浆的技术难度。

上述种种现象都属于泥浆热稳定性的范畴。由于热稳定性常用泥浆经高温后的性能变化来表示，为与高温下的性能相区别又称它为高温后性能。

5.高压对于水基泥浆性能的影响

迄今为止，高压对水基泥浆性能的影响仍然研究不够，根据现有资料，其影响远不如温度突出。目前对此仍然不够重视。目前人们认为高压下仅能压缩泥浆体积并影响密度和流变性。但由于水基泥浆可压性很差，所以这种影响不很突出。但是当泥浆混油以后，压力的影响增大，而且随着混油量增加，这种影响加剧，不能忽视。其变化规律应该用高压仪加以研究。

综上所述，为了全面描述深井泥浆的行为和性状，必须采用三套泥浆性能指标，它们是：

①泥浆的井口性能，即称常规性能或低温性能。用 API 标准方法测定。在深井中主要用来判断泥浆体系的热稳定性。

②高温高压性能。用各类 HTHP 仪器测定（如 HTHP 流变仪，HTHP 失水仪等）。目前尚无通用标准。这一套性能是进行泥浆设计和应用中判断井下情况和处理的依据，它实际上是深井泥浆的应用性能。

③热稳定性，又称高温后的性能。用滚子炉高温老化前后性能变化来检测。主要用来判断和了解泥浆的抗温能力及使用时的变化趋势，指导深井泥浆的应用和处理。因此，合格的深井泥浆应该首先是从井口至井底之间的任何温度下（特别是高温下）都应具有满足钻井工艺要求的性能，亦即井口（低温）性能和井下（HTHP）性能都必须合格；其次，具有良好的热稳定性。这二条也是泥浆抗高温的含义。实践证明，仅满足第一条条件不十分困难，而困难的是使此合格的性能虽经过长期高温作用后仍能保持稳定。这是抗高温工作的核心。

国内外超深井泥浆实践证明，只要选用适当的抗温处理剂和粘土类型及含量，就可建立起耐温达 200℃ 至 250℃ 以至更高温度的水基泥浆体系（水基泥浆理论抗温极限为 374.2℃）而用于超深井中。

近 20 年来，在我国 5000~7000m 深井的研究和实践中，成功地使用和研制了一批抗高温泥浆和处理剂，初步建立起一套对付 7000m 左右深井（抗温 180℃~220℃）各地层条件的泥浆体系系列。为抗温水基泥浆的研究和使用积累了不少有用的经验，为全面攻克技术难关提供了必要的条件，其中有关如何利用高温改进和完善泥浆体系性能的理论 and 实践，则为深井高温水基泥浆的研究和应用开辟了新的途径。

二、高温高压对油基泥浆的影响

油基泥浆包括含水量小于 5% 者称油相泥浆，常用于估算储量的油层取心中及含水量大于 5% 者称为油包水泥浆（或反相乳化泥浆），常用来对付各种复杂情况如高温（深井）、盐岩、高摩阻（水平井、定向井）。

温度和压力对油包水泥浆都产生影响，现分别描述如下。

1. 温度对油包水泥浆性能的影响

1) 高温降低了油浆的电稳定性

同一油包水泥浆，在其他条件相同的情况下，温度愈高，则其电稳定性愈差。其原因在于：

①温度高使油包水的液相粘度下降，水滴运动加快，阻力变小，易合并，故电阻变小，稳定性变差；

②温度可降低乳化剂的效能，尤其当温度超过乳化剂的抗温限度时，就会丧失其乳化能力，造成破乳，故稳定性受到破坏。

2) 高温降低油浆的粘度（包括塑性结构粘度）

在同一油包水泥浆中，当其他条件相同时，温度愈高，则其粘度愈低，这可能造成加重剂沉淀的危险。表 1-3 是温度对油浆的影响情况：

由此可见，油浆粘度受温度的影响主要是由于柴油降粘所引起的。当然尚有其他因素如水的粘度及乳化剂等，但这部分所引起的降幅较小。在增温降粘的变化幅上，塑性粘度比屈服值要大些。

3) 高温增加油浆的滤失性

在其他条件相同的情况下，温度愈高，油包水泥浆的滤失性愈大，滤失量增加。这是由

于高温降低液相粘度和减弱乳化效果所致，尤其是不含固相或固相含量较少的油浆，前者因素更为明显。

表 1-3 在 6.8MPa 下, 1.44g / cm³ 的油包水泥浆受温度影响结果

温度, ℃	油浆塑性 粘度, mPa · s	油浆屈服值 Pa	油浆塑粘 / 柴油粘度 mPa · s	油浆屈服值 / 柴油粘度 Pa
65.56	24.1	3.68	6.8	1.05
148.86	5.7	1.20	4.2	0.86
降幅, %	76.3	67.5	38.2	18.2

2.压力对油包水泥浆性能的影响

压力主要对油包水泥浆的粘度产生较大的影响，这是与水基泥浆不同的独具特性。在其他条件相同的情况下，随着压力的上升，水基泥浆的粘度变化不大而油基泥浆则有较大的增粘作用。表 1-4 是压力对油基泥浆的影响情况。

由此可见，油浆受压力的影响甚大，当温度不变（在 65.56℃）而压力由 10.20MPa 升到 136.05MPa 时，若扣除柴油的影响，塑性粘度增幅达 22.2%，屈服值增幅却成了负值。这说明，压力对油浆的粘度影响主要来自柴油自身所受的影响。因而油包水泥浆的油水比愈高，则受压力的影响愈大。

表 1-5 是压力和温度对柴油粘度的影响情况。

表 1-4 在 65.56℃ 下, 不同压力对 1.44g / cm³ 的油基泥浆粘切的影响

压力, MPa	油 基 粘 切		单位柴油粘度的油浆粘切	
	塑性粘度 mPa · s	屈服值 Pa	塑性粘度 mPa · s	屈服值 Pa
10.20	12.8	2.06	5.9	0.96
68.03	24.1	3.68	6.8	0.86
136.05	47	5.03	7.2	0.77
总增幅(%)	267.18	144.17	22.2	-19.79

表 1-5 压力和温度对柴油粘度的影响

温度, ℃	压力, MPa		
	5.74	3.83	1.91
37.77	6.00	4.50	3.30
65.56	3.25	2.60	1.95
93.37	2.2	1.60	1.35
148.89	1.05	0.92	0.75

表 1-5 说明, 在 37.77°C 下, 压力由 1.91MPa 增到 5.74MPa 时柴油粘度增加 81.8% , 而在 148.89°C 下只增加 40% 。这也说明, 温度愈高时, 柴油粘度受压力的影响愈小。而在压力 1.91MPa 时, 温度由 37.77°C 上到 148.89°C 时, 柴油的粘度降低 78.19% , 若压力为 5.74MPa 时, 其降幅为 82.5% , 说明压力愈大, 温度对粘度的影响愈大。

在压力 68MPa 下, 若以单位温度计则对油浆粘度的影响为: 塑性粘度降值是 $0.22\text{mPa} \cdot \text{s} / ^{\circ}\text{C}$, 屈服值降值是 $0.029\text{MPa} / ^{\circ}\text{C}$ 。若在 65.56°C 下, 以单位压力计, 则对油浆粘度的影响为: 塑性粘度增值是 $1.005\text{mPa} \cdot \text{s} / \text{mPa}$, 而屈服值增值是 $0.087\text{Pa} / \text{MPa}$ 。因此, 单位压力对油浆粘度影响的增幅比单位温度要大得多 (塑性粘度大 4.5 倍, 屈服值大 3 倍)。

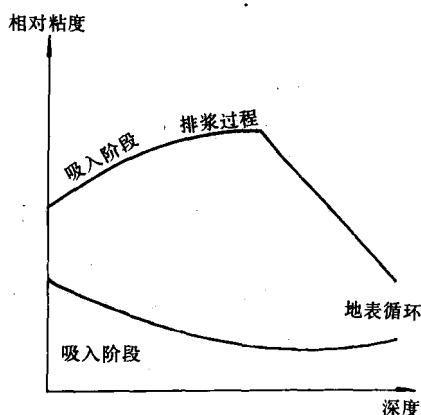


图 1-2 水基和油基泥浆循环过程粘度变化情况

在实际钻井过程中, 泥浆由井口进入, 逐渐循环到达井底, 温度和压力也随着增加, 然而再从井底上返到地面, 油浆所受的压力和温度也随着下降。在这种循环的全过程中, 泥浆受到双重的作用 (温度及压力), 其粘度切力发生变化, 关于变化情况, 油基与水基泥浆则完全不同, 前者粘度变大 (温度和压力两者相抵后), 而后者则变小 (因仅温度降粘作用), 如下面的示意图 1-2 所示。

这是因为压力对水基泥浆粘度的影响极小, 故仅体现出温度降粘度的结果, 而对油基泥浆, 压力增粘的作用却大大地超过温度的降粘作用, 故结果表明为增粘。因此, 在使用油基泥浆钻深井时只要在地面上油浆的粘切足够悬浮加重剂时, 可以肯定油基不会在井底因降粘而产生加重剂沉淀的问题。

第二章 高温水基泥浆

水基泥浆是目前国内深井泥浆所采用的主要类型，而且有进一步发展的趋势。由于在水基泥浆的应用中，技术问题比较多，因此，它必将是今后泥浆工艺技术研究的重要内容。而且其技术的深入发展都是以高温作用机理研究的突破作为基础的。

第一节 高温水基泥浆作用原理

一、高温对泥浆中粘土的作用及对泥浆性能的影响

高温对水基泥浆的影响十分复杂。一般认为这是高温引起泥浆组分的变化和影响各组分间的化学及物理化学作用的结果。其中高温对泥浆中粘土的作用是其基础。

1. 泥浆中粘土粒子的高温分散作用

泥浆中的粘土粒子在高温作用下，自动分散的现象称为粘土粒子的高温分散作用。实践发现水基膨润土悬浮体经高温后膨润土粒子分散度增加，比表面增大，粒子浓度增多。表观粘度和切力（静、动切力）亦随着变大。（见图 2-1）。同时实验还发现粘土粒子的高温分散能力与其水化分散能力相对应，即钠膨润土 > 钙膨润土 > 高岭土 > 海泡石。而任何粘土在油中的悬浮体都未见到高温分散现象。因此，可以认为，泥浆中粘土的高温分散本质上仍然是水化分散，高温只不过激化了这种作用而已。

1) 高温促进粘土水化分散的原因

高温加剧了泥浆中各种粒子的热运动，可能导致以下结果：

① 高温增强了水分子渗入未分散的粘土粒子晶层表面的能力，从而促使原来未被水化的晶层表面水化和膨胀。

② 随着水分子渗入晶层内表面，则 CO_3^{2-} 、 OH^- 、 Na^+ 等有利于粘土表面水化的离子随之进入，增强原来被水化表面的水化能力，促进了进一步的水化分散。因此，随着高温分散的发生，泥浆中 CO_3^{2-} 、 OH^- 含量及泥浆 pH 值都下降（见图 2-2）。

③ 高温不影响粘土的晶格取代，但却促进了八面体中 Al 的离解（pH 值愈高促进离解作用愈大），使粘土所带负电荷增加，同时补偿了因高温而解吸的阴离子，促进粘土粒子 ζ 电位的增加，从而有利于渗透水化分散。

④ 高温使粘土矿物晶格中片状微粒热运动加剧，从而增强了水化膨胀后的片状粒子彼此分离的能力。

2) 影响高温分散的因素

由于高温分散的实质是水化分散，所以凡有利于粘土水化分散的因素都有利高温分散，反之亦然。

① 粘土种类是高温水化分散的决定因素。依其水化能力，钠膨润土高温分散能力强而高岭土（劣土）则弱；

② 所经受的温度愈高，作用时间愈长，粘土高温分散愈强，但有一定限度；

③ 介质的化学环境为分散者，则对高温分散有利，反之则不利。如 OH^- 、 CO_3^{2-} 有利于

粘土水化分散，故 pH 值高，分散作用强，且随之泥浆 pH 值下降，这对高岭土更为明显。

无机高价正离子如 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 等的存在不利于粘土水化，也不利于粘土高温分散，亦则无机高价正离子对粘土的高温分散有一定的抑制作用，其作用大小与正离子价数和浓度有关。

由于高温分散是粘土本性及其介质环境特征在高温下的表现，故在任何粘土中都能发生这种作用而与泥浆中粘土含量没有直接关系。高温分散还是一个不可逆的永久性变化。

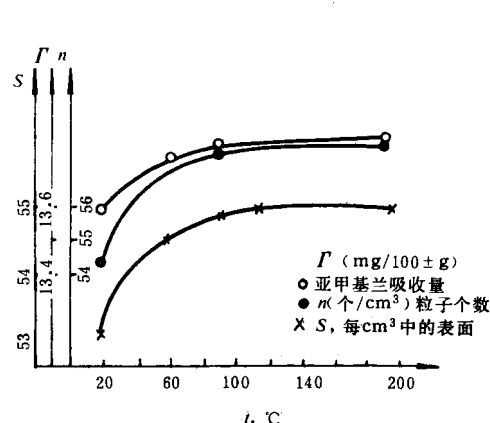


图 2-1 粘土颗粒的高温分散

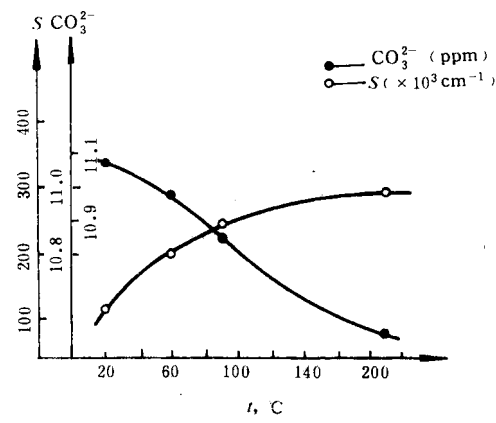


图 2-2 粘土粒子的高温分散与泥浆中 CO_3^{2-} 的关系

3) 高温分散作用对泥浆性能的影响

高温分散使泥浆中粘土粒子浓度增加，因此，对泥浆高温下的性能和热稳定性都有影响。而对流变性的影响最大，且其影响都是不可逆的。

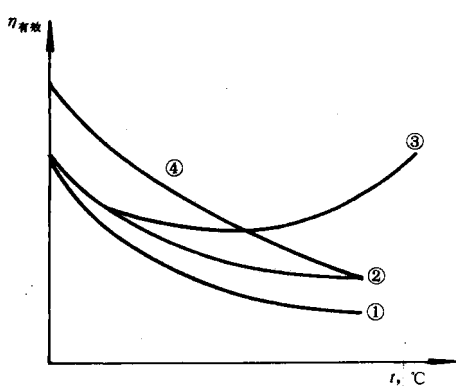


图 2-3 高温分散对泥浆 HTHP 流变性的影响
①理想悬浮体；②、③有高温分散作用的泥浆；④为②的降温曲线

①对高温下流变性的影响：假若粘土粒子为温度惰性的固体粒子，则其悬浮体（称为理想悬浮体）的粘度随温度升高而按正常规律下降。但由于粘土的高温分散作用使泥浆中粘土粒子浓度（指颗粒的数量）增加，则使泥浆的视粘度和静、动切力值都高于对应温度下的“正常粘度”。若这些因素对粘度影响增值大于升温引起理想悬浮体粘度下降的数值，则可能导致泥浆高温下的粘度高于低温粘度的现象，如图 2-3 所示。

由于粘土粒子的高温分散作用是不可逆的，故泥浆的粘度与温度的关系中的降温曲线（即升温后降温再测温度—粘度的关系曲线）总比升温曲线高（见图 2-3）。其高差程度则由泥浆中粘土粒子高温分散作用的强弱和粘土

的含量多少所决定。若高温分散作用强，粘土含量高，则高差大，反之则小。

泥浆高温增稠的原因比较复杂，若排除处理剂等外加组分的高温变性所引起的增稠，则研究粘土的因素，其主要原因是粘土高温分散增加了泥浆中粘土粒子的浓度。因此，由高温分散引起的泥浆严重增稠，用稀释剂如 NaT、FCIS、NaC、SMT、SMC 等一般不能有效降粘，有时甚至反而使泥浆增稠，唯有大量稀释或利用无机絮凝剂降低粘土分散度才能加以解决。

显然，凡是影响粘土高温分散的因素必然同样会影响泥浆高温增稠，但是高温分散对泥浆增稠的实际效果却与泥浆中粘土的含量有很大关系，在其他条件相同时，泥浆中粘土愈多则高温后泥浆粘土粒子浓度的绝对值增加愈多，使泥浆粘度类似指数关系急剧上升。当粘土的含量大到某一数值时，则泥浆高温作用后丧失流动性形成凝胶即产生了高温（后）胶凝。因此，可以说泥浆的高温胶凝是泥浆高温增稠在泥浆中粘土含量大到某一数值以后的极限形式。

②对热稳定性的影响：凡高温胶凝的泥浆，必然丧失其热稳定性，性能破坏。在使用中常表现为泥浆井口性能不稳定，粘、切上升很快，处理频繁，处理剂用量大。而且每次起下钻后泥浆粘度、切力都会有明显增加。因此，防止泥浆高温胶凝及严重增稠是保持泥浆热稳定性的重要问题。多年的实践证明，这是深井泥浆工艺中最常见、最普遍、最麻烦又最重要的事（特别是对于加重泥浆）。

显然，防止泥浆高温胶凝而获得较好的热稳定性应有两条途径：其一是使用抗高温处理剂有效地抑制和减少粘土粒子的高温分散，这是问题的本质。但是要彻底消除粘土的高温分散比较困难。因此，其二是必须把泥浆中的粘土含量控制在某一“量限”以下。凡泥浆中粘土含量大于此量限，则泥浆发生高温胶凝，而低于此量限则泥浆只发生高温增稠而不致于胶凝，低得愈多，泥浆高温增稠作用愈小。可以说任一水基泥浆体系，在某一高温下都有对应的粘土“量限”。它可以简单理解为，“在某一温度下，泥浆体系发生高温胶凝所需的最低土量”。显然它与泥浆中粘土类型，处理剂效能及含量，介质化学环境，经受温度高低及作用时间长短等因素有关。因此，不可能存在一个适用于所有泥浆体系的“粘土量限”，从理论上也不可能计算出它的大小。但它却是一个保证泥浆热稳定性的重要概念，而且对于具体的泥浆体系都可用实验求出粘土量限。例如在铬体系的膨润土泥浆中，180℃~200℃的膨润土量限为7%左右（体积比，下同）。因此，应把它作为泥浆体系使用和控制的重要指标。即在使用时泥浆中粘土的实际含量必须严格地控制在其量限以内，而且在一定范围内愈低愈好。

对此概念国内外在使用抗温水基泥浆时都十分重视，不过国外更多地重视了泥浆中膨润土（或活性固体）的含量（用 MBT 值测定）。这是因为膨润土高温分散作用强而影响大的缘故。但是我们认为不管泥浆中的粘土类型如何都存在一个和使用温度及泥浆体系相应的粘土“高温容量限”。只不过随土的类型不同，其量限大小和求法不同而已。而它对于泥浆热稳定性的重要性却是完全相同的。高温分散作用对于泥浆的 HTHP 滤失量及热稳定性一般没有不良影响。

2. 泥浆中粘土粒子的高温聚结作用

高温加剧水分子的热运动，从而降低了水分子在粘土表面或离子极性基团周围定向的趋势，即减弱了它们的水化能力，减薄了它们的外层水化膜。高温降低水化粒子及水化基团的水化能力，减薄其水化膜的作用称为高温去水作用。同时温度升高，一般可促进处理剂在粘土表面的解吸附，这种作用可称为处理剂在粘土表面的高温解吸。高温也引起粘土胶粒碰撞频率增加。以上三种因素的综合结果使粘土粒子的聚结稳定性下降，从而产生程度不同的聚

结现象。根据经典胶体化学理论，高温的这种作用一般只引起体系聚结稳定性的局部降低。虽然对泥浆性能有严重影响，但一般还未达到使体系凝结或絮凝的程度（高矿化度盐水体系有可能例外），只达到所谓隐匿凝结（或隐匿絮凝）阶段，我们特称这种现象为泥浆中粘土粒子的高温聚结作用。影响此种作用的因素有：粘土表面的水化能力，温度高低，泥浆中的电解质浓度和种类，处理剂和用量，粘土粒子的分散度和浓度等。

由于高温去水化和解吸作用随温度可逆变化。故泥浆中粘土粒子的高温聚结作用和由它引起的泥浆性能的变化也可能随温度而可逆变化。高温凝结作用主要指已经高度分散的粒子由高温作用降低分散度的趋势，它与粘土粒子的高温分散作用是相反而并存的。显然高温聚结对泥浆性能的影响是复杂的，它有随温度可逆的一面，也有不随温度可逆的一面。而且它与泥浆中粘土粒子的高温分散作用同时发生，再加上土量多少的影响，使它们对泥浆性能的综合影响更为复杂。现简单分析如下。

假若泥浆中的粘土粒子对温度是惰性的，随温度上升则其粘、切按理想悬浮体的规律下降（称正常下降）（见图 2-4）。

若在淡水泥浆或分散泥浆中，则高温聚结作用主要促进了粘土粒子的端一面和端一端结合形成卡片房子结构，从而使泥浆静、动切力和较低速梯下的视粘度比对应温度下的理想悬浮体高，则其粘度—温度曲线高于理想悬浮体，若同时考虑粘土粒子的高温分散作用，则高温聚结作用而形成的网架结构的密度和强度必然会因同时发生的粘土高温分散作用而大大加强。如果它们扣除高温引起流体粘度正常下降而有剩余，则泥浆粘度随温度升高而上升，此上升幅度又与泥浆中的土量有关，若土量过高则泥浆在高温下丧失流动性。假使泥浆中粘土不发生高温分散或高温分散能被处理剂有效地抑制，则粘度切力随温度上升而下降的曲线比较理想。悬浮体高，聚结作用愈强，高得愈多。而且由于高温聚结随温度可逆变化，故 Q 、 η' — t 升温曲线和降温曲线重合，泥浆表现出很好的热稳定性。假若泥浆中同时发生高温分散则其 Q 、 η' — t 曲线比理想悬浮体更高，而且这种变化包含有不随温度而可逆的因素，因此， Q 、 η' — t 升温曲线和降温曲线不重合，后者总是高于前者，升温时间愈长，高得愈多。可用二曲线所围成面积的大小来表示这种不可逆程度（即高温分散作用大小）。也可表示泥浆热稳定性，其情况如图 2-4 所示。分散性泥浆中粘土粒子高温聚结作用对泥浆的粘—温曲线的影响如图 2-5。

假若泥浆矿化度高，形成了一种对粘土粒子的聚结性环境，则高温进一步促进这种聚结作用，使粘土粒子发生以面一面为主的作用而使其分散度降低，其结果必然使泥浆产生粘度、切力下降的趋势。这样使其 η 、 Q — t 曲线低于升温曲线，而加温时间愈长，则低得愈多如图 2-6 所示。

一般而言，在高矿化度条件下粘土高温分散较弱，对泥浆体系不产生重要影响。由于上述作用是不可逆的，所以虽经降温搅拌而难以消除，因而又直接影响泥浆的热稳定性，常表现为泥浆体系高温后 η_{sp} ， τ_0 ， Q 下降，它是引起泥浆高温减粘的重要因素。综合上述，为保持高温下有合格的粘度，泥浆中粘土含量不能过高，也不能过低（特别是高矿化度的泥浆）而应有一个下限，且矿化度愈高，其下限愈高。

显然，高温聚结作用使泥饼质量降低，所以它必然增加泥浆的 HTHP 滤失量。在高矿化度泥浆中更是如此，而且也促进高温后泥浆滤失增加，即影响泥浆造壁性的热稳定性。

另外，在高聚物泥浆中，由于高温可能促进高聚物的絮凝能力。其结果也使泥浆粘度随温度上升而增加，滤失量反常的急剧增加。这种现象在盐水泥浆中较为常见，且高聚物分子

量愈大愈明显。它是另一类型的高温聚结作用，也是随温度可逆变化的一种现象。

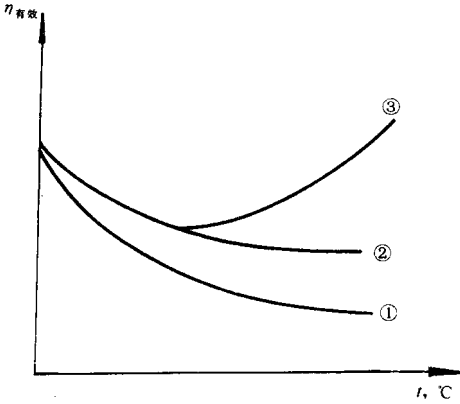


图 2-4 $\eta_{\text{有效}}-t$ 的关系曲线

①理想悬浮体；②有高温聚结作用的泥浆；③高温聚结作用强且粘土含量高的泥浆；④是②的降温曲线，且与②重合

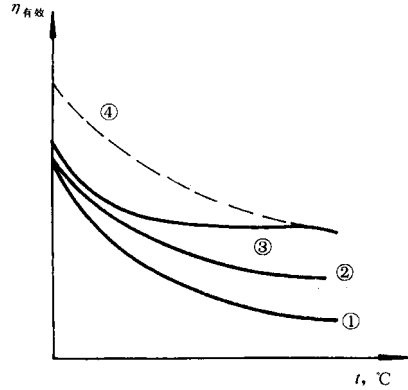


图 2-5 $\eta_{\text{有效}}-t$ 的关系曲线

①理想悬浮体；②有高温聚结作用的泥浆；③高温聚结作用与高温分散作用同时存在的泥浆；④是③的降温曲线

3. 泥浆中粘土粒子的高温表面钝化（去水化）

1) 粘土表面高温钝化

实验发现，粘土悬浮体经高温（一般高于 130°C ）作用后，粘土粒子表面活性降低，我们称这种现象为粘土粒子表面高温钝化，人们可从经高温作用后的粘土粒子单位表面的吸附量下降的结果得到证实，见表 2-1。

粘土表面高温钝化产生的机理目前还不十分明确，一般认为，高温下粘土晶格里 Si、Al、O 和泥浆中的 Ca^{2+} 、 OH^- 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等发生类似水泥硬化的反应，生成了类似硬硅酸钙或铁铝硅酸钙那样的物质，改变了晶格表面的结构和带电情况，从而降低了表面的剩余力场和表面活性，也降低了表面的水化能力。也有人认为，高温增强了泥浆中类似粘土——石灰的反应，生成了一种类似波特兰水泥的组分——雪硅钙石，可以设想这种反应多发生在粘土粒子的端面，因而降低了形成“卡片房子结构”的能力和所形成结构本身的强度。

影响表面钝化的因素首先是温度，此种作用在低温下也能进行，但温度愈高，钝化反应愈厉害。文献记载 130°C 以上钝化反应即可明显发生，泥浆中的 OH^- 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 的含量愈大愈有利于钝化反应，而以 OH^- 、 Ca^{2+} 影响最大。钝化反应的结果必然使泥浆 pH 值下降。因此，石灰泥浆中的粘土粒子容易发生高温钝化作用。这是不随温度而可逆的永久

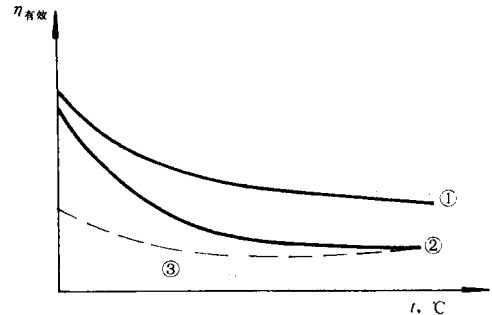


图 2-6 高矿化度盐水泥浆的 $\eta-t$ 曲线

①理想悬浮体；②高温下发生面一面结合的泥浆体系；③是②的降温曲线