

鄢捷年 黄林基 编著

钻井液优化设计 与实用技术



石油大学出版社



钻井液优化设计与实用技术

鄢捷年 黄林基 编著

石油大学出版社

鲁新登字 10 号

内 容 提 要

本书介绍钻井液的优化设计和实用工艺技术。主要包括:钻井液的选型原则和性能控制的方法及原理;聚合物钻井液、抑制性钻井液和油基钻井液的组成、特点与现场应用;钻井液固控技术和钻井过程中储层的损害机理与保护技术等。

本书简明扼要地阐述基本概念和原理,所选内容注重其实用性、科学性和系统性,并尽力反映国内外钻井液工艺的近期研究成果和技术进展。它可作为石油高等院校钻井工程和油田化学专业的教学参考书,也可供从事石油钻井泥浆工作的工程技术人员参考。

钻井液优化设计与实用技术

鄢捷年 黄林基 编著

*

石油大学出版社出版

(山东省 东营市)

新华书店发行

石油大学出版社照排室排版

山东省东营新华印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 16.25 印张 421 千字

1993 年 9 月第 1 版 1993 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—2000 册

ISBN7-5636-0307-7/TE·66

定价: 15.60 元

序

《钻井液优化设计与实用技术》一书共六章。第一章概括地介绍了钻井液类型、选型的原则及对重要性能的控制原理,这是钻井液优化设计的基础。第二、三、四章对目前应用较广泛的聚合物钻井液、抑制性钻井液和油基钻井液进行了详尽和全面的讨论。最后两章对固控技术和保护油气层技术进行了系统的介绍,前者是钻井液实现优化的重要保证,后者是优化钻井液应达到的目标。

本书的主要特点是,既重视介绍与钻井液有关的基础理论、基本概念和工艺原理,又用较大篇幅介绍了钻井液优化设计和实用技术。书中大量地收集了近年来国内外在钻井液工艺方面的新成果与新进展,同时也总结了作者本人相当数量的研究成果。作者还特别注重介绍钻井液工作者所必备的一些专业基础知识。因此,本书的出版不仅为教学工作提供了一本难得的参考书,而且也将受到有关工程技术人员和科研人员的欢迎。

樊世忠

一九九二年六月于北京

前 言

钻井液工艺技术是石油钻井工程的重要组成部分,它在确保安全、优质、快速钻井中起着关键性的作用。近年来,国内外在该项技术的室内研究和现场应用方面,均取得了引人注目的成就和实质性进展。

编写此书的主要目的,是为石油高校钻井工程和油田化学专业的钻井泥浆课程提供一本较新的教学参考书。所以凡是在《泥浆胶体化学》和《泥浆工艺原理》两本教材中重点介绍的内容,如表面与胶体化学的基础理论、钻井液的流变学与滤失造壁性、钻井液处理剂及其作用机理等,在本书中均不作更详细的讨论。本书的特点是,在介绍有关的基础理论、基本概念及原理时尽量做到简明扼要,并注意将一些易混淆或较模糊的概念加以澄清;全书用较多篇幅介绍便于现场应用的钻井液优化设计与实用技术,同时还适当地收入了作者本人的一些研究成果。书中所选的大部分内容是从事钻井泥浆工作的工程技术人员必须具备的专业知识,并尽力反映近年来钻井液工艺方面取得的新成果和新进展。因此,本书除可用作教学参考书(或选修课教材)外,还适合于有关的工程技术人员和科研人员参考。

本书第一章概括地介绍了钻井液的类型、选择类型的原则以及对各种重要性能的控制原理;第二、三、四章分别对目前应用较广泛的聚合物钻井液、抑制性钻井液和油基钻井液作了全面而系统的讨论,由于分散钻井液在《泥浆工艺原理》中介绍已很详尽,故本书未单列一章加以讨论;第五章重点介绍钻井液固控工艺、钻井液中各种固相含量的确定以及固控的经济分析;第六章重点介绍钻井过程中储层的损害机理和油气层保护技术。

本书的第一、四、五、六章由鄢捷年编著,第二、三章由黄林基

编著,全书由郝捷年负责统稿。

本书在编写过程中,得到石油大学和西南石油学院两个泥浆研究室许多同志的大力支持,樊世忠教授和朱墨教授在百忙中详细审阅了全书的内容,提出了许多宝贵意见。作者谨对他们表示衷心的感谢。

限于我们的水平,以及时间仓促等原因,书中难免会有一些不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

1992年5月

目 录

第一章 钻井液设计与性能控制.....	(1)
§ 1 钻井液的类型	(1)
§ 2 钻井液体系的选择.....	(15)
§ 3 钻井液性能调整与控制.....	(28)
§ 4 钻井液中污染物的清除.....	(55)
第二章 聚合物钻井液	(63)
§ 1 概述.....	(63)
§ 2 聚合物钻井液的理论基础.....	(71)
§ 3 不分散低固相聚合物钻井液	(103)
§ 4 不分散聚合物加重钻井液	(115)
§ 5 两性复合离子聚合物钻井液	(123)
§ 6 阳离子聚合物钻井液	(148)
第三章 抑制性钻井液.....	(170)
§ 1 钙处理钻井液	(170)
§ 2 含盐钻井液	(186)
§ 3 钾基钻井液	(198)
§ 4 钾石灰钻井液	(211)
§ 5 其它抑制性钻井液	(215)
第四章 油基钻井液.....	(235)
§ 1 油包水乳化钻井液的组成	(236)
§ 2 油包水乳化钻井液的性能	(247)
§ 3 平衡活度的油包水乳化钻井液	(277)
§ 4 低胶质油包水乳化钻井液	(289)
§ 5 低毒油包水乳化钻井液	(298)
第五章 钻井液固相控制.....	(315)

§ 1	固控设备概述	(315)
§ 2	固控工艺及原理	(334)
§ 3	钻井液中固相含量的测定与计算	(352)
§ 4	固控的经济分析	(372)
第六章	钻井过程中的储层损害与保护	(390)
§ 1	储层的类型、基本特征和物性	(391)
§ 2	储层损害机理概述	(398)
§ 3	固相颗粒对储层的损害	(401)
§ 4	粘土矿物对储层的损害和粘土稳定剂	(414)
§ 5	外来流体与储层流体不配伍对储层的损害	(426)
§ 6	润湿反转与储层损害	(440)
§ 7	储层损害的评价方法	(462)
§ 8	防止储层损害的钻井作业措施	(479)
§ 9	保护油气层的钻井液和完井液	(482)

第一章 钻井液设计与性能控制

§ 1 钻井液的类型

随着钻井液工艺技术的不断发展,钻井液的种类越来越多。目前,国内外对钻井液已有各种不同的分类方法。其中较简单的分类方法有以下几种:

按密度大小可分为非加重钻井液和加重钻井液;

按与粘土水化作用的强弱可分为非抑制性钻井液和抑制性钻井液;

根据流体介质的不同,可分为如图 1-1 所示的 6 种类型^[1]。

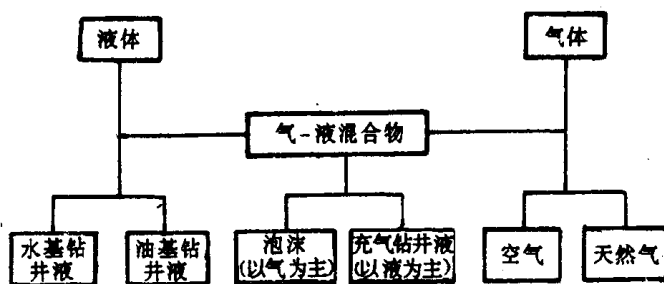


图 1-1 钻井液的分类

由于水基钻井液在实际应用中一直占据着主导地位,根据体系和组成的不同又将其分为各种不同的类型。80 年代中期,经美国石油学会(API)和国际钻井承包商协会(IADC)认可的钻井液体系共有以下九个类别:

(1) 天然钻井液 该类钻井液由膨润土、适量纯碱或烧碱以及清水配制而成,或利用清水在易造浆地层钻进而自然形成。它基本上不添加处理剂,常用于表层或浅层钻进。

(2) 分散钻井液 是以各种分散剂(如丹宁碱液、木质素磺酸

盐等)作为主剂配制而成的水基钻井液。

(3) 钙处理钻井液 是一种因含有一定量 Ca^{2+} 和分散剂,体系中的粘土颗粒保持适度絮凝状态,从而可以提高抑制能力的水基钻井液。根据 Ca^{2+} 来源的不同,又分为石灰钻井液、石膏钻井液和氯化钙钻井液三种类型。

(4) 聚合物钻井液 这类体系由于选用某些具有絮凝和包被作用的长链聚合物进行处理,因而具有良好的剪切稀释特性。聚合物在钻井液中还起增粘、降滤失量、絮凝劣质土和稳定地层等作用。

(5) 低固相钻井液 是指体系中低密度固相的体积百分含量在不超过 10% 的水基钻井液,其中膨润土的体积百分含量应控制在 3% 以下,钻屑与膨润土的比值应小于 2:1。其主要特点是可以明显地提高机械钻速。

(6) 盐水钻井液 是指体系中 NaCl 的重量百分含量大于 1% 的水基钻井液。当 NaCl 浓度达到饱和时,称为饱和盐水钻井液。这类高矿化度的钻井液体系对粘土的水化有较强的抑制作用。

(7) 修井完井液 是一种为防止对油气层造成损害而设计的特种体系。它具有抑制粘土水化膨胀和微粒运移的效能,可用于钻开油气层,以及酸化、压裂和修井等作业。

(8) 油基钻井液 该类体系包括普通油基钻井液和油包水乳化钻井液。前者一般用柴油、氧化沥青、有机土和乳化剂(通常为脂肪酸和胺类的衍生物)等配制而成;后者是以水作为分散相,柴油或低毒矿物油作为连续相,并添加有机土以及各种乳化剂、润湿剂所形成的钻井液。油基钻井液具有耐高温、耐盐和有利于保持井壁稳定等优良特性。

(9) 气体类钻井流体 按国际钻井承包商协会的规定,该类钻井流体共包括四个基本体系:空气(或天然气)、雾、稳定泡沫和充气钻井液。它们都是以空气(或天然气)作为循环体系中的一部分或大部分。由于流体的密度小,一般用于钻低压易漏失地层或低

渗油气层。当用作完井流体时,可有效地保护油气层。

应该指出,以上国外对钻井液的分类并不完全符合我国钻井液技术发展的实际情况,目前已产生一种将国外分类标准与我国国情相结合的较为合理的分类方法^[2]。下面我们对按这种方法分成的各类钻井液体系及其典型配方分别加以介绍。

一、分散钻井液体系

分散钻井液是指用水、膨润土和各种对粘土和钻屑起分散作用的处理剂(简称为分散剂)配制而成的水基钻井液。目前,国内外使用的分散剂种类很多。主要起降粘作用的分散剂有多聚磷酸盐、丹宁碱液、铁铬木质素磺酸盐、褐煤及改性褐煤等。主要起降滤失作用的分散剂有 CMC 和聚阴离子纤维素等。此外,用于调节 pH 值的 NaOH 也具有较强的分散作用。这类钻井液体系中常用组分的名称、作用及加量见表 1-1 和表 1-2^[3]。

表 1-1 密度为 1.06~1.44g/cm³ 分散钻井液的
常用组分名称、作用及加量

组 分	作 用	加量(kg/m ³)	常用商品名称 *
重晶石	增加密度	0~499	Baroid, Magcobar, Milbar, IMCO Bar
膨润土	提粘,滤失量控制	42.8~71.3	Magcogel, Aquagel, Milgel, IMCOgel
木质素磺酸铬	降低动切力和切力,以及滤失量控制	2.8~11.4	Q-Broxin, Spensene, Unical, VC-10, CLS
褐煤	滤失量控制,以及降低动切力和切力	2.8~11.4	Carbonix, Tannathin, Ligco, IMCO Lig
烧碱	维护 pH 值	0.7~5.7	
多聚磷酸盐	降低动切力和切力	0.3~1.4	SAPP, Magcophos, Barafos, Oilfos
CMC	滤失量控制,提粘	0.7~5.7	CMC, Cellex
聚阴离子纤维素	滤失量控制,提粘	0.7~5.7	Drispac, Monpac, Magco, Poly-pac

* 表中商品名称由美国各钻井液公司规定。

表 1-2 密度大于 $1.44\text{g}/\text{cm}^3$ 分散钻井液的常用组分名称、作用及加量

组 分	作 用	加量(kg/m^3)	常用商品名称 *
重晶石、氧化铁粉	增加密度	357~1427	Magcobar, Baroid
膨润土	提粘,控制滤失量	42.8~71.3	Magcogel, Aquagel, Milgel, IMCOgel
木质素磺酸钙	降低动切力和切力,以及滤失量控制	11.4~34.2	Q-Broxin, Spensene, Unical, VC-10, CLS
褐煤	控制滤失量,以及降低动切力和切力	11.4~34.2	Carbonix, Tannathin, Ligco, IMCO Lig
烧碱	增溶分散剂,维护 pH 值	0.7~8.6	
磺化褐煤和树脂类处理剂	控制高温滤失量,并作为稳定剂	5.7~17.1	Durenex, Resinex, Poly Rx, Chemtrol X

* 表中商品名称由美国各钻井液公司规定。

分散钻井液的主要特点是:(1)可容纳较多的固相,最适于配制高密度的钻井液。只要配合足够数量的耐高温分散剂,可将钻井液加重至 $2.00\text{g}/\text{cm}^3$ 以上;(2)可形成较致密的高质量泥饼,API 滤失量和 HTHP 滤失量均较低;(3)耐温能力较强。但是,它与其它钻井液类型相比,也有一些缺点。除抑制性和保护油气层的能力较差外,还因体系中固相含量高,特别是粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的亚微米颗粒所占的比例相当高,因此使用时对机械钻速有一定影响。据统计,在经过充分的剪切作用之后,用木质素磺酸盐处理的膨润土钻井液中亚微米颗粒约占全部固相颗粒总数的 80%,而不分散聚合物钻井液中的亚微米颗粒仅占颗粒总数的 13%^[3]。试验表明,亚微米颗粒要比大于 $1\mu\text{m}$ 的较大颗粒对钻速的影响大 12 倍,可见使用分散性过强的钻井液对提高钻速是十分不利的。

为了将分散钻井液中亚微米颗粒所占比例减至最小程度,一方面应控制膨润土的加量,另一方面应通过固控设备的使用,尽量降低体系的总固相含量。分散剂和 NaOH 的加量亦不宜过高,pH 值一般应控制在 9.5~10.5 范围内。此外,由于大多数分散剂的耐

盐性较差,故分散钻井液中应保持较低的无机盐含量。

以磺化栲胶、磺化褐煤和磺化酚醛树脂作为主处理剂的三磺钻井液是我国用于钻深井的有代表性的分散钻井液体系。这种体系主要用于钻 4500m 以上深井,耐温可达 160~200℃。但该体系不宜在纯盐膏层和井塌严重的地层中使用。分散型三磺钻井液的推荐配方和各项性能指标见表 1-3。

表 1-3 分散型三磺钻井液的推荐配方与性能

基 本 配 方		可 达 到 性 能	
材 料 名 称	加 量(kg/m ³)	项 目	指 标
膨润土	80~150	密度(g/cm ³)	1.15~2.00
纯碱	5~8	漏斗粘度(s)	30~60
磺化褐煤	30~50	API 滤失量(ml)	<5
磺化栲胶	5~15	HTHP 滤失量(ml)	15 左右
磺化酚醛树脂	30~50	泥饼(mm)	0.5~1
或 SLSP	40~60	塑性粘度(mPa·s)	10~15
红矾钾(或钠)	2~4	动切力(Pa)	3~8
CMC(低粘)	10~15	切力(初/终,Pa)	0~5/2~15
SP-80	3~5	pH 值	≥10
润滑剂	5~15	含砂量(%)	0.5~1
烧碱	3 左右		
重晶石	视需要定		
各类无机盐类	视需要定		

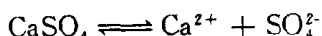
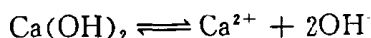
二、钙处理钻井液体系

钙处理钻井液的组成特点是体系中同时含有一定量的 Ca^{2+} 和分散剂。 Ca^{2+} 通过与水化作用很强的钠膨润土发生离子交换,使一部分钠膨润土转变为钙膨润土,从而减弱水化的程度。分散剂

的作用是防止 Ca^{2+} 引起体系中的粘土颗粒絮凝过度,使其保持在适度絮凝的状态,从而保证钻井液具有良好、稳定的性能。由于钙处理钻井液对所钻地层中的粘土有抑制其水化分散的作用,因而在一定程度上可控制页岩坍塌和井径扩大,并能减轻对储层的损害。

以石灰作为 Ca^{2+} 来源的钙处理钻井液称为石灰钻井液。该钻井液的 pH 值应控制在 11~12,使 Ca^{2+} 含量保持在 120~200mg/l 的范围内;体系中悬浮的石灰含量一般为 3000~6000mg/l。以石膏作为 Ca^{2+} 来源时,称为石膏钻井液。其 Ca^{2+} 含量应保持在 600~1200mg/l,悬浮石膏含量保持在 6000~12000mg/l,pH 值保持在 9.5~10.5 范围内。如果用 CaCl_2 进行处理,则称作氯化钙或高钙钻井液,此时体系中的 Ca^{2+} 含量可以更高。

无论石灰钻井液还是石膏钻井液,都必须确保有一定数量的未溶石灰或石膏悬浮在体系中。这是由于在钻进过程中, Ca^{2+} 会不断与钻屑发生相互作用而被消耗。当滤液中 Ca^{2+} 浓度减少时,由下面的溶解平衡:



Ca^{2+} 可及时、自发地得到补充。

体系中悬浮的石灰和石膏的量可通过实验进行测定。以石膏钻井液为例。取 1ml 钻井液,用蒸馏水稀释至 50ml,使悬浮的 CaSO_4 全部溶解,并过滤得到澄清的滤液。然后,取 10ml 滤液样品,在有铬黑 T 指示剂存在的情况下,用 0.02 N Na-EDTA 标准溶液进行滴定。当溶液颜色由酒红色转变为蓝色时,反应即达到终点。由滴定 1ml 钻井液样品所消耗的 Na-EDTA 溶液体积 $V_m(\text{ml})$,用下式可求出体系中 CaSO_4 的总含量(包括溶解的和悬浮的 CaSO_4):

$$\text{CaSO}_4 \text{ 总含量}(\text{mg/l}) = 1361V_m \quad (1-1)$$

用同样方法还可测得滴定 1ml 钻井液滤液所需 0.02 N

Na-EDTA 的体积 V_d (ml)。由 V_d 和钻井液中水的体积分数 f_w (用蒸馏实验测得), 便可由下式求出体系中悬浮 CaSO_4 的含量:

$$\text{悬浮 } \text{CaSO}_4 \text{ 含量 (mg/l)} = 1361(V_m - f_w V_d) \quad (1-2)$$

三种钙处理钻井液的配制、维护、典型配方以及性能指标等可详见第三章。

三、盐水钻井液体系

盐水钻井液是用盐水(或海水)配制而成的。在含盐量从 1% (Cl^- 含量为 6000mg/l) 直至饱和 (Cl^- 含量为 189000mg/l) 之前的整个范围内都属于此种类型。这种体系的主要特点是: (1) 由于矿化度高, 能有效地抑制水敏性粘土的分散而防塌; (2) 对盐的敏感性低, 耐盐和耐钙、镁的能力较强; (3) 由于其滤液性质与地层原生水比较接近, 故对油气层的损害较轻; (4) 由于钻出的岩屑不易在盐水中水化分散, 因而在地面容易被清除, 从而有利于保持较低的固相含量。但该体系对钻柱和设备的腐蚀性较大, 对电测亦有一定的影响。

盐水钻井液主要应用于以下情况: 造浆水本身含盐量较高, 比如用海水造浆; 地层中有盐水流, 淡水钻井液体系不可能维持; 钻遇盐脉或岩盐层以及为了抑制水敏性页岩地层的水化。在选择盐水钻井液时, 可能只涉及以上某些因素, 也可能包含所有因素。多数情况下盐水钻井液只用于某一特定的井段。比如, 当我们预先已知在某一深度有一较浅的盐层时, 可在进入之前有准备地将盐和处理剂加入钻井液中, 使之转化为盐水体系。当钻过盐层并下入套管之后, 也可根据情况, 通过稀释与化学处理, 逐步恢复至淡水体系。海水钻井液一般用于海上钻井, 但也可在近海滩和某些缺乏淡水的地区使用。盐水钻井液的配制、典型配方及性能将在第三章进一步讨论。

四、饱和盐水钻井液体系

该体系是指钻井液中 NaCl 含量达到饱和时的盐水钻井液体系。它可以用饱和盐水配成, 亦可先配成钻井液再加盐至饱和。饱

和盐水钻井液主要用于钻其它钻井液难以对付的大段岩盐层和复杂的盐膏层,也可作为完井液、修井液使用。其主要特点表现在:抗污染能力强;对地层中粘土的水化膨胀和分散有很强的抑制作用;钻遇岩盐层时,可将盐的溶解减至最小程度,避免大肚子井眼的形成。使用饱和盐水钻井液时,需注意以下几点:(1)要根据岩盐层的蠕变曲线(见图 1-2),确定较合理的钻井液密度,以克服因盐层的

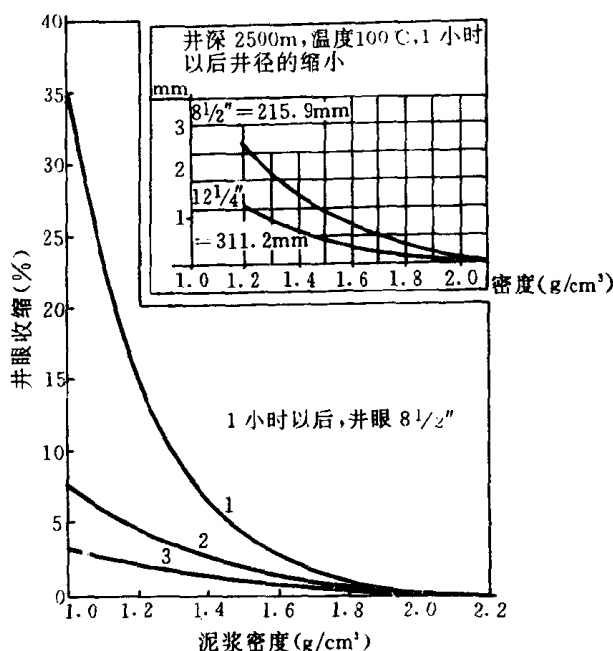


图 1-2 盐层蠕变曲线

1—3600m, 150°C 时的蠕变曲线; 2—3000m, 120°C 时的蠕变曲线;
3—2500m, 100°C 时的蠕变曲线

塑性变形而引起的卡钻或挤毁套管;(2)体系中膨润土含量不宜过高,一般控制在 50kg/m^3 左右,否则会导致过高的切力和粘度;(3)如该体系由井浆转换而成,应在加盐前先将固相含量及粘度、切力降下来;(4)最好加入适量的重结晶抑制剂,以防止因温度变化而导致盐粒析出。

饱和盐水钻井液有多种不同的配方。国外的一种传统方法是用抗盐粘土(如凹凸棒石)造浆并调整粘度和切力,用淀粉控制滤失量。但目前倾向于用各种聚合物降滤失剂(如聚阴离子纤维素)代替淀粉,以利于实现低固相。目前,我国各油田已在钻井实践中形成了多种适合于本地区特点的饱和盐水钻井液配方。其中一种较典型的配方及其性能指标列于表 1-4 中。

表 1-4 饱和盐水钻井液配方及性能

配 方		性 能	
材 料 名 称	加 量(kg/m ³)	项 目	指 标
基 浆	冲稀到 1.10~1.15	密度(g/cm ³)	1.20 以上
增粘剂(CPA 或 PAC 141,SK 或 K-PAM 等)	3~6	漏斗粘度(s)	30~55
		API 滤失量(ml)	3~6
		泥饼(mm)	0.5~1
降滤失剂(CMC 或 SMP 或 Na-PAN 或 SMC 等)	10~50	切力(初/终,Pa)	0.2~2/0.5~10
		塑性粘度(mPa·s)	8~50
		动切力(Pa)	2.5~15
抗盐降粘降滤失剂(FCLS)	视需要而定,一般为 30~50	表观粘度(mPa·s)	9.5~59
		含砂量(%)	<0.5
NaCl	达饱和	pH 值	7~10
NaOH	2~5		
红矾	1~3		
表面活性剂	视需要而定		
盐抑制剂	视需要而定		

五、钾基钻井液体系

钾基钻井液是一类以各种聚合物的钾、铵、钙盐和 KCl 为主