

井间示踪技术



宋吉水 王岩楼 廖广志
袁新强 张同友 冯宝俊 编著

石油工业出版社

井间示踪技术

宋吉水 王岩楼 廖广志
袁新强 张同友 冯宝俊 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

示踪技术已成功地应用于石油、水文、医学、农林等诸多领域。石油工业中已在诸如同位素找水、查找输油管道泄露、井间示踪测试、单井化学示踪测定残余油饱和度等方面应用了示踪技术。本书将只涉及到油田井间示踪技术在油藏工程研究中的应用。井间示踪测试从示踪剂的选择、用量设计、示踪剂的布局、示踪剂的注入、示踪剂的监测(采样频率、样品分析),直到最终结果的解释(定量或定性解释),构成了一个完整的井间示踪技术体系,任何一个环节出现问题,都会殃及井间示踪测试资料的可靠性。某些油田就是由于在某一环节出现了问题,导致示踪方案的失败,浪费了大量的人力物力,国内外都有这样的教训。

本书综合了国内外井间示踪技术的研究成果,力图对评价示踪剂的实验方法(示踪剂的筛选和示踪剂分配系数的测定)、方案设计、注入工艺、结果解释及矿场应用实例等方面,做比较详尽的介绍,希望能对读者在井间示踪技术方面有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

井间示踪技术/宋吉水等编著.

北京:石油工业出版社,2003.11

ISBN 7-5021-4432-3

I. 井…

II. 宋…

III. 油气测井-技术

IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 096335 号

石油工业出版社出版发行

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京昌平奔腾印刷厂印刷

*

787×960 毫米 16 开本 9.25 印张 125 千字 印 1—3000

2003 年 11 月北京第 1 版 2003 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4432-3/TE·3106

定价:29.00 元

前 言

井间示踪技术已有 60 多年的历史了,国内应用此项技术也已有 50 多年的历史。这项技术经历了由浅入深,由定性解释到定量解释的发展过程,至今,国外已有学者把这项技术和脉冲试井技术,看做是油藏工程研究不可缺少的手段。基于这种认识和其在油藏工程研究中的作用,许多学者也都参与到这项技术的开发和应用中来,使得这项技术在上个世纪 80 年代以后,得到了迅速的发展。

我国也是在上个世纪 80 年代之后,伴随着三次采油技术在油田中的应用和油田调整挖潜的需要,井间示踪技术也得到了广泛的应用发展,并获得了良好的效果。在指导油田开发的实践、认识油藏的非均质特征和三次采油提高采收率机理,以及提高原油产量等诸多方面发挥了作用,其经济效益是明显的。

本书作者在应用这项技术的实践中体验到,井间示踪测试是一项完整的系统工程,从示踪剂的选择、方案设计、示踪剂的注入和监测,直到测试结果的解释等,任何一个环节出现问题,都会殃及到测试结果的可靠性。国外有的学者甚至提出,如果没有一个认真负责的可靠采样人员的话,就不要实施这项(示踪剂测试)计划。

我们在总结大庆油田应用井间示踪技术实践和研究成果,并综合了国外研究成果的基础上,编写了本书。本书比较系统地论述了井间示踪技术的各个环节,并介绍了大庆油田和国外油田的应用实例,希望能从中得到一些研究思路,获得一些启发,以此来指导我们的井间示踪测试实践。

在编写本书的过程中,我们侧重于该项技术的实践性和可操作性,对有关的基本理论只做了简略的介绍。测试的每个环节,都是紧紧围绕满足基本理论要求和测试结果的最终解释的需要。在此基础上,我们详细地介绍了每个环节和实施过程的技术内容。特别是针对当前应用中的薄弱环节,比较详细地讨论了注入工艺及施工

要求和示踪剂筛选的实验装置及测定分配系数的实验装置。

我们要特别强调指出的是,井间示踪测试结果的另一重要应用领域是在建立和修改数值模拟地质模型方面。这一点往往被人们忽略了,希望在今后的工作中,能在该领域得到应用。

作者衷心地希望本书对从事于这方面技术研究和对这项技术感兴趣的技术人员,能够起到入门向导和参考作用,能为今后的井间示踪技术研究和应用奠定一个良好基础。如果本书能对读者有所启发和帮助,作者会感到由衷的高兴和欣慰。

由于作者的水平所限,文中难免存在错误和不当之处,请予以批评指正。

作 者

2003 年 8 月

目 录

第一章 概 述	(1)
第二章 示踪剂的流动机理	(5)
第三章 示踪剂的筛选	(9)
一、示踪剂的类型	(9)
二、示踪剂的筛选标准	(10)
三、示踪剂的吸附试验研究	(11)
四、几种常用的示踪剂及其特性	(17)
第四章 示踪方案设计	(21)
一、示踪剂用量设计	(21)
二、示踪剂的配置	(33)
三、示踪剂采出曲线的监测	(34)
第五章 示踪剂的注入	(37)
一、示踪剂的注入工艺	(37)
二、溶液的配制及注入浓度设计	(40)
三、示踪剂溶液的注入时间	(41)
四、施工要求	(42)
第六章 注入流体的分布和波及体积的计算方法	(43)
一、基本假设	(43)
二、注入流体的分布	(44)
三、注入水的井间波及体积	(48)
第七章 油藏非均质特征的研究方法	(53)
一、混合方程	(54)
二、示踪剂开采曲线	(55)
三、井网的示踪剂突破曲线	(59)
四、不同井网示踪剂开采曲线的关系	(63)

五、分层体系的示踪剂开采曲线	(66)
第八章 确定井间油层残余油饱和度的方法	(72)
一、机 理	(72)
二、色谱转换技术	(74)
三、示踪剂的选择	(79)
第九章 实验测定示踪剂分配系数	(80)
一、影响分配系数的几个因素	(80)
二、实验测定分配系数的方法	(82)
第十章 井间示踪矿场应用	(88)
一、体积波及状况	(88)
二、油层的非均质状况	(92)
三、测定井间残余油饱和度	(96)
四、认识注入流体的分布状况	(100)
五、提高采收率措施的效果评价及三次采油开采机理	
.....	(104)
六、描述油层的连续性	(114)
七、层系间或层间窜流及注入井井况	(119)
附录 A 实验测定示踪剂分配系数方法	(123)
一、静态平衡容器法	(124)
二、动力学法(柱流法)	(126)
三、Kapoor 试验方法	(128)
四、GRI 重复循环法	(132)
五、色谱柱流动特性法	(137)
参考文献	(140)

第一章 概 述

井间示踪测试是为了跟踪已注入的流体,向注入井中注入能够与已注入的流体相溶、且溶解了示踪剂的携带流体,然后再用流体驱替这个示踪剂段塞,从而标记已注入流体的运动轨迹,同时在生产井检测示踪剂的开采动态。这种利用跟踪注入流体在油层中运动状况,通过研究示踪剂的开采动态,研究油层特性和开采动态的方法就是井间示踪技术。它是一种直接测定油层特性的方法,生产井检测到的示踪剂浓度突破曲线,反馈了有关油层特性及开采现状的信息。这样我们就可以通过观察示踪剂在采油井中的开采动态,如示踪剂在生产井的突破时间,峰值的大小及个数、相应注入流体的总量等参数,进一步研究和认识注入流体的分布及其运动规律,和油藏的非均质特性。在综合研究基础上,制定可行的提高油田最终采收率的调整措施。

预先认识油藏平面和纵向上的非均质特征,对于设计和实施一个提高采收率(水驱、三次采油)方案来说是十分重要的。在实施任何一个流体注入方案过程中,大量的注入流体将首先进入高渗透条带,并从这一高渗透条带中采出,这种注入流体的不均匀分布及过早地采出,加剧了开采层系内的层间矛盾,严重地干扰了其他油层正常生产;油藏非均质性的另一不利影响是造成注入流体的平面不均匀分布。这些影响因素必然大大降低注入流体在油藏中的体积扫及效率和注入流体的利用率,并由此降低水驱或三次采油方法的效果,因此,在水驱和三次采油矿场试验中,人们为了防止昂贵的注入流体流失和提高该方法的效果,以及正确地评价该方法的有效性,为此,油藏工程研究的一项重要任务就是及早认识注入流体平面上的分布状况及油层纵向上的动用状况,为开采过程中采取相应地调整挖潜措施提供依据。

由于井间示踪测试的研究对象是井间关系,它的研究结果反映

了更大范围内的油层特性和油水井间的关系,因此示踪剂的开采动态反馈了油藏非均质特征及开发过程中注入流体分布的信息,是油田的管理及动态调整的重要依据,因而被油藏工程师们视为油藏工程研究中不可缺少的手段,而得到广泛应用。目前国外已向更深入的领域发展,应用井间示踪技术研究油层的物理化学特性,以及注入流体与油层的化学反应过程。

为开发动态史拟合及预测开采动态建立地质模型,以及在拟合过程中修改地质模型、调整参数提供依据,提高历史拟合的可靠性是井间示踪技术的另一重要应用领域,这一点往往被人们忽视了。因此,了解和掌握井间示踪技术,并将其应用于油藏工程研究中亦是油藏工程师们的一项基本功。

应用井间示踪技术至少已有 60 多年的历史,但直到 20 世纪 80 年代,国内仍停留在定性研究上,即仅仅研究注入流体的流动方向、水线推进速度、评价油层的连通关系及是否存在窜流通道等。

20 世纪 60 年代中叶,Brigham 和 Smith 提出了“示踪剂在五点井网中流动特性的预测方法”^[1]后,人们开始注意研究示踪测试的定量解释方法。L. Yuen 和 Brigham 在此基础上,于 1979 年提出了定量解释五点井网示踪剂开采动态,确定油层的分层特性方法^[2]。但这种方法是一种试凑方法,应用起来相当繁琐、费时。

Abbaszadeh-Deghani M. 和 Brigham W. E. 于 1982—1983 年提出了流度比为 1 的条件下,根据井间示踪剂流动状况,确定油藏非均质特性的分析程序^{[3][18]}。该程序改进了 L. Yuen 的求解方法,加入了优化程序,通过内部迭代直接求解出油层的分层孔隙度厚度乘积和各动用层段所占总地层系数的比例,并计算出累积产水量和示踪剂浓度的关系。用这一组数据,我们可以评价拟合结果是否达到要求。

这一程序的最大优点是,它只需要注入参数和示踪剂的开采动态数据。它给出的数据是注采井间的动用状况,这有助于我们识别出平面上动用状况的不均匀性,找出剩余油的分布位置,这是一般测试方法无法完成的。

S. R. Allison 等人于 1991 年应用德克萨斯大学开发的综合三维化学驱组分模拟软件,成功地模拟了多井、多种示踪剂方案^[4]。

Akhil Datta Gupta 等人于 1992 年提出了“样板曲线”研究油藏非均质性方法^[5]。

S. G. Ghorl 等人于 1992 年提出了应用井间示踪资料,“确定渗透率地质统计参数方法”^[6]。

Maji Saad 等人^[7]于 1996 年提出了应用井间示踪剂开采资料,“优序排列地质统计模型方法”。

人们同时提出了用示踪剂的开采动态,计算流体的平面分布状况和注入流体的波及体积的计算方法。这些数据也为我们认识注入流体平面分布不均匀性和驱替效果,及应采取相应的调整措施提供了依据。

1971 年 Cook 就应用色谱理论,提出了测定油层流体饱和度方法^[8]。但当时由于缺少合适的示踪剂和解释方法,而阻碍了这一技术在油田上的应用。但在 80 年代后,在放射性示踪技术的推动下,使应用这一方法成为可能。1989 年 J. S. Tang 和 K. N. Wood 提出了应用井间示踪技术确定水淹油层残余油饱和度方法,并成功地应用于 Leduc D—2A 油藏^[9],和 Judy Creek BHL “A”油藏^[10]中,确定了水驱残余油饱和度。但这项技术需要在整个测试期间,严格地控制注采井间和周围注、采井的工作制度,防止地下流场发生变化。由于井间示踪测试需要较长的时间才能完成,很难满足这一要求,而使这项技术的推广应用受到了一定的限制。

总之,井间示踪测试结果的解释经历了由定性到定量解释的发展过程,而且这一研究还在不断地深入,开发出新的应用领域,归纳起来,目前主要应用于以下几个方面:

- (1)研究注入流体波及的体积;
- (2)研究注入流体在油层中的平面分布状况,和注入流体方向性流动趋势;
- (3)研究油层的非均质特征及动用状况;
- (4)测定油层中的残余油饱和度;

- (5)评价提高采收率措施效果,及认识三次采油开采机理;
- (6)描述油层的连续性;
- (7)研究层系间或层间窜流和注入井的井况;
- (8)研究不同的注入流体的相对速度;
- (9)描述油层内的物理化学特性。

为了满足定量解释示踪剂开采资料的需要,人们对示踪剂的使用,也提出了更为严格的要求。1962年 Greenkorn 等人就指出^[11],由于示踪剂的吸附—脱附作用,将导致示踪剂滞后于注入的流体,而不是同注入流体一起运动,如果再考虑到扩散和弥散作用的影响,将导致示踪剂前缘散布得更远。为此,他提出了选择示踪剂的标准,并进行了大量的室内实验研究。

Hutchins 则对油田使用过的示踪剂进行了综合评价^[12],比较详尽地从环保和安全角度描述了几种常用示踪剂的特性。

1999年 K. Garder 等人在油藏工程研究中,使用多种示踪剂测试的益处的研究报告^[13]中指出,示踪剂同油层岩石和流体间的物理化学作用,将导致示踪剂运动的滞后,进而影响井间示踪的最终解释结果。

综上所述,井间示踪测试技术是认识油藏的非均质特征和评价二次、三次采油方法提高采收率机理的重要油藏工程手段,它能够 为油藏工程研究提供范围广泛、内容极为丰富的信息,有些内容是其他测试手段无法获得的,从而为油田的调整挖潜,提高油田管理水平提供重要依据。在应用这项资料时,应结合具体情况,灵活地对获得的资料进行认真地分析。

应当指出,由井间示踪测试所获得的大量信息,还应与其他方面的油藏工程研究结果相结合,才能提出扎实、可靠的油田(或三次采油矿场试验)调整措施,以及正确认识和解释油田开发过程中出现的各种现象。

第二章 示踪剂的流动机理

示踪剂在多孔介质中的运动机理,同注入流体是一样的,同样受对流作用和水动力学弥散作用的控制。

对流作用是受达西定律支配的流体整体运动,这种流动是由作用于该系统上的压力梯度产生的,油藏的这种压力梯度是由注采井间的压力差,或流动着的流体密度差而建立起来的,对流作用主要取决于井网的形状和操作条件,如这些井的流动速度。

Brigham 和 Magshood Abbaszadeh-Dehaghani 的研究指出^{[1][3][14]},流体的水动力学弥散是由两部分组成的:分子的扩散和机械弥散。分子的扩散产生于两种流体之间所建立的组分浓度梯度,它与流动速度无关,而机械弥散则是流体质点在多孔介质中迂曲的孔道中运动的结果。从微观的角度看,弥散是由于示踪剂流过单一孔道并再次聚合而产生的速度变化引起的。在二维流动中,这种特性是由在流动方向上(经向)出现的和垂直于流动方向上(纬向)出现的机械混合组成。

由于流体的水动力学弥散结果,示踪剂逐步扩展,超出了仅有流体对流作用时它应占有的区域,从而增加了一部分混合流动区域。扩展的数量(混合)取决于多孔介质的分散程度和流动体系的几何形状,因此示踪剂的开采曲线呈现了一个波峰形。

试验表明,混合作用在低速下受分子扩散的控制,而在高速下受机械弥散的控制,并且纬向上的混合系数比经向上的混合系数小的多。因此,在大多数情况下,分子的扩散和纬向上的混合作用是可以忽略不计的。

Magshood Abbaszadeh-Dehaghani 和 Brigham 为进一步说明示踪剂的流动特性,研究一个假想的均质体系^[14]。示踪剂被以一定的浓度连续注入到该体系中,同时假设未出现混合现象,在此基础上研究井网对示踪剂开采动态的影响。图 2—1 示出了流体在四分之一五

点井网中的位置,该井网的原始状态充满了 A 流体,注入了 B 流体后,如果没有混合现象发生,它存在一个急剧变化的前缘,在生产井中由于几何形状的影响,采出来的是流体 A 和流体 B 的混合物,该体系的流线恰当地解释了突破曲线的演变,流动的流体 B 的百分数可由生产井上的角度准确地确定出来。

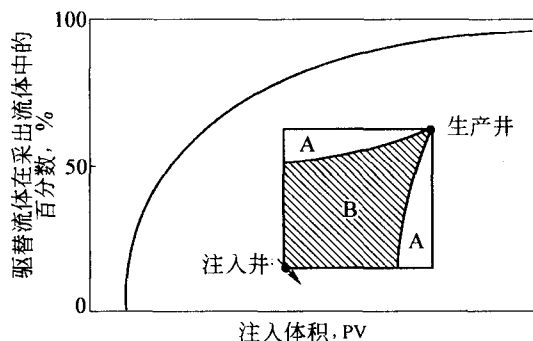


图 2—1 无混合作用的两种流体驱替中
前缘位置和突破曲线

现在让我们再来研究注入的流体 B 只是一个很小段塞的情况,其后面是驱替流体 A,仍假定未出现混合现象。图 2—2 示出了流体 B 在井网中的位置。流动的流体 B 流向生产井中的百分数可由进入该井的流体 B 总角度来表示,该角度也受驱替 B 流体的 A 流体的流线影响,可以看到相同的突破特征,但是,驱替 B 流体的流体 A 的曲线在横坐标上(注入体积)滞后了,数量上等于流体 B 的注入体积,图 2—2 给出了这一概念,它给出了沿 X 轴驱替的前缘和后缘两条突破曲线。

在该井流动的流体 B 的浓度是这两条曲线垂向距离之差,在图 2—2 中以阴影面积表示。可以看出,即使没有发生混合作用,生产井采出的流体 B 的浓度也始终小于 100%,这是井网几何形状对流动影响的必然结果。但是我们应该注意到,流体 B 在油层中的流动浓度远大于示踪剂的采出浓度。

实际上,注入的示踪剂段塞浓度,在油层中是要同油层内流体发生混合作用的,在弥散的过程中逐步被稀释。图 2—2 中这种混

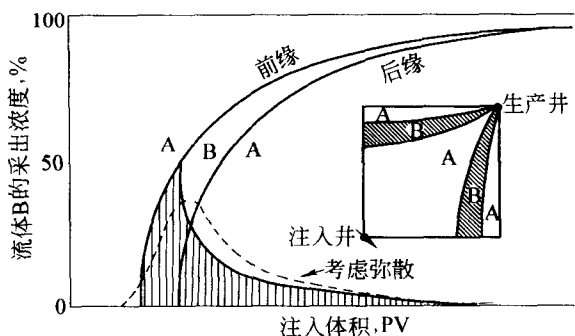


图 2—2 流体 B 的段塞前缘位置和突破曲线

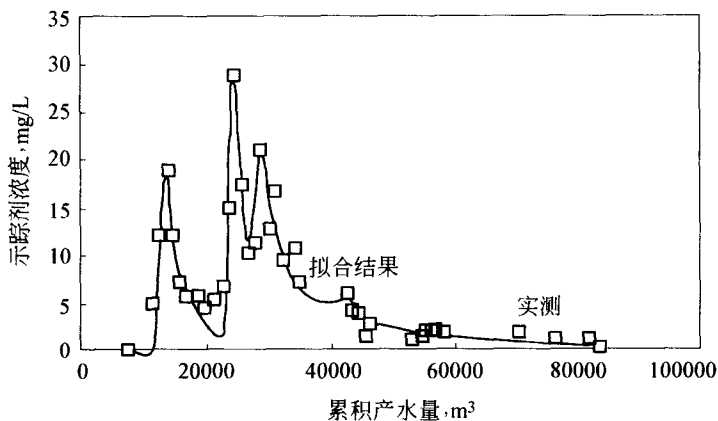


图 2—3 5—35 井 6 层的示踪剂开采曲线

合作用是以虚线表示的,突破时间较阴影线稍微提前了些,峰值的高度也降低了,并滞后了。

图 2—1 和图 2—2 仅研究了井网内的流动,在一口实际的生产井中还存在井网外的稀释作用,这将进一步降低从该井采出的示踪剂浓度。

当井间示踪技术应用于多层体系时,注进每个层示踪剂的数量,取决于每个单层的地层系数 Kh 与整个 Kh 之比,而突破时间则取决于该层的 K/ϕ 。示踪剂开采曲线是每个层采出浓度叠加的结果,致使开采曲线出现多个峰值。根据开采曲线上有多少个峰值,

我们就可以大体上推断,该井至少有多少个主要产液层段,图 2—3 示出了六个层的示踪剂开采曲线,和它们的拟合结果。图 2—3 中的方框点为实测点,实线为拟合结果。当然,如果经过长时间采样后,仍未出现延展的尾部,而取样时间又不可能拖的很久,这样就有可能采集不到一些较差油层的开采特征,但这不会影响我们对油藏的整体评价。

第三章 示踪剂的筛选

大量研究指出,示踪剂的物理化学特性及其与油层岩石和流体的相互作用程度,将直接影响示踪剂的流动特性。它直接关系到示踪剂能否跟踪注入流体,反馈注入流体的流动特性,并对最终解释结果产生影响。因此,选择出适合于本油田示踪测试的示踪剂,是井间示踪测试的重要环节。因此在编制示踪测试方案之前,必须认真地选择示踪剂,以保证示踪测试获得成功。

一、示踪剂的类型

综合分析文献报导,目前使用的示踪剂可以分为五种类型:水溶性化学示踪剂、水溶性放射性示踪剂、气体示踪剂、非放射性同位素示踪剂;稳定同位素(Isotag)示踪剂。

其中非放射性同位素示踪剂,虽然在注入和采出过程中是安全的、无放射性的,而且样品的分析精度高。但它的样品分析需要在地面条件下,在反应堆中或用中子源照射将其激活,一般油田很难满足这一要求,所以其应用只是试验性的,难以推广。

稳定同位素(Isotag)示踪剂是低碳数的卤化有机酸^[15]。它们在水中很容易离解生成离子核素,如果完全同岩石接触,只有少量的相互作用。这些酸的阴离子不容易分配进入油层残余油中,它们在热力学上是稳定的,而且抗细菌降解。用气相色谱直接分析低碳数的卤酸的最新研究成果,加速了分析速度,并降低了检测极限,这样就使分析大量的样品相对简单了。但目前只有 Isotag 公司掌握它的制备和分析方法,因此还未广泛地应用。

基于上述理由,这里仅介绍前三种类型示踪剂。

水溶性化学示踪剂中可分为以下几种类型:

无机盐类,如氯盐、溴盐、碘盐、硫氰酸盐、硝酸盐类等。这些都

是比较容易得到的,分析也比较简单,但是有些油田油层流体中常含有高浓度的氯和溴,而硝酸盐常常受到细菌和油层还原环境的影响而发生分解,因此在使用时,一定注意油田的具体条件。

醇类示踪剂,如甲醇、乙醇、丙醇、异丙醇等。这类示踪剂价格低廉,特别适用于计算残余油饱和度,但它们易受细菌降解的影响。

染料类,如荧光黄和若丹明等。这类示踪剂虽然在价格和样品分析上都占有优势,但它们很容易吸附到油层岩石上和分配到油相中,所以它们不适合于需要定量解释的示踪测试,只能应用到定性解释的测试中,如研究油层的连续性、层间或层系间是否存在窜流,油层是否存在裂缝等。

单氟苯(甲)酸也是一种较好的水溶性示踪剂。其他含氟苯酸,如2,6双(三氟甲基)苯酸(2,6-TFMBA),2,4双(三氟甲基)苯酸(2,4-TFMBA),5-氟,2-甲基苯酸(5F-2-MBA)等,则适合于在测定井间残余油饱和度时,作为分配示踪剂使用。

水溶性放射性示踪剂,如氚水(HTO)、碳14标记的硫氰酸盐(^{14}CNS),钴60盐 $[\text{}^{60}\text{Co}(\text{CN})_6]$,硫35,氯36,钠22等。在使用放射性示踪剂时,应采取高度安全措施,特别是那些 γ 射线的同位素。同时要特别注意环保问题。目前只有放射弱 β 射线,低毒性、半衰期长(12.4年)的氚水获得了比较广泛地应用。

气体示踪剂包括氚标记的烃类(如甲烷、乙烷、丙烷)、氦 85 ,六氟化硫,氟利昂,全氟碳、氙等。

二、示踪剂的筛选标准

获得完整、准确的示踪剂开采动态,是井间示踪测试结果解释的基础,为此必须认真地选择示踪剂。在选择示踪剂时,应考虑到示踪剂的物理化学性质、油藏岩石性质、油田水及注入水性质、经济以及安全和环境保护等诸多因素。井间示踪的目的不同,其筛选标准也应有所不同。

根据国外文献报导^{[10][12][13]}和大庆油田的实践经验,在井间示踪的目的是研究油层的非均质特性和注入流体分布状况时,示踪剂