



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03146509.9

[45] 授权公告日 2006年10月11日

[11] 授权公告号 CN 1279370C

[22] 申请日 2003.7.3 [21] 申请号 03146509.9

[71] 专利权人 石油大学(北京)

地址 102249 北京市昌平区府学路20号

[72] 发明人 肖立志

审查员 赵景焕

[74] 专利代理机构 北京同立钧成知识产权代理有限公司

代理人 刘芳 刘薇

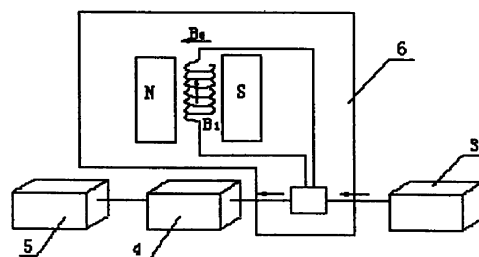
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

[54] 发明名称

测量井下套管内流体特性的探测器及探测系统

[57] 摘要

一种测量井下套管内流体特性的探测器，包括磁铁、线圈和壳体，其中心开设通孔，孔壁为非导磁材料，磁铁设在壳体与孔壁所围设的空间内，通孔建立稳定静磁场 B_0 ，形成极化区；线圈嵌设在磁铁与通孔间，位于探测器上半部，线圈包括发射线圈和接收线圈，与外部的发射器、接收器相连，发射线圈在静磁场 B_0 的方向上施加交变电磁场 B_1 ，其频率与静磁场中原子核的进动频率相同，形成共振区；采用该探测器的探测系统，包括发射器、探测器、接收器和数据采集存储器。本发明结构简单、测量方便快捷，不受井下条件限制，实际测量值与理论值接近，可定点测量、连续测量，用于井底条件金属套管、一般管流或化学加工过程中流体特性的实时观测。



1、一种测量井下套管内流体特性的探测器，其特征在于：该探测器由磁铁、线圈和将其整体包覆的壳体组成，探测器中心开设有供流体流过的通孔，通孔的孔壁为非导磁材料，磁铁设在壳体与通孔壁所围设的空间内，在探测器中心通孔建立稳定静磁场 B_0 ，该磁场 B_0 将通过通孔的流体极化，形成极化区；线圈嵌设在磁铁与中心通孔之间，其设置位置位于探测器的上半部，线圈包括发射线圈和接收线圈，发射线圈和接收线圈分别与外部的发射器和接收器相连，发射线圈在稳定静磁场 B_0 的方向上施加一个交变电磁场 B_1 ，其频率与静磁场中原子核的进动频率相同，使从中心通孔流过的流体产生核磁共振，形成共振区；

所述的探测器内部，极化区域和共振区域内的磁场均匀分布，将探测器的壳体和中心通孔壁所围设的内部空间沿轴向等分，磁铁的 N 极和 S 极分别充满在探测器内部的两等分空间内；

所述的发射线圈和接收线圈同向缠绕，且发射线圈的长度比接收线圈长，并使接收线圈所采集的 CPMG 自旋回波串中每个回波来自于同等体积的流体；

所述的探测器壳体外部的磁场强度为零，使探测器可以在井下套管内上、下自由移动。

2、根据权利要求 1 所述的测量井下套管内流体特性的探测器，其特征在于：所述的交变电磁场 B_1 与稳定静磁场 B_0 的方向彼此垂直。

3、一种采用权利要求 1 或 2 所述的测量井下套管内流体特性的探测器的探测系统，其特征在于：它包括发射器、探测器、接收器和数据采集存储器，发射器发送信号到探测器，使通过探测器的流体产生核磁共振，探测器流体产生核磁共振后探测量得到的信号发送给接收器，接收器与数据采集存储器相连，接收器将测量到的信号转换成数据发送到数据采集存储器存储，采集核磁共振信号并处理。

4、根据权利要求3所述的探测系统，其特征在于：所述的测量数据为采用饱和恢复法测量套管中流体的纵向弛豫时间。

测量井下套管内流体特性的探测器及探测系统

技术领域

本发明涉及一种测量流体特性的探测器及探测系统，尤其是一种在井下套管内或一般管流中，测量流体持率和粘度的探测器及探测系统，属于石油测井、化学加工及工业控制技术领域。

背景技术

持率和粘度是管流的重要描述参数。持率在流体力学中称为面积含量，其物理意义是表示多相流体混合流通截面上，每一相流体各自所占的相对比例。持率又称为就地体积分数，可以表示流动管道某一位置实际存在的各相流体的相对体积大小。对于具有确定尺寸的套管，如果把单位长度上的管内体积看作一个单位，那么此单位体积内某一相的持率可以被看作是这一相在套管中的饱和度。粘度定义为流体中任一点上单位面积的剪应力与速度梯度的比值，它是流体、包括气体或液体内摩擦而引起的阻力，因此，流体的粘度即为流体内部某一部分相对于另一部分流动时摩擦阻力的量度。流体粘度的大小对于它在地层中或管路中的流动计算是很重要的参数，粘度的高低表明流体流动的难易，粘度越大，流动阻力越大，越难流动。

目前，在油气田测井中，还没有在井底条件下测量流体粘度的方法。井内流体持率的测量方法主要有密度法和电容法。测量流体密度的方法包括压差密度计测井和伽玛密度计测井；电容持水率计按其传感器的测量方式可分为环空式电容法持水率计和取样式电容法持水率计。下面对现有的测量技术进行一下简单的介绍：

1、压差密度计

压差密度计又称密度梯度计，利用两个相距 2 ft 的压敏波纹管，测量井筒内相应间距的压力差值。这个压力差值主要与流体的重力梯度有关，并受到流体流动的动力梯度和磨阻梯度的影响。目前，利用压差密度计测井存

在两个难题：其一，压差密度计测井需要进行精确的仪器刻度和严格的质量控制。其二，在井斜较大和流速很高的情况下，特别是在水平井中，已无法通过校正井斜和磨阻的影响来准确求取流体的体积密度。

2、伽玛密度计

伽玛流体密度计又称放射性流体密度计，利用流体对伽玛射线的吸收特性来测量流体密度。当窄束伽玛射线穿过物质时，与物质发生光电效应、康普顿效应和电子对效应。伽玛流体密度计是利用置于油道中的伽玛源射线与穿过流道的流体发生康普顿效应，同时利用计数器测量记录反应后的伽玛射线强度。然后根据其衰减特性求出流体的体积密度。伽玛流体密度计由扶正器居中测量，测量时，需要限制测井速度，以避免时间常数 τ 的影响。由于轻质相流体趋向于在管道中央流动，测井值可能与管内实际存在的流体平均密度有一定的差异；并且，放射性测井均存在其本身难以克服的缺点，即测量结果受统计误差的影响，因此，伽玛流体密度计的测量精度较低，约为 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 。

3、环空式电容法持水率计

环空式电容法持水率计是通过柱状电容式探头，利用流体作为电介质测量持水率。在传感器绝缘层与外电极（仪器外壳）之间的环形空间内设计适当的截面积，使流体通过时不会改变原有的流动状态。仪器将内圆柱作为震荡电路的一部分，震荡频率是环形空间流体介电常数的函数，测量并记录仪器的频率响应，然后间接求出井底的持水率。理论分析、实验研究和实际应用表明，环空式电容法持水率计有两点不足：一是测量响应非线性；二是仪器的分辨能力与混合流体分布的状态有关，亦即受流型影响。环空式电容法持水率计应用的有利条件是“油包水”的分布状态，由于油包水状态有时可能持续到 Y_w 约为60%左右，所以仪器测量可能识别的持水率上限为 $Y_w = 60\%$ ，但其可靠的测量是在 $Y_w < 30\%$ 的情况下。

4、取样式电容持水率计

取样式电容持水率计，其结构仍为一个柱状电容器，只是在进液口和出液口分别加了一个球阀和单流阀，采用二极管泵电路将取样室总电容转换为电位差值记录并输出，然后根据实验建立的关系图版将测井读数转换为持水率值。实践证明，取样式电容持水率计虽然对流体持水率的分辨能力有所提高，但是又产生了一些新问题：一是在探头内难以实现油、水完全分离，测量速度较慢，实际测量与理论基础和实验刻度容易相背离；二是难以准确测量井眼内实际存在的水的相对比例；三是取样式电容持水率计只能定点测量，无法连续测量。

发明内容

本发明的目的在于针对现有技术的不足，提供一种基于核磁共振测量井下套管内流体特性的探测器及探测系统，测量方便，对测量仪器刻度的精确度要求不高，不要求严格的质量控制，测量更快捷。

本发明的又一目的在于针对现有技术的不足，提供一种基于核磁共振测量井下套管内流体特性的探测器及探测系统，不受井斜度大小、井内流体流速和井内混合流体分布状态的限制。

本发明的再一目的在于针对现有技术的不足，提供一种基于核磁共振测量井下套管内流体特性的探测器及探测系统，实际测量值与理论值更接近，且不但可以定点测量，还可以实现连续测量，实现井底条件或地面化学加工过程中，流体特性的实时观测。

本发明的目的是通过如下技术方案实现的：

一种基于核磁共振测量井下套管内流体特性的方法，该方法包括：

步骤 1：使流体进入极化磁场进行极化；

步骤 2：对极化后的流体施加交变电磁场，形成共振磁场，使其产生核磁共振；

步骤 3：采集所述的核磁共振信号，即：纵向弛豫时间（ T_1 ），并根据纵向弛豫时间与流体特性的关联关系对其进行处理，得到流体特性数据。

步骤 2 中的交变电磁场与共振磁场的方向彼此垂直。

步骤 3 中的关联关系包括：

由 $\eta_1 = 5 \times 10^{-8} T/D$ ，求取流体的粘度 η_1 ，其中，D 为扩散系数，其数值为常数，T 为流体的测量温度；

或者由 $\eta_2 = 9.6 \times 10^{-3} T/T_1$ ，求取原油粘度 η_2 ，T 为流体的测量温度；

或者由 $\rho = T_1 \times T^{1.5} / 1.57 \times 10^5$ ，求取天然气密度 ρ ，T 为流体的测量温度；

或者由 $T_1/D = 2 \times 10^5 / f(\text{GOR})$ ，求取气/油 比值；其中，f(GOR) 的具体函数关系由实验图板确定。

或者由 $HI = \rho \times 9R / (12+R)$ ，求取含氢指数 HI， ρ 为天然气密度，由上述计算确定。R 为 H: C 比值，即氢碳比值。

一种采用上述方法测量套管内流体特性的探测器，该探测器由磁铁、线圈和将其整体包覆的壳体组成，探测器中心开设有供流体流过的通孔，通孔的孔壁为非导磁材料，磁铁设在壳体与通孔壁所围设的空间内，在探测器中心通孔建立稳定静磁场 (B_0)，该磁场 (B_0) 将通过通孔的流体极化，形成极化区；线圈嵌设在磁铁与中心通孔之间，其设置位置位于探测器的上半部，线圈包括发射线圈和接收线圈，发射线圈和接收线圈分别与外部的发射器和接收器相连，发射线圈在稳定静磁场 (B_0) 的方向上施加一个交变电磁场 (B_1)，其频率与静磁场中原子核的进动频率相同，使从中心通孔流过的流体产生核磁共振，形成共振区。交变电磁场 (B_1) 与稳定磁场 (B_0) 的方向彼此垂直。

探测器内部，极化区域和共振区域内的磁场均匀分布，将探测器的壳体和中心通孔壁所围设的内部空间沿轴向等分，磁铁的 N 极和 S 极分别充满在探测器内部的两等分空间内。

发射线圈和接收线圈同向缠绕，且发射线圈的长度比接收线圈长，并使接收线圈所采集的 CPMG 自旋回波串中每个回波来自于同等体积的流体。

为了保证探测器可以在井下套管内上、下自由移动，探测器壳体外部的磁场强度为零。

一种采用上述探测器测量套管内流体特性的探测系统，它包括发射器、探测器、接收器和数据采集存储器，发射器发送信号到探测器，使通过探测器的流体产生核磁共振，探测器流体产生核磁共振后探测测量得到的信号发送给接收器，接收器与数据采集存储器相连，接收器将测量到的信号转换成数据发送到数据采集存储器存储，采集核磁共振信号并处理。

测量数据为采用饱和恢复法测量套管中流体的纵向弛豫时间。

测量数据通过探测器停留在管井内部的某一固定位置的定点测量，或者将探测器进行以一定的速度在管井内移动的状态进行连续测量所得。

综上所述，本发明具有如下特点：

- 1、测量方便，对测量仪器刻度的精确度要求不高，不要求严格的质量控制，测量更快捷。
- 2、不受井斜度大小、井内流体流速和井内混合流体分布状态的限制。
- 3、实际测量值与理论值更接近，且不但可以定点测量，还可以实现连续测量，实现井底条件或地面化学加工过程中，流体特性的实时观测。

附图说明

图 1 为现有核磁共振测量装置的基本构成示意图；

图 2 为本发明探测器的纵向剖面结构示意图；

图 3 为本发明探测器共振区的横截面结构示意图；

图 4 为本发明探测器极化区的横截面结构示意图；

图 5 为本发明核磁共振测量系统结构示意图；

图 6 为本发明 NMR 测量的含水量与原油实际含水量的关系图；

图 7 为本发明定点测量和移动测量时 T1 的测量结果对比图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明的技术方案进行详细地说明。

如图 1 所示，为现有核磁共振测量装置的基本构成示意图，从图 1 可知，常规核磁共振（NMR）装置由磁体 1、线圈 2、脉冲序列发射器 3、NMR 信号接收器 4、数据采集和存储装置 5 组成，其连接关系如图 1。核磁共振以往在医学领域的应用比较多，而在石油测井、化学加工及工业控制技术领域的应用较少，在该领域应用的工作原理和相关详细说明，在科学出版社于 1998 年出版的《核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用》一书中均有所揭示，该书作者为肖立志。

核磁共振的基本原理在于：磁体产生静磁场 B_0 ，对磁场中的原子核进行磁化，核磁距在静磁场中进动，频率为 $\omega = \gamma \cdot B_0$ 。发射线圈发射一个与 B_0 垂直的交变电磁场 B_1 ，当 B_1 的频率与核磁距的进动频率相等时，便产生核磁共振，可以观测到核磁共振信号。具体来说，利用核磁共振对流体特性进行测量，主要是在 MNR（核磁共振）特性与流体特性之间建立关联关系。前人的研究表明，NMR 特性与流体表征参数之间，有很好的相关性，其具体转换关系如下表所示。

表 1:

MNR 特性	流体特性	转换关系
扩散系数 D(常数)	粘度 η	$\eta = 5 \times 10^{-8} T/D$ (T 为温度)
纵向弛豫时间 T1	原油粘度 η	$\eta = 9.6 \times 10^{-3} T/T1$ (T 为温度)
纵向弛豫时间 T1	天然气密度 ρ	$\rho = T1 \times T^{1.5} / 1.57 \times 10^5$
D&T1	气/油 比值	$T1/D = 2 \times 10^5 / f$ (GOR)
含氢指数 HI	密度 ρ ，H: C 比值 R	$HI = \rho \times 9R / (12+R)$

根据上表所列的 NMR 特性与流体表征参数之间的转换关系，通过核磁共振的测试装置将纵向弛豫时间 T1 测量记录，利用上述转换公式，可导出相应的流体特性参数。

本发明套管内观测流体特性的核磁共振装置，其核心部件为探测器，

如图 2 所示,为本发明探测器的纵向剖面结构示意图。从图 2 可知,探测器由磁铁 20、线圈 30 和将其整体包覆的壳体 10 组成,探测器中心开设有供流体流过的通孔 40,通孔 40 的孔壁为非导磁材料,磁铁 20 设在壳体 10 与通孔 40 壁所围设的空间内,在探测器中心通孔 40 建立稳定静磁场 B_0 ,该磁场 B_0 将通过通孔 40 的流体极化,形成极化区 200;线圈 30 嵌设在磁铁 20 与中心通孔 40 之间,其设置位置位于探测器的上半部,所述的线圈 30 包括发射线圈 302 和接收线圈 301,发射线圈 302 和接收线圈 301 分别与外部的发射器和接收器相连,发射线圈 302 在稳定静磁场 B_0 的方向上施加一个交变电磁场 B_1 ,其频率与静磁场中原子核的进动频率相同,使从中心通孔 40 流过的流体产生核磁共振,形成共振区 100;交变电磁场 B_1 与稳定磁场 B_0 的方向彼此垂直。

探测器内部,极化区域 200 和共振区域 100 内的磁场均匀分布,将探测器的壳体 10 和中心通孔 40 壁所围设的内部空间沿轴向等分,磁铁的 N 极和 S 极分别充满在探测器内部的两等分空间内。

发射线圈 302 和接收线圈 301 同向缠绕,且发射线圈 302 的长度比接收线圈 301 长一倍,接收线圈 301 所采集的 CPMG (人名缩写) 自旋回波串中每个回波来自于同等体积的流体。

探测器壳体 10 外部的磁场强度为零,使探测器可以在井下套管内上、下自由移动。

如图 3、图 4 所示,分别为本发明探测器共振区、极化区的横截面结构示意图。从图中可了解共振区域 100 和极化区域 200 内磁铁 20、线圈 30、壳体 10 和通孔 40 之间的结构关系。

如图 5 所示,为本发明核磁共振测量系统结构示意图,它包括发射器 3、探测器 6、接收器 4 和数据采集存储器 5,发射器 3 发送信号到探测器 6,使通过探测器 6 的流体产生核磁共振,探测器 6 流体产生核磁共振后探测量得到的信号发送给接收器 4,接收器 4 与数据采集存储器 5 相连,接收器 4

将测量到的信号转换成数据发送到数据采集存储器 5 存储, 采集核磁共振信号并处理。

测量数据为采用饱和恢复法测量套管中流体的纵向弛豫时间。

测量数据是通过探测器停留在管井内部的某一固定位置的定点测量或者将探测器进行以一定的速度在管井内移动的状态进行连续测量所得到的。

具体的测量过程是这样的: 将探测器 6 置于井下套管中, 探测器 6 的外围磁场强度为零, 因而可以很容易地置于金属套管中进行测量。在探测器 6 内腔建立一个稳定静磁场 B_0 , 当流体在其中穿过时, 流体中的氢核受到 B_0 的作用而被磁化, 并以频率 ($\omega_0 = \gamma B_0$) 进动。在垂直于静磁场的方向再加一个交变电磁场 B_1 , 并且让其频率 ($\omega = \omega_0$), 核自旋系统将产生核磁共振。以一定地脉冲序列, 可以实现对流体的弛豫特性进行测量。

采用本发明所提供的套管内观测流体特性的核磁共振装置, 测量套管中流体的纵向弛豫时间 T_1 , 然后利用 NMR 特性与流体表征参数之间的转换关系, 求取流体的持率和粘度。测量过程中, 采用饱和恢复法, 对流体的纵向弛豫过程进行观测。该方法为现有核磁共振领域内的成熟技术。记录纵向弛豫恢复曲线, 并对恢复曲线进行多指数拟合, 得到 T_1 分布, 通过对油、气、水各相位置的确定, 求取各相 T_1 对应的覆盖面积, 从而求取油、气、水的相持率。通过油、水的纵向弛豫时间和粘度的定量关系, 确定油和水的粘度。通过天然气的纵向弛豫时间, 计算其密度和含氢指数。至此, 描述流体特性的参数就都能够得到了。

测量数据是通过探测器停留在管井内部的某一固定位置的定点测量或者将探测器进行以一定的速度在管井内移动的状态进行连续测量所得到的。

流体中含水量的确定方法是这样的: 流体流经探测器时, 由饱和恢复法测量得到纵向弛豫信号, 再经过多指数处理, 得到纵向弛豫时间 T_1 分布, 再 T_1 分布中取得油与水的 T_1 及其谱面积大小。设水的谱面积为 S_w , 油的谱面积为 S_o , 那么, 含水量为: $H_w = S_w / (S_w + S_o)$ 。

对流动状态下 NMR 纵向弛豫过程的测量方法、NMR T1 分布含水量与实际含水量的关系等进行了实验观测。结果表明，流动状态下 NMR 纵向弛豫时间的测量是完全可行的，由 NMR T1 得到的含水量与实际含水量有很好的相关性，如图 6、图 7 所示，分别为本发明 NMR 测量的含水量与原油实际含水量的关系图和本发明定点测量和移动测量时 T1 的测量结果对比图。

图 6 给出了 NMR T1 测量的含水量与 T2 实际含水量的关系，两者在含水量较低时非常符合，充分说明了该装置测量的准确性。

图 7 对比了静止状态与流动状态的 NMR 纵向弛豫测量，在流速为每秒 1 升的条件下，两者的饱和恢复曲线 TW 分布完全重合，如图 7a 所示；静止状态和流动状态 T1 分布也都完全重合，如图 7b 所示。

最后所应说明的是，以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制，尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明，本领域的普通技术人员应当理解，可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换，而不脱离本发明技术方案的精神和范围，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

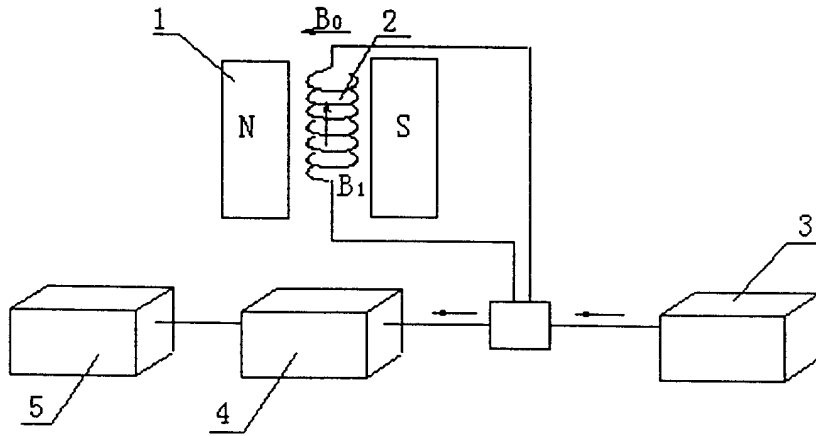


图 1

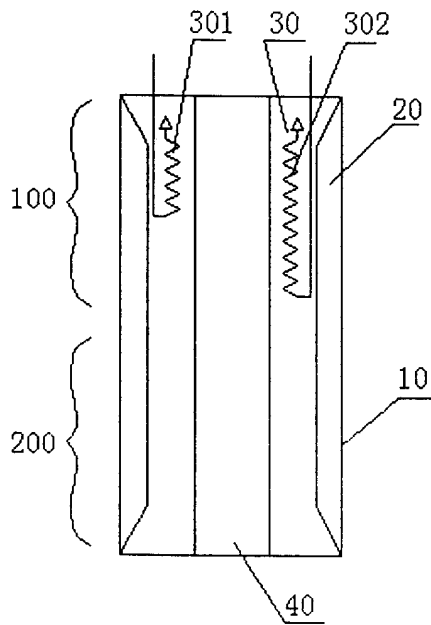


图 2

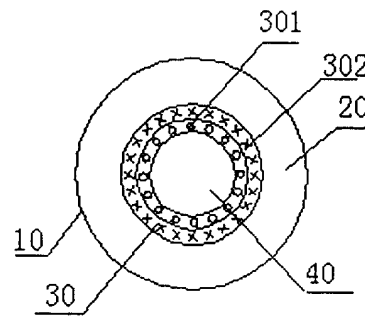


图 3

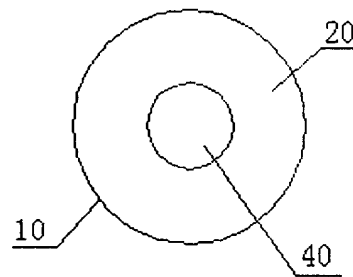


图 4

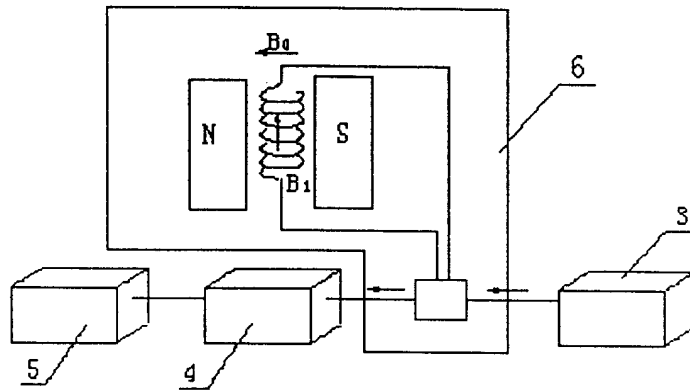


图 5

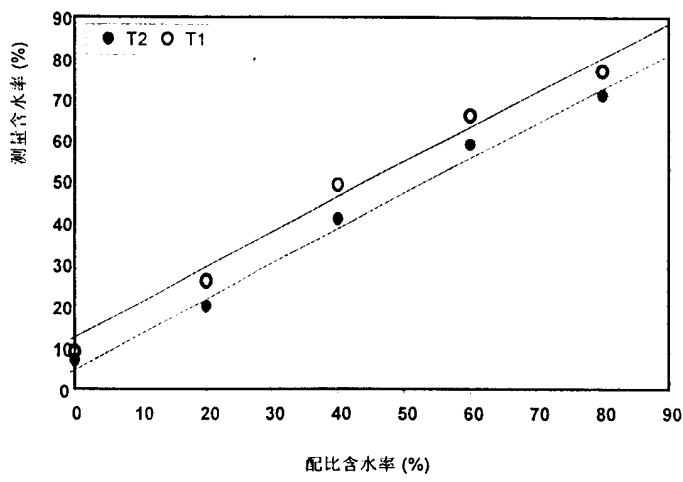


图 6

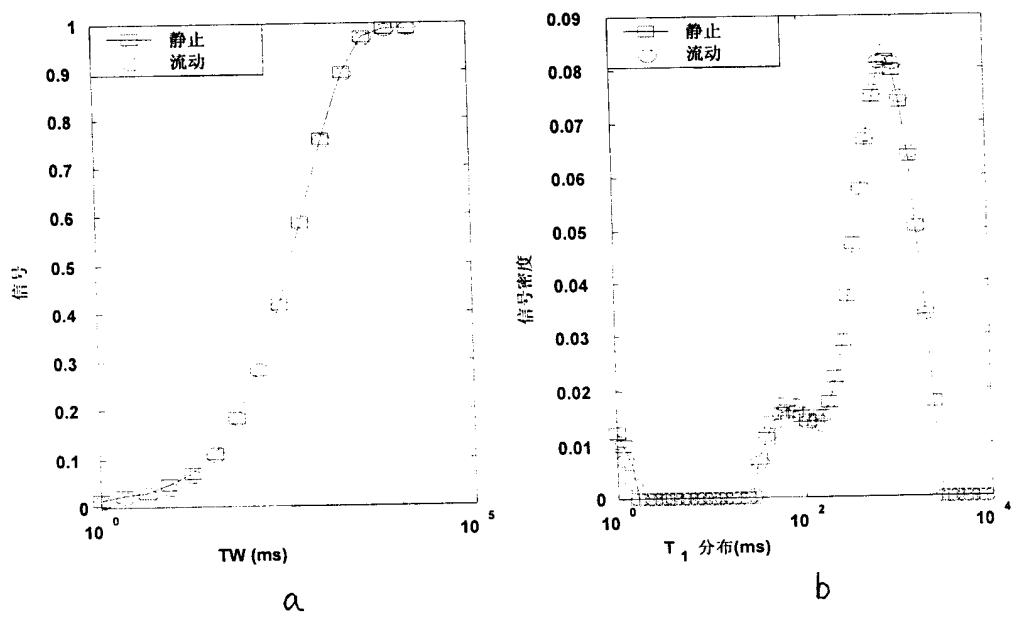


图 7