



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102330552 B

(45) 授权公告日 2016. 06. 08

(21) 申请号 201110204505. 6

(22) 申请日 2011. 07. 13

(30) 优先权数据

61/363, 664 2010. 07. 13 US

61/429, 237 2011. 01. 03 US

(73) 专利权人 普拉德研究及开发股份有限公司
地址 英属维尔京群岛多多拉岛

(72) 发明人 M·埃文斯 M-L·莫博涅

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

代理人 陈松涛 蹇炜

(51) Int. Cl.

E21B 49/00(2006. 01)

G01V 5/14(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1595202 A, 2005. 03. 16,

CN 1627102 A, 2005. 06. 15,

CN 101240705 A, 2008. 08. 13,

CN 1595202 A, 2005. 03. 16,

CN 101078776 A, 2007. 11. 28,

US 7642507 B2, 2010. 01. 05,

US 6207953 B1, 2001. 03. 27,

US 2006/0284066 A1, 2006. 12. 21,

US 4492864 , 1985. 01. 08,

审查员 方勇

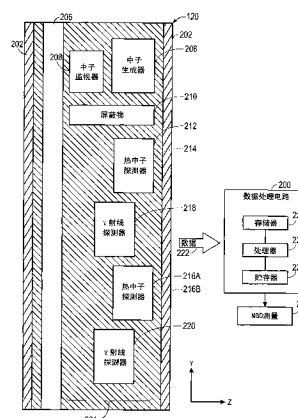
权利要求书4页 说明书15页 附图14页

(54) 发明名称

对中子伽马密度测量的校正

(57) 摘要

提供了用于确定宽范围地层的精确的中子伽马密度 (NGD) 测量的系统、方法和装置, 该地层包括低氢指数或低孔隙度地层和具有重元素的地层。例如, 可以通过发射中子到地层中以使得一些中子由所述地层的元素非弹性散射并生成非弹性伽马射线来获得该 NGD 测量。可以探测返回到所述井下工具的中子和非弹性伽马射线。相信某些地层的一些特性影响所述地层的快中子输运。从而, 如果地层具有一个或多个该特性, 则一旦可以确定所述中子伽马密度 (NGD), 就可以向所述中子计数率、所述非弹性伽马射线计数率、或所述中子输运校正函数施加校正。



1. 一种用于执行测井操作的方法,包括:

使用井下工具的中子生成器来发射中子到地层中,使得所述中子中的一些由所述地层非弹性散射并且生成非弹性伽马射线;

使用所述井下工具的中子探测器来探测返回到所述井下工具的中子计数率;

使用所述井下工具的伽马射线探测器来探测非弹性伽马射线计数率;

确定所述地层是否具有在无附加校正时预期会使得所述中子计数率导致中子伽马密度确定不精确的特性,其中,当所述地层不具有所述特性时,不施加所述附加校正;

当所述地层具有所述特性时,通过向所述中子计数率、所述非弹性伽马射线计数率、或中子输运校正函数、或其组合施加校正来施加所述附加校正,并且至少部分地基于所校正的中子计数率、所校正的非弹性伽马射线计数率、或所校正的中子输运校正函数、或其组合来确定所述地层的密度;以及

当所述地层不具有所述特性时,至少部分地基于所探测的中子计数率、所探测的非弹性伽马射线计数率、或所述中子输运校正函数、或其组合来确定所述地层的密度。

2. 如权利要求1所述的方法,其中,所述特性包括比预定值低的孔隙度。

3. 如权利要求1所述的方法,其中,所述特性包括使得在将所述中子计数率施加于所述中子输运校正函数中时,所述中子计数率不精确地对应于所述地层的快中子输运的重元素浓度。

4. 如权利要求1所述的方法,其中,至少部分地基于所述中子输运校正函数来确定所述地层的所述密度,其中,所述中子输运校正函数是所述中子计数率的函数,所述中子计数率精确地对应于不具有所述特性的至少一些地层的快中子输运。

5. 如权利要求1所述的方法,其中,至少部分地基于所述非弹性伽马射线计数率的函数减去通过所述中子输运校正函数和校准函数获得的值来确定所述地层的所述密度,其中,所述校准函数解释所述中子生成器的中子输出。

6. 如权利要求1所述的方法,其中,至少部分地基于以下关系来确定所述地层的所述密度:

$$\frac{\log(CR_{\gamma}^{inel}) - f(CR_{neutron}) - \log(C_{cal} \cdot N_s)}{e_1} = \rho_{electron},$$

其中, $\rho_{electron}$ 表示所述地层的所述密度, CR_{γ}^{inel} 表示所述非弹性伽马射线计数率, $CR_{neutron}$ 表示所述中子计数率, $f(CR_{neutron})$ 表示所述中子输运校正函数, C_{cal} 表示校准常数, N_s 表示所述中子生成器的输出,以及 e_1 表示实验上或通过核建模或通过其组合获得的系数。

7. 如权利要求6所述的方法,其中,根据以下关系来确定所述中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$:

$$f(CR_{neutron}) = e_1 \log(CR_{neutron}^{e_2} + e_3),$$

其中, e_1 、 e_2 、和 e_3 表示通过实验测量或核建模或其组合确定的系数。

8. 一种井下工具,包括:

中子生成器,配置为以某一能量发射中子到地层中,所述能量足够使得所述中子中的一些由地层的元素非弹性散射并产生非弹性伽马射线;

中子探测器,配置为探测返回到所述井下工具的中子计数率;

第一伽马射线探测器,配置为探测康普顿散射通过所述地层并到达所述井下工具的第一非弹性伽马射线计数率,其中,所述第一伽马射线探测器与所述中子生成器间隔第一距离;

第二伽马射线探测器,配置为探测康普顿散射通过所述地层并到达所述井下工具的第二非弹性伽马射线计数率,其中,所述第二伽马射线探测器与所述中子生成器间隔第二距离;以及

数据处理电路,配置为:

接收所述中子计数率、所述第一非弹性伽马射线计数率、以及所述第二非弹性伽马射线计数率;

确定所述地层的表观孔隙度,或在所述井下工具中存在快中子探测器时,确定将由所述快中子探测器探测的快中子信号的估计值,其中,至少部分地基于所述中子计数率、所述第一非弹性伽马射线计数率、或所述第二非弹性伽马射线计数率、或其组合来确定所述快中子信号的所述估计值;

当所述地层的所述表观孔隙度小于一限度或当所述地层的快中子输运的估计值在一限度以外时,向所述中子计数率、所述第一非弹性伽马射线计数率、所述第二非弹性伽马射线计数率、或将所述中子计数率与所述地层的所述快中子输运相关联的中子输运校正函数、或其组合施加校正;并且

至少部分地基于所校正的中子计数率、所校正的第一非弹性伽马射线计数率、所校正的第二非弹性伽马射线计数率、或所校正的中子输运校正函数、或其组合来确定所述地层的密度。

9.如权利要求8所述的井下工具,其中,所述中子探测器包括超热中子探测器,其中,所述中子计数率包括超热中子计数率。

10.如权利要求8所述的井下工具,其中,所述数据处理电路配置为至少部分地基于以下各项来确定所述表观孔隙度:

所述中子计数率;

所述中子计数率与另一中子计数率之间的比率;

两个中子捕获伽马射线计数率之间的比率;

所述第一非弹性伽马射线计数率与所述第二非弹性伽马射线计数率之间的比率;

所述中子计数率与所述第一非弹性伽马射线计数率、所述第二非弹性伽马射线计数率、或其组合之间的比率;

所述中子计数率与所述第一非弹性伽马射线计数率、所述第二非弹性伽马射线计数率、或其组合的函数;或

其组合。

11.如权利要求8所述的井下工具,其中,所述数据处理电路配置为施加所述校正,以使得所述中子计数率、所述第一非弹性伽马射线计数率、所述第二非弹性伽马射线计数率、或所述中子输运校正函数、或其组合更精确地与所述地层的真实密度相关联。

12.如权利要求8所述的井下工具,其中,所述数据处理电路配置为通过包括对所述中子计数率的中子计数率校正来施加所述校正,其中,所述中子计数率校正向所述中子计数

率增加解释在具有表观孔隙度的所述限度以下的孔隙度的地层中发生的快中子运输的变化的量。

13. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 所述数据处理电路配置为通过向所述中子计数率增加中子计数率校正来施加所述校正, 所述中子计数率校正的量至少部分地基于所述地层的所述表观孔隙度而变化。

14. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 所述数据处理电路配置为通过向所述中子计数率增加中子计数率校正来施加所述校正, 其中, 至少部分地基于第二中子运输校正函数和权重函数来确定所述中子计数率校正, 其中, 所述第二中子运输校正函数取决于所述中子计数率和所述第一非弹性伽马射线计数率、所述第二非弹性伽马射线计数率、或其组合, 并且所述权重函数取决于所述中子计数率和所述表观孔隙度的限度。

15. 如权利要求14所述的井下工具, 其中, 所述权重函数是分段线性函数, 所述分段线性函数包括在所述中子计数率、常数值、或仿射函数、或其组合的不同值之间的两个或更多直线。

16. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 所述数据处理电路配置为通过确定校正的中子计数率来施加所述校正, 其中, 根据以下关系来确定所校正的中子计数率:

$$CR_{neutron, corrected} = CR_{neutron} \left(1 + g \left(CR_{limit}, CR_{neutron} \right) \cdot F \left(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\prime} \right) \right),$$

其中, $CR_{neutron, corrected}$ 表示所校正的中子计数率, $CR_{neutron}$ 表示所述中子计数率, CR_{limit} 表示对应于表观孔隙度的所述限度的所述中子计数率的限度, $CR_{inel}^{\prime}$ 表示所述第一非弹性伽马射线计数率、或所述第二非弹性伽马射线计数率、或其组合, $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\prime})$ 表示中子运输校正函数, 且 $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ 表示权重函数。

17. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 所述数据处理电路配置为至少部分地基于所述第一非弹性伽马射线计数率与所述第二非弹性伽马射线计数率的比率来确定所述快中子信号的所述估计值。

18. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 所述数据处理电路配置为至少部分地基于以下关系来确定所述快中子信号的所述估计值:

$$Fastn = \frac{CR_{net-inelastic}^{SSn}}{CR_{net-inelastic}^{LSn}},$$

其中, $Fastn$ 表示所述快中子信号, $CR_{net-inelastic}^{SSn}$ 表示所述第一非弹性伽马射线计数率, 且 $CR_{net-inelastic}^{LSn}$ 表示所述第二非弹性伽马射线计数率。

19. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 至少部分地基于分别在脉冲时间门、早期捕获时间门、和晚期时间门期间获得的伽马射线计数率来确定所述第一非弹性伽马射线计数率或所述第二非弹性伽马射线计数率, 或所述第一非弹性伽马射线计数率和所述第二非弹性伽马射线计数率二者。

20. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 所述数据处理电路配置为至少部分地基于以下关系来确定所述第一非弹性伽马射线计数率或所述第二非弹性伽马射线计数率, 或所述第一非弹性伽马射线计数率和所述第二非弹性伽马射线计数率二者:

$$CR_{net-inelastic} = CR_{burst} - CR_{ec} - \alpha CR_{lc},$$

其中, $CR_{net-inelastic}$ 表示所述第一非弹性伽马射线计数率或所述第二非弹性伽马射线计数率, 或所述第一非弹性伽马射线计数率和所述第二非弹性伽马射线计数率二者, CR_{burst} 表示在脉冲时间门期间获得的伽马射线计数率, CR_{ec} 表示在早期捕获时间门期间获得的伽马射线计数率, CR_{lc} 表示在晚期时间门期间获得的伽马射线计数率, 且 α 表示常数。

21. 如权利要求8所述的井下工具, 其中, 所述数据处理电路配置为至少部分地基于所述第一非弹性伽马射线计数率或所述第二非弹性伽马射线计数率与所述中子计数率之间的比率来确定所述快中子信号的所述估计值。

对中子伽马密度测量的校正

技术领域

[0001] 本公开总体涉及中子伽马密度(Neutron-gamma density,NGD)测井,并且更具体地,涉及用于获得某种地层(formation)中的精确的NGD测量结果的技术。

背景技术

[0002] 此部分意在将读者引入可能涉及本公开的各方面的技术的各方面,该各方面被描述和/或声名如下。相信此讨论对向读者提供有助于更好地理解本公开的各方面的背景信息是有用的。因此,应当理解,将考虑到这些来阅读这些阐述,而不是承认现有技术。

[0003] 地层密度是在测井中经常获得的测量结果。一种确定地层密度的方式可以称作伽马密度测量,其涉及探测伽马射线通过地层散射的程度。常规地,获得伽马密度测量涉及使用放射性同位素源(例如, ^{137}Cs 或 $^{241}\text{AmBe}$)以伽马射线辐照地层。这些伽马射线可以由存在于地层中的电子康普顿散射。取决于康普顿散射的量,这些伽马射线中的一些可以由与伽马射线源间隔开一定距离的伽马射线探测器探测。因为地层中的电子的浓度与地层的元素的原子系数成比例,并且伽马射线发生康普顿散射并被伽马射线探测器探测到的程度涉及电子浓度,所以可以基于探测的伽马射线计数率来确定地层的密度。

[0004] 在井下工具(downhole tool)中使用放射性同位素源可能是不期望的,所以研发了生成光子用于地层密度测量,而无需放射性同位素伽马射线源的技术。一种该技术称作中子伽马密度(NGD)测量,与常规伽马密度(GGD)测量相区别开。NGD测量涉及使用中子生成器来发射中子到地层中。这些中子中的一些可以由地层中的某些元素非弹性散射,生成使得能够确定地层密度的非弹性伽马射线。虽然基于这些伽马射线的NGD测量在某些地层中可能是精确的,但是NGD在其它地层中可能是较不精确的。

发明内容

[0005] 以下提出于此公开的某些实施例的概括。应当理解,这些方面仅仅是为了给读者提供这某些实施例的简要的概括,并且这些方面不是意在限制此公开的范围。实际上,此公开可以涵盖以下可能没有提出的各个方面。

[0006] 本实施例涉及用于确定用于宽广范围的地层的精确的中子伽马密度(NGD)测量的系统、方法、和装置,该地层包括低氢指数、或低孔隙度地层和具有重元素的地层。例如,通过发射中子到地层中,使得一些中子由地层中的元素非弹性散射并生成非弹性伽马射线,能够获得该NGD测量。可以探测返回到井下工具的中子和非弹性伽马射线。认为地层的一些特性影响地层的快中子输运。从而,如果地层具有该特性,则可以对中子计数率、非弹性伽马射线计数率、或中子输运校正函数施加校正,中子伽马密度(NGD)可以根据中子计数率、非弹性伽马射线计数率、或中子输运校正函数来确定。

[0007] 在另一范例中,井下工具可以包括中子生成器、中子探测器、两个伽马射线探测器、以及数据处理电路。中子生成器可以用足够使一些中子由地层的元素非弹性散射并产生非弹性伽马射线的能量发射中子到地层中。中子探测器可以探测返回到井下工具的中子

计数率,而伽马射线探测器可以探测通过地层康普顿散射到达井下工具的第一和第二非弹性伽马射线计数率。数据处理电路可以接收中子计数率、第一非弹性伽马射线计数率、以及第二非弹性伽马射线计数率,使用它们确定对低氢指数或低孔隙度地层和具有重元素的地层精确的中子伽马密度。

[0008] 通过范例方式,数据处理电路可以确定地层的表观(apparent)孔隙度,或者如果井下工具中存在快中子探测器,可以确定能够由快中子探测器探测的快中子信号的估计值。可以至少部分地基于中子计数率、第一非弹性伽马射线计数率、和/或第二非弹性伽马射线计数率,来确定快中子信号的此估计值。当地层的表观孔隙度小于限度(limit)或当地层的快中子运输的估计值在限度以外时,数据处理电路可以向中子计数率、非弹性伽马射线计数率、或和/或中子运输校正函数施加校正。其后,数据处理电路可以至少部分地基于校正的中子计数率、非弹性伽马射线计数率、和/或中子运输校正函数来确定地层的密度。

[0009] 本公开的技术效果包括对宽广范围的地层精确地确定中子伽马密度(NGD)测量,该地层包括具有低氢指数或低孔隙度的地层和具有重元素的地层。甚至当NGD测量中用于获得中子计数率和伽马射线计数率的井下工具的配置不具有最佳配置时,这些NGD测量也可以保持精确。从而,尽管不具有快中子探测器,或尽管中子探测器可能放置在距中子源非最佳的位置,仍然可以使用以上公开的系统和技术来获得精确的NGD测量。

[0010] 以上记录的特征的各种改进可以与本公开的各方面相关。进一步的特征也可以并入此各方面。这些改进和附加特征可以单独存在或以任何组合存在。例如,以下关于一个或多个示例的实施例讨论的各特征可以单独并入本公开的任何以上描述的方面或以任何组合并入其中。以上描绘的简要概括仅仅意在使读者熟悉本公开的某些方面以及实施例的背景,而不是限制所声称的主题。

附图说明

[0011] 在阅读以下详细描述并参照附图后,将可以更好地理解此公开的各方面,其中:

[0012] 图1是根据实施例的采用中子伽马密度(NGD)系统的井位(wellsite)系统的示意图;

[0013] 图2和3是根据实施例的表示能够精确测量低孔隙度地层或包括重元素的地层中的密度的NGD系统的示意性框图;

[0014] 图4是根据实施例的表示使用图2和3的NGD系统的测井操作的示意图;

[0015] 图5是描述用于执行图4的测井操作的方法的实施例的流程图;

[0016] 图6是根据实施例的将已知地层密度与未对中子或伽马射线计数率进行校正而获得的地层密度进行比较的交会图(crossplot);

[0017] 图7是描述用于在低孔隙度地层中获得精确地层密度测量的方法的实施例的流程图;

[0018] 图8是根据实施例的对用于确定低孔隙度地层中的校正的中子计数率的权重函数进行建模的图表(plot);

[0019] 图9是根据实施例的示例可视化图7的处理的效果的方式的示意性框图;

[0020] 图10是根据实施例的针对低孔隙度地层将已知地层密度与校正中子计数率后获得的地层密度进行比较的交会图;

[0021] 图11是描述用于在包括重元素的地层中获得精确的地层密度测量的方法的实施例的流程图；

[0022] 图12是根据实施例的对快中子校正比率与电子密度之间的比较进行建模的图表；

[0023] 图13是根据实施例的对快中子校正比率与有效密度之间的比较进行建模的图表；

[0024] 图14是根据实施例的对快中子校正比率与有效密度之间的差异进行建模的图表；

[0025] 图15是根据实施例的针对低孔隙度地层和具有重元素的地层将已知地层密度与施加附加校正后获得的地层密度进行比较的交会图。

具体实施方式

[0026] 以下将描述本公开的一个或多个特定实施例。这些描述的实施例仅仅是当前公开的技术的范例。另外，在提供这些实施例的简洁的描述的努力中，可以在说明书中描述实际实施的所有特征。应当理解，在研发任何这样的实际实施时，如在任何工程或设计项目中，能够作出许多特定于实施的决定以获得研发者的特定目标，诸如与系统相关和商业相关的约束的一致，这些约束可以随实施而变化。此外，应当理解，该研发努力可能是复杂并耗时的，但是对于得到此公开的益处的本领域技术人员来说，其不过是执行设计、加工、和制造的程序。

[0027] 当介绍本公开的各实施例的元件时，冠词“一”、“一个”和“所述”意在表示存在一个或多个元件。术语“包括”、“包含”、以及“具有”意在包含的，并且意在可以存在除列出的元件以外的附加元件。附加地，应当理解，本公开中引用“一个实施例”或“实施例”不是意在解释为排除存在也并入了记载的特征的另外的实施例。

[0028] 本公开涉及用于获得中子伽马密度(NGD)测量的系统和技术，该测量对包括低孔隙度地层和具有重元素的地层的各种地层是精确的。通常，用于获得该NGD测量的井下工具可以包括中子源、至少一个中子探测器、和两个伽马射线探测器。虽然井下工具在地层的井眼(borehole)内，但是中子源可以在短的时段中发射至少2MeV的快中子到地层中，该时段于此称作“脉冲门(burst gate)”，在该时段期间，中子可以由地层中的某些元素(例如氧)非弹性散射，并生成伽马射线。井下工具的伽马射线探测器可以探测这些非弹性伽马射线。地层的NGD测量结果可以是这些非弹性散射射线的计数率的函数，该计数率通过中子输运函数基于来自中子探测器的中子计数率进行了校正。该中子输运校正函数总体可以精确地解释在油和/或气井中通常遇到的大多数地层的中子输运，导致精确的NGD测量。如于此使用的，“精确的”NGD测量可以指在约0.03g/cc内的真实地层密度的NGD测量。

[0029] 相信来自一些井下工具配置的中子计数不可以精确解释某些地层中的快中子输运。例如，当井下工具不包括快中子探测器时，热或超热(epithermal)中子探测器可以用于估计快中子分布，但是来自热或超热中子探测器的计数率可能不总是以快中子探测器能够的相同方式精确地反映一些地层的快中子输运。此外，在井下工具中设置该热和/或超热中子探测器可以包含对NGD以及许多其它的测井测量的各种考虑。同样，这些热或超热中子探测器中的一些可以不位于井下工具内，该井下工具最适合于探测中子计数率，以便在将该计数率应用于中子输运校正函数中时，精确地反映一些地层的中子输运。当在包括具有低孔隙度或低氢指数的地层或具有一些浓度限度以上的重元素的地层的某些地层中获得NGD测量时，可以引起这些状况。

[0030] 现在将简要描述这些地层的性质。应当理解,低孔隙度的地层具有相对小的空隙空间。低孔隙度地层将通常具有低的氢指数因为低孔隙度地层可以具有小的空间用于氢(例如,在水中、油中和/或气中)。一些地层,诸如页岩和粘土,可以包含不取决于它们的空隙空间(pore space)的氢。对于这些含氢的地层,低孔隙度将不必然导致低氢指数,因为地层的孔隙以外的地方的氢将反映在氢指数确定中。相信低孔隙度和低氢指数地层具有在类似的方面与许多其它地层不同并且可以从本技术获益的快中子输运。同样,遍及本公开,可以在很大程度上可交换地使用术语“低孔隙度”和“低氢指数”。具有重元素的地层,诸如具有赤铁矿或氧化铝的砂石,也可以具有在类似方面与许多其它地层不同的快中子输运。如于此使用的,术语“具有重元素的地层”指地层具有的元素的原子量为20或更大且元素浓度在浓度限度以上(例如,包含高的铁或铝浓度的页岩)。

[0031] 根据本公开的实施例,当地层中获得NGD测量时,该地层具有以与其它地层不同的方式可探测地影响快中子输运的特性,并且该地层诸如是低孔隙度地层或低氢指数地层、或具有某一浓度限度以上的重元素的地层,可以修改中子计数率、用于NGD测量的伽马射线计数率、和/或中子输运校正函数,以更精确地解释地层的快中子输运。当地层具有预期将使得中子计数率和/或中子引起的伽马射线计数率不精确地对应于地层的快中子输运的一个或多个特性(例如低孔隙度或重元素浓度)时,当中子计数率和/或伽马射线计数率应用于中子输运校正函数中时,可以应用这些或任何其它合适的校正。

[0032] 基于上述,图1示例能够采用公开的NGD系统的井位系统。图1的井位系统可以在陆上(onshore)或在海上(offshore)。在图1的井位系统中,通过使用任何合适的技术的旋转钻孔,可以在地下(subsurface)地层中形成井眼11。钻柱(drill string)12可以悬挂于井眼11内,并且可以具有底孔组件100,底孔组件100在其下端包括钻头(drill bit)105。图1的井位系统的表面系统可以包括位于井眼11以上的平台(platform)和钻塔(derrick)组件10,平台和钻塔组件10包括旋转台16、传动钻杆(kelly)17、钩18和旋转接头(rotary swivel)19。钻柱12可以由通过任何合适的构件通电的旋转台16旋转,其在钻柱12的上端啮合传动钻杆17。钻柱12可以通过传动钻杆17和旋转接头19从联接至滑块(未示出)的钩子18悬挂,这容许钻柱12相对于钩子18旋转。替代地,能够使用顶驱动系统,其可以是本领域技术人员公知的顶驱动系统。

[0033] 在图1的井位系统中,表面系统也可以包括存储在形成于井位置处的坑(pit)27中的钻孔流体或泥浆26。泵29可以经由接头19中的端口将钻孔流体26传送至钻柱12的内部,使得钻孔流体如方向箭头8所示地通过钻柱12向下流动。钻孔流体26可以经由钻头105中的端口离开钻柱12,并且通过钻柱12的外部与井眼11的壁之间的环形区域向上循环,如由方向箭头9所示。以此公知的方式,随着钻孔流体26返回至坑27用于再循环,钻孔流体26润滑钻头105并将钻屑(cutting)向上携带至表面。

[0034] 图1的井位系统的底孔组件100可以包括随钻测井(logging-while-drilling, LWD)模块120和/或随钻测量(measuring-while-drill, MWD)模块130、旋转可操纵(rotate-steerable)系统和马达150、以及钻头105。LWD模块120能够容纳于本领域已知的专门类型的钻环(drill collar)中,并且能够包含一个或多个已知类型的测井工具。还应当理解,能够采用一个以上的LWD模块,如以数字102A总体表示的。同样,对LWD模块120的引用能够替代地也意指在120A的位置的模块。LWD模块120可以包括用于测量、处理、并存储信息,以及

用于与表面装备进行通信的能力。可以采用LWD模块120来获得中子伽马密度(NGD)测量,如下将进一步讨论的。

[0035] MWD模块130也能够容纳于本领域已知的专门类型的钻环中,并且能够包含用于测量钻柱和钻头的特性的一个或多个装置。还应当理解,能够采用一个以上的MWD,如由数字130A总体表示的。同样,对MWD模块130的引用能够替代地也意指在130A的位置处的模块。MWD模块130还可以包括用于给井下系统声称电力的设备。该电生成器可以包括例如由钻孔流体的流动供电的泥浆涡轮发电机,但是也可以附加或替代地采用其它电力和/或电池系统。在图1的井位系统中,MWD模块130可以包括一个或多个以下类型的测量装置:钻压(weight-on-bit)测量装置、转矩测量装置、振动(vibration)测量装置、冲击(shock)测量装置、粘滑(stick slip)测量装置、方向测量装置、和/或倾斜测量装置。

[0036] LWD模块120可以用于中子伽马密度(NGD)系统中,如图2和3中所示,该系统能够精确地测量地层中的密度,该地层包括低孔隙度或低氢指数地层和/或具有重元素的地层。特别是,图2和3描绘相互各旋转90度的LWD模块120的示意性框图侧视图。应当理解,LWD模块120意在表示NGD工具的总体配置的一个范例,并且其它合适的NGD工具可以包括更多或更少的部件并且可以被配置用于其它传送方式。实际上,设想采用LWD模块120的总体配置的NGD工具的其它实施例与任何合适的传送方式一起使用,传送构件诸如是缆线(wireline)、连续管(coiled tubing)、随钻测井(LWD)等。图2和3的NGD系统可以包括LWD模块120和关联的数据处理电路200。虽然图2中LWD模块120和数据处理电路200描绘为独立的元件,但是应当理解,数据处理电路200可以整个实施于LWD模块120内,在远离LWD模块120的表面处,或部分在LWD模块120内且部分在表面处。通过示例方式,LWD模块120可以表示斯伦贝谢公司(Schlumberger)的EcoScope™工具的模型。

[0037] LWD模块120可以包含在环绕底盘204和泥浆通道205的钻环202内。底盘204可以包括用于发射并探测辐射以获得NGD测量的各种部件。例如,中子生成器206可以用作发射至少2MeV的中子的中子源,相信2MeV近似为通过与地层元素的非弹性散射而产生伽马射线的最小能量。通过范例方式,中子生成器206可以为电子中子源,诸如斯伦贝谢技术公司(Schlumberger Technology Corporation)的Minitron™,其可以通过氘核-氘核(d-D)和/或氘核-氚核(d-T)反应产生中子脉冲。从而,中子生成器206可以发射例如约2MeV或14MeV的中子。中子监视器208可以监视来自中子生成器的中子发射。通过范例方式,中子监视器208可以是主要探测从中子生成器206直接发射的未散射中子的塑料闪烁器和光电倍增管,并且从而可以根据中子生成器206的中子输出率来提供与中子输出率成比例的计数率信号。中子屏蔽物210例如可以包括铅,并且可以在很大程度上防止来自中子生成器206的中子内部地通过LWD模块120朝向屏蔽物210的另一侧上的各个辐射探测部件。

[0038] 如图2和3中所示例的,LWD模块120能够包括两个近中子探测器,即热中子探测器212和超热中子探测器214。两个远中子探测器216A和216B可以位于比中子探测器212和214更远离中子生成器206的位置。例如,近中子探测器212和214可以从中子生成器206间隔开约10-14英寸,而远中子探测器216A和216B可以从中子生成器206间隔开18-28英寸。短间隔(short spacing,SS)伽马射线探测器218可以位于近中子探测器212和214与远中子探测器216A和216B之间。长间隔(long spacing,LS)伽马射线探测器220可以位于远中子探测器216A和216B以外,在比伽马射线探测器218更远离中子生成器206的位置。例如,SS伽马射线

探测器218可以从中子生成器206间隔开约16-22英寸,并且LS伽马射线探测器220可以从中子生成器206间隔开约30-38英寸。LWD模块120的替代实施例可以包括更多或更少的该辐射探测器,但是总体可以包括至少两个伽马射线探测器和至少一个中子探测器。

[0039] 中子探测器212、214、216A和/或216B可以是任何合适的中子探测器,诸如 ^3He 中子探测器。为了主要探测超热中子,超热中子探测器214可以由热中子屏蔽物围绕,而热中子探测器212、216A和/或216B可以不被中子屏蔽物围绕。通常,基本上仅超热中子的探测可以容许超热中子探测器214测量通过大多数地层的快中子分布的范围,并且从而该中子计数率在NGD测量中可以用于解释通过地层的快中子输运。然而,在具有低氢指数(HI)或低孔隙度的地层中,中子探测器212、214、216A和/或216B可能距中子生成器206间隔开不是足够远,以至不能直接解释(account for)该地层的快中子输运。如以下将讨论的,对于该低孔隙度和/或低氢指数地层,使用LWD模块120获得的NGD测量结果可以被校正为近似于在中子探测器212、214、216A、和/或216B位于更适合于该地层的单个位置或多个位置时所预期的值。

[0040] 此外,在具有重元素的地层中,该地层诸如是具有高浓度的铁或铝的页岩,中子探测器212、214、216A、和/或216B总体可以不提供精确反映该地层的快中子输运的中子计数率。虽然相信能够通过使用LWD模块120中的快中子探测器来处理此缺陷,但是可能难以在井下工具中实施该快中子探测器。例如,可能难以找到能够在井下工作的具有高灵敏度且足够紧凑以安装在LWD模块120内的合适传感器。如以下将讨论的,对于具有重元素的该地层,使用LWD模块120获得的NGD测量结果可以被校正为近似于在中子探测器212、214、216A、和/或216B为快中子探测器时所预期的值。

[0041] 伽马射线探测器218和/或220可以由中子屏蔽物围绕的闪烁器探测器。中子屏蔽物可以包括例如 ^6Li ,诸如碳酸锂(Li_2CO_3),其基本上可以将伽马射线探测器218和/或220从热中子屏蔽,而不会产生热中子捕获伽马射线。伽马射线探测器218和220可以探测来自中子生成器206的快中子由周围地层的某元素非弹性散射而生成的非弹性伽马射线。如以下将讨论的,中子伽马密度(NGD)测量结果可以是从伽马射线探测器218和220获得的非弹性伽马射线计数的函数,其是针对地层的快中子输运通过快中子校正函数校正的。使用于此公开的系统和技术,该NGD测量可以保持基本精确的,而不管地层是低氢指数地层还是低孔隙度地层或具有高浓度重元素的地层或具有可以使得中子计数率不精确地对应于地层的快中子输运的一个或多个特性的地层。

[0042] 来自伽马射线探测器218和220的伽马射线计数率和来自中子探测器212、214、216A、和/或216B的中子计数率可以由数据处理电路200作为数据222接收。数据处理电路200可以接收数据222并执行某处理来确定周围地层(surrounding formation)的一个或多个性质,诸如地层密度。数据处理电路200可以包括处理器224、存储器(memory)226、和/或贮存器(storage)228。处理器224可以可操作地耦合至存储器226和/或贮存器228以执行当前公开的技术。可以由处理器224和/或其它数据处理电路基于可以由处理器224执行的某些指令来执行这些技术。可以使用任何合适的制造物品贮存该指令,其可以包括一个或多个有形的、计算机可读介质,以至少共同存储这些指令。制造物品可以包括例如存储器226和/或非易失性贮存器228。存储器226和非易失性贮存器228可以包括用于贮存数据和可执行指令的任何合适的制造物品,诸如是随机存取存储器、只读存储器、可重写闪存、硬盘、和

光盘。

[0043] LWD模块120可以经由例如工具内的内部连接、遥测系统通信上行线、和/或通信电缆来将数据222传输至数据处理电路200。数据处理电路200可以确定周围地层的一个或多个性质。通过范例方式,该性质可以包括地层的中子-伽马密度(NGD)测量。其后,数据处理电路200可以输出指示地层的NGD测量的报告230。报告230可以存储在存储器中,或可以经由诸如电子显示器的一个或多个输出装置提供给操着者。

[0044] 如图4的中子伽马密度(NGD)测井操作240中所示,LWD模块120可以用于获得中子伽马密度(NGD)测量,该测量在各种地层242中保持精确,该地层包括低氢指数地层或低孔隙度地层和/或具有重元素的地层。如图4中所示,NGD测井操作240可以涉及通过井眼244将LWD模块120降低至地层242中。在图4的范例中,在钻孔时能够将LWD模块120降低至井眼244中,并且从而没有外管(casing)存在于井眼244中。然而,在其它实施例中,可以存在外管。虽然该外管能够衰减利用伽马射线源代替中子生成器206的伽马-伽马密度工具,但是在井眼244上存在外管将不会妨碍确定NGD测量,因为由中子生成器206发射的中子246可以通过外管而无显著衰减。

[0045] 中子生成器206可以在基本上足够仅容许发生非弹性散射的相对短的时段(例如10 μ s或20 μ s等)中发射中子246脉冲(burst),于此称作“脉冲门”。脉冲门期间中子246脉冲可以通过地层242分布,其范围可以根据地层242的快中子输运而变化。对于一些地层242,由中子探测器212、214、216A、和/或216B获得的中子246的计数总体可以精确反映该地层242的中子输运。然而,对于诸如低氢指数地层或低孔隙度地层和/或具有重元素的地层的地层242,可能需要附加校正来精确地解释地层242的快中子输运。

[0046] 由中子生成器206发射的许多快中子246可以在地层242的一些元素上发生非弹性散射248。此非弹性散射248可以产生非弹性伽马射线250,非弹性伽马射线250由伽马射线探测器218和/或220探测。通过使用距中子生成器206不同间隔的两个伽马射线探测器218和220探测的非弹性伽马射线250的比率来确定地层密度,几乎可以消除岩性效应(lithology effect)。

[0047] 根据非弹性伽马射线250计数率、一个或多个中子246计数率、以及对中子生成器206的中子输出的确定,数据处理电路200可以确定地层242的电子密度 $\rho_{electron}$ 。通常,可以根据涉及净非弹性计数率 CR_{γ}^{inel} 的函数的关系计算电子密度 $\rho_{electron}$,净非弹性计数率是通过中子输运校正和井下工具校准(calibration)校正而被校正的,其可以分别是一个或多个中子计数率 $CR_{neutron}$ 和中子生成器206的中子输出 N_s 的函数。例如,电子密度 $\rho_{electron}$ 计算可以采取以下形式进行计算:

$$[0048] \quad \frac{\log(CR_{\gamma}^{inel}) - f(CR_{neutron}) - \log(C_{cal} \cdot N_s)}{c_1} = \rho_{electron} \quad (1),$$

[0049] 其中, CR_{γ}^{inel} 是净非弹性伽马射线计数率(即,减去由热和超热中子捕获引起的伽马射线后的伽马射线计数率), $CR_{neutron}$ 表示来自中子探测器212、214、216A、和/或216B的中子246计数率, $f(CR_{neutron})$ 表示中子输运校正,其可以是中子246计数率的任何合适的函数并能够对地层242的快中子输运进行校正, C_{cal} 为使用已知组分、孔隙度和密度的测试地层中的测量结果实验上确定的校准常数,并且 N_s 是中子生成器206的中子输出。可以通过特性

化测量和核建模来确定系数 c_1 。

[0050] 例如,中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 可以采取以下一般形式:

[0051] $f(CR_{neutron}) = d_1 + d_2 CR_{neutron} + d_3 CR_{neutron}^2$,

[0052] 其中,系数 d_1 、 d_2 、和 d_3 表示例如通过特性化测量和核建模确定的系数。

[0053] 在一些实施例中,可以如下描述中子输运校正:

[0054] $f(CR_{neutron}) = e_1 \log(CR_{neutron}^2 + e_3)$ (2),

[0055] 其中,通过特性化测量和核建模来确定系数 e_1 、 e_2 、和 e_3 。

[0056] 对于一些地层242,等式(1)可以导致精确的密度测量。然而,对于包括低氢指数或低孔隙度地层242和/或具有相对高浓度的重元素的地层242(例如,具有可以在无附加校正时使得NGD测量不精确的重元素浓度的地层242)的其它地层,相信来自一个或多个中子探测器212、214、216A、和/或216B的中子计数率未充分解释该地层242的快中子输运。从而,当对该地层242确定NGD测量时,可以校正中子计数率 $CR_{neutron}$ 、非弹性伽马射线计数率 CR_{γ}^{inel} 、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$,如由图5的流程图260描述的。

[0057] 图5的流程图260表示用于执行图4的测井操作240的方法的一个实施例。当LWD模块120在井眼244中时,中子生成器206可以发射中子246脉冲到地层242中(框262)。中子246可以由地层242的某些元素非弹性散射248,生成非弹性伽马射线250。可以获得中子246计数率以及非弹性伽马射线250计数率(框264)。如以上参照等式(1)讨论的,对于在油和/或气井中遇到的一些地层242,该中子246计数率总体可以很好地涉及地层242的快中子输运。

[0058] 然而,在其它地层242中,相信中子246计数率和/或伽马射线250计数率可以充分解释该地层242的中子输运。从而,如果数据处理电路200使用任何合适的技术确定地层242具有暗示需要附加校正的一个或多个特性(例如低氢指数、低孔隙度、和/或含有相对高浓度的重元素)(判定框266),则数据处理电路200可以对中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 进行合适的校正,或可以提供适用于一些或所有这些项的全局校正(global correction)(框268)。即,应当理解,修改等式(1)的分子中的任何项能够改变得到的NGD确定。从而,在框268中,数据处理电路200可以对等式(1)的任何项进行任何合适的校正,包括引入一个或多个附加校正项,其可以使得NGD测量对于地层242总体精确。如以下讨论的,这些修改中的一些可以是对中子246计数率相对特定的修改,或当推得的快中子计数率超过限度,指示地层242中的高浓度重元素时,对伽马射线250计数率的修改,其中,可以根据地层242的孔隙度的分段线性函数(例如以下等式(3))调整中子计数率,快中子计数率超过限度表示地层242中的高浓度重元素。然而,应当理解,本实施例不是意在仅现定于这些修改。实际上,本实施例意在涵盖任何合适的修改于对于一些地层242总体精确的NGD确定,在存在的地层242中发生修改,这些地层具有使得一般NGD确定在这些地层242中不精确的某些其它特性。

[0059] 如果数据处理电路200未确定地层242具有该特性(判定框266),则数据处理电路200可以不施加该校正。在任何情况下,数据处理电路200随后可以使用确定的(校正或未校正的)中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率(框270)、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 来确定地层242的NGD测量。通过范例方式,数据处理电路200可以基于等式(1)表示的关系来确定NGD测量。

[0060] 如上述,虽然使用等式(1)这样确定的NGD测量可以精确地表示一些地层242的密度测量,但是该NGD测量对于其它地层242可能是不精确的,其它地层诸如是具有低氢指数、低孔隙度、和/或相对高浓度重元素的地层。此效果在图6的交会图280中是明显的,其表示对各种类型的地层242的已知密度与使用等式(1)获得的该地层242的NGD测量进行建模的交会图,对于等式(1),在存在例如低氢指数、低孔隙度、或高浓度重元素时,未对例如中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 进行校正。在交会图280中,纵坐标282表示LS伽马射线探测器218探测的中子输运校正的伽马射线计数率的对数,并且横坐标284表示地层242的单位为g/cc的电子密度。图例表示各种类型的地层242,该地层242已经被在交会图280中建模,并包括石灰石、砂石、白云石、具有空气填充孔隙的砂石、氧化铝、具有赤铁矿的砂石、以及仿真气体(simulated gas)。线286表示中子输运校正的伽马射线计数率与已知地层密度之间的精确校正。

[0061] 如在交会图280中看到的,对于某些地层242,尽管地层242的密度变化,计算的中子输运校正的伽马射线计数率的对数沿线286延伸并且精确地对应于已知密度。这些点表示对这些地层242的NGD确定的一般精度。然而,对于具有低孔隙度288或重元素290的地层242,中子输运校正的伽马射线计数率的计算的对数分别位于线286以下或以上。因为具有低孔隙度288或重元素290的这些地层242的中子输运校正的伽马射线计数率的计算的对数不与其它地层242遵循相同的密度改变函数(不沿线286下降),所以对使用与其它地层242相同的(未校正)计算获得的低孔隙度288地层或重元素290地层的NGD测量可能是不精确的。

[0062] 相信不充分的快中子输运校正可能是这些低孔隙度地层288和具有重元素290的地层的不精确计算的原因。虽然相信通过将中子探测器212、214、216A、和/或216B放置在LWD模块120内的不同位置可以处理此不充分的快中子输运校正,但是在缺少该选项时,通过以合适方式修改例如中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$,使得具有低孔隙度288或重元素290的地层242的中子输运校正的伽马射线计数率的计算的对数沿线286移动至它们的正确部位,能够获得其它中子输运校正。

[0063] 图7的流程图300表示确定中子伽马密度(NGD)测量的一种方式,该测量能够对低孔隙度地层288校正否则不精确的密度确定。当LWD模块120在井眼244中时,流程图300可以开始,如图4中看到的。中子生成器206可以发射中子246脉冲到地层242中(框302),中子可以由地层的某些元素242非弹性散射248,生成非弹性伽马射线250。可以获得中子246计数率以及这些中子引起的非弹性伽马射线250的计数率(框304)。

[0064] 流程图300的框306和判定框308总体涉及确定地层242是否是低孔隙度地层288。如图7中特别示出的,数据处理电路200可以使用任何合适的技术来确定地层242的表观孔隙度(框306),并且如果表观孔隙度在规定的限度外(判定框308),则数据处理电路200可以对中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 施加校正(框301)。可以实验上或通过计算机建模来确定规定的限度,并且可以通过数据处理电路200预先规定或确定规定的限度。如以上注意到的,数据处理电路200可以对等式(1)的任何项进行任何合适的校正,包括引入一个或多个附加校正项,这可以使得NGD测量对于地层242总体上精确。如以下将讨论的,这些修改中的一些可以是对中子246计数率相对特定的修改,可以根据地层242的孔隙度的分段线性函数对其进行调整(例如,见以下等式(3))。然

而,应当理解,本实施例不是意在仅限制于对中子246计数率的该修改。实际上,本实施例意在涵盖对NGD确定的任何合适的修改,该NGD确定对于一些地层242总体是精确的,但是在存在具有低孔隙度和/或低氢指数的地层时,较不精确。

[0065] 如果数据处理电路200未确定地层242的表观孔隙度在规定的限度外(判定框308),则数据处理电路200可以不施加该校正。在任何情况下,数据处理电路200可以随后使用确定的(校正的或未校正的)中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 来确定地层242的NGD测量(框312)。例如,如上述,数据处理电路200可以基于等式(1)表示的关系来确定NGD测量。

[0066] 在框306中,数据处理电路200可以根据任何合适的技术来确定表观孔隙度,该技术诸如是:

[0067] ●使用根据LWD模块120使用的其它技术直接获得的表观孔隙度测量

[0068] ●使用超热或快中子探测器的计数率来推导表观孔隙度

[0069] ●使用两个中子探测器计数率(优选地超热或快中子探测器)之间的计数率比率来推导存在低孔隙度

[0070] ●使用两个伽马射线探测器的中子捕获计数率之间的比率来推导表观孔隙度

[0071] ●使用两个伽马射线探测器的非弹性计数率之间的比率来推导表观孔隙度

[0072] ●使用来自中子探测器和伽马射线探测器的计数率的比率来推导表观孔隙度

[0073] ●使用中子和/或伽马射线计数率的函数来推导表观孔隙度

[0074] 如应当理解的,如果仅使用计数率,则用于确定地层242的表观孔隙度的计数率可以被归一化为中子生成器206的中子输出。因为中子计数率的比率解释中子输出的变化,所以当使用计数率的比率来确定表观孔隙度时,将中子生成器206的中子输出归一化可以不是必须的。

[0075] 执行图7的流程图300的框306、308和310的一个特定方式可以涉及校正中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 中使用的中子计数率 $CR_{neutron}$ 。特别是,可以根据超热中子探测器214的(归一化的)计数率 $CR_{neutron}$ 来确定地层242的表观孔隙度(框306)。如果超热中子计数率 $CR_{neutron}$ 超过某一值 CR_{limit} 或在值的某一范围内下降(判定框308),则可以指示地层242的低孔隙度状况。在该情况下,可以校正中子输运校正中的中子计数率 $CR_{neutron}$ (框310)。校正的超热中子计数率 $CR_{neutron, corrected}$ 能够采取以下形式:

$$[0076] \quad CR_{neutron, corrected} = CR_{neutron} \left(1 + g(CR_{limit}, CR_{neutron}) \cdot F(CR_{neutron}, CR_{inel}^r) \right) \quad (3).$$

[0077] 使用等式(3),能够基于由权重函数 $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ 加权的中子计数率校正函数 $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^r)$ 来确定校正的超热中子计数率 $CR_{neutron, corrected}$ 。在此范例中,中子计数率校正函数 $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^r)$ 是来自超热中子探测器214的超热中子计数率和一个或多个伽马射线探测器218和220的非弹性伽马射线计数率的函数。中子计数率校正函数 $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^r)$ 的强度由权重函数 $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ 加权,权重函数 $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ 能够是常数值、仿射函数、或从建模和/或测量的数据推导的任何合适的函数。中子计数率校正函数 $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^r)$ 可以采取任何合适的形式,包括常数或以下形式:

$$[0078] \quad F(CR_{neutron}, CR_{inel}^r) = a_1 + a_2 CR_{neutron} + a_3 CR_{neutron}^2 + b_1 + b_2 CR_{inel}^r + b_3 CR_{inel}^{r^2},$$

[0079] 其中,系数 a_1 、 a_2 、和 a_3 以及 b_1 、 b_2 和 b_3 表示通过例如特性化测量和核建模确定的系数。

[0080] 在一些实施例中,权重函数 $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ 可以是由不同计数率限度 CR_{limit} 之间的两个或更多直线构成的分段线性函数,取决于需要被校正的中子计数率 $CR_{neutron}$ 。例如,权重函数 $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ 可以是诸如图8的图表320示例的分段线性函数。在图表320中,纵坐标322表示得到的从0至1的校正系数,且横坐标324表示中子计数率 $CR_{neutron}$ 。

[0081] 图表320中的分段曲线326示例可以在以数字328、330、332、以及334示出的不同的计数率限度 CR_{limit} 施加的各种线性权重函数。从而,在图表320中,当中子计数率 $CR_{neutron}$ 小于第一限度328时,校正系数可以是0,并且在得到的校正的超热中子计数率 $CR_{neutron, corrected}$ 中不可以施加对中子计数率 $CR_{neutron}$ 的校正。在第一限度328和第二限度330之间,校正系数可以从0迅速增加至0.5,随后的其它限度332和334之间的线性函数慢慢变平。在第四限度334以上,校正系数可以是1,并且从而可以在得到的校正的超热中子计数率 $CR_{neutron, corrected}$ 中施加整个中子计数率校正函数 $F(CR_{neutron}, CR_{inel}')$ 。

[0082] 该中子计数率校正能够视为对 $CR_{neutron}$ 的中子计数的增加。一种可视化此校正的效果的方式出现在图9中,其中,超热中子探测器214的测量点可以实际上移动到距中子生成器206更远的位置。应当注意,超热中子探测器214实际上移动到距中子生成器206更远的位置是因为,获得在中子计数率校正函数 $F(CR_{neutron}, CR_{inel}')$ 中使用的非弹性伽马射线计数率 CR_{inelas}' 的伽马射线探测器218和/或220处于比超热中子探测器214的真实位置更远的位置。通过在低孔隙度处有效地移动超热中子探测器214的实际测量点,超热中子计数率 $CR_{neutron}$ 的敏感度在低孔隙度处可以实际上增加,更精确地解释低氢系数或低孔隙度地层242的快中子输运。

[0083] 应当理解,在较大井眼244中,中子计数率也可以受到抵消(standoff)的影响,并且因此可以被针对该抵消进行校正。该抵消校正能够基于来自不同测量的已知抵消。还有,在至少一个偏离的井中,使用来自底象限(quadrant)的中子计数率作为输入来代替平均计数率是有利的,因为底象限可以较少受到抵消的影响。对于小的至适度的抵消(高至1英寸),也能够如U.S.专利号4760252中所述地根据由超热探测器测得的中子下降时间来确定抵消,该专利转让给了斯伦贝谢技术公司并且于此通过引用该专利的整体并入了该专利。

[0084] 当根据图7的流程图300对中子输运进行了校正时,低孔隙度地层288的NGD测量可以更精确地匹配其它地层242的那些。图10的交会图340表示对各种类型的地层242的已知密度与使用等式(1)获得的针对地层242的NGD测量进行建模的交会图,对于等式(1),中子246计数率在存在低氢系数或低孔隙度时已经校正了。类似于图6的交会图280,在图10的交会图340中,纵坐标342表示由LS伽马射线探测器218探测的中子输运校正的伽马射线计数率的对数,并且横坐标344表示地层242的以g/cc为单位的电子密度。图例指示已经在交会图340中进行了建模的各种类型的地层242,该图例与交会图280的那些图例相匹配,包括石灰石、砂石、白云石、具有空气填充孔隙的砂石、氧化铝、具有赤铁矿的砂石、以及仿真气体(simulated gas)。线286表示中子输运校正的伽马射线计数率和地层242的已知密度之间的精确关系。

[0085] 如在交会图340中看到的,当在低孔隙度中调整中子输运校正中使用的中子计数率(例如,根据等式(3))时,可以将针对低孔隙度地层288的中子输运校正的伽马射线计数

率移动为沿线286与大多数其它地层242对准。因为在图10的图表340中,没有对中子输运校正的伽马射线计数率进行校正以解释具有重元素290的地层的快中子输运,所以具有重元素290的地层的中子输运校正的伽马射线计数率位于线286以上并保持不精确。应当理解,可以使用使得低孔隙度地层288的中子输运校正的伽马射线计数率移动为与线286对准的任何合适的替代方式。即,在地层242为低氢指数地层或低孔隙度地层288时获得NGD测量时,数据处理电路200可以对中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 施加任何合适的校正,以使得低孔隙度288的中子输运校正的伽马射线计数率移动为与线286对准。

[0086] 如上所述并且如图10的图表340中所看到的,相信不充分的快中子输运校正也是具有重元素290的地层的不精确计算的原因。还应当相信,可以通过使用快中子探测器代替超热中子探测器214来处理此不充分的快中子输运校正。然而,虽然快中子探测器可能是期望的,但是在诸如LWD模块120的井下工具中实施该装置可能不是容易的。例如,可能难以找到能够在井下工作的合适的快中子探测器。该快中子探测器可以从高灵敏度受益、且足够紧凑以安装到LWD模块120中、并且对伽马射线250的存在不灵敏。另外,因为特别是LWD模块120,并且通常大多数核井下工具,可以不限于它们的获得仅单个测量的使用,所示可以在该工具(例如中子探测器212、214、216A、和/或216B和伽马射线探测器218和220)中采用多个不同类型的辐射探测器。增加辐射探测器的数量不仅可以增加LWD模块120的成本和/或LWD模块120或其它井下工具的长度,并且此多个辐射探测器可以在LWD模块120或其它井下工具内竞争相同的物理位置(例如,多个辐射探测器可以从距中子生成器206类似的间隔和类似的径向位置受益)。替代地,LWD模块120可以使用超热中子探测器214作为用于确定快中子分布的范围的代用品,因为超热中子探测器214也能够对诸如中子孔隙度、下降时间等的附加工具答复起作用。

[0087] 当LWD模块120不包含快中子探测器时,可以根据来自其它中子探测器212、214、216A、和/或216B和/或伽马射线探测器218和/或220的现存响应估计或推导快中子信号。因为仅在高中子能量时(例如大于2MeV)才发生非弹性散射反应,所以能够根据以下比率推导似乎可信的高中子能量信号:

$$[0088] \quad Fastn = \frac{CR_{net-inelastic}^{SSn}}{CR_{net-inelastic}^{LSn}} \quad (4),$$

[0089] 其中, $CR_{net-inelastic}^{SSn}$ 表示从短间隔(SS)伽马射线探测器218获得的净非弹性伽马射线计数率,且 $CR_{net-inelastic}^{LSn}$ 表示来自长间隔(LS)伽马射线探测器220的净非弹性伽马射线计数率。

[0090] 通常可以以相同方式计算净非弹性伽马射线计数率 $CR_{net-inelastic}^{SSn}$ 和 $CR_{net-inelastic}^{LSn}$,例如如下进行计算:

$$[0091] \quad CR_{net-inelastic} = CR_{burst} - CR_{ec} - \alpha CR_{lc} \quad (5),$$

[0092] 其中 CR_{burst} 、 CR_{ec} 、和 CR_{lc} 分别表示来自伽马射线探测器218和/或220的脉冲、早期捕获、以及晚期时间门的伽马射线计数率,并且 α 是常数。应当理解,在一些实施例中,脉冲门可以表示在中子生成器206发射中子的时段(例如10 μ s),早期捕获门可以表示跟随脉冲门的第二时段(例如5 μ s),并且晚期时间门可以表示跟随早期捕获门的第三时段(例如20 μ s)。

s)。如上述,可以使用任何合适的技术执行对SS伽马射线探测器218和LS伽马射线探测器220的净非弹性计数率的计算,包括等式(5)示例的计算。例如,附加地或替代地,可以根据2009年5月22日提交的名称为“Optimization of Neutron-Gamma Tools for Inelastic Gamma ray Logging”的U.S.临时专利申请系列号61/180547公开的技术来确定非弹性伽马射线计数率,于此通过引用并入了该专利申请的全部。此外,应当理解,附加的系数或函数可以修改等式(5)的 CR_{ec} 和 CR_{lc} 项。该系数可以为常数,并且可以取决于地层242的其它测量,诸如孔隙度或 Σ 粒子(sigma)。

[0093] 以上示出的Fastn比率仅仅是获得通过地层242的快中子通量的范围的测量的一种方式。获得与快中子通量相关的该测量的其它方式可以包括例如使用来自伽马射线探测器218或220之一的非弹性伽马射线计数率之一和中子探测器212、214、216A、和/或216B之一的中子计数率的比率来得到Fastn。应当理解,中子探测器212、214、216A、和/或216B能够是快中子或超热中子探测器,中子计数率从该中子探测器212、214、216A、和/或216B获得。

[0094] Fastn信号可以指示何时向中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 施加校正以生成对具有重元素290的地层的精确的NGD测量,如图11的流程图350所示。当LWD模块120处于井眼244中时,流程图350可以开始,如图4中所看到的。中子生成器206可以发射中子246脉冲到地层242中(框352),中子可以由地层242的某些元素非弹性散射248,生成非弹性伽马射线250。可以获得中子246计数率以及这些中子引起的非弹性伽马射线250计数率(框354)。

[0095] 使用任何合适的技术,诸如等式(4)提供的,数据处理电路200可以确定快中子校正比率Fastn(框356)。如果Fastn信号下降到规定的限度外(判定框358),则数据处理电路200可以向中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 施加校正(框360)。可以实验上或通过计算机建模来确定规定的限度,并且可以通过数据处理电路200来对其进行预先规定或确定。如果数据处理电路200未确定Fastn信号在规定的限度外(判定框308),则数据处理电路200可以不施加该校正。在任何情况下,数据处理电路200可以随后使用确定的(校正的或未校正的)中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 来确定地层242的NGD测量(框362)。例如,如上述,数据处理电路可以基于等式(1)表示的关系来确定NGD测量。

[0096] 在框360中施加的对中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(CR_{neutron})$ 的校正可以取决于快中子校正比率Fastn。然而,快中子校正比率Fastn与具有重元素290的地层之间的关系可能并不是立刻明显的。实际上,在图12的图表370中,图表370绘示快中子校正比率Fastn与各种地层242的电子密度之间的关系,对具有重元素290的地层的结果看是非常类似于其它地层242的那些。

[0097] 在图12的图表370中,纵坐标372表示快中子校正比率Fastn的对数,且横坐标374表示地层242的以g/cc为单位的电子密度。图例指示已经在图表370中建模的各种类型的地层242,该图例与图6和10的各个交会图280和340的那些匹配,包括石灰石、砂石、白云石、具有空气填充孔隙的砂石、氧化铝、具有赤铁矿的砂石、以及仿真气体(simulated gas)。沿线376设置的是对具有相对低的氢指数的地层242的结果,而数字378指示的结果的集合与具有相对高的氢指数的地层242关联。因为对具有重元素290的地层的结果看似在由数字378指示的结果的集合中,所以快中子校正比率Fastn看似没有将具有重元素290的地层与由数

字378指示的其它地层242相区别开。

[0098] 然而,当根据地层242的有效密度重新绘制图12的数据时,关系出现,其中,有效密度 $\rho_{\text{effective}}$ 如下规定:

[0099]
$$\rho_{\text{effective}} = \rho_{\text{electron}} + k \cdot \text{HI} \quad (6),$$

[0100] 其中HI表示氢指数,且k表示常数。在一个实施例中,可以通过来自一个或多个近中子探测器212和/或214与一个或多个远中子探测器216A和/或216B的中子计数率比率(近/远)来估计氢指数HI值。从而,以等式(6)的方式计算的有效密度 $\rho_{\text{effective}}$ 包括地层242中的中子和伽马射线衰减的效果。有效密度 $\rho_{\text{effective}}$ 因此表示包括在第一项中的密度、来自伽马散射(电子密度)并在第二项中的效果、氢指数(慢中子)效果。此校正可以解释快中子校正比率Fastn的计算中的,并且因此也在NGD测量中的其余氢指数依赖关系。

[0101] 在图13的图表390中,该图表根据有效密度而不是电子密度来重新绘制图12的数据,具有重元素290的地层是清楚的外露层(outlier)。在图13的图表390中,纵坐标392表示快中子校正比率Fastn的对数,且横坐标394表示地层242的以g/cc为单位的有效密度,如通过等式(6)确定的。图例指示已经在图表390中被建模的各种类型的地层242,该地层包括石灰石、砂石、白云石、具有空气填充孔隙的砂石、氧化铝、具有赤铁矿的砂石、以及仿真气体(simulated gas)。沿参考线396设置的是对除具有重元素290的地层外的所有地层242的结果。即大多数点落在参考线396上或非常靠近参考线396,而不管地层242的孔隙空间的含量。即,针对液体填充的地层和干(无氢)地层242的结果落于相同的线上,具有含有铝和/或铁的重元素290的地层除外。如在图表390中清楚看到的,在不含铝或铁的地层242和含有铝或铁的那些地层之间存在非常好的差异。

[0102] 根据图13的图表390,可以通过计算具有重元素290的地层所在的点和参考线396的值之间的差异(对于相同有效密度),来确定图11的框360的校正,这是明显的。图14的图表400重新绘制图13中所示的数据,以使得此关系更清楚,具有表示 $\log(\text{Fastn})$ 空间中的快中子校正的纵坐标402和表示有效密度的横坐标404。同样,可以更清楚地看到具有重元素290的地层的结果距参考线396的距离。从而,图11的框360的校正可以是中子246计数率、非弹性伽马射线250计数率、和/或中子输运校正函数 $f(\text{CR}_{\text{neutron}})$ 的任何校正,以使得具有重元素290的地层沿参考线396对准。

[0103] 应当理解,除容许对具有重元素290的地层进行更精确的NGD测量外,快中子校正比率Fastn还可以用作页岩指示器。即,因为快中子校正比率Fastn可以用于指示存在例如铝和/或铁,所以快中子校正比率Fastn可以与其它页岩指示物(例如,中子伽马射线、中子伽马射线光谱、捕获和非弹性光谱、中子激活、 Σ 粒子等)结合使用以改善对地层岩性的分析。

[0104] 按照上述技术,首先校正交会图280和340中绘制的各种地层242,并且它们基本上是精确的,而不管低氢指数和/或低孔隙度地层288和具有重元素290的地层中的快中子输运的变化,如图15的交会图410所表示的。在交会图410中,纵坐标412表示由LS伽马射线探测器218探测的中子输运校正的伽马射线计数率的对数,且横坐标414表示地层242的以g/cc为单位的电子密度。图例指示已经在交会图410中建模的各种类型的地层,包括石灰石、砂石、白云石、具有空气填充孔隙的砂石、氧化铝、具有赤铁矿的砂石、以及仿真气体。特别地,基本上在交会图410中建模的地层242的所有结果落于线286上,这表示中子输运校正的

伽马射线计数率和已知地层密度之间的精确校正。虽然不是具有重元素290的地层的所有结果可以正好落于线286上,但是通过施加校正改善了具有重元素290的地层的结果。

[0105] 本公开的技术效果包括对宽范围的地层的中子伽马密度(NGD)测量的精确确定,该地层包括具有低氢指数或低孔隙度的地层和具有重元素的地层。即使在用于获得NGD测量中使用中子计数率和伽马射线计数率的井下工具的配置不具有最佳配置时,这些NGD测量也可以保持精确。从而,尽管缺乏快中子探测器或尽管中子探测器可以放置在距中子源非最佳的位置,但是使用以上公开的系统和技术仍然可以获得精确的NGD测量。

[0106] 已经通过范例方式示出了上述具体实施例,并且应当理解,可以对这些实施例进行各种修改,并且它们具有各种替代形式。还应当理解,不是意在将权利要求限定于公开的特定形式,而是应当涵盖落入此公开的精神和范围内的所有修改、等同物、以及替代物。

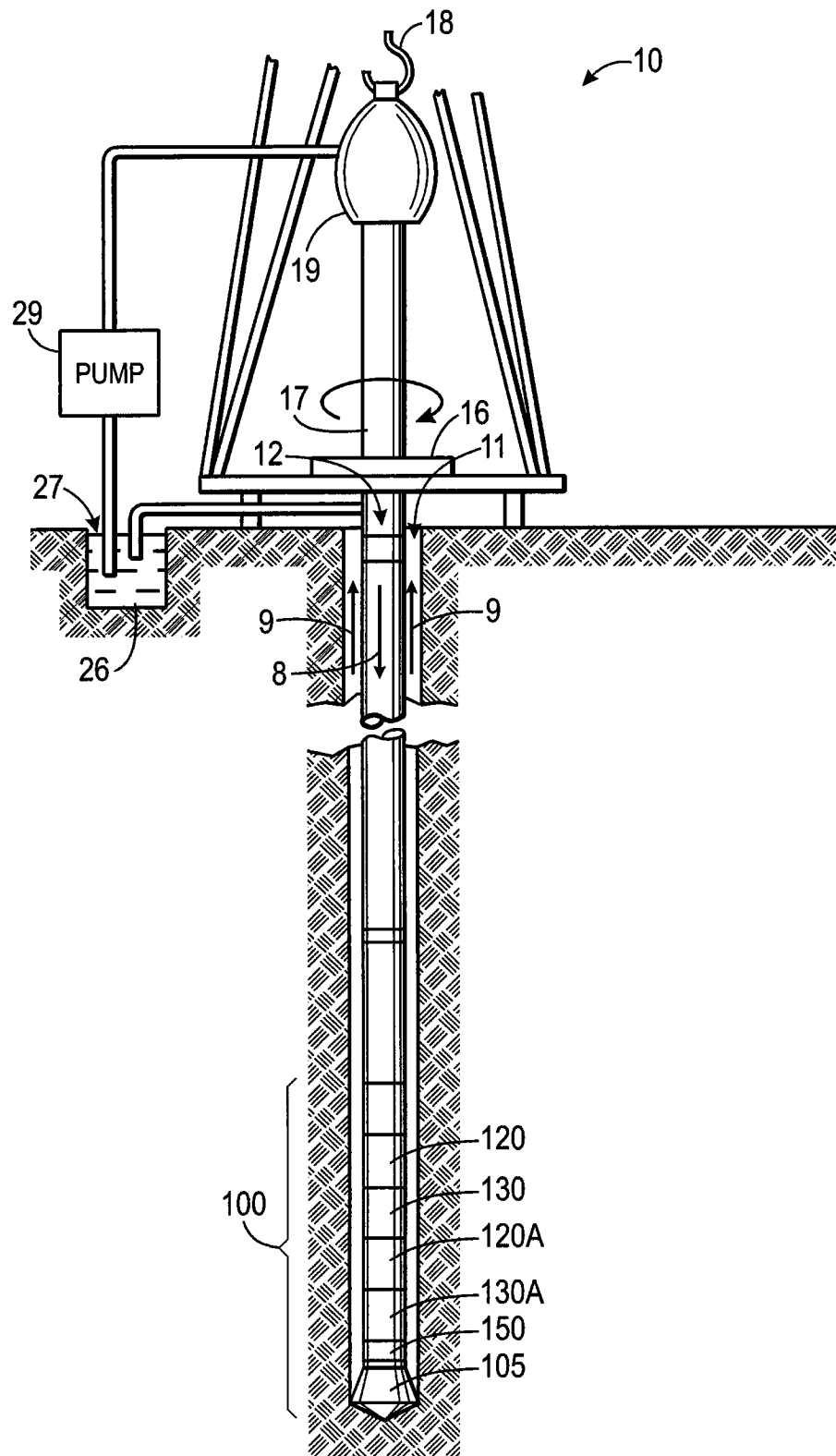


图1

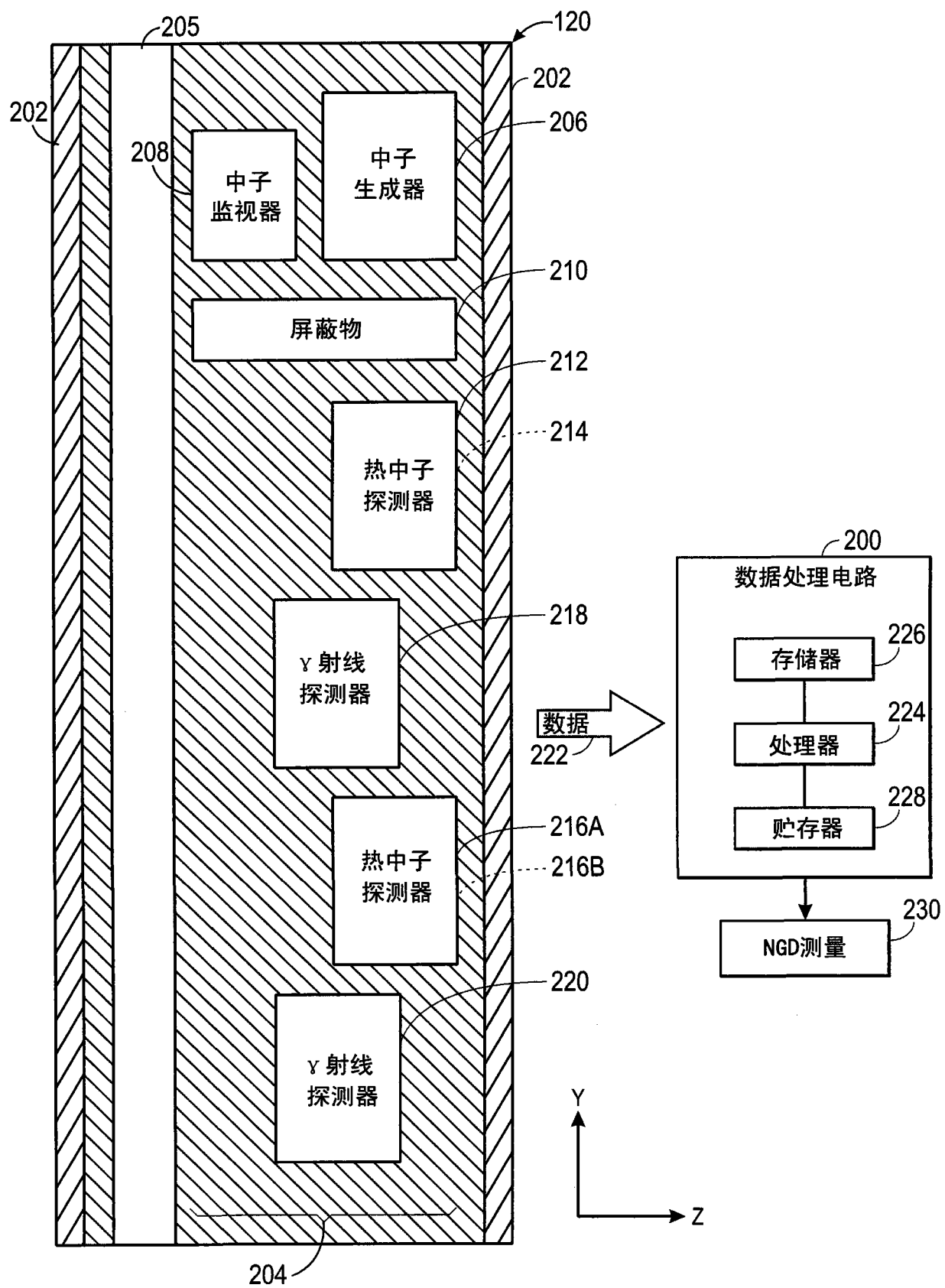


图2

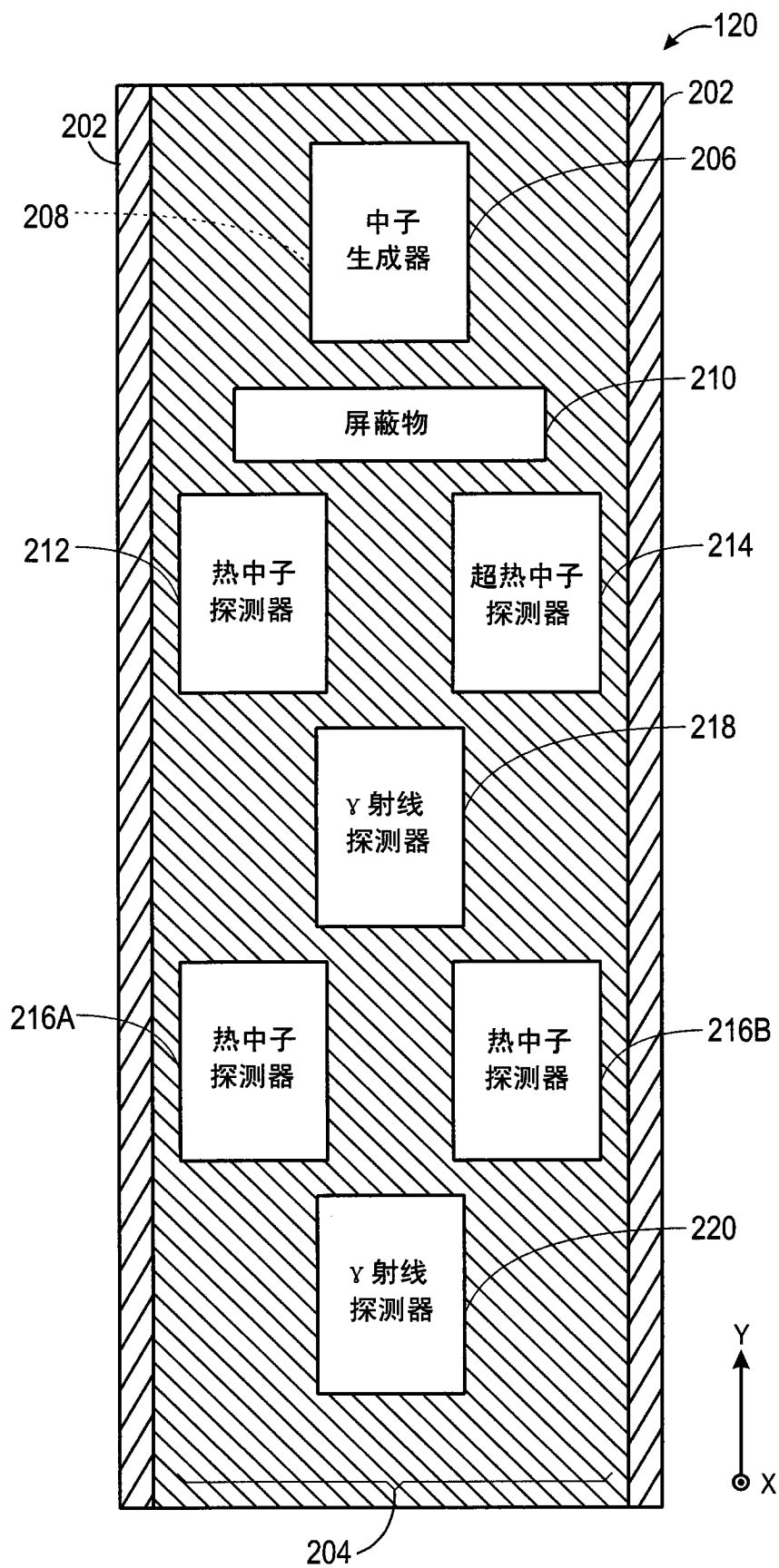


图3

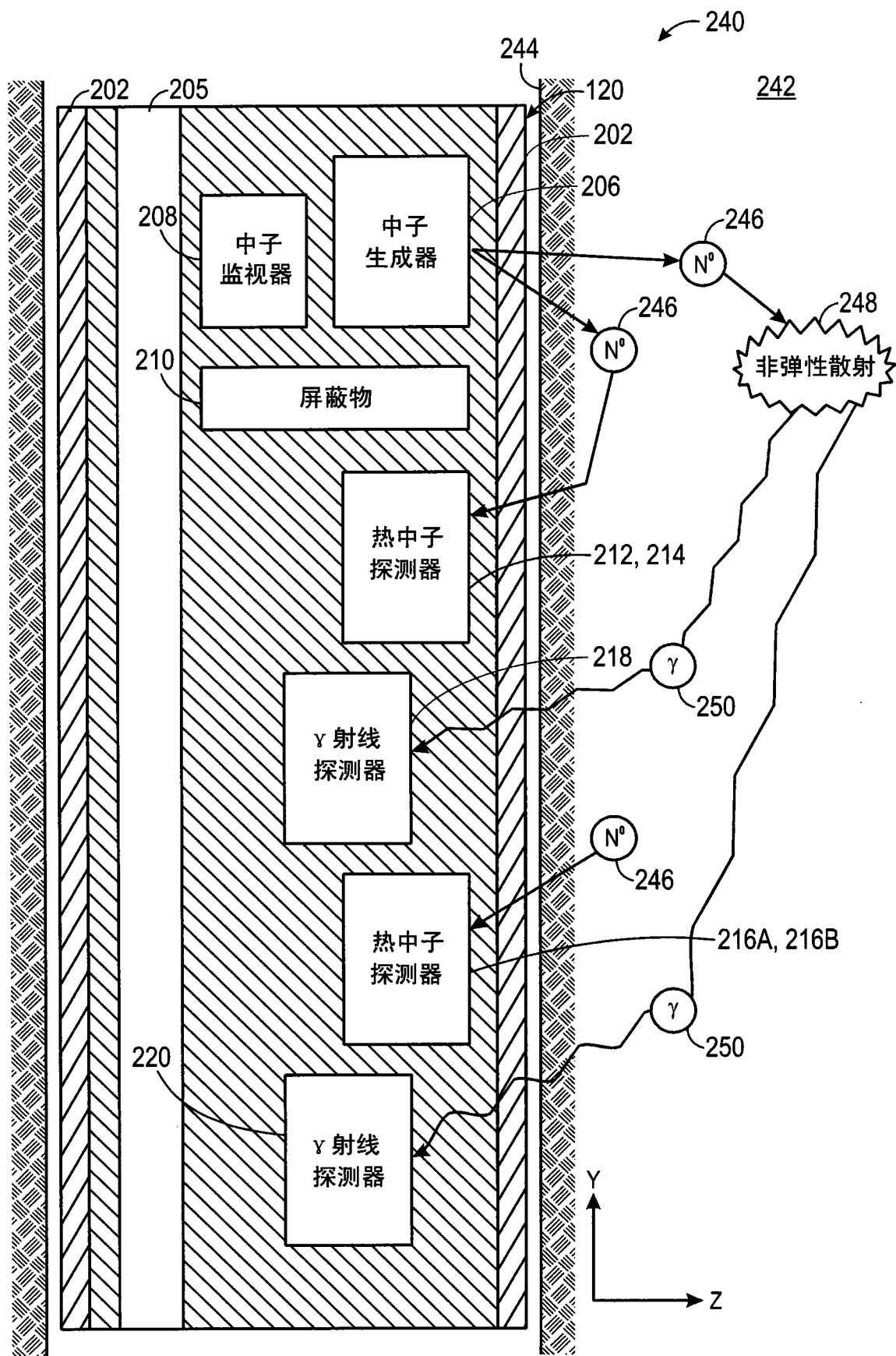


图4

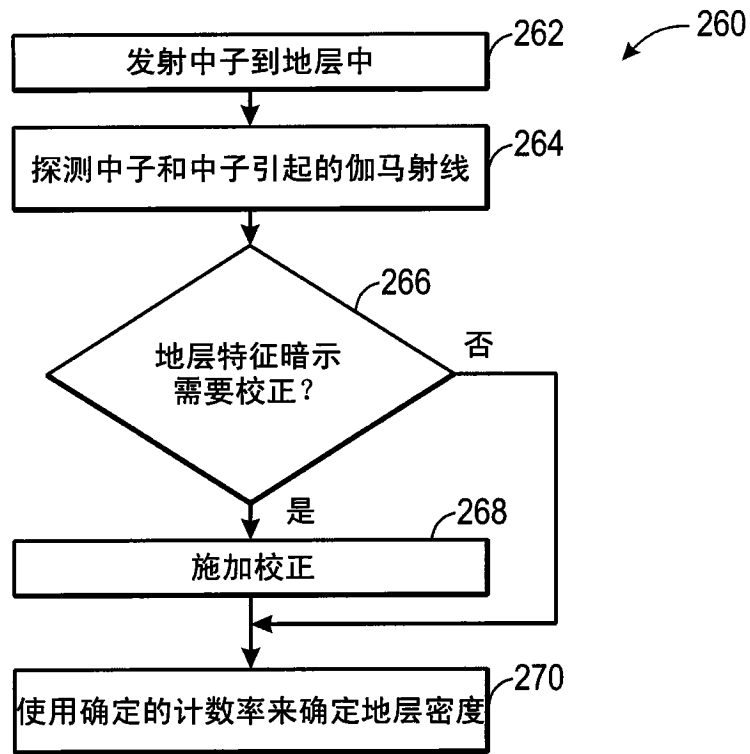


图5

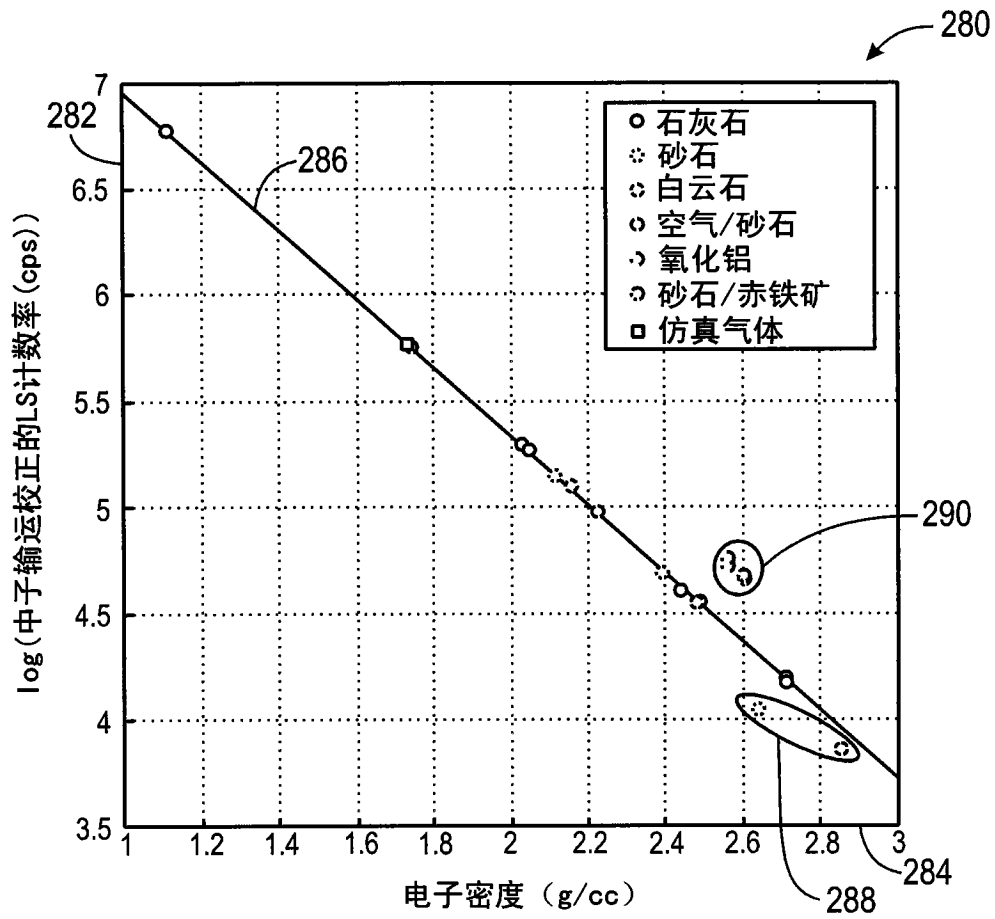


图6

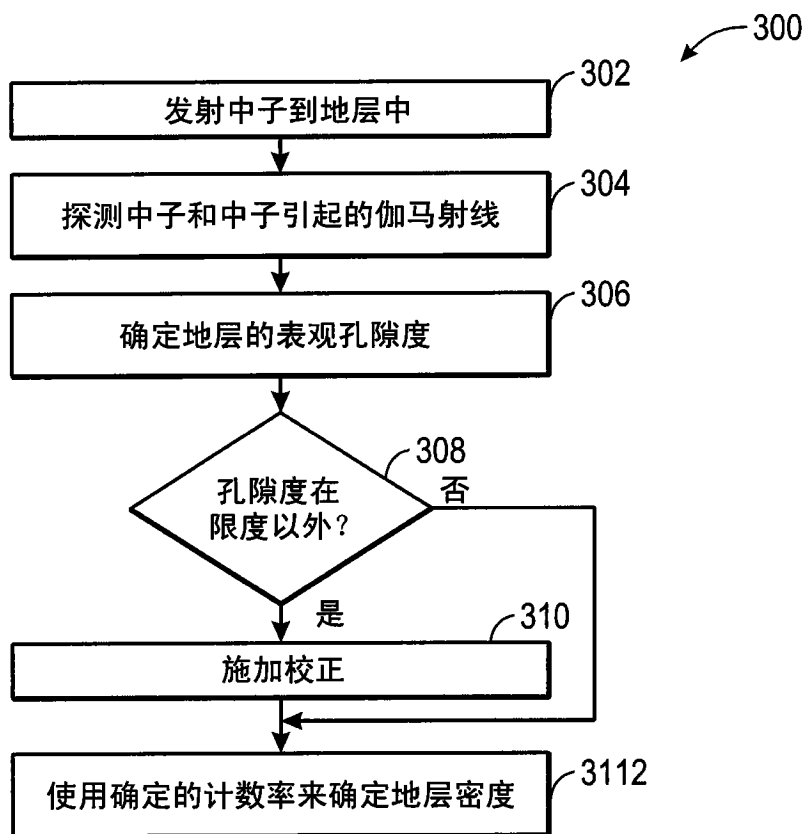


图7

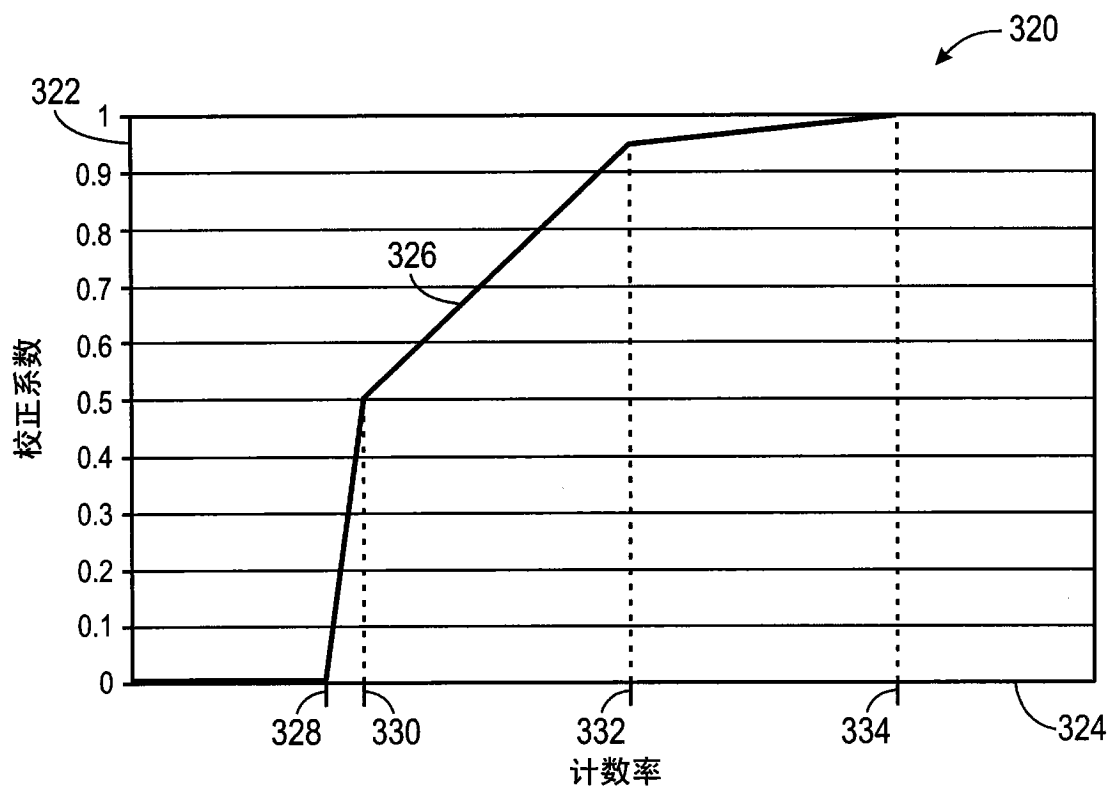


图8

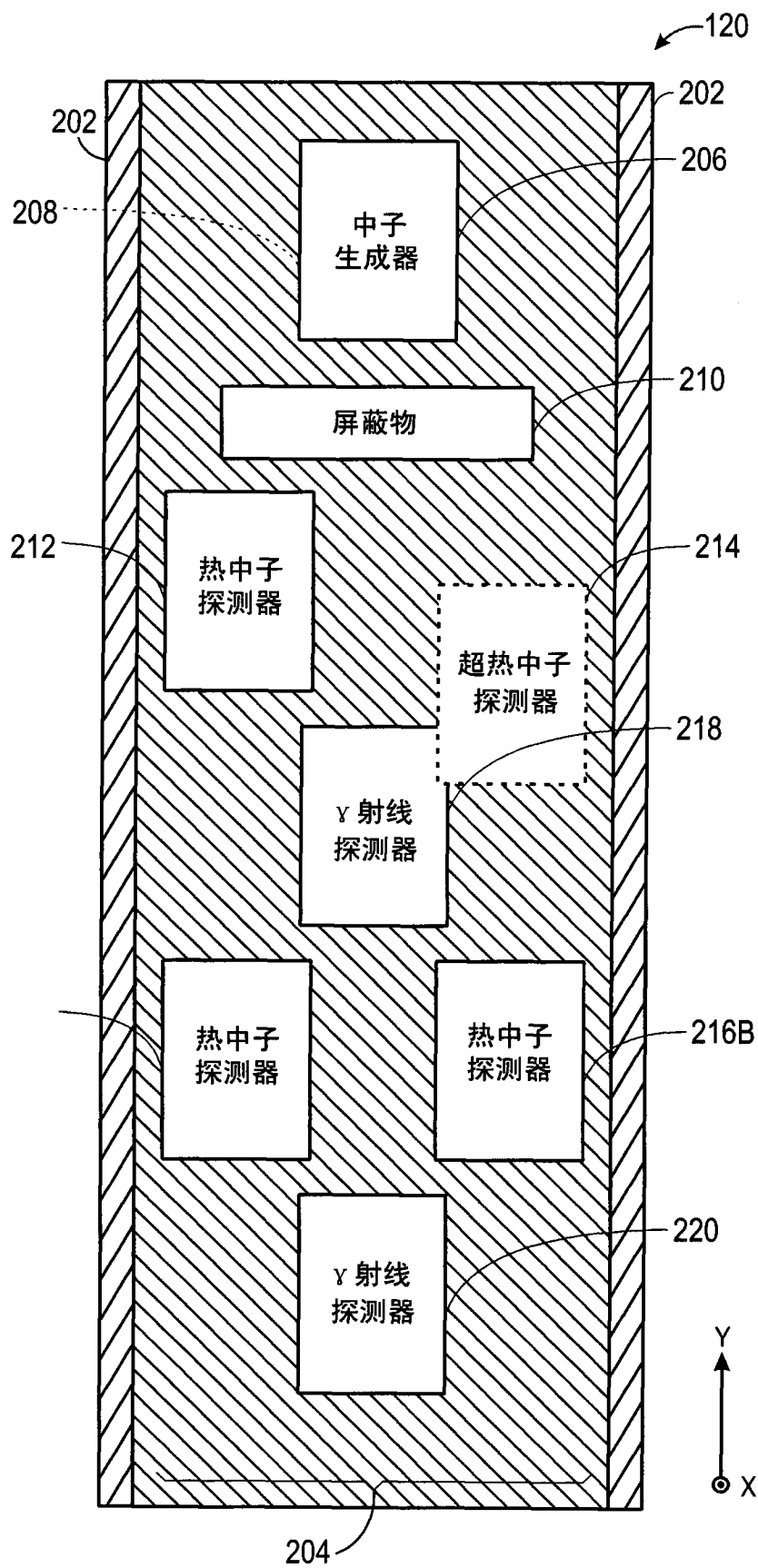


图9

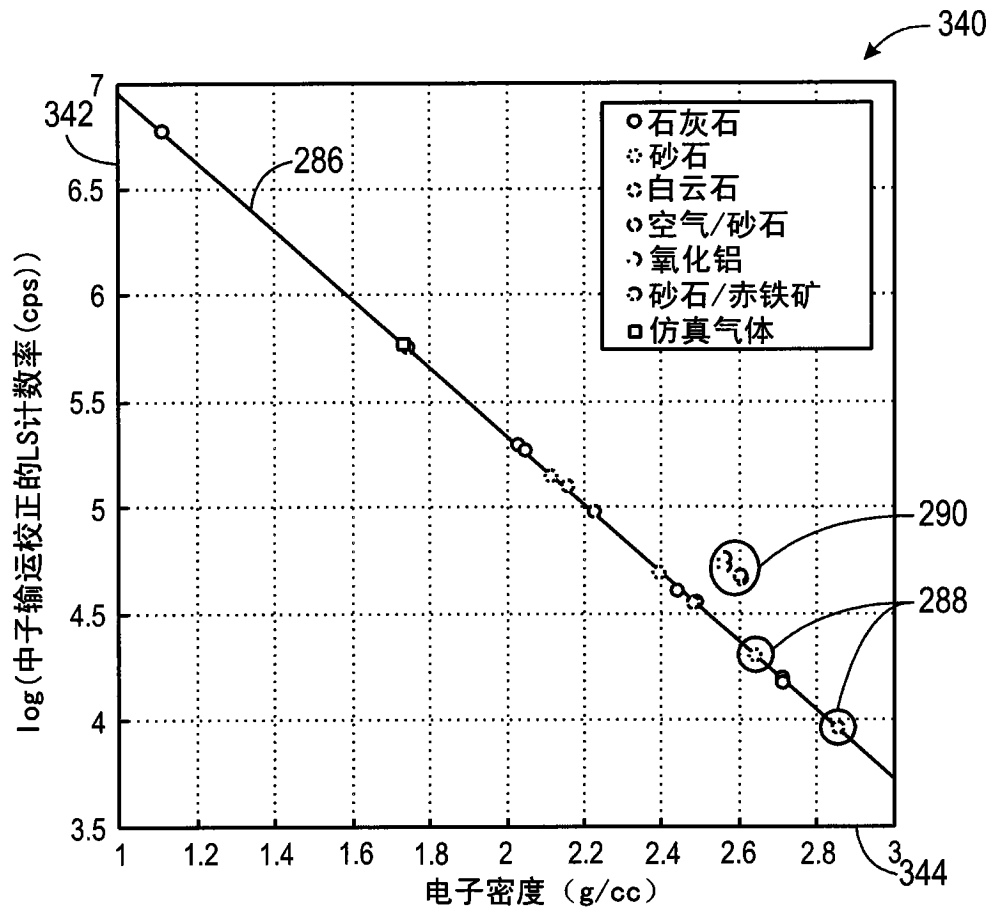


图10

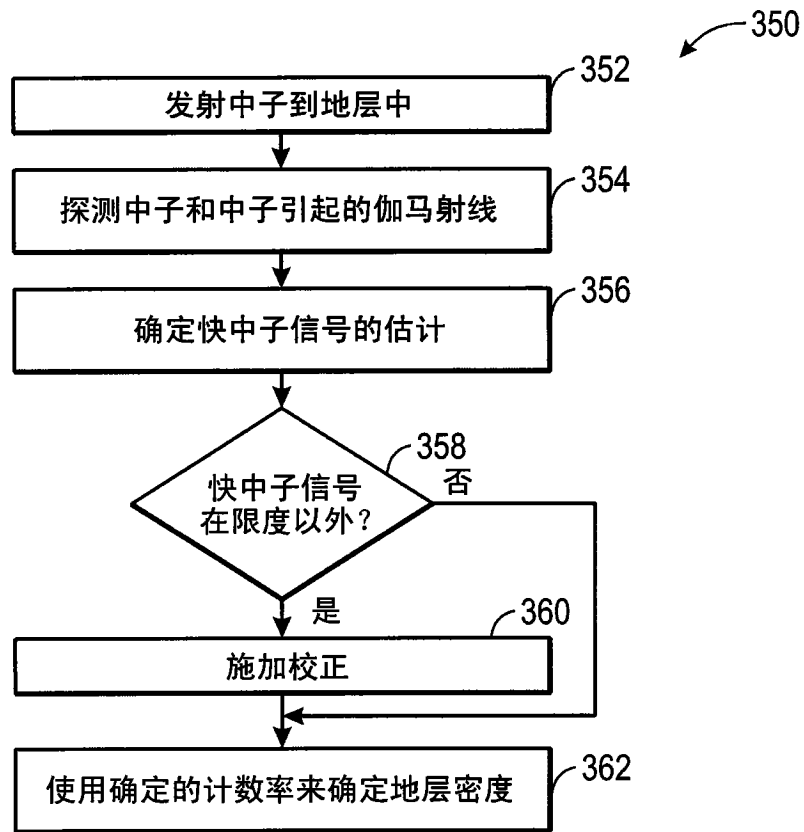


图11

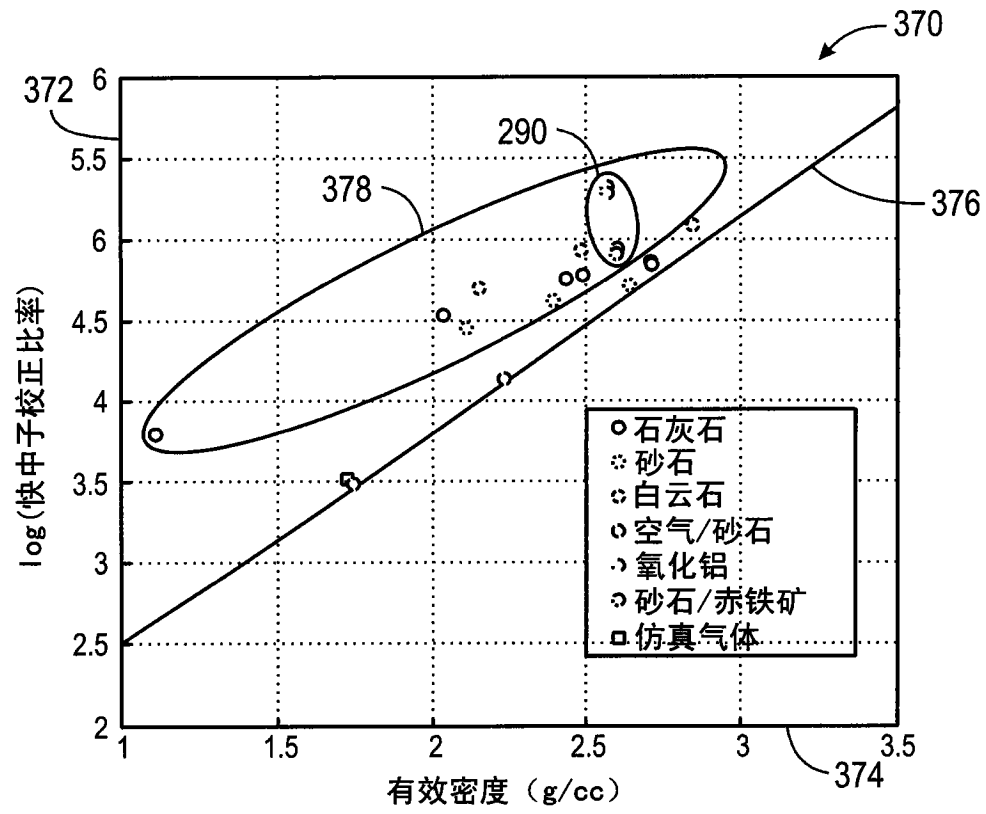


图12

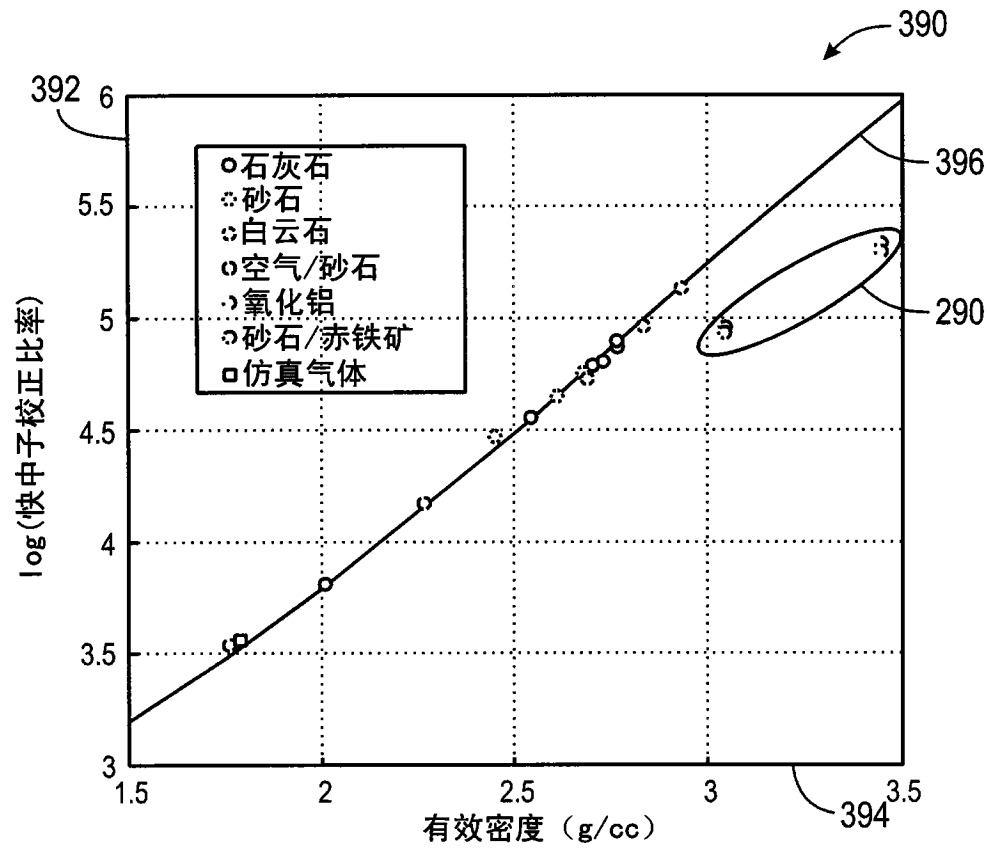


图13

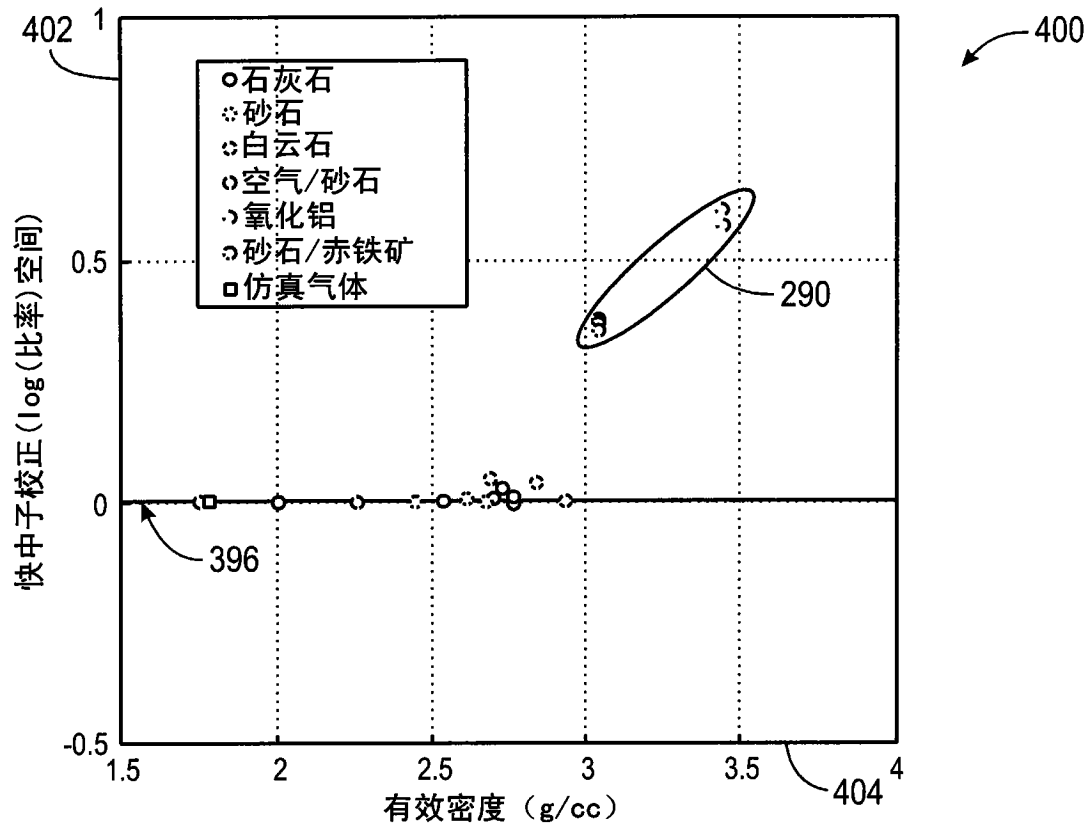


图14

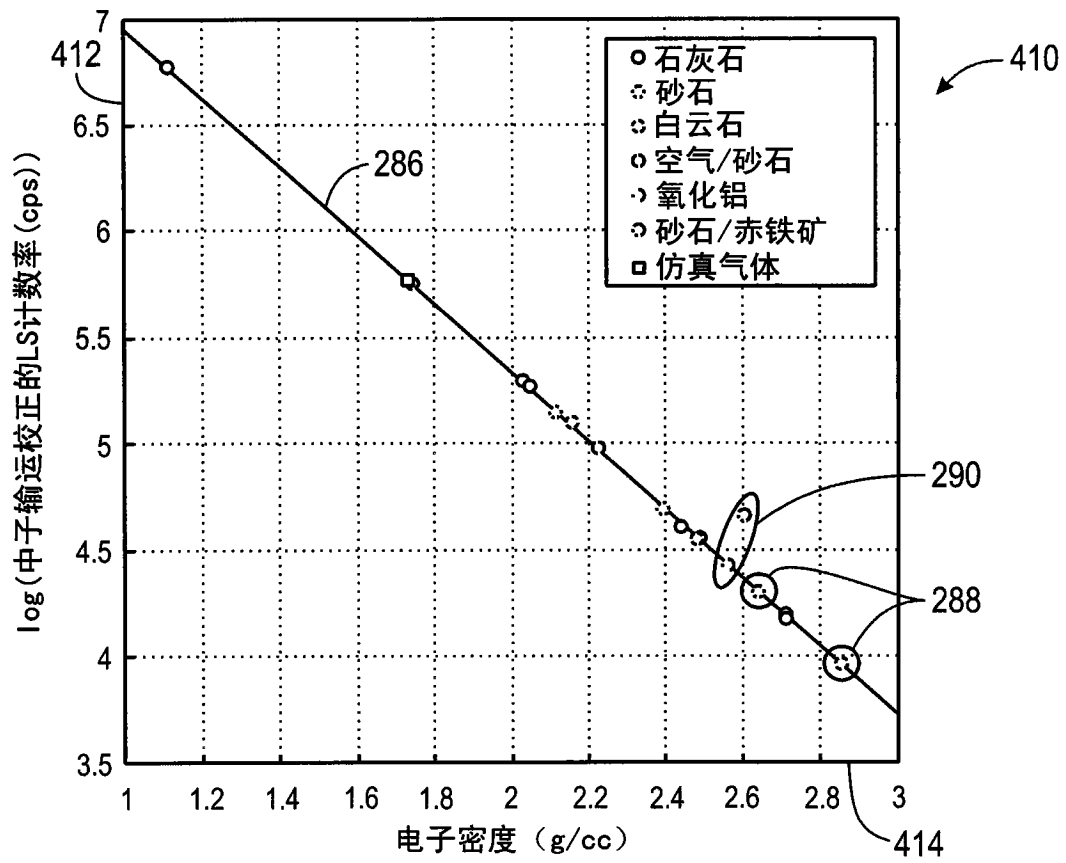


图15