

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200580016595.9

[51] Int. Cl.

E21B 43/24 (2006.01)

E21B 36/04 (2006.01)

H05B 6/10 (2006.01)

[43] 公开日 2007年6月20日

[11] 公开号 CN 1985068A

[22] 申请日 2005.4.22

[21] 申请号 200580016595.9

[30] 优先权

[32] 2004.4.23 [33] US [31] 60/565,077

[86] 国际申请 PCT/US2005/013895 2005.4.22

[87] 国际公布 WO2005/106195 英 2005.11.10

[85] 进入国家阶段日期 2006.11.23

[71] 申请人 国际壳牌研究有限公司

地址 荷兰海牙

[72] 发明人 C·K·哈里斯 H·J·维纳格

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商
标事务所
代理人 赵培训

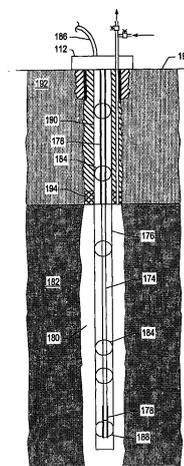
权利要求书 2 页 说明书 44 页 附图 30 页

[54] 发明名称

用于对地下地层进行加热的具有导热流体的
温度受限加热器

[57] 摘要

本发明提供一种系统，这种系统包括：加热器，该加热器包括一个或多个电导体。加热器被构造成在把电流施加到加热器期间产生热输出。加热器包括铁磁材料。一管道至少部分地环绕着加热器。流体被定位在加热器和管道之间的空间中。在标准温度和压力 (STP) (0°C 和 101.325kPa) 下，所述的流体比空气具有较高的热导率。所述的系统被构造成：(a) 当随时间变化的电流被施加到加热器时，在选定温度以下，提供第一热输出，(b) 当随时间变化的电流被施加到加热器时，在选定温度以上或接近于该选定温度，提供第二热输出。



1. 一种系统, 包括:

加热器, 该加热器包括一个或多个电导体, 且该加热器被构造成在把电流施加到加热器期间产生热输出, 其中, 所述加热器包括铁磁材料;

管道, 该管道至少部分地环绕着加热器;

流体, 该流体位于加热器和管道之间的空间中, 其中, 在标准温度和压力 (STP) (0°C 和 101.325kPa) 下, 所述的流体比空气具有更高的热导率;

其中, 这种系统被构造成: (a) 当随时间变化的电流被施加到加热器时, 在选定温度以下, 能提供第一热输出, 以及(b) 当随时间变化的电流被施加到加热器时, 在选定温度以上或接近于该选定温度, 能提供第二热输出。

2. 根据权利要求 1 所述的系统, 其特征在于, 电导体至少部分地环绕着非铁磁材料。

3. 根据权利要求 1 或 2 之一所述的系统, 其特征在于, 流体是氦或氢。

4. 根据权利要求 1-3 之一所述的系统, 其特征在于, 流体是氦, 且电导体和管道之间的空间中容积的至少 50% 是氦, 容积的至少 75% 是氦, 或容积的至少 90% 是氦。

5. 根据权利要求 1-4 之一所述的系统, 其特征在于, 在电导体和管道之间的空间中的流体压力至少为 200kPa , 至少为 500kPa , 至少为 700kPa , 或至少为 1000kPa 。

6. 根据权利要求 1-5 之一所述的系统, 其特征在于, 在电导体和管道之间的空间中的流体压力足够阻止在该空间中发生电弧。

7. 根据权利要求 1-6 之一所述的系统, 其特征在于, 系统还包括交流电电源或调制直流电电源。

8. 根据权利要求 1-7 之一所述的系统, 其特征在于, 第二热输出

是第一热输出的至多 90%、至多 80%或至多 50%，所述的第一热输出是在选定温度以下约 50°C 条件下提供的。

9. 根据权利要求 1-8 之一所述的系统，其特征在于，系统包括另外的非铁磁材料，该非铁磁材料与所述铁磁材料相耦合，且该非铁磁材料具有比所述铁磁材料要高的导电性。

10. 根据权利要求 1-9 之一所述的系统，其特征在于，所述选定温度大至为铁磁材料的居里温度或者是在铁磁材料的居里温度的 25°C 范围内。

11. 根据权利要求 1-10 之一所述的系统，其特征在于，系统具有的调节比至少为 1.1 比 1，至少为 2 比 1，或至少为 3 比 1。

12. 根据权利要求 1-11 之一所述的系统，其特征在于，电导体中的至少一个电导体是细长的且被构造成，使得在选定温度或接近该选定温度的状态下，电阻段自动地提供第二热输出。

13. 根据权利要求 1-12 之一所述的系统，其特征在于，电导体中的至少一个电导体是细长的且被构造成沿着井筒的至少一部分长度提供热输出。

14. 根据权利要求 1-13 之一所述的系统，其特征在于，电导体中的至少一个的长度至少为 10 米、至少为 50 米、或至少为 100 米。

15. 根据权利要求 1-14 之一所述的系统，其特征在于，系统被构造成允许热量从加热器传递到地下地层的一部分。

16. 根据权利要求 1-15 之一所述的系统，其特征在于，系统被构造成能被放置在地下地层中的井孔内。

17. 根据权利要求 1-16 之一所述的系统，其特征在于，系统被用在对地下地层进行加热的方法中，所述方法包括：

向加热器提供电流，以便提供电阻热输出；以及

允许热量从加热器传递到地下地层的至少一部分，从而加热器提供 (a) 当随时间变化的电流被施加到加热器时，在选定温度以下，提供第一热输出，(b) 当随时间变化的电流被施加到加热器时，在选定温度以上或接近于该选定温度，提供第二热输出。

用于对地下地层进行加热的具有导热流体的温度受限加热器

技术领域

本发明总体上涉及用于对地下地层进行加热的方法和系统。某些实施例涉及利用在环状空间中具有导热流体的温度受限加热器来加热地下地层例如含烃地层的方法和系统。

背景技术

从地下地层获得的烃通常被用作能源、工业原材料、消费产品。由于人们担心可获得的烃类资源的损耗和开采出的烃类物质总体质量的降低，从而促使人们研发了一些方法，以便对可获得的烃类资源进行更有效率地开采、加工和/或使用。现场处理方法可以被用于从地下地层中开采烃类物质。地下地层中的烃类物质的化学和/或物理特性可能需要改变，以便允许能更容易地从地下地层中开采烃类物质。化学和物理变化可包括产生可开采流体的现场反应、地层中烃类物质的组分变化、溶解度变化、密度变化、相位变化和/或粘度变化。流体可以是气体、液体、乳状液、浆液和/或具有与液体流动相似的流动特性的固体颗粒流，但不限于此。

在现场处理方法期间，加热器可以被放置在井筒中，以便对地层进行加热。在以下的美国专利文件中描述了这种现场处理方法的一些例子，这些美国专利为：**Ljungstrom** 的 **US2634961**；**Ljungstrom** 的 **US2732195**；**Ljungstrom** 的 **US2780450**；**Ljungstrom** 的 **US2789805**；**Ljungstrom** 的 **US2923535**；**Van Meurs** 等人的 **US4886118**。

可以利用热源对地下地层进行加热。电加热器可以被用于通过辐射和/或传导来加热地下地层。电加热器可以以电阻方式对一元件进行加热。在 **Germain** 的美国专利 **US2548360** 中，描述了一种被放置在井筒内的粘性油中的电加热元件。该加热元件对油进行加热，使油的

粘度减小，以便使得这些油能从井筒中被泵送出来。在 Eastlund 等人的美国专利 US4716960 中，描述了石油井的电加热管，在管道中通过一相当低的电压电流，以防止固体的形成。在 Van Egmond 的美国专利 US5065818 中，描述了一种电加热元件，这种电加热元件被固定至井筒内，在加热元件周围没有套管。

有些加热器可能会因地层中的热点而损坏或失效。如果沿着加热器的任何一个点的温度超过或即将超过该加热器的最大工作温度，那么就需要减小整个加热器的供电量，以避免加热器发生故障和/或在地层中的热点处或热点附近发生地层过热。有些加热器直到加热器达到一特定温度极限，才能沿着加热器长度均匀加热。有些加热器不能对地下地层进行有效地加热。因此，有利的是，具有这样一种加热器，这种加热器能沿着加热器长度进行均匀加热；能对地下地层进行有效地加热；和/或当加热器的一部分接近一选定温度时能自动调节温度。此外，有利的是，在这种加热器中使用具有高热导率的流体。

发明内容

本发明提供一种系统，包括：加热器，该加热器包括一个或多个电导体，且该加热器被构造成在把电流施加到加热器期间产生热输出，其中，所述的加热器包括铁磁材料；管道，该管道至少部分地环绕着加热器；流体，该流体被定位在加热器和管道之间的空间中，其中，在标准温度和压力（STP）（0℃和 101.325kPa）下，所述的流体与空气相比具有较高的热导率；且其中，这种系统被构造成能提供（a）当随时间变化的电流被施加到加热器时，在选定温度以下，提供第一热输出，（b）当随时间变化的电流被施加到加热器时，在选定温度以上或接近于该选定温度，提供第二热输出。

与上述发明进行组合，本发明还提供了：（a）电导体至少部分地环绕着非铁磁材料；（b）流体是电绝缘流体，例如，氦；（c）流体是氦，且电导体和管道之间的空间中容积的至少 50%是氦，容积的至少 75%是氦，或容积的至少 90%是氦；（d）在电导体和管道之间的

空间中的流体压力至少为 200kPa，至少为 500kPa，至少为 700kPa，或至少为 1000kPa。

与上面的一个或多个发明相结合，本发明还提供了：(a) 系统包括另外的交流电电源或调制直流电电源；(b) 系统具有的调节比至少为 1.1 比 1，至少为 2 比 1，或至少为 3 比 1。

与上面的一个或多个发明相结合，本发明还提供了：(a) 系统包括另外的非铁磁材料，该非铁磁材料与铁磁材料相接合，且该非铁磁材料具有比铁磁材料要高的导电性；(b) 所选定的温度大约为铁磁材料的居里温度或者是在铁磁材料的居里温度的 25°C 范围内；(c) 一些电导体中的至少一个电导体是细长的且被构造成，使得在选定温度或接近该温度的状态下，电阻段自动地提供第二热输出。

附图说明

通过下面的详细描述，并参照附图，本领域技术人员就可更好地理解本发明的优点，在这些附图中：

图 1 是地层中烃类物质的一些加热阶段的示意图。

图 2 是用于对地层中烃类物质进行处理的现场转换系统的一部分的实施例的示意图。

图 3、4、5 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有外部导体，该外部导体具有铁磁部分和非铁磁部分。

图 6、7、8、9 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有外部导体，该外部导体具有放置在护套内的铁磁部分和非铁磁部分。

图 10、11、12 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体。

图 13、14、15 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有外部导体。

图 16A、16B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁内部导体。

图 17A、17B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁内部导体和非铁磁芯。

图 18A、18B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体。

图 19A、19B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体，该铁磁外部导体被镀有耐腐合金。

图 20A、20B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体。

图 21 是根据一实施例的复合导体的剖面图，该复合导体具有支撑元件。

图 22 是根据一实施例的复合导体的剖面图，该复合导体具有支撑元件，该支撑元件把导体间隔开。

图 23 是根据一实施例的复合导体的剖面图，该复合导体环绕着支撑元件。

图 24 是根据一实施例的复合导体的剖面图，该复合导体环绕着管道支撑元件。

图 25 是根据一实施例的导体位于管道中的加热器的剖面图。

图 26A、26B 是绝缘的导体加热器的一实施例。

图 27A、27B 是绝缘的导体加热器的一实施例，该加热器具有一护套，该护套位于外部导体的外面。

图 28 是位于管道内部的绝缘的导体的一实施例。

图 29、30、31、32、33、34、35、36 表示对于其中杆和管道辐射系数都为 0.8 的基本情况以及其中杆辐射系数被降低到 0.4 的低辐射系数情况，加热杆的温度是杆内所产生电流的函数。

图 37 表示出了对于在环状空间内具有空气或氦且不同加热器功率而言中央加热杆（辐射系数为 0.8）温度与管道温度之间的关系。

图 38 表示出了对于在环状空间内具有空气或氦且不同加热器功率而言中央加热杆（辐射系数为 0.4）温度与管道温度之间的关系。

图 39 表示出了对于环状空间内具有空气的导体位于管道中的加

热器而言，在不同温度，火花间隙击穿电压与压力的关系。

图 40 表示出了对于环状空间内具有氦的导体位于管道中的加热器而言，在不同温度，火花间隙击穿电压与压力的关系。

图 41 表示对于 446 不锈钢杆而言，在不同的施加电流，电阻与温度之间的关系。

图 42 表示对于一温度受限加热器在不同的施加电流，电阻与温度之间的关系。

图 43 表示对于一实心的直径为 2.54cm,长度为 1.8m 的 410 不锈钢杆在不同的施加电流情况下，电阻与温度之间关系的数据。

图 44 表示对于一实心的直径为 2.54cm,长度为 1.8m 的 410 不锈钢杆在不同的施加的交流电电流，集肤深度与温度之间关系的数据。

图 45 表示一温度受限加热器的温度与时间之间的关系。

图 46 表示出了 2.5cm 实心 410 不锈钢杆和 2.5cm 实心 304 不锈钢杆的温度与测量时间数据之间的关系。

图 47 表示出了一种导体位于管道中的加热器的中心导体的温度是调节比为 2: 1 的一温度受限加热器的地层深度的一个函数。

图 48 表示出了沿着油页岩丰富轮廓对于调节比为 2: 1 而言通过一地层的加热器热流量。

图 49 表示出了对于调节比为 3: 1 而言，加热器温度与地层深度之间的函数关系。

图 50 表示出了沿着油页岩丰富轮廓对于调节比为 3: 1 而言通过一地层的加热器热流量。

图 51 表示出了对于调节比为 4: 1 而言，加热器温度与地层深度之间的函数关系。

图 52 表示出了对于在模拟中用于对油页岩进行加热的加热器而言，加热器温度与深度之间的函数关系。

图 53 表示出了对于在模拟中用于对油页岩进行加热的加热器而言，加热器热流量与时间的函数关系。

图 54 表示出了在对油页岩进行加热的模拟中，累积的热输出与时

间之间的函数关系。

尽管本发明可以具有各种变型，可采用其它的一些形式，但图中通过举例的方式给出了本发明的一些具体实施例，这些具体实施例在这里将被详细描述，附图并不是按比例绘制的。然而，应当知道，附图和所作的详细描述并不是要把本发明局限于所公开的具体形式，相反，本发明应包括落入本发明构思和范围之内的所有的变型、等同方案和替代方案，本发明的范围是由所附的权利要求来限定的。

具体实施方式

利用这里所描述的系统、方法和加热器就可以解决上述问题。例如，系统包括电导体，该电导体被构造成在把电流施加到电导体期间产生电阻热输出。电导体可包括电阻铁磁材料。一管道可至少部分地环绕着电导体。流体可以被定位在电导体和管道之间的空间中。在空间中的温度和 101kPa 状态下，流体与空气相比具有较高的热导率。系统被构造成在选定温度附近或该选定温度以上时能提供减小的热量。

在这里更详细描述的本发明的一些实施例涉及用于对地层中的烃类物质进行加热的系统和方法。这些地层可以被处理，以便生产出烃类产品、氢气或其它产品。在这里所使用的术语被定义如下：

“烃类物质”总体上被定义为主要由碳和氢原子构成的分子。烃类物质也可包括其它一些元素，例如卤族元素、金属元素、氮、氧和/或硫，但并不局限于这些元素。烃类物质可以是油母岩、沥青、焦沥青、油、天然矿物蜡、沥青岩，但并不局限于这些。烃类物质可以位于地层的矿石中或其附近，矿石可包括沉积岩、砂岩、硅酸岩、碳酸岩、硅藻土和其它多孔介质，但并不局限于这些。“烃类流体”是指包含烃类物质的流体。烃类流体可包括、夹杂或可被夹杂在非烃类流体（例如氢、氮、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、水、氨）中。

“地层”包括一个或多个含烃类物质的层、一个或多个非烃类物质层、覆盖层和/或下底层。覆盖层和/或下底层可包括岩石、页岩、泥

岩或湿的/紧密的碳酸岩。在现场转换方法的一些实施例中，覆盖层和/或下底层可包括含烃类物质的层或者一些含烃类物质的层，在现场转换处理期间，这些含烃类物质的层是相对不渗透的并且不受温度影响，所述的现场转换处理导致覆盖层和/或下底层的这些含烃类物质的层的特性发生相当大的改变。例如，覆盖层可包含页岩或泥岩，但在现场转换处理期间，下底层不允许被加热至热解温度。在某些情况下，覆盖层和/或下底层可以有点渗透性。

“地层流体”和“产出流体”指的是从地层中开采出的流体，可包括热解流体，合成气体，动化的烃类物质和水（蒸汽）。地层流体可包括烃类流体和非烃类流体。

“热导流体”包括这样的流体，在标准温度和压力（STP）（0℃和101.325kPa）下，该流体与空气相比具有更高的热导率。

“加热器”是用于在井筒或在井筒区域附近产生热量的任何系统。加热器可以是电加热器、循环换热流体或蒸汽、炉、与地层中的材料或与从地层中生产出的材料进行反应的燃烧室、和/或它们的组合，但并局限于这些。

“温度受限加热器”总体上是指这样的加热器，它无需利用外部控制例如温度控制器、功率调节器、调整器或其它装置，就能在一规定温度范围以上调节热量输出（例如，减小热量输出）。温度受限加热器可以是交流电（AC）供电的或调制（例如“突变”）直流电（DC）供电的电阻加热器。

“居里温度”是指这样的温度，即，在该温度以上，铁磁材料就失去其全部的铁磁特性。铁磁材料除了在居里温度以上失去其全部的铁磁特性以外，在增大的电流通过该铁磁材料时也开始失去其铁磁特性。

“随时间变化的电流”是指这样的电流，即，该电流的大小随着时间而变化。随时间变化的电流包括交流电（AC）和调制直流电（DC）。

“交流电（AC）”是指随时间变化的电流，该电流基本上以正弦方式进行反向。交流电在铁磁导体中产生集肤效应电流流动。

“调制直流电（DC）”是指任何基本上非正弦的随时间变化的电流，

该电流在铁磁导体中产生集肤效应电流流动。

温度受限加热器的“调节比”是指对于给定电流而言，在居里温度以下最高交流电或调制直流电电阻与在居里温度以上最低电阻的比值。

术语“井筒”是指通过钻进或把管道插入到地层内所形成的地层中的孔眼。在本文中，术语“井眼”和“井孔”，当指地层中的孔眼时，它们与术语“井筒”是可互换使用的。

“绝缘导体”是指这样的细长材料，即，它能导电，并且全部或部分地被绝缘材料包裹着。术语“自控制”是指采取无需任何形式的外部控制的方式来控制加热器的输出。

在减小热量输出的加热系统、装置和方法中的上下文中，术语“自动”的意思是这些系统、装置和方法以特定方式起作用，无需采用外部控制（例如外部控制器，如具有温度传感器和反馈回路的控制器，PID控制器或预测控制器）。

地层中的烃类物质可以以各种方式被处理，以便生产出许多不同的产品。在某些实施例中，这些地层被分阶段处理。图 1 表示出了对含有烃类物质的一部分地层进行加热的若干阶段。图 1 还表示出了（y 轴）地层的每吨的以桶计的油当量的产量（Y）与（x 轴）加热地层以摄氏度计的温度（T）之间的关系。

在阶段 1 加热期间，发生甲烷解吸附和水的蒸发。通过阶段 1 对地层进行加热可以被尽快地进行。当地层被开始加热时，地层中的烃类物质就把吸附的甲烷释放出来。被解吸附的甲烷可以从地层中被开采出来。如果地层被进一步加热，那么，地层中的水就被蒸发。在地层中，水通常在 160°C 和 285°C 之间和在 600kPa 绝对压力至 7000kPa 绝对压力之间被蒸发。在某些实施例中，蒸发的水在地层中产生可湿性改变和/或使地层压力增大。可湿性改变和/或压力增大会影响地层中的热解反应或其它反应。在某些实施例中，蒸发的水从地层被开采出来。在其它一些实施例中，蒸发的水在地层中或地层外被用于蒸汽提取和/或蒸馏。通过把水从地层中去除，并增大地层中的孔容积，就

可以增大孔容积中存储烃类物质的存储空间。

在某些实施例中，在阶段 1 加热之后，部分地层被进一步加热，从而使得部分地层中的温度（至少）达到开始热解温度（例如，如阶段 2 所示的温度范围的下端点的温度）。在整个阶段 2，地层中的烃类物质可以被热解。热解温度范围随着地层中的烃的种类的不同而改变。热解温度范围可包括位于 250℃至 900℃之间的温度。用于开采期望产品的热解温度范围只可通过整个热解温度范围的一部分延伸。在某些实施例中，用于开采期望产品的热解温度范围可包括 250℃至 400℃之间的温度、250℃至 350℃之间的温度、或 325℃至 400℃之间的温度。如果地层中的烃类物质的温度通过从 250℃至 400℃的温度范围缓慢升高，那么，当温度到达 400℃时，热解产品的开采就可以基本完成。利用许多加热器对地层进行加热，可以使那些通过热解温度范围使地层中的烃类物质的温度缓慢升高的热量进行叠加。

在某些现场转变实施例中，一部分地层被加热至期望温度，而不是通过热解温度范围来缓慢地加热。在某些实施例中，期望温度为 300℃。在某些实施例中，期望温度为 325℃。在某些实施例中，期望温度为 350℃。其它的温度也可以被选择作为期望温度。来自多个加热器的热量的叠加，使得在地层中可以相对快速和有效地达到期望温度。从加热器向地层中输出的能量可以被调节，以便使地层中的温度保持在期望温度。地层的被加热部分基本上被保持在期望温度，直到热解衰减而使从地层中开采期望地层流体变得不经济为止。产生热解的部分地层可包括这样一些区域，这些区域只通过一个加热器的热传递来使其温度处于热解温度范围内。

在某些实施例中，包括热解流体的地层流体从地层中被开采出来。随着地层温度的升高，开采地层流体中可凝缩的烃类物质的量会降低。在非常高的温度下，地层主要产生甲烷和/或氢。如果地层在整个热解范围内被加热，那么，朝着热解范围的上限，地层就可只产生少量的氢。在大部分可获得的氢采完之后，就将从地层中开采少量的流体。

在烃类物质热解之后，在加热部分的地层中仍然存在大量的碳和

一些氢。保留在加热部分的地层中的一部分碳可以以合成气体的形式从地层中被开采出来。合成气体的产生可发生在图 1 所示的阶段 3 加热期间。阶段 3 可包括把经加热部分的地层加热到一个足以允许产生合成气体的温度。可以在 400℃至 1200℃, 500℃至 1100℃, 或 550℃至 1000℃的温度范围中开采合成气体。当合成气体产生流体被引入到地层时, 加热部分的地层的温度决定了从该地层中所开采出的合成气体的组分。可以通过一个或多个开采井眼来开采所产生的合成气体。

图 2 表示出了用于对含有烃类物质的地层进行处理的现场转变系统中的一部分的实施例的示意图。加热器 100 被放置在至少一部分地层中。加热器 100 向至少一部分地层提供热量, 以便对地层中的烃类物质进行加热。能量可以通过供给管线 102 被供给到加热器 100。供给管线 102 的结构可以根据加热地层所用的加热器类型的不同而不同。加热器的供给管线 102 可以为电加热器传送电, 可以为燃烧器传送燃料, 或者可以传送在地层中循环流动的热交换流体。

生产井 104 被用于从地层中开采地层流体。从生产井 104 中开采出的地层流体可以通过收集管道 106 被传送至处理设备 108。地层流体也可从加热器 100 被开采出来。例如, 流体可以从加热器 100 被开采出来, 以便控制邻近加热器的地层中的压力。从加热器 100 开采的流体可以通过管系或管道被输送至收集管道 106, 或者是, 开采出的流体可以通过管系或管道直接被输送至处理设备 108。处理设备 108 可包括分离单元、反应单元、浓缩单元、从气体中去除硫的单元、燃料室、透平机、存储容器、和/或用于对开采出的地层流体进行加工处理的其它系统和单元。

用于对烃类物质进行处理的现场转变系统可包括一些隔离井 110。这些隔离井 110 被用于在一处理区域周围形成隔离。该隔离阻止流体流入和/或流出处理区域。隔离井包括脱水井、真空井、捕获井、注射井、灌浆井、冻井、或它们的组合, 但并不局限于这些。在某些实施例中, 隔离井 110 是一些脱水井。脱水井可以去除液态水和/或阻止液态水进入要被加热的一部分地层或正在被加热的地层。在图 2 所

示实施例中，表示出了脱水井只沿着加热器 100 的一侧延伸，但是，脱水井通常环绕在被用于或将被用于对地层进行加热的全部加热器 100 周围。

如图 2 所示，除了加热器 100 以外，在地层中还可以设置一个或多个生产井 104。可以通过生产井 104 来开采地层流体。在某些实施例中，生产井 104 包括加热器。生产井中的加热器可以对生产井处及其附近的地层的一个或多个部分进行加热，并且允许地层流体的气相去除。对从生产井进行液体的高温泵送的需要被减少或消除。避免或限制高温液体泵送可以显著减小生产成本。在生产井或通过生产井提供热量，可以：（1）当开采流体正在覆盖层附近的生产井中移动时，阻止这种开采流体的冷凝和/或回流，（2）增大向地层内的热量输入，和/或（3）在生产井处或其附近增大地层的可渗透性。在某些现场转变处理实施例中，从生产井的每米生产井供给到地层的热量要小于从对地层进行加热的加热器的每米加热器供给到地层的热量。

某些实施例的加热器包括开关（例如，熔丝和/或恒温件），当加热器中到达特定条件时，开关就关闭加热器的电源或部分加热器。在某些实施例中，利用温度受限加热器来向地层中的烃类物质提供热量。

温度受限加热器可以有多种结构，和/或包括这样一些材料，这些材料在特定温度为加热器提供自动的温度限制特性。在某些实施例中，铁磁材料被用在温度受限加热器中。铁磁材料在该材料的居里温度或其附近可以自限制温度，以便当向该材料施加随时间变化的电流时，在居里温度或其附近能提供减小的热量。在某些实施例中，在选定温度条件下，铁磁材料对温度受限加热器的温度进行自限制，所述的选定温度大约为居里温度。在某些实施例中，所选定的温度在居里温度的约 35℃ 范围内、约 25℃ 范围内、约 20℃ 范围内、或约 10℃ 范围内。在某些实施例中，铁磁材料与其他材料（例如高导材料、高强度材料、耐腐材料或它们的组合）相接合，以便提供各种电特性和/或机械特性。温度受限加热器的某些部分所具有的电阻比温度受限加热器的其它部分要低（这是由不同的几何形状和/或利用不同的铁磁和/或非铁磁材

料造成的)。通过使温度受限加热器的各个部分具有不同的材料和/或尺寸大小,就可以使加热器的每个部分适应所期望的热量输出。

温度受限加热器可以比其它加热器更可靠些。温度受限加热器较不易因地层中的热点而破损或发生故障。在某些实施例中,温度受限加热器可以基本均匀地对地层进行加热。在某些实施例中,温度受限加热器通过沿加热器的整个长度以更高的平均热量输出运作,从而能够更有效地对地层进行加热。温度受限加热器沿着加热器的整个长度以较高的平均热量输出进行运作,这是因为如果沿着加热器任何点的温度超过或将超过加热器的最大工作温度,那么针对整个加热器而言,供向加热器的功率无需减小,而对于典型的恒定瓦特数的加热器却是必须减小供向加热器的功率。从达到加热器的居里温度的温度受限加热器的各部分的热量输出会自动减小,而无需对施加到加热器的电流进行受控调节。由于温度受限加热器各部分的电学特性(例如电阻)发生改变,因此,热量输出会自动减小。这样,在较大部分热处理期间,温度受限加热器能提供更大的功率。

在某些实施例中,具有温度受限加热器的系统当通过随时间变化的电流对温度受限加热器激励时,在加热器的电阻部分的居里温度或该温度附近或之上,起初提供第一热输出,然后提供减小的(第二热输出)热输出。第一热输出是温度受限加热器开始自限制的温度以下的热输出。在一些实施例中,第一热输出是在温度受限加热器中的铁磁材料的居里温度以下的 50°C 、 75°C 、 100°C 、或 125°C 的温度状态下的热输出。

温度受限加热器可由在井头(wellhead)提供的随时间变化的电流(交流电或调制直流电)来激励。井头可包括电源和其它用于向温度受限加热器供电的部件(例如调制部件、转换器和/或电容)。该温度受限加热器可以是用于对一部分地层进行加热的许多加热器中的一个。

在某些实施例中,温度受限加热器包括导体,当向该导体施加随时间变化的电流时,该导体就作为一种集肤效应或邻近效应加热器进

行工作。集肤效应限制电流渗透到该导体内的深度。对于铁磁材料而言，集肤效应由导体的导磁率决定。铁磁材料的相对导磁率通常在 10 至 1000 之间（例如，铁磁材料的相对导磁率通常至少为 10，至少为 50，100，500，1000 或更大）。随着铁磁材料的温度升高到居里温度之上和/或随着所施加的电流的增大，铁磁材料的导磁率显著减小，从而集肤深度迅速增大（例如，集肤深度以导磁率的反平方根进行增大）。导磁率的减小，导致在居里温度或该温度附近或之上和/或随着所施加电流的增大，所述导体的交流电或调制直流电阻减小。当温度受限加热器由基本上恒定电流的电源供电时，加热器的那些接近、达到或高于居里温度的部分可以减小散热。温度受限加热器的那些不位于居里温度或其附近的部分由集肤效应加热支配，从而允许加热器具有高散热，这是由于较高电阻负荷的缘故。

居里温度加热器已被应用在焊接设备、医疗应用加热器和烤炉加热元件中。这些应用中一部分应用在 Lamome 等人的美国专利 US5579575，Henschen 等人的 US5065501，Yagnik 等人的 US5512732 中被公开了。在 Whitney 等人的 US4849611 中描述了许多离散的间隔开的一些加热单元，这些加热单元包括反应部件、电阻加热部件和温度响应部件。

利用温度受限加热器对地层中的烃类物质进行加热的一个优点在于：导体被选择成具有在期望的工作温度范围内的居里温度。在期望工作温度范围内的操作允许大量的热被注入至地层内，同时把温度受限加热器和其它设备的温度保持在设计极限温度之下。设计极限温度是这样的一些温度，即，在这些温度，一些特性例如腐蚀性能、蠕变性能和/或变形性能会受到不利的影 响。温度受限加热器的这些温度限制特性可阻止位于地层中的低热导率“热点”附近的加热器过热或烧毁。在某些实施例中，温度受限加热器能降低或控制热量输出和/或承受在 25°C，37°C，100°C，250°C，500°C，700°C，800°C，900°C 之上或高达 1131°C 的温度，这取决于加热器中所用的材料。

温度受限加热器允许向地层内输入的热量要比恒定瓦特数的加热

器所输入的热量多，这是由于输入到温度受限加热器内的能量无需被限制以适应加热器附近的低热导区域的缘故。例如，在格林河（Green River）油页岩中，在最低富的油页岩层和最高富的油页岩层的热导率具有至少系数为3的差别。当加热这种地层时，与利用传统加热器相比，利用温度受限加热器时有较多的热量被传递到地层，而传统加热器被温度限制在低热导层。沿着传统加热器整个长度的热量输出需要适应低热导层，以便使加热器在低热导层不会过热和烧毁。对于温度受限加热器而言，位于处于高温的低热导层附近的热量输出将减小，但温度受限加热器的不处于高温状态的剩余部分仍然会提供高的热量输出。由于用于对含烃类物质的地层进行加热的加热器的长度通常较长（例如，至少10米，100米，300米，至少500米，1千米或长达10千米），因而，温度受限加热器的大部分长度可在居里温度以下工作，而只有一小部分在受限加热器的居里温度或该温度附近。

温度受限加热器的使用使得能够高效地向地层传递热量。通过高效的热量传递，就可以减小把地层加热至期望温度所需要的时间。例如，当传统恒定瓦特数的加热器采用12米加热井间距时，在格林河油页岩中，热解通常需要9.5年至10年的加热。对于相同的加热器间距，温度受限加热器可具有较大的平均热量输出，同时把加热器设备温度保持在低于设备设计极限温度以下。由于温度受限加热器所提供的平均热量输出要比恒定瓦特数的加热器所提供的平均热量输出大，因此，采用温度受限加热器，就可使地层中的热解在更早的时间发生。例如，在格林河油页岩中，利用温度受限加热器，加热井间距12米，就可以在5年中产生热解。由于井间距不精确，或者钻井时使加热井相互靠得太近，温度受限加热器可抵消热点。在某些实施例中，对于间隔太远的加热井而言，温度受限加热器允许长时间地增大功率输出，或者是，对于相距太近的加热井而言，允许限制功率输出。温度受限加热器还在覆盖层和下底层附近的区域提供更大的功率，以便补偿这些区域中的温度损失。

有利地是，温度受限加热器可以被用于许多类型的地层中。例如，

在沥青沙地层或渗透性相当大的含有重烃类物质的地层中，温度受限加热器可以被用于提供可控制的低温输出，以便减小流体的粘度，促使流体流动和/或在井筒或其附近或在地层中提高流体的径向流量。温度受限加热器可以被用于阻止地层的井筒区域附近因过热而形成过多的焦炭。

在某些实施例中，通过使用温度受限加热器，就可以消除或减小对昂贵的温度控制回路的需要。例如，通过使用温度受限加热器，就可以消除或减小对执行温度测量的需要和/或在加热器上利用固定热偶以便监测在热点处的潜在过热的需要。

在某些实施例中，温度受限加热器比标准的加热器制造起来更经济。典型的铁磁材料包括：铁、碳钢或铁素体不锈钢。与绝缘导体（矿物绝缘缆）加热器中常用的镍基加热合金（例如，镍铬合金，商标为 Kanthal™（Bulten-Kanthal AB, 瑞典）和/或商标为 LOHM™（Driver-Harris 公司, Harrison, NJ））相比，这些材料是便宜的。在温度受限加热器的一个实施例中，温度受限加热器以连续长度的方式被制造成绝缘导体加热器，以便降低成本和提高可靠性。

在某些实施例中，诸如氦的导热流体可以被放置到温度受限加热器内，以便改善加热器内的热传导。导热流体包括导热的、电绝缘的、放热透明的气体，但并不局限于这些气体。在某些实施例中，在标准温度和压力（STP）（0℃和 101.325kPa）下，空隙容积内的导热流体所具有的导热率高于空气的导热率。放热透明气体包括这样的气体，即这些气体具有双原子或单原子并且不会吸收大量的红外线能量。在某些实施例中，导热流体包括氦和/或氢。导热流体也可以是热稳定的。例如，导热流体不会热裂，也不会形成不需要的残留。

导热流体可以被放置在温度受限加热器的导体内，管道内，和/或护套内。导热流体可以被放置在温度受限加热器的一个或多个部件（例如，导体、管道或护套）之间的空间（环形空间）内。在某些实施例中，导热流体被放置在温度受限加热器和管道之间的空间（环状空间）内。

在某些实施例中，在把导热流体导入所述空间内期间，通过导热流体的流动来使所述空间（环状空间）内的空气和/或其它流体移动。在某些实施例中，在把导热流体引入所述空间之前，把空气和/或其它流体从所述空间除去（例如，抽空，冲去或泵出）。通过减小所述空间中的空气的部分压力，从而减小所述空间中的加热部件的氧化速率。导热流体被引入，并达到一比容和/或达到所述空间中的选定的压力。导热流体可以被引入成使得所述空间至少具有大于一选定值之上的导热流体的最小体积百分比。在某些实施例中，所述空间具有导热流体的体积百分比至少为 50%、75%、或 90%。

通过把导热流体放入温度受限加热器的空间内，来加快所述空间内的热传递。热传递的加快是通过减小具有导热流体的所述空间内的传递热阻来实现的。通过减小所述空间内的传递热阻，就可以使得从温度受限加热器向地下地层的功率输出增大。通过减小具有导热流体的所述空间内的传递热阻，就可以采用较小直径的电导体（例如，较小直径的内部导体，较小直径的外部导体，和/或较小的管道），较大外部半径（例如，较大外部半径的管道或护套），和/或增大空间宽度。通过减小电导体的直径，就可以减小材料成本。通过增大管道或护套的外部半径和/或增大环状空间的宽度，就可以提供附加的环状空间。附加的环状空间可以适应管道和/或护套的变形，而且不会造成加热器故障。通过增大管道或护套的外部半径和/或增大环状宽度，就可以提供附加的环状空间，以便保护环状空间内的部件（例如，间隔件，连接件和/或管道）。

然而，随着温度受限加热器的环状宽度的增大，就需要更快的横贯环状空间的热传递，以便使加热器保持良好的热输出性能。在某些实施例中，尤其是对于低温加热器，在横贯加热器的环状空间的热传递方面，辐射热传递的效率最小。在这些实施例中，为了使加热器保持良好的热输出特性，环状空间中的传导热传递是很重要的。导热流体可以使横贯环状空间的热传递加快。

在某些实施例中，位于所述空间内的导热流体也是电绝缘的，以

便阻止在温度受限加热器的导体之间产生电弧。对于需要较高工作电压的较长加热器而言，横贯所述空间或间隙产生电弧是一个问题。对于较短的加热器和/或在较低电压，电弧可能是一个问题，这取决于加热器的工作条件。通过增大所述空间内的流体的压力，就可以增大所述空间内的火花间隙击穿电压，并且阻止横贯所述空间产生电弧。

在所述空间中的导热流体的压力可以被升高至位于 500kPa 和 50000kPa 之间，700kPa 和 45000kPa 之间，或 1000kPa 和 40000kPa 之间的压力。在一实施例中，导热流体的压力被升高到至少 700kPa 或至少 1000kPa。在某些实施例中，阻止横贯所述空间产生电弧所需的导热流体的压力取决于所述空间内的温度。在所述空间中，电子可以沿着表面（例如，绝缘件，连接件或屏蔽件）移动，并且可以产生电弧或使表面电性变劣。所述空间内的高压流体可以阻止电子在空间内沿着表面移动。

温度受限加热器中所用的一种铁磁合金或多种铁磁合金决定了该加热器的居里温度。在 McGraw-Hill 第二版的“美国物理学院手册”中在 5-170 页至 5-176 页列出了各种金属的居里温度。铁磁导体可包括一种或多种铁磁元素（铁、钴和镍）和/或这些元素的合金。在某些实施例中，铁磁导体包括：铁-铬(Fe-Cr)合金，该合金含有钨(W)（例如，HCM12A 和 SAVE12（Sumitomo Metals 公司，日本））；和/或铁合金，该铁合金含有铬（例如，Fe-Cr 合金，Fe-Cr-W 合金，Fe-Cr-V(钒)合金，Fe-Cr-Nb(铌)合金）。在这三种主要的铁磁元素中，铁具有的居里温度约为 770℃；钴具有的居里温度约为 1131℃；镍具有的居里温度约为 358℃。铁-钴合金具有的居里温度要高于铁的居里温度。例如，钴的重量比为 2%的铁-钴合金的居里温度约为 800℃；钴的重量比为 12%的铁-钴合金的居里温度约为 900℃。钴的重量比为 20%的铁-钴合金的居里温度约为 950℃。铁-镍合金的居里温度低于铁的居里温度。例如，镍的重量比为 20%的铁-镍合金的居里温度约为 720℃。镍的重量比为 60%的铁-镍合金的居里温度约为 560℃。

用作合金的某些非铁磁元素可使铁的居里温度升高。例如，钒的

重量比为 5.9% 的铁-钒合金的居里温度约为 815°C。其它的非铁磁元素（例如碳、铝、铜、硅和/或铬）可以与铁或其它铁磁材料构成合金，以便降低居里温度。用于升高居里温度的非铁磁材料可以与用于降低居里温度的非铁磁材料结合，并且与铁或其它铁磁材料构成合金，以便制造出这样一种材料，即，这种材料具有期望的居里温度和其它期望的物理和/或化学特性。在某些实施例中，居里温度材料是铁素体，例如 NiFe_2O_4 。在其它一些实施例中，居里温度材料是二元化合物，例如 FeNi_3 或 Fe_3Al 。

某些实施例中的温度受限加热器可包括多于一个铁磁材料。如果这里所描述的任何条件适用于温度受限加热器中的这些铁磁材料中的至少一个铁磁材料，那么，此类实施例就落在这里所描述的实施例的范围内。

磁性通常随着接近居里温度而衰减。由 C. James Erickson 所著的“工业电加热手册”（IEEE 出版社，1995）表示出了对于 1% 碳钢（碳的重量比为 1% 的钢）的典型曲线。在 650°C 以上的温度，磁渗透性开始损失，并且当温度超过 730°C 时趋于结束。这样，自限制温度可以稍微低于铁磁导体的实际居里温度。在 1% 碳钢中，在室温时，电流流动的集肤深度为 0.132cm（厘米），并且在 720°C 时该集肤深度增大到 0.445cm。从 720°C 至 730°C，集肤深度剧增至 2.5cm 以上。因此，利用 1% 碳钢的温度受限加热器实施例把温度自限制在 650°C 至 730°C 之间。

集肤深度通常限定流入传导材料内的随时间变化的电流的有效深度。通常，电流密度与沿着导体半径从外表面至中心的距离呈指数关系减小。这样的一个深度，即在该深度，电流密度约为表面电流密度的 $1/e$ ，则这个深度就被称作集肤深度。对于其直径比渗透深度大得多的实心圆柱杆而言，或对壁厚超过渗透深度的空心圆筒而言，集肤深度 δ 为：

$$(1) \quad \delta = 1981.5 * (\rho / (\mu * f))^{1/2};$$

其中， δ = 集肤深度，单位为英寸；

ρ =在操作温度的电阻系数（欧姆-厘米）；
 μ =相对导磁率；以及
 f =频率（Hz）。

方程 1 可从 C.James Erickson(IEEE 出版社, 1995)所著的“工业电加热手册”中获得。对于大多数金属而言，电阻系数（ ρ ）随着温度而增大。相对导磁率通常随着温度和电流的变化而变化。可以利用其它的一些方程来估算关于温度和/或电流的集肤深度和/或导磁率的变化。 μ 对电流的依赖产生于 μ 对磁场的依赖。

在温度受限加热器中所用的材料可以被选择成能提供期望的调节比。对温度受限加热器，可以选择的调节比为至少 1.1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 10:1, 30:1, 或 50: 1。也可以利用更大的调节比。所选择的调节比取决于许多因素，这些因素包括但不限于：温度受限加热器所处的地层类型和/或井筒中所用的材料的温度限制。在一些实施例中，通过把附加的铜或另外的良好的电导体连接到铁磁材料（例如，增加铜以便在居里温度之上降低电阻）上，来增大调节比。

温度受限加热器在该加热器的居里温度以下可提供最小热输出（功率输出）。在某些实施例中，最小热输出至少为 400W/m（瓦特每米），600W/m，700W/m，800W/m，或高达 2000W/m。当温度受限加热器一部分的温度接近或超过居里温度时，温度受限加热器通过加热器的这部分来减小热量输出。所减小的热量可以基本上小于居里温度以下的热输出。在某些实施例中，减小的热量至多为 400W/m, 200W/m, 100W/m, 或可接近于 0W/m。

在一些实施例中，在特定的操作温度范围内，温度受限加热器可以基本上独立于该加热器上的热负荷进行操作。“热负荷”是指热量从一加热系统传递至其周围的速度。应当知道，热负荷可以随着周围温度和/或周围的热导率的变化而变化。在一实施例中，温度受限加热器在温度受限加热器的居里温度或在该温度之上进行操作，从而，在加热器一部分附近，对于热负荷减小 1W/m，加热器的操作温度升高至多 3°C，2°C，1.5°C，1°C 或 0.5°C。在某些实施例中，温度受限加热器

以相对恒定电流的方式进行操作。

在居里温度之上，由于居里效应，交流电和调制直流电电阻和/或温度受限加热器的热输出可以骤减。在一些实施例中，在居里温度以上或附近，电阻或热输出的值至多是在居里温度以下某特定点的电阻或热输出值的一半。在一些实施例中，在居里温度以上或附近，热输出至多是在居里温度以下的一特定点（例如，居里温度以下 30℃，居里温度以下 40℃，居里温度以下 50℃，或居里温度以下 100℃）的热输出的 40%，30%，20%，10%或更小（小至 1%）。在一些实施例中，在居里温度以上或附近，电阻减小至在居里温度以下的一特定点（例如，居里温度以下 30℃，居里温度以下 40℃，居里温度以下 50℃，或居里温度以下 100℃）的电阻的 80%，70%，60%，50%或更小（小至 1%）。

在某些实施例中，交流电频率被调节，以改变铁磁材料的集肤深度。例如，在室温时，1%碳钢的集肤深度在 60Hz 时为 0.132cm；在 180Hz 时，集肤深度为 0.0762cm；在 440Hz 时，集肤深度为 0.046cm。由于加热器直径通常大于两倍的集肤深度，因此，利用较高频率（从而可利用较小直径的加热器）就可以减小加热器成本。对于固定的几何形状，频率越高，就会导致调节比越高。通过把较低频率的调节比乘以较高频率除以较低频率的平方根，就可以计算出在较高频率的调节比。在一些实施例中，采用 100Hz 至 1000Hz 之间，140Hz 至 200Hz 之间，或 400Hz 至 600Hz 之间的频率（例如，180Hz, 540Hz, 或 720Hz）。在一些实施例中，可以采用高频率。频率可以大于 1000Hz。

为了在达到温度受限加热器的居里温度之前保持基本恒定的集肤深度，当加热器是冷的时候，加热器可以以较低的频率操作，当加热器是热的时候，加热器可以以较高频率操作。然而，行频（line frequency）加热通常是有利的，因为这样就可减少对昂贵部件例如电源、转换器、或用于改变频率的电流调制器的需求。行频是一常用电源的频率。行频通常是 60Hz，也可以是 50Hz 或其它频率，这取决于电流供给的来源。利用市场上可获得的设备例如固态可变频率的电源，

可产生较高频率。把三相电源转变成具有三倍频率的单相电源的转换器可以在市场上获得。例如，60Hz 高压三相电源可以被转换成 180Hz 低压单相电源。与固态可变频率电源相比，这种转换器更便宜一些，并且具有更大的能量效率。在一些实施例中，利用把三相转换成单相电源的转换器来增大供向温度受限加热器的电源频率。

在一些实施例中，调制直流电（例如，突变直流电，波形调制直流电，或循环直流电）可以被用于向温度受限加热器提供电力。直流电调制器或直流电突变器可以与直流电源相耦合，以便提供一调制直流电的输出。在一些实施例中，直流电电源可包括用于调制直流电的装置。直流电调制器的一个例子是直流电-直流电转换系统。直流电-直流电转换系统在本领域中是公知的。直流电通常被调制或突变成一期望的波形。用于直流电调制的波形包括但不限于：正方形波形、正弦曲线波形、变形的正弦曲线波形、变形的正方形波形、三角波形和其他的规则或不规则波形。

调制直流电波形通常限定该调制直流电的频率。因此，调制直流电波形可以被选择成能提供一期望的调制直流电频率。调制直流电的调制波形或调制速度（例如突变速度）可以被改变，以便改变调制直流电的频率。直流电可以被调制在高于通常可获得的交流电频率的频率。例如，可以提供至少为 1000Hz 的调制直流电。通过把供给电流的频率增大至更高数值，就能有利地增大温度受限加热器的调节比。

在一些实施例中，调制直流电波形被调节或改变，以便改变调制直流电频率。在使用温度受限加热器和高电流或电压期间的任何时候，直流电调制器都能够调节或改变调制直流电波形。因此，提供到温度受限加热器的调制直流电不局限于单相频率或甚至一小组频率值。利用直流电调制器进行的波形选择通常允许一宽范围的调制直流电频率且允许对调制直流电频率进行离散控制。因此，调制直流电频率更易于被设定在不同的数值，而交流电频率通常被局限于行频增大的数值。调制直流电频率的离散控制允许对温度受限加热器的调节比进行更多的选择性控制。由于能够选择性地控制温度受限加热器的调节比，从

而允许在设计和制造温度受限加热器时可使用的材料范围更宽。

在一些实施例中，调制直流电频率或交流电频率被调节，以便在使用期间补偿温度受限加热器的性能（例如，诸如温度或压力的地下条件）的变化。提供给温度受限加热器的调制直流电频率或交流电频率根据估算的井下条件或状况的变化而变化。例如，随着井筒中的温度受限加热器的温度的升高，可以有利地增大提供给该加热器的电流频率，从而增大加热器的调节比。在一实施例中，对井筒中的温度受限加热器的井下温度进行估算。

在一些实施例中，调制直流电频率或交流电频率被改变，以便调节温度受限加热器的调节比。调节比可以被调节，以便补偿沿着温度受限加热器长度产生的一些热点。例如，由于温度受限加热器在某些地方变得太热，从而使调节比增大。在一些实施例中，调制直流电频率或交流电频率被改变，以便对调节比进行调节，而无需估算地下条件。

温度受限加热器可以产生电感负荷。该电感负荷是由于所施加的电流被铁磁材料利用，除了产生电阻热输出以外，还产生了磁场的缘故造成的。随着温度受限加热器中的井下温度的改变，加热器的电感负荷发生改变，这是由于加热器中的铁磁材料的磁性随着温度的变化而变化的缘故。温度受限加热器的电感负荷可在供给到加热器的电流和电压之间造成相位偏移。

电流波形的时滞（例如，由于电感负荷的缘故，电流相对于电源具有一相位偏移）和/或电流波形的变形（例如，由于非线性负荷的缘故，由引入的谐波造成的电流波形的变形）可以造成施加至温度受限加热器上的实际功率的减小。这样，由于相位偏移或波形变形，从而需要用更多的电流来施加选定量的功率。实际施加的功率和在相同电流处于相位和未变形情况下应被传递的视在功率（*apparent frequency*）的比值为功率因子。该功率因子总是小于或等于 1。当没有相位偏移或没有波形变形时，功率因子为 1。

因发生相位偏移而施加至加热器上的实际功率由方程 2 表示：

$$(2) \quad P=I \times V \times \cos(\theta);$$

其中, P 是施加到温度受限加热器上的实际功率; I 是所施加的电流; V 是所施加的电压; θ 是电压和电流之间的相位角差。如果没有波形变形, 则 $\cos(\theta)$ 等于功率因子。频率越高(例如, 调制直流电频率至少 1000Hz, 1500Hz, 或 2000Hz), 相位偏移和/或变形的问题就越显著。

在一些实施例中, 电压和/或电流被调节, 以便改变铁磁材料的集肤深度。通过增大电压和/或减小电流, 就可以减小铁磁材料的集肤深度。集肤深度越小, 就允许温度受限加热器具有更小的直径, 从而也就减小了设备成本。在一些实施例中, 所施加的电流至少为 1 安培, 10 安培, 70 安培, 100 安培, 200 安培, 500 安培, 或高达 2000 安培。在一些实施例中, 施加电压在 200 伏以上, 480 伏以上, 650 伏以上, 1000 伏以上, 1500 伏以上, 或高达 10000 伏的交流电。

在一实施例中, 温度受限加热器包括位于外部导体内的内部导体。内部导体和外部导体沿径向被设置在一中轴周围。内部导体和外部导体可以被绝缘层分隔开。在一些实施例中, 内部导体和外部导体在温度受限加热器的底部相耦合。电流可以通过内部导体流入温度受限加热器, 然后通过外部导体返回。一个导体或两个导体都包括铁磁材料。

绝缘层可包括具有高热导率的电绝缘陶瓷, 例如氧化镁、氧化铝、二氧化硅、氧化铍、氮化硼、氮化硅、或它们的组合。绝缘层可以是压实的粉末(例如, 压实的陶瓷粉末)。压实可以改善热导率, 并且可以提供更好的绝缘电阻。对于较低温度的应用场合, 可以采用聚合物绝缘层, 例如, 该聚合物绝缘层由含氟聚合物、聚酰亚胺、聚酰胺、和/或聚乙烯制成。在一些实施例中, 聚合物绝缘层由全氟烷氧基(PFA)或聚醚酮(注册商标为 PEEKTM(Victrex 有限公司, 英国))制成。绝缘层可以被选择成基本上红外透明的, 以便有助于热量从内部导体向外部导体的传递。在一实施例中, 绝缘层由透明的石英沙构成。绝缘层可以是空气或非反应气体, 例如氦、氮、或六氟化硫。如果绝缘层是空气或非反应气体, 那么, 可以设有一些绝缘间隔件, 以

便阻止内部导体和外部导体之间的电接触。例如，这些绝缘间隔件可由高纯度的氧化铝或其它热导的电绝缘的材料例如氮化硅制成。这些绝缘间隔件可以由含纤维的陶瓷材料制成，这些含纤维的材料例如为注册商标为 Nextel™ 312（3M 公司，圣保罗，明尼苏达州）的材料、云母带、或玻璃纤维。陶瓷材料可由氧化铝、水合硅酸铝、硼硅酸铝、氮化硅、氮化硼、或其它材料构成。

在一些实施例中，外部导体被选择成能够抗腐和/或抗蠕变。在一个实施例中，在外部导体中可以采用奥斯丁帝克（austenitic）（非铁磁）不锈钢，例如，304H，347H，347HH，316H，310H，347HP，NF709（日本钢铁公司）不锈钢或它们的组合。外部导体也可包括一复合导体。例如，诸如 800H 或 347H 不锈钢的抗腐合金被包覆在铁磁碳钢管上，以便抗腐。如果无需高强度，那么，外部导体可以由具有良好抗腐性能的铁磁金属例如其中一种铁素体不锈钢制成。在一个实施例中，由重量含量为 82.3% 的铁和重量含量为 17.7% 的铬组成的铁素体合金（居里温度为 678℃）提供所期望的抗腐性能。

《金属手册》第 8 卷第 291 页（美国材料协会（ASM））中有着铁-铬合金的居里温度与该合金中铬含量之间相互关系的图表。在一些温度受限加热器实施例中，一分开的（由 347H 不锈钢制成的）支撑杆或管被连接到由铁-铬合金制成的温度受限加热器，以便提供强度和/或抗蠕变力。支撑材料和/或铁磁材料可以被选择，以便至少在 20.7MPa 和 650℃ 提供 100000 小时的蠕变破裂强度。在一些实施例中，100000 小时蠕变破裂强度为至少 13.8MPa，650℃，或至少 6.9MPa，650℃。例如，在 650℃ 或在该温度以上，347H 钢具有有利的蠕变破裂强度。在一些实施例中，100000 小时蠕变破裂强度在 6.9MPa 到 41.3MPa 范围，或者，对于较长的加热器和/或较高泥土或流体压力而言，蠕变破裂强度就更大。

在具有内部铁磁导体和外部铁磁导体的温度受限加热器实施例中，集肤效应电流路径发生在内部导体的外侧和外部导体的内侧。因此，外部导体的外侧可以被包覆有抗腐合金，例如不锈钢，而且不会

影响外部导体内侧的集肤电流路径。

厚度至少为在居里温度的集肤深度的铁磁导体允许铁磁材料的电阻随着在居里温度附近集肤深度的骤减而显著减小。在一些实施例中，当铁磁导体未被包覆有高传导材料例如铜时，导体的厚度可以是居里温度附近的集肤深度的 1.5 倍，可以是在居里温度附近的集肤深度的 3 倍，甚至是在居里温度附近的集肤深度的 10 倍或更多倍。如果铁磁导体被包覆有铜，那么，铁磁导体的厚度可以与居里温度附近的集肤深度基本相同。在一些实施例中，被包覆有铜的铁磁导体所具有的厚度至少为在居里温度附近的集肤深度的四分之三。

在一些实施例中，温度受限加热器包括有复合导体，该复合导体具有铁磁管和非铁磁的高电导芯。非铁磁的高电导芯减小了导体所需的直径。例如，导体可以是合成的 1.19cm 直径的导体，它的芯为 0.575cm 直径的铜，该铜被包覆有环绕着所述芯的 0.298cm 厚的铁素体不锈钢或碳钢。复合导体允许温度受限加热器的电阻在居里温度附近减小得更迅速。随着在居里温度附近的集肤深度增大至包括铜芯，电阻就非常迅速地减小。

复合导体可增大温度受限加热器的传导率和/或允许加热器在较低电压进行操作。在一实施例中，在复合导体的铁磁导体的居里温度附近区域以下的温度，复合导体显示出相对平的电阻与温度关系曲线。在一些实施例中，在 100°C 和 750°C 之间，或在 300°C 和 600°C 之间，温度受限加热器显示出相对平的电阻与温度关系曲线。例如通过调节温度受限加热器中的材料和/或材料的构成，在其它温度范围，也可以显示出相对平的电阻与温度关系曲线。在一些实施例中，复合导体中的各种材料的相对厚度被选择，以便为温度受限加热器形成所期望的电阻与温度关系曲线。

图 3-28 表示出了温度受限加热器的各种实施例。在这些附图中的任意附图中所描述的实施例中的温度受限加热器的一个或多个特征可以与这些附图中所描述的其它一些实施例中的一个或多个特征进行结合。在这里所描述的一些实施例中，温度受限加热器的尺寸大小被做

成能在 60Hz 的交流电频率进行操作。应当理解，可以对这里所描述的温度受限加热器的尺寸大小进行调节，以便温度受限加热器在其它交流电频率以类似的方式进行操作，或者利用调制直流电进行操作。

图 3 表示出了根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该温度受限加热器具有外部导体，该外部导体具有铁磁部分和非铁磁部分。图 4 和图 5 表示出了图 3 所示实施例的横向剖面图。在一个实施例中，铁磁部分 140 被用于向地层中的烃类物质层提供热量。非铁磁部分 142 被用在地层的覆盖层中。非铁磁部分 142 向覆盖层提供很少热量或不提供热量，从而阻止覆盖层中的热量损失，并且提高加热器的效率。铁磁部分 140 包括铁磁材料例如 409 不锈钢或 410 不锈钢。铁磁部分 140 具有 0.3 厘米的厚度。非铁磁部分 142 是铜，其厚度为 0.3 厘米。内部导体 144 是铜。内部导体 144 的直径为 0.9 厘米。电绝缘件 146 是氮化硅、氮化硼、氧化镁粉末、或其它适合的绝缘材料。电绝缘件 146 的厚度为 0.1 厘米至 0.3 厘米。

图 6 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有外部导体，该外部导体具有放置在护套内的铁磁部分和非铁磁部分。图 7、8、9 是图 6 所示实施例的横向剖面图。铁磁部分 140 是 410 不锈钢，其厚度为 0.6 厘米。非铁磁部分 142 是铜，其厚度为 0.6 厘米。内部导体 144 是铜，其直径为 0.9 厘米。外部导体 148 包括铁磁材料。外部导体 148 在加热器的覆盖层部分中提供一些热量。通过在覆盖层中提供一些热量，来阻止覆盖层中流体的冷凝或逆流。外部导体 148 是 409、410、或 446 不锈钢，其外部直径为 3.0 厘米，厚度为 0.6 厘米。电绝缘件 146 是氧化镁粉末，其厚度为 0.3 厘米。在一些实施例中，电绝缘件 146 是氮化硅、氮化硼或六方晶系型氮化硼。传导部分 150 可以把内部导体 144 与铁磁部分 140 和/或外部导体 148 连接起来。

图 10 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体。该加热器被放置在防腐护套中。一传导层被放置在外部导体和所述护套之间。图 11 和 12 是图 10 所示实施例的横向剖面图。外部导体 148 是 3/4" 表 (Schedule) 80 446 不锈钢管。在一个实施例

中，传导层 152 被放置在外部导体 148 和护套 154 之间。传导层 152 是铜层。外部导体 148 被包覆有传导层 152。在一些实施例中，传导层 152 包括一个或多个部分（例如，传导层 152 包括一个或多个铜管部分）。护套 154 是 1-1/4" 表 80 347 不锈钢或 1-1/2" 表 160 347H 不锈钢。在一个实施例中，内部导体 144 是 4/0 MGT-1000 炉缆，该炉缆具有绞合的包有镍的铜线，具有云母带和玻璃纤维绝缘层。4/0 MGT-1000 炉缆是 UL 型 5107（可从联合线缆公司（Phoenixville, 宾夕法尼亚州）获得）。传导部分 150 把内部导体 144 和护套 154 耦合起来。在一实施例中，传导部分 150 是铜。

图 13 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有外部导体。外部导体包括铁磁部分和非铁磁部分。加热器被放置在防腐护套中。传导层被放置在外部导体和护套之间。图 14 和 15 表示出了图 13 所示实施例的横向剖面图。铁磁部分 140 是 409、410 或 446 不锈钢，其厚度为 0.9 厘米。非铁磁部分 142 是铜，其厚度为 0.9 厘米。铁磁部分 140 和非铁磁部分 142 被放置在护套 154 中。护套 154 是 304 不锈钢，其厚度为 0.1 厘米。传导层 152 是铜层。电绝缘件 146 是氮化硅、氮化硼、或氧化镁，其厚度为 0.1 厘米-0.3 厘米。内部导体 144 是铜，其直径为 1.0 厘米。

在一实施例中，铁磁部分 140 是 446 不锈钢，其厚度为 0.9 厘米。护套 154 是 410 不锈钢，其厚度为 0.6 厘米。410 不锈钢比 446 不锈钢具有更高的居里温度。这种温度受限加热器可“包含”电流，从而使得电流不会轻易地从加热器流向周围地层和/或流向周围的水（例如盐水、地下水、或地层水）。在这个实施例中，在达到铁磁部分的居里温度之前，大部分电流流经铁磁部分 140。在达到铁磁部分 140 的居里温度之后，大部分电流流经传导层 152。护套 154（410 不锈钢）的铁磁特性阻止电流流到护套外部，从而“包含”了电流。护套 154 还可具有这样的厚度，即该厚度能向温度受限加热器提供强度。

图 16A 和图 16B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁内部导体。内部导体 144 是 1" 表 XXS 446 不锈钢管。

在一些实施例中，内部导体 144 包括 409 不锈钢，410 不锈钢，不锈钢 36，合金 42-6，合金 52，或其它铁磁材料。内部导体 144 具有 2.5 厘米的直径。电绝缘件 146 是氮化硅、氮化硼、氧化镁、聚合物、纳克斯泰尔(Nextel)陶瓷纤维、云母、或玻璃纤维。外部导体 148 是铜或其它任何非铁磁材料例如铝。外部导体 148 被连接至护套 154 上。护套 154 是 304H，316H 或 347H 不锈钢。在这个实施例中，大部分热量是在内部导体 144 中产生的。

图 17A 和图 17B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁内部导体和非铁磁芯。内部导体 144 包括 446 不锈钢，409 不锈钢，410 不锈钢或其它铁磁材料。芯 168 被紧紧地结合在内部导体 144 的内部。芯 168 是铜杆或其它非铁磁材料。在拉拔操作之前，芯 168 以紧密配合方式被插在内部导体 144 内。在一些实施例中，芯 168 和内部导体 144 是被混合挤压结合的。外部导体 148 是 347H 不锈钢。为了压实电绝缘件 146 而进行的拉拔或轧制操作可确保内部导体 144 和芯 168 之间良好的电接触。在这个实施例中，在达到居里温度之前，热量主要是在内部导体 144 中产生的。然后，随着电流渗透到芯 168，电阻就迅速减小。

图 18A 和图 18B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体。内部导体 144 是包覆有镍的铜。电绝缘件 146 是氮化硅、氮化硼、或氧化镁。外部导体 148 是 1"表 XXS 碳钢管。在这个实施例中，热量主要是在外部导体 148 中产生，从而导致横过电绝缘件 146 的温差小。

图 19A 和图 19B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体，该铁磁外部导体被包覆有防腐合金。内部导体 144 是铜。外部导体 148 是 1"表 XXS 446 不锈钢管。外部导体 148 与护套 154 相连。护套 154 由防腐材料(例如 347H 不锈钢)制成。护套 154 用于提供保护，以免受井筒中的腐蚀性流体(例如，硫化和渗碳气体)的影响。热量主要是在外部导体 148 中产生，从而导致横过电绝缘件 146 的温差小。

图 20A 和图 20B 是根据一实施例的温度受限加热器的剖面图，该加热器具有铁磁外部导体。该外部导体被包覆有传导层和防腐合金。内部导体 144 是铜。电绝缘件 146 是氮化硅、氮化硼、或氧化镁。外部导体 148 是 1" 表 80 446 不锈钢管。外部导体 148 与护套 154 相连。护套 154 由防腐材料制成。在一实施例中，传导层 152 被放置在外部导体 148 和护套 154 之间。传导层 152 是铜层。热量主要在外部导体 148 中产生，从而导致横过电绝缘件 146 的温差小。传导层 152 允许外部导体 148 的电阻当外部导体达到居里温度时而迅速减小。护套 154 用于提供保护，以免受井筒中腐蚀性流体的侵蚀。

在一些实施例中，导体（例如内部导体、外部导体、或铁磁导体）是具有两种或更多种不同材料的复合导体。在一些实施例中，该复合导体包括两种或更多种铁磁材料。在一些实施例中，复合铁磁导体包括两种或更多种径向布置的材料。在一些实施例中，复合导体包括铁磁导体和非铁磁导体。在一些实施例中，复合导体包括放置在非铁磁芯上的铁磁导体。可以利用两种或更多种材料来获得在居里温度以下的温度区域中相对平的电阻率与温度之间的关系曲线图和/或在居里温度或该温度附近电阻率迅速减小（高调节比）。在某些情况中，利用两种或更多种材料来为温度受限加热器提供多个居里温度。

复合电导体可以被用在这里所描述的任何温度受限加热器实施例中。例如，复合导体可以被用作导体位于管道中的加热器或绝缘导体加热器中的导体。在一些实施例中，复合导体可以被连接至支撑元件例如支撑导体上。支撑元件可以被用于为复合导体提供支撑，从而在居里温度或其附近，强度无需依赖复合导体。对于长度至少 100 米的加热器而言，这种支撑元件是很有用的。支撑元件可以是非铁磁元件，它具有良好的抗高温蠕变强度。用于支撑元件的材料例子包括：注册商标为 Haynes[®] 的 625 合金和注册商标为 Haynes[®] 的 HR120[®] 合金（Haynes 国际，Kokomo, IN），NF709，注册商标为 Incoloy[®] 的 800H 合金和 347H 合金（Allegheny Ludlum 公司，匹兹堡，PA），但并不局限于这些。在一些实施例中，复合导体中的材料被直接相互连接（例

如,用黄铜焊接,以冶金方式粘结,或被模锻)和/或与支撑元件相连。通过利用支撑元件,就可以把铁磁元件分离开,无需它为温度受限加热器提供支撑,尤其是在居里温度或其附近。因此,在设计温度受限加热器时,在选择铁磁材料方面就更灵活。

图 21 是根据一实施例的具有支撑元件的复合导体的剖面图。芯 168 被铁磁导体 166 和支撑元件 172 环绕着。在一些实施例中,芯 168、铁磁导体 166 和支撑元件 172 被直接连接(例如,用黄铜焊接在一起或以冶金方式结合在一起)。在一个实施例中,芯 168 是铜,铁磁导体 166 是 446 不锈钢,支撑元件 172 是 347H 合金。在某些实施例中,支撑元件 172 是表 80 管。支撑元件 172 环绕着具有铁磁导体 166 和芯 168 的复合导体。铁磁导体 166 和芯 168 被连接起来,以便通过例如混合挤压过程来形成复合导体。例如,复合导体是环绕着直径为 0.95 厘米的铜芯的外部直径为 1.9 厘米的 446 不锈钢铁磁导体。这种位于 1.9 厘米表 80 支撑元件内的复合导体产生的调节比为 1.7。

在某些实施例中,相对于铁磁导体 166 的恒定外部直径,来调节芯 168 的直径,以便调节温度受限加热器的调节比。例如,芯 168 的直径可以被增大至 1.14 厘米,同时保持铁磁导体 166 的外部直径为 1.9 厘米,以便使加热器的调节比增大至 2.2。

在一些实施例中,复合导体中的导体(例如,芯 168 和铁磁导体 166)被支撑元件 172 分离开。图 22 是根据一实施例的复合导体的剖面图,该复合导体具有支撑元件 172,该支撑元件 172 把所述导体分离开。在一个实施例中,芯 168 是铜,其直径为 0.95 厘米;支撑元件 172 是 347H 合金,其外部直径为 1.9 厘米;铁磁导体 166 是 446 不锈钢,其外部直径为 2.7 厘米。这种导体产生至少为 3 的调节比。与图 21、23、24 中所示的其它支撑元件相比,图 22 中所表示的支撑元件具有更高的抗蠕变强度。

在某些实施例中,支撑元件 172 被设置在复合导体的内侧。图 23 表示出了根据一实施例的环绕着支撑元件 172 的复合导体的剖面图。支撑元件 172 是由 347H 合金制成。内部导体 144 是铜。铁磁导体 166

是 446 不锈钢。在一个实施例中，支撑元件 172 是直径为 1.25 厘米的 347H 合金，内部导体 144 是外部直径为 1.9 厘米的铜，铁磁导体 166 是外部直径为 2.7 厘米的 446 不锈钢。这种导体产生大于 3 的调节比，该调节比要高于图 21、22、24 所描述实施例的具有相同外部直径的导体的调节比。

在某些实施例中，内部导体 144 是铜，该内部导体的厚度被减小，以便减小调节比。例如，支撑元件 172 的直径被增大至 1.6 厘米，同时保持内部导体 144 的外部直径为 1.9 厘米，以便减小管道的厚度。内部导体 144 的这种厚度减小造成相对于较厚的内部导体实施例其调节比减小。然而，调节比保持为至少为 3。

在一个实施例中，支撑元件 172 是管道（或管），该管道位于内部导体 144 和铁磁导体 166 的内侧。图 24 表示出了根据一实施例的环绕着支撑元件 172 的复合导体的剖面图。在一个实施例中，支撑元件 172 是 347H 合金，其具有直径为 0.63 厘米的中央孔。在某些实施例中，支撑元件 172 是预制管道。在某些实施例中，在复合导体成形期间，通过把可溶解材料（例如，能被硝酸溶解的铜）设置在支撑元件内来形成支撑元件 172。在导体被组装之后，该可溶解材料被溶解，从而形成所述的孔。在一实施例中，支撑元件 172 是 347H 合金，其内部直径为 0.63 厘米，外部直径为 1.6 厘米，内部导体 144 是铜，其外部直径为 1.8 厘米，铁磁导体 166 是 446 不锈钢，其外部直径为 2.7 厘米。

在某些实施例中，复合电导体被用作导体位于管道中的加热器中的导体。例如，复合电导体可以被用作图 25 中的导体 174。

图 25 是根据一实施例的导体位于管道中这种类型的加热器的剖面图。导体 174 被设置在管道 176 中。导体 174 是由导电材料制成的杆或管道。在导体 174 两端具有低电阻部分 178，以便在这些部分中产生较少的热量。通过使这些部分具有较大的导体 174 的横断面积，或者这些部分由具有低电阻的材料制成，从而形成所述的低电阻部分 178。在某些实施例中，低电阻部分 178 包括低电阻导体，该低电阻导体与导体 174 相耦合。

管道 176 由导电材料制成。管道 176 被设置在烃类物质层 182 的井孔 180 中。井孔 180 具有能够容纳管道 176 的直径。

可以利用定中件 184 来把导体 174 定位在管道 176 的中心。定中件 184 把导体 174 与管道 176 电绝缘开。定中件 184 阻止移动, 并且把导体 174 正确地定位在管道 176 中。定中件 184 由陶瓷材料或陶瓷与金属材料的组合制成。定中件 184 可阻止管道 176 中的导体 174 变形。定中件 184 是接触的 (touching) 或沿着导体 174 以约 0.1 米至约 3 米或更长的间隔被间隔开。

如图 25 所示, 导体 174 的第二低电阻部分 178 可以把导体 174 连接至井头 112。电流可以从电缆 186 通过导体 174 的低电阻部分 178 被施加至导体 174 上。电流从导体 174 流经滑动接头 188 流到管道 176。管道 176 可以与覆盖层套管 190 以及与井头 112 电绝缘, 以便使电流返回到电缆 186。热量可以在导体 174 和管道 176 中产生。所产生的热量可以在管道 176 和井孔 180 中辐射, 以便对烃类物质层 182 的至少一部分进行加热。

覆盖层套管 190 可以被设置在覆盖层 192 中。在一些实施例中, 覆盖层套管 190 被阻止覆盖层 192 变热的一些材料 (例如, 增强材料和/或水泥) 环绕着。导体 174 的低电阻部分 178 可以被放置在覆盖层套管 190 中。导体 174 的低电阻部分 178 由例如碳钢制成。可以利用定中件 184 来把导体 174 的低电阻部分 178 定位在覆盖层套管 190 的中心。定中件 184 沿着导体 174 的低电阻部分 178 以约 6 米至 12 米或例如约 9 米的间隔被间隔开。在一加热器实施例中, 通过一处或多处焊接, 把导体 174 的低电阻部分 178 接合到导体 174。在其他加热器实施例中, 低电阻部分被以螺纹拧入、旋拧入和焊接、或以其它方式连接到导体。低电阻部分 178 在覆盖层套管 190 中产生很少的热量和/或不产生热量。密封圈 (packing) 194 可以被放置在覆盖层套管 190 和井孔 180 之间。密封圈 194 可以被用作在覆盖层 192 和烃类物质层 182 交界处的封闭盖, 从而允许把材料填充在覆盖层套管 190 和井孔 180 之间的环状空间中。在一些实施例中, 密封圈 194 阻止流体从井

孔 180 流至表层 196。

在某些实施例中，复合电导体可以被用作绝缘导体加热器中的导体。图 26A 和图 26B 表示出了绝缘导体加热器的实施例。绝缘导体 200 包括芯 168 和内部导体 144。芯 168 和内部导体 144 是复合电导体。芯 168 和内部导体 144 被设置在绝缘件 146 内。芯 168、内部导体 144 以及绝缘件 146 被设置在外部导体 148 的内部。绝缘件 146 是氮化硅、氮化硼、氧化镁、或别的适合的电绝缘材料。外部导体 148 是铜、钢、或其它任何的电导体。

在某些实施例中，如图 27A 和图 27B 所示，护套 154 被设置在外部导体 148 的外面。在某些实施例中，护套 154 是 304 不锈钢，外部导体 148 是铜。护套 154 向绝缘导体加热器提供抗腐蚀性。在某些实施例中，护套 154 和外部导体 148 是预制条带，这些预制条带被牵拉过绝缘件 146，以便形成绝缘导体 200。

在某些实施例中，绝缘导体 200 被设置在管道中，该管道为绝缘导体提供保护（例如，腐蚀和侵蚀保护）。在图 28 中，绝缘导体 200 以间隙 202 被设置在管道 176 的内部，从而使绝缘导体与管道相分离。

在某些实施例中，温度受限加热器被用于实现低温加热（例如，在生产井中加热流体，加热地表管道，或减小井筒或井筒区域附近的流体粘度）。通过改变温度受限加热器的铁磁材料，就允许进行低温加热。在某些实施例中，铁磁导体是由这样的材料制成的，即，这种材料的居里温度低于 446 不锈钢的居里温度。例如，铁磁导体可以是铁和镍的合金。该合金具有 30% 至 42% 重量比的镍，其余的为铁。在一个实施例中，合金是不胀钢 36 (Invar 36)，不胀钢 36 是在铁中含有重量比为 36% 的镍，并且具有 277°C 的居里温度。在某些实施例中，合金是三组分合金，例如，铬、镍和铁合金。例如，合金可具有 6% 重量比的铬，42% 重量比的镍，52% 重量比的铁。由这些类型的合金制成的铁磁导体可提供 250 瓦特/米至 350 瓦特/米之间的热输出。由不胀钢 36 制成的直径为 2.5 厘米的杆，在居里温度具有约 2 比 1 的调节比。通过把不胀钢 36 合金放置在一铜芯上，就可以使杆的直径更小

一些。采用铜芯可以导致高的调节比。

对于具有铜芯或铜覆层的温度受限加热器而言，铜可以被相对抗扩散的层例如镍保护着。在某些实施例中，合成的内部导体包括铁，该铁被包覆在镍上，该镍被包覆在铜芯上。这种相对抗扩散的层阻止铜进入具有例如绝缘层的加热器的其它层内。在某些实施例中，这种相对不可渗透的层，在把加热器安装至井筒内期间，可阻止铜在井筒中沉积。

温度受限加热器可以是单相加热器，也可以是三相加热器。在三相加热器的实施例中，温度受限加热器具有三角形或Y形结构。三相加热器中的三个铁磁导体中的每个铁磁导体可以位于分离的外套内。可以在加热器底部的接合部分内形成这些导体之间的连接。这三个导体可以与接合部分内的外套保持绝缘。

在某些三相加热器实施例中，三个铁磁导体被公共的外部金属外套内的绝缘件分离开。这三个导体可以与外套绝缘，或者是，这三个导体可以在加热器组件的底部与该外套相连接。在另外的实施例中，一单一的外套或三个外套是铁磁导体，内部导体可以是非铁磁的导体（例如，铝，铜，或高导电合金）。可选地是，三个非铁磁导体中的每一个都位于分离的铁磁外套的内部，在加热器的底部，在一接合部分内形成这些导体之间的连接。这三个导体可以保持与接合部分内的外套相绝缘。

在某些实施例中，三相加热器包括三条支腿，这些支腿位于分离的井筒内。这些支腿可以被连接在一公共的接触部中（例如，中央井筒，连接井筒，或充有溶液的接触部）。

在一实施例中，温度受限加热器包括中空芯或中空内部导体。形成这种加热器的一些层可以被穿孔，以便允许流体从井筒（例如，地层流体或水）流入该中空芯。中空芯中的流体可以通过中空芯被输送（例如，泵送，或气体提升）到地表。在某些实施例中，具有中空芯或中空内部导体的温度受限加热器被用作一加热器/生产井或一生产井。诸如蒸汽的流体可以通过中空内部导体被注入到地层中。

示例

下面将描述温度受限加热器的一些非限制性的例子以及温度受限加热器的一些特性。

可以通过计算来确定温度受限加热器的环状空间中的导热流体的效果。利用下面的方程(方程 3-13)来把位于加热部分中的中央加热杆的温度与该中央加热杆附近的管道的温度关联起来。在这个例子中,中央加热杆是 347H 不锈钢管,其外部半径为 b 。管道由 347H 不锈钢制成,并且其内部半径为 R 。中央加热杆和管道分别处于均匀温度 T_H 和 T_C 。 T_C 保持不变,一恒定的每单位长度的加热速率 Q 被施加到中央加热杆上。 T_H 是这样的值,即在该值,通过传导和辐射传递到管道的每单位长度的加热速率与热生成速率 Q 相平衡。横贯在管道的内表面和中央加热杆之间的间隙的传导被假设为与横贯所述间隙的辐射是平行发生的。为简明起见,横贯所述间隙的辐射被假设为横贯真空的辐射。于是,就有以下方程:

$$(3) \quad Q = Q_C + Q_R;$$

其中, Q_C 和 Q_R 表示横贯所述间隙的热通量的传导分量和辐射分量。管道的内部半径由 R 表示,传导的热传递满足方程:

$$(4) \quad Q_C = -2\pi r k_g \frac{dT}{dr}; \quad b \leq r \leq R;$$

并受制于边界条件:

$$(5) \quad T(b) = T_H; \quad T(R) = T_C.$$

在所述间隙中的气体的导热率 k_g 由以下方程表示:

$$(6) \quad k_g = a_g + b_g T$$

把方程 6 代入方程 4 中,并在方程 5 中的边界条件下进行积分,就得出:

$$(7) \quad \frac{Q_C}{2\pi} \ln(R/b) = k_g^{(eff)} (T_H - T_C);$$

$$\text{其中, } (8) \quad k_g^{(eff)} = a_g + \frac{1}{2} b_g (T_H + T_C).$$

横贯所述间隙的每单位长度的辐射热传递速率 Q_R 由下式给出:

$$(9) \quad Q_R = 2\pi\sigma b \varepsilon_R \varepsilon_{bR} \{T_H^4 - T_C^4\};$$

其中 (10) $\varepsilon_{bR} = \varepsilon_b / \{\varepsilon_R + (b/R)\varepsilon_b(1 - \varepsilon_R)\}$.

在方程 9 和 10 中, ε_b 和 ε_R 分别表示中央加热杆和管道的内表面的辐射系数, σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数。

把方程 7 和 9 代回到方程 3 内, 并进行整理, 就得出:

$$(11) \quad \frac{Q}{2\pi} = \frac{k_g^{eff} (T_H - T_C)}{\ln(R/b)} + \sigma b \varepsilon_R \varepsilon_{bR} \{T_H^4 - T_C^4\}$$

为了求解方程 11, t 被表示为横贯所述间隙的辐射热通量与传导热通量的比率:

$$(12) \quad t = \frac{\sigma b \varepsilon_R \varepsilon_{bR} \{T_H^2 + T_C^2\} (T_H + T_C) \ln(R/b)}{k_g^{eff}}$$

然后, 把方程 11 写成以下形式:

$$(13) \quad \frac{Q}{2\pi} = \frac{k_g^{eff} (T_H - T_C)}{\ln(R/b)} \{1 + t\}$$

对于 T_H , 给定 Q 和 T_C , 迭代求解方程 13 和 11。在表 1 中给出了参数 σ , a_g 和 b_g 的数值。在表 2 中列出了加热器的尺寸大小。辐射系数 ε_s 和 ε_a 可被认为位于 0.4-0.8 范围内。

表 1
用于计算的材料参数

参数	σ	a_g (空气)	b_g (空气)	a_g (He)	b_g (He)
单位	$Wm^{-2}K^{-4}$	$Wm^{-1}K^{-1}$	$Wm^{-1}K^{-2}$	$Wm^{-1}K^{-1}$	$Wm^{-1}K^{-2}$
数值	5.67×10^{-8}	0.01274	5.493×10^{-5}	0.07522	2.741×10^{-4}

表 2
成组的加热器尺寸大小

尺寸大小	英寸	米
加热杆外部半径 b	$1/2 \times 0.75$	9.525×10^{-3}
管道内部半径 R	$1/2 \times 1.771$	2.249×10^{-2}

图 29 表示对于其中加热杆和管道辐射系数都为 0.8 的基本情况以

及其中加热杆辐射系数被降低到 0.4 的低辐射系数情况，加热杆的温度是加热杆内所产生功率 (W/m) 的函数。管道温度被设置在 $260^{\circ}C$ 。图 29 中比较了对于环状空间被充满空气和氦的一些情况。曲线 204 是针对空气中的基本情况。曲线 206 是针对氦气中的基本情况。曲线 208 是针对空气中的低辐射系数情况。曲线 210 是针对氦气中的低辐射系数情况。图 30-36 重复了针对管道温度为 $315^{\circ}C$ 至 $649^{\circ}C$ (含) 的相同情况，在每个图中步增量为 $55^{\circ}C$ 。应当注意，在图 34-36 中的温度规模相对于图 29-33 中的规模被偏离了 $111^{\circ}C$ 。图 29-36 表示出了对于相似的生成功率，环状空间中的氦气降低了杆的温度，其中的氦气的导热率要高于空气的导热率。

图 37 表示出了对于在环状空间内具有空气或氦且不同加热器功率而言中央加热杆 (辐射系数为 0.8) 温度 (竖轴) 与管道温度 (水平轴) 之间的关系。图 38 表示出了对于在环状空间内具有空气或氦且不同加热器功率而言中央加热杆 (辐射系数为 0.4) 温度 (竖轴) 与管道温度 (水平轴) 之间的关系。曲线 212 是针对空气和加热器功率为 $500W/m$ 的情况。曲线 214 是针对空气和加热器功率为 $833W/m$ 的情况。曲线 216 是针对空气和加热器功率为 $1167W/m$ 的情况。曲线 218 是针对氦和加热器功率为 $500W/m$ 的情况。曲线 220 是针对氦和加热器功率为 $833W/m$ 的情况。曲线 222 是针对氦和加热器功率为 $1167W/m$ 的情况。图 37-38 表示出了与环状空间内的空气相比，在环状空间内的氦减小了加热器和筒之间的温差。

图 39 表示出了对于环状空间内具有空气的导体位于管道中的加热器而言，在不同温度，火花间隙击穿电压 (V) 与压力 (atm) 的关系。图 40 表示出了对于环状空间内具有氦的导体位于管道中的加热器而言，在不同温度，火花间隙击穿电压 (V) 与压力 (atm) 的关系。图 39 和 40 表示出了对于具有 $2.5cm$ 直径的中央导体和 $7.6cm$ 间隙至管道内部半径的导体位于管道内的加热器而言的击穿电压。曲线 224 是针对 $300K$ 温度的。曲线 226 是针对 $700K$ 温度的。曲线 228 是针对 $1050K$ 温度的。 $480V$ RMS 被表示为通常所施加的电压。图 39 和 40 表示出

了氮具有的火花间隙击穿电压要小于针对 1 个大气压(atm)的空气中的火花间隙击穿电压。这样就需要增大氮的压力以实现对于空气的击穿电压级别的火花间隙击穿电压。

图 41-43 表示出了温度受限加热器的一些实验数据。图 41 表示对于直径为 2.5cm 的 446 不锈钢杆和直径为 2.5cm 的 410 不锈钢杆而言,在不同的施加电流,电阻(Ω)与温度($^{\circ}\text{C}$)之间的关系。两杆的长度均为 1.8 米。曲线 230-236 表示出了针对 446 不锈钢杆在 440 安培交流电(曲线 230)、450 安培交流电(曲线 232)、500 安培交流电(曲线 234)和 10 安培直流电(曲线 236),电阻与温度的函数关系曲线。曲线 238-244 表示出了针对 410 不锈钢杆在 400 安培交流电(曲线 238)、450 安培交流电(曲线 240)、500 安培交流电(曲线 242)和 10 安培直流电(曲线 244),电阻与温度的函数关系曲线。对于所述的两杆,在到达居里温度之前,电阻随着温度的升高而逐渐增大。在居里温度,电阻锐减。在居里温度以上,电阻随着温度的升高稍稍减小。这两杆表示出了电阻随着交流电电流的增大而减小的趋势。相应地,调节比随着电流的增大而减小。于是,这些杆在杆的居里温度附近和该居里温度之上能提供减小的热量。相比较而言,采用直流电,则电阻随着温度的升高而逐渐增大,达到居里温度后电阻仍然逐渐增大。

图 42 表示对于一温度受限加热器在不同的施加电流,电阻($\text{m}\Omega$)与温度($^{\circ}\text{C}$)之间的关系。该温度受限加热器包括铜杆,该铜杆的直径为 1.3cm,并且位于一外部导体内,该外部导体是 2.5cm 表 80(schedule 80) 410 不锈钢管,该不锈钢管具有 0.15cm 厚的铜,注册商标为 EverdurTM(DuPont 工程,Wilmington,德国),其为焊接护套,位于 410 不锈钢管上,并且长度为 1.8 米。曲线 264-274 表示对于交流电施加电流在 300 安培至 550 安培之间(264: 300 安培; 266: 350 安培; 268: 400 安培; 270: 450 安培; 272: 500 安培; 274: 550 安培),电阻与温度的函数关系。对于这些交流电施加电流,电阻随着温度升高至居里温度而逐渐增大。在居里温度,电阻就锐减。相比较而言,曲线 276

表示针对 10 安培直流电电流的电阻。这个电阻随着温度的升高而平稳地增大，并且在居里温度很少或没有偏离。

图 43 表示对于实心的直径为 2.54cm 且长度为 1.8m 的 410 不锈钢杆在不同的施加电流，电阻 ($m\Omega$) 与温度 ($^{\circ}C$) 之间的数据关系。曲线 278、280、282、284 和 286 表示出了针对 410 不锈钢杆在 40 安培交流电 (曲线 284)、70 安培交流电 (曲线 286)、140 安培交流电 (曲线 278)、230 安培交流电 (曲线 280) 和 10 安培直流电 (曲线 282)，电阻与温度之间的函数关系。对于 140 安培和 230 安培的施加交流电电流而言，在温度到达居里温度之前，电阻随着温度的升高而增大。在居里温度，电阻锐减。相比较而言，对于施加的直流电电流而言，电阻随着温度通过居里温度的升高而逐渐增大。

图 44 表示对于一实心的直径为 2.54cm 且长度为 1.8m 的 410 不锈钢杆在不同的施加的交流电电流，集肤深度 (cm) 与温度 ($^{\circ}C$) 之间关系的数据。集肤深度由方程 14 来计算。

$$(14) \delta = R_1 - R_1 \times (1 - (1/R_{AC}/R_{DC}))^{1/2};$$

其中， δ 是集肤深度， R_1 是圆筒的半径， R_{AC} 是交流电电阻， R_{DC} 是直流电电阻。在图 44 中，曲线 320-338 表示出了针对在 50 安培到 500 安培范围 (320: 50 安培; 322: 100 安培; 324: 150 安培; 326: 200 安培; 328: 250 安培; 330: 300 安培; 332: 350 安培; 334: 400 安培; 336: 450 安培; 338: 500 安培) 的施加交流电电流而言的集肤深度与温度之间的函数关系。针对每个施加的交流电电流，随着温度增大至居里温度，集肤深度随着温度的升高而增大。在居里温度，集肤深度锐减。

图 45 表示出了温度受限加热器的温度 ($^{\circ}C$) 与时间 (小时) 之间的关系。该温度受限加热器长度为 1.83 米，并且包括铜杆，该铜杆的直径为 1.3cm，该铜杆位于 2.5cm 表 XXH410 不锈钢管和 0.325cm 的铜护套内。该加热器被放置在加热炉内。当加热器位于炉内时，向加热器施加交流电电流。电流被增大二个小时以上，且在其余的时间，电流达到 400 安培这一相对恒定的数值。沿着加热器的长度，以 0.46

米为间隔，在三个点测量不锈钢管的温度。曲线 340 表示在炉内并最靠近加热器的引入部分的在 0.46 米的点处所述管的温度。曲线 342 表示从管的端部并且最远离加热器的引入部分的在 0.46 米的点处所述管的温度。曲线 344 表示在加热器的大致中点的管的温度。加热器中央的点被进一步包裹在 2.5cm 厚的注册商标为 Fiberfrax™ (Unifrax 公司, Niagara Falls, 纽约) 的绝缘件的 0.3 米段中。该绝缘件被用于在加热器上产生低热导率段 (在该段中, 向周围的热传递被减慢或被阻止 (一“热点”))。加热器的温度随着时间而增大, 如图中曲线 344、342、340 所示。曲线 344、342、340 表示对于沿着加热器的长度的所有三个点而言, 加热器的温度增大至约相同的数值。结果温度基本上独立于所增加的注册商标为 Fiberfrax™ 的绝缘件。因此, 尽管在沿着加热器的长度的三个点中的每个点的热负荷不同 (由于所述绝缘件的缘故), 但温度受限加热器的操作温度基本上相同。从而, 在具有低热导率段的情况下, 温度受限加热器不会超过选定的温度极限。

图 46 表示出了 2.5cm 实心的 410 不锈钢杆和 2.5cm 实心的 304 不锈钢杆的温度 (°C) 与测量时间 (小时) 之间的关系。在恒定的所施加的交流电电流下, 每根杆的温度随着时间而增大。曲线 346 表示一热电偶的数据, 该热电偶被放置在 304 不锈钢杆的外表面上, 并且位于绝缘层下面。曲线 348 表示放置在没有绝缘层的 304 不锈钢杆的外表面上的热电偶的数据。曲线 350 表示放置在 410 不锈钢杆的外表面上并且位于绝缘层下面的热电偶的数据。曲线 352 表示放置在没有绝缘层的 410 不锈钢杆的外表面上的热电偶的数据。通过这些曲线的对比, 表明 304 不锈钢杆的温度 (曲线 346 和 348) 比 410 不锈钢杆的温度 (曲线 350 和 352) 增大得更快。304 不锈钢杆的温度 (曲线 346 和 348) 也达到比 410 不锈钢杆的温度 (曲线 350 和 352) 更高的数值。410 不锈钢杆的非绝缘段 (曲线 352) 和 410 不锈钢杆的绝缘段 (曲线 350) 之间的温差小于 304 不锈钢杆的非绝缘段 (曲线 348) 与 304 不锈钢杆的绝缘段 (曲线 346) 之间的温差。在实验终止 (曲线 346 和 348) 时, 304 不锈钢杆的温度在增大, 而 410 不锈钢杆的温度

曲线变平（曲线 350 和 352）。因此，在具有变化的热负荷（由于绝缘层）的情况下，410 不锈钢杆（温度受限加热器）比 304 不锈钢杆（非温度受限加热器）能提供更好的温度控制。

利用数字模拟（FLUENT，可从 Fluent 美国，Lebanon NH 获得）来比较具有三个调节比的温度受限加热器的操作。对于格林河油页岩（Green River 油页岩）地层中的加热器进行这种模拟。模拟条件为：

- 61 米长的导体位于管道中的居里加热器（中央导体（2.54cm 直径），管道外部直径 7.3cm）
- 对于一油页岩地层而言的井下加热器测试区富足关系图
- 16.5cm（6.5 英寸）直径的一些井筒，在三角形间距上，井筒之间的间距为 9.14 米
- 200 小时功率升高时间至 820 瓦特/米初始热注入率
- 在升高之后，以恒定电流来操作
- 加热器的居里温度为 720.6°C
- 对于油页岩富足至少为 0.14L/kg(35 加仑/吨)而言，地层会膨胀并且接触加热筒

图 47 表示出了对于调节比为 2: 1 的温度受限加热器而言，导体位于管道中的加热器的中央导体的温度（°C）是地层深度（米）的一个函数。曲线 354-376 表示在从开始加热之后 8 天至开始加热后 675 天的不同时间（354: 8 天，356: 50 天，358: 91 天，360: 133 天，362: 216 天，364: 300 天，366: 383 天，368: 466 天，370: 550 天，372: 591 天，374: 633 天，376: 675 天）在地层中的温度曲线。在调节比为 2: 1，在最富足的油页岩层中，在 466 天之后，720.6°C 的居里温度被超过。图 48 表示出了沿着油页岩富足（l/kg）的对于 2: 1 调节比，通过地层的对应的加热器的热通量曲线（瓦特/米）（曲线 378）。曲线 380-412 表示从开始加热后 8 天至开始加热后 633 天在不同的时间（380: 8 天；382: 50 天；384: 91 天；386: 133 天；388: 175 天；390: 216 天；392: 258 天；394: 300 天；396: 341 天；398: 383 天；400: 425 天；402: 466 天；404: 508 天；406: 550 天；408: 591 天；

410: 633 天; 412: 675 天)的热通量曲线。在 2: 1 的调节比时,在最富足油页岩层中,中央导体温度超过居里温度。

图 49 表示出了对于 3: 1 的调节比而言,加热器温度($^{\circ}\text{C}$)是地层深度(米)的函数。曲线 414-436 表示出了在开始加热后 12 天至开始加热后 703 天的不同时间(414: 12 天; 416: 33 天; 418: 62 天; 420: 102 天; 422: 146 天; 424: 205 天; 426: 271 天; 428: 354 天; 430: 467 天; 432: 605 天; 434: 662 天; 436: 703 天)通过地层的温度曲线。在 3: 1 的调节比,在 703 天后,达到居里温度。图 50 表示出了对于 3: 1 的调节比而言,沿着油页岩富足(l/kg)的通过地层的对应的加热器热通量(瓦特/米)的曲线(曲线 438)。曲线 440-460 表示出了从开始加热后 12 天至开始加热后 605 天的不同时间(440: 12 天, 442: 32 天, 444: 62 天, 446: 102 天, 448: 146 天, 450: 205 天, 452: 271 天, 454: 354 天, 456: 467 天, 458: 605 天, 460: 749 天)的热通量曲线。对于 3: 1 的调节比,中央导体温度从未超过居里温度。中央导体温度还表示出了对于 3: 1 的调节比的相对平的温度曲线。

图 51 表示对于调节比为 4:1 而言加热器温度是地层深度的一个函数。曲线 462-482 表示在从开始加热后 12 天至开始加热后 467 天的各个时间(462:12 天; 464:33 天; 466:62 天; 468:102 天; 470:147 天; 472:205 天; 474:272 天; 476:354 天; 478:467 天; 480:606 天; 482:678 天)通过地层的温度曲线。在调节比为 4: 1,甚至在 678 天后,居里温度也未被超过。对于调节比为 4: 1 而言,中央导体温度从未超过居里温度。中央导体表示出了对于 4: 1 调节比的温度曲线,该曲线要比对于 3: 1 调节比的温度曲线要更平一些。这些模拟表明,调节比越高,加热器温度在居里温度或该居里温度以下停留的时间越长。对于油页岩富足曲线,理想的是,调节比至少为 3: 1。

已经进行过模拟,以便比较温度受限加热器和非温度受限加热器在油页岩地层中的使用情况。把一些导体位于管道中的加热器放置在 16.5 厘米(6.5 英寸)直径的井筒内,在地层模拟件(例如,STARS,

可从计算机模拟集团有限公司 (Computer Modelling Group, LTD.) , Houston, TX 获得) 加热器和近井筒模拟件 (例如, ABAQUS, 可从 ABAQUS 公司, Providence RI 获得) 加热器之间的间距为 12.2 米 (40 英尺) 的情况下产生模拟数据。标准的导体位于管道中的加热器包括 304 不锈钢导体和管道。温度受限的导体位于管道中的加热器包括有金属, 该金属对于导体和管道而言具有 760°C 的居里温度。图 52-54 表示出了模拟结果。

图 52 表示出了对于在操作 20000 小时后的模拟, 在导体位于管道中的加热器的导体处的加热器温度 ($^{\circ}\text{C}$) 与加热器在地层中的深度 (米) 之间的关系。在达到 760°C 之前, 加热器功率被设置在 820 瓦特/米, 然后, 该功率被减小, 以便阻止过热。曲线 484 表示标准的导体位于管道中的加热器的导体温度。曲线 484 表示出了导体温度的巨大变化以及沿着导体长度形成的大量的热点。导体的温度最小值为 490°C 。曲线 486 表示对于温度受限的导体位于管道中的加热器而言的导体温度。如图 52 所示, 对于温度受限加热器, 沿着导体长度的温度分布被更多地控制。此外, 对于温度受限加热器, 导体的操作温度为 730°C 。因此, 对于采用温度受限加热器的类似加热器而言, 可向地层提供更多的热输入。

图 53 表示出了对于模拟所用的加热器用于加热油页岩而言加热器热通量 (瓦特/米) 与时间 (年) 之间的关系。曲线 488 表示标准的导体位于管道中的加热器的热通量。曲线 490 表示温度受限的导体位于管道中的加热器的热通量。如图 53 所示, 与标准加热器的热通量相比, 温度受限加热器的热通量被保持在更高的值达更长的时间。更高的热通量可以实现对地层更均匀更快速地加热。

图 54 表示出了在模拟中所用的对油页岩进行加热的加热器的累积热输入 (kJ/m) (千焦/米) 与时间 (年) 之间的关系。曲线 492 表示标准的导体位于管道中的加热器的累积热输入。曲线 494 表示温度受限的导体位于管道中的加热器的累积热输入。如图 54 所示, 温度受限加热器的累积热输入比标准加热器的累积热输入增大得更快。通过温度

受限加热器在地层中实现更快的热积累，就可以减少加热地层所需的时间。对油页岩层开始加热可以在平均累积热输入约为 $1.1 \times 10^8 \text{kJ/米}$ 开始。对于温度受限加热器而言约 5 年到达这个累积热输入，对于标准加热器而言在 9 至 10 年间达到这个累积热输入。

鉴于这里所作的描述，对本发明的各个方面作出进一步的修改以及采用其它可选的实施方式，这对于本领域技术人员来说是很显然的。因此，这里所作的描述只是解释性的，它只是为了教导本领域技术人员实施本发明的一些总的方式。应当知道，在这里所描述的和所图示的本发明的形式应被认为是目前的优选实施例。可以对这里所图示和所描述的元件和材料进行替换，部分和过程可以被倒过来，本发明的某些特征可以被独立使用，所有这些对于本领域技术人员来说，在阅读这里的描述之后将会是很显然的。在不脱离本发明的构思和范围的情况下，可以对本发明作出一些变型，本发明的范围是由权利要求限定的。此外，应当知道，这里所独立描述的特征在一些实施例可以被结合起来。

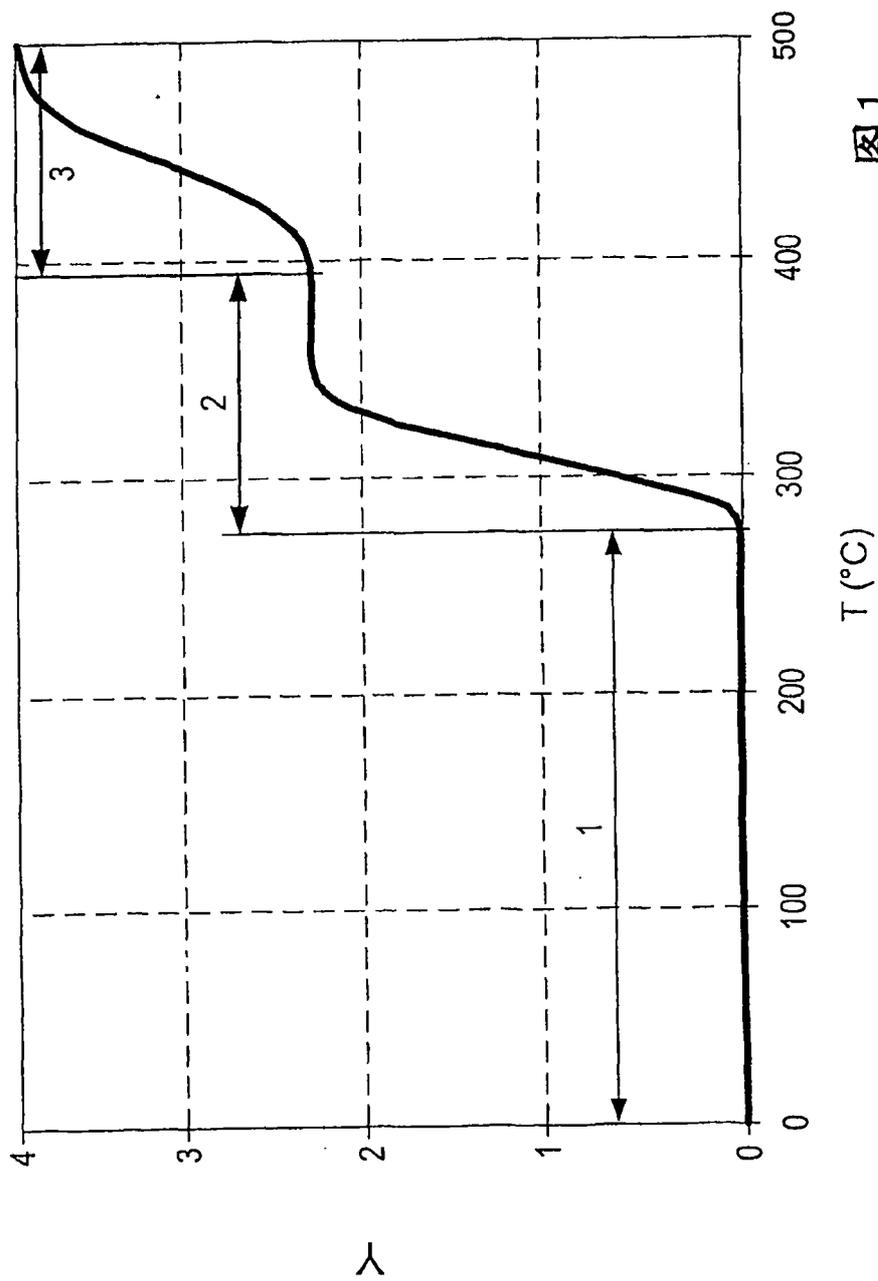
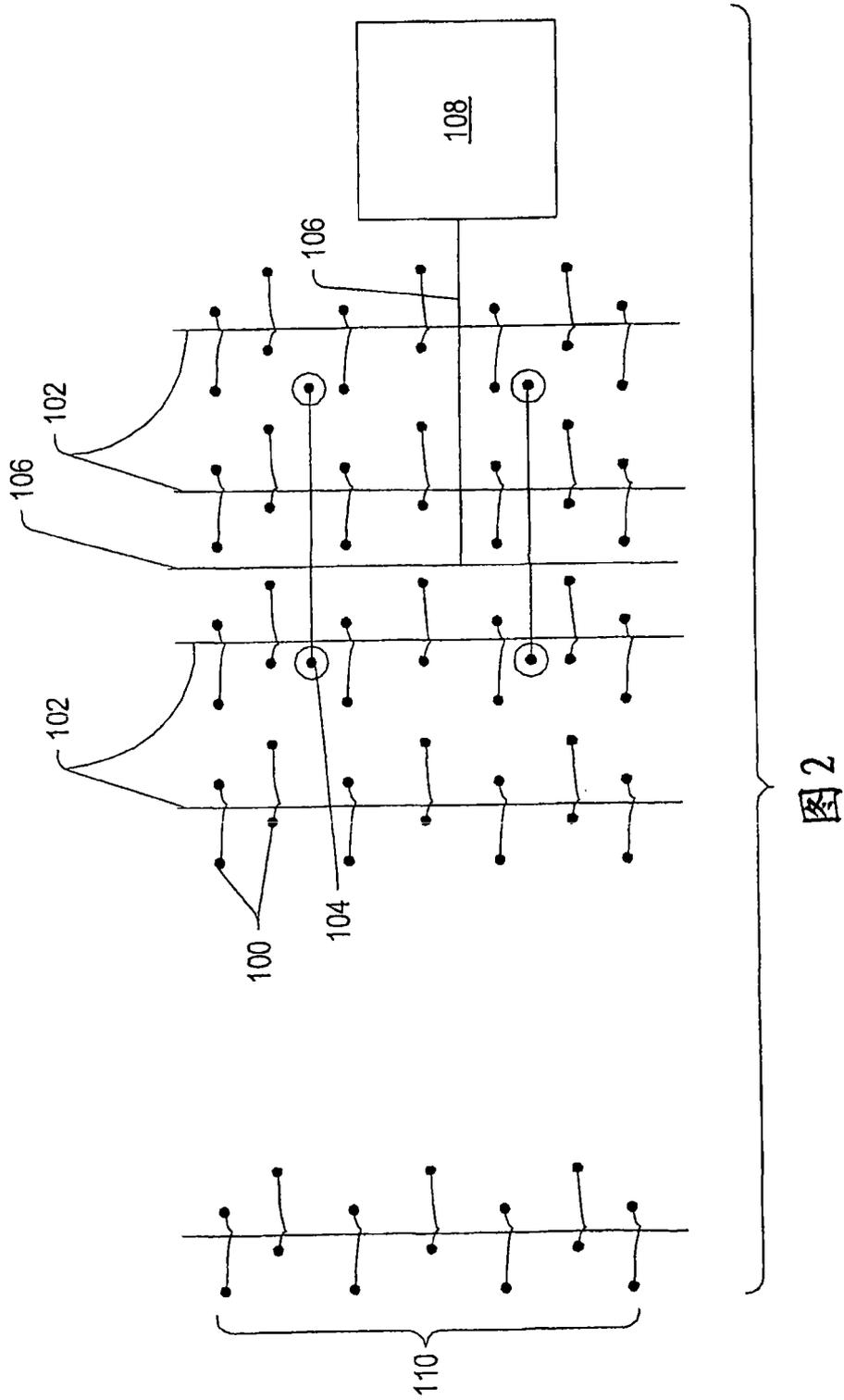


图1



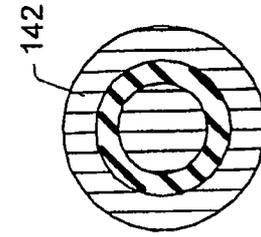


图5

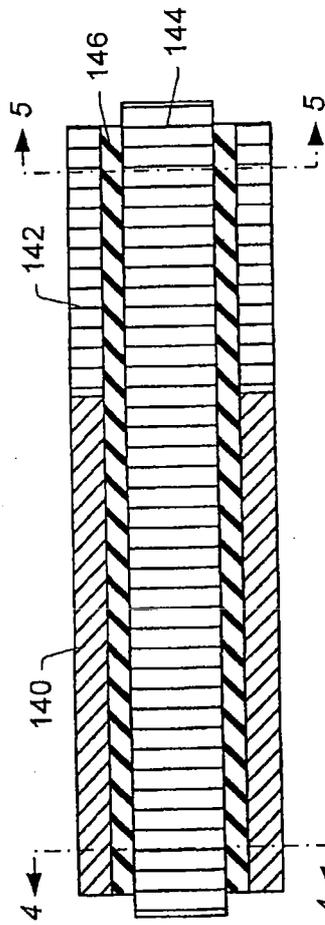


图3

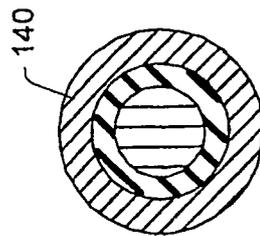


图4

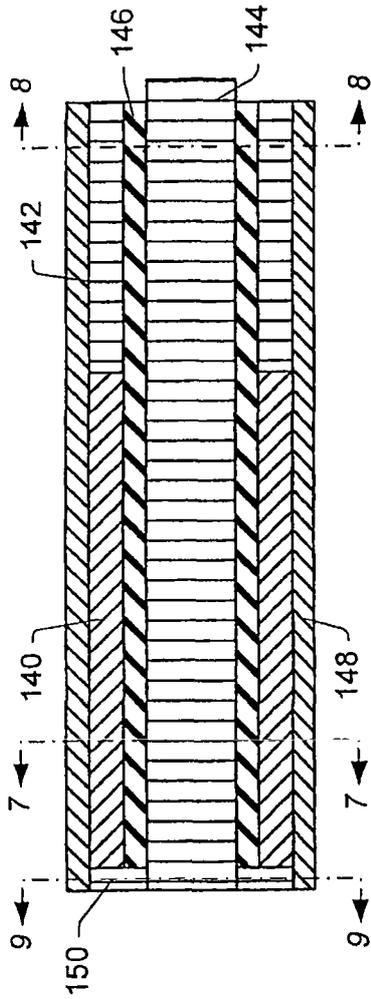


图6

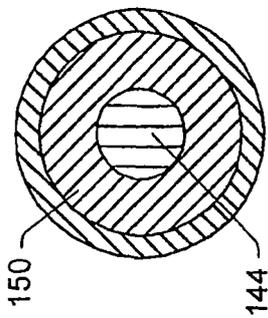


图9

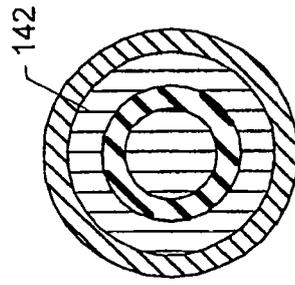


图8

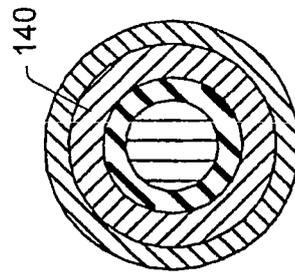


图7

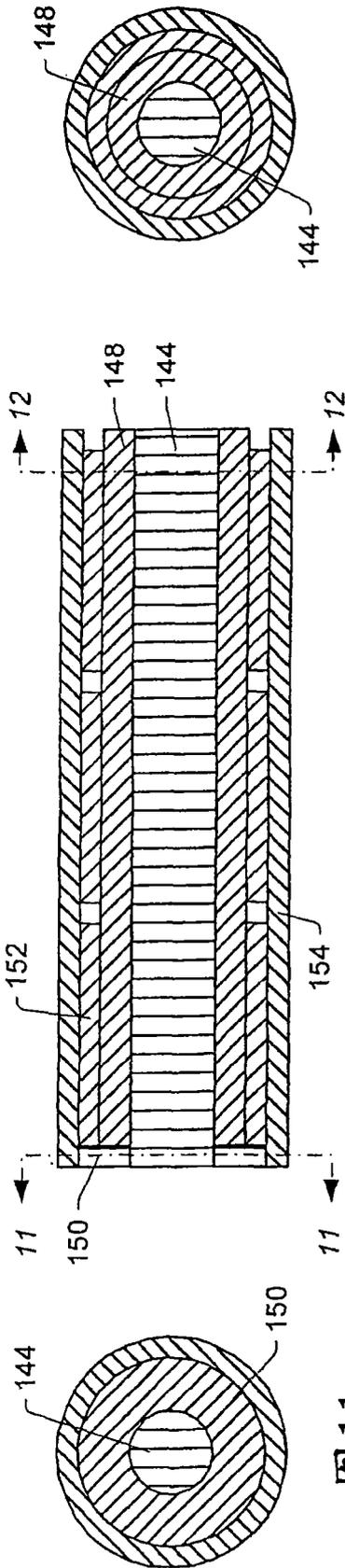


图11

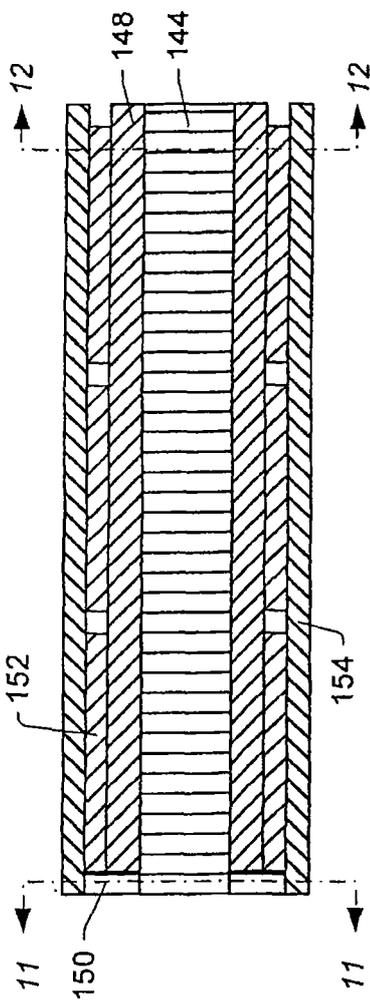


图10

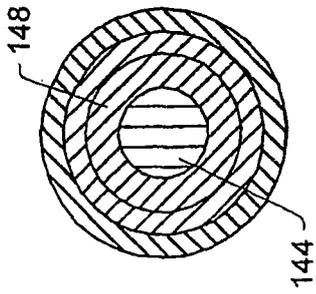


图12

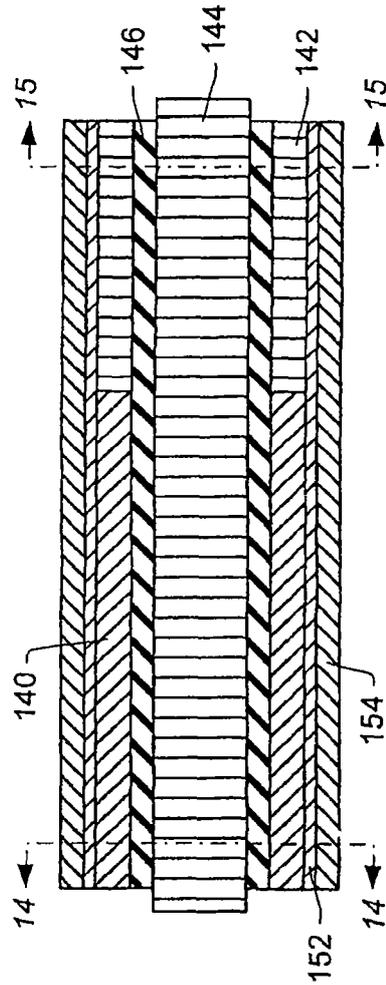


图13

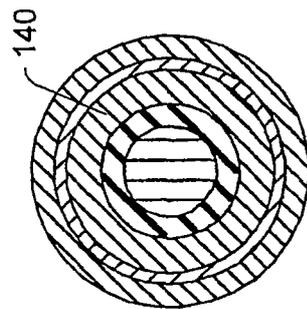


图14

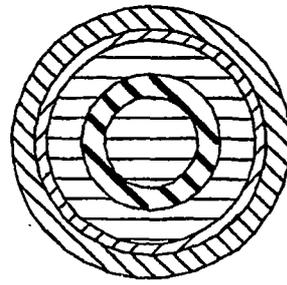


图15

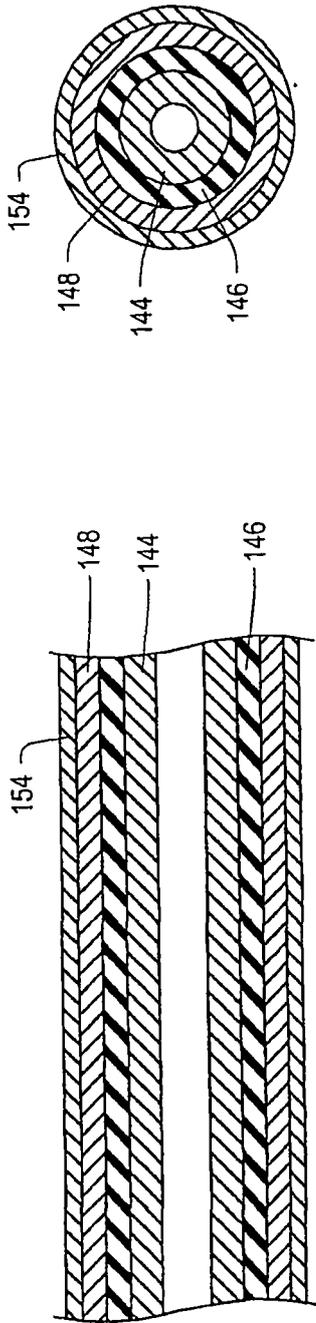


图16A

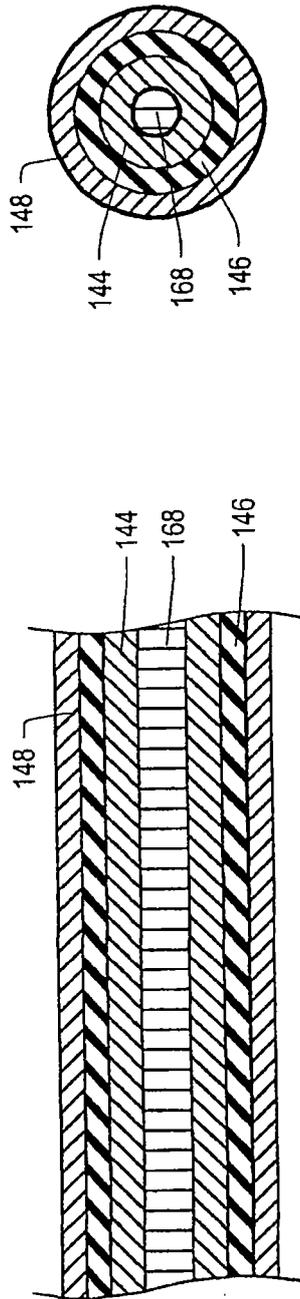


图17A

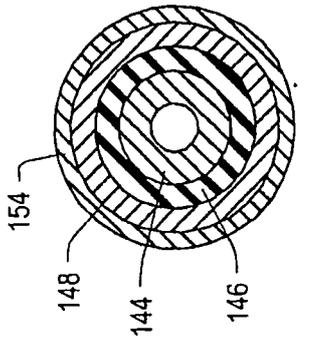


图16B

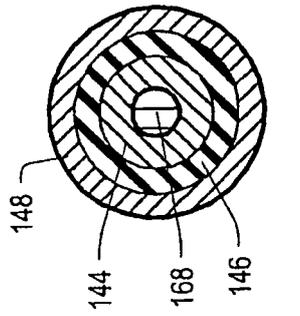


图17B

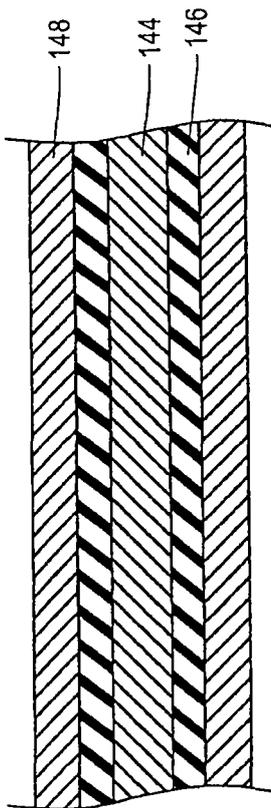


图 18A

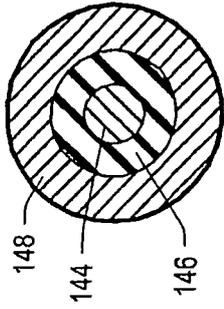


图 18B

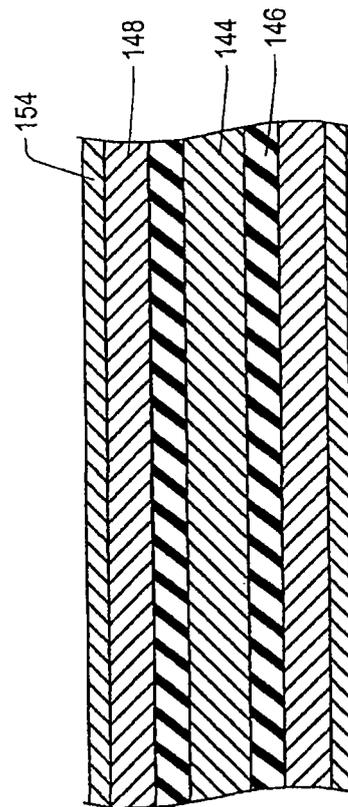


图 19A

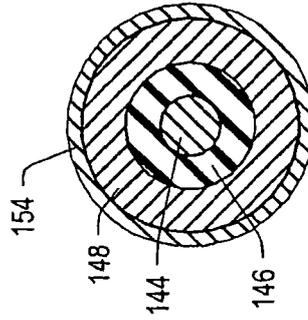


图 19B

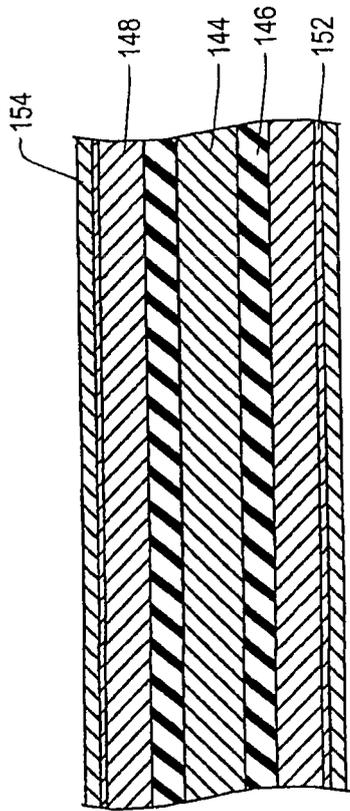


图 20A

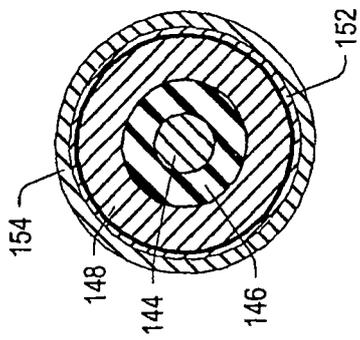


图 20B

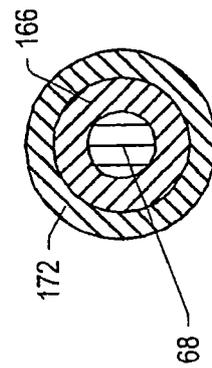


图 21

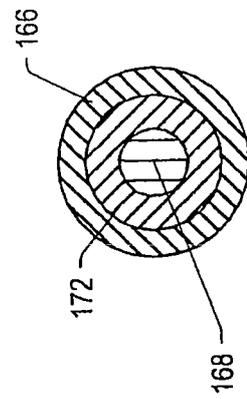


图 22

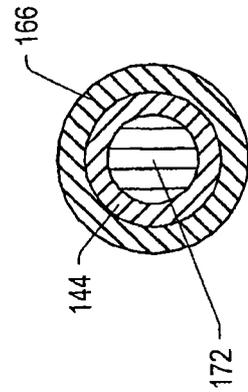


图 23

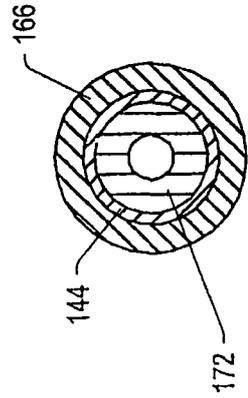


图 24

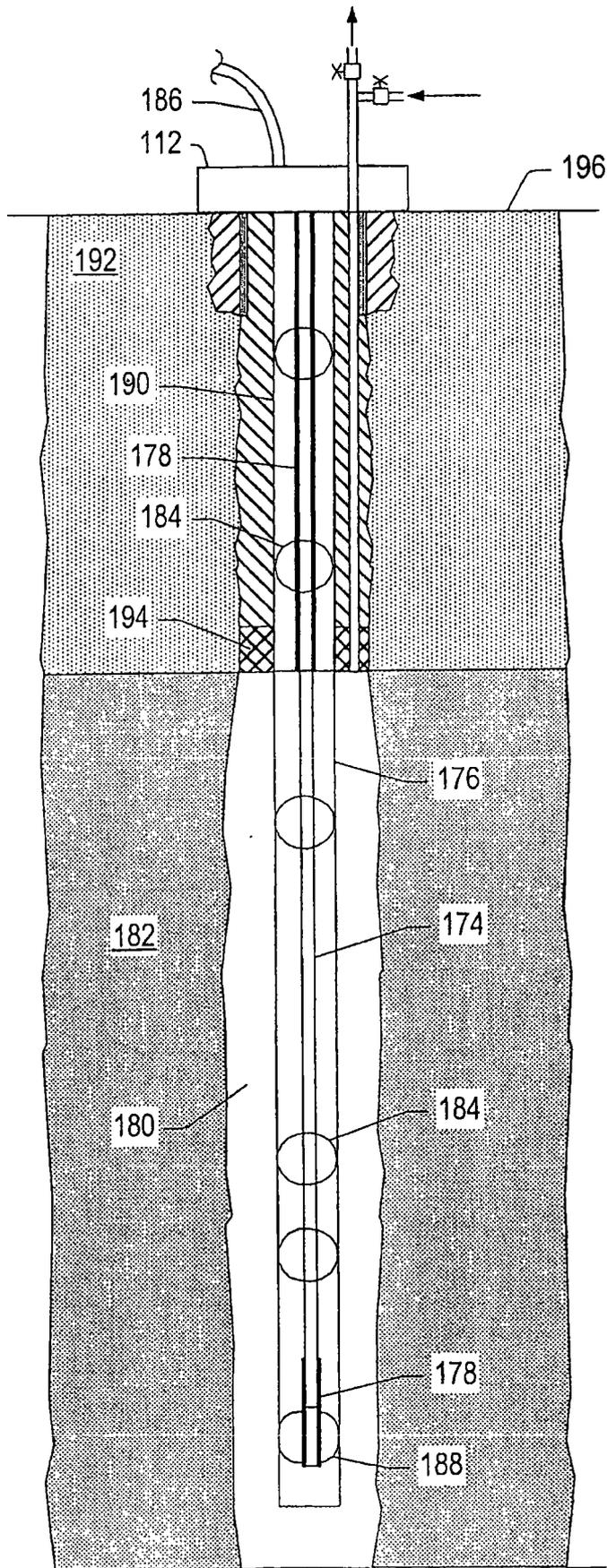


图 25

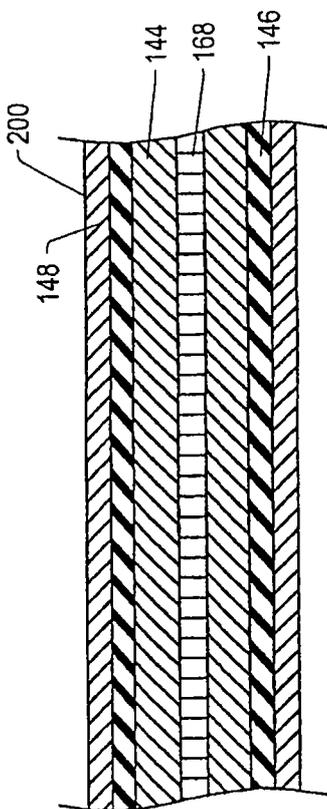


图 26A

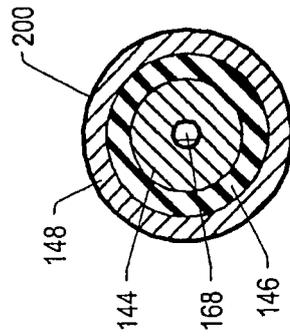


图 26B

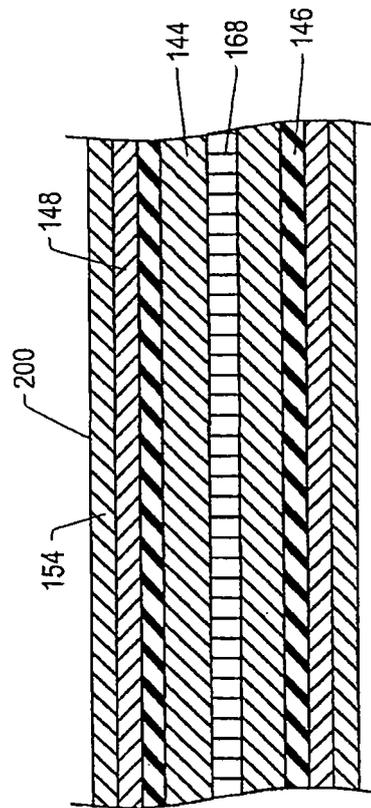


图 27A

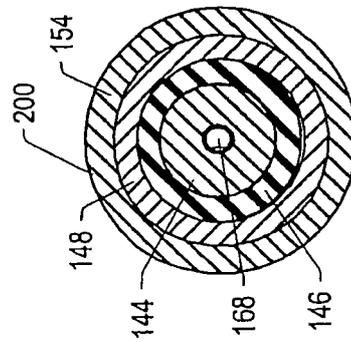


图 27B

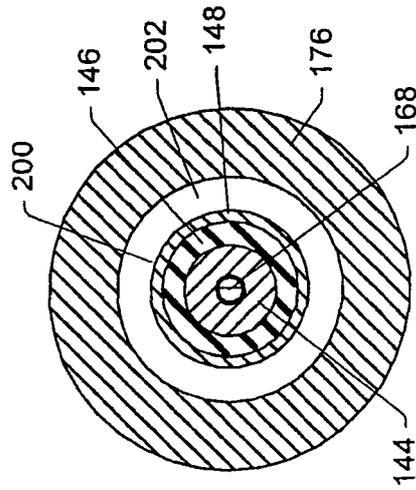


图 28

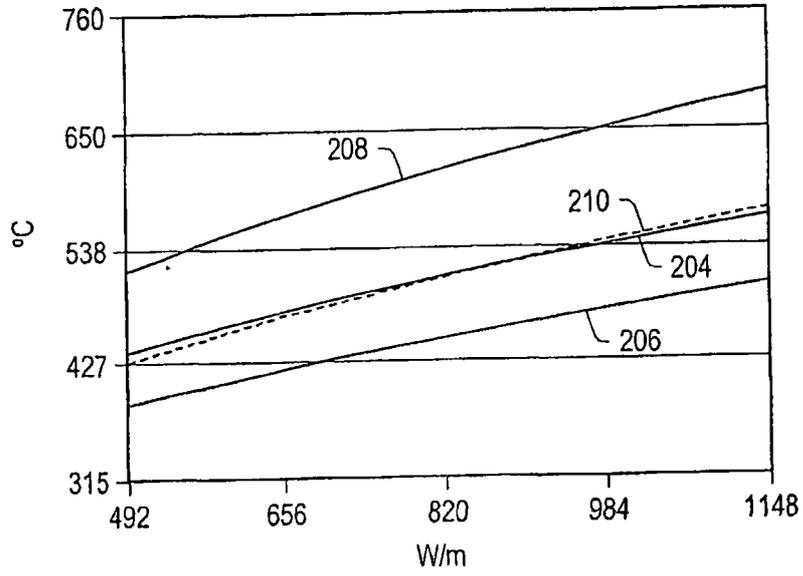


图 29

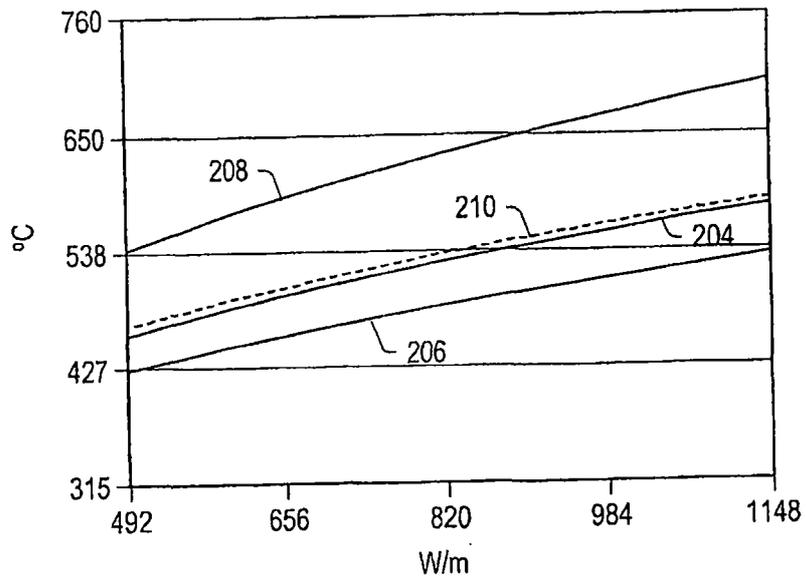


图 30

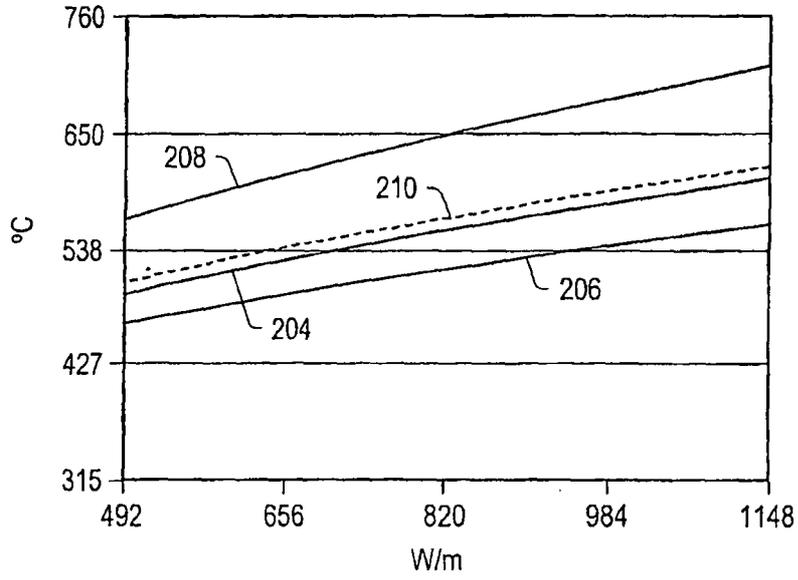


图 31

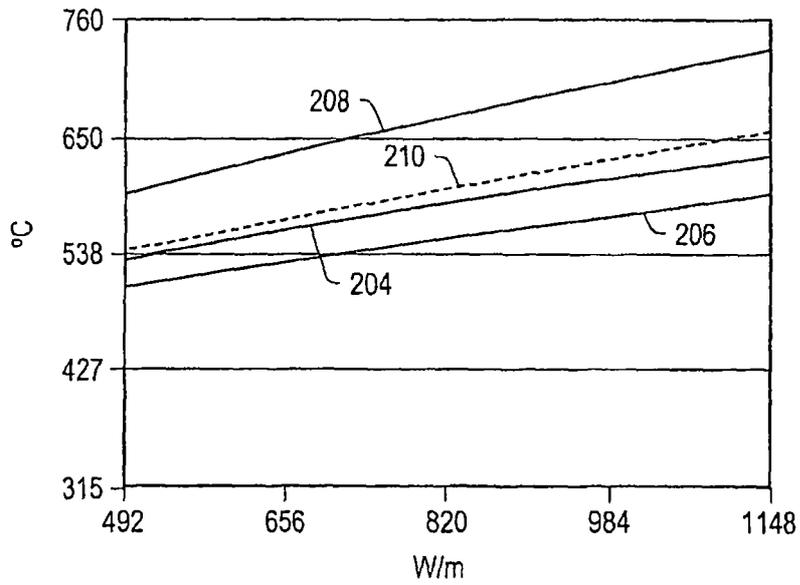


图 32

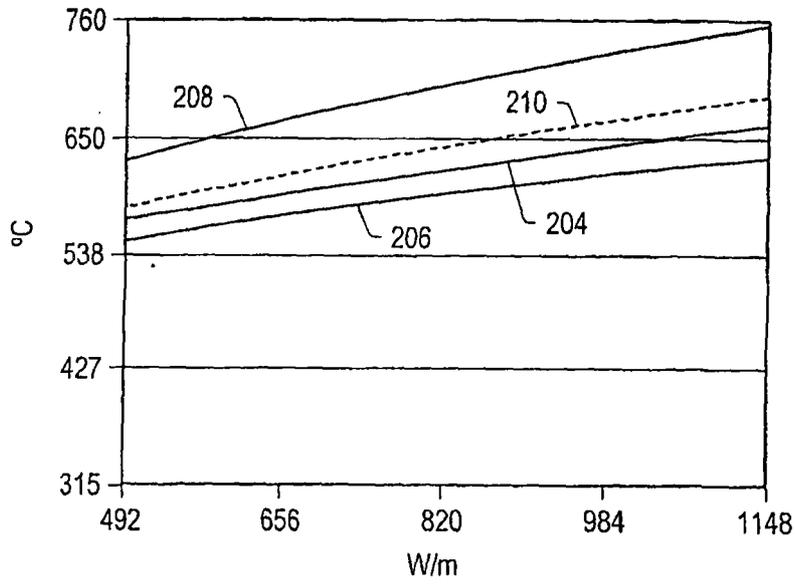


图 33

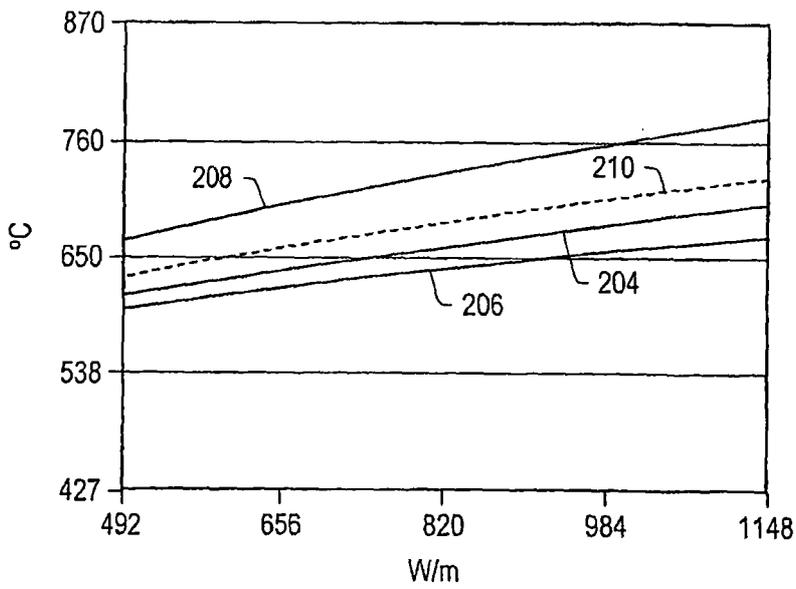


图 34

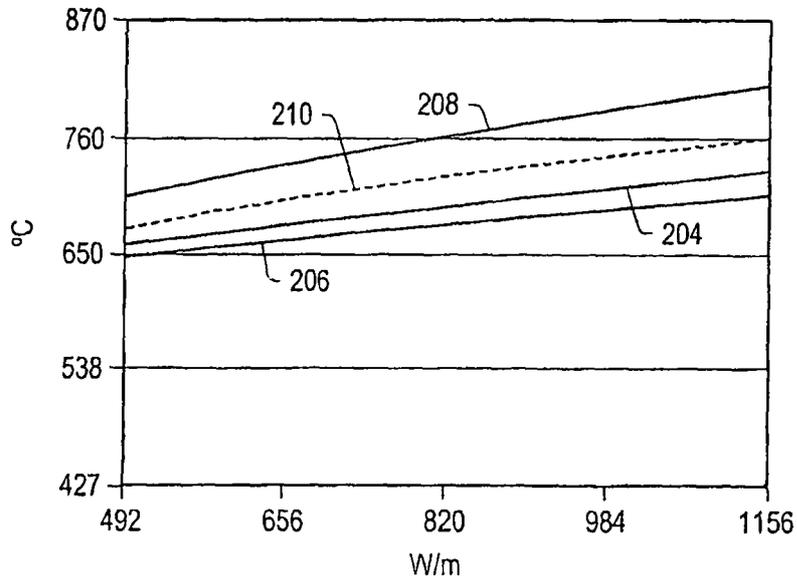


图 35

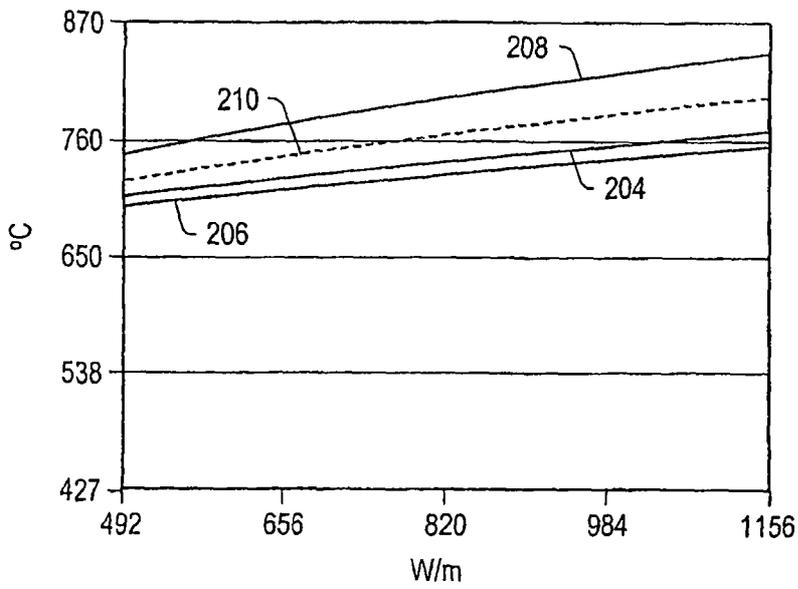


图 36

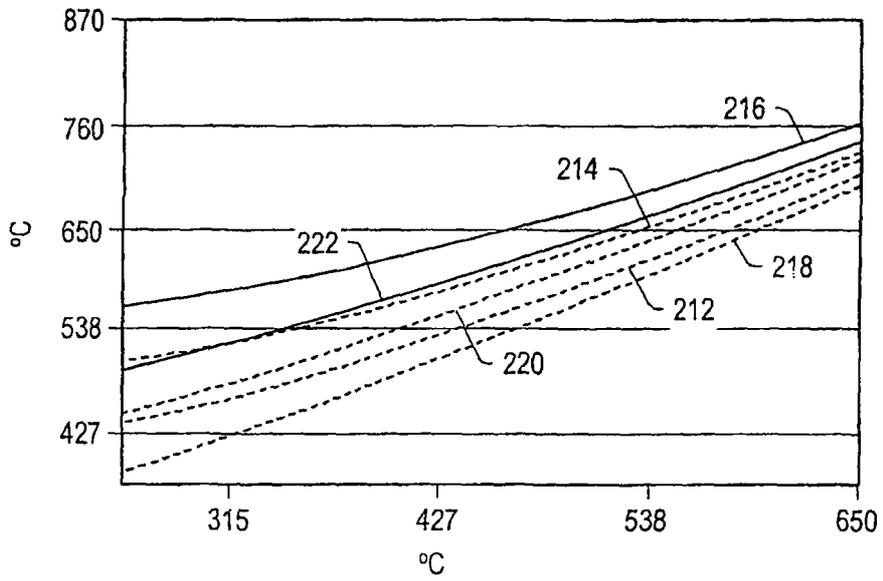


图 37

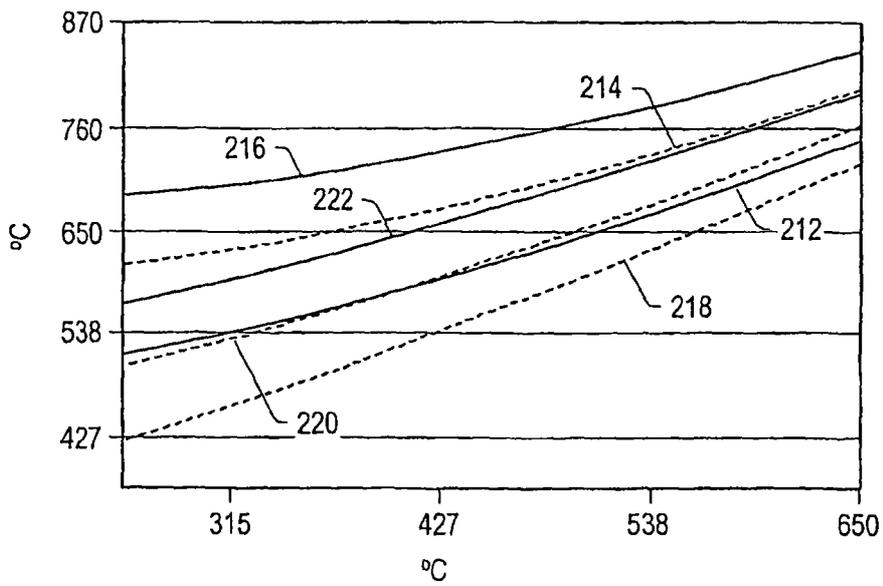
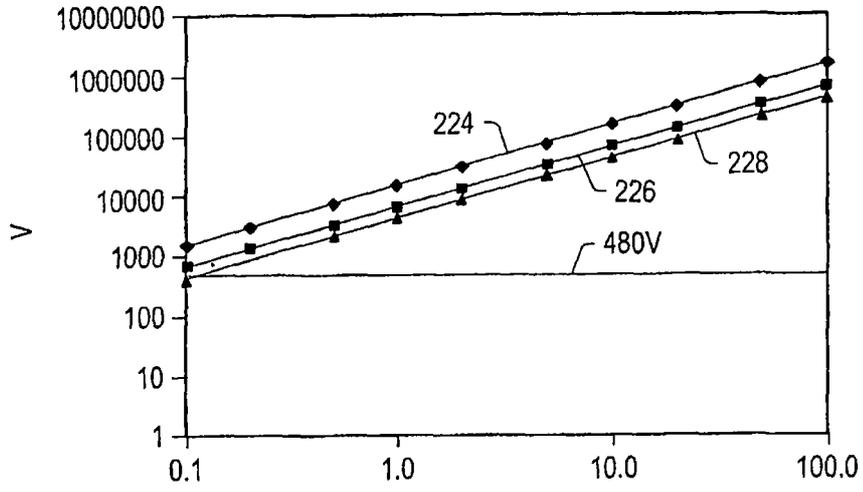
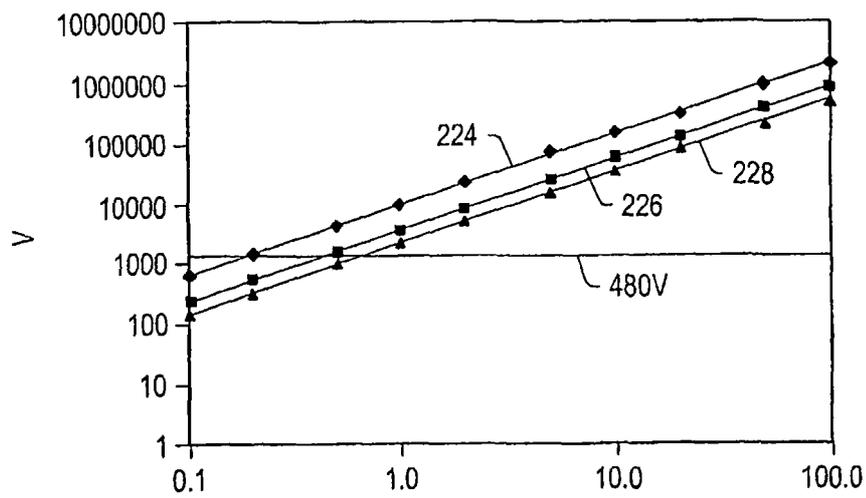


图 38



大气压

图 39



大气压

图 40

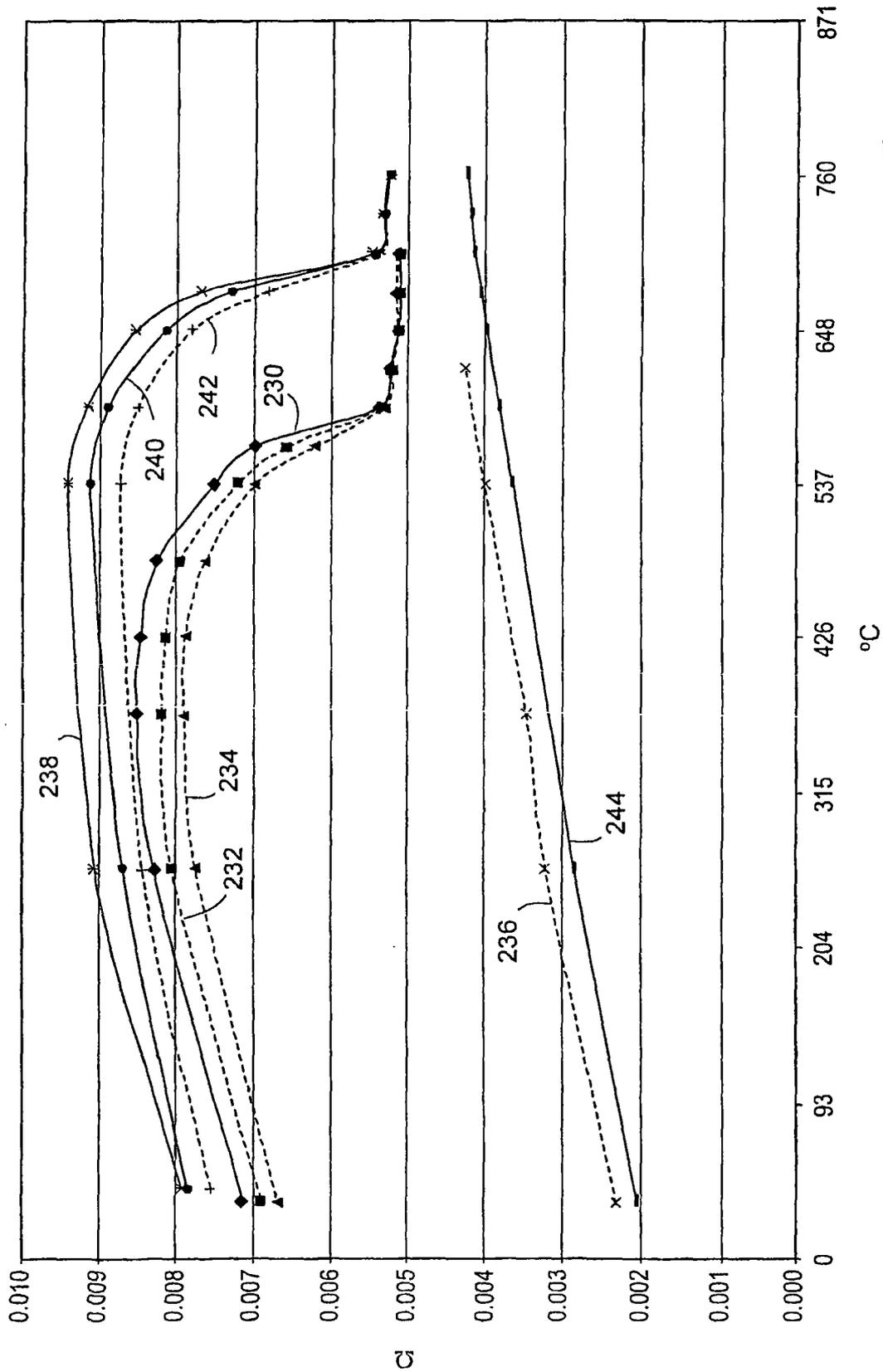


图41

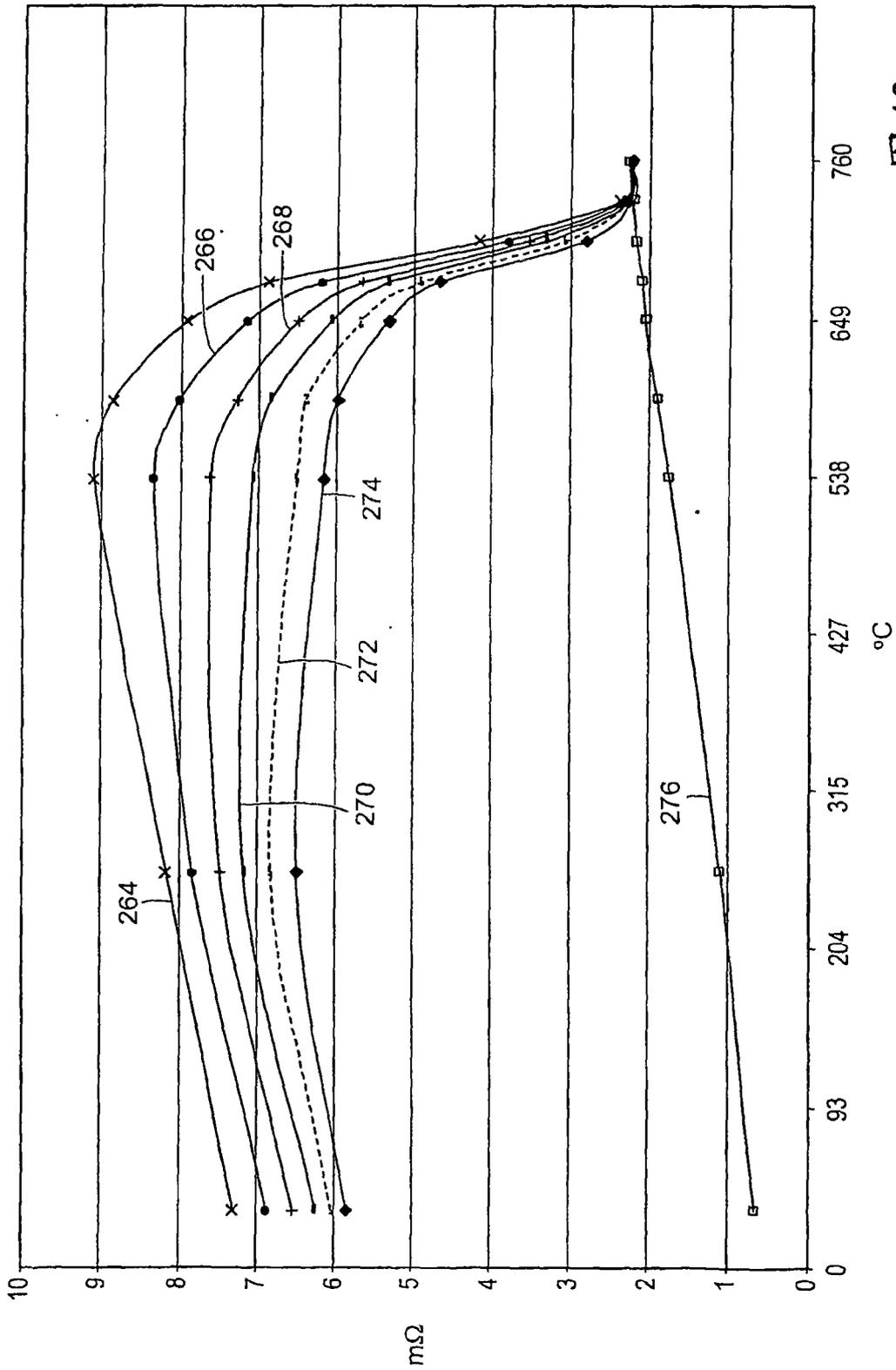


图 42

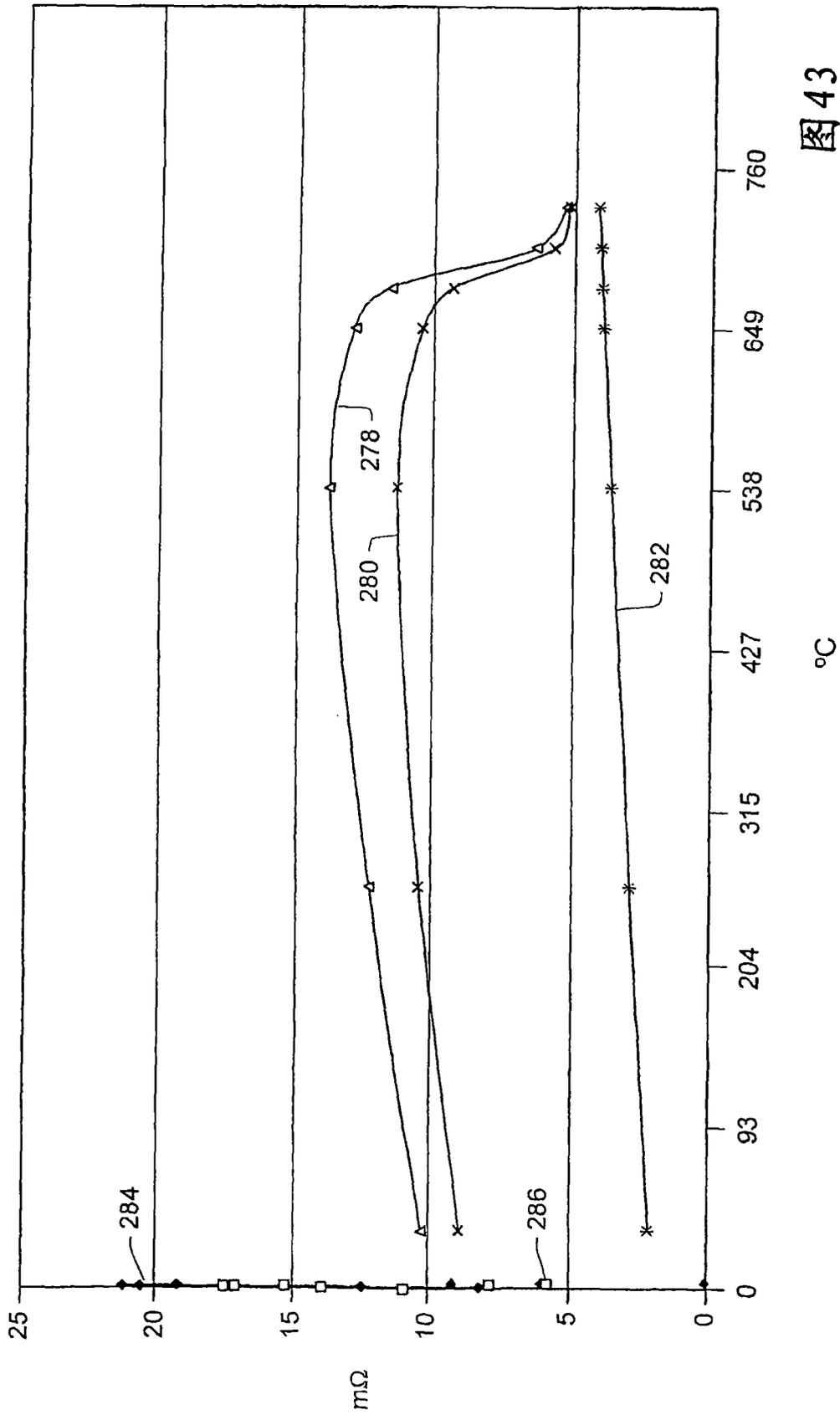


图43

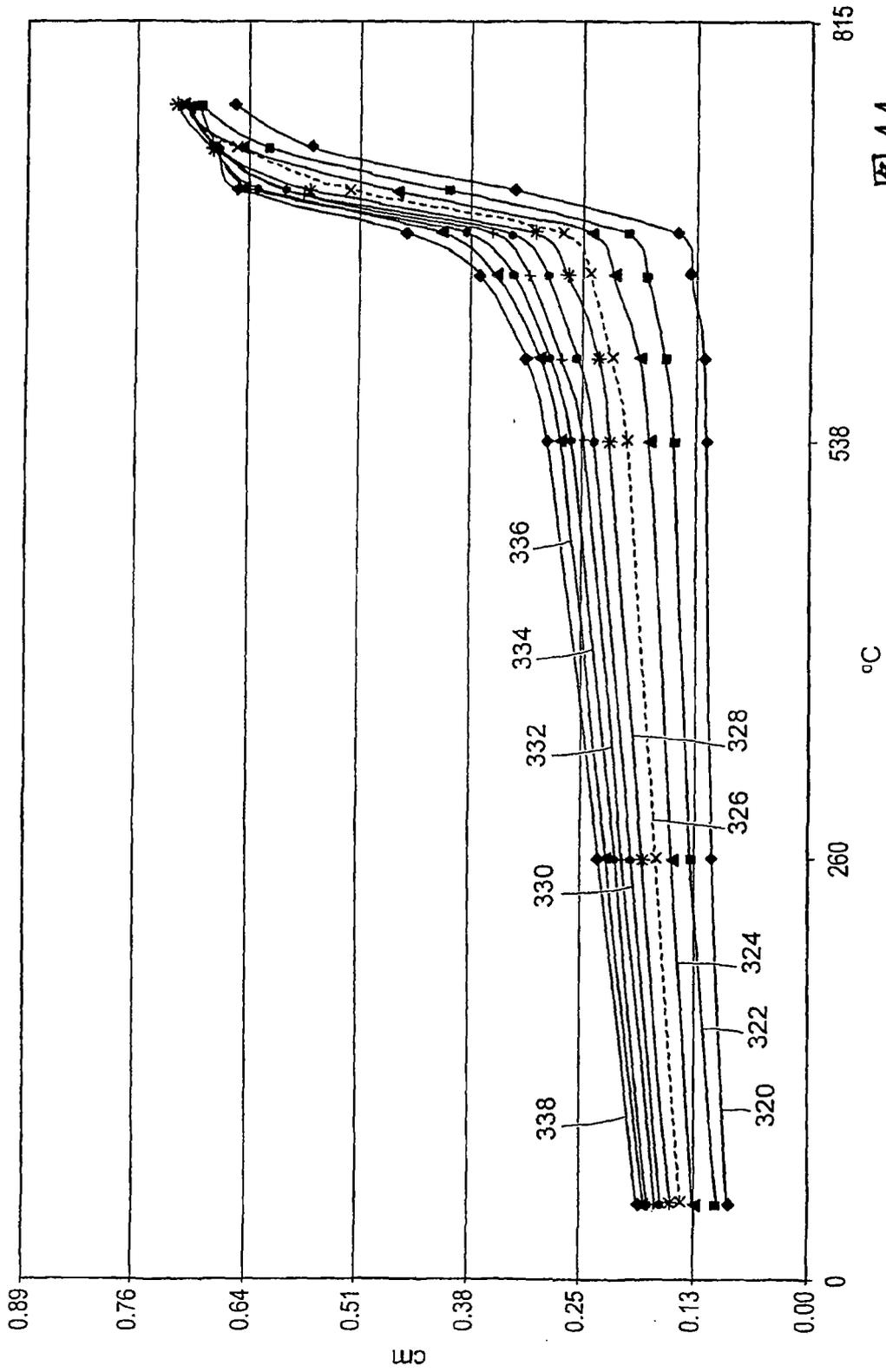


图 44

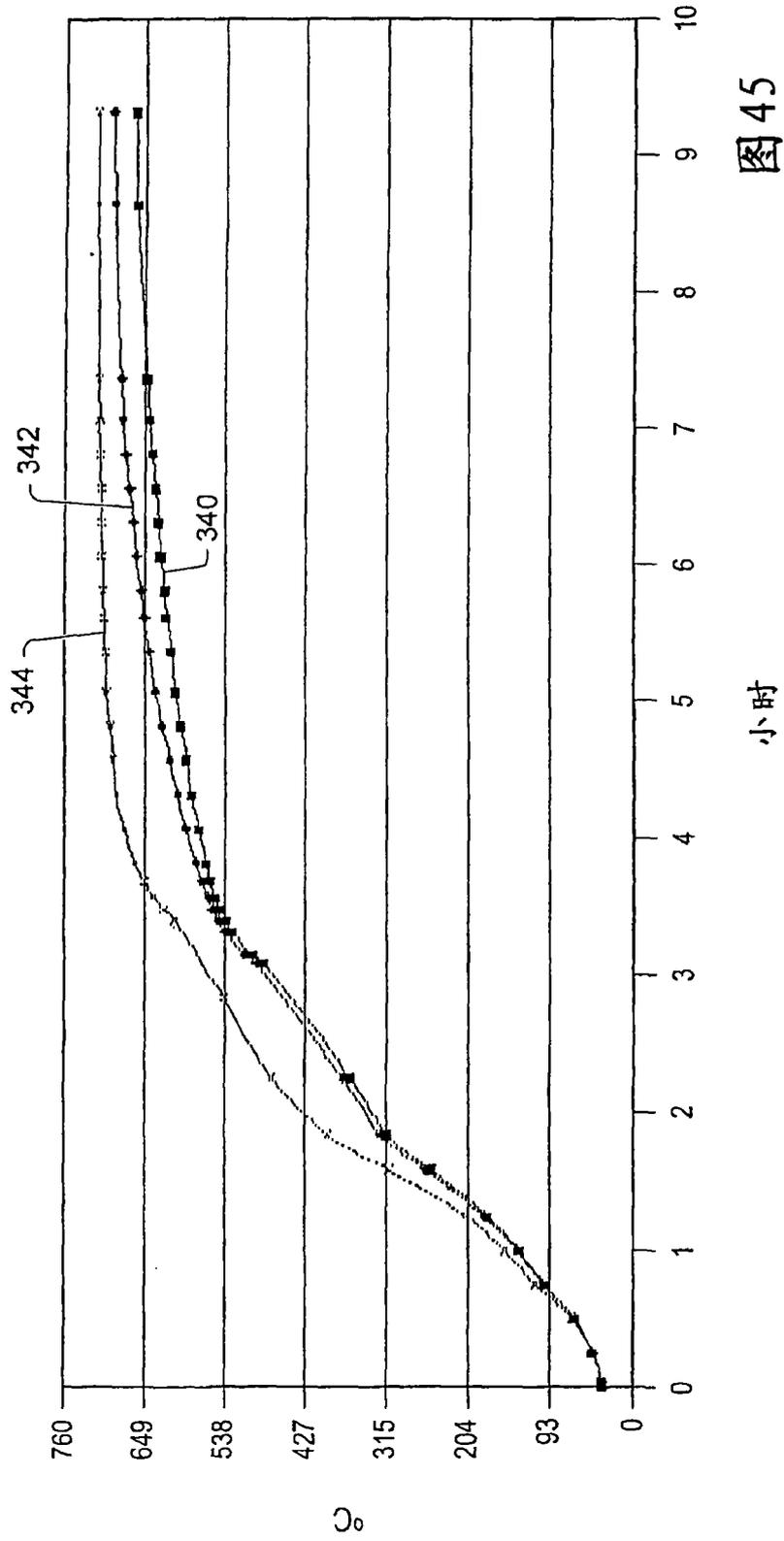


图45

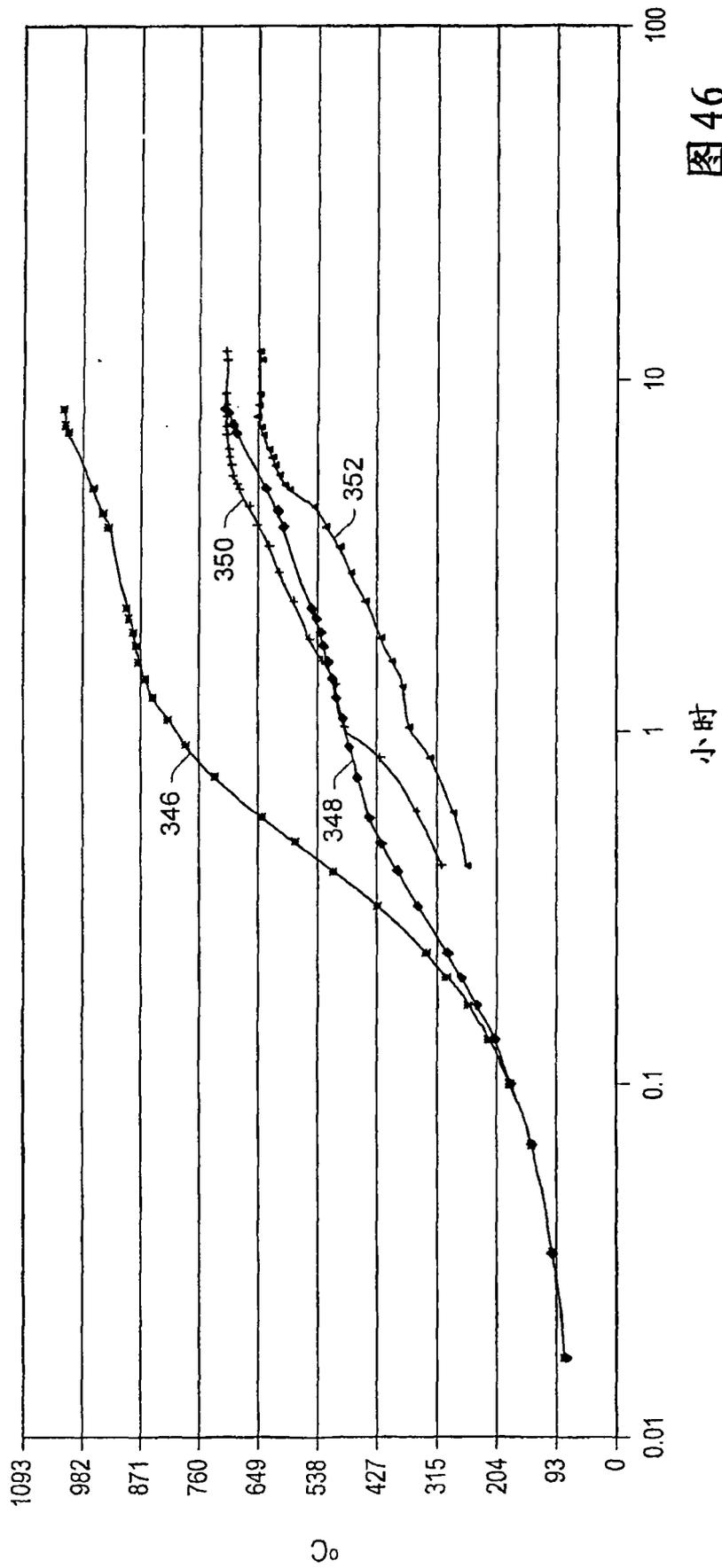


图 46

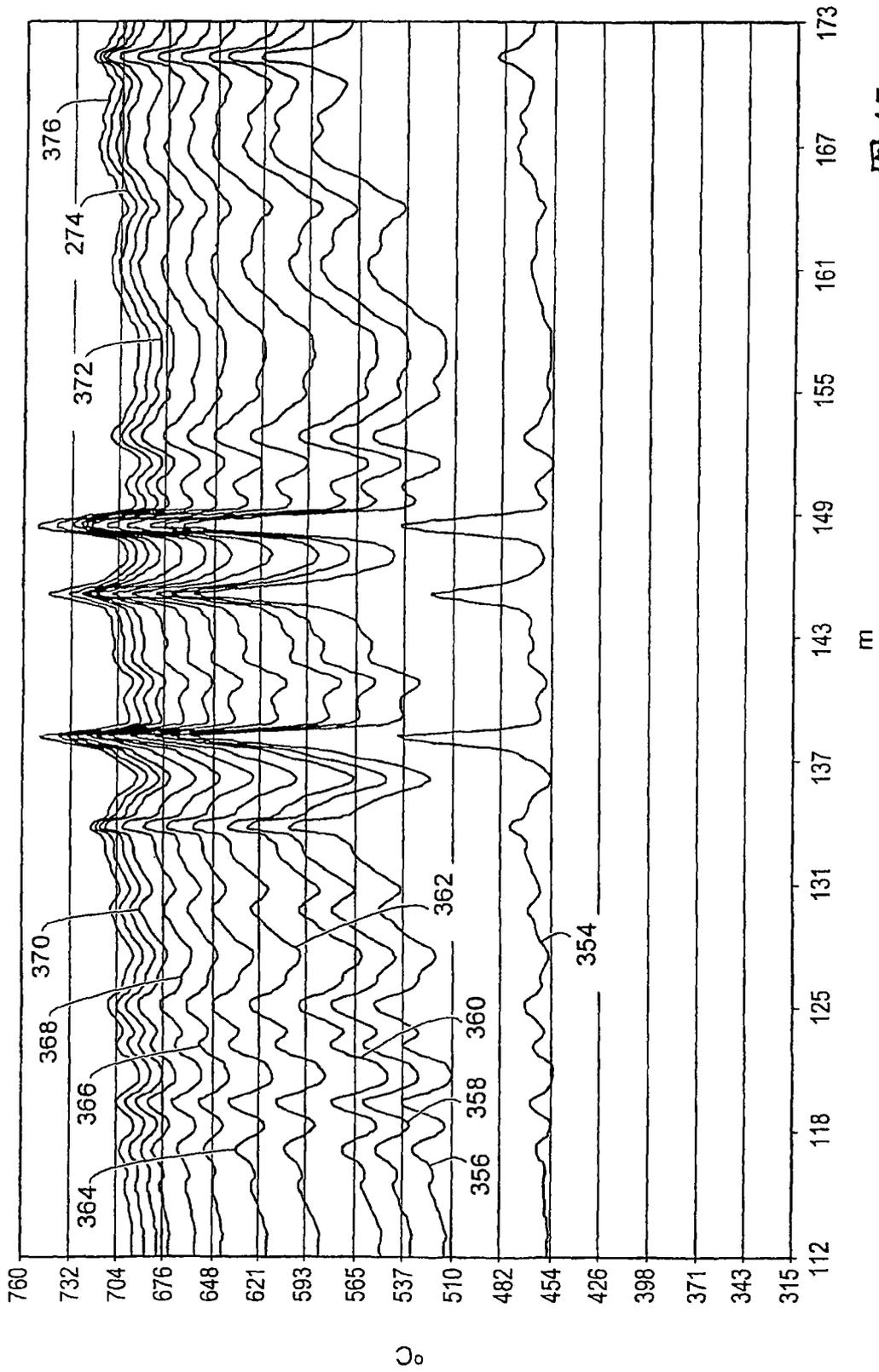


图 47

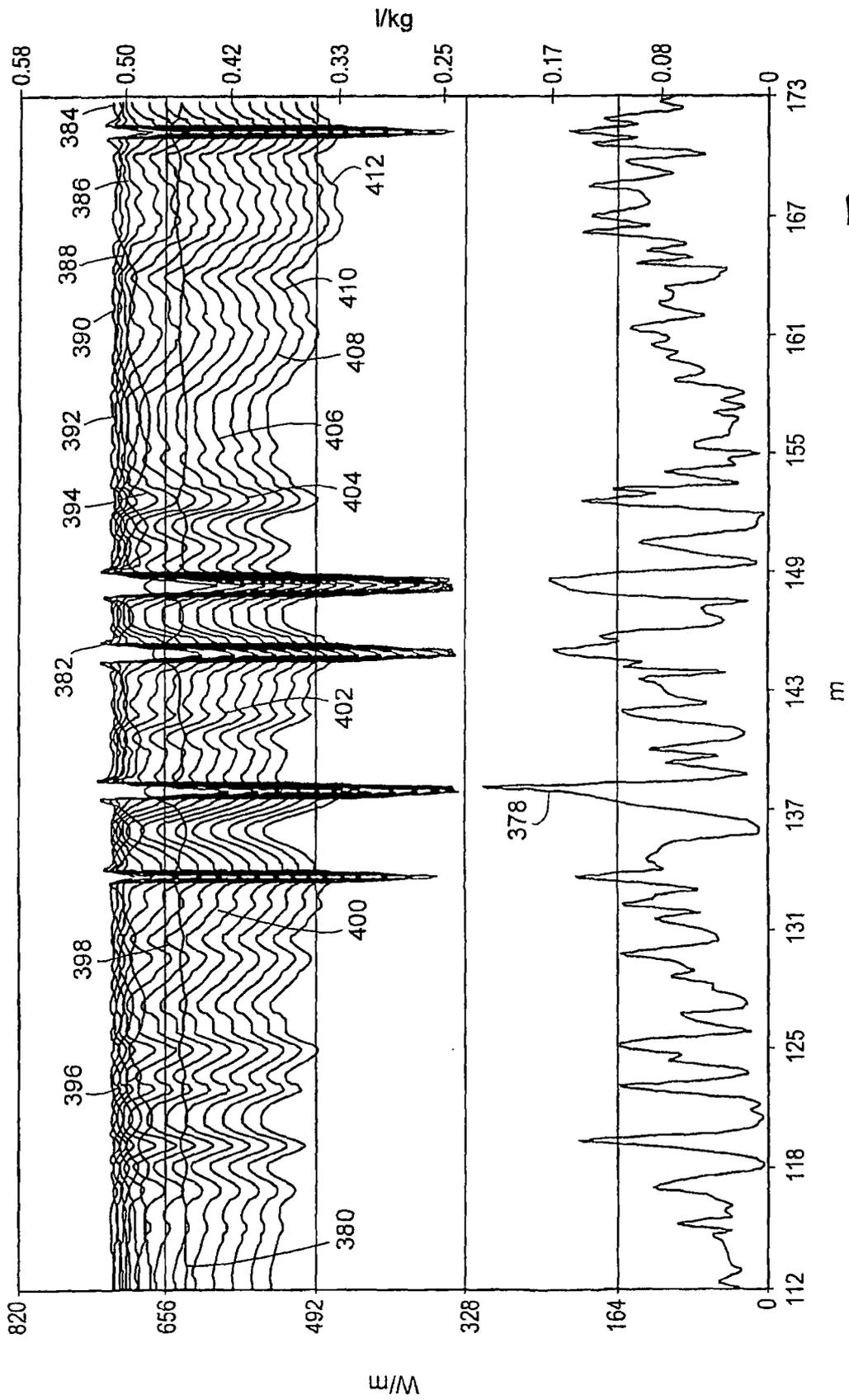


图 48

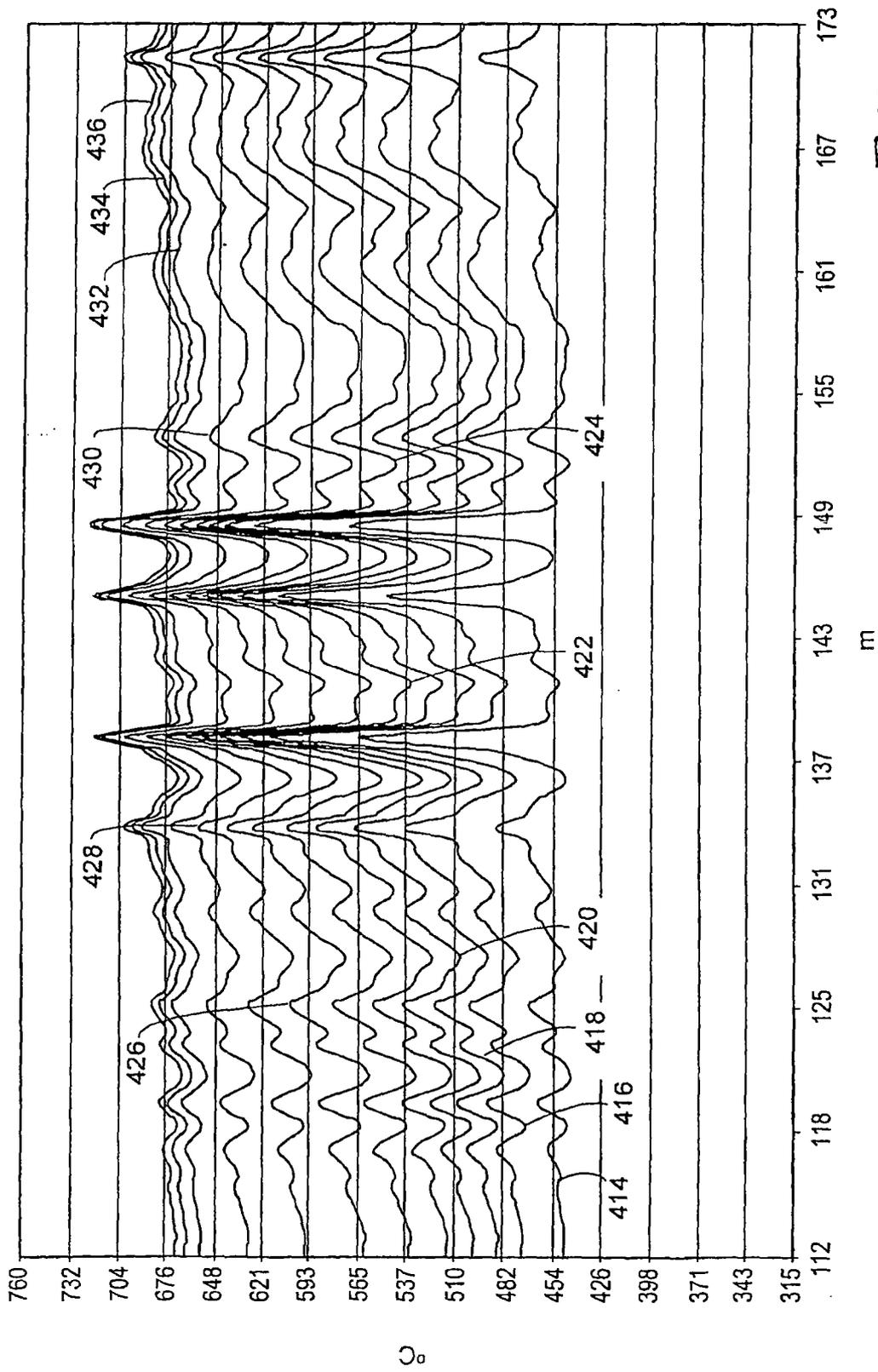


图 49

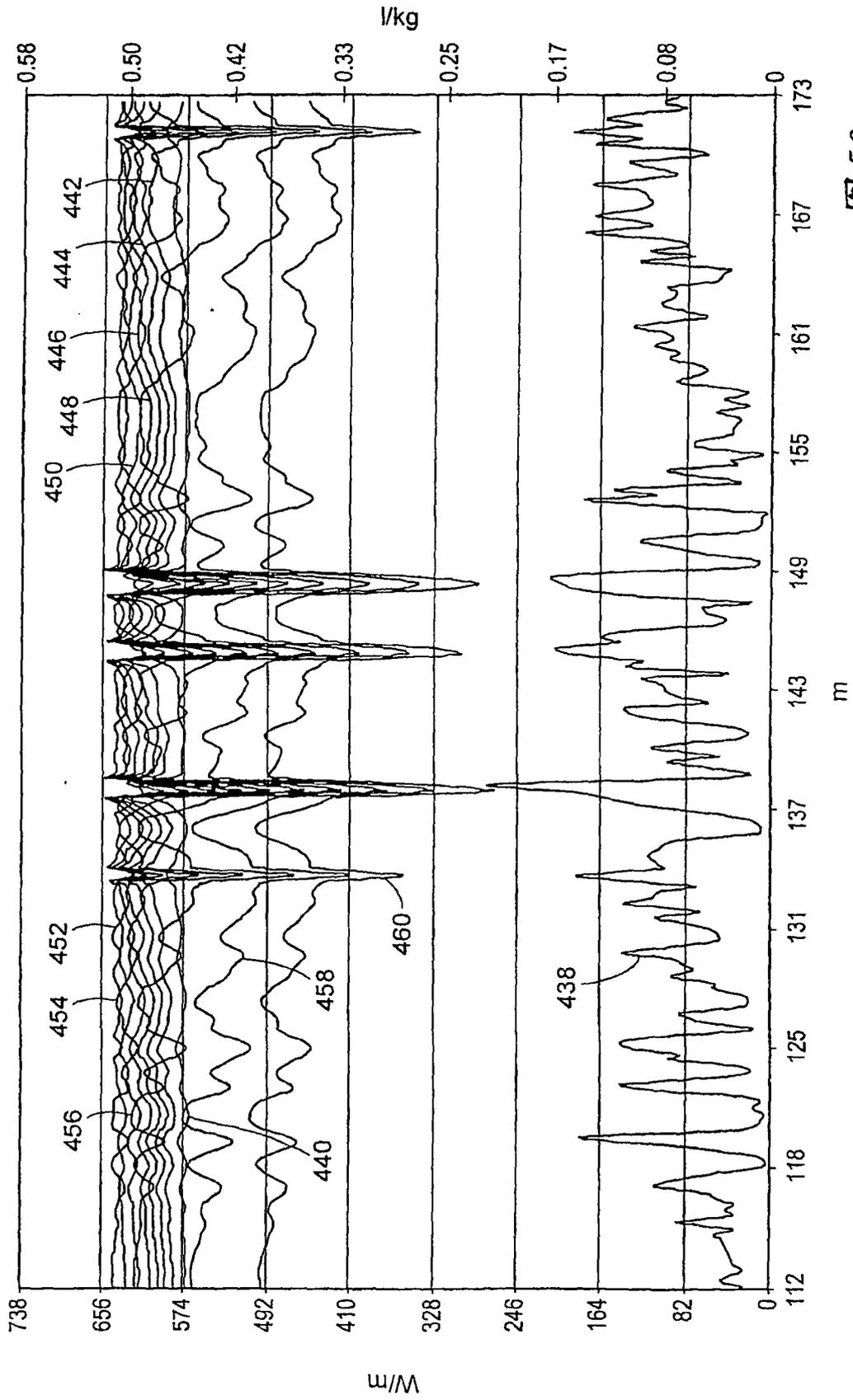


图 50

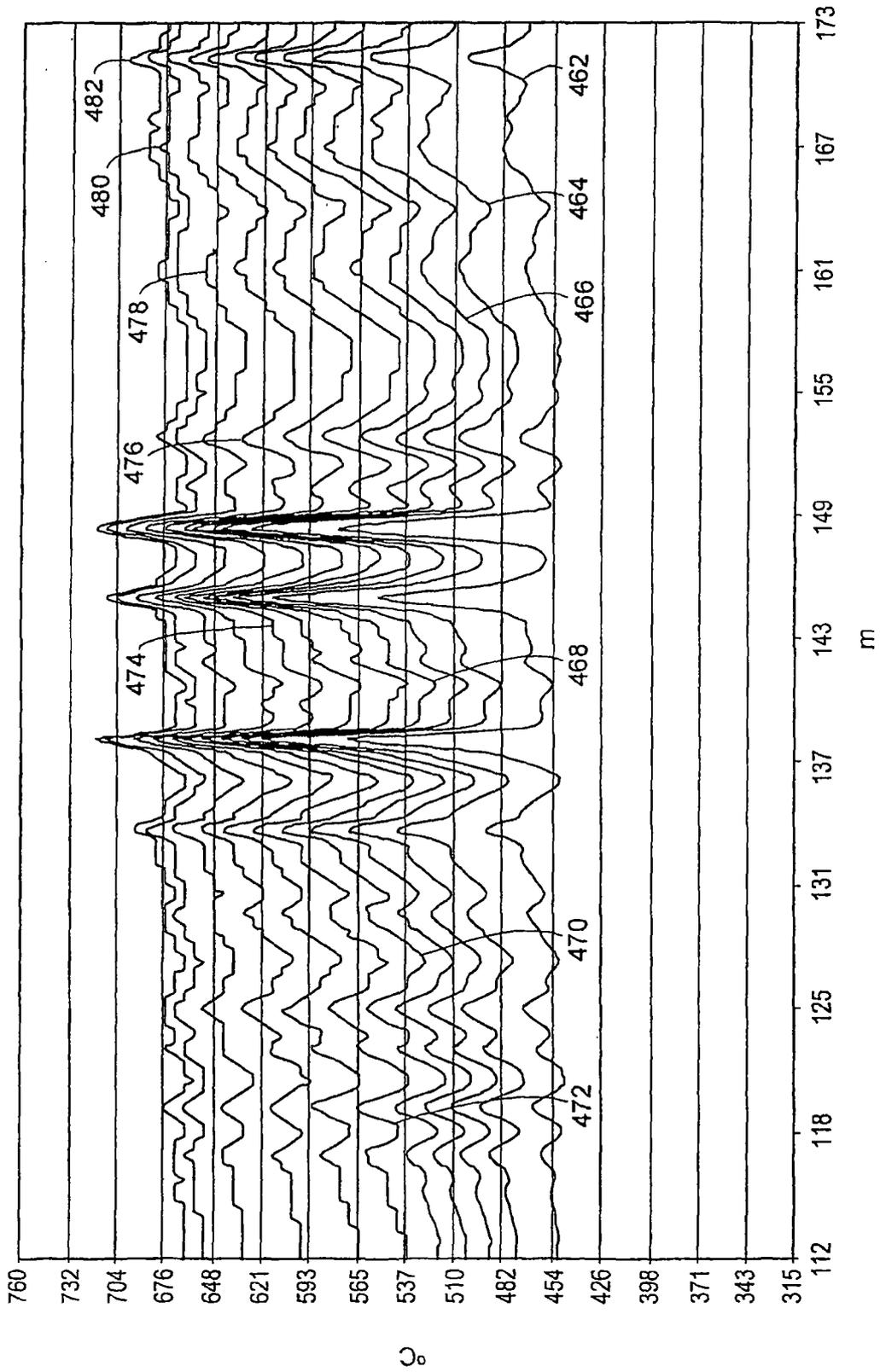


图51

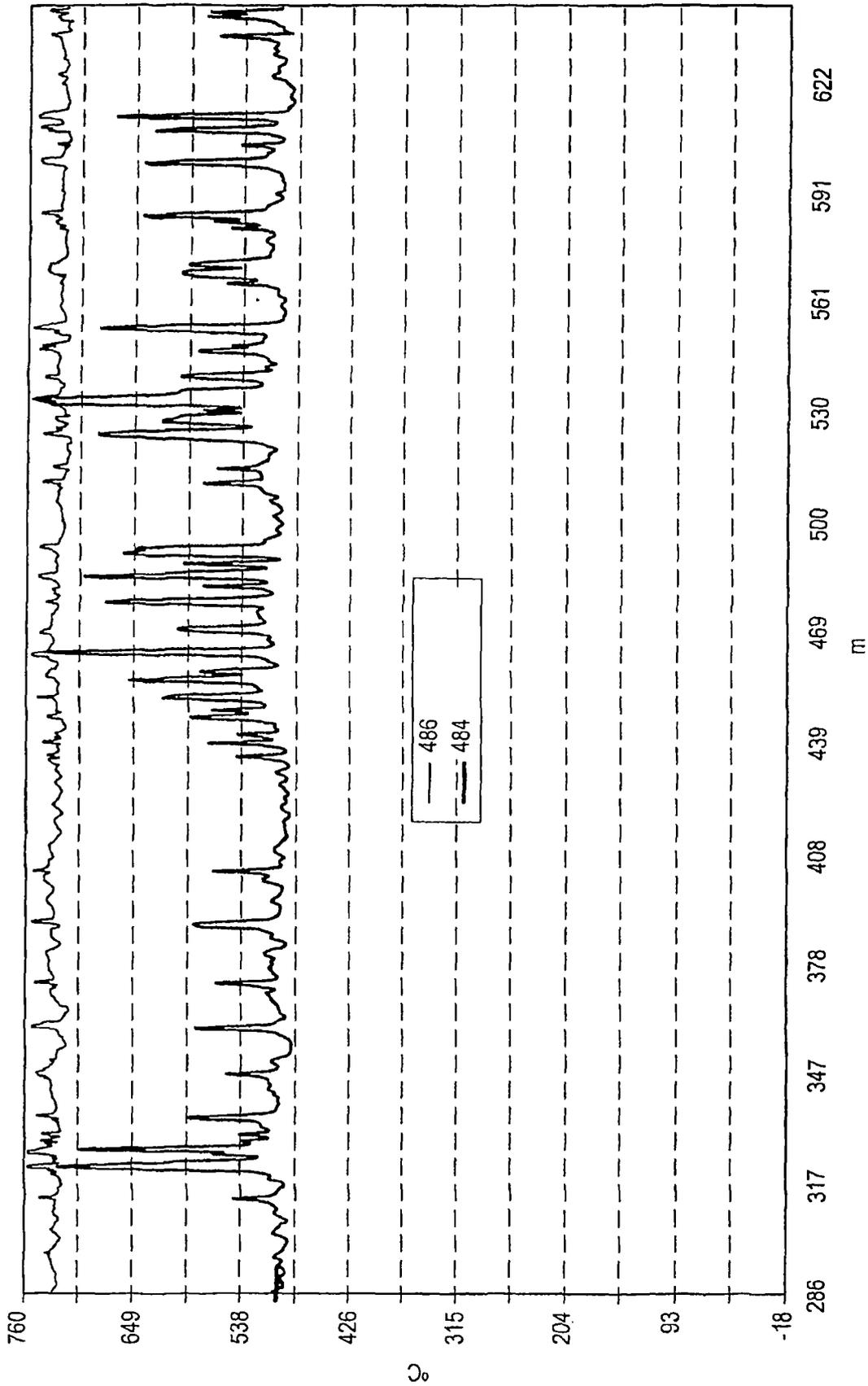


图 52

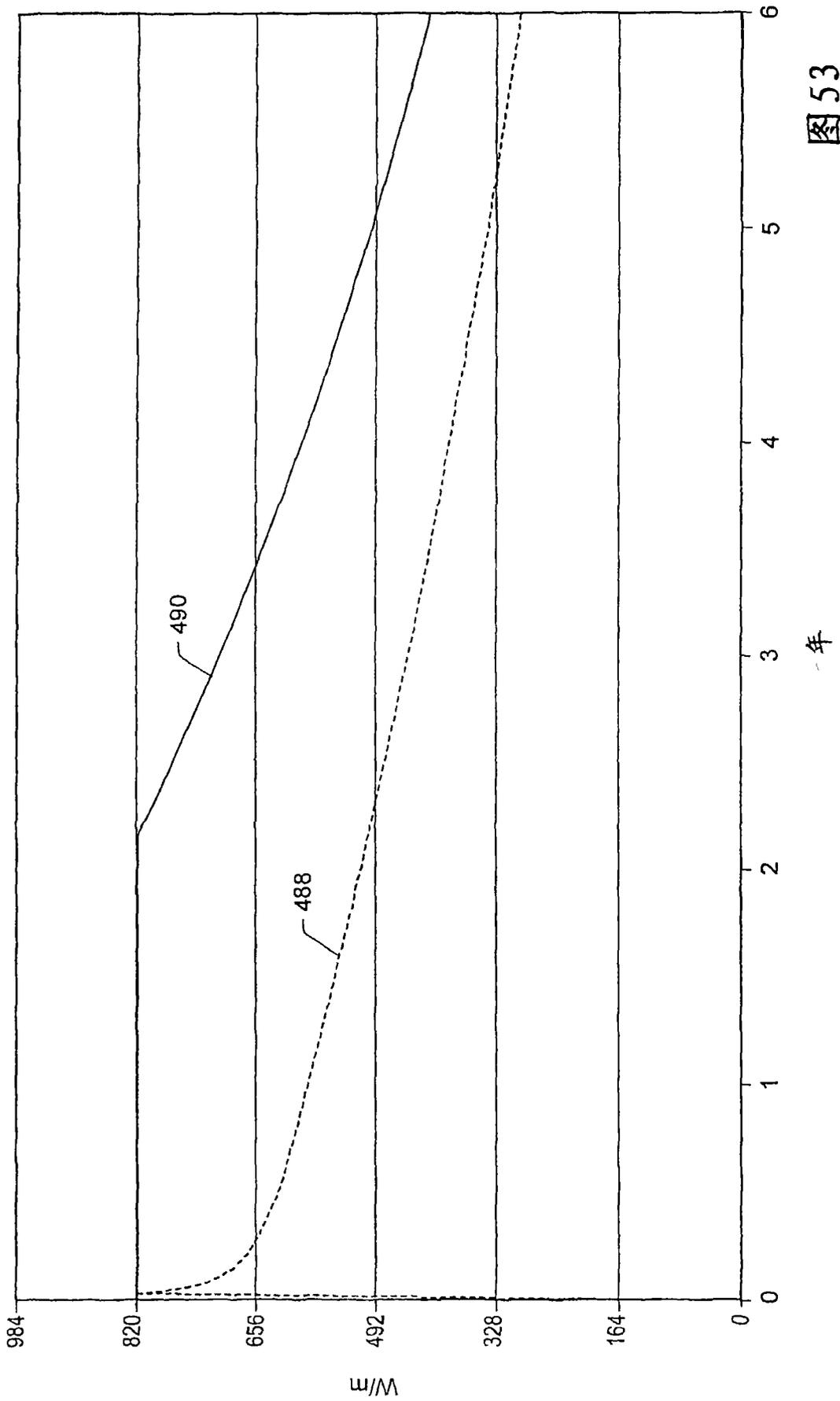


图 53

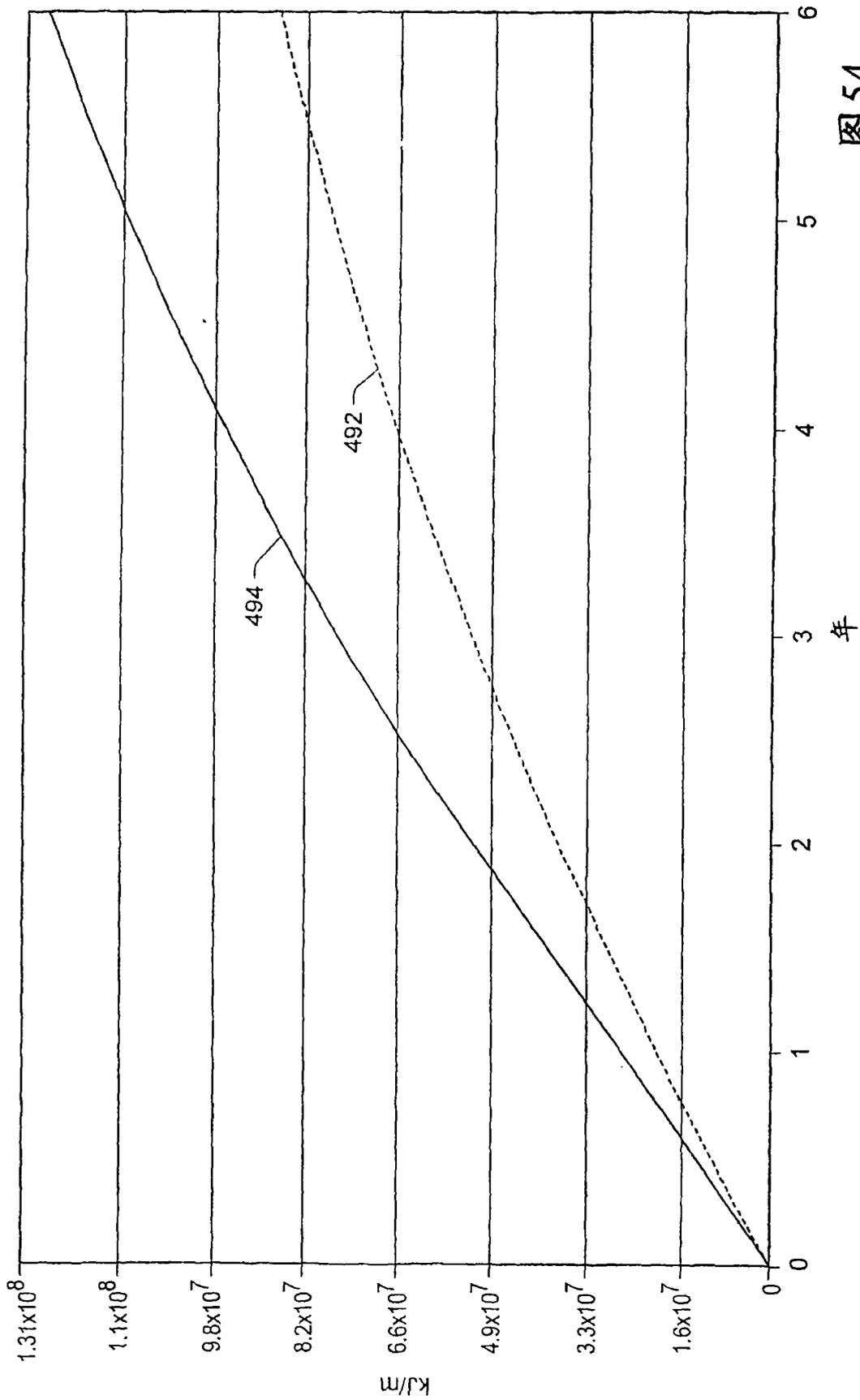


图 54