

[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 200680013322.3

[43] 公开日 2008 年 4 月 16 日

[51] Int. Cl.
E21B 36/00 (2006.01)
E21B 36/04 (2006.01)

[11] 公开号 CN 101163853A

[22] 申请日 2006.4.21

[21] 申请号 200680013322.3

[30] 优先权

[32] 2005.4.22 [33] US [31] 60/674,081

[86] 国际申请 PCT/US2006/015084 2006.4.21

[87] 国际公布 WO2006/116078 英 2006.11.2

[85] 进入国家阶段日期 2007.10.19

[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·L·桑德伯格 H·J·维讷格

[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 范莉

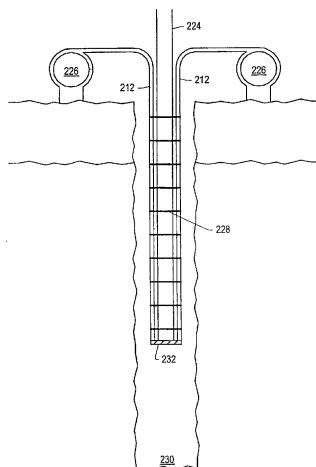
权利要求书 3 页 说明书 28 页 附图 4 页

[54] 发明名称

以三相 Y 字构造结合的用于地下岩层加热的绝缘导体限温加热器

[57] 摘要

描述了一种用于地下岩层的加热系统。该加热系统包括：布置在地下岩层中的开口内的第一加热器(212)、第二加热器(212)和第三加热器(212)。每个加热器包括：电导体(218)、至少部分地包围电导体的绝缘层(220)和至少部分地包围绝缘层的导电护套(222)。电导体在加热器的下端部分电结合至护套。所述下端部分是远离开口表面的加热器部分。第一加热器、第二加热器和第三加热器在加热器的下端部分电结合。第一加热器、第二加热器和第三加热器构造为以三相 Y 字构造电结合。



1. 一种用于地下岩层的加热系统，包括：

布置在地下岩层中的开口内的第一加热器、第二加热器和第三加热器，其中每个加热器包括：

电导体；

至少部分地包围电导体的绝缘层；

至少部分地包围绝缘层的导电护套；

其中电导体在加热器的下端部分电结合至护套，所述下端部分是远离开口表面的加热器部分；

第一加热器、第二加热器和第三加热器在加热器的下端部分电结合；和

第一加热器、第二加热器和第三加热器构造为以三相 Y 字构造电结合。

2. 如权利要求 1 所述的加热系统，其中该系统还包括支撑元件，第一加热器、第二加热器和第三加热器结合至该支撑元件。

3. 如权利要求 1 或 2 中任一所述的加热系统，其中电导体包括：

内层电导体；

至少部分地包围内层电导体并且电结合至内层电导体的铁磁性导体；

电结合至铁磁性导体的外层电导体，该外层电导体至少部分地包围铁磁性导体，并且外层电导体在达到低于选定温度大约 50°C 的温度下提供加热器的大部分电阻性热输出；和

一个或多个至少部分地包围外层电导体的电绝缘体。

4. 如权利要求 3 所述的加热系统，其中铁磁性导体相对于外层电导体定位以使得在低于选定温度或选定温度附近的温度下由在铁磁性导体中流动的电流所产生的电磁场将大部分电流流动限制到外层电导体。

5. 如权利要求 3-4 中任一所述的加热系统，其中加热系统被构造

来提供 (a) 低于选定温度的第一热输出, 和 (b) 大约在选定温度处或之上的第二热输出, 第二热输出与第一热输出相比降低。

6. 如权利要求 5 所述的加热系统, 其中加热系统被构造来自动地提供第二热输出。

7. 如权利要求 5-6 中任一所述的加热系统, 其中第二热输出最多为第一热输出的 90%, 第一热输出在低于选定温度大约 50°C 处。

8. 如权利要求 3-7 中任一所述的加热系统, 其中内层电导体、铁磁性导体和外层电导体电结合以使得在加热器的使用期间加热系统的功率因数仍然高于大约 0.85。

9. 如权利要求 3-8 中任一所述的加热系统, 其中选定温度为铁磁性导体的居里温度。

10. 如权利要求 1-9 中任一所述的加热系统, 其中绝缘层包括至少部分地包围电导体的一个或多个电绝缘体。

11. 如权利要求 1-10 中任一所述的加热系统, 其中加热系统具有至少大约 1.1 的调节比。

12. 一种用于在地下岩层中安装如权利要求 1-11 中任一所述的加热系统的方法, 该方法包括:

在地下岩层中的开口位置处将第一加热器定位在第一线轴上, 第二加热器定位在第二线轴上和第三加热器定位在第三线轴上;

在将加热器安装于地下岩层中的开口内时, 将第一加热器、第二加热器和第三加热器的每一个解绕;

在将加热器安装于地下岩层中的开口内时, 结合每个加热器; 和以三相 Y 字构造电结合加热器。

13. 如权利要求 12 所述的方法, 还包括在将加热器安装于地下岩层中的开口内时, 将每个加热器结合至支撑元件。

14. 如权利要求 12 或 13 中任一所述的方法, 其中所述一个或多个电绝缘体沿着外层电导体的长度定位以使得每个加热器能在不损害电绝缘体的情况下布置在每个线轴上。

15. 如权利要求 13 或 14 中任一所述的方法, 其中三个加热器结

合至支撑元件以使得三个加热器在支撑元件周围大致均匀地间隔开。

16. 一种利用如权利要求 1-11 中任一所述的加热系统进行加热的方法，该方法包括将来自加热器的热提供给一部分地下岩层。

17. 如权利要求 16 所述的方法，其中地下岩层包括烃，该方法还包括允许热传递至岩层以使得至少一些烃在岩层中热解。

18. 如权利要求 16 或 17 所述的方法，还包括从岩层生产流体。

19. 一种包括利用如权利要求 1-11 中任一所述的加热系统或者利用如权利要求 16-18 中任一所述的方法所生产的烃的合成物。

20. 一种由如权利要求 19 所述的合成物所制成的运输燃料。

21. 一种用于地下岩层的加热系统，包括：

布置在地下岩层中的开口内的第一加热器、第二加热器和第三加热器，其中每个加热器包括：

电导体；

绝缘层；

导电护套；

其中电导体在沿着加热器长度的一个位置处电结合至护套；

第一加热器、第二加热器和第三加热器电结合；和

第一加热器、第二加热器和第三加热器构造为以三相 Y 字构造电结合。

以三相 Y 字构造结合的用于
地下岩层加热的绝缘导体限温加热器

技术领域

本发明总体上涉及用于由各种地下岩层（比如含烃的岩层）加热和生产烃、氢和/或其它产品的方法和系统。实施例涉及用来加热地下岩层的绝缘导体限温加热器。

背景技术

由地下岩层获得的烃通常用作能源、原料以及消费产品。对于可用烃源耗尽的考虑以及对于所生产烃的总量降低的考虑已经使得开发了很多工艺来获得可用烃源更有效的回收、处理和/或使用。现场工艺可用来将烃原料从地下岩层中移走。地下岩层中烃原料的化学和/或物理性质可能需要改变以允许烃原料能更易于从地下岩层中移走。化学和物理变化可包括产生岩层中烃原料的可移走流体、成分变化、溶度变化、密度变化、相变化和/或粘度变化的现场反应。流体可以是气体、液体、悬浮液、泥浆和/或流动性质类似于液流的固体颗粒流，但并不限于此。

加热器可置于井筒中以在现场工艺期间加热岩层。利用井下加热器的现场工艺的例子在授予 Ljungstrom 的美国专利 No. 2,634,961、授予 Ljungstrom 的美国专利 No. 2,732,195、授予 Ljungstrom 的美国专利 No. 2,780,450、授予 Ljungstrom 的美国专利 No. 2,789,805、授予 Ljungstrom 的美国专利 No. 2,923,535、授予 Van Meurs 等的美国专利 No. 4,886,118 中示出；所有这些专利通过参考如同在这里完全描述一样地结合于此。

将热施加于油页岩层在授予 Ljungstrom 的美国专利 No. 2,923,535 和授予 Van Meurs 等的美国专利 No. 4,886,118 中描述。热可施加于油页岩层以热解油页岩层中的油母岩。热还可使岩层破裂以

增大岩层的可渗透性。增大的可渗透性能允许岩层流体行进至将流体从油页岩层中移走的生产井。在 Ljungstrom 所公开的一些工艺中，例如，将含氧的气态介质引入可渗透的岩层，优选地同时仍然有来自预热步骤的热，以启动燃烧。

热源可用来加热地下岩层。电加热器可用来通过辐射和/或传导来加热地下岩层。电加热器可电阻地加热一个元件。授予 Germain 的美国专利 No. 2,548,360 描述了一种置于井筒内的粘性油中的电加热元件，该专利通过参考如同在这里完全描述一样地结合于此。加热器元件加热石油并使其变稀以允许油从井筒中泵送。授予 Eastlund 等的美国专利 No. 4,716,960 描述了通过让相对低电压的电流穿过管道来电加热油井的管道以防止形成固体，该专利通过参考如同在这里完全描述一样地结合于此。授予 Van Egmond 的美国专利 No. 5,065,818 描述了一种粘结到井筒中并且没有套筒包围的电加热元件，该专利通过参考如同在这里完全描述一样地结合于此。

一些加热器可能难以结合在地下岩层中。地下岩层中的井下加热器之间的电流可能会由于难以形成地下连接以及地下状况中电流的不稳定性而不可靠。因而，有利的是具有一种加热器，其没有位于地下的加热器之间的电流。

发明内容

这里所述实施例总体上涉及用于处理地下岩层的系统、方法和加热器。这里所述实施例总体上还涉及其中具有新颖部件的加热器。这种加热器能通过使用这里所述的系统和方法获得。

在某些实施例中，本发明提供了一种或多种系统、方法和/或加热器。在一些实施例中，这些系统、方法和/或加热器用于处理地下岩层。

在某些实施例中，一种用于地下岩层的加热系统，其包括：布置在地下岩层中的开口内的第一加热器、第二加热器和第三加热器，其中每个加热器包括：电导体；至少部分地包围电导体的绝缘层；至少部分地包围绝缘层的导电护套；其中电导体在加热器的下端部分电结合至护套，所述下端部分是加热器远离开口表面的加热器部分；第一

加热器、第二加热器和第三加热器在加热器的下端部分电结合；和第一加热器、第二加热器和第三加热器构造为以三相 Y 字构造电结合。

在进一步的实施例中，来自特定实施例的特点可与来自其它实施例的特点相组合。例如，来自一个实施例的特点可与来自任何其它实施例的特点相组合。

在进一步的实施例中，利用这里所述的任何方法、系统或加热器来执行地下岩层的处理。

在进一步的实施例中，额外的特点可增加至这里所述的特定实施例。

附图说明

在受益于下面详细描述之下并参考附图，本发明的优点对于本领域的熟练人员将变得明显，在附图中：

图 1 示出了加热含烃岩层的阶段。

图 2 示出了用于处理含烃岩层的现场转变系统的一部分的实施例的示意图。

图 3A 和 3B 示出了用于绝缘导体加热器中的限温加热器部件的实施例的横截视图。

图 4A 和 4B 示出了用于在井筒中安装加热器的实施例。

图 4C 示出了护套短接至导体的绝缘导体的实施例。

图 5A 和 5B 示出了管道中具有三个导体的加热器的实施例。

虽然本发明可易于进行各种修改和可选形式，其特定实施例借助于附图中的例子示出并且这里将详细描述。附图可能不是按比例的。然而应当理解到，其附图和详细描述并不将本发明限制于所公开的具体形式，而是相反，本发明应覆盖落入本发明如所附权利要求所限定的精神和范围内的所有修改、等同和替换。

具体实施方式

下面的描述总体上涉及用于处理岩层中烃的系统和方法。这种岩层可被处理以生产烃产品、氢和其它产品。

“烃”通常定义为主要由碳和氢原子构成的分子。烃也可包括其它

元素，比如但不限于卤素、金属元素、氮、氧和/或硫。烃可以是油母质、沥青、焦沥青、石油、自然矿物蜡和沥青岩，但不限于此。烃可以位于地球中矿物基体中或其附近。基体可包括但不限于：沉积岩、砂子、沉积石英岩、碳酸盐、硅藻土和其它多孔介质。“烃流体”是包括烃的流体。烃流体可包括、携带或携带在非烃流体中，比如氢、氮、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、水和氨。

“岩层”包括一个或多个含烃的层、一个或多个无烃的层、盖层和/或下伏岩层。“盖层”和/或“下伏岩层”包括一个或多个不同类型的不可渗透材料。例如，盖层和/或下伏岩层可包括岩石、页岩、泥岩或湿/紧密的碳酸盐。在现场转变工艺的一些实施例中，盖层和/或下伏岩层可包括相对不可渗透且在现场转变工艺期间不会经受温度的含烃层，这种温度会导致盖层和/或下伏岩层的含烃层明显的性质变化。例如，下伏岩层可包含页岩或泥岩，但是下伏岩层在现场转变工艺期间不能加热至热解温度。在一些情况下，盖层和/或下伏岩层能稍微可渗透。

“热源”是用于基本上通过传导和/或辐射热传递将热提供给至少一部分岩层的任何系统。例如，一种热源可包括置于管道中的电加热器，比如绝缘导体、细长元件和/或导体。一种热源也可包括通过在岩层外面或其中燃烧燃料来产生热的系统。该系统可以是地面燃烧器、井下气体燃烧器、无焰分布燃烧器、和自然分布燃烧器。在一些实施例中，提供给一个或多个热源或在所述热源中产生的热可由其它能源所供应。其它能源可直接加热岩层，或者能量可供应至直接或间接加热岩层的传递介质。要理解到，将热施加于岩层的一个或多个热源可使用不同的能源。因而，例如，对于给定的岩层，一些热源可供应来自电阻加热器的热，一些热源可提供来自燃烧的热，并且一些热源可提供来自一个或多个其它能源（例如化学反应、太阳能、风能、生物量或其它再生能源）的热。化学反应可包括放热反应（例如，氧化反应）。热源也可包括将热提供给加热位置附近和/或包围该加热位置（比如加热器套管）的区域的加热器。

“加热器”是用于在井中或井筒附近区域产生热的任何系统或热

源。加热器可以是电加热器、燃烧器、用岩层中的材料或由岩层所生产的材料发生反应的燃烧器、和/或其组合。

“现场转变工艺”指的是由热源加热含烃岩层以将至少一部分岩层的温度升高至高于热解温度以使得在岩层中产生热解流体的工艺。

“绝缘导体”指的是能传导电能并且整体上或部分地由电绝缘材料覆盖的任何细长材料。

细长元件可以是裸露的金属加热器或者暴露的金属加热器。“裸露的金属”和“暴露的金属”指的是不包括电绝缘层（比如矿物绝缘，其设计来在细长元件的操作温度范围内给金属提供电绝缘）的金属。裸露的金属和暴露的金属可涵盖包括腐蚀抑制剂的金属，比如自然出现的氧化层、施加的氧化层和/或膜。裸露的金属和暴露的金属包括具有聚合物或在细长元件的典型操作温度下不能保持电绝缘性质的其它类型电绝缘的金属。这种材料可布置在金属上并且在加热器的使用期间会热降解。

“限温加热器”通常指的是在不使用外部控制器（比如温度控制器、电能调节器、整流器或其它设备）之下调节高于特定温度的热输出（例如降低热输出）的加热器。限温加热器可以是 AC（交流）或调制（例如“削波”）DC（直流）驱动的电阻加热器。

“居里温度”是一个高于该温度铁磁性材料就失去其所有铁磁性质的温度。除了在高于居里温度时失去其所有铁磁性质之外，铁磁材料在增大的电流穿过铁磁性材料时就开始失去其铁磁性质。

“时间变化电流”指的是在铁磁性导体中产生集肤效应电流并且幅度随时间变化的电流。时间变化电流包括交流（AC）和调制直流（DC）。

“交流（AC）”指的是基本上正弦地倒转方向的时间变化电流。AC 在铁磁性导体中产生集肤效应电流。

“调制直流（DC）”指的是在铁磁性导体中产生集肤效应电流的任何基本上非正弦的时间变化电流。

限温加热器的“调节比”是对于给定电流而言居里温度之下最高的 AC 或调制 DC 电阻与居里温度之上最低电阻之间的比值。

就减少热输出的加热系统、装置和方法而言，术语“自动”意味着在不使用外部控制器（例如，外部控制器，比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）之下以某种方式起作用的这种系统、装置和方法。

术语“井筒”指的是通过钻孔或将管道插入岩层而在岩层中形成的孔。井筒可具有大致圆形横截面，或者另一横截面形状。如同这里使用的，词语“井”和“开口”在涉及岩层中的开口时可与词语“井筒”互换地使用。

岩层中的烃能以各种方式处理以生产很多不同的产品。在某些实施例中，岩层中的烃分阶段地进行处理。图 1 示出了加热含烃岩层的阶段。图 1 还示出了来自岩层的岩层流体以每吨油当量的生产率（“Y”，单位为桶）（y 轴）与加热岩层的温度（“T”，单位为摄氏度）（x 轴）的例子。

甲烷的解吸和水的蒸发在第一阶段加热期间发生。通过第一阶段加热岩层可以尽可能快地执行。例如，当含烃岩层被初始加热时，岩层中的烃解吸出吸收的甲烷。解吸的甲烷可从岩层中产生。如果含烃岩层进一步被加热，含烃岩层中的水蒸发。在一些含烃岩层中，水可能会占用岩层 10% 至 50% 的孔隙量。在其它岩层中，水占用更大或更小的孔隙量。水通常在 160°C 至 285°C 之间、600kPa 至 7000kPa 的绝对压力下从岩层中蒸发。在一些实施例中，蒸发的水产生岩层中的可湿性变化和/或增大的岩层压力。可湿性变化和/或增大的压力会影响岩层中的热解反应或其它反应。在某些实施例中，蒸发的水从岩层产生。在其它实施例中，蒸发的水用于岩层中或岩层外的抽汽和/或蒸馏。将水从岩层中移走和增大岩层中的孔隙量可增大孔隙量中烃的存储空间。

在某些实施例中，在第一阶段加热之后，岩层被进一步加热，以使得岩层中的温度（至少）达到开始热解温度（比如处于如第二阶段所示温度范围的下端）。岩层中的烃可在第二阶段中热解。热解温度范围根据岩层中烃的类型而变化。热解温度范围可包括 250°C 至 900°C

之间的温度。用于生产期望产品的热解温度范围可延伸过总热解温度范围的仅仅一部分。在一些实施例中，用于生产期望产品的热解温度范围包括 250°C 至 400°C 之间的温度或者 270°C 至 350°C 之间的温度。如果岩层中烃的温度缓慢地升高过从 250°C 至 400°C 的温度范围，热解产品的生产在温度接近 400°C 时基本上完成。烃的平均温度能以小于 5°C/天、小于 2°C/天、小于 1°C/天或者小于 0.5°C/天的速率升高过用以生产期望产品的热解温度范围。用多个热源加热含烃的岩层可在热源周围形成热梯度，这将岩层中烃的温度缓慢地升高过热解温度范围。

对于期望的产品而言将温度升高过热解温度范围的速率可能会影响由含烃岩层产生的岩层流体的质量和数量。对于期望的产品而言将温度缓慢地升高过热解温度范围可能会抑制岩层中长链分子的移动。对于期望的产品而言将温度缓慢地升高过热解温度范围可能会限制产生不希望产品的流动烃之间的反应。对于期望的产品而言将岩层温度缓慢地升高过热解温度范围可能会允许由岩层生产高质量、高 API 重度的烃。对于期望的产品将岩层温度缓慢地升高过热解温度范围可能会允许将岩层中出现的大量烃作为烃产品移走。

在一些现场转变的实施例中，代替缓慢地将温度加热过一个温度范围，一部分岩层被加热至期望的温度。在一些实施例中，期望温度是 300°C、325°C 或 350°C。其它温度也可选择为期望温度。来自热源的热的叠加允许在岩层中相对快速且有效地形成期望温度。可调节从热源至岩层的能量输入以维持岩层中的温度基本上处于期望温度。岩层的被加热部分基本上维持在期望温度直到热解下降以致于由岩层生产期望岩层流体变得不经济。受到热解的岩层部分可包括被仅从一个热源传递的热带入热解温度范围的区域。

在某些实施例中，包括热解流体的岩层流体从岩层生产。随着岩层的温度增大，产生的岩层流体中可凝结烃的量可降低。在高温下，岩层大多产生甲烷和/或氢。如果含烃岩层被加热过整个热解范围，岩层可仅产生朝向热解范围上限的少量氢。在所有可用氢耗尽之后，通常将发生岩层最少量的流体生产。

在烃热解之后，大量碳和一些氢可能仍然在岩层中。残留在岩层中的大量碳能由岩层以合成气的形式产生。合成气产生可在图 1 所示第三阶段加热期间发生。第三阶段可包括将含烃岩层加热至足以允许合成气产生的温度。例如，合成气可在从大约 400°C 至大约 1200°C、大约 500°C 至大约 1100°C 或者大约 550°C 至大约 1000°C 的温度范围内产生。岩层被加热部分在合成气产生流体被引入岩层时的温度决定了岩层中产生的合成气的组分。产生的合成气可通过生产井从岩层中移走。

从含烃岩层生产的流体的总内能可在热解和合成气生产过程中保持相对恒定。在相对低岩层温度下热解期间，所产生流体的相当部分可能是具有高内能的可凝结烃。然而，在较高的热解温度下，较少的岩层流体可能包括可凝结烃。更多不可凝结的岩层流体可以从岩层中生产。所产生流体的每单位体积内能在支配性的不可凝结岩层流体产生期间可能会稍微降低。在合成气产生期间，所产生合成气的每单位体积内能与热解流体的内能相比显著降低。然而，所产生合成气的体积在很多情况下将显著增大，从而补偿降低的内能。

图 2 示出了用于处理含烃岩层的现场转变系统的一部分的一个实施例的示意图。现场转变系统可包括阻挡层井（barrier well）200。阻挡层井 200 用来在处理区域周围形成阻挡层。阻挡层防止流体流入和/或流出处理区域。阻挡层井包括但不限于去水井、负压井、捕获井、喷射井、灰浆井、冻结井、或其组合。在图 2 所示的实施例中，阻挡层井 200 示出为仅沿着热源 202 的一侧延伸，但是阻挡层井通常围绕所有用来或将要用来加热岩层处理区域的热源 202。

热源 202 布置在至少一部分岩层中。热源 202 可包括加热器，比如绝缘导体、管道中导体式加热器、地面燃烧器、无焰分布燃烧器、和/或自然分布燃烧器。热源 202 还可包括其它类型的加热器。热源 202 将热提供给至少一部分岩层以加热岩层中的烃。能量可通过供应管线 204 供应至热源 202。供应管线 204 可根据用来加热岩层的热源的类型而在结构上不同。用于热源的供应管线 204 可为电加热器传递电能、

可为燃烧器输送燃料、或者可输送在岩层中循环的热交换流体。

生产井 206 用来将岩层流体从岩层中移走。在一些实施例中，生产井 206 可包括一个或多个热源。生产井中的热源可加热生产井处或生产井附近岩层的一个或多个部分。生产井中的热源可抑制从岩层中移走的岩层流体的凝结和回流。

由生产井 206 生产的岩层流体可通过收集管道 208 输送至处理设施 210。岩层流体还可由热源 202 生产。例如，流体可由热源 202 生产以控制热源附近岩层中的压力。由热源 202 生产的流体可通过管道或管线输送至收集管道 208 或者所生产的流体可通过管道或管线直接输送至处理设施 210。处理设施 210 可包括分离单元、反应单元、浓缩单元、燃料电池、涡轮机、存储容器和/或用于对所产生的岩层流体进行处理的其它系统和单元。

限温加热器可以由在某些温度下为加热器提供自动温度限制性质的材料构造和/或包括所述材料。在某些实施例中，铁磁性材料用于限温加热器中。当时间变化电流施加至铁磁性材料时，铁磁性材料可在材料的居里温度处或附近自限制温度，以提供居里温度处或附近的减少量的热。在某些实施例中，铁磁性材料可在接近居里温度的选定温度处自限制限温加热器的温度。在某些实施例中，选定温度处于居里温度的大约 35°C 内、大约 25°C 内、大约 20°C 内或者大约 10°C 内。在某些实施例中，铁磁性材料与其它材料（例如，高传导性材料、高强度材料、耐腐蚀材料、或其组合）相结合以提供不同的电气和/或机械性质。限温加热器的一些部分可具有比限温加热器的其它部分要低的电阻（由于不同几何形状和/或由于使用不同铁磁性和/或非铁磁性材料所导致）。使限温加热器的各部分具有不同材料和/或尺寸允许由加热器的每个部分设计期望的热输出。

限温加热器比其它加热器更加可靠。限温加热器不易于由于岩层中的热点而破坏或出故障。在一些实施例中，限温加热器允许岩层基本上一致地加热。在一些实施例中，限温加热器能通过沿着加热器的全部长度以较高的平均热输出操作而更有效地加热岩层。限温加热器

沿着加热器的全部长度以较高的平均热输出操作，因为如果沿着加热器任何点的温度超过或者将要超过加热器的最大操作温度的话加热器的动力无需如同典型的恒定瓦特加热器那样降低至整个加热器。在没有施加至加热器的时间变化电流的受控调节的情况下，从限温加热器的接近加热器居里温度的部分输出的热自动地降低。热输出由于限温加热器的部分的电性质（例如电阻）方面的变化而自动地降低。因而，在更大部分的加热工艺期间，限温加热器供应更多的动力。

在某些实施例中，包括限温加热器的系统最初提供第一热输出并且然后当限温加热器被时间变化的电流所激励时在加热器的电阻部分的居里温度附近、居里温度处或居里温度之上提供降低的热输出（第二热输出）。第一热输出是在以下温度时的热输出，即低于该温度限温加热器开始自限制。在一些实施例中，第一热输出是温度为限温加热器中铁磁性材料的居里温度之下 50°C、75°C、100°C 或 125°C 处的热输出。

限温加热器可由在井口处供应的时间变化电流（交流或调制直流）所激励。井口可包括动力源和用于将动力供应至限温加热器的其它部件（例如调制部件、变压器和/或电容器）。限温加热器可以是用来加热一部分岩层的很多加热器之一。

在某些实施例中，限温加热器包括在有时间变化的电流施加于其上时用作集肤效应或邻近效应加热器的导体。集肤效应限制了电流穿透入导体内部的深度。对于铁磁性材料，集肤效应由导体的导磁率支配。铁磁性材料的相对导磁率通常介于 10 和 1000 之间（例如，铁磁性材料的相对导磁率通常至少为 10 并且可以至少为 50、100、500、1000 或更大）。当铁磁性材料的温度升高至高于居里温度和/或当所施加的电流增大时，铁磁性材料的导磁率显著降低并且透入深度迅速扩展（例如，透入深度扩展为导磁率的平方根倒数）。导磁率的降低导致居里温度处、附近或之上和/或在施加的电流增大时导体的 AC 或调制 DC 电阻降低。当限温加热器被基本上恒定的电源所激励时，接近、达到或高于居里温度的加热器部分可具有降低的热消散。限温加热器

不处于居里温度或其附近的部分可由允许加热器的热消散由于较高的电阻负载而很高的集肤效应加热所支配。

使用限温加热器来加热岩层中的烃的优点在于，导体被选择为具有处于期望操作温度范围内的居里温度。期望操作温度范围内的操作允许显著的热喷射入岩层同时维持限温加热器和其它设备的温度低于设计限制温度。设计限制温度是比如腐蚀、蠕变和/或变形之类的性质受到不利影响的温度。限温加热器的温度限制性质防止了加热器在岩层的低导热率“热点”附近的过热或烧毁。在一些实施例中，限温加热器能降低或控制热输出和/或经受得住温度高于 25°C、37°C、100°C、250°C、500°C、700°C、800°C、900°C、或高达 1131°C 处的热，这取决于加热器中使用的材料。

与恒定瓦特的加热器相比，限温加热器允许更多的热喷射入岩层，原因是输入限温加热器的能量无需受限以适应于加热器附近的低导热率区域。例如，在格林河油页岩中，最低富油页岩层和最高富油页岩层的导热率存在着因数至少为 3 的差别。在加热这种岩层时，与受限于低导热率层的温度的常规加热器相比，限温加热器明显将更多的热输送至岩层。沿着常规加热器全部长度的热输出需要适应于低导热率层以使得加热器不会在低导热率层处过热并烧毁。对于限温加热器，处于高温的低导热率层附近的热输出将降低；但是限温加热器不处于高温的其余部分将仍然提供高的热输出。因为用于加热烃岩层的加热器通常具有很长的长度（例如至少 10m、100m、300m、至少 500m、1km 或高达大约 10km），限温加热器的长度的主要部分可在低于居里温度之下操作同时仅几个部分处于限温加热器的居里温度处或附近。

使用限温加热器使得热有效地输送至岩层。热的有效输送使得将岩层加热至期望温度所需的时间减少。对于相同的加热器间隔，限温加热器可允许更大的平均热输出同时维持加热器设备的温度低于设备的设计限制温度。与恒定瓦特加热器的较低平均热输出相比，岩层中的热解在由限温加热器所提供的较大平均热输出之下可在较早的时间

发生。限温加热器抵消由于加热器井太靠近的不准确井间隔或钻孔所引起的热点。在某些实施例中，限温加热器允许对于间隔太远的加热器井而言一段时间之后增大的动力输出，或者对于间隔太近的加热器井而言受限的动力输出。限温加热器还在靠近盖层和下伏岩层的区域中供应更大的动力以补偿这些区域的温度损失。

限温加热器有利地可用于很多类型的岩层中。例如，在沥青砂岩层或相对可渗透的含重质烃的岩层中，限温加热器可用来提供可控的低温输出以降低流体的粘度、移动流体、和/或改进流体在井筒处或附近或者在岩层中的径向流动。限温加热器可用来抑制由于岩层的靠近井筒区域的过热而导致过度的生焦形成。

在一些实施例中，限温加热器的使用避免或降低了对于昂贵温度控制电路的需要。例如，限温加热器的使用避免或降低了执行温度记录的需要和/或在加热器上使用固定热电偶来监控热点处潜在过热的需要。

在一些实施例中，限温加热器就制造而言比标准加热器更加经济。典型的铁磁性材料包括铁、碳钢、或铁素体不锈钢。这些材料与通常用于绝缘导体（矿物绝缘电缆）加热器中的镍基合金电热丝（比如镍铬合金、KanthalTM（Bulten-Kanthal AB, 瑞典）、和/或 LOHMTM（Driver-Harris 公司, Harrison, New Jersey, 美国））相比很便宜。在限温加热器的一个实施例中，限温加热器以连续的长度制造为绝缘导体加热器以降低成本并改进可靠性。

限温加热器可用来加热含烃岩层，包括但不限于油页岩、煤层、沥青砂岩层和重稠原油。限温加热器还可用于环境矫正领域以蒸发或破坏土壤污染。限温加热器的实施例可用来加热井筒或海底管线中的流体以抑制石蜡或各种水合物的沉积。在一些实施例中，限温加热器用于地下岩层（例如，油页岩或煤层）的溶液采矿。在某些实施例中，流体（例如，熔融的盐）布置在井筒中并用限温加热器来加热以抑制井筒的变形和/或塌陷。在一些实施例中，限温加热器附着至井筒中的抽油杆或者是抽油杆本身的部件。在一些实施例中，限温加热器用来

加热井筒附近区域以降低高粘度原油生产期间和高粘度石油输送到地面期间井筒附近的油粘度。在一些实施例中，限温加热器使得能通过在不使油焦化之下降低油的粘度来实现粘性油的气体提升。限温加热器可用于硫输送管线以将温度维持在大约 110°C 和大约 130°C 之间。

限温加热器的某些实施例可用于要求控制在较窄温度范围内的升高温度的化学或精炼工艺以抑制不希望的化学反应或由于局部温度升高所引起的损害。一些应用可包括但不限于反应管、炼焦器和蒸馏塔。限温加热器还可用于污染控制设备（例如催化转化器和氧化器）以允许在没有复杂温度控制电路之下快速加热至控制温度。另外，限温加热器可用于食品处理中以避免过度的温度损害食品。限温加热器还可用于金属的热处理（例如，焊点的退火）。限温加热器还可用于地龙式加热器、腐蚀器和/或各种其它器具。限温加热器可与活体组织穿刺针一起使用来通过升高体内的温度消灭肿瘤。

限温加热器的一些实施例可用于某些类型的医学和/或兽医设备中。例如，限温加热器可用来治疗性地处理人类或动物的组织。用于医学或兽医设备的限温加热器可具有铁磁性材料，包括居里温度为大约 50°C 的钯铜合金。高的频率（例如大于大约 1MHz 的频率）可用来驱动用于医学和/或兽医用途的相对小的限温加热器。

用于限温加热器的铁磁性合金决定加热器的居里温度。各种金属的居里温度数据列在“美国物理学会手册”（第二版， McGraw-Hill）的 5-170 到 5-176 页中。铁磁性导体可包括一种或多种铁磁性元素（铁、钴和镍）和/或这些元素的合金。在一些实施例中，铁磁性导体包括含钨（W）的铁铬（Fe-Cr）合金（例如 HCM12A 和 SAVE12（Sumitomo Metals Co., 日本）和/或含铬的铁合金（例如 Fe-Cr 合金、Fe-Cr-W 合金、Fe-Cr-V（钒）合金、Fe-Cr-Nb（铌）合金）。在三种主要的铁磁性元件中，铁具有大约 770°C 的居里温度；钴（Co）具有大约 1131°C 的居里温度；和镍具有大约 358°C 的居里温度。铁钴合金的居里温度高于铁的居里温度。例如，具有 2% 重量比钴的铁钴合金具有大约 800°C 的居里温度；具有 12% 重量比钴的铁钴合金具有大约 900°C 的居

里温度；并且具有 20%重量比钴的铁钴合金具有大约 950°C 的居里温度。铁镍合金的居里温度低于铁的居里温度。例如，具有 20%重量比镍的铁镍合金具有大约 720°C 的居里温度；并且具有 60%重量比镍的铁镍合金具有大约 560°C 的居里温度。

用作合金的一些非铁磁性元素升高铁的居里温度。例如，具有 5.9%重量比钒的铁钒合金具有大约 815°C 的居里温度。其它非铁磁性元素（例如碳、铝、铜、硅和/或铬）可与铁或其它铁磁性材料合金化以降低居里温度。升高居里温度的非铁磁性元素可以与降低居里温度的非铁磁性元素相组合并且与铁或其它铁磁性材料合金化从而产生具有期望居里温度和其它期望物理和/或化学性质的材料。在一些实施例中，居里温度材料是铁氧体，比如 NiFe_2O_4 。在其它实施例中，居里温度材料是二元化合物，比如 FeNi_3 或 Fe_3Al 。

限温加热器的某些实施例可包括多于一种的铁磁性材料。如果这里所述任何情况适用于限温加热器中的至少一种铁磁性材料，这些实施例处于这里所述实施例的范围内。

铁磁性性质通常会随着接近居里温度而衰退。C. James Erickson 的“工业电加热手册”（美国电气与电子工程师协会出版社，1995）示出了 1% 碳钢（具有 1%重量比的碳）的典型曲线。导磁率的损失在高于 650°C 的温度处开始并且倾向于在温度超过 730°C 时结束。因而，自限制温度稍微低于铁磁性导体的实际居里温度。1% 碳钢中电流的透入深度在室温下为 0.132cm 并且在 720°C 处增大到 0.445cm。从 720°C 至 730°C，透入深度急剧地增大至超过 2.5cm。因而，利用 1% 碳钢的限温加热器的实施例在 650°C 和 730°C 之间开始自限制。

透入深度通常限定了时间变化的电流进入导电材料的有效渗透深度。总体上，电流密度随着沿着导体的半径从外表面至中心的距离按指数规律地降低。电流密度为表面电流密度大约 $1/e$ 之处的深度称作透入深度。对于直径远大于透入深度的实心圆柱形棒，或者壁厚超过穿透深度的空心圆柱体，透入深度 δ 为：

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

其中： δ =以英寸计的透入深度；

ρ =操作温度下的电阻率（欧姆 - cm）；

μ =相对导磁率； 和

f =频率（Hz）。

公式 1 从 C. James Erickson 的“工业电加热手册”(美国电气与电子工程师协会出版社， 1995) 中获得。对于大多数金属而言，电阻率 (ρ) 随着温度而增大。相对导磁率通常随着温度和电流而变化。其它公式可用来估计导磁率和/或透入深度关于温度和/或电流的变化。 μ 对电流的依赖源自于 μ 对磁场的依赖。

用于限温加热器的材料可以选择来提供期望的调节比。限温加热器至少可以选择 1.1:1、2:1、3:1、4:1、5:1、10:1、30:1 或 50:1 的调节比。也可以使用更大的调节比。所选择的调节比可取决于很多因素，包括但不限于布置限温加热器的岩层的类型（例如较高的调节比可用于富和贫油页岩层之间导热率具有很大变化的油页岩层）和/或用于井筒的材料的温度限制（例如，加热器材料的温度限制）。在一些实施例中，调节比通过将额外的铜或其它良好的电导体结合至铁磁性材料而增大（例如，加入铜以降低居里温度之上的电阻）。

限温加热器可在低于加热器的居里温度下提供最小的热输出（动力输出）。在某些实施例中，最小的热输出为至少 400W/m (瓦每米)、600W/m、700W/m、800W/m 或高达 2000W/m。在加热器一部分的温度接近或高于居里温度时，限温加热器通过加热器的该部分降低热输出的量。降低的热量可明显小于低于居里温度下的热输出。在一些实施例中，降低的热量为最多 400W/m、200W/m、100W/m 或者可接近 0W/m。

限温加热器的 AC 或调制 DC 电阻和/或热输出可随着温度接近居里温度而降低，并且由于居里效应而在居里温度附近或之上急剧地降低。在某些实施例中，居里温度之上或附近的电阻或热输出的数值最多为低于居里温度的某一点处的电阻或热输出的数值的一半。在一些实施例中，高于居里温度或居里温度附近的热输出最多为低于居里温

度的某一点（例如低于居里温度 30°C、低于居里温度 40°C、低于居里温度 50°C 或者低于居里温度 100°C）处的热输出的 90%、70%、50%、30%、20%、10% 或更少（低到 1%）。在某些实施例中，高于居里温度或居里温度附近的电阻降低至低于居里温度的某一点（例如低于居里温度 30°C、低于居里温度 40°C、低于居里温度 50°C 或者低于居里温度 100°C）处的电阻的 80%、70%、60%、50% 或更少（低到 1%）。

在一些实施例中，调节 AC 频率以改变铁磁性材料的透入深度。例如，1% 碳钢室温下的透入深度在 60Hz 时为 0.132cm，在 180Hz 时为 0.0762cm，并且在 440Hz 时为 0.046cm。由于加热器的直径通常大于透入深度的两倍，所以利用更高的频率（并且因而加热器具有更小的直径）降低了加热器成本。对于固定的几何形状，较高的频率产生了较高的调节比。较高频率下的调节比通过用较低频率下的调节比与较高频率除以较低频率的平方根相乘来计算。在一些实施例中，使用 100Hz 和 1000Hz 之间、140Hz 和 200Hz 之间或者 400Hz 和 600Hz 之间的频率（例如 180Hz、540Hz 或 720Hz）。在一些实施例中，可使用高的频率。频率可大于 1000Hz。

在某些实施例中，调制 DC（例如削波 DC、波形调制 DC、或循环 DC）可用来将电能提供给限温加热器。DC 调制器或 DC 削波器可结合至 DC 电源以便提供调制的直流输出。在一些实施例中，DC 电源可包括用于调制 DC 的装置。DC 调制器的一个例子是 DC 至 DC 转换系统。DC 至 DC 转换系统是现有技术中公知的。DC 通常被调制或削波成期望的波形。用于 DC 调制的波形包括方波、正弦波、变形正弦波、变形方波、三角形和其它规则或不规则波形，但不限于此。

调制 DC 波形通常限定了调制 DC 的频率。因而，调制 DC 波形可选择来提供期望的调制 DC 频率。调制 DC 波形的形状和/或调制速率（比如削波速率）可以改变以改变调制 DC 频率。DC 可在高于通常可用 AC 频率的频率下被调制。例如，调制 DC 可在至少 1000Hz 的频率下提供。将供应电流的频率增大至较高数值有利地增大了限温加热器的调节比。

在某些实施例中，调节或改变调制 DC 波形以变化调制 DC 的频率。DC 调节器能在限温加热器的使用期间的任何时间在高电流或高压之下调节或改变调制 DC 波形。因而，提供给限温加热器的调制 DC 并不限于单一频率或者甚至一小组的频率值。使用 DC 调制器的波形选择通常允许宽范围的调制 DC 频率和调制 DC 频率的离散控制。因而，调制 DC 频率更易于设置在一个明确的值而 AC 频率通常限制为供电频率的倍数。调制 DC 频率的离散控制允许对于限温加热器的调节比更加选择性的控制。能选择性的控制限温加热的调节比允许更宽范围的材料用于限温加热器的设计和构造中。

在某些实施例中，限温加热器包括具有铁磁性管和非铁磁性的高电导率芯部的复合导体。非铁磁性的高电导率芯部降低了导体的所需直径。芯部或非铁磁性的导体可以是铜或铜合金。芯部或非铁磁性的导体还可由具有低电阻率和接近 1 的相对导磁率的其它金属（例如，基本上非铁磁性的材料，比如铝和铝合金、磷青铜、铍铜合金和/或黄铜）制成。复合导体允许限温加热器的电阻在居里温度附近更剧烈地降低。随着透入深度在居里温度附近增大以包括铜芯部，电阻非常剧烈地降低。

复合导体可增大限温加热器的电导率和/或允许加热器在较低的电压下运行。在一个实施例中，复合导体在低于复合导体的铁磁性导体的居里温度附近区域的温度处具有相对平的电阻 - 温度曲线。在一些实施例中，限温加热器具有介于 100°C 和 750°C 之间或介于 300°C 和 600°C 之间的相对平的电阻 - 温度曲线。相对平的电阻 - 温度曲线也可通过调节例如限温加热器中的材料和/或材料的配置而显示在其它温度范围中。在某些实施例中，复合导体中每种材料的相对厚度选择得使得为限温加热器产生期望的电阻 - 温度曲线。

在某些实施例中，复合导体中每种材料的相对厚度选择得使得为限温加热器产生期望的电阻 - 温度曲线。

复合导体（例如，复合内层导体或复合外层导体）可通过包括但不限于以下方法的方法来制造：共挤、滚轧成形、紧密配合装管（例

如冷却内部元件并加热外部元件；然后将内部元件插入外部元件；此后进行拉拔操作和/或允许系统冷却）、爆炸或电磁包覆、电弧覆盖焊接、纵条焊接、等离子粉末焊接、坯段共挤、电镀、拉拔、溅射、等离子沉积、共挤铸造、磁性成形、熔融柱体铸造（内芯部材料在外芯部材料内或者相反）、插入之后进行焊接或高温蒸、屏蔽活性气体焊接（SAG）、和/或将内管插入外管中之后通过液压成形或使用生铁来机械地扩张内管以相对于外管扩张和锻造内管。在一些实施例中，铁磁性导体编织在非铁磁性导体上。在某些实施例中，复合导体利用类似于用于包覆的那些方法来形成（例如，用铜包覆钢）。铜包覆层和基体铁磁性材料之间的冶金结合可以是有利的。通过形成良好冶金结合（例如铜和 446 不锈钢之间的良好结合）的共挤工艺产生的复合导体可由 Anomet Products, Inc.（美国麻萨诸塞州 Shrewsbury）提供。

图 3-5 示出了限温加热器的各种实施例。这些附图中任何一个所示的限温加热器的实施例的一个或多个特点可与这些附图所示的限温加热器的其它实施例的一个或多个特点相组合。在这里所述的某些实施例中，限温加热器的尺寸设计为在 60Hz 频率的 AC 下运行。要理解到，限温加热器的尺寸可由这里所述的那些进行调节以使得限温加热器能以类似的方式在其它 AC 频率下或者在调制 DC 电流下运行。

对于其中铁磁性导体在低于居里温度之下提供大多电阻性热输出的限温加热器而言，大部分电流以磁场（H）与磁感应强度（B）高度非线性的函数流过材料。这些非线性的函数会引起导致限温加热器在低于居里温度的温度处功率因数降低的强烈感应效应和畸变。这些效应会导致限温加热器的电力供应难以控制并且会导致额外的电流流过表面和/或加重电源导体的负载。昂贵的和/或难以施加控制的系统（比如可变电容器或调制电源）可用来试图补偿这些效应并控制其中大多电阻性热输出由流过铁磁性材料的电流所提供的限温加热器。

在某些限温加热器的实施例中，铁磁性导体限定了在限温加热器低于铁磁性导体的居里温度或在该温度附近时通过结合至铁磁性导体的电导体的大部分电流。电导体可以是护套、外套、支撑元件、耐腐

蚀元件或者其它电阻力元件。在一些实施例中，铁磁性导体限定了流到定位在最外层和铁磁性导体之间的电导体的大部分电流。铁磁性导体定位在限温加热器的横截面中以使得铁磁性导体在低于居里温度或处于该温度时的磁性限制了流到电导体的大部分电流。大部分电流由于铁磁性导体的集肤效应而限制至电导体。因而，大部分电流在加热器的大多操作范围中以基本上线性的电阻性质流过材料。

在某些实施例中，铁磁性导体和电导体定位在限温加热器的横截面中以使得铁磁性导体在低于居里温度的温度时的集肤效应限制了电导体和铁磁性导体中的电流的穿透深度。因而，电导体在温度达到铁磁性导体的居里温度处或附近提供了限温加热器大多的电阻力热输出。在某些实施例中，电导体的尺寸可选择为提供期望的热输出性质。

因为大部分电流流过低于居里温度的电导体，限温加热器具有一个电阻 - 温度曲线，这个曲线至少部分地反映了电导体中材料的电阻 - 温度曲线。因而，如果电导体中的材料具有基本上线性的电阻 - 温度曲线，限温加热器的电阻 - 温度曲线在低于铁磁性导体的居里温度时为基本上线性的。限温加热器的电阻很少或根本不依赖于流过加热器的电流直到温度接近居里温度。大部分电流在低于居里温度时在电导体中流动而非在铁磁性导体中流动。

其中大部分电流在电导体中流动的限温加热器的电阻 - 温度曲线还倾向于在铁磁性导体的居里温度附近或该温度处显示电阻的更剧烈降低。在居里温度附近或该温度处电阻的更剧烈降低比居里温度附近更渐进的电阻降低更易于控制。

在某些实施例中，电导体中的材料和/或材料的尺寸选择为使得限温加热器在低于铁磁性导体的居里温度时具有期望的电阻 - 温度曲线。

其中大部分电流在低于居里温度时在电导体中流动而非在铁磁性导体中流体的限温加热器更易于预测和/或控制。其中大部分电流在低于居里温度时在电导体中流动而非在铁磁性导体中流动的限温加热器的活动可以通过例如其电阻 - 温度曲线和/或其功率因数 - 温度曲线

来预测。电阻 - 温度曲线和/或功率因数 - 温度曲线可通过例如估计限温加热器活动的实验测量、估计或预测限温加热器活动的分析公式和/或估计或预测限温加热器活动的模拟来估计或预测。

在某些实施例中，估计或预测限温加热器的活动用来控制限温加热器。限温加热器可基于加热器运行期间电阻和/或功率因数的测量（估计）来进行控制。在一些实施例中，供应至限温加热器的动力或电流基于加热器运行期间电阻和/或功率因数的估计以及将这个估计与加热器的预期活动相比较来进行控制。在某些实施例中，限温加热器在没有测量加热器温度或加热器附近温度之下进行控制。在没有温度测量之下控制限温加热器避免了与井下温度测量相关的操作成本。与基于测量温度控制加热器相比，基于加热器的电阻和/或功率因数的估计来控制限温加热器还降低了对供应至加热器的动力或电流进行调节的时间。

在限温加热器的温度接近或超过铁磁性导体的居里温度时，铁磁性导体中铁磁性的降低允许电流流过限温加热器更大部分的导电横截面。因而，在铁磁性导体的居里温度处或附近，限温加热器的电阻降低并且限温加热器自动地提供降低的热输出。在某些实施例中，高导电的元件结合至铁磁性导体和电导体以降低限温加热器在铁磁性导体的居里温度处或高于该温度时的电阻。高导电的元件可以是内层导体、芯部、或者铜、铝、镍或其合金的另一导体元件。

与在达到居里温度或该温度附近使用铁磁性导体来提供大多电阻性热输出的限温加热器中的铁磁性导体相比，在温度低于居里温度时将大部分电流限制至电导体的铁磁性导体可具有相对小的横截面。使用电导体在低于居里温度时提供大多电阻性热输出的限温加热器在温度低于居里温度时具有低的磁感应系数，因为与其中低于居里温度时大多电阻性热输出由铁磁性材料提供的限温加热器相比，较少的电流流过铁磁性导体。铁磁性导体半径 (r) 处的磁场 (H) 与流过铁磁性导体和芯部的电流 (I) 除以半径成正比，或者

$$(2) H \propto I/r$$

由于对于使用外层导体来在低于居里温度时提供大多电阻性热输出的限温加热器而言仅一部分电流流过铁磁性导体，限温加热器的磁场可明显小于其中大部分电流流过铁磁性材料的限温加热器的磁场。对于小磁场而言，相对导磁率 (μ) 可很大。

铁磁性导体的透入深度 (δ) 与相对导磁率 (μ) 的平方根成反比：

$$(3) \delta \propto (1/\mu)^{1/2}$$

增大相对导磁率会降低铁磁性导体的透入深度。然而，因为对于低于居里温度的温度而言仅一部分电流流过铁磁性导体，对于相对导磁率较大的铁磁性材料而言，铁磁性导体的半径（或厚度）可降低以补偿降低的透入深度同时仍然允许集肤效应以限制在温度低于铁磁性导体的居里温度处电导体的电流穿透深度。铁磁性导体的半径（厚度）可以介于 0.3mm 和 8mm 之间、0.3mm 和 2mm 之间、或者 2mm 和 4mm 之间，这取决于铁磁性导体的相对导磁率。降低铁磁性导体的厚度会降低限温加热器的制造成本，因为铁磁性材料的成本倾向于限温加热器的成本的主要部分。在铁磁性导体的居里温度处或附近，增大铁磁性导体的相对导磁率为限温加热器提供了更高的调节比和电阻的更剧烈降低。

相对导磁率较高（例如至少 200、至少 1000、至少 1×10^4 或者至少 1×10^5 ）和/或居里温度较高（例如至少 600°C、至少 700°C 或者至少 800°C）的铁磁性材料（比如纯铁或铁钴合金）倾向于在高温下具有较小的耐腐蚀性和/或较小的机械强度。电导体可为限温加热器提供高温下的耐腐蚀性和/或高的机械强度。因而，铁磁性导体可主要为其铁磁性进行选择。

在低于铁磁性导体的居里温度时将大部分电流限制到电导体降低了功率因数的变化。因为在低于居里温度时仅一部分电流流过铁磁性导体，铁磁性导体的非线性铁磁性质对于限温加热器的功率因数影响很小或根本没有，除了在居里温度处或附近。即使在居里温度处或附近，与其中在低于居里温度时铁磁性导体提供大多电阻性热输出的限温加热器相比，对功率因数的影响也降低。因而，很少需要或者根本

不需要外部补偿（例如可变电容器或波形调制）来调节限温加热器的感应负载中的变化以维持相对高的功率因数。

在某些实施例中，在低于铁磁性导体的居里温度时将大部分电流限制到电导体的限温加热器在加热器的使用期间维持功率因数高于 0.85、高于 0.9 或者高于 0.95。功率因数的任何降低仅在居里温度附近的温度处在限温加热器的局部发生。限温加热器的大多部分在使用期间通常不处于居里温度处或附近。这些部分具有接近 1.0 的高功率因数。整个限温加热器的功率因数在加热器的使用期间维持为高于 0.85、高于 0.9 或者高于 0.95，即使加热器的一些部分具有低于 0.85 的功率因数。

维持高的功率因数还允许较便宜的电源和/或控制设备，比如固态电源或 SCR（硅控整流器）。如果功率因数由于感应负载而变化太大，那么这些设备可能就不能正确地运行。然而，在功率因数维持在较高数值时，这些设备可用来将动力提供给限温加热器。固态电源还具有允许精细调整和受控调节供应至限温加热器的动力的优点。

在一些实施例中，用变压器来将动力提供给限温加热器。变压器可具有多电压接头以将动力提供给限温加热器。多电压接头允许供应的电流在多个电压之间来回切换。这将电流维持在由多电压接头限制的范围内。

高导电元件或者内层导体增大了限温加热器的调节比。在某些实施例中，增大高导电元件的厚度以增大限温加热器的调节比。在一些实施例中，降低电导体的厚度以增大限温加热器的调节比。在某些实施例中，限温加热器的调节比介于 1.1 和 10 之间、介于 2 和 8 之间、或者介于 3 和 6 之间（例如调节比至少为 1.1、至少为 2、或者至少为 3）。

在一些实施例中，用相对薄的导电层来在温度达到铁磁性导体的居里温度或者附近时提供限温加热器的大多电阻性热输出。这种限温加热器可用作绝缘导体加热器中的加热元件。绝缘导体加热器中的加热元件可位于护套内，该护套和加热元件之间具有绝缘层。

图 3A 和 3B 示出了用限温加热器作为加热元件的绝缘导体加热器的一个实施例的横截面视图。绝缘导体 212 包括芯部 214、铁磁性导体 216、内层导体 218、电绝缘体 220 和外壳 222。芯部 214 是铜芯部。铁磁性导体 216 是例如铁或铁合金。

内层导体 218 是电导率比铁磁性导体 216 高的非铁磁性材料的相对薄的导电层。在某些实施例中，内层导体 218 是铜。内层导体 218 也可以是铜合金。铜合金通常具有比纯铜更平的电阻 - 温度曲线。更平的电阻 - 温度曲线可提供在达到居里温度时作为温度函数的热输出中更小的变化。在一些实施例中，内层导体 218 是具有 6%重量比镍的铜（例如，CuNi6 或者 LOHMTM）。在一些实施例中，内层导体 218 是 CuNi10Fe1Mn 合金。在低于铁磁性导体 216 的居里温度时，铁磁性导体的磁性将大部分电流限制到内层导体 218。因而，在低于居里温度时内层导体 218 提供了绝缘导体 212 的大多电阻性热输出。

在某些实施例中，内层导体 218 与芯部 214、铁磁性导体 216 一起设计尺寸，以使得内层导体提供期望的热输出量和期望的调节比。例如，内层导体 218 可具有小于芯部 214 横截面积大约 2 至 3 倍的横截面积。通常，内层导体 218 必须具有相对小的横截面积以提供期望的热输出，如果内层导体是铜或铜合金的话。在内层导体 218 为铜的一个实施例中，芯部 214 具有 0.66cm 的直径，铁磁性导体 216 具有 0.91cm 的外径，内层导体 218 具有 1.03cm 的外径，电绝缘体 220 具有 1.53cm 的外径，并且外壳 222 具有 1.79cm 的外径。在内层导体 218 为 CuNi6 的一个实施例中，芯部 214 具有 0.66cm 的直径，铁磁性导体 216 具有 0.91cm 的外径，内层导体 218 具有 1.12cm 的外径，电绝缘体 220 具有 1.63cm 的外径，并且外壳 222 具有 1.88cm 的外径。这种绝缘导体通常比未使用薄内层导体来在低于居里温度时提供大多热输出的绝缘导体更小且制造成本更便宜。

电绝缘体 220 可以是氧化镁、氧化铝、二氧化硅、氧化铍、氮化硼、氮化硅或者其组合。在某些实施例中，电绝缘体 220 是氧化镁的压实粉末。在一些实施例中，电绝缘体 220 包括氮化硅颗粒。

在某些实施例中，一小层材料布置在电绝缘体 220 和内层导体 218 之间以抑制铜在高温下迁移入电绝缘体。例如，小层镍（例如，大约 0.5mm 的镍）可布置在电绝缘体 220 和内层导体 218 之间。

外套 222 由耐腐蚀材料制成，比如但不限于 347 不锈钢、347H 不锈钢、446 不锈钢、或者 825 不锈钢。在一些实施例中，外套 222 在铁磁性导体 216 的居里温度处或之上为绝缘导体 212 提供一定的机械强度。在某些实施例中，外套 222 不用于传导电流。

在限温加热器的某些实施例中，三个限温加热器以三相 Y 字构造结合起来。将三个限温加热器以三相 Y 字构造结合起来降低了每个限温加热器中的电流，因为电流在三个加热器之间劈分。降低每个限温加热器中的电流允许每个加热器具有小的直径。低的电流允许每个限温加热器中更高的相对导磁率，并且因此允许了更高的调节比。另外，每个限温加热器无需返回电流。因而，与每个限温加热器具有其自己的返回电流路径相比，每个限温加热器的调节比仍然较高。

在三相 Y 字构造中，各个限温加热器可通过将每个限温加热器的护套、外壳或罐短接至其终端（例如加热器在加热器井筒底部处的端部）的导电部分（提供热的导体）而结合起来。在一些实施例中，护套、外壳、罐和/或导电部分结合至在井筒中支撑限温加热器的支撑元件。

图 4A 示出了用于在井筒中安装和结合加热器的实施例。图 4A 中的实施例示出了安装入井筒的绝缘导体加热器。其它类型的加热器，比如管道中导体式加热器也可利用所示实施例安装在井筒中。而且，在图 4A 中，示出了两个绝缘导体 212，而第三个绝缘导体从所示的视图中不可见。通常，三个绝缘导体 212 将结合至支撑元件 224，如图 4B 所示。在一个实施例中，支撑元件 224 是厚壁的 347H 管。在一些实施例中，热电偶或其它温度传感器布置在支撑元件 224 内。三个绝缘导体可以三相 Y 字构造来结合。

在图 4A 中，绝缘导体 212 盘绕在卷绕管状装置 226 上。在绝缘导体 212 从装置 226 上解绕时，绝缘导体结合至支撑元件 224。在某

些实施例中，绝缘导体 212 同时地解绕和/或同时地结合至支撑元件 224。绝缘导体 212 可利用金属（例如 304 不锈钢或 Inconel[®]合金）条带 228 结合至支撑元件 224。在一些实施例中，绝缘导体 212 利用其它类型的紧固件（比如带扣、线夹或掀钮）结合至支撑元件 224。支撑元件 224 连同绝缘导体 212 一起安装到开口 230 中。在一些实施例中，绝缘导体 212 在不使用支撑元件的条件下结合起来。例如，一个或多个条带 228 可用来将绝缘导体 212 结合起来。

绝缘导体 212 可在绝缘导体的下端处彼此电结合（例如，对于三相 Y 字构造）。在三相 Y 字构造中，绝缘导体 212 在没有电流回路的情况下运行。在某些实施例中，绝缘导体 212 在触点区段 232 彼此电结合。在区段 232，护套、外壳、罐和/或导电区段彼此电结合和/或电结合至支撑元件 224 以使得绝缘导体 212 在该区段中电结合。

在某些实施例中，绝缘导体 212 的护套短接至绝缘导体的导体。图 4C 示出了护套短接至导体的绝缘导体 212 的一个实施例。护套 222 利用终端 233 电结合至芯部 214、铁磁性导体 216 和内层导体 218。终端 233 可以是位于绝缘导体 212 下端处的金属条带或金属板。例如，终端 233 可以是结合至护套 222、芯部 214、铁磁性导体 216 和内层导体 218 的铜板以使得它们被短接起来。在一些实施例中，终端 233 被焊接或铜焊至护套 222、芯部 214、铁磁性导体 216 和内层导体 218。

各个绝缘导体 212 的护套可短接起来以电结合绝缘导体的导体，如图 4A 和 4B 所示。在一些实施例中，护套可短接起来，因为护套彼此间物理接触。例如，如果护套由条带 228 捆扎起来时，护套可物理接触。在一些实施例中，在绝缘导体 212 安装到开口中之前，护套的下端在开口 230 的地面处物理地结合（例如焊接）。

在某些实施例中，三个导体定位在单个管道内以形成管道内具有三个导体的加热器。图 5A 和 5B 示出了管道内具有三个导体的加热器的一个实施例。图 5A 示出了管道内具有三个导体的加热器的自顶向下视图。图 5B 示出了管道内具有三个导体的加热器的侧视图，其中具有切口以示出其内部。三个导体 234 定位在管道 236 内。三个导体

234 在管道 236 内基本上均匀地间隔。在一些实施例中，三个导体 234 以螺旋性构造结合。

一个或多个定中器 238 布置在每个导体 234 周围。定中器 238 由电绝缘材料制成，比如氮化硅或氮化硼。定中器 238 维持导体 234 在管道 236 中的位置。定中器 238 还禁止导体 234 和管道 236 之间的电接触。在某些实施例中，定中器 238 沿着导体 234 的长度间隔开以使得包围一个导体的定中器与另一导体的定中器重叠（自顶向下视图中看）。这降低了每个导体所需的定中器数目并且允许了导体的紧密间隔。

在某些实施例中，三个导体 234 以三相 Y 字构造结合。三个导体 234 可以三相 Y 字构造结合在加热器的底部处或附近。在三相 Y 字构造中，管道 236 没有电结合至三个导体 234。因而，管道 236 可仅用来给三个导体 234 提供强度和/或抑制其腐蚀。

在一些实施例中，加热系统包括一个或多个加热器（例如，一个第一加热器、第二加热器和第三加热器）、多个电绝缘体和管道。加热器、电绝缘体和管道可结合和/或连接起来以允许布置在地下岩层中的开口内。管道可包围加热器和电绝缘体。在一些实施例中，管道借助于一个或多个电绝缘体与加热器电绝缘。在一些实施例中，管道的构造抑制了岩层流体进入管道。

加热系统的每个加热器可由至少一个电绝缘体所包围。电绝缘体可沿着每个加热器的长度间隔开以允许包围一个加热器的电绝缘体与包围另一个加热器的电绝缘体横向地重叠。在一些实施例中，电绝缘体包括氮化硅。

加热器可包括电结合至电导体的铁磁性元件。电导体可以是在低于铁磁性元件的居里温度时提供第一热输出的这里所述的任何电导体。电导体可允许在大约 25°C 下大部分电流穿过加热器的横截面。在某些实施例，铁磁性元件和电导体被电结合以使得加热器的功率因数在每个加热器的使用期间仍然高于 0.85。

在一些实施例中，铁磁性导体相对于电导体进行定位。铁磁性导

体相对于电导体定位允许在温度低于铁磁性导体的居里温度或该温度附近时由铁磁性导体中的电流所产生的电磁场将大部分电流限制到电导体。

在一些实施例中，这里所述的加热系统允许热从加热器传递至一部分地下岩层。加热系统具有至少大约 1.1 的调节比。在一些实施例中，这里所述的加热系统提供了 (a) 低于铁磁性导体的居里温度时的第一热输出，和 (b) 在大约铁磁性导体的居里温度处或之上的第二热输出。第二热输出与第一热输出相比降低。在一些实施例中，当第一热输出处于低于选定温度大约 50°C 时，第二热输出最多为第一热输出的 90%。

在一些实施例中，限温加热器用来获得较低温度的加热（例如，用于加热生产井中的流体，加热地面管线，或者降低井筒中或井筒附近区域中流体的粘度）。改变限温加热器的铁磁性材料允许较低温度的加热。在一些实施例中，铁磁性导体由居里温度比 446 不锈钢低的材料制成。例如，铁磁性导体可以是铁和镍的合金。该合金可具有介于 30% 至 42% 重量比的镍，其余为铁。在一个实施例中，合金是 Invar 36。Invar 36 是铁中具有 36% 重量比的镍并且具有 277°C 的居里温度。在一些实施例中，合金是具有例如铬、镍和铁的三组分合金。例如，一种合金可具有 6% 重量比的铬、42% 重量比的镍和 52% 重量比的铁。2.5cm 直径的 Invar 36 在居里温度下具有大约 2 至 1 的调节比。将 Invar 36 合金布置在铜芯部上可允许更小的棒直径。铜芯部可产生高的调节比。在与居里温度低于聚合物绝缘体熔点或软化点的合金一起使用时，低温加热器实施例中的绝缘体可以由高性能聚合物绝缘体（比如 PFA 或 PEEKTM）制成。

本发明各个方面进一步修改和替换实施例对于看到本描述的本领域熟练人员而言很明显。于是，这种描述视为仅仅是示例性的并且用于教导本领域熟练人员实施本发明的大体方式。应当理解到，这里所示和所述的本发明的形式仅作为目前优选的实施例。对于这里所示和所述的元件和材料都可以替换，部件和工艺可以颠倒，并且本发明

的某些特点可独立地利用，所有这些对于已经得益于本发明描述的本领域熟练人员而言都是很明显的。在不背离本发明如权利要求所述的精神和范围之下能对这里所述元件进行变化。另外，要理解到，在某些实施例中，这里独立描述的特点可组合起来。

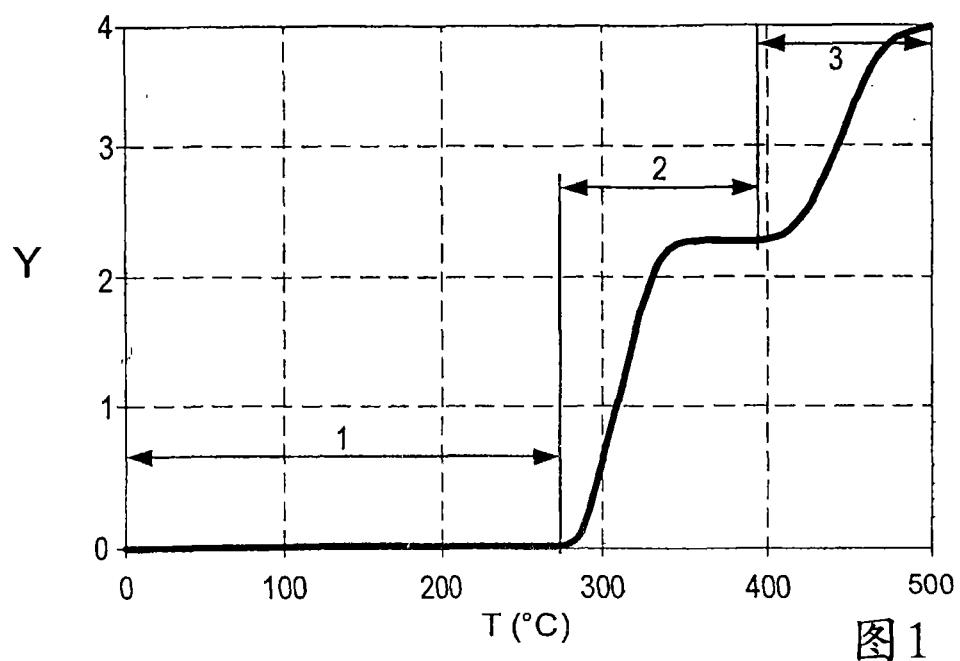


图 1

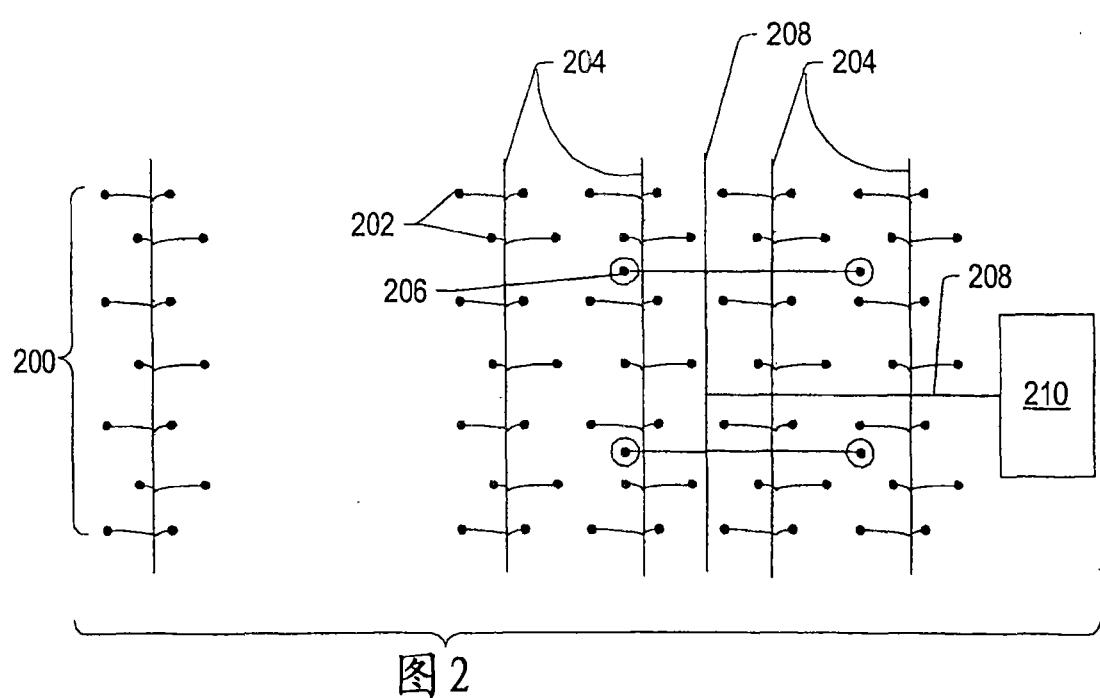


图 2

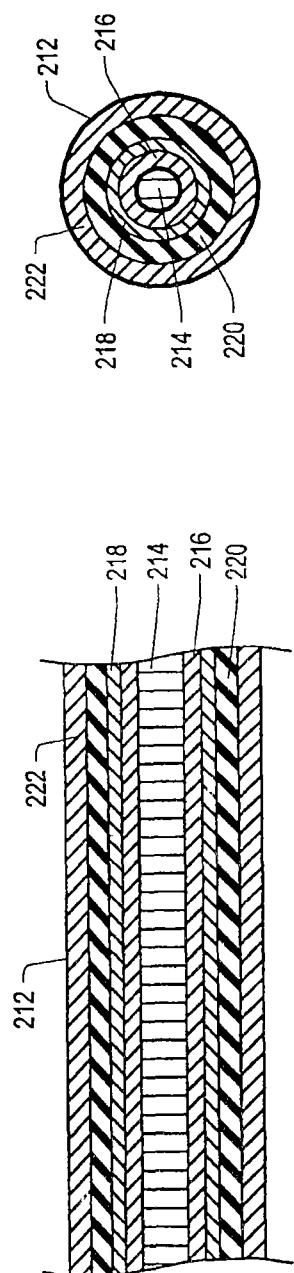


图 3B

图 3A

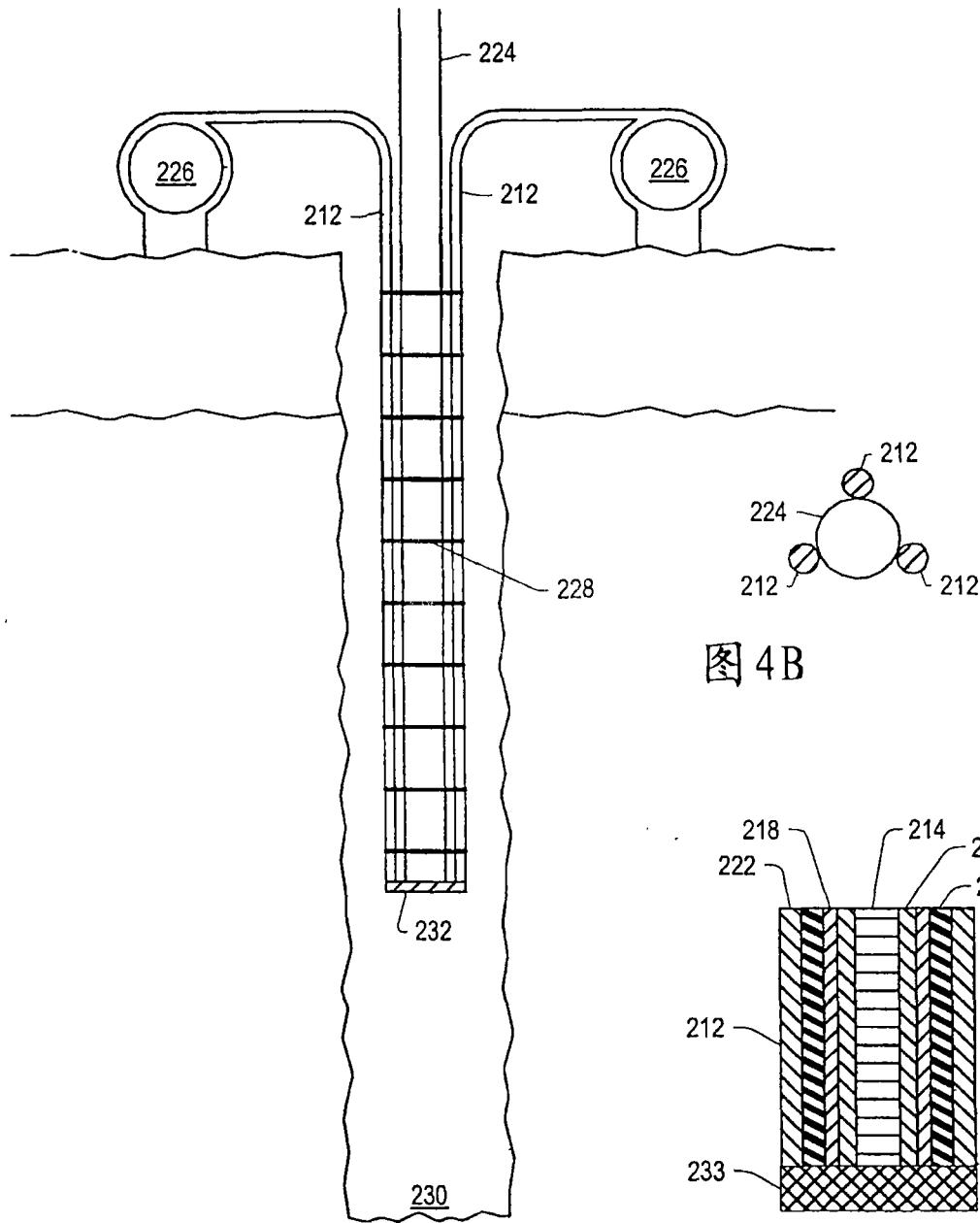


图 4A

图 4C

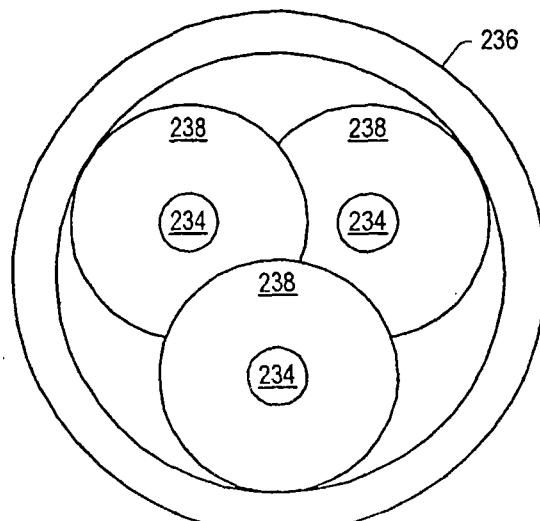


图 5A

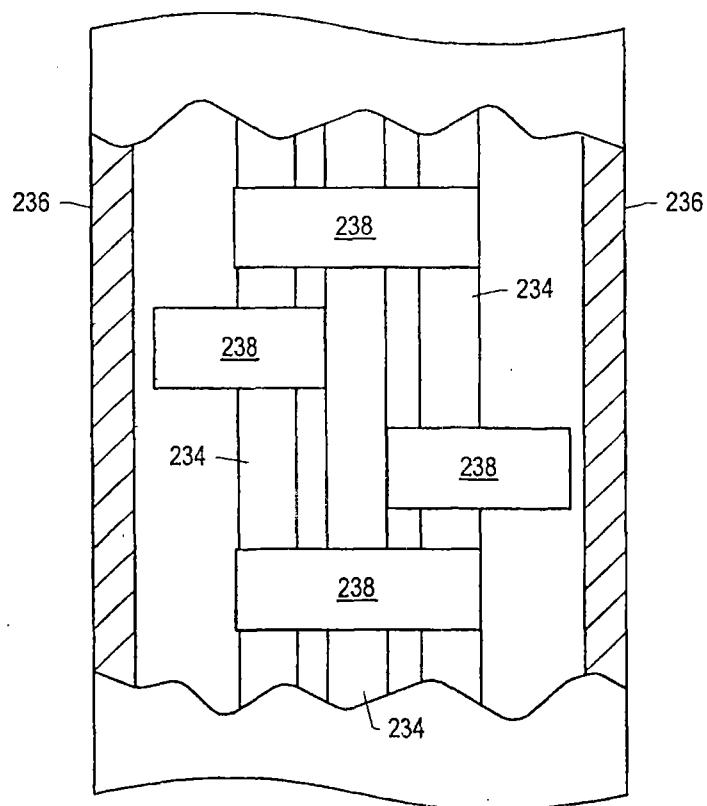


图 5B