(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 726 997**

(51) Int. CI.:

F28F 21/04 (2006.01)
F28D 17/00 (2006.01)
F28D 20/00 (2006.01)
F02C 6/16 (2006.01)
F02C 1/00 (2006.01)
F02C 6/18 (2006.01)
F02C 7/10 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.07.2017 E 17180717 (5)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.02.2019 EP 3270087**

(54) Título: **Contenedor de sistema de almacenamiento y restitución de calor que comprende una doble pared de hormigón**

(30) Prioridad:

15.07.2016 FR 1656804

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.10.2019

(73) Titular/es:

IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)
1 & 4 avenue de Bois-Préau
92500 Rueil-Malmaison, FR

(72) Inventor/es:

DELEAU, FABRICE;
RICHARD, FLORENCE y
TEIXEIRA, DAVID

(74) Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Contenedor de sistema de almacenamiento y restitución de calor que comprende una doble pared de hormigón

Campo de la invención

La presente invención se refiere al campo del almacenamiento de calor, en particular a los contenedores de almacenamiento de calor de gran volumen, tales como los que se utilizan para el almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES, del inglés "*Compressed Air Energy Storage*"), en particular para el almacenamiento de energía de aire comprimido tipo AACAES (del inglés "A*dvanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage*") en el que se prevé el almacenamiento de aire y el almacenamiento del calor generado de forma independiente.

Contexto general

La mayoría de las fuentes de energía primaria, tales como el gas, el petróleo y el carbón, pueden almacenarse fácilmente y, por lo tanto, permiten la producción de electricidad a demanda, a diferencia de la producción de electricidad a partir de fuentes de energía renovables tales como la energía eólica o solar. Para suministrar electricidad a demanda, producida por este tipo de energías renovables, es necesario almacenar la electricidad. Sin embargo, es muy difícil almacenar la electricidad en grandes cantidades. No obstante, es posible convertir la electricidad en las llamadas energías intermedias y almacenarla en forma de energía potencial, cinética, química o térmica.

La electricidad puede almacenarse, por ejemplo, en forma de aire comprimido. Esto es lo que se realiza en los sistemas CAES en los que una energía, normalmente la electricidad, que se desea utilizar en otro momento, se almacena en forma de aire comprimido. Para el almacenamiento, la energía eléctrica acciona los compresores de aire y, para la extracción, el aire comprimido acciona las turbinas conectadas a un generador eléctrico. El aire comprimido se almacena normalmente en una cavidad subterránea, en una formación de roca porosa, en un depósito de petróleo o gas agotado o en cualquier otro depósito de aire comprimido, que puede ser un tanque presurizado. El rendimiento de esta solución no es óptimo porque una parte de la energía del aire comprimido está en forma de calor que no se utiliza: el calor producido durante la compresión del aire se rechaza. Por otro lado, el aire almacenado se calienta para expandir el aire, lo que de nuevo reduce el rendimiento energético del sistema.

En la actualidad, existen varias variantes para este sistema CAES. En particular, se pueden mencionar los siguientes sistemas y procedimientos:

- ACAES (del inglés, "*Adiabatic Compressed Air Energy Storage*"), en el que el aire se almacena a alta temperatura debido a la compresión. Sin embargo, este tipo de sistema requiere un sistema de almacenamiento específico, voluminoso y costoso (almacenamiento adiabático).
- AACAES (del inglés, "*Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage*"), en el que el aire se almacena a temperatura ambiente y el calor debido a la compresión también se almacena, por separado, en un sistema de almacenamiento de calor TES (del inglés, "*Thermal Energy Storage*"). El calor almacenado en el sistema TES se utiliza para calentar el aire antes de que se expanda.

De acuerdo con ciertos diseños de AACAES previstos, el calor se almacena utilizando un fluido caloportador que permite almacenar el calor resultante de la compresión del aire y restituirlo al aire antes de que se expanda por medio de intercambiadores de calor. Por ejemplo, la solicitud de patente n.º EP 2447501 describe un sistema AACAES en el que el aceite, utilizado como fluido caloportador, circula en un circuito cerrado para intercambiar calor con aire.

De acuerdo con otros diseños de AACAES previstos, el calor se almacena por medio de sólidos estáticos contenidos en uno o más contenedores. Por ejemplo, el calor se almacena en un material en forma de partículas en lecho fijo dispuestas en uno o varios contenedores y a través de las cuales pasa el aire que se va a refrigerar. Este calor se restituye al aire frío que pasa a través del lecho fijo en la dirección opuesta durante una fase de descarga (descompresión del aire).

La presente invención se refiere a un contenedor de este último tipo, adaptado para recibir un material de almacenamiento de calor en forma de partículas en lecho fijo.

El contenedor se utiliza, de manera ventajosa, para el almacenamiento de energía en forma de aire comprimido de tipo AACAES, pero no se limita a esta aplicación. Por lo tanto, el contenedor puede ser adecuado para cualquier aplicación que utilice un sistema de almacenamiento y restitución de calor que requiera una gran capacidad de almacenamiento de calor y puede requerir resistencia a altas temperaturas y presiones. A modo de ejemplo, se pueden mencionar otros campos de aplicación, tales como el almacenamiento de energía en forma de aire comprimido, tal como el campo de la metalurgia, por ejemplo, en el contexto de la recuperación y la restitución del calor de los humos de los altos hornos, el campo de almacenamiento de energía marina, etc.

Una dificultad importante consiste en diseñar contenedores para sistemas de almacenamiento de calor que puedan funcionar a altas presiones, del orden de varias decenas de bares, normalmente presiones de hasta 65-85 bares, y que puedan funcionar a altas temperaturas, generalmente varios cientos de grados C, posiblemente hasta 750 °C.

Para soportar altas temperaturas y altas presiones, los TES generalmente comprenden grandes tanques cilíndricos de hormigón rellenos de un material de almacenamiento de calor, que tienen paredes gruesas de hormigón pretensado que pueden reforzarse con acero, y que pueden tener varias estructuras de refuerzo de las paredes, por ejemplo, de tipo espaciadores, para soportar las cargas ejercidas en las paredes debido a la presión interna.

Se conoce, por ejemplo, un TES en el contexto del almacenamiento de aire comprimido adiabático que puede funcionar a una temperatura muy alta, por ejemplo, de hasta 650 °C, y a presiones de hasta 65 bares, tal como se describe en la patente n.º EP1857614B. Este sistema de almacenamiento comprende una estructura doble formada por dos cápsulas anidadas una dentro de la otra, con una cápsula de presión exterior de hormigón pretensado, y una cápsula interior de hormigón resistente al calor y que contiene el material de almacenamiento de calor, por ejemplo, elementos cerámicos apilados. Este sistema se basa en una contribución mecánica de la pared de hormigón para contener la presión interna. Esto exige una producción en el sitio, con la fabricación de hormigón pretensado, sin posibilidad de producción en fábrica. Además, tales sistemas, que implican la construcción de paredes cilíndricas de hormigón de gran espesor (más de 1 m, por ejemplo) plantean dificultades de ingeniería y son costosos y complejos de construir. Por último, este sistema no cumple con las restricciones de presión previstas hoy en día en los sistemas TES, que son más bien del orden de 125 bares o incluso 300 bares.

También se conoce un sistema de almacenamiento de calor que puede almacenar calor a presiones superiores a 3-4 bares, que puede utilizarse en sistemas de almacenamiento de aire comprimido cuasi adiabáticos, tal como el descrito en la patente n.º FR2998556A1. Dicho contenedor tiene paredes de hormigón refractario rodeadas por una carcasa de acero, y se proporciona un aislante térmico entre la carcasa de acero y las paredes de hormigón. La estructura de sándwich formada por el conjunto de pared de hormigón refractario/aislante/carcasa de acero permite reducir las pérdidas térmicas al aislar el material de almacenamiento térmico, reducir la temperatura de la pared de acero, lo que limita la degradación de las características de la pared, limitar la temperatura de la piel de la carcasa de acero, mejorando la seguridad y contener la presión en el contenedor en función del espesor de la carcasa de acero. El contenedor de acuerdo con el documento FR2998556A1 también comprende rejillas para mantener el material de almacenamiento de calor que pueden disponerse a diferentes alturas en el contenedor y que también actúan como espaciadores que limitan la carga que se ejerce sobre las paredes. Esta configuración permite mantener el material de almacenamiento a diferentes alturas en el contenedor, contribuyendo así a limitar la carga que se ejerce sobre las paredes y también permite una mejor distribución del material en el tanque, lo que mejora la interacción del aire con el material de almacenamiento.

Durante las operaciones de carga y descarga de aire, la estructura experimenta expansiones térmicas, especialmente a nivel de las rejillas. Para absorber estas expansiones, el sistema de almacenamiento de calor de acuerdo con el documento FR2998556A1 prevé que las rejillas se fijen a las paredes de hormigón mediante anillos asociados con cadenas, evitando la generación de esfuerzos mecánicos durante la expansión térmica. El documento FR2998556A1 describe un contenedor de un sistema de almacenamiento y restitución de calor de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación independiente 1.

Sin embargo, debido a los grandes esfuerzos que implica el almacenamiento del material, es difícil implementar un contenedor de este tipo que comprenda rejillas fijadas por un sistema de anillos y cadenas que no es adecuado para la cantidad y el peso del material utilizado, especialmente en aplicaciones de tipo AACAES en las que varios cientos de toneladas de material en forma de partículas se almacenan en depósitos con una capacidad de entre aproximadamente 200 m^3 y 1.000 m^3. Además, dicho sistema de fijación es voluminoso.

Objetivos y sumario de la invención

La presente invención propone una nueva realización de sistemas de almacenamiento de calor adaptados a condiciones de alta presión, que normalmente pueden funcionar a presiones de hasta 300 bares aproximadamente y que se adaptan a condiciones de temperatura moderadas, normalmente temperaturas máximas del orden de 300 °C.

En particular, la presente invención tiene por objeto proporcionar un contenedor de TES que pueda soportar altas presiones internas relacionadas con el gas presurizado que pueden ser superiores a 100 bares e incluso de hasta 300 bares y, al mismo tiempo, soportar las cargas ejercidas por el material de almacenamiento de calor dispuesto en forma de lecho fijo de partículas en el contenedor.

La presente invención también pretende limitar los problemas asociados con la expansión térmica durante las operaciones de almacenamiento y restitución de calor, reducir los costes de fabricación del contenedor y facilitar el montaje del contenedor.

De este modo, para lograr al menos uno de los anteriores objetivos, entre otros, y superar al menos en parte las desventajas del estado de la técnica descritas anteriormente, la presente invención propone, en un primer aspecto,

un contenedor para un sistema de almacenamiento y restitución de calor, que comprende un recipiente provisto de medios de inyección y extracción de un gas que se va a refrigerar o recalentar, estando dicho recipiente delimitado por una primera envoltura de hormigón rodeada por una capa térmicamente aislante, estando dicha capa aislante rodeada por una carcasa de acero, y
comprendiendo dicho recipiente al menos dos módulos, cada módulo comprendiendo al menos:

- un primer volumen delimitado por una primera pared lateral de hormigón y una base perforada;
- un segundo volumen que rodea dicho primer volumen y está delimitado por la primera pared lateral, por una segunda pared lateral de hormigón y por la base perforada;

pudiendo contener cada uno de dichos volúmenes primero y segundo un lecho fijo de partículas de un material de almacenamiento y restitución de calor, y
estando dichos módulos dispuestos uno encima del otro de manera centrada de modo que las segundas paredes laterales formen la primera envoltura de hormigón y las primeras paredes laterales formen una segunda envoltura de hormigón, siendo la primera y segunda envolturas de hormigón y la capa aislante no estancas a la presión.

De acuerdo con una primera realización, la base perforada está formada de metal.

De acuerdo con esta primera realización, la base perforada de cada módulo puede comprender una sola rejilla de metal bordeada por la segunda pared lateral de hormigón y que soporta la primera pared lateral de hormigón.

De manera alternativa, la base perforada de cada módulo puede comprender una primera rejilla de metal bordeada por la primera pared lateral de hormigón y una segunda rejilla de metal bordeada por la primera y la segunda paredes laterales de hormigón.

De acuerdo con una segunda realización, la base perforada de cada módulo está formada de hormigón.

De acuerdo con esta segunda realización, los módulos pueden ser, de manera ventajosa, módulos de hormigón monobloques.

De manera ventajosa, el material de almacenamiento y restitución de calor está en forma de partículas de hormigón.

Preferiblemente, el contenedor tiene forma de columna, siendo la primera y la segunda paredes laterales de hormigón de los módulos cilíndricas.

Preferiblemente, el contenedor comprende orificios de equipresión en la primera y la segunda envolturas de hormigón.

Cada módulo puede comprender, además, una zona de homogeneización de gases situada debajo de la base perforada y libre de cualquier material de almacenamiento de calor.

De manera ventajosa, la conductividad térmica se encuentra comprendida entre:

- 0,1 y 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para las envolturas de hormigón,
- 0,01 y 0,17 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para la capa aislante, y
- 20 y 250 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para la carcasa de acero.

De manera ventajosa, el espesor de la capa aislante es tal que, cuando se usa para el almacenamiento de calor, la temperatura de la carcasa de acero es inferior o igual a 50 °C y en el que la capa aislante se selecciona preferiblemente de entre una capa de lana de roca, perlita, lana de vidrio, vidrio celular, una cámara de aire y, más preferiblemente, es una capa de lana de roca.

El contenedor puede comprender entre 2 y 12 módulos de hormigón.

El recipiente tiene preferiblemente un volumen comprendido entre 200 m^3 y 1.000 m^3.

El contenedor puede comprender varios recipientes montados en serie y/o en paralelo.

De acuerdo con un segundo aspecto, la invención se refiere a un sistema de almacenamiento y restitución de calor que comprende al menos un contenedor según la invención.

De acuerdo con un tercer aspecto, la invención se refiere a una instalación de almacenamiento de energía de aire comprimido de tipo AACAES que comprende:

- un sistema de compresión para comprimir aire durante una fase de compresión;

- un sistema de almacenamiento y restitución de calor de acuerdo con la invención para almacenar el calor del aire comprimido durante la fase de compresión y para restituir el calor al aire comprimido durante una fase de expansión;
- un depósito de almacenamiento final para el aire comprimido por el sistema de compresión y refrigerado por el sistema de almacenamiento y restitución de calor;
- un dispositivo de expansión del aire comprimido del depósito de almacenamiento final durante la fase de expansión.

De acuerdo con una realización, el depósito final tiene un volumen comprendido entre 1.000 m^3 y 7.000 m^3 y el recipiente de dicho al menos un contenedor del sistema de almacenamiento y restitución de calor tiene un volumen comprendido entre 200 m^3 y 1.000 m^3, comprendido el sistema de almacenamiento y restitución de calor preferiblemente al menos tres contenedores.

De acuerdo con un cuarto aspecto, la invención se refiere a un procedimiento de montaje de un contenedor según la invención, que comprende:

- la instalación de la carcasa de acero sin tapa de cobertura en el sitio de montaje del contenedor, estando la carcasa de acero dispuesta sobre un soporte;
- el montaje de los módulos, la instalación de la capa aislante y el relleno de los módulos con el material de almacenamiento de calor, mediante la inserción sucesiva de los módulos en la carcasa de acero de manera centrada para formar la primera envoltura de hormigón y la segunda envoltura de hormigón;
- el cierre del contenedor mediante el ensamblaje de la carcasa de acero con una cubierta de acero previamente aislada térmicamente, de preferencia mediante soldadura.

De acuerdo con una realización, el primer volumen y el segundo volumen del módulo se rellenan con el material de almacenamiento de calor para crear dos lechos fijos de partículas una vez que dicho módulo se has insertado en la carcasa de acero.

De manera alternativa, el primer volumen y el segundo volumen del módulo se pueden rellenar con el material de almacenamiento de calor para crear dos lechos fijos de partículas antes de la inserción de dicho módulo en la carcasa de acero.

Otros objetos y ventajas de la invención aparecerán a partir de la lectura de la siguiente descripción de ejemplos de realizaciones particulares de la invención, dados a modo de ejemplos no limitativos, realizándose la descripción con referencia a los dibujos anexos descritos a continuación.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es un diagrama que ilustra el principio de un procedimiento AACAES en el que se implementa un sistema de almacenamiento y restitución de calor (TES) de acuerdo con una realización no limitativa de la invención.
La figura 2 es un diagrama de un contenedor de TES de acuerdo con una primera realización de la invención, en la que los módulos de hormigón del contenedor comprenden una base perforada formada de metal.
La figura 3 es un diagrama de un contenedor de TES de acuerdo con una variante de la primera realización de la invención.
La figura 4 es un diagrama de un contenedor de TES de acuerdo con una segunda realización de la invención, en la que los módulos del contenedor comprenden una base perforada formada de hormigón.
La figura 5A es un diagrama de un módulo del contenedor de TES de acuerdo con la primera realización ilustrada en la figura 2. Las figuras 5B y 5C ilustran un detalle de dicho módulo.
La figura 6 es un diagrama de un módulo del contenedor de TES de acuerdo con la variante de la primera realización ilustrada en la figura 3.
La figura 7 es un diagrama de un módulo de hormigón del contenedor de TES de acuerdo con la segunda realización ilustrada en la figura 4.
Las figuras 8A y 8B son vistas en 3D del módulo de hormigón que se muestra en la figura 7.
La figura 9 es un diagrama de un módulo de hormigón del contenedor de TES de acuerdo con una variante de la segunda realización ilustrada en la figura 4.
La figura 10 es un diagrama de una parte de un contenedor de TES de acuerdo con una variante de la primera realización con módulos que comprenden espacios de homogeneización de gases.
La figura 11 es un diagrama que ilustra un ejemplo de ensamblaje del contenedor de TES mostrado en la figura 4.
La figura 12 es un gráfico que ilustra la evolución de la temperatura a través de la pared de múltiples capas del contenedor de TES ilustrado en la figura 2.
La figura 13 es una vista en 3D de un primer ejemplo de carcasa de acero de un contenedor de TES de acuerdo con la invención.
La figura 14 es una vista en 3D de un segundo ejemplo de carcasa de acero de un contenedor de TES de acuerdo con la invención.

La figura 15 es una vista en 3D de un tercer ejemplo de carcasa de acero de un contenedor de TES de acuerdo con la invención.

En las figuras, las mismas referencias designan elementos idénticos o similares.

Descripción detallada de la invención

La presente invención se refiere a un contenedor de un sistema de almacenamiento y restitución de calor (TES) que tiene una estructura reforzada por la presencia de una doble envoltura de hormigón.

La figura 1 ilustra esquemáticamente el principio de funcionamiento de una instalación AACAES que comprende un sistema de almacenamiento y restitución de calor (TES) de acuerdo con la invención. Las características del contenedor de TES de acuerdo con la invención no se muestran en esta figura y se describen más adelante, en particular en relación con las figuras 2 a 15.

En la figura 1, la instalación AACAES 100 incluye un sistema de compresión 20 de aire, un sistema de expansión 30 de aire, un sistema de almacenamiento y restitución del calor del aire llamado TES 40 y un depósito final 10 para almacenar el aire comprimido.

El TES de acuerdo con la invención es adecuado para cualquier tipo de gas, en particular el aire. En este caso, el aire entrante utilizado para la compresión puede tomarse del aire ambiente y el aire saliente después de la expansión puede liberarse en el aire ambiente. En el resto de la descripción, solo se describirá la variante de realización con aire comprimido. Sin embargo, se puede emplear cualquier otro gas que no sea aire en el contenedor de TES de acuerdo con la invención.

El tren de compresión 20 incluye tres etapas de compresión, cada una de las cuales comprende un compresor (21, 22, 23). El número de etapas de compresión depende de las tecnologías y los rendimientos de los compresores y, preferiblemente, comprende de uno a seis compresores. El tren de compresión es necesario para obtener la presión deseada del aire que se almacena en el depósito 10. Preferiblemente, la presión del aire comprimido en el depósito final 10 está comprendida entre 50 bares y 300 bares. Los compresores, por ejemplo, son accionados por un motor M, en particular un motor eléctrico.

El sistema de expansión 30 de aire comprende tres etapas de turbinas. Las tres turbinas 31, 32 y 33 se utilizan para expandir el aire y generar energía eléctrica. Las turbinas están normalmente conectadas a un generador de electricidad G. El número de etapas de expansión es preferiblemente idéntico al del tren de compresión.

Normalmente, el número de turbinas es igual al número de contenedores de TES y el número de compresores es mayor o igual al número de contenedores de TES.

Se requiere un contenedor de TES por etapa de compresión. Por lo tanto, el TES 40 comprende tres contenedores (41, 42, 43). Cada contenedor incluye un recipiente que define un volumen que comprende al menos un lecho fijo de partículas de un material de almacenamiento de calor y está diseñado para soportar altas presiones y temperaturas moderadas. El material de almacenamiento de calor es capaz de almacenar las calorías del aire que pasa a través del contenedor y entra en contacto con dicho material, y de restituir ese calor al aire que pasa a través del contenedor en otro momento. Estos contenedores se describen en detalle más adelante en la descripción.

Durante la fase de compresión, también denominada fase de almacenamiento o fase de carga, el aire caliente producido por la compresión en un compresor (21, 22, 23) es admitido en un contenedor de TES (41, 42, 43) y sale a baja temperatura para someterse a la siguiente etapa de compresión o almacenarse en el depósito final 10. De este modo, el aire 1 entra en el compresor 21 a una temperatura T_0 y una presión P_0, por ejemplo, a 25 °C (temperatura ambiente) y a presión atmosférica. El aire se comprime en el compresor 21 y se calienta debido a la compresión, y sale a una temperatura T_1 y a una presión P_1 más altas que las iniciales (T_0, P_0), por ejemplo, a aproximadamente 260 °C y aproximadamente 6 bares. El aire comprimido y calentado entra luego en el contenedor 41 y pasa a través del material de almacenamiento de calor con el que intercambia calorías y sale refrigerado, a una temperatura T_2, por ejemplo, a aproximadamente 100 °C. Este aire refrigerado se puede enfriar opcionalmente en un dispositivo de ventilación 51 colocado a la salida del contenedor de TES 41 para alcanzar una temperatura T_3 por debajo de la temperatura T_2, aproximándose a la temperatura ambiente. La temperatura T_3 es, por ejemplo, igual a aproximadamente 50 °C. Por lo tanto, la instalación AACAES puede comprender al menos un dispositivo de refrigeración de aire adicional, diferente de los contenedores de TES, por ejemplo de tipo ventilador, para reducir la temperatura del aire que sale de cada contenedor de TES y comprende, preferiblemente, tantos dispositivos de refrigeración adicionales, por ejemplo de tipo de ventilador, como contenedores de TES, cada uno de los cuales se coloca en la línea de aire que sale del contenedor de TES y entra en el compresor en una etapa de compresión o entra en el depósito final 10. El aire opcionalmente refrigerado en el ventilador 51 se envía luego al compresor 22, para sufrir una nueva compresión y un aumento de temperatura asociado y sale a una presión P_2 superior a la presión P_1, por ejemplo, a una presión de aproximadamente 30 bares y a la temperatura T_1. El aire a la temperatura T_1 y la presión P_2 se envía luego al contenedor de TES 42 donde se refrigera de la misma manera que en el

contenedor 41. El aire que sale del contenedor 42 a la temperatura T_2, opcionalmente se refrigera aún más en el ventilador 52 a la temperatura T_3, antes de enviarse al último compresor 23. El aire comprimido a la salida del compresor 23 tiene una presión P_3 superior a la presión P_2, por ejemplo, es aproximadamente de 125 bares y está a la temperatura T_1. Se envía al contenedor de TES 43, luego opcionalmente a un ventilador 53, para ser enviado finalmente (aire 2) y almacenado en el depósito de almacenamiento de aire final 10, a una temperatura de almacenamiento T_f, que es sustancialmente igual a la temperatura en la salida del último contenedor de TES 43 u, opcionalmente, a la temperatura T_3 en la salida del último ventilador 53, por ejemplo, igual a aproximadamente 50 °C y preferiblemente igual a la temperatura ambiente, y una presión de almacenamiento P_f, que es sustancialmente igual a la presión P_3 en la salida del último compresor 23 (modula la pérdida de carga al final del paso a través del contenedor de TES y opcionalmente a través del ventilador), por ejemplo, alrededor de 125 bares.

Durante la fase de expansión, también llamada fase de extracción o fase de descarga, el aire frío, producido durante la expansión en una turbina, es admitido en el contenedor del TES (41, 42, 43) para transferir al mismo el calor almacenado. De este modo, el aire 3 que sale del depósito 10 a la temperatura de almacenamiento T_f y a la presión de almacenamiento P_f entra en el contenedor de TES 43 donde se recalienta en contacto con el material de almacenamiento de calor que restituye el calor recogido durante la fase de almacenamiento. El aire recalentado luego se envía a la turbina 31, se somete una expansión y, por lo tanto, también a una refrigeración. En la salida de la turbina 31, el aire refrigerado se envía al contenedor de TES 42 para ser recalentado, como en el contenedor 43, luego se somete nuevamente a una expansión y refrigeración, por su paso a través de la turbina 32. Antes de su entrada en la tercera etapa de expansión por la turbina 33, el aire que sale de la turbina 32 se envía al contenedor de TES 41 para someterse a un recalentamiento final.

Gracias al TES, el calor formado durante la fase de compresión del aire se almacena, de manera ventajosa, en los contenedores de TES y es restituido durante la fase de expansión del aire comprimido, lo que garantiza un rendimiento de la instalación óptimo al limitar la pérdida de calorías durante el procedimiento. Para maximizar el rendimiento y garantizar un sistema adiabático, el contenedor de TES debe limitar al máximo la transferencia de calor hacia el exterior. Cada contenedor de TES tiene preferiblemente un volumen comprendido entre 200 m^3 y 1.000 m^3, normalmente seleccionado según la energía que se va a almacenar. El contenedor de TES de acuerdo con la invención se puede utilizar con independencia del tamaño de la instalación AACAES. El volumen del contenedor y la cantidad de contenedores se seleccionan en función del tamaño del sistema AACAES previsto. El flujo de aire que entra y sale del contenedor de TES depende de la etapa en la que se coloca el contenedor y, en particular, depende de la presión y, preferiblemente, está comprendido entre 20 y 200 m^3/h. Preferiblemente, la temperatura del material de almacenamiento está comprendida entre la temperatura ambiente, es decir, aproximadamente 25 °C, y 300 °C y, de preferencia, entre la temperatura ambiente y 260 °C.

En la instalación mostrada esquemáticamente en la figura 1, el contenedor de TES 43, es decir, el contenedor de TES desde el cual se envía aire al depósito final 10, es el dispositivo de almacenamiento de calor que impone la mayor cantidad de restricciones sobre el dimensionamiento del TES. De hecho, es el que soporta las mayores restricciones relacionadas con la compresión del aire. En el ejemplo dado e ilustrado en la figura 1, el contenedor de TES 43 tiene las siguientes características:

- es capaz de contener un aire que tiene una temperatura máxima de aproximadamente 260 °C;
- puede ser operado a una presión máxima de 125 bares;
- contiene 336 m^3 de un material de almacenamiento de calor;
- el material de almacenamiento de calor que contiene tiene una densidad de 2400 kg/m^3, que conduce, por ejemplo, a una densidad aparente de 1200 kg/m^3, suponiendo un porcentaje de vacío del 50 %;
- el material de almacenamiento que contiene se presenta en forma de cuentas de 10 mm de diámetro.

En la figura 1 se muestran varias unidades de almacenamiento de aire comprimido que forman el depósito de almacenamiento de aire final 10, sin que esto constituya una limitación. El depósito de almacenamiento de aire comprimido 10 puede, de hecho, estar compuesto por una o más unidades de almacenamiento de aire, por ejemplo, uno o más tanques, un sistema de tuberías o una o más cavidades subterráneas. El volumen total del depósito 10 puede estar entre 1.000 m^3 y 7.000 m^3 en el caso de las instalaciones AACAES de tamaño modesto y puede ser de hasta 100.000 m^3 en función de las aplicaciones previstas.

El sistema AACAES que comprende un contenedor de TES de acuerdo con la invención no está limitado al ejemplo de la figura 1. Se pueden contemplar otras configuraciones, incluyendo un número diferente de etapas de compresión y/o expansión, la utilización de medios reversibles que garanticen la compresión y la expansión para limitar el número de dispositivos utilizados en el sistema y, por lo tanto, asegurar un aumento de peso y volumen del sistema, etc.

La figura 2 representa una sección esquemática longitudinal de un contenedor de TES de acuerdo con una primera realización de la invención. Solo se muestra la mitad del contenedor, siendo la otra parte simétrica.

El contenedor de TES 200 es un recipiente, que normalmente tiene forma de columna dispuesta de manera sustancialmente vertical, por ejemplo, en un soporte 208 como el suelo, una losa de hormigón o cualquier soporte

apropiado para el peso del contenedor, que comprende preferiblemente en su parte superior y en su base, los medios de inyección y extracción 201/202 de un gas que se va a refrigerar o recalentar, normalmente el aire. En la figura, las flechas ilustran la circulación del gas en el contenedor de TES durante dos fases distintas de funcionamiento del contenedor, normalmente una fase de carga (fase de compresión de gas con almacenamiento de calor en el TES) y una fase de descarga (expansión de gas con restitución del calor al gas) en un procedimiento AACAES. El contenedor de TES no se limita a la geometría cilíndrica del recipiente, sino que también puede tener otra forma, tal como forma de paralelepípedo. Se proporciona un sistema de tuberías (no mostrado) para disponer el contenedor en comunicación de fluidos con los otros dispositivos de la instalación AACAES (compresores, turbinas, etc.), que pueden estar en parte ubicados subterráneamente.

El contenedor 200 comprende al menos dos módulos 210 dispuestos uno encima del otro y, preferiblemente, una sucesión de varios módulos 210 dispuestos uno encima del otro como se muestra en la figura 2. Por ejemplo, el contenedor de acuerdo con la invención comprende entre 2 y 12 módulos 210, preferiblemente entre 3 y 5 módulos 210. Los módulos 210 están posicionados de manera centrada. El centro de cada módulo se encuentra en el eje principal de extensión del recipiente (que se muestra en líneas discontinuas en la figura 2) y todos los módulos son sustancialmente idénticos. La figura 5A ilustra esquemáticamente tal módulo 210 en sección. En cuanto a la figura 2, solo se muestra la mitad del módulo, siendo la otra mitad idéntica por simetría. Cada módulo 210 comprende dos paredes laterales de hormigón 218 y 211 y una base perforada 205. La primera pared lateral de hormigón 218 delimita con la base perforada un primer volumen 217 del módulo 210, y la segunda pared lateral de hormigón 211 delimita con la primera pared lateral de hormigón 218 y la base perforada 205 un segundo volumen 216 del módulo 210. El módulo 210 comprende, de este modo, dos volúmenes, el segundo volumen 216 rodeando al primer volumen 217, que están adaptados para recibir un material de almacenamiento y restitución de calor 207 en forma de partículas que forman un lecho fijo de partículas en cada volumen 217 y 216 del módulo 210 (no mostrado en la figura 5A). La presencia de una doble envoltura de hormigón permite distribuir las fuerzas dentro de la estructura del contenedor.

La base perforada 205 del módulo 210 está formada de metal de acuerdo con esta primera realización. Puede ser de hormigón de acuerdo con otras realizaciones descritas a continuación. De acuerdo con esta primera realización, la base perforada 205 es normalmente una placa de metal que comprende aberturas 212 cuyo tamaño es inferior al de las partículas del material de almacenamiento de calor a fin de retener el material de almacenamiento de calor, mientras permite que el gas pase a través del contenedor. Esta rejilla de metal 205 está bordeada por la segunda pared lateral de hormigón 211 y sirve de soporte para la primera pared lateral de hormigón 218. La segunda pared lateral de hormigón 211 se puede moldear en la periferia de la rejilla de metal 205 para proporcionar una unión de empotramiento 221 (figura 5B). De manera alternativa, la rejilla de metal 205 puede apoyarse en un reborde 222 de la segunda pared lateral de hormigón 211 (figura 5C), lo que facilita las operaciones de mantenimiento.

Preferiblemente, las paredes laterales de hormigón (218, 211) de los módulos tienen un espesor comprendido entre 50 mm y 500 mm. Preferiblemente, la base perforada 205 de metal tiene un espesor comprendido entre 100 y 300 mm.

Cada módulo 210 tiene preferiblemente una forma cilíndrica, lo que da como resultado un contenedor en forma de columna. En este caso, las paredes laterales de hormigón 218 y 211 son cilíndricas. Sin embargo, el módulo puede tener otra forma, por ejemplo, forma de paralelepípedo.

El contenedor 200 comprende así una pluralidad de lechos fijos (al menos cuatro) de partículas de materiales de almacenamiento y restitución de calor 207, estando dispuestos dos lechos en un módulo 210. Por lecho fijo de partículas se entiende un conjunto partículas dispuestas de manera aleatoria, que no son móviles ni fluidizadas.

Los módulos 210 forman una primera envoltura de hormigón 203 del contenedor 200, así como una segunda envoltura de hormigón 215, interior a la primera envoltura 203, es decir, incluida en el espacio interior del recipiente formado por la primera envoltura 203. Más específicamente, la primera envoltura de hormigón 203 está formada por el conjunto de las paredes laterales 211 de los módulos 210, y la segunda envoltura de hormigón215 está formada por el conjunto de las paredes laterales 218 de los módulos 210. La primera envoltura de hormigón 203 está rodeada por una capa térmicamente aislante 206, a su vez rodeada por una carcasa de acero 204. La envoltura de hormigón 203 está en contacto con la capa aislante 206, que a su vez está en contacto con la carcasa de acero 204.

La envoltura de hormigón 203 tiene preferiblemente un espesor comprendido entre 50 mm y 500 mm, por ejemplo, un espesor de 100 mm. La envoltura de hormigón 203 puede contener el material de almacenamiento que puede estar a una temperatura de hasta 300 °C, por ejemplo, una temperatura comprendida entre la temperatura ambiente (20 °C) y 300 °C, preferiblemente comprendida entre 20 °C y 260 °C. La envoltura de hormigón 203 también puede soportar las cargas ejercidas por el material de almacenamiento de calor, en particular las cargas relacionadas con el peso del material de almacenamiento, que pueden ser de varios cientos de toneladas. El material de almacenamiento y la primera envoltura de hormigón 203 están contenidos en una carcasa de acero 204, separada de la primera envoltura 203 por la capa térmicamente aislante 206. Las envolturas de hormigón (203, 215) y la capa aislante 206 no son estancas a la presión, es decir, no hay diferencia en la presión en cada lado de cada envoltura de hormigón y de la capa aislante. Por lo tanto, la carcasa de acero absorbe la presión interna del contenedor. Por

presión interna del contenedor se entiende la presión del aire durante el funcionamiento. De esta manera, la primera envoltura 203 está en equipresión y la carcasa de acero se somete solo a la fuerza debida a esta presión interna. El contenedor 200 comprende preferiblemente al menos un orificio de equipresión 209, que es una abertura en la envoltura 203 que forma un paso entre el interior del recipiente y la capa aislante 206, para transmitir la presión interna del recipiente a la carcasa de acero 204. Preferiblemente, el contenedor 200 tiene varios orificios de equipresión 209, por ejemplo, dispuestos en las paredes laterales de cada módulo de hormigón 210.

La primera envoltura de hormigón 203 se somete principalmente a fuerzas de compresión en condiciones de temperatura moderada, generalmente de hasta aproximadamente 300 °C. Las paredes laterales de los módulos 210 pueden consistir en hormigón ordinario o de alto rendimiento (HAR), que puede someterse a este tipo de cargas sin una degradación significativa de sus rendimientos mecánicos a las temperaturas operativas previstas. También se puede utilizar hormigón refractario y hormigón armado. La conductividad térmica de las envolturas de hormigón 203 está preferiblemente comprendida entre 0,1 y 2 $\mu m^{-1}.K^{-1}$.

La presencia de una doble envoltura de hormigón (215 y 203) permite distribuir las fuerzas dentro de la estructura del contenedor. La doble envoltura de hormigón permite que el contenedor resista mejor los esfuerzos mecánicos ejercidos por el material de almacenamiento de calor 207. El posicionamiento de la envoltura 215 se puede realizar por medio de un tope portado por la placa 205.

La capa aislante 206 permite limitar la temperatura de funcionamiento de la carcasa de acero al limitar la transferencia de calor. La capa aislante 206 también permite facilitar el dimensionamiento de la carcasa de acero permitiendo una carga a baja temperatura, en particular un dimensionamiento con una temperatura que puede ser igual o inferior a 50 °C, o incluso próxima a la temperatura ambiente en lugar de un dimensionamiento a una temperatura máxima de funcionamiento de 300 °C. El espesor de la capa aislante es preferiblemente tal que, durante el uso, la temperatura de la carcasa de acero es inferior o igual a 50 °C. La capa aislante 206 no es estanca a la presión. Esta permeabilidad a la presión permite el funcionamiento en equipresión gracias a la transmisión de la presión a la carcasa de acero 204. Preferiblemente, la capa aislante tiene una porosidad tal que no es estanca a la presión. La conductividad térmica de la capa aislante 206 está preferiblemente comprendida entre 0,01 y 0,17 $W.m^{-1}.K^{-1}$. La capa aislante 206 tiene preferiblemente un espesor comprendido entre 50 mm y 400 mm, por ejemplo, un espesor de 100 mm. El espesor de la capa aislante 206 se puede reducir al seleccionar un hormigón refractario para formar los módulos de hormigón 210 (conductividad térmica reducida de un hormigón refractario, normalmente dividido entre dos en comparación con un hormigón reforzado ordinario). El espesor de la capa aislante también depende de la naturaleza del material seleccionado para formar esta capa. La capa aislante es preferiblemente una capa de lana de roca. También se pueden usar otros materiales para formar la capa aislante 206, tales como perlita, lana de vidrio, vidrio celular, una cámara de aire.

La carcasa de acero 204, que constituye la envoltura exterior del contenedor 200, permite resistir la presión interna del contenedor. Su espesor depende del requerimiento de presión. Preferiblemente, el espesor de la carcasa de acero no excede los 300 mm para ser compatible con los medios de fabricación conocidos hasta la fecha (forja, laminación y soldadura). La conductividad térmica de la carcasa de acero 204 está preferiblemente comprendida entre 20 y 250 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Se pueden utilizar varios aceros para fabricar la carcasa 204. Normalmente, la carcasa está formada de acero de uso general sin alear, tal como el acero P355GH.

La estructura tipo sándwich formada por la sucesión, desde el interior hasta el exterior del contenedor 200, de la primera envoltura de hormigón 203, la capa aislante 206 y la carcasa de acero 204, permite:

- desacoplar las cargas de recuperación de peso del material de almacenamiento y de la presión interna. Se dedica una estructura limpia a cada requerimiento: el peso del material de almacenamiento es soportado por la primera envoltura de hormigón 203 (ayudada por la segunda envoltura de hormigón 215) y la presión interna es soportada por la carcasa de acero 204;
- realizar el dimensionamiento de la carcasa de acero a temperatura ambiente por medio de la capa aislante, lo que permite reducir el espesor de la carcasa de acero, lo que da como resultado una ganancia significativa de la masa de acero utilizada y, en consecuencia, una reducción de costes, en comparación con el dimensionamiento para una temperatura del orden de 300 °C, pero también permite obtener espesores compatibles con los medios de producción de la carcasa de acero. De hecho, fabricar un contenedor de TES que comprenda un recipiente de acero que tenga una temperatura de funcionamiento muy superior a 50 °C, por ejemplo, de 260 °C, para las altas presiones previstas, representa un desafío tecnológico, en particular para un diámetro de depósito superior a 1 m. Por lo general, al usar un acero como el que se usa habitualmente para formar equipos presurizados (ESP), por ejemplo, un acero tipo P355GH, el espesor de la pared de acero alcanza un mínimo de 150 mm. Esto constituye un límite de fabricación que complica la conformación del acero, el montaje mediante soldadura y también el transporte, ya que la masa de los depósitos puede alcanzar varios cientos de toneladas;
- fabricar depósitos de mayor diámetro, normalmente del orden de 4 m.

De manera ventajosa, dado que los módulos 210 comprenden paredes laterales de hormigón (218, 211) que es un material capaz de almacenar el calor del gas que pasa a través del contenedor, los módulos 210 como tales participan activamente en el almacenamiento de calor en el contenedor de TES. De este modo, es posible aumentar

la capacidad de almacenamiento de calor del contenedor de TES inicialmente vinculada al único material de almacenamiento de calor en forma de partículas en lechos fijos y/o reducir la masa de material de almacenamiento en el contenedor para la misma capacidad de almacenamiento de calor.

Por lo tanto, el módulo 210 tiene varias funciones, en particular las de formar el recipiente del contenedor, participar en el almacenamiento y la restitución de calor, actuar como soporte para el material granular de almacenamiento de calor y garantizar una buena distribución del material granular de almacenamiento de calor en el contenedor, que mejora los intercambios de calor entre el gas y las partículas del material de almacenamiento con el gas y que evita la sedimentación en el fondo del contenedor, lo que podría debilitar la estructura del contenedor.

El material de almacenamiento de calor está en forma de partículas dispuestas de manera tal que forman dos lechos fijos en cada módulo 210, o un lecho fijo en cada uno de los volúmenes 217 y 216 formados en el módulo 210. El material de almacenamiento de calor es, por lo tanto, un material granular capaz de almacenar y restituir el calor, que puede ser, sin limitarse a, hormigón, cerámica, amianto, grava.

La forma y el tamaño de las partículas pueden variar, y estos parámetros se seleccionan de manera tal que garanticen el paso del aire a través del lecho y aseguren un contacto eficaz entre el gas y las partículas a fin de optimizar los intercambios de calor. De preferencia, las partículas son sustancialmente esféricas y tienen un diámetro medio comprendido entre 1 y 20 mm.

De acuerdo con una configuración, las partículas del material de almacenamiento de calor se forman de hormigón. El uso del mismo material para las partículas y para al menos una parte de los módulos 210 (las paredes laterales) permite minimizar los problemas relacionados con las diferencias de expansión térmica entre el material de almacenamiento de calor y los módulos 210 que contienen dicho material.

Las partículas, normalmente cuentas, del material de almacenamiento de calor se dimensionan preferiblemente de manera que tengan en consideración la expansión térmica de las partículas y la de los módulos durante el funcionamiento del contenedor, en particular para evitar cualquier fenómeno de bloqueo. A medida que aumenta la temperatura en el recipiente, los módulos se expanden y, en consecuencia, el material de almacenamiento de calor granular puede completar el aumento de volumen. Cuando se produce una fase de enfriamiento, el diámetro de los módulos disminuye y los módulos pueden comprimir el material granular y, por lo tanto, generar cargas perjudiciales para la estructura.

Por ejemplo, el material de almacenamiento de calor está formado de hormigón y está en forma de cuentas con un diámetro superior o igual a 10 mm.

El contenedor 200 de acuerdo con la invención permite almacenar el calor proveniente de un gas caliente, realizándose el almacenamiento mediante las partículas de material de almacenamiento de calor 207. El contenedor también permite restituir el calor almacenado en las partículas a un gas frio. El gas entra o sale del contenedor 200 por sus extremos, al nivel de los medios de inyección y extracción 201/202, e intercambia calor con las partículas del material de almacenamiento y restitución del calor 207 que se disponen en forma de lechos que permiten el paso del gas a través de los mismos. El paso del fluido en el lecho fijo de partículas es sustancialmente axial, es decir, el fluido circula generalmente a lo largo del eje principal definido entre los puntos de entrada y salida del gas en el contenedor 200, normalmente ubicados en dos extremos opuestos del contenedor 200. Por lo general, el paso del gas es sustancialmente vertical. De acuerdo con esta configuración, durante la carga, el fluido entra caliente, a una temperatura T_1, por la parte superior del contenedor y sale frío (refrigerado por las partículas que almacenan una parte del calor del gas) a una temperatura T_2 ($T_2<T_1$), por la base del contenedor. Para la descarga, el gas entra frío, a una temperatura T_2, por la base del contenedor, y sale caliente (calentado por las partículas que restituyen una parte del calor de las partículas) a una temperatura T_1 por la parte superior del contenedor. La configuración descrita constituye una configuración preferida en la que el contenedor comprende una zona caliente en su parte superior, debido a la entrada del gas caliente durante la fase de carga y la salida del gas recalentado durante la descarga, y una zona fría en la parte inferior debido a la salida del gas refrigerado durante la fase de carga y la entrada de gas frío durante la fase de descarga. Una zona caliente en la parte superior permite, en particular, minimizar los movimientos del aire durante una fase de espera antes de la fase de descarga. Sin embargo, el contenedor se puede utilizar en una configuración invertida en la que la zona caliente se sitúa en su parte inferior y la zona fría en la parte superior. En este caso, durante la fase de carga, el gas caliente que se va a refrigerar alcanza una temperatura T_1, desde la base del contenedor y sale frío, a una temperatura T_2 ($T_2<T_1$), desde la parte superior del contenedor y, durante la descarga, el gas entra frío, a una temperatura T_2, desde la parte superior del contenedor, y sale caliente a una temperatura T_1, desde la base del contenedor.

De manera ventajosa, el contenedor de TES de acuerdo con la invención puede funcionar a presiones comprendidas entre 1 bar y 300 bares, en particular entre 100 bares y 300 bares, y más particularmente entre 100 y 150 bares, y a temperaturas comprendidas entre la temperatura ambiente, generalmente de 20 °C a 300 °C, preferiblemente entre la temperatura ambiente y 260 °C.

De acuerdo con una configuración particular, el contenedor de TES no forma un solo depósito sino que comprende varios recipientes definidos, cada uno, como se ha descrito anteriormente para el recipiente del contenedor de TES ilustrado en la figura 2, es decir, que comprende, preferiblemente en su parte superior y su base, medios de inyección y de extracción del gas, estando cada recipiente delimitado por una primera envoltura de hormigón rodeada por una capa térmicamente aislante, a su vez rodeada por una carcasa de acero. Cada recipiente comprende al menos dos módulos de hormigón dispuestos uno encima del otro de manera centrada para formar la primera envoltura de hormigón y una segunda envoltura de hormigón. Cada módulo de hormigón comprende al menos un primer volumen delimitado por una primera pared lateral de hormigón y una base perforada y un segundo volumen que rodea al primer volumen y está delimitado por la primera pared lateral, por una segunda pared lateral de hormigón y por la base perforada. El volumen primero y segundo contienen cada uno un lecho fijo de partículas de un material de almacenamiento y restitución de calor. Los diferentes recipientes están en comunicación de fluidos y montados en serie y/o en paralelo para formar un contenedor de TES compuesto de elementos de tamaño y peso reducidos. El montaje en serie y/o en paralelo se refiere, con respecto al gas enviado a los recipientes del contenedor de TES: en un montaje en serie, el gas pasa sucesivamente a través de los diferentes recipientes del contenedor de TES, mientras que, en un montaje en paralelo, el flujo de gas que se va a refrigerar/calentar se divide entre varias corrientes secundarias inyectadas cada una en un recipiente del contenedor de TES.

La presente invención también abarca una configuración en la que cada módulo comprende más de dos volúmenes, por ejemplo, tres o cuatro volúmenes, adaptados para recibir un lecho fijo de partículas de un material de almacenamiento y restitución de calor. En este caso, cada volumen se define entre dos paredes laterales de hormigón, una de las cuales rodea la otra. El módulo comprende entonces al menos tres paredes laterales de hormigón, preferiblemente paredes laterales cilíndricas.

El contenedor de TES de acuerdo con la invención se usa preferiblemente en un sistema AACAES tal como se describe en relación con la figura 1. Sin embargo, el uso del contenedor de TES de acuerdo con la invención no se limita al almacenamiento de energía de aire comprimido de tipo AACAES. El contenedor de TES de acuerdo con la invención también se puede usar en otras aplicaciones donde se requiere un almacenamiento y una restitución del calor de un gas, en condiciones de alta presión, por ejemplo, para uso en redes de calefacción, o en plantas de energía solar concentrada. Estas diferentes aplicaciones requieren medios de almacenamiento de energía si esta última no se consume durante la producción. Por consiguiente, la energía disponible en forma de flujo de calor puede almacenarse en un sistema de almacenamiento y restitución de calor (TES) de acuerdo con la invención que comprende al menos un contenedor tal como se describe.

Una variante de la primera realización del contenedor de TES de acuerdo con la invención se ilustra en la figura 3. Solo los módulos difieren entre la primera realización y esta variante. De acuerdo con esta variante, los módulos 310, también ilustrados en la figura 6, comprenden cada uno una base de metal perforada que comprende:

- una primera rejilla de metal 319 bordeada por la primera pared lateral de hormigón 318, y
- una segunda rejilla de metal 320 bordeada por la primera y la segunda paredes laterales de hormigón 318 y 311.

En el caso de módulos cilíndricos con paredes laterales cilíndricas, la primera rejilla de metal 319 tiene forma de disco y la segunda rejilla de metal tiene forma de anillo.

La superposición de los módulos 310 de forma centrada permite obtener la primera envoltura 303 y la segunda envoltura 315 del contenedor 300, como en la primera realización. La segunda envoltura 315 difiere de la envoltura 215 del contenedor 200 según la primera realización ilustrada en la figura 2 en que está constituida en toda su altura por el hormigón de las paredes laterales 318 de los módulos 310, mientras que en el caso del contenedor 200 ilustrado en la figura 2, la segunda envoltura de hormigón 215 es, en cierto modo, discontinua puesto que se ve interrumpida, a diferentes niveles en toda su altura, por la presencia de la rejilla única de cada módulo 210 que actúa como soporte de la pared lateral de hormigón 217 del módulo 210.

De acuerdo con esta variante, el peso de las paredes laterales 318 de los módulos no es soportado, de manera ventajosa, por la base perforada 305.

Los otros elementos del contenedor 300 ilustrados en las figuras 3 y 6 son idénticos a los del contenedor 200 ilustrados en las figuras 2 y 5, así como las ventajas asociadas a los mismos, y no se describirán de nuevo aquí. Se entenderá, en particular, que las referencias 301, 302, 304, 306, 307, 308, 309, 311, 312, 316, 317 designan elementos idénticos a aquellos con las referencias 201, 202, 203, 204, 206 a 209, 211, 212, 216 y 217.

Una segunda realización del contenedor de TES de acuerdo con la invención se ilustra en la figura 4. Solo los módulos difieren entre esta segunda realización y la primera realización (y su variante). De acuerdo con esta segunda realización, los módulos 410, también ilustrados en las figuras 7, 8A y 8B, comprenden cada uno una base perforada de hormigón 405. Los hormigones utilizados son de la misma naturaleza que los de las paredes laterales de los módulos.

La base 405 del módulo 410 es normalmente una placa de hormigón que comprende aberturas 412 cuyo tamaño es inferior al de las partículas del material de almacenamiento de calor a fin de retener el material de almacenamiento de calor, mientras que permite que el gas pase a través del contenedor. La base perforada de hormigón 405 y las paredes laterales de hormigón 411 y 418 forman tres entidades distintas, formadas por un material de la misma naturaleza, es decir, hormigón. Las paredes 411 y 418 se apoyan sobre la placa de hormigón 405. Las partes de la placa 405 que soportan las paredes 411 y 418 preferiblemente no están perforadas para asegurar un espesor de hormigón sólido para las envolturas 403 y 415 al menos igual al de las paredes 411 y 418 respectivamente. De manera alternativa a la configuración en la que la pared lateral 411 descansa sobre la placa de hormigón 405, la pared lateral 411 puede comprender una ranura en la que se aloja la periferia de la placa de hormigón 405 que constituye la base del módulo 410 (configuración visible en la vista parcial en 3D del módulo 410 de la figura 8A). En este caso, la parte de la placa 405 que se inserta en la ranura de la pared 411 preferiblemente no está perforada para asegurar un espesor de hormigón sólido al menos igual al de la pared 411 en la unión de la pared/base del módulo.

En el caso de módulos cilíndricos con paredes laterales cilíndricas, la placa de hormigón tiene forma de disco.

Los módulos 410 están formados por paredes laterales y bases constituidas del mismo material, es decir, hormigón, evitando así los problemas de expansión térmica diferencial conocidos en los dispositivos de la técnica anterior.

Además, los módulos 410 que comprenden no solo paredes laterales de hormigón (418, 411) sino también una base de hormigón perforada 405, como tales, participan activamente en el almacenamiento de calor en el contenedor de TES, ya que el hormigón es, de hecho, un material capaz de almacenar el calor del gas que pasa a través del contenedor. Por lo tanto, es posible aumentar aún más la capacidad de almacenamiento de calor del contenedor de TES inicialmente vinculada solo al material de almacenamiento de calor en forma de partículas en lechos fijos y/o reducir la masa de material de almacenamiento en el contenedor para obtener la misma capacidad de almacenamiento de calor.

Además, en el caso de que las partículas del material de almacenamiento de calor estén formadas de hormigón, el uso del mismo material para las partículas y para los módulos de hormigón 410 permite garantizar una expansión térmica sustancialmente idéntica de las partículas y de los módulos que alojan las partículas, evitando así cualquier esfuerzo mecánico adicional en el contenedor.

Los otros elementos del contenedor 400 ilustrados en las figuras 4 y 7, 8A y 8B son idénticos a los del contenedor 200 ilustrado en las figuras 2 y 5, así como las ventajas asociadas a los mismos, y no se describirán de nuevo aquí. Se entenderá, en particular, que las referencias 401, 402, 404, 406, 407, 408, 409, 411, 412, 416, 417 designan elementos idénticos a aquellos con las referencias 201, 202, 203, 204, 206 a 209, 211, 212, 216 y 217.

De acuerdo una variante de la segunda realización del contenedor de TES según la invención, los módulos son módulos de hormigón monobloques. Un módulo de hormigón monobloque de este tipo se ilustra en la figura 9. El módulo de hormigón 510 está formado por una sola pieza de hormigón, más precisamente la pared lateral de hormigón 511 y la base de hormigón perforada 505 forman una única pieza de hormigón. El módulo de hormigón 510 comprende una pared lateral 511 que se extiende a través de una base perforada 505 cuyas aberturas 512 permiten el paso del gas a través del contenedor. Preferiblemente, la pared lateral 518 también se forma como una sola pieza con el conjunto formado por la base perforada 505 y la pared lateral 511. Como en el caso del módulo 410 de hormigón, los problemas de expansión diferencial se reducen debido a la misma naturaleza del material para la base y las paredes del módulo 510 y el módulo 510, como tal, participa en el almacenamiento y la restitución del calor del gas que pasa a través del contenedor.

Esta configuración también es particularmente ventajosa para la fabricación del contenedor de TES. De hecho, todos los módulos pueden ser prefabricados y, de este modo, se puede facilitar el montaje del contenedor al apilar los módulos en una sola pieza. Los módulos también pueden rellenarse previamente con el material de almacenamiento de calor antes del ensamblaje para formar el contenedor.

De acuerdo con otra variante de la primera y segunda realizaciones del contenedor según la invención, los módulos comprenden espacios de homogeneización de gases situados debajo de las bases perforadas. Dicha configuración se ilustra en la figura 10, en el caso de un contenedor de TES de acuerdo con la variante de la primera realización que comprende módulos con dos rejillas de metal como base perforada. En la figura 10, se muestran dos módulos sucesivos del contenedor. Los elementos con las referencias 1003, 1004, 1005, 1006, 1007, 1009, 1015, 1016, 1017 designan elementos idénticos a aquellos con las referencias 303, 304, 305, 306, 307, 309, 315, 316, 317. Sus descripciones, y las ventajas asociadas a los mismos, no se repetirán aquí.

De acuerdo con esta variante de realización, cada módulo 1010 del contenedor de TES comprende una zona de homogeneización de gases 1020 colocada debajo de la base perforada 1005 y libre de cualquier material de almacenamiento de calor 1007. Tal zona permite garantizar una homogeneización de la temperatura del gas en cada etapa (módulo) en el contenedor.

La figura 11 ilustra un ejemplo no limitativo de montaje del contenedor de TES de acuerdo con la invención. Los diagramas (A) a (E) ilustran la sucesión de etapas de montaje del contenedor de TES de acuerdo con la invención. El ejemplo de un contenedor de TES de acuerdo con la segunda realización ilustrada en la figura 4 se selecciona para ilustrar el procedimiento de montaje, aplicándose este último a las otras realizaciones del TES de acuerdo con la invención. Según este ejemplo de montaje, se llevan a cabo las siguientes etapas.

Se lleva a cabo una primera etapa (diagrama (A)) de instalación en el sitio de la carcasa de acero 404 sin su tapa de cubierta 414 y de la capa aislante 406. La carcasa de acero también se puede denominar férula. La carcasa de acero 404 se deposita sobre un soporte 408, por ejemplo, el suelo.

De manera ventajosa, la carcasa de acero es prefabricada, es decir, que la fabricación de la lámina se lleva a cabo en el taller y se transporta en un solo bloque al lugar de montaje. En este caso, solo la soldadura o el ensamblaje de la cubierta 414 se realiza en el sitio de montaje después de insertar los módulos de hormigón 410 y el material de almacenamiento de calor en la carcasa de acero y colocar el aislamiento entre los módulos de hormigón y la carcasa de acero.

De manera alternativa, la carcasa de acero 404 se divide en varios elementos que se trasladan al sitio de montaje y se ensamblan mediante soldadura en el sitio.

Se lleva a cabo una segunda etapa (diagramas (B) a (C)) de montaje de los módulos de hormigón, de colocación de la capa aislante 406 y de relleno de los módulos con el material de almacenamiento de calor 407.

Una vez que se haya instalado la carcasa de acero 404, cada etapa del contenedor que comprende un módulo se monta preferiblemente de la siguiente manera, en este orden:

- colocación del módulo de hormigón. En particular, colocación de la base 405 y la pared exterior 418, y luego la pared interior 418;
- instalación del aislamiento entre la pared exterior de hormigón 418 y la carcasa de acero 404. El aislamiento puede ser normalmente lana de roca, suelta o en rollo;
- relleno del módulo de hormigón con el material de almacenamiento seleccionado 407.

El primer módulo 410 de hormigón insertado en la carcasa de acero por la parte superior abierta de la carcasa 404, se apoya sobre la base de la carcasa previamente aislada térmicamente.

Durante el montaje de los módulos sucesivos, se asegura el centrado de los módulos entre sí durante su apilamiento, para crear una pared continua de la primera envoltura de hormigón 203 y para crear la envoltura de hormigón 415.

De acuerdo con una alternativa, los módulos de hormigón 410 pueden rellenarse con el material de almacenamiento de calor 207 antes de la instalación del aislamiento 206 entre la pared de hormigón exterior 418 y la carcasa de acero 404.

De acuerdo con otra alternativa, los módulos de hormigón 410 pueden rellenarse con el material de almacenamiento de calor 407 antes de su inserción en la carcasa de acero 404.

Se lleva a cabo una tercera etapa de cierre del contenedor 400 mediante el ensamblaje de la carcasa 404 con su cubierta de acero 414 previamente aislada térmicamente, de preferencia soldando la cubierta 414 con la pared de acero de la carcasa 404.

La colocación de otros dispositivos, tales como los medios de inyección y extracción del gas, no se detalla, puesto que un experto en la materia concebirá la misma con facilidad.

La fabricación de la carcasa de acero 404 se puede llevar a cabo según diferentes técnicas:

- La carcasa de acero se puede ensamblar soldando láminas curvadas de un solo espesor. La figura 13 ilustra una carcasa de este tipo 1304, compuesta por láminas soldadas de un solo espesor 1323. Inicialmente, las láminas planas se curvan para obtener el radio del recipiente y luego se ensamblan mediante soldadura para formar la carcasa de acero que tiene una pared de una sola capa.
- La carcasa de acero también se puede ensamblar soldando láminas curvadas en múltiples capas para trabajar con espesores de lámina unitarios más pequeños que el espesor de una lámina utilizada para formar una carcasa de una sola capa. Una parte de una carcasa de este tipo se ilustra en la figura 14, donde se pueden ver varias capas 1424 de láminas que se superponen para formar la pared 1423 de la carcasa de acero. Esta técnica facilita el trabajo de conformación de la lámina. De acuerdo con esta técnica de fabricación, es posible ensamblar las capas superiores con una tensión previa con el fin de producir una carcasa de múltiples capas con ajuste por contracción en las capas externas. La compresión de las capas inferiores permite a las mismas soportar mayores

cargas o soportar una carga similar para espesores más pequeños, lo que tiene la ventaja de optimizar la cantidad de acero requerido para la construcción.

- la carcasa de acero también se puede fabricar a partir del ensamblaje, preferiblemente mediante soldadura, de láminas curvadas de un solo espesor, como la carcasa de una sola capa que se muestra en la figura 13, que están reforzadas por anillos circunferenciales. Esta técnica permite obtener una carcasa con una pared delgada y resistente a grandes requerimientos de presión. La figura 15 es un dibujo en 3D que ilustra una carcasa de este tipo formada de acero reforzado 1504 por la presencia de anillos circunferenciales 1525. La carcasa de acero tiene forma cilíndrica y comprende una pluralidad de anillos circunferenciales 1525 de refuerzo (12 en número la figura 13). Los anillos circunferenciales 1525 están fabricados preferiblemente de metal, en particular acero.

Ejemplo

A continuación, se muestra un ejemplo numérico de un contenedor de TES de acuerdo con la invención, utilizado en un sistema AACAES tal como se muestra en la figura 1 como último contenedor 43 antes del paso del gas al depósito final 10 (o primer contenedor cuando el gas sale del depósito 10).

Un contenedor de TES según la invención comprende, por ejemplo, un recipiente que comprende dos volúmenes formados por dos envolturas de hormigón 415 y 403, tal como se muestra en la figura 4, que tienen diámetros interiores respectivos de 1,8 m y 3,5 m, y un espesor de 100 mm, y que puede soportar una alta temperatura de aproximadamente 260 °C. Estas paredes de hormigón están en equipresión por medio de los orificios 409 que comprenden. Una capa aislante 406 formada de lana de roca con un espesor de 100 mm, se coloca entre la envoltura de hormigón exterior 403 y la carcasa de acero 404, lo que permite limitar la temperatura de la pared de acero de la carcasa a 50 °C. La carcasa de acero tiene un diámetro interior de 3,9 m, y tiene un espesor de 146 mm. Un contenedor de TES de este tipo desarrolla un volumen interno de 672 m^3, y puede contener 806 toneladas de un material de almacenamiento que tiene, por ejemplo, una densidad de 2400 kg/m^3 con una porosidad del 50 % (densidad aparente de 1200 kg/m^3). Se pueden proporcionar cinco etapas formadas por el apilamiento de cinco módulos de hormigón 410, de 14 m de altura cada uno, para formar el contenedor con una altura total de aproximadamente 70 m (esta altura no tiene en cuenta las dimensiones de los dispositivos en la base y en la parte superior del contenedor).

La figura 12 ilustra la evolución de la temperatura (temperatura en la ordenada en °C) en la pared de múltiples capas (radio del contenedor en la abscisa en metros) de este ejemplo de contenedor de TES de acuerdo con la invención, estando la pared formada por la envoltura de hormigón 403, la capa aislante 406 y la carcasa de acero 404. El espesor total e de la pared del contenedor de TES es de 346 mm, con un espesor de la primera capa de hormigón 403 de 100 mm, un espesor de la capa aislante 406 de 100 mm, y un espesor de la carcasa de acero 404 de 146 mm, respectivamente. Se puede observar que, con una temperatura de 260 °C en el interior del contenedor, se alcanza una temperatura inferior a 50 °C en la carcasa de acero 404.

Para la fabricación de un contenedor de TES de este tipo se requieren 270 toneladas de hormigón y 1.000 toneladas de acero.

REIVINDICACIONES

1. Contenedor (200, 300, 400) de un sistema de almacenamiento y restitución de calor (40) que comprende un recipiente provisto de medios de inyección y extracción (201/202, 301/302, 401/402) de un gas que se va a refrigerar o recalentar, estando dicho recipiente delimitado por una primera envoltura de hormigón (203, 303, 403, 1003), rodeada de una capa térmicamente aislante (206, 306, 406, 1006), estando dicha capa aislante (206, 306, 406, 1006) rodeada por una carcasa de acero (204, 304, 404, 1004), caracterizado por que dicho recipiente comprende al menos dos módulos (210, 310, 410, 510, 1010), comprendiendo cada módulo (210, 310, 410, 510, 1010) al menos:

- un primer volumen (217, 317, 417, 517, 1017) delimitado por una primera pared lateral de hormigón (218, 318, 418, 518) y una base perforada (205, 305, 405, 505, 1005);
- un segundo volumen (216, 316, 416, 516, 1016) que rodea dicho primer volumen (217, 317, 417, 517, 1017) y está delimitado por la primera pared lateral (218, 318, 418, 518), por una segundo pared lateral de hormigón (211, 311, 411, 511, 1011) y por la base perforada (205, 305, 405, 505, 1005);

estando dichos volúmenes primero y segundo adaptados para contener un lecho fijo de partículas de un material de almacenamiento y restitución de calor (207, 307, 407, 507, 1007), y
estando dichos módulos (210, 310, 410, 510, 1010) dispuestos uno encima del otro de manera centrada de modo que las segundas paredes laterales (211, 311, 411, 511, 1011) forman la primera envoltura de hormigón (203, 303, 403, 1003) y las primeras paredes laterales (218, 318, 418, 518) forman una segunda envoltura de hormigón (215, 315, 415, 1015), siendo las envolturas de hormigón primera y la capa aislante (206) no estancas a la presión.

2. Contenedor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la base perforada (205, 305) es de metal.

3. Contenedor de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la base perforada (205) de cada módulo (210) comprende una única parrilla de metal delimitada por la segunda pared lateral de hormigón (211) y que soporta la primera pared lateral de hormigón (218).

4. Contenedor de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la base perforada (305) de cada módulo (310) comprende una primera rejilla de metal (319) delimitada por la primera pared lateral de hormigón (318) y una segunda rejilla de metal (320) delimitada por la primera y la segunda paredes laterales de hormigón (318, 311).

5. El contenedor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la base perforada de cada módulo (410, 510) está formada de hormigón (405, 505).

6. Contenedor de acuerdo con la reivindicación 5, en el que los módulos (510) son módulos de hormigón monobloques.

7. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones, en el que el material de almacenamiento y restitución de calor (207) está en forma de partículas de hormigón.

8. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones en forma de columna, en el que las primeras (218, 318, 418, 518) y las segundas (211, 311, 411, 511, 1011) paredes laterales de hormigón de los módulos (210, 310, 410, 510, 1010) son cilíndricas.

9. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones, que comprende orificios de equipresión (209, 309, 409, 509, 1029) en la primera y segunda envolturas de hormigón (203, 303, 403, 1003/215, 315, 415, 1015).

10. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones, en el que cada módulo (1010) comprende además una zona de homogeneización de gases (1020) colocada debajo de la base perforada (1005) y libre de cualquier material de almacenamiento de calor (1007).

11. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones, en el que la conductividad térmica está comprendida entre:

- 0,1 y 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para las envolturas de hormigón (203,215,303,315,403,415,1003,1015)
- 0,01 y 0,17 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para la capa aislante (206, 306, 406, 1006), y
- 20 y 250 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para la carcasa de acero (204, 304, 404, 1004).

12. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones, en el que el espesor de la capa aislante (206, 306, 406, 1006) es tal que, durante el uso, la temperatura de la carcasa de acero (204, 304, 404, 1004) es inferior o igual a 50 °C y en el que la capa aislante se selecciona preferiblemente de una capa de lana de roca, perlita, lana de vidrio, vidrio celular, una cámara de aire y, más preferiblemente es una capa de lana de roca.

13. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones, que comprende entre 2 y 12 módulos de hormigón (210, 310, 410, 510, 1010).

14. Contenedor de acuerdo con una de las anteriores reivindicaciones, en el que el recipiente tiene un volumen comprendido entre 200 m^3 y 1000 m^3.

15. Contenedor de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende varios recipientes montados en serie y/o en paralelo.

16. Sistema de almacenamiento y restitución de calor (40) que comprende al menos un contenedor (200, 300, 400) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 15.

17. Instalación de almacenamiento de energía de aire comprimido de tipo AACAES (100), que comprende:

- un sistema de compresión (20) para comprimir aire durante una fase de compresión;
- un sistema de almacenamiento y restitución de calor (40) de acuerdo con la reivindicación 16 para almacenar el calor del aire comprimido durante la fase de compresión y para restituir dicho calor al aire comprimido durante una fase de expansión;
- un depósito final (10) de almacenamiento del aire comprimido por el sistema de compresión y refrigerado por el sistema de almacenamiento y restitución de calor;
- un dispositivo de expansión del aire comprimido del depósito de almacenamiento final (30) durante la fase de expansión.

18. Instalación de acuerdo con la reivindicación 17, en la que el depósito final (10) tiene un volumen comprendido entre 1.000 m^3 y 7.000 m^3 y el recipiente de dicho al menos un contenedor (200, 300, 400) del sistema de almacenamiento y restitución de calor (40) tiene un volumen comprendido entre 200 m^3 y 1.000 m^3, comprendiendo dicho sistema de almacenamiento y restitución de calor (40) preferiblemente al menos tres contenedores (200).

19. Procedimiento de montaje de un contenedor de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 15, que comprende:

- la instalación de la carcasa de acero (404) sin una tapa de cobertura (414) en el sitio de montaje del contenedor, estando dicha carcasa de acero (404) dispuesta sobre un soporte (408);
- el montaje de los módulos (410), la instalación de la capa aislante (406) y el relleno de dichos módulos (410) con el material de almacenamiento de calor (407), mediante la inserción sucesiva de dichos módulos en la carcasa de acero (404) de manera centrada para formar la primera envoltura de hormigón (403) y la segunda envoltura de hormigón (415);
- el cierre del contenedor (400) mediante el ensamblaje de la carcasa de acero (404) con una cubierta de acero (414) previamente aislada térmicamente, de preferencia mediante soldadura.

20. Procedimiento de montaje de acuerdo con la anterior reivindicación, en el que el primer volumen (417) y el segundo volumen (416) del módulo (410) se rellenan con el material de almacenamiento de calor (407) para crear dos lechos fijos de partículas una vez que dicho módulo (410) ha sido insertado en la carcasa de acero (404).

21. Procedimiento de montaje de acuerdo con la reivindicación 19, en el que el primer volumen (417) y el segundo volumen (416) del módulo (410) se rellenan con el material de almacenamiento de calor (407) para crear dos lechos fijos de partículas antes de la inserción de dicho módulo (410) en la carcasa de acero (404).

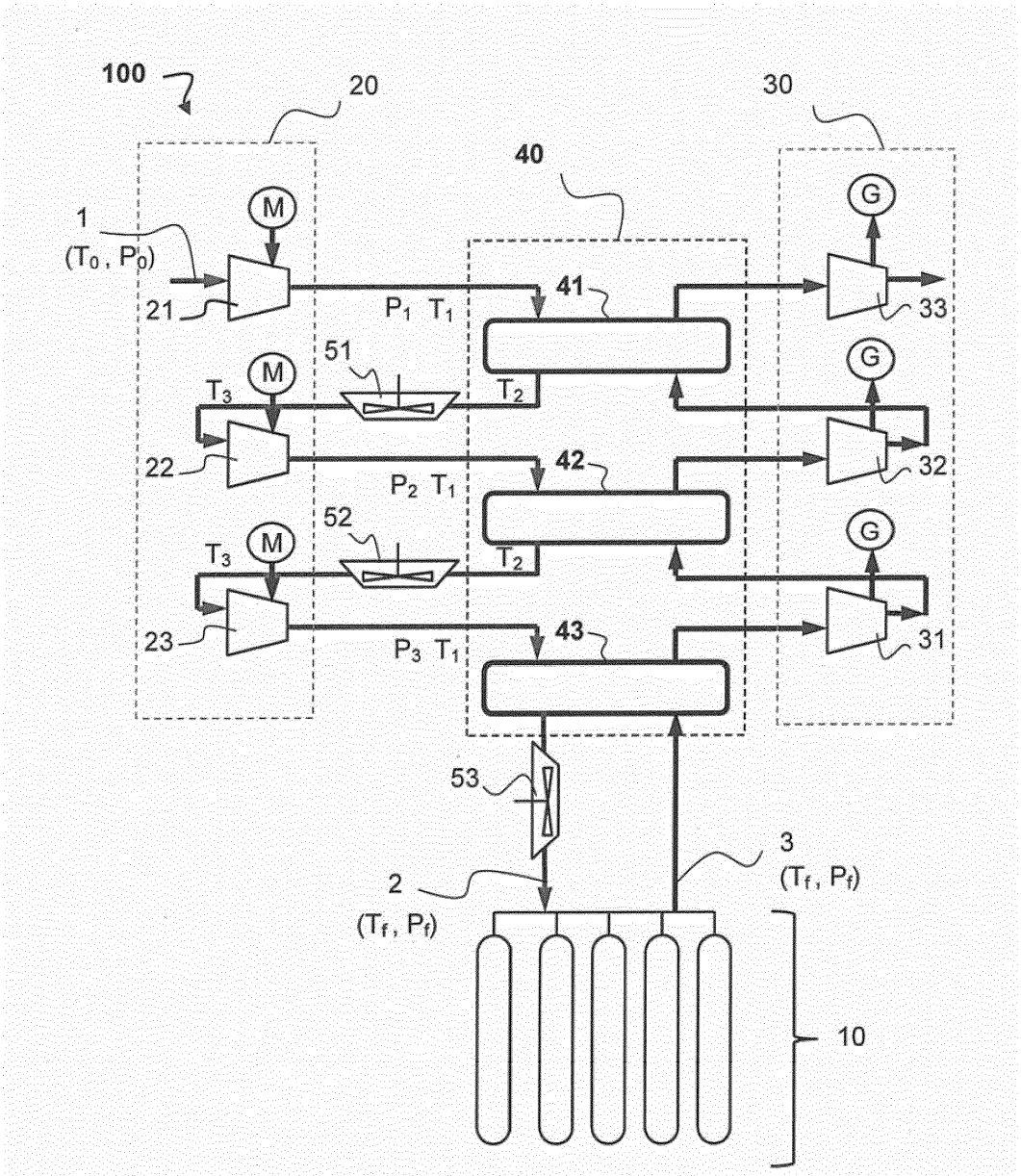

100
20
30
40
1
(T0 , P0)
M
G
21
P1 T1
41
33
51
T3
T2
22
P2 T1
42
32
52
23
P3 T1
43
31
53
2
(Tf , Pf)
3
(Tf , Pf)
10

FIG. 1

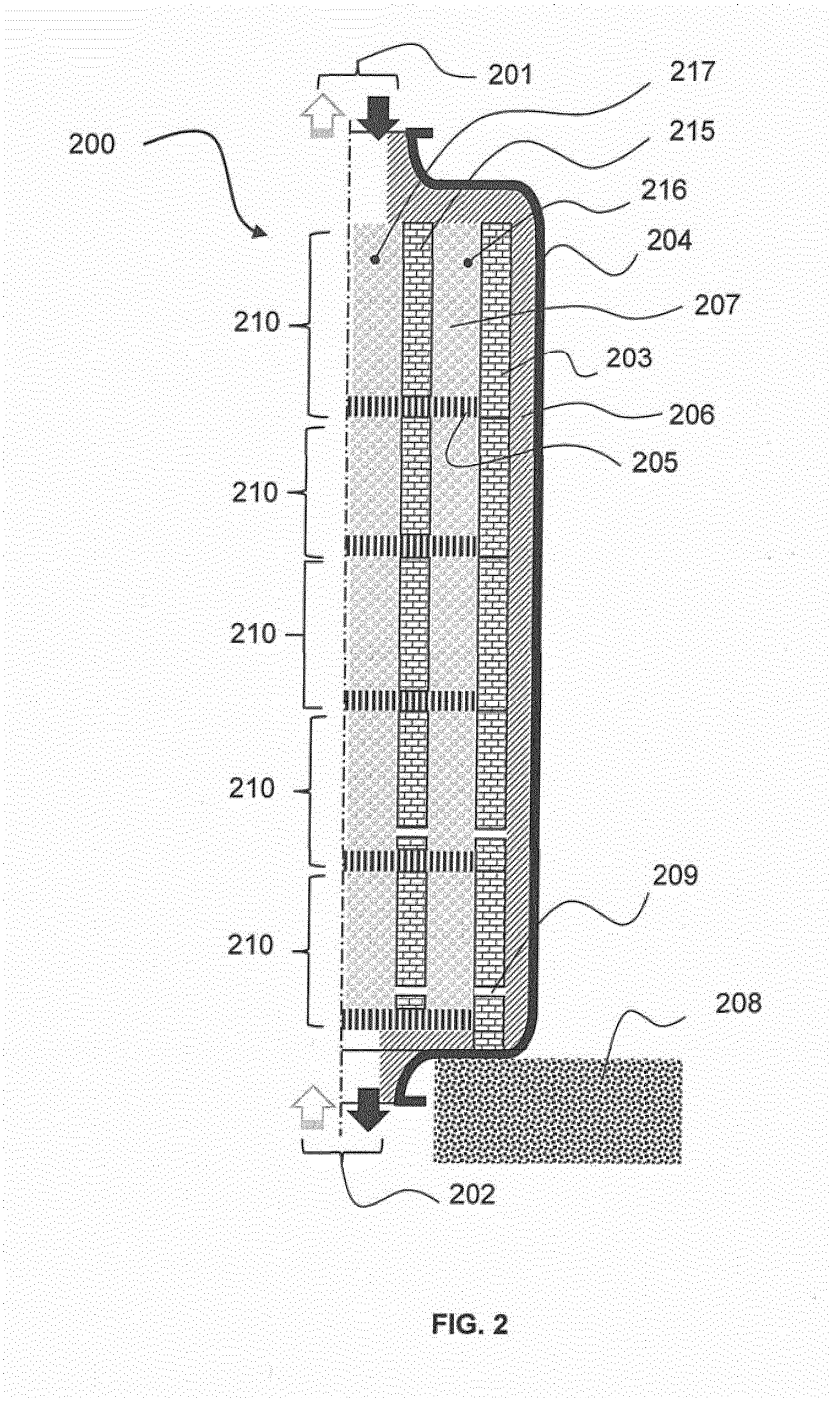

200
201
217
215
216
204
207
203
206
205
210
210
210
210
210
209
208
202

FIG. 2

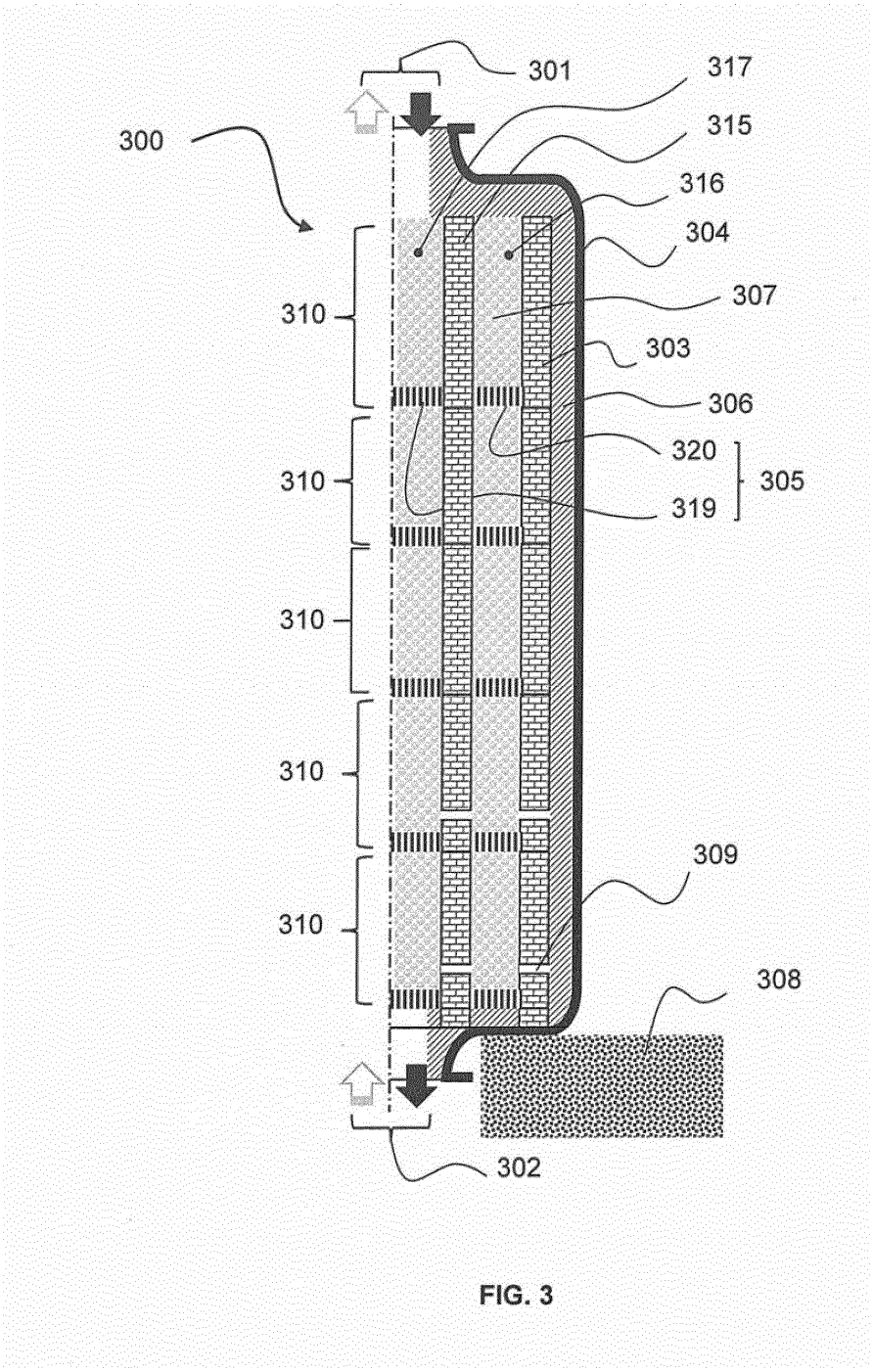

300
301
317
315
316
304
307
303
306
320
319
305
310
310
310
310
310
309
308
302

FIG. 3

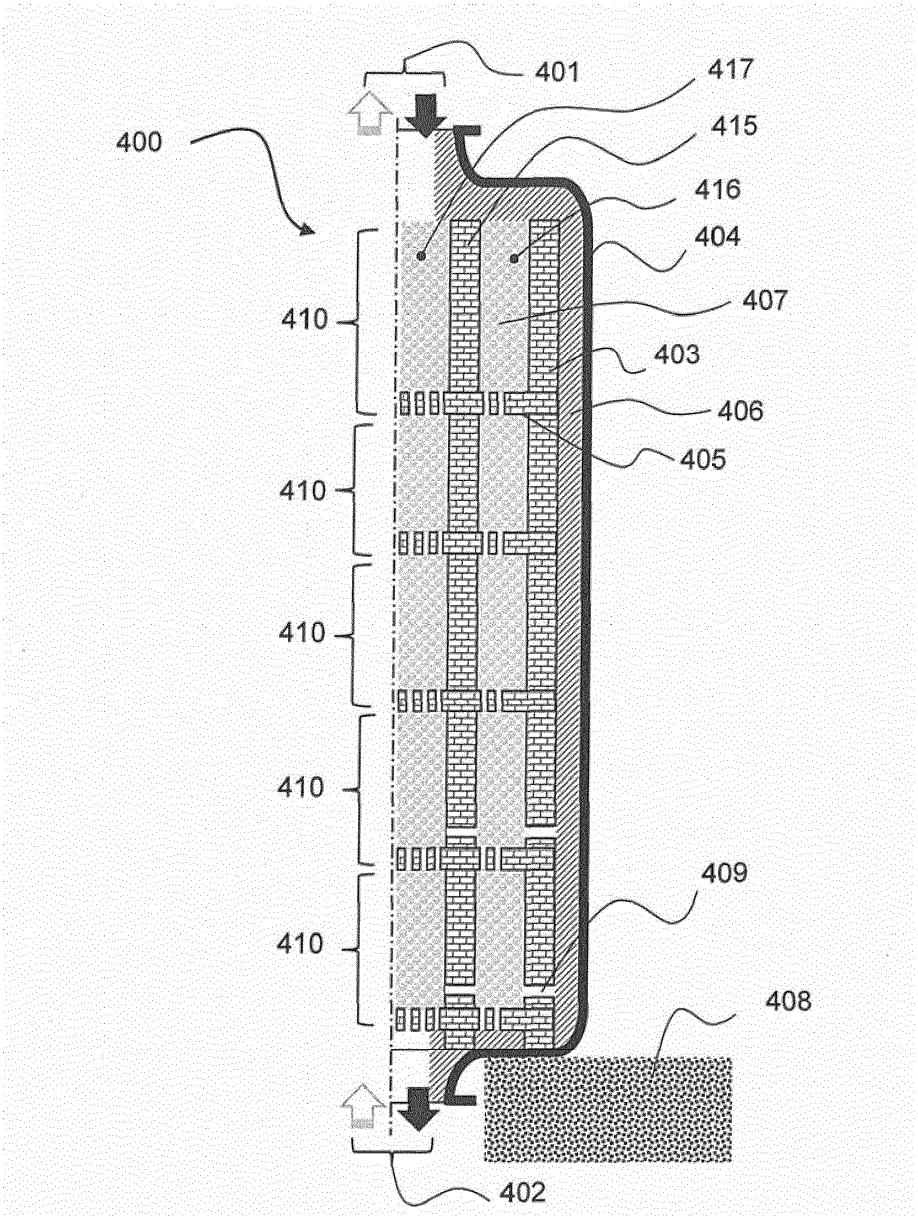

401
417
400
415
416
404
410
407
403
406
405
410
410
410
409
410
408
402

FIG. 4

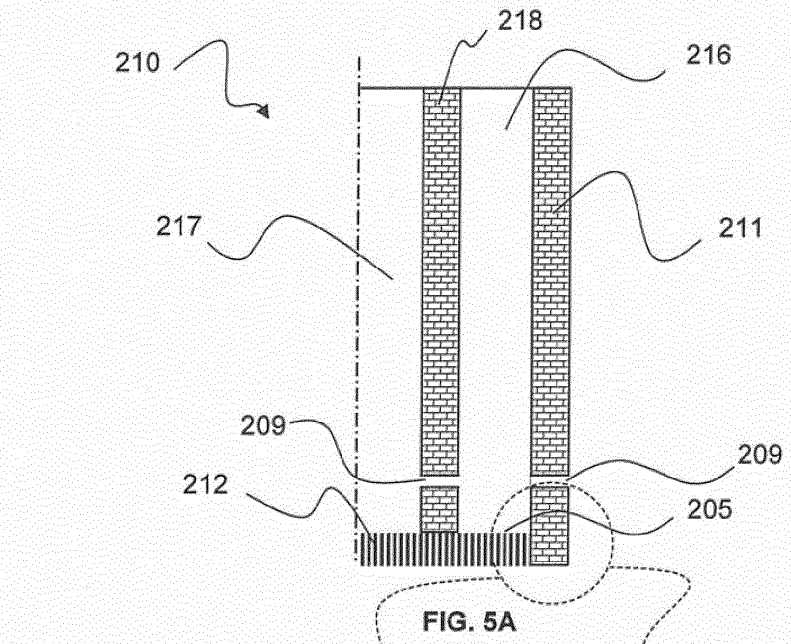


FIG. 5A

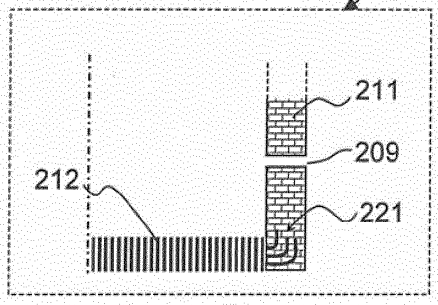


FIG. 5B

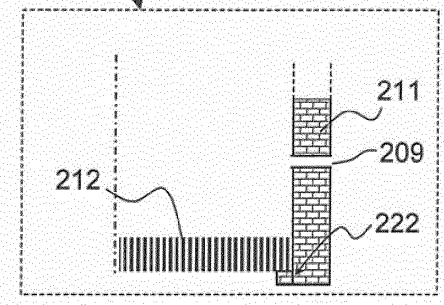


FIG. 5C

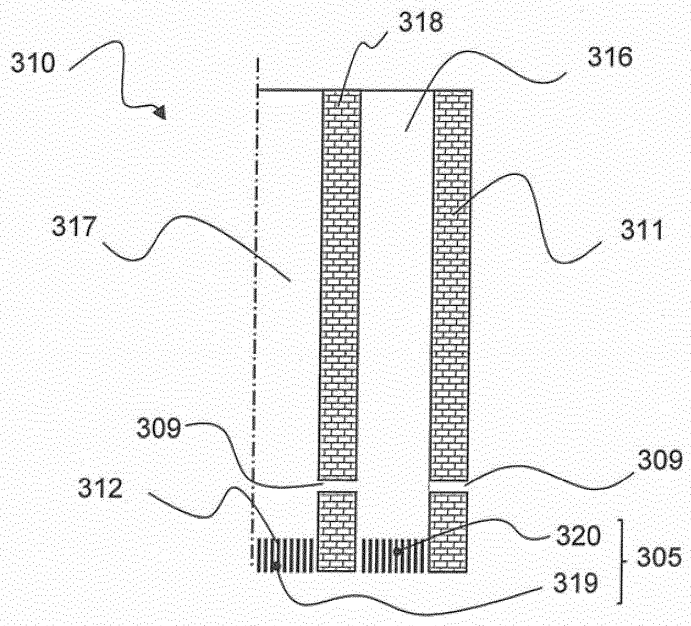

310
318
316
317
311
309
309
312
320
305
319

FIG. 6

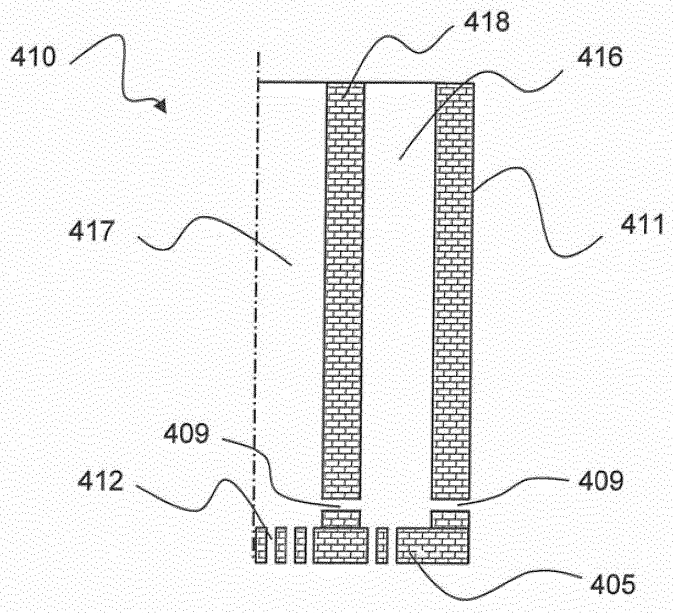

410
418
416
417
411
409
409
412
405

FIG. 7

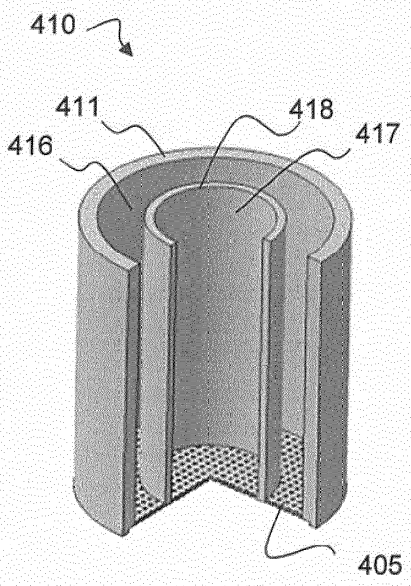


FIG. 8A

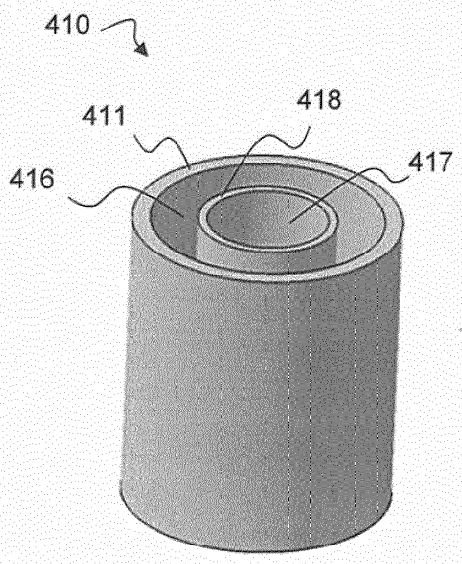


FIG. 8B

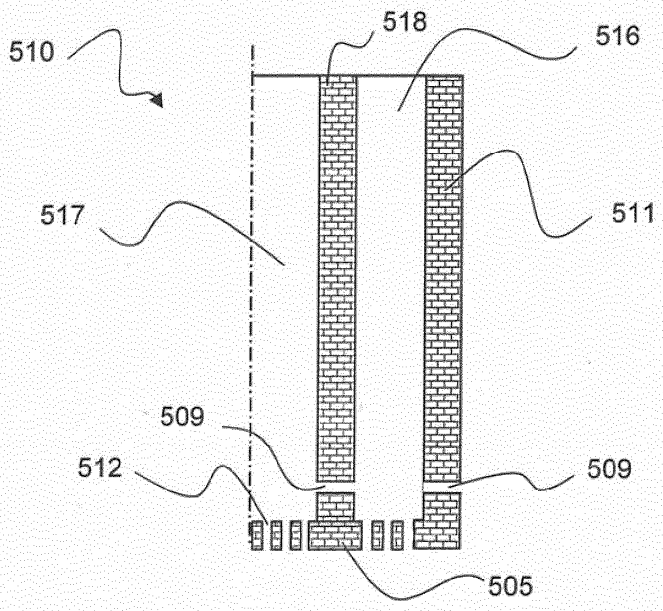


FIG. 9

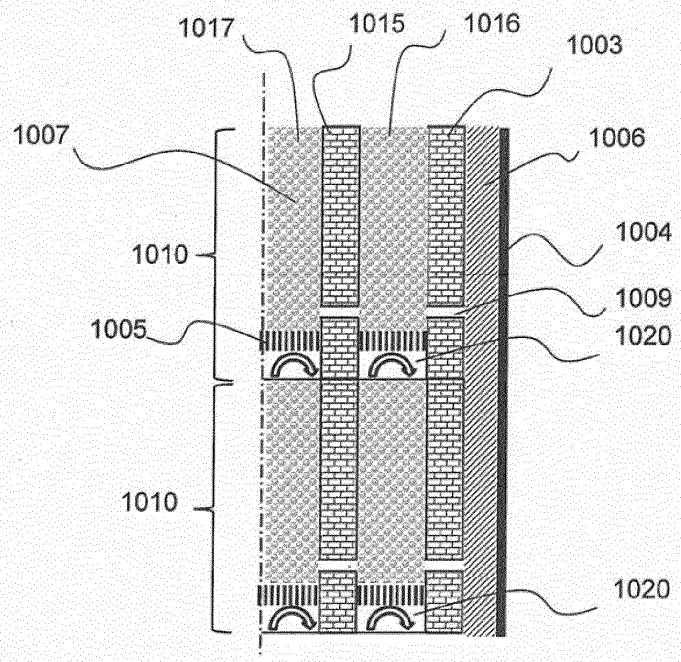

1017
1015
1016
1003
1007
1006
1004
1010
1009
1005
1020
1010
1020

FIG. 10

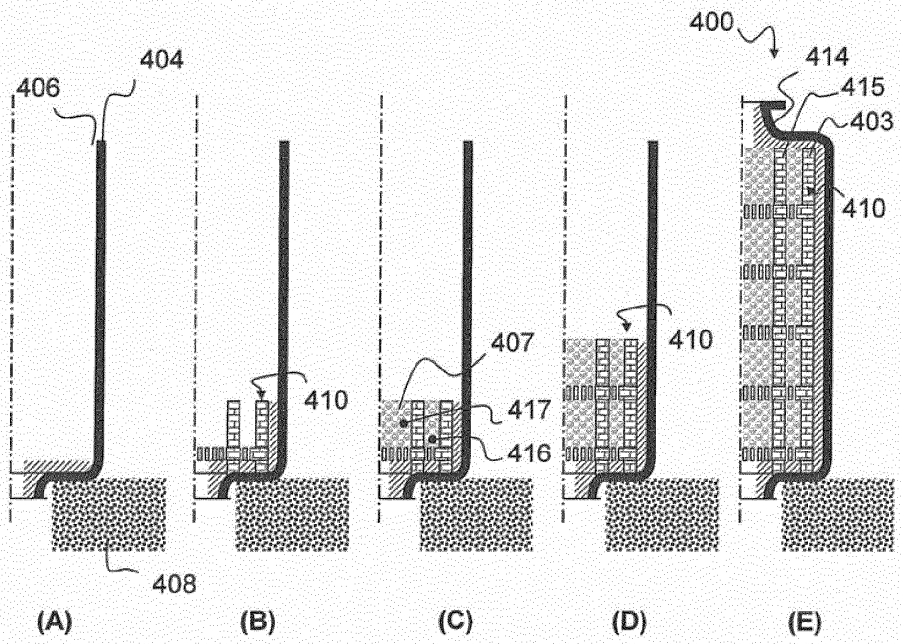

400
414
404
406
415
403
410
410
407
410
417
416
408
(A)
(B)
(C)
(D)
(E)

FIG. 11

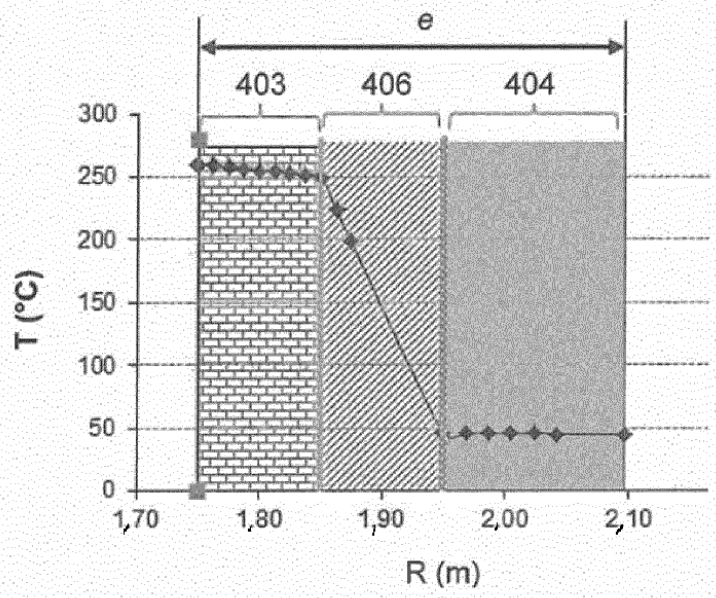

e
403
406
404
300
250
200
150
100
50
0
T (°C)
1,70
1,80
1,90
2,00
2,10
R (m)

FIG. 12

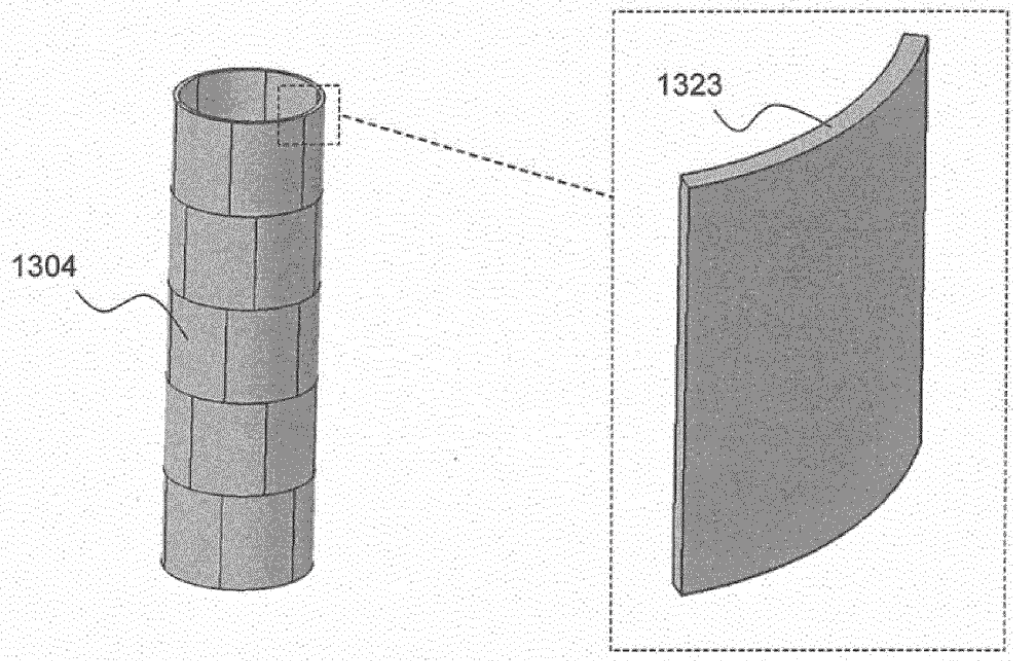

1323
1304

FIG. 13

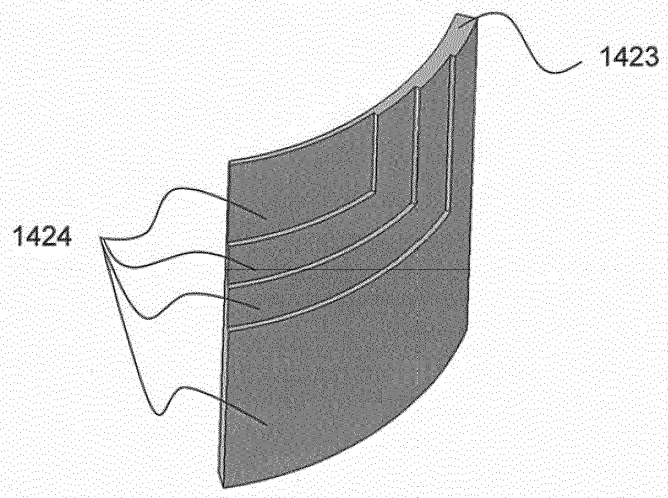


FIG. 14

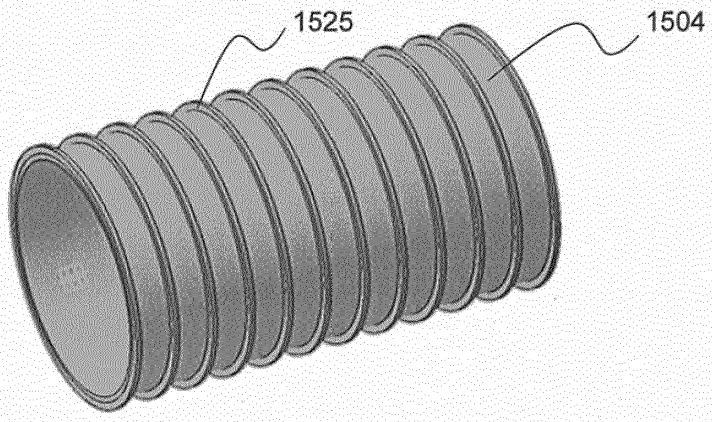


FIG. 15