

APARATO Y PROCESO PARA LA CALCINACIÓN DE MATERIAL DE ALIMENTACIÓN

REFERENCIA CRUZADA CON SOLICITUDES RELACIONADAS

La presente solicitud invoca prioridad sobre la Solicitud No Provisional de EE. UU. N.º 18/079,203, presentada el 12 de diciembre de 2022, y se incorpora en su totalidad al presente documento por referencia.

CAMPO TÉCNICO

La presente innovación se refiere a procesos para la calcinación de un material de alimentación, aparatos para la calcinación de un material de alimentación (p. ej., calcinadores, quemadores de calcinación, sistemas de calcinación, etc.), aspectos operativos de los aparatos y métodos de fabricación y uso de los mismos.

ANTECEDENTES

Los calcinadores pueden utilizarse para calcinar un material crudo. A menudo, el calcinador se estructura como un tubo o cilindro largo configurado para facilitar el calentamiento de un material de carbonato de calcio (CaCO_3) para formar óxido de calcio (CaO), también conocido como cal o cal viva. El funcionamiento del calcinador también suele generar emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Los calcinadores suelen estar diseñados para proporcionar largos tiempos de residencia para la formación de CaO . Posteriormente, el agua puede exponerse al CaO para formar cal apagada o cal hidratada (Ca(OH)_2) en una etapa operativa independiente aguas abajo del calcinador.

BREVE RESUMEN DE LA INVENCION

Determinamos la necesidad de mejorar el funcionamiento del calcinador, permitiendo tiempos de residencia más cortos para la calcinación, lo que también puede proporcionar mejoras significativas en la eficiencia operativa y la captura de dióxido de carbono de los gases de escape (o gases de combustión) del proceso de calcinación. También determinamos que sería ventajoso proporcionar un aparato y un proceso de calcinación que pudieran operarse para formar cal hidratada (Ca(OH)_2) a partir de un material de alimentación que comprenda

CaCO_3 , de modo que se pudiera evitar una etapa adicional del proceso que implica la hidratación de la cal (CaO). La cal hidratada formada puede ser una formación parcial de cal hidratada (p. ej., más del 5 % del material de alimentación se calcina en cal hidratada, la calcinación del material de alimentación ocurre de modo que más del 1 % del material de alimentación se calcina en cal hidratada y menos del 100 % del material de alimentación se calcina en cal hidratada, etc.), una formación sustancial de cal hidratada (p. ej., más del 70 % del material de alimentación se calcina en cal hidratada, más del 60 % del material de alimentación se calcina en cal hidratada, etc.), o una formación sustancialmente completa de cal hidratada (p. ej., más del 90 % del material de alimentación se calcina en cal hidratada).

Las realizaciones de un proceso para calcinar un material de alimentación que hemos desarrollado pueden incluir el paso de un material particulado sólido que incluye CaCO_3 a través de un quemador o junto a este (por ejemplo, cerca de una llama emitida por un quemador mediante una lanza, etc.) para que pase a través de una llama formada por el quemador y así facilitar su calcinación. El material puede emitirse desde la llama del quemador dentro de un calcinador para pasar a través de su cuerpo hasta una salida para su posterior calcinación, de modo que tenga un tiempo de residencia preseleccionado al pasar por la llama y el calcinador hasta la salida y/o entrada de un dispositivo de filtración. El tiempo de residencia puede ser de 20 a 30 segundos, de 1 a 2 minutos o, en algunas realizaciones, inferior a 3 minutos. Las realizaciones pueden facilitar la calcinación de un material de CaCO_3 de modo que el material de salida del calcinador comprenda Ca(OH)_2 (p. ej., principalmente Ca(OH)_2 , con más del 50 % en peso de Ca(OH)_2 , con más del 90 % en peso de Ca(OH)_2 , etc.), a la vez que proporcione un escape con una alta cantidad o concentración de dióxido de carbono (CO_2) para facilitar la captura de CO_2 . En realizaciones donde el oxidante comprende oxígeno, el aumento en la concentración de CO_2 o la mayor cantidad de CO_2 se puede obtener porque se puede utilizar sustancialmente menos nitrógeno (N_2) en las realizaciones (p. ej., realizaciones para usar sistemas de oxicomcombustible, oxidantes con alta concentración de oxígeno, etc.).

Las realizaciones pueden utilizar uno o más mecanismos de filtro para filtrar las partículas sólidas que contienen el material calcinado (p. ej., material compuesto principalmente de Ca(OH)_2 o CaO , etc.) del gas de escape antes de que este pase a través de un sistema de captura de carbono. Es posible que otras realizaciones no requieran un mecanismo de filtrado. Por ejemplo, algunas realizaciones pueden incorporarse en un horno de arco o en una planta de fabricación de cemento, de modo que el material calcinado pueda enviarse a un horno rotatorio para la fabricación de cemento sin filtración, o bien pueda alimentarse a la escoria para su tratamiento sin necesidad de filtración.

Las realizaciones pueden configurarse para usarse con material de alimentación seco o húmedo. En las realizaciones que pueden utilizar material de alimentación húmedo, este puede pasarse por al menos un secador para secarlo antes de alimentarlo a un calcinador o inyectarlo en una llama formada en dicho calcinador.

Las realizaciones pueden utilizar un quemador para la formación de una llama dentro del calcinador que proporcione una alta temperatura de calcinación para el material alimentado a través de la llama. Por ejemplo, el quemador puede utilizar un oxidante con un contenido de oxígeno de entre el 21 % en volumen y el 100 % en volumen para la formación de la llama dentro del calcinador. Por ejemplo, el contenido de oxígeno del oxidante utilizado en el quemador puede estar en el rango del 21 % al 100 % en volumen, 30 % al 70 % en volumen, 35 % al 60 % en volumen, u otro rango adecuado de contenido de oxígeno (p. ej., entre el 95 % al 100 % en volumen, entre el 90 % al 100 % en volumen, entre el 95 % al 99,99 % en volumen, etc.). El oxidante puede ser cualquier oxidante adecuado. Por ejemplo, puede incluir aire, aire enriquecido con oxígeno o flujos de gas oxígeno.

El quemador puede utilizar un combustible para la combustión y formar la llama. El combustible puede incluir gas natural, diésel, carbón pulverizado, hidrógeno u otra fuente de combustible adecuada.

El mecanismo de filtrado (cuando se utiliza) puede incluir uno o más ciclones y/o uno o más filtros de mangas. El mecanismo de filtrado puede incluir, alternativamente, otros mecanismos de filtrado adecuados para eliminar las partículas sólidas calcinadas que salen

del calcinador, provenientes de los gases de escape calientes, antes de que estos sean sometidos a la captura de carbono.

Hemos determinado que las realizaciones de nuestro aparato y proceso permiten una calcinación con tiempos de residencia bajos. Esto permite reducir sustancialmente el tamaño de los sistemas de calcinación, ya que el tamaño y la longitud del calcinador y los equipos relacionados se reducen significativamente gracias a los tiempos de residencia significativamente más bajos. Estas características pueden generar reducciones significativas en los costos de capital, así como en los costos operativos y de mantenimiento. Además, hemos determinado que las realizaciones pueden adaptarse para proporcionar una calcinación de mayor eficiencia, permitiendo calcinar un material de alimentación que incluya CaCO_3 (por ejemplo, piedra caliza) en partículas sólidas compuestas principalmente por Ca(OH)_2 . Este tipo de operación de calcinación evita la necesidad de hidratar cal (CaO) para formar dicho material, exponiéndolo al agua en una etapa de separación. Este tipo de operación puede proporcionar una flexibilidad operativa sustancial y un rendimiento operativo mejorado, lo que se traduce en mejoras significativas en la eficiencia operativa.

Hemos determinado que las realizaciones también pueden proporcionar una mayor concentración de CO_2 o un mayor caudal relativo de CO_2 en la salida de gases de escape de un calcinador, lo que puede mejorar la captura de carbono para la captura de CO_2 (por ejemplo, como gas producto de las operaciones, etc.). La mejora puede incluir una mayor concentración de CO_2 capturado (por ejemplo, una mayor tasa de captura de CO_2) y/o una mayor concentración de CO_2 en el gas que sale del calcinador con el material calcinado. Esto puede proporcionar una mejora adicional en la eficiencia operativa, por ejemplo, para realizaciones adaptadas para proporcionar CO_2 como producto de la operación de calcinación del material, etc.

En un primer aspecto, se proporciona un proceso para calcinar un material de alimentación. El proceso puede incluir la alimentación de material particulado sólido a una llama formada en un calcinador, de modo que el material particulado sólido pase a través de la llama a medida que se mueve a través del calcinador hacia la salida del mismo.

En un segundo aspecto, el material particulado sólido puede tener un tiempo de residencia para la calcinación de entre 5 minutos y 5 segundos, entre 3 minutos y 5 segundos, entre 10 segundos y 30 segundos, o entre 5 segundos y 1 minuto.

En un tercer aspecto, la alimentación del material particulado sólido a la llama puede incluir el paso del material particulado sólido a un quemador para su alimentación al calcinador a través del mismo, y/o bien, el paso del material particulado sólido al calcinador adyacente a la llama, de modo que el material particulado sólido pase a través de ella. En algunas realizaciones, todo el material particulado sólido puede alimentarse a un quemador para su alimentación al calcinador a través del quemador, de modo que el material particulado se alimente a la llama a través del mismo. Otra realización puede configurarse para que todo el material particulado sólido pueda alimentarse al calcinador adyacente a la llama, de modo que el material particulado sólido pase a través de la llama (por ejemplo, mediante al menos una lanza de alimentación, etc.). En otras realizaciones, se puede introducir material particulado sólido en un quemador para alimentarlo al calcinador a través de este, de modo que se alimente a la llama a través del quemador, y se puede introducir otro material particulado sólido en el calcinador junto a la llama, de modo que pase a través de ella (por ejemplo, mediante al menos una lanza de alimentación, etc.).

En un cuarto aspecto, el proceso también puede incluir la alimentación de un combustible y al menos un flujo de oxidante al quemador para la formación de la llama en el calcinador.

En un quinto aspecto, la llama formada en el calcinador mediante al menos un quemador puede configurarse para facilitar la calcinación del material particulado sólido a un rango de temperatura de calcinación preseleccionado de entre 815 °C y 2.205 °C, entre 815 °C y 1.370 °C, entre 815 °C y 1.650 °C, entre 925 °C y 1.650 °C o entre 925 °C y 1.370 °C.

En un sexto aspecto, el material calcinado puede comprender entre un 70 % en peso de Ca(OH)_2 y un 100 % en peso de Ca(OH)_2 , entre un 80 % en peso de Ca(OH)_2 y un 100 % en peso de Ca(OH)_2 , o entre un 90 % en peso de Ca(OH)_2 y un 100 % en peso de Ca(OH)_2 o puede incluir concentraciones de salida del calcinador de CaO y Ca(OH)_2 . En otras realizaciones incluso, el material calcinado puede comprender más del 50 % en peso de

Mg(OH)₂, más del 75 % en peso de Mg(OH)₂, más del 90 % en peso de Mg(OH)₂ o más del 95 % en peso de Mg(OH)₂ o entre el 90 % en peso de Mg(OH)₂ y el 100 % en peso de Mg(OH)₂ (por ejemplo, del 95 % en peso de Mg(OH)₂ al 98 % en peso de Mg(OH)₂). En otras realizaciones incluso, el material calcinado puede incluir concentraciones de salida del calcinador de material calcinado que incluyen concentraciones de MgO y Mg(OH)₂. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el material calcinado puede incluir concentraciones de salida del calcinador de material calcinado que incluyen concentraciones de más del 20 % en peso de Mg(OH)₂ y más del 50 % en peso de Ca(OH)₂, entre el 5 % en peso de Mg(OH)₂ y el 30 % en peso Mg(OH)₂ y entre 70 % en peso de Ca(OH)₂ y 95 % en peso de Ca(OH)₂ , o puede ser otra composición adecuada con concentraciones de salida del calcinador de Mg(OH)₂ y Ca(OH)₂ , o concentraciones de salida del calcinador de MgO, CaO, Mg(OH)₂ y Ca(OH)₂.

En un séptimo aspecto, el material de alimentación puede comprender al menos un 70 % en peso de carbonato y no más de un 30 % en peso de impurezas. Otras realizaciones pueden utilizar otros tipos de composiciones de alimentación.

En un octavo aspecto, el material de alimentación puede tener un tamaño promedio de partícula de 50 a 2.000 micrómetros y/o un tamaño máximo de partícula no superior a 5.000 micrómetros. En algunas realizaciones, el material de alimentación también puede (o alternativamente) tener un tamaño mínimo de partícula no superior a 5 micrómetros.

En un noveno aspecto, el proceso también puede incluir la filtración del flujo de salida del calcinador para separar el material particulado sólido del gas de combustión formado durante la formación de la llama. El material particulado sólido puede separarse del gas de combustión que se calcina.

En un décimo aspecto, el proceso puede incluir el paso del material particulado sólido a través de al menos un secador antes de alimentarlo a la llama dentro del calcinador y el paso del gas de combustión al secador para secar el material particulado sólido dentro del secador antes de que el gas de combustión pase a un sistema de captura de carbono para capturar el dióxido de carbono del gas de combustión.

En un undécimo aspecto, el proceso puede incluir la filtración de una salida de flujo del calcinador para separar el material particulado sólido del gas de combustión formado durante la formación de la llama. El material particulado sólido separado del gas de combustión puede ser el material calcinado. Además, el proceso puede incluir el enfriamiento de la salida de flujo proveniente de la salida del calcinador antes de la filtración. En algunas realizaciones, el medio de enfriamiento para enfriar la salida de flujo desde la salida del calcinador antes del filtrado puede comprender dióxido de carbono.

En un duodécimo aspecto, el primer aspecto del proceso puede combinarse con cualquiera o todos los aspectos del segundo al undécimo para formar otro aspecto. Por ejemplo, el primer aspecto puede combinarse con el segundo, tercer, cuarto, quinto, sexto, séptimo, octavo, noveno, décimo y/o undécimo para formar incluso otras realizaciones del proceso.

En un decimotercer aspecto, se proporciona un aparato para calcinar un material de alimentación. Las realizaciones del aparato pueden configurarse para implementar una realización del proceso de calcinación de un material de alimentación. El aparato puede incluir un calcinador y al menos un quemador ubicado junto a la entrada del calcinador, de modo que el material de alimentación sólido alimentado al calcinador pueda pasar a través de al menos una llama formada en el calcinador a través del quemador para su calcinación. El calcinador y el al menos un quemador pueden configurarse y posicionarse de manera que el material sólido de alimentación pase a través de la llama hasta una salida del calcinador para su calcinación.

En un decimocuarto aspecto, el aparato también puede incluir al menos un dispositivo de filtro conectable a la salida del calcinador para recibir el material sólido de alimentación y el gas de combustión de la salida del calcinador, filtrando así las partículas sólidas del material sólido de alimentación del gas de combustión.

En un decimoquinto aspecto, el aparato puede configurarse de manera que el quemador y el calcinador estén configurados de manera que el material sólido de alimentación tenga un tiempo de residencia para la calcinación de entre 5 minutos y 5 segundos, entre 3 minutos y 5 segundos, entre 10 segundos y 30 segundos, o entre 5 segundos y 1 minuto.

En un decimosexto aspecto, el aparato puede configurarse y disponerse de modo que el al menos un quemador se pueda conectar a una fuente de combustible, al menos una fuente de oxidante y al menos una fuente de material sólido de alimentación, de modo que al menos una parte de este pueda alimentarse al quemador para su alimentación a la llama.

En un decimoséptimo aspecto, el aparato puede configurarse de modo que el calcinador se pueda conectar a al menos una fuente de material sólido de alimentación, de modo que al menos una parte de este pueda alimentarse al calcinador para su calcinación parcial en la llama durante una primera fase de calcinación, antes de ser extraído de la llama y dirigido hacia la salida del calcinador para su posterior calcinación en una segunda fase de calcinación.

En un decimooctavo aspecto, el al menos un quemador y el calcinador pueden disponerse y configurarse de modo que la llama facilite la calcinación del material sólido de alimentación a un rango de temperatura de calcinación preseleccionado de entre 815 °C y 2.205 °C, entre 815 °C y 1.370 °C, entre 815 °C y 1.650 °C, entre 925 °C y 1.650 °C o entre 925 °C y 1.370 °C.

En un decimonoveno aspecto, el aparato puede incluir un sistema de captura de carbono ubicado aguas abajo de la salida del calcinador para capturar el dióxido de carbono del gas de combustión que sale de la salida del calcinador.

En un vigésimo aspecto, el primer aspecto del proceso puede incluir la utilización de cualquiera de los aspectos del aparato descritos en este documento, junto con cualquier otro del segundo aspecto al duodécimo aspecto del proceso descrito anteriormente.

En un vigésimo primer aspecto, el aparato del decimotercer aspecto puede incluir cualquier combinación del decimocuarto al decimonoveno aspectos para formar otro aspecto. Por ejemplo, el decimotercer aspecto puede combinarse con los aspectos decimocuarto, decimoquinto, decimosexto, decimoséptimo, decimooctavo y decimonoveno. Como otro ejemplo inclusive, el decimotercer aspecto puede combinarse con dos o más de los aspectos decimocuarto, decimoquinto, decimosexto, decimoséptimo, decimooctavo y decimonoveno.

En un vigésimo segundo aspecto, se proporciona un sistema de calcinación. El sistema de calcinación puede ser una realización del aparato. Por ejemplo, el sistema puede incluir un calcinador con una salida en comunicación con una cámara, al menos un quemador conectado al calcinador para formar al menos una llama dentro de la cámara para la calcinación a un rango de temperatura preseleccionado de entre 815 °C y 2.205 °C, y al menos un dispositivo de filtro conectado a la salida del calcinador para recibir el material calcinado arrastrado por el gas de combustión desde el calcinador para separar el material calcinado del gas de combustión. El sistema también puede incluir un sistema de captura de carbono conectado al al menos un dispositivo de filtro para recibir el gas de combustión para remoción de humedad del gas de combustión y captura de dióxido de carbono del gas de combustión. Una fuente de material de alimentación de partículas sólidas puede conectarse al quemador o al calcinador para alimentar dicho material a la llama durante una primera fase de calcinación. El calcinador también puede dimensionarse y configurarse de modo que el material de alimentación particulado sólido pase de la llama a la salida dentro de la cámara del calcinador para una segunda fase de calcinación, de modo que el tiempo de residencia preseleccionado del material de alimentación particulado sólido para que la calcinación forme el material calcinado, es superior a 5 segundos e inferior o igual a 5 minutos.

Las realizaciones del proceso aquí descrito pueden implementarse mediante una realización del sistema. El sistema también puede utilizar otros elementos (p. ej., elementos de control de procesos automatizados, sensores, conductos, compresores, intercambiadores de calor, etc.).

Otros detalles, objetivos y ventajas de los procesos de calcinación de un material de alimentación, los aparatos para calcinar un material de alimentación (p. ej., calcinadores, quemadores para calcinación, sistemas de calcinación, etc.), los aspectos operativos de los aparatos y los métodos de fabricación y uso de los mismos se harán evidentes a medida que se avance en la siguiente descripción de ciertas realizaciones a modo de ejemplo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

En los dibujos adjuntos se muestran ejemplos de realizaciones de procesos para la calcinación de un material de alimentación, aparatos para la calcinación de un material de alimentación (p. ej., calcinadores, quemadores de calcinación, sistemas de calcinación, etc.), aspectos operativos de los aparatos y métodos de fabricación y uso de los mismos. Debe entenderse que los caracteres de referencia similares utilizados en los dibujos pueden identificar componentes similares.

La Figura 1 es un diagrama de bloques esquemático de una primera realización a modo de ejemplo de un aparato para la calcinación de un material de alimentación que puede utilizar una realización a modo de ejemplo de un proceso para la calcinación de un material de alimentación.

La Figura 2 muestra una vista esquemática en sección transversal de la primera realización a modo de ejemplo del quemador 3.

La Figura 3 muestra una vista esquemática del extremo de la primera realización a modo de ejemplo del quemador 3, mostrada en la Figura 2.

La Figura 4 muestra otra vista esquemática en sección transversal de otra realización a modo de ejemplo del quemador 3.

La Figura 5 muestra una vista esquemática del extremo de la realización a modo de ejemplo del quemador 3, mostrada en la Figura 4.

La Figura 6 muestra una imagen de microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (MEB/EDS) de una primera muestra obtenida tras el ensayo de una realización a modo de ejemplo de un aparato para la calcinación de un material de alimentación. La primera muestra es una muestra en crudo antes de cualquier calcinación. La primera muestra también puede denominarse Muestra 1.

La Figura 7 muestra una imagen de MEB/EDS de una segunda muestra obtenida tras el ensayo de una realización a modo de ejemplo de un aparato para la calcinación de un material de alimentación. La segunda muestra es una muestra parcialmente calcinada extraída mientras había estado expuesta a una llama 3F emitida por un quemador 3 del calcinador 11. La segunda muestra también puede denominarse Muestra 2.

La Figura 8 muestra una imagen SEM/EDS de una tercera muestra obtenida tras probar una realización a modo de ejemplo de un aparato para la calcinación de un material de alimentación. La tercera muestra es una muestra calcinada obtenida tras el paso del material por un calcinador con un tiempo de residencia de 30 segundos. La muestra 3 también se denomina Muestra 3.

La Figura 9 muestra una serie de gráficos que ilustran los datos obtenidos mediante difracción de rayos X en polvo (DRX) que ilustran los picos de difracción en datos de DRX, comparados con los patrones de referencia de la Muestra 1, que era una muestra de material crudo antes de ser calcinado en la experimentación conducida que se describe aquí.

La Figura 10 muestra una serie de gráficos que ilustran los datos obtenidos mediante DRX que ilustran los picos de difracción en datos de DRX, comparados con los patrones de referencia de la Muestra 2, que era una muestra de material parcialmente calcinado, recolectada del interior de una llama 3F durante la primera fase F1 de calcinación en la experimentación realizada que se describe aquí.

La Figura 11 muestra una serie de gráficos que ilustran los datos obtenidos mediante DRX que ilustran los picos de difracción en datos de DRX comparados con los patrones de referencia de la Muestra 3, una muestra de material calcinado emitido por una salida del calcinador 11 tras haber sido emitido desde una salida del calcinador luego de la segunda fase F2 de calcinación en la experimentación realizada que se describe aquí.

La Figura 12 muestra una serie de gráficos que ilustran el ajuste de las intensidades calculadas del modelo de muestra refinado para la Muestra 1 con datos de DRX observados para la Muestra 1, obtenidos durante la experimentación que se describe aquí.

La Figura 13 muestra una serie de gráficos que ilustran el ajuste de las intensidades calculadas del modelo de muestra refinado para la Muestra 2 con datos de DRX observados para la Muestra 2, obtenidos durante la experimentación que se describe aquí.

La Figura 14 muestra una serie de gráficos que ilustra el ajuste de las intensidades calculadas del modelo de muestra refinado para la Muestra 3 con datos de DRX observados para la Muestra 3, obtenidos durante la experimentación que se describe aquí.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Con referencia a las Figuras 1-5, un aparato 1 para calcinar un material de alimentación puede incluir al menos un quemador 3 conectado a un extremo o porción de entrada de un calcinador 11. El calcinador 11 puede ser un tubo, una tubería u otro tipo de estructura de calcinador (por ejemplo, de sección transversal rectangular, hexagonal, cúbica, rectangular, cilíndrica, etc.). En algunas realizaciones, la entrada del calcinador 11 puede ser más alta que la salida, de modo que el calcinador 11 sea un calcinador en pendiente o tenga una orientación en declive para que la gravedad facilite el flujo 11F de material particulado arrastrado por el gas (por ejemplo, gases de combustión de la combustión de combustible, etc.) que pasa a través del cuerpo del calcinador desde su región de entrada hasta su salida. El calcinador 11 puede tener un revestimiento refractario en algunas realizaciones.

Puede haber un solo quemador 3 o múltiples quemadores 3 para la formación de al menos una llama 3F en la cámara del calcinador 11. Cada quemador 3 puede recibir combustible de una fuente 5 para la formación de la llama 3F. Un conducto de alimentación de combustible 6 conecta la fuente de combustible al quemador 3 para alimentarlo. El combustible 3 puede ser un combustible que se quema, como gas natural, hidrógeno, amoníaco, diésel o carbón pulverizado. Una fuente de oxidante 7 también puede conectarse al quemador 3 para alimentar al menos un flujo de oxidante al quemador 3. El oxidante puede ser aire, aire enriquecido con oxígeno, oxígeno u otro tipo de flujo de oxidante. El flujo de oxidante puede incluir oxígeno en una concentración de entre el 21 % en volumen y el 100 % en volumen de oxígeno. En algunas realizaciones, la concentración de oxígeno dentro del oxidante puede ser mayor o igual al 85 % en volumen (p. ej., al menos 90 % en volumen de oxígeno, entre 90 % en volumen de oxígeno y 100 % en volumen de oxígeno, entre 95 % en volumen de oxígeno y 100 % en volumen de oxígeno, entre 95 % en volumen de oxígeno y 99,99 % en volumen de oxígeno, entre 85 % en volumen de oxígeno y 99,99 % en volumen de oxígeno, etc.).

En algunas realizaciones, puede haber una primera fuente de oxidante 7 y una segunda fuente de oxidante 7a (mostradas en línea discontinua) para alimentar diferentes flujos de oxidante al quemador 3. En realizaciones que pueden utilizar múltiples flujos de oxidante como alimentación al quemador 3, puede haber un primer conducto de alimentación de oxidante entre la primera fuente de oxidante y el quemador, así como un segundo conducto de alimentación de oxidante entre el quemador 3 y la segunda fuente de oxidante. El oxidante para cada flujo puede ser aire, aire enriquecido con oxígeno, oxígeno u otro tipo de flujo de oxidante. En algunas realizaciones, los diferentes flujos de oxidantes pueden ser de distintos tipos (por ejemplo, un flujo de aire y un flujo de aire enriquecido con oxígeno pueden ser el primer y el segundo flujo de oxidante que se alimentan al quemador 3, un flujo de oxígeno y un flujo de aire enriquecido con oxígeno pueden ser el primer y el segundo flujo de oxidante que se alimentan al quemador, etc.). El flujo de oxidante que se alimenta al quemador 3 desde cada fuente de oxidante puede incluir oxígeno en una concentración de entre el 21 % en volumen y el 100 % en volumen de oxígeno.

En otras realizaciones, puede haber un único flujo de oxidante alimentado al quemador 3 a través de un conducto de alimentación de oxidante 4 (que también puede considerarse un primer conducto de alimentación de oxidante) ubicado entre una fuente de oxidante 7 y el quemador 3. En dichas realizaciones, el oxidante puede ser aire, aire enriquecido con oxígeno u oxígeno que se alimenta al quemador a través de al menos un compresor u otra fuente de oxidante.

El material de alimentación particulado sólido puede alimentarse al calcinador 11 o al quemador 3 a través de un conducto de alimentación 8, ubicado entre la fuente de alimentación 9 y el quemador 3 o el calcinador 11. En algunas realizaciones, el conducto 8 puede alimentar material particulado sólido a un flujo de oxidante para su mezcla en la zona de mezcla 4a, aguas arriba del quemador 3. Puede haber un mezclador en línea u otro tipo de dispositivo mezclador ubicado en la zona de mezcla 4a para facilitar el arrastre de partículas sólidas del material de alimentación con un flujo de oxidante que pasa por el conducto 4, por ejemplo. Una mezcla de partículas sólidas del material de alimentación

arrastrada dentro del oxidante puede pasar desde la zona de mezcla 4a al quemador 3 para ser emitida a una llama 3F formada por el quemador 3.

Además, o como alternativa, el material de alimentación puede introducirse desde la fuente de material de alimentación 9 al quemador 3 a través de un conducto de alimentación de material de alimentación independiente 10. En dichas realizaciones, el material de alimentación puede arrastrarse en un gas portador (por ejemplo, un oxidante u otro gas portador adecuado, como dióxido de carbono o gas de combustión) antes de introducirse en el quemador 3, o puede introducirse en el calcinador 11 o el quemador 3 sin arrastrarse en un fluido o gas. En algunas realizaciones, el material de alimentación particulado también, o alternativamente, puede introducirse en el calcinador 11 junto al quemador 3 y la llama 3F generada por este, de modo que el material particulado se introduce en la llama 3F para su calcinación en una primera fase F1, antes de salir de la llama 3F hacia la salida del calcinador 11 a lo largo de la trayectoria del flujo 11F de material particulado para su posterior calcinación dentro del calcinador 3 durante una segunda fase F2, antes de salir por la salida del calcinador 11. Por ejemplo, al menos una parte del material de alimentación particulado puede introducirse en una lanza junto a un quemador a través de un conducto para alimentación de lanza 10L para su alimentación al calcinador 11 junto al quemador 3 y la llama 3F.

Cabe destacar que el material de alimentación particulado puede alimentarse completamente a través del quemador 3, parcialmente a través del quemador 3 y también parcialmente junto al quemador 3, o bien al calcinador 11 junto al quemador 3 y la llama 3F (por ejemplo, a través del conducto de la lanza de alimentación 10L, etc.). En estas realizaciones, el material de alimentación particulado puede ser arrastrado por un gas portador, que puede ser o incluir aire, aire enriquecido con oxígeno, dióxido de carbono, un gas de combustión, etc., para facilitar la alimentación del material de alimentación particulado sólido al quemador 3 y/o al calcinador 11.

El material de alimentación alimentado al calcinador 11 (directamente y/o a través del quemador 3) puede permanecer en el calcinador durante un tiempo de residencia preseleccionado. Este tiempo de residencia puede incluir el tiempo durante el cual el material

se calcina al ser expuesto y calcinado dentro de la llama 3F durante una primera fase F1 de calcinación, así como al someterse a una calcinación adicional en una segunda fase F2 de calcinación que puede ocurrir cuando el material sale de la llama 3F y llega a la salida del calcinador 11 mientras se encuentra a una temperatura de calcinación preseleccionada del calcinador o dentro de un rango de temperatura de calcinación preseleccionado del calcinador 11. El tiempo de residencia en el que el material particulado se encuentra dentro del calcinador 11 puede ser un tiempo de residencia preseleccionado que sea menor a 30 segundos, entre 20 segundos y 30 segundos, menor a 1 minuto, menor a 2 minutos, menor a 3 minutos o entre 10 segundos y 3 minutos en algunas realizaciones. Se pueden configurar otras realizaciones para utilizar un tiempo de residencia adecuado (p. ej., menos de 5 minutos y más de 3 segundos, entre 10 segundos y 5 minutos, menos de 7 minutos y más de 1 segundo, etc.). El tiempo de residencia preseleccionado puede seleccionarse para proporcionar una tasa de conversión preseleccionada de calcinación del material de alimentación. Por ejemplo, la tasa de conversión preseleccionada puede estar entre el 95 % y el 100 % de conversión del material carbonatado, entre el 90 % y el 100 % de conversión del material carbonatado, o una tasa de conversión de al menos el 95 % del material carbonatado. También se pueden seleccionar otras tasas de conversión adecuadas para la tasa de conversión preseleccionada en la que se basa el tiempo de residencia preseleccionado.

El rango de temperatura de calcinación preseleccionado para el calcinador 11 puede ser superior a 815 °C e igual o inferior a 2.205 °C, superior a 1.090 °C, o de 1.370 °C a 1.650 °C, o de hasta 2.205 °C. En algunas realizaciones, el rango de temperatura preseleccionado puede incluir una temperatura de llama de la llama 3F de 1.370 °C a 1.650 °C, de 925 °C a 1.650 °C o de 925 °C a 2.205 °C, y una temperatura dentro del calcinador 11 aguas abajo de la llama de 1.650 °C a 815 °C, o de 2.205 °C a 815 °C. En algunas realizaciones, el rango de temperatura preseleccionado del calcinador 11 puede incluir un primer rango de temperatura para la primera fase F1 que puede estar en el rango de 1.370 °C a 1.650 °C, rango de 1.090 °C a 1.650 °C, rango de 925 °C a 1.650 °C o rango de 925 °C a 2.205 °C y un segundo rango

de temperatura para la segunda fase F2 que es menor que 1.650 °C y mayor que 815 °C, menor que 925 °C y mayor que 815 °C, o menor que 2.205 °C y mayor que 815 °C.

Al menos un dispositivo de filtro 12 puede ubicarse aguas abajo del calcinador 11 para recibir el flujo de material particulado arrastrado por el gas de combustión (p. ej., gas de combustión) que sale del calcinador 11. El dispositivo de filtro 12 puede incluir una zona de entrada 12a. El tiempo de residencia preseleccionado, indicado anteriormente, puede incluir el tiempo que el material particulado permanece retenido en esta zona de entrada antes de ser filtrado a través de al menos un dispositivo de filtro 12 (denominado "Filtro" en la Figura 1). Esta parte del tiempo de residencia puede corresponder, por ejemplo, a la segunda fase F2 de la calcinación, descrita anteriormente.

El dispositivo de filtrado 12 puede incluir uno o más ciclones, una o más cámaras de mangas, uno o más separadores de partículas de alta temperatura, uno o más filtros de polvo, combinaciones de estos, u otra disposición de mecanismos de filtración para separar el material particulado calcinado que sale de la salida del calcinador 11 del gas de escape caliente del flujo 11F de material particulado arrastrado en el gas de escape formado por la combustión del combustible a través del quemador 3. Un conducto de alimentación de filtrado 12a se puede conectar entre la salida del calcinador 11 y el dispositivo de filtrado 12 para alimentar el material de alimentación particulado sólido calcinado arrastrado en el gas de combustión que sale de la salida del calcinador 11 al dispositivo de filtrado 12.

En algunas configuraciones, también se puede colocar un dispositivo de enfriamiento de partículas calcinadas 12b entre la salida del calcinador 11 y el dispositivo de filtrado 12 para enfriar el flujo que sale de la salida del calcinador a un rango de temperatura de filtrado preseleccionado antes del filtrado del material particulado sólido calcinado procedente de la salida del gas de combustión de la salida del calcinador. Dichos sistemas de refrigeración pueden utilizar un flujo reciclado de dióxido de carbono procedente del sistema de captura de carbono 20 para que proporcione el medio refrigerante para el sistema de enfriamiento. Alternativamente, se puede utilizar aire u otro fluido como medio refrigerante para el dispositivo de enfriamiento 12b.

El material particulado sólido calcinado, separado del flujo de gases de escape, puede salir del dispositivo de filtrado 12 a través de un conducto de salida de producto 13 para proporcionar material de producto, que puede incluir el material particulado calcinado procedente del calcinador 11. El dispositivo de filtrado 12 también puede generar un flujo de gas filtrado 14 que se alimenta a un sistema de captura de carbono 20, configurado para capturar dióxido de carbono (CO_2). El sistema de captura de carbono 20 puede configurarse para capturar CO_2 como corriente de producto y proporcionar CO_2 (p. ej., CO_2 líquido comprimido, CO_2 gas comprimido, otros productos de CO_2 , etc.).

Por ejemplo, el flujo de gas filtrado 14 puede alimentarse a un sistema de captura de carbono 20 para eliminar la humedad u otros componentes no deseados del gas de combustión separado del material calcinado que sale del calcinador 11, con el fin de formar dióxido de carbono de alta pureza o capturarlo de otro modo. Por ejemplo, el sistema de captura de carbono 20 puede configurarse para condensar agua y otros componentes distintos del CO_2 de la corriente de gas de combustión (p. ej., monóxido de carbono [CO] además de agua, etc.), o puede incluir elementos de depuración, compresión y secado para eliminar las impurezas y capturar el CO_2 . El gas de escape purificado (p. ej., gas de combustión) que sale del calcinador 11 se puede alimentar a un dispositivo de captura de CO_2 23 del sistema de captura de CO_2 20 para su secuestro, almacenamiento y/o distribución. En algunas realizaciones, se puede generar un flujo de ventilación 25 desde el dispositivo de captura de CO_2 23 para su emisión a la atmósfera o para alimentar a otro proceso de la planta para otro uso (p. ej., como medio de calentamiento para un intercambiador de calor, etc.).

En algunas configuraciones, es posible que no se utilice el dispositivo de filtro 12. Por ejemplo, se pueden incorporar realizaciones en una planta de fabricación de cemento, de modo que el material de alimentación 9, compuesto por material particulado sólido, se alimente directamente a un horno rotatorio de la planta para su paso por una llama 3F para la formación de cal. En tales realizaciones, el dispositivo de filtro 12 puede no ser necesario ni utilizarse, ya que el material calcinado formado se puede utilizar directamente en el horno

sin necesidad de filtrado. El gas de combustión del quemador 3 puede salir del horno rotatorio para su tratamiento antes de la emisión de cualquier gas de proceso de la planta de fabricación de cemento. En tales realizaciones, el horno rotatorio de la planta de fabricación de cemento, que cuenta con el quemador 3 para la formación de la llama 3F, puede considerarse el calcinador 11. Alternativamente, estas realizaciones pueden configurarse de modo que el calcinador 11 pueda extraer el material calcinado para alimentarlo al horno rotatorio de la planta de fabricación de cemento, de modo que no se necesite ni utilice el dispositivo de filtración 12 para filtrar las partículas sólidas calcinadas del gas de combustión. Como otro ejemplo de una realización que podría no utilizar un dispositivo de filtro 12 para filtrar el material particulado sólido calcinado que sale del calcinador 11, se puede proporcionar una realización en un horno de arco eléctrico utilizado para la formación de escoria para la fabricación de acero. En estas realizaciones, el material particulado sólido puede alimentarse a una llama 3F formada en el calcinador 11 para producir material calcinado que puede alimentarse a la escoria para su uso en la formación de escoria a través del horno de arco. La filtración del material particulado sólido puede no ser necesaria en esta realización, ya que el material calcinado puede alimentarse a la escoria para su uso en esta sin necesidad de filtración. Los gases de escape de la operación pueden extraerse para la captura de carbono u otro tipo de tratamiento antes de la emisión de cualquier componente no utilizado o no capturado del gas de escape. La escoria formada en estas realizaciones puede utilizarse posteriormente para formar un cuerpo de acero (por ejemplo, un lingote de acero formado a partir de la escoria, etc.).

En algunas configuraciones, el material de alimentación de la fuente 9 puede estar húmedo (por ejemplo, considerarse lodo o contener humedad). Por ejemplo, el material de alimentación puede incluir lodo/polvo de piedra caliza con una concentración de agua de entre el 20 % en peso y el 40 % en peso, entre el 10 % en peso y el 40 % en peso, u otra concentración de agua. En estas configuraciones, el material de alimentación puede someterse a un proceso de presecado antes de ser alimentado al quemador 3 o al calcinador 11, pasando por al menos un secador 15 (mostrado en línea discontinua). El secador 15

puede ubicarse entre el al menos un dispositivo de filtrado 12 y el sistema de captura de CO₂ 20 para aprovechar el flujo de gas caliente de escape 14 del calcinador 11 y proporcionar un gas caliente que facilite el secado del material de alimentación mediante un intercambiador de calor con dicho material dentro del secador 15. Este flujo de gas caliente de escape 14 puede salir del calcinador 11 y posteriormente filtrarse mediante al menos un dispositivo de filtrado 12 antes de ser alimentado desde este dispositivo al secador 15 en dichas realizaciones. Tras pasar por el secador 15, el flujo de gas de escape puede salir del secador 15 para ser alimentado al sistema de captura de CO₂ 20 (por ejemplo, a un condensador 21, etc.).

Como se indicó anteriormente, el dispositivo de filtrado 12 (cuando se utiliza) puede incluir uno o más ciclones, uno o más filtros de mangas, uno o más separadores de partículas sólidas, o combinaciones de estos, para facilitar la filtración de partículas sólidas del flujo 11F de material particulado arrastrado por los gases de combustión, que sale de la salida del calcinador 11. Además, para este tipo de configuraciones del aparato 1 que pueden utilizar un secador 15, se puede colocar un conducto de alimentación de filtración 12a entre el dispositivo de filtrado 12 y la salida del calcinador 11. El conducto de alimentación de filtración 12a puede incluir una tolva o entrada de un recipiente de alimentación de partículas de un dispositivo de filtración (por ejemplo, la tolva de un ciclón, la entrada de un ciclón o un filtro de mangas, etc.) que se conecta a la salida del calcinador 11, por ejemplo.

Como se mencionó anteriormente, cabe destacar que las configuraciones del quemador 3 pueden utilizar diferentes tipos de combustibles u oxidantes. Por ejemplo, como alternativa (o además) al uso de gas natural, se puede utilizar un combustible líquido atomizado o un combustible sólido pulverizado (por ejemplo, carbón pulverizado) en un gas portador u otra fuente de combustible. También se debe tener en cuenta que un combustible puede incluir un material combustible. Ejemplos de combustibles incluyen gas natural, propano, hidrógeno, diésel, carbón u otras fuentes de combustible que puedan quemarse. El combustible puede pasar a través de al menos una boquilla del quemador 3.

El oxidante puede referirse a un fluido que incluye una concentración de oxígeno en el mismo que se puede utilizar para la combustión del combustible. Por ejemplo, el contenido de oxígeno del oxidante utilizado en el quemador 3 puede estar en un rango del 21 % en volumen al 100 % en volumen de oxígeno, del 30 % en volumen al 70 % en volumen de oxígeno, del 35 % en volumen al 60 % en volumen de oxígeno, u otro rango adecuado de contenido de oxígeno. En algunas configuraciones, el flujo de oxidante alimentado al quemador 3 puede ser, por ejemplo, del 90 % en volumen al 100 % en volumen de oxígeno. El oxidante puede ser cualquier oxidante adecuado. Por ejemplo, puede incluir aire, aire enriquecido con oxígeno o flujos de gas oxígeno. El oxidante puede pasar a través de una boquilla de un elemento quemador (por ejemplo, una boquilla anular que rodea una boquilla interna del elemento quemador o una boquilla central, la más interna del elemento quemador).

En algunas realizaciones, se puede incluir un combustible u otro material con un oxidante que pasa a través de una boquilla anular u otro tipo de boquilla del quemador 3. En otras realizaciones, el combustible puede pasar a través de una o más boquillas, mientras que el material de alimentación y/o el oxidante pasan a través de una o más boquillas adicionales del quemador 3.

En lo anterior, se pueden apreciar ejemplos de quemadores 3 que se pueden utilizar en el aparato 1 para calcinar material de alimentación sólido, así como en las realizaciones a modo de ejemplo del quemador 3 que se muestran en las figuras 2-5. Por ejemplo, el quemador 3 puede estructurarse para incluir múltiples boquillas concéntricas: una primera boquilla interna 3d, una segunda boquilla anular 3e, separada de la primera boquilla interna 3d y ubicada alrededor de la periferia de la primera boquilla interna 3d, y una tercera boquilla anular 3f, separada de la segunda boquilla anular 3e y ubicada alrededor de esta, de modo que esta última se ubique entre la primera boquilla interna 3d y la tercera boquilla anular 3f. La tercera boquilla anular 3f puede considerarse la boquilla más externa en algunas realizaciones. La primera boquilla interna 3d puede ubicarse centralmente y hacia adentro con respecto a las segunda y tercera boquillas anulares 3e y 3f. La forma transversal de la primera boquilla interna puede ser cualquier forma adecuada (por ejemplo, circular, ovalada, poligonal, etc.).

Las secciones transversales anulares de las boquillas anulares segunda y tercera 3e y 3f también pueden tener cualquier forma transversal adecuada (por ejemplo, anular, etc.).

Las boquillas del quemador 3 pueden ubicarse en un plano de salida del quemador 3 orientado hacia la cavidad, cámara o canal interior del calcinador 11 para quemar el combustible y emitir una llama 3F en el calcinador 11. La llama 3F puede estar adyacente a una zona de entrada del calcinador 11, por ejemplo. La zona de entrada puede estar en un primer lado del calcinador 11 opuesto al lado de salida, a través del cual se expulsan el material calcinado y los gases de escape (por ejemplo, hacia un dispositivo de filtro 12, como se mencionó anteriormente).

En algunas realizaciones, como la que se muestra en las Figuras 2-3, el quemador 3 puede configurarse para emitir un primer flujo de oxidante 3c que incluye un primer oxidante a una primera velocidad. El primer oxidante puede ser oxígeno, aire enriquecido con oxígeno o aire. El primer oxidante puede ser, por ejemplo, del 95 % en volumen de oxígeno, o del 80 % al 100 % en volumen de oxígeno, por ejemplo. La velocidad de salida del primer oxidante puede ser una velocidad del sonido o puede ser otra velocidad adecuada (p.ej., 10 m/s a 100 m/s etc.). La velocidad del primer flujo de oxidante 3c también puede considerarse la velocidad de salida del primer flujo de oxidante 3c del quemador 3.

La primera boquilla anular 3e puede emitir un primer flujo de combustible 3b a una primera velocidad de combustible. El primer combustible del primer flujo de combustible 3b puede incluir gas natural y su velocidad puede ser cualquier velocidad adecuada (por ejemplo, de 10 a 100 m/s o de 5 a 110 m/s, etc.). Alternativamente, el primer combustible del primer flujo de combustible 3b puede incluir diésel, carbón pulverizado en aire, hidrógeno u otro combustible adecuado. La velocidad del primer flujo de combustible 3b también puede considerarse la velocidad de salida del quemador 3.

La segunda boquilla anular 3f puede emitir un primer flujo particulado 3a. El primer flujo particulado puede incluir material particulado sólido procedente de la fuente de alimentación 9, arrastrado por un gas portador. El gas portador del primer flujo particulado 3a puede ser un oxidante o incluir uno. Por ejemplo, el oxidante del primer flujo particulado 3a puede incluir

el mismo tipo de oxidante que el primero o uno diferente. Por ejemplo, el primer flujo particulado 3a puede incluir un segundo oxidante, que puede ser aire o aire enriquecido con oxígeno, mientras que el primer oxidante del primer flujo de oxidante 3c es oxígeno. Otro ejemplo: el oxidante del primer flujo particulado 3a puede ser oxígeno, y el oxidante del primer flujo también puede ser oxígeno o incluir oxígeno.

Alternativamente, el gas portador que arrastra el material de alimentación particulado del primer flujo particulado 3a puede no incluir un oxidante. Por ejemplo, el gas portador puede incluir dióxido de carbono o ser un gas de combustión emitido por una cámara de combustión u otro elemento de una planta conectada al aparato 1 para calcinar material de alimentación que puede no contener oxígeno o tener una pequeña concentración de oxígeno (p. ej., menos del 3 % en volumen de oxígeno).

La velocidad del primer flujo particulado 3a (p. ej., partículas arrastradas por el segundo oxidante u otro gas portador) puede ser cualquier velocidad adecuada (p. ej., una velocidad de 1-65 m/s, etc.). La velocidad del primer flujo particulado 3a también puede considerarse la velocidad del primer flujo particulado 3a emitido por el quemador 3.

Otra configuración del quemador 3 puede configurarse para que diferentes boquillas emitan flujos diferentes. Por ejemplo, como se muestra en la realización de las Figuras 4-5, la primera boquilla interna del quemador 3d puede emitir el primer flujo particulado 3a, la segunda boquilla anular 3e puede emitir el primer flujo de combustible 3b y la tercera boquilla anular 3f puede emitir el primer flujo de oxidante 3c.

El quemador 3 de las Figuras 2-3 también puede configurarse para que estas boquillas emitan estos flujos como una configuración operativa alternativa, de modo que el quemador 3 de las Figuras 2-3 funcione de manera que la primera boquilla interna 3d pueda emitir el primer flujo particulado 3a, la segunda boquilla anular 3e pueda emitir el primer flujo de combustible 3b y la tercera boquilla anular 3f pueda emitir el primer flujo de oxidante 3c.

Además, el quemador a modo de ejemplo 3 de las Figuras 4-5 puede configurarse alternativamente de modo que la primera boquilla interna 3d del quemador emita el primer

flujo de oxidante 3c, la segunda boquilla anular 3e el primer flujo de combustible 3b y la tercera boquilla anular 3f el primer flujo particulado 3a.

En otras realizaciones, los quemadores 3 de las Figuras 2-3 y 4-5 pueden configurarse de modo que el primer flujo particulado 3a no contenga partículas y solo comprenda un segundo oxidante. En estas realizaciones, las partículas de la fuente de alimentación solo pueden introducirse en el calcinador 11 adyacente a la llama 3F para pasar a través de ella (por ejemplo, a través de un conducto de alimentación de lanza 10L). En estas realizaciones, el primer flujo particulado 3a puede considerarse un segundo flujo de oxidante, ya que no contiene partículas arrastradas.

En otras realizaciones (por ejemplo, configuraciones de quemador en las que no se introduce material particulado para su inyección en la llama 3F), el quemador 3 puede no incluir tres o más boquillas. En su lugar, puede incluir una sola boquilla con combustible arrastrado por un oxidante, o una primera y una segunda boquillas que emiten un primer flujo de oxidante y un primer flujo de combustible. Como otra realización alternativa, el quemador 3 puede incluir múltiples boquillas: una primera boquilla por la que sale el combustible y una segunda boquilla por la que sale el material particulado arrastrado por un oxidante para la combustión del combustible y la formación de la llama 3F en el calcinador 11. Por lo tanto, cabe destacar que se pueden utilizar numerosos diseños de quemadores para la formación de la llama 3F, de modo que el calcinador 11 funcione dentro del rango de temperatura de calcinación preseleccionado para las fases F1 y F2.

El quemador 3 puede configurarse para emitir la llama 3F y funcionar con una relación de equivalencia preseleccionada. La relación de equivalencia puede ser la relación entre la relación real combustible/oxidante y la relación estequiométrica combustible/oxidante. La relación de equivalencia preseleccionada puede estar en el rango del 0,8 al 1,2, etc. En algunas realizaciones, la relación de equivalencia preseleccionada puede ser mayor o igual a 0,9 a 1,05, entre 0,9 y 1,1, entre 0,9 y 1,05, entre 0,95 y 1,0, 0,9, 0,95, 1,0 o entre 0,9 y 1,1, por ejemplo.

Las realizaciones del aparato 1 para calcinar un material de alimentación pueden incluir varios sensores y otros elementos de control del proceso (p. ej., válvulas de control, etc.) conectados al controlador. El controlador puede incluir una estación de trabajo que ejecuta un programa de control automatizado del proceso, el cual también está conectado a las válvulas de control, sensores y otros elementos de control, o puede ser un controlador integrado en un sistema de control distribuido (DCS). El controlador puede incluir un dispositivo informático con un procesador conectado a un medio legible por computadora no transitorio que contiene el código del programa de control, y al menos un transceptor para la comunicación con las válvulas de control y los sensores (p. ej., mediante una conexión de red, una conexión de red inalámbrica o una conexión de comunicación por cable, etc.). Uno o más dispositivos de entrada pueden conectarse al controlador para permitir que un usuario proporcione una entrada al controlador. Uno o más dispositivos de salida (por ejemplo, una pantalla, una impresora, etc.) pueden conectarse comunicativamente al controlador para proporcionar también una salida al usuario.

Las realizaciones del aparato 1 para calcinar material de alimentación pueden configurarse de modo que el material de alimentación particulado sólido que se alimenta al quemador 3 o al calcinador 11 desde la fuente de material de alimentación 9 incluya carbonato. Este carbonato puede ser, por ejemplo, CaCO_3 , MgCO_3 , una combinación de CaCO_3 y MgCO_3 , u otro carbonato adecuado. La composición del material de alimentación puede incluir una composición de carbonato preseleccionada, así como una concentración de impurezas.

La composición de carbonato preseleccionada puede incluir, por ejemplo, carbonato de magnesio o carbonato de calcio. Por ejemplo, la concentración de carbonato preseleccionada puede ser de al menos el 70 % en peso de CaCO_3 , entre el 70 % en peso y el 99 % en peso de CaCO_3 , u otra concentración adecuada de CaCO_3 , o puede ser del 70 % en peso de MgCO_3 , entre el 70 % en peso y el 99 % en peso de MgCO_3 , u otro MgCO_3 adecuado. La concentración de carbonato preseleccionada también puede incluir una combinación de

MgCO₃ y CaCO₃ que represente al menos el 70 % en peso o entre el 70 % y el 99 % en peso del material de alimentación.

La concentración de impurezas puede ser de hasta el 30 % en peso, entre el 30 % y el 1 % en peso, u otra concentración adecuada. Las impurezas de la concentración de impurezas del material de alimentación pueden incluir Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, así como otras impurezas.

En algunas realizaciones, el material de alimentación puede ser, por ejemplo, piedra caliza triturada u otro material de alimentación adecuado. En algunas realizaciones, la fuente de material de alimentación 9 puede incluir material particulado almacenado en una tolva u otro recipiente de almacenamiento, o puede ser un dispositivo de trituración configurado para triturar el material de alimentación antes de su alimentación al calcinador. Este material de alimentación particulado sólido puede incluir polvo, así como partículas sólidas de gran tamaño. El rango de tamaño del material de alimentación particulado puede ser, en promedio, de entre 50 y 2000 micrómetros. Alternativamente, el rango de tamaño del material de alimentación particulado puede ser, en promedio, inferior a 2000 micrómetros. Por ejemplo, el rango de tamaño de partícula para el material de alimentación particulado sólido a calcinar puede estar en el rango de 5-500 micrómetros, de 5 a 30 micrómetros, u otro rango de tamaño adecuado en algunas realizaciones. En algunas realizaciones, el material de alimentación puede tener un tamaño de partícula promedio de 2.000 micrómetros y un tamaño de partícula máximo que no supere los 5.000 micrómetros. Dichas realizaciones también pueden incluir un tamaño de partícula mínimo que no sea inferior a 5 micrómetros (por ejemplo, el rango de tamaño puede estar entre 5 y 5.000 micrómetros).

El calcinador 11 puede operarse de modo que el material particulado sólido que se alimenta a la llama 3F y que posteriormente pasa por el resto del calcinador 11 hasta la salida del mismo, se calcine a partir de CaCO₃ para formar CaO o Ca(OH)₂. El material calcinado que sale del calcinador hacia un dispositivo de filtro 12 puede incluir principalmente CaO o Ca(OH)₂, por ejemplo. En algunas realizaciones, el material calcinado que sale del calcinador puede contener más del 50 % en peso de CaO, más del 75 % en peso de CaO, más del 90

% en peso de CaO, más del 95 % en peso de CaO, o entre el 90 % en peso y el 100 % en peso de CaO (por ejemplo, entre el 95 % en peso y el 98 % en peso de CaO).

Algunas realizaciones del calcinador 11 pueden operarse de forma que se forme Ca(OH)_2 mediante el funcionamiento del calcinador 11 y el quemador 3 sin necesidad de una etapa de hidratación posterior (p. ej., exposición de CaO al agua, etc.). Por ejemplo, el material calcinado resultante del calcinador 11 puede ser principalmente Ca(OH)_2 . Por ejemplo, el material calcinado resultante del calcinador 11 puede contener más del 50 % en peso de Ca(OH)_2 , más del 75 % en peso de Ca(OH)_2 , más del 90 % en peso de Ca(OH)_2 , más del 95 % en peso de Ca(OH)_2 , o entre el 90 % en peso de Ca(OH)_2 y el 100 % en peso de Ca(OH)_2 (p. ej., entre el 95 % en peso de Ca(OH)_2 y el 98 % en peso de Ca(OH)_2). El Ca(OH)_2 formado puede formarse mediante el funcionamiento del calcinador 11 y el quemador 3 sin necesidad de una etapa de hidratación posterior (p. ej., la exposición del CaO al agua en un proceso posterior, etc.).

La formación de Ca(OH)_2 mediante calcinación se debe a la formación de agua que puede ocurrir durante la combustión del combustible para formar la llama 3F generada por el quemador 3. Creemos que la reacción química que puede ocurrir para dicha calcinación puede ser $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaO} + (\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$. El agua (H_2O) puede ser agua procedente de la combustión del combustible, así como agua presente o incluida en el material de alimentación.

Para el material de alimentación que utiliza otros tipos de carbonato (p. ej., dolomita o carbonatos de magnesio), el material calcinado puede tener una composición diferente. Por ejemplo, el material de alimentación calcinado que sale del calcinador 3 puede ser MgO o Mg(OH)_2 , o incluir una combinación de Ca(OH)_2 y Mg(OH)_2 , una combinación de CaO y MgO o una combinación de Ca(OH)_2 , Mg(OH)_2 , CaO y MgO. En estas realizaciones, el material calcinado que sale del calcinador 11 puede tener más del 20 % en peso de Mg(OH)_2 y más del 50 % en peso de Ca(OH)_2 , entre el 5 % en peso de Mg(OH)_2 y el 30 % en peso de Mg(OH)_2 y entre el 70 % en peso de Ca(OH)_2 y el 95 % en peso de Ca(OH)_2 , o puede ser otra

composición adecuada con concentraciones de salida del calcinador de Mg(OH)_2 y Ca(OH)_2 , o concentraciones de salida del calcinador de MgO , CaO , Mg(OH)_2 y Ca(OH)_2 .

Como otro ejemplo, en realizaciones que solo utilizan carbonato de magnesio como material de alimentación, se contempla que el material de alimentación calcinado resultante del calcinador 11 pueda contener más del 50 % en peso de Mg(OH)_2 , más del 75 % en peso de Mg(OH)_2 , más del 90 % en peso de Mg(OH)_2 , más del 95 % en peso de Mg(OH)_2 , o entre el 90 % en peso de Mg(OH)_2 y el 100 % en peso de Mg(OH)_2 (por ejemplo, entre el 95 % en peso de Mg(OH)_2 y el 98 % en peso de Mg(OH)_2), o bien, incluir concentraciones de material calcinado resultantes del calcinador que incluyan concentraciones de MgO y Mg(OH)_2 .

En las realizaciones que forman Mg(OH)_2 , se contempla que el Mg(OH)_2 formado se pueda formar mediante el funcionamiento del calcinador 11 y el quemador 3 sin necesidad de una etapa de hidratación posterior (p. ej., la exposición del MgO al agua, etc., en un proceso posterior). La formación de Mg(OH)_2 mediante calcinación se puede lograr gracias a la formación de agua que puede ocurrir durante la combustión del combustible para formar la llama 3F generada por el quemador 3. Se contempla que la reacción química que puede ocurrir para dicha calcinación sea $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{MgO} + (\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{Mg(OH)}_2$. El agua (H_2O) puede ser agua procedente de la combustión del combustible, así como agua presente o incluida en el material de alimentación.

Las realizaciones del aparato y el proceso para calcinar un material de alimentación también pueden proporcionar una mejor recuperación de CO_2 . Por ejemplo, la calcinación del material de alimentación puede realizarse de modo que se emita una mayor cantidad y/o concentración de CO_2 proveniente del material de alimentación durante la calcinación para que pueda capturarse posteriormente como producto a través del dispositivo de captura de CO_2 23. Se pueden configurar realizaciones para proporcionar una mejor salida de material calcinado, así como una mejor producción de CO_2 para realizaciones diseñadas para proporcionar tanto un producto de CO_2 como un producto de material calcinado.

EXPERIMENTOS Y SIMULACIONES

Se utilizó una realización a modo de ejemplo de un aparato para la calcinación de material de alimentación que comprende CaCO_3 que empleaba una realización a modo de ejemplo de nuestro proceso para la calcinación de material de alimentación en pruebas confidenciales para evaluar el desempeño del aparato y del proceso. El quemador 3 se operó durante las pruebas de forma que el rango de temperatura de calcinación preseleccionado dentro del calcinador 11 fue de 926 °C a 1.038 °C (1.700 °F a 1.900 °F). El combustible utilizado fue gas natural, el oxidante fue oxígeno al 90-99.99 % en volumen y el gas portador de partículas fue aire enriquecido con oxígeno al 30-45 % en volumen.

Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 1 a continuación. Las imágenes de microscopio electrónico de barrido de las muestras 1-3 obtenidas en estas pruebas también se muestran en las Figuras 6-8. La muestra 1 (Figura 6) es una imagen del material de alimentación que incluye CaCO_3 utilizada en la prueba. La muestra 2 (Figura 7) es un material parcialmente calcinado extraído de la llama 3F del quemador 3, obtenido de la primera fase F1 de la calcinación durante la prueba. La muestra 3 (Figura 8) es un material completamente calcinado obtenido de la salida del calcinador 11 después de la segunda fase F2 de la calcinación durante la prueba. Se utilizó un tiempo de residencia de 30 segundos para los experimentos.

Tabla 1: Composición de la fase cristalina de las muestras de las figuras 6-8

Fase	Muestra 1 (Figura 6)	Muestra 2 (Figura 7)	Muestra 3 (Figura 8)
CaCO_3	96,2 % en peso	21,6 % en peso	2,0 % en peso
Ca(OH)_2	0,0 % en peso	76,3 % en peso	97,7 % en peso
SiO_2	1,2 % en peso	0,3 % en peso	0,3 % en peso
$\text{CaMg(CO}_3)_2$	2,7 % en peso	0,0 % en peso	0,0 % en peso
$\text{Ca}_6(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_2$	0,0 % en peso	1,8 % en peso	0,0 % en peso

La Tabla 1 muestra la composición cristalina del material particulado sólido calcinado durante la prueba. Estos datos se obtuvieron mediante análisis de difracción de rayos X en polvo (DRX) de las muestras. Los picos de difracción en los datos de difracción de rayos X (DRX) se compararon con patrones de referencia, como se muestra en las Figuras 9-11. Las estructuras cristalinas de las fases identificadas se utilizaron para refinar las composiciones relativas de las porciones cristalinas de las muestras. Se desconoce el contenido amorfo de las muestras. Los ajustes de las intensidades calculadas a partir de los modelos de muestra refinados con los datos de DRX observados se muestran en las Figuras 12-14. Como se mencionó anteriormente, la Muestra 1 es el material crudo antes de ser calcinado, la Muestra 2 es el material parcialmente calcinado y recolectado del interior de la llama 3F del quemador 3 durante la primera fase F1 de la calcinación, y la Muestra 3 es el material calcinado que sale de la salida del calcinador 11 tras haber sido emitido desde la salida del calcinador después de la segunda fase F2 de la calcinación.

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (MEB/EDS) de las Muestras 1-3 se muestran en las Figuras 6-8. Estas imágenes se obtuvieron mediante un voltaje de aceleración de 2 kV con un aumento de 12.0000x. Las figuras 6-8 se basan en imágenes obtenidas a una escala de 4.00 micrómetros (μm).

Como se puede apreciar en los resultados anteriores, las pruebas demostraron que un material de alimentación con más del 95 % en peso de CaCO_3 pudo calcinarse para obtener un material calcinado que comprendía 97.5 % en peso de Ca(OH)_2 sin necesidad de exponer a tal material al agua aguas abajo del calcinador 11. Estos resultados demuestran que las realizaciones pueden proporcionar una calcinación mejorada del material con tiempos de residencia significativamente más cortos.

Como se puede apreciar en la Figura 6, el material de alimentación presentó una morfología/textura superficial lisa. Por el contrario, las muestras 2 y 3, como se muestra en las figuras 7-8, presentan un aspecto nodular, lo que indica que se extrajo una cantidad significativa de CO_2 del material de alimentación mediante calcinación. Estas imágenes

corroboran los datos de difracción de rayos X (DRX) obtenidos en las pruebas, que muestran una calcinación muy eficiente del material de alimentación, lo que puede resultar en una formación significativa de CO₂ en el gas de salida del calcinador para su uso posterior en la captura de carbono. Las pruebas demostraron que, además de mejoras en la calcinación, se puede obtener una mejor producción y captura de CO₂ mediante realizaciones de nuestro proceso y aparato. Estas imágenes, junto con el análisis de la composición mencionado anteriormente, muestran que las realizaciones pueden proporcionar una mejor producción de CO₂ para obtener mejores rendimientos de CO₂, además de un mejor rendimiento de la calcinación.

También realizamos una simulación de una realización a modo de ejemplo de nuestro aparato y proceso de calcinación de material. En la realización simulada, el quemador 3 se operó de forma que recibiera 6,96 MMBTU/h de gas natural, así como 15.000 pies cúbicos estándar por hora (SCFH) de oxígeno y 1,853 toneladas por hora de material particulado de CaCO₃. En esta realización simulada, todo el CaCO₃ que contenía material de alimentación se pasó por el quemador para su alimentación al calcinador 11. La operación de esta realización simulada resultó en la formación de 1.0 onzas líquidas de cal (CaO) por hora, así como de 1,161 toneladas por hora de CO₂.

Estos resultados de simulación demostraron además que las realizaciones pueden proporcionar mejoras significativas en el rendimiento operativo utilizando equipos de menor tamaño adaptados a los tiempos de residencia relativamente cortos que se pueden utilizar para la calcinación (p. ej., menos de 5 minutos, menos de 7 minutos, menos de 3 minutos de tiempo de residencia, menos de 1 minuto de tiempo de residencia, etc.).

Las realizaciones de nuestros aparatos y procesos permiten utilizar equipos de menor tamaño para calcinar material de alimentación. Estos equipos de menor tamaño se pueden utilizar gracias a los menores tiempos de residencia necesarios. Esto puede ayudar a reducir considerablemente los costos de capital y construcción asociados con la construcción de una planta de calcinación, por ejemplo. Además, los costos operativos y de mantenimiento se pueden reducir gracias al menor impacto ambiental que tienen estas realizaciones.

Las realizaciones que no utilizan aire como oxidante o que utilizan menos aire en comparación con los sistemas convencionales también pueden proporcionar un mejor impacto ambiental al evitar la formación de óxidos nitrosos y/o reducir su formación. Tales realizaciones también (o alternativamente) pueden utilizar dispositivos de limpieza de gases de escape más sencillos para eliminar dichos elementos indeseables de los gases de escape antes de que se emitan a la atmósfera.

Como se mencionó anteriormente, también se pueden proporcionar realizaciones que permitan la formación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y/o $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sin utilizar agua en una etapa de procesamiento separado (por ejemplo, una etapa de hidratación). Tal etapa de procesamiento por separado puede incluir una etapa de hidratación que puede ocurrir después de la formación de cal mediante calcinación, por ejemplo. Esto puede proporcionar un desempeño ambiental aún mejor durante la operación, al evitar la necesidad de utilizar agua o aguas residuales que podrían requerir tratamiento. Por lo tanto, cabe destacar que las realizaciones pueden proporcionar mejores efectos ambientales, además de mejoras en la operación y reducciones de costos.

Cabe destacar que las realizaciones del aparato 1 para calcinar material de alimentación y que las realizaciones del proceso de calcinación de material de alimentación pueden adaptarse para cumplir con un conjunto específico de criterios de diseño. Además, (y como se mencionó anteriormente), los aparatos 1 para calcinar material de alimentación particulado sólido (p. ej., calcinadores, sistemas de calcinación) y los quemadores 3 que pueden incorporarse a dichos dispositivos pueden configurarse para que incluyan elementos de control de proceso ubicados y configurados para supervisar y controlar las operaciones (p. ej., sensores de temperatura y presión, sensores de flujo, un sistema de control de proceso automatizado con al menos una estación de trabajo que incluye un procesador, memoria no transitoria y al menos un transceptor para la comunicación con los elementos sensores, válvulas y controladores, a fin de proporcionar una interfaz de usuario para un sistema de control de proceso automatizado que pueda ejecutarse en la estación de trabajo o en otro dispositivo informático del sistema, etc.).

Además, se contempla que una característica particular descrita, ya sea individualmente o como parte de una realización, pueda combinarse con otras características descritas individualmente o con partes de otras realizaciones. Por lo tanto, los elementos y actos de las diversas realizaciones descritas en el presente documento se pueden combinar para proporcionar realizaciones adicionales. Por tanto, si bien se han mostrado y descrito anteriormente ciertas realizaciones a modo de ejemplo de procesos para calcinar un material de alimentación, aparatos para calcinar un material de alimentación y métodos para fabricar y utilizar los mismos, debe entenderse claramente que la invención no se limita a ellos, sino que puede incorporarse y practicarse de otras maneras dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes.