

PROCESO DE FABRICACIÓN DE VIDRIO

[001] La presente divulgación se refiere a un proceso para fabricar vidrio y, más específicamente, para retirar burbujas de gas de vidrio fundido.

Antecedentes

[002] El vidrio a base de sílice, tal como el vidrio de sosa-cal-sílice, es frecuente en la fabricación de recipientes de vidrio y otros artículos. El vidrio fundido utilizado para fabricar estos artículos se prepara convencionalmente mediante la fusión de una mezcla de materiales formadores de vidrio sólidos conocida como un lote de vidrio en un tanque de fusión de un horno de fusión de vidrio de tanque continuo para producir un volumen de vidrio fundido conocido como un producto fundido de vidrio. Materiales formadores de vidrio adicionales se cargan continuamente en el tanque de fusión, se depositan en la parte superior del producto fundido de vidrio ya en el horno y se funden gradualmente en el producto fundido mediante la aplicación continua de calor. El calor se puede suministrar al horno, por ejemplo, desde uno o más quemadores de combustión colocados por encima y/o por debajo de una superficie libre del producto fundido de vidrio. Los quemadores colocados sobre la superficie del producto fundido de vidrio se conocen comúnmente como quemadores superiores. Los quemadores superiores generan una llama entre el producto fundido de vidrio y una corona del tanque de fusión, y el calor se transfiere a los materiales formadores de vidrio y el vidrio se funde por radiación de la llama y la corona. Los quemadores colocados debajo de la superficie del producto fundido de vidrio se conocen comúnmente como quemadores de combustión sumergidos. Una mezcla de combustible y un oxidante se queman en el producto fundido de vidrio por los quemadores sumergidos, y el calor se transfiere directamente al producto fundido de vidrio por los productos de la combustión.

[003] Las burbujas de gas se pueden generar dentro del vidrio fundido durante el proceso de fusión a partir de diversas fuentes. Por ejemplo, se generan típicamente cantidades significativas de gas de dióxido de carbono (CO_2) durante la fabricación de vidrio de sosa-lima-sílice a partir de la descomposición térmica de carbonato de sodio (Na_2CO_3), carbonato de calcio (CaCO_3) y otras materias primas a base de carbonato en el lote de vidrio. Además, cuando se utilizan quemadores de combustión sumergidos para calentar el vidrio fundido, los productos de combustión gaseosos, incluidos el CO_2 y humedad (H_2O) se liberan directamente en el vidrio fundido y a menudo ocupan más del 60% en volumen del vidrio fundido resultante. Después de que los materiales formadores de vidrio se han fundido y

homogeneizado, el vidrio fundido se acondiciona térmicamente al enfriarse hasta una temperatura adecuada para la formación. Las burbujas de gas que permanecen en el vidrio fundido durante la etapa de acondicionamiento térmico del proceso pueden quedar atrapadas en el vidrio y en los artículos de vidrio formados a partir del mismo. Sin embargo, la presencia de burbujas de gas dentro de los artículos de vidrio formados puede ser indeseable para ciertas aplicaciones. Como resultado, se han propuesto y empleado varias técnicas para ayudar a retirar burbujas de gas del vidrio fundido corriente arriba de las operaciones de formación de vidrio.

[004] El proceso de retiro de burbujas de gas del vidrio fundido se conoce como clarificación y refinado, y se logra convencionalmente calentando el vidrio fundido a una temperatura (por ejemplo, 1500-1600 °C) que reduce o mantiene la viscosidad del vidrio fundido, y luego sosteniendo el vidrio fundido a la temperatura durante una cantidad de tiempo suficiente para que las burbujas de gas se eleven a una superficie libre del vidrio fundido y escapen. Los compuestos químicos conocidos como agentes de refinado a menudo se añaden al lote de vidrio para ayudar en el proceso de refinado. Los agentes de refinado funcionan mediante la liberación de gases adicionales en el vidrio fundido cuando el vidrio fundido se calienta a una temperatura a o por encima de una temperatura de inicio de refinado predeterminada. Las burbujas de gas y los gases disueltos en el vidrio fundido se difunden en las nuevas burbujas de gas generadas por los agentes de refinado, lo que aumenta el tamaño de las burbujas de gas en el vidrio fundido. A medida que las burbujas de gas aumentan de tamaño, también lo hace la flotabilidad de las burbujas de gas, lo que aumenta la velocidad a la que las burbujas de gas se elevan a la superficie del vidrio fundido y se liberan.

[005] Algunos ejemplos de agentes de refinado incluyen sulfato de sodio (Na_2SO_4), cloruro de sodio (NaCl), óxido de arsénico (As_2O_x) y óxido de antimonio (Sb_2O_x). Cuando se utiliza sulfato de sodio como un agente de refinado, gran parte del sulfato se descompone a temperaturas entre 1300-1550 °C ($\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{O}^{2-}$), liberando así dióxido de azufre (SO_2) y oxígeno (O_2) en el vidrio fundido. El cloruro de sodio es volátil a temperaturas superiores a aproximadamente 1400 °C y, cuando el vidrio fundido se calienta por encima de esta temperatura, liberará gas de cloruro de sodio en el vidrio fundido. El arsénico (As) y el antimonio (Sb) son iones polivalentes y pueden estar presentes en el vidrio fundido en múltiples estados de oxidación dependiendo del potencial de reducción de oxidación (redox) del vidrio fundido (relación redox = % en peso de FeO a % en peso de hierro total (como Fe_2O_3)), que es una función de la temperatura y la presión parcial de oxígeno del vidrio

fundido. Por ejemplo, cuando se utiliza óxido de arsénico como un agente de refinado, el pentóxido de arsénico (As_2O_5) y el trióxido de arsénico (As_2O_3) existen en equilibrio entre sí en el vidrio fundido ($\text{As}_2\text{O}_5 \rightleftharpoons \text{As}_2\text{O}_3 + \text{O}_2$). Cuando el vidrio fundido se calienta a temperaturas de 1200 °C y superiores, se favorece la formación de As_2O_3 y se libera oxígeno (O_2) en el vidrio fundido. Después, cuando el vidrio se enfría hasta una temperatura adecuada para la formación, las burbujas de oxígeno restantes en el vidrio fundido se pueden reabsorber de nuevo en el vidrio mediante la reacción con As_2O_3 para formar As_2O_5 .

[006] Se ha descubierto que el uso de quemadores de combustión sumergidos durante la etapa de fusión del lote de vidrio puede socavar el propósito previsto de incluir agentes de refinado en el lote de vidrio. En particular, el uso de quemadores de combustión sumergidos durante la etapa de fusión puede afectar o destruir la capacidad de los agentes de refinación inicialmente presentes en el lote de vidrio para ayudar en el refinado del vidrio fundido en la etapa de refinado posterior. Sin pretender limitarse por la teoría, se cree que el uso de quemadores de combustión sumergidos durante la etapa de fusión puede destruir la funcionalidad de los agentes de refinado en el lote de vidrio, por ejemplo, al desprender los agentes de refinado de los materiales restantes en el lote de vidrio y agotar los agentes de refinación de la etapa de fusión junto con los subproductos de combustión, y/o mediante el desencadenamiento de la descomposición térmica de los agentes de refinado durante la etapa de fusión, en lugar de durante la etapa de refinado posterior. Si los agentes de refinado incluidos en el lote de vidrio se evaporan o destruyen durante la etapa de fusión, no estarán disponibles para ayudar en el retiro de burbujas de gas del vidrio fundido durante la etapa de refinado.

[007] Los cambios en el potencial redox de un producto fundido de vidrio, por ejemplo, que resultan de la adición de agentes oxidantes y/o reductores, pueden alterar el color del vidrio resultante. Esto se debe a que un cambio en el potencial redox del producto fundido de vidrio puede cambiar el equilibrio de los iones colorantes polivalentes en el vidrio. Por ejemplo, el óxido de hierro presente en el estado de oxidación +3 confiere un color amarillo claro al vidrio de sosa-cal, en tanto que el óxido de hierro presente en la etapa de oxidación +2 confiere un color azul al vidrio de sosa-cal. Además, en un producto fundido de vidrio de sosa-cal altamente reducido, el hierro se puede acoplar con azufre para producir sulfuro de hierro para producir un vidrio de color ámbar.

Breve Descripción de la Divulgación

[008] Un objeto general de la presente divulgación, de acuerdo con un aspecto de la descripción, es proporcionar un proceso de fabricación de vidrio en el que un lote de vidrio

se funde en una primera etapa mediante combustión sumergida para producir un volumen de vidrio fundido no refinado, y luego se introduce un agente de refinación en el vidrio fundido no refinado en una segunda etapa corriente abajo de la primera etapa. La introducción del agente de refinado en el vidrio fundido no refinado después de completar la etapa de combustión sumergida asegura que el agente de refinado esté presente en el vidrio fundido y disponible para ayudar a liberar burbujas de gas del vidrio fundido en la etapa de refinado posterior. El agente de refinado puede ayudar a refinar el vidrio fundido, por ejemplo, al aumentar la cantidad y/o el tamaño de las burbujas de gas en el vidrio fundido, lo que a su vez puede aumentar la velocidad a la que las burbujas de gas se elevan a la superficie del vidrio fundido y se liberan. El incremento de la cantidad de burbujas de gas dentro del vidrio fundido puede promover la ascensión de burbujas de gas al inducir la coalescencia de burbujas e incrementando así la flotabilidad y la velocidad a la que las burbujas de gas se elevan a la superficie del vidrio fundido y se liberan. El agente de refinado se puede formular para reaccionar con uno o más constituyentes gaseosos existentes en el vidrio fundido no refinado después de la etapa de combustión sumergida (por ejemplo, CO₂ y/o H₂O) para ayudar a liberar dichos constituyentes de estos. En una forma, el agente de refinado puede ser un agente reductor y su introducción en el vidrio fundido puede alterar el color del vidrio fundido. En tal caso, después de que se completa la etapa de refinado, se puede aplicar un material colorante al vidrio fundido refinado para contrarrestar el cambio de color o para ajustar el color del vidrio fundido a un color final deseado.

[009] La presente divulgación incorpora diversos aspectos que se pueden implementar por separado de, o en combinación entre sí.

[0010] Un proceso para fabricar vidrio, de acuerdo con un aspecto de la divulgación, incluye proporcionar un lote de vidrio que comprende una mezcla de materiales formadores de vidrio sólidos, fundir el lote de vidrio en una cámara de fusión para producir un volumen de vidrio fundido no refinado, dirigir el vidrio fundido no refinado de la cámara de fusión hacia una cámara de tratamiento corriente abajo que incluye una sección de refinado, introducir un agente de refinado en el vidrio fundido no refinado para promover el retiro de burbujas de gas del vidrio fundido, y calentar el vidrio fundido no refinado que incluye el agente de refinado en la sección de refinado de la cámara de tratamiento a una temperatura en el intervalo de 1200 °C a 1500 °C para producir un volumen de vidrio fundido refinado. El vidrio fundido no refinado puede comprender, en volumen, entre 20% y 60% de burbujas de gas y el vidrio fundido refinado puede comprender, en volumen, menos burbujas de gas que el vidrio fundido no refinado. En una forma, la cámara de tratamiento puede incluir una

sección de control de color corriente abajo de la sección de refinado, y se puede introducir un material colorante en el vidrio fundido refinado en la sección de control de color de la cámara de tratamiento para producir un volumen de vidrio fundido que tiene un color final deseado. Los artículos de vidrio se pueden formar del vidrio fundido.

Breve Descripción de los Dibujos

[0011] La divulgación, junto con los objetos, características, ventajas y aspectos adicionales de la misma, se entenderán mejor a partir de la siguiente descripción, las reivindicaciones y las figuras anexas, en las cuales:

[0012] La figura 1 es una vista en sección lateral de un aparato para su uso en la realización del proceso de fabricación de vidrio divulgado, de acuerdo con una modalidad ilustrativa de la divulgación; y

[0013] La figura 2 es una vista en planta de otro aparato para su uso en la realización del proceso de fabricación de vidrio divulgado, de acuerdo con otra modalidad ilustrativa de la divulgación.

Descripción Detallada

[0014] Un proceso de múltiples etapas para fabricar vidrio incluye una etapa de preparación de lotes de vidrio, una etapa de fusión, una etapa de refinado, una etapa de control de color opcional y una etapa de formación.

[0015] Se proporciona un lote de vidrio que comprende una mezcla de materiales formadores de vidrio sólidos en la etapa de preparación del lote de vidrio que se formula para producir un vidrio a base de sílice que tiene una composición de vidrio deseada. Por ejemplo, el lote de vidrio se puede formular para producir una composición de vidrio de sosa-lima-sílice que incluye, en peso, 60–75% de SiO_2 , 7–15% de Na_2O y 6–12% de CaO . El lote de vidrio opcionalmente puede incluir uno o más materiales colorantes. Algunos ejemplos de materiales colorantes incluyen óxidos de metal polivalentes, por ejemplo, óxido de hierro, que pueden existir en los estados de oxidación de Fe^{2+} y Fe^{3+} . Si los materiales colorantes están presentes en el lote de vidrio, los materiales colorantes pueden comprender menos de 1.0% en peso del lote de vidrio.

[0016] El lote de vidrio puede estar libre de agentes químicos de refinado. Por ejemplo, el lote de vidrio puede contener menos de 0.1% en peso o, más preferentemente, menos de 0.01% en peso de los siguientes agentes de refinado: sulfatos tal como sulfato de sodio (Na_2SO_4), carbono (C), arsénico (As), antimonio (Sb) y/o sales de haluro de metal (por ejemplo, cloruro de sodio (NaCl)).

[0017] En la etapa de fusión, los materiales formadores de vidrio sólidos se cargan en un extremo de una cámara de fusión de operación continua y se funden mediante la aplicación de calor de uno o más quemadores de combustión sumergidos para producir un volumen de vidrio fundido no refinado. El uno o más quemadores de combustión sumergidos pueden estar ubicados en un piso o pared lateral de la cámara de fusión. Los materiales formadores de vidrio se pueden calentar en la cámara de fusión mediante uno o más quemadores de combustión sumergidos a una temperatura en el intervalo de 1200 °C a 1500 °C para producir el volumen de vidrio fundido no refinado. En algunas modalidades, se puede suministrar calor adicional a los materiales sólidos formadores de vidrio en la cámara de fusión mediante una o más fuentes de energía adicionales. Por ejemplo, se puede suministrar calor adicional a los materiales formadores de vidrio sólidos en la cámara de fusión mediante uno o más quemadores superiores o electrodos sumergidos.

[0018] Después de completar la etapa de fusión, el vidrio fundido no se refina, lo que significa que contiene una cantidad indeseable de burbujas de gas, que se deben retirar. Por ejemplo, el vidrio fundido producido en la cámara de fusión mediante la aplicación de calor de uno o más quemadores de combustión sumergidos puede contener entre 20% en volumen y 60% en volumen de burbujas de gas. En una forma, el vidrio fundido producido en la cámara de fusión mediante la aplicación de calor del uno o más quemadores de combustión sumergidos puede contener aproximadamente 25% en volumen a aproximadamente 40% en volumen de burbujas de gas. Por otro lado, el vidrio fundido producido por la aplicación de calor de uno o más quemadores superiores o electrodos sumergidos, sin el uso de quemadores de combustión sumergidos, puede contener significativamente menos burbujas en porcentaje de volumen. Por ejemplo, el vidrio producido en un horno convencional usando quemadores superiores y/o electrodos sumergidos para suministrar calor típicamente contiene entre 5% en volumen y 10% en volumen de burbujas de gas.

[0019] Posteriormente, el vidrio fundido no refinado se dirige a una o más cámaras de tratamiento en donde se introduce un agente de refinado en el vidrio fundido no refinado para ayudar a refinar el vidrio fundido mediante la promoción de la liberación de burbujas de gas del mismo. El agente de refinado se puede introducir en el vidrio fundido en una cantidad que constituye entre 0.001% en peso y 0.1% en peso del vidrio fundido y se puede introducir en el vidrio fundido en forma sólida, líquida y/o gaseosa. En un ejemplo específico, el agente de refinado se puede introducir en el vidrio fundido en una cantidad que constituye aproximadamente 0.05% en peso del vidrio fundido. Dentro de la o las cámaras de tratamiento, el vidrio fundido no refinado se puede calentar hasta una

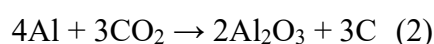
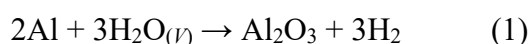
temperatura en el intervalo de 1200 °C a 1500 °C, o más estrechamente en el intervalo de 1220 °C a 1300 °C, para ayudar en clarificación y refinado del vidrio.

[0020] El agente de refinado se puede formular para promover el retiro de burbujas de gas del vidrio fundido mediante la generación de burbujas de gas adicionales en el vidrio fundido. Las burbujas de gas generadas pueden barrer burbujas de gas existentes más pequeñas y/o penetrar o reaccionar con burbujas de gas existentes para aumentar el tamaño de las burbujas de gas existentes. Ambos mecanismos ayudan en última instancia a incrementar la velocidad a la que las burbujas de gas se elevan a la superficie del vidrio fundido y escapan. El agente de refinado puede comprender un elemento o compuesto que, cuando se calienta a temperaturas en el intervalo de 1200 °C a 1400 °C, se formula para descomponerse térmicamente o reaccionar con uno o más constituyentes gaseosos en el vidrio fundido (por ejemplo, CO₂ y/o H₂O) para aumentar la cantidad y/o el tamaño de las burbujas de gas en el vidrio fundido.

[0021] El agente de refinado puede comprender uno o más elementos o compuestos (por ejemplo, óxidos, nitruros y/o carburos) de aluminio (Al), silicio (Si), zinc (Zn), cobre (Cu), estaño (Sn), galio (Ga), berilio (Be), boro (B), calcio (Ca), cromo (Cr), germanio (Ge), indio (In), hierro (Fe), litio (Li), magnesio (Mg), mercurio (Hg), niobio (Nb), plata (Ag), sodio (Na), estroncio (Sr), tantalio (Ta), titanio (Ti), tungsteno (W), uranio (U), vanadio (V), itrio (Y), circonio (Zr), hafnio (Hf), molibdeno (Mo), fósforo (P), azufre (S), carbono (C), carbono y/o hidrógeno (H). Algunos ejemplos específicos de agentes de refinado incluyen nitruro de silicio (Si₃N₄), carburo de silicio (SiC), nitruro de galio aluminio (AlGa₃N), nitruro de aluminio (AlN), oxinitruro de aluminio (ALON), nitruro de berilio (Be₃N₂), nitruro de carbono beta (β -C 3N₄), nitruro de boro (BN), nitruro de calcio (Ca₃N₂), nitruro de cromo (CrN), dinitruro de disulfuro (S₂N₂), nitruro de galio (Ga₃N), nitruro de germanio (Ge₃N₄), nitruro de carbono grafitico (g-C 3N₄), nitruro de aluminio y galio indio (InGaAlN), nitruro de galio-indio (InGa₃N), nitruro de indio (InN), nitruro de hierro (por ejemplo, FeN, Fe₂N, Fe₃N₂, Fe₄N, Fe₇N₃, Fe₈N, y/o Fe₁₆N₂), nitruro de litio (Li₃N), nitruro de magnesio (Mg₃N₂), nitruro de mercurio (Hg₃N₂), nitruro de niobio (NbN), nitruro de fosforilo (OPN), oxinitruro de silicio y aluminio (SiAlON), oxinitruro de silicio (por ejemplo, Si₂N₂O), nitruro de plata (Ag₃N), nitruro de sodio (Na₃N), nitruro de estroncio (Sr₃N₂), nitruro de tantalio (Ta₃N), tetranitruro de tetrasulfuro (S₄N₄), nitruro de titanio-aluminio (TiAlN), nitruro de titanio (TiN), pentanuro de trifósforo (P₃N₅), nitruro de tungsteno (por ejemplo, (W₂N, WN, y/o WN₂)), nitruro de uranio (por ejemplo, ONU, ONU₂ y/o U₂N₃), nitruro de vanadio (por ejemplo, VN y/o V₂N), nitruro de itrio (YN),

nitruro de zinc (Zn₃N₂), nitruro de circonio (ZrN), carburo de titanio (TiC), carburo de circonio (ZrC), carburo de hafnio (HfC), carburo de vanadio (VC), carburo de niobio (NbC), carburo de tantalio (por ejemplo, TaC), carburo de cromo (por ejemplo, Cr₃C₂, Cr₇C₃ y/o Cr₂₃C₆), carburo de molibdeno (Mo₂C), carburo de tungsteno (WC), latón (que puede incluir una combinación de Cu y Zn) y bronce (que puede incluir una combinación de Cu y Sn). En una forma, el agente de refinado puede comprender una combinación de al menos un nitruro y al menos un carburo. En un ejemplo específico, el agente de refinado puede comprender nitruro de silicio y carburo de silicio.

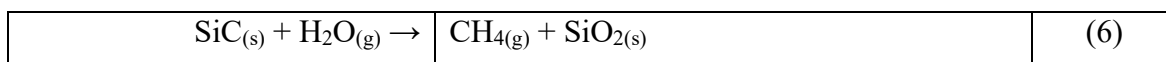
[0022] Sin pretender limitarse por la teoría, se cree que introducir un agente de refinado, por ejemplo, de aluminio elemental en forma de polvo en el vidrio fundido no refinado puede reaccionar con vapor de H₂O y CO₂ - ambos de los cuales son frecuentes en el vidrio fundido no refinado - como se muestra en las reacciones químicas (1) y (2) a continuación:



[0023] Como se puede observar, el aluminio reacciona con vapor de H₂O para producir Al₂O₃ y H₂ (reacción 1), y reacciona con CO₂ para producir Al₂O₃ y carbono (reacción 2). Estas reacciones promueven el retiro de burbujas del vidrio porque el H₂ se difunde más fácilmente a través y fuera del vidrio fundido que el vapor de H₂O, y el carbono se puede absorber en la matriz de vidrio, formar productos secundarios tal como SiC u oxidarse lentamente en CO. Las reacciones de aluminio con vapor de H₂O y CO₂ dentro del vidrio fundido no refinado también producen Al₂O₃. Esta síntesis *in-situ* de Al₂O₃ puede permitir que la composición de los materiales formadores de vidrio se ajuste para reducir los costos de material asociados con la adición de Al₂O₃ en la composición del vidrio a base de sílice, si se desea, que a menudo es el caso cuando se produce vidrio de sosa-lima-sílice.

[0024] Sin pretender limitarse por la teoría, se cree que, cuando el agente de refinado comprende nitruro de silicio (Si₃N₄) y/o carburo de silicio (SiC), el Si₃N₄ y/o SiC puede reaccionar con CO₂, H₂O, SiO₂ y/o H₂S en el vidrio fundido mediante una o más de las siguientes reacciones químicas para generar burbujas de gas adicionales dentro del vidrio fundido y ayudando así en el refinado del vidrio fundido:

$\text{Si}_3\text{N}_{4(s)} + \text{CO}_{2(g)} \rightarrow$	$\text{SiO}_{2(s)} + \text{SiO}_{(g)} + \text{N}_{2(g)} + \text{CO}_{(g)} + \text{SiON}_{2(s)}$	(1)
$\text{Si}_3\text{N}_{4(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow$	$\text{NH}_{3(g)} + \text{H}_{2(g)} + \text{N}_{2(g)} + \text{SiO}_{2(s)}$	(2)
$\text{Si}_3\text{N}_{4(s)} + \text{SiO}_{2(l)} \rightarrow$	$\text{N}_{2(g)} + \text{SiO}_{(s)} + \text{SiO}_{2(s)} + \text{Si}_{(l)}$	(3)
$\text{Si}_3\text{N}_{4(s)} + \text{H}_2\text{S}_{(g)} \rightarrow$	$\text{SiS}_{(g)} + \text{H}_{2(g)} + \text{N}_{2(g)}$	(4)
$\text{SiC}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)} \rightarrow$	$\text{SiO}_{2(s)} + \text{CO}_{(g)}$	(5)



[0025] En modalidades donde el agente de refinado está en forma sólida, el agente de refinado puede estar en la forma de un polvo que tiene un diámetro medio de partícula en el intervalo de 0.1 micrómetros a 1000 micrómetros. En un ejemplo específico, el agente de refinado puede estar en forma de un polvo que tiene un diámetro medio de partícula en el intervalo de 5 micrómetros a 750 micrómetros. Las partículas de polvo pueden ser de diferentes tamaños y/o de diferentes formas (por ejemplo, irregulares o esféricas). En algunas modalidades, el agente de refinado sólido se puede combinar con uno o más materiales sólidos adicionales, que se pueden formular para ayudar a incorporar el agente de refinado en el vidrio fundido. Por ejemplo, en una forma, el agente de refinado sólido se puede mezclar con partículas sólidas de un vidrio a base de sílice o vidrio reciclado, es decir, polvo de vidrio. En otra forma, el agente de refinado se puede fusionar con uno o más materiales formadores de vidrio, inactivar, granular y aplicar al vidrio fundido en forma de una frita sólida.

[0026] En modalidades donde el agente de refinado está en la forma de un líquido, el agente de refinado puede comprender un metal fundido o compuesto metálico (por ejemplo, aluminio fundido) o un compuesto orgánico líquido. En modalidades donde el agente de refinado está en forma de un gas, el agente de refinado gaseoso puede comprender monóxido de carbono (CO), gas de hidrógeno (H₂) o una mezcla de gas de hidrógeno (H₂) y nitrógeno (N₂) (es decir, gas de formación).

[0027] En modalidades donde el agente de refinado se combina con uno o más materiales adicionales y se introduce en el vidrio fundido no refinado como un material compuesto, el agente de refinado puede comprender, en peso, entre 1% y 30% del material compuesto.

[0028] Después de completar la etapa de refinado, el vidrio fundido refinado comprende, en volumen, menos burbujas de gas que el vidrio fundido no refinado. El vidrio fundido no refinado puede contener entre 0 y 0.1% en volumen, y más típicamente entre 0 y 0.05% en volumen, de burbujas de gas.

[0029] En algunas modalidades, la introducción del agente de refinado en el vidrio fundido puede alterar el potencial redox del vidrio fundido y, por lo tanto, su color. Más específicamente, la evolución y liberación de oxígeno y/o compuestos que contienen oxígeno del vidrio fundido puede cambiar el equilibrio de los materiales colorantes de iones metálicos polivalentes, lo que puede cambiar las propiedades ópticas del vidrio fundido. Por ejemplo, si el vidrio fundido contiene óxido de hierro como un material colorante, el óxido

férrico (Fe_2O_3) estará presente en el vidrio fundido en equilibrio con óxido ferroso (FeO), con la cantidad total de óxido de hierro y la relación de FeO a Fe_2O_3 en el vidrio fundido que tiene un impacto directo en el color del vidrio. Esto se debe a que el Fe_2O_3 confiere un color amarillo claro al vidrio, en tanto que el FeO confiere un color azul relativamente intenso al vidrio. Cuando se introduce un agente de refinado tal como carbono en el vidrio fundido, los átomos de carbono reaccionarán químicamente con oxígeno disuelto en el vidrio fundido (por ejemplo, con Fe_2O_3 al reducir el Fe_2O_3 a FeO) para producir gas de monóxido de carbono (CO) y/o dióxido de carbono (CO_2) ($\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}$; $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$), reduciendo así la cantidad de oxígeno disuelto (y por lo tanto la cantidad de Fe_2O_3) en el vidrio fundido. Si se reducen cantidades significativas de Fe_2O_3 a FeO , el color del vidrio fundido puede cambiar de generalmente incoloro a azul claro/verde.

[0030] En modalidades donde es deseable revertir o compensar el cambio de color impartido al vidrio fundido mediante la adición del agente de refinado, se puede añadir un material colorante al vidrio fundido después de que se completa la etapa de refinado para contrarrestar el cambio de color y/o para ajustar el color del vidrio fundido a un color final deseado. En algunas modalidades, el material colorante puede ser un agente oxidante y puede comprender al menos uno de sulfato de sodio (Na_2SO_4), óxido de cerio (Ce_xO_y), óxido de arsénico (As_2O_x) y/o óxido de antimonio (Sb_2O_x). En este caso, el material colorante se puede introducir en el vidrio fundido en una cantidad suficiente para devolver al menos algunos de los iones metálicos polivalentes en el vidrio fundido a un estado de oxidación previo y/o deseado. Por ejemplo, el material colorante se puede añadir en una cantidad suficiente para oxidar al menos parte del FeO a Fe_2O_3 y para devolver el vidrio fundido a un estado generalmente incoloro. Otro ejemplo de un agente oxidante adecuado para introducir en el vidrio fundido refinado durante la etapa de control de color puede comprender gas de oxígeno (O_2).

[0031] En otras modalidades, el material colorante añadido al vidrio fundido en la etapa de control de color del proceso puede estar en forma de un metal elemental o un compuesto metálico que se formula para producir un color deseado en vidrio de sosa-cal y no simplemente para cambiar el estado de oxidación de otro elemento o compuesto ya presente en el vidrio fundido. Ejemplos de óxidos de metal adecuados que se pueden utilizar como materiales colorantes de acuerdo con una o más modalidades de la presente divulgación incluyen, por ejemplo, óxidos de hierro (por ejemplo, FeO o Fe_2O_3), óxidos de cromo (por ejemplo, CrO o Cr_2O_3) y/u óxidos de cobalto (por ejemplo, CoO o Co_2O_3).

[0032] En algunas modalidades, el material colorante puede comprender una combinación de un agente oxidante y un óxido metálico polivalente. Por ejemplo, el material colorante se puede formular para producir vidrio de color ámbar y puede comprender un agente oxidante de sulfato de sodio (Na_2SO_4) y un óxido metálico polivalente de óxido férrico (Fe_2O_3).

[0033] Una vez que el vidrio fundido refinado ha alcanzado un color final deseado, la temperatura del vidrio fundido se puede reducir a una temperatura adecuada para las operaciones de formación de vidrio.

[0034] El proceso para fabricar vidrio descrito anteriormente se puede usar para fundir, refinar y homogeneizar diversas composiciones de vidrio a base de sílice, que incluyen, por ejemplo, vidrio de sosa-lima-sílice. Además, el proceso divulgado se puede llevar a cabo utilizando varios diseños de horno de vidrio, que incluyen, pero ciertamente no se limitan a, los diseños de ejemplo que se muestran en los dibujos y se describen a continuación.

[0035] La figura 1 ilustra un aparato 10 para fundir, clarificar y refinar de forma continua, y homogeneizar una composición de vidrio a base de sílice de acuerdo con una modalidad de ejemplo de la presente divulgación. El aparato 10 incluye una cámara de fusión 12 y una cámara de tratamiento 14. La cámara de fusión 12 se ubica en un extremo de entrada del aparato 10 e incluye una entrada 16 en la cual se reciben materiales de lote de vidrio sólido 18 y una salida 20 desde la cual se descarga vidrio fundido no refinado 22. La cámara de tratamiento 14 se ubica corriente abajo de la cámara de fusión 12 e incluye una entrada 24 en comunicación de fluidos con la salida 20 de la cámara de fusión 12. El vidrio fundido no refinado 22 se recibe en la cámara de tratamiento 14 a través de la entrada 24, y el vidrio fundido refinado 26 se descarga de la cámara de tratamiento 14 a través de una salida 28. En la modalidad ilustrada en la figura 1, el vidrio fundido refinado 26 sale del aparato 10 a través de la salida 28 en la cámara de tratamiento 14 y luego se puede dirigir a una o más máquinas formadoras de vidrio (no mostradas). Sin embargo, en algunas modalidades, una cámara adicional se puede ubicar entre la cámara de tratamiento 14 y la una o más máquinas formadoras, y esta cámara adicional se puede configurar para recibir vidrio fundido refinado 26 de la cámara de tratamiento 14 a través de la salida 28 y para homogeneizar térmicamente el vidrio fundido refinado antes de distribuir el vidrio fundido a la una o más máquinas formadoras de vidrio.

[0036] En la modalidad ilustrada en la figura 1, los materiales de lote de vidrio sólido 18 se suministran continuamente a la entrada 16 de la cámara de fusión 12 desde una tolva 30 mediante un cargador de lote 32. Los materiales de lote de vidrio 18 se funden en la cámara

de fusión 12 mediante la aplicación de calor desde quemadores de combustión sumergidos 34 ubicados en un piso 36 de la cámara de fusión 12 para producir un cuerpo de vidrio fundido no refinado 38. Sin embargo, en otras modalidades, los quemadores de combustión sumergidos 34 se pueden colocar adicional o alternativamente dentro de una pared lateral 40 de la cámara de fusión 12. Los quemadores de combustión sumergidos 34 pueden ser quemadores alimentados por aire o por oxígeno. El calor adicional para fundir los materiales de lote de vidrio 18 se puede suministrar desde una o más fuentes de energía, por ejemplo, desde uno o más electrodos sumergidos o quemadores superiores (no mostrados). Una abertura 42 se puede ubicar en la cámara de fusión 12 por encima de una superficie libre del cuerpo de vidrio fundido no refinado 38 desde la cual se pueden descargar gases de escape de la cámara de fusión 12.

[0037] Después de que los materiales de lote de vidrio 18 se funden inicialmente en la cámara de fusión 12, el cuerpo de vidrio fundido 38 contendrá una cantidad indeseable de burbujas de gas o inclusiones gaseosas y, por lo tanto, será "no refinado". Para retirar o al menos reducir la cantidad de burbujas de gas o inclusiones gaseosas en el mismo, una corriente de vidrio fundido no refinado 22 se dirige lejos de la cámara de fusión 12 a través de la salida 20 y se distribuye a la cámara de tratamiento 14 a través de la entrada 24. El vidrio fundido no refinado 22 se puede suministrar a la cámara de tratamiento 14 por cualquier medio adecuado. En la modalidad mostrada en las figuras 1, el vidrio fundido no refinado 22 se suministra a la cámara de tratamiento 14 a través de un pasaje cerrado 66. Se puede establecer un diferencial de presión a través del pasaje 66 de modo que una corriente continua de vidrio fundido no refinado 22 fluya desde la cámara de fusión 12, a través del pasaje 66, y hacia la cámara de tratamiento 14 sin el uso de una bomba u otro dispositivo mecánico. El diferencial de presión a través del pasaje 66 se puede establecer, al menos en parte, mediante la colocación de una entrada del pasaje 66 debajo de la superficie libre del cuerpo de vidrio fundido no refinado 38 en la cámara de fusión 12.

[0038] La cámara de tratamiento 14 puede incluir una sección de refinado 44 en un extremo de entrada de la cámara de tratamiento 14, una sección de control de color opcional 46 corriente abajo de la sección de refinado 44, y una sección de alimentación 48 corriente abajo de la sección de control de color 46 en un extremo de salida de la cámara de tratamiento 14. La sección de refinado 44 puede abarcar entre 20% y 50% de una longitud L de la cámara de tratamiento 14, en tanto que la sección de control de color 46 y la sección de alimentación pueden abarcar entre 20% y 50% y entre 10% y 30%, respectivamente, de la longitud L de la cámara de tratamiento 14.

[0039] Se puede introducir un agente de refinado en el vidrio fundido no refinado 22 en una ubicación corriente abajo de la salida 20 de la cámara de fusión 12 y corriente arriba de la sección de control de color opcional 46 y corriente arriba de la sección de alimentación 48. El agente de refinado puede comprender cualquiera de los agentes de refinado descritos anteriormente con respecto al proceso de fabricación de vidrio de múltiples etapas divulgado en la presente. En algunas modalidades, el agente de refinado se puede introducir en el vidrio fundido no refinado 22 en una ubicación donde el vidrio fundido 22 es turbulento, que puede incluir una ubicación corriente abajo de la salida 20 de la cámara de fusión 12 donde el vidrio fundido no refinado 22 tiene patrones de flujo irregulares. En una forma, se puede introducir un agente de refinado en el vidrio fundido no refinado 22 a medida que el vidrio fundido 22 fluye a través del pasaje 66. En otra forma, se puede introducir un agente de refinado en el vidrio fundido no refinado 22 en la sección de refinado 44 de la cámara de tratamiento 14 antes de que el vidrio fundido no refinado 22 se asiente en un régimen de flujo tranquilo que tiene patrones de flujo regulares. El vidrio fundido no refinado 22 puede ser turbulento (es decir, experimenta patrones de flujo irregulares) dentro de una porción corriente arriba de la sección de refinado 44 que se extiende no más de 60%, o más estrechamente no más de 30% o incluso no más de 10%, de la longitud de la sección de refinado 44 de la cámara de tratamiento 14.

[0040] Como se analizó anteriormente, el agente de refinado se formula para promover el retiro de burbujas de gas del vidrio fundido no refinado 22. El agente de refinado puede estar en forma de un material sólido, líquido y/o gaseoso y se puede introducir en el vidrio fundido 22, por ejemplo, al depositarse, inyectarse o mezclarse en el vidrio fundido 22. En una forma, el agente de refinado se puede introducir en el vidrio fundido 22 en el pasaje 66 o la sección de refinado 44 al depositarse en una superficie libre del vidrio fundido 22. Por ejemplo, el agente de refinado se puede introducir en un interior de la sección de refinado 44 a través de un conducto 50 que se extiende a través de un techo 52 de la cámara de tratamiento 14 por encima de una superficie libre del vidrio fundido 22. De manera adicional o alternativa, el agente de refinado se puede introducir en el vidrio fundido 22 en el pasaje 66 o la sección de refinado 44 desde debajo de una superficie libre del vidrio fundido 22. Por ejemplo, el agente de refinado se puede introducir en el vidrio fundido 22 en la sección de refinado 44 de uno o más burbujeadores 54 que se extienden a través de un piso 56 o una pared lateral 57 de la cámara de tratamiento 14. Uno o más agitadores 58 se pueden extender en el vidrio fundido 22 en el pasaje 66 o la sección de refinado 44 de la cámara de tratamiento 14 para ayudar a mezclar el agente de refinado en el vidrio fundido 22 y para ayudar a

aumentar la velocidad a la que las burbujas de gas en el vidrio fundido 22 se elevan a la superficie libre del vidrio fundido 22 y se escapan.

[0041] La cámara de tratamiento 14 puede ser una cámara cerrada y el entorno dentro del interior de la sección de refinado 44 se puede controlar para promover el retiro rápido de burbujas de gas del vidrio fundido 22. Más específicamente, se puede controlar la temperatura, presión y/o composición del entorno por encima de la superficie libre del vidrio fundido 22 en el interior de la cámara de tratamiento 14. Por ejemplo, la presión dentro del interior de la cámara de tratamiento 14 se puede controlar para producir un entorno subatmosférico en el mismo. El término “subatmosférico”, como se usa en la presente, significa un entorno que tiene una presión menor que la presión atmosférica ambiente, por ejemplo, menor que aproximadamente 760 Torr (101.3 kPa).

[0042] El vidrio fundido no refinado 22 se mantiene preferentemente dentro de la sección de refinado 44 de la cámara de tratamiento 14 durante una cantidad de tiempo suficiente para que el agente de refinado reaccione químicamente con determinados constituyentes en el vidrio fundido 22 (por ejemplo, óxidos metálicos polivalentes). Además, el vidrio fundido no refinado 22 se mantiene preferentemente dentro de la sección de refinado 44 de la cámara de tratamiento 14 durante una cantidad de tiempo suficiente para que una cantidad significativa de las burbujas de gas en el vidrio fundido 22 se libere físicamente del vidrio fundido 22 o se absorba químicamente en el mismo. El tiempo de residencia, o el tiempo que permanece un volumen de vidrio fundido dentro de la cámara de tratamiento 14, se puede controlar controlando la velocidad a la que el vidrio fundido no refinado 22 entra en la cámara de tratamiento 14 y la velocidad a la que el vidrio fundido refinado 26 sale de la cámara de tratamiento 14.

[0043] Después de que la cantidad de burbujas de gas en el vidrio fundido 22 se ha reducido a un nivel adecuado para operaciones de formación de vidrio, el vidrio fundido se “refina”. Sin embargo, en algunas modalidades, el color del vidrio fundido 26 que sale de la sección de refinado 44 de la cámara de tratamiento 14 puede ser indeseable. Por lo tanto, al ingresar a la sección de control de color 46 de la cámara de tratamiento 14, se puede aplicar un material colorante al vidrio fundido refinado 26. El material colorante puede ser un material sólido o líquido y se puede introducir en el vidrio fundido 26 en la sección de control de color 46 al depositarse en una superficie libre del vidrio fundido 26. Por ejemplo, el material colorante se puede introducir en un interior de la sección de control de color 46 a través de otro conducto 60 que se extiende a través del techo 52 de la cámara de tratamiento 14 por encima de una superficie libre del vidrio fundido 26. De manera adicional o alternativa, el

material colorante puede ser un material gaseoso y se puede introducir en el vidrio fundido 26 en la sección de control de color 46 desde debajo de una superficie libre del vidrio fundido 26. Por ejemplo, el material colorante se puede introducir en el vidrio fundido 26 en la sección de control de color 46 de uno o más burbujeadores 62 que se extienden a través del piso 56 de la cámara de tratamiento 14. Uno o más agitadores 64 se pueden extender en el vidrio fundido 26 en la sección de control de color 46 de la cámara de tratamiento 14 para ayudar a mezclar el material colorante en el vidrio fundido 26. El material colorante se puede introducir en el vidrio fundido refinado 26 en una cantidad que varía de, en peso, 0.5 % y 3 % del vidrio fundido refinado 26.

[0044] El vidrio fundido refinado y controlado por color 26 sale de la sección de control de color 46 y entra en la sección de alimentación 48 de la cámara de tratamiento 14. En la sección de alimentación 48, el vidrio fundido refinado 26 se acondiciona térmicamente al enfriarse hasta una temperatura adecuada para las operaciones de formación corriente abajo (por ejemplo, menos de aproximadamente 1200 grados Celsius para las operaciones de formación de recipientes de vidrio). Después de eso, el vidrio fundido refinado 26 se descarga de la cámara de tratamiento 14 a través de la salida 28 de la cámara de tratamiento 14.

[0045] La figura 2 ilustra otra modalidad ilustrativa de un aparato 100 para fundir, clarificar y refinar de forma continua, y homogeneizar una composición de vidrio a base de sílice. El aparato 100 es similar en muchos aspectos al aparato 10 de la figura 1, y números similares entre las dos modalidades ilustrativas generalmente designan elementos similares o correspondientes. Por consiguiente, las descripciones de las modalidades ilustradas en las figuras 1 y 2 se incorporan entre sí. La materia objeto común entre las modalidades ilustradas en las figuras 1 y 2 en general puede no repetirse aquí.

[0046] El aparato 100 ilustrado en la figura 2 incluye una cámara de fusión de vidrio 112 y una cámara de tratamiento de vidrio 114 corriente abajo de la cámara de fusión 112. La cámara de fusión 112 se ubica en un extremo corriente arriba del aparato 100. Los materiales de lote de vidrio sólidos se suministran continuamente a la cámara de fusión 112, y el vidrio fundido no refinado se descarga continuamente desde una salida 120 de la cámara de fusión 112. Los materiales de lote de vidrio se funden en la cámara de fusión 112 mediante la aplicación de calor desde quemadores de combustión sumergidos 134 para producir un cuerpo de vidrio fundido no refinado en la cámara de fusión 112. La cámara de tratamiento 114 se ubica corriente abajo de la cámara de fusión 112 e incluye una entrada 124 en comunicación de fluidos con la salida 120 de la cámara de fusión 112. Una corriente de

vidrio fundido no refinado se descarga desde la cámara de fusión 112, se dirige a través de un pasaje 166 y se recibe en la cámara de tratamiento 114 a través de la entrada 124.

[0047] La cámara de tratamiento (114) incluye una sección de distribución (144) en un extremo de entrada de la cámara (114) y un primer y segundo canal de flujo discreto (146), (147) corriente abajo de la sección de distribución (144) en un extremo de salida de la cámara de tratamiento (114). La sección de distribución 144 recibe vidrio fundido no refinado de la cámara de fusión 112 y divide la corriente de vidrio fundido no refinado en dos o más corrientes discretas. En la modalidad ilustrada en la figura 2, el vidrio fundido no refinado se divide en dos corrientes discretas que fluyen en direcciones opuestas entre sí y en una dirección transversal con respecto al flujo de vidrio fundido a través del pasaje 166, aunque este no tiene por qué ser el caso.

[0048] Un agente de refinado, en forma de un material sólido, líquido y/o gaseoso, se puede introducir en el vidrio fundido no refinado a medida que el vidrio fundido pasa a través y/o sale del pasaje 166. De manera adicional o alternativa, se puede introducir un agente de refinado en el vidrio fundido no refinado en una entrada de la sección de distribución 144. El agente de refinado puede comprender cualquiera de los agentes de refinado descritos anteriormente con respecto al proceso de fabricación de vidrio de múltiples etapas divulgado en la presente, y se puede introducir en el vidrio fundido, por ejemplo, al depositarse, inyectarse o mezclarse en el vidrio fundido. Algunos ejemplos de regiones para introducir el agente de refinado en el vidrio fundido no refinado que fluye a través del pasaje 166 y/o la sección de distribución 144 se identifican mediante contornos punteados 150, 151 en la figura 2. Se pueden extender agitadores 158, 159 en cada una de las corrientes discretas de vidrio fundido no refinado que fluye a través de la sección de distribución 144 y en el primer y segundo canal de flujo discreto 146, 147. Los agitadores 158, 159 pueden ayudar a mezclar el agente de refinado en el vidrio fundido y también pueden ayudar a aumentar la velocidad a la que se retiran las burbujas de gas del mismo.

[0049] El vidrio fundido refinado se descarga desde la sección de distribución 144 y se introduce en el primer y segundo canal de flujo 146, 147. Se puede introducir un material colorante en el vidrio fundido refinado que fluye a través de uno o ambos del primer y segundo canal de flujo 146, 147. En la modalidad ilustrada en la figura 2, se introduce un material colorante en el vidrio fundido refinado que fluye a través del primer canal de flujo 146, pero no el segundo canal de flujo 147. Una región adecuada para introducir el material colorante en el vidrio fundido refinado que fluye a través del primer canal de flujo 146 se identifica mediante un contorno punteado 160. Un agitador 164 se extiende en el vidrio

fundido que fluye a través del primer canal de flujo 146 de la cámara de tratamiento 114 para ayudar a mezclar el material colorante en el vidrio fundido.

[0050] El vidrio fundido refinado y controlado por color se descarga del primer canal de flujo 146 de la cámara de tratamiento 114 y se dirige a una o más máquinas formadoras. El vidrio fundido refinado se descarga desde el segundo canal de flujo 147 y se dirige a una o más máquinas formadoras. La cámara de tratamiento 114 ilustrada en la figura 2 puede permitir la producción de uno o más colores diferentes de vidrio fundido del mismo aparato de fabricación de vidrio 100.

[0051] Por lo tanto, se ha divulgado un proceso y aparato para fabricar vidrio que satisface completamente uno o más de los objetos y objetivos previamente expuestos. La divulgación se ha presentado en conjunto con varias modalidades ilustrativas, y se han analizado modificaciones y variaciones adicionales. Otras modificaciones y variaciones se sugerirán fácilmente a personas expertas en la técnica en vista del análisis anterior. Por ejemplo, la materia objeto de cada una de las modalidades se incorpora por la presente como referencia en cada una de las otras modalidades, para mayor comodidad. Se propone que la divulgación abarque todas las modificaciones y variaciones que caen dentro del espíritu y alcance amplios de las reivindicaciones anexas.