

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7511031号
(P7511031)

(45)発行日 令和6年7月4日(2024.7.4)

(24)登録日 令和6年6月26日(2024.6.26)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 N 27/22 (2006.01)

G 0 1 N 27/22

B

G 0 1 F 1/64 (2006.01)

G 0 1 F 1/64

請求項の数 16 (全15頁)

(21)出願番号	特願2022-578491(P2022-578491)	(73)特許権者	000006633
(86)(22)出願日	令和4年1月27日(2022.1.27)		京セラ株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/003170		京都府京都市伏見区竹田鳥羽殿町 6 番地
(87)国際公開番号	WO2022/163779	(74)代理人	110003029
(87)国際公開日	令和4年8月4日(2022.8.4)		弁理士法人ブナ国際特許事務所
審査請求日	令和5年7月25日(2023.7.25)	(72)発明者	中村 勝美
(31)優先権主張番号	特願2021-13401(P2021-13401)		京都府京都市伏見区竹田鳥羽殿町 6 番地
(32)優先日	令和3年1月29日(2021.1.29)		京セラ株式会社内
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)	審査官	村田 顕一郎

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 気泡率センサ、これを用いた流量計および極低温液体移送管

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

極低温液体を流すための貫通孔を有する絶縁管と、該絶縁管の外壁面に装着された一対の面状の電極と、を備え、

前記絶縁管において、前記一対の面状の電極間の領域を電極装着部としたとき、
前記電極装着部において、前記貫通孔は、前記一対の面状の電極のそれぞれの電極面に垂直な方向における内壁面間の距離 D 1 が、前記一対の面状の電極のそれぞれの前記電極面に平行な方向における内壁面間の距離 D 2 よりも短い、気泡率センサ。

【請求項 2】

少なくとも前記電極装着部において、前記距離 D 1 を特定する、対向する前記内壁面が互いに平行であるか、または前記内壁面のうち、少なくとも一方の内壁面が前記貫通孔の軸心から見て凹状に湾曲している、請求項 1 に記載の気泡率センサ。

10

【請求項 3】

少なくとも前記電極装着部において、前記距離 D 2 を特定する、対向する前記内壁面が互いに平行であるか、または前記内壁面のうち、少なくとも一方の内壁面が前記貫通孔の軸心から見て凸状に湾曲している、請求項 1 または 2 に記載の気泡率センサ。

【請求項 4】

前記貫通孔の流入側側に供給孔を有する第 1 接続管が前記絶縁管に接続され、前記貫通孔の軸心に垂直な貫通孔の断面積は、前記供給孔の軸心に垂直な供給孔の断面積の 90% 以上 110% 以下である、請求項 1 ～ 3 のいずれかに記載の気泡率センサ。

20

【請求項 5】

前記貫通孔の流出口側に排出孔を有する第 2 接続管が前記絶縁管に接続され、前記貫通孔の軸心に垂直な貫通孔の断面積は、前記排出孔の軸心に垂直な排出孔の断面積の 90% 以上 110% 以下である、請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の気泡率センサ。

【請求項 6】

少なくとも前記電極装着部において、前記貫通孔の軸心に平行な方向の前記内壁面の粗さ曲線における算術平均粗さ R_a は $0.2 \mu m$ 以下である、請求項 1 ~ 5 のいずれかに気泡率センサ。

【請求項 7】

少なくとも前記電極装着部において、前記貫通孔の軸心に垂直な貫通孔の断面形状は、楕円状または矩形状である、請求項 1 ~ 6 のいずれかに記載の気泡率センサ。

10

【請求項 8】

前記絶縁管は、少なくとも前記電極装着部において、前記一对の面状の電極の前記電極面に垂直な方向に開口する 1 対の凹部を有してなり、前記電極が装着された外壁面は、前記凹部の底面である、請求項 1 ~ 7 のいずれかに記載の気泡率センサ。

【請求項 9】

前記凹部は、外部に開口する第 1 凹部と、該第 1 凹部の底面に設けられ、開口面積が前記第 1 凹部よりも小さい第 2 凹部とを有し、前記電極が装着された外壁面は、前記第 2 凹部の底面である、請求項 8 に記載の気泡率センサ。

【請求項 10】

前記絶縁管は、低熱膨張セラミックスからなる、請求項 1 ~ 9 のいずれかに記載の気泡率センサ。

20

【請求項 11】

前記絶縁管は、窒化珪素またはサイアロンを主成分とするセラミックスからなる、請求項 1 ~ 9 のいずれかに記載の気泡率センサ。

【請求項 12】

前記絶縁管は、使用温度域での比誘電率が 11 以下であるセラミックスからなる、請求項 1 ~ 11 のいずれかに記載の気泡率センサ。

【請求項 13】

前記絶縁管は、複数の閉気孔を有するセラミックスからなり、隣り合う前記閉気孔の重心間距離の平均値から前記閉気孔の円相当径の平均値を差し引いた値が $8 \mu m$ 以上 $18 \mu m$ である、請求項 1 ~ 12 のいずれかに記載の気泡率センサ。

30

【請求項 14】

前記閉気孔の円相当径の歪度は、前記閉気孔の重心間距離の歪度よりも大きい、請求項 13 に記載の気泡率センサ。

【請求項 15】

貫通孔内を流れる極低温液体の流量を測定する流量計であって、請求項 1 ~ 14 のいずれかに記載の気泡率センサと、前記極低温液体が前記貫通孔内を流れる流速を測定する流速計とを備えた流量計。

【請求項 16】

請求項 15 に記載の流量計を備えた極低温液体移送管。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、液体水素等の極低温液体の気泡率を測定するための気泡率センサ (void fraction sensor)、これを用いた流量計および極低温液体移送管に関する。

【背景技術】

【0002】

近時、温室効果ガスの排出削減に伴い、有力なエネルギー貯蔵媒体として水素の利用が注目されている。特に、液体水素は、体積効率が高く長期保存が可能であるため、その利

50

用技術が種々開発されている。しかし、液体水素を大量に取り扱う場合に必要となる流量の正確な計測方法が工業的に確立されていなかった。その主な理由は、液体水素が非常に気化しやすく気体と液体の比率の変化が大きな流体であるためである。

【0003】

すなわち、液体水素は、極低温（沸点-253）の液体であり、熱伝導が非常に高く潜熱が小さいため、すぐに気泡（ボイド）が発生するという特徴がある。そのため、液体水素は、移送用の配管内では、気液混合した、いわゆる二相流となっている。

従って、気泡の含有割合の変化が大きいため、配管内を流れる液体水素の流量を測定するには、通常の液体のように流速を測定するだけでは、正確な流量を知ることはできない。

【0004】

そこで、気液二相流の気相体積割合を示す気泡率を計測する気泡率計の開発が進められている。このような気泡率計として、非特許文献1では、一对の電極を用いて静電容量を測定する静電容量型ボイド率計（capacitance type void fraction sensor）が提案されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【文献】Norihide MAENO、他5名、「Void Fraction Measurement of Cryogenic Two Phase Flow Using a Capacitance Sensor」, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 12, No. ists29, pp. Pa_101-Pa_107, 2014

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本開示の気泡率センサは、極低温液体を流すための貫通孔を有する絶縁管と、該絶縁管の外壁面に装着された一对の面状の電極と、を備える。絶縁管は、電極の電極面に垂直な方向における内壁面間の距離D1が、電極の電極面に平行な方向における内壁面間の距離D2よりも短い電極装着部を有する。

【0007】

本開示の流量計は、貫通孔内を流れる極低温液体の流量を測定するものであって、上記の気泡率センサと、極低温液体が貫通孔内を流れる流速を測定する流速計とを備える。

本開示は、上記流量計を備えた極低温液体移送管を提供するものである。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】本開示の一実施形態に係る気泡率センサを示す概略斜視図である。

【図2】図1に示す気泡率センサの垂直破断面を示す概略斜視図である。

【図3】図1に示す気泡率センサの水平破断面を示す概略斜視図である。

【図4】図1に示す気泡率センサの垂直断面図である。

【図5】図1に示す気泡率センサの水平断面図である。

【図6】図1に示す気泡率センサのIV-IV線断面図である。

【図7】図1に示す気泡率センサのV-V線断面図である。

【図8】図1に示す気泡率センサのVI-VI線断面図である。

【図9】絶縁管の流入口部および流出口部の外周面上にそれぞれ結束体を取り付けた状態の気泡率センサの概略斜視図である。

【図10】図1に示す気泡率センサを筐体に収容した状態を示す概略斜視図である。

【図11】図10に示す気泡率センサおよび筐体の垂直破断面を示す概略斜視図である。

【図12】図11に示す気泡率センサおよび筐体の水平破断面を示す概略斜視図である。

【図13】図1～5に示す気泡率センサの変形例を示す垂直断面図である。

【図14】本開示の他の実施形態に係る気泡率センサを示す概略斜視図である。

【図15】図14に示す気泡率センサの垂直破断面を示す概略斜視図である。

【図16】図14に示す気泡率センサの水平破断面を示す概略斜視図である。

10

20

30

40

50

【発明を実施するための形態】

【0009】

以下、本開示の実施形態に係る気泡率センサを説明する。

【0010】

図1は本開示の一実施形態に係る気泡率センサ1を示す斜視図であり、図2および図3は気泡率センサ1の垂直破断面を示す概略斜視図および水平破断面を示す概略斜視図である。図2および図3に示すように、気泡率センサ1は、極低温液体を流すための貫通孔3を有する絶縁管2と、絶縁管2の外壁面に装着された一对の面状の電極4、4とを備える。

【0011】

絶縁管2は、図1に示すように、2つの半割形状の絶縁管部材21、21を互いに重ね合わせて形成される。絶縁管2は、貫通孔3の軸心に垂直な方向に開口する1対の凹部6、6を有している。一对の電極4、4は、それぞれ絶縁管2に設けた凹部6、6の底面に装着され、互に対向している(図2参照)。

10

各電極4には導通ピン7が個別に接続されている。導通ピン7には気密端子8が取付けられている。気密端子8については後述する。

【0012】

絶縁管2は、上記のように凹部6、6が形成されているので、これらの凹部6、6の底面に装着された電極4、4間の距離が狭くなっている。これにより、電極4、4間に蓄積される静電容量が大きくなり、貫通孔3内を流れる極低温液体の気泡率の測定精度を向上させることができる。電極4、4の位置および電極面41の面積は、最適な測定精度が得られるように設定することができる。

20

ここで、電極面41、41とは、電極4、4が凹部6、6の底面に装着された面を言う。

【0013】

一方、極低温液体の供給量を低下させないようにするために、本実施形態では、図2および図3に示すように、絶縁管2の電極装着部5において、電極4、4の電極面41、41に垂直な方向における内壁面3a、3a間の距離D1が、電極面41、41に平行な方向における内壁面3b、3b間の距離D2よりも短くなるように構成されている。逆に言うと、平行な方向の距離D2を垂直な方向の距離D1よりも大きくしているので、たとえ電極4、4間の距離が狭く、そのため距離D1が小さくなくても、極低温液体の供給量を落とすことなく維持することができる。このことは、極低温液体の供給量を多くしても、気泡率の測定精度を低下させずに維持することができることをも意味している。

30

【0014】

電極装着部5における内壁面3a、3a間の距離D1は最短距離を、内壁面3b、3b間の距離D2は最長距離をそれぞれ意味している。ここで、距離D1、D2は、極低温液体の供給量や、気泡率の測定精度等に応じて適宜決定することができ、特に制限されるものではないが、通常、距離D1は距離D2に対して10%以上、好ましくは20%以上で、67%以下、好ましくは50%以下の長さであるのがよい。

従って、少なくとも電極装着部5における貫通孔3の軸心に垂直な断面内の貫通孔3の形状は、楕円状または矩形状であるのがよい。このように上記断面内の貫通孔3の形状が単純形状となり、しかも、軸心に沿って稜線がない形状となるので、気泡の発生のばらつきが抑制され、気泡率の測定精度が向上する。

40

なお、電極装着部5とは、電極4、4が装着される部位をいい、具体的には、電極4、4が装着される凹部6、6の底面を含め、これら底面に挟まれる部分をいう。

【0015】

絶縁管2は、図4に示すように、電極面41、41に垂直な方向における垂直断面において、極低温液体の円形状の流入口31および流出口32からそれぞれ平行領域E2の端部まで滑らかに内壁面3a、3a間の距離が漸次小さくなってゆく。一方、絶縁管2は、図5に示すように、電極面41、41に水平な方向における水平断面において、平行領域E2から貫通孔3の流入口31および流出口32に向かって内壁面3b、3b間の距離は滑らかに小さくなってゆく。平行領域E2では、貫通孔3の内壁面3a、3aは互いに平

50

行であって、距離 D 1 が最小となっている。また、貫通孔 3 の内壁面 3 b、3 b は互いに平行であって、距離 D 2 が最大となっている。このように内壁面 3 a、3 a 間の距離および内壁面 3 b、3 b 間の距離を変えることによって、貫通孔 3 の軸方向に垂直な断面における貫通孔 3 の断面積を一定に保つことができる。そして、この平行領域 E 2 内に電極装着領域 E 1 (すなわち電極装着部 5) が含まれ、電極装着領域 E 1 は、平行領域 E 2 のほぼ中央部に位置しているのがよい。

【0016】

このように、電極面 4 1、4 1 に垂直な方向における垂直断面では、平行領域 E 2 から貫通孔 3 の流入口 3 1 および流出口 3 2 に向かって内壁面 3 a、3 a 間の距離は滑らかに大きくなっているため、内壁面 3 a、3 a 間の距離が流入口 3 1 および流出口 3 2 に向かって段階的に大きくなる場合よりも内壁面 3 a、3 a 上に応力集中が発生しにくく、長期間に亘って用いることができる。同様に、電極面 4 1、4 1 に水平な方向における水平断面では、平行領域 E 2 から貫通孔 3 の流入口 3 1 および流出口 3 2 に向かって内壁面 3 b、3 b 間の距離は滑らかに小さくなっているため、内壁面 3 b、3 b 間の距離が流入口 3 1 および流出口 3 2 に向かって段階的に大きくなる場合よりも内壁面 3 b、3 b 上に応力集中が発生しにくく、長期間に亘って用いることができる。また、平行領域 E 2 を有し、この平行領域 E 2 に電極装着領域 E 1 を有することによって、電極面 4 1、4 1 間で生じる電気力線は流入口 3 1 から流出口 3 2 に向かって流れる極低温液体を垂直に貫通することとなり、測定精度が向上する。

平行領域 E 2 の長さは、電極領域 E 1 の長さの 105% 以上、好ましくは 150% 以上であるのがよく、5000% 以下であるのがよい。

【0017】

なお、内壁面 3 a、3 a が平行領域 E 2 を有せずに、内壁面 3 a、3 a の少なくとも一方が、それらの間の距離 D 1 が流入口 3 1 および流出口 3 2 から電極装着部 5 に向かって連続的に小さくなるように湾曲していてもよい。内壁面 3 a、3 a の湾曲の方向は、貫通孔 3 の軸心から見て凹状であるとよい。

同様に、内壁面 3 b、3 b が平行領域 E 2 を有せずに、内壁面 3 b、3 b の少なくとも一方が、それらの間の距離 D 2 が流入口 3 1 および流出口 3 2 から電極装着部 5 に向かって連続的に大きくなるように湾曲していてもよい。内壁面 3 b、3 b の湾曲の方向は、貫通孔 3 の軸心から見て凸状に湾曲していてもよい。

【0018】

図 6 ~ 図 8 は、貫通孔 3 の流入口 3 1 から電極装着部 5 に向かって貫通孔 3 の形状が順次変化していく様子を示している。図 6 ~ 図 8 に示す各貫通孔 3 は、貫通孔 3 の軸心に垂直な断面の面積が同じである。これにより、極低温液体の供給量を落とすことなく維持することができる。

【0019】

本実施形態における絶縁管 2 は、前記したように、2 つの半割形状の絶縁管部材 2 1、2 1 を互いに重ね合わせて形成される。そして、図 9 に示すように、絶縁管 2 の流入口部および流出口部の外周面上に環状の結束体 9 を環装して半割形状の絶縁管部材 2 1、2 1 を一体に接合する。

なお、絶縁管部材 2 1、2 1 は接合材を用いず結束体 9 で結束してもよい。あるいは、結束体 9 に代えて、または結束体 9 と共に、絶縁管部材 2 1、2 1 の接合面同士を、絶縁管 2 内を流れる極低温液体に対して安定な封止材で接合してもよい。

【0020】

図 10 は、気泡率センサ 1 を筐体 10 内に収容した状態を示している。気泡率センサ 1 は、筐体 10 で囲繞されている。

筐体 10 の垂直破断面を示す概略斜視図である図 11 および水平破断面を示す概略斜視図である図 12 に示すように、筐体 10 は、気泡率センサ 1 を収容する枠体部 10 1 と、枠体部 10 1 の開口を封止する蓋部 10 2 とを備える。

図 9 に示す絶縁管部材 2 1、2 1 が結束体 9 で結束された気泡率センサ 1 は、枠体部 1

10

20

30

40

50

0 1 内に收容後、枠体部 1 0 1 と蓋部 1 0 2 とが溶接またはろう接によって接合される。気泡率センサ 1 の貫通孔 3 の両端開口（流入口 3 1 および流出口 3 2 ）には、第 1 接続管 1 1、第 2 接続管 1 2 がそれぞれ接続される。

第 1 接続管 1 1 は、流入口 3 1 内に挿通され、外周面が蓋部 1 0 2 と溶接またはろう接によって接合されている。第 2 接続管 1 2 は、枠体部 1 0 1 と一体に形成されているが、蓋部 1 0 2 と同様に枠体部 1 0 1 と接合するものであってもよい。

【 0 0 2 1 】

筐体 1 0 の枠体部 1 0 1 には挿通孔 1 3 が形成されている。挿通孔 1 3 には気密端子 8 が装着されており、電極 4 に個別に接続する導通ピン 7 を挿通孔 1 3 内で固定している。

また、筐体 1 0 には、真空排気弁 1 4（真空排気用のニードル弁等）が設けられており、気泡率センサ 1 と筐体 1 0 との間に真空空間 1 5（断熱層）を形成している。このように、気泡率センサ 1 の外周側に真空空間 1 5 が位置しているので、気泡率センサ 1 に対する断熱性能が確保される。その結果、外気温度の影響による気泡の発生が抑制されるため、気泡率の測定精度が向上する。また、気密端子 8 によって、気泡率センサ 1 から外部への極低温液体のリークが抑制されるため、気泡率の測定精度がさらに向上する。

【 0 0 2 2 】

図 1 1、図 1 2 に示すように、貫通孔 3 の流入口 3 1 側に供給孔を有する第 1 接続管 1 1 が絶縁管 2 に接続され、貫通孔 3 の軸心に垂直な貫通孔 3 の断面積は、供給孔の軸心に垂直な供給孔の断面積の 9 0 % 以上 1 1 0 % 以下であるのが好ましい。一般に、極低温液体が高速で流れると、供給孔と貫通孔 3 との接続部付近で圧力損失が高くなりやすいが、上記のように構成すると、圧力損失の上昇が抑制される。その結果、気泡の発生を抑制することができるので、極低温液体の気泡率の測定精度を向上させることができる。

【 0 0 2 3 】

同様に、貫通孔 3 の流出口 3 2 側に排出孔を有する第 2 接続管 1 2 が絶縁管 2 に接続され、貫通孔 3 の軸心に垂直な貫通孔 3 の断面積は、排出孔の軸心に垂直な排出孔の断面積の 9 0 % 以上 1 1 0 % 以下であるのが好ましい。これにより、圧力損失の上昇が抑制される。その結果、気泡の発生を抑制することができるので、極低温液体の気泡率の測定精度を向上させることができる。

【 0 0 2 4 】

筐体 1 0 を構成する枠体部 1 0 1 および蓋部 1 0 2 は金属またはセラミックスから形成される。第 1 接続管 1 1 および第 2 接続管 1 2 は金属管であるのがよい。具体的には、枠体部 1 0 1 は、例えばニッケルの含有量が 1 0 . 4 質量 % 以上であるオーステナイト系ステンレス鋼（例えば、S U S 3 1 6 L）等、窒化珪素、サイアロン等のセラミックス等から形成されるのがよい。

蓋部 1 0 2 は、例えば、フェルニコ系合金、Fe - Ni 合金、Fe - Ni - Cr - Ti - Al 合金、Fe - Cr - Al 合金、Fe - Co - Cr 合金等から形成されるのがよい。

枠体部 1 0 1 の内径は、十分な断熱性能を得るうえで、絶縁管 2 の外径に対して 1 mm 以上、好ましくは、絶縁管 2 の外径に対して 1 0 mm 以上であるのがよく、絶縁管 2 の外径に対して 2 0 0 mm 以下、好ましくは 1 0 0 mm 以下であるのがよい。蓋部 1 0 2 は絶縁管 2 の外周面にろう付けによって気密に接合される。

【 0 0 2 5 】

電極 4、4 は、例えば銅箔、アルミニウム箔等で形成することができる。各凹部 6 の底面に電極 4 を形成するには、例えば真空蒸着法、メタライズ法、活性金属法で行うことができる。また、凹部 6 の底面に、電極 4 となる金属板を接着してもよい。電極 4、4 の厚さは、いずれも 1 0 μ m 以上、好ましくは 2 0 μ m 以上で、2 mm 以下、好ましくは 1 mm 以下であるのがよい。

【 0 0 2 6 】

絶縁管 2 は、例えばジルコニア、アルミナ、サファイア、窒化アルミニウム、窒化珪素、サイアロン、コージライト、ムライト、イットリア、炭化珪素、サーメット、 β -ユークリプタイト等を主成分とするセラミックスから形成される。セラミックスがアルミナを

10

20

30

40

50

主成分とするセラミックスからなる場合、セラミックスは、珪素、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム等を酸化物として含んでいてもよい。

【0027】

セラミックスにおける主成分とは、セラミックスを構成する成分の合計100質量%のうち、60質量%以上を占める成分をいう。特に、主成分は、セラミックスを構成する成分の合計100質量%のうち、95質量%以上を占める成分であるとよい。セラミックスを構成する成分は、X線回折装置(XRD)を用いて求めればよい。各成分の含有量は、成分を同定した後、蛍光X線分析装置(XRF)またはICP発光分光分析装置を用いて、成分を構成する元素の含有量を求め、同定された成分に換算すればよい。

【0028】

絶縁管2は、低熱膨張セラミックスからなるのがよい。低熱膨張セラミックスとしては、線膨張率を測定する温度範囲を0 ~ 50 として、22 における線膨張率が $0 \pm 20 \text{ ppb/K}$ 以下のセラミックスをいう。低熱膨張セラミックスは、線膨張率が低いので、液体水素を含む極低温液体によって熱衝撃を受けても破損のおそれが低減する。低熱膨張セラミックスの線膨張率は、例えば、光ヘテロダイン法1光路干渉計を用いて求めればよい。

【0029】

具体的には、低熱膨張セラミックスは、主結晶相がコージェライトであり、副結晶相としてアルミナ、ムライトおよびサフィリンを含み、粒界相にCaを含む非晶質相が存在しているのがよい。主結晶相の結晶相比率は95質量%以上97.5質量%以下であり、副結晶相の結晶相比率が2.5質量%以上5質量%以下であり、全量中に対するCaの含有量がCaO換算で0.4質量%以上0.6質量%以下であり、さらにジルコニアを含み、全量中に対するジルコニアの含有量が0.1質量%以上1.0質量%以下であるのが好ましい。これにより、極低温液体の温度が大きく変動しても、低熱膨張セラミックスは伸縮しにくいので、長期間に亘って用いることができる。このような低熱膨張セラミックスとしは、例えば、特許第5430389号公報に記載のものが採用可能である。

【0030】

絶縁管2を構成するセラミックスは、使用温度域での比誘電率が11以下であるのがよい。極低温液体は比誘電率が小さいため、セラミックスの比誘電率は小さいと、極低温液体の比誘電率に近くなり、高周波特性がよくなるので、気泡率の測定精度がさらに向上する。特に、11以下であると、極低温液体の気泡率の測定精度をさらに向上させることができる。上記使用温度域とは、極低温液体の移送時の温度域をいう。

【0031】

また、絶縁管2は、窒化珪素またはサイアロンを主成分とするセラミックスからなるものであってもよい。これらのセラミックスは、機械的強度および耐熱衝撃性がいずれも高いので、熱衝撃を受けても破損のおそれが低減する。

具体的には、上記セラミックスは、酸化カルシウム、酸化アルミニウムおよび希土類元素の酸化物を含み、酸化カルシウム、酸化アルミニウムおよび希土類元素の酸化物の合計100質量%に対して、酸化カルシウムおよび酸化アルミニウムの含有量がそれぞれ0.3質量%以上1.5質量%以下、14.2質量%以上48.8質量%以下であり、残部が前記希土類元素の酸化物である。前記窒化珪素は、組成式が $\text{Si}_{6-z}\text{Al}_z\text{O}_z\text{N}_{8-z}$ ($z = 0.1 \sim 1$) で表される β -サイアロンであり、平均結晶粒径が $20 \mu\text{m}$ 以下(但し、 $0 \mu\text{m}$ を除く。)である。このようなセラミックスとしては、例えば、特許第5430389号公報に記載のものが採用可能である。

【0032】

少なくとも電極装着部5における、貫通孔3の軸心に平行な方向の内壁面3a、3bの粗さ曲線における算術平均粗さ R_a は $0.2 \mu\text{m}$ 以下であるのがよい。内壁面3a、3bの粗さ曲線における算術平均粗さ R_a が $0.2 \mu\text{m}$ 以下であると、内壁面3a、3bによって生じる極低温液体の流動抵抗の上昇が抑制されるので、極低温液体の流速分布が安定する。すなわち、流速のばらつきが抑制されるので、極低温液体の気泡率の測定精度を向

10

20

30

40

50

上させることができる。

【0033】

算術平均粗さ R_a は、JIS B 0601:2001 に準拠し、レーザー顕微鏡（（株）キーエンス製、超深度カラー3D形状測定顕微鏡（VK-X1000またはその後継機種））を用いて測定することができる。測定条件としては、照明方式を同軸照明、測定倍率を240倍、カットオフ値 λ_s を無し、カットオフ値 λ_c を0.08 mm、終端効果の補正を有り、測定範囲を $1425\ \mu\text{m} \times 1067\ \mu\text{m}$ として、設定すればよい。測定範囲に、測定対象とする線を略等間隔に4本引いて、線粗さ計測を行えばよい。計測の対象とする線1本当たりの長さは、1280 μm である。

【0034】

セラミックスの相対密度は、例えば、92%以上99.9%以下である。相対密度は、セラミックスの理論密度に対する、JIS R 1634-1998 に準拠して求められたセラミックスの見掛け密度の百分率（割合）として表される。

【0035】

絶縁管2は、複数の閉気孔を有するセラミックスからなり、隣り合う閉気孔の重心間距離の平均値から閉気孔の円相当径の平均値を差し引いた値（以下、この値を閉気孔間の間隔という。）が8 μm 以上18 μm であってもよい。閉気孔は互いに独立している。

閉気孔間の間隔が8 μm 以上の場合、閉気孔が比較的分散された状態で存在するため、機械的強度が高くなる。一方、閉気孔間の間隔が18 μm 以下の場合、冷熱衝撃が繰り返し与えられ、閉気孔の輪郭を起点とするマイクロクラックが発生したとしても、周囲の閉気孔により、その伸展が遮られる確率が高くなる。このことから、閉気孔間の間隔が8 μm 以上18 μm 以下であると、絶縁管2を長期間に亘って用いることができる。

【0036】

閉気孔の円相当径の歪度は、閉気孔の重心間距離の歪度よりも大きくてもよい。ここで、歪度 S_k とは、分布が正規分布からどれだけ歪んでいるか、即ち、分布の左右対称性を示す指標（統計量）であり、歪度が0より大きい場合、分布の裾は右側に向かい、歪度0の場合、分布は左右対称となり、歪度が0より小さい場合、分布の裾は左側に向かう。

【0037】

閉気孔の円相当径および閉気孔の重心間距離のそれぞれのヒストグラムを重ね合わせると、閉気孔の円相当径の歪度は、閉気孔の重心間距離の歪度より大きい場合、円相当径の最頻値は、重心間距離の最頻値よりも左側（ゼロ側）に位置する。即ち、円相当径の小さい閉気孔が多く、しかも、これらの閉気孔がより疎らに存在することになり、機械的強度と耐冷熱衝撃性とを兼ね備えたセラミック部材とすることができる。

例えば、閉気孔の円相当径の歪度は1以上であり、閉気孔の重心間距離の歪度は0.7以下である。閉気孔の円相当径の歪度と、閉気孔の重心間距離の歪度との差は、0.3以上である。

閉気孔の重心間距離および円相当径を求めるには、まず、セラミックスを形成する絶縁管2の一方の端面から軸方向に向かって、平均粒径 D_{50} が3 μm のダイヤモンド砥粒を用いて銅盤にて研磨する。その後、平均粒径 D_{50} が0.5 μm のダイヤモンド砥粒を用いて錫盤にて研磨することにより、粗さ曲線における算術平均粗さ（ R_a ）が0.2 μm 以下である研磨面を得る。

【0038】

研磨面の算術平均粗さ R_a は、上述した測定方法と同じである。研磨面を200倍の倍率で観察し、平均的な範囲を選択して、例えば、面積が $7.2 \times 10^4\ \mu\text{m}^2$ （横方向の長さが310 μm 、縦方向の長さが233 μm ）となる範囲をCCDカメラで撮影して、観察像を得る。

この観察像を対象として、画像解析ソフト「A像くん(ver 2.52)」（登録商標、旭化成エンジニアリング（株）製）を用いて分散度計測の重心間距離法という手法で閉気孔の重心間距離を求めればよい。以下、画像解析ソフト「A像くん」と記載した場合、旭化成エンジニアリング（株）製の画像解析ソフトを示す。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 9 】

この手法の設定条件としては、例えば、画像の明暗を示す指標であるしきい値を 1 6 5、明度を暗、小図形除去面積を $1 \mu\text{m}^2$ 、雑音除去フィルタを無とすればよい。なお、観察像の明るさに応じて、しきい値は調整すればよく、明度を暗、2 値化の方法を手動とし、小図形除去面積を $1 \mu\text{m}^2$ および雑音除去フィルタを有とした上で、観察像に現れるマーカーが閉気孔の形状と一致するように、しきい値を調整すればよい。閉気孔の円相当径は、上記観察像を対象として、粒子解析という手法で閉気孔の円相当径を求めればよい。設定条件は、閉気孔の重心間距離を求めるのに用いた設定条件と同じにすればよい。

閉気孔の円相当径および重心間距離の歪度は、それぞれ Excel (登録商標、Microsoft Corporation) に備えられている関数 Skew を用いて求めればよい。

10

【 0 0 4 0 】

このようなセラミックスからなる絶縁管の製造方法の一例について説明する。絶縁管を構成するセラミックスの主成分がアルミナである場合について説明する。

主成分である酸化アルミニウム粉末 (純度が 99.9 質量%以上) と、水酸化マグネシウム、酸化珪素および炭酸カルシウムの各粉末とを粉碎用ミルに溶媒 (イオン交換水) とともに投入して、粉末の平均粒径 (D_{50}) が $1.5 \mu\text{m}$ 以下になるまで粉碎した後、有機結合剤と、酸化アルミニウム粉末を分散させる分散剤とを添加、混合してスラリーを得る。

ここで、上記粉末の合計 100 質量%における水酸化マグネシウム粉末の含有量は 0.3 ~ 0.42 質量%、酸化珪素粉末の含有量は 0.5 ~ 0.8 質量%、炭酸カルシウム粉末の含有量は 0.06 ~ 0.1 質量%であり、残部が酸化アルミニウム粉末および不可避不純物である。

20

有機結合剤は、アクリルエマルジョン、ポリビニールアルコール、ポリエチレングリコール、ポリエチレンオキサイド等である。

【 0 0 4 1 】

次に、スラリーを噴霧造粒して顆粒を得た後、1 軸プレス成形装置あるいは冷間静水圧プレス成形装置を用いて、成形圧を 78 MPa 以上 118 MPa 以下として加圧することにより柱状の成形体を得る。

成形体には、必要に応じて切削加工により、焼成後に凹部となる凹みが形成される。

30

焼成温度を 1580 以上 1780 以下、保持時間を 2 時間以上 4 時間以下として成形体を焼成して絶縁管を得る。

【 0 0 4 2 】

閉気孔の間隔が $8 \mu\text{m}$ 以上 $18 \mu\text{m}$ である絶縁管を得るには、焼成温度を 1600 以上 1760 以下、保持時間を 2 時間以上 4 時間以下として成形体を焼成すればよい。閉気孔の円相当径の歪度が閉気孔の重心間距離の歪度よりも大きい絶縁管を得るには、成形圧を 96 MPa 以上 118 MPa 以下として加圧して得られた成形体を、焼成温度を 1600 以上 1760 以下、保持時間を 2 時間以上 4 時間以下として焼成すればよい。絶縁管の貫通孔に対向する面を研削して内周面としてもよい。また、電極が装着される凹部の面を研削して底面としたりしてもよい。

40

【 0 0 4 3 】

図 13 は、図 1 ~ 図 3 に示す実施形態の変形例を示している。図 13 に示すように、凹部 6' は、外部に開口する第 1 凹部 61 と、該第 1 凹部 61 の底面に設けられた第 2 凹部 62 とを有し、第 2 凹部 62 は開口面積が第 1 凹部 61 よりも小さく、電極 4' は第 2 凹部 62 の底面に装着されている。これにより、電極 4' の位置決め精度がさらに向上するため、極低温液体の気泡率の測定精度を向上させることができる。その他は、前述の実施形態と同様であるので、詳細な説明は省略する。

【 0 0 4 4 】

次に、本開示の他の実施形態を図 14 ~ 図 16 に基づいて説明する。なお、図 1 ~ 図 13 に示す部材と同じ部材には、同一符号を付して説明を省略する。

50

図 1 4 は、筐体 1 0 で囲繞した気泡率センサ 1 ' を示している。図 1 5 および図 1 6 はその垂直破断面を示す概略斜視図および水平破断面を示す概略斜視図である。

【 0 0 4 5 】

この実施形態に係る気泡率センサ 1 ' は、図 1 5 に示すように、絶縁管 2 の貫通孔 3 ' の軸心に垂直な方向に開口する 1 対の凹部 6 a、6 b、6 c を複数有している。各凹部 6 a、6 b、6 c の底面には、それぞれ電極 4 a、4 b、4 c が装着されている。凹部 6 a、6 b、6 c は、貫通孔 3 ' の軸心に沿って配列されている。

【 0 0 4 6 】

この実施形態において、電極装着部 5 ' とは、上記複数の電極 4 a、4 b、4 c が装着された部位をいい、例えば凹部 6 a、6 b、6 c が形成された部位をいう。

10

この実施形態においても、電極装着部 5 ' において、電極 4 a、4 b、4 c の電極面に垂直な方向における内壁面間の距離 D 1 が、電極 4 a、4 b、4 c の電極面に平行な方向における内壁面間の距離 D 2 よりも短くなるように形成されている。

このように複数の電極 4 a、4 b、4 c で気泡率を測定するので、測定精度がより向上する。その他は前述の実施形態と同様である。

【 0 0 4 7 】

次に、本開示の実施形態に係る流量計について説明する。この流量計は、貫通孔 3、3 ' 内を流れる極低温液体の流量を測定するものであり、前記した気泡率センサ 1、1 ' と、図示しない流速計とを備える。気泡率センサ 1、1 ' および流速計は、図示しない極低温液体移送管（以下、移送管と略称する場合がある。）に取り付けられている。

20

【 0 0 4 8 】

移送管内を流れる極低温液体は、気液混合した二相流となっているので、気泡率センサ 1、1 ' で気泡率を測定し、これから極低温液体の密度 d (kg / m^3) を求める。極低温液体の密度 d は、比誘電率に対応し、よって気泡率センサ 1、1 ' で測定される静電容量にも対応しているからである。

そして、流速計で求めた極低温液体の流速 ($\text{m} / \text{秒}$) を v 、電極装着部 5 における貫通孔 3 の断面積 (m^2) を a としたとき、次式によって流量 F ($\text{kg} / \text{秒}$) が求められる。

$$F = d \times v \times a$$

流量計は、上記演算を行うために、気泡率センサ 1、1 ' および流速計が接続された演算装置をさらに備えている。これにより、極低温液体の流量測定を簡単に行うことができるので、工業的に極低温液体を大量移送する場合に管理が容易になる。

30

【 0 0 4 9 】

本開示の気泡率センサ 1、1 ' の測定対象である極低温液体としては、液体水素 (- 2 5 3) の他、液体窒素 (- 1 9 6)、液体ヘリウム (- 2 6 9)、液化天然ガス (- 1 6 2)、液体アルゴン (- 1 8 6) 等が挙げられる（括弧内は液化温度を示す）。よって、本開示における極低温液体とは、 - 1 6 2 以下の極低温で液化するものをいう。

【 0 0 5 0 】

以上、本開示の実施形態について説明したが、本開示の気泡率センサは、上記実施形態に限定されるものではなく、本開示の範囲内で種々の変更や改良が可能である。

40

【 符号の説明 】

【 0 0 5 1 】

1、1 ' 気泡率センサ

2 絶縁管

2 1 絶縁管部材

3、3 ' 貫通孔

3 a、3 b 内壁面

3 1 流入口

3 2 流出口

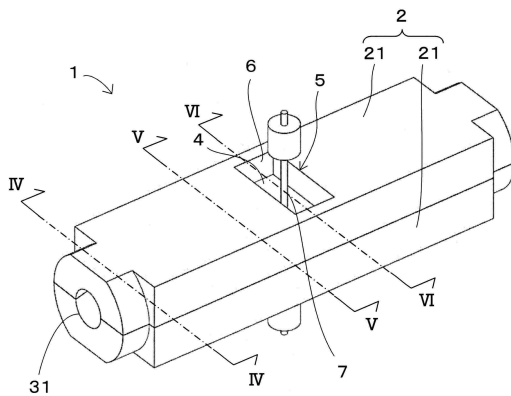
4、4 '、4 a、4 b、4 c 電極

50

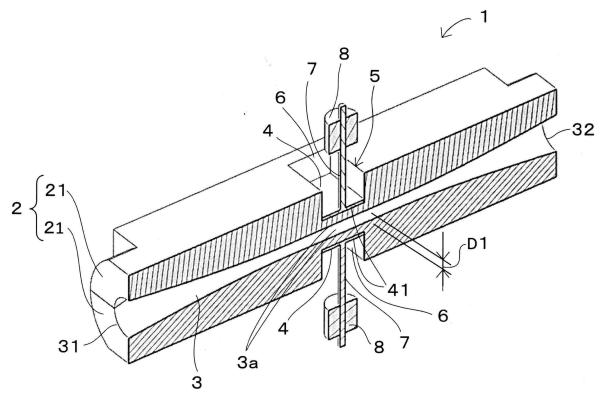
- | | | |
|-------|-------------|-------|
| 5、5' | 5 a、5 b、5 c | 電極装着部 |
| 6、6' | 6 a、6 b、6 c | 凹部 |
| 6 1 | 第 1 凹部 | |
| 6 2 | 第 2 凹部 | |
| 7 | 導通ピン | |
| 8 | 気密端子 | |
| 9 | 結束体 | |
| 1 0 | 筐体 | |
| 1 0 1 | 枠体部 | |
| 1 0 2 | 蓋部 | |
| 1 1 | 第 1 接続管 | |
| 1 2 | 第 2 接続管 | |
| 1 3 | 挿通孔 | |
| 1 4 | 真空排気弁 | |
| 1 5 | 真空空間 | |
| D 1 | (最短)距離 | |
| D 2 | (最長)距離 | |

【図面】

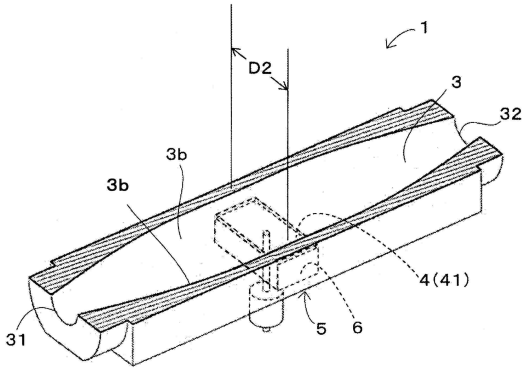
【 図 1 】



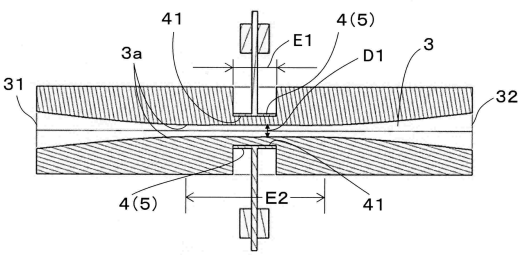
【圖 2】



【図 3】

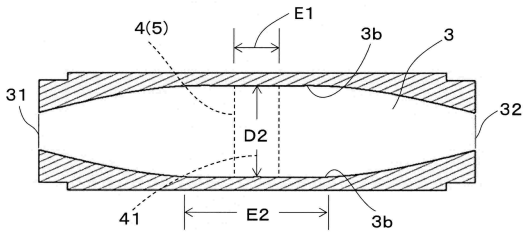


【図 4】

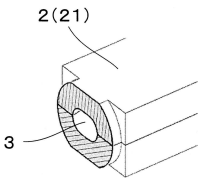


10

【図 5】

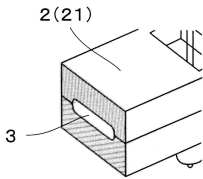


【図 6】

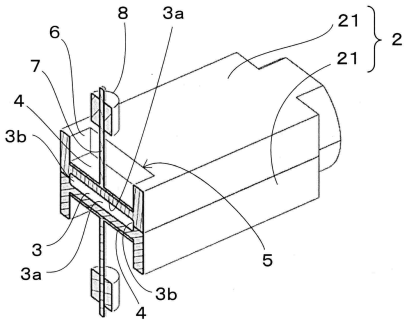


20

【図 7】



【図 8】

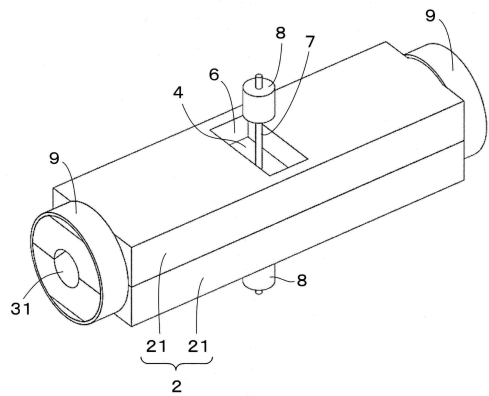


30

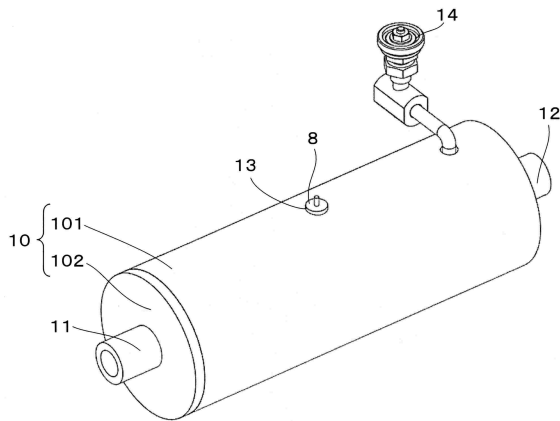
40

50

【図 9】

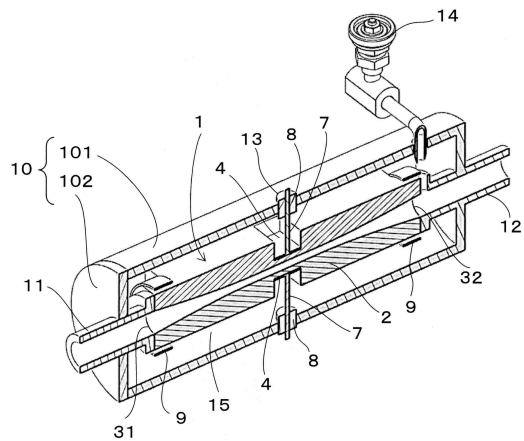


【図 10】

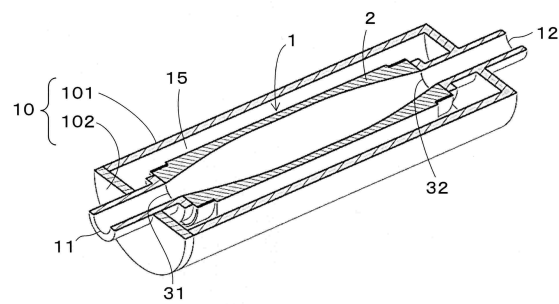


10

【図 11】



【図 12】



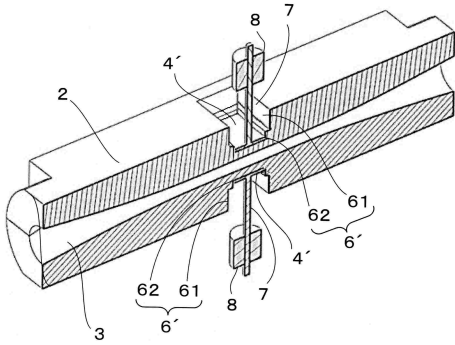
20

30

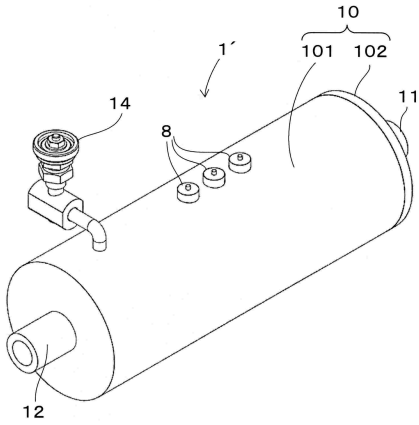
40

50

【図 1 3】

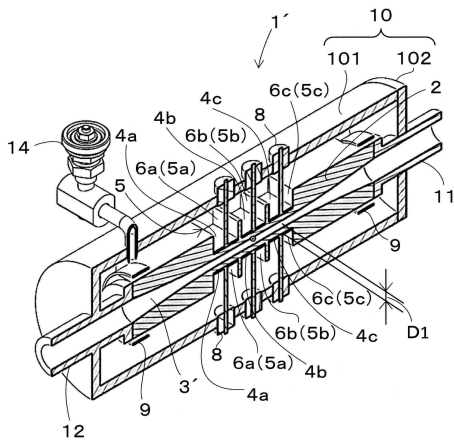


【図 1 4】

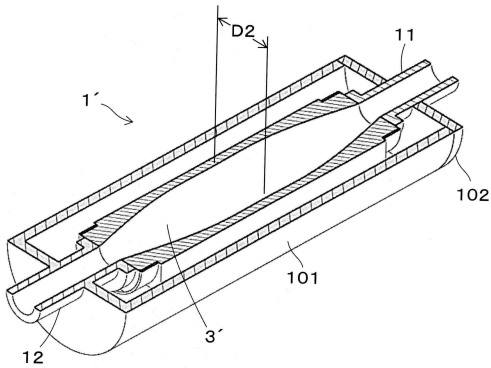


10

【図 1 5】



【図 1 6】



20

30

40

50

フロントページの続き

(56)参考文献 特開 2 0 1 0 - 1 0 7 4 8 7 (J P , A)
特開 2 0 0 5 - 0 5 5 2 7 6 (J P , A)
特開 2 0 1 4 - 2 3 2 0 0 7 (J P , A)
実開昭 5 4 - 0 7 2 5 5 6 (J P , U)
特開 2 0 2 0 - 1 7 3 0 8 9 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 9 / 0 4 4 9 0 6 (W O , A 1)
米国特許第 0 5 0 1 7 8 7 9 (U S , A)
米国特許第 0 5 2 9 1 7 9 1 (U S , A)
(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)
G 0 1 N 2 7 / 0 0 - 2 7 / 1 0
G 0 1 N 2 7 / 1 4 - 2 7 / 2 4
G 0 1 F 1 / 0 0 - 1 / 9 0
F 1 6 L 9 / 1 0