

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 720 351 B1

(51) Int. Cl.: G01N 15/08 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 000780/2023

(22) Anmeldedatum: 06.07.2023

(43) Anmeldung veröffentlicht: 28.06.2024

(30) Priorität: 19.12.2022
CN 2022116296202

(24) Patent erteilt: 30.09.2024

(45) Patentschrift veröffentlicht: 30.09.2024

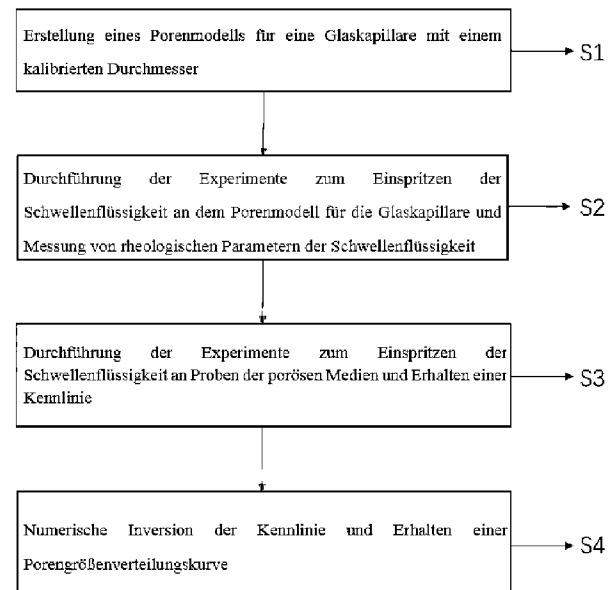
(73) Inhaber:
Xiangtan University,
North Second Ring Road, Yuhu District
411105 Xiangtan City, Hunan Province (CN)

(72) Erfinder:
Jing Ye, 411105 Xiangtan City, Hunan Province (CN)
Hui Dong, 411105 Xiangtan City, Hunan Province (CN)

(74) Vertreter:
IPrime Rentsch Kaelin AG, Hirschengraben 1
8001 Zürich (CH)

(54) VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER PORENGRÖSSENVERTEILUNGEN
PORÖSER MEDIEN

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit mit einer geringeren Toxizität als Quecksilber. Das Verfahren umfasst folgende Schritte: Erstellung eines Porenmodells anhand einer Glaskapillare mit einem kalibrierten Durchmesser; Durchführung der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell und Messung von rheologischen Parametern der Schwellenflüssigkeit; Durchführung der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an Proben der porösen Medien und Erhalten einer Kennlinie $Q_V / \nabla P$; und numerische Inversion der Kennlinie und Erhalten einer Porengrößenverteilungskurve. Die Vorrichtung umfasst einen Kompressor, einen Flüssigkeit-Lagertank, eine stromaufwärts einer Probenkammer gelegene Kammer, eine stromabwärts der Probenkammer gelegene Kammer, eine Präzisionswaage, die hintereinander verbunden sind, und einen Differenzdrucksensor, wobei Druckanschlüsse des Differenzdrucksensors mit der stromaufwärts gelegenen Kammer und der stromabwärts gelegenen Kammer verbunden sind. Die vorliegende Erfindung kann effizient und genau die Porengrößenverteilungen der porösen Medien bestimmen und ist vorteilhaft für die Forschung von Porengefügemerkmalen.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft Messung und Charakterisierung poröser Medien, insbesondere ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit.

Stand der Technik

[0002] Poröse Medien umfassen Skelette aus einem Festkörper und eine große Anzahl von dichten Poren, durchströmt von einem oder mehreren Fluiden oder gasgefüllt. Aufgrund von Gefügemerkmalen der porösen Medien haben die porösen Medien Anwendungen z. B. in der Architektur, Medizin, Luft- und Raumfahrt usw. Die Porengrößenverteilungen gelten als eines der wichtigen Porengefügemerkmale der porösen Medien und haben einen großen Einfluss auf die Freisetzung von Medikamenten, Effizienzen von Katalysatoren, Filterwirkungen von Filtermaterialien, Leistungen von Baumaterialien, Speicherkapazitäten von Gestein usw. Die Frage, wie man die Porengrößenverteilungen der porösen Medien genau und effizient bestimmen kann, steht im Mittelpunkt der aktuellen und künftigen Forschung.

[0003] Heutzutage wird die Quecksilberporosimetrie verwendet, um die Porengrößenverteilungen der porösen Medien zu bestimmen. Das Prinzip besteht darin, mittels der Undurchlässigkeit von Quecksilber für allgemeinen Festkörper das Quecksilber durch äußere Drucke in die Poren der porösen Medien gegen den Widerstand der Kapillare zu drücken. Je größer die äußeren Drucke sind, desto kleiner sind die Radien der Poren, in denen das Quecksilber eindringen kann. Durch die Messung von Gehältern an dem Quecksilber, eindringend unter verschiedenen äußeren Drucken in die Poren, können die Porenvolumen der Poren mit entsprechenden Porengrößen ermittelt und eine Porengrößenverteilungskurve der porösen Medien ermittelt werden.

[0004] Durch die Quecksilberporosimetrie können die Porengrößenverteilungen schnell und genau gemessen werden, aber die Quecksilberporosimetrie ist nur für die Proben der porösen Medien mit hoher mechanischer Festigkeit geeignet. Die Form der Proben der porösen Medien werden während der Experimente nicht verändert, aber übermäßige äußere Drucke beschädigen die Proben, wodurch die Stärke der ausgeübten Drucke weiter begrenzt wird. Daher ist der Porengrößenbereich, gemessen mit der Quecksilberporosimetrie, begrenzt. Darüber hinaus erschwert die Toxizität des Quecksilbers die Experimente und eine aufwändige Abfallbehandlung ist notwendig.

Darstellung der Erfindung

[0005] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit zu schaffen. Das Verfahren und die Vorrichtung können effizient und genau die Porengrößenverteilungen bestimmen und haben einen größeren Messbereich, einen breiteren Anwendungsbereich, geringere Toxizität und höhere Sicherheitsfaktoren als eine Quecksilber-Injektion-Methode.

[0006] Die vorliegende Erfindung stellt eine Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit mit einer geringeren Toxizität als Quecksilber in ein Porenmodell, welches anhand einer Glaskapillare mit einem kalibrierten Durchmesser erstellt worden ist, und Proben poröser Medien bereit, umfassend einen Kompressor, einen Flüssigkeit-Lagertank, eine stromaufwärts einer Probenkammer gelegene Kammer, eine stromabwärts der Probenkammer gelegene Kammer mit einer Auslassöffnung, und eine Präzisionswaage, die hintereinander verbunden sind, sowie einen Differenzdrucksensor, wobei Druckanschlüsse des Differenzdrucksensors mit der stromaufwärts gelegenen Kammer und der stromabwärts gelegenen Kammer verbunden sind.

[0007] Der Kompressor wird zum Erzeugen von Druck verwendet, um die Schwellenflüssigkeit durch Proben der porösen Medien zu drücken. Der Kompressor ist mit zwei Druckregelventilen ausgestattet, um den Druck im Flüssigkeit-Lagertank einzustellen, ein Freikolben im Flüssigkeit-Lagertank überträgt statischen Druck auf die Schwellenflüssigkeit und der Flüssigkeit-Lagertank ist mit einem Manometer ausgestattet, um den ausgeübten Druck in Echtzeit qualitativ zu kontrollieren.

[0008] Die Probenkammer ist zwischen der stromaufwärts gelegenen Kammer und der stromabwärts gelegenen Kammer eingebettet und wird verwendet, um einen Strömungsweg der Schwellenflüssigkeit festzulegen. Die Proben der porösen Medien werden in richtigen Positionen fixiert, und die Probenkammer ist mit o-förmigen Ringen, zusammengedrückt durch Vierkantschrauben, ausgestattet, um die Dichtheit zu gewährleisten.

[0009] Der Differenzdrucksensor wird zur Messung vom Differenzdruck verwendet. Ein Hauptkörper des Differenzdrucksensors ist vertikal in einem Gehäuse angeordnet, und ein Spalt zwischen dem Gehäuse und dem Differenzdrucksensor ist mit Schaumstoff gefüllt, um eine Temperatur des Differenzdrucksensors stabil zu halten; zwei Druckanschlüsse des Differenzdrucksensors sind mit der stromaufwärts gelegenen Kammer und der stromabwärts gelegenen Kammer verbunden, um den Differenzdruck zwischen einem oberen Ende und einem unteren Ende der Proben direkt zu messen und Fehler, verursacht durch andere Komponenten, zu vermeiden.

[0010] Die Präzisionswaage wird zur Messung von Massenströmen an einer Austrittsseite, nämlich der Auslassöffnung der stromabwärts gelegenen Kammer, verwendet. Eine Exportpalette wird auf die Präzisionswaage aufgesetzt und ist über

ein horizontales flexibles Rohr und einen Strahl unter dem Wasser mit der stromabwärts gelegenen Kammer verbunden, um den Einfluss der Kapillarwirkung zu vermeiden. Die Exportpalette ist mit einer Kunststoffolie bedeckt, um Qualitätsverluste durch Flüssigkeitsverdunstung zu vermeiden. Der Strahl unter dem Wasser bedeutet, dass sich beide Enden des horizontalen flexiblen Rohrs in der Schwellenflüssigkeit befinden. Um den Einfluss von Luft zu vermeiden, werden einige Flüssigkeiten im Voraus auf dem Exportpalette vorbereitet und dann wird das flexible Rohr in die Flüssigkeiten eingeführt.

[0011] Vorzugsweise sind der Kompressor, der Flüssigkeit-Lagertank und die stromaufwärts gelegene Kammer nacheinander über ein flexibles Rohr verbunden, ein zweites Druckregelventil ist zwischen dem Kompressor und dem Flüssigkeit-Lagertank angeordnet und ein Abzweig mit einem ersten Druckregelventil erstreckt sich von einem Verbindungsweg zwischen dem Kompressor und dem zweiten Druckregelventil, d.h. der Kompressor ist mit dem zweiten Druckregelventil, dem Flüssigkeit-Lagertank und der stromaufwärts gelegenen Kammer nacheinander über das flexible Rohr verbunden und der Abzweig mit dem ersten Druckregelventil erstreckt sich von dem Verbindungsweg zwischen dem Kompressor und dem zweiten Druckregelventil.

[0012] Der Flüssigkeit-Lagertank ist mit einem Manometer und/oder einem Ablassventil ausgestattet, im Flüssigkeit-Lagertank ist der Freikolben vorgesehen; das mit dem Flüssigkeit-Lagertank zusätzlich verbundene Ablassventil wird verwendet, den Druck im Flüssigkeit-Lagertank abzulassen, um Probleme zu vermeiden.

[0013] Vorzugsweise betragen Innendurchmesser der Probenkammer, der stromaufwärts gelegenen Kammer und der stromabwärts gelegenen Kammer alle 550 Millimeter (mm). Die Probenkammer ist zwischen der stromaufwärts gelegenen Kammer und der stromabwärts gelegenen Kammer eingebettet und um die Probenkammer herum sind die Vierkantschrauben vorgesehen, um die Dichtheit zu verbessern;

[0014] Vorzugsweise ist die stromabwärts gelegene Kammer über das horizontale flexible Rohr mit der Exportpalette verbunden, und die Exportpalette wird mit der Kunststoffolie abgedeckt und auf die Präzisionswaage gestellt. Der Hauptkörper des Differenzdrucksensors ist vertikal in dem Gehäuse angeordnet, und der Spalt zwischen dem Gehäuse und dem Differenzdrucksensor ist mit dem Schaumstoff gefüllt, um die Temperatur des Differenzdrucksensors stabil zu halten; die beiden Druckanschlüsse des Differenzdrucksensors sind jeweils mit der stromaufwärts gelegenen Kammer und der stromabwärts gelegenen Kammer verbunden, beide Druckmessstellen sind auf beiden Seiten der Probenkammer in einem Abstand von 50 mm angeordnet und beide Druckmessleitungen des Differenzdrucksensors sind mit dem Nullstellventil verbunden, wodurch die Druckanschlüsse kurzgeschlossen werden und dann der Differenzdrucksensor kalibriert und auf Null gestellt wird.

[0015] Ferner schafft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit mit einer geringeren Toxizität als Quecksilber umfassend folgende Schritte:

S1: Erstellung einer Vorrichtung für die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit in ein Porenmodell und Proben der porösen Medien; Kalibrierung, Befüllung und Starten der Vorrichtung für die Experimente;

S2: Erstellung des Porenmodells anhand einer Glaskapillare mit einem kalibrierten Durchmesser, Durchführung der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell und Messung von rheologischen Parametern der Schwellenflüssigkeit;

S3: Durchführung der Experimente zum Einspritzen an den Proben der porösen Medien, nämlich Durchführung der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an Proben der porösen Medien und Erhalten einer Kennlinie Q_V / VP , wobei Q_V Volumenströme, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an den Proben der porösen Medien, darstellt, und VP Druckgradienten, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an den Proben der porösen Medien, darstellt; und

S4: numerische Inversion der Kennlinie und Erhalten einer Porengrößenverteilungskurve.

[0016] Vorzugsweise umfasst der S1:

S101: Öffnen des Nullstellventils, anschließende Kalibrierung des Differenzdrucksensors und Schließen des Nullstellventils nach der Kalibrierung;

S102: Einspritzen der Schwellenflüssigkeit mit einer Spritze durch die Auslassöffnung in die Vorrichtung für die Experimente, um die Proben der porösen Medien zu sättigen und Luft in Poren in den Proben, in der stromaufwärts gelegenen Kammer und in der stromabwärts gelegenen Kammer abzusaugen, und Drücken des Freikolbens mit einer Absaugvorrichtung auf die Schwellenflüssigkeit, wenn die Vorrichtung für die Experimente mit der Schwellenflüssigkeit von der Auslassöffnung zum Flüssigkeit-Lagertank gesättigt ist; und

S103: Einschalten der Vorrichtung für die Experimente zwei Stunden vor Verwendung, um Temperaturen von elektronischen Komponenten stabil zu halten.

[0017] Im S2 werden die rheologischen Parameter der Schwellenflüssigkeit durch die Vorrichtung für die Experimente gemessen.

[0018] Das Porenmodell wird anhand der Glaskapillare mit dem kalibrierten Durchmesser erstellt, auf einem Holzsubstrat geklebt und mit der Vorrichtung für die Experimente fixiert. Eine Kennlinie der Glaskapillare wird durch die Experimente zum Einspritzen gemessen, nach der Verarbeitung wird ein rheologisches Diagramm einer Flüssigkeit erhalten, und Viskositäten k und Fließfähigkeiten n werden durch lineare Regression des rheologischen Diagramms der Flüssigkeit nach einer Methode der kleinsten Quadrate erhalten;

Formel 1:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = -\frac{Q_v}{\pi r^3} \left(3 - \frac{d \log Q_v}{d \log \nabla P} \right), \\ \tau = r \cdot \nabla P / 2 \end{cases},$$

wobei $\dot{\gamma}$ Scherraten der Schwellenflüssigkeit, τ Schubspannungen der Schwellenflüssigkeit, Q_v Volumenströme, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell ∇P Druckgradienten, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell und r einen Kapillarradius darstellen.

[0019] Ferner werden im S3 die Proben der porösen Medien in einer geeigneten Position in der Probenkammer fixiert und die Vierkantschrauben werden festgezogen, um die Dichtigkeit zu gewährleisten.

die durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit erhaltenen Volumenströme sind eine diskrete Summe von Grundvolumenströmen und die Kennlinie $Q_v / \nabla P$ wird durch Polynominterpolation gefiltert, um Schwankungen, verursacht durch Fehler in den Experimenten zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit, zu verringern.

[0020] Im S4 wird die Kennlinie $Q_v / \nabla P$ ferner durch eine folgende Berechnungsformel numerisch invertiert:

Formel 2:

$$q_v(r, \nabla P) = n\pi r^3 \left(\frac{\nabla P \cdot r}{2k} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{R_0}{r} \right)^{1+\frac{1}{n}} \left[\frac{(1 - \frac{R_0}{r})^2}{3n+1} + \frac{2 \frac{R_0}{r} \cdot (1 - \frac{R_0}{r})}{2n+1} + \frac{(\frac{R_0}{r})^2}{n+1} \right], r \geq R_0,$$

wobei $q_v(r, \nabla P)$ Grundvolumenströme der Schwellenflüssigkeit, fließend durch eine einzelne Pore, n Fließfähigkeiten der Schwellenflüssigkeit, k Viskositäten der Schwellenflüssigkeit, ∇P Druckgradienten in einer Porenrichtung, r Außenradien der Poren, und R_0 einen Grenzzadius der Poren, wenn die Schwellenflüssigkeit in die Poren fließt, darstellen, wobei im Allgemeinen angenommen wird, dass die Schwellenflüssigkeit nur dann in den Poren fließt, wenn die Außenradien der Poren $r \geq R_0$, und τ_0 stellt eine anfängliche Scherspannung der Schwellenflüssigkeit dar, wobei die anfängliche Scherspannung sich auf eine Schubspannung zum Beginn des Fließens der Schwellenflüssigkeit bezieht und numerisch gleich einer vertikalen Koordinate ist, wobei eine horizontale Koordinate im rheologischen Diagramm der Flüssigkeit 0 ist.

Formel 3:

$$Q_v(\nabla P) = \int_{R_0 = \frac{2\tau_0}{\nabla P}}^{\infty} q_v(r, \nabla P) \cdot p(r) \cdot dr,$$

wobei $Q_v(\nabla P)$ gesamte Volumenströme der Schwellenflüssigkeit, fließend durch die porösen Medien, darstellt, ∞ und R_0 einen Außenradius einer maximalen Pore bzw. einen Außenradius einer minimalen Pore darstellen, durch die die Schwellenflüssigkeit fließt, darstellen, wobei die gesamten Volumenströme eine Summe der mit Wahrscheinlichkeitsdichten $p(r)$ gewichteten Grundvolumenströme sind, und dr Differentiale der Außenradien der Poren r darstellt.

[0021] Die Formel 3 wird in eine Matrixform umgewandelt, um eine Formel 4 zu erhalten:

Formel 4:

$$[q_v(r_j, \nabla P_i)] \cdot \{p(r_i) \cdot dr_i\} = q_{ij} \cdot \{p(r_i) \cdot dr_i\} = \{Q_v(\nabla P_i)\},$$

wobei der tiefgestellte Index i Zeilen darstellt und der tiefgestellte Index j Spalten darstellt, und ein Variationsbereich der Druckgradienten und ein Variationsbereich der Außenradien der Poren vollständig entsprechen und gleichzeitig $\frac{\partial q_{ij}}{\partial r_i} = 0$ erfüllt sein, um eine Reversibilität einer Matrix q_{ij} zu gewährleisten.

[0022] Die Formel 4 wird in eine Formel 5 umgewandelt:

Formel 5:

$$\{p(r_i) \cdot dr_i\} = [q_v(r_j, \nabla P_i)]^{-1} \cdot \{Q_v(\nabla P_i)\},$$

eine Porengrößenverteilungsfunktion $p(r)$ wird aus der Formel 5 abgeleitet, und die Porengrößenverteilungskurve der Proben der porösen Medien wird erhalten.

[0023] Die Ausführungsformen weisen die folgenden Vorteile auf.

[0024] Beim Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit wird die Schwellenflüssigkeit in die Proben der porösen Medien eingespritzt, um die Kennlinie zu erhalten, und dann wird die Kennlinie numerisch invertiert, um die Porengrößenverteilungskurve zu erhalten, wodurch die Porengrößenverteilungen der porösen Medien effektiv bestimmt werden. Die vorliegende Erfindung ist vorteilhaft für die Forschung von Porengefügemerkmalen der porösen Medien, die Anwendung und die Entwicklung der porösen Medien.

[0025] Im Vergleich zum Stand der Technik haben die erfindungsgemäßen Ausführungsformen Vorteile, z. B. einen breiten Anwendungsbereich für die Proben, einen großen Messbereich für die Porengröße, niedrige Kosten, geringe Toxizität der Materialien und einen höheren Sicherheitsfaktor.

[0026] Es gibt viele Arten von Schwellenwertflüssigkeiten je nach den Probeneigenschaften oder einem Porengrößenbereich der porösen Medien, um Anforderungen der Experimente zu erfüllen.

Aufzählung der Zeichnungen

[0027]

- Fig. 1 eine schematische Darstellung der Vorrichtung für Experimente der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 2 ein Kennlinie-Diagramm von Experimenten zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit an einem Porenmodell in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 3 ein rheologisches Diagramm einer Schwellenflüssigkeit in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 4 ein Kennlinie-Diagramm von Experimenten zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit an Proben poröser Medien in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 5 ein Kennlinie-Diagramm von Experimenten zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit an Proben poröser Medien in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 6 ein Diagramm einer Porengrößenverteilungskurve von Proben poröser Medien in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung; und
- Fig. 7 ein Flussdiagramm des Verfahrens der vorliegenden Erfindung.

Ausführung der Erfindung

[0028] Weitere Einzelheiten und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden im Folgenden unter Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben. Obwohl die vorliegende Erfindung unter Bezugnahme auf bestimmte Ausführungsbeispiele beschrieben worden ist, ist es für einen Fachmann ersichtlich, dass verschiedene Änderungen ausgeführt werden können und Äquivalente als Ersatz verwendet werden können, ohne den Bereich der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

[0029] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit mit einer geringeren Toxizität als Quecksilber, um eine Porengrößenverteilungskurve leicht und genau zu bestimmen.

[0030] Wie in der Fig. 1 dargestellt, umfasst eine Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit einen Kompressor 1, einen Flüssigkeit-Lagertank 2, eine stromaufwärts gelegene Kammer 3, eine Probenkammer 4, eine stromabwärts gelegene Kammer 5, einen Differenzdrucksensor 6 und eine Präzisionswaage 7.

[0031] Der Kompressor 1 ist mit einem zweiten Druckregelventil 102, dem Flüssigkeit-Lagertank 2 und der stromaufwärts gelegenen Kammer 3 über ein flexibles Rohr verbunden, und ein Abzweig mit einem ersten Druckregelventil 101 erstreckt sich von einem Verbindungsweg zwischen dem Kompressor 1 und dem zweiten Druckregelventil 102.

[0032] Der Flüssigkeit-Lagertank 2 ist mit einem Manometer 201 und einem Ablassventil 202 ausgestattet, und im Flüssigkeit-Lagertank 2 ist ein Freikolben 203 vorgesehen.

[0033] Die Probenkammer 4 ist zwischen der stromaufwärts gelegenen Kammer 3 und der stromabwärts gelegenen Kammer 5 eingebettet und um die Probenkammer 4 herum sind Vierkantschrauben vorgesehen, um eine Dichtheit der Vorrichtung für die Experimente zu verbessern.

[0034] Insbesondere betragen Innendurchmesser der Probenkammer 4, der stromaufwärts gelegenen Kammer 3 und der stromabwärts gelegenen Kammer 5 alle 550 mm.

[0035] Die stromabwärts gelegene Kammer 5 ist über ein horizontales flexibles Rohr mit einer Exportpalette 701 verbunden, um den Einfluss der Kapillarwirkung zu vermeiden; die Exportpalette 701 ist mit einer Kunststoffolie abgedeckt, um Verdunstung der Schwellenflüssigkeit zu verhindern, und auf der Präzisionswaage 7 angeordnet.

[0036] Ein Hauptkörper des Differenzdrucksensors 6 ist vertikal in einem Gehäuse 601 angeordnet, und ein Spalt zwischen dem Gehäuse 601 und dem Differenzdrucksensor 6 ist mit Schaumstoff gefüllt, um eine Temperatur des Differenzdrucksensors 6 stabil zu halten; zwei Druckanschlüsse sind jeweils mit der stromaufwärts gelegenen Kammer 3 und der stromabwärts gelegenen Kammer 5 verbunden, Druckmessstellen des Differenzdrucksensors 6 sind auf beiden Seiten der Probenkammer 4 in einem Abstand von 50 mm angeordnet, und zwei Druckmessleitungen sind mit einem Nullstellventil 602 verbunden.

[0037] Ein Verfahren für die Experimente auf der Grundlage von der Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen umfasst folgende Schritte.

[0038] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Schwellenflüssigkeit entsprechend einem rheologischen Modell Herschel-Bulkley, verwendet, nämlich eine zubereitete Mayonnaise, und der folgende Begriff „Schwellenflüssigkeit“ bezieht sich speziell auf diese zubereitete Mayonnaise. Als die Schwellenflüssigkeit wird eine Flüssigkeit bezeichnet, die nicht sofort fließt, wenn die Flüssigkeit einer äußeren Kraft ausgesetzt ist, sondern erst dann fließt, wenn die äußere Kraft bis zu einem gewissen Grad zunimmt, wie Bentonitlösung, Polypropylenlösung, verschiedene Emulsionen usw. Es ist nicht schwierig, eine den experimentellen Anforderungen entsprechende Schwellenflüssigkeit mit einer geringen Toxizität auszuwählen, und erfindungsgemäß hat die „zubereitete Mayonnaise“ die geringe Toxizität.

[0039] S1: Kalibrierung, Befüllung und Starten der Vorrichtung für die Experimente:

S101: Öffnen des Nullstellventils 602, Kalibrierung und Nullstellung des Differenzdrucksensors 6, und anschließendes Schließen des Nullstellventils 602;

S102: Erstellung eines Porenmodell anhand einer Glaskapillare mit einem kalibrierten Durchmesser von $D=1025$ mm durch Bohrung, Kleben des Porenmodells auf ein Holzsubstrat mit einem Durchmesser von 550 mm, Befestigen des Holzsubstrats in eine geeignete Position in der Probenkammer 4 und Festziehen der Vierkantschrauben, um die Dichtheit zu gewährleisten;
Einspritzen der Schwellenflüssigkeit in die Vorrichtung für die Experimente durch eine Auslassöffnung mit einer Spritze, um die Glaskapillare zu sättigen und Luft in den Poren von Proben, in der stromaufwärts gelegenen Kammer 3 und in der stromabwärts gelegenen Kammer 5 abzusaugen; und Drücken des Freikolbens 203, ausgestattet mit einer Absaugvorrichtung, auf die Schwellenflüssigkeit, wenn die gesamte Vorrichtung für die Experimente mit der Schwellenflüssigkeit von der Auslassöffnung zum Flüssigkeit-Lagertank 2 gesättigt ist; und

S103: Einschalten der Vorrichtung für die Experimente zwei Stunden vor Verwendung, um Temperaturen von elektronischen Komponenten der Vorrichtung für die Experimente stabil zu halten.

[0040] S2: Messung von rheologischen Parametern der Schwellenflüssigkeit:

[0041] S201: Starten des Kompressors 1, Schließen des ersten Druckregelventils 101, Öffnen des zweiten Druckregelventils 102 und Schließen des Auslassventils 202, wobei in einem Zeitraum $0 < t < 200$ Sekunden (s) der Druck ansteigt, und Schließen des zweiten Druckregelventils 102 bei $t = 200$ s, wobei der Druck exponentiell abfällt;

S202: Aufzeichnung von Massenströmen und Druckgradienten synchron und schnell, wenn $t > 200$ s, und Erhalten einer Einspritzkurve der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell (Kennlinie $Q_v / \nabla P$) nach der Verarbeitung, wie in der Fig. 2 dargestellt; und

S203: Berechnung der rheologischen Parameter der Schwellenflüssigkeit mit einer folgenden Formel:

Formel 1:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = -\frac{Q_v}{\pi r^3} \left(3 - \frac{d \log Q_v}{d \log \nabla P} \right), \\ \tau = r \cdot \nabla P / 2 \end{cases}$$

wobei $\dot{\gamma}$ Scherraten der Schwellenflüssigkeit, τ Schubspannungen der Schwellenflüssigkeit, Q_v die Volumenströme der Schwellenflüssigkeit, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit, ∇P die Druckgradienten in einer Porenrichtung, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit, und r einen Kapillarradius darstellen.

[0042] Ein rheologisches Diagramm der Schwellenflüssigkeit wird mit der Formel 1 erstellt, nämlich die Fig. 3.

[0043] Viskositäten k und Fließfähigkeiten n werden durch lineare Regression des rheologischen Diagramms der Schwellenflüssigkeit nach einer Methode der kleinsten Quadrate erhalten.

[0044] In der Ausführungsform ist die Schwellenspannung $\tau_0 = 42.5 \text{ Pa}$, die Viskosität $k = 2.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ und die Fließfähigkeit $n = 0.850$.

[0045] S3: Durchführung der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an Proben der porösen Medien, um eine Kennlinie $Q_V / \nabla P$ zu erhalten:

erfindungsgemäß sind die Proben der porösen Medien Proben von gesintertem Polyethylen mit einem Durchmesser 550 mm, das aus zufällig angeordneten Partikeln besteht;

S301: Öffnen des Nullstellventils 602, Kalibrierung und Nullstellung des Differenzdrucksensors 6, und anschließendes Schließen des Nullstellventils 602;

S302: Befestigen der Proben vom gesinterten Polyethylen in die geeignete Position in der Probenkammer 4 und Festziehen der Vierkantschrauben, um die Dichtigkeit zu gewährleisten;

S303: Einspritzen der Schwellenflüssigkeit in die gesamte Vorrichtung für die Experimente durch die Auslassöffnung mit der Spritze, um Poren der Proben vom gesinterten Polyethylen zu sättigen und Luft in den Poren, in der stromaufwärts gelegenen Kammer 3 und in der stromabwärts gelegenen Kammer 5 abzusaugen; und Drücken des Freikolbens 203, ausgestattet mit der Absaugvorrichtung, auf die Schwellenflüssigkeit, wenn die gesamte Vorrichtung für die Experimente mit der Schwellenflüssigkeit von der Auslassöffnung zum Flüssigkeit-Lagertank 2 gesättigt ist; und

S304: Starten des Kompressors 1, Schließen des ersten Druckregelventils 101, Öffnen des zweiten Druckregelventils 102 und Schließen des Auslassventils 202, wobei in dem Zeitraum $0 < t < 200 \text{ s}$ der Druck ansteigt, und Schließen des zweiten Druckregelventils 102 bei $t = 200 \text{ s}$, wobei der Druck exponentiell abfällt.

S305: Aufzeichnung der Massenströme und der Druckgradienten synchron und schnell, wenn $t > 200 \text{ s}$, und Erhalten einer Einspritzkurve der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an den Proben der porösen Medien (Kennlinie $Q_V / \nabla P$) nach der Filterung durch Polynominterpolation der Ordnung 12, wie in der Fig. 4 und der Fig. 5 dargestellt.

[0046] S4: Numerische Inversion der Kennlinie und Erhalten einer Porengrößenverteilungskurve.

Formel 2:

$$q_v(r, \nabla P) = n\pi r^3 \left(\frac{\nabla P \cdot r}{2k} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{R_0}{r} \right)^{1+\frac{1}{n}} \left[\frac{\left(1 - \frac{R_0}{r} \right)^2}{3n+1} + \frac{2 \frac{R_0}{r} \cdot \left(1 - \frac{R_0}{r} \right)}{2n+1} + \frac{\left(\frac{R_0}{r} \right)^2}{n+1} \right], r \geq R_0,$$

wobei $q_v(r, \nabla P)$ Grundvolumenströme der Schwellenflüssigkeit, fließend durch eine einzelne Pore, n Fließfähigkeiten der Schwellenflüssigkeit, k Viskositäten der Schwellenflüssigkeit, ∇P Druckgradienten in einer Porenrichtung, r Außenradien der Poren, und $R_0 = \frac{\tau_0}{\nabla P}$ einen Grenzradius der Poren, wenn die Schwellenflüssigkeit in die Poren fließt, darstellen, wobei im Allgemeinen angenommen wird, dass die Schwellenflüssigkeit nur dann in den Poren fließt, wenn die Außenradien der Poren $r \geq R_0$.

[0047] Nur in sehr seltenen Fällen sind r und R_0 gleich und Ergebnisse von Formel 3 werden nicht beeinflussen.

[0048] Im Allgemeinen entsprechen Porengrößen der porösen Medien einer bestimmten Verteilung, die groß oder klein ist. Die Erfindung erkennt die meisten Fälle, in denen die Außenradien der Poren der porösen Medien $r \geq R_0$ Grenzradius der Poren der Schellenflüssigkeit. In einigen wenigen Fällen, in denen $r = R_0$, hat nur die Berechnung der Volumenströme durch die einzelne Pore keine mathematische Bedeutung, und das Ergebnis ist 0, aber die Schwellenflüssigkeit fließt trotzdem in den Poren, was keinen Einfluss auf das Integralergebnis der Grundvolumenströme der porösen Medien in Formel 3 hat und als endlicher Unstetigkeitspunkt des Integrals betrachtet werden kann. τ_0 stellt eine anfängliche Scherspannung der Schwellenflüssigkeit dar, wobei die Schwellenflüssigkeit bezieht sich auf eine Flüssigkeit, die nicht sofort fließt, wenn die Flüssigkeit der äußeren Kraft ausgesetzt sind, sondern erst dann fließt, wenn die äußere Kraft bis zum gewissen Grad zunimmt; und die anfängliche Scherspannung bezieht sich auf eine Schubspannung zu Beginn des Fließens der Schwellenflüssigkeit, und ist numerisch gleich einer vertikalen Koordinate, wobei eine horizontale Koordinate im rheologischen Diagramm der Flüssigkeit 0 ist (wie in der Fig. 3 dargestellt).

Formel 3:

$$Q_V(\nabla P) = \int_{R_0 = \frac{2\tau_0}{\nabla P}}^{\infty} q_v(r, \nabla P) \cdot p(r) \cdot dr,$$

wobei $Q_V(\nabla P)$ gesamte Volumenströme der Schwellenflüssigkeit, fließend durch die porösen Medien, darstellt, ∞ und R_0 einen Außenradius einer maximalen Pore bzw. einen Außenradius einer minimalen Pore darstellen, durch die die Schwellenflüssigkeit fließt, darstellen, wobei die gesamten Volumenströme eine Summe der mit Wahrscheinlichkeitsdichten $p(r)$ gewichteten Grundvolumenströme sind, und dr Differentiale der Außenradien der Poren r darstellt.

[0049] Die Formel 3 wird in eine folgende Matrixform umgewandelt, um eine Formel 4 zu erhalten.

Formel 4:

$$\left[q_v(r_j, \nabla P_i) \right] \cdot \{ p(r_i) \cdot dr_i \} = q_{ij} \cdot \{ p(r_i) \cdot dr_i \} = \{ Q_V(\nabla P_i) \},$$

wobei der tiefgestellte Index i Zeilen darstellt und der tiefgestellte Index j Spalten darstellt, und ein Variationsbereich der Druckgradienten und ein Variationsbereich der Außenradien der Poren vollständig entsprechen und gleichzeitig $\frac{\partial q_{ij}}{\partial \nabla P_i} = 0$ erfüllt sein, um eine Reversibilität einer Matrix q_{ij} zu gewährleisten.

[0050] Die Formel 4 wird in die folgende Formel 5 umgewandelt.

Formel 5:

$$\{ p(r_i) \cdot dr_i \} = \left[q_v(r_j, \nabla P_i) \right]^{-1} \cdot \{ Q_V(\nabla P_i) \},$$

[0051] Eine Porengrößenverteilungsfunktion $p(r)$ wird aus der Formel 5 abgeleitet, und weiter wird die Porengrößenverteilungskurve vom gesinterten Polyethylen erhalten, wie in Fig. 6 dargestellt.

[0052] Wie aus der Fig. 6 ersichtlich ist, begrenzt durch die Besonderheiten der Schwellenflüssigkeit (zubereitete Mayonnaise) in den Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, ist die Messung der Poren mit Außenradien kleiner als der Grenzradius nicht genau genug, was ebenfalls die Anwendbarkeit der Beschränkungsbedingung in Beziehung 2 bestätigt.

[0053] Diese Einschränkung sollte jedoch nicht als die Einschränkung der Erfindung angesehen werden, und der Messbereich kann auf einen kleineren Porenradius erweitert werden, indem die Schwellenwertflüssigkeit des Nano-Emulsionstyps für Experimente ausgewählt wird. Dementsprechend können verschiedene Schwellenflüssigkeiten ausgewählt werden, um verschiedene experimentelle Anforderungen zu erfüllen, und die Flexibilität und Anwendbarkeit der Erfindung sind unvergleichlich mit dem Stand der Technik.

[0054] Die oben beschriebenen Ausführungsformen stellen lediglich eine Veranschaulichung der Prinzipien der vorliegenden Erfindung dar. Es versteht sich, dass Modifikationen und Variationen der hierin beschriebenen Anordnungen und Einzelheiten anderen Fachleuten einleuchten werden. Deshalb ist beabsichtigt, dass die Erfindung lediglich durch den Schutzzumfang der nachstehenden Patentansprüche und nicht durch die spezifischen Einzelheiten, die anhand der Beschreibung und der Erläuterung der Ausführungsbeispiele hierin präsentiert wurden, beschränkt sei.

Bezugszeichen

[0055]

1	Kompressor
101	erstes Druckregelventil
102	zweites Druckregelventil
2	Flüssigkeit-Lagertank
201	Manometer
202	Ablassventil
203	Freikolben
3	stromaufwärts gelegene Kammer
5	stromabwärts gelegene Kammer
4	Probenkammer
6	Differenzdrucksensor
601	Gehäuse
602	Nullstellventil
7	Präzisionswaage
701	Exportpalette

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit mit einer geringeren Toxizität als Quecksilber in ein Porenmodell, welches anhand einer Glaskapillare mit einem kalibrierten Durchmesser erstellt worden ist, und Proben poröser Medien, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung einen Kompressor (1), einen Flüssigkeit-Lagertank (2), eine stromaufwärts einer Probenkammer (4) gelegene Kammer (3), eine stromabwärts der Probenkammer (4) gelegene Kammer (5) und eine Präzisionswaage (7), die hintereinander verbunden sind, sowie einen Differenzdrucksensor (6) umfasst, wobei Druckanschlüsse des Differenzdrucksensors (6) mit der stromaufwärts gelegenen Kammer (3) und der stromabwärts gelegenen Kammer (5) verbunden sind.
2. Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Kompressor (1), der Flüssigkeit-Lagertank (2) und die stromaufwärts gelegene Kammer (3) nacheinander über ein flexibles Rohr verbunden sind, ein zweites Druckregelventil (102) zwischen dem Kompressor (1) und dem Flüssigkeit-Lagertank (2) angeordnet ist und ein Abzweig mit einem ersten Druckregelventil (101) sich von einem Verbindungsweg zwischen dem Kompressor (1) und dem zweiten Druckregelventil (102) erstreckt;
 der Flüssigkeit-Lagertank (2) mit einem Manometer (201) und/oder einem Ablassventil (202) ausgestattet ist, und im Flüssigkeit-Lagertank (2) ein Freikolben (203) vorgesehen ist;
 die Probenkammer (4) zwischen der stromaufwärts gelegenen Kammer (3) und der stromabwärts gelegenen Kammer (5) eingebettet ist und um die Probenkammer (4) herum Schrauben vorgesehen sind, um eine Dichtheit der Vorrichtung für die Experimente zu verbessern;
 die stromabwärts gelegene Kammer (5) über ein horizontales flexibles Rohr mit einer Exportpalette (701) verbunden ist, die Exportpalette (701) mit einer Kunststoffolie abgedeckt ist und auf der Präzisionswaage (7) angeordnet ist;
 ein Hauptkörper des Differenzdrucksensors (6) vertikal in einem Gehäuse (601) angeordnet ist, ein Spalt zwischen dem Gehäuse (601) und dem Differenzdrucksensor (6) mit Schaumstoff gefüllt ist, um eine Temperatur des Differenzdrucksensors (6) stabil zu halten, zwei Druckanschlüsse mit der stromaufwärts gelegenen Kammer (3) und der stromabwärts gelegenen Kammer (5) verbunden sind, Druckmessstellen des Differenzdrucksensors (6) auf beiden Seiten der Probenkammer (4) angeordnet sind und zwei Druckmessleitungen des Differenzdrucksensors (6) mit einem Nullstellventil (602) verbunden sind.
3. Vorrichtung zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Innendurchmesser der Probenkammer (4), der stromaufwärts gelegenen Kammer (3) und der stromabwärts gelegenen Kammer (5) alle 550 Millimeter betragen.
4. Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen poröser Medien durch Experimente zum Einspritzen einer Schwellenflüssigkeit mit einer geringeren Toxizität als Quecksilber, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren folgende Schritte umfasst:
 S1: Kalibrierung, Befüllung und Starten einer Vorrichtung für die Experimente gemäss Anspruch 1;
 S2: Erstellung eines Porenmodells anhand einer Glaskapillare mit einem kalibrierten Durchmesser, Durchführung der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell und Messung von rheologischen Parametern der Schwellenflüssigkeit;
 S3: Durchführung der Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an Proben der porösen Medien und Erhalten einer Kennlinie $Q_V / \nabla P$, wobei Q_V Volumenströme der Schwellenflüssigkeit und ∇P Druckgradienten in einer Porenrichtung; und
 S4: numerische Inversion der Kennlinie und Erhalten einer Porengrößenverteilungskurve.
5. Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Flüssigkeit-Lagertank (2) einen Freikolben (203) und der Differenzdrucksensor (6) ein Nullstellventil (602) aufweist;
 der S1 umfasst:
 S101: Öffnen des Nullstellventils (602), anschließende Kalibrierung des Differenzdrucksensors (6) und Schließen des Nullstellventils (602) nach der Kalibrierung;
 S102: Einspritzen der Schwellenflüssigkeit mit einer Spritze durch die Auslassöffnung in die Vorrichtung für die Experimente, um die Proben der porösen Medien zu sättigen und Luft in Poren der Proben, in der stromaufwärts gelegenen Kammer (3) und in der stromabwärts gelegenen Kammer (5) abzusaugen, und Drücken des Freikolbens (203) auf die Schwellenflüssigkeit, wenn die gesamte Vorrichtung für die Experimente mit der Schwellenflüssigkeit von der Auslassöffnung zum Flüssigkeit-Lagertank (2) gesättigt ist; und
 S103: Einschalten der Vorrichtung für die Experimente zwei Stunden vor Verwendung, um Temperaturen von elektronischen Komponenten der Vorrichtung für die Experimente stabil zu halten.
6. Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass im S2 das Porenmodell anhand der Glaskapillare mit dem kalibrierten Durchmesser erstellt und mit der Vorrichtung für die Experimente fixiert wird, eine

Kennlinie der Glaskapillare durch die Experimente zum Einspritzen gemessen wird, ein rheologisches Diagramm der Schwellenflüssigkeit nach Verarbeitung erhalten wird, und Viskositäten k und Fließfähigkeiten n durch lineare Regression des rheologischen Diagramms der Flüssigkeit nach einer Methode einer kleinsten Quadrate erhalten werden;

Formel 1:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = -\frac{Q_v}{\pi r^3} \left(3 - \frac{d \log Q_v}{d \log \nabla P} \right), \\ \tau = r \cdot \nabla P / 2 \end{cases},$$

wobei $\dot{\gamma}$ Scherraten der Schwellenflüssigkeit, τ Schubspannungen der Schwellenflüssigkeit, Q_v Volumenströme, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell ∇P Druckgradienten, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an dem Porenmodell und r einen Kapillarradius darstellen.

7. Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass im S3 die Volumenströme, erhalten durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit an den Proben der porösen Medien, eine diskrete Summe von Grundvolumenströmen sind, und die Kennlinie $Q_v / \nabla P$ durch Polynominterpolation gefiltert wird, um Schwankungen, verursacht durch Fehler in den Experimenten zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit, zu verringern.
8. Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass im S4 die Kennlinie $Q_v / \nabla P$ durch eine folgende Berechnungsformel numerisch invertiert wird:

Formel 2:

$$q_v(r, \nabla P) = n \pi r^3 \left(\frac{\nabla P \cdot r}{2k} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{R_0}{r} \right)^{1+\frac{1}{n}} \left[\frac{(1 - \frac{R_0}{r})^2}{3n+1} + \frac{2 \frac{R_0}{r} \cdot (1 - \frac{R_0}{r})}{2n+1} + \frac{(\frac{R_0}{r})^2}{n+1} \right], r \geq R_0,$$

wobei $q_v(r, \nabla P)$ Grundvolumenströme der Schwellenflüssigkeit, fließend durch eine einzelne Pore, n Fließfähigkeiten der Schwellenflüssigkeit, k Viskositäten der Schwellenflüssigkeit, ∇P Druckgradienten in einer Porenrichtung, r Außenradien der Poren, und R_0 einen Grenzzradius der Poren, wenn die Schwellenflüssigkeit in die Poren fließen kann, darstellen, wobei im Allgemeinen angenommen wird, dass die Schwellenflüssigkeit nur dann in den Poren fließt, wenn die Außenradien der Poren $r \geq R_0$;

Formel 3:

$$Q_v(\nabla P) = \int_{R_0 = \frac{2\tau_0}{\nabla P}}^{\infty} q_v(r, \nabla P) \cdot p(r) \cdot dr,$$

wobei $Q_v(\nabla P)$ gesamte Volumenströme der Schwellenflüssigkeit, fließend durch die porösen Medien, darstellt, ∞ und R_0 einen Außenradius einer maximalen Pore bzw. einen Außenradius einer minimalen Pore darstellen, durch die die Schwellenflüssigkeit fließt, wobei die gesamten Volumenströme eine Summe der mit Wahrscheinlichkeitsdichten $p(r)$ gewichteten Grundvolumenströme sind, und dr Differentiale der Außenradien der Poren r darstellt; die Formel 3 wird in eine Matrixform umgewandelt, um eine Formel 4 zu erhalten;

Formel 4:

$$\left[q_v(r_j, \nabla P_i) \right] \cdot \{ p(r_i) \cdot dr_i \} = q_y \cdot \{ p(r_i) \cdot dr_i \} = \{ Q_v(\nabla P_i) \},$$

wobei der tiefgestellte Index i Zeilen darstellt und der tiefgestellte Index j Spalten darstellt, und ein Variationsbereich der Druckgradienten und ein Variationsbereich der Außenradien der Poren vollständig entsprechen und $\frac{\partial Q_v}{\partial \nabla P} \neq 0$ erfüllt sind, um eine Reversibilität einer Matrix q_{ij} zu gewährleisten; die Formel 4 wird in eine Formel 5 umgewandelt:

Formel 5:

$$\{ p(r_i) \cdot dr_i \} = \left[q_v(r_j, \nabla P_i) \right]^{-1} \cdot \{ Q_v(\nabla P_i) \},$$

eine Porengrößenverteilungsfunktion $p(r)$ wird aus der Formel 5 abgeleitet, und dann wird die Porengrößenverteilungskurve der Proben der porösen Medien erhalten.

9. Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilungen der porösen Medien durch die Experimente zum Einspritzen der Schwellenflüssigkeit nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Schwellenflüssigkeit einem rheologischen Modell Herschel-Bulkley entspricht.

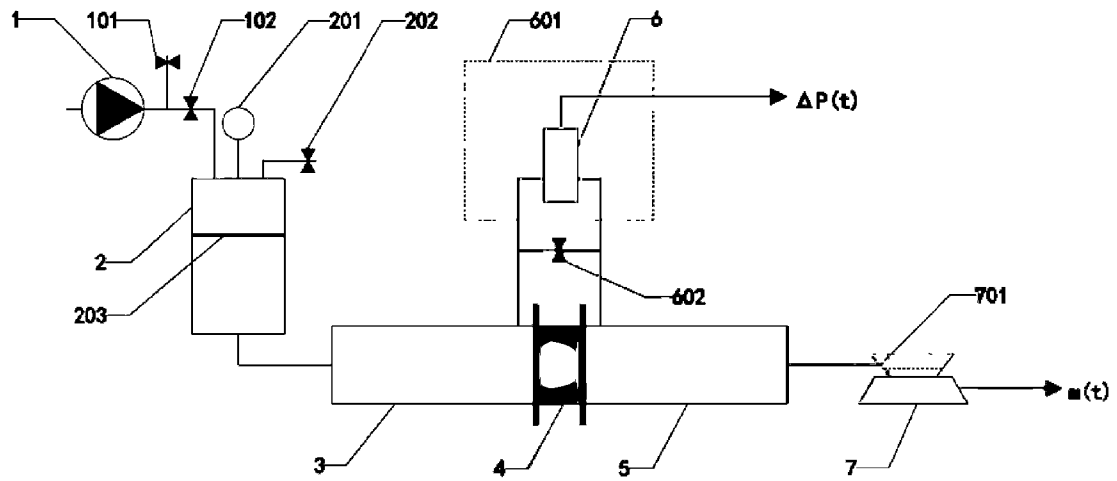


Fig. 1

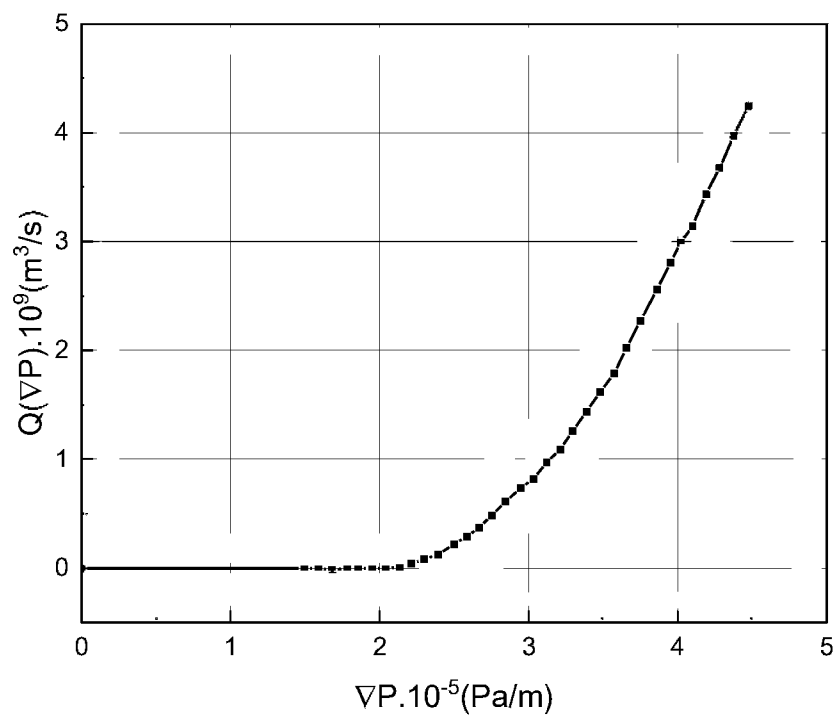


Fig. 2

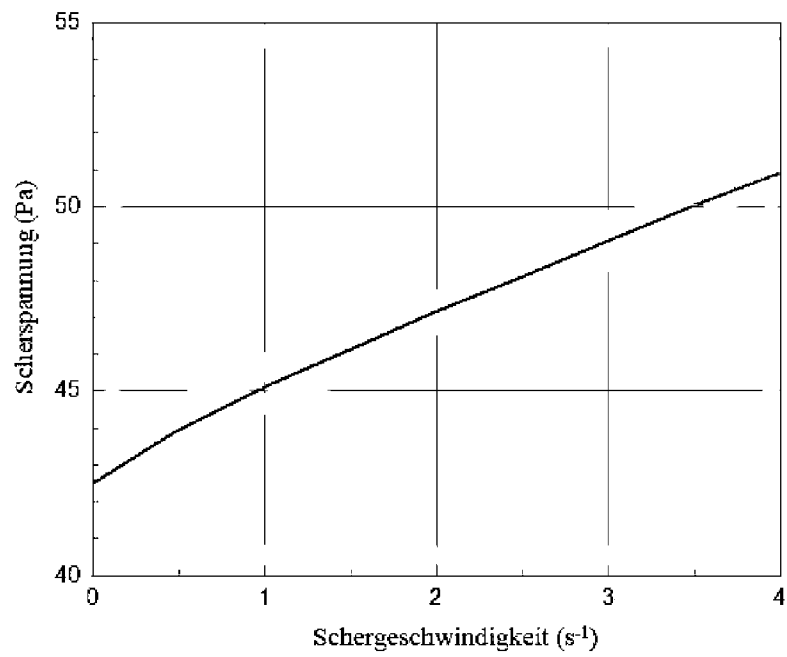


Fig. 3

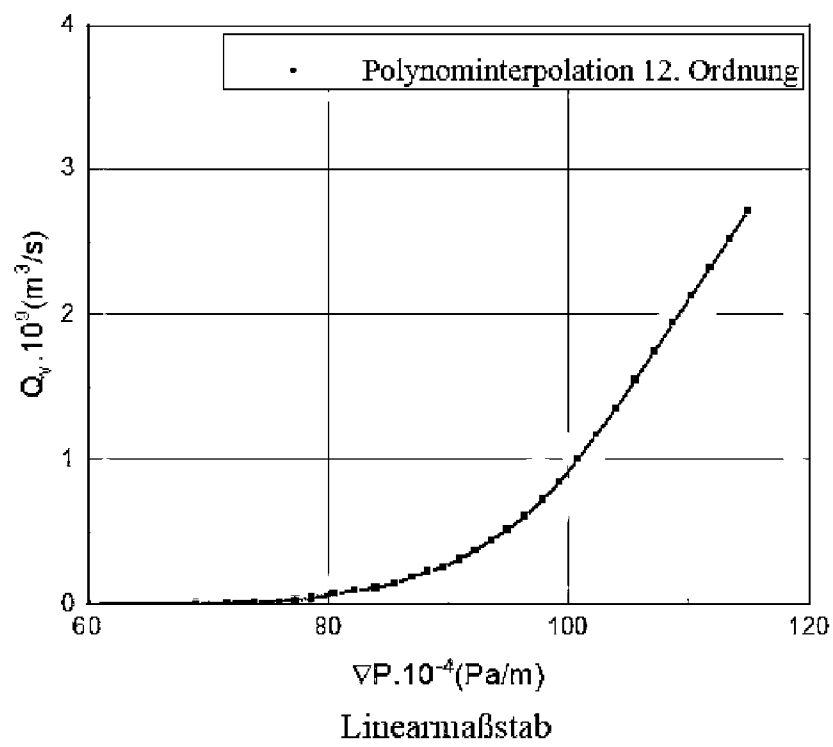


Fig. 4

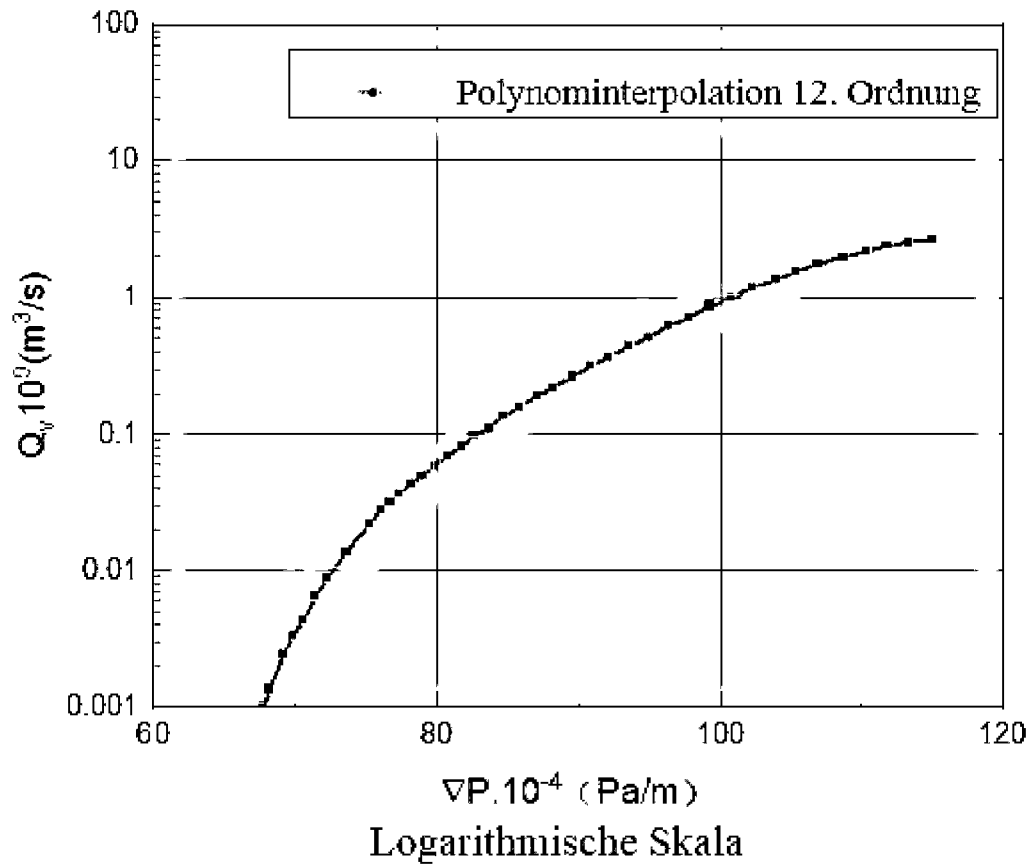


Fig. 5

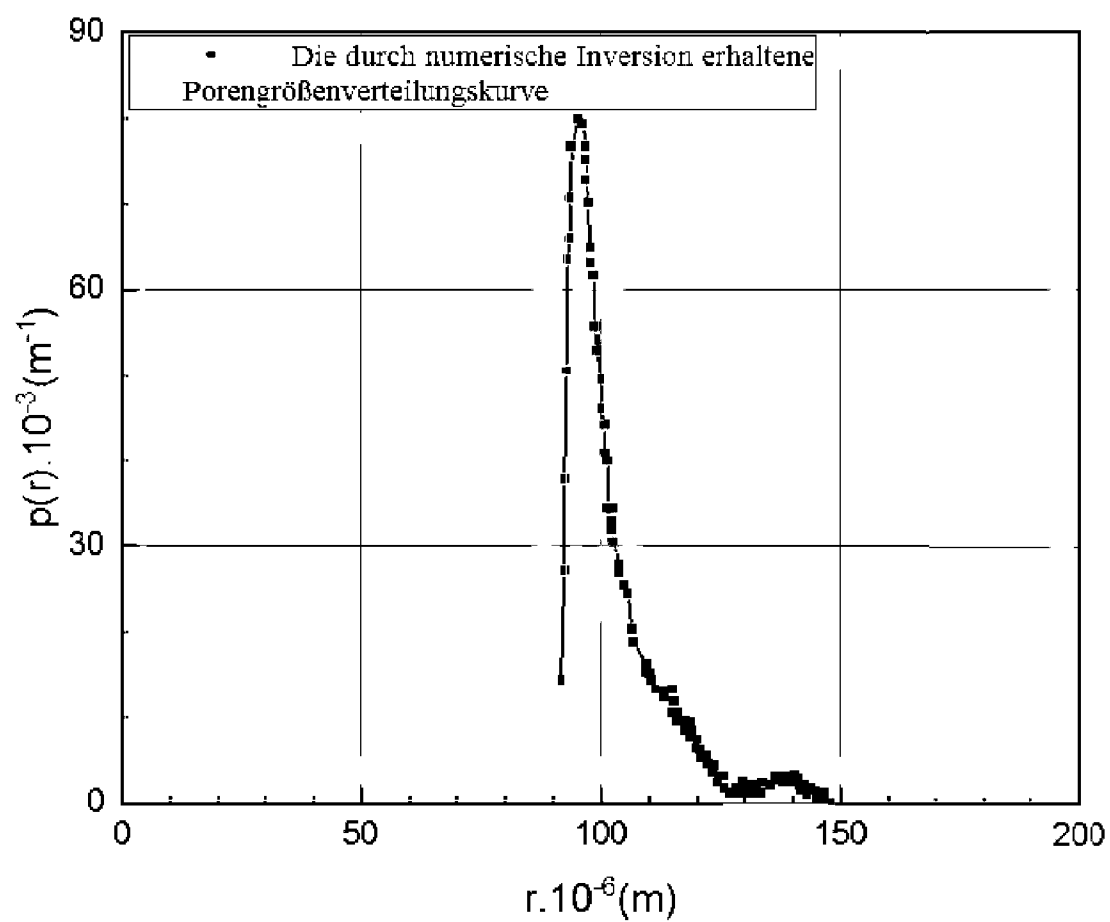


Fig. 6

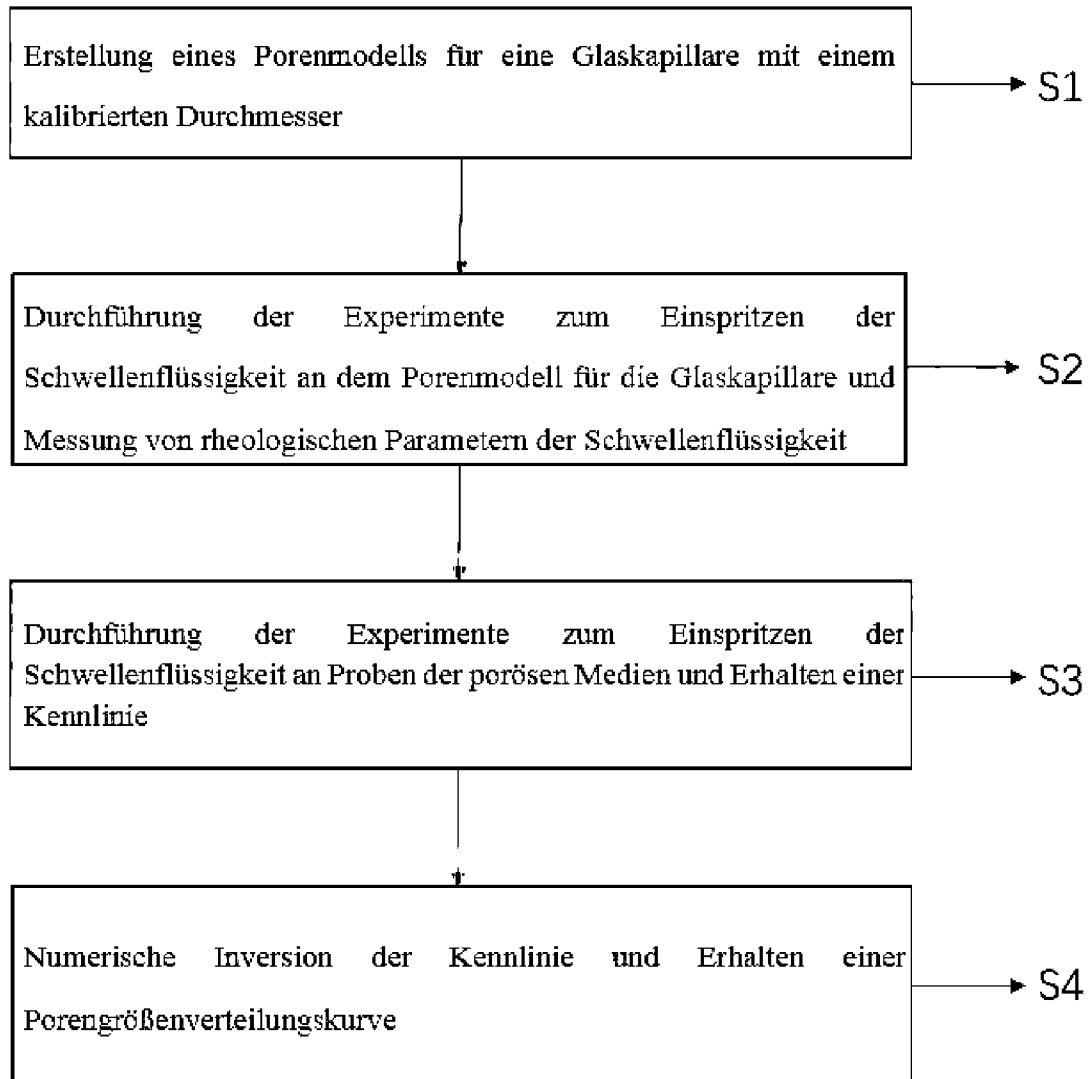


Fig. 7