



Doctoral Thesis

Experimental investigation of air injection in saturated unconsolidated porous media

Author(s):

Kong, Xiang-Zhao

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006246547> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 19084

Experimental investigation of air injection in saturated unconsolidated porous media

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
XIANG-ZHAO KONG
M.Eng., University of Science & Technology of China
born in July 6, 1979
citizen of Guangdong, China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Wolfgang Kinzelbach, examiner
Prof. Dr. Patrick Jenny, co-examiner
Prof. Dr. Fritz Stauffer, co-examiner

2010

Abstract

The work described in this thesis is primarily concerned with the construction and study of laboratory scale models for the process of air injection into liquid-saturated grain packing. Experiments, both in two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) setups, were carried out using water-saturated packings of glass beads and/or packings of crushed fused silica glass grains saturated with a glycerin-water solution. High resolution digital images of the invasion patterns were recorded and analyzed.

During air injection into a vertically-placed 2D glass bead packing saturated with water, three stages were identified, a tree-like pattern, a fluidized pattern, and a migrating single-channel pattern. The expansion of the tree-like pattern behaves in a diffusion-like manner as the air branches advance upward randomly, and finally reach a more or less constant width. The starting position of the fluidized pattern was quantitatively estimated via balancing the pressure forces between the effective stress due to the weight of the grains and the pressure resistance on the displaced fluid combined with the capillary pressure. Four dynamic regimes were distinguished: regime (i) where the fluidization stops somewhere between the top of the packing and the injection orifice, a transition regime (ii), regime (iii) where the fluidization reaches the injection orifice, and regime (iv) where the deformation of the packing appears as soon as the air is injected. A critical injection rate Q_f is defined to identify the transition regime. The value of Q_f can be determined via Q_a , where Q_a is calculated as averaged flux per channel. The regime (iv) is characterized by a characteristic injection rate Q_c , which is estimated by balancing the pressure gradient of the air flow and the overburden pressure gradient of the medium.

The phenomenon of the migrating channel is measured quantitatively in two parts, before and after breakthrough. Before breakthrough, the characteristic measurements concern maximum vertical advance, maximum horizontal advance, air volumetric fraction, ratio of total surface area to volume, specific surface area of the air phase, and box-counting dimension. After breakthrough, the characteristic measurements focus on mean horizontal position of air channel, horizontal shifting distance, lateral move-

ment distance, and lateral movement width. Before breakthrough, the maximum vertical height of the air structure approximately advances linearly with time. The maximum horizontal advance reaches a maximum value and then levels off for the rest of the time. Air volumetric fraction decreases monotonically with time, and finally levels off asymptotically to an approximate constant. In all cases, the air volumetric fraction for packings of small grains is larger than that for packings of large grains. The ratio of total surface area to volume varies in time similarly to the air volumetric fraction. However, the ratio of total surface area to volume can clearly be grouped according to the grain size, which is also true for the specific surface area of the air phase. Both can be scaled with the Bond number with a power of -0.5. After breakthrough, the migration process is studied by analyzing the mean horizontal position, horizontal shifting distance, lateral movement distance, and lateral movement width of the air channel. The results indicate that over 99% of the horizontal shifting distance is less than 10 mm. Furthermore, the its probability density function indicates that the air channel oscillates more frequently in the packing of small grains than in the packing of large grains.

The interaction of the air flow with the grains and the liquid leads to a mobilization of the grains, in which air channels migrate and grain clusters undergo shearing. The channel migration comes to a stop after some time, leaving one thin and stable preferential channel for air flow. Assuming Hagen-Poiseuille's formula to be applicable, the size of the preferential channel should exceed a lower threshold D_{ch} so that a mechanical equilibrium at the channel interface is maintained, but it should stay below an upper threshold D_{max} so that a stable air channel is sustained. A rearrangement of the grains is observed which is caused by a pulsation effect. It induces a compaction process, in which the individual grains are disassembled from the region of non-zero shear rate and then reassembled into the compacted clusters of the region of zero shear rate. It also induces a size segregation process, in which smaller grains move into the spaces beneath larger grains.

By using high-speed image acquisition through laser scanning, the 3D dynamic air plume is recorded by sequential tomographic imaging. Due to the overlap between adjacent laser sheets and the light reflection, air bubbles are multiply exposed in the imaging along the scanning direction. A "curvature" method, based on a threshold on the curvature of grey-value in scanning direction, is proposed to remove the redundant pixels. The respective results are discussed by comparing the reconstructed air plume volume with the injected one and by evaluating the morphological consistency of the obtained air plume. The reconstructed air plume is further investigated with respect to its growth characteristics, such as breakthrough, air volume fraction, and air channel migration.

Zusammenfassung

Die Doktorarbeit befasst sich mit der experimentellen Untersuchung von Prozessen, welche durch die Injektion von Luft in flüssigkeitsgesättigten Packungen von Körnern entstehen. Dazu wurden zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) experimentelle Anordnungen mit wassergesättigten Glaskugelpackungen sowie Packungen mit gebrochenem Silicaglas, gesättigt mit einer Glycerin-Wasser-Lösung entworfen und im Labor aufgebaut. Mit diesen wurden umfangreiche Experimente durchgeführt. Hochauflösende digitale Bilder der resultierenden Invasionsstrukturen (Luftschleier) wurden aufgenommen, registriert und analysiert.

Während der Luftinjektion in eine vertikale wassergesättigte 2D-Glaskugelpackung wurden drei typische Stadien identifiziert, eine baumähnliche Struktur, eine fluidisierte Struktur und eine Struktur mit einem wandernden Einzel-Luftkanal. Die Entwicklung der baumähnlichen Struktur verhält sich diffusionsähnlich durch zufälliges Wachstum der einzelnen Zweigkanäle und erreicht schliesslich eine mehr oder weniger konstante Breite. Die Startposition der fluidisierten Struktur wurde quantitativ abgeschätzt. Dazu wurden Druckkräfte und die effektiven Spannungen infolge Gravitation und Strömungswiderstand mit dem vorherrschenden Kapillardruck kombiniert und abgeschätzt. Vier dynamische Regimes wurden unterschieden: Regime (i) in welchem die Fluidisierung zwischen oberer Packungsbegrenzung und Injektionsdüse endet, ohne die Düse zu erreichen, ein Übergangsregime (ii), Regime (iii) in welchem die Fluidisierung die Injektionsdüse erreicht und Regime (iv) wo eine Deformation der Packung sofort erfolgt, sobald Luft injiziert wird. Eine kritische Injektionsrate Q_f wurde definiert, die das Übergangsregime charakterisiert. Der Wert von Q_f kann mit Hilfe der mittleren Luftströmungsrate pro Luftkanal, Q_a , bestimmt werden. Regime (iv) ist charakterisiert durch eine Injektionsrate Q_c , welche mit Hilfe des Druckgradienten der Luftströmung sowie dem Gradienten des Überlagerungsdrucks der Packung abgeschätzt wird.

Das Phänomen des wandernden Luftkanals wurde vor und nach dem Durchbruch der Luftströmung durch die Packung quantitativ untersucht. Vor dem Durchbruch sind die charakteristischen Grössen die maximale vertikale Höhe und die maximale horizontale

Ausdehnung des Luftkanals, der Luftanteil, das Verhältnis von Gesamtoberfläche zu Luftvolumen, die spezifische Oberfläche der Luftphase und die Box-Counting-Dimension. Nach dem Durchbruch sind die charakteristischen Größen die mittlere Position des Luftkanals, die horizontale Verschiebungsdistanz, die laterale Migrationslänge und die laterale Migrationsbreite. Vor dem Durchbruch wächst die maximale vertikale Höhe der Luftstruktur approximativ linear mit der Zeit. Die horizontale Ausdehnung erreicht einen maximalen Wert und pendelt sich für den Rest der Zeit auf einen etwa konstanten Wert ein. Der volumetrische Luftanteil nimmt monoton über die Zeit ab und erreicht asymptotisch approximativ eine Konstante. In allen Fällen ist der Luftanteil für Packungen mit kleinem Korndurchmesser grösser als für Packungen mit grossem Korndurchmesser. Das Verhältnis von Gesamtoberfläche zu Luftvolumen variiert über die Zeit ähnlich wie der volumetrische Luftanteil. Allerdings kann das Verhältnis der Gesamtoberfläche zum Volumen klar gemäss dem Korndurchmesser unterschieden werden. Dies trifft auch für die spezifische Oberfläche der Luftphase zu. Beide Größen können mit der Bond-Zahl mit einem Exponenten von -0.5 skaliert werden. Nach dem Durchbruch wurde der Migrationsprozess hinsichtlich der horizontalen Position, der horizontalen Verschiebungsdistanz, der lateralen Migrationslänge und der lateralen Migrationsbreite der Luftkanäle analysiert. Die Resultate deuten darauf hin, dass über 99% der horizontalen Verschiebungsdistanz kleiner als 10 mm sind. Weiter zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte, dass die Luftkanäle häufiger in Packungen mit kleinem Korndurchmesser oszillieren als in Packungen mit grossen Körnern.

Die Interaktion der Luftströmung mit den Körnern und der Flüssigkeit führt zu einer Mobilisierung der Körner in welcher die Luftkanäle und Korn-Cluster einer Scherung unterworfen sind. Die Migration der Kanäle kommt nach einiger Zeit zu einem Stillstand, wobei ein dünner und stabiler Luftkanal entsteht. Unter Annahme der Gültigkeit des Hagen-Poiseuille-Gesetzes wurde gezeigt, dass die Öffnungsweite des Luftkanals einen Schwellenwert D_{ch} überschreiten muss, damit ein mechanisches Gleichgewicht der Kanaloberfläche erreicht wird. Allerdings sollte sie unterhalb einer oberen Schranke D_{max} liegen, damit ein stabiler Kanal entsteht. Es wurde eine Neuordnung der Körner beobachtet, welche durch einen Pulsationseffekt ausgelöst wird. Dieser führt zu einer Kompaktion, bei der individuelle Körner aus Regionen mit Schergefälle herausgelöst werden und in eine kompakte Anordnung ohne Schergefälle integriert werden. Dies ist begleitet von einem Segregationsprozess, in welchem kleine Körner in Hohlräume unter grossen Körnern verlagert werden.

Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeits-Bilderfassung mit Laserabtastung wurde die 3D-Dynamik des Luftinjektionsschleiers durch sequentielle Bildtomographie erfasst. Infolge Überlagerung benachbarter Laser-Lichtebenen sowie durch Lichtreflexe werden

Luftblasen entlang der Abtastrichtung mehrfach beleuchtet. Eine Krümmungsmethode wurde vorgeschlagen, welche auf einem Schwellenwert der Krümmung der Kurve der Grauwerte in Abtastrichtung beruht, um überschüssige Pixel zu entfernen. Das erzielte Resultat wurde mit dem rekonstruierten Luftvolumen und dem injizierten Luftvolumen verglichen und diskutiert. Der rekonstruierte Luftschleier wurde weiter im Hinblick auf charakteristische Größen wie Durchbruch am oberen Ende der Packung, Luftvolumenanteil und Migration der Luftkanäle untersucht.