

多孔介质理论发展史上的重要成果

〔德〕 R. de Boer 著

刘占芳 严波 译

32

重庆大学出版社

本书出版得到国家自然科学基金的资助

多孔介质理论发展史上的重要成果

〔德〕 R. de Boer 著
刘占芳 严波 译

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书系统全面地介绍了多孔介质理论的历史发展,详细地讨论了多孔介质理论的各个重要阶段的重大成就。本书可供土力学、生物力学、石油勘探及材料科学等领域的工程技术人员、科研人员及高等院校有关专业的师生参考。

多孔介质理论发展史上的重要成果

[德] R. de Boer 著

刘占芳 严波 译

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学科技实业总公司南方印务分公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:5.5 字数:137千

1995年10月第1版 1995年10月第1次印刷

印数:1-1000

ISBN 7-5624-1143-3 /O·128 定价:19.60元

(川)新登字 020号

PREFACE

When at the beginnings of the 1980's, investigations of the porous media were commenced at Essen University, it was soon recognized from investigations of the literature that some existing theories were incomplete, unclear, and in parts even incorrect. Therefore a program was developed in order to establish a consistent macroscopic theory for the thermodynamical behavior of fluid-saturated porous solids. At first the program included two strategies.

The first strategy contained the creation of clear mechanical and thermodynamical concepts, as well as the consistent performing of the material independent fundamental relations of these media, i. e. , the kinematics of the deformations, the balance equations and the entropy inequality. It was revealed that only the mixture theory restricted by volume fraction concept would be the adequate basis, because only this theory proceeds from ensured principles of mechanics and thermodynamics and applies them under consideration of all coupling terms to the individual constituents as well as to the mixture body. During the last years it was recognized that with the introduction of the volume fraction concept the microscale is touched and therefore investigations on the microscale are in parts necessary. This had led to serious difficulties which, however, have been recently solved.

The second strategy pursued the development of consistent constitutive equations, particularly in the plastic range. In this range great difficulties arose in view of the description of the material behavior. The "natural" porous bodies like rock and soil as well as some "artificial" porous bodies like concrete and sintermetals consist of granular and brittle material. These materials, also called frictional materials show a great dependence of the material behavior on the hydrostatic pressure in the plastic range, contradictory to metallic materials. The influence of hydrostatic pressure causes various new effects which are unknown in the plastic range of ductile materials, and makes the development of a consistent plasticity theory very difficult. However, during the last years great progress has been made in this field.

In the course of preparation of both the strategies it was recognized that a third strategy is necessary, namely the investigation of the historical development of the porous media theory. The corresponding investigations are not interesting from the historical point of view. Rather it helps to recognize how scientists in the past treated problems in the complex porous media theory and shows a relationship between the modern theories and the other approaches. Efforts by the researchers in Essen to reveal the main streams in the historical development have been very successful. For example, the real originator of the porous media theory could be clarified.

In the present paper the highlights of the historical development of the porous media theory is summarized up to the current state where the latest findings of the Essen mechanics group, concerning a consistent macroscopic theory is discussed. However, due to space problems only the e-

lastic behaviour is discussed. This work should make it easy for the Chinese scientists, in particular for young researches, to find the right access to the complex porous media theory. It is also expected that in China this theory becomes (as a part of continuum mechanics) the basis for the description of the mechanical and thermodynamical behaviour of heterogeneously composed bodies.

The author is grateful to Dr. Zhanfang Liu for the translation of the English version of his treatise into the Chinese language.

Essen, August 1995

Prof. Dr.-Ing. Reint de Boer

序 言

从80年代初开始,我们在埃森大学开始进行多孔介质的研究。此后,在对文献的考察中发现一些现有理论不完整,概念不清,有些部分甚至是错误的。因此,我们开展的这个课题就是试图建立一个相容的宏观理论,以描述流体饱和的多孔固体的热力学行为。一开始该课题包括两个步骤。

第一个步骤包括建立清晰的力学和热力学概念以及这些介质的与材料无关的基本关系的一致性行为,即变形的运动学,平衡方程和熵不等式。从而揭示了只有体积分数概念约束下的混合物理论才能构成足够的基础,因为该理论是从确证的力学和热力学原理出发,并考虑了针对独立组分以及整个混合物的全部耦和项来加以运用的。在过去的几年里得到广泛认可的是利用体积分数概念触及微观领域的研究,并且正因为如此,微观领域的研究才部分地成为必要。然而,所导致的巨大困难最近才得到解决。

第二个步骤是发展相容的本构方程,尤其在塑性阶段。如果忆及对材料行为的描述,那么在塑性阶段会产生巨大的困难。象岩石和土这样的天然多孔体以及诸如混凝土和烧结金属这样的人造多孔体都是由粒状和脆性材料所组成。这些也称作摩擦材料的材料在塑性阶段其材料行为对于静水压力呈现着强烈的依赖性,这点恰与金属类材料相反。在延性材料的塑性阶段,由静水压力引起的各种新的效应尚属未知,并使得发展一个相容塑性理论变得困难。然而,在过去的几年里该领域已取得很大的进展。

在上述两个步骤实施过程中,我们认识到有必要开展第三个步骤,即对多孔介质理论发展史的研究。以历史的观点看,这种研究并不能激发人们的兴趣。但是它能够帮助人们认识过去的科学家是怎样处理复杂的多孔介质理论中的问题的,并且有助于澄清现代理论和其他方法之间的关系。埃森大学的研究人员所作的努力成功地揭示出多孔介质理论发展史上的主流。例如,这种努力揭示出谁是多孔介质理论最初的开拓者。

本书总结了多孔介质理论发展史上的重要成果,包括埃森大学力学研究小组最近关于一个相容宏观理论的发现。但限于篇幅,这里只讨论了材料的弹性行为。这个工作会使中国学者,尤其是对年青的学者更容易遵循正确的途径去深入探求复杂的多孔介质理论。我们同时也期盼该理论(作为连续介质力学的一部分)在中国成为描述非均质体的力学和热力学行为的一个基础。

本书作者感谢刘占芳博士将本书的英文版译成中文。

Reint de Boer 教授,工程博士
1995年8月于埃森

提 要

对多孔介质理论最初的贡献是在 1794 年由 R. Woltman 做出的,他较之于 Coulomb 更缜密并且独立发展了土压力理论,而且令人吃惊地在另外一篇文稿中引入了体积分数的概念。在上一世纪,更重要的贡献来自于 A. Delesse, A. Fick, H. Darcy 以及 J. Stefan 关于表面分数的概念、扩散问题、地下水流动和混合物理论等的讨论,这些都是多孔介质理论的基本部分。

在 20 世纪, P. Fillunger 于 1913 年发表的一篇关于饱和刚性多孔固体中扬压力问题的文章开启了多孔介质理论的科学讨论。在接下来的论文中,他研究了摩擦和毛细力效应,发现了有效应力效应。在 1923 年,现代土力学的奠基人 von Terzaghi 在计算粘土渗透系数的框架内开始了对饱和的可变形多孔固体的研究。1936 年 P. Fillunger 建立了液饱和的可变形多孔固体的力学理论的概念。然而,他的杰出工作完全被遗忘和忽视了。其原因在于 P. Fillunger 和 K. von Terzaghi 对多孔介质理论和土力学不同的科学观点导致的本世纪 30 年代期间深深的敌意所造成的,并由此导致了一场以悲剧而告终的巨大争论。

在以后的数十年间, M. Biot, G. Heinrich 和 I. Frenkel 继承发展了 K. von Terzaghi 和 P. Fillunger 的研究工作。

今天,宏观多孔介质理论的两个重要方向已经得到广泛认同。其一是基于 M. Biot 的研究工作,其二源于混合物理论,而后者受到体积分数概念的约束(多孔介质理论)。特别地,多孔介质理论构成了处理饱和或空的多孔固体的一个有效工具。

目 录

1. 引 言	1
2. 早 期	2
2.1 Woltman 对多孔介质理论的贡献	2
2.2 基本定律的发现(Delesse, Fick, Darcy)	6
2.3 混合物理论基础	8
3. 经典时期	11
3.1 液饱和刚性多孔固体的基本效应的发现	11
3.2 von Terzaghi 关于液饱和和变形多孔固体的研究	16
3.3 Fillunger 为现代多孔介质理论奠定的基础	19
3.4 两位维也纳教授 Fillunger 和 von Terzaghi 之间的悲剧性争论	21
3.5 维也纳事件和土力学的进一步发展	29
3.6 von Terzaghi 和 Fillunger 的继承者: Biot, Heinrich 和 Frenkel	38
4. 现代理论	50
4.1 非混溶的混合物理论	51
4.2 多孔介质理论的现状	57
5. 结 束 语	70
致 谢	71
参考文献	72

1. 引言

一般地,许多固体呈现着一种内部结构。一方面,这是由于有些固体是由不同的固体组分所构成,例如无空隙的密实的混凝土。另一方面,固体又可含有封闭的或者张开的空隙,例如陶瓷和土以及混凝土。过去这些材料一般都作为没有内部结构的单一组分材料来处理。利用这样一个理想材料组成的模型,经典的连续介质力学已获得巨大的成功。所定义的所有力学量,例如应力,都作为统计平均量。因此经典连续介质力学自然不能回答液饱和和多孔固体中孔隙的变化和不同相的不同运动。

因为所有的混凝土组分变形时只有一种运动,因此具有空的孔隙空间的诸如混凝土这样的材料可相对简单地进行处理。然而,如果多孔固体的孔隙充满了液体,例如土或混凝土,情况将变得更为复杂。这种情况下,固体和液体具有不同的运动,并且由于这些不同的运动和不同的材料特性,组分会发生相互作用。这使得对其力学或热力学特性的描述变得困难。不仅如此,问题之所以变得复杂还由于一般而言,材料内部的孔隙结构呈现着复杂的几何特性。采用两种不同的方式来解决饱和和多孔介质这样的复杂问题似乎是可能的。第一种方式可作为该问题的精确解。为此,必须用 Euler 分割原理(Cut Principle)分离组分。然后对分离的组分应用力学和热力学原理并考虑所有的初边值条件。对某些特殊情况这种方法由于复杂的内部孔隙结构而变得完全不适合。同时,对许多工程问题而言,这种方法也完全不必要,因为这些工程问题需要对物理现象的宏观描述而不是微观水平上的描述。例如,为了描述渗流,设计工程师并不着眼于多孔土体的单个孔隙中的水的真实流速;他所需要的是渗流速度,即全部孔隙中的水流的平均速度。因此,它取决于该问题是在微观还是在宏观范围内进行研究,宏观范围意指把全部在微观范围定义和测量的量都作为统计平均值。

上面的考察表明需要第二种方法,即问题的宏观描述。因此,可以方便地通过一个具有内部作用的非均匀介质构成的替代模型来描述液饱和和多孔介质。这种方法涉及到体积分数的概念以使固体骨架和孔隙中的液体质量分布到全部控制空间。这种分布是借助于某一组分的体积占全部控制空间体积的体积孔隙数达到的。这种方法假定孔隙是统计地分布到控制空间。在这种情况下,作为统计上的必要性,体积孔隙比和表面孔隙比是相等的。体积分数的概念具有下列效应,即模糊化了的替代介质使固、液相的密度变小,并同时充满整个控制空间,因而可用连续介质力学的方法加以处理。显然这种处理同混合物理论的刻划方法是一致的,因为在混合物理论中,混合物的各个组分也覆盖了全部控制空间。在过去的几十年里,混合物理论已经获得了具有坚实基础的许多结论。因此,描述具有各自自由度的不同组分构成的混合物的连续介质理论,就可以作为一个坚实的基础来处理液饱和和多孔固体的力学和热力学行为。然而必须指出的是,原则上,混合物理论的假定,例如所有的组分在控制空间上的完全混合,对于真实的饱和和多孔固体骨架是不成立的,因为固、液相本质上是不相混溶的。故上面提到的第二种方法不是解决真实的问题,而是解决了替代连续介质模型的问题。

体积分数概念约束下的混合物理论(多孔介质理论)构成了处理液饱和和多孔固体的最相容的发展框架。其他的方法往往基于很模糊的假定。可是,多孔介质理论极其复杂,迄今并非所有的问题都已经得到了解决。

为了更好地理解象多孔介质理论这样复杂的理论,对其历史发展的研究是极有裨益的。一方面,它揭示了几乎完全被遗忘和忽视了的极有价值的贡献。另一方面,澄清了饱和和多孔固体的特性,

而这些问题在更早的文献中曾经被处理过。但是不能就此宣称关于多孔介质理论的历史背景的研究是完美无缺的,它更侧重于过去所取得的重要成果,而这些重要成果决定了多孔介质的历史发展,有时甚至介入了个人间的冲突,例如,本世纪三十年代维也纳的教授 P. Fillunger 和 K. Von Terzaghi 之间的争论。

在多孔介质理论整个发展史上,有三个主要的阶段。在十八世纪和十九世纪的初期,表述了体积分数的概念,发现了一些基本定律并建立了混合物理论。在 1910 年至 1960 年,最初的努力试图澄清液体、气体和刚性多孔固体间的相互作用力,并且第一次研究了可变形的饱和多孔固体。在七十年代和八十年代开展了对不相混溶的混合物理论的研究,并且这种研究一直持续到今天。按着这样的发展过程,我们追溯其中的重要成就。本书作者正在准备另外一本书,将对多孔介质理论的发展史提供更广阔的视角。

在本书关于多孔介质理论的现状一节中,我们讨论了多孔介质理论一些最新的发现。

本书中的许多引证来自于德文,这些引证的译文将紧随在德文之后(本书略去德文引证,译者)。

2. 早 期

早在力学基础理论出现的初期,多孔固体就为科学家们所认识。正是杰出的 Leonhard Euler 在“Lettres a une Princesse d'Allemagne”(Euler, 1768)中描述了多孔体。他还在另外一书中提到这种介质。在他去世后出版的《自然科学指南》(Euler, 1762)一书中,Euler 清楚地定义了什么是孔隙,明确区分了开孔和闭孔。然而 Euler 没有进一步发表其它关于多孔介质理论的文章。之后,其他工程师和科学家们在描述多孔结构和空的多孔固体的力学性质方面取得了巨大的进展。

2.1 Woltman 对多孔介质理论的贡献

一位出色的工程师和科学家,来自汉堡的港口建设指挥,Reinhard Woltman(1757—1837)对多孔介质理论作出了卓越的贡献,但这在过去没有引起人们的注意。在他 1791 到 1799 年间所著的四卷书《水工建筑》中,他介绍了他关于土力学的观点,并在第三卷(Woltman, 1794)中论述了对多孔体的观点。

Woltman 首先将土分为四种:砂、石灰、粘土和灰泥。他指出各种土中的摩擦相同,这使土有别于流体。土仅在含有饱和水的情况下,摩擦现象才消失。在这种情况下,Woltman 把这些混合物称为流砂、漂流砂、泥、泥炭或泥沼。此外,他认为土是不可压缩的,并指出这种特性在砂中尤其突出。Woltman 认为粘结力是由于“混有水份”的结果。

Woltman 接着开始从事土压力问题的研究。他转入这一问题的原因是圣彼得堡皇家科学院的一次竞赛,Woltman 在他的著作(Woltman, 1794)中的第一段这样写道:

“我从 1791 年 4 月 30 日的‘Göttingischen gelehrten Anzeigen’上得知有奖竞赛,上面这样写道‘1792 年帝国科学院希望获得比迄今为止关于档土墙土压力的更完善的理论。应注意,理论基础应更多地从物理观点出发;同样欢迎有关土的粘性和湿度、建筑结构材料的结合力和强度等方面的成果。对此,只要可能,就应该做实验,就应该将对实际的描述(已经存在的或已被做的)给以公式化,由此提出与自然现象更加吻合的假设’”。

在那段时间, Woltman 努力地对该问题进行研究并发展了土压力理论, 但由于邮资太贵, 他没有将成果寄去圣彼得堡。

在该书的引述之后, Woltman 列出了他的土压力理论的条件:

“土压力是通过观察受压物的四种不同状态进行考察的:

1. 干燥且松散状态, 如流砂和尘土——谷物和种子也可归于此类;
2. 湿润且松散状态, 如坑土和矿土;
3. 潮湿(含有饱和水)状态, 如漂流砂, 泥土和沼泽土;
4. 坚硬状态, 如硬粘土。”

之后, Woltman(1794)根据 B. F. De Belidor(1697—1761)和他非常崇拜的枢密院官员、哥廷根大学的教授 Kästner(1719—1800)的理论讨论了土压力的计算。并接着讨论了作用在土粒上的力。下面一段话中, Woltman 引入了一个土力学中非常重要的用于计算破坏条件的概念, 即内摩擦角(在下面的公式中 $\frac{1}{n}p$ 是摩擦力):



图 2.1 Woltman《水工建筑》一书

“如果一个颗粒仅凭借摩擦力静止在一倾斜的平面上, 让摩擦力逐渐增加, 即让倾角 β 逐渐增大, 直到颗粒开始向下滑落, 则在滑落前的那一瞬间颗粒处于平衡: $p \sin \beta = \frac{1}{n} p \cos \beta$, 所以 $\frac{1}{n} = \tan \beta$, 我将据此对摩擦力进行描述。如果有一个物体, 其重量 $= p$, 摩擦力 $= f$, 静止在一倾斜的平面上, 那么有关系: $p:f = 1:\tan \beta$ 。”在讨论关于泥的力学行为时, Woltman 提到了混合物(图 2.3), 并令人吃惊地引入了体积分数概念。他也许是第一个表达这一概念的科学家:

“我们假设松散土粒间的充满水的空隙空间与土的总体积有关系: r : 1, 这里 r 是一个适当的比值。

用 P 表示松散土的重量, p 表示水的重量, v 表土的体积, u 为加入的水的体积, 那么混合物的重量为 $vP + up$, 体积为 $v + u - rv$, 因而, 泥的重量为 $\frac{vP + up}{v + u - rv}$ 。如果松散土中含的水

Zusatz. Wenn das Theilchen bloß vermöge der Friction auf der geneigten Ebene ruht, und man diese allmählich erhöht; β größer nimmt; so lange, bis das Theilchen beginnt herab zu fallen: so ist für das letzte Gleichgewicht $p \sin \beta = \frac{1}{n} p \cos \beta$; also $\frac{1}{n} = \tan \beta$; und so werde ich im folgenden die Friction ausdrücken. Nämlich wenn ein Körper dessen Gewicht $= p$ und Friction $= f$ auf der geneigten Ebene ruht, so verhält sich $p:f = 1:\tan \beta$.

图 2.2 Woltman 引入的内摩擦角

份的体积和它们之间的空隙空间相等, 那么 $u = rv$, 则泥的比重 $= (vP + up)/v = v(P + rp)/v = P + rp$ 为最大。然而, 如果加入的水多于土粒间的空间所能容纳的量, 即 $u > rv$, 那么泥的重量在 $P > p$ 时变得更轻, 在 $P = p$ 时不变, 在 $P < p$ 时变得更重。后者仅对沼泽土或泥炭似的沃土才会出现, 我随后将增加一表格, 以使这里的表述更明晰。”显然, Woltman 没有继续他的关于多孔体的研究。在他的论文中没有任何迹象表明在以后的工作中再涉及到水饱和和多孔固体。

传记要点

Reinhard Woltman (1757–1837)

Reinhard Woltman 是一个农民的儿子, 1757 年出生在德国的 Axstedt, 也即当时属于不来梅的 Dukedom。他是十八世纪工程界最引人注目的人物之一。他在贫困中长大, 勤奋的工作使他获得丰富的知识, 并成为当地的一名教师。然而, 没过多久他向 Ritzebüttel (现属库克斯港口) 的汉堡区申请一领班和职员职位。

1779 年 5 月 14 日, 由议员、海军部和财政部的代表以及海运界人士组成的防堤代表团表决同意了他的申请。对于他的一生, 到汉堡议会工作是决定性的一步, 因为其在 Ritzebüttel 的地位具有重要的作用。

Woltman 开始为防堤会工作, 此时防堤会的主席是 Syndic Jacob

Schuback (1728–1784), 而他的直接上司是 V. Grumkow 和 H. Zitting。后者是第一个发现并赏识 Woltman 才干的人。Woltman 对知识的渴望和孜孜不倦的勤奋使他获得了在大学学习数学和防



图 2.4 Reinhard Woltman

Wir wollen annehmen, daß die leeren Zwischenräume der lockern Erde, welche das Wasser anfüllt, sich zu dem ganzen Volumen derselben Erde wie $r:1$ verhalte, wo denn r ein eigentlicher Bruch seyn wird. Das Gewicht der lockern Erde P ; des Wassers p , das Volumen der Erde v ; des bethgemischten Wasser u , so ist das Gewicht der Mischung $vP \mp up$; und dessen Volumen $v \mp u - rv$; also die spezifische Schwere des Schlammes $= \frac{vP \mp up}{v \mp u - rv}$. Wenn der Schlamm nicht mehr Wasser enthält als die Zwischenräume der lockern Erde fassen können, so ist $u = rv$, und die Schwere des Schlammes $= \frac{vP \mp up}{v} = \frac{v(P \mp rp)}{v} = P \mp rp$ und am größten. Wird aber mehr Wasser zugemischt als die Zwischenräume enthalten können, $u > rv$, so wird der Schlamm leichter wenn $P > p$; bleibe unverändert wenn $P = p$; wird schwerer wenn $P < p$. Welches letztere nur bey Moor oder Torferde statt haben kann; ich werde bald eine Tafel befügen, die hierüber noch mehr sieht geben wird.

图 2.3 Woltman 表达的体积分数概念

堤建筑所必须的知识。他的上司们在各方面给他以鼓励。其间, 委员会的成员们, 特别是委员会的主席都了解了 Woltman。根据 Syndic Schuback 的推荐, 议员和当地名人同意了 Woltman 本人的要求, 使他得以深造。他们的条件是 Woltman 完成学业后, 应首先为汉堡服务。

1780 年复活节前, Woltman 进入高中学习, 之后他又进入 Kiel 大学听由 Johann Nicolaus Tentens 教授讲授的课程。Tentens 教授是当时德国唯一用科学方法从事防堤建筑的教授。在此期间, Woltman 还有机会参加了实际工作。

1782 年圣诞节期间, Woltman 的上司 H. Zitting 的职位成了空缺, 1783 年 4 月 25 日, 委员会打算让 Woltman 成为 Zitting 的继承人。Syndic Schuback 支持 Woltman, 他让委员会委任 Woltman 承担这一职位。正在这时, Woltman 要求离开汉堡继续他的学业, 并作一次学术旅行, 委员会不仅同意他带全薪离开一

年半时间,并且在他旅行过程中还每月向他提供补贴。Woltman 在 Kiel 停留了一段时间,之后在哥廷根学习了一个月(在哥廷根他极有可能听枢密院官员、数学物理教授 A. G. Kästner 的课程,从而丰富了他的数学知识)。1784 年复活节,Woltman 离开了哥廷根,他在《水工建筑的贡献》的第三卷详细描述了他该次旅行的各个停留地点,并对防堤建筑问题和防堤结构作了详尽的阐述。在书中他的文学天才得到了充分发挥。经过卡塞尔,马尔堡,吉森和美茵河畔法兰克福,斯特拉斯堡(一个当时有 48,000 居民的城市)最终到达巴黎,这是他第一次到达的最远的地方。他详细描绘了这座壮丽的城市,特别留意名胜点如卢浮宫和歌剧院。同时,他也为那些肮脏的街道感到震惊。Woltman 在巴黎还得到名人的支持,如皇家大臣 Chev de Viviers。他甚至被邀请到凡尔赛宫。他用流畅的文笔描写了宫殿的大厅和花园以及他所见到的宫廷生活。

Woltman 从条件恶劣的加来港经过多佛前往伦敦。作为一名水力学专家,泰晤士河上的桥梁给他留下了深刻的印象:“这座桥如此庞大牢固,它们似乎要永存在那里”。

为了认真地学习,Woltman 在荷兰停留了较长的时间,他经过弗里斯兰,奥尔登堡和不来梅,于 1784 年 11 月 20 日返回 Ritzbüttel 就职。

直到 1810 年,Woltman 一直在那里发展他的实践、科学和文学方面的才能。

Woltman 的杰出之处不仅在于他能认识到什么在技术上是正确的,而且在于他能清楚地向代表团表达他的思想,并促成他们在政治决策过程中采纳他的想法,而不考虑费用问题。

他的名望同样建立在他在公职中所取得的巨大成功。得到科学界的认同使他名声大噪。这特别归功于他的四卷书集《水工建筑》。事实上该书的第一卷就使他在科学界出了名,该卷涉及了海洋防堤经济学和堤坝加固方面的问题,该书同样具有文学价值。1792 年,他成为了 Harlem 的荷兰科学学会会员和鹿特丹的实验哲学学会会员。此外,布拉格皇家科学学会授予他会员资格。哥廷根皇家科学学会于 1793 年接收他为通讯会员。与学术界的频繁接触使他希望改变他的建设指挥头衔,这个头衔在外界看来不那么显赫。委员会考虑了他的要求,并同意授予他为易北港湾 Ritzbüttel 区“岸口及水力建设代表”。

其间,Woltman 的成功使他飞黄腾达。1792 年 8 月,Woltman 接到任命他为奥尔登堡的 Dukedom 区作为 dike-reeve(负责堤坝的官员)的重要职位,该职位奉禄丰厚,但是 Woltman 决心不离开汉堡,在那年他两次视察汉堡所有的防堤,并写了这些防堤状况的报告。

Woltman 很晚才成家。1797 年 10 月 1 日,他娶了他的第一位资助人 Syndic Jacob Schuback 的女儿 Johanna Elisabeth Schuback,他们生了五个孩子。

尽管工作繁重,Woltman 仍然挤出时间完成他的文学作品。值得一提的是,他写出了所建水力工程状况的报告,出版了航行手册,参加河道疏浚。为此,议会为表达敬重而向他授予了荣誉奖。1836 年 10 月 27 日,Woltman 光荣退休,并享受全薪。他于 1837 年 4 月 20 去世。

德国北方的家乡、父辈的贫穷以及后来汉堡的社会造就了 Woltman 的性格。他在整个一生中保持着北德人的品性,他坚强、开朗而又诚实。当他认识到某问题是正确的,他的秉直性格使他能对其给以有力的解释。为了从汉堡地方议会获得在 Ritzbüttel 修建防堤的经费,他曾作过不懈的努力。他对待同事和上级坦荡而又诚实,因而受到人们的爱戴和信任。由于得到热情的支持,他在汉堡地区完成了几项防堤工程,如我们所见,他的上级们在各方面给予他支持,这使他后来感激不尽。他得到了很好的安置,这使他在是否接受奥尔登堡的 Dukedom 的 dike-reeve 职位时犹豫不决。除此之外,他非常勤俭。这就是为什么他没有通过较昂贵的邮政方式将他的关于土压力理论的稿子按时寄到圣彼得堡的原因。

事实上,Woltman 非常爱整洁。这一点可以从他对旅行的细心描写和对工程问题(尤其是防堤

建筑)的处理方式上看出。他将他的工作建立在仅有的几条原则上,这些原则他坚信不移,从不偏离。这种品质给他的科学工作带来很大的益处。他具有非凡的观察能力和抽象能力,他能将被观察的事物进行有效的归纳并从中得出结论,然后将它们纳入他的理论中。

他的科学工作使他的名声远远超出了汉堡地区,尽管他名扬四方,却永远保持着谦逊的美德。

他的政见在各个方面都持保守态度,并对官方深信不疑。尽管他到过许多地方,使他有可能会接触到除 Ritzbüttel 之外的各种社会体制,从某种意义上,他成为了一个世界主义者,然而他对政治条件和社会体制的见解却一直保持着单纯。

2.2 基本定律的发现(Delesse, Fick, Darcy)

在十九世纪中期,还没有混合物理理论和多孔介质理论。事实上,自 Woltman(1794)提出体积分数概念之后,没有见到对非均质体理论有实质性贡献的工作。然而,大约在十九世纪中叶,混合物理理论和多孔体理论取得了一些重要的成果,这归功于 Delesse, Fick 和 Darcy。

Delesse 定律

Woltman(1794)提出的体积分数概念将液饱和和多孔介质的各单独组分的体积元与整体的体积元联系起来。如后来人们所认识到的,利用这一概念,在早期的力学史上已向着多孔介质理论的发展迈出了重要的一步。用体积分数的概念,人们可以将非均质体用连续介质力学的方法来处理。然而,对于某些目的,有必要发展一个适合于液饱和和多孔介质表面元的相应概念。为建立这样一种概念,采矿工程师 Delesse(1848)做出了一决定性的贡献。尽管他所研究的是另一个截然不同的问题,然而他却成功地证明了在一定的条件下,物体的表面分数等于它们的体积分数。作为一名采矿工程师,他所关心的是怎样确定单个的矿物质在一石块中所占的比例。他指出,仅认识单个的矿物质并不够,需要知道这些矿物质在整体中所占的比例。他曾抱怨,根据他的实验,要确定这种体积分数几乎不可能。他期待一种在不破损石块的情况下确定单个矿物质比例的方法,后来经过一些理论分析之后,他得到了表面分数等于体积分数的结论。

Delesse 的结论在本世纪上半叶的多孔介质理论的最初的发展中起到了重要作用。尽管 Delesse 的这一结论必须被视为是统计上的结果(见 von Terzaghi, 1934),后来该领域中所有权威性的研究工作者,如 Fillunger(1913, 1935a), von Terzaghi(1934)以及 Heinrich 和 Desoyer(1935)都提到了 Delesse(1848)的这个基本结论。

Fick 定律

发展混合物的现象学理论的最初尝试是 Fick(1885)完成的,他研究混合物中的扩散问题。作为一名物理学家, Fick 受到通过膜的水扩散问题的启发。他指出这一问题不仅对有机生命重要,而且对一个非常有趣的物理过程同样重要。他声称当时仅见到四篇有关工作的文献。仅取得如此小的进展的原因可能是在该领域中进行定量测试存在极大的困难。事实上,尽管作了巨大的努力, Fick 也未能成功地阐明这些理论的论点。他发表了根据他的新的测试结果的发现,并强调某些力学方面的问题,即经过多孔体的实际扩散和一可溶物体在溶剂中简单膨胀的关系。Fick 指出,最后提到的那种现象被另一作者在一长篇文献中进行了研究,其中包括很多定性和定量实验的观察测试。然而整个观察不是建立在对基本过程的观察之上。因此, Fick 决意再次研究没有多孔膜的混合物的简单扩散问题,以找到基本定律,而这个基本定律必须满足层与层间的基本扩散过程。

后来 Fick 详细讨论了分子运动,但在这方面的的工作有些含糊不清。他指出,一般而言,两个截然不同的分子间的引力比相同分子间的引力更大。

根据热传导的 Fourier 方程,Fick(1855)得到了扩散流的偏微分方程:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -k \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dx} \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (2.2.1)$$

这里 y 是集度, t 是时间, k 是一取决于组分特性的常数, x 是容器高度的度量, Q 是容器的截面积。Fick(1855)指出,在容器为等截面的情况下,上述微分方程可简化为:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -k \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (2.2.2)$$

现在这个关系被称为 Fick 第二扩散定律。Fick 的文章中未曾提到关于扩散流矢量的本构方程,即 Fick 第一定律。

在该篇论文的其余部分,Fick 通过实验证明了他的关于扩散过程的基本定律。

Darcy 定律

Darcy(1856)通过对天然砂的实验,观测了流过砂的水的总体积比及压力的减小。尽管他的观察基于纯碎的实验方法,但他所获得的结果对多孔固体中流体运动的连续介质力学处理方法是极其重要的。在 Darcy(1856)的论文中,多相连续介质中不同组分间的相互作用问题首次得到研究,他采用的模型包含一刚性多孔固体和一运动中的流体。现在,Darcy 定律已在热力学约束条件下通过理论完善地建立起来。然而,Darcy 定律在液体高速运动或在气体极低速和极高速的情况下并不成立。

虽然 Delesse(1848),Fick(1855)和 Darcy(1856)或多或少通过启发式的研究,而不是从力学和热力学的基本关系出发发展了他们的定律,但是,他们的重要观点对后来出现的混合物理论和多孔介质理论中是有用的。

传记要点

关于前述的 Delesse, Fick 和 Darcy 三位科学家的情况知道的较少,以下内容摘自百科全书。

Achille Ernest Delesse(1817—1881)

Achille Ernest Delesse 1817 年 2 月 3 日出生于梅斯,学习采矿学和地质学。他在 Sorbonne 被授予教授头衔。后来在 Ecole des 采矿公司获得一职位。最后成为法国全国采矿联合会主席。当时,他是著名的采矿工程师,为了纪念他,矿物 Delessit 以他的名字命名。Delesse 于 1881 年 3 月 24 日在巴黎去世。

Adolph Fick(1829—1901)

Adolph Fick 于 1829 年 9 月 3 日生于德国的卡塞尔。早年于马尔堡学习数学。他与生理学家 Carl Ludwig 之间的友谊使他转而学医。当时 Carl Ludwig 是由 Adolph Fick 的长兄领导的解剖学院的一名编外讲师。



图 2.5 Adolph Fick

在马尔堡有所发展之后,他跟随 Carl Ludwig 于 1852 年到了苏黎世。这里有两名著名的科学家,一个是 E. Du Bois-Reymond, Fick 1849 年在柏林时听过他的课,另一个是 Y. Moleschott. Fick 成为了那个被物理学家和数学家主宰的研究方向中杰出的生理学家之一。这个研究方向为后来生理学中的几乎所有的进展提供了方法论的基础。E. Du Bois-Reymonds 暗示 Fick 研究扩散问题。Fick 在苏黎世于 1855 年成为教授,于 1862 年成为全职生理学教授。他从事医学中各种不同问题的物理化学基础研究。另外,他还证明了热力学两个定律对肌肉收缩问题的有效性,并认识到:肌肉中化学能可直接转换为机械能,而不是通过热的间接转换。

1868 年他在维尔茨堡大学被授予教授职称,并在那里一直工作到 1899 年。

Adolph Fick 于 1901 年 8 月 21 日在布兰肯堡(西佛兰德)去世。

Henri-Philibert Darcy(1803-1852)

Henri-philibert Darcy 1803 年生于第戎。他在理工学院毕业后于 1823 年进入 Corps des Ponts et chaussées 学习工程学,1828 年成为一名工程师。在 Jura 度过短暂的假期之后,他被召到第戎作一名土木工程师。他在 Saone 河上修建了两座大桥。另外,他于 1824 年为第戎设计了饮用水工程,之后便从事该项工程的建设工作。1840 年,作为 Coted'Or 的总工程师,他被指派考察巴黎到里昂的铁路。他对在大城市中铺设道路而困惑。为了解决这一问题,他于 1850 年被送到伦敦学习英国工程师们是怎样解决这一问题的。回来之后,他发表了一篇报告,比较了伦敦和巴黎的道路建设。1850 年他因健康方面的原因请求退休。1852 年 1 月 3 日在巴黎去世。

2.3 混合物理论基础

在十九世纪一个新的力学分支开始发展,它对一个相容多孔介质理论的创立具有极其重要的作用,此即混合物理论的创立。正如我们已看到的,是 Fick(1855)发现了描述具有不同集度的液体扩散问题的微分方程。然而,Fick 没有从严格的力学原理出发,而是从描述热传导的 Fourier 方程出发,通过比拟的方法导出他的微分方程。

Maxwell(见 Stefan, 1871)则用一个完全不同的方法研究了气体的扩散问题。Stefan 声称,Maxwell 是第一个从基本力学原理出发导出气体混合物热力学方程的科学家。他的研究最终导致了运动气体理论的诞生。

对发展混合物连续介质理论决定性的一步,是由 Stefan(1871)完成的,他清楚地阐述到:

“如果要计算混合物中的真实过程,仅象一般力学那样将混合物视为一均匀物体是不够的;必须对混合物中的每一个组分建立包括平衡条件和运动定律的方程组。

特别地,这适用于能相互渗透的所有气体。气体混合物的平衡方程和运动方程的建立、将这些方程应用于气体扩散现象的计算以及这些计算与实验结果的比较是本论文的主题。”

接着,他引入了考虑各组分间相互作用时的主要假设:

“在混合物中,每一种气体的每个粒子如果处于运动之中,都受到其它气体每一个粒子的阻力作用,这个阻力与这种气体的密度和两者间的相对速度成正比。”

此后,Stefan(1871)写出了平衡方程和运动方程。对一两相气体的混合物,他得到了对该两相气体 1 和 2 在 x 方向的两个运动方程:

$$\begin{aligned}\rho_1 \xi_1 &= \rho_1 X_1 - \frac{dp_1}{dx} - A_{12} \rho_1 \rho_2 (u_1 - u_2), \\ \rho_2 \xi_2 &= \rho_2 X_2 - \frac{dp_2}{dx} - A_{21} \rho_1 \rho_2 (u_2 - u_1),\end{aligned}\tag{2.3.1}$$

这里 ξ 是加速度, ρ 是密度, X 是一外部加速度, p 是压力, u 是速度, $A_{12}=A_{21}$ 是与材料有关的常数。Stefan 还指出, 上述两个方程形式上与 Maxwell 在他的气体理论得到的方程相一致。

接着, Stefan 写出了在排除任何质量交换的情况下, 第一种气体的质量平衡方程:

$$\frac{d\rho_1}{dt} + \frac{d(\rho_1 u_1)}{dx} + \frac{d(\rho_1 v_1)}{dy} + \frac{d(\rho_1 w_1)}{dz} = 0, \quad (2.3.2)$$

这里 u_1, v_1, w_1 是第一种气体在 x, y, z 方向的速度分量, 他指出对第二, 第三... 等各种气体有相似的方程成立。

利用上述关系, 可以得到适用于气体混合物的流体动力学方程。

在进一步考察阻力之后, Stefan 指出, 对于阻力的这些关系式, 不仅适用于气体, 同样适用于液体和导体中的电子。

Stefan 将他的基本方程 (2.3.1) 和 (2.3.2) 应用到两相气体混合物的扩散问题中。他考虑了具有相同压力的两种气体, 这两种气体在实验开始时在一根管子中被隔开, 然后让其自由渗透。

他假定不存在体积力, 两气相的压力与位置和时间有关。混合物作为整体处于静止之中。因为扩散过程很慢他还忽略了各个组分的加速度。

利用这些假设和简化, Stefan 将方程 (2.3.1) 简化为:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dx} + A_{12}\rho_1\rho_2(u_1 - u_2) &= 0, \\ \frac{dp_2}{dx} + A_{21}\rho_1\rho_2(u_2 - u_1) &= 0, \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

对这组关系式, 必须加上质量平衡方程:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_1}{dt} + \frac{d(\rho_1 u_1)}{dx} &= 0, \\ \frac{d\rho_2}{dt} + \frac{d(\rho_2 u_2)}{dx} &= 0, \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

气体的运动仅沿平行于管道轴线方向, 即 x 方向。

这里假设气体的运动仅沿平行于管道轴线方向, 即 x 方向。为了进一步讨论, 将密度用 d_1 和 d_2 来代替会更方便, 令两相气体在 0°C 大气压下的密度分别为 d_1 和 d_2 , 再将在冰点 0°C 的绝对温度用 T_0 表示, 而两相气体的绝对温度为 T ; 根据 Mariotte 和 Gay-Lussac 定律, 可得如下关系:

$$\rho_1 = d_1 \frac{T_0 p_1}{T p_0}, \quad \rho_2 = d_2 \frac{T_0 p_2}{T p_0}. \quad (2.3.5)$$

Stefan 进一步使用了如下的缩写形式:

$$A_{12} \frac{d_1 d_2 T_0^2}{p_0 p_0 T^2} = b_{12}, \quad (2.3.6)$$

$$p_1 u_1 = q_1, \quad p_2 u_2 = q_2, \quad p_1 + p_2 = p.$$

利用这个缩写形式, 前述关系可重新写为:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dx} + b_{12}(p_2 q_1 - p_1 q_2) &= 0, \\ \frac{dp_2}{dx} + b_{12}(p_1 q_2 - p_2 q_1) &= 0. \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

$$\frac{dp_1}{dt} + \frac{dq_1}{dx} = 0, \quad \frac{dp_2}{dt} + \frac{dq_2}{dx} = 0. \quad (2.3.8)$$