

·学科进展·

岩石流体力学及其发展

赵阳升

(太原理工大学采矿研究所, 太原 030024)

[摘要] 较系统阐述新兴分支学科——岩石流体力学各个方面的研究进展情况, 包括物性规律、理论模型、求解方法及压裂技术等多个方面, 并对该学科以后发展的若干问题发表了看法。

[关键词] 岩石流体力学, 物性规律, 控制方程和解法, 现状与发展

对岩体变形、破坏与流体渗流的早期研究主要集中在岩体变形与水渗流的耦合作用方面。近年来, 这一研究逐渐拓宽到一般的流体, 即各种液体、气体和化学流体, 并于90年代在岩石水力学的基础上, 发展成为一门新兴的分支学科“岩石流体力学”。

岩石流体力学是岩石力学、渗流力学和众多工程科学相互交叉而产生的专门研究岩体变形、破坏与流体渗流相互作用规律的新兴分支学科。它是伴随着石油、天然气田开采、煤层气开采、干热岩体的地热开采、水文地质、地下水动力学、环境科学、水利水电工程、水库诱发地震、海水入侵、岩体加固、地基沉降变形、煤矿突水与瓦斯突出、水上水下的采煤、水力压裂等一系列重大工程的发展而形成的, 已完全具备了构成一个分支学科的3个要素条件, 即: 独立的研究对象——岩体与流体的相互作用; 独立的研究方法——建立在固体变形与孔隙、裂隙双重介质中的流体渗流的相互作用之上的理论、实验与工程措施; 明确的服务领域——环境工程、油气田开采、煤矿开采、地震、水利水电工程等。尽管如此, 还不能说这一分支学科已经成熟, 它现仍处在迅速发展时期。

在实际工程中研究固流耦合问题时, 岩石流体力学的学科特点远较单纯的岩石力学或渗流力学广泛而深入。表现在研究方法上, 岩石流体力学通过考虑岩体与流体的相互作用(含物理作用与化学作用), 给出工程实际性态的描述。而单纯的岩石力学则是在假设或估计流体对岩体作用的基础上给出的描述; 单纯的渗流力学则是在假设与估计岩体变形对渗流影响的基础上给出的描述。显然, 在许多情况下, 后两者还存在较大的误差或错误。

1 岩体介质性态分类

天然岩体是复杂的, 欲给出一种普适的理论与方法相当困难, 甚至不可能。因而, 如何对岩体介质性态作出正确的认识与分类, 是众多研究者十分关注的问题。

近代连续介质力学是建立在“表征体积单元 REV”之上的^[5]。对于经典固体力学、流

本文于1997年2月17日收到。

体力学等学科的研究对象而言, REV 的尺度一般远小于工程对象的尺度, 因此可以简化为均质的连续介质。岩体则不然, 张有天等^[3]认为裂隙岩体的 REV 很大, 甚至不存在表征体积单元; Hudson^[7]指出, 在同样的岩体中, 由于洞室端面尺寸不同, 其岩体结构表现了显著的不同; Dere Elsworth (1990) 认为, 对于含裂隙与裂缝的岩体, 也同样可以设想存在一个表征体积单元; Witherspoon 则认为, 三维裂隙网络连通性好, 其 REV 比二维小。这些观念代表了岩体介质性态研究的最新动态。

孙广忠^[2]以岩体结构面特征与规模为基础, 将岩体划分为块裂介质、碎裂介质和连续介质 3 种类型, 进而提出了相应的岩体力学理论与方法。赵阳升^[1]按照岩体 REV 的尺度与工程对象尺度的相对比值, 提出了岩体介质性态的分类方法, 将岩体分为块裂介质、拟连续介质和连续介质 3 种类型。这种分类方法需要继续研究的是: 对于具体的工程岩体如何确定 REV 的尺度。

2 岩石流体力学物性规律

与 Terzaghi T 所著《土力学》的固结理论类似, 岩石流体力学问题的研究必须包括 3 个物性方程: 考虑固流耦合作用的渗流规律、应力应变规律和有效应力规律, 三者缺一不可。

2.1 渗流物性规律

块裂介质岩体中单一裂缝的水渗流物性规律^[4,6]: (1) 等宽度裂隙水力学模型。水流速度 $q = K_f J_f$, 裂隙渗透系数 K_f 是裂隙宽度 d 的平方关系, $K_f = gd^2/12\nu$, 式中 J_f 为裂隙压力梯度, ν 为运动粘滞系数, g 为重力加速度。(2) 沟槽流模型^[9]。 K_f 是 d 的立方关系, $K_f = gd^3/12\nu$; (3) 考虑裂缝法向应力作用的单一裂隙渗透系数公式。

对于可简化为拟连续介质的岩体, 可以采用非线性的 Darcy 渗流规律, 其中等效连续介质渗透系数 K 为一变量。Louis 和 Peuga 根据大量现场测试结果得出应力对 K 影响的经验公式为 $K = K_0 \exp(-\eta\sigma)$, 其中 $\sigma = \gamma h - p$, h 为地层深度, γ 为岩石容重, K_0 为地表渗透系数, p 为孔隙压力, η 为拟合常数; 赵阳升等(1990)进行了各种煤体的渗透系数实验, 得出 K 是体积应力 Θ 与 p 的指数函数的规律 $K = a \exp(-b\Theta + cp)$, 式中, a, b, c 均为实验常数。

在上述研究的基础上, 不少学者研究了裂隙粗糙度与渗透性的关系, 其中最有影响的是 Louis C 提出的 $K_f = \beta gd^2/12\nu C$, 其中 β 为裂隙连通系数, C 为裂隙相对粗糙度修正系数。

另一趋向是简化裂隙岩体为拟连续介质岩体, 水在岩体中的流动速度 q 采用 Darcy 定律 $q = K_f J d/L$ 描述 (L 为裂隙间距, J 为等效压力梯度), 由此可以推出裂隙岩体等效渗透系数 $K_e = gd^3/12\nu L$ 。

上述结论主要是以水作为流体介质的, 对于天然气、煤层气和其他化学流体的裂隙渗流规律研究甚少。

2.2 岩石有效应力规律

由于岩体孔隙、裂隙分布及其连通性的极端不均匀性, 岩石的有效应力规律就不能采用 Terzaghi 或 Biot 有效应力方程, 广大研究者公认采用修正的 Terzaghi 有效应力方程是合适的, 即 $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij}$, 式中: σ'_{ij} 和 σ_{ij} 分别为有效应力与总应力; α 为等效孔隙压力系数; δ_{ij} 为 Kronecker 符号, 它实际上反映了空隙压力对不均匀和不发育的孔隙和裂隙的一种折减。但是, 对于不同的岩石, 其系数 α 的选取必须通过实验来确定。一些学者通过对抛光的节理

岩体模型和张性节理岩体实验证明 α 分别为 0.9 和 0.56。A. A. Borisenko^[9]从煤体的孔隙面积与固体骨架的实体面积的理论推演研究了煤体在孔隙气压作用下的有效应力规律。赵阳升等^[10]的实验揭示出在孔隙水和瓦斯作用下 α 是 Θ 和 p 的双线性函数, $\alpha = A_0 + A_1\Theta + A_2p + A_3\Theta p$, 式中 A_i ($i=0, 1, 2, 3$) 均为实验常数, 随 Θ 和 p 的改变, α 值在 0.1—0.8 之间变化。非常有趣的是, Θ 和 p 相互作用的范围按 α 值的不同可分为 4 个区域: 类土作用区, 正常作用区; 压裂作用区和不起作用区。

上述研究均是对连续介质和拟连续介质岩体给出的。对于块裂介质岩体, 其基质岩块仍可采用上述规律, 而裂缝接触面的有效应力则为 $\sigma' = \sigma - p$, 当然, 考虑裂缝接触面和连通情况可以做适当的折减, 但意义不大。

2.3 岩石应力应变规律

流体作用下岩石的应力应变规律, 特别是弹性模量 E 、泊松比 ν 、抗压强度 σ_c 及抗拉强度 σ_t 等参数, 由于流体与岩体的不同而发生显著的变化。这种影响包括物理和化学等方面的影响。但目前这方面的研究还很薄弱, 仅见到一些零散的研究成果, 如 Vinokurova 等^[11]、氏平增之 (1986)、赵阳升、梁冰等先后研究的瓦斯、 CO_2 、 N_2 对煤体的 σ 和 E 的影响; 曲永新、李成江、靳钟铭和赵阳升、朱之芳等研究了水对砂岩、花岗岩及煤等的 σ 和 E 的影响。

热流体与化学流体对岩石性态的影响是当前固流耦合研究的一个重要方面。近年来, 地热开发、核废料处置、化学废料排放等提出了许多有关的问题, 迫切需要开展这方面的研究。

2.4 岩石流体力学特性的尺度效应

上述实验参数都存在一个尺度效应, 一般小试件条件下的结果, 很难适用于工程岩体。国内外许多学者相继开展了此方面的研究^[13], 茂木清夫 (1962) 提出, $\sigma_c = \sigma_{c0} d^{-0.092}$; Hoek (1980) 指出, $\sigma_c/\sigma_{c50} = (50/d)^{0.18}$, 式中 σ_{c50} 为 $\phi = 50$ mm 时试件的强度, d 为试件尺寸; Hyun-Koo Moon 等 (1995) 的研究证实, 在 0—3 000 m^3 内, 岩体单轴抗压强度随体积的变化呈幂函数规律; 且岩体模量与岩块模量之比, 随体积增加而呈指数规律衰减。

利用裂隙分形特征来寻求岩体力学参数的尺度效应规律是最近几年的发展方向, 最有代表性的是 Panek L. A. 基于能量准则, 提出的岩体强度 σ_f 与尺度和分形维数的关系: $\sigma_f = k (L/L_0)^{(D_f-3)/2}$, 其中 D_f 为裂隙分维值, L 和 L_0 分别为岩体一般尺度和特征尺度, k 为系数。

3 控制方程

岩石流体力学的控制方程主要由 3 个部分组成, 即岩体变形方程、流体渗流方程和耦合方程。

3.1 拟连续介质和连续介质岩体的控制方程

这两类介质的区别在于 REV 大小和方程对实际的近似程度以及参数选择的差异, 但就介质性态的本质而言都属于连续介质的范畴, 对其研究比较成熟, 已建立了基于岩体弹性力学的固液耦合数学模型和固气耦合数学模型及其解法^[14]。

3.2 块裂介质岩体的控制方程

这类介质岩体的控制方程的建立, 体现了岩体结构力学的思想: 岩体是由基质岩块与裂

缝两部分组成, 分别单独建立其变形与渗流方程。基质岩块变形与渗流的控制方程均采用连续介质或拟连续介质控制方程; 裂缝的固体变形采用 Goodman 节理模型; 裂缝的渗流采用单一裂缝的水力学模型。最后, 根据固体应力平衡和流体质量均衡关系建立其控制方程。

Bareblalltt 分别对孔隙和裂隙建立渗流控制方程, 并考虑二者的交换与均衡, 建立了块裂介质岩体的渗流方程; Wittke 假设块裂介质岩体的渗流空间是由裂隙个体构成的裂隙网络所组成, 根据流体在裂隙交汇点和沿裂缝闭合回路的特征建立了渗流控制方程。陶振宇等先后研究建立了块裂介质的岩体变形与水渗流的耦合控制方程, 并应用于水库诱发地震分析。近年来, 由于干热岩体地热的开发, 有不少外国学者注意研究岩体变形与热流体渗流的耦合模型及其解法, 即岩体在高温流体驱动下的热破裂理论, 如弹性孔隙介质中高温流体渗流驱动裂纹的扩展理论与分析方法, 但这些还仅是刚刚起步。

气体或二相流体与块裂介质岩体的耦合作用的研究, 在煤层气、天然气和地热开采中占有重要地位, 是应大力鼓励和支持的研究方向。

4 求解方法

复杂的耦合数学模型的求解大都是以有限元法 (FEM)^[15]为基础的。John T^[16]曾对此问题的数值解法作了较详细的论述。他将两组方程看作一个整体的解算方法, 求解起来十分繁杂, 而且常常导致解的发散。近年来, 人们趋向于将耦合问题看作两个单独系统, 应用各自现有的有限元程序块, 作迭代耦合求解, 看来是较为有效且计算稳定的捷径方法。由于固气耦合数学模型中的气体渗流方程是非线性方程, 赵阳升^[14]提出了按照时间序列线性近似的耦合迭代求解方法, 从而使这一复杂的问题得以有效地解决。

总的看来, 岩石流体力学 (固流耦合) 的 FEM 数值方法已相对成熟, 而其他数值方法, 如 BEM、DEM、解析方法等应用于岩石流体力学的研究尚很少, 应提倡发展, 以与 FEM 相互促进, 推进学科的发展。

5 岩体控制压裂

岩体控制压裂是岩石流体力学的一个重要应用领域, 主要研究在高压流体和地应力场的复合作用下岩体的破裂规律。

由于石油与天然气的开发, 岩层水力压裂理论及其技术迅速发展起来, 并广泛应用于其他工程技术领域, 近十年来, 岩层水力压裂工艺与理论都有了长足的进展, 其特征是压裂流体的多样化 (泡沫压裂液, 胶质压裂液、氮气压裂、液体二氧化碳压裂等) 和压裂方式的多样化 (Kiel 压裂、裁剪脉冲压裂、聚能高能气体压裂、水压爆破压裂等), 其目的都是为了尽可能提高岩体的体积渗透能力。

经典水力压裂方法产生的是钻孔周围对称的一对垂直于最小主应力方向的裂缝, 由于裂纹方向与地应力方向紧密相关, 因而被广泛应用于地应力测量, 但对提高岩层渗透性而言, 效益不高。近年来发展的压裂工艺都是以增加致裂裂缝数目, 并较严格地控制致裂裂缝的形态为主要特征的新型压裂工艺, 这些内容已远远超出了经典水力压裂的范畴。裁剪脉冲压裂技术首先由美国的 Sandia 和 Lawrence Livermore 两个国家实验室提出。王靖涛^[17]也对此进行了深入研究, 结果表明: 孔边裂纹数目 (N) 与脉冲荷载持续时间 (t_d)、膨胀波传播速度

V 和钻孔直径 (D) 之间存在下列近似关系式: $N \approx k' (D/Vt_d)$, 其中, k' 为实验常数。

岩体控制压裂的理论主要是以拉张破坏理论为主, 但国外的大量实验和现场观测, 揭示出存在剪切压裂破坏方式。这一结论被美国 (1986) New Mexico 州 EE-2 # 巨型水力压裂引起的微地震震源位置检测所证实。寻求新型的压裂技术, 控制岩体产生剪切破裂, 是提高岩层渗透性的一条有效的途径, 需要进行理论与技术方面的深入研究。

在岩体压裂理论方面, F. E. Heuze (1990) 和 T. J. Boone (1990) 进行了很好的研究, 基本建立了固液耦合的岩体压裂理论、相应的方程及其解法。

6 对岩石流体力学发展的一些思考

客观地分析岩石流体力学的发展, 可以清楚地看出还存在以下不足之处:

(1) 岩体裂缝分布规律。已有的理论和测试手段还不能清楚地告诉人们岩体裂缝的分布。许多研究者认为, 在这一研究中对岩体裂缝分形几何方法及其分形规律的了解是十分必要的, 应大力发展。

(2) 岩石流体力学物性规律。气体、粘性流体、二相流体在裂缝中的流动规律, 以及它们对岩体变形性态的影响规律——应力应变规律和有效应力规律等, 在能源工程与环境工程中占有十分重要的地位, 是有待深入开展的研究课题。

(3) 岩石流体力学理论。块裂介质的岩石流体力学理论是重要的研究课题, 而已有的研究十分薄弱。大型水利水电工程、水库诱发地震等迫切需要研究在复杂的地应力场中块裂岩体变形与水渗流的完善理论及分析方法, 可以为工程设计与施工提供可靠的依据。石油和天然气的开采, 特别是近年来煤层气的开采, 亟需研究岩体变形与气体或二相流体渗流的耦合数学模型、计算方法和计算软件, 以促进油气工业的发展。干热岩体的地热开发是当前国际上正在兴起的又一新型能源工业, 是具有广阔前景的、洁净的、用之不竭的新能源, 为促进我国此项研究的发展, 应尽快开展块裂岩体的固体与热流体 (气、液) 的耦合理论及其解法的研究^[12]。化学废料与核废料的排放与储存, 需研究固体-化学流体的耦合理论及解法, 以期对环境保护和控制污染提供决策与指导。

(4) 岩体控制压裂理论与技术。研究有效的控制压裂技术, 提高低渗透岩层的渗透性, 将大大促进我国石油、天然气、煤层气工业的发展。

参 考 文 献

- [1] 赵阳升. 矿山岩石流体力学. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [2] 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 张有天等. 岩土与水工建筑物相互作用研究报告. 天津: 天津大学出版社, 1993.
- [4] 周维垣等. 高等岩石力学. 北京: 水电出版社, 1990.
- [5] Bear J. Dynamics of fluid in porous media. U. S.: America Elsevier Publishing Company, Inc. 1972.
- [6] 陶振宇等. 关于岩石水力模型. 力学进展 1994, 24 (3).
- [7] Hudson J A. 岩石力学原理 (来华讲学报告). 岩石力学与工程学报. 1989 (3).
- [8] Tsang Y W, et al. Channel model of flow through fractured media. J. of Water Resources Research. 1987, 23 (3).
- [9] Borisenko A A. Effect of gas pressure on stress system as an energy source in the development of gas bursts. Soviet Mining Science, 1985 (1): 88—91.

- [10] 赵阳升. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的实验研究. 岩土工程学报, 1995 (3).
- [11] Vinokurova E B, et al. Influence of gas composition the modulus of elasticity of gas impregnated anthracites. Soviet Mining Science, 1985 (5): 458—460.
- [12] Elsworth D. Thermal permeability enhancement of blocky rocks one-dimensional flows. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1989 (3/4), 319—339.
- [13] Proc. 1st Int. workshop on scale effect in rock mass/7—8, June, 1990. A. A. Balkema Publishing.
- [14] Zhao Y S. Mathematical model for solid deformation & gas flow in coal seams. Applied Math. Modelling, 1994 (6): 328—333.
- [15] Huang N C. Variational principles and finite element method for stress analysis of porous media. Int. J. Numer. Anal. Method Geomech., 1990, 14: 1—26.
- [16] Desai C S, John T C. Numerical Methods in Geotechnical Engineering. McGRAW-HILL Book Company, 1977, 287—306.
- [17] 王靖涛. 裁减脉冲加载法研究. 中国科学, A辑, 1987 (10).

ROCK FLUID MECHANICS AND ITS DEVELOPMENT

Zhao Yangsheng

(Mining Tech. Institute, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract This paper presents the new development of Rock Fluid Mechanics in system, including constitute equation, theoretical model, numerical method and fracturing technology.

Key words rock-fluid mechanics, constitute law, control equation and its solving method, present state and development

·资料·信息·

国家自然科学基金委员会资助留法学者 参加我国中西部地区的开发建设

国家自然科学基金委员会决定对留法学者参与我国中西部地区科技、教育、经济建设和社会发展的 19 个申请项目给予近 90 万元人民币的资助。

为了推动我国中西部地区的经济和社会发展, 鼓励和支持更多的海外留学人员积极参与我国中西部地区的开发建设, 原国家教委会同国家自然科学基金委员会、原国家科委、原国家计委、农业部等有关部委于 1997 年 7 月底至 8 月中旬组织了 25 名留法学者赴甘肃省实地考察, 与该省的 70 多个单位进行了学术交流, 并和该省的科技工作者就结合双方的优势促进甘肃省的经济发展, 提出了 58 个项目建议书。项目建议书所涉及的领域包括农业、医学、化工、电子、石油、核能和基础科学。

对其中属于基础科学研究的项目, 国家自然科学基金委员会根据同行专家的评审意见, 已决定对其中 19 个项目给予资助。

(国际合作局 汤锡芳 供稿)