

文章编号:2095-0411(2015)01-0081-05

基于 ADINA 的多孔介质流固耦合分析^{*}

朱庆杰,任 瑞,贾海波,徐伟彬,张 涛

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213016)

摘要:基于流固耦合的研究理论,根据多孔介质(过滤板)中流体与结构之间的耦合关系,以有限元分析软件 ADINA 为平台,建立多孔介质(过滤板)的三维有限元模型,计算得到多孔介质(过滤板)在流固耦合作用下应力分布及变形情况。计算结果表明流固耦合作用对多孔介质(过滤板)变形破坏有重要的影响。针对计算结果,为过滤板的设计提出几点建议。

关键词:多孔介质;流固耦合;有限元;ADINA

中图分类号:TE 992.2

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2015.01.016

Coupling Analysis of Fluid Structure Interaction in Porous Media Based on ADINA

ZHU Qing-jie, REN Rui, JIA Hai-bo, XU Wei-bin, ZHANG Tao

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Based on the research of fluid structure interaction theory, according to the coupling relationship between structure and fluid in porous media, taking ADINA finite element analysis software as the platform, three-dimensional finite element model of porous media is established. The stress distribution and deformation condition of porous media are calculated. The results show that the fluid structure interaction has an important influence on deformation and damage of the filter plate. Finally, some advice for the design of the filter plate is proposed.

Key words: porous media; fluid structure interaction; finite element; ADINA

多孔介质流固耦合作用存在于诸多工程问题中,如水利水电工程的渗流与控制、水库诱发地震、核废料深埋处理、煤与瓦斯突出、岩坡和坝基的稳定性、热能开发、地下水资源的利用等领域^[1]。在油田污水处理中的精细过滤装置中,由于过滤介质一般选用多孔介质材料,所以在含油污水处理过程中也会出现多孔介质流固耦合作用。如精细过滤过程中的微孔过滤^[2],其过滤原理是在压力的推动下,料浆穿过过滤介质,并依靠这种过滤介质的拦截作用实现过滤。其中,过滤介质多采用金属丝网烧结的微

孔过滤材料,也可称之为多孔介质(过滤板)。含油污水通过过滤介质(过滤板)必然会存在流固耦合作用,而流固耦合作用会影响过滤介质(过滤板)的使用寿命。因此有必要采用有限元分析方法对过滤介质(过滤板)的工作过程进行数值模拟,研究过滤介质(过滤板)工作时的受力及变形情况。国外学者已将有限元数值模拟方法应用到工程分析和设计中^[3]。Richardson 等(2003)利用有限元法对错流过滤网建立模型并对其定量分析,数值模拟试验表明该模型产生的结果与理论分析一致^[4];Nassehi 等

^{*} 收稿日期:2014-03-06。

作者简介:朱庆杰(1966—),男,河北宁晋人,教授,主要从事城市地理信息系统等方面的研究。

(2005)对折叠筒式过滤器建立有限元模型,并进行预测和定量分析其工作过程中流体动力学的行为^[5];Elbitar 等(2008)利用有限元分析方法对机油滤清器盖的外凸缘拉深和内法兰翻边加工处理的两种技术进行分析,分析结果提出内凸缘冲孔拉深工艺及最后拉深外法兰^[6]。国内的杨文明,宗荣珍(2009)采用有限元分析方法,根据集料给料机配料仓滤网的结构和工作情况,建立了滤网的三维计算模型并运用 ANSYS 有限元分析软件,对滤网的结构进行计算分析^[7];刘令,肖剑等(2012)利用 ANSYS 软件对熔融结晶洗涤塔的主要受力构件—过滤板进行了有限元分析,建立了合理的结构和载荷简化模型^[8]。

从上述的研究中可以看出,有限元数值模拟方法已成为分析和研究多孔介质变形与破坏问题的一个重要工具。本文的工作是以有限元分析软件 ADINA 为平台,通过计算分析流固耦合作用对过滤板的影响,来为过滤板的设计改进提供依据。

1 多孔介质流固耦合有限元分析方法

流固耦合问题按其耦合机理可分为两大类^[9]。第一类问题的特征是耦合作用仅仅发生在两相交界面上,在方程上的耦合是由两相耦合面上的平衡及协调来引入的,如气动弹性、水动弹性等。第二类问题的特征是两域部分或全部重叠在一起,如多孔介质的渗流问题,难以明显地分开,使描述物理现象的方程,特别是本构方程需要针对具体的物理现象来建立,其耦合效应通过描述问题的微分方程来体现。对于过滤介质(过滤板)的流固耦合问题属于第二类问题。

流固耦合有限元分析方法主要用于处理流体和固体之间的非线性动态耦合问题,其基本原理是通过分别满足流体和固体之间耦合边界上的运动学平衡方程和动力学平衡方程,将流体和固体耦合起来,其运动学和动力学条件分别为(1)式和(2)式:

$$d_f = d_s \quad (1)$$

$$n \cdot \tau_f = n \cdot \tau_s \quad (2)$$

式中: d_f, d_s 为流体和固体的边界位移; τ_f, τ_s 为流体和固体应力; n 为流体流动方向。

耦合边界上流体速度 v_f 可以从运动学条件得出,如果是应用无滑移壁面条件,则:

$$v_f = d_s \quad (3)$$

如果是应用滑移壁面条件,则:

$$n \cdot v_f = n \cdot d_s \quad (4)$$

基于有限元的流固耦合分析方法需解决 3 个方面的问题。首先是作用在耦合面上力的准确传递。在 ADINA 软件中,固体模型和流体模型是分开建立的,这两个模型之间的耦合实现是通过分别在其实际的作用面定义流-固耦合表面,两者的网格可以不相同,但需要满足一定的容差要求,耦合面上流体节点的位移是通过附近固体节点的位移插值得到,而固体节点受到的流体作用力 $F(t)$ 通过对附近流体应力的积分得到:

$$F(t) = \int h^d \tau_f dS \quad (5)$$

式中: h^d 为固体节点位移; S 为自由表面位置。

其次是描述由于固体变形或位移引起的流体网格的移动。目前常用的方法是将欧拉坐标系统下的 N-S 方程映射到 ALE(Arbitrary Lagrangian Euleria)坐标系统中,ALE 坐标的位移及速度即为流体节点的位移和速度。在 ADINA 软件中,耦合面上流体节点的位移和速度由固体变形得到,由此引起体积改变的流体区域内的可任意移动流体节点的位移增量通过求解 Laplace 方程得到;此外,还可以通过定义 Leader-Follower 点对模型中非物理移动边界上流体网格的移动进行人为控制。

最后是对耦合系统的求解。有 2 种方法,分别是迭代解法和直接解法。这 2 种方法都要保证动态分析时固体和流体模型中的时间积分必须是相容的。由于耦合模型的非线性,这两种方法都要通过迭代才能得到有限元方程的解。迭代解法中流体和固体求解变量是完全耦合的。其中流体方程和固体方程是按顺序相互迭代求解的,各自在每一步得到的结果提供给另一部分使用,直到耦合系统的解收敛为止。直接解法是将流体模型和固体模型组合在同一矩阵中进行求解,其有限元方程如下:

$$\begin{bmatrix} A_{ff} & A_{fs} \\ A_{sf} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_f^k \\ \Delta X_s^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_f \\ B_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k \quad (7)$$

$$A_{ff} = \frac{\partial F_f^k}{\partial X_f}, A_{fs} = \lambda_d \frac{\partial F_f^k}{\partial X_s}, A_{sf} = \lambda_r \frac{\partial F_s^k}{\partial X_f}, A_{ss} = \frac{\partial F_s^k}{\partial X_s} \quad (8)$$

式中: $\lambda_d (0 < \lambda_d \leq 1)$ 和 $\lambda_r (0 < \lambda_r \leq 1)$ 分别为位移松弛因子和应力松弛因子; F_f^k 为流体应力; F_s^k 为固体应力; X_f 和 X_s 分别为以节点定义的流体矢量和固体矢量; k 为迭代次数(以上标形式存在); ΔX_f^k 和 ΔX_s^k 分别为流体和固体的矢量增量; B_f 和 B_s 分别为第 k 次迭代流体应力和固体应力的反向力。

2 有限元模型

含油污水来源主要有金属工业、石油工业、食品加工、餐饮业、轻工、化工等行业,特别是石油工业,如在石油生产、炼制、储存或运输,或使用这种工业产品过程中都将产生含油污水。而含油污水的处理装置在油田开采、炼油工业、石油化工等行业随处可见。其中,在用于油田污水精细过滤的微孔过滤装置中,过滤介质大多采用多孔介质材料,如过滤板、过滤网、过滤膜等。本次工作是将微孔过滤过程做了一定的简化,对简化之后过滤介质(过滤板)工作过程建立有限元模型并进行数值模拟计算。本次工作研究的具体问题是管道中间有块过滤板,为多孔介质属性,含油污水可从过滤板渗透过去,由于过滤板两侧有压差的存在,将导致板发生变形。通过利用 ADINA 有限元分析软件对其进行数值模拟,计算分析过滤板变形情况,从而为过滤板变形破坏提出工程改进建议。

2.1 建模方法

ADINA 程序提供了两种基本的建模方法:Native 和 Parasolid 建模^[10-11]。Native 建模是一种传统的建模方法,它的几何建模是一种从底向上的建模方式,由点生成线,线生成面,面生成体。Parasolid 建模是一种最为广泛的三维复杂实体模型建模技术,它提供一系列基本几何体,利用布尔操作实现几何体之间的合并、求交或相减,建立分析需要的几何模型。两种方法建立的几何模型在几何形状和尺寸上完全相同,但在网格划分上有所不同。Native 建立的模型在划分网格时生成的网格质量要比 Parasolid 的好,网格也更加规则^[12]。

2.2 多孔介质流固耦合模型建立

过滤板和流体(含油污水)的耦合作用是通过 ADINA 结构模块(ADINA Structures)和流体模块(ADINA CFD)分别建立固体模型、多孔介质模型和流体模型,然后将它们一起放到 ADINA 流固耦合求解器(ADINA-FSI)进行耦合计算来实现的。模型分别建立后,分别进行运算,然后进行流固耦合求解。

图 1 所示的是管道和多孔介质(过滤板)组成的一个简化含油污水处理的总体模型。

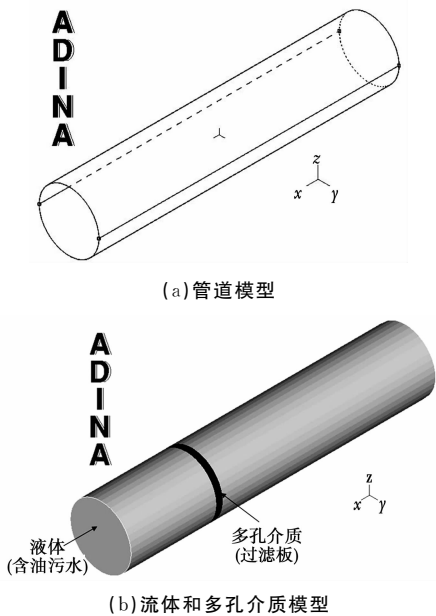


图 1 总体模型

Fig. 1 Overall model

2.2.1 固体模型的建立

固体模型是在结构模块下建立,几何模型采用 ADINA 中的 Parasolid 建模方式,最终生成的固体模型如图 1 中的(a)所示。

2.2.2 多孔介质模型的建立

多孔介质模型也是在结构模块下建立,几何模型采用 ADINA-Native 建模方式。根据实际情况,将约束施加在多孔介质模型的厚度面上。多孔介质单元采用 8 节点三维实体单元,单元划分采用 8 节点规则三维实体单元。网格密度划分采用不同方向上设定网格数量来划分。需注意的是,必须设定流固耦合边界。约束及网格划分如图 2 所示。

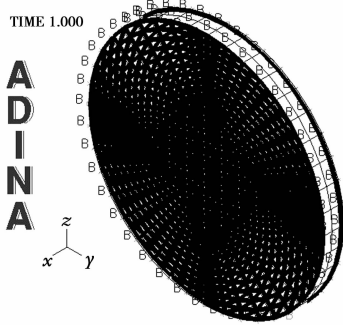


图 2 约束和网格显示图

Fig. 2 Fixity and meshing plot

2.2.3 流体模型的建立

流体模型的建立,在 AUI 界面选定 ADINA-CFD 模块,选择 FSI 选项,并选中 Includes Porous Coupling,然后进行特殊流体假定,Flow Dimension

设定为三维流体。将流固耦合边界条件施加在流体与多孔介质接触面上,并增加 Wall 边界条件。流体采用恒定不可压缩流体,流体单元采用三维流体单元,考虑流体以一定流速流动,故施加法向牵引力。网格密度划分采用不同方向上设定网格数量来划分,单元划分采用 8 节点规则三维流体单元。保存模型并选定不求解。荷载、边界条件及网格划分情况,如图 3 所示。

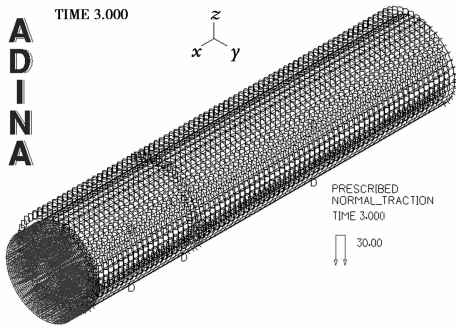


图 3 荷载、边界条件及网格显示图

Fig. 3 Loading, boundary condition and meshing plot

2.2.4 模型参数选择

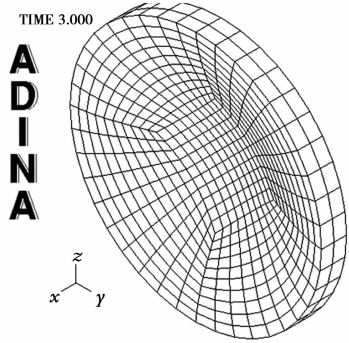
模型参数说明:管壁厚度为 0.01m;管径为 1m;管长为 10m。管道采用双线性弹塑性材料,多孔介质直径为 1m,厚度为 0.1m,多孔介质材料为各向同性线弹性材料,见表 1;流体材料的类型选择含油污水,含油污水的性质(由油滴大小和数量决定),粘滞系数为 0.009(g/(cm·s)),密度为 0.9g/cm³;管道入口处给流体模型施加法向牵引力荷载,法向牵引力荷载分别考虑为:10、30、50、80、100N。

表 1 固体和多孔介质模型材料参数

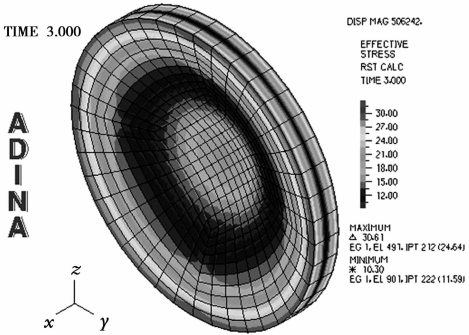
Table 1 Parameters of solid material and porous media material			
模型材料	杨氏模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
固体	2.07E11	0.29	7 800
多孔介质	1E8	0.30	1 200

3 计算结果分析

图 4 中的(a)能明显地看出过滤板网格的变形程度;过滤板有效应力分布如图 4 中的(b)所示,从(b)中可以清楚的看到在过滤板各个位置上的有效应力分布及最大值点的位置。从图 4 可以明显看出流固耦合作用对过滤板的变形和受力有着重要的影响。



(a) 网格变形图



(b) 有效应力云图

图 4 结构变形应力云图

Fig. 4 The structural deformation stress nephogram

图 5 为在给含油污水分别施加 10、30、50、80N 和 100N 的法向牵引力情况下,经过计算得到过滤板中心节点在 X 方向上的位移时程曲线,从图 5 对比分析可以看出,过滤板中心节点在 0~1s 时,位移的增长较快;1~3s 时,位移的增长变得缓慢,但整体位移还是在不断地变大。另外,变形位移随着施加荷载的增加而变大。

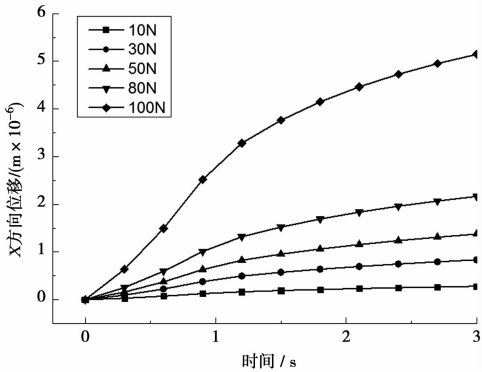


图 5 位移时程曲线

Fig. 5 Plot of displacement vs. time

图 6 为在给含油污水分别施加不同法向牵引力的情况下,计算得到过滤板中心节点处的有效应力时程曲线,从图 6 对比分析可知,过滤板中心节点处在 0~1s 时,有效应力增长较快;1~3s 时,有效应力的增长变得缓慢,但整体来看,过滤板中心节点处

的有效应力还是随着时间的增加而不断地增大。此外,有效应力也随着施加荷载的增加而进一步增大,当有效应力增大到一定的程度,会引起过滤板的变形破坏。

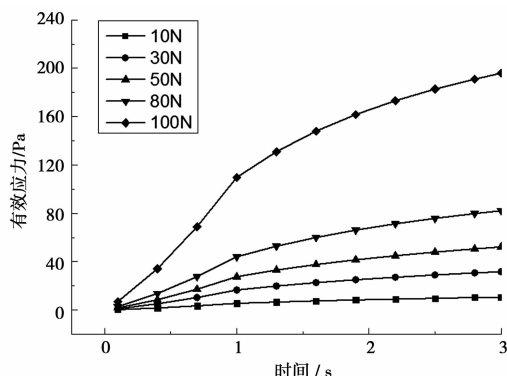


图6 有效应力时程曲线

Fig. 6 Plot of effective stress vs. time

4 结论与展望

本文利用有限元分析软件 ADINA 对含油污水通过管道中的过滤板进行了数值模拟,通过分析过滤板的有效应力分布图及过滤板中心节点处 X 方向位移时程曲线和有效应力时程曲线,得到如下结论:①从变形位移分析可知,过滤板中心节点处的变形位移会随着施加给含油污水法向牵引力的增加而变大,对过滤板的破坏也会越严重,故应尽量将施加给含油污水的牵引力控制在合适的范围内,也即控制合适的含油污水流速,以此减小流固耦合作用引起的过滤板变形;②从有效应力分析可知,在过滤板与管道接触的边缘处,应力比较集中,故要使过滤板能够承受住实际工作过程中受到的应力且不变形,就应该对过滤板的结构设计进行改进,比如加厚过滤板边缘部分或者将过滤板边缘部分材料改成非多孔介质属性材料并使其与管道无缝接触等。全面考

虑含油污水的油滴大小和数量,以及不同流体流速等因素对过滤板变形破坏的影响,是下一步工作的重点内容,将在以后的研究中阐述。

参考文献:

- [1]薛世峰,全兴华,岳伯谦,等. 地下流固耦合理论的研究进展及应用[J]. 石油大学学报(自然科学版),2000,24(2):109-114.
- [2]李静,祁万军. 油田污水处理研究[J]. 化工装备技术,2010,31(4):46-49.
- [3]Lihan Huang, Michael T Morrissey. Finite element analysis as a tool for crossflow membrane filter simulation[J]. Journal of Membrane Science,1999,155(1):19-31.
- [4]Richardson C J, Nassehi V. Finite element modelling of concentration profiles in flow domains with curved porous boundaries[J]. Chemical Engineering Science,2003,58(12):2491-2503.
- [5]Nassehi V, Hanspal N S, Waghode A N, et al. Finite-element modelling of combined free/porous flow regimes: simulation of flow through pleated cartridge filters[J]. Chemical Engineering Science,2005,60(4):995-1006.
- [6]Elbitar T, Gemeal A. Finite element analysis of deep drawing and hole flanging processing of an oil filter cover[J]. Int J Mater Form,2008,1(Suppl 1):125-128.
- [7]杨文明,宗荣珍. 基于 ANSYS 的配料仓滤网有限元分析[J]. 机械研究与应用,2009(1):36-38.
- [8]刘令,肖剑,黄龙,等. 熔融结晶洗涤塔过滤板的有限元分析[J]. 化工机械,2012,39(5):602-621.
- [9]邢景棠,周盛,崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展,1997,27(1):19-38.
- [10]岳戈,陈权. ADINA 应用基础与实例讲解[M]. 北京:人民交通出版社,2008:54.
- [11]岳戈,梁宇白,陈晨,等. ADINA 流体与流固耦合功能的高级应用[M]. 北京:人民交通出版社,2010:57.
- [12]朱庆杰,苏幼坡,陈艳华. 城市防灾技术-ADINA-M 建模与 ID-RISI 防灾决策[M]. 北京:中国科学技术出版社,2007:50.

(责任编辑:殷丽莉)