

doi:10.3799/dqkx.2017.546

碳酸盐岩油藏酸岩反应流动模拟研究进展

姚军, 刘丕养, 黄朝琴, 王月英, 严侠, 曾青冬

中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580

摘要: 酸岩反应流动模拟可用于指导油藏酸化施工, 优选注入参数, 从而以最小的成本最大程度地改善地层。国内外很多学者基于不同的方法建立了不同的模型对碳酸盐岩油藏酸岩反应流进行了研究, 但这些模型尚缺乏科学的归纳与整理。以研究对象的空间尺度为依据, 将现有的碳酸盐岩油藏酸岩反应流模型分为孔隙尺度模型、岩心尺度模型及井筒尺度模型, 简要概括了每类模型的适用条件及其在应用中的局限性。结合本课题组在酸岩反应流模拟方面所做的工作, 重点论述了岩心尺度模型的最新研究进展和发展趋势, 给出了岩心尺度模型下一步的研究方向, 主要包括: 建立更接近地层实际的数学模型, 如考虑酸化过程中存在的非达西流和地应力的影响; 发展高效的数值算法, 将模型的计算区域扩大到油藏尺度; 将岩心尺度模型进行尺度升级, 得到可以指导油藏酸化施工的优化参数。

关键词: 碳酸盐岩; 反应流; 酸化; 蚓孔; 数值模拟; 尺度升级。

中图分类号: P618.12 **文章编号:** 1000-2383(2017)08-1263-10 **收稿日期:** 2017-03-02

Status and Progress of Reactive Flow Simulations for Carbonate Reservoirs

Yao Jun, Liu Piyang, Huang Zhaoqin, Wang Yueying, Yan Xia, Zeng Qingdong

School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: Simulation results of the reactive flow of the acid in the rock generally are used to optimize the operation of reservoir acidization so that the optimal injection rate is determined to stimulate the formation effectively with minimum cost. Many models have been developed based on variety of methods to study the reactive flow in carbonate reservoir during acidizing. However, these models are still short of scientific classification and systematization. According to the spatial scale of the study objects, the existing models for reactive flow in carbonate rocks are classified into three types, namely pore-scale model, core-scale model and wellbore-scale model in this study. The assumptions and limitations of each type are summarized. Based on the works we have done in the simulation of reactive flow in carbonate rock, the latest research progress and development trend of the core-scale model are presented in this paper. Besides, suggestions on the future studies on core-scale model are proposed, which include developing more accurate mathematical model, such as considering the effect of non-Darcy flow and the influence of stress, developing the efficient numerical algorithms to extend the computational domain to the whole reservoir, upscaling the core-scale model to obtain the optimal operating parameters during carbonate reservoir acidization.

Key words: carbonate reservoir; reactive flow; acidization; wormhole; numerical simulation; upscaling.

0 引言

酸化是碳酸盐岩油藏最常用的一种增产措施 (Economides and Nolte, 2000), 这主要是由其储层特征及岩矿特征决定的。碳酸盐岩油藏往往发育有

裂缝及溶洞 (王月英等, 2012), 这一储层特征决定了进行压裂时会导致压裂液大量滤失。一方面, 压裂液滤失进入地层会导致储层伤害; 另一方面, 滤失作用使得生成的水力裂缝短且窄, 降低了增产效果, 而酸化改造碳酸盐岩地层则不存在这些问题。其次, 碳酸

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (Nos.51504276, 51504277); 国家油气重大专项项目 (No.2016ZX05061); 山东省自然科学基金联合专项项目 (No.ZR2014EL017)。
作者简介: 姚军 (1964—), 男, 教授, 从事油气田开发方面的工作。ORCID: 0000-0002-6720-584X。E-mail: RCOGFR_UPC@126.com

盐岩油藏矿物成分简单,主要为灰岩及白云岩,极易与盐酸反应,且反应物不存在沉淀(方旻等,2016)。因此,以盐酸为主体酸的酸化改造常用来解除碳酸盐岩地层的污染问题。酸化施工时,将酸液通过井筒以不压裂岩石的压力注入地层,使其与地层中的岩石发生溶蚀反应,从而提高地层的孔隙度及渗透率,达到解除污染的效果。在合适的注入条件下,酸蚀地层会形成一些窄的具有高导流能力的优势通道,称作蚓孔。这些蚓孔可以穿过井筒周围的污染带,成为连通井筒与地层的高渗通道,从而大大地降低了油气流向井筒的阻力(Economides and Nolte, 2000)。但是蚓孔的生成条件与注入酸在地层中的流动状态、岩石及酸本身的化学性质以及油藏的压力温度都有关系(Kalia, 2008)。例如,研究者们通过将盐酸以不同的速度注入碳酸盐岩岩心进行酸化实验,当注入速度从低到高变化时,得到了 5 种不同的溶蚀模式:面溶蚀、锥形溶蚀、蚓孔溶蚀、多分枝蚓孔溶蚀以及均匀溶蚀(Fredd and Fogler, 1998)。因此,对于如何优选出注入酸的类型及注入条件是酸化施工成功的关键。为解决这一问题,国内外研究者们建立了许多模型来描述酸液在碳酸盐岩油藏中的反应流动。这些模型从研究尺度上来看主要分为 3 类:(1)孔隙尺度模型(Hoefner and Fogler, 1988; Fredd and Fogler, 1998; Kang *et al.*, 2009; Budek and Szymczak, 2012; Tansey, 2014; Menke *et al.*, 2015; Tansey and Balhoff, 2016);(2)岩心尺度模型(Liu *et al.*, 1997, 2012, 2013, 2016; Golfier *et al.*, 2002; Panga *et al.*, 2002, 2004, 2005; Cohen *et al.*, 2007, 2008; Kalia and Balakotaiah, 2007, 2009, 2010; Kalia, 2008; Kalia and Glasbergen, 2009, 2010; Izgec *et al.*, 2010; Ratnakar *et al.*, 2012, 2013; Maheshwari and Balakotaiah, 2013a, 2013b; Maheshwari *et al.*, 2013, 2014, 2015; Bekibayev *et al.*, 2015; Ghommam *et al.*, 2015; Tabasy and Rashidi, 2015; Wu *et al.*, 2015; Bastami and Pourafshary, 2016; Liu and Liu, 2016; Safari *et al.*, 2016; Yuan *et al.*, 2016; 姚军等, 2017; Liu *et al.*, 2017a, 2017b);(3)井筒尺度模型(Daccord *et al.*, 1989; Pichler *et al.*, 1992; Frick *et al.*, 1994)。本文对这 3 类模型进行了系统地介绍,并概述了各类模型的研究进展及发展趋势,介绍了本课题组研究的最新成果,对碳酸盐岩油藏酸岩反应流动模拟及油藏酸化施工具有重要的理论指导意义。

1 孔隙尺度反应流动模拟

酸岩反应发生在每个孔隙壁面上,因此,研究酸岩反应流最直接的方法就是在孔隙尺度上建立模型(Cohen *et al.*, 2008)。此时,酸液在孔隙内的流动通过 N-S 方程来描述,酸与岩石的化学反应可以分解为 3 个顺序的阶段:(1)反应物经传质作用传输至岩石表面;(2)酸与岩石发生表面反应;(3)反应产物离开岩石表面(Economides and Nolte, 2000)。反应物传输至岩石表面的速度称为传质速度,表面反应的速度称为反应速度,而酸蚀岩石的整体速度则受控于两者中较慢的那个。例如,反应速度小于传质速度的反应称为动力控制反应;反应速度大于传质速度的反应称为传质控制反应。

明确了孔隙尺度的流动及反应机理,还需要选定合适的模型来表示多孔介质。常用的描述多孔介质的模型包括:(1)孔隙网络模型;(2)毛细管模型。研究者们分别基于这 2 种模型对酸岩反应流进行了模拟。

1.1 孔隙网络模型

孔隙网络模型通过在节点处相互连通的管柱网络来表征多孔介质,酸液在吼道中的流动符合哈根—泊肃叶公式,酸液与吼道壁发生反应使吼道的直径增加。Hoefner and Fogler(1988)根据这一假设建立了一个包含 40×40 个节点二维网络模型来研究基岩酸化中的反应流问题,并模拟出了与实验结果一致的溶蚀模式。Fredd and Fogler(1998)将不同大小的球棍进行叠加生成了一个三维网络模型。根据哈根—泊肃叶定律建立孔隙尺度的传质模型,化学反应会使得球体溶解、孔隙变大。在计算过程中,孔隙网络模型保持其结构和配位数不变,但当骨架完全溶解时,两个孔隙将合并成一个,而吼道则不会合并,也就是说,即便吼道周围的骨架都已完全溶解,在计算时仍考虑酸液在每个吼道的流动,只不过吼道的半径将会增大。图 1 所示为 Fredd and Fogler(1998)通过三维网络模型模拟得到的溶蚀结构,随着注入速度的增加,分别得到了面溶蚀、蚓孔和均匀溶蚀。Budek and Szymczak(2012)对 Hoefner and Fogler(1988)提出的孔隙网络模型进行了改进,新的模型考虑了反应物输送至孔隙表面的传质作用,在此基础上,得到了两个描述反应系统的无因次参数:有效 Damkohler 数和描述溶解速度受传质速度影响范围的无因次参数 G 。同时,该模型允许拓扑结构发生变化,当溶蚀后的孔隙半径大于相邻孔隙间

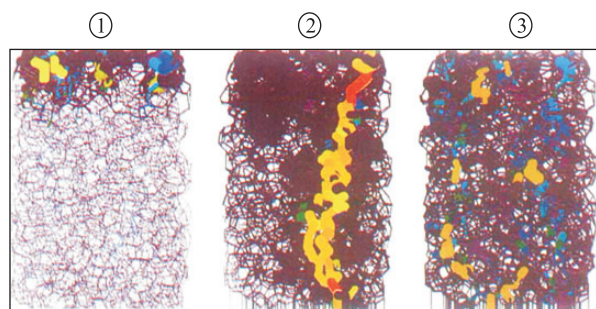


图1 基于三维孔隙网络模型计算得到的溶蚀模式

Fig.1 Dissolution patterns obtained from the numerical simulation using the 3-D network model

不同注入速度对应的溶蚀模式:①低注入速度;②中等注入速度;③高注入速度;据 Fredd and Fogler(1998)

的距离时,这两个孔隙将合并成一个孔隙.Tansey (2014)、Tansey and Balhoff(2016)根据真实岩心的数据建立了三维孔隙网络模型来模拟碳酸盐岩酸化反应,该模型对之前的网络模型进行了改进,提出了一种孔隙合并的算法,允许孔隙被完全溶解;还提出了一个孔隙尺度的传质系数而不再使用宏观的传质系数.但是,与岩心实验的结果相比,数值计算出的最优注入速度及突破体积均偏大.Tansey(2014)给出的解释是因为模拟计算用的岩心未达到表征单元体的大小.

网络模型可以用来预测不同的酸蚀形态并定性地解释实验中观察到的最优注入速度现象.但是由于网络模型的尺度限制,将其应用于岩心尺度的问题时就会产生巨大的计算量,更别说应用于油藏尺度了.

1.2 毛细管模型

毛细管模型用一个圆柱形的毛细管表示蚓孔来研究酸液漏失、反应动力等参数对蚓孔生长速度的影响(Hung *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 1993; Huang *et al.*, 1997; Gdanski, 1999; Buijse, 2000).在毛细管模型中,假设已经形成了一条圆柱形的蚓孔,运用此模型研究蚓孔内酸液的运输和反应机理.由于该模型预先设置了蚓孔的形状,所以不能用来解释蚓孔的初始生成,也不能用来解释均匀溶蚀和面溶蚀.另外,将此模型应用于岩心尺度时,需要考虑蚓孔的密度,也就是将毛细管模型升级为毛管束模型,该模型可以用来研究蚓孔间的相互作用,研究表明,控制区内多个蚓孔的生长速度与它们之间的间隔距离有关(Huang *et al.*, 1999; Buijse, 2000).由于毛细管模型结构比较简单,使得其在研究蚓孔内部的反应、扩散、对流机理上具有一定的优

势.但是,同样因为毛细管模型比较简单,所以其计算结果与实际情况出入较大.不过,这类模型通过定义无因次参数,为研究不同参数对酸蚀模式的影响提供了一个好的思路(Maheshwari *et al.*, 2013).

2 岩心尺度反应流动模拟

酸液在岩心中的流动满足达西定律,因此岩心尺度的模型又可称为达西尺度模型或连续尺度模型.与孔隙尺度描述酸蚀机理不同,连续模型从达西尺度描述酸在多孔介质中的流动与传输,并通过经验公式来计算孔隙尺度的参数.Liu *et al.*(1997)将化学反应模型及传质输运模型进行耦合,最早提出了描述酸岩反应流的连续模型.但是,他们的模型中没有考虑传质作用对反应速度的影响,其模型只适用于动力控制反应阶段.随后, Golfier *et al.*(2002)给出了适用于动力控制反应的双尺度模型,并数值再现了实验中观察到的溶蚀模式,但是其模型却不能描述传质控制阶段的反应.基于以上工作, Panga *et al.*(2005)通过定义两个浓度系数,给出了既适用于传质控制阶段又适用于动力控制阶段反应的连续模型,他们将数值模拟的结果与岩心实验的结果进行对比,二者取得了较好的一致性.图2所示为基于 Panga *et al.*(2005)模型模拟出的溶蚀模式与岩心实验得到的溶蚀模式对比图.通过研究岩石非均质性、注入酸强度、注入速度、传质系数等参数对溶蚀动态的影响, Panga *et al.*(2005)认识到溶蚀模式的不同是受注入酸的对流速度、扩散速度以及与岩石的反应速度共同决定的;对流扩散的传质速度与反应速度的量级一致时,酸蚀岩石会生成蚓孔溶蚀模式,他们还根据量纲分析方法给出了一个计算最优注入速度的公式.

因为在真实油藏条件下,井筒周围流体的流动是径向的,这就导致在离井筒越远的地方,流体流动速度越慢.所以线性流动条件下得到的结果并不能简单地拓展升级到油藏条件下.2007年, Kalia and Balakotaiah(2007)将 Panga *et al.*(2005)提出的双尺度模型从线性流动模式拓展到了径向流动模式,并给出了适用于径向流条件的最优注入速度计算公式.此后,该模型被大量地应用于碳酸盐岩酸岩反应流数值模拟,并被不断地拓展,用来研究不同参数对蚓孔生成及最优注入条件的影响.比较典型的如:不同的注入酸类型(牛顿流体和非牛顿流体)(Ratnakar *et al.*, 2012, 2013; Maheshwari *et al.*,

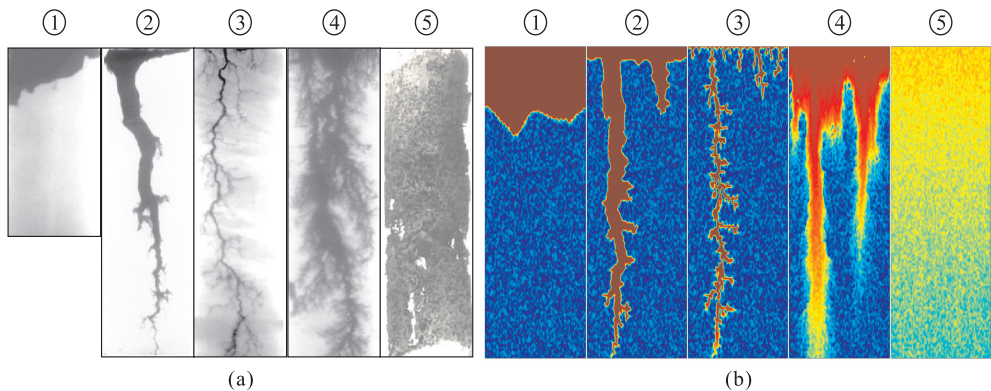


图 2 基于连续模型计算得到的溶蚀模式与岩心酸化实验得到的溶蚀模式对比

Fig.2 Comparison of dissolution patterns obtained from numerical simulations using continuum model and linear flow experiments
a.岩心实验结果,据 Fredd and Fogler(1999);b.数值模拟结果.溶蚀模式:①面溶蚀;②锥形溶蚀;③蚓孔;④分枝蚓孔;⑤均匀溶蚀

2014, 2015; Liu and Liu, 2016);不同的油藏非均质性(初始孔隙度服从均匀分布和正态分布)(Liu *et al.*, 2012, 2016);不同的完井方式(射孔完井和裸眼完井)(Kalia and Balakotaiah, 2010);不同的计算维数(二维和三维)(Maheshwari and Balakotaiah, 2013a, 2013b; Maheshwari *et al.*, 2013);不同的流体运动方程(达西流和非达西流)(Wu *et al.*, 2015; Kou *et al.*, 2016);不同的油藏温度(Kalia and Glasbergen, 2009, 2010)等.这些模型对指导油藏酸化施工提供了理论基础,Fredd and Miller (2000)、Golfier *et al.*(2002)、Panga *et al.*(2005)、Maheshwari *et al.*(2013)、Ghommam *et al.*(2015)等人对连续模型的应用及发展做了综述.

3 井筒尺度反应流动模拟

从井筒尺度来看,酸岩反应流生成的溶蚀模式受地层非均质性、注入速度、注入酸类型等条件的影响.目前为止,没有一种模型可以在这一尺度上对注入酸的反应流动进行精确地模拟.这一方面受限于目前的计算能力,另一方面是因为要想对注入油藏内的酸的反应流动进行模拟,需要已知井筒周围的孔隙分布及污染状态,这也是很困难的.常用的井筒尺度模型都是基于岩心酸化实验或岩心尺度的数值模拟结果,提取与尺寸无关的参数,进行尺度升级得到的,典型的如分形模型.Daccord *et al.*(1989)、Pichler *et al.*(1992)及 Frick *et al.*(1994)考虑单个蚓孔的分形性质提出的分形模型是一种连续模型,该模型假设岩石的溶解反应与单个毛细管的溶解反应相似,定义了一组无因次参数,如 Damkohler 数、

Peclet 数、酸化能力常数等来描述酸化反应的进程.分形几何是一种自相似的几何形态,这表明图形在扩大后同样的形态还会再出现.因此,根据以上想法,大的溶蚀结构会在分枝中以小的复制品的形式重现.这种复制形态随着不断放大至整个油藏而不断重复.Daccord *et al.*(1989)根据分形模型提出了灰岩酸化的现场设计方法,在这一方法中,酸蚀蚓孔的复杂性由分形维数描述.

需要注意的是,分形仅仅是蚓孔的部分性质,将酸液径向地注入井筒时还存在着注入酸的滤失效应以及蚓孔之间的竞争,所有这些都影响蚓孔的拓展与最优注入速度的值.因此,建立在油藏尺度上能精确描述流体流动及化学反应的模型,发展高效的数值计算方法仍是碳酸盐岩油藏酸岩反应流动模拟亟需解决的问题.

4 酸岩反应流动模拟最新研究进展

近期,笔者基于 Panga *et al.*(2005)提出的连续模型,对碳酸盐岩油藏酸岩反应流动模拟进行了研究,主要工作包括:(1)给出了基于非结构网格的通用算法(姚军等,2017);(2)将模型拓展至了三维非达西流条件下的反应流动;(3)建立了适用于裂缝性碳酸盐岩油藏的酸岩反应流模型(Liu *et al.*, 2017a).下面分别对这些研究成果及其应用进行概述.

4.1 基于非结构网格的通用算法

图 3 为使用基于非结构网格的通用算法计算出的二维径向流条件下的溶蚀模式.与 Kalia 使用基于径向网格的计算结果相比(Kalia and Balakotaiah, 2007),图 3 中的蚓孔分形性质与岩心实验的结果更

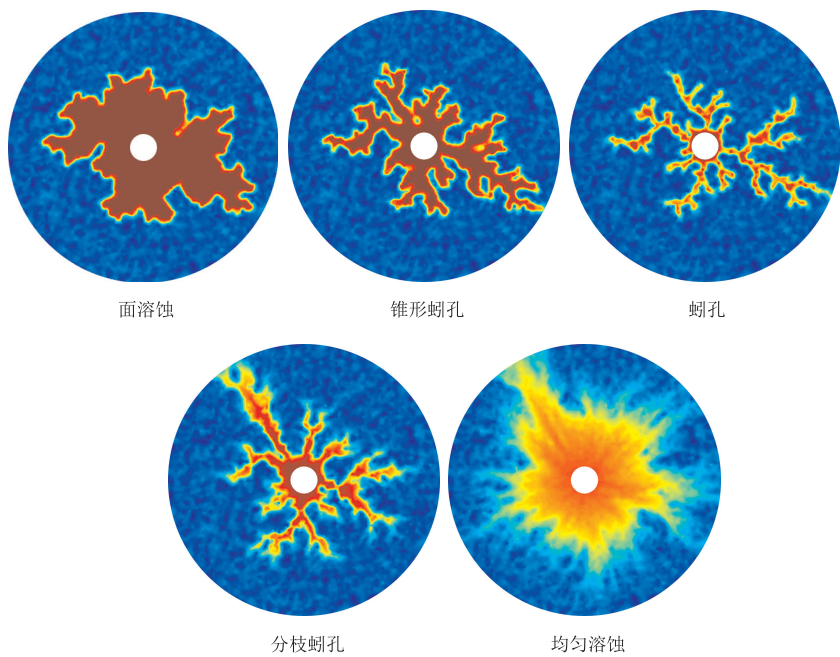


图 3 基于非结构网格计算得到的二维径向流条件下的不同溶蚀模式

Fig.3 Radial dissolution patterns obtained from the numerical simulation using the unstructured grid method

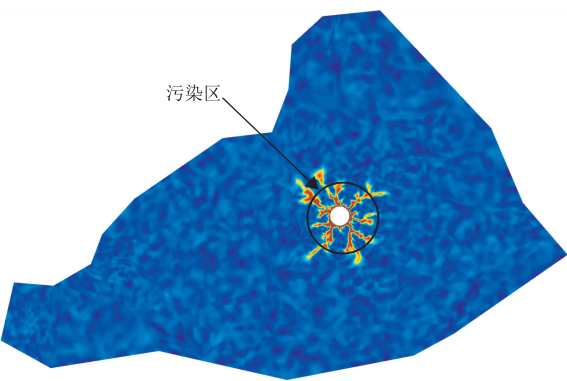


图 4 应用基于非结构网格的通用算法计算复杂边界形状条件下的反应溶蚀

Fig.4 The simulation of reactive flow in carbonate rock with complex geometry using the general method based on unstructured grid

接近.这是因为使用径向网格时,限制了注入酸只能沿着半径方向或圆周方向流动,从而使得蚓孔只能沿着这两个方向拓展,降低了蚓孔生长的随机性,而基于非结构网格的通用算法就避免了这个问题.此外,非结构网格可以处理任意复杂的几何形状,大大增加了酸岩反应流模型的应用范围.图 4 为任意油藏形状下反应流模型计算出的蚓孔溶蚀模式,而基于结构网格的计算方法则无法处理这类问题.

4.2 三维非达西流条件下的反应流模拟

注入酸溶蚀地层后会大大地改变反应区域的孔隙度及渗透率.当反应速度相对较高时,被溶蚀出的

渗流通道孔隙度甚至接近 1.此时,高渗通道内流体的流动速度很高,如需精确地描述被溶蚀区域内流体的流动,达西定律将不再合适.Wu *et al.* (2015)将连续模型中的运动方程改为了 Darcy-Brinkman-Forchheimer 方程,并给出了数值计算方法,但是其工作仅限于二维的情况.笔者将考虑高速非达西流的反应流模型拓展到了三维,并分析了考虑高速非达西对溶蚀模式及突破体积的影响.基于 Forchheimer 方程计算得到的溶蚀模式如图 5 所示,研究结果表明:考虑高速非达西计算得到的蚓孔分枝性更强,且达到同样的渗透率改善效果,需用的酸液体积更大.

4.3 裂缝性碳酸盐岩油藏酸岩反应流模拟

碳酸盐岩油藏的一大特征就是非均质性较强,并发育有天然裂缝或溶洞.天然裂缝具有低孔隙度高渗透率的特征,因此裂缝的分布会主导流体的流动,从而影响碳酸盐岩酸液反应最终的溶蚀结构.在连续尺度上,目前常用的描述裂缝性碳酸盐岩酸岩反应流的模型主要有 3 类:(1)单裂缝模型(Hanna and Rajaram, 1998; Hill *et al.*, 2001; Dong *et al.*, 2002a; O'Brien *et al.*, 2003; Detwiler and Rajaram, 2007; Szymczak and Ladd, 2009; Upadhyay *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2016);(2)裂缝网络模型(Dong *et al.*, 2001, 2002b);(3)拟裂缝模型(Kalia and Balakotaiah, 2009; Yuan *et al.*,

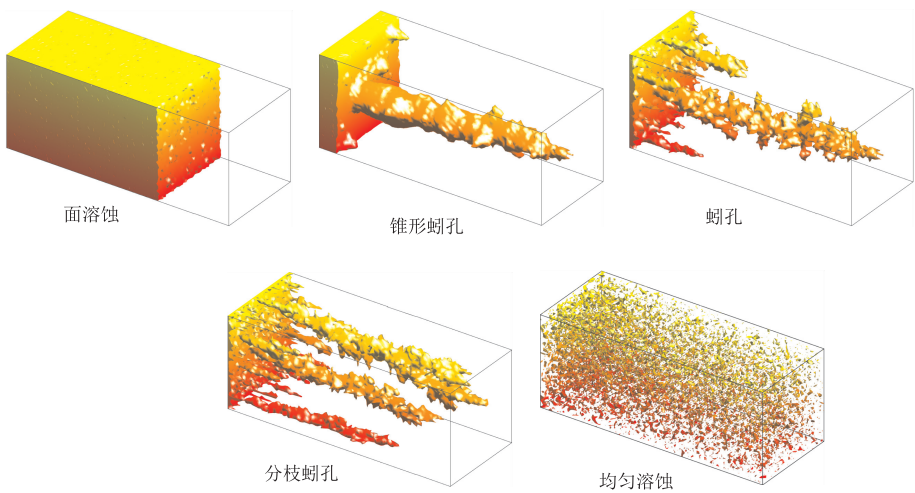


图 5 基于 Forchheimer 方程计算得到的三维条件下的不同溶蚀模式

Fig.5 3-D dissolution patterns obtained from simulation using Forchheimer equation

2016).单裂缝模型只研究单条裂缝内的反应与流动.通过将两个光滑或者粗糙的平面连在一起表示裂缝边界,两个平面之间的距离表示裂缝开度,基于裂缝内流体流动及传质传输的物质平衡方程,以及化学反应动力学方程建立模型,研究裂缝内流体的流动与反应对裂缝结构的影响.这类模型为理论研究裂缝性介质内的反应流提供了基础,但由于只含一条裂缝,并不能用来模拟真实地层中的复杂裂缝情况.

裂缝网络模型是单裂缝模型的升级,通过将多孔介质中连通的裂缝提取出来,表示整个多孔介质,并假设注入酸只在裂缝内流动,忽略基岩内的流动,但考虑裂缝向基岩的滤失.显然,裂缝网络模型忽略了那些未与井筒直接连通的裂缝,导致计算出的溶蚀模式与实际情况存在出入.另一方面,裂缝网络模型需要提前确定裂缝的分布,且注入酸只能沿着裂缝分布的方向进行反应流动,因此该模型无法描述蚓孔的多分枝性.但是,该模型为将反应流模型从岩心尺度升级到油藏尺度提供了一个思路,对实际油藏的酸化施工具有指导意义.

在拟裂缝模型中,裂缝被看作是具有高孔隙度、高渗透率的基质,裂缝开度通过网格尺寸大小来表示.这类模型与未考虑裂缝的反应流模型本质上是相同的,只不过是在初始物理参数的时候增加了一些高渗通道.由于裂缝开度尺寸相对较小,且至少需要一个网格来表示,因此这类模型对网格尺寸要求较高,当裂缝分布较复杂时会大大增加计算量.这一限制使得拟裂缝模型只能用来研究高渗通道的存在对溶蚀结构及注入体积的影响,而无法处理实际

油藏中出现的复杂裂缝.

鉴于目前裂缝性碳酸盐岩反应流模型应用上存在的限制,本课题组基于连续模型在达西尺度上描述流体流动与反应,通过经验公式计算孔隙尺度物理参数的建模思想,结合离散裂缝模型显式处理裂缝的方法(Yao *et al.*, 2010; 姚军等, 2010; Huang *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2016),建立了适用于裂缝性碳酸盐岩油藏的酸岩反应流模型.该模型同时考虑了裂缝和基质内的流动以及两者之间的窜流,且适用于任意复杂分布的裂缝.数值计算时将裂缝显式处理,不需要对裂缝周围进行网格加密,极大地减少了计算量.基于该模型计算的线性及径向流动条件下的溶蚀结构如图 6 所示.研究表明,裂缝的存在会影响最终溶蚀结构,使得蚓孔沿着裂缝分布的方向生长.但对于相同的酸-岩系统来说,是否存在裂缝并不影响酸化时的最优注入速度.

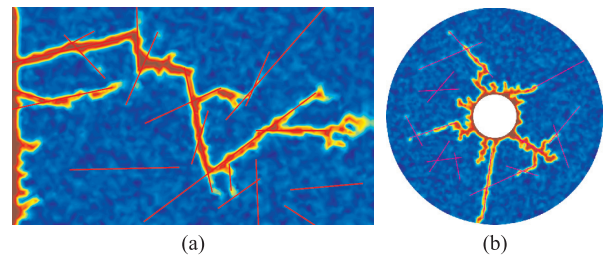


图 6 盐酸以最优速度注入裂缝性碳酸盐岩模拟生成的蚓孔结构

Fig.6 Wormhole structures obtained from the simulation of injecting HCl into carbonate rocks at the optimum injection rate

a.线性流;b.径向流

5 结论及展望

碳酸盐岩油藏酸化反应流动模拟的最终目的是指导油藏酸化施工。孔隙尺度的模型揭示了酸岩反应流动的机理,且能定性地模拟出岩心酸化实验中出现的溶蚀模式,其研究结果为在连续尺度上研究酸岩反应流提供了基础。但由于其计算尺度太小,得到的定量参数与岩心酸化实验结果存在出入。

岩心尺度的模型无论在溶蚀模式还是注入酸突破体积的预测上都与实验结果取得了良好的一致性,但在处理真实地层条件时仍存在着一些问题,是一项极具挑战性的研究,下一步应该从以下几个方面开展研究工作:(1)综合考虑地应力的影响。裂缝被溶蚀后结构发生改变,打破了原有的应力平衡(钱海涛等,2014),进一步影响到裂缝的分布结构,改变了注入酸的流动方向,从而影响最终的溶蚀结构。在建立反应流模型时应综合考虑地应力的影响;(2)精细地描述流体在裂缝及溶蚀通道内的流动。当酸岩反应生成蚓孔时,部分孔隙被完全溶蚀,流体在蚓孔内的流动接近管流。此时应使用 N-S 方程来描述流体的流动,达西定律计算的结果将不再精确;(3)模型的尺度升级。碳酸盐岩酸岩反应流动模拟的最终目的是为了指导油藏酸化施工生产,以期使用最少的注入酸达到最大程度改善地层的效果。因此要得到适用于油藏尺度的施工参数,需要对模型进行尺度升级,结合现场资料,建立描述油藏尺度酸岩反应流的模型。

References

Bastami, A., Pourafshary, P., 2016. Development of a New Model for Carbonate Matrix Acidizing to Consider the Effects of Spent Acid. *Journal of Energy Resources Technology*, 138(5):052905. doi:10.1115/1.4032728

Bekibayev, T. T., Beisembetov, I. K., Assilbekov, B. K., et al., 2015. Study of the Impact of Reduced Permeability due to Near-Wellbore Damage on the Optimal Parameters of the Matrix Acidizing in Carbonate Rocks. SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition, Assilbekov. doi:10.2118/177372-ms

Budek, A., Szymczak, P., 2012. Network Models of Dissolution of Porous Media. *Physical Review E*, 86(5):056318. doi:10.1103/physreve.86.056318

Buijse, M. A., 2000. Understanding Wormholing Mechanisms Can Improve Acid Treatments in Carbonate Formations. *SPE Production & Facilities*, 15(3):168-175.

doi:10.2118/65068-pa

Cohen, C. E., Ding, D. Y., Quintard, M., et al., 2007. A New Matrix Acidizing Simulator Based on a Large Scale Dual Porosity Approach. European Formation Damage Conference, Scheveningen. doi:10.2118/107755-ms

Cohen, C. E., Dong, C. L., Quintard, M., et al., 2008. From Pore Scale to Wellbore Scale: Impact of Geometry on Wormhole Growth in Carbonate Acidization. *Chemical Engineering Science*, 63(12):3088-3099. doi:10.1016/j.ces.2008.03.021

Daccord, G., Touboul, E., Lenormand, R., 1989. Carbonate Acidizing: Toward a Quantitative Model of the Wormholing Phenomenon. *SPE Production Engineering*, 4(1):63-68. doi:10.2118/16887-pa

Deng, H., Molins, S., Steefel, C., et al., 2016. A 2.5D Reactive Transport Model for Fracture Alteration Simulation. *Environmental Science & Technology*, 50(14):7564-7571. doi:10.1021/acs.est.6b02184

Detwiler, R. L., Rajaram, H., 2007. Predicting Dissolution Patterns in Variable Aperture Fractures: Evaluation of an Enhanced Depth-Averaged Computational Model. *Water Resources Research*, 43(4):W04403. doi:10.1029/2006wr005147

Dong, C. L., Zhu, D., Hill, A. D., 2001. Acid Penetration in Natural Fracture Networks. SPE European Formation Damage Conference, Hague. doi:10.2118/68927-ms

Dong, C. L., Zhu, D., Hill, A. D., 2002a. Acidizing in Naturally Fractured Carbonate Reservoirs. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa. doi:10.2118/75252-ms

Dong, C. L., Zhu, D., Hill, A. D., 2002b. Modeling of the Acidizing Process in Naturally Fractured Carbonates. *SPE Journal*, 7(4):400-408. doi:10.2118/81816-pa

Economides, M. J., Nolte, K. G., 2000. Reservoir Stimulation. Wiley, Chichester.

Fang, Y., Xie, S. Y., He, Z. L., et al., 2016. Thin Section Based Geochemical Dissolution Experiments of Ooid Carbonates. *Earth Science*, 41(5):779-791 (in Chinese with English abstract).

Fredd, C. N., Fogler, H. S., 1998. Influence of Transport and Reaction on Wormhole Formation in Porous Media. *AIChE Journal*, 44(9):1933-1949. doi:10.1002/aic.690440902

Fredd, C. N., Fogler, H. S., 1999. Optimum Conditions for Wormhole Formation in Carbonate Porous Media: Influence of Transport and Reaction. *SPE Journal*, 4(3):196-205. doi:10.2118/56995-pa

Fredd, C. N., Miller, M. J., 2000. Validation of Carbonate Matrix Stimulation Models. SPE International Symposium

- on Formation Damage Control, Lafayette. doi: 10.2118/58713—ms
- Frick, T. P., Kurmayr, M., Economides, M. J., 1994. An Improved Modeling of Fractal Patterns in Matrix Acidizing and Their Impact on Well Performance. *SPE Production & Facilities*, 9(1): 61—68. doi: 10.2118/23789—pa
- Gdanski, R., 1999. A Fundamentally New Model of Acid Wormholing in Carbonates. SPE European Formation Damage Conference, Hague. doi: 10.2118/54719—ms
- Ghommam, M., Zhao, W. S., Dyer, S., et al., 2015. Carbonate Acidizing: Modeling, Analysis, and Characterization of Wormhole Formation and Propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 131: 18—33. doi: 10.1016/j.petrol.2015.04.021
- Golfier, F., Zarcone, C., Bazin, B., et al., 2002. On the Ability of a Darcy-Scale Model to Capture Wormhole Formation during the Dissolution of a Porous Medium. *Journal of Fluid Mechanics*, 457: 213—254. doi: 10.1017/s0022112002007735
- Hanna, R. B., Rajaram, H., 1998. Influence of Aperture Variability on Dissolutional Growth of Fissures in Karst Formations. *Water Resources Research*, 34(11): 2843—2853. doi: 10.1029/98wr01528
- Hill, A. D., Zhu, D., Dong, C., Dong, C. L., et al., 2001. Computer Model Predicts Matrix Acidizing of Naturally Fractured Carbonate. *Journal of Petroleum Technology*, 53(10): 20—25. doi: 10.2118/1001—0020—jpt
- Hoefner, M. L., Fogler, H. S., 1988. Pore Evolution and Channel Formation during Flow and Reaction in Porous Media. *AIChE Journal*, 34(1): 45—54. doi: 10.1002/aic.690340107
- Huang, T. P., Hill, A. D., Schechter, R. S., 1997. Reaction Rate and Fluid Loss: The Keys to Wormhole Initiation and Propagation in Carbonate Acidizing. *SPE Journal*, 5(3): 287—292. doi: 10.2118/37312—ms
- Huang, T. P., Zhu, D., Hill, A. D., 1999. Prediction of Wormhole Population Density in Carbonate Matrix Acidizing. SPE European Formation Damage Conference, Hague. doi: 10.2118/54723—ms
- Huang, Z. Q., Yan, X., Yao, J., 2014. A Two-Phase Flow Simulation of Discrete-Fractured Media Using Mimetic Finite Difference Method. *Communications in Computational Physics*, 16(3): 799—816. doi: 10.4208/cicp.050413.170314a
- Hung, K. M., Hill, A. D., Sepehrnoori, K., 1989. A Mechanistic Model of Wormhole Growth in Carbonate Matrix Acidizing and Acid Fracturing. *Journal of Petroleum Technology*, 41(1): 59—66. doi: 10.2118/16886—pa
- Izgec, O., Zhu, D., Hill, A. D., 2010. Numerical and Experimental Investigation of Acid Wormholing during Acidization of Vuggy Carbonate Rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 74(1—2): 51—66. doi: 10.1016/j.petrol.2010.08.006
- Kalia, N., 2008. Modeling and Analysis of Reactive Dissolution of Carbonate Rocks (Dissertation). University of Houston, Houston.
- Kalia, N., Balakotaiah, V., 2007. Modeling and Analysis of Wormhole Formation in Reactive Dissolution of Carbonate Rocks. *Chemical Engineering Science*, 62(4): 919—928. doi: 10.1016/j.ces.2006.10.021
- Kalia, N., Balakotaiah, V., 2009. Effect of Medium Heterogeneities on Reactive Dissolution of Carbonates. *Chemical Engineering Science*, 64(2): 376—390. doi: 10.1016/j.ces.2008.10.026
- Kalia, N., Balakotaiah, V., 2010. Wormholing in Perforated Completions. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette. doi: 10.2118/127347—ms
- Kalia, N., Glasbergen, G., 2009. Wormhole Formation in Carbonates under Varying Temperature Conditions. 8th European Formation Damage Conference, Scheveningen. doi: 10.2118/121803—ms
- Kalia, N., Glasbergen, G., 2010. Fluid Temperature as a Design Parameter in Carbonate Matrix Acidizing. SPE Production and Operations Conference and Exhibition, Tunisia. doi: 10.2118/135654—ms
- Kang, Q. J., Lichtner, P. C., Viswanathan, H. S., et al., 2009. Pore Scale Modeling of Reactive Transport Involved in Geologic CO₂ Sequestration. *Transport in Porous Media*, 82(1): 197—213. doi: 10.1007/s11242—009—9443—9
- Kou, J. S., Sun, S. Y., Wu, Y. Q., 2016. Mixed Finite Element-Based Fully Conservative Methods for Simulating Wormhole Propagation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 298: 279—302. doi: 10.1016/j.cma.2015.09.015
- Liu, M., Zhang, S. C., Mou, J. Y., 2012. Effect of Normally Distributed Porosities on Dissolution Pattern in Carbonate Acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 94—95: 28—39. doi: 10.1016/j.petrol.2012.06.021
- Liu, M., Zhang, S. C., Mou, J. Y., et al., 2013. Wormhole Propagation Behavior under Reservoir Condition in Carbonate Acidizing. *Transport in Porous Media*, 96(1): 203—220. doi: 10.1007/s11242—012—0084—z
- Liu, N. Z., Liu, M., 2016. Simulation and Analysis of Wormhole Propagation by VES Acid in Carbonate Acidizing.

- Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138: 57—65. doi: 10.1016/j.petrol.2015.12.011
- Liu, P. Y., Yao, J., Couples, G. D., et al., 2017a. Modeling and Simulation of Wormhole Formation during Acidization of Fractured Carbonate Rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 154: 284—301. doi: 10.1016/j.petrol.2017.04.040
- Liu, P. Y., Yao, J., Couples, G. D., et al., 2017b. Numerical Modelling and Analysis of Reactive Flow and Wormhole Formation in Fractured Carbonate Rocks. *Chemical Engineering Science*, 172: 143—157. doi: 10.1016/j.ces.2017.06.027
- Liu, P. L., Xue, H., Zhao, L. Q., et al., 2016. Simulation of 3D Multi-Scale Wormhole Propagation in Carbonates Considering Correlation Spatial Distribution of Petrophysical Properties. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 32: 81—94. doi: 10.1016/j.jngse.2016.04.014
- Liu, X. H., Ormond, A., Bartko, K., et al., 1997. A Geochemical Reaction-Transport Simulator for Matrix Acidizing Analysis and Design. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 17 (1—2): 181—196. doi: 10.1016/S0920-4105(96)00064-2
- Maheshwari, P., Balakotaiah, V., 2013a. 3D Simulation of Carbonate Acidization with HCl; Comparison with Experiments. SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma. doi: 10.2118/164517—ms
- Maheshwari, P., Balakotaiah, V., 2013b. Comparison of Carbonate HCl Acidizing Experiments with 3D Simulations. *SPE Production & Operations*, 28(4): 402—413. doi: 10.2118/164517—pa
- Maheshwari, P., Maxey, J. E., Balakotaiah, V., 2014. Simulation and Analysis of Carbonate Acidization with Gelled and Emulsified Acids. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi. doi: 10.2118/171731—ms
- Maheshwari, P., Maxey, J. E., Balakotaiah, V., 2015. Reactive-Dissolution Modeling and Experimental Comparison of Wormhole Formation in Carbonates with Gelled and Emulsified Acids. *SPE Production & Operations*, 31(2): 103—119. doi: 10.2118/171731—pa
- Maheshwari, P., Ratnakar, R. R., Kalia, N., et al., 2013. 3-D Simulation and Analysis of Reactive Dissolution and Wormhole Formation in Carbonate Rocks. *Chemical Engineering Science*, 90: 258—274. doi: 10.1016/j.ces.2012.12.032
- Menke, H. P., Bijeljic, B., Andrew, M. G., et al., 2015. Dynamic Three-Dimensional Pore-Scale Imaging of Reaction in a Carbonate at Reservoir Conditions. *Environmental Science & Technology*, 49(7): 4407—4414. doi: 10.1021/es505789f
- O'Brien, G. S., Bean, C. J., McDermott, F., 2003. Numerical Investigations of Passive and Reactive Flow through Generic Single Fractures with Heterogeneous Permeability. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3—4): 271—284. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00342-X
- Panga, M. K. R., Balakotaiah, V., Ziauddin, M., 2002. Modeling, Simulation and Comparison of Models for Wormhole Formation during Matrix Stimulation of Carbonates. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio. doi: 10.2118/77369—ms
- Panga, M. K. R., Ziauddin, M., Balakotaiah, V., 2005. Two-Scale Continuum Model for Simulation of Wormholes in Carbonate Acidization. *AIChE Journal*, 51(12): 3231—3248. doi: 10.1002/aic.10574
- Panga, M. K. R., Ziauddin, M., Gandikota, R., et al., 2004. A New Model for Predicting Wormhole Structure and Formation in Acid Stimulation of Carbonates. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette. doi: 10.2118/86517—ms
- Pichler, T., Frick, T. P., Economides, M. J., et al., 1992. Stochastic Modeling of Wormhole Growth in Carbonate Acidizing with Biased Randomness. European Petroleum Conference, Cannes. doi: 10.2118/25004—ms
- Qian, H. T., Sun, Q., Wang, S. J., 2014. Effects of Geo-Stress on Carbonate Dissolution and Karst Evolution. *Earth Science*, 39(7): 896—904 (in Chinese with English abstract).
- Ratnakar, R. R., Kalia, N., Balakotaiah, V., 2012. Carbonate Matrix Acidizing with Gelled Acids: An Experiment-Based Modeling Study. SPE International Production and Operations Conference & Exhibition, Doha. doi: 10.2118/154936—ms
- Ratnakar, R. R., Kalia, N., Balakotaiah, V., 2013. Modeling, Analysis and Simulation of Wormhole Formation in Carbonate Rocks with in Situ Cross-Linked Acids. *Chemical Engineering Science*, 90(10): 179—199. doi: 10.1016/j.ces.2012.12.019
- Safari, A., Dowlatabad, M. M., Hassani, A., et al., 2016. Numerical Simulation and X-Ray Imaging Validation of Wormhole Propagation during Acid Core-Flood Experiments in a Carbonate Gas Reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30: 539—547. doi: 10.1016/j.jngse.2016.02.036
- Szymczak, P., Ladd, A. J. C., 2009. Wormhole Formation in Dissolving Fractures. *Journal of Geophysical Research*, 114(B6): 258—266. doi: 10.1029/2008JB006122
- Tabasy, M., Rashidi, F., 2015. A Qualitative Simulation of a

- Face Dissolution Pattern in Acidizing Process Using Rotating Disk Apparatus for a Carbonate Gas Reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26: 1460—1469. doi: 10.1016/j.jngse.2015.08.014
- Tansey, J., 2014. Pore-Network Modeling of Carbonate Acidization. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Amsterdam. doi: 10.2118/173472—stu
- Tansey, J., Balhoff, M. T., 2016. Pore Network Modeling of Reactive Transport and Dissolution in Porous Media. *Transport in Porous Media*, 113(2): 303—327. doi: 10.1007/s11242—016—0695—x
- Upadhyay, V. K., Szymczak, P., Ladd, A. J. C., 2015. Initial Conditions or Emergence: What Determines Dissolution Patterns in Rough Fractures? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(9): 6102—6121. doi: 10.1002/2015jb012233
- Wang, Y., Hill, A. D., Schechter, R. S., 1993. The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing of Carbonate Formations. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston. doi: 10.2118/26578—ms
- Wang, Y. Y., Yao, J., Huang, Z. Q., 2012. Discrete Medium Modeling Method for Fractured-Vuggy Carbonate Reservoir. *Xinjinag Petroleum Geology*, 33(2): 225—229 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. Q., Salama, A., Sun, S. Y., 2015. Parallel Simulation of Wormhole Propagation with the Darcy-Brinkman-Forchheimer Framework. *Computers and Geotechnics*, 69: 564—577. doi: 10.1016/j.compgeo.2015.06.021
- Yan, X., Huang, Z. Q., Yao, J., et al., 2016. An Efficient Embedded Discrete Fracture Model Based on Mimetic Finite Difference Method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145: 11—21. doi: 10.1016/j.petrol.2016.03.013
- Yao, J., Huang, Z. Q., Li, Y. J., et al., 2010. Discrete Fracture-Vug Network Model for Modeling Fluid Flow in Fractured Vuggy Porous Media. International Oil and Gas Conference and Exhibition, Beijing, 96. doi: 10.2118/130287—ms
- Yao, J., Huang, Z. Q., Wang, Z. S., et al., 2010. Mathematical Model of Fluid Flow in Fractured Vuggy Reservoirs Based on Discrete Fracture-Vug Network. *Acta Petrolei Sinica*, 31(5): 15—20 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J., Liu, P. Y., Huang, Z. Q., et al., 2017. Analysis of Influencing Factors on the Optimum Stimulation Conditions of the Acidizing Treatment in Carbonate Reservoirs. *Scientia Sinica Technologica*, 47: 1—16 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, T., Ning, Y., Qin, G., 2016. Numerical Modeling and Simulation of Coupled Processes of Mineral Dissolution and Fluid Flow in Fractured Carbonate Formations. *Transport in Porous Media*, 114(3): 747—775. doi: 10.1007/s11242—016—0742—7

附中文参考文献

- 方畅, 谢淑云, 何治亮, 等, 2016. 基于岩石薄片的鲕粒碳酸盐岩地球化学溶蚀. *地球科学*, 41(5): 779—791.
- 钱海涛, 孙强, 王思敬, 2014. 地应力对碳酸盐岩溶解和岩溶发育的影响. *地球科学*, 39(7): 896—904.
- 王月英, 姚军, 黄朝琴, 2012. 缝洞型碳酸盐岩储集层离散介质模型的建模方法. *新疆石油地质*, 33(2): 225—229.
- 姚军, 黄朝琴, 王子胜, 等, 2010. 缝洞型油藏的离散缝洞网络流动数学模型. *石油学报*, 31(5): 15—20.
- 姚军, 刘丕养, 黄朝琴, 等, 2017. 碳酸盐岩油藏酸化施工最优注入条件影响因素分析. *中国科学: 技术科学*, 47: 1—16.