

CMG 软件天然裂缝模拟功能综述

与算例速查指南

1. 概述

天然裂缝性油藏中，裂缝系统提供了主要的渗流通道，而基质岩块则提供了主要的储集空间。这类“基质—裂缝”双重介质的流动行为与常规砂岩油藏有本质区别：生产过程中裂缝压力快速下降，基质中的流体则在压差驱动下缓慢向裂缝补给，形成典型的双重介质压力响应与产量特征。

CMG 三大模拟器均提供完整的天然裂缝模拟能力，但侧重点不同：

- **IMEX（黑油模拟器）**——裂缝性油藏黑油模拟的主力工具，模板库中提供超过 30 个系统的裂缝算例（mxfrf 系列），覆盖双孔隙、双渗透率、MINC、子区域（Subdomain）、复杂裂缝描述等全部建模方法；
- **GEM（组分模拟器）**——与 IMEX 共用同一套双重介质建模框架和关键字体系，适用于凝析气藏、注气、CCUS 等需要组分跟踪的裂缝性油藏；
- **STARS（热采及化学驱模拟器）**——除常规双重介质模型外，独家提供裂缝—地质力学耦合模拟能力（Barton-Bandis 裂缝模型、应力敏感裂缝渗透率、节理岩模型）以及离散裂缝网络（DFN）建模，适用于热采、地热及裂缝—应力耦合问题。

本材料第 2 章梳理 CMG 天然裂缝模拟的核心功能与适用场景，第 3 章对比三个模拟器的选型建议，第 4 章提供按应用需求组织的算例速查表，第 5 章说明如何在软件中快速定位这些算例。

2. 天然裂缝模拟的核心功能

2.1 双重介质模型家族

CMG 提供由简到繁的完整双重介质模型系列，可根据油藏特征和精度要求选择：

模型	关键字	物理描述	适用场景	代表算例
双孔隙度模型	*DUALPOR	基质块之间不直接连通，流体经"基质→裂缝→井"路径流动；裂缝是主要流动通道	裂缝高度发育、基质补给为主的裂缝性油藏（最常用）	mxfr003、 mxfr013、stfr001
双渗透率模型	*DUALPERM	在双孔隙基础上允许基质块之间直接流动（含垂向基质连通）	基质渗透率不可忽略的裂缝性油藏；底水/气顶锥进问题	mxfr002、 mxfr006、mxfr010
MINC 模型	*MINC	将基质块细分为多个嵌套壳层（多重相互作用连续体），精细刻画基质向裂缝的非稳态瞬态补给	压力瞬变、周期注采等强瞬态过程；地热裂缝储层	mxfr003、stfr002 (Pruess 地热问题)
子区域方法	SUBDOMAIN	每个基质块细分为若干层（如 SPE6 算例分 3 层），兼顾精度与计算量	需要比单基质块更精确、但不想承担 MINC 全部成本的场合	mxfr004、 mxfr005、mxfr027
VR 选项	VR Option	STARS 中的经典双重介质变体（Kazimi 问题、Chen 数据集验证）	STARS 常规裂缝建模	stfr004、stfr005

选型经验：绝大多数裂缝性油藏生产模拟从双孔隙度模型入手即可；当基质具有一定渗透能力（如致密油藏基质向裂缝、裂缝向井的逐级补给）或存在明显锥进时，改用双渗透率模型；需要精确描述基质内部瞬态扩散/补给时（如吞吐、压力恢复解释），再升级为 MINC 或子区域方法。

2.2 基质—裂缝传输函数与形状因子

基质与裂缝之间的流体交换强度由传输函数（transfer function）控制，其核心是形状因子（shape factor）。CMG 支持多种形状因子模型与自定义方式：

- **Warren-Root / Kazemi 模型**——经典拟稳态传输模型，CMG 双重介质模型的默认基础；

- **Gilman-Kazemi (GK) 形状因子**——改进的拟稳态形状因子，支持仅指定某一方向（如仅 J 方向）的裂缝间距，兼容空裂缝块（null fracture blocks），见 mxfr008、mxfr009、mxfr011、mxfr012、mxfr014、mxfr016 等；
- **自定义传输系数**——通过 *SIGMAMF / *KAVMF 直接定义基质—裂缝传输系数（mxfr028、stgro093），或通过 *SHAPE 选项族（*K-HARMONIC、*PI2、*KX、*K-AV2）选择不同的有效传输几何平均方式（stgro041、stgro042、stgro050、stgro080、stgro081）；
- **传输修正与再渗吸**——*TRANSD 关键字可调整基质—裂缝传输关系及再渗吸（re-infiltration）高度，典型应用是厚层裂缝性油藏中的气油重力驱替（GOGD）过程（mxfr029）；
- **裂缝孔体积截止**——*PVCUTFR / *PVCUTRG-FR 用于剔除孔体积过小的裂缝网格，避免数值困难（mxfr024、stgro078、stgro096）。

2.3 复杂裂缝系统的描述方法

对于压裂裂缝、裂缝网络等非均布裂缝，CMG 提供从“显式加密”到“模板化定义”的多层次手段：

- **LS-LR-DK 方法**（对数间距网格 + 局部加密 + 双渗透率）——在井周用对数间距加密的局部加密网格（LGR）显式刻画高导流裂缝，配合双渗透率描述基质向裂缝的补给；mxfr019 展示了页岩气藏（基质 0.0001 mD、裂缝 4000 mD）压裂裂缝网络的建模，裂缝中考虑非达西流动；
- **平面裂缝模板**——*PLNRFRAC_TEMPLATE / *PLNRFRAC 结合块组（blockgroups）和 REFINE INNERWIDTH，可用极少关键字批量创建复杂/平面裂缝，大幅简化裂缝输入（mxfr022、mxfr023、mxfr025、mxfr026、mxfr030）；
- **MINC-DK 选项**——MINC 与双渗透率耦合，用等效连续体方式模拟加密单重介质裂缝模型（mxfr021）；
- **混合双重介质网格**——同一模型中部分区域用 DUALPERM、其余区域用 MINC（mxfr031）；
- **时变裂缝参数**——在时变数据段（recurrent data）中定义裂缝渗透率与非达西校正，模拟后期压裂、重复压裂改造（mxfr020）；
- **离散裂缝网络 (DFN)**——STARS 支持在角点网格上显式定义离散裂缝网络，含跨区域连通的 DFN 及与 DUALPOR 的耦合（stgro089 ~ stgro092）；

- **断层/裂缝传导率**——*TRANSF 直接定义裂缝面或断层面的传导率，可与 DUALPOR、MINC、DUALPERM 及 SUBDOMAIN 组合使用（stgro028 ~ stgro031）。

2.4 裂缝—地质力学耦合（STARS 特色）

裂缝的导流能力对应力高度敏感，STARS 的地质力学模块提供了裂缝性储层独有的耦合模拟能力：

- **Barton-Bandis 裂缝模型**——描述裂缝开度/导流能力随有效应力变化的经典节理模型，适用于双孔隙/双渗透率系统（stgeo026、stgeo030、stgeo060、stgeo089）；
- **应力敏感裂缝渗透率**——*GPERMNEX/Z（裂缝）与 *GPERMNEX/Z_MT（基质）渗透率倍数表，使裂缝/基质渗透率随法向有效应力变化（stgeo080、stgeo081）；*GROCKTAB 提供应力相关的孔渗/传导率倍数表（stgeo091、stgeo092）；
- **节理岩模型**——*ROCKJOINT 将节理发育岩体等效为各向异性弹性体，报告等效杨氏模量与泊松比（stgeo082、stgeo083、stgeo085）；
- **剪切与张性裂缝判别**——模拟注采过程中裂缝的剪切/张性激活（stgeo093）。

2.5 井、初始化与结果输出相关功能

- **基质/裂缝射孔限定符**——射孔可分别指定与基质或裂缝系统连通（stwwm037）；
- **裂缝模型初始化**——支持重力平衡初始化与用户自定义初始化（USER_INPUT，如 mxfr006、mxfr011 系列）；
- **裂缝系统的二进制输入/输出**——*BINARY_DATA 支持天然裂缝模型（stsmo020、stsmo021；IMEX 侧对应 mxfr017、mxfr018）；
- **分区连通输出**——*SCONNECT 支持天然裂缝系统的分区连通性分析（verify79、verify80）。

3. 三个模拟器的选型建议

模拟器	裂缝模拟定位	典型应用	裂缝算例入口
IMEX	黑油体系裂缝性油藏的主力	裂缝性砂岩/碳酸盐岩油藏的水驱、枯竭开发、锥进分析、	mxfr001 ~ mxfr031、 mxhfr001

	工具，算例最系统、最全面	水平井优化	
GEM	与 IMEX 共用双重介质框架和关键字体系，增加组分/EOS 能力	裂缝性凝析气藏、注气开发、酸性气体、CCUS 等需要组分跟踪的裂缝储层	模板库与 IMEX 同构，建模关键字通用
STARS	热采/化学驱 + 裂缝；独家提供裂缝—地质力学耦合与 DFN	裂缝性稠油热采、地热裂缝储层、应力敏感裂缝、离散裂缝网络	stfrr001 ~ 006、stgeo 系列、stgro028 ~ 096

4. 算例速查表

下表按应用需求组织，便于“按需查例”。算例文件均为 CMG 官方模板库中随软件安装提供的完整数据集，文件头部注释包含模型描述（MODEL）、用途（USAGE）和详细说明。

4.1 IMEX / GEM（黑油与组分）

应用需求	算例文件	说明
双孔隙入门（MINC）	mxfr003.dat	10×10×1 油水两相，一组正交裂缝，全隐式；理解 MINC 的最佳起点
双渗透率入门	mxfr006.dat、 mxfr007.dat	平面双渗透率模型（GK 形状因子、用户自定义初始化）；mxfr007 为全隐式版本
锥进问题（径向网格）	mxfr002.dat、 mxfr010.dat	10×1×15 径向网格，带气顶裂缝性油藏，垂向基质连通的双渗透率模型
SPE6 标准对比（子区域法）	mxfr004.dat、 mxfr005.dat、 mxfr027.dat	基于 SPE 第六次对比题：枯竭/注气，基质块分 3 层；mxfr027 使用单调三次插值 Kr-Pc
GK 形状因子系列	mxfr008、mxfr009、 mxfr011、mxfr012、 mxfr014、mxfr016	覆盖双孔隙/双渗透率 × 空裂缝块 × 单方向裂缝间距等组合；mxfr015/016 为子区域法与双渗透率结果互验
自定义传输系数	mxfr028.dat	使用 *SIGMAMF 直接定义基质—裂缝传输系数
裂缝孔体积截止	mxfr024.dat	*PVCUTFR 关键字用法

重力驱替 (GOGD) 与再渗吸	mxfr029.dat	5×5×60 厚层模型, *TRANSD 调整再渗吸高度, 穿越三套页岩隔夹层
水平井开发裂缝性油藏	mxhfr001.dat	12×8×3, 底水裂缝油藏, 4 口直井与 1 口水平井分区对比, 含运行结果摘要
页岩气/压裂裂缝网络	mxfr019.dat	LS-LR-DK 方法: LGR 显式裂缝 + 双渗透率, 裂缝内非达西流, 基质 0.0001 mD
后期压裂/重复压裂	mxfr020.dat	在时变数据段中创建裂缝渗透率与非达西校正, 模拟井的后期压裂与再改造
平面/复杂裂缝快速定义	mxfr022、mxfr023、 mxfr025、mxfr026、 mxfr030	*PLNRFRAC_TEMPLATE/*PLNRFRAC + blockgroups + REFINE INNERWIDTH, 极大简化裂缝输入
MINC-DK 等效连续体	mxfr021.dat	MINC5 + TRANSD CON 1, 等效 9×9 LGR 单重介质裂缝模型
混合双重介质网格	mxfr031.dat	部分区域 DUALPERM、其余区域 MINC
二进制文件输入	mxfr017.dat、 mxfr018.dat	14×40×8 双孔隙度油藏的二进制输入测试

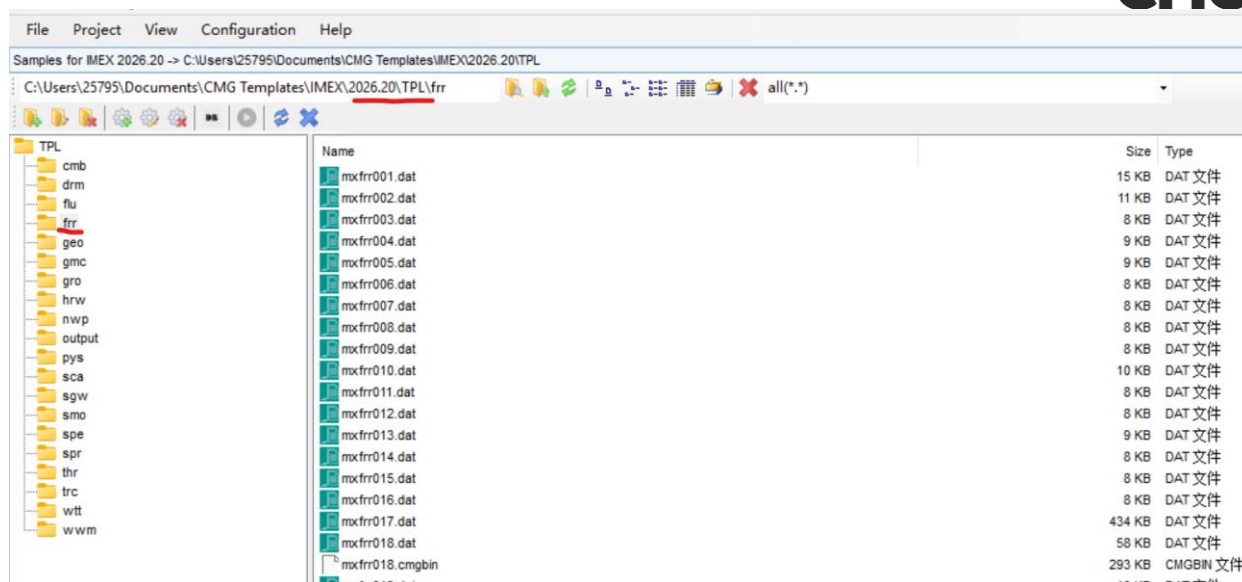
4.2 STARS (热采、化学驱与地质力学)

应用需求	算例文件	说明
经典双重介质入门	stfr001.dat ~ stfr006.dat	官方"裂缝性油藏"专题: Kazimi 双孔隙问题 (001)、Pruess 地热问题 MINC (002)、重力驱替双渗透率 (003)、VR 选项 (004/005)、SUBDOMAIN-DK (006)
传输/形状因子组合	stgro028 ~ 030、041 ~ 044、050、080、081、 093 ~ 096	*TRANSF 与 DUALPOR/MINC/DUALPERM 组合; *SHAPE 各选项; *TRANSMF; *TRANSD; *PVCUTFR/*PVCUTRG-FR 等
双重介质与网格加密	stgro045.dat、stgro046.dat	*DUALPOR 与多级 *REFINE、*PARASOL 的组合
离散裂缝网络 (DFN)	stgro089.dat ~ stgro092.dat	角点网格 DFN: 单重介质、与 DUALPOR 耦合、 *LAYERXYZ、跨区域连通 DFN

Barton-Bandis 裂缝模型	stgeo026.dat、 stgeo030.dat、 stgeo060.dat、 stgeo089.dat	双孔隙/双渗透率系统中裂缝导流能力随有效应力变化
应力敏感孔渗	stgeo080.dat、 stgeo081.dat、 stgeo091.dat、 stgeo092.dat	裂缝/基质渗透率随法向有效应力变化 (*GPERMNEX/Z、*GROCKTAB)
节理岩等效	stgeo082.dat、 stgeo083.dat、 stgeo085.dat	*ROCKJOINT 节理岩模型，报告等效弹性参数
剪切/张性裂缝	stgeo093.dat	注采过程中裂缝剪切与张性激活判别
压裂模拟（对比参考）	stgeo086 ~ 088、094、 stgro095	2D/3D 水力压裂扩展、多段压裂、LGR 中的压裂；与天然裂缝建模互为补充
射孔基质/裂缝限定	stwww037.dat	射孔分别连接基质或裂缝系统

5. 如何快速找到这些算例

算例位置。 上述 .dat 数据集随 CMG 软件安装包提供，位于安装目录下各模拟器的模板/示例库中（IMEX、GEM、STARS 各有独立目录）。在 Builder 中新建模型时可直接基于模板（Template）创建，也可直接用文本编辑器打开 .dat 文件查看完整关键字用法。



命名规律。 掌握命名前缀即可快速筛选：

- **mxfr###.dat**——IMEX 裂缝性油藏（fractured reservoir）专题，001 ~ 031 为完整系列；
- **stfr###.dat**——STARS 裂缝性油藏专题（001 ~ 006）；
- **stgeo###.dat**——STARS 地质力学专题（裂缝应力敏感、Barton-Bandis、节理岩在此系列）；
- **stgro###.dat**——STARS 网格选项专题（DFN、TRANSF、SHAPE、REFINE 组合等在此系列）；
- **stsmo / stwwm###.dat**——STARS 模拟器选项 / 井管理专题。

检索技巧。 在模板目录中对 .dat 文件全文搜索关键字是最快的定位方式：查双孔隙搜 "DUALPOR"，双渗透率搜 "DUALPERM"，MINC 搜 "MINC"，形状因子搜 "SHAPE" 或 "GK SHAPE FACTOR"，地质力学耦合搜 "Barton-Bandis"，离散裂缝网络搜 "DFN"。每个文件头部注释块的 MODEL 行概括了网格、相态、核心选项，USAGE 行说明用途，30 秒内即可判断是否符合需求。

上手路径建议。 初次接触 CMG 裂缝建模，建议按以下顺序学习：mxfr003（双孔隙 MINC 入门）→ mxfr006（双渗透率）→ mxfr008（GK 形状因子）→ mxfr029（GOGD 再渗吸）→ mxfr019/022（复杂裂缝与 LGR）。需要热采或应力耦合时，再转入 STARS 的 stfr 与 stgeo 系列。