CMG-IMEX 耦合地质力学算例模板技术指南

一、概述 3

二、CMG-IMEX 地质力学模块简介 3

2.1 什么是耦合地质力学模拟？ 3

2.2 IMEX 地质力学的核心特点 3

三、算例分类与详细介绍 4

3.1 基础入门算例（建议首先学习） 4

3.2 进阶应用算例 4

3.3 本构模型算例 5

3.4 裂缝与双重介质算例 6

3.5 特殊效应与高级功能 7

3.6 后处理与特殊技术 8

四、网格类型与耦合方式速查表 9

4.1 支持的网格类型组合 9

4.2 耦合级别设置 9

五、结果输出关键词速查 9

5.1 常用输出变量 9

5.2 地质力学专用输出 10

六、学习路径建议 10

阶段一：基础入门（1-2 周） 10

阶段二：本构模型（2-3 周） 10

阶段三：高级应用（2-3 周） 10

阶段四：专业专题（按需） 11

七、常见问题与解决方案 11
Q1: 计算不收敛怎么办？ 11
Q2: 如何选择合适的本构模型？ 11
Q3: 双网格系统如何设置？ 11
Q4: 如何验证地质力学计算结果？ 11
八、关键参考文献 11
九、附录：关键词索引 12
A. 网格与几何 12
B. 边界条件 12
C. 本构模型 12
D. 裂缝模型 13
E. 求解控制 13
十、总结 13

一、概述

本文档介绍 CMG-IMEX 油藏模拟器中**耦合地质力学模块（Coupled Geomechanical Option）**的算例模板（\\CMG Templates\IMEX\2025.40\TPL）。这些模板涵盖了从基础弹性模型到复杂弹塑性模型、从简单网格到双网格系统的各种应用场景，为油藏工程师和地质力学分析师提供了丰富的学习和参考资源。

二、CMG-IMEX 地质力学模块简介

2.1 什么是耦合地质力学模拟？

耦合地质力学模拟是指将**油藏流动模拟**与**岩石力学变形计算**相结合的高级数值模拟技术。在油气开采过程中，储层压力的下降或注入压力的增加会引起岩石骨架的变形，进而影响储层孔隙度、渗透率等关键参数。传统的油藏模拟假设岩石为刚体，而耦合地质力学模拟能够：

- **准确预测储层变形**（沉降、压实）
- **评估应力变化对渗流的影响**
- **分析裂缝开启/闭合对产能的影响**
- **预测出砂风险**
- **评估盖层完整性**

2.2 IMEX 地质力学的核心特点

特点	说明
全耦合求解	油藏流动与岩石力学方程同时求解
多种本构模型	线弹性、非线弹性、弹塑性、粘塑性等
灵活网格系统	支持单网格、双网格、角点网格、径向网格
裂缝模拟	Barton-Bandis 模型、水力压裂模拟
后处理功能	支持基于已有结果的地质力学后处理分析

三、算例分类与详细介绍

3.1 基础入门算例（建议首先学习）

🗀 *网格变形基础*

算例编号	名称	核心内容	适用场景
mxgmc001	5×5×2 笛卡尔网格变形	基础网格变形 (*GRIDDEFORM)，上覆岩层载荷	初学者入门
mxgmc002	7×7×2 笛卡尔网格（含无效网格）	处理含 NULL 块的模型	复杂地质构造
mxgmc015	5×5×2 弹性模型	三维有限元 (*GEOM3D) 基础应用	理解 3D 有限元

关键词学习： - *GRIDDEFORM - 启用网格变形 - *GEOM3D - 使用真实三维有限元（而非伪 3D） - *DLOADBC - 分布载荷边界条件

🗀 *二维模型入门*

算例编号	名称	核心内容	适用场景
mxgmc003	31×31×1 二维笛卡尔	3D 有限元与变渗透率选项 (*GPERMES)	大面积储层
mxgmc004	13×1×4 二维径向	多岩性、不同杨氏模量层	单井近井地带
mxgmc010	13×1×4 径向（零孔隙度层）	处理零孔隙度层	致密隔层

3.2 进阶应用算例

🗀 *上覆岩层与边界条件*

算例编号	名称	核心内容	适用场景
mxgmc006	11×11×3 上覆岩层载荷	*DLOADBC（分布载荷）*、GLOADBC（体力）、*PLSTRAINY（平面应变）	考虑上覆岩层重量的真实模拟
mxgmc036	3×3×10 法向分布载荷	*DLOADBC3D（三维分布载荷）	复杂载荷条件
mxgmc037	3×3×10 任意分布载荷	*DLOADIJK（任意方向载荷）	复杂边界条件

关键概念：

上覆岩层模拟方法：

1. *DLOADBC - 在储层顶部施加分布压力（模拟上覆岩层重量）

2. *GLOADBC + SPECGRAV - 通过比重定义岩层体力
3. *RIGIDTOP - 限制储层盖层向上移动

双网格系统

双网格系统允许油藏网格和地质力学网格采用不同的分辨率，提高计算效率。

算例编号	名称	核心内容	油藏/地质力学网格
mxgmc050	角点网格双系统	储层与地质力学使用不同角点网格	16×25×9 / 33×25×14
mxgmc051	径向-笛卡尔耦合	储层径向、地质力学笛卡尔	10×20×11 / 21×21×11
mxgmc052	笛卡尔-径向耦合	储层笛卡尔、地质力学径向	21×21×11 / 10×15×11
mxgmc053/054	Dean 论文问题 #4	双井模型，基于 SPE 79709	21×21×11 / 10×10×11
mxgmc055	局部加密双网格	储层软岩、周围硬岩	11×11×10 / 48×48×26
mxgmc066/067	扩展/收缩网格	使用扩展或收缩网格	角点网格

关键词学习： - *GEOGRID - 定义地质力学专用网格 - *GEODOMAIN - 定义地质力学计算区域 - *BCDOMAIN - 定义地质力学与储层交界面的压力边界 - *GNULL - 定义地质力学域中的无效块

3.3 本构模型算例

弹性模型

算例编号	名称	核心内容
mxgmc001-003	线弹性基础	线弹性本构 (*ELASTIC)
mxgmc014	3D 径向-多岩性	不同层的杨氏模量
mxgmc016	非线弹性模型 2	超弹性模型 (*NLINEAR 2)
mxgmc027	表查找渗透率	经验模型与表查找方法

弹塑性模型

算例编号	名称	核心内容	屈服准则
mxgmc018	Cap 模型	双井对比（Cap vs 超弹性）	Modified Cap
mxgmc019	超弹性模型对比	与 mxgmc018 对比	Hyperelastic
mxgmc031	3D 径向 Cap 模型	3D 径向+双耦合	Modified Cap

mxgmc033	11×11×10 Cap 模型	网格变形展示	Modified Cap
mxgmc038	Mohr-Coulomb 2D	剪胀角应用	Mohr-Coulomb
mxgmc047	Mohr-Coulomb 3D	3D 径向版本	Mohr-Coulomb
mxgmc068	CPA 算法	切割平面算法	Drucker-Prager
mxgmc069	子步算法	默认塑性应力返回算法	Cap
mxgmc041	单表面模型	SS 模型演示	Single Surface
mxgmc042/043	关联/非关联流动	关联与非关联 SS 模型	Single Surface
mxgmc048	广义塑性模型	内聚力与摩擦角随应变演化	Generalized Plastic
mxgmc057	硬化-软化	内聚力硬化、摩擦角软化	Generalized Plastic
mxgmc058	修正剑桥模型	MCC 模型、Skempton 效应	Modified Cam Clay

本构模型选择指南：

```
┌──────────────────────────────────────────────────────────────
│  线弹性 (*ELASTIC)
│  ├── 适用：小变形、低应力变化
│  └── 特点：计算快、参数少
│
│  非线弹性 (*NLINEAR)
│  ├── Type 1: 亚弹性模型 (Hypoelastic)
│  └── Type 2: 超弹性模型 (Hyperelastic) - 大变形
│
│  弹塑性模型
│  ├── Mohr-Coulomb: 岩石剪切破坏 (*MOHRCOUL)
│  ├── Drucker-Prager: 扩展 M-C，适用于 3D (*DRUCKPRAG)
│  ├── Modified Cap: 压实与剪切 (*CAP)
│  ├── Single Surface: 统一屈服面 (*SS)
│  └── Modified Cam Clay: 粘土类岩石 (*MCC)
│
│  粘塑性 (*VISCOPLASTIC)
│  └── 适用：时间相关变形、蠕变
└──────────────────────────────────────────────────────────────
```

3.4 裂缝与双重介质算例

Barton-Bandis 裂缝模型

Barton-Bandis 模型是描述裂缝法向变形和渗透率变化的经典模型。

算例编号	名称	核心内容	应用场景
mxgmc026	2D 双重孔隙	基础 Barton-Bandis	裂缝性油藏
mxgmc030	3D 双重孔隙	应力敏感裂缝渗透率	复杂裂缝网络
mxgmc060/089	双网格双重孔隙	双网格+加密网格+伪膨胀	高精度裂缝模拟
mxgmc080	表查找双重渗透	法向有效应力-渗透率表	实验数据拟合
mxgmc081	单孔隙裂缝模拟	模拟基质中的裂缝	微裂缝发育
mxgmc091	膨胀-再压实	考虑裂缝膨胀和再压实	循环注采
mxgmc093/095	剪切裂缝	剪切裂缝与 Barton-Bandis	压裂设计

水力压裂模拟

算例编号	名称	核心内容	应用场景
mxgmc086	2D 水力压裂	3 条垂直裂缝、节点分离	压裂设计
mxgmc087	3D 角点网格压裂	4 口注入井、3D 裂缝扩展	复杂压裂
mxgmc088	3D 分段压裂	水平井分段压裂	页岩气压裂
mxgmc094	压裂开闭控制	*GBCPFACT*、GBCUFACT	压裂后产能
mxgmc090	预置裂缝	初始裂缝宽度为零	天然裂缝激活

关键参数： - `*GBCPFACT` - 控制裂缝开启的压力因子 - `*GBCUFACT` - 控制裂缝闭合的压力因子 - `*GPSCALING` - 地质力学压力缩放因子（0=裂缝压力，1=基质压力）

3.5 特殊效应与高级功能

Skempton 与 Mandel-Cryer 效应

算例编号	名称	核心内容	物理意义
mxgmc039	Skempton 效应演示	不排水条件下的孔隙压力变化	快速加载响应
mxgmc058	MCC+Skempton	修正剑桥模型+Skempton 效应	粘土储层
mxgmc100	综合效应	Skempton + Mandel-Cryer	耦合迭代演示

物理概念：

`Skempton` 效应（不排水）：
突然施加压缩载荷 → 孔隙压力瞬时升高
突然施加拉伸载荷 → 孔隙压力瞬时降低

`Mandel-Cryer` 效应：
排水条件下，流体排出后孔隙压力
可能先升高再降低（超过初始值）

物性参数变化

算例编号	名称	核心内容	参数依赖
mxgmc049	温度相关物性	高温储层	温度
mxgmc071	有效应力相关	应力依赖性	有效应力
mxgmc072	孔隙压力相关	压力依赖性	孔隙压力
mxgmc075	有效应力相关 2	双井模型	有效应力
mxgmc101	水弱效应	水饱和度影响	含水饱和度
mxgmc044	孔隙度相关物性	地质材料随流体孔隙度变化	孔隙度

关键词： - *YOUNGMAP - 空间分布的杨氏模量 - *POISSONMAP - 空间分布的泊松比 - *FRICANGMAP - 空间分布的摩擦角 - *YOUNGTAB - 温度/应力相关的杨氏模量表

各向异性岩石

算例编号	名称	核心内容
mxgmc096	各向异性岩石	不同方向的杨氏模量和泊松比
mxgmc076	逐单元数据	*YOUNGMAP*, POISSONMAP, *FRICANGMAP
mxgmc077	分布杨氏模量	单岩性但非均质杨氏模量

3.6 后处理与特殊技术

地质力学后处理

算例编号	名称	核心内容	应用场景
mxgmc062	后处理基础	主机网格后处理的基础运行	结果存档
mxgmc063	后处理扫描	扫描 mxgmc062 的 SR2 文件	重新分析
mxgmc064	双网格后处理	双网格系统的后处理	复杂模型
mxgmc065	双网格扫描	扫描 mxgmc064 的 SR2 文件	结果验证
mxgmc099	Kriging 重赋初应力	在合并网格上使用 Kriging 方法	精细应力场

技术说明：

后处理流程：
1. 运行基础案例（如 mxgmc062），生成 SR2 文件
2. 创建后处理案例（如 mxgmc063），扫描 SR2 文件
3. 在后处理案例中进行额外的地质力学计算
4. 优势：不需要重新运行完整的油藏模拟

外部数据耦合

算例编号	名称	核心内容
mxgmc015_ob	Outboard 回放	使用外部软件的地质力学变形数据

使用方法：

```
# 第一步：运行基础案例并记录地质力学数据
imex -f mxgmc015.dat -obrec_geomech

# 第二步：在回放案例中使用 *OUTBOARD *REPLAY 读取数据
# 结果与完整耦合计算一致，但计算速度更快
```

🗀 断层再活化

算例编号	名称	核心内容
mxgmc103	断层再活化	断层滑动准则、传导率乘子表查找

四、网格类型与耦合方式速查表

4.1 支持的网格类型组合

储层网格	地质力学网格	算例参考	说明
笛卡尔	笛卡尔	mxgmc001, 006	最简单
径向	径向	mxgmc004, 014	单井模拟
角点	角点	mxgmc008, 050	复杂构造
径向	笛卡尔	mxgmc051, 073	单井+远场
笛卡尔	径向	mxgmc052, 085	复杂井网
角点	笛卡尔	-	需网格转换

4.2 耦合级别设置

关键词	级别	说明	适用场景
`*GCOUPLING 1`	单向耦合	地质力学→油藏	快速计算
`*GCOUPLING 2`	双向弱耦合	迭代耦合	平衡精度与效率
`*GCOUPLING 3`	双向强耦合	完全耦合	高精度需求

迭代控制： - `*NCOUPLING` - 最大耦合迭代次数 - `*STRESSTOL` - 应力收敛容差 - `*GPTOLMUL` - 孔隙压力收敛容差乘子

五、结果输出关键词速查

5.1 常用输出变量

输出关键词	含义	单位

TSTRESI/J/K	总正应力（I/J/K 方向）	压力单位
ESTRESI/J/K	有效正应力	压力单位
STRESINVF	第一应力不变量	压力单位
STRESINVS	第二应力不变量	压力单位
STRESSDIFF	应力差	压力单位
VDISPL	位移矢量	长度单位
SUBSIDENCE	地面沉降	长度单位
VOIDRATIO	孔隙比	无量纲
YOUNG	杨氏模量	压力单位
POISSON	泊松比	无量纲
GCOHESION	内聚力	压力单位
FRICANGLE	摩擦角	度

5.2 地质力学专用输出

```
*GRESULTS
*XYDATA  TSTRESI  TSTRESJ  TSTRESK  // 总应力
*XYDATA  SUBSIDENCE  VDISPL        // 沉降和位移
*XYDATA  YOUNG  POISSON            // 岩石力学参数
```

六、学习路径建议

阶段一：基础入门（1-2 周）

1. **mxgmc001** - 理解基本设置和输出
2. **mxgmc003** - 学习二维模型
3. **mxgmc004** - 学习径向网格
4. **mxgmc006** - 理解上覆岩层载荷

阶段二：本构模型（2-3 周）

1. **mxgmc014/016** - 非线弹性
2. **mxgmc038** - Mohr-Coulomb 基础
3. **mxgmc018/019** - Cap 模型对比
4. **mxgmc058** - Modified Cam Clay

阶段三：高级应用（2-3 周）

1. **mxgmc050-052** - 双网格系统
2. **mxgmc026/030** - Barton-Bandis 裂缝
3. **mxgmc086/088** - 水力压裂
4. **mxgmc062/063** - 后处理技术

阶段四：专业专题（按需）

- 地热开发 → mxgmc049（温度相关）
- 致密气/页岩气 → mxgmc088, 093, 095
- 注水开发 → mxgmc101（水弱效应）
- 断层分析 → mxgmc103

七、常见问题与解决方案

Q1: 计算不收敛怎么办？

解决方案： 1. 使用 `*NINCS` 将大载荷分成多个小载荷步 2. 增加耦合迭代次数 `*NCOUPLING` 3. 放宽收敛容差（谨慎使用） 4. 检查网格质量，避免畸形单元

Q2: 如何选择合适的本构模型？

决策树：

```
变形大小？
├── 小变形 (<1%) → 线弹性
└── 大变形 → 非线弹性或弹塑性

是否有塑性变形？
├── 无 → 非线弹性 (*NLINEAR)
└── 有 → 弹塑性
    ├── 主要剪切破坏 → Mohr-Coulomb / Drucker-Prager
    ├── 压实现象明显 → Cap / Modified Cam Clay
    └── 统一描述 → Single Surface
```

Q3: 双网格系统如何设置？

基本规则： 1. 地质力学网格应覆盖或包含储层网格 2. 使用 `*GEOGRID` 定义地质力学网格 3. 确保网格之间有合理的一一对应或插值关系 4. 在交界面使用 `*BCDOMAIN` 定义压力边界

Q4: 如何验证地质力学计算结果？

验证方法： 1. 与解析解对比（如无限介质中的圆孔问题） 2. 与文献结果对比（如 Dean SPE 79709） 3. 网格敏感性分析 4. 与实验数据对比

八、关键参考文献

1. **Settari, A. and Mourits, F.M.** (1998). A Coupled Reservoir and Geomechanical Simulation System. *SPE Journal*, 3(3), 219-226.

2. **Dean, R.H. et al.** (2003). A Comparison of Techniques for Coupling Porous Flow and Geomechanics. *SPE Journal*, 79709.

3. **Barton, N. et al.** (1985). Conductivity of Variably Aperture Fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 18(4), 261-279.

4. **CMG IMEX User Manual** - Geomechanics Module Documentation

九、附录：关键词索引

A. 网格与几何

关键词	功能
*GEOM3D	启用真实 3D 有限元
*GRIDDEFORM	启用网格变形
*GEOGRID	定义地质力学专用网格
*GEODOMAIN	定义地质力学计算区域
*GNULL	定义地质力学无效块
*BCDOMAIN	定义域间压力边界

B. 边界条件

关键词	功能
*DLOADBC	分布载荷边界条件
*DLOADBC3D	三维分布载荷
*DLOADIJK	任意方向分布载荷
*GLOADBC	体力载荷
*PRESCBC	指定边界位移
*RIGIDTOP	固定盖层顶部
*PLSTRAINY	Y 方向平面应变

C. 本构模型

关键词	功能
*ELASTIC	线弹性模型
*NLINEAR	非线弹性模型
*MOHRCOUL	Mohr-Coulomb 模型
*DRUCKPRAG	Drucker-Prager 模型
*CAP	Modified Cap 模型
*SS	Single Surface 模型

关键词	功能
*MCC	Modified Cam Clay 模型
*VISCOPLAST	粘塑性模型
*GENPLAST	广义塑性模型

D. 裂缝模型

关键词	功能
*BARTBAND	Barton-Bandis 裂缝模型
*HYDRAULIC	水力压裂模型
*GBCPFACT	裂缝开启压力因子
*GBCUFACT	裂缝闭合压力因子
*GPSCALING	地质力学压力缩放

E. 求解控制

关键词	功能
*GCOUPLING	耦合级别设置
*NCOUPLING	耦合迭代次数
*STRESSTOL	应力收敛容差
*GPTOLMUL	孔隙压力容差乘子
*NINCS	载荷步数
*SOLVERG	地质力学求解器
*AIMSOL	AIM 求解器

十、总结

CMG-IMEX 地质力学模块提供了从基础到高级的全套算例模板，覆盖了：

- ✅ **5 大类本构模型**（弹性、非线弹性、弹塑性、粘塑性、广义塑性）
- ✅ **4 种网格类型**（笛卡尔、径向、角点、混合）
- ✅ **3 种耦合方式**（单向、双向弱耦合、双向强耦合）
- ✅ **完整的裂缝模拟能力**（Barton-Bandis、水力压裂）
- ✅ **丰富的后处理功能**

建议用户按照**基础→本构→高级→专题**的学习路径，结合实际工程问题，逐步掌握 CMG-IMEX 地质力学模拟技术。