

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM XXXX—XXXX

复杂储层岩石物理量板构建规范

Guideline for construction of rock physics template for complex reservoirs

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

- XX - XX 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 构建目标	4
5 构建流程与数据	4
6 模型构建与关键技术	7
7 动态验证、优化与评价	7
附 录 A （规范性） 岩石物理量板构建核心参数指标体系	9
附 录 B （规范性） 多尺度数据融合技术流程	11
附 录 C （资料性） 岩石物理量板构建报告模板	12

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：河海大学、中国矿业大学、中国矿业大学（北京）、同济大学、中国石油大学（北京）、中南大学、中国石油勘探开发研究院、中国石油长庆油田勘探开发研究院、中国石油川庆钻探地质勘探开发研究院。

本文件主要起草人：巴晶、张琳、庞孟强、雒聪、郭强、龚飞、马汝鹏、王恩江、戚慧、王璞、李芳、段旻良、焦国卿、程卫、*****等。

本文件首次发布。

复杂储层岩石物理量板构建规范

1 范围

本文件规定了岩石基质建模、岩石骨架建模及孔隙流体替换的关键技术流程。

本文件适用于碳酸盐岩、致密砂岩、砂砾岩、页岩油、煤层气、裂缝型等复杂储层的岩石物理量板的构建工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 29172 岩心分析方法
- GB/T 33684 地震勘探资料解释技术规程
- DZ/T 0300 煤田地震勘探规范
- SY/T 5368 岩石薄片鉴定
- SY/T 6546 复杂岩性地层测井数据处理解释规范
- SY/T 7002 储层地球物理预测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

复杂储层 complex reservoir

具有强非均质性、复杂孔隙结构、岩性多变、流体混合特征的油气储层，主要包括碳酸盐岩、致密砂岩、页岩、煤层气等非常规油气储层。

3.2

储层预测 reservoir prediction

基于地震、测井、岩心、实验测试数据及地质资料，综合应用岩石物理模型、反演方法与统计分析技术，对地下储层的空间分布、物性参数、含流体特征及储集能力进行定量或半定量预测的过程。

3.3

岩石物理量板 rock physics template

基于岩石物理理论、实验测试数据及测井与地震响应特征，建立不同岩性、孔隙结构、流体性质及储层参数之间定量关系，优选储层敏感参数构建多尺度岩石物理图板，用于储层参数表征、流体识别、储层分类及储层预测的岩石物理分析工具。

3.4

岩石基质 rock matrix

组成岩石骨架且不包括孔隙及孔隙流体的固体矿物集合体，是决定岩石弹性、密度及力学性质的重要组成部分。岩石基质通常由一种或多种矿物组成，其性质受矿物成分、结构及胶结特征等因素影响。

3.5

岩石骨架 rock frame

由岩石颗粒及其胶结物相互接触形成、能够承受和传递应力的固体支撑结构，是控制岩石弹性、力学性质及波传播特征的主要组成部分。岩石骨架包括孔隙空间但不包含孔隙流体。

3.6

孔隙流体 pore fluid

赋存于岩石孔隙、裂缝及孔喉空间中的流体，包括油、气、水及其混合流体。孔隙流体的类型、性质及赋存状态对岩石的弹性参数、电学性质及地震响应特征具有重要影响。

3.7

等效介质理论 effective medium theory

是一种将微观非均匀复合材料等效为宏观均匀介质的近似方法，核心是通过平均化微观组分的物理参数，获取能表征材料整体响应的等效参数（如等效介电常数、等效弹性模量、等效渗透率等），从而简化复杂介质的宏观性质分析与计算。

3.8

弹性波传播理论方程 wave propagation equation

描述弹性波或声波在介质中传播过程中，其位移、速度、应力等物理量随时间和空间变化关系的数学方程，用于表征波在不同介质中的传播特征及响应规律。

3.9

岩石物理建模 Rock Physics Modeling

基于岩石物理理论、实验测试数据及地质约束条件，建立岩石组分、孔隙结构、流体性质与弹性参数、地震响应等物理特征之间定量关系的过程，用于储层表征、流体识别及储层预测等研究。

3.10 弹性特性 elastic property

岩石在外力作用下发生变形并在外力解除后恢复原始状态的力学响应特征，通常通过纵波速度、横波速度、弹性模量、泊松比及体积模量等参数进行表征。

3.11

衰减 attenuation

在地震波或声波传播过程中，波的振幅或能量随传播距离逐渐减小的现象称为衰减。

3.12

颗粒密度 particle density

指单位体积岩石固体矿物颗粒的质量，为纯净、不含任何孔隙与流体的固体矿物固有密度，仅由岩石矿物组分、矿物配比决定，是岩石物理建模中表征岩石固体基质属性的基础常量。

3.13

骨架密度 dry frame density

单位体积内不含孔隙流体、仅包含矿物颗粒与孔隙空间的岩石整体密度。该参数兼顾矿物颗粒质量与孔隙体积，充分体现岩石孔隙结构对整体密度的影响。

3.14

物性参数 petrophysical parameters

指用于表征岩石储层物理性质及流体响应特征的一组基础参数的统称，通常包括孔隙度、渗透率、电阻率、密度等，用于描述岩石的储集性、渗流性及物理响应特征。

4 构建目标

4.1 构建目标

建立适用于复杂储层的岩石物理量板，实现储层岩性、物性、流体性质与地震弹性参数之间的定量表征。支撑储层参数预测、流体识别及地震反演解释，提高复杂储层预测的准确性和可靠性。

4.2 基本原则

岩石物理量板构建应遵循多尺度数据融合原则，整合实验数据、测井数据和地震数据等不同尺度信息。岩石物理模型的选择应适应目标储层的岩性、孔隙结构和流体特征，并具备物理合理性和可解释性。量板构建过程应建立动态验证与优化机制，结合实测数据持续修正模型参数。

5 构建流程与数据

5.1 总体技术流程

岩石物理量板构建应包括以下主要步骤：

- a) 多尺度数据采集与预处理；
- b) 岩石物理模型选择；
- c) 岩石基质建模；
- d) 岩石骨架建模；
- e) 孔隙流体替换；
- f) 多尺度数据整合；
- g) 量板构建与动态验证；
- h) 模型优化与评价。

5.2 多尺度数据采集

包括实验数据、测井数据和地震数据的采集。

5.2.1 实验数据

应采集目标储层代表性岩心样品，进行岩石物理实验测试，包括纵波速度、横波速度、密度、孔隙度、渗透率、电阻率等参数，测试条件应模拟地层温压环境。开展岩石薄片鉴定，获取矿物组成、孔隙结构及裂缝发育特征。XRD衍射实验获取岩石内部的矿物组分信息。

5.2.2 测井数据

应按SY/T 6546的规定对测井数据进行环境校正、标准化及多矿物模型分析。应获取纵波时差、横波时差、密度、中子、电阻率、自然伽马等常规及成像测井资料。应按GB/T 33684的规定进行地震资料处理与解释，提取叠前或叠后地震属性，包括纵波阻抗、横波阻抗、速度比、泊松比等弹性参数。

5.3 超声波数据处理

5.3.1 波形预处理

对采集的原始波形进行去直流、去趋势及带通滤波处理。带通滤波器通带频率范围应覆盖换能器有效频带。识别并剔除由系统噪声、电磁干扰或换能器耦合不良引起的异常波形。

5.3.2 走时拾取

纵波走时应采用首波过零点或互相关方法拾取，走时读数精度应优于 $0.05 \mu\text{s}$ 。横波走时应采用横波首波或波形交叉相关方法拾取，当纵波尾波干扰严重时，可采用偏振分析或信号分解方法分离横波。有效走时应扣除系统延迟时间，系统延迟时间应采用标准样品（如铝、有机玻璃）标定获得。

5.3.3 速度计算

纵波速度和横波速度应按照以下公式计算：

$$V_P = \frac{L}{\Delta t_p - \Delta t_{\text{sys}}} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_S = \frac{L}{\Delta t_s - \Delta t_{\text{sys}}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

V_P ——纵波速度，单位：m/s

V_S ——横波速度，单位：m/s

L ——样本长度，单位：m

Δt_p ——纵波走时，单位：s

Δt_s ——横波走时，单位：s

Δt_{sys} ——系统延迟时间，单位：s

5.3.4 衰减参数提取

利用处理后的超声波波形数据，基于谱比法计算得到品质因子Q。

5.4 测井数据处理

5.4.1 深度校正

不同测井系列之间应进行深度对齐，深度误差应不大于0.1 m。测井深度与岩心深度应建立准确对应关系，通过自然伽马、密度等曲线与岩心扫描数据匹配确认。

5.4.2 环境校正

应按仪器型号及井眼条件，对密度、中子、声波等测井曲线进行井眼补偿、泥浆侵入及围岩校正。井径扩径段（井径变化超过10%）测井曲线应标记为低置信度数据，宜采用邻井或模型预测值替代。

5.4.3 异常值处理

识别并剔除由仪器故障、蹦跳、突跳等原因引起的异常值。对于厚度小于0.5 m的尖峰异常，可采用中值滤波或三点平滑方法处理。连续缺失段长度大于1 m时，不宜简单插值，应结合邻井资料或地质模型进行综合判断。

5.4.4 关键参数计算

包括泥质含量、孔隙度、渗透率、含油饱和度、纵波速度、横波速度、体积模量、剪切模量等的计算。

5.5 地震波数据处理

5.5.1 数据加载与格式转换

加载原始地震数据（SEG-Y格式）并转换为处理系统内部格式。记录道头信息，包括炮点坐标、检波点坐标、采样间隔、记录长度及野外采集参数。检查数据完整性，识别并标记缺失道、坏道及异常道。

5.5.2 观测系统定义

根据野外采集记录定义观测系统，建立炮点、检波点与道集的空间位置关系。计算炮检距、方位角及覆盖次数，输出观测系统属性图。覆盖次数应满足目标储层成像要求，低于设计覆盖次数50%的区域应标记为低置信度。

5.5.3 静校正

采用野外静校正消除地形起伏及低速带对走时的影响。剩余静校正宜采用反射波剩余静校正方法，逐道逐样计算静校正量。静校正后叠加剖面目的层反射应连续、同相轴无明显抖动。

5.5.4 去噪

根据噪声类型选用适应性去噪方法：面波采用频率波数滤波或小波变换滤波；线性干扰采用倾斜叠加滤波或Radon变换；脉冲噪声采用中值滤波或异常振幅衰减；随机噪声采用预测滤波、曲波变换或非局部均值滤波。

5.5.5 振幅恢复与补偿

采用球面扩散补偿校正波前扩散引起的振幅衰减。采用地层吸收补偿（Q补偿）校正介质黏性吸收引起的振幅衰减与相位畸变。补偿因子应基于实测品质因子（Q）或根据经验Q值模型确定。补偿后振幅应反映地下反射系数的真实相对变化。

5.5.6 反褶积

采用反褶积压缩地震子波，提高纵向分辨率。常用方法包括脉冲反褶积、预测反褶积及统计反褶积。反褶积后剖面主频应提高，子波旁瓣抑制，信噪比不显著降低。

5.5.7 速度分析

采用速度谱方法拾取叠加速度，速度控制点间隔应不大于500 m。叠加速度应转换为均方根速度，必要时计算层速度。速度分析与地质层位应相对应，速度异常应与测井速度进行对比验证。

5.5.8 动校正与叠加

采用叠加速度进行动校正，拉伸畸变限制应小于50%。动校正后道集同相轴应拉平，远炮检距道集可加权或切除处理。叠加方法宜采用保护性叠加（如中值叠加、加权叠加），优先保护含油储层的振幅异常特征。

5.5.9 偏移成像

采用叠前深度偏移或叠前时间偏移进行地震成像。偏移速度模型应通过层析反演或网格层析成像更新，并经井约束验证。偏移后剖面的目的层构造形态应与井资料吻合，断层清晰，绕射波收敛。

6 模型构建与关键技术

6.1 岩石物理模型选择

应根据目标储层的岩性、孔隙结构及流体特征，选择合适的等效介质理论模型。常用模型包括但不限于：

- a) 对于颗粒支撑的碎屑岩储层，宜采用 Hashin-Shtrikman 界限或 Xu-White 模型；
- b) 对于碳酸盐岩储层，宜采用微分等效介质模型、自洽近似 SCA 模型、Mori-Tanaka (MT) 模型或 Kuster-Toksöz (KT) 模型；
- c) 对于页岩等层状介质，宜采用各向异性岩石物理模型。

6.2 岩石基质建模

6.2.1 根据薄片、XRD矿物分析和测井矿物解释结果，确定岩石基质的矿物组分及其体积分数。

6.2.2 采用Voigt-Reuss-Hill平均、Hashin-Shtrikman界限或自洽近似SCA模型计算岩石基质的等效弹性模量。

6.2.3 基质建模应考虑黏土矿物、有机质等特殊组分对弹性性质的影响。

6.3 岩石骨架建模

6.3.1 岩石骨架模型应综合考虑孔隙度、孔隙形态、胶结程度及压力影响。

6.3.2 裂缝发育储层应引入裂缝密度、纵横比等参数，构建等效裂缝介质模型。

6.4 孔隙流体替换

6.4.1 采用Batzle-Wang经验关系式或者室内岩石物理实验，获取不同温压下的孔隙流体的密度、黏度、体积模量。

6.4.2 常用的孔隙流体替换方法包括Gassmann方程、Biot-Rayleigh方程、喷射流模型、White模型、BISQ等弹性波传播理论模型，结合储层实际情况，选择合适的流体替换方法。流体替换应考虑油、气、水及其混合流体的体积模量、密度和黏度，以及流体的饱和度和分布状态。

6.5 多尺度数据融合方法

建立岩心尺度实验数据与测井尺度响应之间的标定关系。利用测井解释结果对岩石物理模型进行本地化校准。采用统计岩石物理方法或贝叶斯反演框架实现测井与地震尺度的量板一致性融合。

7 动态验证、优化与评价

7.1 量板动态验证机制

利用独立的岩心实验数据或测井数据对量板预测结果进行交叉验证。应至少采用以下指标评价量板精度：

- a) 弹性参数预测的相对误差与均方根误差；
- b) 流体识别准确率；
- c) 储层参数（孔隙度、饱和度）预测的相关系数；
- d) 当新增钻井或实验数据时，应重新验证并更新量板。

7.2 模型参数优化方法

采用非线性反演方法（如粒子群算法、模拟退火或马尔可夫链蒙特卡洛方法）优化岩石物理模型关键参数。优化参数应包括但不限于孔隙纵横比、胶结指数、裂缝密度等。优化过程应保持模型的物理合理性，避免过拟合。

7.3 量板精度与可靠性评价

对最终构建的岩石物理量板进行不确定性分析，量化关键参数对预测结果的影响程度。编制量板使用说明，明确其适用的岩性、孔隙度范围、流体类型及压力温度条件。提交量板构建成果报告，包括数据来源、模型参数、验证结果及适用范围说明。

附 录 A
(规范性)
岩石物理量板构建核心参数指标体系

A.1 总则

岩石物理量板构建过程中，应建立统一的核心参数指标体系，用于表征复杂储层的岩性特征、孔隙结构特征、流体性质及弹性响应特征。参数体系应满足岩石物理建模、流体替换、地震反演及储层预测等应用需求。

A.2 参数分类

岩石物理量板构建核心参数包括：岩石基质参数、孔隙结构参数、流体参数、弹性参数、测井响应参数、地震响应参数、各向异性参数和衰减与频散参数等。具体参数见表A.1。

表 A.1 构建岩石物理量板的核心参数

核心参数分类	具体参数
岩石基质参数	矿物组分含量； 矿物体积分数； 基质密度； 矿物体积模量； 矿物剪切模量； 有机质含量（TOC）； 黏土矿物含量。
孔隙结构参数	孔隙度； 渗透率； 孔隙纵横比； 裂缝密度； 孔喉半径； 孔隙连通性； 胶结指数。
流体参数	流体类型； 流体密度； 流体体积模量； 流体黏度； 流体饱和度； 含气饱和度； 地层温度； 地层压力。
弹性参数	纵波速度； 横波速度；

	纵波阻抗； 横波阻抗； 密度； 泊松比； 杨氏模量； 体积模量； 剪切模量； 拉梅参数。
测井响应参数	声波时差； 密度测井； 中子孔隙度； 自然伽马； 电阻率； 成像测井参数； 核磁共振参数。
地震响应参数	振幅； 频率； 相位； AVO 属性； 弹性反演参数； 各向异性参数； 地震衰减参数 Q 。

附 录 B
(规范性)
多尺度数据融合技术流程

B.1 总体流程

复杂储层岩石物理量板构建中的多尺度数据融合流程主要包括：

- a) 岩心实验数据采集；
- b) 测井数据预处理与解释；
- c) 地震数据处理与反演；
- d) 岩石物理模型建立；
- e) 尺度转换与参数标定；
- f) 量板构建；
- g) 动态验证与优化。

B.2 实验尺度数据处理

实验数据主要包括实验室超声波测试、CT扫描、岩石薄片分析及核磁共振测试等。
实验数据处理应包括：

- a) 温压条件校正；
- b) 波速与密度计算；
- c) 孔隙结构定量分析；
- d) 矿物组分分析；
- e) 流体性质分析。

B.3 测井尺度数据融合

测井尺度数据融合应包括：

- a) 深度统一；
- b) 曲线标准化；
- c) 多矿物解释；
- d) 弹性参数计算；
- e) 测井与岩心标定。

测井解释结果应与岩心实验数据建立对应关系，用于岩石物理模型参数校准。

B.4 地震尺度数据融合

地震尺度数据融合应包括：

- a) 地震反演；
- b) 弹性参数提取；
- c) 频率尺度转换；
- d) 地震与测井标定；
- e) 地震属性优化。

应利用井震联合标定建立测井尺度与地震尺度之间的关系。

B.5 多尺度统一标定

不同尺度数据之间应建立统一标定关系，包括：

- a) 岩心—测井标定；
- b) 测井—地震标定；
- c) 实验频率—地震频率转换；
- d) 静态参数—动态参数转换。

附 录 C
(资料性)
岩石物理量板构建报告模板

C.1 基本信息

包括：项目名称、工区名称、储层类型、编制单位、编制日期等。

C.2 数据来源

应说明：岩心实验数据来源、测井资料来源、地震资料来源、实验测试方法以及数据时间范围等。

C.3 储层地质特征

应包括：区域地质背景、储层岩性特征、孔隙结构特征、裂缝发育特征以及流体性质等。

C.4 数据处理方法

应包括：超声波数据处理方法、测井数据处理方法、地震数据处理方法、异常值处理方法以及数据融合方法等。

C.5 岩石物理模型

应包括：模型选择依据、模型参数、模型适用条件、模型计算流程、流体替换方法等。

C.6 岩石物理量板构建结果

应包括：量板类型、量板参数范围、交会关系、敏感参数分析、流体识别效果等。

C.7 验证与评价

应包括：模型验证结果、误差分析、适用范围、不确定性分析、可靠性评价等。

C.8 结论与建议

应包括：主要认识、量板应用效果、存在问题、后续优化建议等。