

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/GMR

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GMR XXXX—XXXX

复杂储层地震岩石物理反演技术要求

Technical specification for seismic rock-physics inversion in complex reservoirs

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - 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	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基础数据要求	2
5 工作流程	3
6 关键技术与要求	4
7 质量控制与检查	5
8 成果图件与归档	6
附录 A（规范性）地震岩石物理反演检查内容及要求	7

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、雒聪、郭强、张琳、*****等。

本文件首次发布。

复杂储层地震岩石物理反演技术要求

1 范围

本文件规定了复杂储层地震岩石物理反演的基础数据要求、工作流程、关键技术、质量控制及成果归档等内容与技术要求。

本文件适用于碳酸盐岩、致密砂岩、页岩油气、煤层气等复杂储层的地震岩石物理反演工作，为储层定量预测与综合评价提供技术依据。

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 14499 地球物理勘查技术符号
- GB/T 18341 地质矿产勘查测量规范
- GB/T 33684 地震勘探资料解释技术规程
- DZ/T 0080 煤炭地球物理测井规范
- DZ/T 0300 煤田地震勘探规范
- SY/T 5331 石油地震勘探解释图件要素规范
- SY/T 5933 地震反射层地震地质层位代号确定原则
- SY/T 5928 地震勘探资料归档规范
- SY/T 5938 地震反射层地质层位标定
- 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

指非均质性强、孔隙结构复杂（如孔、洞、缝并存）、流体斑块饱和、岩性多变或受强烈成岩、构造作用改造，导致其地球物理响应与储层参数关系复杂的储层。

3.2

非均匀性 heterogeneity

储层的岩性、物性、孔隙结构、流体性质等参数在空间上呈现不均匀分布的特性。

3.3

地震岩石物理建模 seismic rock-physics modeling

建立岩石整体弹性性质和各个组分弹性性质与储层特征参数（如矿物及其含量、孔隙度与孔隙结构、流体类型与饱和度等）之间关系的过程。

[来源：SY/T 7002-2020, 3.1]

3.4

地震岩石物理正演 seismic petrophysical forward modeling

由已知的储层物性参数（如矿物组分、孔隙度、孔隙结构、流体类型与饱和度等）出发，应用岩石物理模型与地震模拟方法，建立储层物性参数与其地震响应（如反射系数、合成地震记录）之间定量关系的过程。该过程是地震岩石物理反演的正过程。

3.5

地震岩石物理反演 seismic petrophysical inversion

基于地震数据、测井数据和岩石物理模型，通过数学反演方法定量获取储层物性参数（如孔隙度、泥质含量、饱和度等）的过程，包括物性参数地震直接反演和物性参数地震间接反演。

3.6

弹性参数反演 elastic parameter inversion

以叠前或叠后地震数据为基础，反演获得岩石弹性参数（如纵波速度、横波速度、密度、拉梅常数、体积模量、剪切模量等）的过程。

3.7

物性参数间接反演 petrophysical parameter sequential inversion

以弹性参数反演结果为输入，基于岩石物理模型所建立的弹性参数与物性参数之间的定量关系，通过反演方法、岩石物理量板分析、数学转换等方法获取储层物性参数（如孔隙度、渗透率、流体饱和度等）的过程。

3.8

物性参数直接反演 petrophysical parameter direct inversion

基于地震数据（叠前或叠后），利用岩石物理模型所建立的地震响应与物性参数之间的定量关系，通过反演方法直接估计储层物性参数（如孔隙度、渗透率、流体饱和度等）的过程。

3.9

孔隙结构参数 pore structure parameter

用于定量表征岩石内部孔隙空间几何形态、大小分布及连通性的系列特征参数。常见参数包括孔隙纵横比、孔隙半径分布、比表面积、曲折度、孔喉配位数等。

4 基础数据要求

4.1 地震数据

收集地震资料宜包括：

- a) 地震数据采集参数；
- b) 高信噪比、高保真的叠前道集数据（如共中心点 CMP 道集、共反射角 CRP 道集、螺旋道集）；
- c) 叠后偏移、叠前偏移的纯波数据及成果数据；
- d) 分入射角（或炮检距）叠加纯波数据及成果数据；
- e) 叠加、偏移等速度数据及时深关系数据；
- f) 地震反射层位及断层解释数据。

4.2 测井数据

收集测井资料宜包括：

- a) 经过环境校正和标准化处理的纵波速度、横波速度及密度曲线，未经校正的资料仅供参考；
- b) 关键井的偶极子声波测井、核磁共振测井等特殊测井资料；
- c) 关键井的岩性体积分数、孔隙度、渗透率、含水饱和度、含气饱和度、含油饱和度等测井解释成果；
- d) 井轨迹、井位坐标、补心高、地面海拔等钻井基本信息。

4.3 岩石物理实验数据

收集岩石物理实验数据宜包括：

- a) 系统取心的储层及围岩岩心样本的弹性参数（包括纵波速度、横波速度及密度）测试数据；
- b) 储层及围岩相关的岩石力学参数（如杨氏模量、泊松比、抗压强度等）测试数据；
- c) 岩石薄片、扫描电镜、压汞等孔隙结构分析数据。

4.4 其他数据

其他资料包括：

- a) 地质分层、沉积相、构造演化等地质研究成果；
- b) 烃源岩地球化学数据、地层压力、地层温度及地应力测试数据；
- c) 经过归位校正后的岩性柱状图、气测等录井资料，未经校正的原始录井资料仅供参考；
- d) 油气产量信息、试油试气成果、压裂等工程数据，用于反演结果的验证。

5 工作流程

5.1 基础工作

5.1.1 层位标定与构造解释：按SY/T 5938和SY/T 5481执行，确保地震地质层位准确。

5.1.2 测井资料预处理：进行环境校正、深度匹配、曲线标准化，确保井震一致性。

5.1.3 地震资料预处理：包括道集优化、振幅补偿、噪声压制等，确保数据保真度。

5.1.4 岩石物理可行性分析：分析工区岩石物理背景，明确反演的物理基础。

5.2 地震岩石物理建模

5.2.1 模型选择与构建：根据复杂储层特点，选择合适的岩石物理模型（如Xu-White模型、Kuster-Toksöz模型、Xu-Payne模型、Biot-Rayleigh模型等）。

5.2.2 孔隙结构参数预测：基于已构建的岩石物理模型，以测井物性参数为输入，通过改变孔隙结构参数正演预测弹性参数，并将预测结果与实测测井弹性参数匹配，预测随深度变化的孔隙结构参数。

5.2.3 模型校准与验证：利用实验和测井数据对岩石物理模型及建模物理参数进行校准，确保模型预测精度。

5.2.4 敏感参数分析：通过交会图、直方图、基于岩石物理模型的岩石弹性响应分析、基于地震岩石物理模型的地震响应分析等技术，优选出对储层物性和流体敏感的弹性参数组合。

5.3 地震岩石物理正演

5.3.1 正演模型构建：结合地震岩石物理建模成果和地震正演模拟方法（包括弹性/黏弹性各向同性/各向异性AVO正演、波动方程数值模拟等），构建能表征储层物性参数（如矿物组合、孔隙度、孔隙结构参数及流体饱和度等）与地震响应之间数学量化关系的模型。

5.3.2 地震响应模拟：根据实际地质条件和目标参数选择合适的地震正演模拟方法（如各向同性/各向异性，弹性/黏弹性等方法），利用构建的储层物性参数-地震响应的地震岩石物理正演模型，合成地震道集、角道集或叠加数据。

5.3.3 地震响应特征分析：系统分析不同物性参数（如孔隙度、泥质含量、流体饱和度及孔隙结构参数）变化对合成反射系数、AVO（振幅随偏移距变化）响应、叠后地震数据的特征，明确不同储层类型的地震识别标志和敏感地震属性。

5.4 地震岩石物理反演

5.4.1 弹性参数反演：采用叠前多参数同时反演、弹性阻抗反演等方法，获取纵波阻抗、横波阻抗、纵波速度、横波速度、密度等数据体。

5.4.2 物性参数间接反演：以弹性参数结果为输入，基于岩石物理模型所建立的弹性参数与物性参数定量关系，通过反演方法、岩石物理量板分析、数学转换等间接获取储层物性参数数据体。

5.4.3 物性参数直接反演：基于地震数据（叠前或叠后），利用地震岩石物理正演所建立的地震响应与物性参数定量关系，通过地震数据直接储层物性参数数据体。

5.4.4 不确定性分析：评估反演结果的不确定性，并生成相应的不确定性数据体。

5.5 储层预测与评价

5.5.1 储层空间展布：根据反演得到的物性参数，刻画储层的纵向和横向分布。

5.5.2 储层质量分级：结合物性参数（如孔隙度、渗透率、泥质含量等）和流体信息（如含水饱和度），对储层进行质量分级。

5.5.3 有利区带优选：综合构造、储层、流体等信息，圈定钻探有利目标区，提出井位部署建议。

6 关键技术与要求

6.1 岩石物理模型选择与校准

6.1.1 岩石物理模型应根据储层类型、岩性组合、孔隙结构、流体赋存状态和目标参数选择，不宜脱离实际地质条件直接套用通用模型。

6.1.2 对碳酸盐岩、致密砂岩、页岩油气、煤层气等复杂储层，应结合孔隙空间特征（孔、洞、缝）、泥质含量、有机质、饱和流体形式等因素，选择或构建适用的岩石物理模型。

6.1.3 岩石物理模型应采用测井资料、岩心实验资料或已知生产资料进行校准。校准过程中，应将模型预测的速度、密度或弹性模量等参数与实测资料进行对比，检验模型参数设置的合理性。

6.1.4 当采用含频散、衰减或各向异性介质的岩石物理模型时，应说明模型参数的物理含义、适用频带及主要假设条件。

6.1.5 对难以直接测量的模型参数，应通过敏感性分析、参数约束或多资料联合校准确定，不宜采用缺乏依据的固定经验值。

6.2 敏感参数优选与岩石物理分析

6.2.1 应基于测井、岩心实验和岩石物理正演结果，分析储层物性参数对弹性参数和地震响应的影响。

6.2.2 敏感参数优选宜采用交会图、概率分布、相关分析、岩石物理量板、正演模拟等方法综合确定。

6.2.3 优选参数应能够反映目标储层的主要差异，如岩性、孔隙度、泥质含量、流体饱和度、孔隙结构等。

6.2.4 当单一弹性参数难以区分目标储层时，宜采用弹性参数组合，同时结合储层物性参数进行综合分析。

6.2.5 敏感参数优选结果应与地质认识、测井解释和实验资料相互验证。

6.3 地震岩石物理正演

6.3.1 地震岩石物理正演应根据储层类型、资料条件和研究目标，建立储层参数与地震响应之间的定量关系。储层参数可包括矿物组分、流体参数、孔隙结构参数、裂缝参数及其他影响储层弹性及地震响应的参数。

6.3.2 地震岩石物理正演模型应包括岩石物理模型和地震响应计算过程，能够描述储层参数变化对地震响应的影响。

6.3.2 地震响应计算方法应根据储层类型、资料条件和研究目标进行选择，可采用弹性介质、黏弹性介质、各向同性介质、各向异性介质等的正演模型。

6.3.3 正演模拟应分析目标储层参数的弹性及地震敏感性分析，明确不同储层类型或储层参数的敏感响应特征。

6.3.4 正演模拟结果宜与井旁实际地震资料进行对比，检验正演模型及参数设置的合理性。

6.3.5 对复杂储层宜根据需要，选择性考虑非均质性、孔隙结构、裂缝、频散、衰减和各向异性等因素对地震响应的影响。

6.4 弹性参数反演

6.4.1 弹性参数反演应根据资料条件和物性参数预测需求，选择叠后反演、叠前同时反演、弹性阻抗反演等方法。

6.4.2 反演初始模型应与井点资料、地层格架和地质规律一致。

6.4.3 子波提取应结合井震标定结果进行。叠前反演中，子波宜按角度分别提取。

6.4.4 反演结果应在井点处与测井曲线具有一致的趋势，宜采用盲井测试检验参数反演效果。

6.5 地震岩石物理物性参数间接反演

- 6.5.1 地震岩石物理物性参数间接反演应以弹性参数反演结果为输入，基于经校准的岩石物理模型、统计岩石物理模型或岩石物理量板，反演预测储层物性参数。
- 6.5.2 间接反演宜在弹性参数反演结果可靠的条件下开展。
- 6.5.3 间接反演目标参数可包括孔隙度、泥质含量、含水饱和度、含气饱和度、含油饱和度、渗透率等，具体参数应根据储层类型和研究目标确定。
- 6.5.4 间接反演物性参数时，应优先采用经测井资料、岩心实验资料等校准的岩石物理模型，不宜直接采用未经本区资料验证的模型或经验关系。
- 6.5.5 间接反演方法可根据反问题特点采用确定性反演或概率化反演等框架；当采用经验关系、岩石物理量板、统计岩石物理模型或机器学习方法进行物性参数间接反演时，应明确样本来源、建立依据、适用条件和验证结果。
- 6.5.6 开展多参数间接反演时，宜分析参数间的耦合性与反演多解性，必要时引入地质约束、测井约束或其他先验约束。
- 6.5.7 间接反演结果应与测井解释、岩心分析、录井、试油试气或生产动态资料进行对比验证。

6.6 地震岩石物理物性参数直接反演

- 6.6.1 地震岩石物理物性参数直接反演应以叠前或叠后地震数据为输入，基于地震岩石物理正演算子，直接反演预测储层物性参数。
- 6.6.2 直接反演宜在地震资料品质较好、子波稳定、井震匹配可靠、岩石物理模型适用性明确的条件下开展。
- 6.6.3 直接反演应采用地震岩石物理正演模型作为正演算子，包括岩石物理模型和地震响应计算过程，能够描述物性参数与地震数据的直接量化关系。
- 6.6.4 直接反演目标参数可包括孔隙度、泥质含量、含水饱和度、含气饱和度、含油饱和度、孔隙结构参数或裂缝参数等，具体参数应根据资料条件、储层类型和参数敏感性确定。
- 6.6.5 直接反演方法可根据反问题特点采用确定性反演或概率化反演等框架；当资料条件允许时，可开展多资料联合约束反演。

6.7 孔隙结构参数预测

- 6.7.1 孔隙结构参数预测应服务于复杂储层岩石物理建模和物性参数反演，不宜脱离弹性响应单独解释。
- 6.7.2 孔隙结构参数可采用等效孔隙纵横比、孔隙半径、孔喉结构参数、曲折度等可量化参数表征。
- 6.7.3 孔隙结构参数宜采用岩心实验、薄片、扫描电镜、数字岩心、核磁共振测井等资料进行约束。
- 6.7.4 当孔隙结构参数不能直接测量时，可通过岩石物理模型正演和测井弹性参数匹配进行预测。
- 6.7.5 采用岩石物理模型预测孔隙结构参数时，应说明孔隙结构参数的取值范围、约束条件及其确定依据。
- 6.7.6 孔隙结构参数预测结果宜随深度和空间展布具有合理变化趋势，并结合岩性、沉积相、成岩作用等进行合理分析。

6.8 不确定性分析与结果验证

- 6.8.1 应对弹性参数反演和物性参数反演结果开展不确定性分析；对孔隙结构参数预测结果，宜开展合理性和稳定性评价。
- 6.8.2 不确定性分析宜考虑地震噪声、子波误差、低频模型误差、岩石物理模型误差、参数耦合及资料尺度差异等因素。
- 6.8.3 可采用盲井检验、交叉验证、后验概率分析、多次反演对比或参数扰动测试等方法，评价反演结果的稳定性和可靠性。
- 6.8.4 反演与预测结果应结合井资料、岩心实验、录井、试油试气、生产动态或地质认识进行综合验证。
- 6.8.5 对预测精度不足、不确定性较大或缺少充分验证的区域，应在成果图件和技术报告中予以说明。

7 质量控制与检查

7.1 检查方法

- 7.1.1 应建立项目组自检、项目负责人检查和主管部门抽查相结合的三级质量检查制度。
- 7.1.2 一级检查包括自检和互检，应覆盖全部工作流程和成果资料。
- 7.1.3 二级检查由项目负责人组织开展，应检查数据处理、岩石物理建模、正演模拟、反演计算和成果解释等关键环节，检查率不低于关键环节的 30%。
- 7.1.4 三级检查由主管部门或质量管理部门组织开展，应对重点目标和关键成果进行抽查，检查率不低于重点检查内容的 20%。
- 7.1.5 检查中发现的问题应及时记录、修改和复查，检查记录应随成果资料一并归档。

7.2 检查内容

- 7.2.1 数据质量：检查地震、测井、岩心实验及其他基础数据的完整性、一致性和可靠性。
- 7.2.2 模型合理性：检查岩石物理模型选择、参数设置、模型校准和适用性。
- 7.2.3 正演与反演过程：检查正演模型、反演参数、初始模型、子波提取和约束条件设置的合理性。
- 7.2.4 结果可靠性：检查反演与预测结果在井点处的吻合程度，以及平面和剖面特征的地质合理性。
- 7.2.5 图件与报告：检查成果图件的规范性、完整性，以及技术报告中方法、参数、结果和结论的一致性。

8 成果图件与归档

8.1 成果图件

根据项目要求，应提供但不限于以下图件：

- a) 井震标定综合图；
- b) 地震岩石物理分析图件（如交会图、岩石物理量板等）；
- c) 弹性参数反演剖面与平面图（如纵波阻抗、纵横波速度比等）；
- d) 物性参数预测图（如孔隙度、饱和度、孔隙结构参数等平面图及剖面图）；
- e) 储层综合评价图及有利区带预测图；
- f) 反演不确定性分析图件；
- g) 质量控制相关图件（如井旁道对比图、盲井检验图、误差分析图等）。

8.2 归档要求

- 8.2.1 归档工作应按照SY/T 5928的规定执行。
- 8.2.2 归档内容应包括：原始数据、处理数据、模型参数、反演参数、中间成果、最终成果数据体、成果图件、技术报告和质量检查记录等。
- 8.2.3 电子数据和纸质文档应同步归档，归档资料应完整、规范，确保成果可检查、可追溯和可复用。

附录 A
(规范性)
地震岩石物理反演检查内容及要求

质量控制及检查的各项内容及要求见表A.1至表A.7

表 A.1 基础数据质量检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	地震资料完整性	地震资料及采集参数齐全						
2	地震资料品质	信噪比、分辨率满足反演要求						
3	测井资料完整性	关键测井曲线齐全						
4	测井资料预处理	曲线校正和标准化合理						
5	岩石物理实验资料	实验资料来源和测试条件明确						
6	其他资料	地质、录井及生产资料可用						

表 A.2 井震标定与资料一致性检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	井震匹配	合成记录与井旁地震道匹配合理						
2	关键层位标定	目标区域关键层位同相轴定位准确						
3	时深关系	时深转换关系可靠						
4	子波提取	子波类型、主频、相位与长度合理						
5	构造解释	层位、断层解释与地震反射特征协调						

表 A.3 岩石物理模型选择与校准检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	模型选择	模型选择符合目标储层特征						
2	适用条件	模型假设和适用范围明确						
3	参数设置	模型参数取值依据充分						
4	模型校准	预测结果与实测资料吻合						
5	复杂戒指效应	涉及非均质性、孔隙结构、各向异性、压力温度、频散衰减等效应，说明处理依据						

表 A.4 敏感参数优选与正演分析检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	分析方法	参数敏感性分析方法选用合理						
2	参数优选依据	优选参数区分能力明确						
3	参数组合	优选参数与目标储层相关性明确						
4	正演输入参数	输入参数来源和取值范围明确						
5	正演模拟条件	正演方法、入射角范围、子波等设置合理						
6	正演响应分析	储层参数变化对应的地震响应明确						
7	井旁对比	正演结果与井旁地震主要特征相似						

表 A.5 弹性参数反演检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	反演方法	反演方法选择合理						
2	初始模型	初始模型符合地层格架，无明显局部异常						
3	子波提取	子波类型和提取方法合理						
4	反演参数	正则化、先验和迭代参数等设置合理						
5	井点质控	井旁地震道反演结果与测井资料误差可接受						
6	盲井检验	盲井检验结果满足应用要求						
7	空间展布	平面和剖面变化符合地质规律						

表 A.6 物性参数间接反演检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	输入弹性参数	输入弹性参数质量满足预测要求						
2	岩石物理依据	岩石物理模型、量板或统计模型建立合理						
3	孔隙结构影响	涉及孔隙结构参数时，处理方式合理明确						
4	目标参数	目标参数对目标储层具有指示作用						
5	反演方法及参数设置	反演方法、正则化、先验和迭代参数等设置合理						
6	井点质控	预测结果与井点解释资料误差可接受						
7	盲井检验	盲井检验结果满足应用要求						
8	结果验证	预测结果与岩心、录井、生产资料及地质认识协调						

表 A.7 物性参数直接反演检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	输入地震数据	输入地震资料质量满足反演要求						
2	地震岩石物理正演模型	正演模型建立及参数设置合理						
3	子波提取	子波类型和提取方法合理						
4	孔隙结构参数	涉及孔隙结构参数时，处理方式合理明确						
5	目标参数	目标参数对目标储层具有指示作用						
6	反演方法及参数设置	反演方法、正则化、先验和迭代参数等设置合理						
7	井点质控	预测结果与井点解释资料误差可接受						
8	盲井检验	盲井检验结果满足应用要求						
9	结果验证	预测结果与岩心、录井、生产资料及地质认识协调						

表 A.8 不确定性分析与成果归档检查表

序号	检查项目	检查要求	合格	存在问题	检查人及日期	整改结果	复检结果	复检人及日期
1	结果验证	预测结果与井资料误差在接受范围						
2	试油试气及生产资料验证	有相关资料时，对比验证结果不矛盾						
3	不确定分析	预测结果不确定性和可信度明确						
4	低可信度区说明	低可信区范围和使用风险予以提示						
5	成果图件	成果图件完整、规范						
6	资料归档	数据、图件和检查记录齐全						