

刘灵,张卫卫,朱焱辉,等.基于岩石物理模型的凝灰质砂岩的识别与刻画——以珠江口盆地惠州凹陷古近系砂岩储层为例[J].石油物探,2024,63(2):336-345

LIU Ling,ZHANG Weiwei,ZHU Yanhui,et al.Identification and characterization of tuffaceous sandstone based on petrophysical model:A case study of Paleogene sandstone reservoir in Huizhou Sag of the Pearl River Mouth Basin[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2024,63(2):336-345

基于岩石物理模型的凝灰质砂岩的识别与刻画

——以珠江口盆地惠州凹陷古近系砂岩储层为例

刘 灵,张卫卫,朱焱辉,何 叶,罗 明,杨学奇

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院,广东深圳 518054)

摘要:惠州 H5 油田位于珠江口盆地惠州凹陷,古近系恩平组下段砂岩储层是其主力油层,但储层中因火山作用而发育了致密的凝灰质砂岩。此类致密砂岩导致储层性能下降,使得优质储层的预测面临挑战。准确识别凝灰质砂岩并刻画其分布范围是惠州 H5 油田优质储层预测的关键。为此,根据已钻井资料和地震资料进行了含凝灰质砂岩的岩石物理建模,得到了识别凝灰质砂岩的敏感岩石物理弹性参数;在此基础上,开展了地震资料叠前反演和人工智能深度学习的储层定量预测;在储层预测结果的基础上,识别并刻画了致密的凝灰质砂岩及其分布范围,从而突出优质砂岩储层。提出了凝灰质砂岩岩石物理建模和岩石物理模型驱动下的人工智能储层预测技术及其流程。该技术应用于惠州 H5 油田的储层评价,在钻前成功识别了 H5-3d 井区和 H5-5d 井区恩平组下段发育的凝灰质砂岩,准确刻画了其分布范围和边界,为后续评价井的钻探和储量申报提供了重要依据。

关键词:凝灰质砂岩物理模型;叠前反演;人工智能深度学习;储层定量预测

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:1000-1441(2024)02-0336-10

DOI:10.12431/issn.1000-1441.2024.63.02.006

Identification and characterization of tuffaceous sandstone based on petrophysical model:A case study of Paleogene sandstone reservoir in Huizhou Sag of the Pearl River Mouth Basin

LIU Ling,ZHANG Weiwei,ZHU Yanhui,HE Ye,LUO Ming,YANG Xueqi

(Research Institute of Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd.,Shenzhen 518054,China)

Abstract: In Huizhou H5 Oilfield in the Huizhou Sag of the Pearl River Mouth Basin, the sandstone reservoir in the lower section of the Paleogene Enping Formation is the major oil reservoir. Tight tuffaceous sandstone is developed in the reservoir due to volcanism. Such sandstone has led to the degradation of reservoir performance. The prediction of high-quality reservoirs is challenging. Accurate identification of tuffaceous sandstone and characterization of its distribution are crucial to the prediction of high-quality reservoirs in Huizhou H5 Oilfield. In this paper, petrophysical modeling of tuffaceous sandstone was conducted using available drilling and seismic data, and sensitive petrophysical elastic parameters for identifying tuffaceous sandstone were obtained. Then, quantitative reservoir prediction was performed through seismic data prestack inversion and artificial intelligence deep learning. Furthermore, tight tuffaceous sandstone and its distribution were identified and characterized, highlighting high-quality sandstone reservoirs. Finally, the technology and process of artificial intelligence reservoir prediction driven by petrophysical modeling of tuffaceous sandstone are presented.

收稿日期:2023-11-20。

第一作者简介:刘灵(1986—),女,硕士,工程师,研究方向为岩石物理和反演。Email:liuling8@cnooc.com.cn

基金项目:中海石油有限公司“十四五”重大科技项目“海上深层/超深层油气勘探技术”(KJGG2022-0403)资助。

This research is financially supported by the CNOOC Ltd's "14th Five Year Plan" Major Technology Project (Grant No.KJGG2022-0403).

faceous rocks and petrophysical models were proposed. This technology was applied to the reservoir evaluation of Huizhou H5 Oil-field, contributing to the successful identification of the tuffaceous sandstone in the H5-3d well area and the lower section of the Enping Formation in the H5-5d well area before drilling, and to the accurate characterization of the tuffaceous sandstone distribution, which provide an important basis for the subsequent drilling of appraisal wells and reserve declaration.

Keywords: physical model of tuffaceous sandstone, prestack inversion, artificial intelligence deep learning, quantitative reservoir prediction

惠州凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷中部,由 11 个洼陷组成,其中,惠州 X 洼陷位于惠州凹陷东南部,为珠江口盆地东部已证实的最富烃洼陷之一,文昌组为其主要烃源岩发育层系,受构造抬升(惠州运动)影响,惠州 X 洼陷上文昌组地层(文一段、文二段、文三段)缺失,仅保留下文昌组文六段、文五段和文四段,其中,文五段和文四段为最主要的烃源岩发育段,裂陷期陆相地层和裂后期海相地层为储层主要发育层系^[1-3]。

惠州 H5 油田位于珠江口盆地惠州凹陷惠州 X 洼陷东缘,为具有基底古隆起背景的断鼻构造,经历文五段沉积末期及文四段沉积末期两期岩浆底侵和晚期填平补齐,并被多期断裂活动复杂化^[4-6]。惠州 H5 油田主力油层为古近系恩平组,恩平组上段主要发育大型辫状河三角洲砂体,地层含砂率为 70%~90%^[7],整体呈现富砂薄泥的特征,缺乏有效区域盖层,难以形成规模油气藏,储盖组合制约恩平组勘探成效。恩平组下段(简称恩下段)位于洲扇转换带,相带变化快,且多口井钻遇凝灰质砂岩,该类砂岩造成储层致密,所以明确凝灰质填隙物的含量和分布范围是优质储层预测的关键,然而针对凝灰质砂岩影响下的储层预测研究较少,凝灰质砂岩岩石物理特征不清,导致优质储层预测困难^[8-9]。

近年来,已有不少学者对古近系中深层储层预测技术方法开展了研究工作并取得了一些进展。徐长贵等^[10]基于工作实践提出了适合渤海古近系中深层储层预测的技术思路与方法,包括陆相层序地层分析、古地貌分析、地震相组合与地震属性解释以及成岩动力学分析等。针对沙南凹陷中深层优质储层预测难题,黄江波等^[11]提出了相控叠前弹性反演技术,可有效反映中深层储盖层空间变化特征。张佳佳等^[12]针对制约岩石物理反演精度的两个关键问题,即岩石物理模型和反演算法,提出了一种线性化岩石物理反演方法,该方法通过对复杂岩石物理模型进行泰勒展开,可得到岩石物理反演

的一阶近似表达式,从而可直接求逆获得岩石物理反演问题的解析解,计算效率高。针对凝灰质砂岩等复杂岩性,石晓敏等^[13]以松辽盆地火山作用下的致密凝灰质砂岩为研究对象,以核磁共振方法和压汞实验法为主要手段,探究了致密凝灰质砂岩储层孔隙结构特征,发现凝灰质砂岩堵塞关键喉道并降低渗透率是造成孔渗相关性差的主要原因。李晓艳等^[14]分析了珠江口盆地陆丰地区文昌组低渗透凝灰质砂岩储集特征,认为储层差异演化主要受控于凝灰质砂岩丰度以及原生孔隙的发育程度,富凝灰质砂岩储层早期快速压实致密,形成超低孔渗储层。

针对凝灰质砂岩影响下优质储层预测的难题,本文提出了凝灰质砂岩岩石物理建模和岩石物理模型驱动下的人工智能储层参数定量预测两项关键技术,并应用在惠州 H5 油田评价井钻探中,在钻前成功预测 H3 井和 H5 井恩下段大量发育凝灰质砂岩,从而准确刻画了凝灰质砂岩的发育范围,落实了致密带的边界,为后续评价井的钻探和储量申报提供了重要依据。

1 问题分析

研究区构造沉积背景复杂,北块由断层分为西、东两个高点。西高点古近系砂岩源自惠州 A 转换带,为长源辫状河三角洲沉积,沉积相带优越,储层物性条件较好,为油藏富集块;东高点为陡坡物源,主要发育陡坡扇或短源辫状河三角洲,沉积相带条件较差,同时受凝灰质砂岩影响,储层物性条件差。南块受储层物性条件控制更加明显,油气主要富集在未受凝灰质砂岩影响的辫状河三角洲沉积体系内。由此可见,凝灰质砂岩是影响物性的主控因素,但凝灰质砂岩预测非常困难,主要问题如下。

1) 地震剖面上无法有效识别凝灰质砂岩,如图 1 所示,H5-1 井恩下段钻遇大量凝灰质砂岩,孔隙度较

低,渗透性较差,地震响应表现为波峰或波谷响应,与常规砂泥岩地震响应特征无明显差异,而距离 H5-1 井不到 2 km 的 H5-2 井却不受凝灰质砂岩影响,物性较好,从地震响应上来看,H5-2 井砂岩基本表现为波峰响应,如 EP440 砂体,但在 H5-1 井 EP440 砂体受凝灰质砂岩影响也表现为波峰特征。

2) 由于该油田评价井钻探前只有 H5-2 井有完备的纵、横波数据,但该井没有钻遇凝灰质砂岩,因而凝灰质砂岩的岩石物理特征和敏感弹性参数不清,无法通过常规反演手段来识别凝灰质砂岩,导致该区储层预测难度加大,严重制约该地区进一步的勘探和评价。

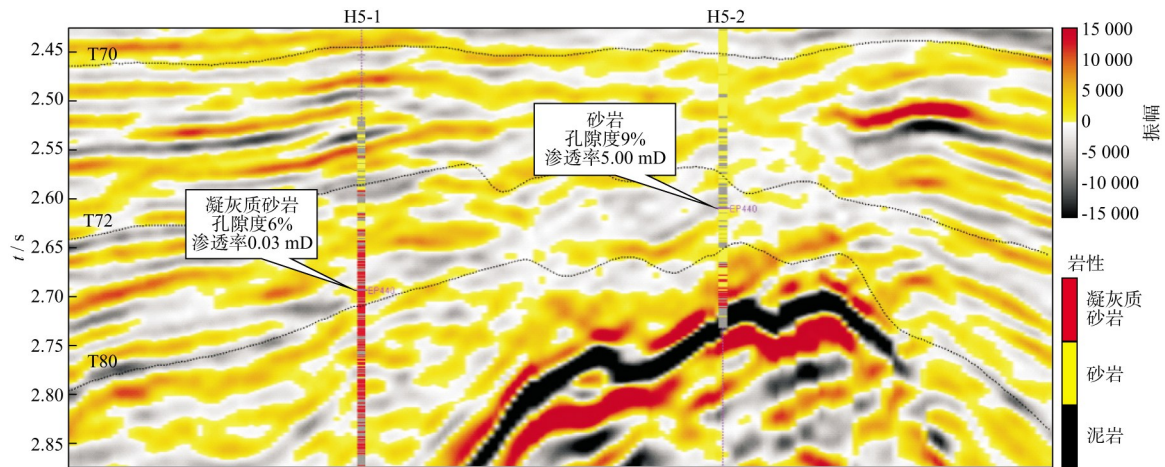


图 1 惠州 H5 油田古近系岩性剖面 and 地震剖面 ($1 \text{ mD} \approx 0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

2 技术对策

由于研究区多口井在恩下段钻遇凝灰质砂岩,而在叠后地震成果剖面上无法准确识别出凝灰质砂岩,因而 2015 年通过长缆长、高密度二次三维采集得到的地震数据其成像质量有了很大程度的提高,地震道集满足了深层叠前反演要求。针对以上地质地震资料特点制定了复杂岩性岩石物理建模和叠前反演、人工智能深度学习相结合的储层定量预测技术流程(图 2),其中凝灰质砂岩岩石物理建模和人工智能储层参数定量预测是两项关键技术。

2.1 含凝灰质砂岩岩石物理建模

岩石物理分析是沟通地震数据和储层参数的桥梁,通过岩石物理分析找到岩性物性敏感弹性参数是进行储层预测的前提,研究区恩平组上段(简称恩上段)和恩下段岩性和物性差别较大,为了提高储层预测的精度,分层段构建不同岩石物理模型:恩上段以砂泥岩为主,岩石基质由石英、粘土、方解石组成,孔隙结构偏圆,物性偏好,与辫状河三角洲相的沉积环境相符。恩下段普遍含凝灰质砂岩,本文研究建立凝灰质砂岩岩石物理模型,在矿物成分和孔隙结构中加入凝灰质

砂岩成分,具体建模流程如图 3 所示,从孔隙结构上可以看到恩下段孔隙纵横比相对恩上段偏小,表征恩下段整体物性不如恩上段,这与扇三角洲相的沉积环境相符,也与井上统计的物性特征相符。

首先,利用 Voigt-Reuss-Hill 平均模型计算凝灰质岩石等效矿物模量。

在计算岩石矿物基质的等效体积模量和剪切模量时,通常采用边界模型,Voigt-Reuss 上、下界限和 Hashin-Shtrikman 界限是典型的边界模型,Hashin-Shtrikman 界限更窄,Voigt-Reuss 上、下限不仅用来定义弹性极限,而且可以描述岩石成岩过程中的分选和胶结趋势^[15],通常采用 Voigt-Reuss-Hill 平均模型计算岩石基质等效模量,矿物基质考虑石英、粘土、方解石、凝灰质填隙物 4 种成分。

$$K_{\text{VRH}} = \frac{K_{\text{V}} + K_{\text{R}}}{2} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{VRH}} = \frac{\mu_{\text{V}} + \mu_{\text{R}}}{2} \quad (2)$$

$$K_{\text{V}} = V_{\text{clay}} K_{\text{clay}} + V_{\text{quart}} K_{\text{quart}} + V_{\text{lime}} \cdot K_{\text{lime}} + V_{\text{tuff}} K_{\text{tuff}} \quad (3)$$

$$\mu_{\text{V}} = V_{\text{clay}} \mu_{\text{clay}} + V_{\text{quart}} \mu_{\text{quart}} + V_{\text{lime}} \mu_{\text{lime}} + V_{\text{tuff}} \mu_{\text{tuff}} \quad (4)$$

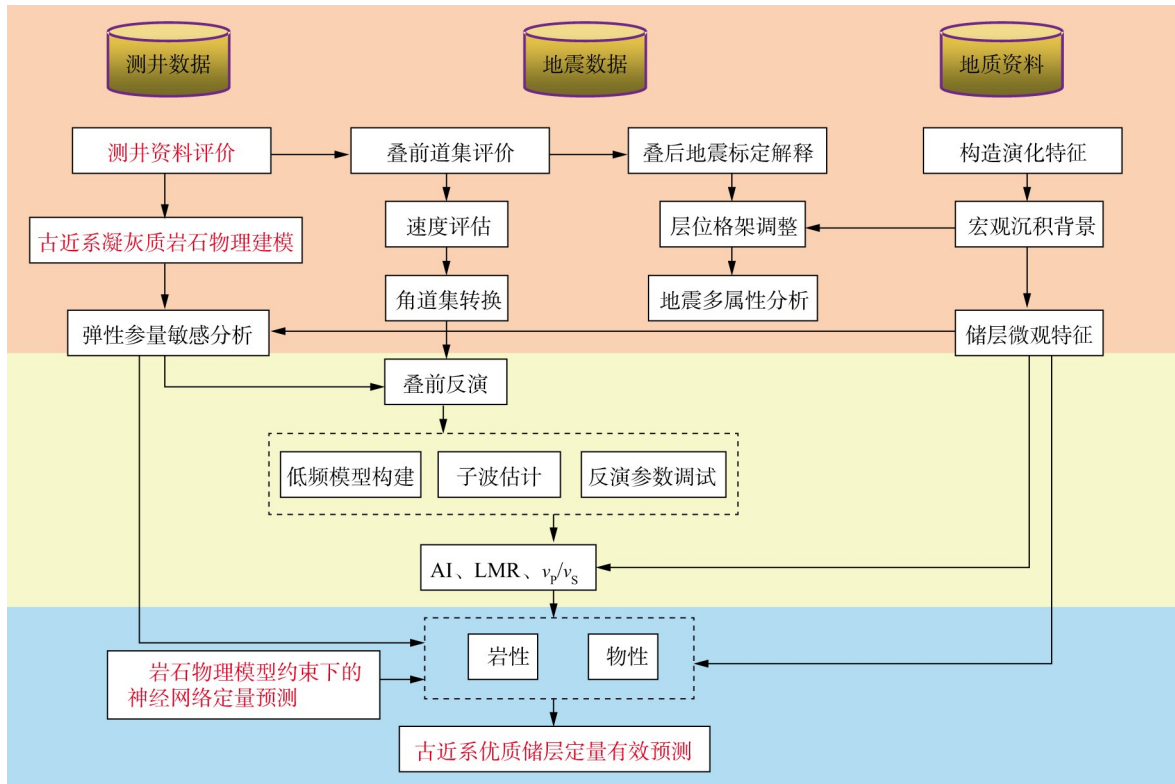


图 2 古近系储层预测技术路线

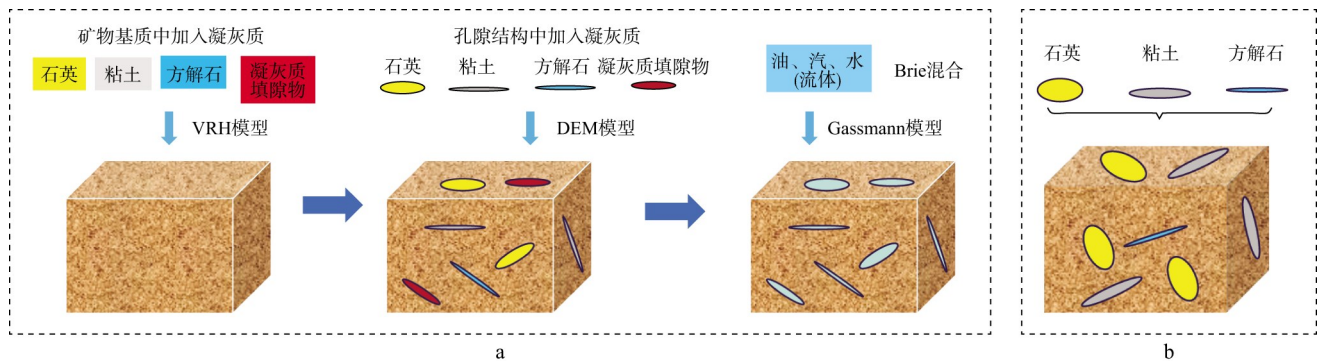


图 3 恩下段凝灰质砂岩岩石物理建模(a)和恩上段砂泥岩骨架模型(b)

$$K_R = 1 / (V_{clay} / K_{clay} + V_{quart} / K_{quart} + V_{lime} / K_{lime} + V_{tuff} / K_{tuff}) \quad (5)$$

$$\mu_R = 1 / (V_{clay} / \mu_{clay} + V_{quart} / \mu_{quart} + V_{lime} / \mu_{lime} + V_{tuff} / \mu_{tuff}) \quad (6)$$

式中： K_V 和 μ_V 分别表示混合物体积模量和剪切模量的 Voigt 上限； K_R 和 μ_R 分别表示混合物体积模量和剪切模量的 Reuss 下限； V_i, K_i, μ_i 分别为每种组成成分的体积分数、体积模量和剪切模量，其中 $i = clay, quart, lime, tuff$ 分别表示粘土、石英、方解石和凝灰质填隙物。

其次，利用微分等效介质 (DEM) 模型计算凝灰质岩石骨架弹性模量。

DEM 模型理论^[16-17] 提供了对不同几何形状孔隙的弹性模量进行计算的岩石物理模型，它通过往一种固体矿物相中逐渐加入另一种包含物相来模拟双相混合物，然后将该双相混合物看成是一种固体矿物相，再向其中加入第 3 种矿物相，这个过程一直进行到各种矿物成分含量达到设定值为止。

等效体积 K^* 和剪切模量 μ^* 耦合的微分方程组分别为：

$$(1 - \varphi) \frac{d}{d\varphi} [K^*(\varphi)] = (K_2 - K^*)P^{(*2)}(\varphi) \quad (7)$$

$$(1 - \varphi) \frac{d}{d\varphi} [\mu^*(\varphi)] = (\mu_2 - \mu^*)Q^{(*2)}(\varphi) \quad (8)$$

式中:初始条件是 $K^*(0) = K_1$ 和 $\mu^*(0) = \mu_1$, 其中 K_1 和 μ_1 分别为初始主相材料的体积模量和剪切模量(相 1), K_2 和 μ_2 分别为逐渐加入的包含物的体积模量和剪切模量(相 2); φ 为孔隙度; P 和 Q 是给定的几何因素, P 和 Q 的上标“* 2”指此几何因素是针对具有等效模量 K^* 和 μ^* 的背景介质中的包含物材料 2。 P 和 Q 值计算与椭球状包含物的高宽比有关, 设 α 为高宽比, $\alpha = 1$ 则表示包含物为球体, α 越小表示包含物形状越扁。对于任意高宽比的椭球状包含物的 P 和 Q 值的计算见附录 A。

用 DEM 模型和自相容模型计算混合物等效弹性模量的一个重要的概念上的区别是, DEM 指定了其中的一种成分作为主相固体矿物材料, 其它物质组

成的包含物被逐渐填入主相背景介质中; 自相容理论则不指定任何成分作为主相固体矿物材料, 而是将混合物当成是地位均等的各个成分的集合体。

2.2 含凝灰质砂岩的岩石物理特征分析

目标区 H5 油田评价井钻探前仅 H5-2 井有完备的实测纵波速度和横波速度资料, 鉴于此种情况, 需要开展岩石物理建模重构其它井的纵、横波速度和密度曲线, 根据前面所述, 由于恩上段和恩下段岩性和物性有差别, 所以恩上段采用砂泥岩模型, 恩下段采用含凝灰质砂岩岩石物理模型正演得到声波曲线, 从图 4 可以看到, 已知井 H5-2 井正演纵、横波速度(红)与实测曲线(黑)基本吻合, 说明了分层段岩石物理模型的准确性, 利用该井确定的矿物基质和孔隙结构等参数可重构得到其它井的纵、横波速度和密度, 从重构结果上可以看到目标区其它 5 口井的正演速度与实测速度和地震速度趋势吻合, 进一步证明了岩石物理建模的准确性。

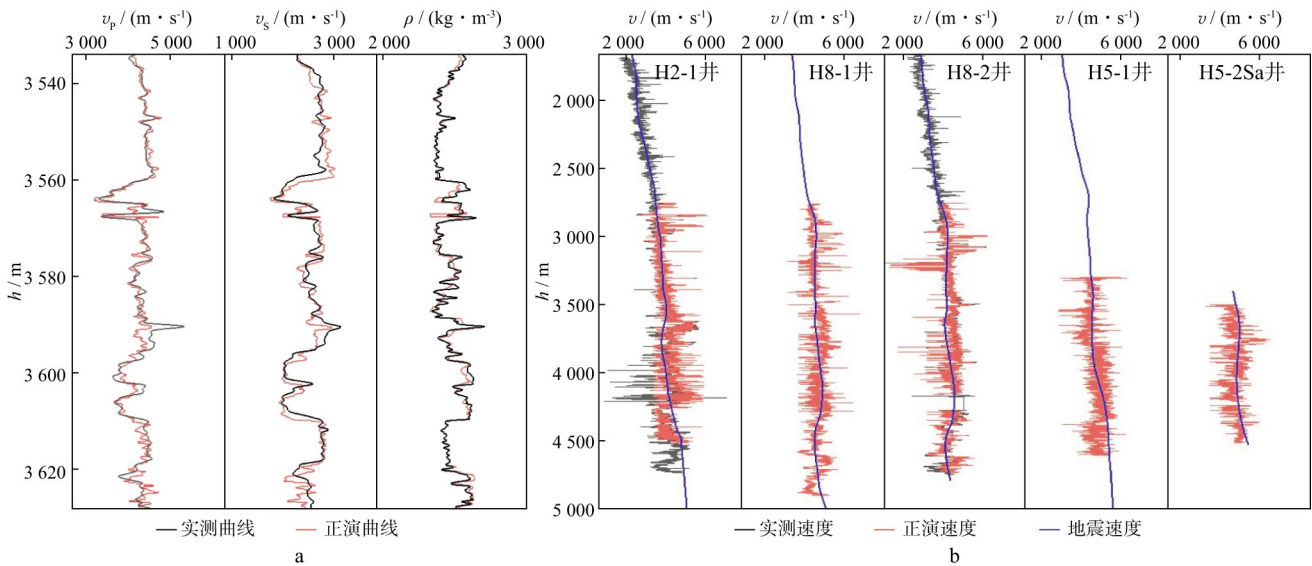


图 4 H5-2 井岩石物理正演弹性参数(a)和 5 口井实测速度、地震速度与正演速度对比(b)

从凝灰质砂岩岩石物理特征(图 5)可以看到, 凝灰质砂岩相比泥岩有低纵横波速度比(v_p/v_s)特征, 相比砂岩有高拉梅参数($\lambda\rho$)特征, 利用该特征可实现凝灰质砂岩和优质砂岩储层的有效识别与刻画。

2.3 地震资料的叠前反演与人工智能深度学习储层预测

地震数据中蕴含丰富的地震弹性参数和储层参数信息, 储层参数预测主要分两步: ①通过地震反演得到弹性参数。现有的地震反演技术已经非常成熟,

能够反演得到较为准确的弹性参数^[18-19], 例如纵、横波速度和密度等; ②利用岩石物理反演由地震弹性参数得到储层参数, 如孔隙度、泥质含量等。岩石物理反演首先需要构建一个理论或者经验的岩石物理模型, 即建立地震弹性参数与储层参数之间的关系, 其次就是确定岩石物理反演采用的反演算法^[20-21], 由于弹性参数是岩性、物性和流体三者耦合的非线性关系, 难以直接求解得到泥质含量和孔隙度等岩性物性参数, 现阶段大多数采用了概率统计学反演方法^[22]

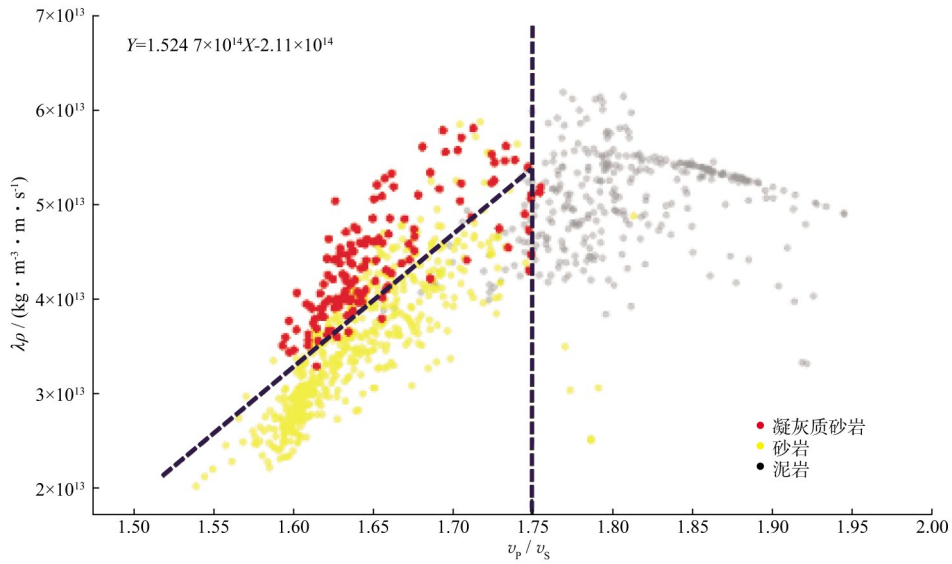


图 5 凝灰质砂岩岩石物理特征

等,但概率性方法需要进行全局寻优或者随机抽样,求解岩石物理反演问题的计算效率较低。因此,本文提出了岩石物理模型约束下的神经网络储层参数定量预测方法,通过凝灰质砂岩岩石物理建模,一方面可以正演多井声波数据,解决样本少的问题,另一方面建立储层参数与弹性参数之间的关系,便于 BP 神经网络快速学习找到对应关系,从而通过机器学习反函数求解得到泥质含量、凝灰质填隙物含量、孔隙度等储层参数,最终实现储层预测由定性走向定量。

人工智能储层参数定量预测的实现步骤如下:①通过岩石物理模型正演得到多口井位处的地层弹性参数并作为人工智能学习样本;②叠前反演得到弹性参数体;③人工智能通过学习弹性参数与储层参数之间的映射关系从而由反演弹性体得到储层参数体(图 6)。

2.4 凝灰质砂岩和优质储层的定量预测与刻画

根据岩石物理分析发现纵横波速度比 v_p/v_s 和

拉梅参数 $\lambda\rho$ 的交会结果可以识别砂岩、泥岩和凝灰质砂岩这 3 种岩性。通过反演得到纵横波速度比数据体和 $\lambda\rho$ 数据体并进行交会分析,可以定性预测岩性体,另外通过神经网络方法,可以定量预测每种岩性的含量分布数据体,如图 7 所示,在叠后地震剖面上无法准确识别 H5-3d 井和 H5-5d 井恩下段发育的凝灰质砂岩,若不进行凝灰质砂岩岩石物理建模,无法明确凝灰质砂岩的岩石物理特征,叠前反演得到弹性参数只能用于常规砂泥岩的预测,而通过凝灰质砂岩岩石物理建模可以得到凝灰质砂岩定性预测结果,利用神经网络技术可以得到凝灰质填隙物含量定量预测结果,该结果成功预测出了 H5-3d 井和 H5-5d 井恩下段的凝灰质填隙物含量,吻合度达到 90%,其它井的预测结果吻合率也在 80%以上(图 8)。

从恩下段的平均属性平面分布图(图 9)上可以看到,凝灰质填隙物的分布特征与孔隙度的分布特征

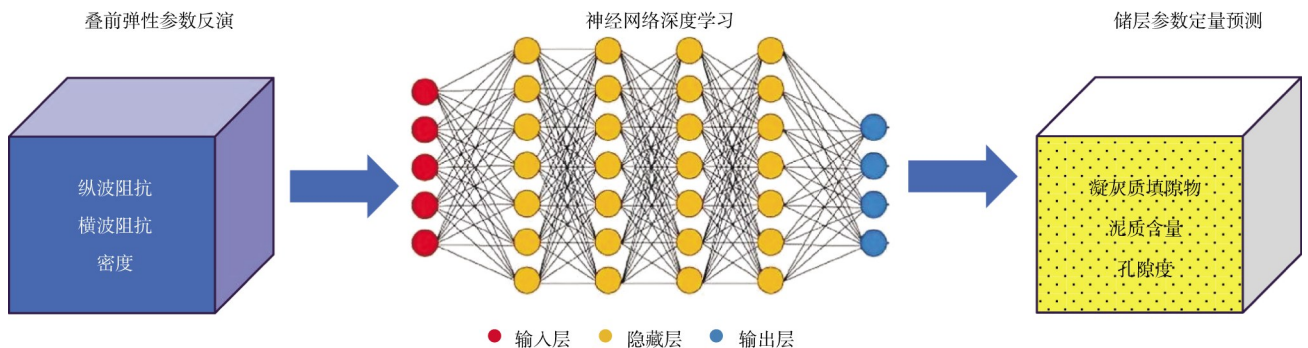


图 6 人工智能储层参数定量预测技术

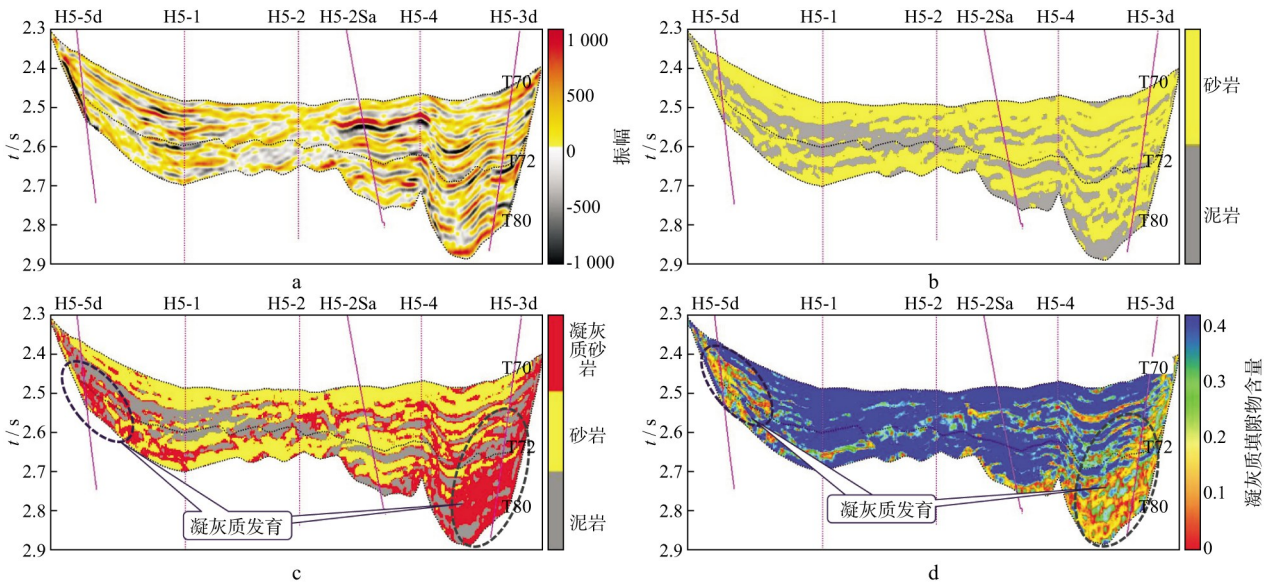


图 7 叠后地震剖面(a)、常规砂泥岩预测剖面(b)、凝灰质砂岩定性预测剖面(c)和凝灰质填隙物定量预测剖面(d)

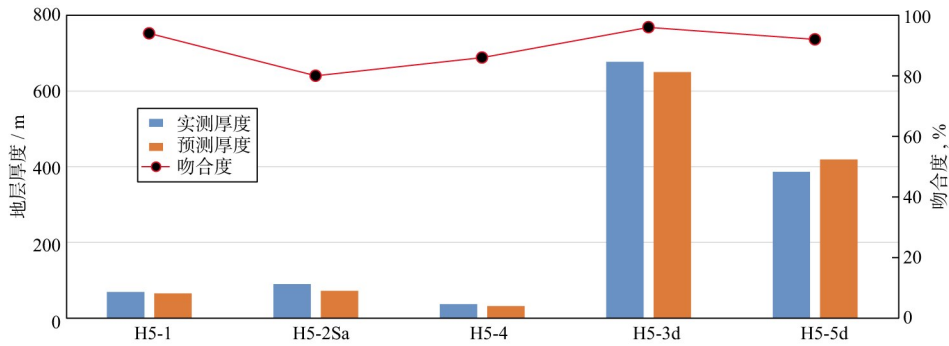


图 8 恩平组凝灰质砂岩地层预测厚度吻合度统计结果

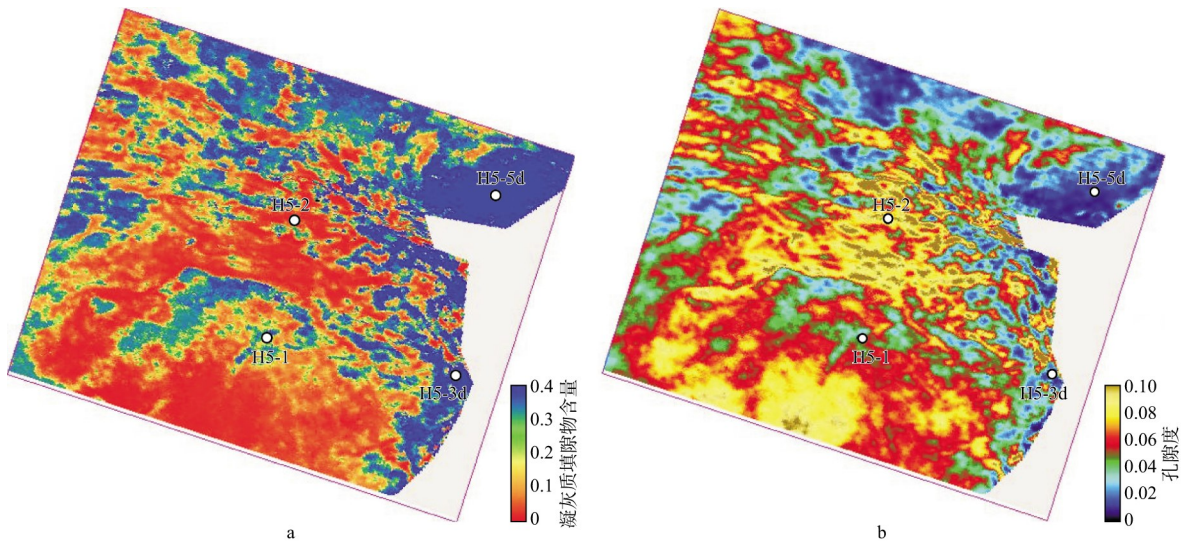


图 9 恩下段凝灰质填隙物含量(a)和孔隙度(b)平均属性平面分布

具有一定相关性,H5-3d 和 H5-5d 井区凝灰质填隙物含量较高,孔隙被堵塞,导致储层致密。反演结果有效刻画了该地区凝灰质填隙物和优质储层的分布范围,落实了致密带边界,为圈定探明含油面积提供了重要依据,顺利推动了 H5 油田国家储量申报工作。

3 结论

通过凝灰质砂岩岩石物理建模、叠前反演、人工智能储层参数定量预测等地球物理组合技术,实现了惠州 H5 油田深层古近系优质储层的定量有效预测,恩平组凝灰质砂岩定量预测结果已被钻井证实,钻井平均吻合度达到 90%,反演结果准确刻画了凝灰质填隙物的发育范围,从而落实了致密带的边界,对于古近系储层预测具有借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 田立新,刘杰,张向涛,等.珠江口盆地惠州 26-6 大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J].中国海上油气,2020,32(4):1-11
TIAN L X,LIU J,ZHANG X T,et al.Discovery and accumulation pattern of HZ26-6 large-medium sized pan-buried hill oil and gas field in Pearl River Mouth basin[J].China Offshore Oil and Gas,2020,32(4):1-11

[2] 田立新,施和生,刘杰,等.珠江口盆地惠州凹陷新领域勘探重大发现及意义[J].中国石油勘探,2020,25(4):22-30.
TIAN L X,SHI H S,LIU J,et al.Great discovery and significance of new frontier exploration in Huizhou Sag,Pearl River Mouth Basin[J].China Petroleum Exploration,2020,25(4):22-30

[3] 施和生,舒誉,杜家元,等.珠江口盆地古近系石油地质[M].北京:地质出版社,2017:1-254
SHI H S,SHU Y,DU J Y,et al.Petroleum geology of Paleogene in the Pearl River Mouth Basin[M].Beijing:Geological Publishing House,2017:1-254

[4] 陈维涛,杜家元,施和生,等.珠江口盆地惠西南地区复式油气成藏特征及富集规律[J].石油勘探与开发,2015,42(2):194-208
CHEN W T,DU J Y,SHI H S,et al.Compound hydrocarbon accumulation and enrichment in southwestern Huizhou area, Pearl River Mouth Basin,Southern China[J].Petroleum Exploration and Development,2015,42(2):194-208

[5] 李潇雨.惠州凹陷古近系沉积相及岩相古地理演化[D].成都:成都理工大学,2007
LI X Y.Paleogene sedimentary facies and lithofacies Paleogeographic evolution in Huizhou Depression[D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2017

[6] 周清波,舒誉,朱筱敏,等.珠江口盆地 HA 地区古近系文昌组沉积特征[J].高校地质学报,2019,25(4):558-567
ZHOU Q B,SHU Y,ZHU X M,et al.Sedimentary characteris-

tics of the Paleogene Wenchang Formation in the HA Area, Pearl River Mouth Basin[J].Geological Journal of China Universities,2019,25(4):558-567

[7] 刘军,刘杰,曹钧,等.基于岩石物理实验的储层与孔隙流体敏感参数特征——以珠江口盆地东部中-深层碎屑岩储层为例[J].石油学报,2019,40(1):197-205
LIU J,LIU J,CAO J,et al.Characteristics of reservoir and pore fluid sensitivity parameters based on rock physical experiment: A case study of the middle-deep clastic rock reservoirs in the eastern Pearl River Mouth Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2019,40(1):197-205

[8] 张丽丽,舒梁锋,冯轩,等.再论珠江口盆地恩平组时代归属[J].中国海上油气,2020,32(5):9-18
ZHANG L L,SHU L F,FENG X,et al.Further discussion on the age assignment of Enping Formation in the Pearl River Mouth basin[J].China Offshore Oil and Gas,2020,32(5):9-18

[9] 焦鹏,郭建华,张向涛,等.陆丰地区古近系恩平组沉积演化特征及沉积模式[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):10-18
JIAO P,GUO J H,ZHANG X T,et al.Sedimentary evolution characteristics and sedimentary model of Paleogene Enping Formation,Lufeng area,Pearl River Mouth Basin[J].Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition),2017,41(5):10-18

[10] 徐长贵,赖维成.渤海古近系中深层储层预测技术及其应用[J].中国海上油气,2005,17(4):231-236
XU C G,LAI W C.Prediction technologies of Paleogene mid-deep reservoir and their application in Bohai Sea[J].China Offshore Oil and Gas,2005,17(4):231-236

[11] 黄江波,左中航,侯栋甲,等.叠前密度反演技术在沙南凹陷中深层储层预测中的应用[J].海洋地质前沿,2021,37(2):46-53
HUANG J B,ZUO Z H,HOU D J,et al.Application of pre-stack density inversion technology to middle-deep reservoir prediction in Sha'n'an depression[J].Marine Geology Frontiers,2021,37(2):46-53

[12] 张佳佳,印兴耀,张广智,等.基于线性化岩石物理反演的物性参数预测方法[J].石油勘探与开发,2020,47(1):57-64
ZHANG J J,YIN X Y,ZHANG G Z,et al.Prediction method of physical parameters based on linearized rock physics inversion[J].Petroleum Exploration and Development,2020,47(1):57-64

[13] 石晓敏,位云生,朱汉卿,等.致密凝灰质砂岩储层孔隙结构特征与储层分类评价——以松辽盆地南部营城组致密凝灰质砂岩为例[J].天然气地球科学,2023,34(10):1828-1841
SHI X M,WEI Y S,ZHU H Q,et al.Pore structure characteristics and reservoir classification and evaluation of tight tuffaceous sandstone gas reservoir: Taking the tight tuffaceous sandstone of Yingcheng Formation in southern Songliao Basin as an example[J].Natural Gas Geoscience,2023,34(10):1828-1841

[14] 李晓艳,张向涛,丁琳,等.珠江口盆地陆丰地区文昌组低渗透凝灰质砂岩储集特征与差异演化[J].中国海上油气,2023,35(3):34-44
LI X Y,ZHANG X T,DING L,et al.Reservoir characteristics and differential evolution of low permeability tuffaceous sand-

- stone in Wenchang Formation, Lufeng sag, Pearl River Mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(3): 34-44
- [15] XU S, WHITE R E. A new velocity model for clay-sand mixtures[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(1): 91-118
- [16] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media[M]. 2nd Edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998: 1-329
- [17] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: Theory and methods[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1980: 153-154
- [18] 甘利灯, 王钧峒, 罗贤哲, 等. 基于孔隙结构参数的相控渗透率地震预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 883-890
- GAN L D, WANG J Y, LUO Z X, et al. A permeability prediction method based on pore structure and lithofacies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 883-890
- [19] RUSSELL B. Introduction to seismic inversion methods[M]. Tulsa: SEG, 1988: 1-178
- [20] SALTZER R, FINN C, BURTZ O. Predicting shale and porosity using cascaded seismic and rock physics inversion[J]. Expanded Abstracts of 75th Annual Internat SEG Mtg, 2005: 732-736
- [21] 邓继新, 王尚旭. 基于统计岩石物理的含气储层饱和度与孔隙度联合反演[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 48-52
- DENG J X, WANG S X. Joint inversion of saturation and porosity in gas reservoirs based on statistical rock physics[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 48-52
- [22] 胡华锋, 印兴耀, 吴国忱. 基于贝叶斯分类的储层物性参数联合反演方法[J]. 石油物探, 2012, 52(3): 225-232
- HU H F, YIN X Y, WU G C. Joint inversion of petrophysical parameters based on Bayesian classification [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 52(3): 225-232

附录 A: 任意高宽比包含物的 P 和 Q 值计算

$$P = \frac{1}{3} T_{ijj} \quad (\text{A1})$$

$$Q = \frac{1}{5} \left(T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj} \right) \quad (\text{A2})$$

张量 T_{ijkl} 将均匀远场应变场与椭球状包含物内的应变联系起来 (Wu, 1996)。Berryman (1980b) 给出了计算 P 和 Q 所需的相关标量:

$$T_{ijj} = \frac{3F_1}{F_2} \quad (\text{A3})$$

$$T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj} = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4 F_5 + F_6 F_7 - F_8 F_9}{F_2 F_4} \quad (\text{A4})$$

其中,

$$F_1 = 1 + A \left[\frac{3}{2} (f + \theta) - R \left(\frac{3}{2} f + \frac{5}{2} \theta - \frac{4}{3} \right) \right] \quad (\text{A5})$$

$$F_2 = 1 + A \left[1 + \frac{3}{2} (f + \theta) - \frac{R}{2} (3f + 5\theta) \right] + B(3 - 4R) + \frac{A}{2} (A + 3B)(3 - 4R) [f + \theta - R(f - \theta + 2\theta^2)] \quad (\text{A6})$$

$$F_3 = 1 + A \left[1 - \left(f + \frac{3}{2} \theta \right) + R(f + \theta) \right] \quad (\text{A7})$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4} [f + 3\theta - R(f - \theta)] \quad (\text{A8})$$

$$F_5 = A \left[-f + R(f + \theta - \frac{4}{3}) \right] + B\theta(3 - 4R) \quad (\text{A9})$$

$$F_6 = 1 + A [1 + f - R(f + \theta)] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (\text{A10})$$

$$F_7 = 2 + \frac{A}{4} [3f + 9\theta - R(3f + 5\theta)] + B\theta(3 - 4R) \quad (\text{A11})$$

$$F_8 = A \left[1 - 2R + \frac{f}{2} (R - 1) + \frac{\theta}{2} (5R - 3) \right] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (\text{A12})$$

$$F_9 = A [(R - 1)f - R\theta] + B\theta(3 - 4R) \quad (\text{A13})$$

式中:

$$A = \frac{\mu_i}{\mu_m} - 1 \quad (\text{A14a})$$

$$B = \frac{1}{3} \left(\frac{K_i}{K_m} - \frac{\mu_i}{\mu_m} \right) \quad (\text{A14b})$$

$$R = \frac{1 - 2\nu_m}{2(1 - \nu_m)} \quad (\text{A14c})$$

其中 μ 和 K 分别表示材料的剪切模量和体积模量,下标 i 和 m 分别是包含物材料和背景材料,表示背景材料的泊松比。

函数 θ 为:

$$\theta = \begin{cases} \frac{\alpha}{(\alpha^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} [\alpha (\alpha^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \arccos \alpha] & (\alpha > 1) \\ \frac{\alpha}{(1 - \alpha^2)^{\frac{3}{2}}} [\arccos \alpha - \alpha (1 - \alpha^2)^{\frac{1}{2}}] & (\alpha < 1) \end{cases} \quad (\text{A15})$$

对扁圆球体 $\alpha < 1$, 扁长球体 $\alpha > 1$, 且满足

$$f = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} (3\theta - 2) \quad (\text{A16})$$

(编辑:顾石庆)