

# 渗透率测井评价：现状及发展方向

李宁\*, 王克文, 武宏亮, 冯周, 刘鹏, 李雨生

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

\* 通信作者, ln@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-07-20

中国石油天然气集团公司“十四五”测井基础前沿研究项目(2022DJ3908)资助

**摘要** 渗透率是十分重要而又难以准确计算的储层参数之一。目前渗透率测井评价主要依据4类方法, 即: 基于孔渗关系的渗透率评价、基于核磁共振测井的渗透率评价、基于斯通利波测量的渗透率评价以及基于大数据和人工智能的渗透率评价。通过对上述方法适用性的分析发现, 井筒斯通利波与储层孔隙空间流体的流动性密切相关, 在储层渗透率评价中具有明显优势。但目前渗透率测井评价面临艰巨挑战, 其原因包括3个方面, 即: 确定渗透率参数本身的理论、实验难度, 评价对象复杂性的日益增大和尚未形成能用于井下连续测量渗透率的装备。本文指出, 推进斯通利波渗透率评价理论、方法和技术研究, 构建新的以斯通利波测量为核心的渗透率评价技术体系是新一代测井技术发展的方向。

**关键词** 渗透率; 孔隙度; 斯通利波; 核磁共振测井; 大数据

## Permeability logging evaluation: Current status and development directions

LI Ning, WANG Kewen, WU Hongliang, FENG Zhou, LIU Peng, LI Yusheng

Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED), PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract** Permeability is one of the important and difficult to accurately calculate reservoir parameters. At present, the evaluation of permeability logging mainly has four types of methods, namely: permeability evaluation based on porosity-permeability relationship, permeability evaluation based on nuclear magnetic resonance logging, permeability evaluation based on Stoneley wave measurement, and permeability evaluation based on big data and artificial intelligence. Through the analysis of the applicability of the above methods, it was found that the wellbore Stoneley wave is closely related to the fluidity of fluid in the reservoir pore space and has a significant advantage in permeability evaluation. However, at present the permeability logging evaluation faces great challenges due to three reasons: the theoretical and experimental difficulty of determining permeability parameters themselves, the increasing complexity of evaluation objects, and the lack of equipment that can be used for continuous permeability measurement underground. This article points out that promoting the research on the theory, methods, and techniques of Stoneley wave permeability evaluation and constructing a new permeability evaluation technology system centered on Stoneley wave measurement is the development direction of the new generation logging technology.

**Keywords** permeability; porosity; stoneley wave; nuclear magnetic logging; big data

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.033

引用格式: 李宁, 王克文, 武宏亮, 冯周, 刘鹏, 李雨生. 渗透率测井评价: 现状及发展方向. 石油科学通报, 2023, 04: 432-444

LI Ning, WANG Kewen, WU Hongliang, FENG Zhou, LIU Peng, LI Yusheng. Permeability logging evaluation: Current status and development directions. Petroleum Science Bulletin, 2023, 04: 432-444. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.033

## 0 引言

储层渗透率决定油气的动用程度，其计算结果直接影响油气可采储量评价和后期开发方案的制定<sup>[1-3]</sup>。超深致密及非常规储层日渐成为油气勘探开发的重要领域，其评价对测井渗透率计算精度提出了更高的要求。

通过对井下钻取岩心进行渗透率实验，是获取储层渗透率参数最直接、最可靠的方法。由于取心分析成本高昂，加之其对钻井提速影响较大，所以只能在部分重点层段实施，数据点少且深度不连续。地层测试(如MDT)通过流体取样、压力测试可以确定储层渗透率参数，但由于井下泵抽能力限制并非所有储层地层测试技术均适用。试井资料记录了大量地层信息，利用试井资料可计算地层流动系数，而地层流动系数与储层渗透率有关。然而，由于试井测试亦存在施工周期长、成本高、资料有限等相关问题，导致基于试井资料的渗透率计算在实际应用中受限。在储层渗透率与测井响应关系研究基础上，利用测井资料进行渗透率间接计算是储层渗透率评价的重要途径，其主要优势在于资料易获取且具有深度连续性<sup>[4-5]</sup>。本文首先综述目前储层渗透率测井评价的技术现状及不同方法的适用性，然后分析渗透率评价面临的主要挑战，最后指出其发展方向。

## 1 渗透率测井评价技术现状

### 1.1 基于孔渗关系的渗透率评价方法

孔隙是形成渗透能力的必要条件，因此基于理论分析和实验研究提出的各种渗透率计算模型中大多包含孔隙度这一参数。对孔隙结构简单、均质性好的砂岩岩心，渗透率与孔隙度之间的关系简单，易于确定，但对复杂孔隙结构的非砂岩储层，准确孔渗关系的建立面临很大挑战。

利用毛细管模型和达西定律，Kozeny等较早导出了孔隙度—渗透率关系方程(即KC方程)<sup>[6]</sup>，若采用Archie地层因素表征孔隙迂曲度，则KC方程可变形为：

$$K = \frac{r^2}{8F} \quad (1)$$

式中， $K$ 为渗透率，mD； $F$ 为地层因素，无因次； $r$ 为孔喉半径， $\mu\text{m}$ 。由于式(1)中地层因素 $F$ 与孔隙度 $\phi$ 之间呈指数关系，因此渗透率 $K$ 与孔隙度 $\phi$ 也呈指数函数关系。

Herron(1987)开展了砂岩储层渗透率实验研究，发现当渗透率取对数后与孔隙度之间具有很好的线性关系<sup>[7]</sup>，并提出了如下渗透率计算公式：

$$K = ac^{b\phi} \quad (2)$$

式中， $a$ 和 $b$ 是常数。

需要指出的是，由于KC方程是基于理想的毛细管模型，式(2)是在均质砂岩中得出的实验关系，因此这2个公式的适用条件均有限，仅适用于孔隙发育且分布均匀的砂岩储层，对孔隙结构复杂、非均质性强的非砂岩储层不适用。

除孔隙度之外，孔隙结构是影响渗透率的关键因素，如图1所示，在孔隙度相同的情况下，不同孔隙结构储层渗透率差异很大。因此，为了提高渗透率计算精度，单纯考虑孔隙度这一参数是不够的，必须考虑孔隙结构及相关特性对渗透率计算的影响。

Timur(1968)较早提出了渗透率与孔隙度、束缚水饱和度关系式<sup>[8]</sup>：

$$K = 0.136 \frac{\phi^{4.4}}{S_{\text{wir}}^2} \quad (3)$$

式中， $S_{\text{wir}}$ 为束缚水饱和度，%。束缚水饱和度在某种程度上体现了孔隙结构特征，孔隙的结构越复杂、空间连通性越差，束缚水饱和度越高。因此式(3)相对于KC模型具有较大改进。在实验数据分析基础上，Timur(1969)进一步给出了利用自由流体指数( $FFI$ )计算砂岩储层渗透率的公式：

$$K = 0.381 \left[ \frac{\phi^{4.4}}{10^4 \left( 1 - \frac{1.4FFI - 3.2}{\phi} \right)^2} \right]^{0.83} \quad (4)$$

Amaefule等(1993)研究发现：总孔隙中只有部分孔隙对渗透率有贡献，相同孔隙度不同岩石类型，渗透率可能相差几个数量级。为了更精细地描述储层岩石的孔隙特征，提出了流动单元指数( $FZI$ )，以及基于 $FZI$ 的渗透率计算公式<sup>[9]</sup>：

$$K = 1014(FZI)^2 \left( \frac{\phi_e^3}{(1-\phi_e)^2} \right) \quad (5)$$

式中， $\phi_e$ 为有效孔隙度，小数。Ohen等(1995)进一步给出了利用核磁测井计算流动单元指数的方法<sup>[10]</sup>，Altunbay等(1997)提出了利用电阻率、伽马和骨架密度计算 $FZI$ 的方法<sup>[11]</sup>。碳酸盐岩储层孔隙类型多、结构复杂，渗透率与孔隙度之间关系十分复杂。从图1中可以看出，在相同孔隙度下，渗透率能相差几个数量级；当渗透率数值相同时，孔隙度亦呈现很大的变

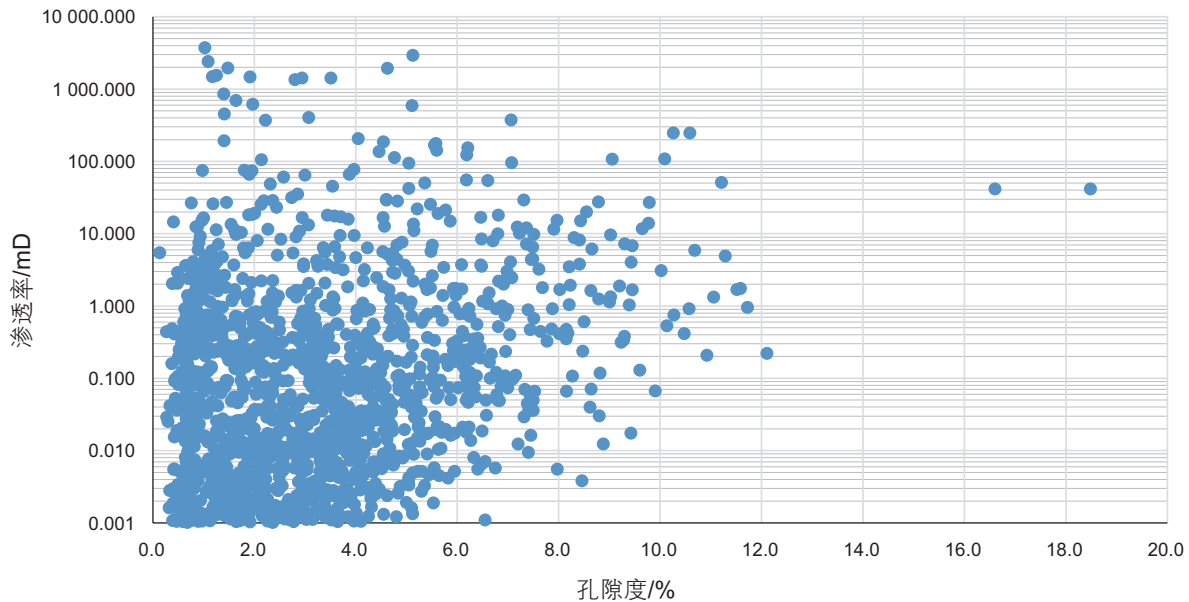


图1 非均质碳酸盐岩储层孔隙度—渗透率关系

Fig. 1 Porosity-permeability relationship in heterogeneous carbonate reservoirs

化范围, 渗透率与总孔隙度的关系很难用单一公式进行描述。因此, 如何提高碳酸盐岩储层渗透率计算精度是国内外学者重点研究的课题<sup>[12-14]</sup>。

Dziuba根据实验研究, 提出了下面用于计算碳酸盐岩渗透率的公式<sup>[12]</sup>:

$$K = \frac{r_{90}(1 - S_{wr})}{F} \quad (6)$$

式中,  $r_{90}$  为压汞曲线上汞饱和度 90% 对应的孔隙半径,  $\mu\text{m}$ ;  $S_{wr}$  为束缚水饱和度, %;  $F$  为地层因素, 无因次。上述参数可通过测井或岩心分析得到。

次生孔洞是碳酸盐岩储层中常见的孔隙类型, 其对渗透率的影响与原生粒间/晶间孔隙存在差异。通过对德克萨斯州西部二叠纪盆地碳酸盐岩储层进行研究, Xu等(2006)提出了利用孔洞孔隙度计算渗透率的方法<sup>[15]</sup>:

$$K = a\phi_{vg}^2 \times 10^{b\phi_{vg}} \quad (7)$$

式中,  $\phi_{vg}$  为基于成像测井计算的溶洞孔隙度;  $a$ 、 $b$  为常数,  $b$  反映了孔洞之间的连通性。 $a\phi_{vg}^2$  表示孔洞孔隙度为零时基质的渗透率, 参数  $a$  可以通过孔洞不发育层段岩心数据分析确定。当孔洞发育时, 储层岩心的渗透率主要由式(7)中右边的孔洞项确定。

高分辨率电成像测井是评价孔洞发育程度的重要方法, Burrowes等(2010)开展了根据岩心及成像测井资料研究碳酸盐岩孔隙结构的方法研究, 并分析、总结了孤立孔洞、连通孔洞、粒间孔隙、晶间孔隙以及裂缝等不同孔隙类型岩心的渗透率特征(图2)<sup>[16]</sup>。

裂缝是碳酸盐岩储层中另一重要孔隙类型, 且对渗透率具有显著影响。当同时存在孔洞、裂缝等复杂孔隙类型时, 由于孔、洞、缝的多种耦合作用, 渗透率的精确计算非常困难。谭廷栋(1987)总结了基质渗透率、裂缝渗透率的计算方法<sup>[17]</sup>, 赵良孝等(1991)提出了孔隙型、裂缝型碳酸盐岩储层渗透率计算公式<sup>[18]</sup>。黄宏等(2020)通过四川盆地高石梯—磨溪地区碳酸盐岩储层数字岩心实验及配套岩石物理实验研究发现, 孔隙连通性的好坏主要由大孔与中孔、微孔的

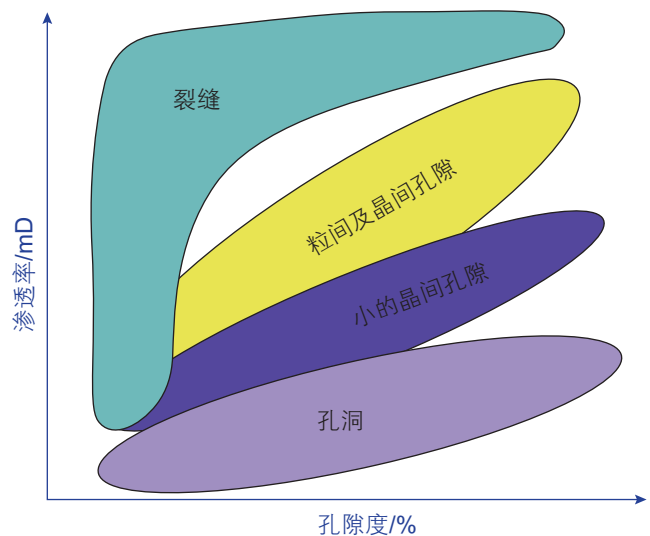


图2 不同孔隙结构碳酸盐岩储层孔渗关系(据Bueowes等<sup>[16]</sup>)  
Fig. 2 Porosity-permeability relationships of carbonate reservoirs with different pore structures (according to Bueowes et al<sup>[16]</sup>)

连通方式和连通效率决定。大、中喉道所占比例越高，连通孔隙比例越高；连通性越好，储层渗透率越大。储层基质渗透率与溶蚀孔洞渗透率、裂缝渗透率之间并非直接相加，而是存在耦合关系，进而提出了多重孔隙耦合作用渗透率计算新模型<sup>[19]</sup>：

$$K = K_m + (1+r_1)K_v + (1+r_1+r_2+r_3)K_f \quad (8)$$

式中， $K_m$ 、 $K_v$ 、 $K_f$ 分别为基质、孔洞及裂缝渗透率， $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 为耦合系数。

需要指出的是，尽管国内外针对碳酸盐岩、火山岩及致密砂岩等非均质储层渗透率影响因素及测井渗透率计算方法开展了深入研究，但很多方法只在特定地区或特定储层类型应用效果显著。考虑到不同孔隙类型、不同岩性储层的渗透率存在较大差异，难以采用单一公式准确描述不同储层孔隙度—渗透率关系，因此，目前针对此类储层提高渗透率测井计算精度的思路是：首先对储层进行分类，然后建立不同孔隙或不同储层类型的渗透率计算模型，最后分层段进行渗透率计算。当然，对储层进行分类的具体方法有多种：

1) 根据储层的孔隙类型进行分类，如司马立强等(2017)将非均质性极强的滩控岩溶型白云岩储层划分为溶洞型、溶孔型与基质孔隙型3种相对均质的储层类型，然后对每一类孔隙类型储层建立渗透率计算模型<sup>[20]</sup>；

2) 根据岩性对储层进行分类，如潘军等(2018)针对玛湖地区低渗透致密砂砾岩储层，先按照岩性将储层分为细砾岩、小中砾岩、大中砾岩和砂岩4种类型，然后通过多元回归分析建立了渗透率与孔隙度、黏土含量的关系<sup>[21]</sup>；

3) 储层沉积相是储层“四性”关系研究的基础，不同沉积相下储层特性存在明显差异，因此可在储层沉积相/微相分析基础上，建立不同类型储层的渗透率模型，如张鹏等(2017)针对不同沉积微相砂岩建立渗透率计算模型，提高了鄂尔多斯盆地低孔低渗储层渗透率测井评价精度<sup>[22]</sup>。

除上述分类方法外，还可基于测井相、岩石物理相等对储层进行分类，然后再进行渗透率评价<sup>[23-25]</sup>。

## 1.2 基于核磁共振测井的渗透率评价方法

渗透率与储层孔隙结构密切相关，而核磁共振测井是储层孔隙结构评价最重要的测井方法，因此，核磁共振渗透率评价是渗透率测井评价的重要方法。基于 $T_2$ 平均值和截止值(即分别反映可动饱和度与束缚饱和度)的渗透率计算是常用的核磁共振渗透率模

型<sup>[26-27]</sup>，这2类模型中除孔隙度这一参数外，还具有反映孔隙结构特征的变量。因此，当储层孔隙结构复杂时，核磁共振渗透率计算结果较常规渗透率计算结果具有较高的精度。下面重点介绍2类常用的核磁共振渗透率计算模型：

### 1) $T_2$ 平均值模型

储层孔隙半径的大小可以利用核磁 $T_2$ 分布平均值近似反应，SDR公式就是利用 $T_2$ 分布的几何平均值来计算渗透率：

$$K = C(\varnothing)^m (T_{2gm})^n \quad (9)$$

式中， $C$ 、 $m$ 、 $n$ 为常数； $\varnothing$ 为孔隙度，小数； $T_{2gm}$ 为 $T_2$ 几何平均值，ms。

由于油气会影响核磁 $T_2$ 谱的分布，进而影响几何平均值及渗透率的计算精度，因此SDR公式对水层有较好的预测结果，而当地层含油气时，计算的渗透率误差较大。

很显然，仅仅利用核磁 $T_2$ 分布平均值难以准确反应复杂储层的孔隙结构特征，因此，在SDR模型基础上，提出了扩展的核磁共振渗透率计算模型。Chi Lu等(2014)将连通性系数引入到核磁共振渗透率模型中，提出了如式(10)所示的渗透率计算模型，并分析了在砂岩、碳酸盐岩储层中的应用效果<sup>[28]</sup>。

$$K = a\varnothing^b T_{2gm}^c \left( \frac{C_j}{\sum_j C_j} \right)^d \left( \frac{N+H}{C_j} \right)^e \quad (10)$$

式中， $C_j$ 为 $j$ 方向的连通数； $N$ 为孤立孔隙组分数； $H$ 为完全封闭洞穴数； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 为常数，与孔隙结构及测量的渗透率方向有关。Chi Lu等(2018)对式(10)进行了2点改进<sup>[29]</sup>：一是，利用 $T_2$ 分布的2个峰值来计算 $T_2$ 平均值；二是利用方向地层因素来表示孔隙之间的连通性。

白松涛等(2016)研究了砂岩 $T_2$ 谱形态定量表征方法，并在此基础上提出了改进的核磁共振渗透率计算模型<sup>[30]</sup>：

$$K = 0.01\varnothing \sqrt{\frac{T_{2gm} \sigma_{T_2} T_{2h} \varnothing_{i,max}}{K_G}} \quad (11)$$

式中， $\varnothing_{i,max}$ 为最大孔隙度分量； $\sigma_{T_2}$ 为孔隙分选系数； $K_G$ 为峰度； $T_{2h}$ 为谱峰弛豫时间。由于式(11)是基于砂岩储层提出的，而碳酸盐岩等非均质储层核磁共振 $T_2$ 谱的特征及孔隙分布特征的特征方法与砂岩存在较大差别，因此，需要注意式(11)的应用范围。

姚艳斌等(2018)提出了如式(12)所述的页岩储层双 $T_2$ 几何平均值渗透率计算模型<sup>[31]</sup>。该模型采用了2

个反映核磁分布特征的 $T_2$ 几何平均值,从这个意义上说,其对孔隙结构的描述更为精细,但另一方面,该模型仅仅使用了 $T_2$ 几何平均值,而没有孔隙度这一重要参数,因此需要注意其适用条件。此外,该模型需要饱和水和束缚水状态的 $T_2$ 几何平均值,实际测井评价中准确确定模型中的参数本身面临挑战。

$$K = aT_{2ga}^b (T_{2gb})^c \quad (12)$$

式中, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为常数; $T_{2ga}$ 为饱和水 $T_2$ 几何平均值,ms; $T_{2gb}$ 为束缚水 $T_2$ 几何平均值,ms。

SDR模型利用 $T_2$ 分布的几何平均值来估算渗透率,该模型主要适用于中高孔渗的储层,随着评价对象非均质性增强、孔隙结构复杂性增加,单一的SDR模型难以满足生产实际的要求。为了提高SDR模型渗透率计算精度,有学者对模型中的系数进行了修正,也有学者提出将表面弛豫率引入SDR模型中。

## 2) 截止值渗透率模型

研究表明,储层岩石的渗透率与束缚水饱和度有关,而利用核磁 $T_2$ 截止值可以计算储层岩石的束缚水饱和度,进而计算渗透率参数。Timur(1968)提出了如下渗透率计算公式:

$$K = 10^4 \frac{\varnothing^{4.5}}{S_{wir}^2} \quad (13)$$

式中, $S_{wir}$ 为束缚水饱和度,小数。

Coates和Dumanoir在研究了束缚流体饱和度的基础上提出了一个广泛应用的公式,该公式具有多种变化形式,最常用的一种形式如式(14),该公式也称Coates-Timur公式或简称Coates公式。

$$K = \left(\frac{\varnothing}{C}\right)^m \left(\frac{BVM}{BVI}\right)^n \quad (14)$$

式中, $C$ 、 $m$ 和 $n$ 为三个常数,一般通过岩心实验确定,在没有岩心资料的情况下,取默认值 $C=10$ , $m=4$ , $n=2$ 。

随着评价对象复杂程度的增加,单一的截止值不足以准确描述复杂孔隙空间流体的流动性,Coates公式渗透率的计算精度不能满足勘探生产需求,因此,提出了利用多个截止值对不同孔隙组分进行精确划分的研究思路。如范宜仁等(2018)引入了 $T_2$ 双截止值的概念,将致密砂岩孔隙空间划分完全可动孔隙、完全束缚孔隙以及部分可动孔隙为3种,并据此提出了核磁双截止值渗透率计算公式<sup>[32]</sup>:

$$K = a \frac{S_{wmd}^b}{S_{wir}^c} T_{2gmd}^d \varnothing_{NMR}^e \quad (15)$$

式中, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 和 $e$ 为常数; $S_{wmd}$ 为完全可动流体饱

和度,小数; $S_{wir}$ 完全束缚流体饱和度,小数; $T_{2gmd}$ 为2个截止值之间 $T_2$ 几何平均值,ms; $\varnothing_{NMR}$ 为核磁孔隙度,小数。

核磁双截止值渗透率计算公式考虑了不同孔隙度对渗透率的影响,可更好地刻画岩石中流体的赋存状态和渗流规律。韩玉娇等(2018)进一步提出了一种基于核磁共振多组分孔隙分量组合的渗透率计算新方法<sup>[33]</sup>。该方法在实际应用中的局限性主要有以下2个方面:一是,气层或稠油层由于核磁谱峰形态有较大的差异,渗透率计算精度低;二是,如何确定多个截止值以及对应的流体组分是实际应用中必须面对的难题。

除多截止值之外,对Coates公式另一方面的改进是,在公式中引入反映储层孔隙连通性的参数。Chen Songhu等(2008)研究了碳酸盐岩孔隙连通因子对 $T_2$ 谱的影响,并对基于 $T_2$ 截止值渗透率模型进行了修正<sup>[34]</sup>:

$$K = \left(\frac{\varnothing}{C}\right)^m \left(\frac{p \cdot BVM}{BVI + (1-p)BVM}\right)^n \quad (16)$$

式中, $BVM$ 为可动流体体积, $\text{cm}^3$ , $BVI$ 为束缚流体体积, $\text{cm}^3$ ; $p$ 为连通性指数; $m$ 和 $n$ 为常数。

除上述2大类核磁共振渗透率模型以外,如何利用核磁测井资料对储层产能进行评价也是研究的一个重点,这一研究的实质也是对特定条件下储层渗流能力的研究。如李宁等(2015)研究指出,如果把直径大于70 $\mu\text{m}$ 的孔隙占整个岩样体积的百分比定义为CT70孔隙度,则CT70孔隙度既反映储集层主要储集空间也反映储集层渗流能力。对于非均质孔隙—孔洞型碳酸盐岩储集层,其产气量与CT70孔隙度之间存在指数函数关系。通过CT—核磁同比例转换(图3),可确定与CT70孔隙度对应的核磁孔隙度及核磁 $T_2$ 特征值,进而利用核磁测井资料预测产气量(图4)。岩心及核磁测井资料分析表明,与CT70孔隙度对应的岩心核磁 $T_2$ 特征值为20ms,CMR型核磁测井 $T_2$ 特征值为20ms、P型核磁测井 $T_2$ 特征值为54ms<sup>[35]</sup>。

## 1.3 基于斯通利波测量的渗透率评价方法

当斯通利波穿过渗透性地层时,孔隙中流体的流动会导致斯通利波衰减,并同时发生频散,这种衰减、频散与地层的渗透率及裂缝发育情况密切相关。Williams等(1984)最早提出了利用斯通利波评价渗透率。1989年,李宁通过全波测量实验研究了不同模式波首波的相位关系,首次发现斯通利波首波相位与

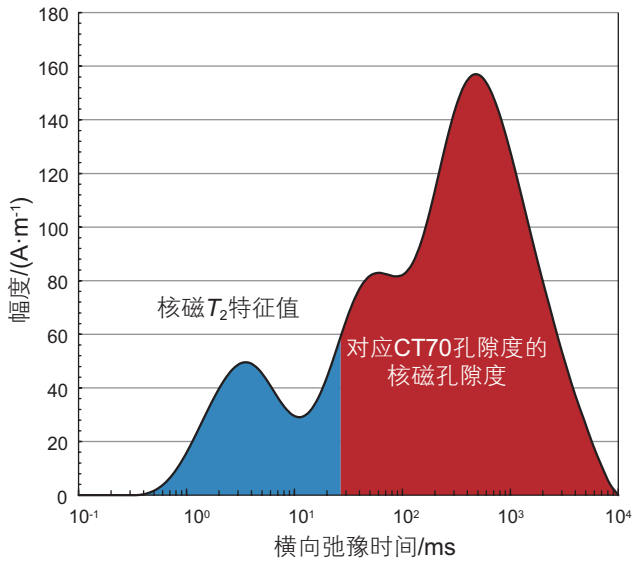


图3 CT—核磁同比例转换  
Fig. 3 proportional transformation between CT and NMR

纵波首波相位相同，而与横波首波相位相反，并且其相位变化满足余弦函数关系，从而为斯通利波首波幅度准确提取以及进一步的斯通利波储层评价奠定了基础<sup>[36]</sup>。Winkler等(1989)利用实验证实斯通利波与渗透率有较好的相关性。Tang Xiaoming等(1991)提出简化的Biot-Rosenbaum模型，并利用实际斯通利波相对于模拟信号的频移和时滞来反演渗透率<sup>[37-41]</sup>。

井筒斯通利波的传播与衰减与孔隙中流体流动密切相关，是裂缝及渗透率评价的有效手段。不少学者从理论与实验的角度研究了斯通利波渗透率评价的可靠性。Yin Hezhu等(2018)研究了不同孔隙类型储层的渗透率特征、斯通利波渗透率计算方法，并将斯通利波渗透率与岩心分析渗透率、MDT测试结果进行了对比，结果表明无论是高渗透率层段还是低渗透率层段，斯通利波渗透率与岩心分析结果均吻合很好，且与MDT具有很好的一致性<sup>[42]</sup>。

亦有众多学者开展了基于斯通利波幅度衰减、频移或时滞进行渗透率计算的方法研究<sup>[43-45]</sup>，由于这些方法需要在波场分离基础之上，利用简化的Biot-Rosenbaum模型进行反演计算，且涉及到井眼及岩性界面的校正，处理过程复杂。如图5是Yin Hezhu等(2018)采用的斯通利波渗透率反演流程。

斯通利波的衰减与渗透率密切相关，因此寻找斯通利波衰减幅度与渗透率之间的直接相关关系是近年的研究重点。考虑到裂缝渗透率与裂缝宽度具有定量关系，因此，若能建立斯通利波与裂缝宽度的解析关系式，则利用斯通利波测井资料可以进行裂缝渗透率直

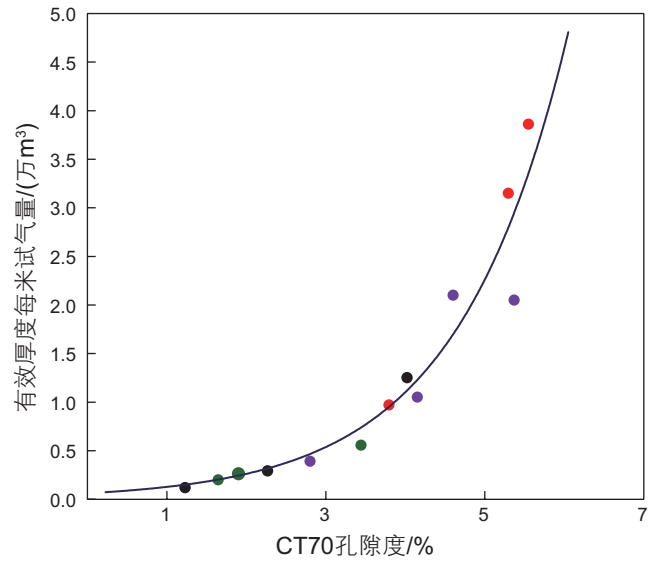


图4 核磁测井产气量预测  
Fig. 4 Prediction of gas production based on NMR well logging

接计算。为了寻找类似计算饱和度的“Archie”公式，Li Ning等(2019)开展了井下真实碳酸盐岩岩心激波管实验及其理论分析，研究不同宽度水平裂缝对斯通利波的影响<sup>[46]</sup>。李宁等(2021)进一步通过实验研究了不同裂缝条件下斯通利波幅度衰减特征及定量规律<sup>[47]</sup>，包括裂缝宽度、倾角、延伸长度及填充物等不同因素对斯通利波幅度衰减的影响。

为了定量描述斯通利波的衰减规律，定义斯通利波经过裂缝前后的相对幅度 $R_{st}$ 。相对幅度 $R_{st}$ 有效消除了岩心基质物性差异等干扰因素，能更准确地反映裂缝对斯通利波影响的强弱。 $R_{st}$ 的数值越接近1，裂缝对斯通利波的衰减越小； $R_{st}$ 数值越接近0，裂缝对斯通利波的衰减越大。实验数据分析表明，斯通利波相对幅度与裂缝宽度之间满足如下关系<sup>[47]</sup>：

$$R_{st} = a_1 e^{b_1(W_f^{n_1} + W_f^{n_2})} \quad (17)$$

式中 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $n_1$ 和 $n_2$ 为常数。图6中红色实线即(17)式，可以看出，实验数据点基本都落在红色曲线上，说明(17)式刻画了裂缝宽度对斯通利波幅度的影响规律。(17)式中的指数部分由 $f_1(W_f)$ 与 $f_2(W_f)$  2项组成，它们随裂缝宽度衰减的变化规律分别如图6中绿色、蓝色实线所示。由图6可见，第1部分 $f_1(W_f)$ 为裂缝对斯通利波影响的主体，随着裂缝宽度的增加呈指数衰减；第2部分 $f_2(W_f)$ 对斯通利波的影响相对较小。

此外，牟瑜等(2019)开展斯通利波能量表征方法的研究，优选与碳酸盐岩储层渗透率相关性最强的幅度衰减系数，建立了如下渗透率定量计算模型<sup>[48]</sup>：

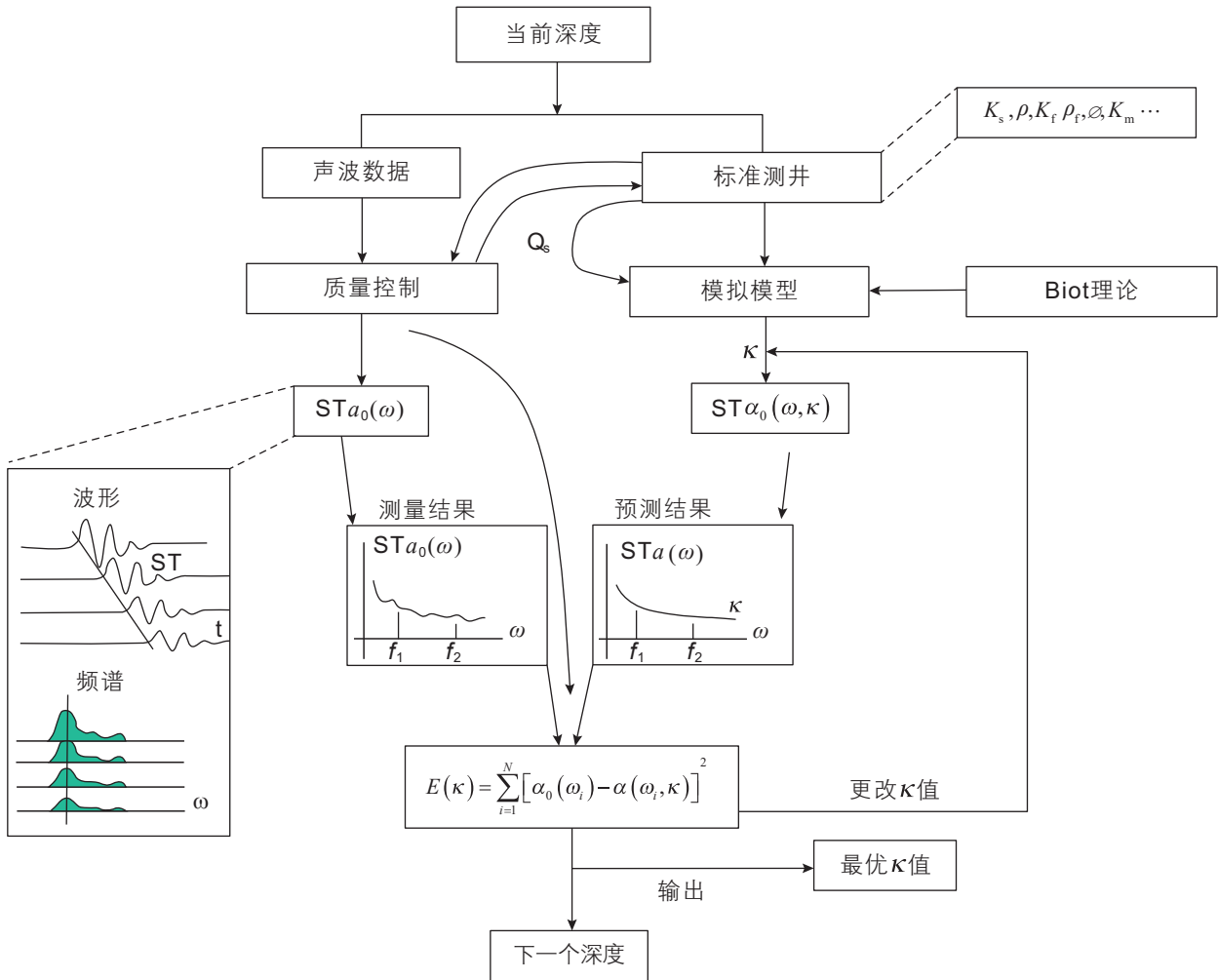


图 5 斯通利波衰减反演地层渗透率流程图

Fig. 5 Flow chart of permeability inversion based on Stoneley Attenuation

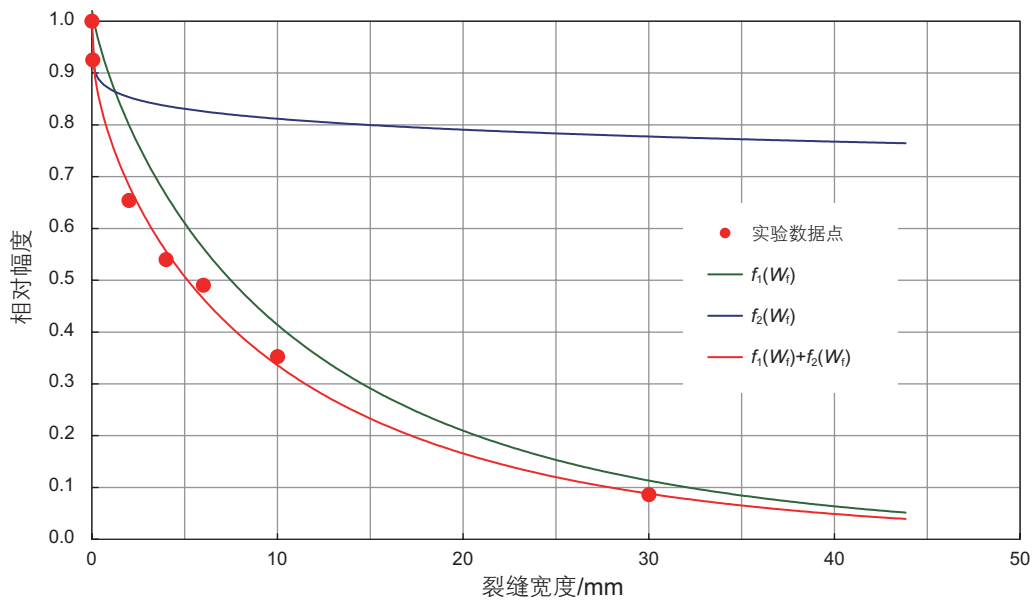


图 6 不同裂缝宽度下斯通利波相对幅度变化规律

Fig. 6 Attenuation of Stoneley wave relative amplitude under different fracture widths

$$K = 0.0522e^{8.9393C_{DE}} \quad (18)$$

式中  $C_{DE}$  为计算的波形衰减系数。

显然，在现有的测井方法中，井筒斯通利波对渗透率变化最直接、最敏感，是评价储层渗透率最为有效的方法。由于低频斯通利波激励困难，前期研究更多侧重在理论分析和数值模拟基础上的渗透率反演方法方面，缺乏针对实际储层岩心的实验研究。近年来，笔者团队深入开展了斯通利波实验方法研究，并在此基础上形成了斯通利波衰减定量表征及测井数据处理方法。为了建立测井斯通利波渗透率评价的完整技术体系，还需进一步开展以下几个方面的研究：①由于实验室岩心实验条件与真实地层条件存在差异，需要研究基于激波管实验的井筒斯通利波定量表征的刻度方法；②斯通利波渗透率评价模型中参数的变化规律及测井条件下的确定方法；③井下斯通利波的高精度探测方法和测井装备。

#### 1.4 基于大数据和人工智能的渗透率评价方法

神经网络等智能分析技术，由于其具有高度非线性的映射能力和极强的自适应和自学习能力，在渗透率预测中亦被广泛使用。李宁等(2021)分析了人工智能在测井地层评价中的应用现状，指出渗透率评价是人工智能在测井中的重要应用领域<sup>[49]</sup>。目前，渗透率的智能预测方法总体上可以分为有监督浅层机器

学习、有监督深层机器学习和半监督机器学习 3 大类。

有监督浅层机器学习方法源于 20 世纪 80 年代到 90 年代中期神经网络方法研究的兴起，如 BP 神经网络，径向神经网络、玻尔兹曼机、限制玻尔兹曼机都是在这一时期被提出。Mohaghegh 等(1994)设计了三层神经网络方法计算渗透率<sup>[50]</sup>。马力等(2002)应用改进的人工神经网络 BP 模型，大大提高了储层孔隙度和渗透率的预测精度<sup>[51]</sup>。Sadegh 等构建的 SCMNN 模型由 30 个估计器组合而成，每个估计器由一个选择高、低渗透率的门阀网络，形成一个识别高渗透率数据的网络和识别低渗透率数据的网络<sup>[52]</sup>。输入数据后，由门阀网络将数据输入给相应的高渗透率网络或低渗透率网络，最后进行渗透率预测输出，这种联合求解减少了“多解性”(图 7)。

深度学习中的残差结构、随机丢失模块等新机制出现可有效解决深层网络学习中梯度消失、易过拟合等问题。在处理核磁共振测井资料时，传统 SDR 弛豫时间-渗透率模型建立了核磁共振测井的横向弛豫时间谱( $T_2$  谱)与渗透率之间的联系，但其对致密砂岩储层参数的预测精度不高，Zhu 等(2017)结合 Ada-boost 集成算法，设计了一种利用集成正则化改进后向传播神经网络(BPNN, back propagation neural network)算法与核磁共振  $T_2$  谱预测致密储层渗透率的方法，取得了良好的应用效果<sup>[53]</sup>。朱林奇等研究发现 15 层的深

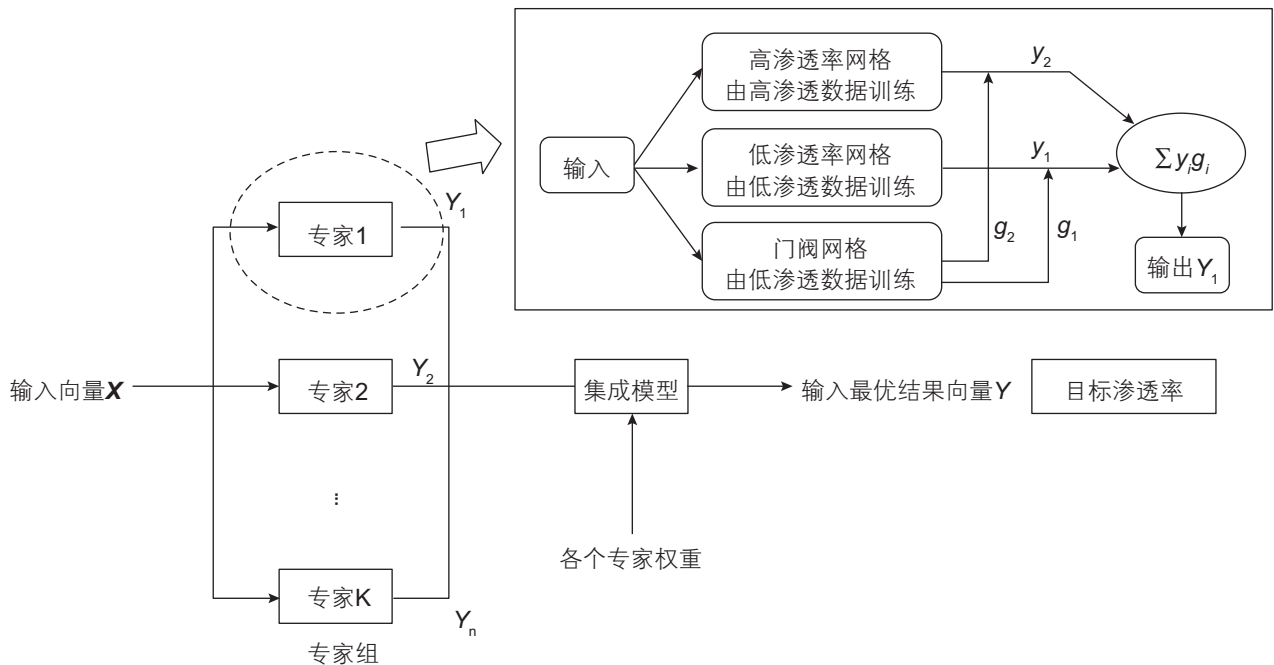


图 7 SCMNN 模型中估计器示意<sup>[52]</sup>

Fig. 7 Schematic of the estimator in the SCMNN model<sup>[52]</sup>



度置信网络能有效提取岩心样本特征,其结合极限学习机可解决现有核磁共振测井对低孔低渗储层的渗透率预测效果欠佳的问题<sup>[54]</sup>。

半监督学习物性参数计算的第一步也是采用K均值聚类、自编码等无监督方法进行岩相划分。吴进波<sup>[55]</sup>针对不同流动单元构建了精细的渗透率评价模型;Bennis等<sup>[56]</sup>基于测井曲线的变化规律,利用机器学习和无监督岩石分类技术对岩石物理特性进行了预测;Arkalgud<sup>[57]</sup>提出一种鲁棒性岩石物理分析方法——领域转移分析方法,该方法不仅可以计算饱和度和渗透率,还可以识别储层岩相、重构测井曲线等。

## 2 渗透率评价面临的挑战

### 2.1 影响渗透率的因素复杂

相对于孔隙度、饱和度等储层参数而言,渗透率的影响因素多、响应机理复杂。首先,孔隙度、饱和度是标量,而渗透率是与流动路径有关的矢量;其次,孔隙度、饱和度的响应具有体积加权特性,而渗透率通常不具有体积加权特性;再者,渗透率不仅影响因素多,且不同影响因素之间存在耦合,如渗透率既与孔隙结构、流体类型有关,也与孔隙—流体的界面特性和相互作用有关。因此,渗透率影响机理、定量评价模型研究面临非常大的挑战。

### 2.2 油气勘探对象日趋复杂

随着勘探开发程度的不断提高,我国油气资源劣质化的趋势日渐明显。首先,勘探对象的物性变差,致密、低渗特低渗储层逐渐成为勘探的重要对象;其次,勘探对象的岩性复杂、孔隙类型多样,非均质性强;再者,以页岩油为代表的非常规储层多具薄互层结构,非均质性和各向异性极强,给渗透率实验室精确测量及渗透率测井评价模型的构建均带来巨大困难。

### 2.3 渗透率测井评价技术体系尚未建立

一种测井方法要形成完整的工业应用技术体系,需在基础理论、实验技术、解释方法、处理软件和测井仪器等方面进行系统深入研究。经过90多年的发展,关于储层孔隙度、饱和度评价的相关理论、实验、解释及井下测量装备等已很完善,形成了成熟的测井技术体系。对斯通利波渗透率评价而言,尽管近年来在基础理论、实验技术及处理软件等方面取得了长足进展,但斯通利波渗透率评价的“Archie”公式的应用效果尚有待进一步验证、不同储层斯通利波渗透率

评价方法以及井下斯通利波高精度测量仪器等正在研发。因此,斯通利波渗透率测井评价技术体系尚未建立,这是渗透率测井评价面临的最大困难。

## 3 发展方向

基于上述对渗透率测井评价现状的认识,为了提高渗透率测井评价精度,亟需进一步加强对斯通利波渗透率评价理论、方法和技术的研究,提出并建立以测井渗透率评价为核心的全新技术体系。

### 3.1 加强理论研究,提出渗透率计算的“Archie”公式

经典的威利时间平均公式、著名的Archie公式是测井孔隙度、饱和度定量计算的理论基础。尽管目前提出了众多渗透率计算的公式,但大多是基于实验或测试数据的拟合公式或者区域性的经验公式,而真正基于地层岩石物理响应、能够反映渗透率物理本质的计算公式至今仍未建立。斯通利波在储层渗透率评价中具有巨大优势,本文作者率先提出了斯通利波相对幅度与裂缝宽度之间的定量关系(式17),目前正对关系式中参数的物理意义、影响因素以及参数的确定方法等做深入研究,寻找并确立渗透率计算的“Archie”公式是渗透率评价理论研究的核心理论。

### 3.2 加强方法研究,形成斯通利波井下探测及数据处理方法

如前所述,目前孔隙度、饱和度测井系列已日益完善,但针对渗透率的测井方法还未形成。斯通利波属于低频模式波(低于5 kHz),而声源频率与其体积呈反比,因此在数千乃至万米井下有限的井眼空间中,高精度低频斯通利波的激励非常困难。目前仅斯伦贝谢SonicScanner、哈里伯顿Xaminer电缆测井仪器附带斯通利波测量模式,而国产声波测井探测器激发频率高(10~15 kHz),无单独的斯通利波测量模式。因此深入研究斯通利波井下探测及数据处理方法是新一代渗透率测井技术发展的重点。

### 3.3 加强技术研究,形成渗透率井下高精度探测装备及处理软件

在理论、方法研究基础之上,井下高精度测井装备研制及地面快速处理分析软件研发是渗透率测井发展的另一重要方面。目前深层、超深储层已经成为油气勘探开发的重要领域,井下恶劣测量环境给斯通利波渗透率测井仪器研制和高精度数据处理带来了严峻

挑战。为了建立完整的渗透率评价技术体系，需进一步加强以下几个方面研究：井下耐高温高压新型低频换能器优化设计及制造技术；井下耐高温高压低频激励电路设计及封装技术；复杂井眼条件下斯通利波数据处理、高精度刻度及渗透率计算软件模块等。

需要指出的是，不同的测井方法反映了储层不同的属性及特征，为了提高复杂储层测井渗透率评价精度，需要充分利用多种测井信息对储层岩性、物性、孔隙结构、流体性质等进行综合评价，进而提升储层渗透率测井评价精度。因此，新一代渗透率测井是以渗透率评价为核心的测井技术系列，在该系列中斯通利波测井是核心。除此之外，也需同步发展其它测井及测试技术，如阵列化的常规测井、高精度成像测井（如核磁、电成像和元素测井等）、智能化的地层测试器和高精度的井场近原位岩心分析技术等。这些新的测井、测试及岩心分析技术，能够提供更多、更准确的地层信息，可为复杂储层渗透率测井评价提供重要支撑。

## 4 结论

(1)利用测井资料进行渗透率计算具有资料丰富、深度连续等优点，是储层渗透率评价的重要方法；基于孔渗关系、核磁共振测井、斯通利波测量以及大数据与人工智能的渗透率计算是目前渗透率测井评价的主要方法。

(2)渗透率影响因素多，而目前油气勘探对象日益复杂，储层物性变差，非均质性增强，再加之没有以渗透率评价为核心的测井装备，使得渗透率测井高精度评价面临巨大挑战。

(3)斯通利波在渗透率评价中具有明显优势。加强斯通利波渗透率评价理论、方法和技术研究，构建以斯通利波测井为核心，高精度成像测井、智能化地层测试和井场近原位岩心分析等技术同步发展的渗透率测井评价技术体系是提高渗透率评价精度的关键，是新一代测井技术发展的方向。

## 参考文献

- [1] 李宁. 中国海相碳酸盐岩测井解释概论[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [LI N. Introduction to logging interpretation of marine carbonate rocks in China[M]. Beijing: Science Press, 2013.]
- [2] 李宁, 陶宏根, 刘传平, 等. 酸性火山岩测井解释理论、方法与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009. [LI N, TAO H G, LIU C P, et al. Theory, method, and application of acid volcanic rock logging interpretation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.]
- [3] 王小敏, 樊太亮. 碳酸盐岩储层渗透率研究现状与前瞻[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 166–174. [WANG X M, FAN T L. Progress of research on permeability of carbonate rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 166–174.]
- [4] 闫国亮. 基于数字岩心储层渗透率模型研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013. [YAN G L. Research of permeability models of reservoirs based on digital cores[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.]
- [5] 王鑫, 张旭阳, 黄长兵, 等. 试油数据在估算致密砂砾岩储层渗透率中的应用[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 214–217+238. [WANG X, ZHANG X Y, HUANG C B, et al. Application of oil test data in estimating permeability of tight glutenite reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(2): 214–217+238.]
- [6] CARMAN P C. Fluid flow through granular beds[J]. Institution of Chemical Engineers, 1937, 15: 150–166.
- [7] HERRON M M. Estimating the intrinsic permeability of clastic sediments from geochemical data[C]//SPWLA Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1987.
- [8] TIMUR A. An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships[C]//SPWLA Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1987.
- [9] AMAEFULE J O, ALTUNBAY M, TIAB D, et al., Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic(flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells[C]//SPE 26436, 1993.
- [10] OHEN H A, AJUFO A, CURBY F M. A hydraulic (flow) unit based model for the determination of petrophysical properties from NMR relaxation measurements[J]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 22–25, 1995.
- [11] ALTUNBAY M, GEORGI D, TAKEZAKI H M. Permeability prediction for carbonates: Still a challenge?[C]//Society of Petroleum Engineers, 1997.
- [12] DZIUBA T T. Improved permeability prediction in carbonates[C]//SPWLA 37th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, 1996.
- [13] 徐鹏宇, 周怀来, 官俊洁, 等. 碳酸盐岩储层自适应模型常规测井渗透率预测[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(5): 1192–1203+1007–1008. [XU P Y, ZHOU H L, GUAN J J, et al. Permeability prediction of carbonate reservoirs by conventional logging with adaptive model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(5): 1192–1203+1007–1008.]

- [14] 吕苗苗, 宋本彪, 田昌炳, 等. 中东地区孔隙型碳酸盐岩储层渗透率主控因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(03): 70–76. [LV M M, SONG B B, TIAN C B, et al. Key controlling factors of permeability in porous carbonate reservoirs of Mishrif Formation in the Middle East[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(3), 70–76.]
- [15] XU C M, RICHTER P, RUSSELL D, et al. Porosity partitioning and permeability quantification in Vuggy carbonates using wireline logs, Permian Basin, West Texas[J]. PETROPHYSICS, 2006, 47(1): 13–22.
- [16] BURROWES A, MOSS A, SIRJU C, et al. Improved permeability prediction in heterogeneous carbonate formations[C]//SPE EURO-PEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. 2010.
- [17] 谭廷栋. 裂缝性油藏测井资料定量解释[J]. 石油与天然气地质, 1987(02): 171–176. [TAN T D. Quantitative log interpretation of Fracture reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 1987, 8(2): 171–176.]
- [18] 赵良孝. 测井在四川碳酸盐岩储层研究中的应用(上)[J]. 天然气工业, 1991(4): 43–46+12. [ZHAO L X. Application of log information to the study of carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1991(4): 43–46+12+62.]
- [19] 黄宏, 闫伟超, 刘航, 等. 四川盆地高石梯-磨溪地区深层碳酸盐岩储层渗透率评价[J]. 测井技术, 2020, 44(05): 462–467. [HUANG H, YAN W C, LIU H, et al. Permeability log evaluation of deep carbonate reservoirs in Gaoshiti-Moxi Block, Sichuan Basin[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(05): 462–467.]
- [20] 司马立强, 陈志强, 王亮, 等. 基于滩控岩溶型白云岩储层分类的渗透率建模方法研究——以川中磨溪—高石梯地区龙王庙组为例[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(03): 92–102. [SIMA L Q, CHEN Z Q, WANG L, et al. Permeability modeling based on the classification of beach-controlled karst dolomite reservoirs: a case from Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(03): 92–102.]
- [21] 潘军, 杨国栋. 玛湖地区低渗透致密砂砾岩储层渗透率模型研究及应用[J]. 测井技术, 2018, 42(03): 321–324. [PAN J, YANG G D. Research and application of permeability model of low permeability and dense sandy conglomerate reservoir in Mahu area[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(03): 321–324.]
- [22] 张鹏, 樊云峰. 鄂尔多斯盆地低孔低渗储层渗透率测井建模研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(17): 172–177. [ZHANG P, FAN Y F. Permeability logging model-building of low porosity and low permeability reservoirs of in Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(17): 172–177.]
- [23] 赖锦, 王贵文, 罗官幸, 等. 基于岩石物理相约束的致密砂岩气储层渗透率解释建模[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(03): 1173–1182. [LAI J, WANG G W, LUO G X, et al. A fine logging interpretation model of permeability confined by petrophysical facies of tight gas sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(03): 1173–1182.]
- [24] 路萍, 王浩辰, 高春云, 等. 致密砂岩储层渗透率预测技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(06): 2428–2438. [LU P, WANG H C, GAO C Y, et al. Research progress of permeability prediction technology for tight sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(06): 2428–2438.]
- [25] 金武军, 李军, 武清钊, 等. 页岩气储层渗透率测井评价方法研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(01): 177–182. [JIN W J, LI J, WU Q Z, et al. Study on well logging evaluation method of gas shale permeability[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 177–182.]
- [26] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998. [XIAO L Z. Nuclear magnetic resonance imaging logging and nuclear magnetic resonance of rock and its application[M]. Beijing: Science Press, 1998.]
- [27] 谭茂金. 油气藏核磁共振测井理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. [TAN M J. Theory and application of nuclear magnetic resonance logging in oil and gas reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 2017.]
- [28] CHI L, HEIDARI Z. Directional-permeability assessment in formations with complex pore geometry with a new Nuclear-Magnetic-Resonance-Based permeability model[C]//Spwla, 2014.
- [29] CHI L, ROTH S. A new directional permeability model combining NMR and directional resistivity measurements for complex formations[C]//the SPWLA 59th Annual Logging Symposium held in London, 2018.
- [30] 白松涛, 程道解, 王金彬, 等. 砂岩岩石核磁共振  $T_2$  谱定量表征[J]. 石油学报, 2016, 37(03): 382–391+414. [BAI S T, CHENG D J, WANG J B, et al. Quantitative characterization of sandstone NMR  $T_2$  spectrum[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 382–391+414.]
- [31] 姚艳斌, 刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱技术的页岩储层物性与流体特征研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(01): 181–189. [YAO Y B, LIU D M. Petrophysical properties and fluids transportation in gas shale: A NMR relaxation spectrum analysis method[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(01): 181–189.]
- [32] 范宜仁, 刘建宇, 葛新民, 等. 基于核磁共振双截止值的致密砂岩渗透率评价新方法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(04): 1628–1638. [FAN Y R, LIU J Y, GE X M, et al. Permeability evaluation of tight sandstone based on dual  $T_2$  cutoff values measured by NMR[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(4): 1628–1638.]
- [33] 韩玉娇, 周灿灿, 范宜仁, 等. 基于孔径组分的核磁共振测井渗透率计算新方法——以中东A油田生物碎屑灰岩储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(01): 170–178. [HAN Y J, ZHOU C C, FAN Y R, et al. A new permeability calculation method using nuclear magnetic resonance logging based on pore sizes: A case study of bioclastic limestone reservoirs in the oilfield of the Mid-East[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 170–178.]

- [34] CHEN S H, JACOBI D, KWAK H, et al. Pore-Connectivity based permeability model for complex carbonate formations[C]//SPWLA 49th Annual Logging Symposium, 2008.
- [35] 李宁, 王克文, 张宫, 等. 应用CT分析及核磁测井预测碳酸盐岩产气量[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(02): 150–157. [LI N, WANG K W, ZHANG G, et al. Prediction of gas production in carbonates based on CT analysis and nuclear magnetic resonance (NMR) logging[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 150–157.]
- [36] 李宁. 纵、横波首波相位关系实验现象的解释及其对全波测井的意义[J]. 地球物理测井, 1989, 13(4): 14–20. [LI N. Interpretation of the experimental phenomena about the P and S-Head wave phase relations and its significance to full wave logging[J]. Well Logging Technology, 13(4): 1989, 14–20.]
- [37] HORNBY B E, JOHNSON D L, WINKLER K W, et al. Fracture evaluation using reflected Stoneley-wave arrivals[J]. Geophysics, 1989, 54(10), 1274–1288.
- [38] KOSTEK S, JOHNSON D L, RANDALL C J. The interaction of tube waves with borehole fractures, Part I: Numerical models[J]. Geophysics, 1998, 63(3): 800–808.
- [39] KOSTEK S, JOHNSON D L, WINKLER K W, et al. The interaction of tube waves with borehole fractures, Part II: Analytical models[J]. Geophysics, 1998, 63(3), 809–815.
- [40] TANG X M, CHENG C H. Quantitative borehole acoustic methods[M]. San Diego: Elsevier, 2004.
- [41] TANG X M, CHENG C H. Fast inversion of formation permeability from stoneley wave logs using a simplified biot-rosenbaum model[J]. Geophysics, 1996, 61(3): 639–645.
- [42] YIN H Z, WU X, YOSE L. Permeability derivation from sonic stoneley wave attenuation measurements: Application in a giant carbonate field from middle east[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [43] 庄春喜, 李杨虎, 孔凡童, 等. 随钻斯通利波测井反演地层渗透率的理论、方法及应用[J]. 地球物理学报, 2019, 62(11): 4482–4492. [ZHUANG C X, LI Y H, KONG F T, et al. Formation permeability estimation using stoneley waves from logging while drilling: theory, method, and application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(11), 4482–4492.]
- [44] 潘卫国, 冯进, 管耀. 利用斯通利波评价中孔低渗地层渗透率[J]. 应用声学, 2018, 37(04): 496–503. [PAN W G, FENG J, GUAN Y. Evaluation of permeability in medium-porosity and low-permeability formation based on stoneley wave[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(04): 496–503.]
- [45] 陈刚, 潘保芝. 利用斯通利波反演地层渗透率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(S1): 77–81. [CHEN G, PAN B Z. Inversion method of permeability using stoneley wave[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(S1): 77–81.]
- [46] LI N, WANG K W, WU H L, et al. Shock-induced Stoneley waves in carbonate rock samples[J]. Geophysics, 2019, 84(5): D2009–D2016.
- [47] 李宁, 王克文, 刘鹏, 等. 不同裂缝条件下斯通利波幅度衰减实验[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(02): 258–265. [LI N, WANG K W, LIU P, et al. Experimental study on attenuation of stoneley wave under different fracture factors[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(02): 258–265.]
- [48] 牟瑜, 张蕾, 罗少成, 等. 基于斯通利波能量分析的碳酸盐岩储层渗透性评价[J]. 测井技术, 2019, 43(04): 386–390. [MU Y, ZHANG L, LUO S C, et al. Permeability evaluation of carbonate reservoirs through stoneley wave energy analysis[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(4): 386–390.]
- [49] 李宁, 徐彬森, 武宏亮, 等. 人工智能在测井地层评价中的应用现状及前景[J]. 石油学报, 2021, 42(04): 508–522. [LI N, XU B S, WU H L, et al. Application status and prospects of artificial intelligence in well logging and formation evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 508–522.]
- [50] MOHAGHEGH S, AREFI R, AMERI S, et al. Design and development of an artificial neural network for estimation of formation permeability[J]. SPE Computer Applications, 1995, 7(6): 151–154.
- [51] 马力, 郑艳辉. 人工神经网络预测木头油田储层孔隙度渗透率[J]. 河南石油, 2002, 16(3) : 15–17+2. [MA L, ZHENG Y H. Prediction reservoir porosity and permeability of Mutou Oilfield with artificial neural network[J]. Henan Petroleum, 2002, 6(3): 15–17+2.]
- [52] SADEGH K, NADER F, JABER R. A new approach to improve neural networks' algorithm in permeability prediction of petroleum reservoirs using supervised committee machine neural network (SCMNN)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 73(3–4): 227–232.
- [53] ZHU L Q, ZHANG C, WEI Y, et al. Permeability prediction of the tight sandstone reservoirs using hybrid intelligent algorithm and nuclear magnetic resonance logging data[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(4): 1643–1654.
- [54] 朱林奇, 张冲, 周雪晴, 等. 融合深度置信网络与核极限学习机算法的核磁共振测井储层渗透率预测方法[J]. 计算机应用, 2017, 37( 10): 3034–3038. [ZHU L Q, ZHANG C, ZHOU X Q, et al. Nuclear magnetic resonance logging reservoir permeability prediction method based on deep belief network and kernel extreme learning machine algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(10): 3034–3038.]
- [55] 吴进波. MRGC方法在储层分类及渗透率精细评价中的应用[J]. 海洋石油, 2017, 37(1): 49–53. [WU J B. Application of reservoir

- classification and permeability elaborate evaluation with MRGC method[J]. *Offshore Oil*, 2017, 37(1): 49–53.]
- [56] BENNIS M, TORRES-VERDÍN C. Estimation of dynamic petrophysical properties from multiple well logs using machine learning and unsupervised rock classification[C]//2019 SPWLA 60th Annual Symposium. 2019.
- [57] ARKALGUD R, MCDONALD A, CROMBIE D. Domain transfer analysis- a robust new method for petrophysical analysis[C]// SPWLA 60th Annual Logging Symposium, 2019.

(编辑 杨雅露)