

基于弹性波速的砂砾岩非均质性评价方法

王蒙恩¹, 王小琼^{1*}, 马德龙², 张晓娟², 黄可可¹, 赵宇豪¹, 侯朔阳¹, 葛洪魁¹

(1. 油气资源与工程全国重点实验室 中国石油大学(北京), 北京, 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 为识别砂砾岩岩心内部裂缝与层间砾石分布差异, 准确评价砂砾岩岩心的空间非均质性, 提高油气开采效率, 在实验室中, 利用弹性超声波波速对岩石内部结构差异的敏感响应, 对来自准噶尔盆地沙湾凹陷区域的 18 块砂砾岩露头岩心进行波速测量, 建立了一种基于分层测量弹性波速的非均质性无损评价方法。取 15 块样品作为测试岩心, 利用该方法对其进行非均质性评价; 取剩余 3 块样品作为验证岩心并与其波速分布进行对比验证。结果表明: (1) 该评价方法能够有效识别砂砾岩中砾石分布、孔缝等非均质性特征, 评价岩心的空间非均质性; (2) 与传统非均质性评价方法相比, 该评价方法具有非破坏性、灵敏度高、速度快、成本低等优势; (3) 测试岩心和验证岩心的非均质性评价结果较为一致。该方法能够为砂砾岩的非均质性评价提供良好借鉴。

关键词: 岩石力学; 砂砾岩; 非均质性; 波速; 评价方法; 沙湾凹陷; 无损评价

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)02-0525-12

第一作者: 王蒙恩(1999-), 现为硕士研究生, 主要从事非常规油气储层岩石物理、岩石力学、地质力学方面的研究工作。E-mail: wme8514@163.com

***通信作者:** 王小琼(1984-), 现任研究员, 主要从事非常规油气储层岩石物理、岩石力学、地质力学方面的研究工作。E-mail: wxq4526@163.com

An evaluation method for glutenite heterogeneity based on elastic wave velocity

WANG Meng'en¹, WANG Xiaoqiong^{1*}, MA Delong², ZHANG Xiaojuan²,

HUANG Keke¹, ZHAO Yuhao¹, HOU Shuoyang¹, GE Hongkui¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: To identify the distribution differences between fractures and interlayer gravels within glutenite cores, accurately evaluate spatial heterogeneity, and enhance hydrocarbon recovery efficiency, this study employed elastic ultrasonic wave velocity—a parameter highly sensitive to variations in the internal rock structure—to measure wave velocities in 18 outcrop cores collected from the Shawan Sag in the Junggar Basin. A non-destructive evaluation method for heterogeneity was established based on stratified elastic wave velocity measurements. Fifteen samples were utilized as test cores for heterogeneity assessment using this method, while the remaining three served as validation cores, with their velocity distributions compared for verification. The results demonstrate that: (1) the proposed method effectively identifies heterogeneity characteristics, such as gravel distribution and pore-fracture networks in glutenite, enabling an accurate assessment of spatial

收稿日期: 2025-08-20; **修回日期:** 2025-10-09

基金项目: 中石油基础性前瞻性重大科技专项(2023ZZ0205); 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1401403); 国家自然科学基金面上项目(42374132)

Supported by the China National Petroleum Corporation Fundamental and Forward-looking Major Science and Technology Project (Grant No. 2023ZZ0205), National Science and Technology Major Project on New Types of Oil and Gas Exploration and Development (Grant No. 2025ZD1401403) and General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42374132)

heterogeneity; (2) the method offers several advantages over conventional heterogeneity evaluation techniques, including non-destructiveness, high sensitivity, rapid measurement, and cost-effectiveness; and (3) consistent heterogeneity evaluation results were obtained between the test and validation cores. Therefore, this method can serve as a valuable reference for heterogeneity assessment in glutenite reservoirs.

Key words: rock mechanics; glutenite; heterogeneity; wave velocity; evaluation method; Shawan Sag; non-destructive evaluation

First author: WANG Meng'en (1999 -), postgraduate student, is engaged in research on petrophysics, rock mechanics and geomechanics of unconventional oil and gas reservoirs. E-mail: wme8514@163.com

***Corresponding author:** WANG Xiaoqiong (1984 -), research fellow, is engaged in research on petrophysics, rock mechanics and geomechanics of unconventional oil and gas reservoirs. E-mail: wxq4526@163.com

1 引言

致密砂砾岩储层是非常规油气资源的重要载体,我国砂砾岩储层分布广泛、储量丰富,在大庆油田徐家围子地区、辽河油田西部凹陷、华北油田廊固凹陷、大港油田滩海地区、胜利油田东营凹陷、车镇凹陷和沾化凹陷等诸多地区均有分布^[1]。此外,准噶尔盆地玛湖凹陷、松辽盆地徐家围子断陷等区域已探明超亿吨级储量,其高效开发对保障国家能源安全具有重要意义^[2-4]。然而致密砂砾岩体具有近物源、厚度大、相变快的特征,储集物性差,沉积类型多样,空间展布复杂,其非均质性显著高于常规砂岩储层^[5-6]。同时,在砂砾岩储层中,砾石粒径大小及分布会对水力裂缝扩展产生重要影响^[7],这导致在油气开发过程中普遍存在注采不见效、水窜严重及采收率低等问题。因此,如何精确表征砂砾岩储层的非均质性,建立有效的评价预测方法,是砂砾岩油气藏高效开发的关键问题之一。

针对储层的非均质性评价,前人已开展了诸多研究,如通过岩心观察、粒度分析、薄片鉴定等方法确定砾石成分与含量,建立砾石粒度-分选性分类标准^[2, 8];借助常规岩心分析、核磁共振测试、X射线计算机层析扫描、拼接扫描电镜测试和扫描电镜矿物定量评价等手段建立砂砾岩多组分三维数字岩心,识别砂砾岩岩心中的主要矿物组分和多尺度孔隙空间分布^[9];通过电成像测井定量评价方法,计算电成像测井图像的分形维数来综合表征溶孔、裂缝,评价储层非均质性^[10];采用数值模拟技术,利用离散元法(discrete element method, DEM)构建砾石-基质混合模型,描述不同尺寸砾石分布下的力学响应^[11];通过计算平面内砾石面积占比来评价岩心非均质性^[12-13]。上述方法均可应用于评价岩心

非均质性,但需进行大量的处理工作,耗费时间长,成本高。岩石的波速各向异性特征可以表征岩石的各向异性,也是表征非均质性的方法之一^[14]。国内外学者通过测量致密储层岩石在不同频段下的纵波速度与衰减特性,揭示了弹性波速与岩石非均质性之间的内在关联,即岩石的非均质性决定了弹性波的传播环境,而波速的响应则反映其结构特征^[15]。另一方面, G. Gowtham 和 J. P. Sahoo^[16]借助纵波、横波波速建立非均质性模型,系统分析了土壤介质的非均质性对圆形隧道地震稳定性的影响,进一步从工程实践角度证实了弹性波速在岩石非均质性评价中的重要意义。刘见通^[17]以弹性波速为评价指标定义了一种波速非均质系数 HV 来表征储层的非均质性,对砾石的分布不均响应效果较好,但该方法尚不能很好地识别岩心中孔缝以及砾石的空间分布不均对岩心非均质性的影响。本文在此基础上提出分层提取砂砾岩岩心截面砾石特征并引入了截面裂缝敏感性修正系数 M 与层间突变因子 N ,对 18 块岩心进行波速测量,建立了一种基于弹性波速的非均质性无损评价方法,定义为非均质性综合评价指数 HI (Heterogeneity Index)。相较于 HV 指数, HI 指数通过耦合岩心中孔缝与砾石层间分布不均特征,建立了新的非均质性评价模型,提升了评价结果的准确性。

2 试验样品与试验方法

2.1 试样制备

试验样品来自准噶尔盆地沙湾凹陷区域砂砾岩露头。砂砾岩主要由砾石、砂粒和基质组成,李宁等^[18-19]研究发现,水力压裂时,砾石粒径会对裂缝扩展产生影响。为深入研究不同砾石粒径尺寸对岩心非均质性的影响,保证波速测量时测点分布可靠、

数据准确，本次研究共钻取了 18 块圆柱形岩心(直径 50 mm，长度 100 mm)。按照岩心表面砾石颗粒大小将样品分为大，中，小粒径 3 组，每组 6 块。其中每组中取 5 块样品作为测试样，1 块样品作为验证样(见图 1)。其中 S06[#]，S16[#]，S26[#]样品用于验证评价方法的可靠性。

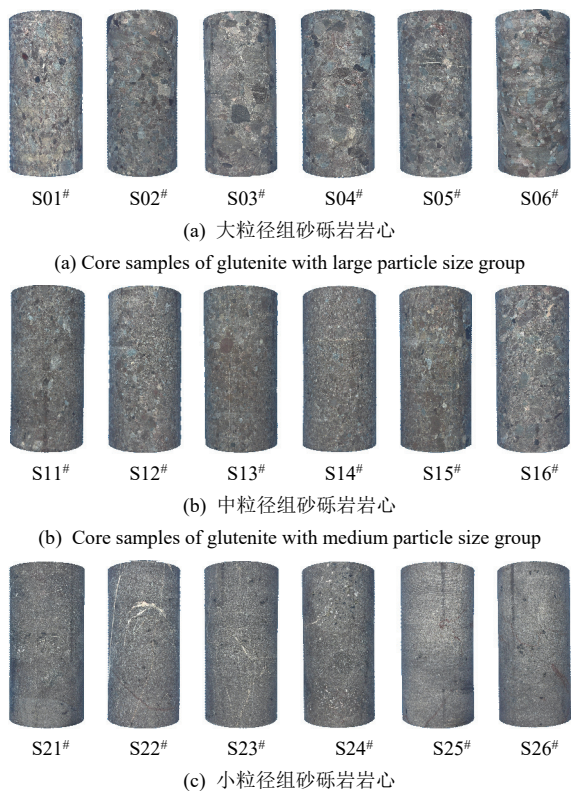


图 1 不同粒径下砂砾岩样品

Fig.1 Samples of glutenite with different particle sizes

2.2 试验仪器与方法

实验室中通常通过测量纵、横波波速获取岩心的基本物理性质，并可获得岩心的动态杨氏模量和动态泊松比等岩石力学参数以及波速各向异性等重要信息。试验采用的超声波波速测试系统由 Tektronix-DPO2024B 数字示波器、Olympus - 5077PR 脉冲发射接收器、自制岩心夹具、超声波发射与接收探头组成。超声波测试系统如图 2 所示。Olympus - 5077PR 脉冲发射接收器发生脉冲信号，通过发射换能器(声波探头)，将电信号转化为振动信号，振动信号穿过岩样后被另一端的接收换能器接收并将其转化为电信号，由示波器记录波形，完成测试。示波器采集声波信号时，采用 10 MHz 的采样率进行采样，并采集至少 100 次波形进行叠加以增加波形的信噪比。由于纵波对岩心中的裂隙及流体敏感且

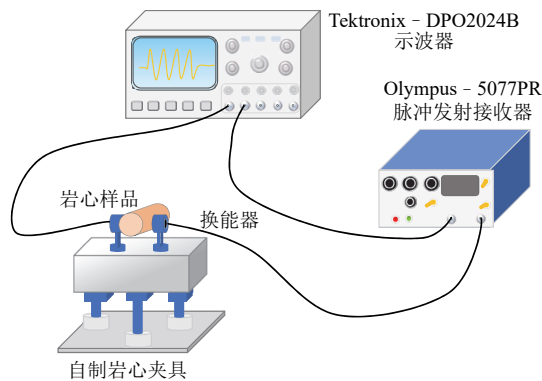


图 2 超声波测试系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ultrasonic testing system

易于采集，因此本文主要获取岩心的纵波速度。脉冲从发射信号端经过岩心回到接收信号端需要一段时间 t_p ，考虑测量时的系统误差 t_0 ，仪器需进行校准调零，纵波速度的计算式为

$$V_p = \frac{L}{t_p - t_0} \quad (1)$$

式中： V_p 为岩心纵波速度(km/s)， L 为纵波通过岩心的距离(本文指岩心的直径 d ，mm)， t_p 为纵波传播时间(μ s)， t_0 为换能器之间的校零时间(μ s)。

岩心尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，为保证测量时的可操作性及测得波速数据的客观有效性，沿岩心轴向取高度分别为 $h_1 = 25 \text{ mm}$ ， $h_2 = 50 \text{ mm}$ ， $h_3 = 75 \text{ mm}$ 的 3 个径向截面将岩心等分为 4 个部分，并在每个截面上按顺时针方向每 20° 测量一次波速，共计 9 次。截面及测量位置的选取方法如图 3 所示。

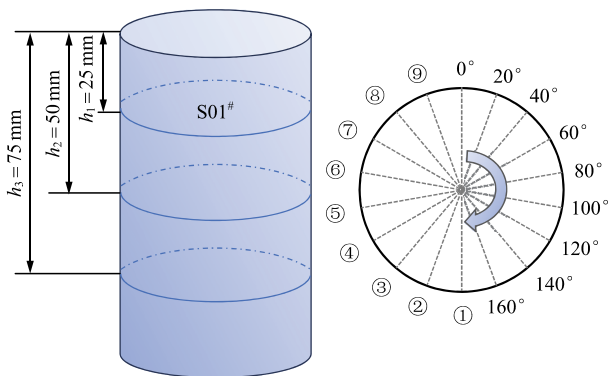


图 3 岩心截面选取及波速测点位置示意图

Fig.3 Location map of wave velocity measurement points and selected core sections

3 砾石特征提取方法研究

3.1 岩心表面砾石特征提取

砾石含量、砾石粒径尺寸、孔缝等都是影响砂

砾岩非均质性的重要因素，如何定量表征砂砾岩的空间结构特征和几何特征是评价其空间非均质性的关键。目前，砾石特征提取常采用筛析法和图像特征提取法。因筛析法需要破碎岩石样品，不仅会损耗大量岩心，而且由于砾石尺寸的不规律性，导致计算砾石尺寸时过程繁琐，准确性较差。因此采用数字图像法提取岩心表面砾石特征。以 S01#样品为例，步骤如下：

(1) 将岩心样品置于旋转台上，固定相机位置，拍照记录；岩心按顺时针方向每旋转 20° 记录 1 次，共计 18 次，得到岩心不同角度下的照片(见图 4)。

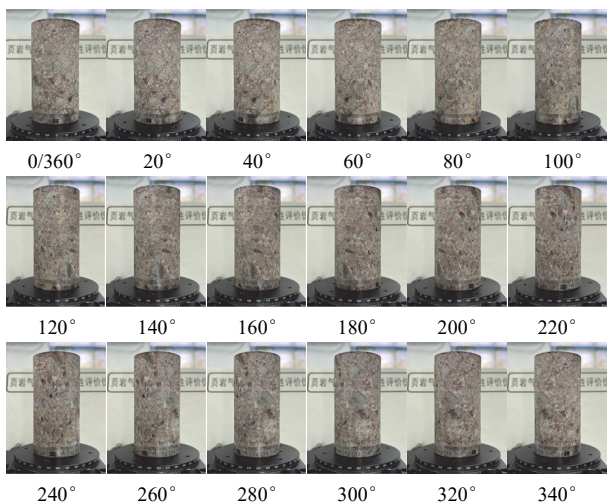


图 4 S01#岩心不同角度下周圈照片

Fig.4 Photos of the #S01 core from different angles

(2) 拼接岩心周圈照片得到其侧面展开图。为方便观察和计算，沿岩心轴向长 50 mm 处，按照轴向每 90° 将其侧面展开图均分为 8 个网格，依次编号为①~⑧，如图 5 所示。

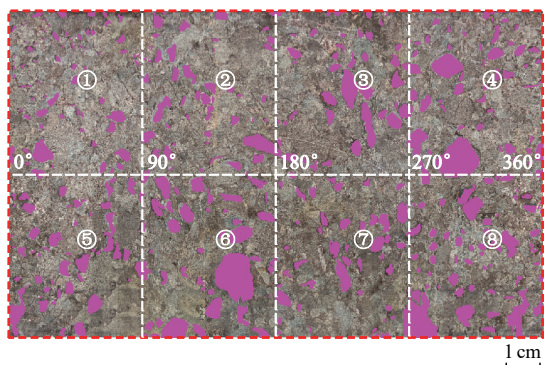


图 5 S01#岩心砾石分布特征提取效果图

Fig.5 Results of gravel distribution feature extraction for core #S01

(3) 为使砾石特征更加明显，基于图像 RGB 值(红色、绿色、蓝色 3 种基本颜色亮度值)对岩心侧

面展开图进行多阈值区域分割，再进行网格划分，以提取砾石分布特征^[20-24]，其中红色部分代表砾石，由图 5 可知，该样品砾石分布不均、砾石尺寸不一，非均质性较强。

3.2 砾石特征评价参数研究

根据图 5 划分的网格，不同网格内砾石分布与砾石粒径尺寸有明显差异。将每个网格中砾石所占面积与网格面积的比值定义为砾石分布系数 α ($0 < \alpha < 1$)。 α 值越大，则表征该区域内砾石含量越高。将上下 2 个网格计算得到的 α 值作差并取绝对值，定义为 β ($0 < \beta < 1$)，以网格①与⑤为例，即 $\beta = |\alpha_1 - \alpha_5|$ 。 β 值越大，说明两网格之间的非均质性越强。以 S01#为例，按照此方法，分别计算岩心的 α ， β 值，数据记录如表 1 所示。

表 1 S01#岩心砾石分布 α 与 β 值

Table 1 α and β values of gravel distribution in core #S01

网格(grid)	α	β
①	12.37	-
②	16.76	-
③	13.52	-
④	24.54	-
⑤	19.98	7.61
⑥	29.29	12.53
⑦	17.30	3.78
⑧	27.54	3.00

由表 1 可知，网格④，⑥，⑧中砾石含量较多，分布最广泛，面积占比分别为 24.54%，29.29%，27.54%；网格①，③中砾石含量较少，面积占比分别为 12.37%，13.52%；网格②和⑥之间的砾石含量差异最大，为 12.53%，非均质性最强；网格④和⑧之间的砾石含量差异最小，为 3%，均质性较好，这与直观观察一致。同理，取中粒径 S11#样品与小粒径 S21#样品分别重复上述操作，发现该方法仍然适用，因此数字图像法提取砾石特征能够用于评价砂砾岩的非均质性。

4 纵波波速评价非均质性

声波测井是生产中获取储层信息的重要手段。声波测量受砾石含量和粒径的影响，纵波穿过砾石时会发生散射，干涉纵波传播路径，降低纵波穿过时的速度，且砾石含量越高，粒径越大，对纵波传播的干涉作用越强烈，波速降低效果越明显。因此

不同测量路径下的纵波波速能够反映岩心在不同方向上的砾石含量，适用于评价岩心的非均质性。基于此，结合砾石特征提取方法，测量岩心的纵波速度并进行非均质性评价。

4.1 岩心端面砾石特征评价

拍照记录岩心端面，按粒径进行分组(见图 6)，其中图 6(a)~(c)分别代表大粒径组、中粒径组、小粒径组岩心端面。提取岩心端面砾石分布特征(见图 7)，其中图 7(a)~(c)分别表示大粒径组、中粒径组和小粒径组岩心端面砾石及微裂隙分布。由图 6, 7 可知，大粒径组砂砾岩样品中含有大量明显且颗粒较大的砾石；中粒径组砂砾岩样品中含有大量较小粒径的砾石；而对于小粒径组的砂砾岩样品，砾石含量明显减少，且粒径也最小，但可见明显的微裂隙(S21#, S25#, S26#)。利用该方法不仅可以表征

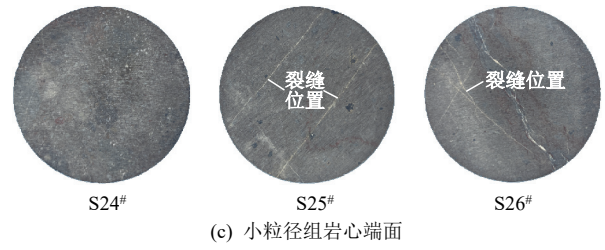
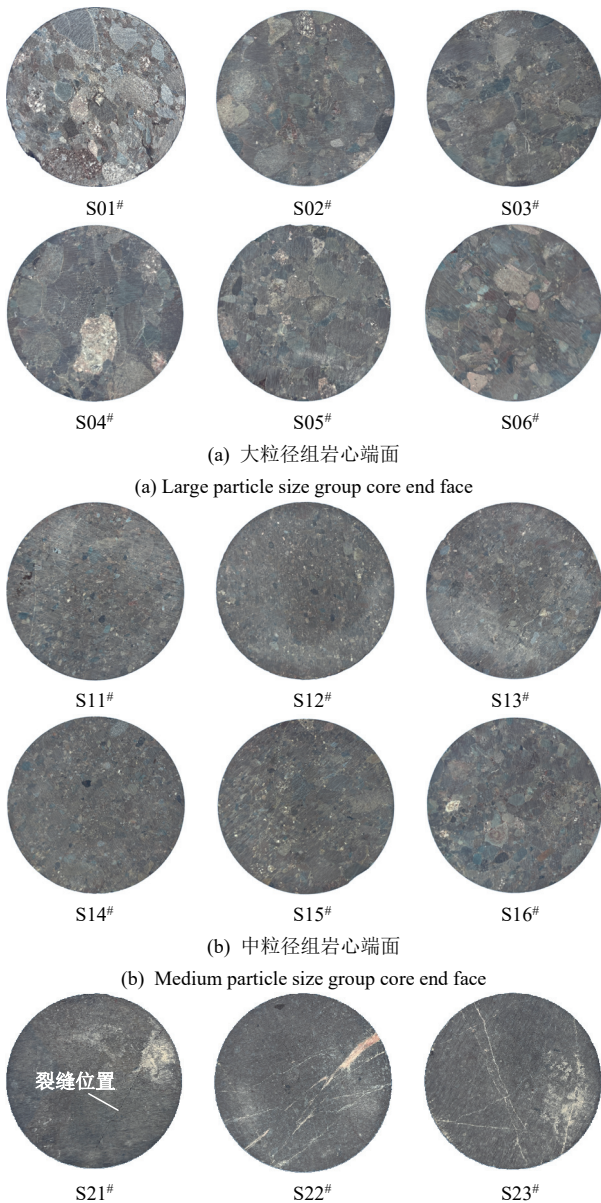


图 6 不同粒径砂砾岩岩心端面图

Fig.6 Glutenite core end faces with different grain sizes

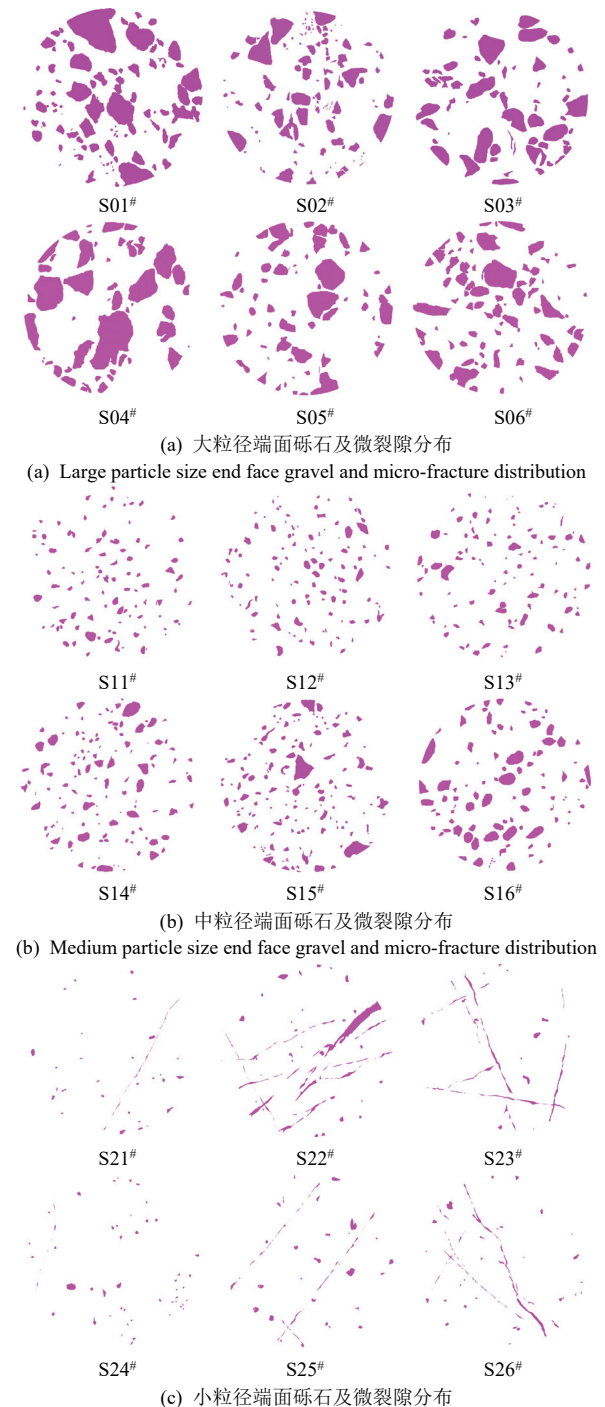


图 7 不同粒径砂砾岩岩心端面砾石及微裂隙分布图

Fig.7 Distribution of gravel and microfractures in glutenite core end faces with different grain sizes

砾石分布特征,也能表征端面的微裂隙分布。总之,岩心端面与岩心横截面同岩心侧面一致,均能够反映岩心的非均质性。

4.2 波速非均质性测量

测量并计算不同粒径岩心沿3个截面不同角度的纵波波速 V_p ,部分数据如表2所示。以S01#岩心为例,在 $h = 25, 50, 75$ mm三个截面上的纵波速度极差依次为243, 384和633 m/s,相较于各截面

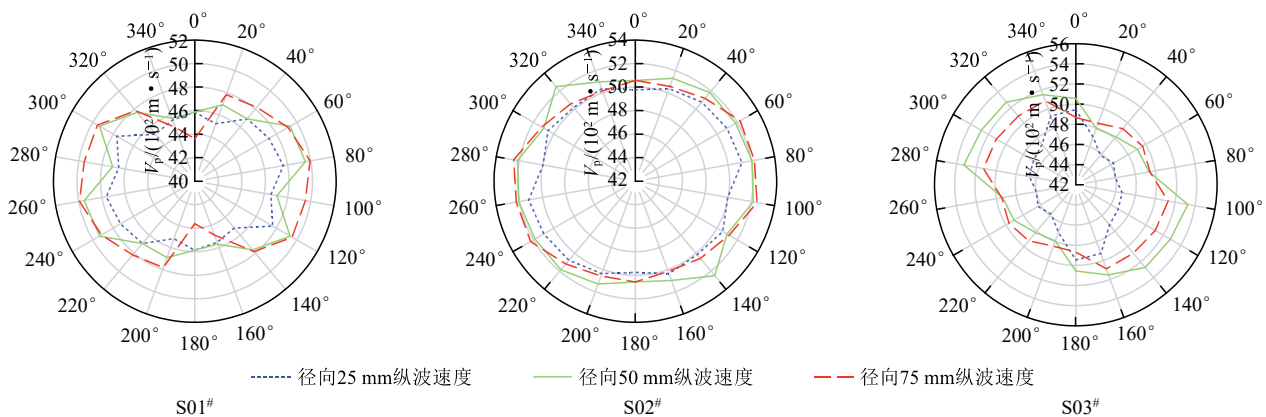
上最小波速的波动幅度分别为5.38%, 8.40%和14.52%,不同截面之间差异较大。这表明在不同截面上纵波速度具有显著的空间变异性,能够对岩心的空间非均质结构做出敏感响应。

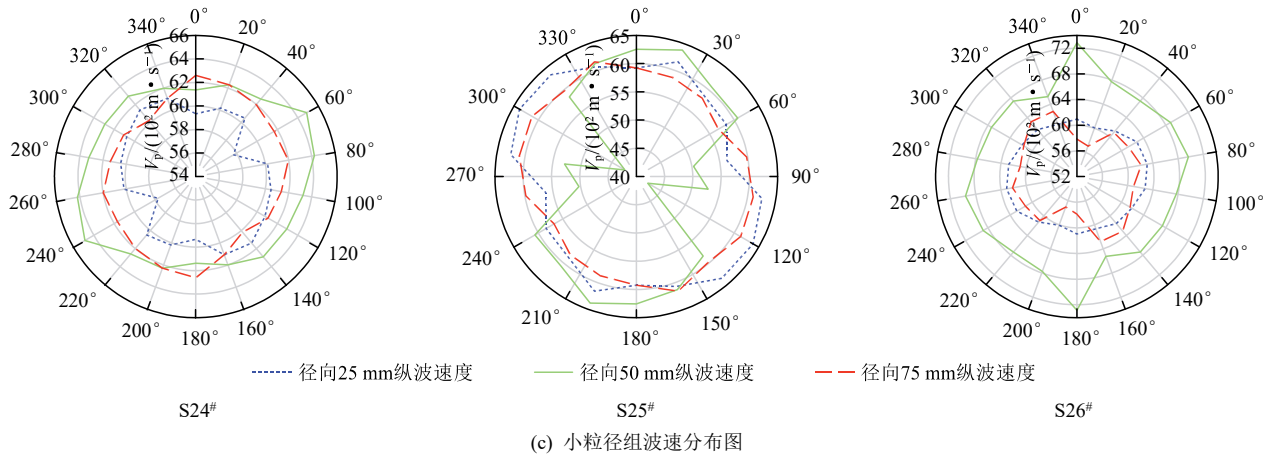
将波速数据绘制在极坐标系(θ, r)中,其中, θ 坐标轴表示测量角度, r 坐标轴表示纵波速度 V_p ,蓝、绿、红色线条分别代表在 $h = 25, 50, 75$ mm截面处由波速数据连接得到的闭合曲线(见图8)。

表2 砂砾岩样品不同截面处纵波速度测量结果

Table 2 Measurement results of P-wave velocity at various sections of the glutenite sample

岩心编号 (core No.)	截面高度 (cross-section height)/mm	岩心纵波速度 (longitudinal wave velocity of core)/(m · s ⁻¹)									
		0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
S01#	25	4 587	4 520	4 691	4 727	4 763	4 656	4 763	4 520	4 553	4 587
	50	4 587	4 691	4 691	4 934	4 954	4 709	4 934	4 763	4 570	4 587
	75	4 361	4 782	4 819	4 915	4 994	4 954	4 954	4 782	4 487	4 361
S02#	25	4 976	5 036	5 078	5 098	5 119	4 996	5 057	5 016	5 036	4 976
	50	5 057	5 130	5 183	5 183	5 205	5 216	5 098	5 249	5 098	5 057
	75	5 057	5 057	5 119	5 227	5 227	5 249	5 119	5 057	5 016	5 057
...											
S11#	25	5 425	5 265	5 332	5 287	5 265	5 378	5 449	5 473	5 425	5 425
	50	5 620	5 521	5 473	5 402	5 425	5 473	5 521	5 672	5 546	5 620
	75	5 521	5 310	5 177	5 243	5 287	5 355	5 546	5 546	5 497	5 521
S12#	25	5 648	5 700	5 598	5 648	5 548	5 700	5 598	5 523	5 451	5 648
	50	5 752	5 726	5 779	5 726	5 752	5 752	5 648	5 648	5 674	5 752
	75	5 598	5 648	5 598	5 573	5 523	5 573	5 523	5 475	5 523	5 598
...											
S21#	25	5 690	5 395	5 466	5 904	5 588	5 613	5 961	5 932	5 664	5 690
	50	5 690	5 588	5 613	5 795	5 690	5 639	6 166	6 197	5 849	5 690
	75	5 877	5 989	5 768	5 716	5 563	5 768	5 768	5 742	5 563	5 877
S22#	25	5 417	5 465	5 513	5 348	5 213	5 417	5 638	5 613	5 394	5 417
	50	5 587	5 538	5 441	5 795	5 795	5 769	5 822	5 563	5 716	5 587
	75	5 769	5 742	5 822	5 850	5 822	5 905	6 019	6 108	6 049	5 769
...											





(c) Small particle size group wave velocity distribution map
图8 砂砾岩岩心不同截面波速分布图

Fig.8 Distribution of wave velocity at various sections of the glutenite core

图 8(a)~(c)分别为大粒径组、中粒径组和小粒径组的截面波速分布图。由图 8 可知：(1) 若某截面上闭合曲线的轮廓越接近于圆，则说明岩心在该截面上的均质性越好，如 S23#的均质性优于 S13#；(2) 若同一岩心上得到的 3 条闭合曲线重合度越高，则代表其层间均质性越好，如 S23#的层间均质性优于 S04#的层间均质性。

4.3 非均质性综合评价指数 HI

目前，针对砂砾岩非均质性的评价方法主要有 T. Li 等^[12-13]建立的非均质性评价公式，以及刘见通^[17]建立的波速非均质性系数 HV，计算式分别为

$$H = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{m-1}} \quad (2)$$

$$HV = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(v_i - \bar{v})^2}{n}}}{\bar{v}} \quad (3)$$

式中： H 为基于砾石特征的非均质性(量纲一)， A_i 为非均质体(砾石)面积(mm^2)， \bar{A} 为砾石平均面积(mm^2)， m 为非均质体的数量， HV 为波速非均质系数(量纲一)， v_i 为同一截面上不同测点波速(m/s)， \bar{v} 为该截面上 v_i 的平均值(m/s)， n 为该截面上测点数量。取每块样品在 3 个测量平面内波速非均质系数的平均值作为样品的波速非均质系数。

在评价砂砾岩的非均质性时，式(2)中的方法需要进行砾石特征提取并进行砾石面积计算等大量图像处理工作，费时费力。式(3)中的方法能够识别同一截面内的波速差异，但该方法一是不能反映不同截面间的波速差异；二是对岩心内部孔缝造成的非均质性响应不敏感。为此，本研究考虑了裂缝以及

不同截面间波速差异对非均质性的影响，基于岩心波速试验结果，提出了新的非均质性评价方法，并定义为非均质性综合评价指数 HI，具体计算步骤如下：

(1) 定义截面波速非均质性系数，计算式为

$$W = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(v_i - \bar{v})^2}{n}}}{\bar{v}} \quad (4)$$

式中： W 为截面波速非均质性系数(量纲一)，3 个截面波速非均质性系数分别表示为 W_{25} ， W_{50} ， W_{75} (对应每一个截面高度 25，50，75 mm)。本文中 $n=9$ 。分别评价各个截面的非均质性。

(2) 定义截面裂缝敏感性修正系数，计算式为

$$M = 1 + \frac{|\bar{v} - v_{\min}|}{\bar{v}} \quad (5)$$

式中： M 为截面裂缝敏感性修正系数， $M>1$ ，量纲一，3 个截面裂缝敏感性修正系数分别为 M_{25} ， M_{50} ， M_{75} ； v_{\min} 为该截面上波速最小值(m/s)。采用此公式评价截面裂缝敏感性修正系数是因为波速对裂隙非常敏感，裂隙发育，波速越低，其波速的均值与最小波速之间的关系即可表征裂隙的影响。

(3) 定义层间突变因子，计算式为

$$N = 1 + \frac{(\bar{v}_{25}, \bar{v}_{50}, \bar{v}_{75})_{\max} - (\bar{v}_{25}, \bar{v}_{50}, \bar{v}_{75})_{\min}}{(\bar{v}_{25}, \bar{v}_{50}, \bar{v}_{75})_{\max}} \quad (6)$$

式中： N 为岩心层间突变因子， $N>1$ ，量纲一； \bar{v}_{25} 为 $h=25\text{ mm}$ 截面上的波速平均值(m/s)， \bar{v}_{50} 和 \bar{v}_{75} 以此类推。式(6)表征了不同截面间的波速差异，进一步表征其非均质性。

(4) 定义各截面上非均质性指数，计算式为

$$h = WMN \quad (7)$$

式中： h 为各截面上非均质性指数(量纲一)。

(5) 定义非均质性综合评价指数 HI ，见下式：

$$HI = \frac{h_{25\text{ mm}} + h_{50\text{ mm}} + h_{75\text{ mm}}}{3} \quad (8)$$

式中： $h_{25\text{ mm}}$ 为 $h = 25\text{ mm}$ 截面上的非均质性指数， $h_{50\text{ mm}}$ 和 $h_{75\text{ mm}}$ 以此类推。岩心非均质性综合评价指数 HI 由各截面上非均质性指数 h 之和求平均值得到，若 n 个截面，则分子为 n 个截面非均质性指数 h 相加求和，分母为 n 。

(6) 结合刘见通^[17]的研究，根据岩心非均质性综合评价指数 HI ，重新定义砂砾岩储层的非均质性分类标准，如表 3 所示。当 $0 < HI \leq 0.02$ 时，储层为均质；当 $0.02 < HI \leq 0.04$ 时，储层为中等均质；当 $0.04 < HI \leq 0.07$ 时，储层为非均质；当 $HI > 0.07$ 时，储层为强非均质。按式(3)~(8)，分别计算 3 组砂砾岩岩心的非均质性综合评价指数 HI 、波速非均质性系数 HV ，判定岩心非均质性，判定结果如表 4 所示。

由表 4 得到的 HI 值可知，大粒径岩心整体上呈中等均质；中粒径岩心整体上呈均质；小粒径岩

表 3 储层非均质性评价标准

综合非均质性指数 (comprehensive heterogeneity index) HI	非均质性判定 (heterogeneity determination)
0~0.02	均质
0.02~0.04	中等均质
0.04~0.07	非均质
>0.07	强非均质

心更为致密，整体上应介于均质与中等均质之间，但因其非均质性易受岩心内部裂缝与砾石影响，放大了其非均质性。如岩心 S25[#]有 2 条贯穿裂缝穿过，极大降低了纵波速度，故而评价为强非均质性。

5 讨论

5.1 岩心分层处理

砾石特征图像提取能够突出样品的细观结构和砾石分布特征，准确性较高。然而在进行砾石特征提取与 α 、 β 值计算时，发现该评价方法存在 2

表 4 砂砾岩样品 HI 指数与 HV 指数非均质性评价结果

Table 4 Heterogeneity evaluation results of HI and HV indices for the glutenite sample

粒径分类 (particle size classification)	岩心 (core)	HI 值 (HI value)	HI 法非均质性判定 (heterogeneity determination of HI)	HV 值 (HV value)	HV 法非均质性判定 (heterogeneity determination of HV)	样品类型 (sample type)
大粒径	S01 [#]	0.033 8	中等均质	0.031 2	中等均质	
	S02 [#]	0.012 8	均质	0.012 3	均质	
	S03 [#]	0.031 6	中等均质	0.028 4	中等均质	测试样
	S04 [#]	0.020 4	中等均质	0.018 4	均质	
	S05 [#]	0.025 6	中等均质	0.023 6	中等均质	
	S06 [#]	0.024 3	中等均质	0.023 0	中等均质	验证样
中粒径	S11 [#]	0.019 1	均质	0.018 2	均质	
	S12 [#]	0.010 8	均质	0.010 3	均质	
	S13 [#]	0.029 2	中等均质	0.027 3	中等均质	测试样
	S14 [#]	0.011 1	均质	0.010 3	均质	
	S15 [#]	0.020 0	均质	0.019 4	均质	
	S16 [#]	0.013 8	均质	0.013 4	均质	验证样
小粒径	S21 [#]	0.033 0	中等均质	0.031 1	中等均质	
	S22 [#]	0.024 8	中等均质	0.022 2	中等均质	
	S23 [#]	0.012 4	均质	0.012 0	均质	测试样
	S24 [#]	0.016 0	均质	0.014 9	均质	
	S25 [#]	0.076 4	强非均质	0.060 8	非均质	
	S26 [#]	0.030 0	中等均质	0.025 8	中等均质	验证样

个问题：一是其评价准确性依赖于数字网格划分的精细程度，网格划分越细致，则对砂砾岩的非均质性评价越可靠，而网格划分越细致、测试样品越多，在进行特征提取与 α 、 β 值计算时的工作量则越大，耗时越长，不能很好的应用普及。二是难以建立评价砂砾岩非均质性的标准，对于全井段的非均质性评价更是难以实现。但是上述方法提供了“分割”的思想，即在波速测量时将岩心进行分层处理，表征砂砾岩的非均质性。

5.2 有效性与可靠性验证

(1) 有效性验证

经计算非均质性综合评价指数 HI 发现，中粒径岩心均质性最好；大粒径岩心非均质性最强；小粒径岩心非均质性受砾石、裂缝影响明显，波速波动较大。分别从大粒径、中粒径、小粒径 3 组岩心样品中各取一块岩心，S06[#]，S16[#]，S26[#]，其中 S26[#] 岩心内部存在裂缝，如图 9 所示，用于验证非均质性综合评价指数 HI 在评价非均质性时对裂缝识别的有效性。

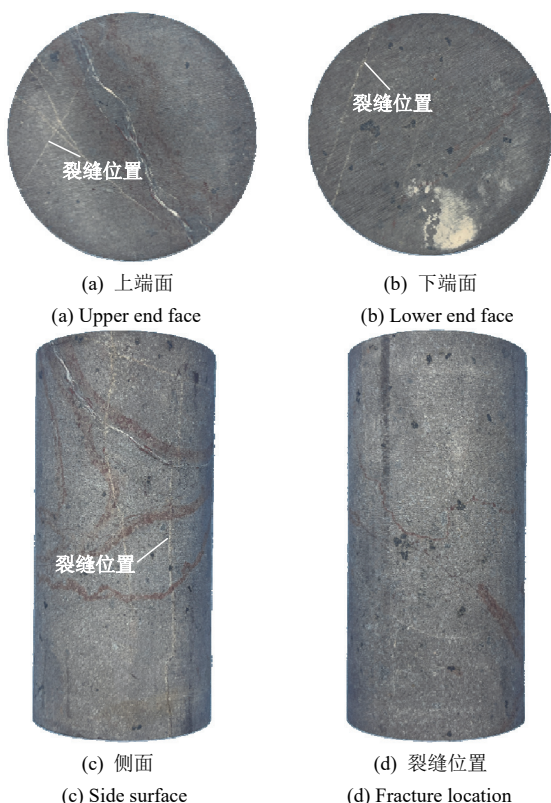


图 9 S26[#]验证岩心端面及侧面图

Fig.9 #S26 verification core end face and side surface images

分别测量 3 块验证岩心在 25, 50 和 75 mm 截面高度处的纵波波速，结果如图 10 所示。由图 10 知，砂砾岩的砾石粒径与纵波波速呈负相关性，纵

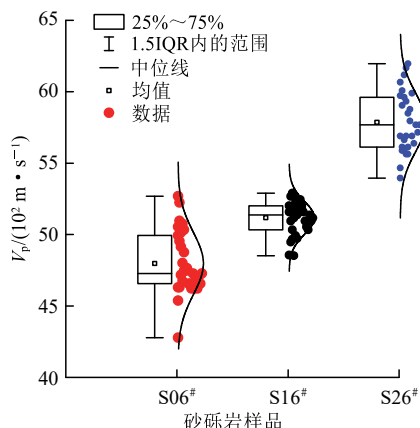


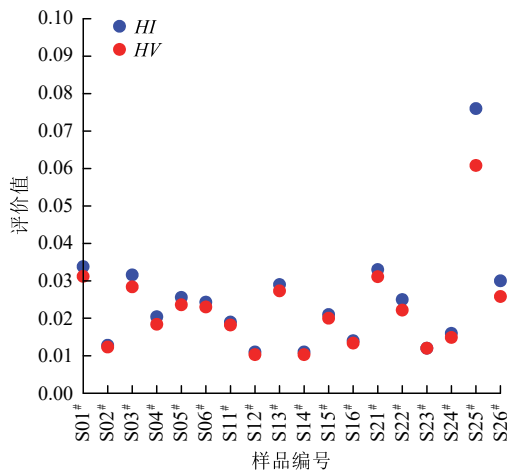
图 10 不同粒径验证岩心纵波波速箱线图

Fig.10 Box plot of P-wave velocity in validation cores with different grain sizes

波波速随砾石粒径的增大而降低(图中，IQR 为箱线图中四分位距，1.5IQR 反映统计学中的正态分布)。大粒径岩心纵波速度最小，集中分布在 4 600~5 100 m/s 范围，平均波速 4 899 m/s；小粒径岩心的纵波速度最大，集中分布在 5 700~6 200 m/s 范围，平均波速 5 979 m/s；而中粒径岩心的纵波速度介于大粒径与小粒径岩心之间，集中分布在 5 200~5 700 m/s 范围，平均波速 5 375 m/s。不过中粒径 S16[#] 岩心的波速波动范围较小，主要集中在 5 100~5 300 m/s 范围，较为均质；大粒径 S06[#] 岩心的波速波动范围略微增大，主要集中在 4 600~4 900 m/s 范围；而小粒径 S26[#] 岩心的波速波动范围较大，多数集中在 6 000~6 200 m/s 范围，这是因为岩心端面存在贯穿裂缝，极大地降低了纵波速度。这与采用非均质性综合评价指数 HI 的评价结果一致。因此，认为该方法有效，可以用于评价储层非均质性。

(2) 可靠性验证

对比表 4 中由 2 种评价指数得到的 HI 和 HV 值(见图 11)可见，除 S04[#] 与 S25[#] 岩心的评价结果存在差异外，其余样品的评价结果均完全一致，这说明了非均质性综合评价指数 HI 的可靠性。由于非均质性综合评价指数 HI 考虑了孔缝、空间砾石分布对非均质性的影响，因此得到的 HI 值普遍高于 HV 值。其中，根据岩心 S04[#] 的砾石分布特征，端面右下方砾石较少，其他方位砾石含量较多，应评价为中等均质；根据岩心 S25[#] 的砾石分布特征来看，岩心砾石小且含量少，整体均匀性较好，但端面存在 2 条平行贯穿岩心的裂缝，使得岩心在沿裂缝方向与垂直裂缝方向上的均质性呈现出极大差异，因此应定义为强非均质性。另外，由图 6(c)可见，S22[#]

图 11 非均质性评价指数 HI 和 HV 值对比Fig.11 Comparison between HI and HV values for heterogeneity evaluation

样品端面一侧存在白色石英脉填充，而纵波穿过石英脉时时间更短、波速更快，体现在图 8(c)中 S22# 样品 75 mm 截面处波速(红色)大于 25 mm(蓝色)与 50 mm(绿色)截面处波速，再次证明利用弹性波速评价岩心整体非均质性是可靠的。综上所述，非均质性综合评价指数 HI 能够识别岩心中裂缝及砾石空间分布不均等因素对岩心非均质性的影响，其评价结果的可靠性优于波速非均质性系数 HV 。

6 结 论

针对砂砾岩的非均质性评价问题，本文结合砾石分布特征，采用分层测量岩心截面弹性波速的方法，系统开展了纵波波速与岩心非均质性关系的研究，建立了表征岩心非均质性的综合评价指数 HI ，并得到如下主要结论：

(1) 非均质性综合评价指数 HI 引入分层思想指导波速分截面测量，综合了岩心内部裂缝与层间差异对其非均质性的影响，实现了对岩心非均质性的有效评价。经验证，该评价方法可靠性较高，具有快速、非破坏性、灵敏度高、成本低等特点。

(2) 砂砾岩砾石粒径与纵波速度呈负相关性，其波速随砾石粒径的增大而降低。大粒径岩心纵波速度最小，小粒径岩心纵波速度最大，而中粒径岩心的纵波速度介于大粒径与小粒径岩心之间。

(3) 中粒径岩心的均质性较好，纵波波速差异最小，约 450 m/s；大粒径岩心因其砾石含量高，粒径大，非均质性相对较强，波速波动范围最大，约 700 m/s；小粒径岩心相对均匀，但易受内部孔缝等因素

影响，波速波动范围介于两者之间，约为 550 m/s。

参考文献(References):

- [1] 管 灵, 王顺华, 张枝焕, 等. 砂砾岩储层研究现状[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2011, 8(3): 63 - 66.(ZAN Ling, WANG Shunhua, ZHANG Zhihuan, et al. Research status of sandy conglomerates reservoir[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science, 2011, 8(3): 63 - 66.(in Chinese))
- [2] 朱 宁. 环玛湖地区三叠系百口泉组储层成岩作用差异性及其成因[硕士学位论文][D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.(ZHU Ning. Diagenetic differences and genetic mechanisms of Triassic Baikouquan Formation reservoirs from circum-Mahu depression[M. S. Thesis][D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2019.(in Chinese))
- [3] 陆加敏, 刘 超. 断陷盆地致密砂砾岩气成藏条件和资源潜力——以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统沙河子组为例[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(2): 53 - 60.(LU Jiamin, LIU Chao. Accumulation conditions and resource potential of tight glutenite gas in fault depression basins: A case study on Lower Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(2): 53 - 60.(in Chinese))
- [4] 高 波, 潘哲君, 刘连杰, 等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层有效性综合评价[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2025, 55(1): 31 - 45.(GAO BO, PAN Zhejun, LIU Lianjie, et al. Comprehensive evaluation on the effectiveness of conglomerate reservoir in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2025, 55(1): 31 - 45.(in Chinese))
- [5] 曹 茜, 王志章, 王 野, 等. 砂砾岩储层分布非均质性和质量非均质性研究——以克拉玛依油田五 2 东区克上组为例[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(2): 129 - 138.(CAO Qian, WANG Zhizhang, WANG Ye, et al. Distribution and quality heterogeneity of conglomerate reservoir: A case from the upper Karamay Formation in eastern block Wu 2, Karamay Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(2): 129 - 138.(in Chinese))
- [6] 鲁新川, 史基安, 葛 冰, 等. 准噶尔盆地西北缘中拐一五八区二叠系上乌尔禾组砂砾岩储层特征[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(6): 54 - 59.(LU Xinchuan, SHI Ji'an, GE Bing, et al. Characteristics of glutenite reservoir of Permian Upper Wuerhe Formation in Zhongguai-Wuba area in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(6): 54 - 59.(in Chinese))
- [7] 孟庆民, 张士诚, 郭先敏, 等. 砂砾岩水力裂缝扩展规律初探[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 119 - 123.(MENG Qingmin, ZHANG Shicheng, GUO Xianmin, et al. A primary investigation on propagation mechanism for hydraulic fractures in glutenite formation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(4): 119 - 123.(in

- Chinese))
- [8] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 渤南洼陷沙四下亚段扇三角洲前缘优质储层成因[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015, 40(12): 2 067 - 2 080.(YANG Tian, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Genesis of high-quality reservoirs of fan delta front in lower part of the fourth member of Shahejie Formation in Bonan Subsa[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(12): 2 067 - 2 080.(in Chinese))
- [9] WANG M. Resistivity numerical simulation and its influence law analysis based on multi-component 3D digital core of glutenite[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 33 - 44.
- [10] LI C, SIMA L Q, SHEN A J, et al. The application of the reservoir heterogeneity evaluate method with micro-resistivity image log in FC formation of G region in northeastern Sichuan[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 725 - 732.
- [11] ZHANG G D, SUN S S, CHAO K, et al. Investigation of the nucleation, propagation and coalescence of hydraulic fractures in glutenite reservoirs using a coupled fluid flow-DEM approach[J]. Powder Technology, 2019, 354: 301 - 313.
- [12] LI T, LI M, JING X Q, et al. Influence mechanism of pore-scale anisotropy and pore distribution heterogeneity on permeability of porous media[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 594 - 604.
- [13] WANG Z Y, JIN X, WANG X Q, et al. Pore-scale geometry effects on gas permeability in shale[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 948 - 957.
- [14] 王小琼, 葛洪魁, 王文文, 等. 致密储层岩石应力各向异性与材料各向异性的实验研究[J]. 地球物理学报, 2021, 64(12): 4 239 - 4 251.(WANG Xiaoqiong, GE Hongkui, WANG Wenwen, et al. Experimental study on stress-related and matrix-related anisotropy in tight reservoir[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(12): 4 239 - 4 251.(in Chinese))
- [15] MA R P, BA J, CARCIONE J M. Frequency-dependent P-wave anelasticity due to multiscale (fractal) heterogeneities in rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 162: 105297.
- [16] GOWTHAM G, SAHOO J P. Stability analysis of circular tunnels using spatiotemporal accelerations formulated considering heterogeneity of seismic wave propagation velocities[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 181: 108654.
- [17] 刘见通. 玛湖砾岩储层破裂过程与水力压裂裂缝扩展规律研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.(LIU Jiantong. Failure process and hydraulic fracture propagation in Mahu conglomerate reservoir[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.(in Chinese))
- [18] 李宁, 张士诚, 马新仿, 等. 砂砾岩储层水力裂缝扩展规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2 383 - 2 392.(LI Ning, ZHANG Shicheng, MA Xinfang, et al. Experimental study on the propagation mechanism of hydraulic fracture in glutenite formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2 383 - 2 392.(in Chinese))
- [19] 马东东, 罗宇杰, 胡大伟, 等. 粒径分选性与围压对砂砾岩水力压裂破裂影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2 264 - 2 273.(MA Dongdong, LUO Yujie, HU Dawei, et al. Effects of particle size sorting and confining pressure on hydraulic fracturing mechanism of glutenite rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2 264 - 2 273.(in Chinese))
- [20] 王剑波, 侯冰, 滕卫卫, 等. 致密砾岩储层力学特征与水力裂缝扩展机理研究进展[J]. 石油科学通报, 2024, 9(6): 972 - 990.(WANG Jianbo, HOU Bing, TENG Weiwei, et al. Research progress on mechanical characteristics and hydraulic fracture propagation mechanism of tight conglomerate reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(6): 972 - 990.(in Chinese))
- [21] 陈红, 唐立模, 陈珺, 等. 基于RGB图像的泥沙颗粒粒径测试技术研究[J]. 泥沙研究, 2015, (1): 25 - 29.(CHEN Hong, TANG Limo, CHEN Jun, et al. Research on sediment particle size testing technology based on RGB images[J]. Journal of Sediment Research, 2015, (1): 25 - 29.(in Chinese))
- [22] 于庆磊, 唐春安, 唐世斌. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 551 - 559.(YU Qinglei, TANG Chun'an, TANG Shibin. Digital image based characterization method of rock's heterogeneity and its primary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 551 - 559.(in Chinese))
- [23] 周健, 余荣传, 贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2 047 - 2 052.(ZHOU Jian, YU Rongchuan, JIA Mincai. Measurement of microstructure parameters for granular soil model using digital image technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2 047 - 2 052.(in Chinese))
- [24] 朱万成, 康玉梅, 杨天鸿, 等. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术在流固耦合分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2 087 - 2 091.(ZHU Wancheng, KANG Yumei, YANG Tianhong, et al. Application of digital image-based heterogeneity characterization in coupled hydromechanics of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2 087 - 2 091.(in Chinese))