引用格式： 吕蓓，程垒明，张雨菲，等，2025. 石炭系火山岩储层岩石力学特性及动、静态参数修正[J]. 地质力学学报，31（6）：1296−1309. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025102

Citation: LV B，CHENG L M，ZHANG Y F，et al.，2025. Mechanical properties of Carboniferous volcanic rock reservoirs and correction of dynamic and static parameters[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1296−1309. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025102

石炭系火山岩储层岩石力学特性及动、静态参数修正

吕　蓓[1]，程垒明[1]，张雨菲[1]，罗　垚[1]，李梦杰[2]，付俊望[2]，李金全[2]，李世远[2]
LYU Bei[1]，CHENG Leiming[1]，ZHANG Yufei[1]，LUO Yao[1]，LI Mengjie[2]，FU Junwang[2]，LI Jinquan[2]，LI Shiyuan[2]

1. 中国石油新疆油田分公司（采油工艺研究院），新疆 克拉玛依 834000；
2. 中国石油大学（北京）石油工程学院，北京 102249

1. *China Petroleum Corporation New Oilfield Division* (*Oil Production Technology Research Institute*), *Karamay* 834000, *Xinjiang*, *China*;
2. *College of Petroleum Engineering*, *China University of Petroleum* (Beijing), *Beijing* 102249, *China*

Mechanical properties of Carboniferous volcanic rock reservoirs and correction of dynamic and static parameters

Abstract: ［**Objective**］To address the challenges posed by the strong heterogeneity of the volcanic reservoirs of the Carboniferous C2 Formation in the Junggar Basin and the low accuracy of rock mechanical parameters derived from logging data, this study aims to precisely determine the relationship between dynamic and static mechanical parameters for typical lithologies to enhance the reliability of static parameter predictions. ［**Methods**］Based on systematic laboratory testing of four representative lithologies (andesite, basalt, tuff, and volcanic breccia), lithology-specific dynamic-to-static conversion models were established and calibrated by introducing a confining pressure sensitivity parameter. An integrated microstructural analysis via thin-section and scanning electron microscope (SEM) observations was conducted. ［**Results**］The research yielded clear quantitative relationships between the dynamic and static parameters for all four lithologies and confirmed the high accuracy of the newly established, confining-pressure-corrected conversion model. ［**Conclusion**］The analysis further reveals an intrinsic link between the differences in macroscopic mechanical properties and dynamic-static parameter responses on the one hand and specific microstructural characteristics(including mineral composition, grain structure, and pore-fracture development) on the other. This link confirms the fundamental control that the rock microstructure has. The model developed and calibrated in this study effectively improves the accuracy of predicting static mechanical parameters, thereby providing critical technical and theoretical support for accurately obtaining these essential parameters from conventional logging data. ［**Significance**］This model is of significant practical value for the efficient exploration and development of similar volcanic hydrocarbon reservoirs.

Keywords: volcanic rock; Carboniferous System; dynamic and static parameters; rock mechanical properties; microscopic mechanism

摘　要： 针对准噶尔盆地石炭系C2油藏火山岩储层非均质性强、基于测井数据反演岩石力学参数精度低的问题，研究旨在精准确定其典型岩性的动、静态力学参数关系，以提升利用测井资料预测静态力学参数的可靠性。以克拉玛依油田一区安山岩、玄武岩、凝灰岩及火山角砾岩4种典型岩性为研究对象，开展了系统的室内岩石动、静态力学参数测试实验。基于实验数据，建立分岩性的动、静态转换关系模型，并引入围压敏感性参数对模型进行校正。同时，结合岩芯薄片与扫描电镜（SEM）观测，开展微观

基金项目： 国家重大科技专项（2025ZD1401404）；国家自然科学基金面上项目（52174011）；国家自然科学基金重点项目（52434001）
This research is financially supported by the National Science and Technology Major Project (Grant No. 2025ZD1401404), the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52174011), and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52434001).

第一作者： 吕蓓（1988—），女，硕士，高级工程师，从事专业为储层改造。Email：Lvbei@petrochina.com.cn
通信作者： 李世远（1983—），男，博士，教授，研究方向为工程力学和石油工程岩石力学。Email：lishiyuan1983@cup.edu.cn

收稿日期： 2025−08−01；**修回日期：** 2025−12−01；**录用日期：** 2025−12−05；**网络出版日期：** 2025−12−12；**责任编辑：** 范二平

结构分析。研究明确了 4 种岩性动、静态力学参数之间的定量关系，建立了经围压校正的高精度动、静态转换模型。微观结构分析表明，不同岩性宏观力学特性及动、静态参数响应差异与其特定的矿物组成、颗粒结构及孔隙裂隙发育特征等微观结构密切相关。岩石的微观结构是决定其宏观力学特性及动、静态参数关系的根本原因。研究建立的经围压校正的、分岩性的动、静态转换模型，能够有效提高岩石静态力学参数预测精度，可为利用常规测井资料准确获取火山岩储层静态力学参数提供关键技术与理论依据，对该类油气藏的高效勘探开发具有重要的实践参考价值。

关键词：火山岩；石炭系；动、静态力学参数；岩石力学特性；岩石微观结构

中图分类号：P315.72+7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2025)06−1296−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025102

0　引言

火山岩油气藏作为一种特殊的油气藏类型，是全球油气资源的重要接替领域，广泛分布于中国松辽盆地（路波和赵萍，2004；Wang et al.，2016；高帅等，2020）、准噶尔盆地（Liu et al.，2022；王剑等，2023；赵耀等，2023；Ma et al.，2025）及南美安第斯山脉（Valencia-Gómez et al.，2024）等区域。国外已发现火山岩油气藏 169 个，探明石油储量超过 3.4×10^8 t、天然气储量近 7000×10^8 m^3，储量丰富，极具开采价值。截至 2019 年底，中国火山岩油气藏探明石油地质储量为 6.0×10^8 t，探明天然气地质储量达到 5800×10^8 m^3，由此证实了中国火山岩油气藏具有良好的勘探开发潜力（刘睿等，2015；张璐等，2021；郭旭升，2022）。火山岩岩石类型多样，储层分布的控制因素复杂（张金风等，2020），因其独特的形成环境（如岩浆喷发、热液蚀变）导致矿物组分复杂（分为玄武岩、安山岩、火山角砾岩、凝灰岩、流纹岩等多种岩性）、岩石结构多尺度（纳米级溶蚀孔至米级裂缝网络）及力学性质高度非均质。中国准噶尔盆地火山岩油藏资源量大（支东明等，2024），储层为石炭系、二叠系（周健等，2024），受多期构造运动改造，储层结构复杂，储层非均质性强，油藏类型多样（Chen et al.，2016），即总体存在岩性、储层、油藏类型复杂多样，不同期次地质特征差异大等多种影响效益开发的问题。

岩石地下所处温度、围压和孔隙压力等环境对储层岩石的力学动、静态参数有着不同程度的影响。还原储层岩石原位温压条件，测量得到的岩石力学动、静态参数更接近真实值。在油气开发过程中，常通过声波测井等手段获取储层岩石的动态力学参数（宋杰，2014），具有采集成本低，采集连续且数据量大的特点，而油气生产更关心岩石的静态力学参数，因此岩石动、静态力学参数校正对储层力学性质研究及地应力场反演至关重要（盛英帅等，2016）。在岩石力学动、静态参数校正方面，研究人员在沉积岩如页岩、煤岩、砂岩等做了较多的工作，针对火山岩储层岩石的相关研究较少（孟召平等，2000；尤明庆，2003；WU，2023）。相关学者在测量岩石力学动、静态参数时，主要以单一实验室条件对动、静态参数的影响研究为主，而开展原位地应力，温度和孔隙压力条件下储层岩石动、静态关系实验研究较少，导致所建立的动、静态参数转换关系式相关性较差（周振江等，2023）。

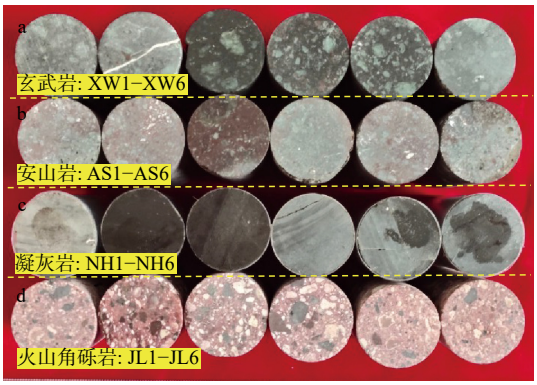
随着油气资源逐渐由常规转变为非常规油气藏开采，开采难度逐渐增大，更加重视施工的准确度和有效性（陈勉，2004；罗伟，2024）。油气开发及增产工程对岩石力学参数的精度要求增大（陈峥嵘等，2025），建立更贴近火山岩储层真实情况的岩石力学参数集，对火山岩油气藏资源有效动用及高效开发具有重要意义。文章对采自准噶尔盆地克拉玛依油田石炭系的玄武岩、安山岩、凝灰岩及火山角砾岩样品，开展了原位温压条件下的动、静态岩石力学参数实验研究，结合岩石组分及结构分类解释，建立了接近火山岩储层原位环境的动、静态参数转换公式，并对转换关系式进行了修正，初步建立了针对火山岩油藏的储层岩石力学参数集，预期对地应力场反演及储层地质力学研究具有一定参考价值（Erling et al.，2008；李嘉成等，2024）。

1　火山岩储层岩石力学参数测定

1.1　实验材料、装置及方法原理

测试实验岩芯属于准噶尔盆地西部隆起石炭系火山岩 C2 油藏的储层岩石。该储层构造上位于克百断裂带、克拉玛依断裂上盘和北黑油山断裂下盘。共采集了 4 类火山岩井下岩芯样品，包含玄武岩、安山岩、凝灰岩及火山角砾岩，取心处测井深

度分别为421～436 m、606～652 m、836～874 m。加工制备成标准岩样(A25 mm×50 mm),端面经磨光处理后的精度要求为岩样端面不平整度误差小于0.02 mm,两端面不平行程度不大于0.05 mm,所有岩样抽真空饱水待测,如图1所示。



a—玄武岩岩心样品;b—安山岩岩心样品;c—凝灰岩岩心样品;d—火山角砾岩岩心样品

图1 4类不同岩性的火山岩岩芯样品

Fig. 1 Core samples of volcanic rocks of four different lithologies (a) Basalt core sample; (b) Andesite core sample; (c) Tuff core sample; (d) Volcanic breccia core sample

岩石动、静态参数测定实验装置采用GCTS-2000型高温高压伺服岩石力学三轴实验系统,可模拟地层温度、压力条件下多类型岩石力学实验,其技术指标为:轴向力1000 KN;围压100 MPa;孔隙压力60 MPa。温度为0°～150°C。岩样根据实际地层条件饱水抽真空后,装入岩样夹持器。加围压的样品在模拟原地层温度和压力的环境下测量纵、横波时差;未加围压的样品采用常温常压波速仪测定横、纵波时差。动态力学参数实验采用岩石力学三轴实验系统声波测试仪测试火山岩样的横、纵波波速,并得到岩石的动态弹性模量和泊松比,从而降低因外界条件的改变对实验结果的影响(李琼等,2017;崔莹等,2018)。静态岩石力学参数测试实验前样品准备工作包括:将抽真空后的岩样用水介质取芯后保持其湿度,并将其用聚烯烃热缩管套住,再均匀加热并用橡皮圈使其密封,最后将其放置于GCTS-2000高温高压测试仪器。随后根据测试标准进行不同原位条件下的岩石三轴压缩实验。岩石内部结构表征实验测试采用Ultima Ⅳ型X射线衍射仪,蔡司sigma500扫描电镜,奥林巴斯BX53P正交/偏光显微镜等,分别表征岩石的组成成分、孔隙发育程度、矿物胶结程度、矿物颗粒填充类型和天然裂缝发育程度等特征。

(1)依据测得的岩样纵波与横波速度,可计算得到岩石的动态弹性参数,即动态弹性模量及动态泊松比:

$$v_{\mathrm{p}}=\frac{L}{t_{\mathrm{p}}-t_0} \tag{1}$$

$$v_{\mathrm{s}}=\frac{L}{t_{\mathrm{s}}-t_0} \tag{2}$$

式中,v_{p}—纵波波速,m/s;v_{s}—横波波速,m/s;L—发射接收换能器中心间的距离,m;t_{p}—纵波在试件中传播时间,s;t_{s}—横波在试件中传播时间,s;t_0—仪器系统的零延时,s。

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{\rho v_{\mathrm{s}}^2\left(3-4v_{\mathrm{s}}^2\right)}{v_{\mathrm{p}}^2-v_{\mathrm{s}}^2} \tag{3}$$

$$u_{\mathrm{d}}=\frac{\left(\frac{v_{\mathrm{p}}}{v_{\mathrm{s}}}\right)^2-2}{2\left[\left(\frac{v_{\mathrm{p}}}{v_{\mathrm{s}}}\right)^2-1\right]} \tag{4}$$

式中,E_{d}—动态弹性模量,MPa;u_{d}—动态泊松比,无量纲;v_{p}—纵波波速,m/s;v_{s}—横波波速,m/s;ρ—岩样的密度,g/cm^3。

(2)依据伺服试验机,在岩样加载过程中测定不同荷载条件下的应力值和应变值。绘制应力−应变关系曲线,可计算得到岩石的抗压强度、弹性模量和泊松比等静态力学参数:

$$\sigma_1=\frac{P}{A} \tag{5}$$

$$E_{\mathrm{s}}=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)_{50}}{\varepsilon_{\mathrm{h50}}} \tag{6}$$

$$u_{\mathrm{s}}=\frac{\varepsilon_{\mathrm{d50}}}{\varepsilon_{\mathrm{h50}}} \tag{7}$$

式中,σ_1—不同围压条件下的抗压强度,MPa;P—轴向破坏载荷峰值,N;A—试样的横截面积,mm^2;E_{s}—静态弹性模量,MPa;$(\sigma_1-\sigma_3)_{50}$—50%主应力差的应力值,MPa;$\varepsilon_{\mathrm{d50}}$—应力为主应力差50%时的横向应变值;$\varepsilon_{\mathrm{h50}}$—应力为抗压强度50%时的纵向应变值;$u_{\mathrm{s}}$—静态泊松比。

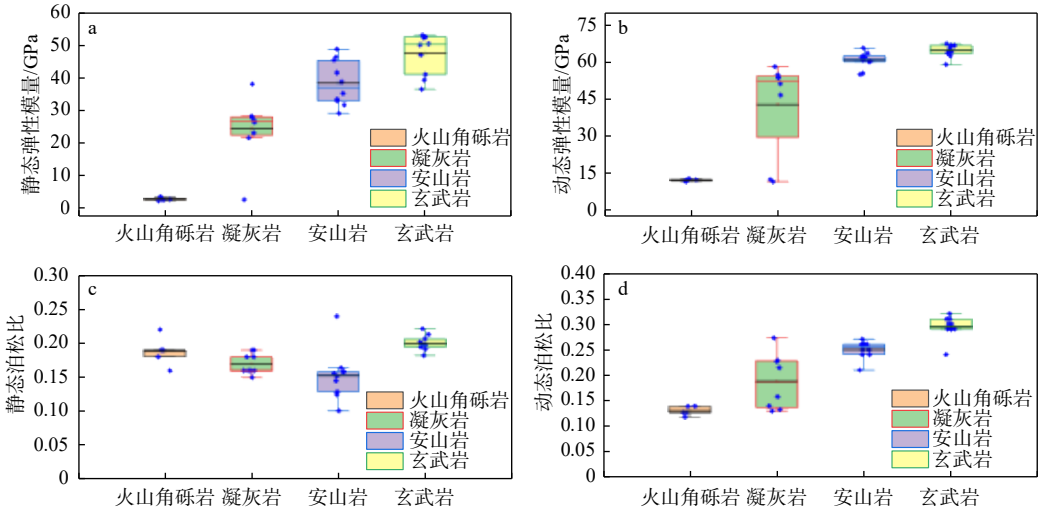
1.2 岩性分组及实验方案

文中针对4种典型火山岩岩性,分岩性及组别进行了不同实验条件下(围压0 MPa、10 MPa、15 MPa、20 Mpa;温度25 ℃、35 ℃、40 ℃、45 ℃)的岩石动、静态弹性参数测试共34组,实验得到各组岩石的动态弹性模量、动态泊松比,静态弹性模量、静态泊松比。同时进行岩石组分测试及岩石内部

结构微观表征实验 34 组。

1.3　动、静态力学参数实验结果

实验设置岩石的原位条件(模拟岩样在地下对应深度的围压、孔隙压力、温度等条件)，依据上述实验装置及测试方法同时测量试样的动、静态力学参数，不同岩性动、静态力学参数对比如图 2 所示。



图中蓝色菱形代表各岩性数据点，柱状图代表弹性模量、泊松比数据范围

a—岩性间静态弹性模量范围对比；b—岩性间动态弹性模量范围对比；c—岩性间静态泊松比范围对比；d—岩性间动态泊松比范围对比

图 2　4 种岩性火山岩静、动态力学参数对比

Fig. 2　Comparison of static and dynamic mechanical parameters of four types of volcanic rock

(a) Inter-lithology static elastic modulus range comparison; (b) Inter-lithology dynamic elastic modulus range comparison; (c) Inter-lithology static Poisson's ratio range comparison; (d) Inter-lithology dynamic Poisson's ratio range comparison

The blue diamonds represent the data points for each lithology, and the bar charts show the data ranges for elastic modulus and Poisson's ratio.

各岩性动、静态参数测试结果如表 1 所示，动态力学参数包括动态弹性模量及动态泊松比，其数值顺序均为玄武岩>安山岩>凝灰岩>火山角砾岩。其中凝灰岩动态弹性模量及动态泊松比的离散性相对于其他 3 种岩性均较强。

在静态力学参数方面，玄武岩的平均三轴抗压强度为 261.63 MPa，比其他 3 类岩石分别高 78.68%(火山角砾岩)、7.98%(安山岩)和 53.24%(凝灰岩)。静态弹性模量离散性较强，分布在 2～55 GPa。其中，安山岩和玄武岩的弹性模量较高且离散性较强，分别比火山角砾岩的平均弹性模量高 92.78%和 94.18%。不同类型岩石的静态泊松比分布范围为 0.10～0.27，其中安山岩试件的泊松比离散性较强。

2　动、静态参数拟合及修正

2.1　动、静态参数拟合

通过室内实验，得到岩芯样品的弹性模量和泊松比动、静态转换关系，线性度为 0.25～0.65，其中动态弹性模量的线性度大小关系为凝灰岩(0.65)>玄武岩(0.51)>安山岩(0.50)>火山角砾岩(0.37)；动态泊松比则为凝灰岩(0.61)>安山岩(0.53)>玄武岩(0.49)>火山角砾岩(0.25)。各岩性动、静态参数经线性拟合得到的相关性系数均小于 0.7，实际储层开发应用时，以测井曲线计算得到的储层动态弹性参数，若按照线性拟合动、静态参数转换关系式进行计算，得到的静态弹性参数预测值精度较小，难以实际支撑油田开发应用。因此，需建立针对火山岩的动、静态参数转换关系模型，提高动、静态参数预测的精准度。

各岩性成岩环境不同(岩浆的快速冷却、碎屑经压实或胶结等)，导致其矿物结晶、矿物组合及孔隙结构存在较大差异。与取心井临近区块沉积岩相比，火山岩动、静态转换关系相关性均较差，各岩性相关性线性拟合结果如图 3 所示。临近区块沉积岩整体弹性模量预测精度 87.73%，泊松比预测精度 75.21%，沉积岩线性拟合结果及线性拟合关系式如图 4 所示。

2.2　动、静态参数转换关系修正

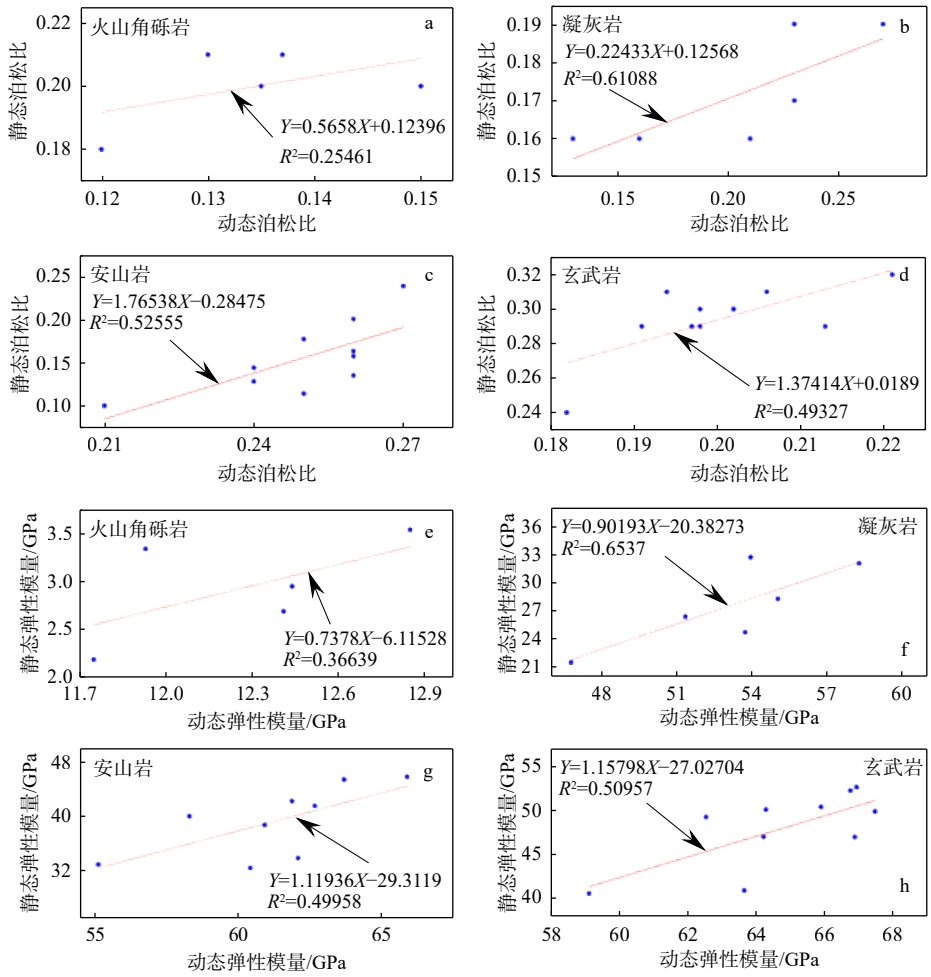
考虑到各岩性在围压升高时动态弹性模量与静态弹性模量随围压变化的趋势不同，而对于此种

表 1 原位测试实验条件及实验结果

Table 1 Conditions and results of in-situ tests

编号	围压/MPa	孔隙压力/MPa	温度/℃	密度/(g·cm^{-3})	动态弹性模量/GPa	动态泊松比	静态弹性模量/GPa	静态泊松比	抗压强度/MPa
AS1	0	0	25	2.56	62.08	0.26	48.74	0.239	232.49
AS2	10	10.99	35	2.66	63.69	0.26	41.48	0.152	214.8
AS3	10	9.85	35	2.63	60.42	0.24	28.99	0.101	230.84
AS4	10	9.63	35	2.72	65.88	0.25	38.69	0.164	290.95
AS5	15	12.36	40	2.69	55.13	0.21	31.64	0.158	266.26
AS6	15	14.32	40	2.75	62.67	0.26	32.88	0.129	224.85
AS7	15	12.69	40	2.63	61.88	0.26	45.36	0.156	215.69
AS8	20	15.78	45	2.55	60.30	0.25	33.37	0.125	265.14
AS9	20	15.63	45	2.71	55.66	0.24	46.32	0.145	218.44
AS10	20	16.01	45	2.65	59.07	0.26	35.21	0.158	248.08
XW1	0	0	25	2.86	65.90	0.32	52.58	0.191	214.8
XW2	10	9.56	35	2.93	64.22	0.30	52.2	0.182	280.9
XW3	10	8.99	35	2.84	66.94	0.29	40.96	0.197	184.85
XW4	10	9.23	35	2.77	67.48	0.31	50.37	0.213	229.37
XW5	15	11.32	40	2.81	62.54	0.31	46.99	0.194	264.75
XW6	15	11.69	40	2.95	59.12	0.24	39.29	0.198	246.76
XW7	15	12.03	40	2.86	64.29	0.30	50.06	0.202	307.21
XW8	20	15.32	45	2.88	66.76	0.29	52.91	0.221	327.88
XW9	20	14.98	45	2.95	63.66	0.29	52.47	0.206	266.02
XW10	20	15.33	45	5.96	66.89	0.29	36.45	0.198	226.86
NH1	0	0	25	1.98	46.78	0.13	26.69	0.16	85.12
NH2	10	10.21	35	1.96	58.27	0.27	21.5	0.16	87.12
NH3	10	10.36	35	2.03	55.03	0.23	28.25	0.16	97.21
NH4	15	16.55	40	2.34	53.94	0.16	38.01	0.15	134.48
NH5	15	16.52	40	2.14	53.72	0.23	27.67	0.19	129.86
NH6	20	16.69	45	2.45	51.34	0.21	26.37	0.19	201.95
NH7	20	17.34	45	1.99	46.78	0.13	26.69	0.16	179.14
JL1	0	0	25	2.36	12.42	0.14	2.63	0.19	28.61
JL2	10	7.65	35	2.74	11.66	0.13	2.81	0.19	69.54
JL3	10	8.69	35	2.61	12.85	0.14	2.44	0.22	57.48
JL4	15	10.66	40	2.45	12.44	0.13	2.95	0.18	56.56
JL5	15	11.45	40	2.31	11.75	0.12	3.54	0.16	66.19
JL6	20	12.36	45	2.03	11.93	0.13	2.19	0.16	71.67
JL7	20	10.74	45	2.38	12.41	0.14	2.69	0.18	79.52

由火山喷发冷凝形成的岩石类型，其内部气孔/微裂缝较多，且基质颗粒之间胶结相对较弱，围压升高导致岩石内部气孔/孔隙或微裂缝闭合或相对错动等岩芯内部的结构变化，这种外部压力作用到岩石样品上时，其对动态及静态弹性力学参数（弹性模量及泊松比）的影响较大，文中研究了随着围压升



a—火山角砾岩动、静态泊松比拟合曲线；b—凝灰岩动、静态泊松比拟合曲线；c—安山岩岩动、静态泊松比拟合曲线；d—玄武岩动、静态泊松比拟合曲线；e—火山角砾岩动、静态弹性模量拟合曲线；f—凝灰岩动、静态弹性模量拟合曲线；g—安山岩动、静态弹性模量拟合曲线；h—玄武岩动、静态弹性模量拟合曲线

图 3　各岩性动、静态弹性模量及动、静态泊松比线性拟合结果

Fig. 3　Linear fitting of dynamic and static elastic moduli and dynamic and static Poisson's ratios of each lithology

(a) Dynamic–static Poisson's ratio fitting curve for volcanic breccia; (b) Dynamic–static Poisson's ratio fitting curve for tuff; (c) Dynamic–static Poisson's ratio fitting curve for andesite; (d) Dynamic–static Poisson's ratio fitting curve for basalt; (e) Dynamic–static elastic modulus fitting curve for volcanic breccia; (f) Dynamic–static elastic modulus fitting curve for tuff; (g) Dynamic–static elastic modulus fitting curve for andesite; (h) Dynamic–static elastic modulus fitting curve for basalt

高各岩性的平均动态力学参数及静态力学参数的变化趋势。结果表明随围压升高，各岩性静态力学参数（弹性模量为例）呈近似线性增长的趋势，而动态弹性模量则呈降低的趋势，如图 5 所示。这表明对于 4 种典型岩性，围压对动、静态力学参数的影响显著，故在线性拟合方法式（8）的基础上，考虑引入表征围压敏感性参数的拟合项，用以修正动、静态参数转换相关性（张金风等，2020；彭磊等，2023；WU, 2023）。如公式（9）引入围压敏感性参数：

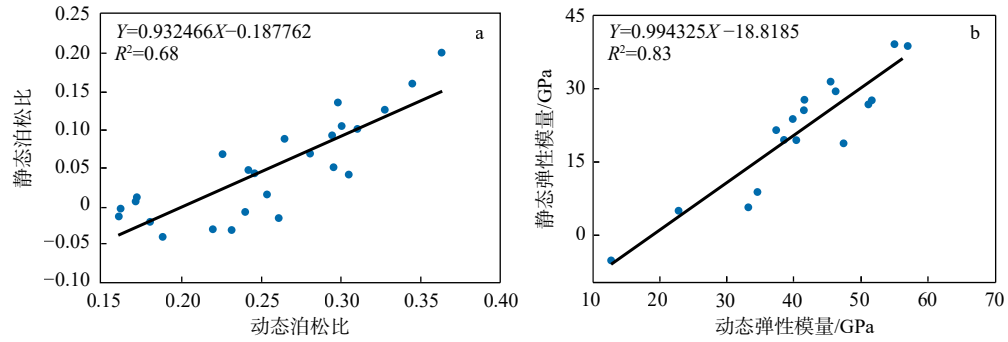
$$E_s = a + b \cdot E_d \tag{8}$$

$$\ln(E_s) = a \cdot E_d + b \cdot \sigma + c \tag{9}$$

式中，σ—围压大小；a、b、c—待定系数，由多元对数型回归拟合计算得到；其余变量含义同上。

多元对数型回归是一种用于分析多类别因变量与多个自变量关系的统计方法，通过构建多个二元逻辑回归模型，通过对自变量或因变量取对数，使得非线性关系转换为线性关系，从而可以使用线性回归的方法进行拟合。其中因变量包括静态弹性参数即静态弹性模量、静态泊松比等。

对每种岩性的因变量即静态弹性参数 E_s 取自然对数，得到 $\ln(E_s)$，使用最小二乘法估计回归系

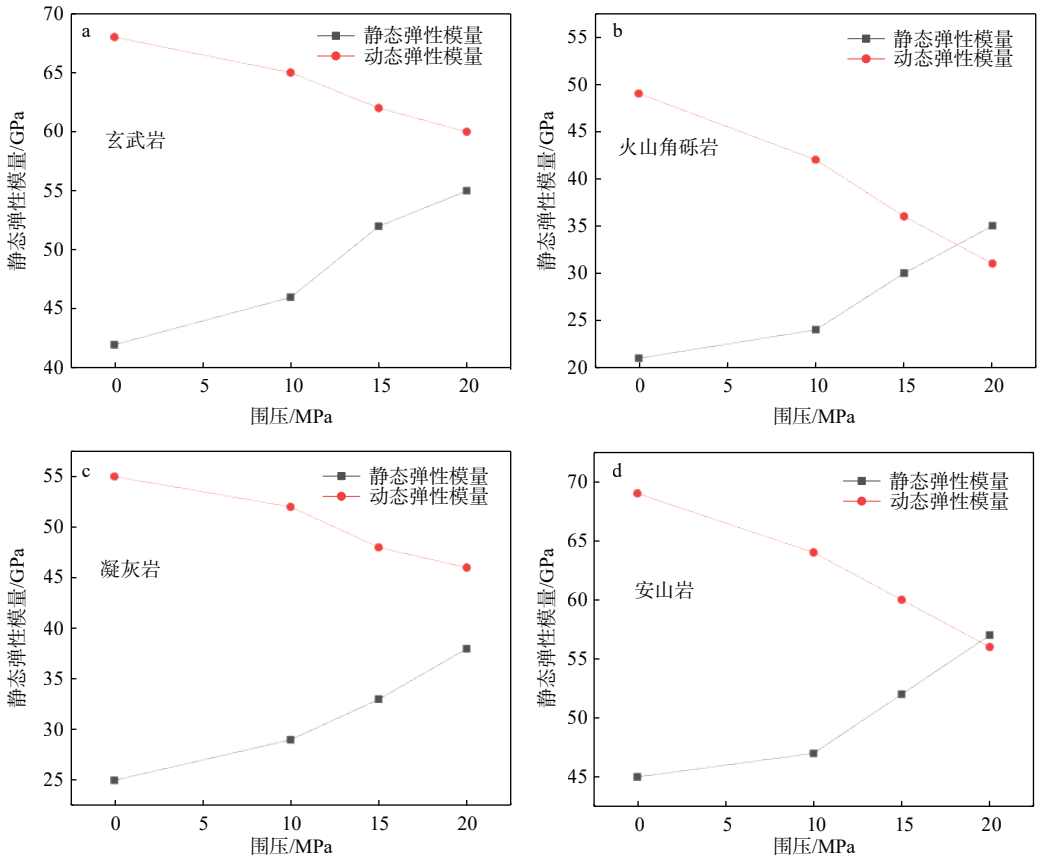


a—临近区块沉积岩动、静态泊松比拟合曲线；b—临近区块沉积岩动、静态弹性拟合曲线

图 4 临近区块沉积岩（云化砂岩）静态弹性模量及动、静态泊松比线性拟合结果

Fig. 4 Linear fitting of static elastic moduli and dynamic and static Poisson's ratios of sedimentary rocks (cloudified sandstone) from an adjacent block

(a) Dynamic–static Poisson's ratio fitting curve for sedimentary rocks from an adjacent block; (b) Dynamic–static elastic modulus fitting curve for sedimentary rocks from an adjacent block



a—玄武岩平均动、静态力学参数随围压变化趋势；b—安山岩平均动、静态力学参数随围压变化趋势；c—凝灰岩平均动、静态力学参数随围压变化趋势；d—火山角砾岩平均动、静态力学参数随围压变化趋势

图 5 各岩性平均动、静态力学参数随围压变化趋势示意（弹性模量）

Fig. 5 Trends in average dynamic and static mechanical parameters for each lithology with confining pressure (elastic modulus)

(a) Variation of average dynamic–static mechanical parameters with confining pressure for basalt; (b) Variation of average dynamic–static mechanical parameters with confining pressure for andesite; (c) Variation of average dynamic–static mechanical parameters with confining pressure for tuff; (d) Variation of average dynamic–static mechanical parameters with confining pressure for volcanic breccia

数 a、b、c。使用线性回归求解公式，计算回归系数：

$$\beta = (\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y} \tag{10}$$

式中，β—回归系数的估计值，包含 a、b、c；$\boldsymbol{X}$—自变量矩阵；$\boldsymbol{Y}$—ln($\boldsymbol{Y}$) 的向量。

计算决定系数 R^2，评估模型的拟合优度。进行显著性检验，经 F 检验和 t 检验，回归系数显著，残差是否满足线性回归的假设条件。根据回归系数可得到各岩性具体的动、静态弹性参数拟合关系式。采用以下公式得到静态弹性参数的预测值：

$$E_s = e^{\ln(Y)} = e^{a\cdot E_d + b\cdot\sigma + c} \tag{11}$$

式中，变量含义同上。

通过多元对数型回归分析（谢恩等，2014），建立了针对火山岩 4 种典型岩性修正后的弹性模量和泊松比动、静态转换公式。对比由修正前后拟合关系得到的弹性模量及泊松比，可以发现其与力学实验测试结果吻合度显著提升，动、静态参数拟合精度在修正前后的具体对比结果如表 2 所示。修正后拟合关系式如下。

凝灰岩弹性模量及泊松比转换关系：

$$E_s = 28.67 - 5.11\times\log\sigma - 0.056E_d - 0.00014\times\log\sigma\times E_d \tag{12}$$

$$u_s = -2.96 + 1.43\times\log\sigma + 10.36u_d - 4.62\times\log\sigma\times u_d \tag{13}$$

安山岩弹性模量及泊松比转换关系：

$$E_s = 11.09 - 4.1\times\log\sigma - 0.53E_d - 0.00237\times\log\sigma\times E_d \tag{14}$$

$$u_s = -2.16 + 6.4\times\log\sigma + 9.06u_d - 7.84\times\log\sigma\times u_d \tag{15}$$

玄武岩弹性模量及泊松比转换关系：

$$E_s = 10.56 - 3.23\times\log\sigma - 0.69E_d - 0.00566\times\log\sigma\times E_d \tag{16}$$

$$u_s = -5.98 - 3.89\times\log\sigma + 20.23u_d - 2.67\times\log\sigma\times u_d \tag{17}$$

火山角砾岩弹性模量及泊松比转换关系：

$$E_s = 8.623 - 6.37\times\log\sigma - 0.34E_d - 0.0074\times\log\sigma\times E_d \tag{18}$$

$$u_s = 8.06 - 4.3\times\log\sigma + 3.56u_d - 6.723\times\log\sigma\times u_d \tag{19}$$

式中变量含义同上。

表 2　动、静态参数拟合修正及前后精度对比

Table 2　Comparison of accuracy before and after fitting dynamic and static parameters

岩性	安山岩		玄武岩		火山角砾岩		凝灰岩	
数值/精度	平均数值	拟合精度	平均数值	拟合精度	平均数值	拟合精度	平均数值	拟合精度
弹性模量	19.5	40.1%	20.2	39.6%	6.4	23.1%	20.4	65.4%
修正后	43.9	90.1%	45.3	87.2%	23.5	85.3%	27.9	89.3%
泊松比	0.06	37.4%	0.07	36.3%	0.05	29.8%	0.05	40.7%
修正后	0.14	92.1%	0.17	86.2%	0.15	84.9%	0.15	91.3%

相关性较强的动、静态力学参数转换关系是提高地应力计算精度的关键。文章通过室内试验、线性回归分析以及对数型回归分析得到针对火山岩 4 种典型岩性的动、静态参数转换关系，引入对动、静态参数影响最大的围压因素参数，对力学参数拟合关系进行修正，提升了针对取心井所在区块火山岩储层动、静态参数拟合相关性及地应力场计算精度。

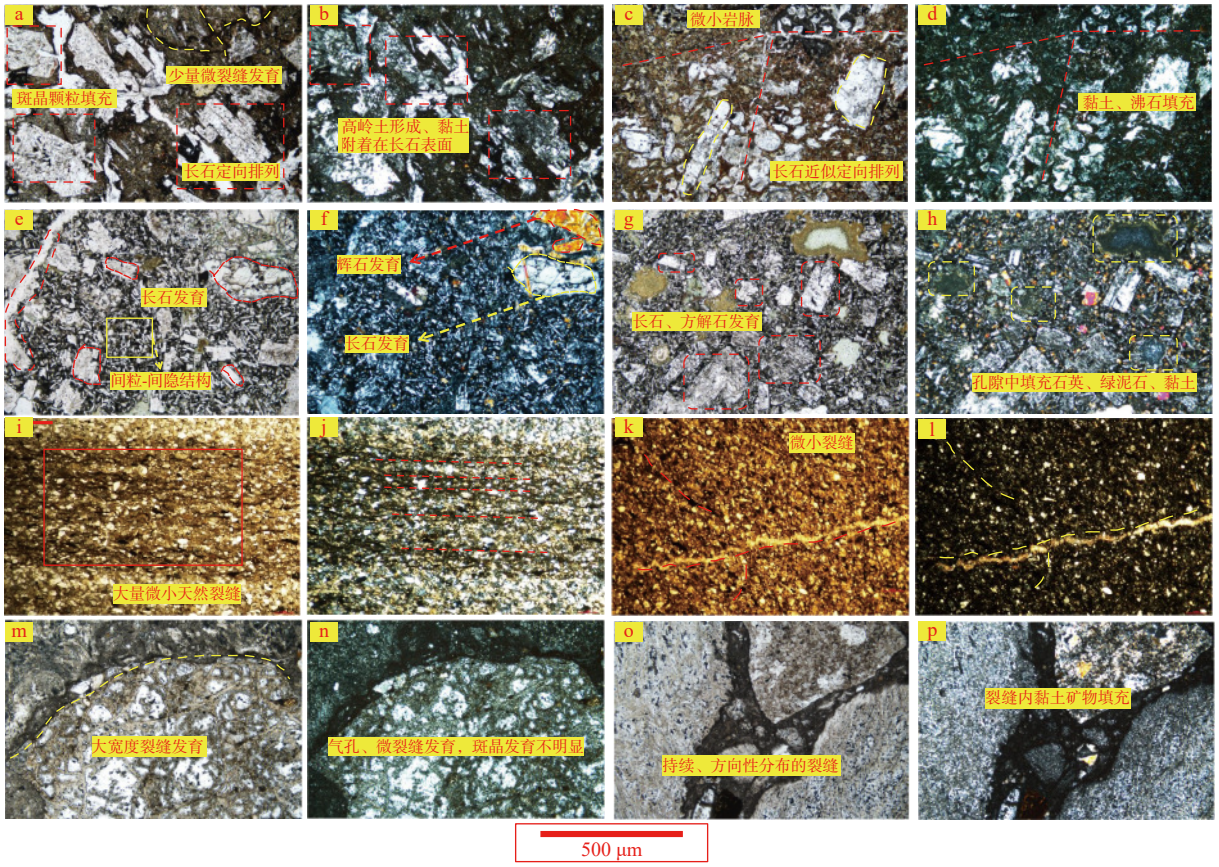
3　岩石力学特性及动、静态力学参数差异的微观机制

3.1　岩石微观结构特征

通过开展岩芯薄片及扫描电子显微镜下观测，得到 4 种岩性岩芯的孔隙发育程度、矿物胶结程度、矿物颗粒填充类型、天然裂缝发育程度等特征并对比分析各岩性岩芯微观结构特征差异，明确了岩芯组构对火山岩岩石宏观力学特性，以及对动、静态弹性力学特性参数的影响机制。

各岩性正交/偏光显微镜下岩芯观测实验结果如图 6 所示。岩芯薄片观测结果表明，安山岩岩芯内部的长石晶体呈相对定向排列趋势，含有大量微小岩脉（微裂缝）延伸。长石、石英等脆性矿物发育（平均含量为 47.25%）。矿物颗粒与基质的胶结程度较为致密（相比火山角砾岩）。

玄武岩薄片显示为玄武岩典型结构，即“间粒-间隐结构”，基质小颗粒相互连接，呈近似小三角形排列。内部含孔隙较多，孔隙内部常被绿泥石等其他黏土矿物填充。颗粒之间胶结致密，天然裂缝（岩脉、微裂缝）相对较少，斑晶较多，斑晶密度较大，岩芯整体表现出均质性较好的特征。



a—正交光下安山岩典型结构及裂缝发育情况；b—偏光镜下安山岩典型结构及裂缝发育情况；c—正交光下安山岩矿物排列及矿物填充；d—偏光镜下安山岩矿物排列及矿物填充；e—正交光下玄武岩典型间粒–间隐结构及矿物排列；f—偏光镜下玄武岩典型间粒–间隐结构及矿物排列；g—正交光下玄武岩矿物颗粒胶结及矿物填充；h—偏光镜下矿物颗粒胶结及矿物填充；i、j、k、l—正交/偏光镜下凝灰岩天然裂缝发育形态、密度；m、n、o、p—火山角砾岩天然裂缝发育状态及黏土矿物、斑晶、孔隙等发育形态

图 6 火山岩典型岩性正交/偏光显微镜下观测结果

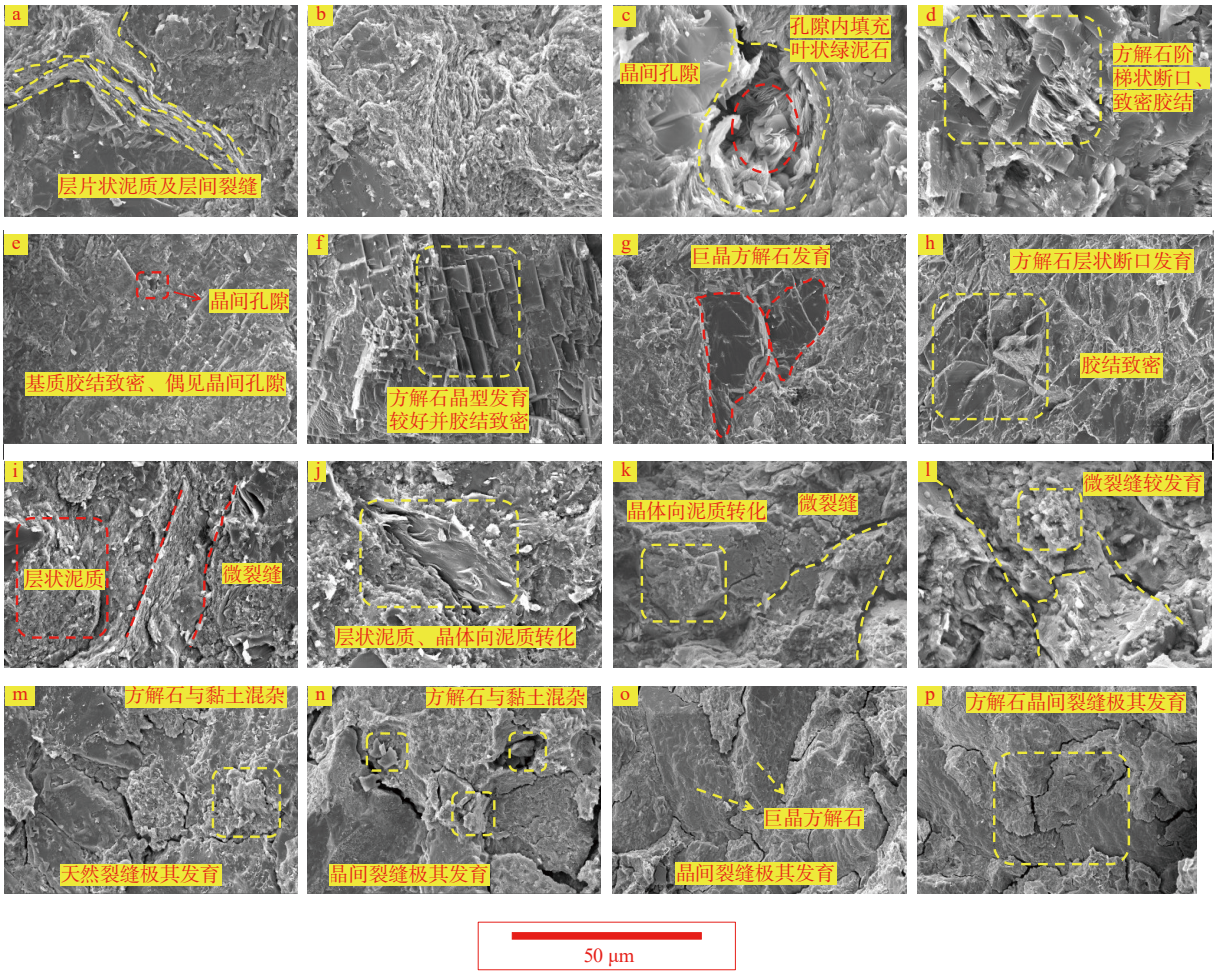
Fig. 6 Typical micro-textures of volcanic rocks under cross- and plane-polarized light

(a) Typical texture and fracture development of andesite under cross-polarized light; (b) Typical texture and fracture development of andesite under plane-polarized light; (c) Mineral arrangement and mineral filling of andesite under cross-polarized light; (d) Mineral arrangement and mineral filling of andesite under plane-polarized light; (e) Typical intergranular–intersertal texture and mineral arrangement of basalt under cross-polarized light; (f) Typical intergranular–intersertal texture and mineral arrangement of basalt under plane-polarized light; (g) Cementation and mineral filling of basalt mineral grains under cross-polarized light; (h) Cementation and mineral filling of mineral grains under plane-polarized light; (i–l) Morphology and density of natural fractures in tuff under cross-polarized / plane-polarized light; (m–p) Development of natural fractures and morphologies of clay minerals, phenocrysts, pores, etc., in volcanic breccia under cross-polarized / plane-polarized light

凝灰岩薄片观测整体结果显示凝灰岩岩芯内部方解石、黏土矿物等发育明显，斑晶发育极少。颗粒尺寸大小较一致，但分布不均匀，块状颗粒胶结强度较小，较多天然裂缝发育。裂缝内部填充石英、基质颗粒或黏土等矿物成分，胶结不致密，整体反映出胶结强度较为松散、天然裂缝密度较大的岩芯特征。

火山角砾岩整体结果显示岩芯内部方解石、长石等发育明显，斑晶发育较少。颗粒尺寸大小及分布不均匀，块状颗粒胶结强度亦不均匀，大量天然裂缝存在。裂缝内部填充基质颗粒或黏土等矿物，胶结不致密，整体反映出松散、天然裂缝密度大的岩芯特征。

扫描电镜观测微观结构显示(图 7)，安山岩岩芯微裂缝大量存在，孔隙相对较少发育；但可偶见孔隙内部填充黏土矿物，岩芯内部大量存在层状断口，微裂纹发育也较多；方解石大量发育，与基质致密胶结。玄武岩岩芯表现为胶结致密，裂缝较少，方解石发育丰富，且与基质致密胶结，基质晶间孔隙发育，常被泥质等黏土矿物填充。凝灰岩岩芯表



a、b、c、d—安山岩裂缝发育及矿物填充特征；e、f、g、h—玄武岩矿物类型及基质胶结；i、j、k、l—凝灰岩天然裂缝及黏土矿物发育分布特征；m、n、o、p—火山角砾岩基质、黏土矿物胶结及天然裂缝发育程度

图 7　火山岩典型岩性扫描电子显微镜下（SEM）观测结果

Fig. 7　SEM observations of representative microstructures in volcanic rocks

(a–d) Fracture development and mineral filling in andesite; (e–h) Mineral types and matrix cementation in basalt; (i–l) Distribution of natural fractures and clay minerals in tuff; (m–p) Matrix, clay mineral cementation, and natural fracture development in volcanic breccia

现为方解石等矿物颗粒及微裂缝大量发育，晶间层间裂缝较大量存在，整体胶结强度较低，结构松散。火山角砾岩表现为微裂缝大量发育，晶间溶蚀孔及晶间/层间裂缝大量存在，整体胶结强度较低，结构松散。由以上各岩性微观结构观测结果可知，其孔隙发育程度表现为火山角砾岩>凝灰岩>安山岩>玄武岩；矿物胶结程度呈现出玄武岩>安山岩>凝灰岩>火山角砾岩；层间/晶间微裂缝密度则表现为火山角砾岩>凝灰岩>安山岩>玄武岩；天然裂缝发育程度表现为火山角砾岩>凝灰岩>安山岩>玄武岩。

岩芯微观结构特征反映出，其内部结构整体致密性与岩石力学特性参数趋势一致。结合上述的岩芯组构分析可知，岩石内部颗粒成分、基质胶结程度、天然裂缝发育程度和颗粒尺寸均质性综合决定了岩石力学特性与动、静态参数。

3.2　微观结构特征对宏观岩石力学特性的影响机制

火山岩的宏观力学特性本质上受其微观结构控制，这一观点已得到大量实验证实（Liu et al., 2025）。通过对比准噶尔盆地 4 种火山岩的微观结构与力学测试结果，可以清晰地揭示孔隙、胶结物和裂缝对岩石强度、变形行为及各向异性的影响机制。

孔隙作为岩石中的“缺陷”，对岩石力学行为的影响主要体现在 2 个方面：①孔隙减少了岩石的有效承载面积；②孔隙边缘易产生应力集中，成为裂纹萌生的起点。文中研究数据显示，孔隙发育程度与单轴抗压强度之间存在明显的负相关关系：玄武岩孔隙度最低（约 3%），其平均单轴抗压强度最

高(261.63 MPa);而火山角砾岩孔隙度最高(约18%),强度最低(146.42 MPa)。值得注意的是,不仅孔隙数量影响岩石强度,孔隙形态和空间分布同样对力学行为产生重要影响。如安山岩中的扁平状孔隙在轴向应力作用下更易扩展连接,形成宏观破裂面;而玄武岩中的孤立球形孔隙对强度影响相对较小。相关学者对松南气田火山岩的研究也证实了这一点(李永刚, 2017),发现随着流纹岩亚相的变化,岩石内的孔隙和微裂纹发育程度发生变化,进而影响其力学性能。

胶结物作为连接矿物颗粒的“桥梁”,其成分、分布和强度直接决定了岩石骨架的坚固程度。文中研究通过扫描电镜观察发现,玄武岩的间粒–间隐结构中,矿物颗粒间几乎无胶结弱面,形成高度连续的刚性骨架,这是其高强度和脆性行为的主要原因。安山岩中长石晶体的定向排列形成了结构异性,使其在不同方向的力学响应有所差异。凝灰岩和火山角砾岩中,方解石和黏土矿物作为主要胶结物,这些胶结物自身强度较低,且与碎屑颗粒的黏结力弱,导致岩石在荷载作用下更易发生颗粒滑移和重新排列,表现出一定的塑性变形特征。胶结程度的不同也影响了岩石的破坏模式:胶结良好的玄武岩和安山岩主要呈现劈裂破坏,而胶结差的凝灰岩和火山角砾岩则多发生剪切破坏或塑性压实。

裂缝是岩石中的“软弱面”,对岩石力学性质的影响主要体现在3方面:①显著降低岩石的强度和刚度;②增加力学参数的离散性;③引入明显的各向异性。文中研究结果显示,凝灰岩动态弹性模量及动态泊松比的离散性相对于其他3种岩性均较强,这与其不均匀分布的裂缝系统直接相关。同样,安山岩试件的泊松比离散性较强,可归因于其内部大量微小岩脉(微裂缝)的随机分布。定向排列的裂缝或层理会导致岩石力学性质的强各向异性,通常平行于层理方向的强度高于垂直方向。在火山角砾岩中,大量随机分布的天然裂缝使其呈现出高度非均质性,这也是其静态弹性模量分布范围宽(2～25 GPa)且平均值低的主要原因。

3.3 微观结构对动、静态弹性参数的影响机制

实验数据显示,4种火山岩的动、静态参数相关性存在显著差异。动态弹性模量的线性度大小关系为凝灰岩(0.65)>玄武岩(0.51)>安山岩(0.50)>火山角砾岩(0.37),动态泊松比的线性度为凝灰岩(0.61)>安山岩(0.53)>玄武岩(0.49)>火山角砾岩(0.25)。凝灰岩在动、静态参数关系中表现出最高的线性度,这与其相对均匀的矿物组成和较为简单的孔隙结构有关。相比之下,火山角砾岩最为复杂的微观结构导致其动、静态参数关系最为离散,线性度仅为0.25～0.37。有研究表明(BahraMi et al., 2025),动、静态参数关系的这种岩性差异主要源于不同岩石的微观结构特征。

在均质、致密的岩石中,动态(超声波)测试与静态(力学试验)测试对岩石结构的响应较为一致;而在非均质、多缺陷的岩石中,2种测试方法对岩石结构的响应机制差异显著,导致动、静态参数关系离散。动态测试(超声波)与静态测试在荷载大小、作用时间和响应机制上存在本质差异,而微观结构特征则进一步放大了这些差异。动态测试采用小振幅、高频率的超声波,对岩石中的弹性部分较为敏感,受裂缝、孔隙等缺陷影响相对较小;而静态测试采用大荷载、准静态加载,能够更充分地激活岩石中的非弹性变形机制,如裂缝闭合、颗粒滑移和胶结物破坏等。文中研究结果显示,与临近区块沉积岩相比,火山岩动、静态转换关系相关性均较差,这主要源于火山岩更为复杂的微观结构。具体而言,玄武岩相对致密的结构使其动、静态参数关系较为稳定;而凝灰岩和火山角砾岩中大量裂缝和弱胶结区域的存在,使得静态测试中这些软弱要素被激活,导致静态参数显著低于由动态参数预测的值。

3.4 围压效应与微观结构对动、静态参数的耦合作用机制

随着围压增大,岩石中的孔隙和裂缝逐渐闭合,矿物颗粒间的接触更加紧密,从而增强了岩石的有效承载面积。研究发现在中等围压(20～40 MPa)下,凝灰岩和火山角砾岩的弹性模量和抗压强度显著提高,而玄武岩和安山岩的变化相对较小。这种现象的微观机制在于:对于多孔的凝灰岩和火山角砾岩,围压有效抑制了裂缝扩展和颗粒边界的滑移;而对于致密的玄武岩和安山岩,其初始结构已经较为完整,围压的增强效应相对有限。围压还改变了岩石的破坏模式:在低围压下,所有岩性均表现为脆性破坏;而在高围压下,凝灰岩和火山角砾岩表现出一定的塑性变形特征,这与其中软弱组分(如黏土矿物)的流变行为有关。以往研究对碳酸盐岩的研究也具有类似结论(伍尚嘉等, 2025),即发现围压显著影响其力学行为和参数关系。

围压对动、静态参数关系有显著影响，这种影响具有明显的岩性依赖性。文中研究显示，随着围压增大，4 种火山岩的动、静态参数关系趋于一致，离散性显著降低。这是因为围压抑制了微观缺陷的活化，使岩石的力学响应更接近理想弹性体。具体而言，在围压从 0 MPa 增加到 60 MPa 的过程中，凝灰岩的动、静态弹性模量比从 2.8 降至 1.5，火山角砾岩从 3.2 降至 1.7，而玄武岩和安山岩的变化范围较小（从 1.8 降至 1.3）。这种差异反映了不同岩性中微观缺陷在围压作用下的不同响应：凝灰岩和火山角砾岩中大量的裂缝和孔隙在围压作用下逐渐闭合，显著提高了静态测试中的弹性模量；而玄武岩和安山岩初始缺陷较少，围压的增强效应相对有限。基于这一认识，研究建立的围压校正模型，实质上是通过考虑不同岩性的微观结构在围压下的差异化响应，显著提高了动、静态参数转换的精度。

4　结论

（1）不同类型火山岩的动态与静态力学参数存在显著差异。动态力学参数包括动态弹性模量与动态泊松比，各岩性动态力学参数间存在数值上的显著差异，同时凝灰岩的动态参数离散性最强。静态力学参数方面，玄武岩具有最高的平均抗压强度（261.63 MPa），较其他岩性高出 7.98%～78.68%；静态弹性模量分布范围广（2～55 GPa），其中安山岩与玄武岩的弹性模量明显高于火山角砾岩，但离散性较大；静态泊松比分布于 0.10～0.27 之间，安山岩试样的泊松比离散性最为显著。

（2）通过动、静态力学实验，建立了针对取心井区块的动、静态参数转换关系式，包括弹性模量及泊松比的转换模型；并通过引入围压敏感性参数及多元回归拟合方法，实现了火山岩典型岩性力学参数的预测校正。各岩性火山岩弹性模量预测精度由最低 23.1% 提升至最高 90.1%。泊松比预测精度由最低 29.8% 提升至最高 92.1%。多方法回归分析思路的提出，可为油气藏岩石力学参数场和地应力场准确反演提供参考。

（3）采用微观结构测试手段即岩芯薄片及扫描电子显微镜下观测，明确了岩石内部颗粒成分、基质胶结程度、天然裂缝发育程度和颗粒尺寸均质性等。各微观结构特征综合决定了火山岩岩石力学动、静态参数相关性。火山岩的微观结构特征（孔隙发育、胶结程度、裂缝分布）与其宏观力学特性之间存在显著的相关性。孔隙发育程度与岩石强度呈负相关，胶结质量与岩石强度呈正相关，裂缝密度则增加了力学参数的离散性和各向异性。

（4）通过对宏观力学特性及岩石微观结构的综合分析，从机制上分析讨论了宏观力学特性及动、静态力学参数的影响因素及内在逻辑。围压通过抑制微观缺陷的活化，可使动、静态参数关系更加稳定，离散性显著降低。分析结果表明岩石的微观结构决定了宏观岩石力学特性，而宏观力学响应（动、静态参数差异）则揭示了微观结构的特征。

References

BAHRAMI B , FEREIDOONI D, KHANLARI G, et al. , 2025. Micro and macrostructural investigations on the fracture mechanism of the brittle rocks under compressive loading[J]. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 8(3): 329-351.

CHEN M, 2004. Review of study on rock mechanics at great depth and its applications to petroleum engineering of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(14): 2455-2462. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z H, WANG X L, ZHA M, et al., 2016. Characteristics and formation mechanisms of large volcanic rock oil reservoirs: a case study of the Carboniferous rocks in the Kebai fault zone of Junggar Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 100(10): 1585-1617.

CHEN Z R, LIU W, SHI X, et al. Prediction of in-situ stress field of deep coalbed methane considering the coalbed structure differences[J/OL]. Coal Science and Technology, 2025: 1-11. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20250708.1135.006. (in Chinese with English abstract)

CUI Y, QU Z, ZHANG Y H, et al., 2018. Experimental research on dynamic and static elastic mechanics parameters of mud shale[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 43(6): 2284-2291. (in Chinese with English abstract)

ERLING F, HOLT R M, HORSRUD P, et al. , 2008. Petroleum related rock mechanics[J]. Amsterdam: Elsevier: 445-473.

GAO S, GONG L, LIU X B, et al., 2020. Distribution and controlling factors of natural fractures in deep tight volcanic gas reservoirs in Xujiaweizi area, Northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 41(3): 503-512. (in Chinese with English abstract)

GUO X S, 2022. Discussion and research direction of future onshore oil and gas exploration in China[J]. Earth Science, 47(10): 3511-3523. (in Chinese with English abstract)

LI J C, TIAN G, WANG J C, et al., 2024. Prediction of bedding fractures in shale reservoirs based on two-step matching core-logging-seismic information[J]. Xinjiang Oil & Gas, 20(1): 21-30. (in Chinese with English abstract)

LI Q, HE J J, CHEN J, 2017. Simultaneous ultrasonic experiment of dynamic and static elastic parameters of coal under formation pressure conditions in Qinshui Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(7): 2897-2903.

(in Chinese with English abstract)

LI Y G, 2017. Classification of tight volcanic reservoirs and evaluation of favorable target potential in the Songnan Gas Field[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47(2): 344-354. (in Chinese with English abstract)

LIU J, HUANG C, ZHOU L, et al., 2024. Estimation of the rock mechanics and in-situ stress parameters of carbonate reservoirs using array sonic logging: a case study of Shunbei No. 4 block[J]. Journal of Geomechanics, 30(3): 394-407. (in Chinese with English abstract)

LIU R, HUANG H D, SUN C Z, et al., 2015. Study on the formation permeability evaluation of volcanic reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 15(8): 60-65. (in Chinese with English abstract)

LIU T J, JIA H B, JI H C, et al., 2022. Volcanic reservoirs lacking a paleoweathering crust in Carboniferous deposits of the Junggar Basin, western China: characteristics, controlling factors and hydrocarbon potential[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 219: 111119.

LIU S J, ZHANG Y J, WU Y, et al., 2025. Reverse Size Effect of the Unconfined Compressive Strength of Crystalline Rock: A Grain-Scale Perspective[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(2): 1651-1669.

LU B, ZHAO P, 2004. Distribution volcanic rocks and their effect on oil and gas reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 11(2): 17-19. (in Chinese with English abstract)

LUO W, 2024. Regression analysis of dynamic and static elastic parameters of sandstone reservoir rocks in Bonan Subsag[J]. Sichuan Cement(7): 19-24. (in Chinese)

MA X P, ZHUANG X G, HE Y L, et al., 2025. Reservoir forming conditions and models of oil sands in northwestern margin of Junggar Basin, China[J]. Journal of Earth Science, 36(2): 611-626.

MENG Z P, PENG S P, LING B C, 2000. Characters of the deformation and strength under different confining pressures on sedimentary rock[J]. Journal of China Coal Society, 25(1): 15-18. (in Chinese with English abstract)

PENG L, LUO J W, ZHAO H B, et al., 2023. The lost circulation mechanism in formations prone to lost circulation at Misui block in Changqing oilfield[J]. Xinjiang Oil & Gas, 19(4): 10-19. (in Chinese with English abstract)

SHENG Y S, ZHANG Y G, GU M Y, et al., 2016. Static and dynamic mechanical parameter calibration of tight reservoir rock mass under in-situ condition[J]. Oil & Gas Geology, 37(1): 109-116. (in Chinese with English abstract)

SONG J, 2014. The correlations between geological stress and casing damage and between rock mechanics parameters and casing damage in sandstone reservoir[J]. Journal of Geomechanics, 20(3): 324-330. (in Chinese with English abstract)

VALENCIA-GÓMEZ J C, CARDONA A, ZAPATA S, et al., 2024. Fracture analysis and low-temperature thermochronology of faulted Jurassic igneous rocks in the Southern Colombian Andes: reservoir and tectonic implications[J]. Marine and Petroleum Geology, 165: 106850.

WANG J, LIU J, CHEN J, et al., 2023. Characteristics and controlling factors of carboniferous high quality volcanic reservoirs in eastern Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 23(22): 9388-9403. (in Chinese with English abstract)

WANG W G, WANG M, LU S F, et al., 2016. Basin modelling of gas migration and accumulation in volcanic reservoirs in the Xujiaweizi Fault-depression, Songliao Basin[J]. Arabian Journal of Geosciences, 9(2): 166.

WU H H, 2023. Study of triaxial compression test on mechanical parameters of coal rock[J]. Academic Journal of Architecture and Geotechnical Engineering, 5(6): 16-20.

WU S J, WU J , FAN T L, et al. , 2025. Characteristics of correlation between lithofacies and mechanical properties of deep carbonate rocks and its genetic mechanism[J]. Petroleum Geology & Experiment, 47(6): 1224-1240. (in Chinese with English abstract)

XIE E, XIONG J, PAN Y Y, et al., 2014. The establishment of rock mechanical parameter model in Tazhong area of Tarim basin and its application[J]. Science Technology and Engineering, 14(3): 130-133. (in Chinese with English abstract)

YOU M Q, 2003. Effect of confining pressure on the Young's Modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22(1): 53-60. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J F, LIU Y H, WAN W S, et al., 2020. Lithology identification and reservoir prediction of volcanic reservoir in Xiquan area[J]. Xinjiang Oil & Gas, 16(3): 6-10. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L, LI J, SONG Y, et al., 2021. Gas accumulation characteristics and exploration potential of the Carboniferous volcanic rocks in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 26(6): 141-151. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y, PAN H, LUO F F, et al., 2023. Characteristics and quality determinants of Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche Fault Zone, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 44(5): 1129-1140. (in Chinese with English abstract)

ZHI D M, XIE A, YANG F, et al., 2024. Exploration prospects of the whole oil and gas system in the Permian hydrocarbon depressions in the Eastern Junggar Basin[J]. Journal of Geomechanics, 30(5): 781-794. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J, LIN C Y, LIU H M, et al., 2024. Mechanism of reservoir development in the Carboniferous-Permian volcanic rock reservoirs in Hala'alate Mountain area, Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 31(2): 327-342. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Z J, ZHANG H W, WANG X Y, et al. , 2023. Calculation method of in-situ stress in tight sandstone reservoir without density logging curve[J]. China Science and Technology Information(2): 105-107. (in Chinese)

附中文参考文献

陈勉, 2004. 我国深层岩石力学研究及在石油工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 23(14): 2455-2462.

陈峥嵘, 刘伟, 时贤, 等, 2025. 考虑煤体结构差异的深层煤层气地应力场预测方法[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-11. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20250708.1135.006.

崔莹, 屈展, 张永浩, 等, 2018. 泥页岩动静态弹性力学参数实验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 43(6): 2284-2291.

高帅, 巩磊, 刘小波, 等, 2020. 松辽盆地北部深层致密火山岩气藏天然裂缝分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 41(3):

503-512.

郭旭升，2022. 我国陆上未来油气勘探领域探讨与攻关方向[J]. 地球科学，47(10)：3511-3523.

李嘉成，田刚，王俊超，等，2024. 岩心-测井-地震信息二步匹配预测页岩储层层理缝[J]. 新疆石油天然气，20(1)：21-30.

李琼，何建军，陈杰，2017. 地层压力条件下沁水盆地煤岩动静态弹性参数同步超声实验研究[J]. 地球物理学报，60(7)：2897-2903.

李永刚，2017. 松南气田火山岩致密储层分类及有利目标潜力评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，47(2)：344-354.

刘睿，黄捍东，孙传宗，等，2015. 火山岩油藏地层渗透率评价研究[J]. 科学技术与工程，15(8)：60-65.

路波，赵萍，2004. 火山岩的分布及其对油气藏的作用[J]. 特种油气藏，11(2)：17-19.

罗伟，2024. 渤南洼陷砂岩储层岩石的动静态弹性参数回归分析[J]. 四川水泥(7)：19-24.

孟召平，彭苏萍，凌标灿，2000. 不同侧压下沉积岩石变形与强度特征[J]. 煤炭学报，25(1)：15-18.

彭磊，罗江伟，赵宏波，等，2023. 长庆油田米绥新区易漏地层漏失机理[J]. 新疆石油天然气，19(4)：10-19.

盛英帅，张玉广，顾明勇，等，2016. 原位条件下致密储层岩体力学动静态参数校正[J]. 石油与天然气地质，37(1)：109-116.

宋杰，2014. 砂岩油藏地应力及岩石力学参数与套管损坏相关性[J]. 地质力学学报，20(3)：324-330.

王剑，刘金，陈俊，等，2023. 准噶尔盆地东部石炭系优质火山岩储层特征及分布规律[J]. 科学技术与工程，23(22)：9388-9403.

谢恩，熊健，潘杨勇，等，2014. 塔里木盆地塔中地区岩石力学参数模型建立及其应用[J]. 科学技术与工程，14(3)：130-133.

伍尚嘉，吴俊，樊太亮，等，2025. 深层碳酸盐岩岩相与力学性质相关性特征及成因机制[J]. 石油实验地质，47(6)：1224-1240.

尤明庆，2003. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报，22(1)：53-60.

张金风，刘艳红，万文胜，等，2020. 西泉地区火山岩储集层岩性识别及储层预测[J]. 新疆石油天然气，16(3)：6-10.

张璐，李剑，宋永，等，2021. 准噶尔盆地石炭系火山岩天然气成藏特征及勘探潜力[J]. 中国石油勘探，26(6)：141-151.

赵耀，潘虹，骆飞飞，等，2023. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层特征及质量控制因素[J]. 石油与天然气地质，44(5)：1129-1140.

支东明，谢安，杨帆，等，2024. 准噶尔盆地东部二叠系富烃凹陷全油气系统勘探前景[J]. 地质力学学报，30(5)：781-794.

周健，林承焰，刘惠民，等，2024. 准噶尔盆地哈山地区石炭系-二叠系火山岩储层发育机制研究[J]. 地学前缘，31(2)：327-342.

周振江，张翰文，王星宇，等，2023. 缺乏密度测井曲线情况下致密砂岩储层地应力计算方法[J]. 中国科技信息(2)：105-107.