

深部膏泥岩盖层动静态岩石力学弹性性质分析

尹帅¹, 闫玲玲^{2*}, 宋跃海³, 程汉列⁴

(1.西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2.巴音郭楞职业技术学院, 新疆 库尔勒 841000; 3.中国石油塔里木油田分公司 开发处, 新疆 库尔勒 841000; 4.恒泰艾普石油天然气技术服务股份有限公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:基于矿物组分分析和动、静态岩石力学弹性参数同步测试实验,对塔里木盆地西南部玉北地区古近系厚层膏泥岩盖层进行系统的实验岩石力学分析。研究表明,在单轴应力条件下,膏泥岩的变形呈现出明显的弹性变形特征;而在三轴应力条件下,则表现为明显的弹-塑性特征。在地层围压条件下,随着轴向载荷的增加,膏泥岩依次经历了初始压密、线弹性变形、非线性稳定延展变形、非线性非稳定延展变形及峰后应变共5个阶段。硬石膏质泥岩相比泥质硬石膏岩具有更高的纵波波速、横波波速以及纵横波波速比。纵横波波速比与硬石膏组分含量之间具有较好的正相关性。随着硬石膏含量从10%增至90%,其纵横波波速比约从1.63增至1.88,增幅明显。进而确定膏泥岩的纵、横波时差转换关系,且具有较高的精度。泥质硬石膏岩的动态杨氏模量、泊松比及剪切模量均明显高于硬石膏质泥岩。最终建立膏泥岩盖层的动、静态岩石力学弹性参数转换关系。

关键词:膏泥岩 岩石力学弹性性质 转换关系 古近系 塔里木盆地

中图分类号:TE112.25

文献标识码:A

Experimental analysis of rock static and dynamic mechanical properties of deep gypsiferous mudrock cap

YIN Shuai¹, YAN Lingling², SONG Yuehai³, CHENG Hanlie⁴

(1.School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 2.Bayin Guoleng Vocational and Technology College, Korla, Xinjiang, 841000, China; 3.Department of Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China; 4.LandOcean Energy Services Co., Ltd., Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: The mineral composition analysis and static and dynamic mechanical parameters synchronous test were used to analyze the experimental rock mechanics of the thick Paleogene gypsiferous mudrocks in the Yubei area in the southwest of the Tarim Basin. The results indicated that under uniaxial conditions, the gypsiferous mudrock showed obvious characteristic of elastic deformation, while under triaxial conditions, its elastic-plastic characteristics were obvious. Under formation confining pressure conditions, with the increase of axial load, the gypsiferous mudrock had experienced five stages such as initial compaction, linear elastic deformation, nonlinear stability extensional deformation, nonlinear unsteady extension deformation and macroscopic rupture. Compared to the gypsiferous mudrocks (GMR), argillaceous anhydrite rocks (AR) had higher V_p , V_s and V_p/V_s . There was a very good positive correlation between V_p/V_s and the anhydrite content. While the anhydrite content increased from about 10% to 90%, the V_p/V_s value increased from 1.63 to 1.88 and the increase amplitude was significant. And then the conversion relationship of time difference between longitudinal wave and transverse wave of gypsiferous mudrock samples were obtained precisely. The dynamic Young's modulus, Poisson's ratio and shear modulus of AR were obviously higher than that of GMR. The conversion relationships among dynamic and static mechanical parameters of the gypsiferous mudrocks were obtained finally.

收稿日期:2017-11-17。

作者简介:尹帅(1989—),男,山东新泰人,讲师,博士,从事石油构造及地质力学方面的教学与研究。联系电话:13331190422, E-mail:spedysys@163.com。

*通讯作者:闫玲玲(1978—),女,新疆奇台人,副教授,博士。联系电话:13697664881, E-mail:yll7245522@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“硬脆/塑性泥页岩微裂缝产生的岩石物理学机制基础研究”(41572130),国家科技重大专项“四川盆地周缘海相页岩气有利区优选及重点目标评价”(2017ZX05035001-007)。

Key words: gypsiferous mudrocks; elastic mechanical property of rock; conversion relationship; Paleogene; Tarim Basin

硬石膏是一种特殊的晶体矿物,具有低孔隙度、低渗透率、良好的愈合能力以及蠕变特性^[1]。因此,膏盐和盐岩一样,均被认为是封存油气、二氧化碳及核废料的理想岩石介质^[2]。从晶体构成上来说,硬石膏属正交晶系,内部不含结晶水,含有3个相互垂直的二次轴^[3],且这3个二次轴彼此不相等,因此,当声波透射硬石膏晶体时,会发生显著的各向异性变化^[1]。世界范围内多数大型油气田均有膏岩覆盖,这些膏岩的赋存状态可能呈纯度较高(含量超过95%)的厚层状、薄层状或层内混合状^[4]。针对含有不同矿物组分类型的膏岩,其岩石力学弹性性质存在较大差异。对于深部且厚度较大的膏泥岩盖层,其岩石力学弹性性质复杂,在钻井过程中易出现井壁失稳、泥浆密度难以确定以及套管挤压变形等工程问题^[1],而这些工程问题或事故的发生会延误施工进度、浪费人力物力,甚至造成钻井的报废^[2]。因此,明确膏泥岩这类特殊岩性岩石的动、静态岩石力学弹性性质,对测井评价及制定合理的钻井方案均具有重要的参考价值^[5]。笔者设计了动、静态岩石力学弹性参数同步测试实验,对塔里木盆地西南部玉北地区深层膏泥岩盖层岩样进行动、静态岩石力学弹性参数测试,系统分析应力-应变曲线变化及矿物组分对膏泥岩动态岩石力学弹性参数的影响,并建立膏泥岩的动、静态岩石力学弹性参数转换关系。研究成果可以为深部厚层膏泥岩地层的高效钻、测井评价提供科学依据。

1 实验样品及条件

1.1 实验样品

研究区位于塔里木盆地西南部的玉北地区,其古近系膏泥岩为区域性盖层,厚度为50~200 m,埋深超过3 500 m^[6]。膏泥岩岩样取自研究区玉北1-6H井,共计8组,编号分别为Y1—Y8。岩样中的主要矿物组分为硬石膏和泥质,还含有少量白云石、石英粉砂、炭屑、氧化铁及重矿物锆石等(表1)。根据硬石膏和泥质组分的相对含量,将膏泥岩样品分别定义为泥质硬石膏岩(AR)和硬石膏质泥岩(GMR);其中AR的硬石膏含量大于泥质含量,而GMR的泥质含量大于硬石膏含量。

1.2 实验条件

对膏泥岩岩样进行动、静态岩石力学弹性参数同步测试实验,测试仪器为MTS岩石物理测试系

表1 塔里木盆地西南部玉北地区膏泥岩岩样的矿物组分含量分析结果

Table1 Mineral component content analysis of the gypsiferous mudrock samples in the Yubei area, southwestern Tarim Basin %

组号	岩性	岩样编号	泥质	硬石膏	白云石	石英粉砂	炭屑	氧化铁
1	GMR	Y1	41	35	20	4		
2	GMR	Y2	66	10	12	8	2	2
3	GMR	Y3	50	28	20	2		
4	GMR	Y4	57	40		3		
5	GMR	Y5	68	25		2	2	3
6	AR	Y6	35	55		10		
7	AR	Y7	39	60		1		
8	AR	Y8		90	10			

统。岩石力学测试的最大有效围压为140 MPa,孔压为70 MPa,轴向载荷为1 000 kN。应力传感器的误差小于1%,位移分辨率为0.000 1 mm。声学测试的精度为0.1%,测试频率为1 MHz。由于测井频率为20 kHz,因此,通过测试品质因子,结合频散转换技术将所测试的波速值转换为20 kHz条件下的速度值^[5]。研究区古近系地层温度实测值为85~87 ℃,有效围压接近50 MPa。8组岩样每组4个,尺寸为2.5 cm×5 cm,分别进行力学和声学测试,所施加的有效围压分别为0,15,30和50 MPa。模拟地层有效围压(50 MPa)的实验测试温度为85 ℃。

2 静态岩石力学弹性性质分析

研究区古近系膏泥岩的测井曲线表现为低自然伽马、低声波时差及高密度特征,其自然伽马值主要为10~65 API,声波时差值主要为164~328 μs/m,其中纯膏岩地层密度通常大于2.9 g/cm³^[3]。在单轴应力条件下,岩样应力测试的应力-应变曲线表现为明显弹性变形特征;而在三轴应力条件下,应力-应变曲线则表现为明显的弹-塑性变形特征。

在地层围压(50 MPa)条件下,可以将研究区膏泥岩岩样的应力-应变曲线划分为5个阶段:①第1个阶段为初始压密阶段,岩石内部的微裂隙和孔隙迅速发生闭合。②第2个阶段为线弹性变形阶段,岩石发生线弹性变形,无新的微裂缝产生^[7]。③第3个阶段为非线性稳定延展变形阶段,岩石内部发生了孔隙的坍塌,并产生一些新的微裂缝^[7-10]。④第4

个阶段为非线性非稳定延展变形阶段,该阶段岩石内部出现大量新的微裂缝,并导致岩石发生宏观破裂。⑤第5个阶段为峰后应变阶段,该阶段岩石破裂后仅剩余残余强度^[2]。

3 动态岩石力学弹性性质分析

3.1 纵、横波波速

对研究区膏泥岩岩样进行三轴声学测试。随着有效围压的增加,岩石逐渐被压实,纵、横波波速也随之增大。统计结果显示,在地层条件(有效围压为 50 MPa)下,GMR 的纵波波速(V_p)和横波波速(V_s)比单轴应力条件下的分别高 11.5%和 11.4%;AR 的 V_p 和 V_s 比单轴应力条件下的分别高 3.4%和 4.3%。由于硬石膏的密度远大于泥质,其可压实空间应远小于泥质^[3],因此,随着硬石膏含量的增加,岩样的波速也相对较高,但随着有效围压的增加,其波速的增大幅度逐渐减小。

随着有效围压的增加,研究区膏泥岩岩样的纵横波波速比(V_p/V_s)的变化特征如图 1 所示。在不同有效围压条件下,岩样的 V_p/V_s 具有一定的离散变化特征,这可能与有效围压加载过程中膏泥岩内部晶体矿物的复杂变化有关,而复杂的晶体结构增强了声波传播的各向异性^[3]。与 GMR 相比,AR 具有更高的 V_p/V_s 值(图 1)。

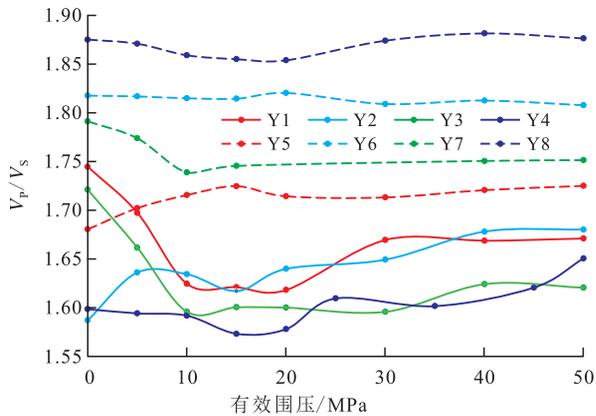


图1 不同有效围压条件下膏泥岩岩样 V_p/V_s 变化特征

Fig.1 Variation of V_p/V_s of the gypsiferous mudrock samples under different confining pressures

由图 2 可以看出,GMR 和 AR 的纵、横波时差具有类似的变化特征,纵、横波时差之间具有非常好的线性相关性。其纵、横波时差的转换关系实际代表不同应力环境下膏泥岩的纵、横波对应关系,因此对不同埋深的膏泥岩均具有参考价值。

在地层围压条件下,膏泥岩岩样的硬石膏含量与 V_p/V_s 之间具有较好的正相关关系(图 3)。随着硬

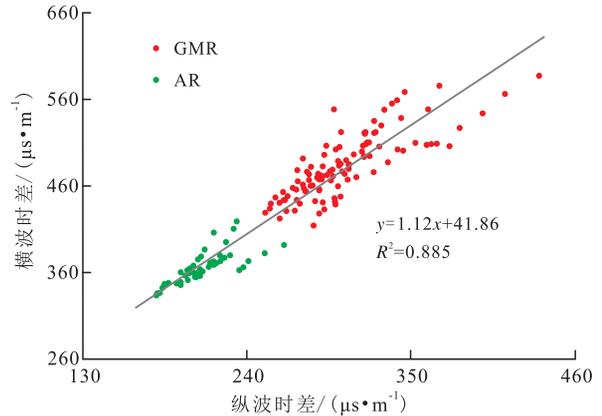


图2 膏泥岩岩样的纵、横波时差转换关系

Fig.2 Conversion relationship of time difference between longitudinal wave and transverse wave of gypsiferous mudrock samples

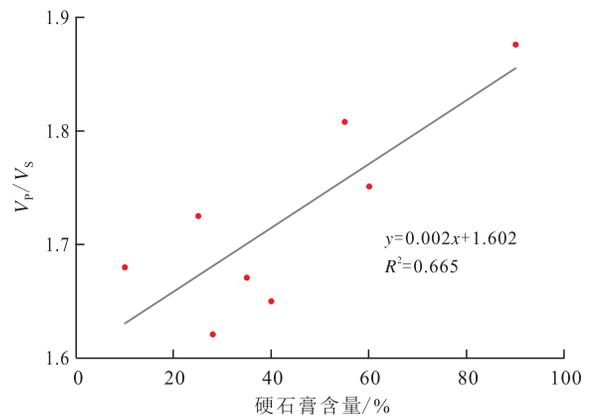


图3 地层围压条件下膏泥岩岩样硬石膏含量与 V_p/V_s 的关系

Fig.3 Relationship between anhydrite content and V_p/V_s of the gypsiferous mudrock samples under the gypsiferous mudrock samples formation confining pressure

石膏含量的增加,膏泥岩的 V_p/V_s 值增大。在硬石膏含量约从 10% 增至 90% 的过程中,其 V_p/V_s 值约从 1.63 增至 1.88,增幅明显。

3.2 动态杨氏模量及泊松比

岩石动态杨氏模量和泊松比的计算式^[6]分别为

$$E_d = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \times \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \quad (1)$$

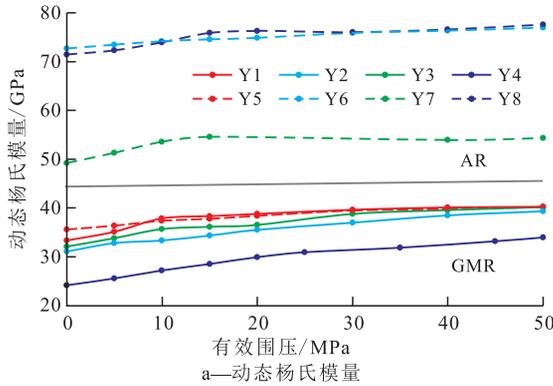
$$\nu_d = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \right) \quad (2)$$

式中: E_d 为动态杨氏模量, GPa; ρ_b 为岩石密度, g/cm^3 ; Δt_s 为横波时差, $\mu s/m$; Δt_p 为纵波时差, $\mu s/m$; ν_d 为动态泊松比。

在不同有效围压条件下,膏泥岩岩样的动态杨氏模量随着有效围压的增加而增大(图 4a)。对于 GMR,在有效围压为 50 MPa 条件下的动态杨氏模量比单轴应力条件下的动态杨氏模量高 24%。对于 AR,在有效围压为 50 MPa 条件下的动态杨氏模量

比单轴应力条件下的动态杨氏模量高8.1%。

研究区所有膏泥岩岩样的动态泊松比为0.170~0.300,变化范围较小(图4b)。随着有效围压的增加,单个岩样的动态泊松比具有一定的离散



性,这与波速的离散有关^[8]。对于硬石膏含量较高的膏泥岩岩样,其同样具有较高的动态泊松比(图4b)。AR的动态杨氏模量和泊松比均高于GMR的动态杨氏模量和泊松比(图4)。

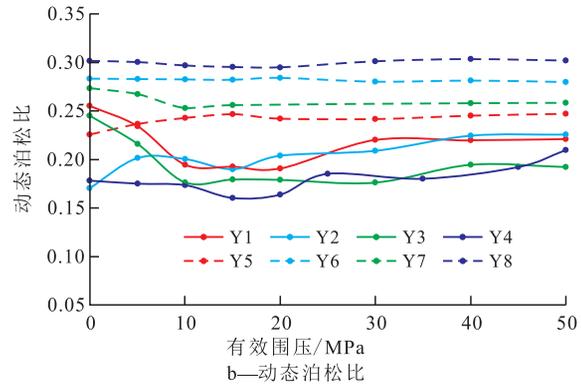


图4 不同有效围压条件下膏泥岩岩样的动态杨氏模量和泊松比变化特征

Fig.4 Changes of the dynamic Young's modulus and Poisson's ratio of the gypsiferous mudrock samples under different effective confining pressures

3.3 动态剪切模量

岩石动态剪切模量的计算式为

$$G_d = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \quad (3)$$

式中: G_d 为动态剪切模量, GPa。

在三轴应力条件下,研究区膏泥岩岩样主要发生剪切破裂,因此,剪切模量可用于表征岩石抵抗剪切破裂的能力^[11-12]。

从图5可以看出,随着有效围压的增加,膏泥岩岩样的动态剪切模量逐渐增大。在有效围压为15 MPa范围内,膏泥岩岩样的动态剪切模量的增长率较大;之后,动态剪切模量的增长率较小,并基本保持稳定。此外,AR的动态剪切模量明显高于GMR的动态剪切模量,表明AR的强度更高,抗剪切破裂能力更强(图5)。

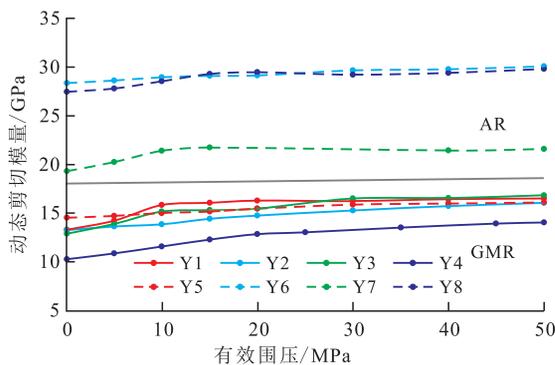


图5 不同有效围压条件下膏泥岩岩样动态剪切模量的变化特征

Fig.5 Changes of the dynamic shear modulus of the gypsiferous mudrock samples under different effective confining pressures

4 动静态岩石力学弹性参数的转换关系

研究区膏泥岩岩样的动、静态杨氏模量和泊松比均具有较好的正线性相关性(图6)。AR的动态

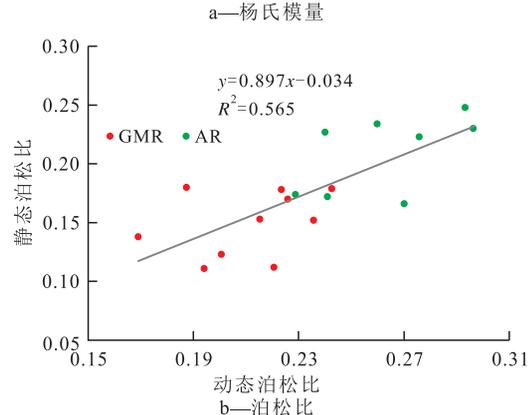
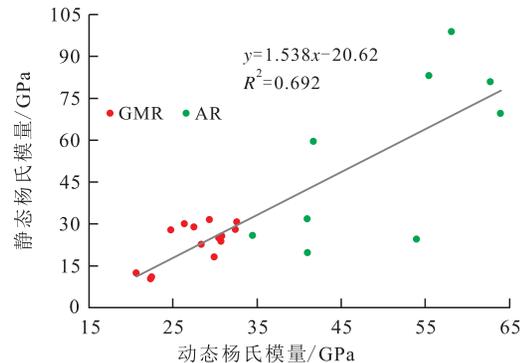


图6 膏泥岩岩样动、静态杨氏模量和泊松比的转换关系
Fig.6 Conversion model of dynamic-static Young's modulus and Poisson's ratio of gypsiferous mudrock samples

杨氏模量和泊松比均明显高于GMR。GMR的动态杨氏模量主要为18~35 GPa,静态杨氏模量主要为17~35 GPa;AR的动态杨氏模量主要为34~65 GPa,静态杨氏模量主要为19~100 GPa。GMR的动态泊松比主要为0.16~0.25,静态泊松比主要为0.11~0.18;AR的动态泊松比主要为0.24~0.30,静态泊松比主要为0.17~0.25。

由于笔者对声学测试数据进行了频散校正,因此,所建立的膏泥岩岩样动、静态岩石力学弹性参数的转换关系可以直接用于膏泥岩地层岩石力学弹性参数的测井评价。

5 结论

在单轴应力条件下,塔里木盆地西南部玉北地区膏泥岩岩样的变形呈现出明显的弹性变形特征;而三轴应力条件下,则表现为明显的弹-塑性特征。在地层围压条件下,随着轴向载荷的增加,膏泥岩岩样依次经历了初始压密、线弹性变形、非线性稳定延展变形、非线性非稳定延展变形及峰后应变共5个阶段。在地层围压条件下,GMR的 V_p 和 V_s 比单轴应力条件下的分别高11.5%和11.4%;AR的 V_p 和 V_s 比单轴应力条件下的分别高3.4%和4.3%;GMR的动态杨氏模量比单轴应力条件下的高24%,AR的动态杨氏模量比单轴应力条件下的高8.1%。研究区所有膏泥岩岩样的动态泊松比为0.170~0.300,变化范围较小。GMR与AR相比,具有更低的 V_p 、 V_s 和 V_p/V_s 。 V_p/V_s 与硬石膏含量之间具有较好的正相关性。在硬石膏含量约从10%增至90%的过程中,其 V_p/V_s 值约从1.63增至1.88,增幅明显。AR的动态杨氏模量、泊松比及剪切模量均明显高于GMR。根据实验测试结果确定研究区膏泥岩的纵、横波时差转换关系,且具有较高的精度。最终建立研究区膏泥岩的动、静态岩石力学弹性参数转换关系,可以为深部厚层膏泥岩地层的高效钻、测井评价提供科学依据。

参考文献:

[1] 孔祥鑫,姜在兴,韩超,等.束鹿凹陷沙三段下亚段细粒碳酸盐纹层特征与储集意义[J].油气地质与采收率,2016,23(4):19-26.
KONG Xiangxin, JIANG Zaixing, HAN Chao, et al. Laminations characteristics and reservoir significance of fine-grained carbonate in the lower 3rd member of Shahejie Formation of Shulu sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4):

- 19-26.
[2] 杨淑雯,陈波,蔡德洋,等.江陵凹陷古近系新下段膏盐岩地球物理响应特征及分布预测[J].油气地质与采收率,2015,22(2):33-38.
YANG Shuwen, CHEN Bo, CAI Deyang, et al. Geophysical responses characteristics and distribution prediction of gypsum-salt rock in the lower member of Xingouzui Formation of Paleogene in Jiangling sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2):33-38.
[3] 李双贵,张俊,易浩,等.模拟地层条件下膏泥岩高频声波测试及频散外推对比研究[J].岩性油气藏,2014,26(1):110-116.
LI Shuanggui, ZHANG Jun, YI Hao, et al. Comparative study of high frequency acoustic wave test and dispersion extrapolation of gypsum mudstone in simulated formation [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(1):110-116.
[4] 宋磊,宁正福,丁冠阳.鄂尔多斯盆地苏东地区下古生界马五₂亚段白云岩成因及特征[J].油气地质与采收率,2017,24(5):34-39.
SONG Lei, NING Zhengfu, DING Guanyang. Genesis and characteristics of Lower Palaeozoic dolomite of submember Ma₅ in Mjiagou Formation, Sudong region in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5):34-39.
[5] 牛贯非,李连崇,李明,等.基于数值模拟的储层岩石力学参数预测模型分析及应用[J].油气地质与采收率,2017,24(2):73-79.
NIU Guanfei, LI Lianchong, LI Ming, et al. Analysis and application on prediction model of reservoir rock mechanical parameters based on numerical simulation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2):73-79.
[6] 张谦,黄文辉,丁文龙,等.玉北地区奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素特征及成岩环境分析[J].西安石油大学学报:自然科学版,2015,30(5):23-30,74.
ZHANG Qian, HUANG Wenhui, DING Wenlong, et al. Analysis of carbon and oxygen isotopic characteristics and diagenetic environment of Ordovician carbonate rock in Yubei area [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2015, 30(5):23-30, 74.
[7] GOODMAN R E. Introduction to rock mechanics [M]. New York: Wiley, 1989.
[8] LAMA R D, VUTUKURI V S. Handbook on mechanical properties of rocks: Vol II [M]. Clausthal: Trans Tech Publications, 1978.
[9] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics [M]. Oxford: Blackwell, 2007.
[10] AHRENS T J. A handbook of physical constants [M]. San Francisco: American Geophysical Union, 1995.
[11] BAGHERIPOUR M H, MOSTYN G R. Prediction of strength of jointed rock: theory and practice [C]. Torino: Proceedings of ISRM International Symposium (Eurock'96), 1996: 231-238.
[12] ZHANG J, WONG T F, DAVIS D M. Micromechanics of pressure-induced grain crushing in porous rocks [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B1):341-352.