

干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究

谭现锋^{1,2}, 张强^{1,2}, 战启帅^{1,2}, 李生海^{1,2}, 江海洋³, 张帆^{2,4}

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁 272100;

2. 山东省地热清洁能源勘查开发工程研究中心, 山东 济宁 272100;

3. 山东省第一地质矿产勘察院, 山东 济南 250102;

4. 湖北工业大学土木工程与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:为了更准确掌握高温条件下干热岩储层的岩石力学性质,进一步指导干热岩钻井施工,通过室内试验进行了实时高温条件下的巴西劈裂试验、剪切试验、单轴压缩试验。单一试验采用同一钻孔同一深度采取的岩样,通过高低温箱控制器设置温度和恒温时间,以恒位移速率0.1 mm/min对试样进行加载,减少岩石宏观力学性质的离散性和试验过程偏差对试验结果的不利影响。试验样品为山东省文登—荣成一威海地区LGZK1井采取的二长花岗岩,通过获得试样破坏时的最大荷载值和变形数据,计算其抗拉强度、抗剪强度、抗压强度、弹性模量等力学性质参数,分析实时高温条件下岩石内部破坏机理和岩石强度差异。研究表明,在200℃以内,花岗岩的抗剪强度和单轴抗压强度升高、抗拉强度降低;随着温度的进一步升高,花岗岩的抗剪强度和单轴抗压强度降低,而抗拉强度持续降低;储层岩体温度和应力的升高,将使岩石的硬度增加、塑性增强。这些认识可为高热流花岗岩岩石力学性质的进一步研究提供基本参数,为高热流花岗岩型干热岩资源勘探开发过程中碎岩机具的选型、钻井工艺的选择、井壁稳定的控制等提供参考依据。

关键词:干热岩储层;花岗岩;实时高温;巴西劈裂试验;剪切试验;单轴压缩试验

中图分类号:P634.1;TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)04-0110-08

Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature

TAN Xianfeng^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, ZHAN Qishuai^{1,2}, LI Shenghai^{1,2}, JIANG Haiyang³, ZHANG Fan^{2,4}

(1. Shandong Provincial Lunan Geology and Exploration Institute (Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources No.2 Geological Brigade), Jining Shandong 272100, China;

2. Shandong Geothermal Clean Energy Exploration and Development Engineering Research Center, Jining Shandong 272100, China;

3. No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan Shandong 250102, China;

4. School of Civil Engineering Architecture & Environment, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei 430068, China)

Abstract: In order to know more accurately the rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature, and further guide the drilling work of hot-dry rock, the real-time Brazilian splitting test, shear test and uniaxial compression test under high temperature were carried out in laboratory. In a single test, rock samples taken from the same borehole and the same depth were loaded at a rate of 0.1mm/min by setting the temperature and holding temperature time using a high-low temperature chamber, to reduce the adverse influence of the discretization of rock macro-mechanical properties and the deviation of test process on the test results. The samples are monzonitic granite

收稿日期:2022-10-17; 修回日期:2023-04-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.015

基金项目:国家自然科学基金项目“干热岩水力压裂-热冲击耦合机理及压裂效果评估”(编号:51979100)

第一作者:谭现锋,男,汉族,1977年生,研究员,地质工程专业,博士,主要从事深部地热资源勘探与开发、采煤沉陷区综合治理与生态修复工作,山东省济宁市兖州区九州中路107号,geotan1977@126.com。

引用格式:谭现锋,张强,战启帅,等.干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J].钻探工程,2023,50(4):110-117.

TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):110-117.

taken from the Well LGZK1 in the Wendeng-Rongcheng-Weihai area of Shandong province. Through obtaining the maximum load and deformation data of the samples at failure, the mechanical properties such as tensile strength, shear strength, compressive strength and elastic modulus are calculated, and the failure mechanism and strength difference of the rock under real-time high temperature are analyzed. As a result, the shearing strength and uniaxial compressive strength of granite increased and the tensile strength decreased below 200 °C. While the shear strength and uniaxial compressive strength of the granite decreased and the tensile strength continuously decreased with the increase of temperature. The increase of temperature and stress will increase the hardness and plasticity of the rock. It provides basic parameters for the study of rock mechanical properties of the high heat flow granite, and also provides a reference for the selection of rock-crushing tools, drilling technology and wellbore stability in the exploration and development of high heat flow granite type hot-dry rock resources.

Key words: hot-dry rock reservoir; granite; real-time high temperature; Brazilian splitting test; shear test; uniaxial compressive test

0 引言

干热岩是不含或仅含少量流体,温度高于180 °C,其热能在当前技术经济条件下可以利用的岩体,深部干热岩资源深度可达到5000 m以上,温度可达到350 °C温度以上^[1-6]。目前在国内外的干热岩开发利用过程中存在很多科学和工程问题需要进一步研究,如资源靶区定位技术、人工压裂、地热地质模型、地下高温岩体多场耦合过程等^[7],高温和应力耦合下的岩石力学特性是解决上述干热岩开发问题的基础,因此研究掌握实时高温作用下岩石的力学特性和变形特征,对干热岩勘探开发具有重要意义^[8-11]。

鉴于目前勘探开发的干热岩资源大部分为高热流花岗岩型干热岩资源,为了研究干热岩储层岩石高温环境下的力学特性,特采取钻井岩心进行测试。由中国科学院武汉岩土力学研究所负责测试,选取了不同的实时高温条件,对钻获的干热岩储层花岗岩岩心分别开展了实时高温条件下花岗岩巴西劈裂试验、剪切试验、单轴压缩试验,并分析了不同实时高温条件下花岗岩在拉伸、剪切、压缩等应力路径下的强度和变形破坏机理,为干热岩工程碎岩机具的选型、钻井工艺的选择、井壁稳定性等提供参数和依据。

1 试验方法

1.1 试验样品

岩石材料本身具有非均质性,具有大致相同矿物颗粒和结构的花岗岩局部结构也会存在差异,这将导致岩石宏观力学性质的差异,即岩石的宏观力

学性质存在离散性^[12]。再加上尺寸效应、端部效应、加工精度等因素的影响,在试验结果的分析过程和规律的归纳过程中容易产生偏差^[13]。为了最大程度的规避岩石宏观力学的离散性和偏差,试验试样取自同属于高热流花岗岩型干热岩资源的山东省文登—荣成一威海地区深部干热岩资源调查评价项目的LGZK1井,采样深度为2800、3100、3400 m,样品岩性为二长花岗岩(见图1)。

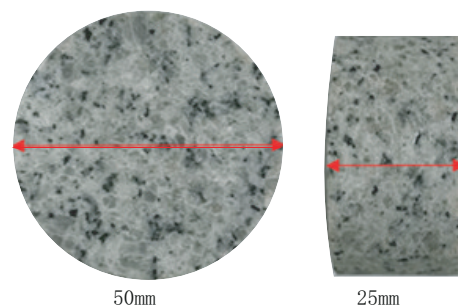


图1 花岗岩试样

Fig.1 Granite samples

1.2 试验装置

试验采用设备为ETM305D型高低温电子万能试验机(见图2a)。最大试验力为300 kN,试验机精度为0.5级,试验力分辨率为1/500000。可通过高低温箱控制器设置温度和恒温时间,实时温度范围为-70~400 °C,温度控制精度为±1 °C。

1.3 试验方案

1.3.1 巴西劈裂试验

巴西劈裂试验试样取自2800 m井段,由同一根岩心加工而成,表面完整无明显缺陷(参见图1)。



图2 ETM305D型高低温电子万能试验机及试验夹具
Fig.2 ETM305D high low temperature electronic universal testing machine and test fixture

根据规范^[14],将岩样加工成 $\text{O}50 \times 25 \text{ mm}$ 的圆饼状,控制试样两端面的平整度偏差 $\geq 0.05 \text{ mm}$ ^[15]。

将试样置于弧形夹具并进行对中处理(见图2b),以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至目标温度,然后维持2 h的恒温,保证试样内外温度均匀。恒温结束后采用 $0.1 \text{ mm}/\text{min}$ 的加载速率分别在不同实时高温(25 、 100 、 200 、 $300 \text{ }^\circ\text{C}$)下进行巴西劈裂试验,获得试样破坏时的最大荷载值,并计算其抗拉强度。

1.3.2 剪切试验

剪切试验试样采自3100 m井段,均由同一根岩心加工而成,表面完整无明显缺陷。将所选岩样加工为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的立方体,并控制试样各端面的平整度偏差 $\geq 0.05 \text{ mm}$ ^[16]。

本试验所选剪切角度为 70° ,将试样置于高低温箱内的变角剪切夹具(见图2c),以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至目标温度,然后维持2 h的恒温,可避免试样加温过程中不均匀温度分布引起的热应力。恒温结束后采用 $0.1 \text{ mm}/\text{min}$ 的加载速率分别在不同

实时高温(100 、 200 、 $300 \text{ }^\circ\text{C}$)下进行剪切试验,获得试样破坏时的最大荷载值,并计算其抗剪强度。

1.3.3 单轴压缩试验

单轴压缩试验试样采自3400 m井段,均由同一根岩心加工而成,表面无明显缺陷。根据规范^[14]将岩石端面平直度、平行度和垂直度等加工精度均控制在规范范围之内,试样尺寸为 $\text{O}37 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 、表面平整光滑。

将试样置于高低温箱内的单轴压缩夹具上(见图2d),以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至目标温度,然后维持2 h的恒温,可避免试样加温过程中不均匀温度分布引起的热应力。同时使用高精度轴向差动位移传感器(LVDT)测量其轴向位移,精度可达 0.01 mm 。恒温结束后采用 $0.1 \text{ mm}/\text{min}$ 的加载速率分别在不同实时高温(25 、 100 、 200 、 $300 \text{ }^\circ\text{C}$)下进行单轴压缩试验,获得试样破坏时的最大荷载值和变形数据,并计算其抗压强度与弹性模量。

2 巴西劈裂试验结果及分析

2.1 实时高温条件下巴西劈裂试验

图3为不同实时温度下花岗岩巴西劈裂荷载-位移曲线,图中曲线均具有压密、线弹性和峰后下降阶段。整体上试样的峰值荷载随温度的升高呈下降趋势,且达到峰值荷载时对应的位移量越来越小;压密阶段和线弹性阶段的曲线斜率随温度的升高逐渐增大,超过 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 后曲线斜率基本重合。

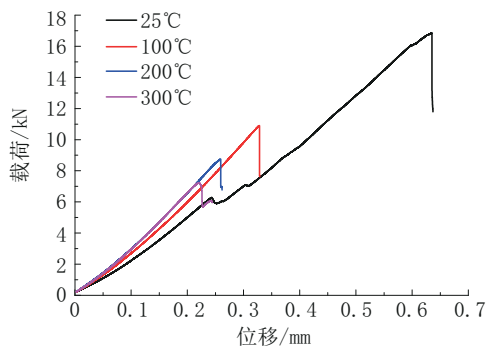


图3 不同实时温度下花岗岩巴西劈裂荷载-位移曲线
Fig.3 Brazilian splitting load-displacement curves of the granite under different real-time temperatures

由于试验采用的花岗岩属于致密岩样,因而荷载-位移曲线弹性阶段较长,压密阶段较短,屈服过程微不可查,试样在经过弹性变形后立即达到峰值,

强度发生破坏,破坏前荷载-位移曲线上几乎没有征兆。在 25、100、200 °C,曲线斜率在临近峰值荷载前几乎保持不变,到达峰值荷载后突然陡降,表现出明显脆性破坏特征,均属于脆性破坏^[17-18]。当温度升高到 300 °C,曲线在峰值荷载前具有较小的屈服阶段,微小的荷载增量导致变形继续增大,在峰值荷载后的下降阶段曲线呈现明显的锯齿状特征,此时花岗岩的破坏已经表现出了一定韧性,不再是单纯的脆性破坏,这是由于温度升高,粘性水、强结合水和结晶水的逸出^[19],矿物颗粒间的润滑作用下降,颗粒间的摩擦力增大,导致岩石的脆性减弱,塑性增强^[20-21],但岩石断裂时依然具有一定的承载力。

2.2 实时高温下巴西劈裂试验岩石力学参数计算与规律性分析

图 4 为不同实时温度下巴西劈裂后试样的破坏形态图,试样均沿加载方向劈裂成两半,其抗拉强度可由公式(1)计算求得^[22]:

$$\sigma_t = 2P/\pi DL \quad (1)$$

式中: σ_t ——岩石抗拉强度,MPa; P ——试样劈裂破坏发生时最大荷载值,N; D ——圆盘试样的直径,mm; L ——圆盘试样的厚度,mm。

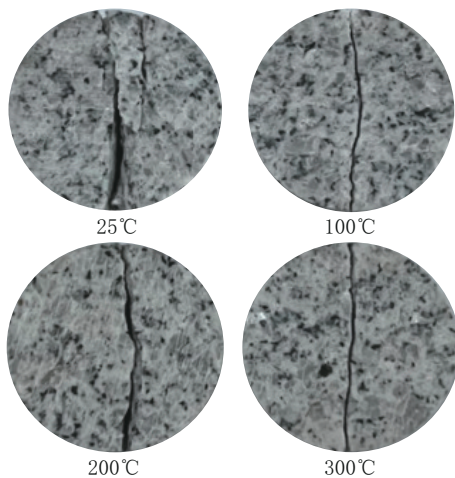


图 4 不同实时温度下花岗岩巴西劈裂试验破坏形态

Fig.4 Failure modes of the granite after Brazilian splitting tests under different real-time temperatures

不同实时温度下花岗岩试样抗拉强度见表 1 和图 5。结合表 1 与图 5 可看出,随着温度的升高,花岗岩的整体抗拉强度呈现下降的趋势。温度由 25 °C 升高至 100 °C,其抗拉强度由 8.56 MPa 降低到 5.55 MPa,降幅为 35.16%,在 200 °C 和 300 °C 下的降

幅分别为 47.90% 和 63.79%,由此可见温度的升高对花岗岩的抗拉强度有着明显的劣化影响^[23]。

表 1 实时温度下花岗岩试样抗拉强度

Table 1 Tensile strength of the granite samples under real-time temperature

实时温度/°C	峰值荷载/kN	抗拉强度/MPa
25	16.80	8.56
100	10.90	5.55
200	8.75	4.46
300	6.08	3.10

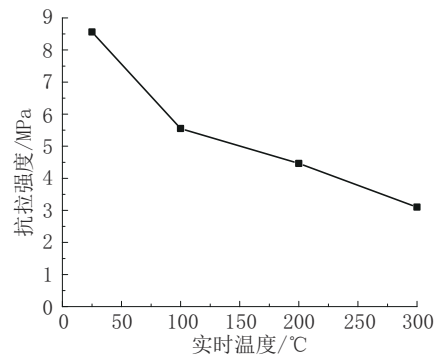


图 5 花岗岩试样实时温度-抗拉强度曲线

Fig.5 Real-time temperature-tensile strength curve of the granite samples

3 剪切试验结果及分析

3.1 实时高温条件下剪切试验荷载-位移曲线

图 6 为不同实时温度下花岗岩变角剪切试验荷载-位移曲线,曲线均具有压密、线弹性和峰后下降阶段。

在剪切的开始阶段,试样在剪切荷载的作用下逐渐被压密,岩体中原有微裂隙和孔隙逐渐闭合;线

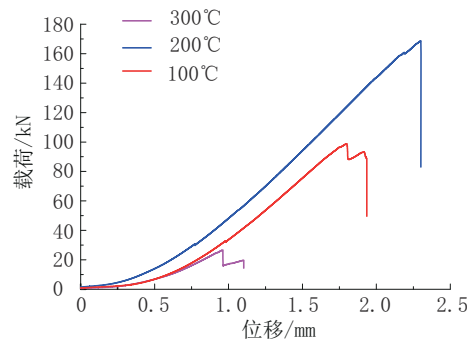


图 6 不同实时温度下花岗岩剪切试验荷载-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of the granite shearing tests under different real-time temperatures

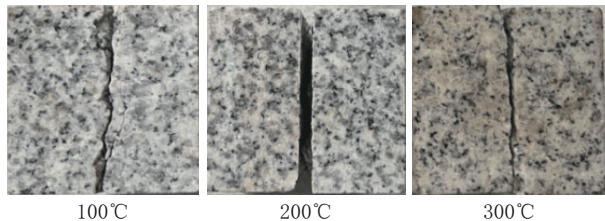
弹性阶段,剪应力随剪切位移的增大迅速增大,达到峰值荷载后,结构面发生剪切破坏,剪应力迅速跌落,破坏前屈服过程微不可查,表现出较强的脆性破坏特征。在100℃条件下,试样破坏后在荷载作用下仍然具有一定的位移量,表现出一定的韧性;300℃条件下,剪切破坏下的试样在荷载降低到一定程度后出现二次弹性发展,表现出一定的承载能力。200℃以内,试样的峰值荷载随温度的升高逐渐增大,这是由于高温作用使得试样内部体积膨胀,剪切面增大引起晶间接触密实,从而导致峰值荷载的增加;超过200℃后,由于高温下试样内部颗粒的不均匀膨胀和热裂纹的扩展^[19-20],导致峰值荷载大幅度下降,表现出温度对试样的劣化作用。

3.2 实时高温条件下剪切试验岩石力学参数计算与规律性分析

图7为不同实时温度下变角剪切后试样的破坏形态图,试样均沿加载方向剪裂成两半。观察试样,300℃时花岗岩的颜色发生明显改变,由常温下的灰白色渐渐泛黄。试样抗剪强度可由下式计算求得^[17-18]:

$$\tau = (P/A)(\sin\alpha - f\cos\alpha) \quad (2)$$

式中: τ ——岩石抗剪强度,MPa; P ——试样剪切破坏时最大荷载值,N; A ——剪切断面的面积, mm^2 ; f ——滚轴摩擦系数; α ——剪切模具夹角, $(^\circ)$ 。



100℃ 200℃ 300℃

图7 不同实时温度下花岗岩剪切破坏形态

Fig.7 Failure modes of the granite during the shearing tests under different real-time temperatures

试验中选用凡士林作为润滑剂,摩擦力可忽略不计。不同实时温度下花岗岩试样抗剪强度见表2和图8。

结合表2与图8可看出,随着温度的升高花岗岩的整体抗剪强度的变化趋势。温度在100℃时其抗剪强度为36.8 MPa,当温度升高到200℃时其抗剪强度提高了72.3%,这说明200℃以内,温度对试样表现出强化作用,这是由于高温作用时试样内部

表2 实时温度下花岗岩试样抗剪强度

Table 2 Shear strength of the granite samples under real-time temperature

实时温度/℃	峰值荷载/kN	抗剪强度/MPa
100	98.0	36.8
200	168.7	63.4
300	26.6	10.0

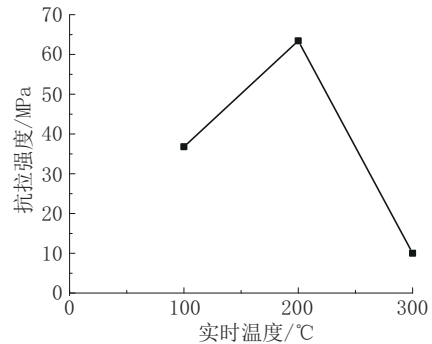


图8 花岗岩试样实时温度-抗剪强度曲线

Fig.8 Real-time temperature-shear strength curve of the granite samples

体积膨胀,受压面增大引起晶间接触密实,从而导致抗剪强度增加。随着温度的进一步提高,其抗剪强度骤然剧降,300℃时其抗剪强度降低到10.0 MPa,这是由于高温下内部颗粒的不均匀膨胀和热裂纹的扩展导致的^[19-20]。

4 单轴压缩试验结果及分析

4.1 实时高温条件下单轴压缩应力-应变曲线

图9为不同实时温度下花岗岩单轴压缩试验应力-应变曲线,除25℃条件下曲线均具有压密、线弹性、屈服和峰后下降4个应力应变阶段。

压密阶段应力-应变曲线呈缓坡下凹形,这是由于压缩荷载作用下岩体中原有微裂纹及孔隙逐渐闭合,且压密阶段也随着温度的升高而增长;弹性变形阶段,应力-应变曲线近似直线,岩石压密后接近连续介质;屈服阶段岩石进入塑性变形阶段,开始出现微破裂,且随压缩应力的增大而加剧,屈服阶段后期逐渐接近峰值应力状态,过程较短;屈服阶段随温度的升高逐渐显现;越过峰值强度后,微破裂发展出现质的变化,不断破裂扩展造成应力和能量释放,试样贯通性破裂面形成,岩体强度迅速减弱^[24]。25℃条件下,试样表现为脆性破坏,峰值强度后岩体强度直

线下降;在 100、200 °C 条件下,试样的破坏表现出一定的韧性,破坏后仍然具有一定残余强度,且随温度的升高,残余强度越大,衰减速度越小;在 300 °C 条件下,峰值强度较 200 °C 略有下降,残余强度衰减加快,这是由于温度持续升高使得颗粒间或颗粒内应力持续增大,致使花岗岩内部产生微小裂纹或使原生裂纹扩展、加宽、联通,宏观上表现为花岗岩岩石力学性质的劣化^[13]。

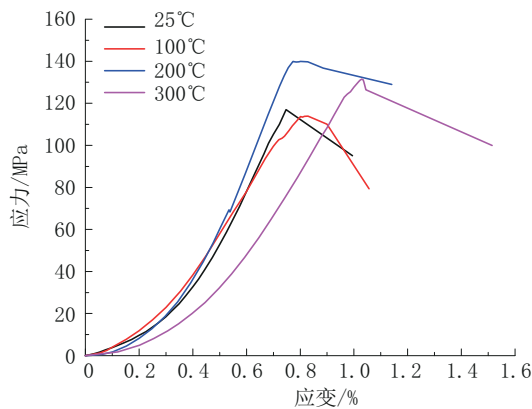


图 9 不同实时温度下花岗岩单轴压缩试验应力-应变曲线

Fig.9 The stress-strain curve of the granite during the uniaxial compression test under different real-time temperatures

4.2 实时高温条件下单轴压缩试验岩石破坏形态

图 10 为不同实时温度下试样的单轴抗压试验破坏形态图,在 25 °C 条件下,整个试样沿轴向存在劈裂面,劈裂面分布不规则,试样破裂成许多小块;在 100 °C 和 200 °C 条件下,试样内形成 1~2 条轴向剪切破裂面,在主破裂面两侧局部伴有裂隙和碎块;在 300 °C 条件下,试样呈劈裂破坏,无剪切裂缝出现,且试样的颜色发生明显改变,由常温下的灰白色渐渐泛黄。

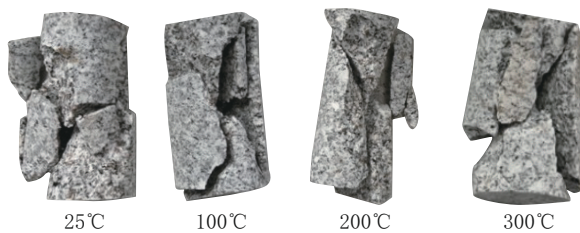


图 10 不同实时温度下花岗岩单轴抗压试验破坏形态

Fig.10 Failure modes of the granite during the uniaxial compression tests under different real-time temperatures

4.3 实时高温条件下单轴压缩试验岩石力学参数计算与规律性分析

试样抗压强度和弹性模量可由下式计算求得^[17-18]:

$$\sigma_1 = P/A \tag{3}$$

式中: σ_1 ——岩石抗压强度,MPa; P ——试样发生破坏时最大荷载值,N; A ——试样截面积,mm²。

为了试验结果的准确性,本试验选取应力-应变曲线的直线段(40%~60%)进行弹性模量的计算:

$$E = (\sigma_{60\%} - \sigma_{40\%}) / (\epsilon_{60\%} - \epsilon_{40\%}) \tag{4}$$

式中: E ——花岗岩试样的弹性模量,GPa; $\sigma_{60\%}$ 、 $\sigma_{40\%}$ ——抗压强度的 60% 和 40%; $\epsilon_{60\%}$ 、 $\epsilon_{40\%}$ ——60% 和 40% 抗压强度下对应的应变。

不同实时温度下花岗岩试样抗压强度及弹性模量见表 3 和图 11。

表 3 实时温度下花岗岩试样抗压强度及弹性模量
Table 3 Compressive strength and elastic modulus of the granite samples under real-time temperature

实时温度/ °C	峰值荷载/ kN	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa
25	127.3	118.4	23.9
100	122.1	113.6	20.5
200	152.0	141.4	27.5
300	142.4	132.3	19.4

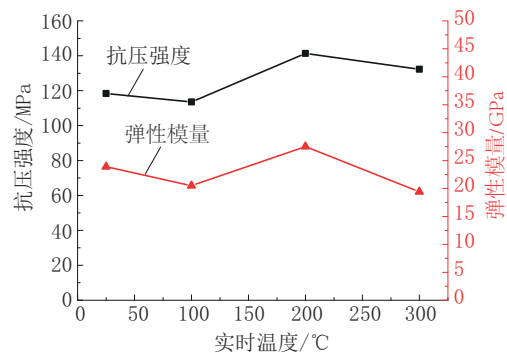


图 11 花岗岩试样实时温度-抗压强度曲线和弹性模量曲线

Fig.11 Curves of real-time temperature-compressive strength and elasticity modulus of the granite samples

结合表 3 和图 11 可看出,200 °C 内花岗岩试样的单轴抗压强度随温度的升高稍微上升,此时实时温度对试样表现出强化作用,这是由于高温作用时

试样内部体积膨胀,受压面增大引起晶间接触密实导致强度增加,这与抗剪强度演化规律一致;但随着温度的升高,弹性模量的变化没有明显的规律。当温度达到300℃时,试样的强度稍微减小,实时温度对试样开始表现出劣化作用,这是由于内部颗粒的不均匀膨胀和热裂纹的扩展导致强度和弹性模量的下降^[19-20]。

5 结论

以往的研究表明,岩石的可钻性与岩石力学参数存在密切的关系,由于我国目前勘探开发的干热岩资源大部分为高热流花岗岩型干热岩资源,通过对花岗岩岩心在300℃以内的试验结果可见:

(1)随着钻井深度的增加,储层岩体温度逐渐升高,在200℃以内,花岗岩的抗剪强度和单轴抗压强度升高、抗拉强度降低;随着温度的进一步升高,花岗岩的单轴抗压强度和抗剪强度降低,而抗拉强度持续降低。这表明,在干热岩储层的温度条件下,相比于常温环境,尽管花岗岩的抗拉强度出现了一定的劣化,但是单轴抗压强度和剪切强度都出现了升高,并且拉伸、压缩和剪切应力路径下破坏已经表现出了一定韧性,不再是单纯的脆性破坏,这是由于温度升高,强结合水和结晶水的逸出,矿物颗粒间的润滑作用下降,颗粒间的摩擦力增大,导致岩石的脆性减弱,塑性增强(从侧面也说明高温将导致储层高温岩体的蠕变性增强)。

(2)储层岩体温度和应力的升高,将使岩石的硬度增加、塑性增强。在干热岩勘探钻井过程中,随着钻井深度的加深和井底温度的增高,岩石硬度逐渐增大、塑性逐步增强,岩石可钻性越来越差,研磨性越来越强,钻头的钻齿每次与岩石的碎岩作用所破碎岩石的体积也越来越小,引起钻进速度下降、钻效降低。

(3)通过模拟测试干热岩储层岩体的物理力学特征和分析其特性,对指导干热岩工程碎岩机具的选型、钻井工艺的选择、井壁稳定的控制等具有重要的指导意义。

参考文献(References):

[1] 陆川,王贵玲.干热岩研究现状与展望[J].科技导报,2015,33(19):13-21.
LU Chuan, WANG Guiling. Current status and prospect of hot

dry rock research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):13-21.

[2] 谭现锋,王景广,郭新强,等.螺杆钻进工艺在青海共和干热岩GR1钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):49-53.
TAN Xianfeng, WANG Jingguang, GUO Xinqiang, et al. Application of PDM drilling technology in Well GR1 drilling in hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):49-53.

[3] 谭现锋,马哲民,段隆臣,等.复合动力钻进工艺在干热岩钻井中的应用研究[J].钻探工程,2021,48(7):1-8.
TAN Xianfeng, MA Zhemin, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):1-8.

[4] 谭现锋,王景广,赵长亮,等.涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用[J].水文地质工程地质,2021,48(1):195-202.
TAN Xianfeng, WANG Jingguang, ZHAO Changliang, et al. A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1):195-202.

[5] 马哲民,谭现锋,郝俊杰,等.多种测温方法在青海共和干热岩GR1井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):42-48.
MA Zhemin, TAN Xianfeng, HAO Junjie, et al. Application of various temperature measurement methods in Well GR1 in Qinghai Gonghe hot dry rock[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(12):42-48.

[6] 谭现锋,刘肖,王贵玲,等.利津干热岩型地热资源调查评价关键技术研究[J].地质学报,2020,94(7):2166-2176.
TAN Xianfeng, LIU Xiao, WANG Guiling, et al. Research on the key technology for the investigation and evaluation of the hot dry rock geothermal resources in Lijin[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7):2166-2176.

[7] 许天福,张延军,曾昭发,等.增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J].科技导报,2012,30(32):42-45.
XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32):42-45.

[8] 马啸,马东东,胡大伟,等.实时高温真三轴试验系统的研制与应用[J].岩石力学与工程学报,2019,38(8):1605-1614.
MA Xiao, MA Dongdong, HU Dawei, et al. A real-time high-temperature true triaxial test system and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8):1605-1614.

[9] 朱合华,闫治国,邓涛,等.3种岩石高温后力学性质的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006(10):1945-1950.
ZHU Hehua, YAN Zhiguo, DENG Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, geantie and breccia after high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(10):1945-1950.

[10] 刘石,许金余,刘志群,等.温度对岩石强度及损伤特性的影响

- 研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4):583-588.
- LIU Shi, XU Jinyu, LIU Zhiqun, et al. Temperature effect on strength and damage property of rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4):583-588.
- [11] 孟召平, 李明生, 陆鹏庆, 等. 深部温度、压力条件及其对砂岩力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(6):1177-1181.
- MENG Zhaoping, LI Mingsheng, LU Pengqing, et al. Temperature and pressure under deep conditions and their influences on mechanical properties of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(6):1177-1181.
- [12] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9):1807-1817.
- QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9):1807-1817.
- [13] 杜守继, 刘华, 职洪涛, 等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(14):2359-2364.
- DU Shouji, LIU Ha, ZHI Hongtao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(14):2359-2364.
- [14] SL/T 264—2020, 水利水电工程岩石试验规程[S].
- SL/T 264—2020, Code for rock tests in water and hydropower projects[S].
- [15] 许腾, 任思玉, 樊成, 等. 基于变参数的含水岩石弱化流变模型研究[J]. 中国科技论文, 2018, 13(1):70-77.
- XU Teng, REN Siyu, FAN Cheng, et al. The rheological model of rocks with water weakening effect based on variable parameters[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(1):70-77.
- [16] GB/T 23561.11—2010, 煤和岩石物理力学性质测定方法第11部分:煤和岩石抗剪强度测定方法[S].
- GB/T 23561.11—2010, Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock—Part 11: Methods for determining shear strength of coal and rock[S].
- [17] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩应力脆性跌落系数的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(5):589-597.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Experimental study of brittle stress drop coefficient of granite endured high temperature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(5):589-597.
- [18] 徐小丽, 高峰, 张志镇. 高温作用下花岗岩的脆延性转化温度点[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1):43-48.
- XU Xiaoli, GAO Feng, ZHANG Zhizhen. Temperature of brittle-ductile transition of granite under high temperature[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1):43-48.
- [19] Shengqi Yang, P.G. Ranjith, Hongwen Jing, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, 65:180-197.
- [20] 徐小丽, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008(3):402-406.
- XU Xiaoli, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Effect of high temperatures on the mechanical characteristics and crystal structure of granite[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008(3):402-406.
- [21] 徐小丽, 高峰, 张志镇, 等. 实时高温下加载速率对花岗岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8):2184-2192.
- XU Xiaoli, GAO Feng, ZHANG Zhizhen, et al. Experimental study of the effect of loading rates on mechanical properties of granite at real-time high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8):2184-2192.
- [22] Yifei Ma, Haiying Huang. DEM analysis of failure mechanisms in the intact Brazilian test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 102:109-119.
- [23] 张帆, 胡维, 郭翰群, 等. 热处理后花岗岩纳米压痕试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1):235-243.
- ZHANG Fan, HU Wei, GUO Hanqun, et al. Nanoindentation tests on granite after heat treatment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1):235-243.
- [24] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2):245-255.
- HUANG Da, HUANG Runqiu, ZHANG Yongxing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2):245-255.

(编辑 王文)