

文章编号:1007-9432(2020)05-0627-07

高温三轴应力下粗、细粒花岗岩力学特性研究

阴伟涛,赵阳升,冯子军

(太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室,太原 030024)

摘 要:干热岩地热真正开发的是深层的干热岩地热,由于成岩环境的不同,深层花岗岩的矿物组成及细观结构与浅层花岗岩有较大差异。为揭示真正深层花岗岩特性用以指导干热岩地热开发,文章对中国山西芦芽山花岗岩(粗粒花岗岩)及中国山东鲁灰花岗岩(细粒花岗岩)高温(100~400℃)三轴应力下的热、力学特性差异进行了研究。试验得出,粗粒花岗岩热膨胀系数随温度的升高呈线性增加趋势,其热膨胀系数平均为细粒花岗岩的 1.52 倍,且在 400℃ 时二者差值最大。粗粒花岗岩弹性模量随温度的升高呈先增后减的趋势,其随温度变化的阈值温度为 300℃。此外,细粒花岗岩弹性模量为粗粒花岗岩的 1.4~2.6 倍,且差异会随着温度及围压的升高而增大。经显微观测可知,粗粒花岗岩含有的大量原生裂隙及其极端的非均质性导致了粗粒花岗岩更大的热应变以及更加劣化的力学性质,进而使得粗粒花岗岩在高温高压条件下拥有更高的渗透性。这为干热岩地热开发过程中高效率、低成本以及大范围地建造人工储留层提供了良好的地质基础。

关键词:粗、细颗粒;花岗岩;高温三轴应力;力学特性;干热岩地热开发

中图分类号:O343.6 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2020.05.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Study on the Mechanical Properties of Coarse-grained and Fine-grained Granite Under High Temperature Triaxial Stress

YIN Weitao, ZHAO Yangsheng, FENG Zijun

(Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The real development of hot dry rock (HDR) geothermal is deep HDR geothermal. Because of different diagenesis environments, the mineral composition and micro-structure of deep granite are quite different from those of shallow granite. To reveal the real characteristics of deep granite and guide HDR geothermal development, the difference of thermal and mechanical properties between the granite in Luya Mountain, Shanxi Province, China (coarse-grained granite) and the granite in Shandong Province, China (fine-grained granite) under triaxial stress at high temperature (100-400℃) was studied. The results show that the thermal expansion coefficient of coarse-grained granite increases linearly with the increase of temperature, and the thermal expansion coefficient of coarse-grained granite is 1.52 times that of fine-grained granite on average, and the difference between them reaches the maximum at 400℃. The elastic modulus of coarse-grained granite increases first and then decreases with the increase of temperature, and its threshold temperature varying with temperature is 300℃. The elastic modulus of fine-grained

收稿日期:2020-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1810104, 11772213);山西省回国留学人员科研教研资助项目(HGKY2019018)

通讯作者:冯子军(1983-),男,博士,副教授,主要从事岩石力学等研究,(E-mail)fzj3893811@126.com

引文格式:阴伟涛,赵阳升,冯子军.高温三轴应力下粗、细粒花岗岩力学特性研究[J].太原理工大学学报,2020,51(5):627-633.

granite is 1.4~2.6 times that of coarse-grained granite, and the difference increases with the increase of temperature and confining pressure. Micro-observation shows that the large number of preexisting fractures and extreme heterogeneity in coarse-grained granite lead to larger thermal deformation and more deteriorated mechanical properties of coarse-grained granite, and further make coarse-grained granite has higher permeability under high temperature and high pressure. This provides a good geological foundation for high efficiency, low cost and large-scale construction of artificial reservoirs in the process of HDR geothermal development.

Keywords: coarse and fine grain; granite; high temperature and triaxial stress; mechanical properties; HDR geothermal development

地热资源作为可持续发展的绿色能源,其逐步开发利用对全球增加能源储备,改变现有能源格局以及解决环境污染等方面有着重要的战略意义。据世界能源评估(WEA)统计,全球每年可利用地热能约为 6×10^5 EJ,考虑到目前全球年能源消耗量约为 570 EJ,地热能实际上可以被看作是一种无限的能源资源。干热岩(温度高于 $200\text{ }^\circ\text{C}$,主要赋存于地表 5 km 以下的花岗岩体)作为其中优质的、暂未开发的地热资源,在世界范围内储量巨大。例如,初步计算仅中国云南腾冲和西藏羊八井两地可开发的资源量就超过了 1.56×10^{11} kW/a^[1],美国地热资源总量的 90% 以上都储存在干热岩体中。因此干热岩的开发利用便显得尤为重要。在干热岩地热开采过程中,岩体的热膨胀变形以及压缩变形随时都会发生,这样就影响了地热开采。例如,岩体热膨胀变形会直接影响钻孔施工以及钻孔围岩稳定性,岩体高温高压条件下的压缩特性也会在水力压裂建造储留层以及储层检测过程中产生很大影响。因此研究高温高压下岩体热力学特性对干热岩开采十分必要。

自 20 世纪 70 年代以来,国内外学者已针对世界范围内的花岗岩体进行了大量的物理力学特性研究并得出许多有价值的结论。例如花岗岩的热扩散率^[2]、粘结强度与内摩擦角^[3]、弹性模量^[4-5]、抗压强度^[4,6]、抗拉强度^[7-8]和泊松比^[9]等会随着温度的升高而减小,并且在三轴应力条件下,弹性模量的速率随着围压的升高而减小^[10],抗压强度会随着围压的升高而增加^[11]。而花岗岩的比热^[12]、热膨胀系数^[13]等会随着温度的升高而增加。为了进一步探讨高温作用对花岗岩热力学性质的影响机理, YANG et al^[14]使用 CT 观测,声发射(AE)检测系统细观研究了花岗岩热损伤及力学性质失效的关系。LIU et al^[15]发现 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 为花岗岩的脆-韧性转变临界温度。GAUTAM et al^[16]得出 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 是 Jalore 花岗岩热物理性质损伤的阈值温度。ZHAO

et al^[17-19]利用自主研发的“20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机”实时测量了花岗岩在高温三轴应力条件下的热力学性质、渗透率并讨论了钻孔稳定性失稳的临界条件。

由上述研究可知,高温作用对花岗岩体的热力学性质有重要影响,因为高温作用会导致岩体产生热破裂,而花岗岩体的矿物组成及细观结构会直接影响热破裂剧烈程度并进一步影响高温下花岗岩的热力学表现。上述研究的花岗岩试样大多是直接从地表或浅层地下采集的低温环境成岩的细粒花岗岩(例如 Westerly 花岗岩^[2-3,7-8], Climax 花岗岩^[7,13], Charcoal 花岗岩^[3], Luhui 花岗岩^[14,17-19], Qinling 花岗岩^[15]和 Jalore 花岗岩^[16])且多为高温处理后的试样。然而干热岩地热多赋存于地表 5 km 以下,在深入研究天然花岗岩体的特征后发现,该深度的深层花岗岩在矿物成分、晶体颗粒尺寸及其细观结构等方面与浅层花岗岩有很大不同^[20]。这便会导致高温作用下深层花岗岩与浅层花岗岩的热力学性质产生不同,同时也导致上述浅层花岗岩特性的研究结果很难代表真实的干热岩特性。因此,研究真正深层的花岗岩的热膨胀特性和固体力学特性对干热岩地热开发尤为重要。为了研究颗粒尺寸对花岗岩性质的影响并揭示深层花岗岩体高温高压下的特性来更加准确地指导干热岩地热开采,本文对高温三轴应力下浅层细粒花岗岩与深层粗粒花岗岩的热、力学特性进行了研究。

1 试验设备及方法

1.1 试验试样

1) 细粒花岗岩:细粒花岗岩取自中国山东平邑浅层地表,商品名“鲁灰花岗岩”^[14,17-19]。细粒花岗岩整体呈灰白色、致密无裂纹,其主要矿物组分为长石、石英,晶体颗粒尺寸最大在 1.5 mm 左右,常温无裂隙^[14]。

2) 粗粒花岗岩:粗粒花岗岩取自中国山西芦芽山,该区花岗岩为 19 亿年前在地表 10 km 以下缓慢冷凝固晶成岩,后被地质运动推置到地面的。该区花岗岩的性态真正代表了深层花岗岩体的特征,是深层花岗岩性态研究难得的样品采集区^[20]。粗粒花岗岩整体呈暗灰色,晶体颗粒粗大。经显微观测可知,其主要矿物组分为角闪石、斜长石等,晶体颗粒尺寸最大可达 8 mm,且在常温下有明显原生裂隙。

两类粗、细粒花岗岩具体矿物组成及其性质见表 1^[21-23]。

表 1 粗、细粒花岗岩矿物组成及性质
Table 1 Mineral composition and properties of coarse-grained and fine-grained granite

花岗岩类型	矿物组成	颗粒平均尺寸/mm	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	弹性模量/GPa
粗粒花岗岩	角闪石	8.4	8	—
	斜长石	6.3	4	70
	云母	1.9	3	—
	石英	0.7	11	117
细粒花岗岩	长石	1.5	7	89
	石英	0.7	11	117

两类花岗岩通过取芯、车削加工成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱体,见图 1。



(a) 细粒花岗岩 (b) 粗粒花岗岩

图 1 粗、细粒花岗岩试样

Fig. 1 Samples of coarse-grained and fine-grained granite

1.2 试验设备及方法

粗、细粒花岗岩的热膨胀特性和固体力学特性试验皆是在太原理工大学自主研制的 $600 \text{ } ^\circ\text{C}$ 高温高压岩体三轴试验机上进行,见图 2。试验机主要包括压力框架、加热系统、高温三轴应力室、压力控制系统、温度控制系统、测试系统等,可进行高温(最高温度 $600 \text{ } ^\circ\text{C}$)高压(最大围压 60 MPa)条件下岩体三轴压缩试验。

试验具体过程为:测量粗、细粒花岗岩试样尺寸后装入三轴压力试验机,先后施加轴压(σ_a)及围

压(σ_c)至 4 MPa ,随后升温至预定目标温度值($100 \text{ } ^\circ\text{C}$, $150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $200 \text{ } ^\circ\text{C}$, $250 \text{ } ^\circ\text{C}$, $300 \text{ } ^\circ\text{C}$, $350 \text{ } ^\circ\text{C}$ 及 $400 \text{ } ^\circ\text{C}$)并保温 2 h ,升温速率 $20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{h}$ 。保温完成后,保持围压不变,增加轴压至 30 MPa ,测定不同温度下花岗岩弹性模量,轴压增量 2 MPa 。此外,在升温过程中,通过两个光栅外尺连续自动测定轴压头位移,进而得到不同温度下花岗岩热变形及热膨胀系数。



图 2 高温高压岩体力学试验机

Fig. 2 HTHP rock mechanics triaxial testing machine

2 粗、细粒花岗岩热应变特征与热膨胀系数变化规律研究

岩体热膨胀变形会直接影响地热开采活动,因此本文研究了高温高压下粗、细粒花岗岩应变特征以指导地热开采。

试样施加初始轴压及围压各 4 MPa 并保持不变,随后对花岗岩试样进行升温。升温过程中通过固定于轴压压头的两个光栅外尺实时精确记录轴压头位移,以此得到试样轴向热应变,结果如图 3 所示(轴向热应变为负值表示轴向膨胀变形)。随后按公式(1)计算得到不同温度下的试样热膨胀系数:

$$\alpha = (S_{t_2} - S_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: α 为试样热膨胀系数, S_{t_1} 、 S_{t_2} 分别是温度为 t_1 、 t_2 时试样的轴向热应变。粗、细粒花岗岩热膨胀系数随温度的变化规律见图 4。

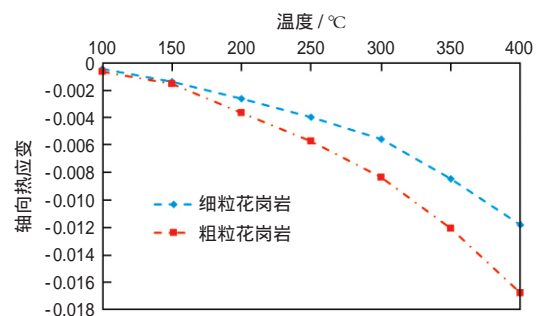


图 3 粗、细粒花岗岩轴向热应变随温度变化曲线

Fig. 3 Axial thermal strain of coarse-grained and fine-grained granite versus temperature

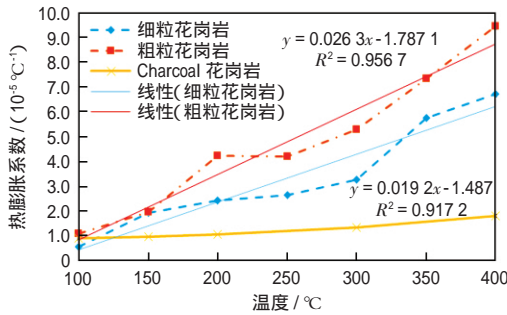


图 4 粗、细颗粒花岗岩热膨胀系数随温度变化曲线

Fig. 4 Thermal expansion coefficient of coarse-grained and fine-grained granite versus temperature

由图 3、图 4 可知：

1) 温度为 100~400 °C 时,粗粒花岗岩热膨胀系数随温度的升高呈线性增加趋势。该试验条件下,其热膨胀系数由 100 °C 的 $1.09 \times 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$ 升至 400 °C 的 $9.44 \times 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$,增加了近 8 倍。表现在热应变曲线上即粗粒花岗岩轴向热应变随温度的升高而增加,且增加速率越来越大。

2) 两类粗、细颗粒花岗岩轴向热应变及热膨胀系数随温度变化的趋势相同,但相同温度下粗粒花岗岩轴向热应变与热膨胀系数皆大于细粒花岗岩轴向热应变与热膨胀系数。温度在 100~400 °C 范围内,粗粒花岗岩轴向热应变与热膨胀系数分别为细粒花岗岩轴向热应变与热膨胀系数的 1.07~1.50 倍以及 1.03~1.95 倍。

与 BAUER^[3] 得出的高温三轴应力下细粒花岗岩热应变结果对比分析可知(Charcoal 花岗岩是以长石、石英为主要矿物组分的中细颗粒花岗岩^[24],其特性可代表浅层细粒花岗岩)：

1) 本文研究得出温度为 100~400 °C 时,粗、细颗粒花岗岩热膨胀系数随温度的升高呈线性增加趋势。BAUER 得出 Charcoal 花岗岩热膨胀系数在 100~400 °C 温度段也大致呈线性增加,变化规律大体一致。由此可知,在 100~400 °C 温度区间内,高温三轴应力下粗、细颗粒花岗岩热膨胀系数变化规律相近,即随温度的升高而整体增加,该规律与花岗岩体颗粒大小无关,但花岗岩晶体颗粒越大,其热膨胀系数增加速率越大。

2) 该试验条件下,粗粒花岗岩在相同温度下的热膨胀系数皆大于细粒花岗岩。温度从 100 °C 升至 400 °C,粗粒花岗岩热膨胀系数为细粒花岗岩热膨胀系数的 1.03~1.95 倍,为 Charcoal 花岗岩热膨胀系数的 1.19~5.23 倍。造成该差异的原因可能是粗粒花岗岩矿物组分、颗粒大小及细观结构与细粒花岗岩不同,从而使高温作用对于粗粒花岗岩的

影响明显强于细粒花岗岩。即随着温度的升高,粗粒花岗岩内部矿物晶体颗粒热膨胀现象更加明显,导致其热膨胀系数也更大。

3) BAUER 得出在 $\sigma_c = 27.6 \text{ MPa}$ 条件下,Charcoal 花岗岩热膨胀系数为 $(0.91 \sim 1.80) \times 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$,同本文细粒花岗岩相比最大相差 4 倍,由此可见热膨胀系数对于围压具有依赖性。围压水平越低,花岗岩内部晶体颗粒受到高温作用产生的热膨胀现象越明显,热膨胀系数越大;而围压水平越高,花岗岩内部晶体颗粒受到高温作用产生的热膨胀现象越受限,热膨胀系数越小。

3 粗、细粒花岗岩弹性模量变化规律研究

弹性模量是岩体变形过程中重要的力学参数,弹性模量的大小直接反映了岩体抵抗变形的能力,微观上也体现了岩体的晶体结构。因此研究高温高压下粗粒花岗岩弹性模量对深层干热岩开采过程中的储留层建造有重要的指导意义。

通常,弹性模量可以通过拟合应力-应变曲线中峰值应力之前近似的直线段来计算,所得到的弹性模量即为平均弹性模量^[25]。本文中的弹性模量是指应力值为 10%~30% 岩体单轴抗压强度范围内应力-应变曲线对应的斜率。不同温度下粗、细颗粒花岗岩平均弹性模量变化规律见图 5。

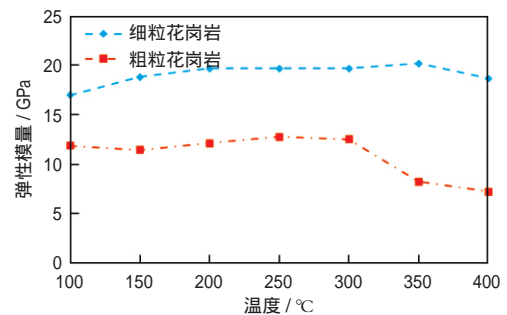


图 5 粗、细颗粒花岗岩弹性模量随温度变化图

Fig. 5 Elastic modulus of coarse-grained and fine-grained granite versus temperature

由图 5 可知：

1) 温度为 100~400 °C 时,粗粒花岗岩弹性模量随温度升高可分为两个阶段:第一阶段是在 100~300 °C 的低温段,粗粒花岗岩弹性模量随着温度的升高而缓慢增加。该阶段粗粒花岗岩弹性模量由 100 °C 的 11.9 GPa 增加到 300 °C 的 12.5 GPa。第二阶段是在 300~400 °C 的高温段,粗粒花岗岩弹性模量随着温度的升高而快速下降。该阶段粗粒花岗岩弹性模量由 300 °C 的 12.5 GPa 迅速降至 400 °C 的 7.2 GPa,平均降幅为 0.053 GPa/°C。

2) 温度为 100~400 °C 时,粗、细颗粒花岗岩弹性模量的变化规律相似,但具体的温度区间不同。细粒花岗岩弹性模量在 100~350 °C 中低温段随着温度的升高而缓慢增加,在 350~400 °C 中高温段随着温度的升高而开始下降。此外在相同温度下粗粒花岗岩的弹性模量始终小于细粒花岗岩的弹性模量。在 100~400 °C 区间内,细粒花岗岩弹性模量为粗粒花岗岩弹性模量的 1.4~2.6 倍,而且温度越高,两者相差越大。

3) 温度为 100~400 °C 时,粗、细颗粒花岗岩弹性模量随温度升高的过程可分为两阶段。第一阶段由于温度较低,随着温度的升高花岗岩内部晶体颗粒逐渐膨胀,致使部分原生裂隙闭合,裂缝数量减少,密实程度提高,导致其抗变形能力提高,因此该阶段花岗岩弹性模量随着温度的升高而增加。在第二阶段,随着温度的进一步升高,具有不同热膨胀率的晶体颗粒进一步膨胀,由此产生的热应力高于晶体间的承载强度,花岗岩产生微裂隙,致使其力学性质发生劣化,弹性模量开始降低。

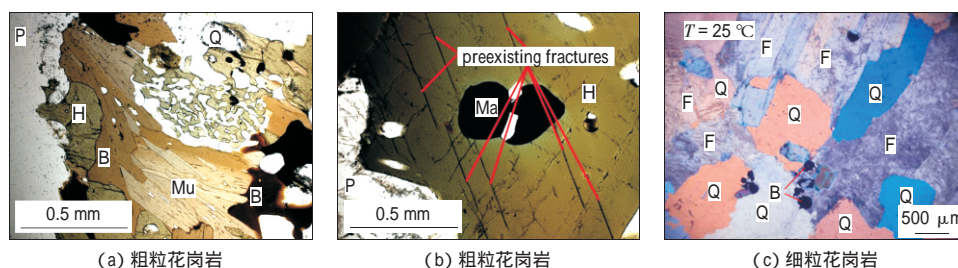
4) 花岗岩弹性模量随温度的变化是存在临界温度的,当温度低于临界温度时,花岗岩弹性模量随

着温度的升高而升高;温度高于临界温度时,花岗岩弹性模量随着温度的升高开始减小。本文得出,粗粒花岗岩弹性模量随温度变化的临界温度是 300 °C 左右,细粒花岗岩弹性模量随温度变化的临界温度是 350 °C 左右。此外,相同温度下粗粒花岗岩的弹性模量皆小于细粒花岗岩的弹性模量。其原因可能是粗、细颗粒花岗岩矿物组分与晶体颗粒尺寸的不同,导致高温作用对粗粒花岗岩影响更大,因此温度越高,粗粒花岗岩热破裂程度越剧烈,力学性质劣化越严重。

4 分析与讨论

4.1 粗粒花岗岩细观结构显微观测

为研究粗粒花岗岩矿物成分及其细观结构,本文进行了粗粒花岗岩显微切片观测。首先将粗粒花岗岩钻取、切割、磨制、加工成标准观测薄片,随后采用太原理工大学煤科学与技术重点实验室 DMRX 型徕卡偏光显微镜进行岩石微结构显微观测,同时拍照,见图 6。通过显微观测分析,粗粒花岗岩矿物组成及其性质见表 1。



(H-角闪石;P-斜长石;Mu-白云母;B-黑云母;Ma-磁铁矿;Q-石英;F-长石)

图 6 花岗岩细观显微观测图

Fig. 6 Micro-observation image of granite

深入分析粗粒花岗岩细观结构显微观测结果以及对比 YANG et al^[14] 细粒花岗岩显微观测结果可知:

1) 室温条件下,相较于细粒花岗岩致密无裂隙的细观结构,粗粒花岗岩晶体颗粒本身已经含有大量原生裂隙(如图 6(b)中角闪石、斜长石内的裂隙),该结构特性很大程度上会导致粗粒花岗岩力学性质的劣化。

2) 由图 6 及表 1 可知,相较于细粒花岗岩,粗粒花岗岩也是由多种矿物组成,而且其矿物组分更加复杂。这表明粗粒花岗岩是由多种矿物结晶形成的非均质岩体,并且其非均质性是要明显强于细粒花岗岩。

3) 由表 1 可知,粗粒花岗岩中的主要矿物组分

角闪石、斜长石等晶体颗粒平均尺寸明显大于细粒花岗岩中的主要矿物长石、石英等晶体颗粒平均尺寸,其中最大相差 12 倍。这使得粗粒花岗岩体整体晶体颗粒尺寸明显大于细粒花岗岩。

对于非均质岩体来说,由于各种矿物组分及其胶结物具有完全不同的热膨胀率和热弹性性质,因此只要温度发生变化岩体内部便会产生热应力。当热应力超过晶体间的承载强度时,便会发生热破裂。热力作用下,不同矿物晶体与胶结物都要产生热应力,而且晶粒交界处热应力最高,矿物晶粒交界处的胶结物强度和熔点也最低,因此岩石的热破裂首先从晶粒交界处的胶结物开始^[19]。由上述对比结果分析可知,相较于细粒花岗岩,粗粒花岗岩体所含矿物组分种类更多、晶体颗粒更大,这使得不同种类矿

物颗粒间的交界面面积更大,也使粗粒花岗岩具有了极端的非均质性。因此当温度升高时,粗粒花岗岩一方面会产生更高的热应力(由表 1 及式(2)可知,粗粒花岗岩中斜长石与石英交界面产生的热应力大于细粒花岗岩中石英与长石交界面产生的热应力);另一方面使高热应力存在的范围更大,再加上其晶体本身便含有大量原生微裂隙,故粗粒花岗岩在高温作用下原生裂隙的扩展及贯通,次生裂隙的起裂、扩展及贯通变得更加容易,最终造成了高温三轴应力下粗粒花岗岩与细粒花岗岩在热、力学特性上的差异。

4.2 粗粒花岗岩热、力学特性意义分析

首先,开发 400 °C 以上的深层干热岩地热才会获得更大的经济效益,而此深度的花岗岩结构特征与浅层花岗岩结构特征有很大区别,因此必须研究粗粒花岗岩的热膨胀特性和固体力学特性。本文研究的粗粒花岗岩正是取自地壳深部高温结晶形成的花岗岩体,其热、力学特性能反映真正的干热岩体特性。

此外,在干热岩地热开采过程中,如何低成本、大范围、高效率地建造人工储留层往往成为地热开采项目成败的关键,这也是众多学者努力研究的方向。下面通过一个简单力学模型来分析地热开采过程中水力压裂建造储留层的热破裂情况,如图 7 所示。

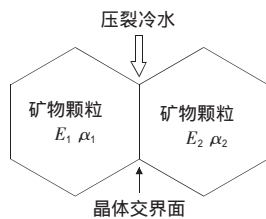


图 7 水力压裂过程热破裂力学模型

Fig. 7 Thermal cracking mechanical model of hydraulic fracturing process

假设 $E_1, \alpha_1, E_2, \alpha_2$ 分别为两相邻矿物颗粒 I、II 的弹性模量及热膨胀系数, ΔT 为温度差,则晶体交界面处的热应力 $\sigma_{\Delta T}$ 为^[26]:

$$\sigma_{\Delta T} = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T E_1 E_2 / (E_1 + E_2). \quad (2)$$

水力压裂建造储留层过程中,冷水注入干热岩体便会产生温度差,并产生热应力,当热应力 $\sigma_{\Delta T}$ 大于晶体交界面结合力 σ_b 时,便会产生热破裂现象。由上式分析可知,相邻两矿物颗粒交界面处的热应力主要受矿物热膨胀系数与弹性模量的影响。

因此,粗粒花岗岩热膨胀系数在 400 °C 时为细粒花岗岩热膨胀系数的 1.4 倍以上,粗、细颗粒花岗

岩弹性模量相差可达 260%,并且差距会随着温度及围压的升高而进一步增大^[3,27]。这正是由于粗粒花岗岩极端的非均质性(即 $(\alpha_1 - \alpha_2)$ 值更大)而产生更加剧烈的热破裂。与此同时,粗粒花岗岩含有大量原生裂隙并且不同矿物晶体颗粒交界面面积更大(见图 6),因此水力压裂过程中粗粒花岗岩理论上更易形成大范围的裂隙网。在水力压裂过程中,热破裂现象会随着水热交换一直持续,因此储留层规模及其内部裂隙网络也会进一步发育,其渗透能力也得到进一步提高^[19,28]。因此,粗粒花岗岩的存在会大大降低干热岩地热开采过程中储留层建造的施工难度,增加储留层面积并节约施工成本,为干热岩地热开采大范围应用提供了良好的地质基础。

5 结论

干热岩地热真正开发的是深层的干热岩地热,由于成岩环境的不同,深层花岗岩的矿物组成及微观结构与浅层花岗岩有较大差异。本文通过进行高温(100~400 °C)三轴应力条件下中国山西芦芽山深层粗粒花岗岩与中国山东平邑浅层细粒花岗岩热、力学特性的对比研究初步揭示了深层干热岩体特征,并得出以下结论:

1) 由于深层成岩,粗粒花岗岩含有大量原生裂隙,而且其矿物组分更加复杂,晶体颗粒尺寸更大,不同矿物交界面面积更大。

2) 粗粒花岗岩热膨胀系数随温度的升高呈线性增加趋势,由于粗粒花岗岩具有更大的颗粒尺寸及极端的非均质性,粗粒花岗岩热膨胀系数及其增加速率更大。因此得出粗粒花岗岩热膨胀系数平均为细粒花岗岩的 1.52 倍,且在 400 °C 时二者差值最大。

3) 粗粒花岗岩弹性模量随温度变化的临界温度为 300 °C。温度低于临界温度时,弹性模量随着温度的升高而缓慢增加;温度高于临界温度时,弹性模量随着温度的升高而快速下降。因此,细粒花岗岩弹性模量为粗粒花岗岩的 1.4~2.6 倍,并且差异会随着温度及围压的升高而增加。

4) 深层粗粒花岗岩特有的矿物组成及微观结构导致其在高温高压条件下具有更大的热变形以及更加劣化的力学性质,这使得粗粒花岗岩在水力压裂过程中拥有更高的渗透性。这为干热岩地热开发过程中高效率、低成本以及大范围的建造人工储留层提供了良好的地质基础,使得大范围开采干热岩地热成为可能。

参考文献:

- [1] 赵阳升,万志军,康建荣.高温岩体地热开发导论[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] HANLEY E J,DEWITT D P,ROY R F. The thermal diffusivity of eight well characterised rocks for the temperature range 300-1000 K[J]. Eng Geol,1978,12:31-47.
- [3] BAUER S J,JOHNSON B. Effects of slow uniform heating on the Westerly and charcoal granites[C]//Proceedings of the 20th Symposium on Rock Mechanics. Austin,TX,New York,1979:7-18.
- [4] HOMAND H,HOUPERT R. Thermally induced micro-cracking in granites: characterization and analysis[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,1989,26:125-34.
- [5] HEUZE F E. High-temperature mechanical,physical and thermal properties of granitic rocks—a review[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,1983,20:3-10.
- [6] GAUTAM P K,VERMA A K,JHA M K,et al. Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite[J]. Journal of Applied Geophysics,2018:460-474.
- [7] HEARD H C. Thermal expansion and inferred permeability of climax quartz monazite to 300 °C and 27.6 MPa[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,1980,17:289-296.
- [8] TULLIS J,YUND R A. Experimental deformation of dry Westerly granite[J]. J Geophys Res,1977,82:5705-5718.
- [9] CLARK J R S P. Handbook of physical constants[M]. New York:Geological Society of America,1966.
- [10] 徐小丽,高峰,张志镇.高温作用后花岗岩三轴压缩试验研究[J].岩土力学,2014,35(11):3177-3183.
XU X L,GAO F,ZHANG Z Z. Research on triaxial compression test of granite after high temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(11):3177-3183.
- [11] 徐小丽,高峰,张志镇.高温后围压对花岗岩变形和强度特性的影响[J].岩土工程学报,2014,36(12):2246-2252.
XU X L,GAO F,ZHANG Z Z. Influence of confining pressure on deformation and strength properties of granite after high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(12):2246-2252.
- [12] 康健,赵明鹏,赵阳升.高温下花岗岩热物理特性数值试验研究[J].太原理工大学学报,2004,35(4):396-399.
KANG J,ZHAO M P,ZHAO Y S. Numerical experimental study on thermophysical properties of granite at high temperature[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2004,35(4):396-399.
- [13] 邵保平,赵阳升.高温高压下花岗岩中钻孔围岩的热物理及力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(6):1245-1253.
XI B P,ZHAO Y S. Experimental study of thermophysical-mechanical property of drilling surrounding rock in granite under high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(6):1245-1253.
- [14] YANG S Q,RANJITH P G,JING H W,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.
- [15] LIU S,XU J Y. An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks[J]. Engineering Geology,2015,185:63-70.
- [16] GAUTAM P K,VERMA A K,SHARMA P,et al. Evolution of thermal damage threshold of Jalore Granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2018,51(9):2949-2956.
- [17] ZHAO Y S,WAN Z J,FENG Z J,et al. Triaxial compression system for rock testing under high temperature and high pressure[J]. Int J Rock Mech Min Sci,2012,52:132-138.
- [18] ZHAO Y S,FENG Z J,XI B P,et al. Deformation and instability failure of borehole at high temperature and high pressure in Hot Dry Rock exploitation[J]. Renew Energy,2015,77:159-165.
- [19] ZHAO Y S,FENG Z J,ZHAO Y,et al. Experimental investigation on thermal cracking,permeability under HTHP and application for geothermal mining of HDR[J]. Energy,2017,132:305-314.
- [20] YIN W T,ZHAO Y S,FENG Z J. Experimental research on the rupture characteristics of fractures subsequently filled by magma and hydrothermal fluid in hot dry rock[J]. Renew Energy,2019,139:71-79.
- [21] WANG H F,BONNER B P,CARLSON S R,et al. Thermal stress cracking in granite[J]. J Geophys Res,1989,94(B2):1745-1758.
- [22] WHITNEY D L,BROZ M,COOK R F. Hardness,toughness,and modulus of some common metamorphic minerals[J]. Am Mineral,2007,92(2/3):281-288.
- [23] ZHOU H,LIU H,HU D,et al. Anisotropies in mechanical behavior,thermal expansion and P-wave velocity of sandstone with bedding planes[J]. Rock Mech Rock Eng,2016,49(11):4497-4504.
- [24] LABUZ J F,SHAH S P,DOWDING C H. Experimental analysis of crack propagation in granite[J]. Int J Rock Mech Min Sci,1985,22(2):85-98.
- [25] 尤明庆,苏承东.岩石的非均质性与杨氏模量的确定方法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):757-761.
YOU M Q,SU C D. Heterogeneity of rock and the definition of Yang's Modulus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(5):757-761.
- [26] 平修二.热应力与热疲劳[M].北京:国防工业出版社,1984.
- [27] 万志军,赵阳升,董付科,等.高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):72-77.
WAN Z J,ZHAO Y S,DONG F K,et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperature and triaxial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(1):72-77.
- [28] CHEN S W,YANG C H,WANG G B. Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite[J]. Applied Thermal Engineering,2017,110:1533-1542.

(编辑:薄小玲)