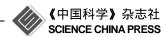
www.scichina.com

tech.scichina.com



高温作用下岩石力学性能的实验研究

张连英^{®②*}, 茅献彪[®], 卢爱红[®]

- ① 徐州工程学院数理学院, 徐州 221111;
- ② 中国矿业大学理学院, 徐州 221116
- * E-mail: zhanglianying@126.com

收稿日期: 2009-04-17; 接受日期: 2009-09-14

国家自然科学基金项目(批准号: 50490273)、国家重点基础研究发展计划("973"计划)(批准号: 2007CB209400)和徐州工程学院校级项目(批准号: XKY2007219)资助

摘要 采用电液伺服材料力学试验系统对常温~800℃高温作用下大理岩、石灰岩、砂岩的力学性能进行了研究. 考察了三种岩石的全应力-应变曲线,给出了其峰值强度、峰值应变、弹性模量 E 随温度的变化特征. 研究结果表明: (1) 大理岩的峰值强度、弹性模量在常温~400℃内呈现起伏变化; 400℃后则呈平缓下降态势. (2) 石灰岩的峰值强度、弹性模量在常温~200℃内,随温度升高呈下降趋势;在 200℃~600℃内变化不大;当 T>600℃后,呈现出急剧下降现象. (3) 砂岩在常温~200℃内,峰值强度呈下降趋势,弹性模量变化不大;在 200℃~600℃内,峰值强度呈上升趋势,弹性模量变化不大;当 T>600℃后,峰值强度、弹性模量均急剧下降. (4) 对于峰值应变,石灰岩在常温~600℃变化不大,当 T>600℃后,峰值应变急剧上升;大理岩、砂岩的峰值应变在常温~200℃之间随着温度升高在降低,当 T>200℃后,峰值应变迅速增长. 研究结果可为相关岩体工程设计与研究提供参考.

处理高温环境下的岩石工程问题是对岩石力学新的挑战.高放射性核废料的地层深埋处置、地热资源开发以及大都市圈的大深度地下空间开发利用等工程所处的地质环境周围岩体均可能经历一定的高温,这就需要考虑岩石在高温作用下的强度及变形特性,其相关力学参数是岩石地下工程开挖、支护设计、围岩稳定性分析的基本依据.

温度对岩石物理力学性质的影响一直是岩石力学领域重要的研究课题. Heuze 和 Lau 等人^[1-3]对一些岩石的变形模量、泊松比、抗拉强度、抗压强度、内聚力、内摩擦角、黏度等参数进行了测定,并讨论了热膨胀系数对温度、侧压的依赖性以及高温下岩石的

蠕变特性. 杜守继和吴刚等人[4-8]分别对经历高温作用后再冷却的花岗岩、大理岩、砂岩的力学性能进行了试验研究, 分析了高温后岩石的应力-应变曲线、峰值应力、峰值应变、弹性模量及泊松比等的变化情况. 朱合华等人[9]通过单轴压缩试验, 对不同高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学性质进行了研究, 分析比较了三种岩石峰值应力、峰值应变及弹性模量随温度的变化规律, 并研究了峰值应力与纵波波速、峰值应变与纵波波速的关系. 以上研究结果仅限于岩石材料施加高温冷却后的力学性能的研究, 事实上, 岩石的热膨胀是不可逆的, 它会受加温历史的影响, 加热到高温再冷却后进行实验, 岩石细

引用格式: Zhang L Y, Mao X B, Lu A H. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(3): 641-646. doi: 10.1007/s11431-009-0063-y

观结构已发生了很大变化,因此其结果难以反映高 温状态时的本质特性.

近几年来, 有学者对实时高温作用下岩石的物 理力学性能进行研究,但在热力(TM)耦合下岩石的 行为异常复杂[10,11],如强度特性、弹性模量与室温相 比都有很大不同. 文献[12]的细观试验研究表明, 平 顶山砂岩的强度随着温度在一定范围内先升高后降 低. 文献[13~16]的研究表明大多数岩石强度随温度 的升高而有所下降, 且下降的趋势与岩石的种类相 关. 以上关于实时高温作用下岩石力学性能的研究 仅局限于温度低于 600℃的情形, 而更高温度下岩石 的力学性能又会如何? 为深入研究高温状态下岩石 的力学特性, 以指导高温岩体地热开发与核废料的 地层深埋处置,本文借助美国MTS810电液伺服材料 试验机和其配套的高温环境炉 MTS652.02, 对大理 岩、石灰岩、砂岩高温状态下的力学性能进行了实验 研究, 探讨了三种岩样在常温~800℃范围内主要力 学性能随温度的变化规律.

1 试验设备及试验方案

1.1 试样采集与制备

本试验所用岩样采自徐州矿区某矿井下岩层.一般地,不同尺寸、形态对岩石材料力学性能参数测定具有明显影响,但考虑到本试验中使用的高温环境炉内腔容积的限制,将本试验的岩样加工成直径为 20.0 mm、高为 45.0 mm 左右的圆柱体.加工时首先用钻筒钻取相同直径的岩样,然后用切割机截取相同高度岩样,最后用磨床将岩样的两个端面磨平,以改善测试结果的离散性.试验分常温 20℃,100℃,200℃,300℃,400℃,500℃,600℃,700℃,800℃下9个温度段,每个温度段加工岩样 5~6 块.

1.2 试验设备及方法

试验采用美国 MTS810 电液伺服材料试验系统和其配套的 MTS652.02 高温环境炉进行,如图 1 所示,整个试验过程由试验系统配套的 Teststar II 系统按照事先要求设定的程序完成.该系统通过计算机对测试过程有一个最优化的控制,利用主窗体的菜单,可分配传感器,定义控制模式、设置边界、让敏感元件自动调零、选取输出信号,且在必要时设置一些参数,该系统软件包括图形用户接口、数据接口、软件功能



图 1 MTS810 电液伺服材料试验系统与 MTS652.02 高温环境炉

发生器、程序设计及系统工具.

试验时,首先将岩样正确放置到高温环境炉MTS652.02 内,然后以 2℃/s 的升温速率将岩样温度升至预定温度,并将岩样恒温2.0 h,以确保岩样受热均匀.采用电液伺服位移控制方式对岩样实施加载,位移加载速率设定为 0.004 mm/s,直至岩样破坏为止.加载过程中利用 TeststarII 控制程序按预定的要求完成实验过程,同时记录下相关物理量的值:轴向载荷、轴向位移、轴向应力及应变等.

2 高温作用下岩石的应力-应变全过程曲线

根据岩样单轴压缩试验得到的轴向荷载、轴向位移数据,进一步分析处理得到3种岩样高温作用下单轴压缩试验的应力-应变全过程曲线,如图 2~4 所示.同时得到岩样的峰值强度 σ_c (单轴抗压强度),峰值应变 ε_c (峰值强度对应的应变).利用应力-应变全过程曲线

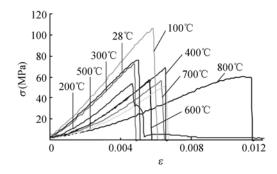


图 2 大理岩单轴压缩应力-应变全过程曲线

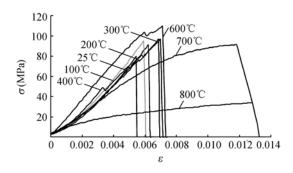


图 3 石灰岩单轴压缩应力-应变全过程曲线

上岩样达到峰值强度前的近似直线段,计算得出岩样的切线弹性模量 E. 表 1 分别给出了三种岩样的峰值强度 σ_c 、峰值应变 ε_c 、弹性模量 E 均值随温度 T 的变化规律.

由图 2~4 可以看到, (1)当 T<600°C时, 三种岩样的应力-应变全过程曲线特征与常温情形基本类似,都呈现有明显初始压密过程、弹性变形和脆性破断. (2)当 T>800°C时, 大理岩除了具有压密阶段和弹性阶段外, 还呈现有明显的塑性变形特征; 当 T>600°C时, 石灰岩也呈现明显的塑性变形现象. 表明:随着温度的增加, 大理岩和石灰岩的塑性性能增强,而脆性特性减弱. (3)砂岩的应力应变曲线在常温~800°C之间大致经历了两个阶段,即压密阶段和弹性阶段.

3 高温作用下岩石的力学性能

3.1 峰值强度 σ_c 的变化特征

三种岩样的峰值强度(单轴抗压强度 σ)随温度的变化曲线如图 5 所示: 从图 5 及表 1 可以看到, 高温作用下3种岩石的峰值强度与常温相比都发生了明显

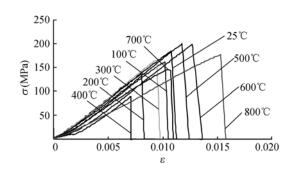


图 4 砂岩单轴压缩应力-应变全过程曲线

的变化. 其中大理岩在常温~100℃, 峰值强度达到最大值, 这与文献[16]中所得出的结论不谋而合, 但与文献[13]略有差异, 文献[13]所用试件是花岗岩, 峰值强度在 200℃达到最大值, 说明大理岩和花岗岩的单轴抗压强度与温度之间的关系, 在突变点上是有差异的. 对于大理岩在 100℃左右峰值强度出现异常可能是热裂化(thermal cracking)的影响. 大理岩内部在初始状态下就含有大量微裂隙, 在加温到100℃前,内部矿物颗粒受热膨胀,减少了岩石原生裂隙的长度和面积, 甚至是原生裂隙闭合,减少了微裂隙数目,峰值强度均大于常温; 100℃~200℃内,峰值强度发

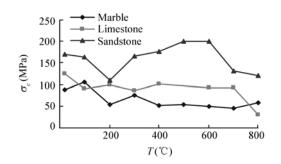


图 5 峰值强度 σ 随温度 T 的变化曲线

表 1 高温下 3 种岩石基本力学特性测试结果

$T(^{\circ}\mathbb{C})$		20	100	200	300	400	500	600	700	800
σ_c (MPa)	marble	87.56	105.65	52.87	75.78	52.12	54.33	50.64	44.65	59.10
	limestone	123.97	91.46	99.31	86.27	100.49	_	91.28	93.51	29.97
	sandstone	170.98	163.52	109.09	165.00	176.22	200.89	199.49	131.09	120.33
$\varepsilon_c \times 10^{-3}$	marble	5.766	5.646	3.432	4.959	5.934	6.639	5.698	5.836	9.838
	limestone	7.677	6.867	7.632	8.116	7.009	_	6.870	10.167	11.792
	sandstone	11.887	9.984	7.256	9.556	9.984	12.222	12.738	12.111	13.101
	marble	17.73	19.69	14.24	16.88	10.55	10.51	11.35	10.05	7.57
E (GPa)	limestone	17.77	17.03	15.46	15.04	15.11	_	16.23	12.01	3.21
	sandstone	16.73	17.77	17.20	18.87	15.63	18.19	17.61	13.75	11.30

生突变性降低,从 106 MPa 左右降低到 53 MPa 左右,降低幅度约 50%; 200℃~300℃峰值强度从 52 MPa 左右上升到 76 MPa 左右,300℃~400℃峰值强度又降低,从 76 MPa 左右下降到 52 MPa 左右降低幅度约 32%,400℃~800℃内,大理岩峰值强度变化不大.

对于石灰岩峰值强度均值随温度的升高呈明显 下降趋势. 在常温~100℃内, 石灰岩的平均峰值强度 由常温时的 120 MPa 降到了90 MPa, 下降幅度约为 25%; 当经历的温度在 100℃~700℃时, 石灰岩峰值 强度变化不大. 这意味着加热温度较低时(不超过 700℃),岩石受热产生膨胀,虽然由此伴随产生一定的 结构热应力,但未超过岩石的极限抗压强度,因此未出 现新的微裂纹, 岩石强度变化不大. 当温度进一步升 高到700℃, 岩石受热产生的结构热应力明显增强, 超过岩石的极限强度, 在岩石中将形成新的微裂纹, 裂纹的存在和不可逆的裂纹扩展变形使得岩石微结 构发生变化,碎裂结构增多, 从而导致岩石强度的明 显下降. 对于本实验的结果来说 700℃是石灰岩强度 开始急剧下降的温度点. 在温度达到 800℃时, 石灰 岩峰值强度由 100℃时的 90 MPa 下降至 30 MPa, 下 降幅度达 70%, 表明单轴压缩条件下, 石灰岩在 700 ℃左右可能存在一临界温度点, 超过这一临界点, 石 灰石受温度影响其力学特性发生剧烈变化.

对于砂岩峰值强度随温度呈起伏状变化, (1)常 温~200℃内砂岩的峰值强度呈下降状态,从 170 MPa 左右降低到 110 MPa 左右,降低幅度约 35%,主要由 于砂岩受热后内部各矿物颗粒变形调整, 使得岩石 内部原有裂隙逐渐闭合, 致密程度得到改善, 而一些 小裂纹则逐步形成较大裂纹带或大裂纹(200℃左右 裂缝数量达到峰值[17], 这致使砂岩的峰值强度下降; (2)200℃~600℃峰值强度呈现出上升趋势,从 110 MPa 左右上升到 200 MPa 左右, 个别试件甚至出现 在 600℃以前的峰值强度高于常温状态. 由于砂岩部 分矿物发生了热熔效应,导致砂岩内部一些裂缝愈 合、裂纹的数量开始呈下降趋势, 使得砂岩的峰值强 度上升; (3)温度达到 800℃时峰值强度又从 200 MPa 快速降低到 120 MPa 左右, 降低幅度约 40%. 强度发 生急剧降低是否意味着600℃是砂岩内部结构变异的 临界温度值,这还有待做更进一步的研究与探讨.

 对温度敏感性不同,砂岩在 600℃时出现抗压强度的 急剧下降,而石灰岩则在 700℃时出现抗压强度的急剧下降,大理岩则在 800℃前其抗压强度呈平缓下降 态势; (3)大理岩和砂岩在 200℃左右,抗压强度的变化曲线呈低谷形,表明 200℃左右的温度,对岩样的抗压强度有影响.

3.2 峰值应变 ε 。的变化特征

高温作用下三种岩石峰值应变(峰值强度对应的应变)随温度变化情况如图 6 及表 1 所示,可见,(1)大理岩的峰值应变在常温~200℃之间随着温度升高逐渐降低,而当经历的温度超过 200℃以后,峰值应变随受热温度的升高又逐渐增长,在 800℃高温时,大理岩平均峰值应变由 200℃时的 0.0034 增长到 0.0098,增长幅度约 200%左右;(2)石灰岩在常温~600℃内,平均峰值应变变化不大,当 T>600℃后,则呈现急剧上升现象,有常温下的 0.007677 增长到 0.011792,增长幅度达 150%;(3)砂岩的峰值应变在常温~200℃之间随着温度升高逐渐降低,而当经历的温度超过 200℃以后,峰值应变随受热温度的升高又逐渐增长,在 800℃高温时砂岩平均峰值应变由 200℃时的 0.007256 增长到 0.013024,增长幅度达 180%左右.

从图 6 及表 1 可以看到,高温作用下三种岩石峰值应变的变化具有明显的区别, (1)砂岩的峰值应变在各个温度段都比大理岩和石灰岩的大,大理岩的峰值应变在三种岩样中最小; (2)大理岩和砂岩在 200℃前峰值应变呈下降趋势,而石灰岩则变化不明显;三种岩样在 200℃以后,峰值应变总体均呈增大趋势;大理岩和石灰岩在 600℃后,其峰值应变增长速度加快; (3)大理岩和砂岩在 200℃左右,峰值应变曲线出现明显的低谷形特征.

3.3 弹性模量E的变化特征

图 7 为三种岩石的弹性模量 E 随温度升高的变化曲线, 从图 7 中看出以下 3 点.

(1)大理岩在常温~400℃范围内,弹性模量出现起伏变化,但在 100℃左右时弹性模量达到最大值,可能由热裂化引起,这与文献[16]中所得出的结论相一致,与文献[13]略有差异,文献[13]中花岗岩的弹性模量在 75℃达到最大值,我们可认为 100℃为大理岩弹性模量的门槛温度,400℃后则呈平缓下降态势.经历 800℃高温作用,其弹性模量均值与常温

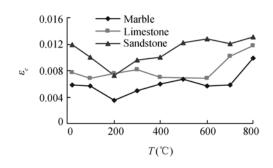


图 6 峰值应变 ϵ_c 随温度 T 的变化曲线

相比, 从 18 GPa 左右降低到 7.5 GPa 左右, 降低幅度约 58%.

- (2) 石灰岩经历的高温在 600℃以前,弹性模量略有下降,但幅度很小;而当经历的温度超过600℃以后,弹性模量随受热温度升高急剧下降;经历800℃高温作用,石灰岩平均弹性模量由常温时的17.8 GPa下降到3.2 GPa,降低幅度约80%.表明石灰岩经受600℃以上温度作用后,其内部结构将产生明显改变.
- (3) 砂岩在 600° 以前,弹性模量 E 随温度 T 的升高虽有起伏,但变化不很明显;当温度 T 超过 600° 飞后,弹性模量 E 随温度 T 的升高急剧下降;当温度达到 800° 时,砂岩平均弹性模量 E 由常温时的 18 GPa 下降到 11.2 GPa,下降幅度约 35%. 表明:高温条件下,砂岩的单轴压缩存在一临界温度点 T_C (约 600°),当 $T<T_C$ 时,砂岩的弹性模量 E 几乎不随温度发生变化:当 $T>T_C$ 时,砂岩对温度的敏感性强烈,随着温度 T 的升高,其弹性模量 E 迅速下降,即此时砂岩的抗变形能力大大降低.

由图 7 给出的三种岩样平均弹性模量与温度的关系看到, (1) 随温度的升高,三种岩石的弹性模量均呈现出下降趋势; (2) 对于砂岩和石灰岩,在600℃以前弹性模量变化不大,经过600℃后弹性模量均发生明显下降变化,而大理岩的弹性模量则在400℃以前出现起伏变化,400℃后则呈平缓下降态势; (3)大理岩和石灰岩在200℃左右,弹性模量曲线呈现明显的低谷形.

4 结论

利用美国MTS810电液伺服材料试验机和其配

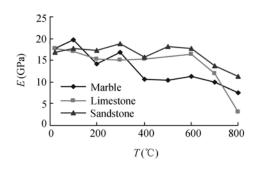


图 7 弹性模量 E 随温度 T 的变化曲线

套的 MTS652.02 高温环境炉,系统地研究了大理岩、石灰岩、砂岩 3 种岩石在高温状态下的力学特性,得到以下研究结论.

- (1) 三种岩样的应力-应变全过程曲线特征在600℃以前与常温情形基本类似,都呈现有明显初始压密过程、弹性变形和脆性破断;当 *T≥*800℃时,大理岩和石灰岩除了具有压密阶段和弹性阶段外,还呈现有明显的塑性变形特征.表明:随着温度的增加,大理岩和石灰岩的塑性性能增强,而脆性特性减弱;砂岩的应力应变曲线在常温~800℃之间大致经历了两个阶段,即压密阶段和弹性阶段.
- (2) 在常温~200℃温度区域内, 3 种岩样峰值强度均呈下降趋势; 大理岩的峰值强度在 400℃前出现起伏变化, 400℃后则呈平缓下降态势; 石灰岩的峰值强度在 200℃~700℃内, 随温度升高变化不大, 当 T>700℃后,则呈现出急剧下降现象,温度达到 800℃时,下降幅度约 70%; 砂岩的峰值强度在 200℃~600℃内,呈上升趋势,当 T>600℃后呈下降趋势,在温度达到 800℃时,降低幅度约 40%.
- (3) 石灰岩的峰值应变在常温~600℃温度区域内,随温度升高变化不大,当 *T*>600℃后,随温度升高则呈现急剧上升现象;大理岩、砂岩的峰值应变在200℃以前呈下降趋势,当 *T*>200℃后峰值应变迅速增长,温度达到800℃时,增长幅度均超过150%.
- (4) 随温度的升高, 3 种岩石的弹性模量均呈现出下降趋势; 对于石灰岩和砂岩, 在 600℃以前弹性模量变化不大, 当 *T*>600℃后, 弹性模量均呈现出明显下降现象, 经历 800℃高温作用, 石灰岩和砂岩的弹性模量分别降低幅度约 80%和 35%; 大理岩在常温~400℃范围内, 弹性模量出现起伏变化, 但从总体规律上看呈下降趋势.

参考文献.

- 1 Heuze F E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks—A review. Int J Rock Mech Min Sci Geo Mech Abstr, 1983, 20(1): 3-10
- 2 Lau J S O, Gorski B, Jackson R. The effects of temperature and water saturation on mechanical properties of Lac du Bonnet pink granite. 8th International Congress on Rock Mech, Tokyo, 1995. 1167—1172
- 3 Wong T F. Effects of temperature and pressure on failure and post-failure behavior of westerly granite. Mech Mater, 1982, 1: 3-17
- 4 杜守继, 刘华. 高温后花岗岩力学性能的试验研究. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2359-2364
- 5 夏小和, 王颖轶, 黄醒春, 等. 高温作用对大理岩强度及变形特性影响的实验研究. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 996-998
- 6 吴刚, 邢爱国, 张磊, 等. 砂岩高温后的力学特性. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2110—2116
- 7 何国梁, 吴刚, 黄醒春, 等. 砂岩高温前后超声特性的试验研究. 岩土力学, 2007, 28(4): 779—784
- 8 张磊. 高温后砂岩物理力学性质的试验研究及扰动状态概念分析. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2005
- 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. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1945—1950
- Hudson J A, Stephansson O, Andersson J. Guidance on numerical modeling of thermo-hydro-mechanical coupled processes for performance assessment of radioactive waste repositories. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, 42(5/6): 850—870
- 11 Rutqvist J, Barr D, Datta R. Coupled thermal-hydrological-mechanical analyses of the Yucca mountain drift scale test—Comparison of field measurements to predictions of four different numerical models. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, 42(5/6): 680—697
- 12 左建平. 温度-应力共同作用下砂岩破坏的细观机制与强度特征. 北京: 中国矿业大学, 2006
- 13 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性能初步研究. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 332-335
- 14 吴忠,秦本东. 煤层顶板砂岩高温状态下力学特性试验研究. 岩石力学与工程学报,2005,24(11):1863—1867
- 15 谌伦建,吴忠,秦本东,等. 煤层顶板砂岩在高温下的力学特性及破坏机制. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(5): 123—126
- 16 李道伟, 朱珍德, 蒋志坚, 等. 温度对大理岩力学性质影响的细观研究河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 375—378
- 17 张渊, 张贤, 赵阳升. 砂岩的热破裂过程. 地球物理学报, 2005, 48(3): 656-659