

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0417-07

高温下石灰岩和砂岩膨胀特性的试验研究

秦本东¹, 罗运军², 门玉明³, 谌伦建⁴

(1.河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003; 2.河南理工大学 基建处, 河南 焦作 454003;
3.长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 4.河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘 要: 利用自行研制的高温岩石膨胀特性试验装置, 对石灰岩和砂岩试件 300~700 °C 高温过程中的膨胀特性进行试验研究。试验结果表明, 升温过程中, 石灰岩和砂岩的膨胀应力随温度的增加而增大, 且砂岩膨胀速率比石灰岩大, 刚到 700 °C 时砂岩膨胀应力是石灰岩的 2.45 倍。升温过程中膨胀应力与温度曲线的拟合函数为 2 次抛物线, 相关系数达 0.94 以上。恒温过程中, 随时间延长 2 种岩石的膨胀应力缓慢增加, 最后逐渐趋于稳定的数值。600 °C 高温后 2 种岩石膨胀均达到极限, 但具体表现不同, 700 °C 恒温结束时砂岩稳态膨胀应力是石灰岩的 3.14 倍。岩石热膨胀应力变化与其岩性、内部矿物分解、孔隙率变化、声速变化等有显著关系。

关 键 词: 石灰岩; 砂岩; 高温; 单向约束; 膨胀应力

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental research on swelling properties of limestone and sandstone at high temperature

QIN Ben-dong¹, LUO Yun-jun², MEN Yu-ming³, CHEN Lun-jian⁴

(1. College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 2. Infrastructure Construction Department, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 3. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
4. College of Material Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: The swelling properties of limestone and sandstone at 300 °C to 700 °C were investigated by the experiment system used to measure the swelling properties of rocks at high temperature and designed by ourselves. The experimental results show that the swelling stresses of limestone and sandstone increase with temperature increasing during raising temperature; and the swelling velocity of sandstone is more quickly than the limestone. The swelling stress of sandstone is 2.45 times as that of limestone when just reaching to 700 °C. The fitted functions of curves about swelling stress and temperature are second-degree parabolaes during raising temperature; and the related coefficients are all above 0.94. The swelling stresses of two kinds of rocks increase slowly during constant temperature with time prolonging and tended to steady values at last. Two kinds of rocks' swelling stresses reach to the limit values at 600 °C; but the specific processes are different. The swelling stress of sandstone is 3.14 times as that of limestone when constant temperature process finished at 700 °C. The swelling stress of rock is obviously related to lithological characters, mineral resolving, porosity and sound velocity.

Key words: limestone; sandstone; high temperature; unidirectional restraint; swelling stress

1 引 言

在煤炭地下气化、开采过程中自燃和各种洞室及地下工程经受火灾过程中, 围岩将经受高温烘烤, 岩石内部产生较大的膨胀应力并影响岩石的结构和力学性质的变化。近年来, 国内外许多学者针对高温对岩石的力学行为及微观结构变化的研究有

很多^[1-9], ALSHA YEAN A 等^[1]研究了花岗岩的断裂韧性及加热时岩石的损伤过程; OL GAARD D L 等^[2]研究了膨胀黏土对泥岩变形的影响, 发现有一种含膨胀黏土成分较多的泥岩在 90 °C 时发生变形, 且应变速率达 $8 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$; Y. Nara 等^[3]研究了各向异性岩石中次临界裂缝在不同温度和水蒸汽及应力强度下的生长过程; 邱一平等^[4]对花岗岩

收稿日期: 2009-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50574037)。

第一作者简介: 秦本东, 女, 1977 年生, 博士研究生, 副教授, 主要从事岩土工程和结构工程方面的教学与研究工作。E-mail: qinbendong@hpu.edu.cn

高温后的损伤进行了研究,验证了花岗岩的塑性应变主要与偏斜应力产生的形状改变比能有关,与体积改变比能关系不大,并得出高温下花岗岩力学性质的变化主要与其结构成分中矿物颗粒热膨胀效应发生热应力作用有关;谢卫红等^[5]对高温作用下石灰岩在单向压缩和单向拉伸加载的细观结构进行了试验研究,分析了岩石热损伤演化过程和热裂纹扩展、破坏特征,建立了岩石热裂纹生长的损伤模型;苏承东等^[6]研究了粗砂岩高温后各力学参数的变化;朱珍德等^[7]分析了温度循环与高围压作用对大理岩应力-应变关系曲线、峰值应力、残余应力,峰值应变、残余应变以及弹性模量等的影响;朱合华等^[8]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3种岩石峰值应力、峰值应变及弹性模量随温度的变化规律;张渊等^[9]对阜新细砂岩在常温到900℃下的矿物组分和微结构变化以及内部微裂纹的发生和发展进行了研究。由于岩石形成环境的不同,使其矿物组成和胶结物成分不同,受高温作用后物理力学特性表现有所差异,目前对岩石高温作用过程中的膨胀特性研究成果相对较少。

根据煤炭地下气化炉及采场和地下洞室围岩具有1个或2个自由面,以及地下气化时氧化区及煤层自燃和火灾现场温度高达1200℃的现实,本文主要研究常温至700℃范围内石灰岩和砂岩单向约束条件下产生的热膨胀应力问题,了解煤系地层石灰岩和砂岩的膨胀应力与破坏机制之间的关系,掌握高温下此类岩石的热力学特性,为煤炭地下气化过程中气化及其他地下工程提供高温岩石力学基础。

2 试验装置及试验方法

2.1 试验装置

试验采用自行研制的高温岩石膨胀应力试验装置^[10],该试验装置由立方体高温加热炉、温度控制器、载荷传感器、电阻应变仪、试验框架和隔热垫块组成,如图1所示。高温加热炉外形尺寸为440 mm×400 mm×400 mm,加温元件采用硅炭棒元件加热,高性能纤维保温,最高温度可达1000℃,炉体四侧面各开1个直径为50 mm的通道,通道轴线到底部的距离为170 mm,炉体内筒高温空间的尺寸为120 mm×120 mm×120 mm。温度控制器型号为WDX2-A,该温度控制器可以自动控温和升温,控制精度误差为±1℃。岩石膨胀载荷采用DYB-a型压阻式力传感器和TS3861型静态应变仪进行测试。

本试验中试件与载荷传感器之间采用高纯石英玻璃棒作为传压隔热垫块,弹性模量为71 GPa,线膨胀系数为 $5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$,导热率为1.4 W/m·℃。与煤层顶板岩石(石灰岩在高温下的平均弹性模量约为15 GPa,平均线膨胀系数为 $3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)相比,石英垫块的膨胀量对试验结果的影响可以忽略不计。

岩石膨胀应力测试装置为一矩形框架,采用20号槽钢焊接成型,其刚度能够满足岩石高温膨胀特性试验,能够实现单向或双向2种约束条件,与传感器相对设置有加紧螺栓,保证试验加热前对岩石试件保持一定的预紧载荷。它配合岩石高温加热炉,可以实现在100~900℃高温条件下岩石受单向或双向约束条件下膨胀特性试验。本试验在单向约束条件下测试2种岩石的热膨胀应力,即在图1中仅水平方向施加约束,竖直方向未施加约束,双向约束试验参见笔者其他文章^[11]。

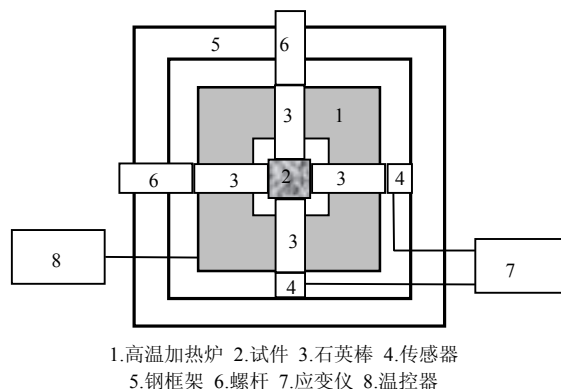


图1 膨胀应力测试系统
Fig.1 Swelling stress experiment system

2.2 岩石试样

所用石灰岩采自巩义大峪沟矿务局三矿煤层顶板,由岩性鉴定该石灰岩为生物屑泥晶灰岩。石灰岩主要矿物成分为 CaCO_3 、 MgCO_3 ,粒径较细,没有肉眼可见的明显缺陷,整体质地均匀。砂岩取自焦作方庄煤矿地下550 m深处煤层顶板,为石英长石砂岩,其主要成分为长石、石英,含有少量云母,层理明显。经锯和磨工序加工成边长为50 mm×50 mm×50 mm的立方体,岩样两端的不平行度小于0.05 mm。石灰岩和砂岩试件的平均密度分别为 2.719×10^3 、 2.654×10^3 g/cm³,平均声波速度分别为4942、4407 m/s。

2.3 试验方案

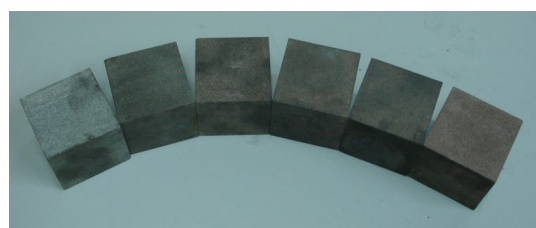
试验共分5组,每组3个试样,加温前先测试石灰岩和砂岩试件的纵波波速,根据试件3个方向上的声学参数,并结合试件的层理结构确定施加约

束的方向,一般均垂直层理方向施加约束。试验温度分别设置为 300、400、500、600、700 °C。考虑到升温速率会影响恒温前岩石膨胀应力的变化,在准备试验阶段,以不同升温速率试做了部分岩样,为保证对试样加温均匀,正式试验时以 5~10 °C/min 的升温速度加温。在升温过程中,从 100 °C 开始计数,而后每升温 50 °C 记录一次数据,达到试验预定温度后再恒温 60 min,使岩石试件内外受热均匀、充分膨胀,在恒温过程中每隔 10 min 记录一次数据,然后,在炉膛中自然冷却至室温。

常温下的石灰岩呈灰黑色,高温后石灰岩试件由灰黑色逐渐变为浅灰色,600、700 °C 时试件表面呈白色,象石灰一样(700 °C 试件当时未拍照片),这是因为随着温度的变化,组成石灰岩的碳酸钙、碳酸镁等矿物颗粒发生了化学变化,生成了相应的氧化物而颜色变浅,600 °C 及以下石灰岩表面仅发生了颜色变化,并未出现裂纹,600 °C 的石灰岩试件在空气中放置一段时间后表面白色物质呈粉末状脱落砂岩常温呈浅绿色,随着温度升高,颜色逐渐变为棕红色和粉红色,见图 2。



(a) 石灰岩 (从左向右常温至 600 °C)



(b) 砂岩 (从左向右常温至 700 °C)

图 2 不同温度后试件的照片

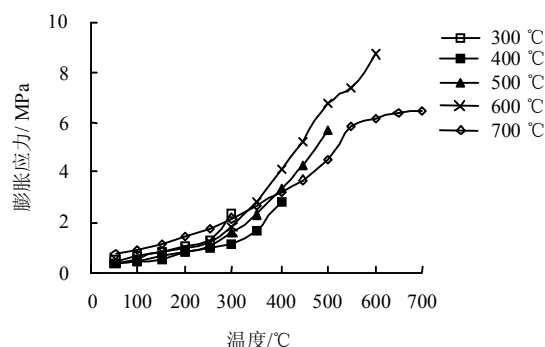
Fig.2 Photos of samples after different temperatures

3 试验结果分析

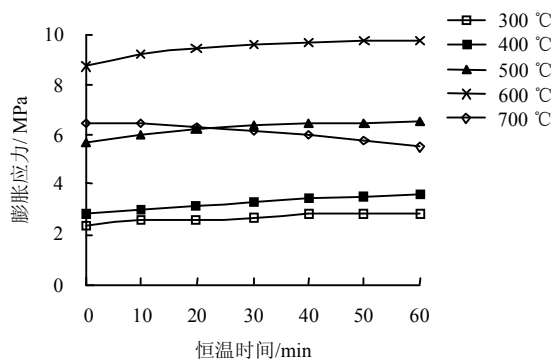
3.1 石灰岩热膨胀应力变化规律

图 3 为石灰岩经历 300~700 °C 升温过程和恒温过程中膨胀应力与试验温度的关系曲线。纵坐标为膨胀应力,是每组 3 个岩样测试结果的平均值。由图 3(a)可以看出,不同的试验温度水平膨胀应力与温度的关系曲线整体变化趋势一致,随着温度的升高,膨胀应力逐渐增加。250 °C 之前,300~600 °C

温度水平的试件在经历同一温度点时平均膨胀应力非常接近,4 条曲线在 250 °C 之前几乎重合。250 °C 之后,不同试验温度水平的试件在同一温度点时离散性增加,且曲线斜率在 250 °C 之后也加大,原因主要是低温时,岩石内部水分先蒸发,矿物颗粒还未充分膨胀;温度较高时,岩石内部水分已经蒸发完毕,颗粒开始膨胀并随温度升高陆续出现孔隙、裂纹等,导致膨胀应力逐渐增大并在高温时膨胀加速。700 °C 试验温度水平的试件在 550 °C 前曲线斜率较大,膨胀应力增加较快,从 100 °C (0.915 MPa) 到 550 °C (5.785 MPa) 膨胀应力增加了 6.322 倍,550 °C 之后曲线平缓上升,到 700 °C 时达到了 6.437 MPa,仅比 550 °C 时膨胀应力高 0.652 MPa。600 °C 温度水平的试件在 300 °C 后膨胀应力急剧增长,曲线斜率最大,远远超过 700 °C 试件的膨胀应力值,这与 600 °C 试验的 3 块试件中有一块试件膨胀应力偏大有关,但 700 °C 的 3 块试件均没有 600 °C 的 3 块试件膨胀应力大。由于石灰岩经受长时间高温后内部结构变化较大,碳酸盐分解也较多(主要是 CaCO_3 、 MgCO_3 等),致使 600 °C 左右膨胀最明显。700 °C 升温过程中膨胀应力增加减缓的原因之一可能是岩石内部已形成的裂隙不断被烧碎的微小



(a) 升温过程



(b) 恒温过程

图 3 石灰岩膨胀应力与温度的关系

Fig.3 Relationships between swelling stress of limestone and temperature

颗粒慢慢填充,贯通裂隙虽有出现但增加不多,另一种原因可能是未施加约束方向膨胀较大分担了约束方向的膨胀应力。

从图 3(b)恒温过程曲线可见,除了 700 °C 温度水平以外,曲线都呈平稳上升,但曲线斜率都远远小于升温过程。恒温前 10~20 min 膨胀应力增加相对较多,这说明恒温能促进石灰岩内外温度均匀,变形一致,膨胀应力增加,但一定时间后每一温度水平的膨胀应力都会趋于该温度的一个稳定值。300、400 °C 试验水平刚到试验温度时的膨胀应力较接近,但远小于 500、600 °C 水平的膨胀应力值,说明此石灰岩 400 °C 以后膨胀速度更大。700 °C 恒稳过程膨胀应力有减小趋势,且最终稳态膨胀应力值小于 500 °C 水平。热分析发现,巩义石灰岩在 648~920 °C 之间失重最大,约 33.8%,因此,700 °C 恒温过程中出现热膨胀应力降低,可能是碳酸盐充分分解,岩石内部结构已发生破坏,传感器弹性恢复所致。

3.2 砂岩热膨胀应力变化规律

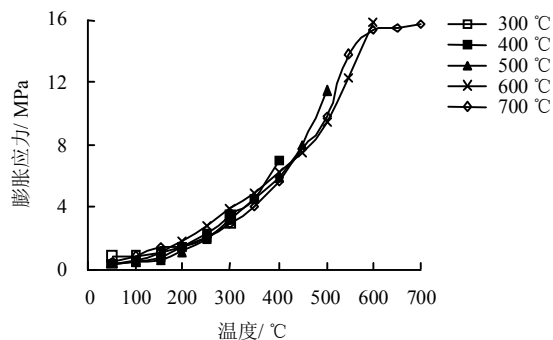
图 4 为方庄砂岩升温过程和恒温过程中膨胀应力与温度的关系曲线。与石灰岩相比,砂岩升温过程中曲线一致性更强,500 °C 前各试验水平试件在经过同一温度时的热膨胀应力很接近,且曲线整体上呈 2 次函数变化。随着温度升高,砂岩膨胀应力逐渐增大,当加热温度超过 600 °C 时,热膨胀应力随温度升高增长减缓(可从 700 °C 曲线上看出),说明在一定温度条件下经过一定加热时间,砂岩热膨胀应力也基本上达到极值。砂岩膨胀应力与温度的曲线斜率明显比石灰岩的大,同一温度时砂岩的膨胀应力值也大于石灰岩,例如,500 °C 时石灰岩最大膨胀应力是 6.735 MPa,砂岩最小是 9.85 MPa,砂岩最小值比石灰岩的最大值大 46.25% 左右,说明砂岩温度敏感性比石灰岩大得多。

如图 4(b)所示,恒温过程中砂岩膨胀应力均呈缓慢上升趋势,恒温结束时的膨胀应力比刚达此温度水平时平均大 15.31%,其中此差值低温度水平(300、400 °C)比高温度水平(600、700 °C)大的多一些,说明温度高时恒温对膨胀应力的增加影响并不大。从图 4(b)来看,每一温度水平膨胀应力都比前一温度水平大 4 MPa 左右(700 °C 除外),4 条曲线近乎平行,递增规律明显。但 600、700 °C 曲线则几乎重合,600、700 °C 砂岩的膨胀应力数值接近,说明砂岩也存在一膨胀应力接近极限的温度点,大约也在 600 °C 左右。

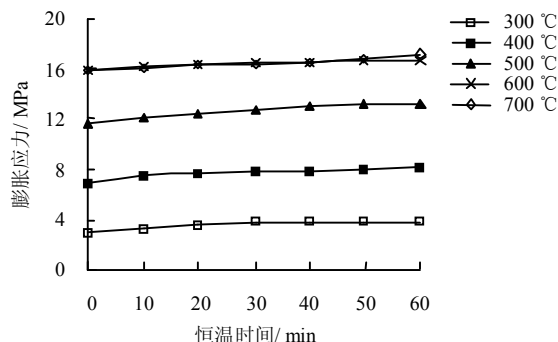
如果将图 3(a)和图 4(a)中曲线拟合,则拟合曲线函数基本上都符合 2 次抛物线规律:

$$\sigma = a \times 10^{-5} \times T^2 + bT + c \quad (1)$$

式中: σ 、 T 分别为膨胀应力和温度。不同的岩石、不同温度水平函数中系数 a 、 b 、 c 的取值不同,这可能是岩石的各向异性所致,各函数中系数及相关性系数详见表 1。



(a) 升温过程



(b) 恒温过程

图 4 砂岩膨胀应力与温度的关系

Fig.4 Relationships between swelling stress of sandstone and temperature

表 1 拟合函数中参数取值

Table 1 Parameter values in the fitted function

温度 / °C	岩石种类	相关系数 R^2	系数		
			a	b	c
300	石灰岩	0.952 4	3	-0.005 3	0.766 4
	砂岩	0.999 1	5	-0.009 4	1.313 1
400	石灰岩	0.947 0	3	-0.006 0	0.767 4
	砂岩	0.992 2	6	-0.008 8	0.748 8
500	石灰岩	0.996 6	3	-0.007 0	0.786 8
	砂岩	0.994 2	7	-0.013 9	1.103 4
600	石灰岩	0.991 5	3	-0.003 2	0.493 7
	砂岩	0.991 8	5	-0.006 2	0.837 7
700	石灰岩	0.978 2	7	0.005 1	0.241 8
	砂岩	0.964 1	3	0.003 2	-0.164 4

由表 1 可见,拟合曲线的相关系数高达 0.94 以上。700 °C 试验温度水平的试样在 600 °C 前拟合效果较好,600 °C 以后,膨胀应力与温度的关系曲线发生了明显的转折,所以对于更高试验温度范围的试

验曲线拟合公式还要进一步研究。

3.3 两种岩石的膨胀应力比较

图5为2种岩石不同温度水平下膨胀应力与温度的关系曲线, 其中曲线①、③是刚到达试验温度水平时的膨胀应力与温度的关系, 曲线②、④是恒温结束时膨胀应力与温度的关系。由曲线①、③可以看出, 升温结束时, 600℃前砂岩膨胀应力随温度增加近乎线性增加, 曲线斜率较大。石灰岩600℃前膨胀应力也随温度增加而增加, 但曲线斜率明显小于砂岩, 且线性没有砂岩的明显。300℃时二者膨胀应力接近, 差值仅为0.635 MPa; 300℃后随着温度升高, 砂岩膨胀速度快于石灰岩; 600℃时二者差值达到了7.116 MPa; 600~700℃之间石灰岩和砂岩膨胀应力都有所降低, 但石灰岩降低得更多, 600℃时石灰岩膨胀应力为8.74 MPa, 700℃时仅为6.437 MPa, 是600℃时的73.65%。

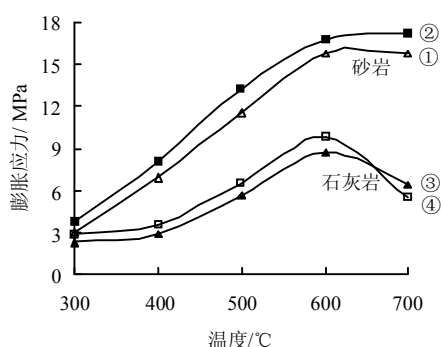


图5 不同温度水平下2种岩石膨胀应力与温度的关系

Fig.5 Relationships between swelling stresses of two kinds of rocks and temperature

从恒温结束时的膨胀应力来看(曲线②、④), 随着温度升高, 膨胀应力同样逐渐增加, 700℃时石灰岩和砂岩的膨胀应力分别达到了5.483 MPa和17.194 MPa, 是300℃的1.94和4.5倍, 是500℃的0.84和1.3倍, 是600℃的0.56和1.03倍。300℃时石灰岩和砂岩稳态膨胀应力相差1 MPa左右, 300℃之后砂岩膨胀加剧, 400℃之后石灰岩膨胀才加快。500℃时砂岩热膨胀应力已是石灰岩的2倍左右, 700℃时已达3.14倍, 这与石灰岩在500℃后孔隙率增加(图6)、碳酸盐分解内部出现贯通裂隙并且贯通裂隙不断加大、加宽有关。另外, 恒温结束后石灰岩膨胀应力小于恒温前的值, 说明到一定温度后石灰岩的膨胀应力也达到了极限, 恒温不会使石灰岩继续膨胀, 反而会使其强度削弱。总体上砂岩比石灰岩膨胀应力要大得多, 这说明岩石的种类与对温度的敏感程度相关。

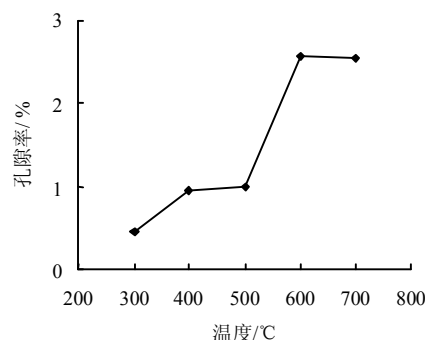


图6 石灰岩孔隙率随温度的变化曲线

Fig.6 Curve of porosity of limestone vs. temperature

4 讨论

由于影响试验结果的因素很多, 上述结论还有待进一步验证, 出现上述现象的微观机制更需要继续探讨。现根据前期2种岩石的热分析试验、孔隙率测定试验、超声试验结果, 讨论如下:

(1) 由巩义石灰岩热重-差热分析(TG、DSC曲线)结果见图7(a), 石灰岩从室温~1000℃有5个失重区间, 分别是室温至460℃、460~480℃、480~648℃、648~920℃、920~1000℃, 说明该石灰岩中各种成分的分解和释放与温度有明显相关性, 不同阶段矿物分解及分解释放的产物可能不相同, 对结构变化影响也可能不同, 从而影响其热膨胀应力的变化。另外, 该石灰岩在627.2℃时出现一个放热峰, 可能是有机物燃烧和碳酸盐分解所致。此外, 巩义石灰岩孔隙率也在500~600℃之间出现明显的突变(图6), 这些变化势必都会影响到其热力学性质的变化。

(2) 由方庄砂岩热重-差热分析(TG、DSC曲线图7(b))可知, 样品在试验开始时有增重现象, 然后是失重, 且失重率达3.14%。同时, 该砂岩在571.7℃时出现吸热谷, 这可能是石英晶型转变所致, 因为 α 石英与 β 石英的相变理论温度为573℃。石英晶型在此温度的转变可能引起砂岩热膨胀应力在600℃前增大较大, 之后变化较小。

(3) 岩石在高温下的热膨胀应力是由于组成岩石的矿物在高温下发生膨胀、收缩、晶型转变、化学分解以及由这些因素形成孔隙、裂隙等产生的。岩石孔隙率增大, 热膨胀力也相应增大。一般岩石在300~400℃开始出现裂纹, 500℃左右矿物颗粒出现破裂, 随着温度升高矿物颗粒破裂加剧, 裂纹逐步扩展形成裂隙, 最后岩石膨胀达到极限造成破坏。不同的岩石这一过程不同, 石灰岩在600、700℃试验水平升温曲线上在经历同一温度时膨胀应力相差较大, 而砂岩经历同一温度时膨胀应力较

接近,说明不同的岩石对温度变化的响应不同(图3(a)、图4(a))。

(4)从声速变化特征看,2种岩石声速在300℃以后急剧降低,而其热膨胀力也是在300℃以后开始快速增大^[12],间接证明岩石热膨胀力变化与其内部微观结构变化有显著关系。

(5)本文中巩义石灰岩和焦作砂岩均在600℃左右膨胀应力达到极限,除了文中所述岩石的微观结构和矿物组成发生变化外,随着温度的升高,岩石弹性模量也会降低,如果弹性模量降低的幅度超过其热膨胀增加的幅度,也会引起高温膨胀应力不再增加或者呈降低趋势。具体原因有待进一步研究确定。

(6)由于试验条件限制,试样加工成了50 mm×50 mm×50 mm的立方体试件,与标准50 mm×100 mm的圆柱体岩样相比可能存在差异。为研究方便,忽略了各试件之间的微小差异,将岩石看作是均匀材料,也可能给试验带来误差。

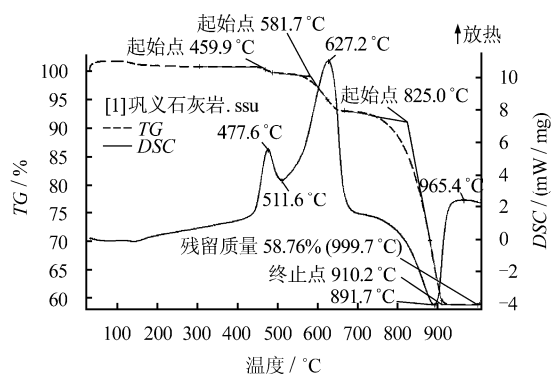
(2)升温过程中石灰岩和砂岩的膨胀应力随温度的增加而增大,升温过程曲线600℃前斜率较大,600~700℃之间曲线缓慢上升,且砂岩曲线斜率比石灰岩大,刚到700℃时砂岩膨胀应力是石灰岩的2.45倍。升温过程膨胀应力与温度的关系曲线可用2次抛物线来拟合,相关系数达0.94以上。

(3)恒温初始10~20 min内石灰岩和砂岩膨胀应力增加较大,随后逐渐趋于稳定的数值。600℃高温后2种岩石在单向约束条件下的膨胀应力均达到极限,但具体表现不同。700℃恒温结束时,砂岩稳态膨胀应力是石灰岩的3.14倍。

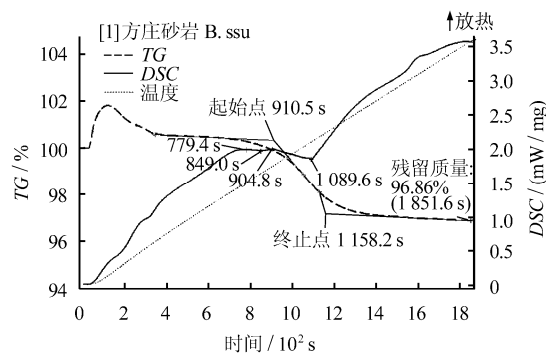
(4)岩石热膨胀应力变化与其岩性、内部矿物分解、孔隙率变化、声速变化等有显著关系。

参考文献

- [1] ALSHA YEA N A, KHAN K, ABDULJAUWARD S N. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode(I-II) fracture toughness of a lime-stone rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(4): 629—643.
- [2] OL GAARD D L, URAIJ, LI'ANQEL O L N, et al. The influence of swelling clays on the deformation of mudrocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 364—364.
- [3] NARA Y, KANEKO K. Sub-critical crack growth in anisotropic rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43: 437—453.
- [4] 邱一平, 林卓英. 花岗岩样品高温后损伤的试验研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(6): 1005—1010.
QIU Yi-ping, LIN Zhuo-ying. Testing study on damage of granite samples after high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 1005—1010.
- [5] 谢卫红, 高峰, 李顺才, 等. 石灰岩热损伤破坏机制研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5): 1021—1025.
XIE Wei-hong, GAO Feng, LI Shun-cai, et al. Study on mechanism of thermal damage fracture for limestone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 1021—1025.
- [6] 苏承东, 郭文兵, 李小双. 粗砂岩高温作用后力学效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(6): 1162—1170.
SU Cheng-dong, GUO Wen-bing, LI Xiao-shuang. Experimental research on mechanical properties of coarse sandstone after high temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1162—1170.



(a) 石灰岩



(b) 砂岩

图7 热分析曲线

Fig.7 Heat analysis curves

5 结论

(1)高温后石灰岩颜色随温度升高逐渐变浅,600℃后试件表面呈白色石灰状,砂岩颜色则由浅绿色逐渐变成棕红色和红色。

- [7] 朱珍德, 方荣, 朱明礼, 等. 高温周期变化与高围压作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2279—2283, 2290.
ZHU Zhen-de, FANG Rong, ZHU Ming-li, et al. Study of mechanical performance of marble under high pressure and cyclic temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2279—2283, 2290.
- [8] 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, 25(10): 1945—1950.
ZHU He-hua, YAN Zhi-guo, DENG Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccia after high temperatures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2006, 25(10): 1945—1950.
- [9] 张渊, 张贤, 赵阳升. 砂岩的热破裂过程[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 656—659.
ZHANG Yuan, ZHANG Xian, ZHAO Yang-sheng. Process of sandstone thermal cracking[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2005, 48(3): 656—659.
- [10] 顿志林, 晁俊奇, 刘希亮, 等. 高温双向约束下岩石膨胀应力测试装置的研制[J]. 河南理工大学学报, 2008, 27(6): 685—688.
DUN Zhi-lin, CHAO Jun-qi, LIU Xi-liang, et al. The test device design of swelling stress of rock under bidirection restraints and high temperature[J]. **Journal of Henan Polytechnic University**, 2008, 27(6): 685—688.
- [11] 秦本东, 谌伦建, 晁俊奇, 等. 高温石灰岩膨胀应力的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(3): 326—330.
QIN Ben-dong, CHEN Lun-jian, CHAO Jun-qi, et al. Experimental research on the swelling stresses in limestone at high temperatures[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2009, 38(3): 326—330.
- [12] 秦本东, 何军, 谌伦建. 石灰岩和砂岩高温力学特性的试验研究[J]. 地质力学学报, 2009, 25(3): 253—261.
QIN Ben-dong, HE Jun, CHEN Lun-jian. Experimental research on mechanical properties of limestone and sandstone under high temperature[J]. **Journal of Geomechanics**, 2009, 25(3): 253—261.