

龚俊杰,刘鑫,姚云龙,等. 基于细观结构试验的红砂岩线膨胀系数变化的研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1):15-21. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.003

GONG J J, LIU X, YAO Y L, et al. On the Change of Linear Expansion Coefficient of Red Sandstone Based on Microstructure Experiment [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1):15-21. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.003

基于细观结构试验的红砂岩线 膨胀系数变化的研究

龚俊杰,刘鑫*,姚云龙,洪宝宁

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了解释红砂岩的线膨胀系数变化规律,分别对红砂岩进行了XRD成分分析试验、细观结构试验和线膨胀试验研究,从细观结构的角度讨论红砂岩线膨胀系数的变化规律.研究表明:(1)在2℃/min的加热速率下,红砂岩试样的线膨胀系数在常温~400℃增长速度比较缓慢,在400~530℃增长速度随着温度的升高而逐渐加快,在530~620℃出现了一个巨大的峰值,峰值于570~580℃达到顶峰,在620~870℃,红砂岩的线膨胀系数总体处于一个稳定的较低水平,当温度高于870℃时,红砂岩的线膨胀系数有一个微弱上涨的趋势,并且逐渐趋于稳定.(2)红砂岩随着胶结物的解离、矿物颗粒破碎导致裂纹数量增加,结构变得疏松,从而线膨胀系数减小;红砂岩随着颗粒膨胀、石英相变产生的体积增大,使得其膨胀量逐渐填补了结构内部的空隙,结构变得密实,从而线膨胀系数减小.(3)当温度高于870℃时,由于红砂岩微观缺陷、空洞和破坏区的大量出现,其线膨胀系数增幅受石英相变体积膨胀的影响较小.

关键词:红砂岩;线膨胀系数;细观结构;裂纹;峰值

中图分类号:TU454

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)01-0015-07

On the Change of Linear Expansion Coefficient of Red Sandstone Based on Microstructure Experiment

GONG Junjie, LIU Xin, YAO Yunlong, HONG Baoning

(College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explain the variation rule of the coefficient of linear expansion of red sandstone, XRD composition analysis experiments, fine structure experiments and linear expansion experimental studies are carried out to discuss the variation rule of the coefficient of linear expansion of red sandstone from the point of view of fine structure. The results show that firstly, under the heating rate of 2℃/min, the linear expansion coefficient of red sandstone specimens grows slowly in the temperature range of room temperature to 400℃. The growth rate in the temperature range of 400~530℃ has gradually accelerated with the increase of temperature, and a huge peak has appeared in the range of 530~620℃, which has peaked in the temperature range of 570~580℃. In the range of 620~870℃, the coefficient of linear expansion of red sandstone is generally at a stable lower level, when the temperature is higher than 870℃, the coefficient of linear expansion of red sandstone has a weak rising trend, and

收稿日期:2023-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51609071)

*通信作者, E-mail: liuxin100@hhu.edu.cn

gradually tends to stabilize. Secondly, the linear expansion coefficient of red sandstone decreases with the dissociation of cement and the fragmentation of mineral particles, resulting in the increase of the number of cracks and the structure becomes loose. Red sandstone with the expansion of particles, and quartz phase transition produced by the volume increase, its expansion gradually fills the voids within the structure, and the structure becomes dense, so that the coefficient of linear expansion decreases. Lastly, when the temperature is higher than 870 °C, the increase of the linear expansion coefficient is less affected by the volume expansion of quartz phase transformation, due to the large number of microscopic defects, voids and damage zones in red sandstone.

Keywords: red sandstone; linear expansion coefficient; meso structure; crackle; peak value

在煤层瓦斯的安全抽放及综合利用、地热能及石油的开发及开采、核废料储存库的设计、选址及长期安全性预测等工程中,都会涉及围岩在温度作用下的变形及破裂损伤等问题,而热膨胀系数是衡量围岩变形的一个重要指标。

近年来,国内外许多学者在岩石的热膨胀系数变化规律方面进行了较多的研究工作.SIEGFRIED 等^[1]对 65 种不同类型的岩石进行了系统研究,发现温度和湿度对热膨胀系数均有重要的影响;KESHAVARZ 等^[2]对辉长岩在高温下的微观破裂机理进行了研究,发现辉长岩存在临界温度,在 600 °C 作用下,由于不同的晶体热膨胀系数不同以及热膨胀系数在升温的过程中会产生突变,因此会导致岩石产生微裂纹;ONYIDE 等^[3]对南非铂金矿中精选的岩石进行了热膨胀系数研究,发现相比于其他样品,铬铁矿的膨胀系数最低,这是由于其较低的强度和在晶界内的弱结合造成的;LIU 等^[4]通过一种基于断裂力学理论和热弹性理论的数学模型发现了矿物热膨胀系数之间的差异对热裂和渗透率变化的影响;CHIYODA 等^[5]发现了不同 SiC 含量对莫来石-铝土矿浇注料热膨胀系数有很大影响;马占国等^[6]研究发现砂岩在保温试验过程中随着温度升高,试样热膨胀系数逐渐增加,但温度达到 700 °C 后,试样热膨胀系数增加趋势明显减缓,趋于平稳,试样轴向高度变化速度降低;康健等^[7-8]首先考虑以岩石的热膨胀系数为随机变量,在平面应力模型下,进行了岩石热破裂的数值试验,研究发现热膨胀系数的概率分布形式对花岗石热破裂规律及门槛值温度有重要影响;仇洪云等^[9]研究了在热膨胀系数为常数和随机变量 2 种情况下,低温对气体钻井中井底岩石应力分布的影响,研究发现热膨胀系数为随机变量时的切向应力数值大于热膨胀系数为常数时的切向应力;张岩等^[10]以鄂尔多斯盆地三叠系长 7 页岩段 3 口取心井的岩心为研究对象,研究发现鄂尔多斯盆地三叠系长 7 富有机质段不同岩性的热膨胀系数存在较大差异,并随有机碳含量的升高而增大。

一般来说,岩石热膨胀系数产生变化与岩石微观结构的变化有着一定的关系,研究高温作用下岩石的热膨胀规律对工程设计以及安全性评价具有重要意义。然而,国内外从微观结构的角度对红砂岩热膨胀系数变化规律这方面的研究较少。在采矿巷道以及石油、天然气的储层中,红砂岩是一种常见的储集岩,构成采矿巷道或储层的一部分,也能有效地储存和运输油气。由于地热梯度、地层流体作用、机械应力和其他因素的共同作用,易使储层中的红砂岩产生热膨胀甚至热破裂,从而引发火灾或爆炸等安全事故,进而严重影响施工作业的正常进行。因此,本文以山东济宁某矿区的红砂岩作为工程背景,选取多块代表性的红砂岩作为试验样品,对试样进行 XRD 成分分析试验、热膨胀系数试验、细观结构试验,并对高温下红砂岩的热膨胀系数变化规律进行研究分析。

1 试验设计

本文主要对红砂岩进行 XRD 成分分析试验、高温作用下的细观结构试验和热膨胀试验。其中 XRD 成分分析试验,使用的主要研究设备为 Smartlab9kW 型号粉末 X 射线衍射仪,主要功能有对材料样品进行定性、定量物相分析以及对材料进行晶体内部结构的分析。

热膨胀试验采用湘潭市仪器仪表有限公司生产的 ZRPY-1000 热膨胀系数测定仪进行红砂岩试样的热膨胀系数测定,按照仪器规定要求将红砂岩加工成横截面为 8 mm×8 mm,长度为 50 mm 的长方体。仪器主要由位移传感器、加热钼丝炉、传力推杆、电器控制柜这 4 部分组成。电炉升温后,炉膛内的试样发生膨

胀,顶在试样端部的传力推杆产生与之等量的位移量(如果不计系统的热变形量的话).这一位移量由电感位移计精确地测量出来,并由位移表显示,如图 1 所示.

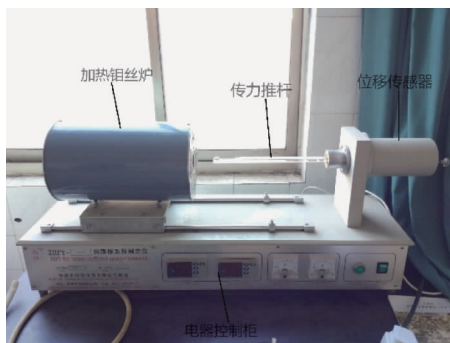


图 1 ZRPY-1000 热膨胀系数测定仪

细观结构试验采用 LECIA 显微镜 DM2700P(见图 2)、LINKAM TS1200 热台(见图 3),对加工好的厚度为 0.03 mm 的薄片进行透射光路的试验研究.



图 2 LECIA 显微镜 DM2700P

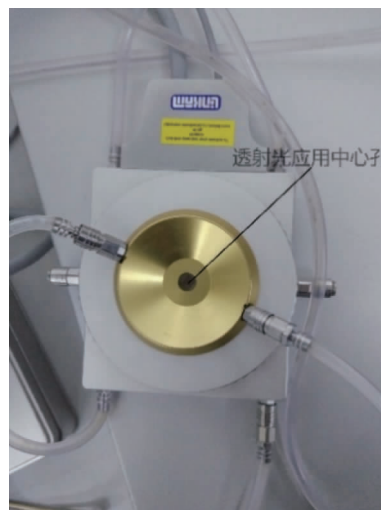


图 3 LINKAM TS1200 热台

将红砂岩试件的加温速率设定为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,加热范围为常温至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$,分别做 4 组试验,记录红砂岩的热膨胀数据.剔除每组试验明显偏离正常范围的数据,最后取 4 组试验数据的平均值以保证试验数据的准确性.本文采用线膨胀系数来表示材料的热膨胀系数,计算如式(1)所示.

$$a_1 = \frac{l_t - l_0}{l_0 \Delta t} \quad (1)$$

式中: a_1 为线膨胀系数; l_t 为试样变化后长度; l_0 为试样初始长度; Δt 为温度变化量.

将热台放置于 LECIA 显微镜 DM2700P 载物台上,将红砂岩薄片放置于 LINKAM TS1200 热台的透射光应用中心孔进行以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速度进行加热,在加热的过程中通过 LECIA 显微镜 DM2700P 进行观测,并在观测的过程中对红砂岩薄片受热过程中的细观结构变化进行全过程录像.

2 试验结果

2.1 红砂岩样品成分组成分析

XRD 试验是一种半定量的分析方法,能够分析出样品中的矿物成分,但在一般情况下得到的各矿物成分的含量误差较大,因此本文仅对 XRD 分析结果做定性分析.通过对室温状态下的红砂岩样品进行 X 射线衍射分析,可以得到相应的 X 射线衍射图谱,见图 4.其中,横轴为 2 倍衍射角,纵轴为衍射峰强度.通过图 4 可知:红砂岩样品的主要矿物成分包含石英、长石,并含有少量的白云母、方解石、绿泥石.

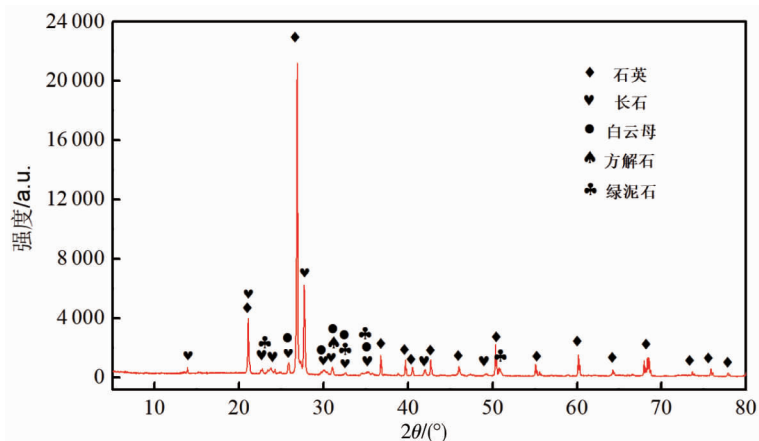
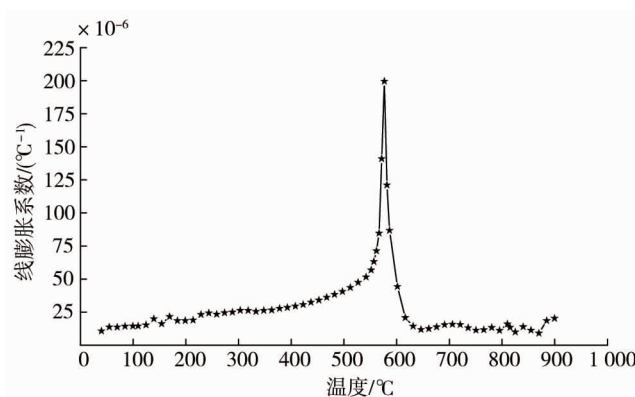


图4 常温状态下红砂岩样品的 XRD 图谱

2.2 红砂岩升温过程中热膨胀系数的变化规律

在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下,红砂岩试样在常温至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的线膨胀系数随着温度升高其变化关系曲线如图 5 所示。

图5 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 下红砂岩的线膨胀系数

通过图 5 可以发现:在常温~ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 红砂岩的线膨胀系数增长速度比较缓慢;在 $400\sim 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 红砂岩的线膨胀系数的增长速度随着温度的升高而逐渐加快;在 $530\sim 630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 红砂岩的线膨胀系数产生了一个巨大的峰值;红砂岩的线膨胀系数在 $530\sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 急剧上升,于 $570\sim 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到顶峰,在 $580\sim 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 又开始急剧下降,这个温度阶段是整个升温阶段红砂岩线膨胀系数变化最剧烈的阶段;在 $620\sim 870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 红砂岩的线膨胀系数总体处于一个稳定的较低水平;在 $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后红砂岩的线膨胀系数有一个微弱上涨的趋势,之后逐渐趋于稳定。

2.3 红砂岩升温过程中微观结构的变化规律

通过 DM2700P 偏光显微镜观察,砂岩样品中所含矿物主要呈晶体颗粒状排列,矿物晶体颗粒之间的胶结物主要为黏土矿物,还有一些胶体二氧化硅,在胶结物中赋存有一些有机质和包裹体.样品中的孔洞发育不明显,原生裂隙有发育.矿物晶体颗粒界限明显,晶体颗粒形状呈椭圆形的较多,但不规则;矿物颗粒大小不一,分布无规律性。

通过对岩石的细观热破裂试验,发现岩石样品在温度不断升高过程中,内部的裂纹数量逐渐增多,红砂岩的初始细观结构及加温后的细观结构如图 6 所示。

为了更好地反映升温过程中红砂岩裂纹变化的规律,将裂纹数量的变化进行了统计分析.根据已定的试验方案,将加工好的红砂岩薄片放入偏光显微镜的加热室内,进行控制升温.以红砂岩裂纹的数量作为研究对象,根据试验观察及显微图像的计算机后处理,以裂纹宽度 Width 作为选取标尺和数量统计的参照.最后,根据裂纹数量的变化规律对红砂岩的热破裂规律进行研究(为方便描述起见,将裂纹宽度 $3\text{ }\mu\text{m}>\text{Width}>1\text{ }\mu\text{m}$ 的裂纹简称为小裂纹、将裂纹宽度 $\text{Width}\geq 3\text{ }\mu\text{m}$ 的裂纹简称为大裂纹).红砂岩裂纹数量统

计见图7.由图6和图7可以得出:在对样品进行加温的初始阶段,即在常温~210℃样品整体形态基本无变化,有部分小裂纹开始萌生,小裂纹数量呈缓慢增加趋势,增加的裂纹主要出现在矿物晶体颗粒边界;砂岩内部的原生裂隙在热应力作用下呈现不同的表现形式,有的呈延展现象、有的则出现闭合,表现较为随意.裂纹数量的增长主要是2个原因造成的:(1)原生裂隙的进一步发育,部分小裂纹发育成较大的裂纹;(2)少量的新生小裂纹生成.在这个温度阶段,大裂纹数量较少,基本无变化.

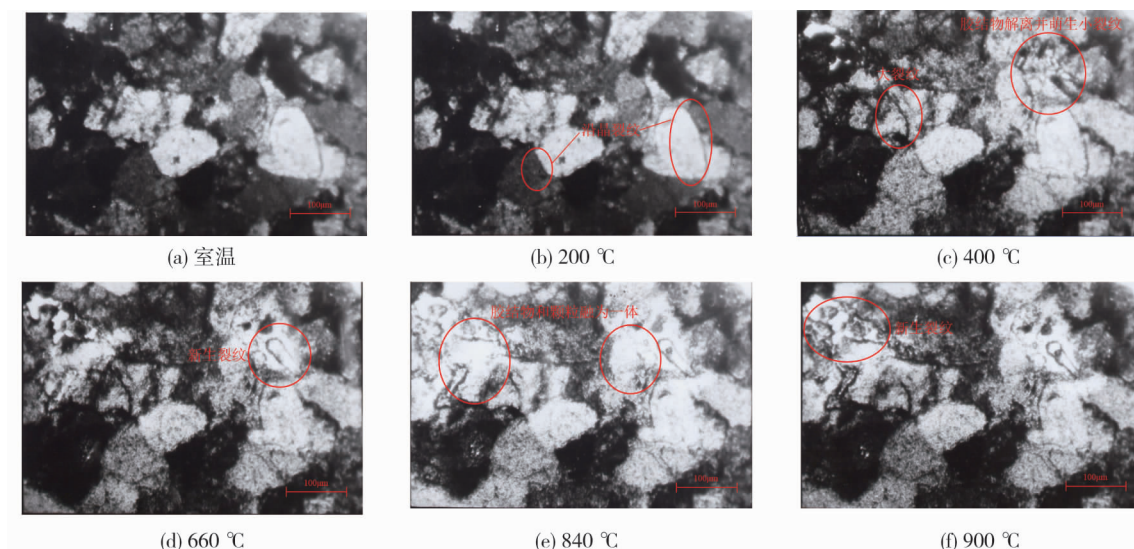


图6 红砂岩结构随温度变化的显微图像

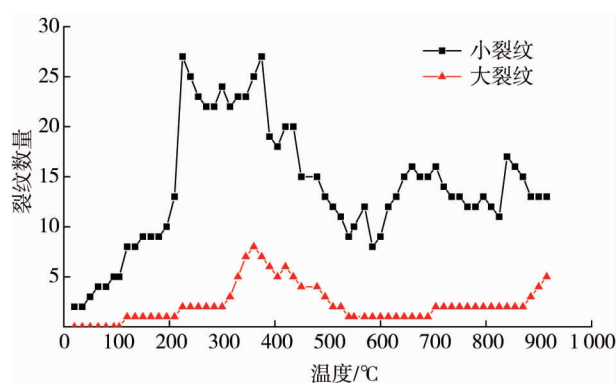


图7 济宁红砂岩样品裂纹数量随温度变化

当温度上升至220~400℃,红砂岩的裂缝网络有一个突变现象:红砂岩裂缝的数量急剧增长,众多小裂纹逐步汇聚、沟通形成裂缝,大裂纹和小裂纹的数量都达到峰值,分析有两方面因素:(1)红砂岩中的部分胶结物中矿物集合区发生解离,有些裂缝在高温下进一步发育形成;(2)在这个温度范围内会有部分结晶水和矿物结构水逸出,结构水和结晶水的丧失导致了矿物晶格骨架的破坏,从而导致了岩石的内部缺陷和裂纹的增加.

在400~530℃,红砂岩内部裂纹数量明显减少,小裂纹数量出现大幅波动,有较大幅度的减少,而大裂纹的表现较为平稳,但也有减少的现象,判断是随着颗粒进一步的膨胀,填补了结构内部的空隙,使得裂纹减少.随着温度的进一步升高,红砂岩裂纹数量的下降趋势减弱并逐渐稳定,与红砂岩初始状态裂纹数量相比,此时红砂岩裂纹数量维持在一个较高水平.

在530~600℃,红砂岩的小裂纹数量出现了一个小幅度的峰值,大裂纹数量不变.判断是因为在常温下 α 石英的晶格结构中2个Si-O四面体相互连接成150°夹角(见图8).当红砂岩加热到573℃左右,其所含的 α 石英转变成 β 石英,晶体结构中2个Si-O四面体连接成180°,这个转化过程中石英体积急剧增大^[11].红砂岩结构内部的空隙不足以将石英膨胀量的部分消融.所以在这种条件下,石英体积急剧增大后

导致矿物颗粒之间的作用力也增加,从而导致岩石内部微裂隙增多.

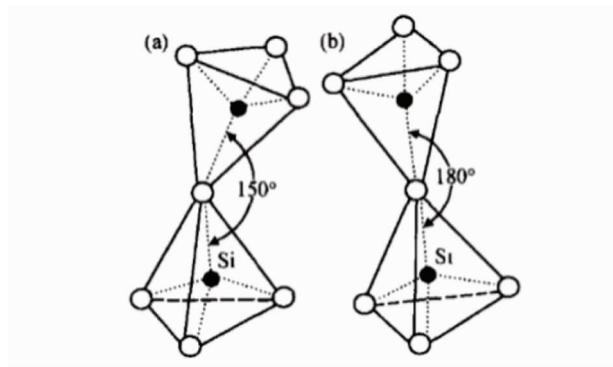


图 8 $\alpha - \beta$ 石英键角变化^[11]

继续增加样品的温度,在 600~660 °C 红砂岩小裂纹数量出现再一次增加,并且在 660~720 °C 红砂岩的微裂纹数量增长完成以后稳定在一个较高水平.判断是因为随着温度的继续增加,红砂岩内部有机物质析出,有机物的析出和在岩石中的迁移促使岩石中裂隙的形成与发展.

当温度在 720~840 °C,红砂岩的裂纹数量缓慢下降,判断是由于高温作用,部分胶结物与颗粒会开始发生相变而使得两者紧密黏结在一起,随着温度的继续增大,红砂岩胶结物与颗粒将因高温变为一个整体,导致了部分裂纹的消失.

当温度加热至 840 °C 之后,红砂岩的裂纹数量又出现增长,并且在 870 °C 以后大裂纹数量增加.分析主要由 2 个原因造成:(1)由于石英缓慢加热到 870 °C 左右会由 β 向 β -鳞石英转变,这个过程中体积会增加 16%^[11],体积的增加导致红砂岩结构内部的空隙不足以将石英膨胀量的部分消融,从而产生了裂缝;(2)温度的持续升高导致红砂岩的某些组岩矿物的熔融、升华,从而使得内部裂纹的进一步发展,许多小裂纹进一步发展成了大裂纹.

3 细观结构与线膨胀系数的相关性讨论

通常结构紧密的物质,热膨胀系数较大,而结构疏松或者类似于无定形的物质,热膨胀系数较小,这是由于结构疏松或无定形物质内部孔隙较多,当温度升高发生膨胀时,原子振幅加大,原子间距离增加时,膨胀量部分被结构内部的空隙所消融,表现为整个物体的宏观膨胀量较小,热膨胀系数较低^[12-13].

在常温~210°C 的初始升温阶段,由于试样内部温度较低,岩石内部水分先蒸发,矿物颗粒还未充分膨胀,因此在这个温度范围内线膨胀系数增长缓慢.在 210~400 °C 红砂岩中所含胶结物中矿物集合区发生了解离.而岩石的胶结物一般填充于粒间孔隙、附着于颗粒表面,堵塞着孔隙的喉道^[14-15].胶结物的解离使得红砂岩的孔隙度增大,裂缝的数量急剧增长,结构变得疏松,红砂岩矿物颗粒的一部分膨胀量被结构内部的空隙所消融,这是导致红砂岩在 210~400 °C 整体的宏观膨胀量仍然较小,线膨胀系数增长缓慢的主要原因.

在 400~530 °C,随着红砂岩矿物颗粒的进一步膨胀,其膨胀量逐渐填补了结构内部的空隙,红砂岩结构变得密实,因此在这个温度范围内红砂岩线膨胀系数的增长速度由开始的平稳增长逐渐转变为加速增长.

当温度达到 530 °C 时,红砂岩的结构变得较为密实,裂缝的数量及内部空隙较少,随着温度的进一步增加, α 石英转变成 β 石英体积急剧增大,其体积增长的部分无法被红砂岩结构内部的空隙所消融,这就会使红砂岩矿物颗粒之间产生巨大的热膨胀力,从而使得红砂岩在 530~570 °C 的线膨胀系数急剧上升.当热应力超过自身强度极限时,红砂岩出现了微裂纹,使红砂岩的结构再次变得疏松,从而又有空隙可以消融由于矿物颗粒膨胀而产生的体积.因此,在 575~600 °C 红砂岩的线膨胀系数开始急剧下降.

过了 600 °C 以后,红砂岩的线膨胀系数总体处在一个较低的水平.一方面是因为红砂岩的矿物颗粒基本得到了充分的膨胀;另一方面是由于随着温度的继续增加,红砂岩有机物质析出促使岩石中裂隙的形成

与发展,使得红砂岩的结构变得疏松,线膨胀系数较小。

在 870 °C 左右,由于石英由 β 向 β -鳞石英转变,这个过程中体积石英的体积增加了 16% 导致红砂岩的密实度增加,因此,在 870 °C 之后红砂岩的线膨胀系数有一定的上涨,但是由于 870 °C 之后红砂岩的某些组岩矿物的熔融、升华等现象,已经造成了岩石内部出现空洞和破坏区,因此红砂岩的线膨胀系数增幅并不是很大。

4 结论

1) 在 2 °C/min 的加热速率下,红砂岩试样的线膨胀系数在常温~400 °C 增长速度比较缓慢,在 400~530 °C 增长速度随着温度的升高而逐渐加快,在 530~570 °C 急剧上升,并且于 570~580 °C 达到顶峰,在 580~620 °C 又开始急剧下降,在 620~870 °C 红砂岩的线膨胀系数总体处于一个稳定的较低水平,870 °C 以上红砂岩的线膨胀系数有一个微弱上涨的趋势,之后逐渐趋于稳定。

2) 红砂岩随着胶结物的解离、矿物颗粒破碎导致裂纹数量增加,结构变得疏松,从而线膨胀系数减小。红砂岩随着颗粒膨胀、石英相变产生的体积增大,使得其膨胀量逐渐填补了结构内部的空隙,结构变得密实,从而线膨胀系数减小。

3) 当温度高于 870 °C 时,虽然石英由 β 相向 β -鳞石英转变,这个过程中体积会增加 16%,但是由于红砂岩微观缺陷、空洞和破坏区的大量出现,红砂岩的线膨胀系数增幅并不是十分明显。

参考文献:

- [1] SIEGESMUND S, SOUSA L, KNELL C. Thermal expansion of granitoids [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(2): 41.
- [2] KESHA VARZ M, PELLET F L, LORET B. Damage and changes in mechanical properties of a gabbro thermally loaded up to 1 000 °C [J]. Pure and Applied Geophysics, 2010, 167(12): 1511-1523.
- [3] ONIYIDE G O. Impact of temperature variation on the coefficient of thermal expansion of selected rocks from South African platinum mines in an unconfined conditions [J]. Innovative Systems Design and Engineering, 2019, 10(4): 8-15.
- [4] LIU J R, LI B Y, TIAN W, et al. Investigating and predicting permeability variation in thermally cracked dry rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 77-88.
- [5] ZHANG W, DAI W Y, CHIYODA N. Research on thermal shock resistance of mullite-bauxite-silicon carbide castable refractory [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2012, 31(2): 204-208.
- [6] 马占国,唐芙蓉,戚福周,等.高温砂岩热膨胀系数变化规律试验研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(1):121-126.
- [7] 康健,赵明鹏,赵阳升,等.随机介质固热耦合模型与高温岩体地热开发人工储留层二次破裂数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2005,24(6):969-974.
- [8] 康健,赵明鹏,梁冰.随机固-热耦合模型与岩石热破裂数值试验研究[J].岩土力学,2005,26(1):135-139.
- [9] 仇洪云,高德利,郭柏云.热膨胀系数对气体钻井井底岩石应力场的影响[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4):88-93.
- [10] 张岩,侯连华,崔景伟,等.鄂尔多斯盆地三叠系长7富有机质段岩石热膨胀系数随温度演化特征及启示[J].岩性油气藏,2022,34(4):32-41.
- [11] 孙强,张志镇,薛雷,等.岩石高温相变与物理力学性质变化[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):935-942.
- [12] 高贵波,钱春香,朱晨峰,等.粉煤灰对混凝土热膨胀系数的影响[J].东南大学学报,2006,36(增刊2):185-190.
- [13] 关振铎,张中太,焦金生.无机材料物理性能[M].北京:清华大学出版社,1992:119-131.
- [14] 吴晓东,刘均荣.岩石热开裂影响因素分析[J].石油钻探技术,2003,31(5):24-27.
- [15] 谭启,骆循,李仕雄,等.岩石热破裂研究进展评述[J].露天采矿技术,2006,21(6):16-19.