

文章编号: 1000-7598-(2007) 05-1021-05

石灰岩热损伤破坏机制研究

谢卫红¹, 高峰², 李顺才², 关祥慧²

(1. 徐州空军学院 机场工程系, 江苏 徐州 221000; 2. 中国矿业大学理学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 采用清华大学带扫描电镜的岛津 SEM 高温疲劳试验机系统, 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实时试验研究, 探讨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, 结合试验结果和利用位错、扩散蠕变的概念, 分析了岩石热损伤变形的破坏机制。结果表明在 500 °C 范围内的温度作用下产生的热裂纹主要为晶间裂纹。

关 键 词: 石灰岩; 温度; 热损伤; 破坏机制

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study on mechanism of thermal damage fracture for limestone

XIE Wei-hong¹, GAO Feng², LI Shun-cai², GUAN Xiang-hui²

(1. Department of Airport Engineering, Xuzhou Air Force College, Xuzhou 221000, China;

2. School of Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Under uniaxial compressive and tensile loading, limestone's meso-structure has been investigated by real-time under high temperature with advanced experiment instruments such as High Temperature Fatigue Testing System with Scanning Electron Microscope in Tsinghua University. Thermal damage evolution process, thermal crack growth and fracture characteristic of rock are discussed. The damage model of rock thermal crack growth is established. Combining test results with the concept of dislocation and diffusion creep, thermal damage deformation fracture mechanism of rock are researched. The results show that the thermal crack is intercrystalline crack mainly within the scope of 500 °C.

Key words: limestone; temperature; thermal damage; fracture mechanism

1 引 言

岩石是颗粒或晶体相互胶结或黏结在一起的聚集体, 在温度作用下的它宏观力学效应是一种从微观结构的变化导致其宏观力学性质改变的过程, 岩石的内部结构会发生明显的热损伤变形^[1]及各种物理和化学变化。张晶瑶等^[2]进行了高温条件下岩石结构特征的研究, 发现在高温 (600 °C) 条件下两种含铁石英岩的微结构均产生明显的损伤, 由此而形成的微裂隙导致矿石强度明显下降。王振波、姬秀文等^[3]利用电测及超声波测试技术进行了混凝土热损伤试验研究, 分析了温度载荷对混凝土结构的热损伤影响, 并解释了混凝土热损伤破坏机制。

F. HOMAND-ETIENNE and R. HOUPERT^[4]对 Senones 和 Remirement 两种不同粒度花岗岩在

20~600 °C 范围内热处理过试件扫描 (SEM) 微观分析裂纹长度、宽度、形状、密度、种类 (晶间、穿晶、晶内裂纹) 等变化特性, 定性和定量地研究了该岩石微观结构损伤对其力学性能的影响。通过压缩和拉伸试验比较分析, 解释了这些微观结构和力学参数值变化的可能原因是由于热引起花岗岩内的微裂缝所致, 其他一些文献亦表明^[5, 6]温度的作用能极大地使岩石的内部结构发生损伤。这些研究大多集中在温度效应对岩石宏观力学性能方面和加温冷却后再扫描的细观结构研究, 对更能揭示问题本质的岩石在温度作用时的细观结构损伤演化问题目前未见报道。针对不同温度对石灰岩微观结构的影响, 从损伤力学的角度, 本文运用 SEM 实时研究在不同温度作用下石灰岩内部损伤及破坏机制, 其结论对处理高温环境下的岩土工程问题具有一定

收稿日期: 2005-06-13

修改稿收到日期: 2005-09-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 项目 (No. 2002CB412705); 创新群体项目 (No. 50221402) 资助。

作者简介: 谢卫红, 女, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事防护工程, 岩石损伤与断裂力学等方面的研究和教学工作。E-mail: xie621022@126.com

的指导意义。

2 岩石热损伤演化试验

热细观试验所采用的设备是清华大学带扫描电镜的岛津 SEM 高温疲劳试验机系统。该套系统可以实现外部应力状态与内部微细观结构变化相对应,是目前国际上最先进的试验设备。本文利用该套系统实时观测了石灰岩在不同温度作用下的热损伤变形破坏过程。由于试验是在高温和载荷同时作用下实时观测微结构变化,难度较大,对试样尺寸有严格要求和限制,如图 1 所示。因试样尺寸和材料的特殊性,加工试样非常困难,要求所选岩石强度适中、粒度小、少杂质,试样取自河南济源市古生代泥质石灰岩,主要含量为(Ca, Mg) CO₃。该材料粒度很细,结构致密。为了易于观察裂纹的起萌、损伤、扩展路径与方向,先在加工好的试样长度方向的中点处预制双边裂纹。对于拉伸试样,用锯齿状刀片加工缺口(裂纹)。常温下试样缺口(裂纹)尺寸为:深度 $a \leq 300 \mu\text{m}$,宽度 $b \approx 50 \sim 100 \mu\text{m}$;高温下试样双边缺口(裂纹)尺寸为: $a \leq 100 \sim 200 \mu\text{m}$, $b \leq 80 \sim 100 \mu\text{m}$ 。对于压缩试样用细钢丝加工对称缺口(裂纹),双边缺口(裂纹)尺寸为: $a \approx 100 \sim 200 \mu\text{m}$, $b \approx 50 \sim 100 \mu\text{m}$,包括常温和高温两种温度下压缩和拉伸试验,石灰岩的弹性模量为 52 GPa,泊松比为 0.276,这里深度是长度,宽度是圆弧度。

3 岩石热损伤演化及破坏特征

3.1 岩石单向压缩下热损伤演化及破坏特征

比较岩石热处理后的应力-应变曲线,整体呈上凸形,如图 2 所示。其过程可分为 3 段:第一段为线弹性阶段,此段曲线整体呈直线型,应力随应变的增加线性增加;第二段曲线整体呈上凸形,应变随应力非线性增加;第三段曲线整体呈直线形,应力急剧增大直到破坏;随着温度的增加,岩石的脆性减小,塑性变形增加。

在压缩情况下微裂纹的弯折扩展是脆性材料轴向劈裂的主要原因:(1)在应力 σ 从 0 升至 5.71 MPa 乃至 14.6 MPa 阶段,扫描图像未见明显热裂纹,这一阶段仅存在初始的微裂纹并不扩展,这是石灰岩试样热损伤弱化阶段。(2)在应力 σ 从 14.6 MPa 升至 25.85 MPa 这一阶段,应变增加很快,扫描图片均未有明显热裂纹的出现,但原有裂纹更加突出明显,可以认为试样处于热裂纹萌生的

前兆阶段。(3)当应力 $\sigma = 35.99 \text{ MPa}$ 时,试样裂纹缺口处出现热裂纹,裂纹为张拉型,见图 3。通过扫描屏幕,长度可准确测量,热损伤开始演化。(4)在应力 σ 从 35.99 MPa 升到 62.20 MPa 时,已出现的裂纹完全贯通并且继续伸长变宽,同时出现与水平方向成小角度的分叉裂纹,这一阶段可认为是损伤开始演化并缓慢增长的阶段。(5)当应力 σ 从 62.20 MPa 升到 72.57 MPa 时,热损伤急剧增大,裂纹扩展速度加快,热裂纹的长度和宽度都急剧增加。当加载到 $\sigma = 85.74 \text{ MPa}$ 时,试样发生热损伤破坏,宏观裂纹形成,试样达到破坏强度而断裂破坏。由于岩石断裂速度很快,试样崩溃,未能在破坏时刻扫描到图片。

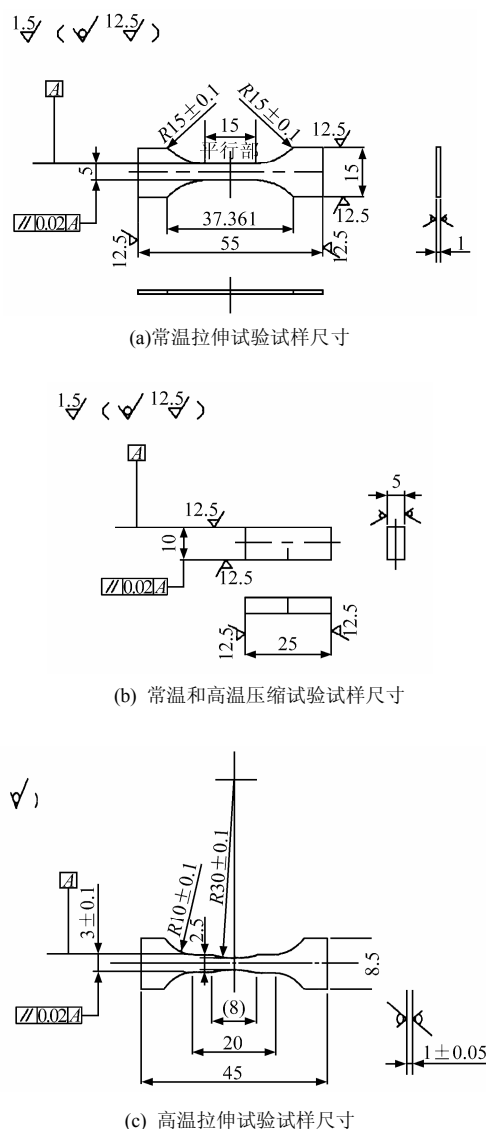


图 1 常温和高温拉伸,压缩试验试样尺寸(单位: mm)

Fig.1 Sample's size under room temperature and high temperature compressive and tensile experiment (unit: mm)

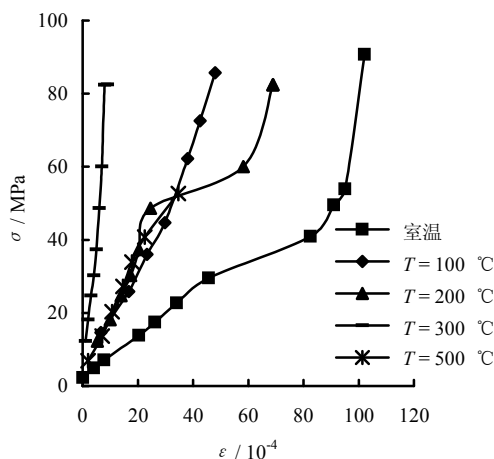


图2 石灰岩在压缩加载下不同温度下应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curve in uniaxial compression under different temperature

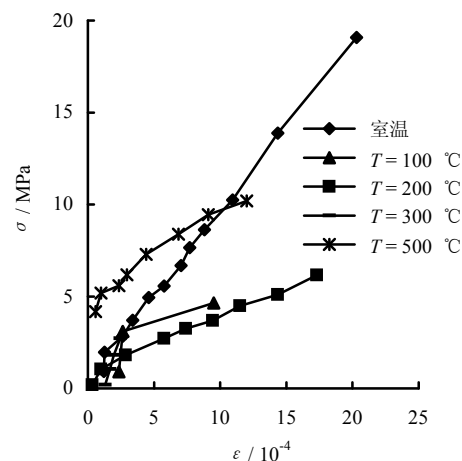


图4 石灰岩拉伸时在不同温度下应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curve in uniaxial tension under different temperature

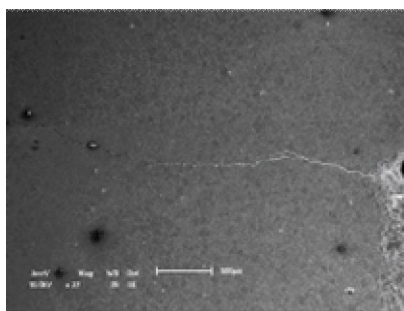


图3 恒温 100 °C 时预制裂纹处产生裂纹扫描图
($\sigma=35.99$ MPa)

Fig.3 SEM pictures of prefabricated flaw's crack creating under temperature was 100 °C

3.2 岩石单向拉伸时热损伤演化及破坏特征

高温下的拉伸试验,当升温速率、升温值与压缩试验相同时岩石在温度载荷作用下得到的应力-应变曲线近乎为直线,如图4所示。但从细观损伤力学的角度来看,岩石的热损伤变形对应于岩石中热裂纹的弹性变形、稳定扩展、失稳扩展和汇合等过程:

(1) 在拉伸载荷和温度作用下,当拉伸应力小于临界拉伸应力时,岩石材料内部没有损伤演化,所有的微裂纹都只发生弹性变形,不发生扩展。

(2) 在拉伸载荷和温度作用下,当拉伸应力超过临界拉伸应力,但低于岩石材料的最大承载应力时,材料内发生连续的分步损伤。随着温度和应力的增大,热裂纹发生稳定扩展,这时应力-应变关系表现出非线性和各向异性性质。

(3) 在拉伸载荷和温度作用下,当拉伸应力达到最大承载应力后,裂纹发生失稳扩展,岩石细观结构发生从连续损伤到损伤局部化的过渡,其承载能力迅速下降,裂纹迅速扩展到破坏。

4 岩石热损伤破坏机制及模型

4.1 岩石热裂纹成核位错机制

温度升高会增加岩石内部的热激活能、位错源,降低各组成部分或质点间的凝聚力,使岩石和矿物质易于变形。在试验研究中发现,该石灰岩试件在裂纹扩展之前发生了有限的塑性流动,可是一旦整个裂纹开始扩展,其裂纹从外表上看来它和高脆性断裂是一样的。但在初始阶段,流动过程能起到承担、提供、有时甚至产生裂纹核的关键作用,因此该材料的强度与屈服特性关系密切。滑移面上的剪应力分量至少与裂纹面上的张应力分量一样重要,这一点可以从裂纹在压力下几乎和在张力下一样容易成核而看出来。当矿物晶体所受载荷超过屈服点后位错源开始起作用,如果形成的位错阵向外扩散运动受到阻碍时,则产生位错塞积,而塞积的相邻位错间的相互斥力造成了应力集中。总之,热裂纹在石灰岩材料中的扩展是一个复杂的过程,包含着大量随机微观事件。在每个矿物微晶处,按照其局部的具体条件,到底发生晶内裂纹、晶间裂纹还是穿晶裂纹,主要还是受细观结构和外部环境如外力和温度等因素影响。从试验中发现,不管是拉伸还是压缩试件,无论在常温还是在温度作用下,都是由一条裂纹贯穿而破坏,从外观上看来,这条裂纹是脆性裂纹,这可以从位错力学的性质来解释,在裂纹端部,位错繁殖源自然地起显著作用,这些繁殖源在裂纹尖端的变形区内产生高密度的滑移带,它们在微结构障碍处依次塞积,并在主裂纹前缘引起次生断裂。随后,这些次生断裂扩展,并且与主裂纹会合直至到破坏。

4.2 岩石扩散蠕变滑动机制

扩散蠕变是高温时的一种变形机制，它是在温度作用下空位的移动造成的，其是指变形过程中由岩石或矿物中的点缺陷（空位、杂质等）和质点（离子、原子）的扩散和运动而引起应变的作用过程。在应力作用下，晶体中的空位趋向集中于晶体的界面，或晶体内其它有利于空位聚集的部位，从而形成空位密度梯度。在一定的温度和应力条件下，当空位密度足够大和空位的运移能力足够强时，空位就会从高密度的部位向低密度部位扩散。空位的扩散，实质上也就是原子或离子的扩散。空位的扩散与原子或离子的扩散(或运动)沿着相反方向进行，并由此引起了矿物或岩石的变形。空位和原子或离子的扩散(或运动)可以是沿着颗粒边缘发生，此时，称其为由晶格控制的蠕变，即 Nabarro-Herring 扩散蠕变（图 5），扩散运动也可以是沿着晶粒间的区域进行，此时称其为晶粒边界蠕变，即 Coble 蠕变。

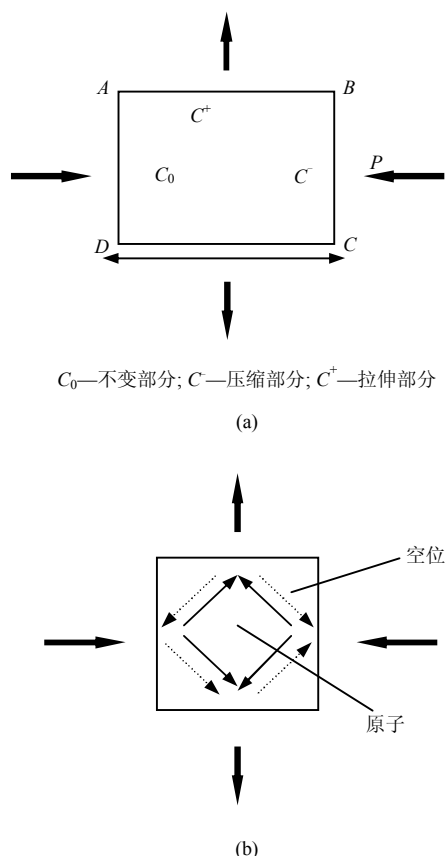


图 5 Nabarro-Herring 蠕变示意图
Fig.5 Sketch map of Nabarro-Herring creep

扩散蠕变是在较低应力及较慢应变速率下蠕变机制。位错滑动是指由位错在滑移面上运动而产生变形的机制，主要表现为晶内滑动，位错蠕变是指由位错的攀移或交滑移而引起蠕变机制，主要表

现为恢复和再结晶。扩散蠕变与位错蠕变及位错滑动相比，所需应力较低^[7]。在扩散蠕变中，Nabarro-Herring 蠕变比 Coble 蠕变所要求的温度要高。扩散蠕变与颗粒边界滑动有着密切的联系。颗粒边界滑动是指颗粒间的相对运动，是塑性变形，尤其是温度下塑性变形的一种作用方式，也可以说是一种变形机制。颗粒边界滑动的驱动力主要来自于扩散蠕变。在这种情况下，岩石和矿物的应变主要是由物质的迁移运动所引起的。扩散蠕变与颗粒边界滑动之间的关系是先由颗粒边界滑动产生空位，再由空位的运动形成扩散蠕变。相反，由空位的运动也可引起颗粒边界的滑动，较高的温度和较慢的应变速率有利于颗粒边界滑动。

对于本试件石灰岩材料，该岩石的断裂破坏主要为沿晶断裂，试验结果显示：生成的晶间裂纹优于晶内裂纹且占控制地位，晶内裂纹长度由于它的小颗粒尺寸受到限制。观察发现，随着温度的升高，裂纹易在矿物颗粒边界发展，主要产生晶间裂纹（即易产生沿晶裂纹），这是由于颗粒间的胶结物随着温度的升高，发生软化，构成了晶体中的相对薄弱面，晶界间强度随温度变化的趋势大于晶粒强度变化的趋势，形成沿晶裂纹比形成穿晶裂纹耗散的能量要少，因而发生晶间裂纹的可能性大。

4.3 岩石热裂纹生长损伤模型

本次试验中，由于对试件预制了缺口，缺口周围必然为弱强度区，在力和温度作用下会发生连续损伤，但是损伤到一定程度，将在某一方向上发生损伤的局部化。裂纹尖端的损伤可认为由颗粒边界间位错滑移所致，每个颗粒的位移如图 6 所示。

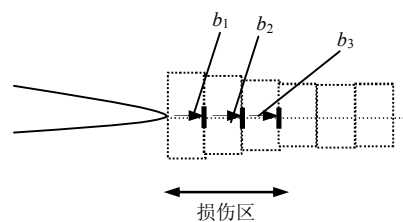


图 6 裂纹前端轴向颗粒边界位错滑移
Fig.6 Grain boundary location slip in crack tip axial

每个颗粒点的 Burgers 矢量模和所对应的总位移为

$$u_n = \sum_{j=n}^{\infty} b_j \quad (1)$$

式中： u_n 为第 n 个颗粒的位移； b_j 为离裂纹尖端第 j 个滑移的 Burgers 矢量模。在力和温度作用下颗

粒边界滑动位错使得材料产生损伤。裂纹的扩展可认为是裂纹尖端附近的损伤区损伤累积达到临界状态的直接结果。在裂纹扩展方向上, 各单元块都受到不同程度的损伤, 显然, 最靠近裂纹缺口处的单元块内的损伤程度最为严重, 首先达到损伤临界状态而断裂。裂纹的扩展因损伤区过程而发生。如图7所示热损伤沿着位于裂纹之前的连续晶粒的边界产生。这样裂纹的扩展速度就由损伤区孔洞的生长特性以及裂纹尖端应力场的大小所决定。具体地说就是缺口周围晶间孔洞凝聚先于主裂纹的发展, 孔洞凝聚与增长直到它们最终汇聚于裂纹的尖端, 从而引起缺口处裂纹的萌生和扩展。

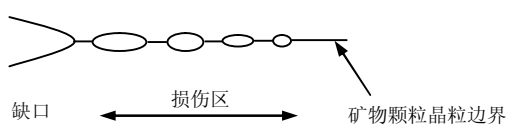


图7 缺口处晶间孔洞凝聚损伤模式

Fig.7 Porosity agglomeration between crystal damage mode of prefabricated flaw's crack

图8为晶间孔洞在力和高温作用下由均匀孔洞(图8(a))到类似裂纹的孔洞(图8(b))直至发展到晶间裂纹扩展破坏(图8(c))。

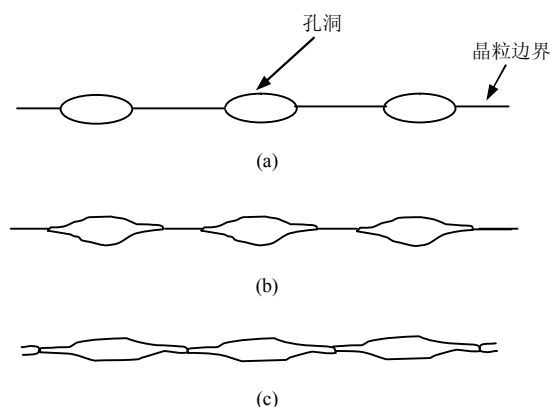


图8 晶间孔洞凝聚扩展成裂纹

Fig.8 The crack of porosity agglomeration between crystal propagation

5 结 语

岩石实时加热、加载的细观损伤演化过程与升温冷却后的损伤演化过程不同。在本次试验温度范围内, 温度不足以导致裂纹扩展, 只是温度的循环加载可以导致微裂纹数目的增长, 温度载荷导致裂纹端应力集中较机械载荷作用要微弱。

采用位错理论分析研究了岩石热变形的微观损伤特性。在高温作用下产生的热裂纹主要为晶间裂纹, 晶界之间形成空洞, 空洞的相互吞并和长大形成微裂纹。裂纹的扩展是裂纹尖端附近的损伤区内损伤累积达到临界状态的直接结果。

参 考 文 献

- [1] Hettema M H H. A microstructural analysis of the compaction of claystone aggregate at high temperature[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1999, 36(1): 57—68.
- [2] 张晶瑶, 马万常, 张凤鹏, 等. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 1996, 17(1): 5—9.
ZHANG Jing-yao, MA Wan-chang, ZHANG Feng-peng, et al. On rock structure character under high temperature[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1996, 17(1): 5—9.
- [3] 王振波, 许道远, 王向东, 等. 试验研究混凝土的热损伤[J]. *河海大学学报*, 2001, 29(6): 94—98.
WANG Zhen-bo, XU Dao-yuan, WANG Xiang-dong, et al. Experimental study on concrete thermal damage[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(6): 94—98.
- [4] HOMAND-ETIENNE F, HOUPERT R. Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(2): 125—134.
- [5] Jamaluddin A K M. Formation heat treatment(FHT): A stage of the art technology for near wellbore formation damage treatment[A]. *6th Annual Technical Meeting of The Petroleum Society of CI MIN Banff*[C]. Canada: Alberta, 1995.
- [6] Jamaluddin A K M. Field testing of the formation heat treatment process[A]. *47th Annual Technical Meeting of The Petroleum Society in Calgary*[C]. Canada: Albert, 1996.
- [7] 陈进化. 位错基础[M]. 上海: 上海科学出版社, 1984.