

# 温度 - 拉应力共同作用下砂岩破坏的断口形貌

左建平<sup>1, 2</sup>, 谢和平<sup>2, 3</sup>, 周宏伟<sup>1, 2</sup>, 方园<sup>2</sup>, 范雄<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学 岩石力学与分形研究所, 北京 100083;  
3. 四川大学, 四川 成都 610065)

**摘要:** 通过扫描电镜研究温度 - 拉应力共同作用下砂岩破坏的断口形貌。通过研究不同温度影响后的解理断口、准解理断口、疲劳断口、非主断裂面的二次裂纹和碎裂断口、局部延性断口、沿晶断口及一些奇特的断裂花样, 证实温度对砂岩断裂的微观机制产生了影响, 随着温度的升高, 砂岩的断裂机制由以局部脆性断裂机制为主向局部脆性和延性耦合断裂机制转变。低温下的断口较为光滑平坦, 高温下的断口较为粗糙, 表明发生过塑性变形, 并且高温断口形貌更为多样和更为复杂, 这主要是受到高温影响后, 岩石内部矿物颗粒、晶体和原子热运动加剧, 当岩石受到外部载荷作用时断裂就有可能出现在更大范围的位置。通过一些简单的断裂机制示意图对部分断口形貌进行解释, 并报道了一些特殊的岩石断口形貌。综合认为金属断口学研究所发现的微观断口形貌特征几乎都可以从岩石断口形貌中找到, 但由于岩石是多晶体地质材料, 高温影响下岩石的断口形貌还将更为多样和更为复杂。

**关键词:** 岩石力学; 砂岩; 温度 - 拉应力共同作用; 断口形貌; 扫描电镜

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)12 - 2444 - 14

## FRAC TOGRAPHY OF SANDSTONE FAILURE UNDER TEMPERATURE-TENSILE STRESS COUPLING EFFECTS

ZUO Jianping<sup>1, 2</sup>, XIE Heping<sup>2, 3</sup>, ZHOU Hongwei<sup>1, 2</sup>, FANG Yuan<sup>2</sup>, FAN Xiong<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*  
2. *Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*  
3. *Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China*)

**Abstract:** The scanning electron microscope(SEM) is employed to study sandstone fractography under thermo-mechanical coupling effects. Through several fracture morphologies at different temperatures, such as cleavage, quasi-cleavage, fatigue, secondary and fragmentary, local ductile, intercrystalline fracture and some special fractographies, the temperature has been confirmed to influence actually micro fracture mechanism of sandstone. The fracture mechanism will transfer from brittle fracture mechanism to brittle-ductile coupling fracture mechanism with the increasing temperature. At low temperatures, the fractography of sandstone is quite smooth; but at high temperatures, the fractography is rougher, and a great deal of plastic deformation is observed obviously. Therefore, the fractography is more various and complicated after high temperature effects. The reasons can be summarized as follows. The thermal motion of mineral particle, crystals and atom will be strengthened after temperature effects; and sandstone will fracture at more widely positions. Several fracture mechanism models had been used to interpret some failure phenomena. In addition, some novel rock fractographies were reported. At last,

**收稿日期:** 2007 - 04 - 09; **修回日期:** 2007 - 07 - 26

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707); 国家自然科学基金资助项目(50674092, 50221402, 50490272, 50579042, 50620130440, 50639100); 中国科学院岩土力学重点实验室资助课题项目(Z110606); 中国博士后科学基金资助项目(20070410577); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题项目(2007 - 08)

**作者简介:** 左建平(1978 - ), 男, 博士, 1999年毕业于长沙铁道学院机电工程学院车辆工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石力学、损伤、断裂及数值计算等方面的教学与研究工作。E-mail: zjp@cumtb.edu.cn

it is concluded that any micro fractographies which has been reported in metallic fractography can also be found in rock fractography. Moreover, rock fractography is more various and more complicated because of rock own characteristics and thermal-mechanical coupling effects.

**Key words:** rock mechanics; sandstone; temperature-tensional stress coupling effects; fractography; scanning electron microscope(SEM)

## 1 引言

断口形貌学(fractography)是研究材料破坏断口的科学<sup>[1~3]</sup>。金属材料断口的研究起步早,比较成熟,而且应用广泛,但对于岩石材料断口的研究只是近 30 a 的事,且由于岩石均质性较差,对其研究略显困难<sup>[4~8]</sup>。事实上,岩石的断裂与其内部的微结构及微缺陷是紧密相关的,如果把岩石内部的微缺陷与工程上的节理、断层相比拟,再把实验室尺度岩石与工程岩体相比拟,两者的相似比大致在同一数量级上。因此研究实验室岩石破坏与微缺陷的关系和研究工程岩体破坏与节理、断层的关系实际上具有相似性,差别在于尺度的不同,相应会带来尺度效应。岩石的断裂受到内部矿物成分和结构、微缺陷、外部载荷、温度等因素的共同影响,并与加载历史有关。而岩石断口记录了岩石断裂时的不可逆变形,以及裂纹的萌生、扩展直至断裂的信息,因此可通过对断口的分析来定性研究岩石断裂的微细观机制,从而揭示岩石断裂的性质及破坏规律。反过来,把分析得来的信息反馈到工程实际中去,就有可能更好地指导生产实践。国内李先炜等<sup>[9]</sup>率先开展这方面的研究,他们通过透射电镜和扫描电镜观察研究了多种载荷条件下岩石的破坏断口,随后很多学者对不同载荷下的断口进行了研究,如静载与动载断口<sup>[10~12]</sup>、岩爆后的断口<sup>[13, 14]</sup>、高压水射流断口<sup>[15]</sup>、不同围压及水压条件下的断口<sup>[16, 17]</sup>,这些研究主要是从微观角度出发的。D. Bahat 等<sup>[1, 18]</sup>对工程尺度上的地质断裂表面的研究认为,通过断口形貌学的研究可近似推测断裂的起源、断裂扩展的模式及方向,甚至可以推测出亿万年前的古应力场的大小。最近也有研究<sup>[19~22]</sup>表明,岩石的断裂表面具有分形特征。

以上研究多是对室温情况下的岩石断口的研究,对受不同温度影响后的岩石断口研究较少。作者在对不同温度影响后的砂岩的强度特性<sup>[23]</sup>及热开裂特性<sup>[24]</sup>进行了研究后,又借助金属断口学的研究方法研究了不同温度影响后的砂岩断口,并观察到很多未曾报道的断口形貌。

## 2 试验情况介绍

砂岩试样取自平顶山煤业集团公司十矿,为细粉砂岩,试件的具体尺寸及形状见图 1。拉伸试验是在中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室的岛津 SEM 高温疲劳试验系统上完成的<sup>[6]</sup>。试验采取先升温后加载的试验流程,设计升温速率为 5 °C/min,试验温度点包括室温(25 °C), 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C 和 300 °C。每个温度点进行了 3 次成功的试验。试验过程中,由伺服控制器自动加载直至砂岩试件被拉断,拉伸方向如图 1 中箭头所示。拉伸后的断口经过 JSM - 5410LV 扫描电镜扫描分析,获得受不同温度影响后的断口形貌。

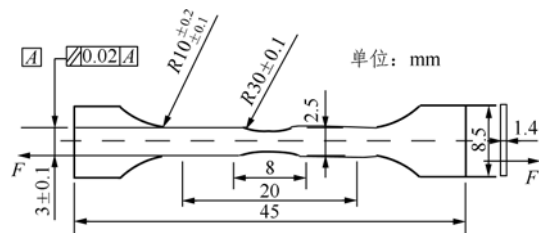


图 1 试件尺寸和形状

Fig.1 Size and shape of sample

## 3 胶结物的断裂

X 衍射分析结果表明,该砂岩的主要成分是:石英约 54.7%、钾长石 17%、方解石 2%、白云石 3.6%、菱铁矿 3.1%和黏土胶结物 19.6%。在外部载荷的作用下,砂岩的最终断口发生在黏土胶结物上及其与矿物颗粒的交界处,少数发生在矿物颗粒上。典型的胶结物断口形貌如图 2 所示。黏土胶结物的断口形貌较为复杂,基本上没有什么规律,因此本文不详细讨论。

## 4 解理断口

砂岩含有多种矿物晶体,因此断口形貌具有晶

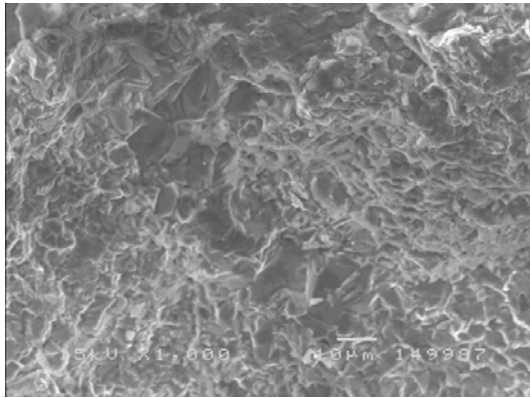


图2 典型的胶结物断口形貌

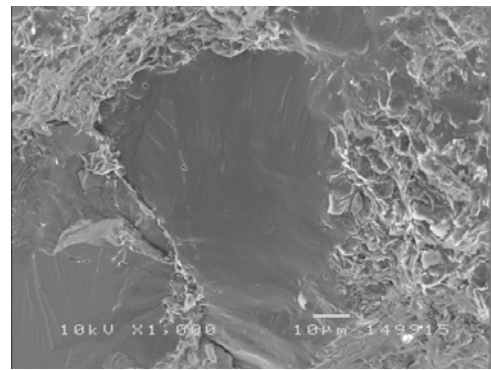
Fig.2 Typical fractography of clay cements

体材料断裂所拥有的共同特征。一些研究<sup>[9, 11]</sup>指出, 室温岩石断口存在大量的解理断口, 一般情况下, 解理台阶平行于裂纹扩展方向, 并垂直于裂纹面。因为这样形成的额外自由表面最小, 因而消耗的能量也最小, 这也被分形理论所证实<sup>[20]</sup>。解理裂纹多起源于矿物颗粒边界以及矿物颗粒与黏土胶结物的边界, 少部分起源于晶界, 这主要是矿物颗粒间的胶接强度远低于晶粒间的强度。由于岩石矿物颗粒或矿物晶体的取向是无序的, 解理断口上的结晶面微观上呈现无规则取向和结晶状小刻面形状, 因而解理断口会由于解理裂纹沿不同取向节理面扩展, 裂纹相交成具有不同特征的花样, 比较常见的有河流花样和台阶状花样等。

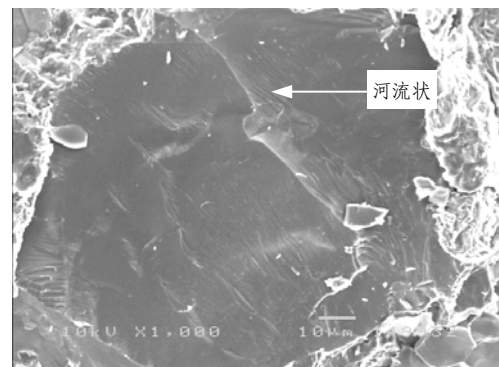
### 4.1 河流花样

由于砂岩是多晶体材料, 且各矿物晶体颗粒取向无序, 解理在某一颗粒(或晶粒)内发生或穿过一个颗粒(或晶粒)向相邻颗粒(或晶粒)传播, 均会造成解理在不同的结晶面上产生解理裂缝, 而这些解理裂缝相交即会形成台阶。在扫描电镜下这些解理台阶呈现出形似地球上的河流状形貌, 故称其为河流花样, 如图3所示。这些花样多起源于矿物颗粒或晶粒的边界, 根据河流的流向可大致判断出裂纹扩展方向并由此找出裂纹源。通常由于颗粒的变形不协调, 向颗粒边界扩展会消耗更少的能量, 因此有些小河流会向颗粒边界分散扩展, 如图3(b)所示; 解理裂纹在扩展过程中为了尽量减少能量消耗, 有些小河流会逐渐合并形成大河流, 如图3(c)所示。

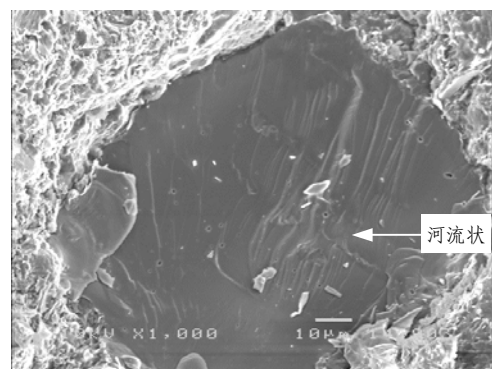
河流花样的密度受应力状况和温度的影响。比较不同温度影响后的解理断口可知, 温度低于 100 °C 时, 断口形貌比较光滑, 河流花样不明显, 如图3(a)所示; 而温度达到或超过 150 °C 时, 断口形貌较粗糙, 河流花样更为明显, 如图3(b), (c)所示。从图3



(a) 试件 30 °C - 2(×1 000)



(b) 试件 150 °C - 1(×1 000)



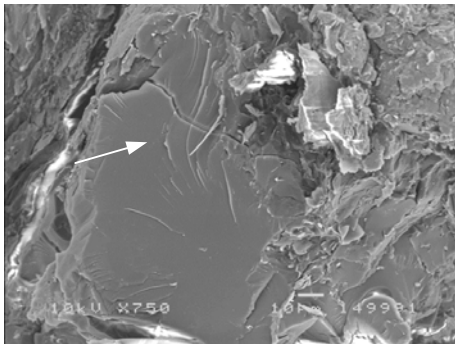
(c) 试件 300 °C - 3(×1 000)

图3 不同温度下砂岩断口的河流花样

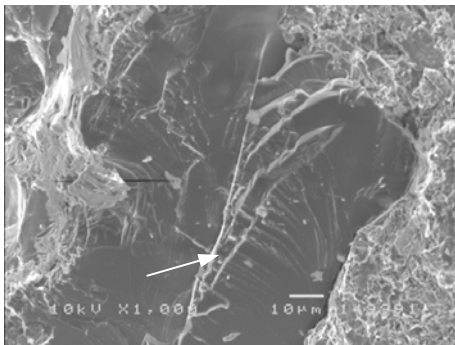
Fig.3 River fracture patterns of sandstone fracture at different temperatures

也可看出, 温度低于 100 °C 时, 河流花样多起源于颗粒内部, 在裂纹初始扩展阶段, 解理断口光滑平坦, 扩展到颗粒中间时, 开始出现河流花样, 随后河流花样会逐渐消失, 并且河流花样范围小, 不明显, 这主要还是低温下岩石的脆性断裂的表现; 温度高于 150 °C 时, 河流花样多起源于颗粒边界, 随着裂纹的扩展, 河流花样会遍布整个矿物颗粒, 与低温河流花样相比, 其范围更大, 表面也更粗糙, 局部表现出大的塑性变形。这是由于高温下砂岩内部矿物颗粒、晶体和原子热运动加剧的缘故。

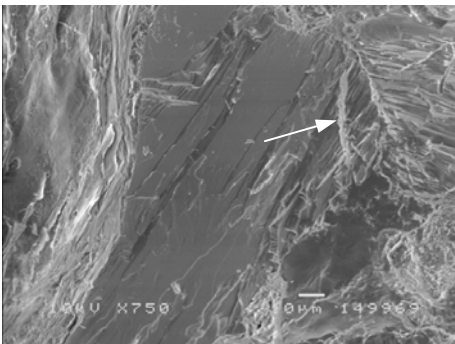
河流花样在扩展过程中遇到倾斜晶界、扭转晶界和普通大角度晶界时河流性态会变化。裂纹与小角度倾斜晶界相交时，河流连续地穿过晶界，如图 4(a)所示。晶界两侧晶体取向差小，其解理面也只倾斜一个小角度，因此，裂纹穿过时河流花样顺延到下一个晶粒。河流花样穿过扭转晶界时将发生河流的激增，扭转晶界又称孪晶晶界，两侧晶体以晶界为公共界面旋转了一个角度，因此解理裂纹不能简单地穿过晶界，必须重新形核后才能沿新的解理面扩展，由此造成晶界处河流花样激增，如图 4(b)所示。裂纹穿过普通大角度晶界时，由于晶界位错密度高、位向差大，也会出现河流激增的现象，如图 4(c)所示。



(a) 穿过小角度晶界(试件 250 °C - 3, ×750)



(b) 穿过扭转晶界(试件 200 °C - 1, ×1 000)



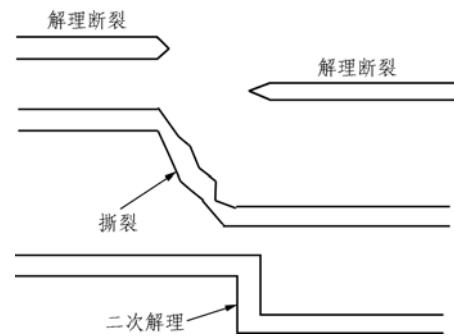
(c) 穿过大角度晶界(试件 200 °C - 3, ×750)

图 4 穿过不同角度晶界的河流花样

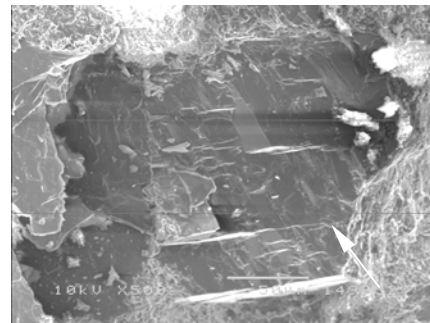
Fig.4 River fracture patterns across grain boundaries with different angles

### 4.2 台阶花样

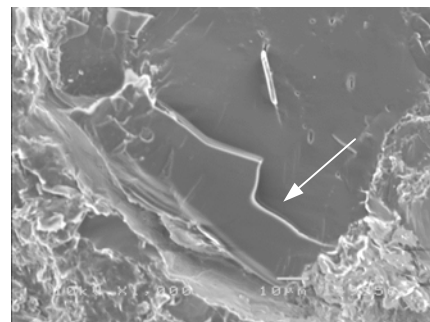
两个不在同一平面上的解理裂纹通过与主解理相垂直的二次解理或者撕裂作用会形成解理台阶。二次解理即解理台阶的形成是在一个晶体学平面发生解理的结果，通常形成的台阶较为光滑；而撕裂作用是指在快速高能量释放下，连接部分由于拉应力或者剪切作用而破断，其产生的台阶形貌较为复杂多样，通常不光滑，这一方面是由于解理裂纹之间可能产生较大的塑性变形，另一方面是撕裂力和岩石的非均质性造成的。实际解理断裂中二次解理面与撕裂方式经常同时存在，其机制示意图可用图 5(a)表示。从图 5(b)和(c)中箭头所示可看出解理台阶的高度大小不等，小的只有几微米，高的可达 20~30 µm，解理台阶的高度主要受到岩石材料自身性质的影响，温度对其也有一定影响。



(a) 撕裂或二次解理形成台阶机制示意图



(b) 典型撕裂台阶断口(试件 150 °C - 2, ×500)



(c) 典型二次解理台阶断口(试件 200 °C - 2, ×1 000)

图 5 解理台阶形成机制示意图及断口形貌图

Fig.5 Sketch of form mechanism of cleavage step and fractography

### 4.3 层状结构面撕裂断口

由于长期的地质构造运动，砂岩内部常有一些广泛发育的层状结构面，它由不连续面、不等轴矿物的优选方位和薄片状矿物组成，或者由某些显微构造组合所确定，在地质学上有很多意义相似的术语，如面理、层理和不连续结构面等，这些术语严格讲含义是不同的，各具特点，这里根据其所共有的“层状”特性，笼统称之为层状结构，如图6所示，有颗粒大小的分层、不同组分的分层、近平行的密集不连续面和颗粒界面优选方位，真实岩石的内部结构通常是由这4种结构组成，或者是它们的组合体，甚至更复杂。本文把由于这种层状结构断裂后形成的断口称为层状结构面撕裂断口，也是一种脆性解理断口，如图7所示。层状结构面撕裂断口的形成机制通常是：在外部载荷及温度的作用下，裂纹容易在层状间起裂，由于岩石材料的脆性及强非均质性，再加上层理之间比较薄弱，内部又存在一些杂质、第二相物质，这容易导致裂纹在扩展过程中改变方向，从而在层状结构之间产生撕裂作用，形成层状结构面撕裂断口，它是岩石地质材料所特有的现象，在金属断口中很少见。层状结构面撕裂断口的形成与撕裂台阶断口的形成机制有相似之处，但它形成的机制很大程度是由于层理及其中间的物质较薄弱的缘故，从而形成类似片状结构断口。

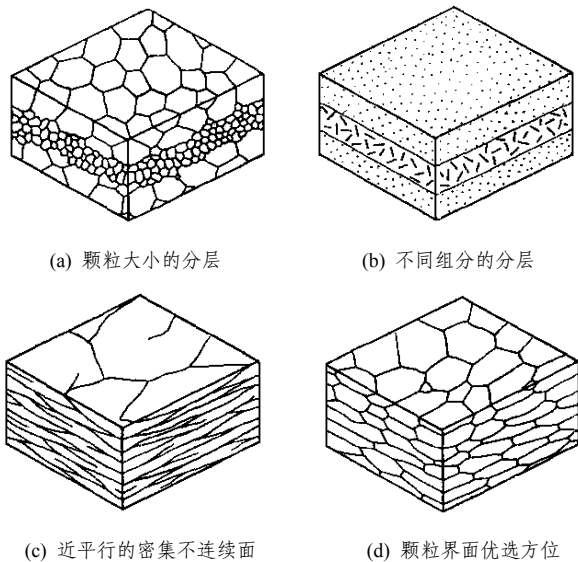
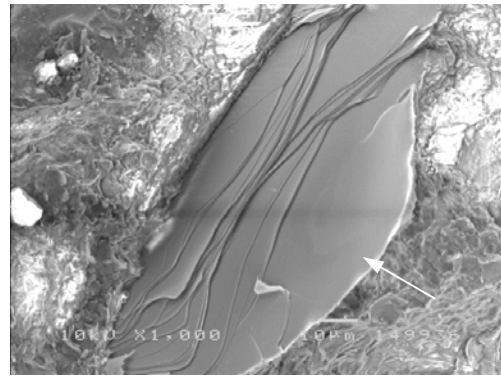


图6 岩石内部可能的层状结构示意图

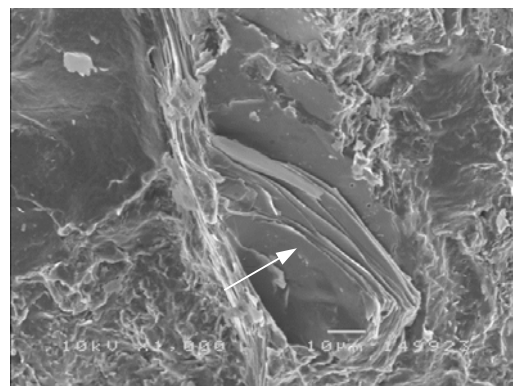
Fig.6 Sketch of probable laminated structures in rock

### 4.4 “雾区”断口

该类断口的形成是由于某一矿物颗粒处于其他矿物颗粒及胶结物包围中，在颗粒边界区由于应力集中首先出现裂纹，然后裂纹由矿物颗粒的周边向



(a) 试件 25 °C - 1(×1 000)



(b) 试件 150 °C - 1(×1 000)

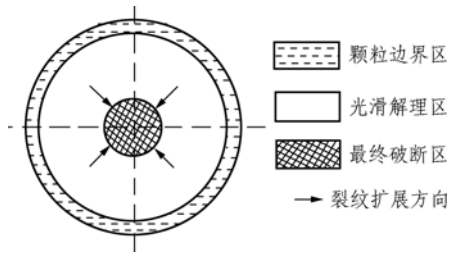
图7 层状结构面撕裂断口

Fig.7 Tearing fractures of laminated structure

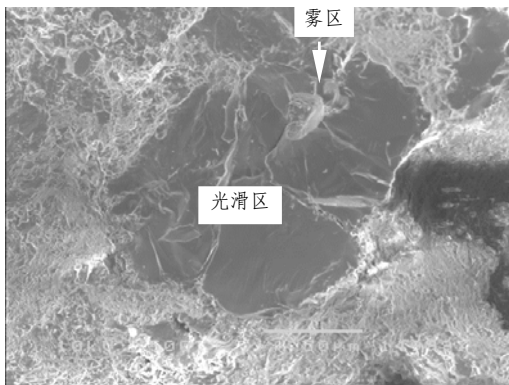
颗粒内部扩展，此时裂纹的扩展区域即为“光滑解理区”，当裂纹扩展到中心位置时，颗粒完全丧失承载能力，导致突然断裂，形成“最终破断区”，与光滑解理区相比该区较粗糙，所以称其为“雾区”(mist)，形成机制示意图如图8(a)所示。该类断口在金属材料的带缺口的圆柱形试件拉伸断口中最常见，在岩石微观断口中还少见报道。它通常要求岩石内部矿物颗粒的横截面较大，这样可以在内部形成平面应变条件。事实上作者在 200 °C 和 300 °C 的温度下才在两个试件 200 °C - 2 和 300 °C - 2 发现此类断口，如图 8(b)和(c)所示，因此除了前面的条件，还需要一定的温度条件，即让岩石有一定的塑性变形能力。

## 5 准解理断口

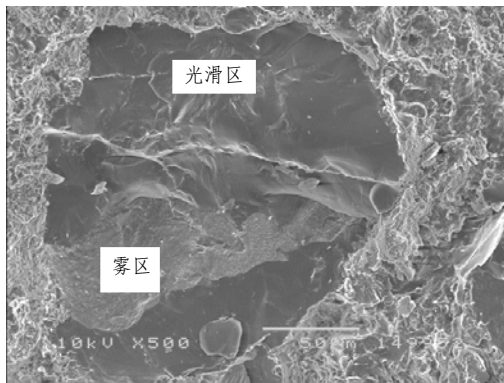
准解理断裂属于脆性穿晶断裂，断口形态与解理断口形态很相似。准解理断口的断裂过程也是沿着一定的结晶面扩展，断口上一般既有河流花样，又有较大塑性变形产生的撕裂棱，通常认为塑性变形量大于解理断裂又小于延性断裂。由此可认为准



(a) “雾区”断口形成机制示意图



(b) “雾区”断口 1(试件 300 °C - 2, ×500)



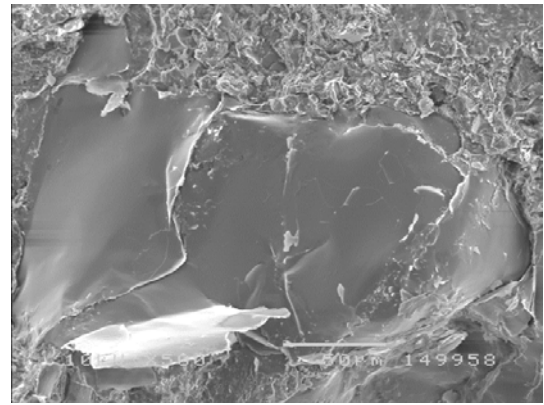
(c) “雾区”断口 2(试件 200 °C - 2, ×500)

图 8 “雾区”断口机制示意图及断口形貌图

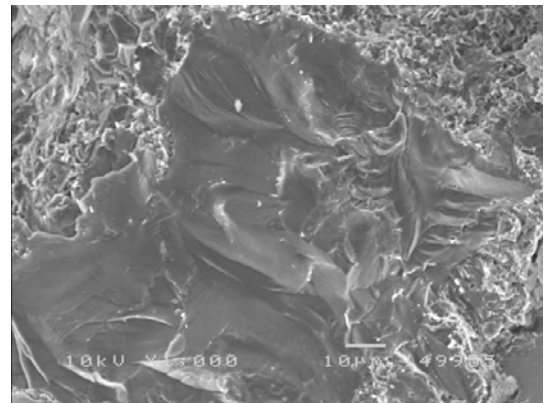
Fig.8 Sketch of mist fracture mechanism and fractography

解理断裂是介于解理断裂与延性断裂之间的一种断裂方式, 因此准解理断口微观形貌特征既不同于解理断口也有别于延性断口。从拍摄的断口图中可看出发生准解理断裂的河流花样多起源于晶粒内部的孔洞、微缺陷、夹杂、第二相、硬质点及析出物等, 并且河流只在局部小区域形成, 河流较短且不连续, 汇合特征也不明显, 小平面对之间以撕裂方式相接, 可看到明显的撕裂棱, 如图 9(a)和(c)所示; 也有的显示出曾经受到过剪切或者扭转力的作用(图 9(b)和(d)), 这与解理断口河流花样有较明显的区别。

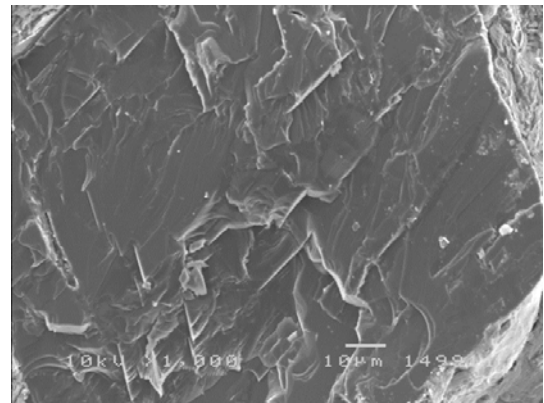
由于长期的地质构造运动, 岩石内部存在一些高张应力的区域, 且很多区域存在微裂纹。在外部



(a) 100 °C准解理断口(试件 100 °C - 3, ×500)



(b) 150 °C准解理断口(试件 150 °C - 2, ×1000)



(c) 250 °C准解理断口(试件 250 °C - 1, ×1000)

图 9 不同温度下的准解理断口

Fig.9 Quasi-cleavage fractures at different temperatures

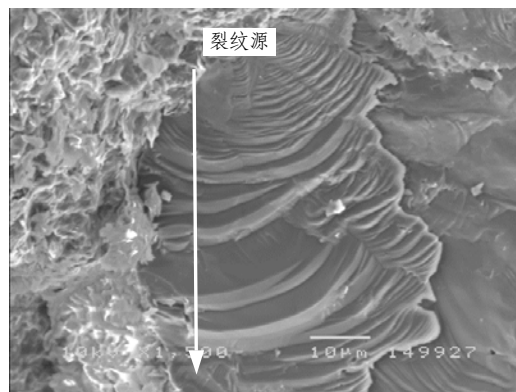
载荷(这里是拉应力)的作用下, 内部微裂纹在准解理面内以台阶的方式扩展形成河流花样, 但由于岩石矿物颗粒或者晶体中存在大量的位错及孪晶, 点阵严重扭曲, 同一晶粒内部的空间位向有一定的差异, 因此微裂纹在晶粒内部连续光滑地扩展比较困难。裂纹在点阵严重扭曲的晶粒内部扩展时, 彼此相邻的边界处发生的塑性变形以撕裂的方式连接, 形成撕裂棱, 有的甚至形成微孔聚合的韧窝。在较低温度时, 塑性变形较小, 撕裂棱不明显; 较高温

度时，塑性变形大，撕裂棱比较明显。准解理断裂单元为小平面，小平面之间发生塑性变形时以撕裂的方式相连接，这与前面台阶花样的机制是相似的，塑性变形的产生受到温度的影响。准解理断裂接近解理断裂机制时撕裂棱较小，如图 9(a)所示，通常这种准解理断裂很难判断，因为也可把它看作解理断裂。至于温度对准解理断口的影响，从图 9 可看出：温度低于 100 °C 时，准解理断口不明显，撕裂棱数量少，整体看上去此时的准解理面还是比较光滑，几乎没有塑性变形发生，与解理断裂很难分辨；较高温度(150 °C，200 °C，250 °C 和 300 °C)时，准解理断口比较明显，撕裂棱的数量也相对较多，断口比较粗糙，有塑性变形发生，断口局部地方曾经受到过剪切或者扭转力的作用。这主要还是因为温度较高时，岩石矿物热振动加剧，弱结晶面增多，局部塑性变形的能力得到了提升，这样断口形貌也更为复杂和多样。总之准解理面的形成受到了岩石的组织结构、成分、试验条件和温度变化等情况的综合影响。

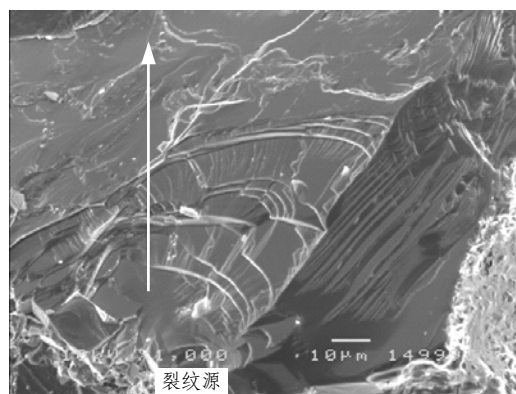
更大尺度的矿物颗粒和晶粒具有相似的现象，这使得部分高温时的断口与室温或者较低温度时的断口有相似之处，而部分断口又有所区别。从不同温度的解理断口与准解理断口来看，高温的断口形貌更为多样，更为复杂。

### 6 疲劳断口

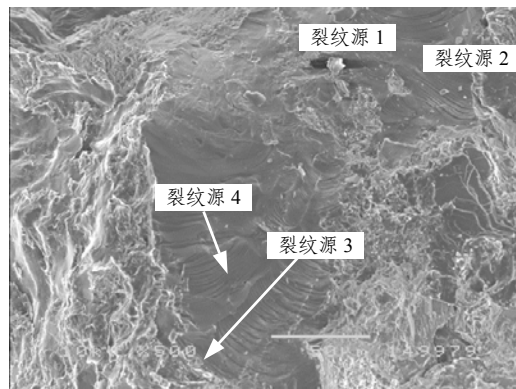
疲劳断裂是在循环交变载荷作用下材料内部逐渐出现损伤劣化的结果，是与时间相关的破坏方式。有关疲劳裂纹萌生的机制有很多，通常认为滑移或者由于位错产生的滑移带是疲劳裂纹产生的根本原因，这在金属断口的研究中得到了充分的证实。岩石断口中也存在大量的位错<sup>[25]</sup>，仔细分析砂岩的断口发现，滑移主要是由于矿物颗粒的变形不协调导致应力集中而造成的，或是局部切应力作用的结果，这是产生滑移的主要原因，从图 10 可看出，断口处有很多滑移迹象，其周围还存在塑性变形。但岩石中的疲劳裂纹与金属中的疲劳裂纹还是有区别的。金属中各晶体的性质比较相似，因此疲劳裂纹的扩展能够在较大范围内得到自相似扩展；而岩石中由于其组成矿物颗粒和晶体的性质存在很大差异，再加上黏土胶结物及其组成结构的影响，疲劳裂纹仅在很小的一个范围内扩展，就试验观察到的现象，通常只在某个矿物颗粒内部扩展，或者在某个晶体内部扩展。疲劳裂纹一旦萌生，一般会沿与最大切应



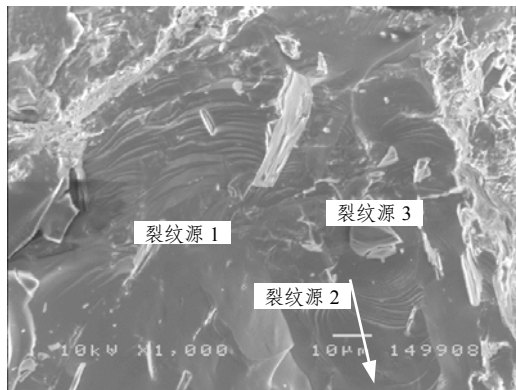
(a) 150 °C 疲劳断口(试件 150 °C - 1, ×1 500)



(b) 200 °C 疲劳断口(试件 200 °C - 1, ×1 000)



(c) 200 °C 疲劳断口(试件 200 °C - 3, ×500)



(d) 300 °C 疲劳断口(试件 300 °C - 3, ×1 000)

图 10 砂岩的高温疲劳断口

Fig.10 Fatigue fractography of sandstone under high temperature

力方向最一致的滑移面扩展。只要裂纹的扩展是沿着滑移面进行的, 其扩展机制通常是一致的。这是微观裂纹扩展, 通常称这种裂纹扩展方式为第一阶段裂纹扩展。金属中疲劳裂纹扩展长度通常为零点几到  $1\text{ mm}^{[3]}$ ; 本文岩石中的疲劳裂纹扩展长度最大只有几十微米, 且多在一个矿物晶体或者矿物颗粒内部扩展。金属材料中的疲劳裂纹按第一阶段的方式扩展到一定长度后, 将由于裂纹尖端主应力的作用而偏离其滑移路线, 并沿着大致与最大正应力方向相垂直的方向扩展, 即开始宏观裂纹扩展, 通常称为疲劳裂纹扩展的第二阶段, 而岩石内部几乎观察不到这个阶段。

由于加载设备施加的应力存在波动, 另外拉伸试验采用了加载→停载的加载方式, 因此应力中的交变部分是形成疲劳裂纹的重要因素, 局部区域的塑性变形是裂纹形成的先决条件, 而温度则影响了岩石的塑性性质。温度对裂纹扩展的影响是明显的, 温度低于  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 多以平面状滑移为主, 表面较为光滑; 当温度高于  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 滑移的平行性消失, 波纹状滑移占支配地位, 如图 10(a)~(d)所示。疲劳裂纹源通常是个光滑、细洁的小区域, 长  $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 。当外部载荷较小时, 该区域的裂纹张开位移较小, 扩展也较缓慢, 由于拉伸试验采用了加载→停载的加载方式, 使得裂纹反复的张开和闭合, 这会引起裂纹两壁反复的相互挤磨, 从而形成一光滑小区域。在图中可看到以疲劳裂纹源为中心的贝纹线向外发射, 如图 10(a)和(d)所示, 还可看到向四周辐射的放射台阶或线痕, 如图 10(c)所示。疲劳裂纹源的中心有时不止一个, 特别是在温度较高时存在多个疲劳源, 如图 10(c)和(d)所示, 图中有 3 或 4 个疲劳源, 且疲劳裂纹源最容易在岩石胶结物和颗粒的交界处产生, 其次容易在颗粒与颗粒交界处产生。由于外部载荷作用下颗粒的边界或者晶粒的晶界会导致颗粒和晶粒不同的受力状态, 这会产生变形不协调, 裂纹在扩展过程中会由于边界或晶界而停止或者改变扩展方向, 如图 10(a)~(d)所示。

另外由图 10 可把疲劳裂纹分为两类, 一类是韧性疲劳裂纹, 一类是脆性疲劳裂纹。通常来讲, 韧性疲劳断口在变形时发生了较大的塑性变形, 而脆性疲劳断口在变形时发生了较小的塑性变形, 这可由裂纹波浪的起伏程度来大致判断。图 11 为典型的金属疲劳断口示意图<sup>[3]</sup>。图 10(b)是典型脆性疲劳裂纹的 SEM 图片, 与图 11(a)非常相似; 图 10(a), (c)和(d)为典型的韧性疲劳裂纹 SEM 图片。

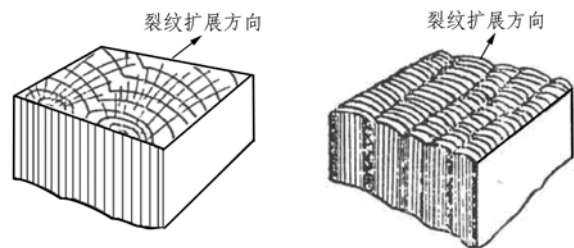


图 11 脆性疲劳与延性疲劳断口示意图<sup>[3]</sup>

Fig.11 Sketch of brittle fatigue and ductility fatigue fractures<sup>[3]</sup>

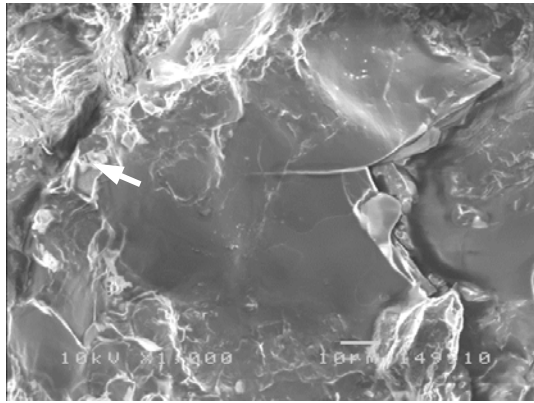
## 7 非主断裂面的二次裂纹和碎裂断口

二次裂纹和碎裂断口发生在与主断裂面垂直的平面上, 并多发生在矿物颗粒上或者颗粒的周边, 如图 12 所示, 这说明砂岩在沿着最终主断裂面破坏之前, 在其他的平面或区域也试图产生新断裂面。可以推测这些二次裂纹和碎裂区域在断裂之前或断裂的时候曾经是高应力区, 但在与主断裂面的应力相比较时, 这些区域的应力只导致了部分区域的破坏, 并没有导致整个结构的破坏。由于砂岩由多种矿物组成, 就其结构而言可简单把其看成是由黏土物质与矿物颗粒组成。作者<sup>[23]</sup>分析得出黏土物质的强度会随着温度的变化而发生变化。在低温时, 黏土物质强度较低而矿物颗粒强度较高, 破坏多发生在黏土物质或者黏土物质与颗粒交界处, 如图 12(a)所示; 而在高温时, 由于黏土物质强度升高, 导致破坏是黏土物质与矿物颗粒的整体破坏, 在矿物上除了主断裂面外, 垂直于主断裂面的地方由于受到黏土物质的变形协调作用也可能发生破碎, 如图 12(b)和(c)所示, 图中箭头所示为二次裂纹或破碎结构。这在一定程度上说明岩石的破坏过程是其内部各个子部分自组织的破坏过程, 一些子结构的破碎逐渐积聚, 最终形成宏观断裂面; 另外也说明岩石的断裂是个极为复杂的过程。基于目前 CT 技术的发展<sup>[26, 27]</sup>, 使得读者有可能得到这些岩石内部各子结构的破坏信息, 未来如何用损伤来表征这些微损伤是个可行的办法。

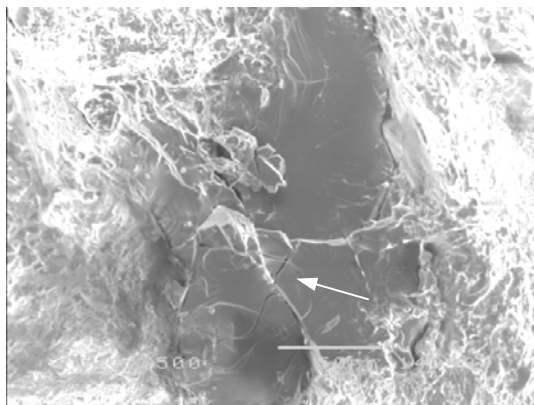
## 8 局部延性断口

岩石内部的矿物颗粒由于受到其周围黏土物质及其他矿物颗粒的约束, 在温度和载荷作用下局部也会发生明显的塑性变形, 本文把这样的断裂称为局部延性断裂, 局部的含义主要是仅在很少的一些

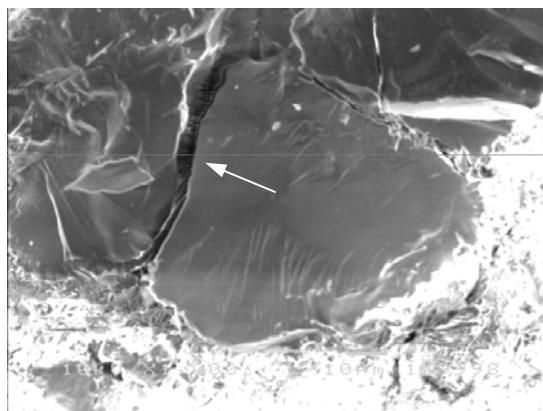




(a) 碎裂断口(试件 50 °C - 1, ×1000)



(b) 碎裂断口(试件 150 °C - 2, ×1000)



(c) 二次裂纹和碎裂破坏(试件 300 °C - 2, ×1000)

图 12 二次裂纹和碎裂断口花样

Fig.12 Fracture pattern of secondary and fragmentary crack

区域甚至只是在某些矿物颗粒或晶粒上发生了局部的塑性变形。在金属断口中主要有两种类型的延性断裂，一种是韧窝 - 微孔聚集型断裂，另一种是滑移分离断裂<sup>[3]</sup>。第一种类型的断口在本文的试验中并未发现，观察到的多是滑移分离断裂，如图 13 所示。这些断裂也有疲劳的性质在里面，很难完全区分开来。出现这种滑移型的延性断裂，一方面是由矿物颗粒晶体本身的性质造成的，另一方面是由于局部地方受到剪应力的作用。作者只在温度大于

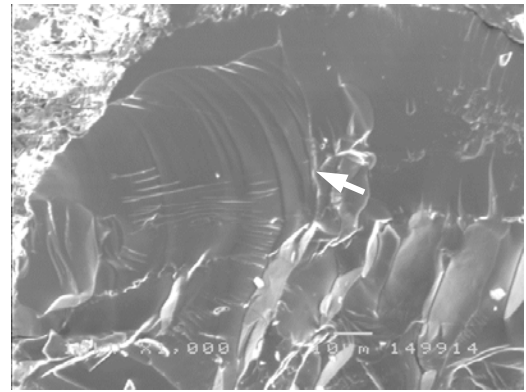


图 13 局部延性断口花样(试件 300 °C - 3, ×1000)

Fig.13 Local ductility fracture pattern(sample 300 °C - 3, ×1000)

200 °C 的试验中发现了局部延性断口，而低温试验中没有发现这种断口，这也证实了温度对此起了重要的影响作用。

局部延性断口除了塑性变形机制外，还有脆性机制在里面。从前面大量的 SEM 图片可见，这些断裂机制不能完全割裂开来，在岩石的断裂过程中，往往两个或者多个断裂机制在共同起作用。在应力状态、显微组织、晶粒取向、应变速率、温度和外界环境等因素对各种断裂机制都起作用的情况下，可发生多种机制为主导的混合型断裂。

### 9 沿晶断裂

沿晶断裂也被称为晶间断裂，是指沿矿物颗粒或晶粒界面的开裂。由于晶界原子受相邻晶粒位向的影响排列混乱，使其处于较高的能量状态，为了降低整个晶体系统的能量和减少晶间能，矿物颗粒的边界成为黏土矿物的填充地，而晶体的晶界处或相邻区域也可成为各种杂质的择优地点，因此颗粒的边界和晶体的晶界强度会受到一定程度的削弱，这种削弱作用会导致颗粒边界和晶体晶界处的力学、物理性能与颗粒和晶粒内部的力学、物理性能会有所不同，在外部载荷作用下，再加上温度、环境因素的影响，容易沿晶界发生断裂。岩石是多晶体材料，通常晶粒间的黏结强度小于晶粒本身的强度，以及岩石矿物颗粒本身独立的滑移系数不够，岩石内多晶体在变形中未能保证微观连续性条件，这也会导致沿晶断裂的发生。在金属断口中，观察到了脆性沿晶断裂和延性沿晶断裂<sup>[3]</sup>，在本文的砂岩拉伸试验中，由于最高温度不超过 300 °C，仅仅观察到了脆性沿晶断裂，更高温度下是否会出现延

性沿晶断裂还有待进一步研究。脆性沿晶断裂是指在断口附近没有发生塑性变形的迹象，断口一般与主应力垂直，表面平齐，边缘没有剪切唇。微观断口为冰糖状，晶界面清洁、光滑，界面棱角清晰，多面体感很强，如图 14 所示。脆性沿晶断裂的裂纹通常起源于晶界处，如果起源于晶粒内部就可以认为是穿晶断裂。其中三颗粒的交界点或者三晶体的三角晶界处的裂纹更容易起裂，因为三角处的应力集中现象最为明显。通过图 15 来说明其形成机制：当 A, B 两晶粒晶界发生相对滑移时，C 晶粒内的变形区与 A, B 两晶粒的晶界滑移不协调，因此在 A, B, C 三晶粒交点处产生应力集中。当应力超过晶界结合力时，产生一个裂纹源。在外力继续作用下，裂纹沿与外力垂直的晶界 PP' 扩展，许多此类微裂纹互相连接，最终形成脆性沿晶断口。

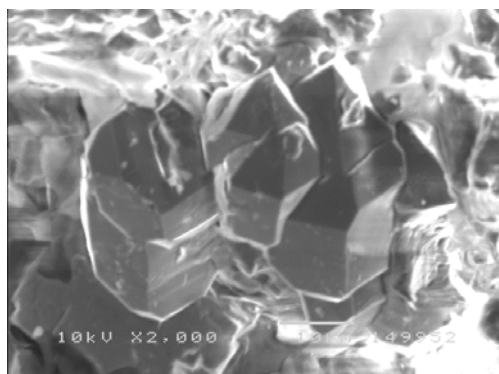


图 14 沿晶断裂花样(试件 100 °C - 1, ×2 000)

Fig.14 Intercrystalline fracture pattern(sample 100 °C - 1, ×2 000)

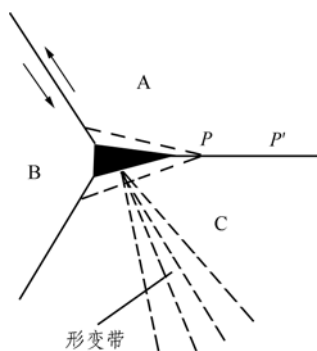


图 15 三角晶界处沿晶断裂形成机制示意图

Fig.15 Sketch of intercrystalline fracture mechanism on triangle grain boundary

### 10 其他奇特的断裂花样

砂岩含多种矿物，在温度的影响下，由于各矿物颗粒的变形不协调及热膨胀各向异性等特点，在岩石的断口中除了上面讨论的断口形貌外，还有许

多很有特点的断口，作者根据其形状特征分别给予了相应的“生活化”命名，这些断口在有关岩石的断口形貌文献中少见报道，在金属中也很少见，有些断裂机制可从前文找到解释，有些机制可能是复杂的，甚至很难解释清楚，作者把它们罗列出来，一方面是想说明岩石断口形貌的美观性，在受到温度影响后断口的形貌也变得更为复杂多样；另一方面也想说明，大自然的事物在变形破坏时如同有规律一般，甚至可以从生活中找到原貌。

#### 10.1 鱼鳞状花样

在断口形貌中有一种叫 Wallner 线的断口形貌，它是根据 Wallner 在玻璃断口发现的一种图像而命名的，即裂纹前沿线与以缺陷为中心的球形冲击波交互作用形成的图像。后来很多学者在许多非常脆的金属或金属间化合物的断口上也发现了这种类似 Wallner 线的花样<sup>[3]</sup>。Wallner 线的顶尖指向裂纹扩展方向，具有疲劳裂纹的性态，与疲劳裂纹的区别是两组不同的平行线会交截。P. J. Syme-Gash<sup>[28]</sup>提出了一种由于应力波作用在宏观尺度的岩石内部产生的人字形羽毛状裂纹模型。这两类裂纹的主要机制是由于裂纹快速扩展时裂纹尖端与弹性冲击波相互干涉所造成的。在本文的试验中，作者发现一种类似鱼鳞状花样的断口形貌，如图 16 所示，其形成机制可能与 Wallner 线和岩石中的人字形羽毛状裂纹的形成机制是相似的。

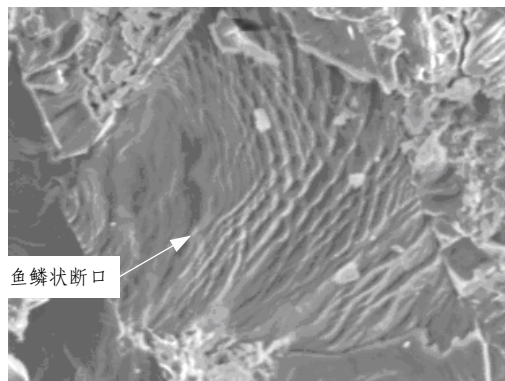


图 16 鱼鳞状断口形貌(试件 150 °C - 1, ×1 000)

Fig.16 Fish-scale fractography(sample 150 °C - 1, ×1 000)

#### 10.2 香蕉形状

香蕉形状花样属于疲劳断口，是应力中的交变部分载荷、裂纹尖端局部平面应变状态和温度的共同影响造成的。该花样可能的形成过程是：裂纹在裂纹源开始起裂，本来要沿着图 17 中箭头向垂直初始裂纹源的方向往前扩展，但由于在 A 处附近可能受到夹杂或者第二相物质的影响，该物质较硬，阻

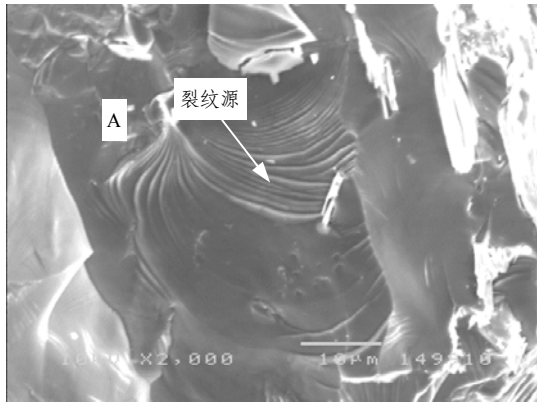


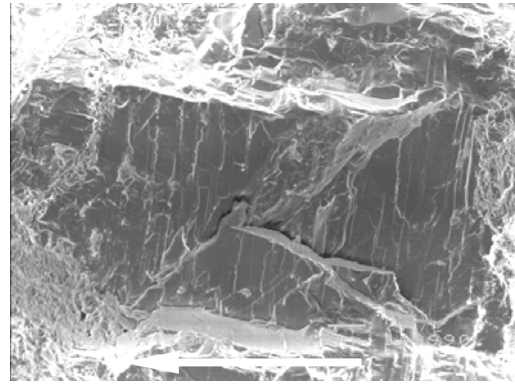
图 17 香蕉形状断口形貌(试件 300 °C - 3, ×2 000)

Fig.17 Banana-shaped fractography(sample 300 °C - 3, ×2 000)

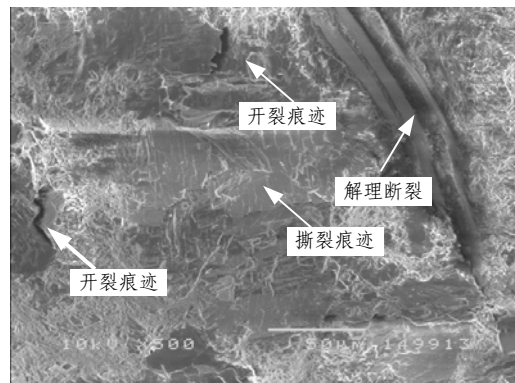
碍了裂纹继续按其原来的路径扩展, 因此裂纹绕着较硬物质 A 旋转扩展, 这就形成了一类似香蕉形状的断口形貌。

### 10.3 瀑布状花样

瀑布状花样产生在一个截面形状较为规则的矿物颗粒上, 里面的断裂机制有多种, 如图 18 所示。表面上类似于瀑布状的花样说明岩石矿物颗粒具有一定塑性变形, 近似等间距的排列又说明此裂纹具有疲劳的特性, 裂纹沿着箭头的指向扩展。而在垂直 SEM 图的平面中间部位也有裂纹在扩展, 可以判断这条裂纹的扩展是脆性机制在起主导作用, 并且发生了撕裂作用, 如图 18(a)所示。这说明在同一矿物颗粒上发生了两种裂纹的扩展, 而且是在不同的平面上。这样的裂纹扩展机制是很复杂的, 由于只观察到断裂后的状态, 并不能了解当时所有的裂纹实时扩展状况, 所以对其只能推测分析。两种裂纹在不同的平面上扩展可能是由于岩石矿物颗粒的各向异性的影响, 瀑布状花样的近似等间距的排列说明受到交变载荷、岩石的非均质性和温度的影响, 另一平面上的裂纹张开的位移不均匀, 又说明此时岩石的非均质性在起主导作用, 并且这个影响看来要比温度的影响大。作者也在另一半试件的断口找到了图 18(a)所示的对应位置, 发现垂直于 SEM 图片的那个平面的裂纹并没有在这半个试件上扩展, 但可以看出留下撕裂的痕迹, 这样就可以推测撕裂的痕迹是两个不同平面的裂纹在相交后产生的。在图 18(b)的左侧中间部位和上面的中间部位都发现了矿物颗粒与其附近胶结物开裂的现象, 这可能是温度和外部载荷共同造成的影响。另外在图 18(b)



(a) 瀑布状花样(面 1)



(b) 瀑布状花样(面 2)

图 18 试件同一断口的瀑布状花样(试件 300 °C - 2, ×1 000)

Fig.18 Waterfall-shaped fracture pattern of the same section (sample 300 °C - 2, ×1 000)

的右侧出现了一条河流状的解理裂纹, 如同崇山峻岭之间一条河流缓缓通过。

### 10.4 “无头鹤” 花样

“无头鹤”花样的机制同层状结构面撕裂断口的机制是相似的, 主要是由于矿物的层状结构所造成的。该花样像只没有头的仙鹤, 故称其为“无头鹤”花样(见图 19)。

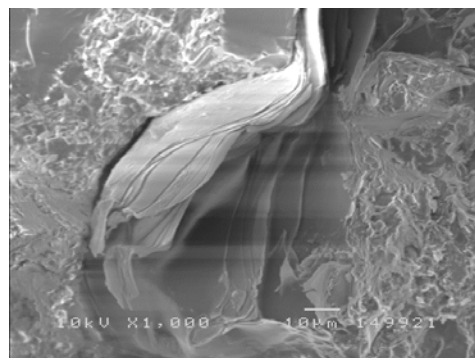
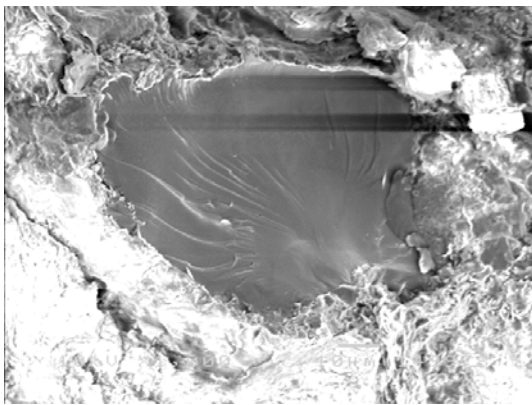


图 19 “无头鹤”断口花样(试件 250 °C - 1, ×1 000)

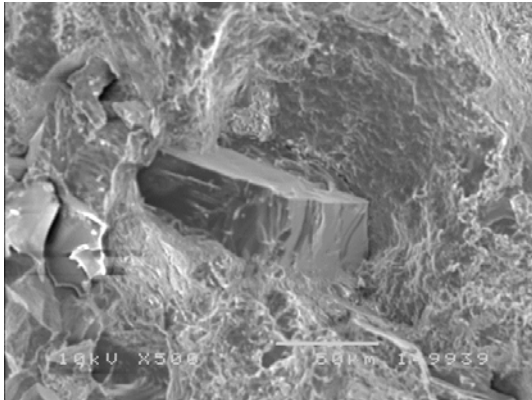
Fig.19 “Non-head crane” fracture pattern(sample 250 °C - 1, ×1 000)

### 10.5 其他花样

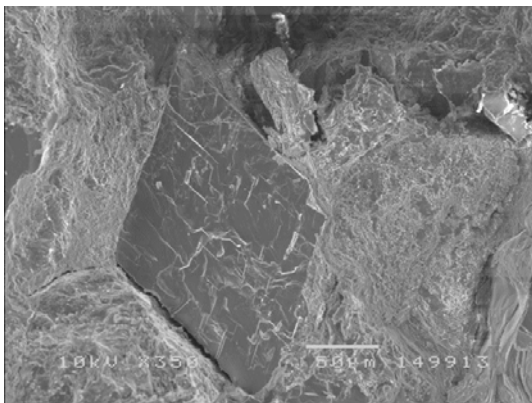
从试验中还观察到很多其他断裂花样, 如图 20(a) 所示火炬形状, 图 20(b) 是某一方解石颗粒断面, 图 20(c) 是某一菱铁矿断面, 而图 20(d) 和 (e) 类似于角锥形或三角形。这些断口的形成机制是很复杂的, 岩石的非均质性、各向异性及温度和应力的综合影响在起作用。这里把这些有特点的断裂花样归结起来, 一方面展示出岩石断口形貌的美观性, 另一方面也展示了岩石断口形貌的复杂多样性, 将来有待进一步去探讨研究。



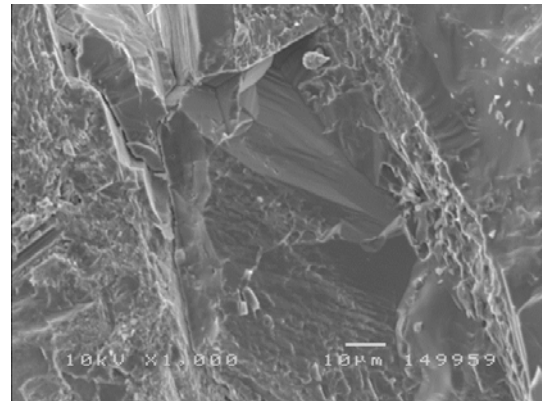
(a) 火炬花样(试件 40 °C - 3, ×1 000)



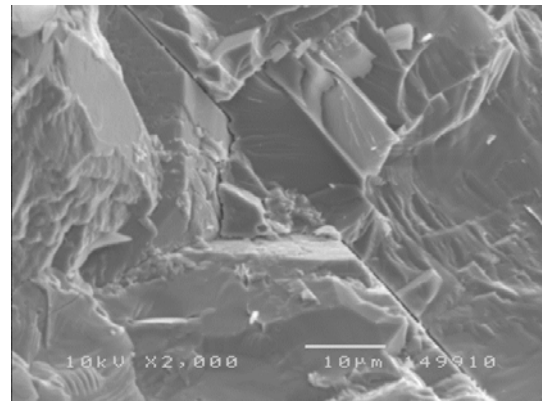
(b) 方形断口花样(面 1)(试件 150 °C - 2, ×500)



(c) 菱形花样(面 1)(试件 250 °C - 1, ×350)



(d) 角锥形断口花样(试件 200 °C - 3, ×1 000)



(e) 三角形断口花样(试件 250 °C - 1, ×2 000)

图 20 各种形状的断口花样

Fig.20 Other fracture patterns with different shapes

## 11 结 论

本文通过扫描电镜观察和研究了不同温度和拉应力作用下砂岩的断口形貌, 获得了以下结论:

(1) 温度 - 拉应力共同作用下砂岩的断裂主要发生在黏土胶结物上及其与矿物颗粒的交界处, 少数发生在矿物颗粒上; 胶结物的断裂形貌较复杂, 几乎没有什么规律。

(2) 在断裂机制都相似的情况下, 低温下的断口较为光滑平坦, 而高温下的断口较为粗糙, 断口表面发生过微小的塑性变形; 在反复拉伸加载→停载的加载方式及温度的共同作用下, 砂岩内部也能产生疲劳断口, 温度大于 150 °C 后疲劳断口更容易发生; 局部延性断口只在温度大于 200 °C 的试验中发现。这些都说明温度对砂岩破坏的微观机制产生了很大的影响, 即随着温度的升高, 砂岩的断裂机制由以局部脆性断裂机制为主向局部脆性和延性耦合断裂机制转变。应力中的交变部分和裂纹尖端

局部平面应变状态是形成疲劳裂纹的重要因素，局部区域的塑性变形是疲劳裂纹形成的先决条件，而温度影响了岩石的塑性行为，这也是温度影响岩石强度变化的一种体现。而且高温断口形貌更为多样、复杂，这主要是受到高温影响后，岩石内部矿物颗粒、晶体和原子热运动加剧，当岩石受到外部载荷作用发生断裂时就有可能出现在更大范围的位置。

(3) 借用金属断口形貌学的研究思想，通过撕裂或二次解理形成台阶机制示意图、雾区断口机制和层状结构示意图对一些断裂机制进行了解释。随着温度升高，河流花样逐渐增多，而穿过不同角度晶界河流花样的变化主要受到晶界角度的影响；台阶花样产生的主要机制是受到撕裂和二次解理的作用，解理台阶的高度主要受到岩石材料自身的结构特性的影响，温度对其影响较小；层状结构面撕裂断口的产生主要受到岩石内部层状结构面的影响，并且这种断口形貌是岩石所特有的，在金属断口形貌中还少见报道；雾区断口只在高温试验中发现，说明温度的影响起着决定性作用；准解理断口很难与解理断口区分，但其通常比解理断口具有更多的塑性机制在里面。清楚地观察到沿晶断口，并通过三角晶界处的沿晶断裂模型对其进行了解释。

(4) 非主断裂面的二次裂纹和碎裂断口说明岩石的破坏除了主断裂之外，其他子结构也可能发生破碎，而高温时这种碎裂结构更容易发生，这也表明温度的影响是重要的，另外也表明主断裂发生前后，岩石内部还有其他损伤发生。

(5) 观察到很多奇特的断口形貌，并给予了相应生活化的命名，如香蕉断口、鱼鳞状断口、瀑布断口、“无头鹤”断口等，说明受温度影响后，岩石的断口形貌更为多样、复杂，有些断口甚至可以从生活找到原貌。

本文综合认为，由于岩石是多晶体材料，在金属断口中发现的微观断口形貌特征都可以从岩石断口形貌中找到，因此借助金属断口形貌学的方法研究岩石断口形貌是可行的。但由于岩石是在各种不同随机因素作用下经历了漫长而又复杂的地质构造运动后形成的产物，与人工金属材料又有着很大的差别，因此在温度的影响下，岩石的断口形貌比金属的断口形貌还将更为复杂、多样，这也导致岩石断口上出现很多极有特点的形貌，如层状结构面撕裂断口、鱼鳞状断口、香蕉状断口、菱形和方形断

口等，这在金属断口形貌中还少见报道。因此有必要进一步加强岩石断口形貌学的研究，加深对岩石微细观断裂机制的理解，以期在岩石的宏观破坏和微观机制的联系方面架起一道桥梁。

### 参考文献(References):

- [1] BAHAT D. Tectono-fractography[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [2] 上海交通大学《金属断口分析》编写组. 金属断口分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.(Compilation Group of Analysis of Metal Fracture of Shanghai Jiaotong University. Analysis of metal fracture[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979.(in Chinese))
- [3] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.(CUI Yuexian, WANG Changli. Analysis of metal fracture[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998.(in Chinese))
- [4] FINEBERG J, MARDER M. Instability in dynamic fracture[J]. Physical Reports, 1999, 313: 1 - 108.
- [5] BOUCHAUD E. Scaling properties of cracks[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1997, 9(21): 4 319 - 4 344.
- [6] 左建平. 温度 - 应力共同作用下砂岩破坏的微观机制与强度特征 [博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2006.(ZUO Jianping. Sandstone failure mechanism at the meso-scale and its strength characteristics under the thermal-mechanical action[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2006.(in Chinese))
- [7] 刘彩平. 岩石动态裂纹扩展的不稳定性及其物理机制研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2005.(LIU Caiping. Instability of dynamic crack propagation in rock and its physical mechanisms[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2005.(in Chinese))
- [8] COX B N, GAO H, GROSS D, et al. Modern topics and challenges in dynamic fracture[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(3): 565 - 596.
- [9] 李先炜, 兰勇瑞, 邹俊兴. 岩石断口分析[J]. 中国矿业学院学报, 1983, 12(1): 15 - 21.(LI Xianwei, LAN Yongrui, ZOU Junxing. A study on rock fracture[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1983, 12(1): 15 - 21.(in Chinese))
- [10] 谢和平. 岩石材料的局部损伤拉破坏[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(2): 147 - 154.(XIE Heping. The local extension failure of damaged rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(2): 147 - 154.(in Chinese))

- [11] 谢和平, 陈至达. 岩石断裂的微观机制分析[J]. 煤炭学报, 1989, 14(2): 57 - 67.(XIE Heping, CHEN Zhida. Analysis of rock fracture micro-mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(2): 57 - 67.(in Chinese))
- [12] 刘小明, 李焯芬. 岩石断口微观断裂机制分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(6): 509 - 513.(LIU Xiaoming, LEE C F. Microfailure mechanism analysis and test study for rock failure surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(6): 509 - 513.(in Chinese))
- [13] 谭以安. 岩爆岩石断口扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程[J]. 电子显微学报, 1989, 8(2): 41 - 48.(TAN Yi'an. Analysis of fractured face of rock burst with scanning electron microscope and its progressive failure process[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1989, 8(2): 41 - 48.(in Chinese))
- [14] 冯涛, 谢学斌, 潘长良, 等. 岩爆岩石断裂机制的电镜分析[J]. 中南工业大学学报, 1999, 30(1): 14 - 17.(FENG Tao, XIE Xuebin, PAN Changliang, et al. Fracture mechanism analysis for burst rock with electron scanning microscope[J]. Journal of Central South University of Technology, 1999, 30(1): 14 - 17.(in Chinese))
- [15] 李根生, 廖华林. 超高压水射流冲刷切割岩石断口微观断裂机制试验研究[J]. 高压物理学报, 2005, 19(4): 337 - 342.(LI Gensheng, LIAO Hualin. Micro-failure mechanism analysis and test study for rock failure surface under water jet impact[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(4): 337 - 342.(in Chinese))
- [16] 朱珍德, 张勇, 徐卫亚, 等. 高围压高水压条件下大理岩断口微观机制分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 44 - 51.(ZHU Zhende, ZHANG Yong, XU Weiya, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis on marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 44 - 51.(in Chinese))
- [17] 朱珍德, 张勇, 王春娟. 大理岩脆 - 延性转换的微观机制研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 31 - 35.(ZHU Zhende, ZHANG Yong, WANG Chunjuan. Study on microcosmic mechanics for brittle-ductile transition of marble[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(1): 31 - 35.(in Chinese))
- [18] BAHAT D, FRID V, RABINOVITCH A, et al. Exploration via electromagnetic radiation and fractographic methods of fracture properties induced by compression in glass-ceramic[J]. International Journal of Fracture, 2002, 116(2): 179 - 194.
- [19] BABADAGLI T, DEVELI K. On the application of methods used to calculate the fractal dimension of fracture surfaces[J]. Fractals, 2001, 9(1): 105 - 128.
- [20] XIE H P. Fractals in rock mechanics[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993.
- [21] ZHOU H W, XIE H P. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock[J]. Surface Review and Letters, 2003, 10(5): 751 - 762.
- [22] ZHOU H W, XIE H P. Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis[J]. Physics Letters A, 2004, 325(5/6): 355 - 362.
- [23] 左建平, 周宏伟, 谢和平, 等. 温度和应力耦合作用下砂岩破坏的细观试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3)(待刊).(ZUO Jianping, ZHOU Hongwei, XIE Heping, et al. Meso-experimental research on the sandstone failure behavior under thermo-mechanical coupling effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3)(to be published).(in Chinese))
- [24] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 不同温度作用下砂岩热开裂的试验研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1 150 - 1 155.(ZUO Jianping, XIE Heping, ZHOU Hongwei, et al. Experimental research on thermal cracking of sandstone under different temperatures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(4): 1 150 - 1 155.(in Chinese))
- [25] 高峰. 岩石损伤断裂的细观机制及统计强度理论[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学北京研究生部, 1997.(GAO Feng. Meso-mechanism and statistic strength theory of rock damage and fracture[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Graduate School, China University of Mining and Technology, 1997.(in Chinese))
- [26] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石损伤力学宏观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. Macro- and micro-experiment study on damage mechanics of rocks and soils[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [27] 孙红, 葛修润, 牛富俊, 等. 上海粉质黏土的三轴 CT 实时细观试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 559 - 4 564.(SUN Hong, GE Xiurun, NIU Fujun, et al. Real-time CT meso-testing on Shanghai silty clay subjected to triaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 559 - 4 564.(in Chinese))
- [28] SYME-GASH P J. Surface features relating to brittle fracture[J]. Tectonophysics, 1971, 12: 349 - 391.