

# 中国庐山第四纪沉积砾石的显微构造系统及 地质环境动力学分析

胡东生<sup>1,2,3)</sup>, 张华京<sup>4)</sup>, 徐 冰<sup>5)</sup>, 白建斌<sup>1)</sup>, 田新洪<sup>2)</sup>,  
王旭龙<sup>3)</sup>, 宋友桂<sup>3)</sup>, 刘卫国<sup>3)</sup>, 张国伟<sup>2)</sup>

- 1)湖南师范大学资源环境科学学院, 湖南长沙 410081; 2)西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069;  
3)中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西西安 710075;  
4)湖南师范大学化学化工学院, 湖南长沙 410081; 5)中国海洋大学地球科学学院, 山东青岛 26001

**摘 要:** 经过多年的区域地质调查和第四纪环境演变的分析, 对庐山芦林盆地大校场谷口剖面松散沉积物中变形砾石进行岩石显微构造学的研究。发现变形砾石内部存在特殊的微裂隙组构, 呈现出错裂-横裂-劈裂-爆裂-复裂-应力矿物等的复杂组合, 其结构面特征反映出显微构造形迹的力学性质是互为转变的。通过物理模型分析和试验变形比对应综合材料证明, 变形砾石是遭受了既密集、又分散、还具有同时发生作用的长时期的多边界外力条件及平衡力系, 内部形成破裂其应力传递过程和性质改变与变形形迹转变及其做功连续扩展, 是由低于疲劳极限的具有脉动性作用微弱应力造成的。地球陆表过程和地质环境要素及其动力学机制的研究认为, 只有第四纪晚期地质事件的低温、低应力及其分散密集的多颗粒平衡力系的缓慢长期及间歇脉动作用的边界条件才能满足、符合及形成这种特殊的岩石变形构造, 为中国东部山地可能遭受第四纪冰冻环境及冰川作用提供了新的科学证据。

**关键词:** 岩石微裂隙; 冷构造系统; 陆面表层冰冻作用; 地质环境响应; 地球动力学机制

**中图分类号:** P313; P343.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-3021(2009)06-787-09

## A Dynamic Analysis of the Geological Environment and Micro-structural System of the Quaternary Sedimentary Gravels in the Lushan Area of China

HU Dong-sheng<sup>1,2,3)</sup>, ZHANG Hua-jing<sup>4)</sup>, XU Bing<sup>5)</sup>, BAI Jian-bin<sup>1)</sup>, TIAN Xin-hong<sup>2)</sup>,  
WANG Xu-long<sup>3)</sup>, SONG You-gui<sup>3)</sup>, YU Xue-feng<sup>3)</sup>, LIU Wei-guo<sup>3)</sup>, AN Zhi-sheng<sup>3)</sup>,  
ZHANG Guo-wei<sup>2)</sup>

- 1) *College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081;*  
2) *State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069;*  
3) *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710075;*  
4) *College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081;*  
5) *College of Geosciences, China University of Oceanography, Qingdao, Shandong 266001*

**Abstract:** Based on many years work of regional geological investigation and an analysis of Quaternary environment development, the authors studied the microscopic structure of the deformed gravels in loose sediments along

本文由西北大学大陆动力学国家重点实验室科学基金项目(编号: DL2006001)和湖南省重点学科建设项目(编号: ZRDL2007001)与中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(编号: SKLLQG0701)等联合资助。

收稿日期: 2009-02-28; 改回日期: 2009-11-21。

第一作者简介: 胡东生, 男, 1951年生。教授。从事资源环境和遥感地质学与地球动力学及全球变化等研究。电话: 0731-88871743; E-mail: hudsh@hunnu.edu.cn。

the Dajiaochang valley section in Lulin basin of Lushan area and detected the existence of the special micro-fissure fabric inside the deformed gravel, which assumes the complex assemblage of displacement crack – transversal crack – cleavage crack – explosion crack – composite crack – stress minerals, whose structural plane characteristic show that the mechanic qualities of the microscopic structure features are interchangeable. Synthetic material data and physical model analysis as well as experimental deformation contrast have demonstrated that the deformed gravel underwent the prolonged and simultaneous multi-boundary external force condition and the equilibrant system characterized by intensiveness and scattering. The internal breaking, the stress transmission process, the quality variation with the change of the transformation structure features and the continuous expansion of the work-doing resulted from the weak stress of the pulsation action lower than the fatigue limit. Researches on the earth's land surface processes and the geological environment essential factor and its dynamic mechanism have demonstrated that only with the equilibrant system of the low-temperature and low-stress and the scattered as well as dense multi-grains, the boundary condition for the slow, long-term and intermittent pulsation action can meet the formation conditions of such a rock deformation structure. These achievements have provided new scientific evidence for the possible existence of Quaternary frost environment and glacial action in mountainous areas of eastern China.

**Key words:** micro-fissure of rock; cold structural system; frost action on the land surface; response of geological environment; geodynamic mechanism

庐山是旅游名山,避暑度假休闲观赏功能相得益彰;庐山是文化名山,涵养了中国古代学府教育白鹿洞书院的赋存和繁衍;庐山是景观名山,自然风光与人文历史等古迹遗存丰富多彩;庐山是科学名山,孕育了中国第四纪冰川地质学的诞生和形成;庐山还是探索名山,对过去地球环境的研究及讨论迭起不绝。这个映像就是中国人心目的庐山真面目,庐山确实是中华之瑰宝、环球之仙境。

在庐山科学考察中(1997~2007),对该地区地形、地貌、地质及环境等方面进行了长期的路线调查,对一些重要的剖面及景观反复踏勘及详细考察,广泛地搜集第一手材料和采集岩石标本。同时注重通过野外调查和室内分析更多地考虑从地球动力学原理与机制来分析及认识自然现象和自然过程。经过多年的调查,资料丰富,积累颇多,并发现了一系列的新材料和新认识,对研究庐山地区的地质作用、地质过程、地质环境及地质演变有重要意义,也对颇多争议的学术观点和学派理论以及科学探索的深化及发展有积极的借鉴意义。

本文报道的就是庐山科学考察中的系列研究的部分成果之一。

## 1 现象表述

在庐山芦林盆地大校场谷口(海拔约 1080 m)第四纪泥砾沉积(周慕林, 1988)中,曾多次发现变形砾石及其岩石局部变质现象,反映了固体岩石发生塑性变形和出现低级蚀变等现象(胡东生等, 2008)。最近对该位置的变形砾石进行切片研究时,发现了特殊的岩石显微构造型式,而且发育清楚自成系统,这在过去的岩石构造形迹及变形构造型式中都是从未发现和出现过的。

### 1.1 变形砾石宏观特征

砾石标本的观察形貌如下:

砾石形状为似矩形,长约 7 cm,宽约 4 cm,厚约 2 cm。岩性为淡黄色长石石英砂岩,岩石有残余层理构造存在,具残余粒状变晶结构,颗粒平均直径为 1~1.5 mm,长石含量约为 5%,其余均为石英;浅色矿物颗粒(主要为石英)有压扁拉长现象(为平均直径的 1~2 倍),局部有颗粒碎裂化和重结晶现象的发生。根据庐山地区地质面貌及区域地层岩性特征的对比和分析,这块砾石应属于震旦系下统莲沱组海相碎屑岩沉积建造岩系的组成部分,即莲沱组(江西、湖南、福建、广东、广西地质矿产局, 1984)下部的长石石英砂岩的组成成分。

砾石内部有暗黄色铁质条带,砾石表层发育薄层(厚约  $1 \pm$  mm)侵蚀蚀变带,主要表现为暗黄色或褐色及红褐色的星散装的铁质质点密度增加,原岩砾石颗粒未发生明显改变,反映一种低温轻微蚀变现象。变形砾石外貌呈红褐色。上表面呈微凸状,发育斜交标本长轴(约成  $50^\circ$ )的刻槽和隔脊相间出现;刻槽宽约 3~4 mm,其底部较粗糙;隔脊宽约 4~6 mm,其顶部较光滑,走向延伸笔直;刻槽和隔脊的深度比较均一,约为  $2 \pm$  mm。下表面呈微凹状,发育清晰的擦痕其走向与上表面刻槽和隔脊的方向完全一致,类似于分布间隔较大的脊槽但擦痕遍及其间,深度约为 1~3 mm。砾石四周表面上未见有其它明显变形现象。

### 1.2 变形砾石微观特征

岩石薄片(垂直横切脊槽及擦痕方向)在光学显微镜下的整体形貌(见图 1)如下:岩石整体性较好结构紧密,无常规岩石破裂裂隙发育;中部平行于残余层理方向发育贯穿两侧的薄层褐铁矿条带,局部

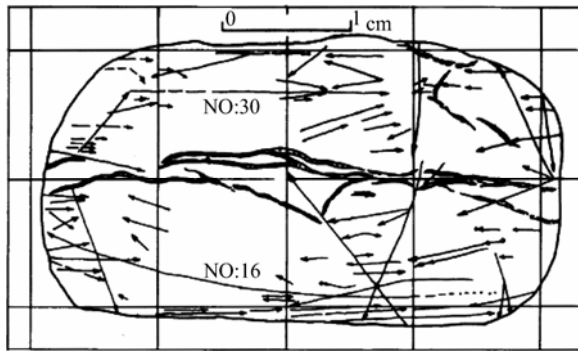


图 1 变形砾石微裂隙分布显微素描图  
Fig. 1 Microscopic sketch diagram showing the distribution of microfissures in deformed gravel

有斜交铁质小条带；石英以扁圆形态为主，表面较干净，颗粒边缘为次棱角或次圆度的多边形，颗粒间紧密镶嵌无空隙。特殊的显微构造——微裂隙实际上是一种岩石变形微裂纹(见图 1)，主要发育在砾石的周边沿地带(即沿砾石长轴的两侧方向展布最为发育)，其中央地带的分布较少，清晰可统计的微裂隙有 85~100 余条，展布方向以平行或近平行于砾石横轴方向为主，少数为平行或近平行于砾石纵轴方向的，也有少量呈斜交状的，并存在“X”型共轭微裂隙。

微裂隙大多数延伸均较短，靠近顶部及底部附近发育少数几条贯通裂隙，最小长度为 0.45 mm，最大长度为 4 mm；最小宽度为 0.03 mm，最大宽度为 0.3 mm；微裂隙的延展方向，一般由边部往中部延伸，有少数微裂隙由中部往边缘延伸。这些微裂隙大多数各自平行或近平行展布，少数为交叉状但没有明显的切割及位移现象；这个特征反映了这些微裂隙是同一时期形成的，即是岩石遭受了同一作用过程，也即同一变形阶段的产物。

1.3 显微裂隙构造特征

变形砾石的显微构造——微裂隙的表现形式及变形图像非常复杂(见图版 1)，各种变形特征及力学形式都十分丰富，根据岩石应力-应变原理和材料变形形迹规律，将微裂隙按其变形组合及力学性质划分为如下类型：

1.3.1 错裂

即扭裂，破裂形迹表现为雁列状(图 2-1-1)。沿破裂走向方向发育斜列状及相互平行的直线性或“S”状的微裂隙，其夹角约为 30°~60°，其长度在 0.5~2.0 mm 之间。

1.3.2 横裂

即张裂，破裂形迹表现为追踪状(图 2-1-2)。其

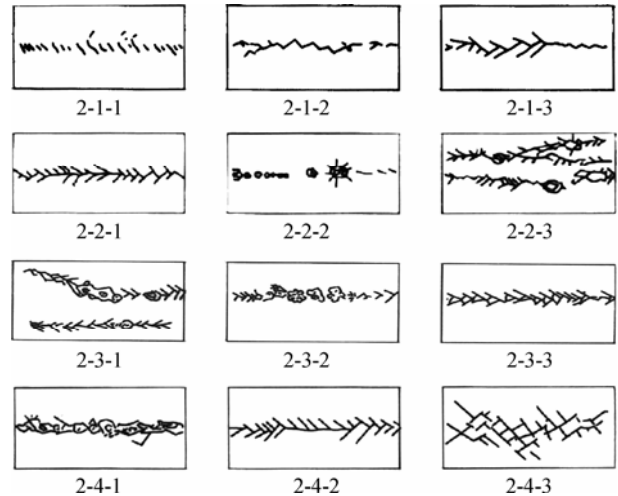


图 2 微裂隙类型特征及力学性质的显微构造素描图  
(视域宽度 0.12 mm)

Fig. 2 Microstructure sketch map showing type characteristics and mechanics properties of microfissures (width of field of vision 0.12 mm)

破裂构造形迹发育为参差不齐及锯齿状延伸的格局，局部有弧形延展的态势，其长度约在 0.1~0.5 mm 之间。

1.3.3 劈裂

即压裂，破裂形迹表现为“人”字状(图 2-1-3)。其破裂构造形迹发育为直线性裂隙及左右搭袂交替生长，其夹角为 30°~90°，其长度约在 0.1~0.6 mm 之间。

1.3.4 暴裂

破裂形迹表现为圆环状与放射状交互穿插的结构格局(图 2-2-2)。圆环状破裂构造形迹  $\phi_{min}$  0.06 mm， $\phi_{max}$  0.15 mm；其组合形状有圆点孤立破裂状，有多层圆环包络状；放射状破裂构造形迹不太发育，但可切割圆环破裂面，其长度约在 0.12~0.3 mm 之间。

1.3.5 复裂

即具有复性结构组合的破裂构造形迹，据其表现特征可分为劈暴(压暴)、横暴(张暴)、横错(张扭)、劈错(压扭)等型式。

(1) 劈暴：即具有劈裂(压裂)及暴裂结构组合的构造形迹，表现为直线性“人”字状及左右交叉破裂之下发育有镶嵌的弧形裂隙(图 2-3-3)，其长度约为 0.1~0.3 mm。

(2) 横暴：即具有横裂(张裂)及暴裂结构组合的构造形迹，表现为弧状、锯齿状、肘状和不规则“人”字状及交叉破裂面与圆环破裂面及矿物团块等同生发育在一起(图 2-2-3)，其长度约为 0.1~0.2 mm。

(3) 横错：即具有横裂(张裂)兼有错裂(扭裂)结构组合的构造形迹，表现为不规则直线性破裂兼具扭性

破裂(交叉破裂)(图 2-4-2), 其长度约为 0.1~0.4 mm。

(4) 劈错: 即具有劈裂(压裂)兼有错裂(扭裂)结构组合的构造形迹, 表现为“人”字状及交叉破裂错位与“X”状破裂(交叉破裂)(图 2-4-3), 其长度为 0.1~1.5 mm。

1.3.6 应力矿物

在应力下发生变形和成分变更与在应力下新生成的矿物, 都能反映受力情况, 因此都叫应力矿物(王嘉荫, 1978)。本项试验分析并未发现原生矿物的变形变位现象, 镜下检出的应力矿物的生成主要与强烈复性破裂有关, 即与张暴(横暴)、压暴(劈暴)等破裂的出现密切相关, 也即是在特殊应力作用下形成的新生矿物(应力矿物)。

根据鉴定结果主要有冲击石英(Pq)、褐铁矿(Li)、绿泥石(Ch)、绿帘石(Ep)等。

(1)冲击石英: 出现较少, 主要发育在应力矿物带的中心位置(图 2-3-2), 颗粒呈浑圆状及港湾状,  $\phi$  0.03~0.24 mm, 边界较模糊, 干涉色为一级灰, 微具波状消光。

(2)褐铁矿: 局部发育, 主要呈现为浑圆状及港湾状(图 2-3-1、2-3-2),  $\phi$  0.03~0.3 mm, 边界清晰, 具弱多色性。

(3)绿泥石: 沿强烈变形微裂隙发育频率较高, 主要呈现为片状及菱形团块状(图 2-2-3、2-3-1、2-3-2、2-4-1),  $\phi$  0.03~0.36 mm, 边界较清晰, 干涉色为一级黄至一级黄绿。

(4)绿帘石: 较少出现, 一般在绿泥石条带团块中心相伴发育, 主要呈现为星点状,  $\phi$  0.01  $\pm$  mm,

边界较模糊, 干涉色为二级蓝至二级绿。

1.4 微裂隙力学性质及其转化

根据变形砾石镜下观测 100 余条微裂隙的研究, 显示出微裂隙规模越小其性质越简单, 反之规模越大其性质越复杂; 发现同一条微裂隙的结构特征在不同的部位是各不相同的(图 3 和图 4), 其力学性质及结构形式可以依次出现劈裂(压裂)-横裂(张裂)-错裂(扭裂)-暴裂-复裂(劈暴、横暴、劈错、横错)等, 甚至还可以出现应力矿物(冲击石英、褐铁矿、绿泥石、绿帘石)。尽管其变形形迹和力学性质出现复杂及频繁的转化与变化, 但微裂隙的延伸走向却保持不变; 而且其变形特征的变化及其力学性质的转换在其走向延伸上是连续的和多变的。

镜下分析的结果表明, 变形砾石微裂隙的长度:  $L_{min}$  0.45 mm,  $L_{max}$  4.00 mm; 其宽度:  $W_{min}$  0.03 mm,  $W_{max}$  0.3 mm。微裂隙延伸长度越长其变形特征及其力学性质越为复杂。

NO:16 微裂隙(图 3)沿走向由始至终(即由右至左)的变形特征依次为: 应力矿物(冲击石英(Pq)+绿泥石(Ch))-暴裂(B)-劈裂(Y)-暴裂(B)-劈暴(YB)-暴裂(B)-劈暴(YB)-劈裂(Y)-横裂(Z)-横错(ZN)-劈错(YN)-横裂(Z)-劈裂(Y)-横裂(Z)-横错(ZN)-劈裂(Y)-劈暴(YB)等; 其相应的力学性质的变化依次为: 熔蚀性-暴性-压性-暴性-压暴性-暴性-压暴性-压性-张性-张扭性-压扭性-张性-压性-张性-张扭性-压性-压暴性等。这组微裂隙的变形形迹的改变及力学性质的转换多达 17 级以上。

NO:30 微裂隙(图 4)沿走向由始至终(即由左向

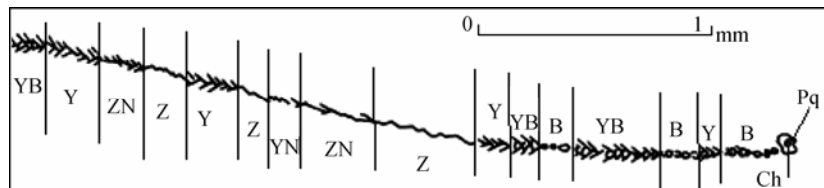


图 3 变形砾石 NO:16 微裂隙结构特征及力学性质转化(根据岩石薄片镜下素描)

Fig. 3 Microfissure textural characteristics and mechanics property conversion of No. 16 deformed gravel (based on optical sketch of thin section)

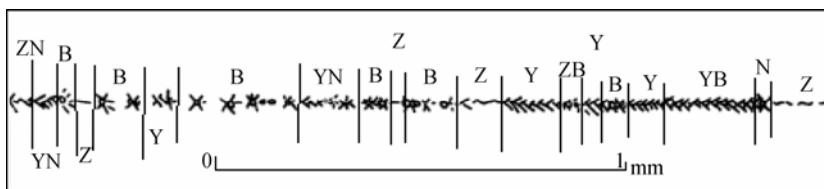


图 4 变形砾石 NO:30 微裂隙结构特征及力学性质转化(根据岩石薄片镜下素描)

Fig. 4 Microfissure textural characteristics and mechanics property conversion of No. 30 deformed gravel (based on optical sketch of thin section)

右)的变形特征依次为：横错(ZN)-劈错(YN)-暴裂(B)-横裂(Z)-暴裂(B)-劈错(YN)-暴裂(B)-劈错(YN)-暴裂(B)-横裂(Z)-暴裂(B)-横裂(Z)-劈裂(Y)-横暴(ZB)-劈裂(Y)-暴裂(B)-劈裂(Y)-劈暴(YB)-错裂(N)-横裂(Z)等；其相应的力学性质的变化依次为：张扭性-压扭性-暴性-张性-暴性-压扭性-暴性-压扭性-暴性-张性-暴性-张性-压性-张暴性-压性-暴性-压性-压暴性-扭性-张性等。这组微裂隙的变形形迹的改变及力学性质的转化可达 20 级以上。

上述特征表明，微裂隙在走向方向(也即裂隙的发展方向)，存在连续的应力变形形迹的更替和力学性质的改变；意味着变形应力在连续介质的传递过程中，存在着复杂的性质转变和周期性规律。同时这些事实也表明，连续的应力性质转变和复杂的变形形迹更替是在同一应力作用之下完成的。从微裂隙分布位置与砾石变形外力接触面的相互关系分析，大多数边缘微裂隙的形成都与砾石长轴方向两侧的受力状态存在直接的关系，少数中心微裂隙的出现则与砾石内部物质的应力状态有关。

## 2 形成机制

岩石受力实验证明，岩石内部的微裂隙的发育与其遭受的应力状态密切相关，即遵循岩石变形的应力-应变准则(Somerton Wilbur H., 1970)。

庐山变形砾石内部的特殊变形构造形式，也应遵循岩石变形的应力应变规律，所不同的是与一般岩石变形的形式更为复杂，即在极小的范围内频繁出现力学性质的转化及交替发育不同性质的变形形迹，这在过去的岩石变形研究中还是极为罕见的现象，而且变形砾石内部发育的微裂隙的构造型式也是十分复杂和极为罕见的，这些都反映出变形砾石的受力状态及微裂隙的发展过程是十分特殊和十分复杂的。

从砾石的宏观特征与内部变形以及岩石物质状态的综合分析表明，这种微裂隙是在较低温度下由特殊力系作用而形成的，与一般岩石构造的形成过程中力系作用及效应相比较，是一种冷构造作用形式。

力学光弹性试验的结果(大连工学院数理力学光测组, 1978)表明，物体围绕着一个平衡力系小区域产生剧烈局部应力，此区域以外几乎不受应力的影响。遵循圣维南原理(Saint-Venant's principle)，物体局部边界表面承受的表面力为平衡力系时，平衡表面力只在受力部位附近产生显著的应力，而在远处其应力急剧减少并趋于零(赵学仁, 1994)。这种受力机制及力系平衡原理可以很好地解释变形砾石的

受力状态，反映砾石是遭受了局部的平衡力系作用，而且是既密集、又分散、还须同时发生作用的复杂力系的组合。即意味着砾石遭受外力的边界条件是在同一地质过程的作用之下呈多颗粒接触的平衡力系的组合。

岩石受力超过抵抗强度便产生破裂，依据格里菲斯准则(Griffith norms)表述，破裂是由微裂隙尖端的应力集中所引起的，当方向最有利的微裂隙尖端附近的最大应力达到材料的特征值时破裂便开始发生(耶格 J.C., 库克 N.G.W., 1981)。用公式表述为：

$$\delta(A+Q) - \delta n - \gamma \delta S = 0. \quad (1)$$

式中： $\delta(A+Q)$ 为施加在该体积上的外力所作的功和给予它的热量， $\delta n$ 为动能变化和内力所作的功(即位能变化加上耗散)， $\delta S$ 为裂隙面增量， $\gamma$ 为单位破裂功。反映边界砾石嵌入挤压条件，产生裂隙尖端应力集中(图 5)，进而导致裂隙的扩展。

更多的实验表明，单位破裂功  $\gamma$  与破裂扩展速度和温度有关。既表明应力的传递除与砾石边界条件有关之外，而且还与边界作用环境有关。

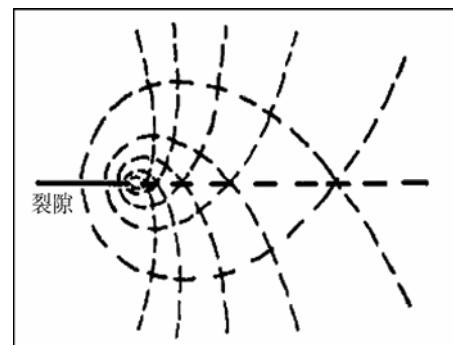


图 5 岩石裂隙尖端应力状态  
Fig. 5 Point stress state of rock fissure

岩石的破裂形式依据伊尔文准则(Irwin norms)表述(科斯特罗夫 B., 1979)为：

$$\sigma_{ik} \times n_{ik} \approx k_i \div \sqrt{2r}. \quad (2)$$

式中： $K_i(k_1, k_2, k_3, \dots, w)$ 为应力强度系数。这个准则证明，随着破裂产生的条件不同，它可以由张裂方式或剪切方式以及后者产生的横切与顺切等方式来完成，反映延时破裂过程中能够形成多种破裂形式及应变图像。

如令  $k = k_{1c}$ ，(1)和(2)两式联立则有：

$$K_{1c}^2 = 2\gamma E/\pi(1-\nu^2). \quad (3)$$

式中： $K_{1c}$ 为材料临界值， $E$ 为杨氏模量， $\nu$ 为泊松系数。表明应力传递与破裂形迹产生是连续发生的。

裂隙的发展受岩石不均匀性的影响，引入巴林布拉特模型(诸武扬, 1979)：

$$K_1 = \int_0^d g(s) (ds / \sqrt{s}) = (N) / \pi. \quad (4)$$

式中:  $K_1$ 为应力强度系数,  $g(s)$ 为距裂隙端部距离 $s$ 函数的内聚力分布,  $d$ 为端部地带宽度。表明岩石裂隙扩展是由内聚力起作用。在平衡状态下, 内聚力和位移跃变在端部地带内的分布是独立的, 由岩石材料性质来决定。

不均匀性岩石在应力作用下, 符合列昂诺夫-帕纳寿克模型(科斯特罗夫 B., 1979):

$$(u_i^+ - u_i^-) n_i = \delta. \quad (5)$$

其公式计算表明, 单位破裂功不是材料的常数, 功的一部分消耗在联系减弱带内位移跃变分布的改变上。

根据岩石的力学实验结果, 这种分散的多边界的微弱强度应力条件促使岩石产生疲劳断裂(诸武扬, 1979)及其效应, 整个过程表现为晶格滑移(A)-产生微裂纹(B)-微裂纹连接(C)-宏观裂纹扩展-直至断裂(D)(图 6), 在外加应力 $\sigma_1$ 作用之下, 经 $N_1$ 周期产生滑移,  $N_2$ 周期出现微裂隙,  $N_3$ 周期形成宏观裂隙,  $N_4$ 周期后发生断裂; 如外加应力低于疲劳极限值 $\sigma_r$ , 则材料可经受足够长( $N > 10^7$ 周期)的疲劳周期而不会发生断裂, 而只会产生微裂隙构造变形形迹。

庐山第四纪沉积物样本中的砾石所遭受的显微破裂形式非常特殊, 实际上是一种切穿范围有限的微裂纹构造, 并且没有发生岩石(或岩块)的宏观破裂及断裂。在庐山变形砾石样本的微裂隙中, 除具有压性、张性、扭性及其复性特征之外, 还出现了特殊的暴性结构特征。这种暴性特征具有冲击爆发(或爆破)的特点, 但是仍具有切穿范围有限的微裂纹构造形状, 即仍低于疲劳极限值的微弱应力的变形特征, 这个特征意味着岩石标本外加应力还具有脉动冲击性作用的特点。

根据上述力学实验和破裂准则及物理模型等方

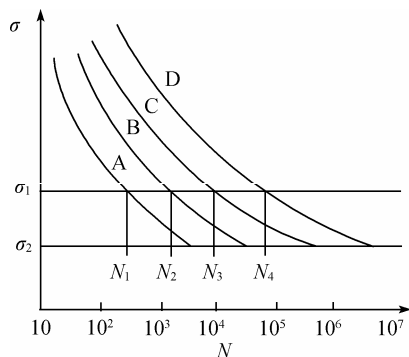


图 6 岩石破裂扩展实验图解

Fig. 6 Enlarged experimental diagram of rock cracking

面的综合分析表明, 庐山第四纪沉积岩石样本(砾石)遭受了既密集、又分散、还具同时发生作用的长时期的多边界外力条件及平衡力系, 在内部形成破裂其应力传递过程和性质改变与变形形迹转变及其做功连续扩展都是能够实现的, 而且是低于疲劳极限的具有脉动性作用的微弱应力造成的。

### 3 地质环境意义

岩石力学实验和物理模型推演的结果都表明, 岩石样本遭受密集分散颗粒的多边界条件外力平衡力系的作用, 在岩石内部可以形成压性、张性、扭性、暴性及复性的微裂纹变形构造形迹, 其应力在连续介质传递过程中能够发生多种属性的转变和跃迁及扩展, 并反映出外加应力具有脉动及疲劳变形效应的特点, 这个复杂的应力应变图像深刻的揭示及完整地表征了庐山第四纪沉积变形砾石中的微裂隙构造系统。这些变形过程在刚性材料的损伤(余寿文等, 1997)和断裂(哈富宽, 2000)与冲击动力学(王礼立等, 1992)实验中, 获得了清晰的裂纹变形图像。

庐山变形砾石内部特殊的构造型式“人”字形微裂隙(即劈裂), 可以用进一步的疲劳实验及交替滑移裂纹成核模型(Neumann P., 1969)来阐述, 按照 Neumann 模型在拉伸与压缩(即完成一个疲劳周次)交变进行下, 滑移面相继交替发展其裂纹也随之依次长大(图 7)。实际上在低应力(低于疲劳极限值)状态下, 外加应力沿裂隙前端内聚力的分布状态, 是隶属于包络共轭剪切力(图 5)的扩散轨迹, 其相应的左右搭榫式裂隙的交替发展的变形结构面可以是扭性、压扭性和压性, 甚至还可以是张扭性和张性的。

庐山变形砾石内部发育的微裂隙这种特殊的构造变形式, 是低应变的外加应力的脉动冲击变形的结果, 同样在宏观脉动冲击实验中得到了证实。在实验现场使用低功率冲击振动钻切割水泥石渣路面产生的破裂变形图像如图 8 所示, 变形图像表现

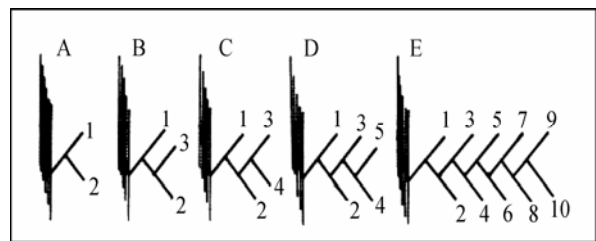


图 7 岩石人字形裂隙扩展形成实验图解

Fig. 7 Experimental diagram of the expansion and formation of herringbone rock fissure

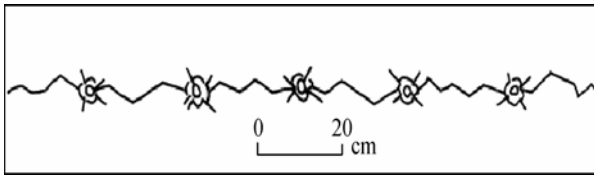


图8 石渣水泥路面脉动冲击试验变形素描图  
(岳麓山木兰路段, 2004.6.)

Fig. 8 Sketch map showing pulsation impact test of deformation of the stone dregs and cement road surface (Mulan road segment of the Yuelu Mountain, 2004.6.)

面, 间隔 30~40 cm 距离重复施钻推进, 光滑平整路面: 其冲击振动中心发育环状及放射状裂隙, 沿其推进方向(即走向方向)发育锯齿状裂隙。实验证明, 低应力疲劳作用在其岩石内部传递过程中, 能够发生从压性-张性-扭性-暴性及复性等性质的转变, 并产生相应的变形结构面及构造形迹。

根据岩石力学实验分析, 安山岩(Somerton Wilbur H., 1970)的岩石破裂控制极限为  $1.8 \times 10^2$  Pa 时岩石仍能保持“人”字形裂隙, 其强度与之出现完全破裂相比仅为  $1/60 \sim 1/100$ ; 同理而论安山岩的蠕变常数(张家诚等, 1986)为  $7.1 \times 10^7$ , 其差异应力强度为  $10^4$  Pa。实验结果证明, 岩石内部其裂隙的出现及产生的应力强度远小于破裂控制极限和完全破裂值及其蠕变常数, 与前述物理数学模型演算的低应力边界条件是完全一致的。岩石实验(Neumann P., 1969)也证明, 岩石内部微裂隙的初始裂纹宽度约为 0.01 mm, 与我们在镜下观察到的庐山变形砾石内部微裂隙最小宽度 0.03 mm 的同一数量级结果是相当一致的。

综合实验的研究结果表明, 庐山变形砾石内部微裂隙的出现及形成, 是处于低温、低应力及其分散密集的多颗粒平衡力系的缓慢长期及间歇脉动作用的边界条件之下。在地球表层作用及地质过程中, 仅有冰冻作用及其运动过程可以满足这种边界条件。在冰冻作用的发育过程中, 低温气候能够将各种碎屑物包裹起来随同冰流一起运动, 由于低温冻结作用使得冰内碎屑颗粒位置相对固定起来, 形成砾石周围镶嵌分散密集碎屑颗粒分布状态。在冰冻物质流的运动过程中, 受不同层次和不同部位的冰流的影响, 砾石上下部位的碎屑颗粒随冰流层流运动与其发生差异流动导致形成擦痕及刻槽或槽沟; 砾石两侧部位的碎屑颗粒由于受冰流间的挤压作用与其发生低温、低应力的分散密集多颗粒作用力系, 随同冰流的长期缓慢运动和冰流的短期间歇跃动的发生而导致砾石内部产生复杂的微裂隙变形形迹及显微构造系统。

庐山第四纪沉积岩石中变形砾石显微构造动力学分析的结果表明了古冰川作用在中国东部地区山地发育的可能性, 并对多种地质作用及自然灾害的发生和演变以及后期改造与识别准则提出新的挑战, 重视地质实践和地质材料与地质事件是解决地质环境演变的根本问题。近年来国际上开发出采用声发射测量岩石历史记忆应力的方法(丁原辰等, 1991), 对庐山第四纪沉积砾石及母岩的测量结果(赵志中等, 2000)为, 其砾石AE应力平均为 0.84~1.02 MPa, 其母岩AE应力平均为 2.77~4.75 MPa, 经过对比分析表明岩石遭受的构造应力与冰冻应力存在显著的数值差异, 庐山第四纪沉积砾石记录了冰冻应力的明确刻划。根据芦林盆地同一层位剖面的古地磁及磁性特征的研究(何培元等, 1992), 本研究剖面初步标定的磁性地层年龄为 0.2~0.4 Ma, 属于中国第四纪大冰期的庐山冰期作用。庐山第四纪冰期的争论及讨论(施雅风等 1989; 何培元等, 1992)是正常的学术问题, 可以促进学科的发展及进步。上述新材料新发现的砾石显微变形构造形迹证实庐山在第四纪晚期曾经确实进入冰冻圈, 是否有大规模的冰川作用存在值得继续进一步深入探索, 这对过去地球气候环境的认识和未来区域气候演化及全球变化的预测具有重要的科学意义。

## 参考文献:

- 褚武扬. 1979. 断裂力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1-342.  
大连工学院数理力学光测组. 1978. 光弹性试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 1-361.  
丁原辰, 张大伦. 1991. 声发射记录不净现象及其在地应力测量中应用[J]. 岩石力学与工程学报, 10(4): 313-326.  
哈富宽. 2000. 断裂物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1-452.  
何培元, 段万倜, 邢历生, 刘兰锁. 1992. 庐山第四纪冰期与环境[M]. 北京: 地震出版社, 1-167.  
胡东生, 庞西磊, 张华京, 徐冰. 2008. 庐山冰川活动遗迹的新证据[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 42(3): 467-470, 476.  
江西, 湖南, 福建, 广东, 广西地质矿产局编. 1984. 中国南岭及其邻区地质图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1-83.  
科斯特罗夫 B. 1979. 构造地震震源力学[M]. 北京: 地震出版社, 1-204.  
施雅风, 崔之久, 李吉钧. 1989. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M]. 北京: 科学出版社, 1-462.  
王嘉荫. 1978. 应力矿物概论[M]. 北京: 地质出版社, 1978, 1-238.  
王礼立, 余同希, 李永池. 1992. 冲击动力学进展[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1-415.  
耶格 J.C., 库克 N.G.W. 1981. 岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1-690.  
余寿文, 冯西桥. 1997. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1-327.  
张家诚, 李文范. 1986. 地学基本数据手册[M]. 北京: 海洋出版社, 1-1377.  
赵学仁. 1994. 弹性力学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社,

1~277.

赵志中, 丁原辰, 钱方, 何培元, 邵兆刚. 2000. 冰川沉积物成因确定的一种新方法[J]. 地球学报, 21(4): 396-400.

周慕林. 1988. 中国的第四系[M]. 北京: 地质出版社, 1-276.

## References:

- Bureaus of geology and mineral resources of Jiangxi, Hunan, Fujian, Guangdong and Guangxi. 1984. Explanatory notes to the geological map of Nanling and neighbouring area China[M]. Beijing: Geology publisher, 1-83(in Chinese with English abstract).
- DING Yuan-chen, ZHANG Da-lun. 1991. Application of the incomplete erosion phenomenon in acoustic emission activities to the measurement of geostresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 10(4): 313-326(in Chinese with English abstract).
- Optical measure group of the mathematics and physics and mechanics at Dalian Engineering Collogy, Optical elastic experiment[M], Beijing: Defence industry publisher, 1978. 1-361. (in Chinese)
- HA Fu-kuan. 2000. The foundation of splitting physics[M]. Beijing: Science publisher, 1-452(in Chinese).
- HE Pei-yuan, DUAN Wan-ti, XING Li-sheng, LIU Lan-suo. 1992. Quaternary glaciation and environment in Lushan Mountain[M]. Beijing: Seismological press, 1-167(in Chinese with English abstract).
- HU Dong-sheng, PANG Xi-lei, ZHANG Hua-jing, XU Bing. 2008. Vestigial New testimony of glacial activity in the Lushan Area of China[J]. Journal of Huazhong Normal Universty(Nat. Sci), 42(3):467-470, 476(in Chinese with English abstract).
- Jaeger J C, Cook N G W. 1981. The foundation of rock mechanics[M]. Beijing: Science publisher, 1-690(in Chinese).
- Кочров Б В. 1979. The earthquake focus mechanics of the construct earthquake[M]. Beijing: Earthquake publisher, 1-204(in Chinese).
- Somerton Wilbur H. 1970 Rock mechanics-theory and practice, Society of mining engineers[M]. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. New York, 1-762.
- SHI Ya-feng, CUI Zhi-jiu, LI Ji-jun. 1989. The Quaternary glaciation and environment in east area of China[M]. Beijing: Science publisher, 1-462(in Chinese).
- WANG Li-li, YU Tong-xi, LI Yong-chi. 1992. The progress of the pound dynamics[M]. Hefei: Chinese science and technology university publisher, 1-415(in Chinese).
- WANG Jia-ying. 1978. The introduction of the stress minerals[M]. Beijing: Geological publisher, 1-238(in Chinese).
- YU Shou-wen, FEN Xi-qiao. 1997. The harm mechanics[M]. Beijing: Qinghua university publisher, 1-327(in Chinese).
- ZHANG jia-cheng, LI Wen-fan. 1986. The basic data manual of earth science[M]. Beijing: Ocean publisher, 1-1377(in Chinese).
- ZHAO Xue-ren. 1994. The foundation of the elastic mechanics[M]. Beijing: Beijing science and engineering university publisher, 1-277(in Chinese).
- ZHAO Zhi-zhong, DING Yuan-chen, QIAN Fang, HE Pei-yuan, SHAO Zhao-gang. 2000. Anew method for identifying moraine[J]. Acta Geoscientica Sinica, 21(4): 396-400(in Chinese

with English abstract).

ZHOU Mu-lin. 1988. Quaternary system for China[M]. Beijing: Geology publisher, 1-276(in Chinese).

ZHU Wu-yang. 1979. The foundation of splitting mechanics[M]. Beijing: Science publisher, 1-342(in Chinese).

## 图版 I Plate I

1. 微裂隙条带—压裂-张裂-暴裂-压暴(由上中-左下)
  2. 微裂隙条带—暴裂-压暴-压裂(由左上-左下)
  3. 微裂隙条带—张裂(由左上-左下)
  4. 微裂隙条带—张裂(左)、张暴(右)
  5. 微裂隙条带—压裂(由右中-左下)
  6. 微裂隙条带—张暴(左)、张裂(右)
  7. 微裂隙条带—张裂(由左上-左下)
  8. 微裂隙条带—张裂(中部)、压扭-张扭(右部、由右上-右下)
  9. 微裂隙条带—张暴(上部)-压暴(下部、左上-左下)
  10. 微裂隙条带—暴裂(由中上-左下)、压裂-张裂-压裂(由左上-右下)
  11. 微裂隙条带—扭裂-暴裂-压扭-张扭(左)、暴裂-张暴(右、由右上-右下)
  12. 微裂隙条带—暴裂-张裂(由左上-左下)
  13. 微裂隙条带—压暴-张暴(左上~右下)
  14. 微裂隙条带—张暴-暴裂(由右上-右下)
  15. 微裂隙条带—暴裂-冲击矿物(褐铁矿)(由右上-右下)
  16. 微裂隙条带—扭裂-暴裂-冲击矿物(绿泥石)(由右中-左中)  
(照片: 长度为 2 mm, 宽度为 1 mm. 详细说明见正文)
1. microfissures belt — press crack - pull crack - explosion crack - press explosion (from to above center - left under)
  2. microfissures belt — explosion crack - press explosion - press crack (from to left above - left under)
  3. microfissures belt — pull crack (from to left above - left under)
  4. microfissures belt — pull crack (left), pull explosion (right)
  5. microfissures belt — press crack (from to right center - left above)
  6. microfissures belt — pull explosion (left), pull crack(right)
  7. microfissures belt — pull crack (from to left above - left under)
  8. microfissures belt — pull crack(center), press twist - pull twist (right, from to right above - right under)
  9. microfissures belt — pull explosion(above) - press explosion (under, left above - left under))
  10. microfissures belt — explosion crack(from to center above - left under), press crack - pull crack (from to left above - right under)
  11. microfissures belt — twist crack - explosion crack - press twist - pull twist (right, from to right above -right under)
  12. microfissures belt — explosion crack - pull crack (from to left above - left under)
  13. microfissures belt — press explosion - pull explosion (left above - right under)
  14. microfissures belt — pull explosion - explosion crack (from to right - right under)
  15. microfissures belt — explosion crack - strike mineral (limonite) (from to right above - right under)
  16. microfissures belt — twist crack - explosion crack -strike mineral (chlorite) (from to right center - left center) (photograph: length is 2 mm, width is 1 mm. expound to see text)



图版 I Plate I

