

压性雁列构造变形过程中热场演化的实验研究*

刘培洵** 马 瑾 刘力强 马胜利 陈国强

中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 在实验室利用铂电阻接触测温系统和红外热像仪两种仪器, 观测了含压性雁列断层结构的岩石标本在变形过程中的温度分布. 两种方法的测量结果都显示了热场在时间上和空间上与应力、应变场的关系. 实验显示, 在岩石标本的不同构造部位的增温速率不同, 反映了不同部位的应力分布不同. 实验过程中标本变形可分3个阶段: 弹性阶段、粘滑阶段、以及破裂阶段. 温度变化过程也分为3个阶段, 各阶段的温度上升速率不同, 热辐射场也发生了相应的变化, 反映了不同阶段的主导增温机制发生了改变. 实验结果对利用卫星热红外波段资料研究断层现今活动提供了物理依据.

关键词 雁列断层 粘滑 热红外辐射 温度 增温机制

利用 NOAA 卫星热红外波段资料研究断层活动的结果表明, 热红外信息中包含了与断层近期活动有关的信息, 其中一些可能与区域应力、应变场关系密切^[1]. 卫星影像信息受多种因素影响, 既包括应力、应变场的变化, 也包括物质状态变化的影响, 例如水和气体的参与等的影响^[2,3]. 因此, 卫星影像是多种因素的综合结果. 在实验室进行实验研究是解决这个问题一个途径, 因为实验室温度、变形条件可控、物质状态已知, 可从多种角度设计观测, 分析标本各部位热像变化的原因, 进而研究红外辐射场与应力、应变场的关系, 为卫星影像资料的分析提供依据.

我们的实验试图研究下列问题: 岩石机械变形可以引起温度变化^[4,5], 但遭受变形的岩石标本不同部位应力大小不同, 这些差异能否在热场上得到充分反映; 在变形过程中, 标本可能经历各种变形: 例如弹性变形、塑性变形、摩擦滑动和破裂等, 变形机制的改变对热红外辐射会产生什么影响; 失稳前后断层带发生位移加速、应力突降等变化, 能否在热像上观测到等.

如果在实验室证明上述变形特征可能在热场上得到反映, 并证明热红外辐射场与应力、应变场之间存在相关关系, 就能为利用热红外信息研究区域应力场的分布和演化提供依据. 我们在过去构造物理实验基础上, 开展了断层变形过程中热场变化的实验观测.

1 实验条件与观测设备

实验中应用了红外热像仪和接触式测温仪同步观测岩石变形引起的热场变化, 并记录实验过程中应力、位移参数的变化.

实验中使用的热像仪为武汉高德公司 IR913A 型非制冷焦平面红外热像仪, 光谱范围 8—14 μm , 测温范围 10—350 $^{\circ}\text{C}$, 模数转换 16 bit, 温度分辨率 0.06 K, 镜头焦距 40 mm, 聚焦范围 0.5— ∞ m, 空间分辨率 320 $\times$ 240 像素. 加装 1394 接口后, 实现了连续数传和录制, 最长录制时间仅受硬盘空间限制, 最快录制速度为 50 帧/s. 此次实验中红外热像仪观测距离 0.65 m, 热像采集频率 12.5 帧/s. 实验开始前和结束后分别录制一段均匀温度场热像,

2006-05-29 收稿, 2006-08-23 收修稿

* 国家自然科学基金(批准号: 90202018, 40572125)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2004CB418405)资助项目

** E-mail: liupeixun@sina.com

用于数据处理时进行本底场校正。

由于使用的热像仪为非制冷型,长时间连续记录时零点漂移和本底场畸变较为严重.为此我们在数据处理时,依据实验前后录制的均匀温度场数据进行了本底场畸变和零漂校正,并针对红外热像数据高频噪声较强的问题进行了低通滤波.实验所使用的热像仪的温度标定有较大的偏差,有待重新严格标定,故此次实验着重研究热辐射亮温(T_B)的相对变化.实验过程中实际温度量值主要依据铂电阻测温仪的测量结果.

利用一套独立于热像仪的多点铂电阻接触式测温仪,与热像仪进行同步观测.该系统的温度观测范围为 $-10\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度分辨率 2 mK ;实验中采样频率为 5 Hz .这套温度观测设备的灵敏度比热像仪高一个数量级以上,可以作为热像仪的校正基准;多个测点的快速扫描,可以获得温度场空间分布形态与动态演化过程,可与红外图像进行对比分析.

实验中使用了环境温度湿度计、热红外点测温仪等对实验环境进行监测,采取了多项措施控制红外背景噪声与扰动^[6].实验环境温度为 $24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 0.75 .

标本为 $500\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的房山花岗岩闪长岩.沿与轴向呈 31° 的方向斜切标本,断层结构见图1,断层段充填石膏.图中圆圈表示温度传感器的部位,以虚线勾画的矩形区和实线勾画的矩形区分别表示热像观测区和本文将分析的区域.

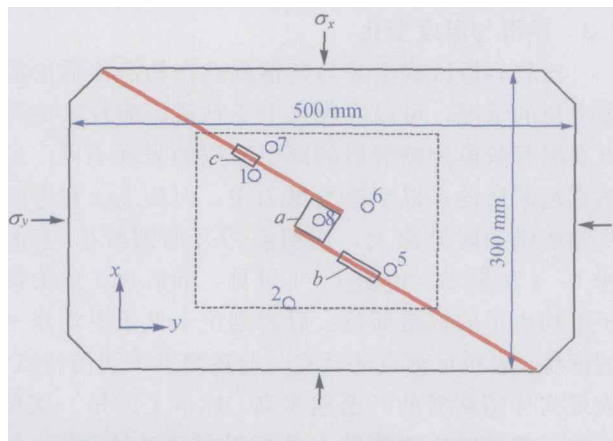


图1 标本结构以及温度、热像仪观测研究区

图中红色粗线表示断层,蓝色圆圈表示温度探头,虚线矩形区表示热像仪观测区,矩形区a,b和c表示图5热像曲线研究区

雁列式断层变形过程中物理场演化的实验结果很多^[7-10],为了不使热场观测受到干扰,本次实验中标本表面没有布设应变片、位移计等发热的传感器.

利用一套双向伺服系统对标本加载.在实验过程中首先在 x 和 y 方向同时加载至 5 MPa ,然后,令 σ_x 保持常数,在 y 方向按位移控制方式继续加载,位移速率为 $0.5\text{ }\mu\text{m/s}$.图2表示实验过程中差应力($\sigma_D=\sigma_y-\sigma_x$)与位移的变化过程.图中蓝色曲线表示在 y 方向的位移控制过程,在 $0\sim 6000\text{ s}$ 期间位移速率保持常数,6000 s后曾进行过加速控制.

很多作者在实验室进行过岩石标本形变过程中的热辐射实验^[11-24].与过去的实验相比较,本次实验有3个特点:(1)严格控制实验室温度,湿度环境;(2)两种相互独立的方法同步测量热场演化;(3)实现了对热像的连续数传,提高了热像时间分辨率.

2 实验结果

由图2中的差应力 σ_D 曲线可见实验过程中标本变形可分3个阶段:弹性阶段($0\sim 3000\text{ s}$)、粘滑阶段($3000\sim 5200\text{ s}$)、以及破裂阶段(5200 s 后).弹性阶段应力和位移保持准线性关系.在粘滑阶段沿断层发生多次粘滑,粘滑事件应力降大小不等,大事件的时间间隔平均为 280 s .实验中观测到在这些变形阶段中温度与热像随空间、时间的变化.

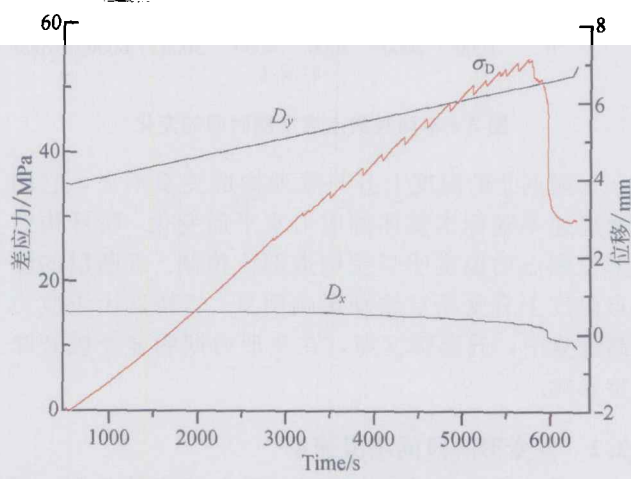


图2 实验过程中差应力与位移的时间过程

红线表示差应力 σ_D , D_y 与 D_x 分别表示 y , x 方向的位移

2.1 不同构造部位的升温速率

图3表示测温系统获得的温度数据随时间的变化. 由图可以看到以下特点: (1) 远离断层的部位②温度变化较小, 该点温度随总体应力的增强而增高, 但增量有限, 直至标本破裂, 温度上升只有大约0.1 K; (2) 雁列岩桥区⑧的温度在变形初期与其他测点曲线相近, 并不突出, 随着断层粘滑错动温度逐渐升高, 在最后破裂阶段温度突增, 温度的升高与应力增加的时间一致. 断层端点附近的⑥点温度变化则在岩桥区破裂扩展过程中逐渐突出. (3) 断层附近的测点①, ⑤与⑦分别位于断层两侧, 与断层的距离也不相同, 这些点的增温量随与断层的相对位置而变化. (4) 在粘滑阶段观测到断层附近测点以及岩桥区测点的快速增温与粘滑应力降同步发生, 而远离断层的测点对粘滑则没有明显的温度变化响应. 测点温度的变化与标本不同部位的应力状态关系密切.

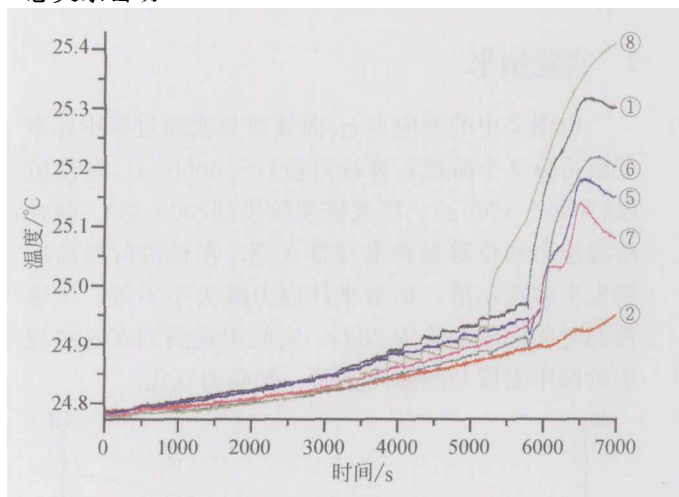


图3 不同观测点温度随时间的变化

测点②的温度上升与雁列构造关系不大, 它的增温速率随标本整体的应力水平而变化. 特殊构造部位测点的温度明显受构造部位控制. 近断层的测点温度上升受断层错动影响明显. 岩桥区由于应力高度集中, 升温幅度高, 在变形后期明显受破裂摩擦影响.

2.2 各变形阶段的增温速率

图3除显示不同构造部位升温速率的差别, 还显示了各变形阶段的平均升温速率的差别. 表1表示温度测点在各变形阶段温度上升的平均速率.

表1 各变形阶段的温度平均上升速率($\text{mK} \cdot \text{s}^{-1}$)

测点编号	弹性阶段	粘滑阶段	破裂阶段
2	0.011	0.024	0.042
6	0.013	0.031	0.177
7	0.015	0.034	0.101
8	0.016	0.041	0.274
5	0.02	0.035	0.129
1	0.02	0.042	0.204

弹性阶段(0—3000 s): 温度随应力增大而升高, 属于应力升温型, 平均升温速率最低为0.01 mK/s(测点②); 最高为0.02 mK/s(测点①, ⑤). 对比应力水平和温度上升的变化计算出应力升温量平均为1.2 mK/MPa.

粘滑阶段(3000—5200 s): 粘滑阶段升温速率较弹性阶段明显增加. 近断层部位升温随时间呈阶梯式上升. 粘滑时这些部位温度突升, 间粘滑期温度或保持不变, 或逐渐降低. 远离断层的部位温度上升与粘滑的关系不明显. 最低升温速率: 0.02 mK/s(测点②); 最高升温速率: 0.04 mK/s(测点①, ⑧). 粘滑阶段应力升温量平均为3—4 mK/MPa.

破裂阶段(5200后): 破裂阶段升温速率增加显著, 呈数量级地增大. 最高平均升温速率为0.2—3 mK/s(测点⑧, ①). 这个部位的升温显然受破裂影响, 属于破裂摩擦升温. 远离断层的部位则不同, 平均升温速率只有0.04 mK/s(测点②), 这里升温速率的提高是由标本整体应力水平提高所致.

2.3 粘滑与温度变化

比较岩桥区测点⑧与其他测点在粘滑前后的温度变化的情况, 可以发现几个受粘滑影响较大的测点在温升阶段和粘滑后的降温阶段的表现不同. 虽然靠近断层的点以摩擦升温为主, 但测点①和⑤每次粘滑错动时升温大, 而测点⑦升温则较小(参阅图1, 4和表2). 由图1, 4可见, 前者位于应力高于平均水平的构造部位, 后者则位于低于平均水平的部位. 岩桥区测点⑧具有与前述测点不同的特点, 表现为伴随粘滑的升温速率高. 标本上的每一次粘滑都引起该区应力值的上升是引起升温的原因. 加速升温发生在3858 s后, 显然与岩桥区的破裂摩擦有关.

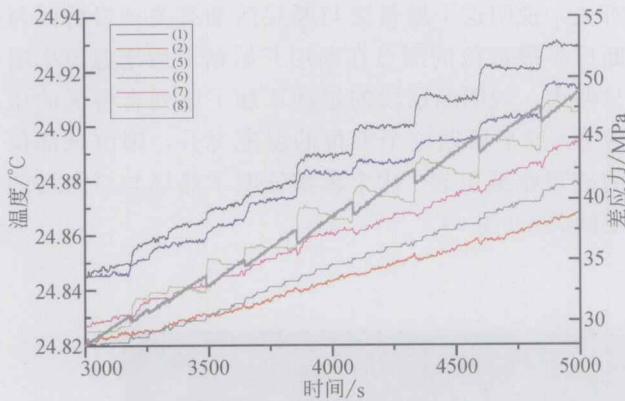


图 4 粘滑阶段测点温度与应力-时间曲线的对比

图中数字表示曲线代表的温度测点, 灰色粗实线表示应力-时间曲线

表 2 粘滑事件 3849 的升温 and 降温速率 ($\text{mK} \cdot \text{s}^{-1}$)

编号	升温速率	降温速率
8	0.906	-0.045
1	0.296	0
5	0.283	-0.011
7	0.074	0

2.4 粘滑与热像变化

分别计算了岩桥区(图 1 矩形 a)与左、右断层区(图 1 矩形 b, c)的平均热辐射亮温-时间过程(图 5)。由图可见, 随着粘滑次数的增加, 热辐射亮温逐渐升高, 每次粘滑均伴随热辐射亮温的快速上升, 这个结果与测温计的记录结果类似; 粘滑过程中岩桥区(红色曲线)与断层区反映的 T_B 值-时间过程有所不同, 前者伴随粘滑有一个快速上升和随后的逐渐下降, 后者则表现为快速升降, 高值持续时间仅有 20 多秒, 约为岩桥区反映的高值时间的 1/5; 值得指出的是左、右断层的 T_B 值-时间过程不完全相同, 有时右断层的 T_B 值的上升高于左断层, 有时则相反。说明雁列断层两侧的断层段是交替活动的, 热辐射亮温上升主要发生在错动断层段。

这里存在应力升温 and 摩擦升温两种机制, 应力引起的升温值虽小, 但由于应力变化涉及范围大, 整体蕴含的热量大, 因此散热较慢(如岩桥区); 而摩擦滑动发生在断层带附近, 升温值虽大, 但由于涉及范围小, 总体热量小, 所以散热快(如断层附近)。

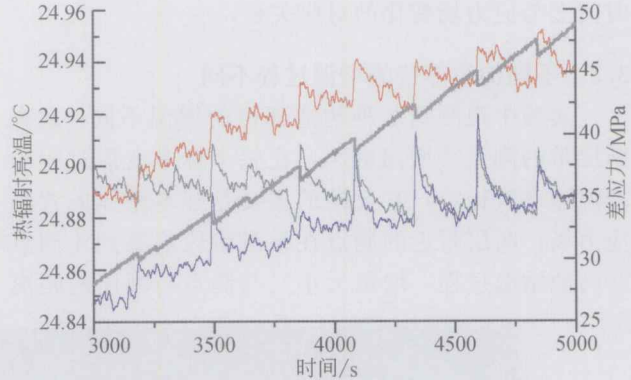


图 5 岩桥区(红色)、左断层区(绿色)和右断层区(蓝色)的热辐射亮温与差应力(灰色)的关系

3 结论

3.1 两种仪器的温度场观测结果基本一致

比较在相同位置上铂电阻接触式测温系统和红外热像仪的温度观测曲线, 可以看出其观测结果基本一致, 比如岩桥区的铂电阻测温曲线和红外测温结果均显示出与粘滑同步变化的特点。但这两种仪器也存在明显不同, 铂电阻测温仪的温度分辨率明显优于热像仪。热像仪观测数据经校正和滤波后可清晰地看见粘滑过程中温度的起伏, 可见经过校正后的分辨率已明显优于热像仪生产厂家的标称值。但校正和滤波后, 热像仪仍有一些较大的残存误差, 如左断层温度变化的总体趋势就有较大的偏差, 这是由于热像仪在工作时自身不均匀发热以及校正后的残存误差引起的。相比之下, 铂电阻测温系统更为精确可靠。另一方面, 红外热像仪的温度响应速度明显快于铂电阻测温系统, 这在断层区的温度变化曲线上可以看出, 粘滑时断层附近温度突升并很快下降, 红外热像仪对这类信号的响应显然优于铂电阻测温系统。

3.2 热场与应力、应变场密切相关

实验中接触测温仪测得的温度和由热像仪测得的热辐射亮温 T_B 的分布与变化都显示了热场与应力、应变场密切相关。实验是在温度与湿度稳定, 没有大气干扰下进行, 标本变形中没有水和气的参与。实验中接触式测温仪与热像仪两种方法反映的结果相互验证, 共同显示热场变化与应力、应变场变化密切相关。实验结果也表明了增温量在空间上、

时间上与应力场变化的对应关系。

3.3 不同构造部位的增温过程不同

实验中观测到3种构造部位的增温不同。远离断层带的测点②增温最小，在整个标本变形过程中增温速率较稳定，它反映的主要是标本整体的背景应力场；断层附近的测点在粘滑阶段观察到比测点②高的增温过程，增量大小又与测点与断层的距离

有关，说明这个增量应与断层活动有关；岩桥区与断层扩展部位的测点在断层开始粘滑后增温速率明显增大，说明断层段的错动增加了雁列岩桥区的压应力。变形后期这个部位的温度突升，则由该部位的破裂摩擦引起。这个事实证明了热场与应力场的空间关系(图6)。

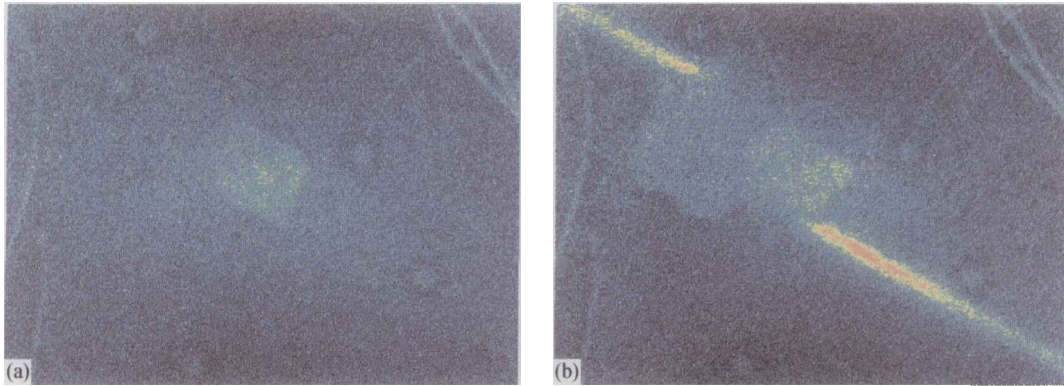


图6 两个时刻的红外热像图

(a) (时间为5742s)中部岩桥温度较高；(b) (时间为5966s)断层区摩擦升温，且岩桥附近岩体剥落

3.4 粘滑阶段断层附近增温机制分析

在粘滑阶段观测到断层附近测点增温速率明显高于远离断层的测点②。除与其他测点一样有一个缓慢的上升速率外，热像仪与测温仪记录同时揭示出断层附近测点还存在多次阶梯式升温。通过与实验中记录的应力-时间过程对比，发现这些阶梯式升温与粘滑应力降同步。这与挤压升温、拉伸降温的结果有所不同^[5]，表明其升温机制不同。对比发现大多数断层附近测点在温度突升前均存在短暂的快速降温。先降后升的特点在5791s应力降时表现最突出。在该时刻由于断层滑动产生的应力降引起①、⑤、⑥测点温度下降。因此，可以认为，快速降温与应力降有直接关系，而突发升温则与快速摩擦升温有关，摩擦导致温度升高需经过一段时间由摩擦点传导到观测表面，因此时间滞后较长。由此说明变形机制的变化改变了增温机制。

3.5 不同阶段主导增温机制不同

实验中断层区存在3类变形。由图3和表1，2可以看到在弹性阶段，由变形引起的温度变化范围在0.01—0.02 mK/s。不同观测点之间看不到明显

区别，属于应力升温。在粘滑阶段，远离断层测点②升温速率有所增大，但仍保持在 ± 0.02 mK/s，而距离断层最近的测点①、⑤升温速率比弹性阶段高约一倍，属于摩擦升温。在破裂阶段测点②由于应力的非线性增大以及周围高应力区的影响，升温速率也有所提高，但没有数量级的区别。雁列岩桥区⑧和距离断层近的测点⑥等升温速率则有数量级的变化，属于破裂快速摩擦升温。由此可见不同变形阶段主导变形机制发生变化，而增温机制的变化，也影响了热场的分布。

以上结果可能为进一步分析区域变形阶段提供了物理根据，并为利用热像探寻断层失稳错动提供了新的途径。但有待深入研究的问题还很多。例如：实验结果虽然表明红外热像设备可清楚地观察到由应力引起的热场变化，但这是在实验室近距离极少干扰因素下观测的，并且数据经过认真地校正、滤波、图像增强等技术处理。卫星上使用的热像仪的分辨率虽然可能高于我们使用的民用设备，但观测距离非常远、干扰因素非常多，因此通过卫星观测地表变形升温将面临极大的困难。我们在实验室获

得的温度变化远小于一些作者报道的地震前观测到的温度变化,如果这些变化确由构造运动引起,那么可能还存在其他机制,或可能存在由应力场变化诱导的其他因素.应变速率与散热速率的相互关系是解决实验中观测到的现象能否在野外观测到的关键,也有待于进一步研究.

致谢 作者感谢高祥林、单新建、屈春燕、陈顺云、王凯英、扈小燕等的帮助和有益的讨论.

参 考 文 献

- 马 瑾,汪一鹏,陈顺云,等.卫星热红外信息与断层活动关系讨论.自然科学进展,2005,15(12):1467—1475
- 强祖基,孔令昌,王弋平,等.地球放气、热红外异常与地震活动.科学通报,1992,(24):2259—2262
- 徐秀登,徐向民.地震前红外异常的基本特征与成因机理.西北地震学报,2001,23(3):310—312
- 谢锐生著,热力学原理.关德相,等译.北京:人民教育出版社,1980
- 刘培洵,刘力强,陈顺云,等.地表岩石变形引起热红外异常的实验研究.地震地质,2004,26(3):502—511
- 刘力强,陈国强,刘培洵,等.岩石变形实验热红外观测系统.地震地质,2004,26(3):492—501
- Ma J, Du YJ, Liu LQ. The instability of en-echelon cracks and its precursors. J Phys Earth, 1986, 34(Suppl): S141—S157
- 马胜利,邓志辉,马文涛,等.雁列式断层变形过程中物理场演化的实验研究(一).地震地质,1995,17(4):327—335
- 马胜利,刘力强,马文涛,等.雁列式断层变形过程中物理场演化的实验研究(二).地震地质,1995,17(4):336—341
- 马 瑾,马胜利,刘力强,等.断层几何结构与物理场的演化及失稳特征.地震学报,1996,18(2):200—207
- 崔承禹,邓明德,耿乃光.在不同压力下岩石光谱辐射特性研究.科学通报,1993,38(6):538—541
- 邓明德,耿乃光,崔承禹.岩石应力状态改变引起岩石热状态改变的研究.中国地震,1997,13(2):179—185
- 董玉芬,王来贵,刘向峰,等.岩石变形过程中红外辐射的实验研究.岩土力学,2001,22(2):134—137
- 耿乃光,崔承禹,邓明德.岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端.地震学报,1992,14(增刊):645—652
- 耿乃光,崔承禹,邓明德,等.遥感岩石力学及其应用前景.地球物理进展,1993,8(4):1—7
- 吴立新,王金庄.煤岩受压红外热象与辐射温度特征实验.中国科学, D辑, 1998, 28(1): 41—46
- 刘善军,吴立新,吴育华,等.受载岩石红外辐射的影响因素及机理分析.矿山测量,2003,3:67—70
- 钱家栋,邓明德,尹京苑,等.雷达用于地震预测的基础实验研究.地球物理学报,2005,48(5):1103—1109
- 尹京苑,房宗绯,钱家栋,等.红外遥感用于地震预测及其物理机理研究.中国地震,2000,16(2):140—148
- Ouzounov D, Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. Advances in Space Research, 2004, 33(3): 268—273
- Freund F. Charge generation and propagation in igneous rocks. Journal of Geodynamics, 2002, 33(4—5): 543—570
- 吴立新,刘善军,吴育华,等.遥感-岩石力学(I)——非连续组合断层破裂的热红外辐射规律及其构造地震前兆意义.岩石力学与工程学报,2004,23(1):24—30
- 吴立新,刘善军,吴育华,等.遥感-岩石力学(II)——断层双剪粘滑的热红外辐射规律及其构造地震前兆意义.岩石力学与工程学报,2004,23(2):192—198
- Wu LX, Liu SJ, Wu YH, et al. Precursors for rock fracturing and failure—Part I: IRR image abnormalities. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43: 473—482