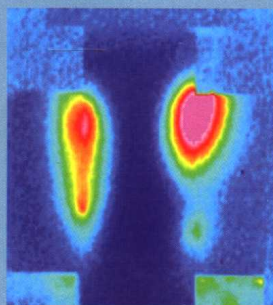
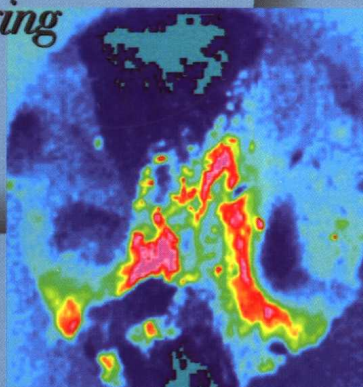


岩石受力的红外 辐射效应

刘善军 吴立新 著



*Yanshi Shouli De
Hongwai
Fushe Xiaoying*



冶金工业出版社

岩石受力的红外辐射效应

刘善军 吴立新 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2005

内 容 简 介

全书共分为8章,第1章介绍热辐射的基础理论及热成像原理;第2~5章介绍多种加载方式下岩石应变及破裂过程的红外辐射规律;第6~7章介绍岩石摩擦滑动过程中的红外辐射规律;第8章讨论岩石加载过程中产生红外辐射效应的机理。考虑到岩石加载下通常产生两类力学现象——破裂及滑动,因此,将典型断层(雁列断层及共线非连通断层)活动的红外辐射放在了第4章作为岩石破裂问题介绍,而交汇断层活动的红外辐射部分则放在了第7章作为岩石滑动问题介绍。

本书可供从事岩石力学、遥感等的技术人员阅读,也可供地质、矿山的研究人员、技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石受力的红外辐射效应/刘善军等著. —北京:
冶金工业出版社, 2005. 9
ISBN 7-5024-3791-6

I. 岩… II. 刘… III. 岩石力学—红外辐射
—辐射效应 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 074624 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 王之光 美术编辑 李 心

责任校对 石 静 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2005 年 9 月第 1 版, 2005 年 9 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 5.125 印张; 2 彩页; 140 千字; 153 页; 1-1500 册

19.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

1988年，苏联学者 V. I. Gorny 在研究中亚地区的地震时，发现许多中强震前在卫星图像上出现热红外异常。为探索震前红外异常的内部机制，一些学者进行了岩石加载过程中红外辐射的实验观测研究。耿乃光和吴立新等在多年研究的基础上，提出将遥感方法用于岩石力学的研究，建立“遥感-岩石力学”或“遥感岩石物理学”新的学科，并认为随着研究的深入，有可能建立一种应用遥感技术探测岩体应力状态和岩体稳定性的新方法。在大范围方面，可通过搭载卫星飞机的遥感仪器对地面进行遥感观测，以探测地壳应力场活动和预报地震、滑坡等地质灾害的发生；在小范围方面，可在地面对矿山岩体进行遥感观测来测定岩体的应力状态，评估岩体的稳定性和预报矿震及岩爆等灾害的发生。

为将研究推向深入，本书第一作者在2000~2003年的博士学习期间，在导师吴立新教授的指导下对岩石受力及灾变过程中的红外辐射现象进行了较为广泛的研究，发现了许多重要现象，如岩石在不同应力阶段存在不同的红外辐射特征，在破裂前出现红外异常前兆，增温异常对应剪性破裂，降温异常对应张性破裂，异常的位置对应破裂位置，利用热成像技术可以监测岩石微破裂的产生、发展直至最终岩石破裂的全过程；岩石的摩擦生热效应与岩石强度、正应力、摩擦速度以及摩擦面的性状等因素有关，摩擦过程中，摩擦表面的红外辐射随应力场的变化而变化，呈现时空迁移变化的特点；断层的几何结构是影响红外辐射特征的主要因素，垂直交汇型断层的交汇部位是红外辐射的高强度部位，也是断

层活动发生灾变重点监测的部位，而雁列断层和共线非连通断层的非连通区域是断层破裂的重点监测区域。基于上述研究成果，完成了博士学位论文“岩石受力与灾变过程的红外辐射规律实验研究”。

本书是第一作者博士论文主要内容的扩展，同时为使书的结构编排更加合理，增删了部分内容。全书共分为8章，第1章介绍热辐射的基础理论及热成像原理；第2~5章介绍多种加载方式下岩石应变及破裂过程的红外辐射规律；第6~7章介绍岩石摩擦滑动过程中的红外辐射规律；第8章对岩石加载过程中产生红外辐射效应的机理进行讨论。

本书内容的研究受到北京市自然科学基金重点项目(No. 8001003)和全国优秀博士论文专项基金项目(No. 2000048)的资助。研究工作得到中国矿业大学(北京校区)3S与沉陷工程研究所的同志们，特别是同在RS研究小组的吴焕萍、吴育华、李永强、钟声及葛大庆等的帮助；还得到清华大学的马少鹏博士和中科院力学所的许向红博士的帮助，在此表示衷心的感谢。

需要指出的是，“遥感-岩石力学”目前还处于发展阶段，许多问题还有待于进一步的探索及深入研究。因此本书的一些内容仍然有待于在发展中得到验证、充实和完善。同时由于作者的学识有限，不妥之处在所难免，衷心希望同行学者批评指正。

作者
2005年

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定 价
金矿床成因、勘探与贵金属回收	32.00 元
炭浆提金工艺与实践	20.00 元
锰的微生物地球化学	11.50 元
内生金属矿床聚矿研究	24.50 元
矿床无废开采的规划与评价	14.50 元
充填采矿技术与应用	55.00 元
成矿区带地球化学异常评价方法	9.80 元
胶东招莱地区花岗岩与金矿床	28.00 元
脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论与应用	38.00 元
当代胶结充填技术	45.00 元
矿石学基础	32.00 元
矿山生态复垦与露天地下联合开采	20.00 元
岩石动力学特性与爆破理论	20.00 元
金属矿山尾矿综合利用与资源化	16.00 元
有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论	18.00 元
金银提取技术	34.50 元
中国非金属矿开发与利用	49.00 元
选矿知识问答 (第2版)	22.00 元
碎矿与磨矿	28.00 元
选矿场设计	36.00 元
矿浆电解原理	22.00 元
选矿概论	12.00 元
矿业权估价理论与方法	19.00 元
扬子地台周边锰矿	70.00 元
非金属矿加工技术与应用	119.00 元

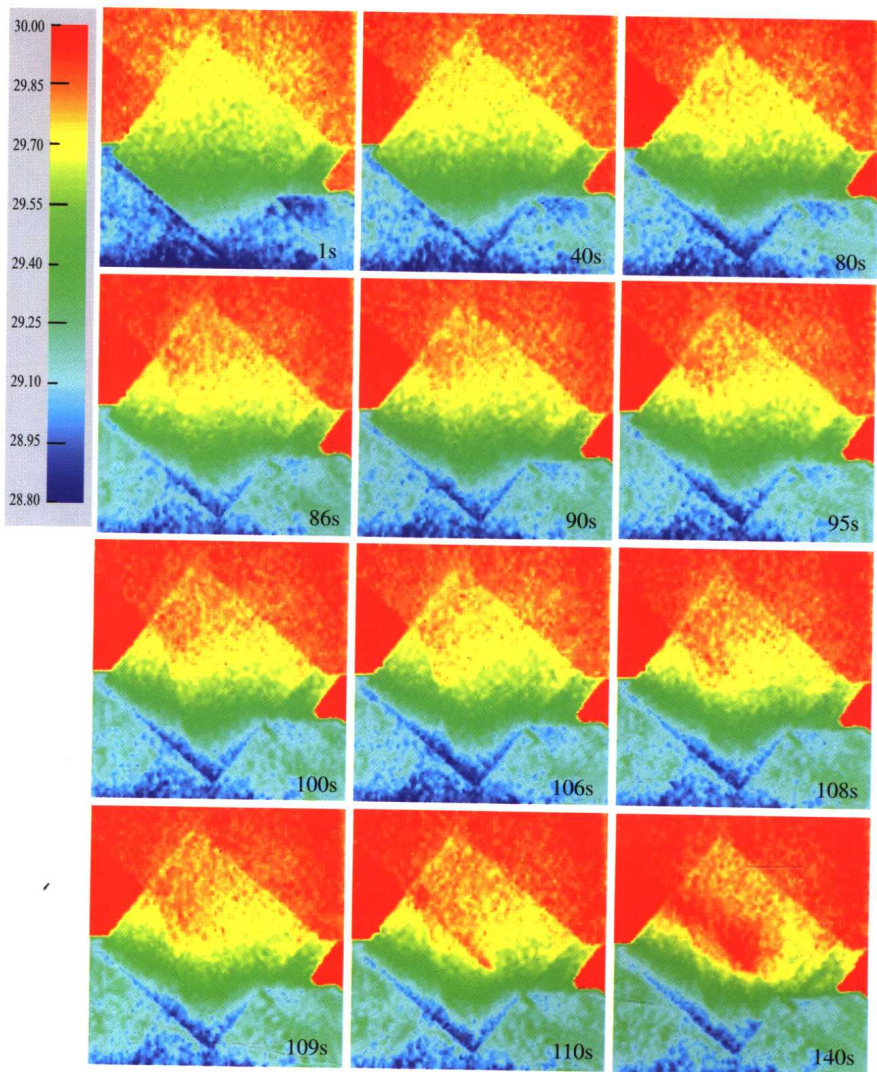


图 3-7 1-9 试件在压剪加载过程中的典型热像序列

Fig. 3-7 Typical TIR images of sample 1-9 in compressively sheared process

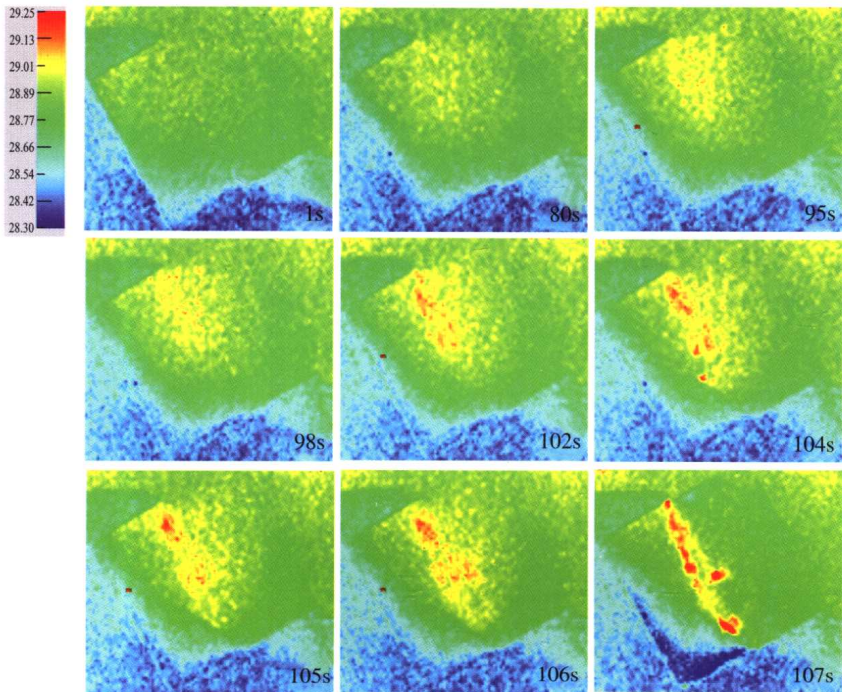
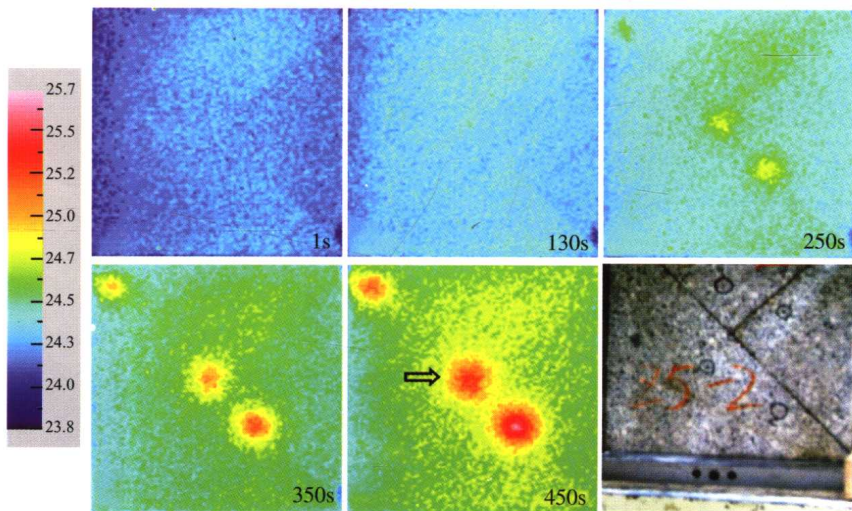


图 3-9 3-6 试件在压剪加载过程中的典型热像序列

Fig. 3-9 Typical TIR images of sample 3-6 in compressively sheared loading process



a

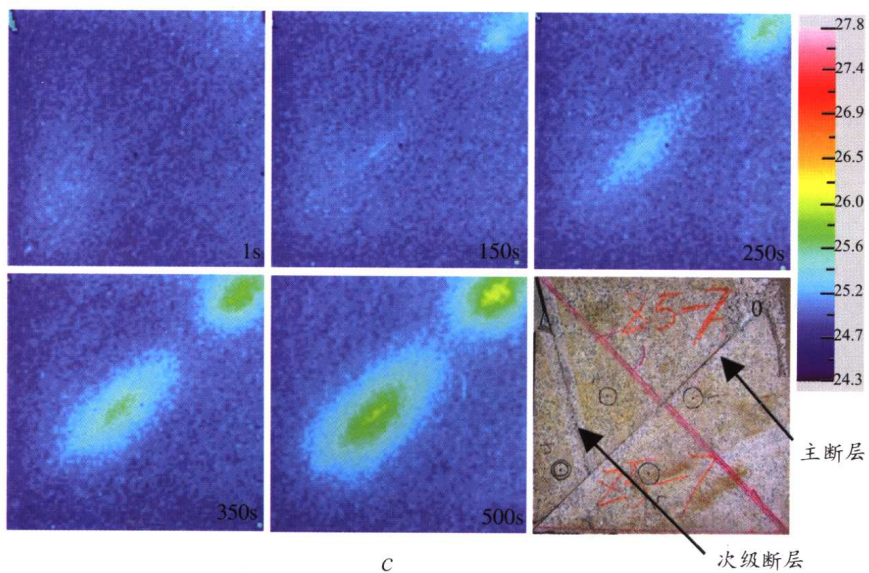
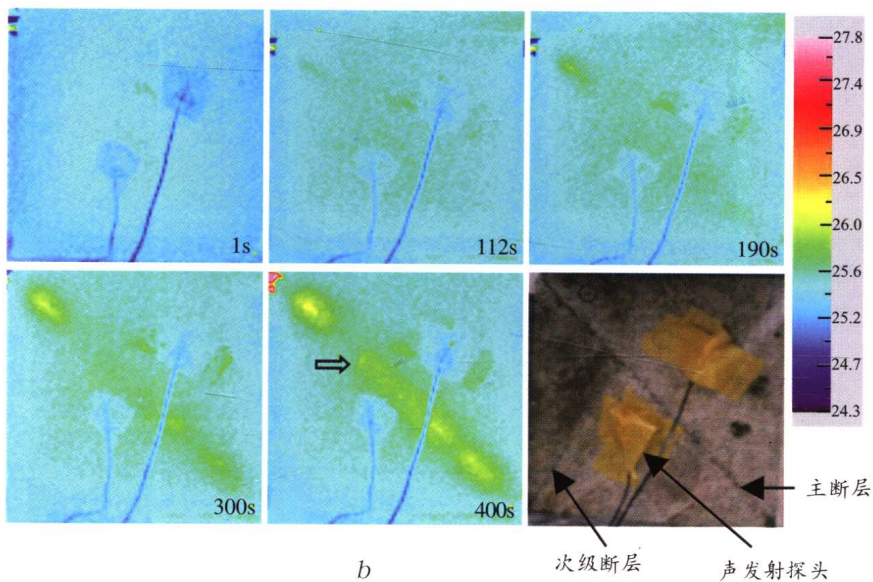


图 7-5 不同交汇角度的组合断层试样加载过程中的红外线热像

Fig. 7-5 TIR images of intersectant fault samples at different included angle

a-90° 交汇角的 z5-2 试件；b-75° 交汇角的 z5-4 试件；c-60° 交汇角的 z5-7 试件

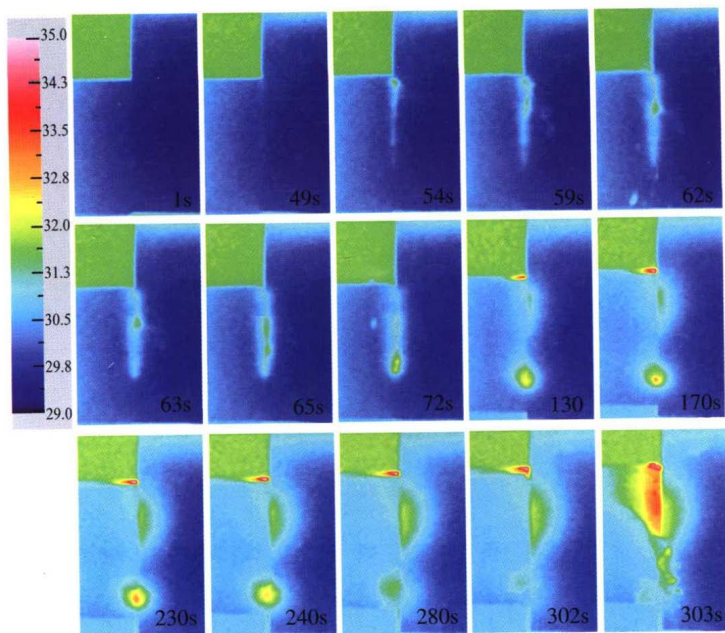


图 6-8 2t6 试件摩擦滑移过程中的红外热像典型序列

Fig. 6-8 Typical TIR images of sample 2t6 in the process of loading and sliding

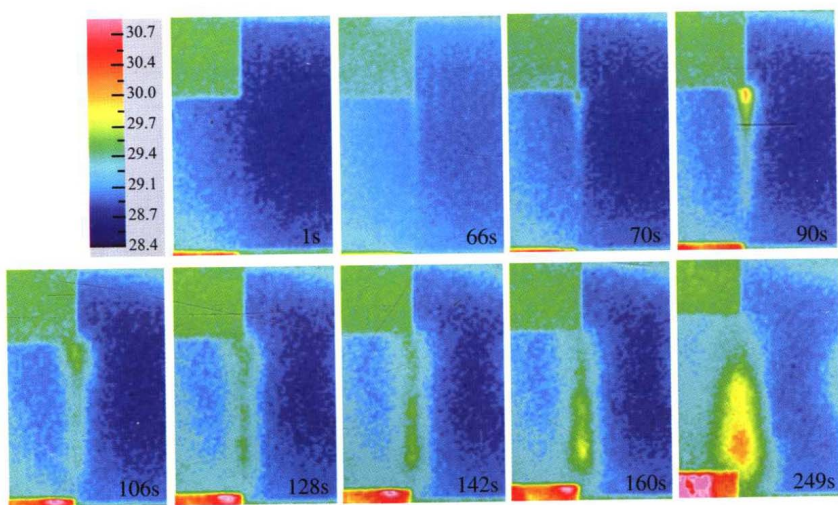


图 6-10 h11 试件摩擦滑移过程中的红外热像典型序列

Fig. 6-10 Typical TIR images of sample h11 in the process of loading and sliding

目 录

1 热辐射的基础理论及热成像原理	1
1.1 热辐射的基础理论	1
1.1.1 表征辐射性质的基本术语	2
1.1.2 支配辐射规律的四大定律	3
1.2 热成像原理及热像仪系统	7
1.2.1 热成像的原理	7
1.2.2 热成像系统（热像仪）的组成	8
1.2.3 热像仪的特点	8
1.2.4 热像仪的测温原理	9
1.2.5 热像仪的性能指标	10
1.2.6 热成像技术发展现状	11
1.2.7 基于热成像的无损检测技术	12
1.3 本章小结	13
参考文献	13
2 岩石单轴压缩的红外辐射	16
2.1 实验设计	18
2.1.1 实验设备	18
2.1.2 实验试样	18
2.1.3 实验方法	19
2.2 岩石的应力-应变曲线及表征的力学性质	20
2.3 加载过程中 AIRT 的变化特征	23
2.4 加载过程中红外热像的变化特征	26
2.5 岩石破坏瞬间的红外辐射特征	31
2.6 力学参量与红外辐射参量间的定量关系	33

2.6.1	AIRT 与应力和应变间的定量关系	33
2.6.2	AIRT 与机械功的定量关系	35
2.6.3	机械能与红外辐射能之间的定量关系	38
2.7	损伤岩石单轴加载过程中红外辐射特征	40
2.8	岩石破裂的红外前兆	41
2.8.1	前兆在 AIRT-时间变化曲线上的表现	41
2.8.2	前兆在红外热像上的表现	43
2.9	岩石与均质体—有机玻璃的红外辐射特征比较	43
2.9.1	有机玻璃的应力-应变曲线	43
2.9.2	有机玻璃红外辐射温度的变化规律	44
2.9.3	有机玻璃加载过程中的红外热像特征	46
2.10	岩石加载过程中红外辐射的影响因素	46
2.10.1	加载方式	46
2.10.2	加载速率	48
2.10.3	岩性	50
2.11	本章小结	50
	参考文献	53
3	岩石压剪加载下的红外辐射	55
3.1	实验设计	56
3.2	不同剪倾角下剪切带上的应变规律	57
3.2.1	剪倾角为 45° 时剪切带的应变类型	57
3.2.2	剪倾角为 60° 和 70° 时剪切带的应变类型	58
3.3	压剪过程中红外辐射温度变化规律	58
3.3.1	AIRT 与载荷之间的关系	59
3.3.2	AIRT-时间曲线变化与岩性的关系	60
3.3.3	AIRT-时间曲线变化与剪倾角的关系	61
3.4	加载过程中的红外热像特征	63
3.5	压剪破裂的红外辐射异常前兆	65
3.6	破裂瞬间的红外辐射	67

3.6.1	辐射增强度与抗剪强度的关系	67
3.6.2	辐射增强度与剪倾角的关系	68
3.6.3	岩石破裂瞬间的红外热像特征	68
3.7	本章小结	69
	参考文献	71
4	非连续断层破裂的红外辐射	72
4.1	实验设计与实验方法	72
4.2	雁列断层破裂前红外异常的时空演化特征	74
4.2.1	加载过程中应力变化特征	74
4.2.2	AIRT-时间曲线变化规律	75
4.2.3	红外热像的时空演变规律	75
4.3	共线非连通断层破裂前红外异常 的时空演化特征	77
4.3.1	加载过程中应力变化特征	77
4.3.2	AIRT-时间曲线变化规律	78
4.3.3	红外热像的时空演变规律	78
4.4	本章小结	79
	参考文献	80
5	岩石破裂的红外监测关键问题	82
5.1	岩石破裂的红外前兆	82
5.1.1	红外前兆的表现形式与类型	83
5.1.2	红外前兆的时间特性	87
5.2	岩石破裂瞬间的红外辐射特征及影响因素	89
5.2.1	加载方式对破裂瞬间的红外辐射特征影响	89
5.2.2	破裂性质对破裂瞬间的红外辐射特征影响	92
5.2.3	岩性对破裂瞬间的红外辐射特征影响	93
5.3	本章小结	93
	参考文献	94

6 岩石摩擦滑动的红外辐射	96
6.1 实验设计	97
6.2 加载过程的剪应力-时间曲线	98
6.3 不同条件下岩石摩擦的热像特征	99
6.3.1 I类组合的红外热像特征	100
6.3.2 II类组合的红外热像特征	101
6.3.3 III类组合的红外热像特征	103
6.3.4 IV类组合的红外热像特征	106
6.4 岩石摩擦滑动中红外辐射的影响因素分析	107
6.4.1 正应力对辐射温度的影响	109
6.4.2 摩擦面粗糙度对辐射温度的影响	113
6.4.3 岩性对辐射温度的影响	114
6.4.4 机械功对辐射温度的影响	116
6.4.5 摩擦速率对辐射温度的影响	116
6.5 本章小结	118
参考文献	120
7 交汇断层活动的红外辐射	121
7.1 实验设计	121
7.2 加载过程中的载荷-时间曲线特征	122
7.3 声发射时间序列特征	124
7.4 加载过程中的热像特征	126
7.5 交汇断层时空活动讨论	128
7.6 本章小结	129
参考文献	130
8 受载岩石红外辐射的机理	131
8.1 岩石的应力-应变曲线及形变特征	131
8.2 岩石力学性质的主要影响因素	133

8.2.1	矿物成分	133
8.2.2	结构	133
8.2.3	构造	134
8.2.4	地质环境	134
8.3	岩石加载变形的微观表现	134
8.3.1	岩石微破裂的类型	135
8.3.2	晶体位错理论	136
8.3.3	裂纹成核与扩展理论	139
8.4	岩石的热力耦合效应	140
8.4.1	岩石形变的微观物理反映	140
8.4.2	岩石的热力耦合效应	141
8.5	岩石受力变形产生红外辐射的机理分析	146
8.6	岩石摩擦滑动产生红外辐射的机理分析	150
8.7	本章小结	151
	参考文献	152

1 热辐射的基础理论及热成像原理

1.1 热辐射的基础理论

自 19 世纪麦克斯韦证明光是一种电磁波以来,人类对不同波长范围各类电磁波的性质及其应用性进行了卓越有效的研究,并建立了如图 1-1 所示的从 γ 射线到无线电波的连续波谱图。其中具有热效应的红外波长范围为 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。从理论上讲,自然界中高于绝对温度 0K (-273.15°C) 的物体都向外辐射不同波段的电磁波,这是由于物体内部微观粒子的运动造成的。其产生机制有电磁振荡,晶格分子的热运动,晶体、分子或原子的电子能级跃迁,原子核的振动与转动,内层电子的能级跃迁,原子核内的能级跃迁等。而红外辐射产生的机制则主要是分子振动能级和转动能级跃迁的结果^[1]。

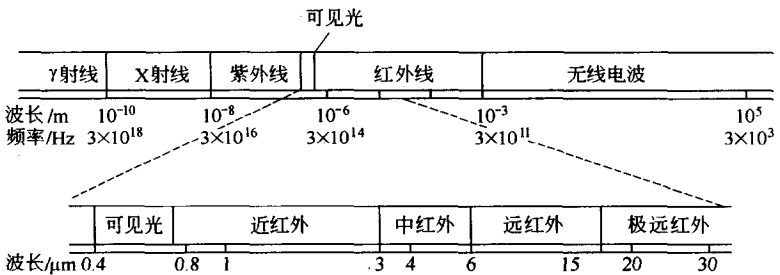


图 1-1 电磁波谱

Fig. 1-1 Electromagnetic spectrum

在实际应用中,为了方便起见,将红外波段又细划分为近红外($0.76 \sim 3.0 \mu\text{m}$)、中红外($3.0 \sim 6.0 \mu\text{m}$)、远红外($6.0 \sim 15.0 \mu\text{m}$)

和极远红外(15~1000 μm)。近红外在性质上与可见光相似,所以又称为光红外。由于它主要是地表面反射太阳的红外辐射,所以又称为反射红外。中红外、远红外和极远红外是产生热感的原因,所以又称为热红外^[2]。物体在常温范围内,发射红外线的波长多在3~40 μm ,而15 μm 以上的超远红外线易被大气和水吸收,所以在遥感技术中,主要利用3~15 μm 波段,而在这个波段又存在两个大气窗口——3~5 μm 和8~14 μm 波段。所以红外遥感多利用这两个波段。

1.1.1 表征辐射性质的基本术语

(1) 辐射能:以电磁波的形式发射、传输或接收的能量,单位为J。

(2) 辐射通量:在单位时间内通过某一表面的辐射能量,单位为W(即J/s)。

(3) 辐射通量的空间密度:指在单位时间内,从单位面积上辐射出的辐射能量,单位为 W/m^2 。当具体考虑辐射的发射和入照时,可分别使用辐射出射度和辐照度。

(4) 点辐射源的辐射强度:指点辐射源在某一给定方向上单位立体角内的辐射通量,单位为 W/sr 。

(5) 面辐射源的发射亮度:辐射源在某方向的单位投影面积在单位立体角内的辐射通量,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

点辐射源辐射能力仅使用辐射强度,而面辐射源,尤其是考虑微分面元或有限面积的辐射时,则既可以用辐射强度也可以用亮度。对于辐射亮度与方向无关的辐射源称为朗伯源。它的辐射强度满足:

$$I(\theta) = I_0 \cos\theta \quad (1-1)$$

式中 θ ——辐射方向与物体表面法线的夹角;

I_0 —— θ 为0时的辐射强度;

$I(\theta)$ ——在 θ 方向上的辐射强度。