

干、湿沙层对岩石受力微波辐射影响的实验对比

毛文飞¹, 吴立新², 刘善军¹, 徐忠印¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410008)

摘 要: 在天空冷背景下,通过实验模拟卫星对地观测,研究盖层对岩石受力过程中微波辐射的影响规律及影响机理.实验以花岗岩及覆被干、湿沙层为例,采用卧式压力机和C波段微波辐射计对岩石受力过程中松散盖层对辐射变化的影响规律进行观测.实验结果表明:花岗岩弹性变形阶段的微波辐射变化与载荷具有很好的同步性,相关系数达0.94,微波亮温变化量为0.015 K/MPa.当岩石观测面铺设2.5 cm厚的干沙层或湿(含水)沙层时,其对受力岩石微波辐射影响存在差异:1)干沙层对岩石受力过程中的微波辐射变化量无显著影响;2)含水沙层显著削弱了微波辐射计所接收到的岩石中由力引起的微波辐射变化信号.

关 键 词: 遥感-岩石力学;微波辐射;沙层;天空冷背景;水

中图分类号: TP 79, TU 452

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)05-0710-06

Experiment Comparison on Microwave Radiation from Stressed Rock Covered by Materials: Dry or Humid Sands

MAO Wen-fei¹, WU Li-xin², LIU Shan-jun¹, XU Zhong-yin¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410008, China. Corresponding author: WU Li-xin, professor, E-mail: awulixin@263.net)

Abstract: Considering the working conditions of satellite sensors in earth observation, the loading experiments of rock under the condition of cold sky background were carried out. The influence of cover layers on microwave radiation from loaded bare rock in elastic phase is analyzed, and the influence mechanism is discussed as well. The horizontal loading machine and C band microwave radiometer were applied for observing the microwave radiation from the stressed granite samples covered by different materials: dry or humid silver sands. The experimental results show good synchronicity between the microwave radiation and the loaded stress in the elastic deformation phase of granite samples, which with the correlation coefficient of 0.94 and the microwave brightness increases by 0.015 K/MPa. When covered by dry or humid sands (with layer thickness of about 2.5 cm), the characteristics of affected microwave radiation from the stressed rock are much different: 1) the dry sand has no obvious influence on the affected microwave radiation from stressed rock; 2) the humid sand weakens the signals received by microwave radiometer significantly.

Key words: remote sensing-rock mechanics; microwave radiation; sand cover; sky cold background; water

作为遥感监测的重要手段之一,微波具有穿透云层、并在某种程度上穿透雨区的能力^[1]. 20世纪90年代,耿乃光等^[2]、邓明德等^[3]等先后开展了岩石受力破裂的微波观测实验,表明岩石试

件在临破裂前出现了微波辐射异常. Maki等^[4]发现岩石受压破裂时会向外辐射微波电磁脉冲信号. Liu等^[5]通过实验发现岩石分层破裂后微波辐射亮温值会下降. 徐忠印等^[6]在岩石单轴压缩

过程中,发现微波辐射呈现初始阶段微降、弹性阶段上升、塑性阶段下降以及临破裂前上升的变化特征. Takano 等^[7]在室内岩石受力微波辐射观测实验的基础上,采用 AMSR - E (advanced microwave scanning radiometer for earth observation system) 数据将微波遥感用于地震微波辐射异常分析中,结果表明在理想条件下震前震中区域确实存在微波辐射异常的可能性.

然而,上述关于岩石微波辐射的实验观测及分析结果都是基于直接观测受力岩石表面而得. 事实上,地球表面是由水 (70.8%) 和陆地 (20.2%) 所覆盖,其中陆地类型包括沙、土壤、冰雪和植被等. 当岩石圈层中的微波辐射信号传入到位于大气层上部的微波遥感卫星传感器时,将不可避免地受到覆盖在岩石圈上部松散盖层的影响. 为了强调和研究地表松散盖层对遥感观测的影响,Wu 等^[8]提出了松散盖层 (Coversphere) 以及相应的岩石圈层 - 盖层 - 大气层 - 电离层 (LCAI) 耦合作用的概念模型.

为探讨盖层对岩石受力微波辐射信号的影响特征,作者采用干燥沙层和含水沙层两种松散物质作为覆被于岩石试件上表面的盖层,用 C 波段微波辐射计在天空冷背景下观测岩石受循环载荷作用时的微波辐射变化,并对比分析干、湿沙层对受力岩石微波辐射变化的影响特征.

1 实验设计与实验方法

1.1 实验样品

实验选择花岗岩作为岩石试样. 花岗岩矿物成分主要有斜长石、钾长石、石英、黑云母等,矿物颗粒大小 5 mm 左右,为等粒结构. 为保证微波辐射计接收的辐射全部来自岩石,实验采用 46 cm × 25 cm × 15 cm 的大块长方体试样. 采用细沙作为松散盖层材料,沙粒直径在 0.2 ~ 1.0 mm 之间. 实验中将天然风干的细沙作为干燥沙层;选取部分细沙添加一定的水 (质量分数约 7.0%),搅拌均匀,作为含水沙层. 考虑到微波辐射计喇叭口距离试件表面为 5 cm,本实验中沙层铺设厚度为 2.5 cm. 对于不同厚度盖层对受力岩石微波辐射的影响规律,在后续盖层实验研究中将陆续开展.

1.2 实验设备

为模拟遥感卫星对地观测,实验采用具有微机伺服控制功能的卧式压力加载机,轴向最大荷载为 5 000 kN;同时,为模拟地壳的围压环境,压力机可提供最大荷载为 100 kN 的侧压,如图 1 所

示. 实验中使用 C 波段 (频率为 6.6 GHz) 的微波辐射计,温度灵敏度为 0.1 K,定标精度 0.5 ~ 1.5 K,稳定度为 1 K,数据采样速度为 1 帧/s. 采用 TWC - 2A 铂电阻多路温度测试仪对岩石观测表面的物理温度进行同步测试,测量精度 $\pm 0.3\%$ rdg + 1 $^{\circ}\text{C}$,温度分辨率 0.01 $^{\circ}\text{C}$. 在压头与试样间夹衬聚四氟乙烯垫片,用于减少压头对试样的传热以及加载端对岩石的电磁干扰.




图 1 岩石受力微波观测实验系统

Fig. 1 Rock loading system for observing microwave radiation

1.3 实验方法

实验在室外空旷区进行,保证岩石上方为天空冷背景. 为避免太阳照射造成试样温度变化,实验选择在夜间进行. 由于 C 波段微波辐射计的喇叭天线口较大 (20 cm × 15 cm),为减少环境辐射干扰,将辐射计垂直试样放置,距离为 5 cm (见图 2).

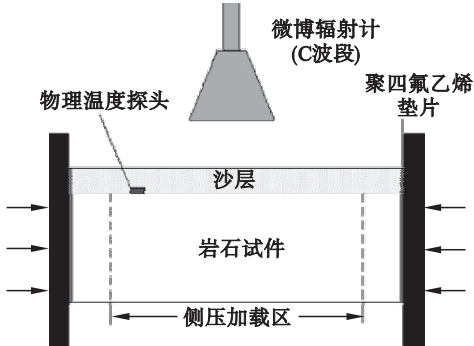


图 2 覆被盖层的岩石受力微波观测示意图

Fig. 2 Schema of microwave detection on stressed rock covered by sands

一般地,岩石加载破裂过程包括弹性变形、塑性变形和宏观破裂 3 个阶段. 本实验旨在探究盖层对岩石受力破裂前微波辐射的影响,因此采用循环加载的方式,以 0.6 倍的试件单轴抗压强度为循环载荷的上限值 (单轴压缩实验中,该尺寸花岗岩试件峰值强度约为 56 MPa). 先对岩样施加侧压至 0.9 MPa 并保持不变,然后轴压以 0.027 MPa/s 的加载速率加载至预定上限值,在上限载荷保持 30 s 后以 0.027 MPa/s 的速率卸载至 2.7 MPa,保持 30 s 后开始第二次循环加载,加

载方式与第一次相同,即对同一试样进行两次循环加载.

2 实验结果与分析

2.1 干沙层对岩石受力微波辐射的影响

首先对无沙层(裸岩)条件下 1 号岩石试件受力过程中微波辐射规律进行观测. 图 3a,图 3c 为无盖层条件下,1 号试件在循环荷载作用下微波辐射亮温与岩石表面物理温度观测结果. 从图中可以看出,微波辐射计因仪器性能及噪声影响导致辐射亮温频繁波动,但微波辐射亮温的总体变化趋势与载荷一致,呈现循环变化态势,在受压阶段随着载荷上升而上升,在卸压阶段随载荷下降而下降,二者的变化步调一致.

为进一步揭示二者关系,采用 sym5 小波基对微波亮温信号进行去噪. 结果显示,当微波信号经过 7 阶小波滤波以后,辐射亮温变化呈现与载荷变化非常一致的光滑曲线(图中红线所示),二者相关系数达到 0.94. 微波亮温在加载过程中的

变化幅度约为 0.5 K,由此可计算当轴向应力增加 1 MPa 时,微波辐射亮温约上升 0.015 K. 此外,图 3c 表明:在整个加载过程中,岩石表面物理温度呈缓慢上升趋势(实验时间为凌晨 04:48:00 ~ 05:01:20,环境气温开始缓慢回升),在单次加载期间岩石表面温度上升幅度小于 0.1 ℃.

图 3b 为 1 号岩石试件表面铺设干沙层后,在相同循环荷载作用下微波辐射观测结果. 相比于裸岩观测(图 3a),微波亮温的基值由 268 K 上升至 272.5 K. 采取相同的去噪方法对观测结果进行噪声剔除,结果显示,在铺设干沙层后,岩石受力过程中产生的微波辐射变化信号并未被干沙层明显干扰,微波亮温的变化趋势依然与载荷有很好的同步性,且去噪后的亮温与载荷的相关系数提升到 0.97,循环受力过程中微波亮温的变化幅值仍为 0.5 K 左右. 另一方面,从岩石表面物理温度的变化曲线(图 3d)上看,其变化趋势更加趋于平缓,在单次循环加载阶段升高量少于 0.1 ℃,表明岩石表面与环境的热交换作用受到了干沙抑制.

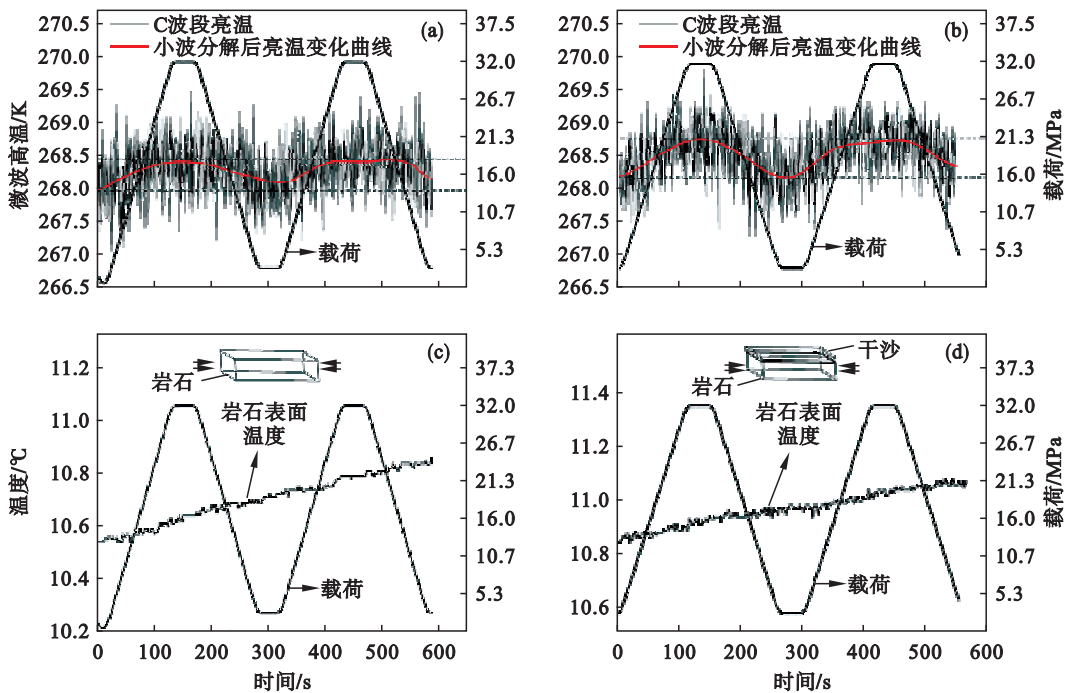


图 3 干沙层对花岗岩受力微波辐射影响的实验结果

Fig. 3 Experimental results of microwave brightness temperature variation contrasted with physical temperature in process of loading

(a) —裸岩微波高温; (b) —铺设干沙微波高温; (c) —裸岩物理温度; (d) —铺设干沙物理温度.

2.2 含水沙层对岩石受力微波辐射的影响

为对比研究含水盖层对微波辐射的影响,以 2 号花岗岩试件和含水沙层(干燥沙层添加水制成)为实验对象. 图 4a,图 4c 即为无盖层(裸岩)条件下 2 号岩石试件在荷载上限为 26.7 MPa 的

循环荷载作用下,微波亮温与岩石表面物理温度的观测结果. 从图中看出,由于 2 号试件加载条件与 1 号试件基本相同,裸岩受力过程中微波辐射的变化规律具有相似性,均呈现出与载荷较好的同步性. 对 2 号试件微波亮温信号进行去噪后,微

波辐射亮温与载荷的相关系数达 0.95；微波亮温在加载过程中的变化幅度约为 0.5 K；而岩石表面的物理温度变化趋于平稳，加载阶段总体变化少于 0.1℃。图 4b 为 2 号岩石试件表面铺设含水沙层后微波亮温观测结果。相比于裸岩观测（图 4a），微波亮温的基值由 268 K 上升至 276.5 K，但微波辐射计接收到的辐射亮温频繁波动，与循环载荷的同步性十分微弱。采取相同的小波去噪方

法对此观测结果进行噪声剔除，微波亮温与循环载荷呈现一定的同步性，但相关系数仅为 0.34。微波辐射亮温的变化幅值约为 0.25 K，这相比于裸岩或铺设干沙层条件下的实验观测结果而言，降低了 50%。表明含水沙层对受力岩石微波辐射信号的传播具有明显的削弱作用。而岩石表面的物理温度变化因含水沙层的保护而更趋平稳，加载阶段总体变化小于 0.05℃（图 4d）。

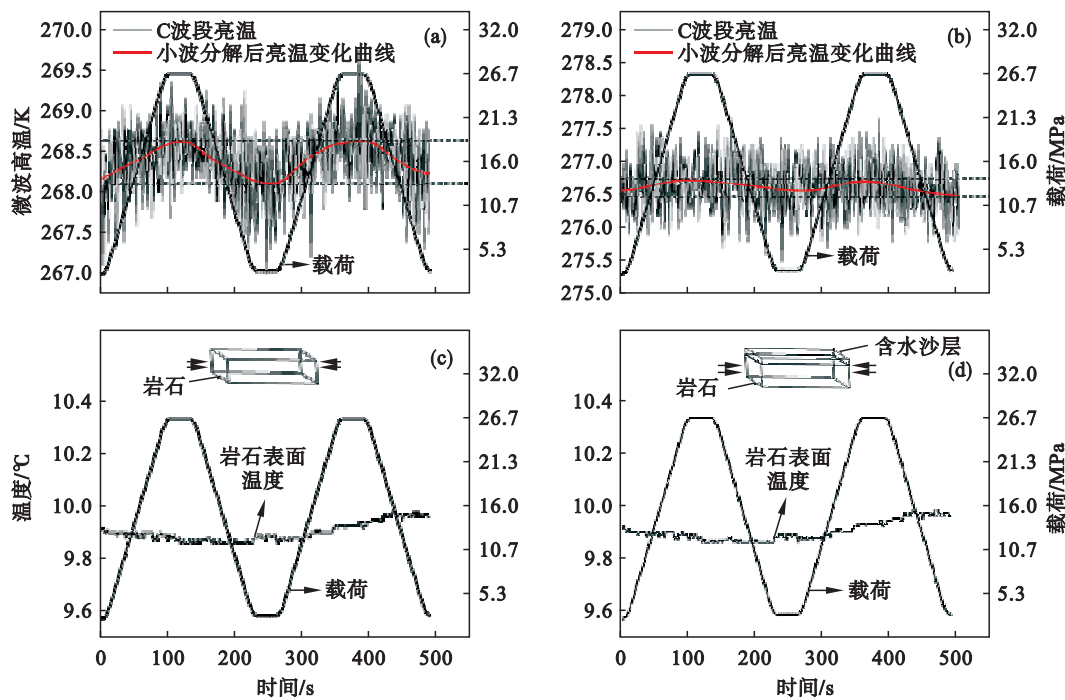


图 4 含水沙层对花岗岩受力微波辐射影响的实验结果

Fig. 4 Experimental results of microwave brightness temperature variation contrasted with physical temperature in process of loading
(a)—裸岩微波高温；(b)—铺设含水沙微波高温；(c)—裸岩物理温度；(d)—铺设含水沙层物理温度。

3 沙层对微波辐射传输影响机理分析

3.1 沙层微波亮温的变化机理

由图 3 和图 4 可知，相对于裸岩实验观测结果，铺设干、湿沙层后，微波辐射计所探测到的微波亮温值均明显增大，分别由裸岩观测时的 268 K 增大至 272.5 K（干沙）和 276.5 K（湿沙）。这主要是由于沙层的铺设（厚 2.5 cm），使得喇叭口与目标观测面距离由 5 cm 减小至 2.5 cm，而这一距离的改变，较大幅度地增加了辐射计所接收到的来自岩石及沙层目标物的微波辐射能。此外，实验结果显示，湿沙条件下的微波亮温值比干沙条件下高出 4 K，这与“随着目标含水量的增大，微波亮温会减小”的卫星遥感一般性认识不相符。分析其原因如下。

根据 Ulaby 理论^[1]，对于由大量散射体组成的媒质材料（实验中沙层），其微波亮温 T_B 可以表示为

$$T_B = \frac{T(1 - \frac{1}{L^2})(1 - \Gamma)}{1 - \frac{\Gamma}{L^2}} \quad (1)$$

式中： T 为沙层的热力学温度（K）； L 为沙层的损耗系数； Γ 为沙层与空气界面的反射系数。对于性质均匀的沙层而言，沙层的损耗系数 L 是由消光系数 κ_α 和厚度 d 决定：

$$L = e^{\kappa_\alpha d} \quad (2)$$

其中，

$$\kappa_\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + (\varepsilon''/\varepsilon')^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

而沙层与空气界面的反射系数 Γ 为

$$\Gamma = \left| \left(\sqrt{\frac{1}{\varepsilon}} - 1 \right) \right| \left(\sqrt{\frac{1}{\varepsilon}} + 1 \right)^2 \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: λ_0 为微波波长; ε' 为沙层介电常数的实部, ε'' 为沙层介电常数的虚部, $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$.

由此可知,沙层的微波亮温 T_B 直接由介电常数 ε 、厚度 d 、温度 T 以及波长 λ_0 决定. 实验中的干沙和湿沙(含水率为 7.0%)的介电常数,可根据文献[1]取近似值:干沙 $\varepsilon_1 = 2.5 - 0.3 j$,湿沙 $\varepsilon_2 = 5 - 0.5 j$. 代入式(1)计算得,2.5 cm 厚的干沙层亮度温度 $T_{B1} = 145.5 \text{ K}$,而湿沙层亮度温度 $T_{B2} = 151.7 \text{ K}$. 此外,本处理论计算只是针对实验中的沙层,而实际的卫星遥感观测中,地表对象更为复杂、地表覆盖也更厚,辐射计还会接收来自岩石及周围环境的微波辐射,所以会出现“随着目标含水量的增大,微波亮温会减小”的情形.

3.2 沙层对受力岩石微波信号的影响

在岩石受力这一相对短暂的过程中,背景亮温值是基本不变的,因此可探测由岩石受力而引起的微波辐射的变化. 首先,针对无盖层岩石受力微波观测实验,微波辐射和传输是在两种不同介质之间进行的,即岩石和空气,如图 5 所示. 岩石受力后会产生微波辐射变化 ΔT_L . 当微波信号由岩石传入至空气时,由于两种介质的介电常数不同,所以会在其界面产生反射和折射效应,只有部分微波辐射(ΔT_B)能进入空气,并被微波辐射计所接收,显然 $\Delta T_B < \Delta T_L$. 当岩石表面铺设了松散盖层,其受力过程中微波辐射传输模型如图 6 所示. 首先,岩石受力产生的微波辐射信号 ΔT_L 受到岩石与沙层界面的反射和折射效应,部分进入沙层;之后,再受到“沙层 - 空气”界面的反射和折射效应,剩余部分 ΔT_B 才透射进入空气,并被微波辐射计所接收. 在此过程中,沙层的颗粒、厚度及干湿状态决定 ΔT_B . 由于细沙粒径 $< 1.0 \text{ mm}$,而 C 波段微波波长为 4.5 cm ,因此细沙层本身对 C 波段微波的散射作用非常小. 介质对微波的吸收作用,主要取决于其微波介电常数的大小. 当岩石表面铺设干沙层时,由于干沙层的介电常数($\varepsilon \approx 3.0$)介于花岗岩($\varepsilon \approx 4.7$)和空气($\varepsilon = 1$)之间^[9],所以在“岩石 - 干沙”界面处,相比于无盖层时的“岩石 - 空气”界面,反而会有更多的微波辐射信号透射到沙层中. 当微波在沙层中传播时,定会受到沙层介质吸收和散射的双重作用,但就干燥均匀且厚度较小的细沙层而言,根据 Ulaby 理论^[1],因其空间非均匀程度和各向异性程度都很低(相对于 C 波段微波),散射作用并不

明显;加之干沙层的介电损耗性低,对微波的吸收作用也很小. 此外,相对于岩石介质而言,沙层介质的介电性能与空气介质的介电性能更为接近,当微波穿过沙层最终进入空气时,“沙层 - 空气”界面的透射系数比无盖层时的“岩石 - 空气”界面反而更大. 综上所述:与裸岩的微波辐射变化量及变化特征相比,铺设薄层干沙并不会对微波辐射亮温与载荷的同步性及微波辐射亮温升幅造成显著影响. 而当岩石表面铺设含水沙层时,由于水具有很高的介电常数,会使得含水沙层整体的介电性能明显增大(干沙时约 3.0,湿沙时约 5.0). 此时,“岩石 - 湿沙”界面对微波的反射作用明显增强、透射率降低. 当透射进入含水沙层的微波继续向上传播时,随着含水沙层介质介电损耗性能的急剧增大,使得含水沙层对微波也有较强的吸收作用. 当穿过沙层的微波继续上行进入到空气中时,“湿沙 - 空气”界面的反射系数要比“岩石 - 空气”和“干沙 - 空气”界面处的反射系数大很多,导致辐射信号透射率大幅降低. 综上:与裸岩的微波辐射变化量及变化特征相比,铺设薄层湿沙会对微波辐射亮温与载荷的同步性及微波辐射亮温升幅造成显著影响.

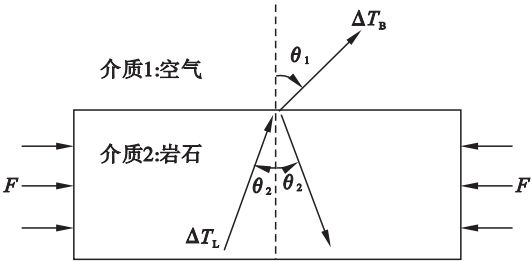


图 5 岩石受力微波辐射与传输的双层介质模式
Fig. 5 Emission and propagation two-layer mode for microwave radiation from stressed rock

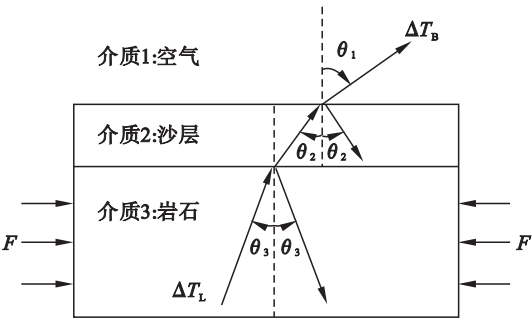


图 6 岩石受力微波辐射与传输的三层介质模式
Fig. 6 Emission and propagation three-layer mode for microwave radiation from stressed rock

4 结 论

1) 在循环荷载作用下,花岗岩弹性变形阶段

的微波辐射变化规律与载荷具有较好的一致性，C 波段微波亮温变化量约为 0.015 K/MPa。

2) 岩石观测面铺设干燥细沙层(2.5 cm 厚),由于干沙层介电性能较低,对微波辐射的吸收作用较小,而“岩石-干沙-空气”介质界面处的透射作用加强,整体上对岩石受力产生的微波辐射变化量及微波辐射变化与应力的同步性无明显影响。

3) 岩石观测面铺设潮湿细沙层(2.5 cm 厚),由于湿沙层介电性能显著增强,对微波吸收明显增大,而“岩石-湿沙-空气”介质界面处的反射作用加强,整体上对岩石受力产生的微波辐射变化量及微波辐射变化与应力的同步性有显著的削弱作用。

致谢:岩石受力微波观测实验得到中国科学院东北地理与农业生态研究所赵凯研究员的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing -active and passive[M]. New York: Addison-Wesley, 1982.

[2] 耿乃光,樊正芳,籍全权,等.微波遥感技术在岩石力学中的应用[J].地震学报,1995,17(4):482-486.

(Geng Nai-guang, Fan Zheng-fang, Ji Quan-quan, et al. The application of microwave remote sensing technology in rock mechanics[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1995, 17(4): 482 -

486.)

[3] 邓明德,樊正芳,崔承禹,等.无源微波遥感用于地震预报的实验研究[J].红外与毫米学报,1995,14(6):401-406.

(Deng Ming-de, Fan Zheng-fang, Cui Cheng-yu, et al. The experiment study for earthquake prediction by passive microwave remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1995, 14(6): 401 - 406.)

[4] Maki K, Takano T, Soma E, et al. An experimental study of microwave emissions from compression failure of rocks[J]. *Journal of the Seismological Society of Japan*, 2006, 58(4): 375 - 384

[5] Liu S J, Xu Z Y, Wu L X, et al. Theoretical analysis and experimental verification of microwave radiation features of fractured rock [C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium. Guangzhou, 2014: 25 - 28.

[6] 徐忠印,刘善军,吴立新.岩石变形破裂红外与微波辐射变化特征对比研究[J].东北大学学报(自然科学版),2015, 36(12):1738-1742.

(Xu Zhong-yin, Liu Shan-jun, Wu Li-xin. Comparative study on the variation features of infrared and microwave radiation in deformation and fracture process of rock [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(12): 1738 - 1742.)

[7] Takano T, Maeda T. Experiment and operational evidence of earthquake detection capability by means of microwave passive sensors on satellite[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(1): 107 - 111.

[8] Wu L X, Qin K, Liu S J. GEOSS-based thermal parameters analysis for earthquake anomaly recognition[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(10): 2891 - 2907.