

无源微波遥感用于监测混凝土 工程稳定性的实验研究*

邓明德¹⁾ 尹京苑²⁾ 钱家栋²⁾ 房宗绯¹⁾
樊正芳³⁾ 荆惠连³⁾ 耿乃光⁴⁾ 刘晓红⁴⁾

¹⁾中国地震局综合观测中心,北京,100039;

²⁾中国地震局分析预报中心,北京,100036;

³⁾中国航天工业总公司第二研究院 207 所,北京,100854;

⁴⁾中国地震局地球物理研究所,北京,100081)

摘要 在等温过程加载条件下,得出混凝土等固体物质的微波辐射能量随压力变化的实验结果,实验证明了机械能可直接激发固体物质分子的转动态能级发生跃迁,不需要经历生热的中间物理过程,这一物理现象把应力同微波辐射能量从物理上直接联系起来,为无源微波遥感用于测量大型混凝土工程应力场分布、演变,用于岩土工程稳定性监测和失稳预测,提供了实验依据,奠定了物理基础。

关键词 机械能,激发,固体物质,分子,转动态能级,跃迁。

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE APPLICATION OF PASSIVE MICROWAVE REMOTE SENSING TO THE STABILITY MONITORING OF CONCRETE ENGINEERING*

DENG Ming-De¹⁾ YIN Jin-Yuan²⁾ QIAN Jia-Dong²⁾
FANG Zong-Fei¹⁾ FAN Zheng-Fang³⁾ JING Hui-Lian³⁾
GENG Nai-Guang⁴⁾ LIU Xiao-Hong⁴⁾

¹⁾ Comprehensive Observation Centre, China Seismological Bureau, Beijing 100039, China;

²⁾ Centre for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China;

³⁾ Institute No. 207, the Second Academy, CASC, Beijing 100854, China;

⁴⁾ Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China)

Abstract Under the experimental condition of loading in isothermal process, the microwave radiation energy of solid matters like concrete varied with the change of pressure. Experiments were carried out considering two polarized states (horizontal and vertical) of 3 wave bands including 2cm, 3cm, and 10cm. The experiments demonstrated that mechanical energy can directly excite rotation state energy level jump of solid matters (rocks and concrete, etc.) molecules without need of intermediate physical process of heat generating. This phenomenon directly connects stress with microwave radiation energy physically. This paper puts forward experimental basis and lays physical foundation for the remote measurement of stressfield distribution and evolvement of large concrete engineering by passive microwave remote sensing, and for rock engineering's stability monitoring and stability-failure predicting.

Key words mechanical energy, excitation, solid state matter, molecule, rotation state energy level, transition.

引言

混凝土是水利、水电工程、核电工程、地下洞室工程、军事工程等现代建筑最基本最重要的材料之一。随着科学技术的发展和经济建设的需要,混凝土工程的规模越来越大,巨大的混凝土工程,当受到外力作用,特别是受到强大的地质构造力的作用之后,工程的稳定性及工程有没有可能发生损坏或遭到破坏等问题,就成为越来越重要的研究课题。

工程在外力作用下发生破坏,是由于应力在工程的某些部位集中、增强的结果,当应力达到或超过工程的抗断强度时,则工程发生破坏。若实时地测量出工程的应力分布状态,便可判断工程处于稳定状态或不稳定状态。

当前应力测量的方法有多种^[1],尽管测量的原理和方法不同,但都是测量一个点的应力,均是接触测量,以点代面表示应力场分布,若对工程应力分布状态有精细地了解,用传统的应力测量方法是困难的,甚至是不可能的,须另辟蹊径。

微波遥感具有全天候全天时工作的优点,能够穿透植被,对土壤和岩石也具有一定的穿透能力^[2],因此,微波遥感除了军事上有重要的应用外,在国民经济的众多部门也得到了广泛地应用,发展很快。微波遥感在地震预报方面的应用,也已开始研究^[3~5]。微波遥感技术能否用于地应力测量,能否用于大型混凝土工程稳定性监测,还是一项尚未研究的重要课题。

由近代物理学知道,物质的微波辐射是组成物质分子的转动态能级发生跃迁辐射出的电磁波^[6,7],无源微波遥感若能用于应力测量、用于工程稳定性监测,必定是机械能(应力属于机械力)能够激发物质分子的转动态能级发生跃迁,这一新的物理现象,在国内外未见报道。经过我们的研究,从理论上得出,当物质受到一定机械力作用,机械能够激发分子的转动态能级发生跃迁,若这一物理现象获得实验证实,无论是理论上还是应用上,都具有重要意义和实用价值。我们对不同强度的混凝土进行了实验,实验得出混凝土的微波辐射能量随压力变化而显著变化的多项结果。

1 实验

由电磁辐射理论知道,物质的微波辐射能量与物质的温度成正比^[8],而物体受到机械力快速作用时,机械力能够引起物体温度升高,升温达几度量

级^[9,10],为了证明机械能够直接激发物质分子的转动态能级发生跃迁,在实验过程中必须保证试件温度不随压力增加而改变,即实行等温过程加载,只有在等温过程加载条件下,得出试件的微波辐射能量随压力的变化,才能证明机械能直接激发分子的转动态能级发生跃迁,与温度无关。

1.1 等温过程加载

试件受到压力作用,发生形变,由于形变的不均匀性,晶粒之间发生相对运动,摩擦生热,当生热的速率大于向外传递热量的速率时,在试件内部产生热量积累,导致试件温度升高,生热的速率取决于形变速率,而形变速率取决于加载速率,当加载速率足够缓慢,缓慢到在试件内部和表面积累不起足够的热量,使试件温度升高,试件温度处于恒定状态,这就实现了等温过程加载。通过对不同试件多次试验得出,当加载速率 $\leq 1.5\text{MPa}/\text{min}$ 时,试件内部温度变化 $< 0.1\text{K}$,而实验用的微波辐射计的温度精度为 0.1K ,所以,当选取加载速率 $\leq 1.5\text{MPa}/\text{min}$ 时,在本实验中,即实现了等温过程加载。

1.2 测量仪器与试件

遥感测量仪器为 2cm 、 3cm 和 10cm 微波辐射计,测量试件微波辐射,温度精度均为 0.1K ,带宽均为 0.5GHz , 2cm 、 3cm 和 10cm 波段天线波束宽度分别是 0.036rad 、 0.054rad 和 0.073rad 。压力机械轴向最大载荷力为 500t ,测力误差 $\leq 1\%$ 。力学量测量仪器:FX-212型位移计,测量试件轴向位移,误差为 1% 。S3207型声发射综合参数测量仪,测量试件加载过程的声发射率,误差为 2% ,LZ-304型函数记录器,记录力学量信号,误差为 0.5% 。

混凝土试件由北京建工集团混凝土试验中心承制,试件为长方体,尺寸为 $150\text{mm} \times 250\text{mm} \times 400\text{mm}$,在自动控制恒温恒湿标准养护室内,养护28天,然后放置在通风干燥的室内,自然干燥3个月。试件两受力面磨成平行平面,不平行度 $\leq 0.05\text{mm}$,其余面为混凝土成型时的自然平面。

1.3 实验方法

在 500t 岩石压力机下,沿试件长轴方向单轴加载至试件破裂,加载速率为 $1.05\text{MPa}/\text{min}$ (保证等温过程加载),匀速加载。微波辐射计测量,每秒采样1次,微机自动记录,天线距离试件 3.5m 。试件、接收天线和辐射计均置于金属屏蔽罩内。在加载前,测量试件固有(未受力状态)辐射 2min ,以此值为基准值(基线),然后开始加载,在加载的过程中同时测量试件的微波辐射和各种力学量,测量直到试件破裂。

用灵敏度为 0.02K 温度计, 监视试件周围环境温度的变化, 在一块试件加载的过程中, 环境温度变化 $\Delta T < 0.15K$. 实验水平和垂直两种极化状态.

2 实验结果与分析

图 1~图 3 给出了不同强度混凝土的微波幅射

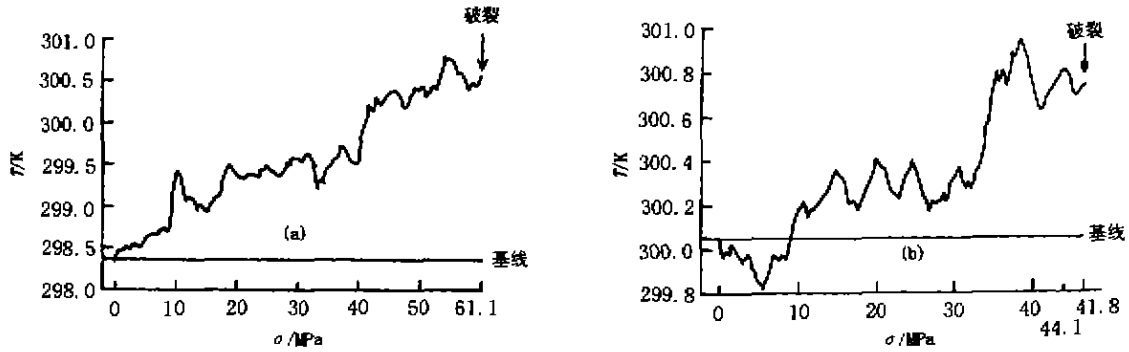


图 1 混凝土微波幅射在 2cm 波段随应力变化

(a) 水平极化, (b) 垂直极化

Fig. 1 The concrete microwave radiation varying with the stress at 2cm wave band

(a) the horizontal polarization, (b) the vertical polarization

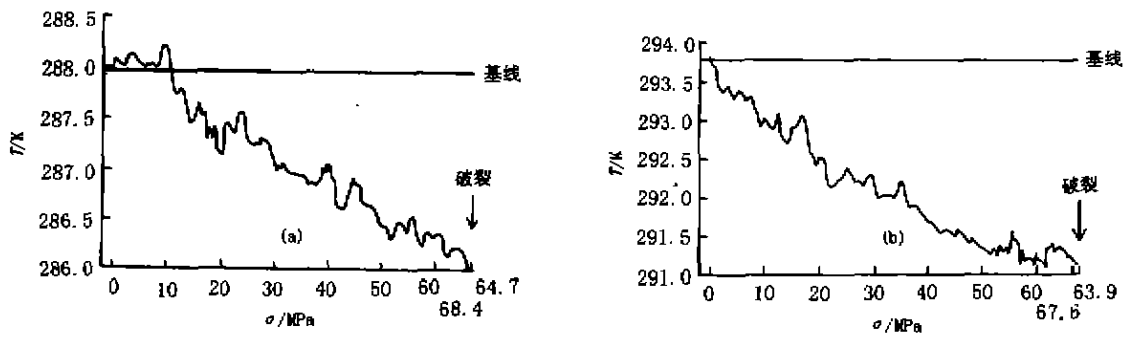


图 2 混凝土微波幅射在 3cm 波段随应力变化

(a) 水平极化, (b) 垂直极化

Fig. 2 The concrete microwave radiation varying with the stress at 3cm wave band

(a) the horizontal polarization, (b) the vertical polarization

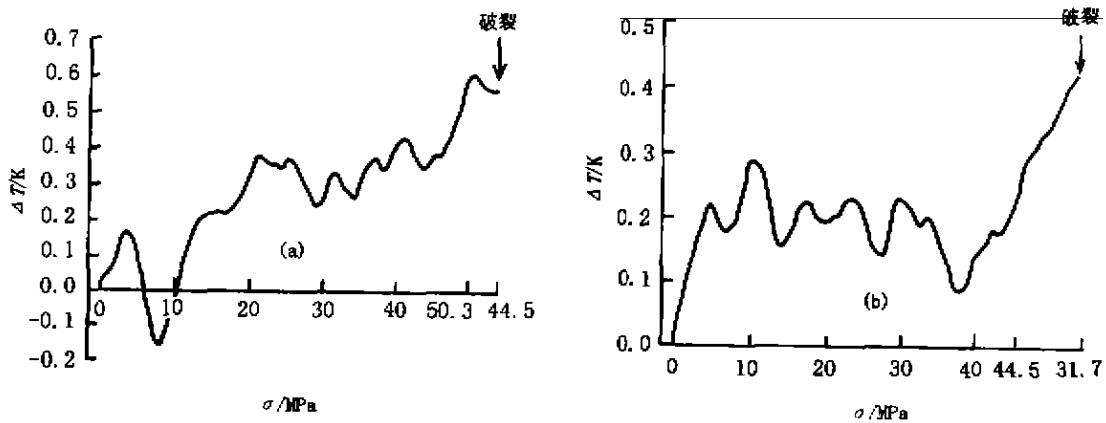


图 3 混凝土微波幅射在 10cm 波段随应力变化

(a) 水平极化, (b) 垂直极化

Fig. 1 The concrete microwave radiation varying with the stress at 10cm wave band

(a) the horizontal polarization, (b) the vertical polarization

在不同波段随压力的变化. 图中纵坐标为辐射能量(T), 用亮度温度度量, 单位为 K, 横坐标为应力 σ , 单位为 MPa. 0 之前为未加载荷时测量试件 2min 的固有辐射(背景值), 以此值为基准或称基线(与横坐标平行的直线), 从 0 点开始施加载荷.

2.1 微波辐射在不同波段随应力变化规律和特征

2.1.1 变化规律

在实验不同强度和两种极化状态的 40 块混凝土试件中, 变化规律为:

(1) 在 2cm 波段和 10cm 波段辐射能量随应力增加波动式增加, 如图 1(a)、图 1(b)和图 3(a)、图 3(b)所示, 直到试件破裂.

(2) 在 3cm 波段辐射能量随应力增加波动式减小, 如图 2(a)、图 2(b)所示, 直到试件破裂.

2.1.2 变化特征

突变特征. 在 2cm 和 10cm 波段, 在低应力和中等应力状态, 辐射能量随应力增加缓慢增加, 当应力增至高应力状态时, 辐射能量随应力增加而增加的速率发生突变. 如图 1(a), 应力增至峰值应力 65% (40MPa); 图 1(b), 应力增至峰值应力 73% (32MPa) 高应力状态; 图 3(a), 应力增至峰值应力 87% (43.9MPa); 图 3(b), 应力增至峰值应力 86% (38.2MPa) 极高应力状态时, 辐射能量随应力增加由缓慢增加转变为急速增加, 增加速率发生突变.

在 3cm 波段, 无突变特征, 它的特征是随应力增加, 辐射能量近似线性下降, 直到试件破裂, 如图 2(a)、(b)所示.

在 2cm 和 10cm 波段, 出现预示试件破裂前兆, 其特征是:

第一种类型, 试件临破裂前, 亮度温度 T 急速升高又急速下降, 随即试件破裂. 由图 1(a)可见, 当应力增至峰值应力 87.6% (53.5MPa) 时, 亮温 T 增加到 300.40K, 随应力增加, 亮温 T 迅速升高到 300.80K (最高值), 又迅速下降到 300.40K, 试件破裂, 该试件峰值应力为 61.1MPa. 由图 1(b)可见, 当应力增至峰值应力 87.3% (38.5MPa) 高应力状态时, 亮温 T 增加到 300.93K (最高值), 随应力增加, 亮温 T 急速下降到 300.63K, 又迅速升高到 300.81K, 再迅速下降到 300.68K, 试件破裂. 试件峰值应力为 44.1MPa, 破裂应力为 41.8MPa. 由图 3(a)可见, 当应力增至峰值应力 87.3% (43.9MPa) 高应力状态时, 亮温 T 的变化量 ΔT 增至 0.34K, 随应力增加, ΔT 迅速增高到 0.62K (最高值), 又迅速下降到 0.56K, 试件破裂. 试件峰值应力为 50.3MPa, 破裂

应力为 44.5MPa.

第二种类型, 试件临破裂前, 亮温 T 近似直线迅速升高, 直到试件破裂. 由图 3(b)可见, 当应力增至峰值应力 85.8% (38.2MPa) 高应力状态时, 亮温 T 的变化量 ΔT 降至 0.08K (最低值), 自此后亮温 ΔT 近似直线迅速升高到 0.42K, 试件破裂. 试件峰值应力为 44.5MPa, 破裂应力为 31.7MPa.

在试验的试件中, 大多数试件在 2cm 和 10cm 波段都出现这两类破裂前兆, 但以第一种类型的居多, 而在 3cm 波段, 无论是水平极化还是垂直极化, 均未出现明显的破裂前兆. 这些破裂前兆的存在, 有可能对工程失稳的时间作出预测.

2.2 不同极化方式的波在不同波段的变化

由于物质的微波辐射能力与极化方式有关, 同一种物质不同极化方式辐射能量的大小不同, 同一种极化方式, 在不同波段辐射能量的大小也不同, 对不同波段选取最佳的极化方式, 能够提高微波遥感对物体的探测效果和辨识能力. 我们对混凝土进行了水平极化和垂直极化两种实验, 结果如下:

变化规律. 对 40 个混凝土试件的实验资料分析得出, 在相同波长波段, 无论是水平极化波还是垂直极化波, 微波辐射随应力变化的规律基本相同, 见图 1~图 3, 但变化量不同.

变化量比较. 在 2cm 和 10cm 波段, 水平极化波随应力变化的变化量大于垂直极化波, 在 2cm 波段平均大 2.3 倍, 在 10cm 波段平均大 1.5 倍. 在 3cm 波段, 垂直极化波随应力变化的变化量大于水平极化波, 平均大 2.6 倍.

这一结果, 对于选取不同波段的最佳极化方式, 具有重要意义.

3 由微波辐射能量反演温度和应力

在实际中, 物体的温度始终存在, 并且是时刻在变化, 当物体受到应力作用时, 应力也在变化, 而传感器接收到的微波辐射能量是由观测时刻物体的温度 T 产生的辐射能量 E_1 和由观测时刻的应力 σ 产生的辐射能量 E_2 叠加在一起的总辐射能量 E , 即

$$E = E_1 + E_2, \quad (1)$$

式(1)中 E 是观测值, E_1 和 E_2 是未知数, 如何将 E_1 和 E_2 从观测总能量 E 中定量的分离出来, 在实际应用中至关重要, 经过我们的研究, 从理论上证明, 采取多波段遥感观测, 通过数学方法, 能够将 E_1 和 E_2 从观测总能量 E 中定量的准确的分离出来, 进而通过 E_1 反演温度 T , 通过 E_2 反演应力 σ (分离和反

演的理论与数学方法将另文报道),这个 T 和 σ 就是遥感观测时刻象元点的温度状态和应力状态. 这就是用无源微波遥感测量目标物体的温度和应力的基本原理.

倘若应力、应变的变化速率加快(如失稳前期),产生热量积累,导致温度升高,这时由 E_i 反演出的温度为

$$T = T_0 + \Delta T, \quad (2)$$

式(2)中 T_0 是正常温度, ΔT 为应变速率加快产生的附加温度,这个附加温度 ΔT 称为温度异常. 所以,用微波遥感既能观测出应力及其分布状态,又能同时观测出温度异常及其分布状态. 能够从应力和温度异常两方面判定工程是处于稳定状态或不稳定状态.

4 结语

(1) 本实验成功地实现了对混凝土和岩石试件的等温过程加载实验,实验得出了机械力直接引起固体物质(如混凝土、岩石等)的微波辐射能量随机械力的变化而显著变化的结果,这就证明了机械能激发了固体物质分子的转动态能级发生了跃迁,这个能级跃迁,完全是机械力引起,与温度无关. 这就把微波辐射能量变化与力从物理上联系起来.

(2) 实验了 2cm、3cm 和 10cm³ 个波段的水平和垂直两种极化状态,在实验的 48 个混凝土试件和岩石试件中,这一物理现象,均无一例外地显著存在,证明了具有普遍性,不是个别试件的个别现象.

(3) 物体的微波辐射遵守著名的瑞利(Rayleigh)-金斯(Jeans)辐射定律,即微波辐射能量是绝对温度 T 和波长 λ 的函数,我们的实验证实,它还是应力(机械力) σ 的函数,本实验结果,对物质的微波辐射基本理论是一个新的补充.

(4) 微波遥感观测出的应力和温度是连续分布. 例如,在地面距离水库大坝 500m 处观测,对大坝的地面分辨率很容易地做到 50cm \times 50cm,即在 50cm \times 50cm 面积内就有一个应力和温度测量点,所以,测量出的应力和温度是高度连续分布,可准确发现应力集中和增强的部位,可准确找出温度异常的区域.

(5) 这一物理现象的发现,为工程应力测量和稳定性监测,提出了新原理、新方法和新技术,为微

波遥感应用和研究开拓了新领域,具有广泛地应用前景和价值. 不但可以用于混凝土工程稳定性监测,而且可用于地震监测、岩体稳定性监测、洞体工程稳定性监测、矿爆和岩爆等的监测和预测等领域. 为工程应用,提供了实验依据,奠定了理论基础. 这一研究结果,一旦付诸应用,将产生重大的社会效益和经济效益.

REFERENCES

- [1] CAI Mei-Feng, QIAO Lan, LI Hua-Bin. *The Principle and Technology for Crustal Stress Measuring*. Beijing: Science Press (蔡美峰, 乔兰, 李华斌. 地应力测量原理和技术. 北京: 科学出版社), 1995: 28-94
- [2] XIE Shou-Sheng, XU Yong-Jin. *The Technology and Application for Microwave Remote Sensing*. Beijing: Electronics Industry Press (谢寿生, 徐永进. 微波遥感技术与应用. 北京: 电子工业出版社), 1987: 17-23, 104-106
- [3] CUI Cheng-Yu, DENG Ming-De, GENG Nai-Guang. Spectral radiation signatures of rocks under different pressures. *Chinese Science Bulletin* (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
- [4] DENG Ming-De, FAN Zhen-Fang, CUI Cheng-Yu. The experimental study for earthquake prediction by passive microwave remote sensing. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (邓明德, 樊正芳, 崔承禹. 无源微波遥感用于地震预报的实验研究. 红外与毫米波学报), 1995, 14(6): 401-406
- [5] GENG Nai-Guang, FAN Zheng-Fang, JI Quan-Quan, et al. The application of microwave sensing technology in rock mechanics. *Acta Seismologica Sinica* (耿乃光, 樊正芳, 籍全权等. 无源微波遥感技术在岩石力学中的应用. 地震学报), 1995, 17(6): 480-486
- [6] ZHU Sheng-Lin. *Atomic Physics*. Beijing: Higher Education Press (褚圣麟, 原子物理. 北京: 高等教育出版社), 1979: 256-279
- [7] XU Yi-Zhuang. *Molecular Spectrum Theory*. Beijing: Tsinghua University Press (徐亦庄, 分子光谱理论. 北京: 清华大学出版社), 1988: 234-239
- [8] WANG Guo-Duo, JIN Pei-Yu. *Microwave Remote Sensing*. Beijing: Electronics Industry Press (汪国铎, 金佩玉. 微波遥感. 北京: 电子工业出版社), 1989: 34-55
- [9] DENG Ming-De, GENG Nai-Guang, CUI Cheng-Yu, et al. The study on the variation of thermal state of rocks caused by the variation of stress state of rocks. *Chinese Earthquake Research* (邓明德, 耿乃光, 崔承禹, 等. 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
- [10] Burn J P, Cbbold P R. Strain heating and thermal softening in continental shear zones: a review. *J. Structural Geology*, 1980, 2: 149-158