

红外测温技术用于地下爆炸试验监测

刘扬 谭吉春 钟钦

(国防科学技术大学应用物理系, 湖南, 长沙, 410073)

TL91

摘要 用数值模拟方法计算了地下爆炸装置释热对地面温度场分布的影响, 并建立了空对地红外测温模型, 研究了探测器—大气—地下热源之间的联系. 数值模拟结果表明, 红外测温技术可以有效地实现对地下爆炸事件的非接触监测.

关键词 红外技术, 地下核试验, 非接触测量, 亮温.

核爆炸

引言

地震波探测、放射性探测是已经付诸实用的地下核试验监测方法. 仿真计算的结果表明, 地表温度探测与地震波探测、放射性探测等方法配合, 是实现非接触核查的有效技术途径.

地表温度随气候、气象条件和昼夜交替而变化, 很多文献深入研究了用已知参数(如气温、风速、日照、湿度、感度、植被覆盖、土壤性质等)预测地表温度变化的方法^[1,2]. 由于核试验之前地表温度可认为是一已知量, 在核试验后植被、土壤和大气环境等条件相似, 核装置爆炸中心(以下简称爆心)是一个高温热源, 地下核爆产生的热能对原有的(天然)地面温度分布的扰动必然显露出来. 空对地红外测温技术可以通过热学效应判断地下爆炸事件的发生和估计发生时间.

本文用地层热传导模型表述地下核试验高温热源对地面温度分布的影响, 用空对地红外测温模型分析探测器—大气—地下热源的联系. 将两个模型连接, 以探测器测得的等效黑体亮温为基础, 判断地下核爆炸的发生、推测核爆当量和核爆深度.

1 地下核试验对地面温度场的影响

根据地下核爆炸试验现象学及有关资料, 地下试验场所处地层可视为半无限大的非均匀(分层)的导热体. 瞬态过程后的稳态条件下, 爆心高温区向四周散热是一个缓慢的过程. 岩石的热传导是散热的主要方式之一. 热流源自球形爆心, 经半无限大岩石、土壤层传向四方, 引起地面温度的升高(见图1).

1.1 地层传热模型及数值模拟方法

本文讨论热平衡状态下岩层的导热现象(不考虑地下水汽的对流等因素的影响). 自爆心球形高温区向外的稳态传热过程由 Laplace 方程描述, 由于球对称的缘故, 三维导热可简化为垂直面内的二维问题求解, 热源的球面边界化为沿直面内的圆形边界. 设 $T(p)$ 是边界上 P 点的温度(见图1), g 是调和函数. 由格林第二恒等式将 Laplace 方程化为边界积分形

式,得:

$$\frac{1}{2}T(P) + \int_{\Sigma_{\text{BOUNDARY}}} \left(T \frac{\partial g}{\partial n} - g \frac{\partial T}{\partial n} \right) ds = 0. \quad (1)$$

设 q_0, q_m 是待定系数, θ 的定义见图 1 所示. 对圆形内边界处的温度梯度 $\partial T / \partial n$ 作 M 阶近似, 其表达式为^[3,4]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = q_0 + \sum_{m=1}^M q_m \sin m\theta, \quad (2)$$

图 1 中, x 为圆形内边界上一点, ξ 为热源中心(即圆心). 圆形内边界的调和函数 g 的表达式为^[3]:

$$g(x, p) = -\frac{1}{2\pi} \log |x - p|, \quad (3)$$

$$g_0(x, \xi) = g(x, \xi), \quad (4)$$

$$g_m(x, \xi) = \frac{\sin(m\theta)}{|x - \xi|^m}. \quad (5)$$

设内边界(热源的边界)温度为 T_0 . 绕过爆心的铅直轴将地面边界划分为 n 个同心圆环, 在一阶近似条件下, 式(2)和(5)中 $m=1$, 将式(2)~(5)代入式(1), 可得到 $(n+2)$ 阶闭合方程组式(6)~(8):

$$\frac{1}{2}T(P_i) + \int_{\Sigma} \left(T \frac{\partial g}{\partial n} - g \frac{\partial T}{\partial n} \right) ds + a \left[q_0 \log r(P_i) - \frac{1}{2} b (q_1 \sin \theta) \right] = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\int_{\Sigma} \left(T \frac{\partial g}{\partial n} - g_0 \frac{\partial T}{\partial n} \right) ds + T_0 + a q_0 \log a = 0, \quad (7)$$

$$\int_{\Sigma} \left(T \frac{\partial g}{\partial n} - g_1 \frac{\partial T}{\partial n} \right) ds - \pi q_1 = 0; \quad (8)$$

式(6)~式(8)中, 积分域 ∂R 为无限大的地面, a 为热源半径, $r(P_i)$ 为 P_i 到爆心 ξ 的距离, $b = a/r(P_i)$ (见图 1).

1.2 地质分层与地表—大气表面的计算方法

本文地层导热模型的外边界(即地面边界)受空气对流换热的影响, 数学处理方法是将辐射换热及其它换热折合成对流换热系数 h ^[5]:

$$q_1 = \frac{\partial T(P_i)}{\partial n} = -BI T(P_i). \quad (9)$$

式(9)中 $BI = ha/k$ 是 Biot 数, k 是地面的热传导系数.

本文用等效深度来近似表述多层地层结构的导热效应. 设地面覆盖的砂土层厚度为 H_1 , 导热系数为 k_1 , 相应的岩石层厚度为 H_2 , 导热系数为 k_2 , 则爆心等效深度 D 可用岩石的深度表示为:

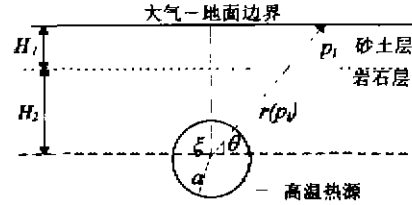


图 1 地下核爆炸产生的高温热源的热传导模型

Fig. 1 The thermal conduction model of high temperature source concerned with the underground nuclear explosion

$$D = \frac{k_2}{k_1} H_1 + H_2. \quad (10)$$

1.3 地下爆炸引起地面升温的模拟计算结果

在已知参量和特定的地质结构中,在几种典型条件下(不同温度、不同爆心高温区大小及深度等)用本文模型所得仿真结果较好地符合模拟实验测温结果. 计算中 $k_1 = 0.25 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$, $k_2 = 2.5 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$, $\text{Biot} = 200$. 将待测地面分成 156 个温度相同的环形区域,任一区域 i 到爆心投影点的距离为 $R(\text{m}) = D \times \tan[0.01(i-156)]$, 纵坐标表示无量纲温度 $T' = (T - T_0)/(T_i - T_0)$, T_i 和 T_0 分别为高温区的温度和无限远处地面的温度. 图 2 表明: 在热源半径一定($R=40\text{m}$)条件下增加爆心深度,爆心高温区对地表温度的影响随之减少;图 3 表明: 在爆心深度一定($D=400\text{m}$)条件下增大地下高温区的半径(即增大爆炸当量),地表温度的变化量将随之增大. 由于爆心高温区大小、温度及深度可根据核爆现象学的多种参数与核爆当量联系起来,因此利用本文提供的方法可对不同当量的地下核爆对地面温度场的影响进行预估. 假定爆心温度为百万度量级,本文计算结果显示,根据爆炸当量及掩埋深度的不同,地面温度增量约为爆心温度的百万分之一至百万分之十左右(高于无核爆炸条件下地面温度预测值). 分层岩石的实际传热过程十分复杂,例如,地质构造中各层的非均匀性(含地下核爆造成的非均匀性),裂隙的存在和不同地质构造层分界面的无规律性,以及地下水的存在而导致核爆后汽化水的对流等因素均影响仿真计算的精度. 为了降低这些误差因素的影响,一方面需对试验数据综合分析,修正原设的导热系数,另一方面需进一步完善计算模型,例如,可将对流方程加入到计算方程组.

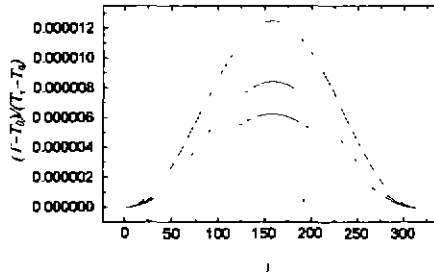


图 2 地面温度分布与地下爆炸深度的关系
Fig. 2 The relationship between ground surface temperature ($T, ^\circ\text{C}$) and the buried depth of the explosion center ($D_1 = 300\text{m}$, $D_2 = 400\text{m}$, $D_3 = 500\text{m}$).

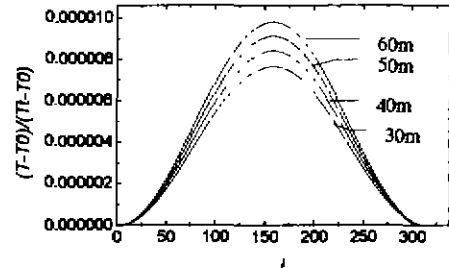


图 3 地面温度分布与地下热源半径大小的关系
Fig. 3 The ground surface temperature ($T, ^\circ\text{C}$) versus the radius (R, m) of the underground high temperature area

2 地表温度红外监测的方法

2.1 空对地红外监测的方法

用红外测温法监测地下核爆炸,本文考虑了以下主要因素对探测器测量值的不同贡献:(1)爆炸前地表温度,(2)爆炸后地表温度,(3)环境热辐射,(4)大气传输和探测器响应等.图 4 是空对地红外测温示意图.

本文用 $L_0(\lambda)$ 表示探测器入瞳处的光谱辐亮度 ($W/cm^2 sr \mu m$), 则探测器接收到的对信号有贡献的有效辐亮度 $L_e(\lambda)$ 为:

$$L_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

式(11)中 $\Phi(\lambda)$ 为红外探测器在波长 λ 处的光谱响应, 令 $M(\lambda, T_{BB})$ 为黑体光谱出射度 ($w/cm^2 \mu m$), 则探测器在光谱间隔 $(\lambda_1 - \lambda_2)$ 接收的有效亮度 L_e 可由等效黑体的亮温 T_{BB} 描述:

$$L_e = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) M(\lambda, T_{BB}) d\lambda, \quad (12)$$

$$M(\lambda, T) = C_1 / [\lambda^5 \exp(C_2 / \lambda T) - 1], \quad (13)$$

式(13)中 $C_1 = 2\pi hc^2, C_2 = hc/k, C$ 为光速, h 是普朗克常数, k 是玻耳兹曼常数. 由式(12)得到 T_{BB} 与 L_e 的对应关系为:

$$T_{BB} = f(L_e), \quad (14)$$

如果离开地表面处总的红外辐射的光谱辐亮度记为 L_G (见图 4), 则:

$$L_G = L_1^* + L_{RH}^* + L_{RS}^*, \quad (15)$$

式(15)中 L_1^* 为地表自身辐射的光谱辐亮度, L_{RH}^* 为天空辐射在地表反射的光谱辐亮度, L_{RS}^* 为太阳辐射及太阳的散射光经地表反射的光谱辐亮度. 由图 4 所示可知, 式(11)中隐含的 $L_0(\lambda)$ 为:

$$L_0(\lambda) = L_G \tau(\lambda) + L_A + L_{SS}, \quad (16)$$

式(16)中 $\tau(\lambda)$ 为红外辐射大气路径上的透过率, L_A, L_{SS} 分别为大气红外辐射和太阳红外辐射的散射在探测器位置处的光谱辐亮度.

2.2 用空对地测温结果监测地下爆炸

图 5 分析了两种典型地面温度下 (293K 及 300K) 工作波段为 $800 \sim 1200 cm^{-1}$ 的探测器在不同高度探测到的地面等效黑体温度. 结果表明: 相同波段探测器在探测温度分别为 293K 和 300K 的地面时, 等效黑体亮温有显著差别, 这种差别足以区别地下核爆炸引起的试验场区地面温度的变化, 升温幅值最大可达 $7 \sim 8^\circ C$.

红外辐射在大气中传输要受到大气分子的吸收和散射, 同时大气中尘埃、烟雾等气溶胶的存在对辐射也有吸收和散射作用. 本文采用美

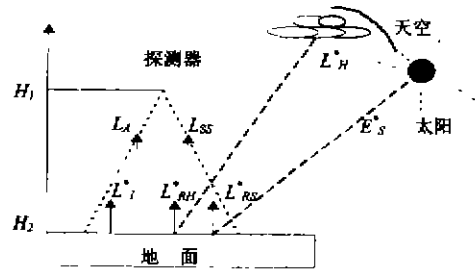


图 4 空基(或天基)红外探测器的红外遥测模型

Fig. 4 Infrared remote sensing model of IR detector based on aircraft (or satellite)

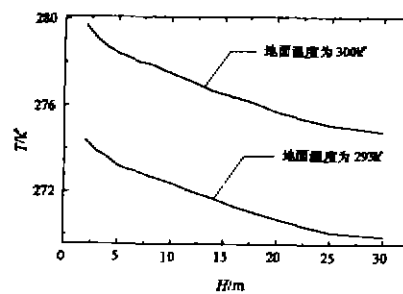


图 5 亮温与探测器高度关系

Fig. 6 The relationship between the brightness temperature and the detector's height

国空基地球物理实验室(AFGL)的 LOWTRAN 7^[6]计算在地表处的太阳直接辐射 E_s' 、太阳散射辐射 L_{SS} 、天空背景辐射 L_H 及大气辐射 L_A 和大气红外光谱透过率 $\tau(\lambda)$ 。图 6(a)、(b) 是图 2 所示的地面温度分布由不同工作波段探测器得到的对应的亮温分布(计算中假设环境 T_0 为 273K, 探测器高度为 10km)。

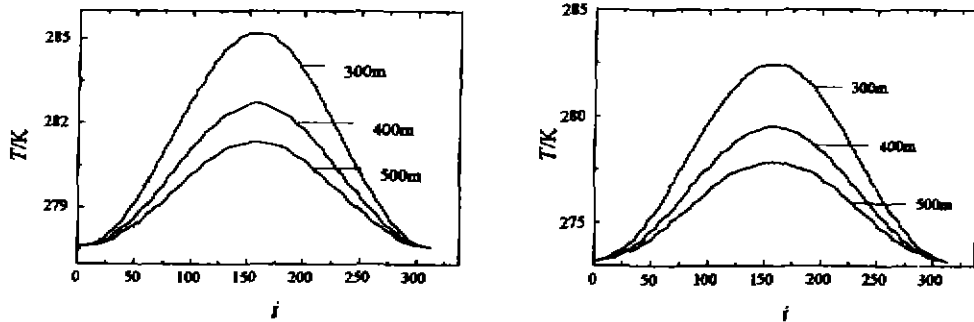


图 6 与图 2 地面温度分布对应的亮温分布

(a) 探测器工作波段为 $800\sim 1200\text{cm}^{-1}$

(b) 探测器工作波段为 $2000\sim 2200\text{cm}^{-1}$

Fig. 5 The brightness temperature corresponding to the ground surface temperature in Fig. 2

(a) the detector's working band $800\sim 1200\text{cm}^{-1}$,

(b) the detector's working band $2000\sim 2200\text{cm}^{-1}$

从图 5 和图 6 还可以看出,用不同波段的探测器测量地面温度时有不同的对比度,同时这种区别也与探测高度有关.这种影响在底层大气尤为显著,由于高层空气稀薄这种影响明显减小.(图 5 和图 6 计算中探测器的平均光谱透过率为 0.7895,LOWTRAN 7 采用 1976 年标准大气,乡村气溶胶模型,可见度为 23km,地面海拔为 0.6km,太阳天顶角为 60°).

3 结语

本文将空对地红外测温和爆炸高温热源引起地面温度分布变化两个模型连接,分析了以地下热源为起点、空中探测器为终点的传热和测温过程.经标定后,本文仿真方法可将空对地红外探测结果与地下核爆的发生概率相联系,达到对爆心坐标定位和当量估算等目的.

地下核爆炸后地面温度的升高和降低是一个非常缓慢的过程,因此红外测温方法应用于地下核试验核查具有长时效性和可重复性,对于检查“核禁试条约”的执行情况等实际应用有重要价值.

REFERENCES

- 1 Pratt D A, Foster S J, et al. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, 1980, **46**(4):529
- 2 ZHANG Jian-Qi, ZHANG Hai-Xing, et al. *Infrared Phys. Technol.*, 1995, **96**(2):577
- 3 Baove M R, Caulk D A. *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, 1985, **18**:675
- 4 RAO V. *Arimilli and Maasood Parang, Heat Transfer*, 1983, **121**
- 5 Rudolf R. *Applied Optics*, 1987, **26**(12)~(15):2376
- 6 Kneizys F X, et al. AD-206 773

THE UNDERGROUND EXPLOSION TEST INSPECTION BY INFRARED SENSING TECHNOLOGY

LIU Yang TAN Ji-Chun ZHONG Qin

(Department of Applied Physics, National Defense University of Science and Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract An air-to-ground IR temperature-sensing model was set up, and the ground surface temperature influenced by the underground nuclear test was calculated. The model of infrared remote sensing was also set up to estimate the ground surface temperature. The results indicate that the infrared remote sensing can be effectively applied to implement the noncontact inspection of the underground nuclear test.

Key words infrared technology, underground nuclear test, remote sensing, brightness temperature.