第7卷 第1期 空间科学学报 Vol. 7, No. 1
1987 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1987

安徽亳县陨石的热释光研究

王奎仁 刘京发* 杨海涛
（中国科学技术大学地球和空间科学系）

一、引 言

亳县陨石于 1977 年 10 月 20 日下午 2 时 30 分左右降落于安徽亳县张沃公社吝子门大队．陨石表面灰黑色，有 0.5mm 厚的烧蚀层，具有明显的球粒结构．已查明[1]该陨石的透明矿物有镁橄榄石、贵橄榄石、透铁橄榄石、古铜辉石、顽火辉石、斜顽辉石、顽火透辉石、易变辉石、斜长石、正长石、白磷钙矿、石英、黑云母、白云母、方解石、刚玉等；不透明矿物有陨硫铁、铁纹石、镍纹石、铬铁矿、镁铁尖晶石、钛铁矿、镍黄铁矿、石墨、磁铁矿、方铁矿、自然铜和张衡矿等．经研究[1]该陨石的化学-岩石类型为 LL_4，属于平衡球粒陨石．

陨石在通过大气层时，由于大气摩擦加热作用在陨石表层数毫米范围内产生了一定的温度分布．通过对这种温度分布状况的研究，可以对陨石的复原工作、运行轨道的计算和烧蚀速率的估算等提供一定的参考数据，在陨石对比研究中也具有一定的意义．

已经知道陨石运行所受大气加热的影响深度达数毫米．而岩相学技术仅能在距表面 1mm 的深度范围内测定陨石中的热变化．1971 年 Vaz[2] 在研究 Ucera 球粒陨石时第一次用热释光法研究陨石温度梯度．后来陆续在 Lost City 陨石、Barwell 陨石、Allende 陨石和 Plainview 陨石的研究中，测得在距熔壳 2—10mm 区域内温度梯度值是 15—20℃/mm．之后热释光法就成为陨石温度梯度测定的一种基本方法．

二、实 验 原 理

晶体在电离辐射作用下，电子受到激发吸收能量由价带越禁戒而进入导带．此时晶体就贮藏了部分辐射能，处于介稳状态．当晶体加热时，电子由导带又回到价带，伴随有光子的放出．这就是热释光现象（TL）．

热释光法的理论基础是固体物理学中的发光剂量学．热释光的产生是辐照和贮藏的过程，热释光的放出是加热过程．陨石在降落过程中由于大气加热作用使部分热释光放出，而在距陨石表面深度不同的位置由于温度不同而使释放的光强度不同．这样便将大气加热作用产生的温度分布的信息通过热释光强度反映出来了．因此测定陨石样品的剩余热释光，并对大气加热过程进行模拟，可以获得陨石的温度分布．

---

* 中国科学院地球化学研究所．
本文于 1986 年 7 月 3 日收到．

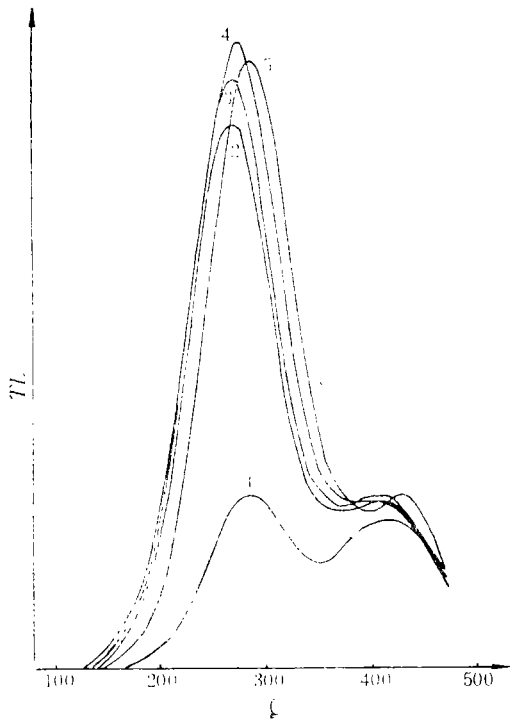
三、实 验 装 置

实验装置主要由三部分组成：加热系统、探测系统和记录系统．加热系统主要是发光炉和线性升温控制器．探测系统采用了 EMI9635QB 型光电倍增管探头．记录系统包括 FH-408 自动定标器和 X-Y 记录仪．加热样品是用经退火处理的银托盘．滤波采用 2mm 厚的 QB24 深蓝色滤片和 3mm 厚的 GRB1 隔热玻璃．测定时升温速率 20℃/s，样品量 3mg，氮气清除，流量 2 l/min．仪器所测峰值强度的再现性为 ±2%．

四、测 定

1. 样品的制备

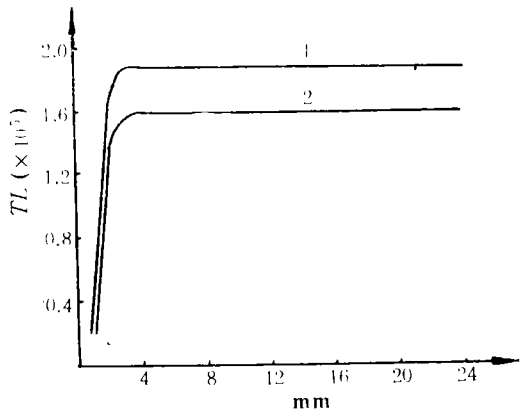
原始样品头部和边部有发育完好的约 0.5mm 厚的熔壳，头部表面和边部表面基本直交．分别在头部和边部沿垂直熔壳方向各取出 4 条 10×10×35mm 长条样品．再将此样品从熔壳开始以 1 毫米为间隔切成薄片．将薄片清洗、晾干、夹碎，再用玛瑙研钵轻轻研磨，过 120 目筛，待测．



编号为距熔壳距离，mm(number is the distance to the fusion crust, mm)

图 1 亳县陨石自然热释光曲线

Fig. 1 Natural TL curves of Bo County meteorite



1.头部 (head)
2. 边部 (side)

图 2 热释光与距熔壳深度的关系

Fig. 2 Relationship between the intensity of TL and depth from the fusion crust

2. 自然热释光的测定

在选定实验条件下分别测定各样品的自然热释光，同时记录光子数和热释光曲线(如图 1)．该陨石的热释光强度曲线由“LT”和“HT”组成．“LT”表示低温峰，中心温度 280℃，“HT” 表示高温峰，中心温度 420℃．分别将头部和边部不同深度样品的热释光强度相对取样深度作图 (如图 2)，由之可见在陨石近表面处明显存在一个热释光强度的梯度．

3. 大气加热模拟实验

为了将热释光梯度换算成温度梯度，进行大气加热模拟实验： 取距表面约 20mm 处的样品(其热释光基本没受大气加热的影响而损失) 在不同的温度下各加热 10 秒，再测定其热释光，得出如图 3 的实验曲线．该曲线反映了随着温度的升高热释光强度的减小情况． 当温度低于 120℃ 时，热释光基本没有放出，而温度超过 300℃ 时热释光已完全清除．

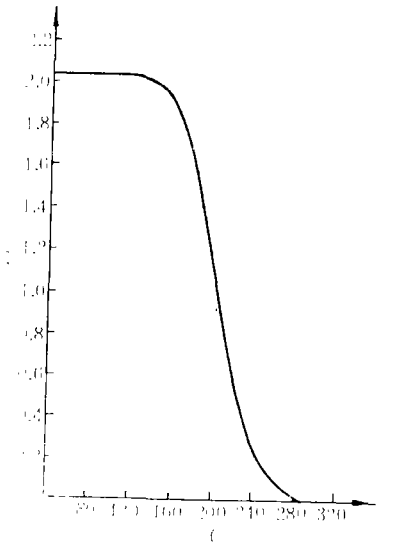


图 3　大气加热模拟实验曲线

Fig. 3 Experiment curve to simulate the atmospheric heating

4. 单矿物的热释光测定

在镜下选出亳县陨石中的主要矿物：辉石、橄榄石和陨硫铁．热释光测定结果表明这些矿物均没有明显热释光贮存．

五、结 果 讨 论

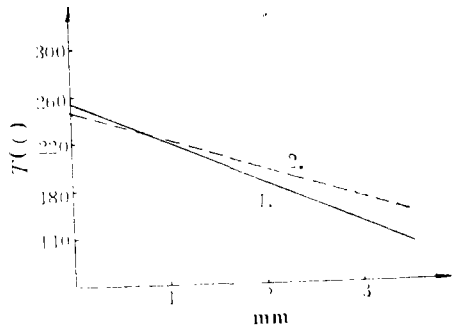
将热释光强度与距熔壳深度关系的二组数据通过大气加热模拟实验的结果(图 3) 进行代换，分别获得陨石头部和边部的温度与深度关系的二组数据，用最小二乘法进行拟合，获得亳县陨石由于大气加热而形成的温度分布图，如图 4．相关系数 γ 分别为 0.9649 和 0.9425．温度梯度值分别为：头部： $G = 34.2$℃/mm；边部： $G = 24.8$℃/mm．

通过实验测定和数据处理可以给出下述几点结论：

1. 陨石的热释光主要是陨石在运行期间由宇宙射线的辐照产生的，少量是由于陨石自身的 ^{238}U、^{232}Th、^{87}Rb、^{40}K 的衰变产生的．热释光放出的温度范围是 175—400℃，而陨石在距熔壳 5mm 内的温度变化正好在这个范围之中，因此用热释光强度的变化梯度来确定陨石通过大气层时产生的温度变化梯度是合适的．

2. 方法的误差之一是模拟大气加热过程时对样品加热的时间． 所选定的加热时间为 10 秒，这是考虑到估计陨石发光飞行时间接近 10 秒．幸运的是，实验已经表明[3,4]：即使模拟大气加热时间相差两倍，对温度梯度的影响也是很小的．

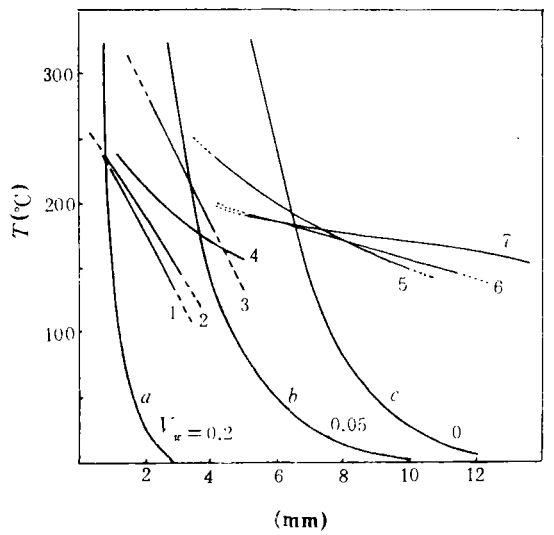
3. 该方法的另一误差来自陨石陨落时的方向性问题． 亳县陨石研究的前期工作[1]已对陨石的方向性作出了判断．温度梯度测定值表明头部梯度值(34.2℃/mm) 大于边部的梯度值 (24.8℃/mm)．这反过来又证实了之前对陨石方向性的判断，同时可以推论亳县陨



1.头部 (head) 2.边部 (side)

图 4 亳县陨石温度分布图

Fig. 4 The temperature profiles in Bo County meteorite



1、2.亳县陨石 (Bo County meteorite); 3.吉林陨石 (Jilin meteorite); 4. Barwell 陨石; 5. Plainview 陨石; 6. Ucera 陨石; 7. Lost City 陨石 a、b、c. 不同烧蚀速率的理论曲线 (theritical temperature profiles with different ablation rate)

图 5 各类陨石温度分布及理论曲线

Fig. 5 The temperature profiles in some meteorites and the theritical temperature profiles with different ablation rate

石在通过大气层时是定向性的.

4. 考虑到石陨石较弱的热传导性,可以将它近似视为无限宽的板.根据富里叶实验定律,用热传导方程可以描述该陨石的温度分布. 由于加热作用主要是由外界大气摩擦产生的,忽略陨石内部放射性衰变产生的热源分布,再考虑一烧蚀项,则深度 y 和温度 T 满足下述方程:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{v_w}{k}\frac{\partial T}{\partial y}-\frac{1}{k}\frac{\partial T}{\partial t}=0, \quad (1)$$

其中 v_w 为烧蚀速率, k 是热扩散系数 $\left(即\frac{K}{D\cdot C_p}, K是热传导率, D是密度, C_p是比热\right)$, t 是时间. 方程的通解是:

$$T=\frac{1}{2}T_i\left\{\operatorname{erfc}\left[\frac{y+v_w t}{2(kt)^{1/2}}\right]+\exp\left(\frac{-v_w y}{k}\right)\operatorname{erfc}\left[\frac{y-v_w t}{2(kt)^{1/2}}\right]\right\}. \quad (2)$$

其中

$$\operatorname{erfc}x=\frac{2}{\pi^{1/2}}\int_x^\infty \exp(-x^2)dx. \quad (3)$$

由于陨石发光飞行时间很短(仅 10 秒左右),因此可以假设热传导过程是在稳态的条件下完成的,即 $\frac{\partial T}{\partial t}=0$,代入方程(1),可得:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{v_w}{k}\frac{\partial T}{\partial y}=0. \quad (4)$$

初值条件: $T|_{y=0}=T_i$ (即陨石表面温度)解得:

$$\frac{\partial T}{\partial y}=-\frac{v_w T_i}{k}\exp\left(-\frac{v_w y}{k}\right), \quad (5)$$

$$T=T_i\exp\left(-\frac{v_w y}{k}\right). \quad (6)$$

式(5)为陨石表层的温度梯度函数,式(6)为陨石表层的温度分布函数.

将方程(4)的解与实验测定的温度分布曲线轮廓进行比较[3] (图 5), 可见亳县陨石的

温度分布曲线的斜率（即温度梯度）介于吉林陨石和其他陨石之间，与烧蚀速率 v_m 为 0.10 cm/s 时稳态热传导方程的理论解释比较一致。

从(6)式还可以看出采用稳态连续烧蚀模型所获得的理论温度分布是指数函数关系，我们的研究是对指数曲线的一段进行直线拟合，获得了陨石表层由于大气摩擦加热产生的温度梯度值。

5. 根据单矿物热释光测定结果再结合考虑矿物的共生和连生特征，可以认为亳县陨石中的辉石、橄榄石、陨硫铁、铁纹石、镍纹石和自然铜等矿物中均没有明显的热释光贮存，陨石的热释光主要是贮存在石英、长石和白磷钙矿等矿物中。

6. 实测温度分布曲线与理论曲线[5]的对比（图 5）可以看出亳县陨石的烧蚀速率估计为 0.10cm/s，这提供了陨石复原工作的一个重要参数。

7. 从实测热释光曲线（图 1）可得到参数 $\ln(LT/HT)$ 为 1.30。根据 McKeever[6] 对热释光曲线特征的分析，本文将亳县陨石划为 A 型(即参数 $\ln(LT/HT)$ 大于零)，该陨石在太空中运行时是位于距太阳较远的轨道上(相对于 B 型陨石)。

参　考　文　献

[1] 王奎仁、李学明和王俊新，科学通报，第 10 期，第 756 页，1986.
[2] Vaz, J. E., *Meteoritics*, Vol. **6**, p. 207, 1971.
[3] 刘京发、王维达和刘顺生，科学通报，第 17 期，第 1057 页，1981.
[4] Sears, D. W., *Modern Geol.*, Vol. **5**, p. 155, 1975.
[5] Melcher, C. L., *Meteoritics*, Vol. **14**, p. 309, 1979.
[6] McKeever, S. W. S. and D. W. Sears, *Modern Geol.*, Vol. **7**, p. 137, 1980.

Thermoluminescence Study on Bo County Meteorite

Wang Kui-ren　　Liu Jing-fa

(*University of Science and Technology of China*)　(*Guiyang Institute of Geochemistry, Academia Sinica*)

Yang Hai-tao

(*University of Science and Technology of China*)

Abstract

In this paper the results of thermoluminescence (TL) study on Bo County meteorite are reported. Temperature gradient in the meteorite, produced by heating during its atmospheric passage, is 34.2°C/mm in head, 24.8°C/mm in side. The temperature profiles of the meteorite is closed to the Barwell meteorite, and more reasonably consistent with the steady-state solution to the heat conductivity equation in a case of the ablation rate of 0.10 cm/sec. According to the TL curve of the meteorite the parameter Ln (LT/HT) is 1.30. So the meteorite belong to type A.