

## 垃圾焚烧炉干燥床垃圾干燥过程研究和分析

蒙爱红<sup>1</sup>, 李清海<sup>1</sup>, 张衍国<sup>1</sup>, 陈允轩<sup>2</sup>, 党文达<sup>1</sup>, 陈梅倩<sup>2</sup>

(1. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 对部分垃圾组分进行了恒温条件下干燥失重情况的试验研究,同时通过理论分析和计算,研究了炉排-循环流化床复合垃圾焚烧炉干燥床上垃圾的干燥过程.结果表明:垃圾干燥过程中,干燥温度越高,失重率越大,但垃圾失重率并不是温度的简单线性函数;不同种类垃圾的干燥效果受其原始含水率和自身结构的影响,干燥过程有显著差异;比表面积越小的垃圾越难干燥;干燥床与辐射窗的比例在1和1.2之间,干燥床的适宜倾角为20°~30°,辐射角系数0.5~0.6;实际干燥床上的垃圾受炉膛辐射、干燥风对流和垃圾自身局部燃烧等综合因素影响,可使垃圾表层的水分蒸发率达40%左右.

**关键词:** 垃圾干燥; 垃圾焚烧; 失重率; 辐射窗; 干燥床

**中图分类号:** TK123

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-8740(2008)06-0518-05

## Research on Drying Process of Grate-Fluidized MSW Incinerator

MENG Ai-hong<sup>1</sup>, LI Qing-hai<sup>1</sup>, ZHANG Yan-guo<sup>1</sup>,

CHEN Yun-xuan<sup>2</sup>, DANG Wen-da<sup>1</sup>, CHEN Mei-qian<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,

Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Mechanical, Electrical and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Drying process is simultaneously affected by the kind, thickness, shape, size and drying temperature of MSW. Experiments are conducted on MSW drying process. The results show that the higher the drying temperature is, the more rapidly MSW is dried. But the loss rate of MSW is not a simple linear function of temperature. Drying process varies for various MSW due to their different moisture and organization. The proportion of drying bed to radiation window in length is approximately 1—1.2, and proper obliquity of the drying bed is 20°—30°, and the angle factor is 0.5—0.6. With the combined effect of heat radiation, drying air, pyrolysis/combustion of partial MSW, moisture of surface MSW on the drying bed can be reduced by approximately 40%.

**Keywords:** MSW drying process; MSW incineration; loss rate of weight; radiation window; drying bed

由于我国垃圾成分复杂、形态多样、水分含量高、热值低,在选择焚烧设备时,需要充分考虑垃圾前处理和垃圾干燥.如果进行炉外预干燥,势必会增加垃圾处理的投资和成本,而高水分的垃圾不经干燥处理直接投入炉膛,也势必会影响锅炉的正常运行.针对这种情

况,清华大学开发了具有独立知识产权的炉排-循环流化床复合垃圾焚烧技术.该技术一个突出特征是具备干燥床,干燥床同时起到垃圾预干燥和形成垃圾进料通道的作用.通过炉内干燥后进入循环床焚烧,焚烧炉掺煤比约为14%.张衍国等<sup>[1]</sup>研究了该种焚烧炉垃圾

收稿日期: 2007-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776007).

作者简介: 蒙爱红(1976—),女,硕士,工程师.

通讯作者: 蒙爱红, mengah@tsinghua.edu.cn.

焚烧过程中污染物的形成和排放特性,并介绍了垃圾焚烧发电的工艺流程<sup>[2-3]</sup>,然而关于干燥床上的干燥过程还没有详尽的研究报道。

Yang 等人<sup>[4]</sup>利用固定层燃装置研究了垃圾在移动炉排上的干燥、热解、燃烧过程.陈勇<sup>[5]</sup>等人针对部分热带城市垃圾、热带地区农产品加工剩余物及热带植物进行了干燥热解试验研究,分析了水分的影响.张衍国<sup>[6]</sup>等利用马弗炉研究了干燥过程的影响因素,并分析了干燥过程的动力学参数.李清海<sup>[7]</sup>研究了水分对废弃物干燥和燃烧过程的影响。

笔者对部分垃圾组分进行了恒温条件下失重情况的试验研究,同时通过理论计算和分析,研究了炉排-循环流化床复合垃圾焚烧炉干燥床上的干燥过程。

### 1 炉排-循环流化床垃圾焚烧炉干燥过程分析

长春市生活垃圾水分很高,夏季甚至为“湿淋淋”的滴水状态,这种垃圾直接进入循环床密相区,将变成“液-固-气”三相燃烧,亦即垃圾表面的外部水分必须先蒸发完全,然后是垃圾内部的水分蒸发,以及固态垃圾热解气化和燃烧.在外部水分的蒸发过程中,水蒸气迅速占据垃圾周围的空间,影响氧气向垃圾表面的扩散,并因水分蒸发潜热直接降低密相区温度,从而导致垃圾在密相区焚烧状况的恶化和加煤量的增加,并导致焚烧过程初始污染排放升高.我国垃圾的平均含水率达到45%~55%,对循环床焚烧炉,上述情况是正常焚烧工况必然面对的问题,因此,为保证焚烧炉的正常运行,垃圾需经预干燥处理。

清华大学炉排-循环流化床复合垃圾焚烧炉如图1所示,此焚烧炉用于长春市生活垃圾综合处理电站,单炉规模为日处理垃圾260t。

在炉排-循环流化床垃圾焚烧炉中,干燥床与流化床密相区相连,垃圾从料斗中先进入干燥床,然后在干燥床内受热干燥的同时缓慢移动到密相区。

垃圾在干燥床内受到3种干燥作用:密相区约900℃高温床料辐射热的干燥;干燥床下总风量1%~10%的150℃干燥风的对流干燥;垃圾自身局部热解、燃烧产热的干燥.在这3种干燥作用下,气相干燥空间温度能达到200~500℃,但垃圾层内部则主要靠干燥风的对流作用,因此,大多数垃圾在干燥床上的干燥过程是在100~300℃下进行的.为获悉更为宽泛的垃圾干燥过程影响情况,本文研究了100~500℃间的垃圾干燥过程。

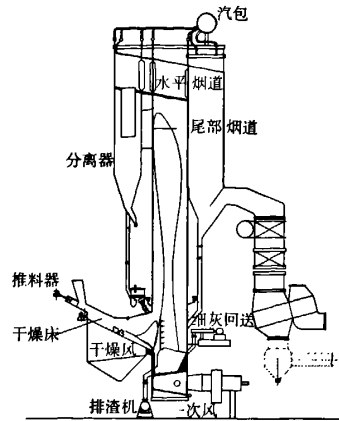


图1 复合炉排垃圾焚烧炉示意

垃圾种类、垃圾几何尺寸与形状、干燥床的几何结构(图2)、干燥温度、垃圾层厚度以及干燥风比例等诸多因素都会对垃圾干燥过程产生影响,这里重点研究干燥温度、垃圾种类、垃圾层厚度以及干燥床几何结构对垃圾干燥过程的影响。

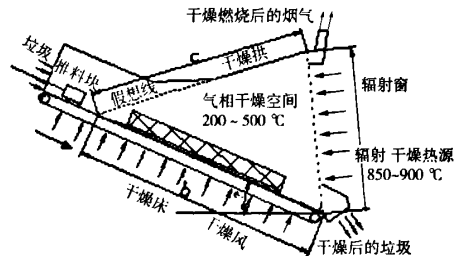


图2 干燥床干燥示意

### 2 干燥温度、垃圾种类及其层厚对垃圾干燥过程的影响

干燥试验的主要设备为马弗炉和电子天平,其中马弗炉型号为SX3-4-10,温度范围是室温至1100℃,控温误差±1℃。

#### 2.1 干燥温度对垃圾干燥过程的影响

使用马弗炉可以模拟没有强迫对流(如干燥床底部通入的干燥风)和忽略垃圾自身热解/燃烧产热所形成的干燥作用时的辐射干燥过程.试验时,以白菜梗和土豆为研究对象.对这两种高含水率的有机质垃圾而言,样品块内的传热传质过程基本是液相输运,在缓慢加热干燥过程中输运阻力很小,这时控制干燥过程的是炉腔对干燥对象的辐射传热量.试验时,为了尽可能防止热解,干燥温度设定在100~300℃.在150~220℃干燥时,温度低于200℃时,温度没有对干燥过

程产生明显的影响,但温度达到或高于 200 °C 时则明显地加速了干燥过程(图 3 和图 4)。在 200 ~ 500 °C 下桔子皮的干燥过程中,发现桔子皮在 300 °C 以上干燥要更迅速,可能是因为高温干燥伴随了挥发分的析出,从而加速了失重率(图 5)。图 3 ~ 图 5 的结果表明,纯粹辐射时,高温提供了高的辐射热量,提供了高的水分的蒸发和扩散能力,但干燥的失重率不是温度的线性函数。根据辐射四次方温差定律,炉腔对样品块的辐射热量

$$Q_r = \epsilon_s A (T^4 - T_m^4) \tag{1}$$

式中:  $\epsilon_s$  为系统黑度;  $A$  为面积,  $m^2$ ;  $T$  为炉腔温度(即干燥温度);  $T_m$  为样品块温度。当存在强迫对流、辐射和垃圾燃烧自加热等干燥作用时,其热量为

$$Q = Q_r + Q_c + Q_{com} \tag{2}$$

$$Q_c = h_c A (T - T_m) \tag{3}$$

式中:  $Q_{com}$  为燃烧热;  $Q_c$  为对流换热热量;  $h_c$  为对流换热系数。从式(1)、式(2)和式(3)可以看出,垃圾干燥过程失重率  $w$  (对应于总换热量) 是由多种因素决定的量。假定没有热解和燃烧,且换热过程是稳态的,即

$$w(\tau) = \frac{m_0 - m(\tau)}{m_0} = \frac{1}{r} \int_0^\tau dQ = \frac{\tau f(T) (T - T_m)}{r} \tag{4}$$

式中:  $\tau$  为时间;  $r$  为热量 - 质量的转换系数(近似为水的潜热);  $f(T)$  为折算换热系数,是干燥温度  $T$  的非线性函数。可见,失重率与干燥温度的关系不是简单的线性,准确的  $f(T)$  的形式需要进一步的试验研究和理论分析来给出。

### 2.2 垃圾种类对垃圾干燥过程的影响

不同垃圾组分,其干燥过程也是不一样的。对于生物物质垃圾组分,由于其水分含量和细胞结构不同,在同样的干燥温度下,干燥速率也不一样。图 6 显示了土豆、白菜梗、杨树木块、杨树叶在 200 °C 下的干燥曲线。土豆干燥最迅速;杨树叶干燥也非常迅速,但很难使其干燥得更彻底;杨树木块干燥最慢,且与树叶一样,难以干燥彻底,这与木块和树叶的木质素含量较高,细胞内部水分在 200 °C 时难以彻底释放有关。由于树叶比较薄,单位质量的受热强度大,水分容易蒸发,因此其干燥比较迅速,而杨树木块结构比较致密,不仅单位质量受热强度小,且细胞内部水分输运阻力较大,因而在 200 °C 更难以彻底干燥。

从试验条件看,由于土豆块和白菜梗尺寸不完全相同,土豆块的厚度略小于白菜梗,因此,上述试验结果仅作参考。实际干燥过程中,虽然土豆含水率通常比白菜梗小,但由于土豆通常呈不规则球状,比白菜梗厚,干燥时土豆水分的蒸发要相对困难些。

万方数据

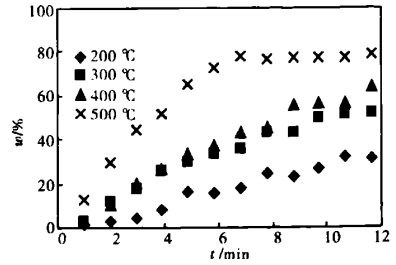


图 3 白菜梗在不同温度下的失重曲线

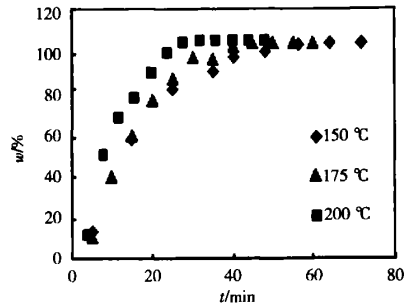


图 4 土豆在不同温度下的失重曲线

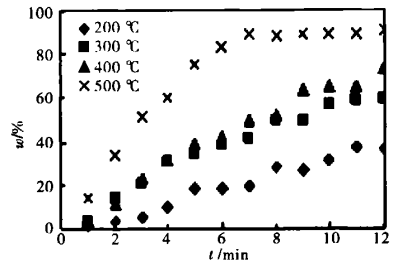


图 5 桔皮在不同温度下的失重曲线

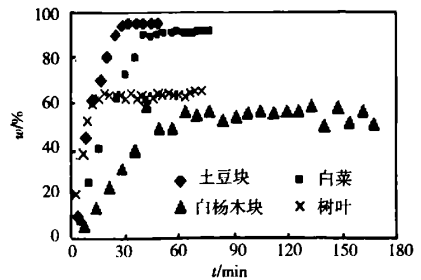


图 6 几种垃圾组分的干燥曲线(200 °C)

### 2.3 垃圾尺寸对干燥过程的影响

图 7 显示了 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm 不同厚度条件下桔皮的干燥情况,很显然,桔皮厚度越薄,干燥越迅速。

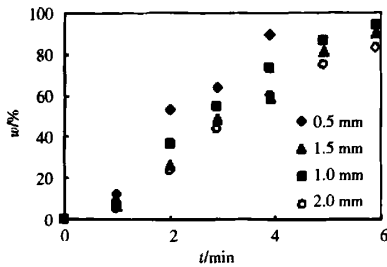


图7 不同桔皮厚度的干燥曲线

垃圾自身厚度(对应垃圾的比表面积)会影响干燥过程. 由于垃圾自身厚度的影响,垃圾单元中心温度要达到环境干燥温度,通常需要一段时间( $\geq 20$  min),因此,在干燥过程中,垃圾单元表面会比其内部更容易干燥,如果干燥时间较短,垃圾失水往往为表层失水. 当垃圾自身尺寸不一时,通常是比表面积越小的垃圾越难以干燥. 为了达到预定的干燥效果,在设计干燥装置时要充分考虑比表面积小的垃圾的干燥.

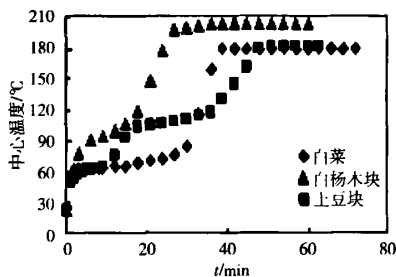


图8 恒温干燥下物质中心温度变化

在实际的焚烧炉干燥床内,垃圾层厚度对干燥过程的影响很大,料层越厚,干燥越不充分. 垃圾实际焚烧过程中,干燥床表层的垃圾易于干燥充分,深层的垃圾如果没有适合的翻动,则干燥效果很差. 为了消除厚度对干燥不均匀的影响,实际的干燥床设计成具有翻动功能的多级阶梯结构.

### 2.4 垃圾热解/燃烧产生的干燥作用

干燥床设计过程中,干燥风为  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,加上来自密封相区高温辐射产生的干燥作用,可以估算出干燥床干燥温度为  $200\text{ }^\circ\text{C} \sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ ,但由于垃圾给料均匀性不够,垃圾层厚度不均,在干燥床表面会出现局部热解/燃烧现象,干燥床空间温度有时 would 达到  $400\text{ }^\circ\text{C} \sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ (实测值).

在  $260\text{ t/d}$  炉排-循环流化床垃圾焚烧炉中,当干燥床上没有垃圾时,在干燥床中部的热电偶测得温度

约为  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ,而当燃烧垃圾时,测得的温度则为  $200\text{ }^\circ\text{C} \sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ ,从现场试验观察,当干燥床上发生了局部燃烧现象时,干燥床温度偏高. 局部燃烧主要是一些纸张和塑料发生了热解燃烧,正因为燃烧现象的存在,才使得干燥床内产生了较高温度. 因此,垃圾干燥过程中还要考虑来自垃圾自身部分热解/燃烧产生的干燥作用. 但对干燥过程自身而言,垃圾局部热解/燃烧对垃圾整体干燥的影响,主要还是体现在其产生的热量提高了垃圾干燥温度,一方面加速了水分的蒸发和扩散,另一方面挥发分析出加速了垃圾的失重速率.

### 3 干燥床几何参数对其接受辐射干燥的影响

干燥床几何参数也会对干燥过程产生一定的影响. 干燥室的切面几何形状是一个多边形,为了简化问题,将干燥拱延长出假想线到干燥床,则辐射窗、干燥床、干燥拱及其延长线构成了一个封闭三角形. 图2中辐射窗  $a$  对干燥床  $b$  辐射热释放比例可用角系数表述. 角系数的计算式为<sup>[8]</sup>

$$\varphi_{ab} = \frac{a + b - c}{2a}$$

干燥床与水平的倾角为  $\phi$ ,将不同倾角、不同  $b/a$  比例的角系数绘于图9中,从图9可以看出,在辐射窗高度固定不变的条件下,随着干燥床长度的增加,辐射窗投射到干燥床的辐射热比例增加,当倾角为  $0^\circ$  时,极限值是  $0.5$ .  $150\text{ t/d}$  和  $260\text{ t/d}$  垃圾焚烧炉的干燥床倾角均为  $26^\circ$ . 从图中可以看出倾角越大,角系数越大,但不能就此说明倾角越大对干燥效果越好. 因为角系数的概念是假设  $a, b, c$  三个面是等温灰体表面,事实上对于  $b$  表面,越远离辐射窗温度越低,干燥效果越差,而且干燥床理论上也不能无限加长,角度越大,  $b$  越小(即干燥床面积越小). 干燥床倾角超过  $50^\circ$  后,基本上接近了垃圾的休止角,使垃圾进料难以控制,理想

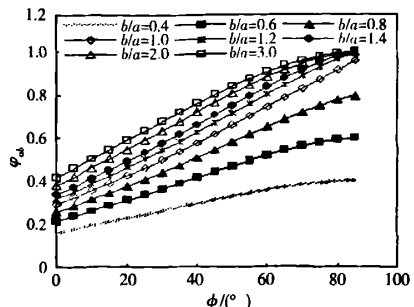


图9 辐射窗对干燥床的角系数

的倾角应该在  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  之间. 倾角太小会加重推料机构的机械负担, 且因积压导致垃圾堆积密度加大, 不利于干燥. 在设计时, 通过改变几何结构, 使角系数的值保持在  $0.5 \sim 0.6$  之间.

#### 4 干燥床干燥效果分析

260 t/d 垃圾焚烧炉的垃圾供给量约为  $3 \text{ kg/s}$ , 垃圾原始含水率约  $50\%$ , 垃圾料层厚度约  $0.35 \text{ m}$ , 垃圾在干燥床上的停留时间  $11.5 \text{ min}$ . 对干燥床几何参数确定的 260 t/d 炉排-循环流化床垃圾焚烧炉而言, 从辐射窗向干燥床辐射热功率  $640 \text{ kW}$ , 假设这些热量全部被利用蒸发垃圾中的水分, 则水分蒸发量为  $8.5\%$ . 干燥风为总空气量的  $10\%$ , 干燥风穿过垃圾料层, 温度从  $150^{\circ}\text{C}$  降低到  $100^{\circ}\text{C}$  左右, 干燥风可使垃圾水分降低  $0.8\%$ .

垃圾局部热解/燃烧过程产生的热量, 使干燥床温度在  $200 \sim 500^{\circ}\text{C}$  之间. 以垃圾干燥床温度约  $200^{\circ}\text{C}$  进行估算, 垃圾的失重率在  $50\% \sim 60\%$ , 这样对垃圾整体而言的水分蒸发量就约为原始质量的  $30\%$  (计算基准转换). 因此, 垃圾热解/燃烧、辐射、干燥风干燥等综合因素导致的垃圾表层的水分蒸发率可高达  $40\%$  左右, 亦即在垃圾进入密相区时, 表面垃圾的水分已经降低到  $10\%$  以下, 这将大大改善垃圾在循环床密相区的燃烧. 需要指出的是, 实际的焚烧炉中, 由于某些垃圾比表面积小、辐射热只能加热表明垃圾、垃圾层翻动不均匀以及局部的层燃燃烧受氧气扩散控制等原因, 垃圾层的干燥并不均匀, 垃圾总体水分有时仍明显高于  $10\%$ , 需要进一步完善.

#### 5 结 论

(1) 垃圾干燥过程中, 有辐射、对流和垃圾自身燃烧释热干燥等作用, 干燥温度越高, 失重率越大, 但垃圾失重率不是温度的简单线性函数.

(2) 不同种类的垃圾的干燥效果受其原始含水率和自身细胞结构的影响, 干燥过程有显著差异.

(3) 垃圾层厚度和垃圾自身厚度都会影响垃圾干燥过程. 比表面积越小的垃圾越难以干燥. 在实际设计干燥床时, 需要充分考虑不同种类和尺寸的垃圾干燥特性的不同, 采用多级阶梯结构可以实现良好的垃圾翻动效果, 有利于垃圾干燥.

(4) 根据角系数分析, 干燥床与辐射窗的比例在

$1.0 \sim 1.2$  之间比较合适, 干燥床的倾角  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  为宜, 辐射的角系数选择  $0.5 \sim 0.6$ .

(5) 干燥床上的垃圾受炉膛辐射、干燥风对流和垃圾自身局部燃烧等因素综合影响可使垃圾表层的水分蒸发率达  $40\%$  左右, 垃圾进入密相区时的水分大大降低.

#### 参考文献

- [1] 张衍国, 王哲明, 李清海, 等. 炉排流化床垃圾焚烧的热态试验研究[J]. 热力发电, 2005, 34(8): 19-24.  
Zhang Yanguo, Wang Zheming, Li Qinghai, et al. Hot test study on stoker circulating bed MSW incineration[J]. *Thermal Power Generation*, 2005, 34(8): 19-24 (in Chinese).
- [2] 张衍国, 李清海. 一种新颖的炉排-循环床垃圾焚烧发电系统[J]. 发电设备, 2005, 19(4): 205-207.  
Zhang Yanguo, Li Qinghai. A new type of fire grate-circulating bed power generation system for garbage incineration [J]. *Power Equipment*, 2005, 19(4): 205-207 (in Chinese).
- [3] Cheng Hefa, Zhang Yanguo, Meng Aihong, et al. Municipal solid waste fueled power generation in China: A case study of waste-to-energy in Changchun city[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(21): 7509-7515.
- [4] Yang Y B, Goh Y R, Zakaria R, et al. Mathematical modeling of MSW incineration on a traveling bed [J]. *Waste Management*, 2002, 22(4): 369-380.
- [5] 陈 勇, 马晓茜, 李海滨, 等. 固体废弃物能源利用 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.  
Chen Yong, Ma Xiaoxian, Li Haibin, et al. *Energy Utilization of Solid Waste* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002 (in Chinese).
- [6] Zhang Yanguo, Chen Meiqian, Meng Aihong, et al. Research on the drying and combustion process in combined grate-fluidized bed MSW incinerator [J]. *Science in China Series E-Technological Sciences*, 2007, 50(5): 636-643.
- [7] 李清海, 张衍国, 陈昌和, 等. 水分对垃圾焚烧燃烧影响的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 58-64.  
Li Qinghai, Zhang Yanguo, Chen Changhe, et al. Experimental study of moisture impact on municipal solid waste incineration [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(8): 58-64 (in Chinese).
- [8] 冯俊凯, 沈幼庭, 杨瑞昌. 锅炉原理及计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Feng Junkai, Shen Youting, Yang Ruichang. *Boiler Principle and Calculation* [M]. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese).