

堆肥系统的通风控制方式*

魏源送, 樊耀波, 王敏健, 王菊思(中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室, 北京 100085, E-mail: wpc1@mail.rcees.ac.cn)

摘要: 对堆肥系统的不同通风控制方式比较结果表明, 强制通风静态垛系统宜采用通风速率变化的时间-温度反馈正压通风控制方式(控制堆体中心最高温度为 60℃), 密闭式堆肥系统宜采用 O₂ 含量反馈的通风控制方式(保持堆料间 O₂ 体积分数为 15% ~ 20%)。在中国, 堆肥系统采用时间控制和时间-温度反馈控制的通风方式比较经济和适宜。

关键词: 堆肥系统, 通风控制方式, 强制通风静态垛, 密闭式堆肥系统。

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)02-0101-04

Control Modes of Aeration for Composting Systems*

Yuansong Wei, Yaobo Fan, Minjian Wang, Jusi Wang(SKLEAC, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China E-mail: wpc1@mail.rcees.ac.cn)

Abstract: Control modes of aeration in composting systems were compared. The control of positive aeration adopted the time-temperature feedback with integral variable flow rate is suitable for aerated static pile(ASP), in which the highest core temperature is controlled under 60℃; the container composting systems should adopt the control of aeration through O₂ feedback maintaining interstitial O₂ with 15% ~ 20% (V/V). The control of aeration adopted the timer or the time-temperature feedback is suitable and economic for Chinese composting plants according to Chinese condition.

Keywords: composting system, control modes of aeration, aerated static pile, container composting system.

由于生态、环境和经济的原因, 堆肥技术在固体废弃物处理中的作用越来越大^[1]。影响堆肥过程的主要操作参数有通风、温度和含水率^[2]。通风的好坏直接影响到堆肥产品的好坏, 所以如何控制通风就显得非常重要。

1 通风方式

在堆肥过程中, 通风有供氧、散热和去除水分作用^[3-5]。通风控制在很大程度上取决于空气的供给方式: ①翻堆(自然通风); ②强制通风, 有正压鼓风、负压抽风和由正压鼓风与负压抽风组成的混合通风^[2]; ③翻堆与强制通风的结合方式^[2]; ④被动通风。因热气上升引起的“烟囱效应”使空气通过堆体的方式称为被动通风方式, 应用此通风方式的堆肥系统称为被动通风条垛系统(Passively Aerated Windrow), 如图 1, 穿孔管的孔朝上。它不需要翻堆和强制通风, 所以同条垛和强制通风静态垛系统相比, 它大大地降低了投资和运行费用^[6-9]。自然通风和被动通风常用于条垛系统(Windrow), 强制通风静态垛系统(Aerated Static Pile, ASP)和反应器系统(In-Vessel)均采用强制通风。在不同的堆肥阶段, 条垛系统翻堆的频率不同, 需根据具体情况而定, 通常采用温度作为是否翻堆的标志(堆体中心温度为 55 或 60℃)。如用稻草、谷壳、干草、干树叶、

木片或锯屑作调整剂且与污泥形成的混合物的含水率约为 60% 时, 堆体建好后第 3d 翻堆, 然后每隔一天翻堆一次直至第 4 次, 从第 4 次翻堆后, 每隔 4 或 5d 翻堆一次。如果用废纸作调理剂, 只要污泥混合物含水率不超过 50%, 便可如上述频率进行翻堆。见图 2^[10]。

不同的通风方式对堆肥过程有不同的影响。采用自然通风(翻堆)、被动通风和强制通风对猪粪(含水率高达 76%)堆肥研究表明^[11]: 在被动通风和强制通风下, 堆温下降较快, 但它们能更有效地向堆体供氧; 而在被动通风和自然通风方式下, 堆体中心温度 > 55℃ 的时间较长。同其它通风方式相比, 强制通风易于操作和控制, 并且是为堆料生物降解提供氧气的最有效方法, 然而它对通风管附近的堆料有明显的冷却效应。

2 通风控制方式及分类

所需的通风速率、风机选型和通风管道取决于如何控制风机, 风机可连续运行或间歇运行^[9]。在风机间歇运行的情况下, 控制方式可分为: ①时间控制, 通风速率恒定; ②时间控制, 通风速率变化; ③温度反馈控

* 国家“九五”重点科技攻关项目(The National Key Science and Technology Project during the Ninth Five-year Plan Period, numbered: 96-909-01-05)
作者简介: 魏源送(1969~), 男, 江西新建, 博士研究生。
收稿日期: 1999-10-20

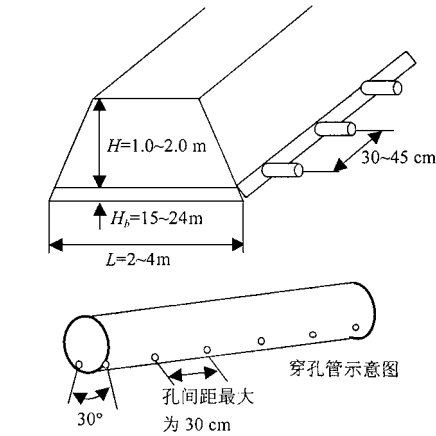


图 1 用于畜禽粪便堆肥的被动式通风条垛

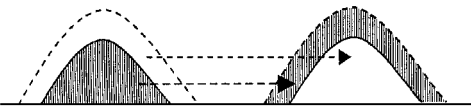


图 2 翻堆操作示意图

制; ④通风速率变化的时间-温度反馈控制; ⑤微电脑控制系统; ⑥ O_2 或 CO_2 含量反馈控制^[9, 12~16]. 根据控制指标的分类, 通风控制有温度反馈控制、 O_2 含量反馈控制和由温度与 O_2 含量反馈控制组成的混合控制. 在密闭的堆肥系统中, 排气可以循环使用, 采用这种方式, 可以使进、出堆体的空气温差减小(控制进、出气的最大温差为 $5\sim 7^\circ C$), 从而更有利于控制堆肥过程^[2]. 强制通风静态垛系统的温度传感器位置见图 3.

根据 O_2 含量和温度不同的控制方式, Feinstein 等^[17]从理论上论述了 16 种可能的通风控制方式(包括

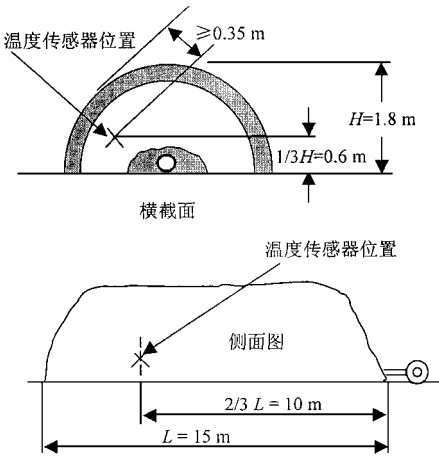


图 3 一个强制通风静态垛的温度传感器位置图

已见报道的 10 种通风控制方式). O_2 含量和温度各自可以在以下情况下调整: ①缺省值: 缺乏过程设计和控制, 堆肥过程取决于堆体自加热的自然特性; ②初始值: 在堆肥过程, 很少有或几乎没有干预. 在堆肥过程的起始阶段, 设定初始值, 从而影响 O_2 含量和温度在堆肥过程的变化; ③人工反馈: 操作人员定期收集、分析 O_2 含量或记录温度, 从而调整风机, 使它们达到设定值; ④自动反馈: 从 O_2 和温度传感器得到的连续不断信号自动调整空气输送, 从而使它们达到设定值.

任何堆肥通风控制系统的最终目标是^[15]: ①在最佳的生物降解速率下提供高质量的堆肥; ②保证堆肥产品达到充分无害化的要求, 降低其使用时的危害性. 对于强制通风静态垛堆肥系统, 表 1 比较了不同控制方式下的影响因素和结果^[15]. 综合评定, 通风速率变化的时间-温度反馈控制优于其它控制方式.

表 1 堆肥控制系统的影响因素及结果

控制方式	维护性	控制阶段		费用/£	控制堆体数
		高温	其它		
固定通风速率的时间控制	极好	一般	差	20	≥ 1
通风速率变化的时间控制	极好	一般	一般	50	≥ 1
温度反馈控制	一般	极好	差	250	1
通风速率变化的时间-温度反馈控制	一般	好	好	300	1
微电脑控制	差	极好	极好	5, 000	≥ 25

3 不同强制通风控制方式及其特点

在强制通风静态垛堆肥系统中, 典型的通风控制方式有 Beltsville、Rutgers、Leeds 和混合通风控制方式^[1, 13~18], 它们的逻辑图分别见图 4^[13~15]、图 5^[20]和图 6^[1]. Beltsville 控制方式属于时间控制; Rutgers、Leeds 和混合通风控制方式都属于时间-温度反馈控制; Leeds 控制系统是一种在一个堆体中采用多个温度传感器的微机系统, 它以微机与堆体温度和 O_2 含量的相

互关系为中心, 使堆体在堆肥各阶段达到最佳的温度和 O_2 含量, 该方式又分为全控制系统(Full Control System)和温度控制系统(Temperature Control System). 在密闭的反应器堆肥系统中, 典型的通风控制方式是 O_2 含量反馈控制方式^[18]. Beltsville、Rutgers 和 O_2 含量反馈控制方式的特点见表 2^[13~15, 19]. 通过对堆肥时间、总固体降解率、挥发性固体降解率和水分去除率的比较, Rutgers 方式优于 Beltsville 方式, 正压鼓风

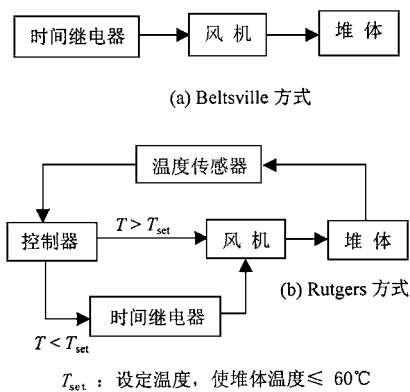
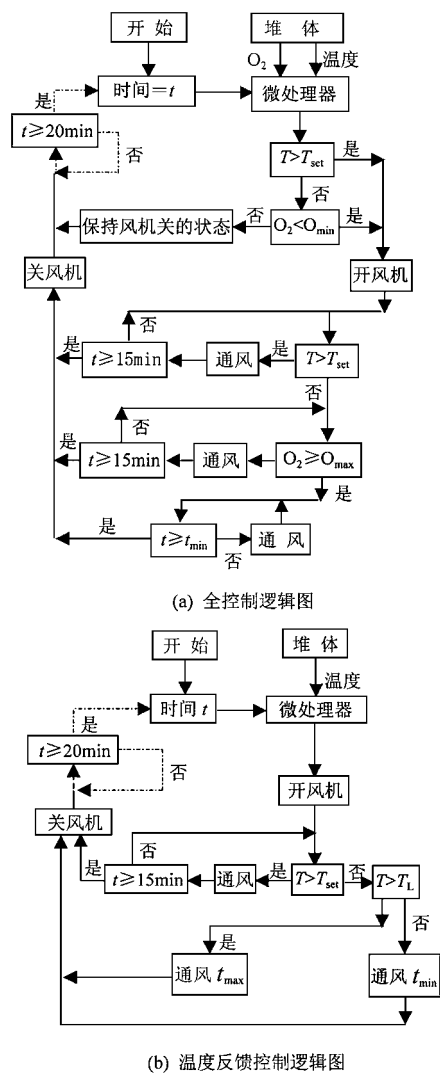


图 4 Rutgers 和 Beltsville 控制方式逻辑图

优于负压抽风^[13-14]。在 Leeds 控制方式中, 全控制系统采用温度和 O_2 含量作为控制参数, 使有机物降解速率在各个阶段最大。因其复杂性, 目前它还只是一个理想系统。Leeds 控制方式通常采用多个温度传感器的温度控制系统, 与 Rutgers 控制方式的不同之处在于后者只用一个温度传感器。Leeds 控制方式的优点: ①堆肥操作集中控制, 可同时控制多个堆体; ②所有堆体在同一条件下堆肥, 堆肥物料代替堆肥周期成为优先考虑因素; ③可根据通风期间的温度和 O_2 含量判断通风系统的效率和堆体降解情况。与 Rutgers、Leeds 方式不同, 混合通风控制方式(由正压鼓风和负压抽风组成且以时间-温度反馈进行控制)的特点是: 利用微机监测堆体顶部、中心和底部的温度, 当堆体中心温度低于设定温度(55°C)时, 风机正压鼓风; 当堆体中心温度大于 55°C , 微机便比较堆体顶部和底部的温度, 如果堆体顶部温度大于堆体底部温度, 风机负压抽风; 反之, 风机正压鼓风。采用强制通风静态垛进行城市固体废弃物的堆肥化研究表明, 混合通风控制方式同经典的正压通风控制方式(Rutgers 方式)相比, 前者具有如下优点: 堆体高温区分布更加均匀; 堆料水分损失更少; 无害化效果更好; 两者堆肥的腐熟度类似^[1], 但前者的投资费用高, 操作也很复杂。

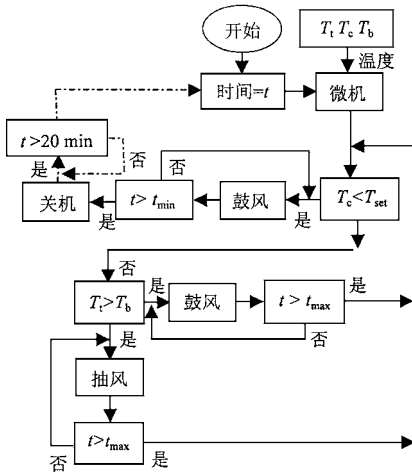
表 2 不同通风控制方式的比较

项目	Beltsville 控制方式	Rutgers 控制方式	O_2 含量控制方式
堆肥装置	强制通风静态垛	强制通风静态垛	密闭式反应器
过程控制目标	维持 O_2 体积分数 5% ~ 15%	控制最高温度为 60°C	保持 O_2 体积分数 15% ~ 20%
堆肥时间	长	短	中
风机控制	整个过程定时控制	开始时定时控制, 随后温度控制	O_2 含量控制
能耗	一般, 5.48W/吨湿污泥	须满足散热时的最高通风需求	与 O_2 需求成比例
风机工作方式	负压抽风	正压鼓风	正压鼓风
控制方式结果	堆料氧化; 有机物分解速率慢; 温度最高, 可达到抑制微生物的湿度(80°C), 产热和蒸发速率低; 干燥趋势不明显; 灭菌效果好。	堆料氧化; 有机物分解速率快; 产热和蒸发速率高; 如不加预防, 干燥可达到抑制微生物活动的程度; 灭菌效果好。	堆料氧化; 有机物分解速率快, 干燥趋势正常, 灭菌效果好。



T_L : 上次控制温度(从上一轮的 20 min 周期开始);
 T_{set} : 所需控制的温度(55°C); t_{max} : 设定的最大通风时间;
 t_{min} : 设定的最小通风时间(2 min);
 O_{min} : 最小需氧含量; O_{max} : 最大需氧含量。

图 5 Leeds 控制方式逻辑图^[19]



t : 实际时间; $t_{\min}$: 最小通风时间(20 min); $t_{\max}$: 最大通风时间(50 min), 通风周期为 20 min; T_t 、 T_c 、 T_b : 堆体顶部、中心和底部的温度; T_{set} : 设定温度(55℃)

图 6 混合通风时间-温度反馈控制逻辑图^[1]

4 小结

对于强制通风静态堆肥系统, 堆肥工厂常用的是时间控制和时间-温度反馈控制 2 种方式。对于密闭的反应器堆肥系统, 堆肥工厂常采用 O_2 含量反馈控制方式。时间控制的目的是提供足够的氧并部分控制温度; 时间-温度反馈控制的目的是试图保持最佳的堆体温度。从管理的角度来看, 时间控制优于时间-温度反馈控制; 与时间控制系统相比, 时间-温度反馈控制系统需要更大的通风速率, 更大的风机和更复杂、昂贵的温度控制系统^[9]。根据对管理、设备投资及运行费用和堆肥腐熟度的综合考虑, 强制通风静态堆肥系统宜采用通风速率变化的时间-温度反馈正压通风控制方式(控制堆体中心最高温度为 60℃); 密闭式反应器堆肥系统宜采用 O_2 含量反馈的通风控制方式(保持堆料间 O_2 体积分数为 15% ~ 20%)。而根据中国国情, 堆肥系统采用时间控制和时间-温度反馈控制的通风方式比较经济适宜。

参考文献

- 1 Sesay A A, Lasaridi K E and Stentiford E I. Aerated Static Pile Composting of Municipal Solid Waste (MSW): A Comparison of Positive Pressure Aeration with Hybrid Positive and Negative Aeration. *Waste Management Research*, 1998, **16**(3): 264~ 272.
- 2 Stentiford E I. Composting Control: Principles and Practice. In: *The Science of Composting*, ed. by M. de Bertolli, Paolo Sequi, Bert Lemmes and Tiziano Papi. Blackie Academic & Professional, 1996, 49~ 59.
- 3 Haug R T. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lew is Publishers: 1993.

- 4 Miller F C, MacGregor S T, Psarianos K M et al. Direction of Ventilation in Composting Wastewater Sludge. *Journal WPCF*, 1982, **54**(1): 111~ 113.
- 5 Kuchenrither R D, Martin W J, Smith D G and William S D W. Design and Operation of an Aerated Windrow Composting Facility. *Journal WPCF*, 1985, **57**(3): 213~ 219.
- 6 Lynch N J and Cherry R S. Winter Composting Using Passively Aerated Windrows. *Compost Science & Utilization*, 1996, **4**: 44~ 52.
- 7 Lynch N J and Cherry R S. Design of Passively Aerated Compost Piles: Vertical Air Velocities between the Pipes. *Biotechnology Progress*, 1996, **12**(5): 624~ 629.
- 8 Lynch N J, Gering K L and Cherry R S. Composting as A Reactor Design Problem: Modeling and Experiment. *Annals New York Academy of Sciences*, 1997, **829**: 290~ 301.
- 9 Rynk R. *On Farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, 1992.
- 10 Diaz L F, Savage G M, Eggerth L L and Golueke C G. *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*. Lew is Publishers, 1993, 121~ 174.
- 11 Fernands L. and Sartaj M. Comparative Study of Static Pile Composting Using Natural, Forced and Passive Aeration Methods. *Compost Science & Utilization*, 1997, **5**(4): 65~ 77.
- 12 Benedict A H, Epstein E and English J N. Municipal Sludge Composting Technology Evaluation. *Journal WPCF*, 1986, **58**(4): 279~ 289.
- 13 Finstein M S, Miller F C, Strom P F, MacGregor S T and Psarianos K M. Composting Ecosystem Management for Waste Treatment. *Bio/Technology*, 1983, June: 347~ 353.
- 14 Miller F C and Finstein M S. Materials Balance in the Composting of Wastewater Sludge as Affected by Process Control Strategy. *Journal WPCF*, 1985, **57**(2): 122~ 127.
- 15 Pereira-Neto J T, Stentiford E I and Mara D D. Low Cost Controlled Composting of Refuse and Sewage Sludge. *Wat, Sci Tech.*, 1987, **19**: 839~ 845.
- 16 Haug R T. *Composting Process Design Criteria. Part III—Aeration*. *BioCycle*, 1986, Oct: 53~ 56.
- 17 Finstein M S, Hogan J A. Integration of Composting Process Microbiology, Facility Structure and Decision-Making. In: *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*, ed. by Hoitink H A J and H M Keener. Renaissance Publications: 1993, 1~ 23.
- 18 MacGregor S T, Miller F C, Psarianos K M and Finstein M S. Composting Process Control Based on Interaction between Microbial Heat Output and Temperature. *Applied and Environmental Microbiology*, 1981, June, 1321~ 1330.
- 19 de Bertoldi M, Rutti A, Cotterio B and Civilini M. Composting Management: A New Process Control through O_2 Feedback. *Waste Management & Research*, 1988, **6**: 253~ 259.
- 20 Leton T G and Stentiford E I. Control of Aeration in Static Pile Composting. *Waste Management & Research*, 1990, **8**: 299~ 306.