

温度对堆肥孔隙比 渗透性以及可压缩性的影响

常志州¹, A. H. M. Veeken²

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究中心, 江苏 南京 210014; 2. Sub - Department Environmental Technology Wageningen University The Netherlands)

摘要: 以猪粪及庭园垃圾为材料, 在一种可测定堆肥物理结构参数的装置上, 研究了温度对堆肥物料可压缩比、孔隙比以及渗透性的影响。结果表明, 温度由 20 °C 升到 60 °C, 堆肥物料弹性模数(β)由 3.08×10^{-4} 上升到 $8.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, 因而影响堆体的可压缩比、孔隙比以及渗透性等物理结构参数, 这种影响随堆肥物料的不同而异, 因此, 在进行堆肥高度设计时, 应充分考虑温度可能对堆体物理结构参数的影响, 使堆肥设计更科学合理。

关键词: 堆肥; 温度; 可压缩比; 孔隙比; 渗透性

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 2043(2004)04 - 0791 - 05

Effects of Temperature on the Structure of a Compost Bed - Compress, Porosity and Permeability

CHANG Zhi-zhou¹, A. H. M. Veeken²

(1. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, The Center of Agricultural Resources and Environment, Nanjing 210014, China; 2. Sub - Department Environmental Technology, Wageningen University, The Netherlands)

Abstract: An experiment was carried out to study the effects of temperature on the structure of a compost bed, including compress, porosity and permeability, which were measured with an experimental apparatus. Green waste and pig manure with different ratios were used as the feedstock of compost. The results indicated that high temperature made materials more plastic and susceptible to compaction. The permeability decreased with temperature increase since the change of the particle shape factors. When temperature increased from 20 °C to 60 °C, the modulus of elasticity rose from 3.08×10^{-4} to $8.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, which influenced the compress, porosity and permeability of compost bed and these effects varied with the ratio of green waste to pig manure. It was suggested that the influence of the temperature on the physical structure of feedstock must be considered in determining a maximum pile height for higher quality and effective compost.

Keywords: compost; temperature; compress; porosity; permeability

为获得质量稳定、品质好以及经济有效的堆肥产品, 各国环境及农学专家就如何为微生物活动与生物反应创造各种优化条件进行了深入系统研究, 并发表了大量的研究报告^[3, 6, 9], 这其中除有关堆肥物料的化学组成, 如 C/N 比、pH 值、可溶性碳、水分以及矿物元素等, 微生物本身种群特征、数量等外, 有关堆肥物理性状对堆肥中微生物活动的影响也给予较高的关注。

堆肥的物理结构, 如可压缩比、孔隙比以及渗透

性 (Compress、Porosity、Permeability, 简称 CPP) 等影响气体、热以及水分等在堆体中的扩散、交换、对流等过程, 进而影响堆体中氧浓度、温度、水分等变化。Haug (1993) 等^[8] 人经大量试验, 指出堆肥中孔隙比 (Free Air Space) 应大于 20%, 才能获得较好的堆肥效果。此外, 物料的直径大小、形状又直接影响堆料的孔隙比、渗透性以及可压缩比^[7], 影响存在强烈微生物活动的水固界面大小^[8]。

因此, 研究影响堆肥的 CPP 因素以及它们的变化过程, 对于获得堆肥成功设计至关重要。

水分含量对堆肥的 CPP 影响研究表明, 高水分含量可能使物料变得更富有弹性, 易于压缩, 且又由于自身重量增加产生更大沉降压力, 从而减少堆

收稿日期: 2003 - 11 - 14

基金项目: 国家留学基金及江苏省“六大人才”高峰项目资助

作者简介: 常志州 (1957—), 男, 研究员, 主要从事农业固体废物处理与资源化利用的研究。

肥中的孔隙比^[3]。

堆肥的高度影响容积重与孔隙大小、比例的分布^[3],不同物料,如秸秆、树叶及木屑等也影响堆肥的CPP,不同物料以及物料在垂直高度上对堆肥的容积重与孔隙大小、比例分布可用土壤沉降公式 $h(\sigma) = h_{\infty} + \Delta h \times \exp(-\beta \times \sigma)$ 描述^[4,11]。

堆肥中由于微生物活动,使堆体中温度一般会升高并维持着 45 ℃ 以上,温度升高是否影响堆肥物料的弹性以及颗粒形状,进而影响堆肥的 CPP,未见报道。本试验用猪粪与庭园垃圾为材料,研究不同温度对堆肥结构 CPP 的影响,为更科学地进行堆肥设计提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

猪粪来自荷兰一有机猪养殖场,庭园垃圾(树枝、树干的粗粉碎物,长度 5~15 cm)来自垃圾处理场。猪粪 TS、VS 分别为 34.3% (湿基,下同)、60.5% (TS 基,下同),庭园垃圾的 TS、VS 分别为 83.6%、81.3%。试验前按猪粪与庭园垃圾比例分别为 10:0、9:1、8:2 及 6:4 混合,在设定的 20 ℃、44 ℃、60 ℃ 温度条件下,将混合好的物料在培养箱中预热 10 h。然后放入试验装置的样品仓中。TS、VS 测定参照 APHA (1992)^[11]。

1.2 方 法

1.2.1 试验装置

试验装置为荷兰瓦格宁大学实验室研制,专用于测定堆肥孔隙比、可压缩比以及渗透性。装置主要由压力仓、样品仓、两个压力仪、一个流量压力仪以及一个加热部件组成,两个压力仪一个记录压力仓与样品仓空气压力,另一个记录对物料施加的压力。流量压力仪记录当在样品仓底部通入一定流速空气时,样品仓上、下的空气压力。在样品仓底部有一个带孔不锈钢隔板,当物料放入样品仓时可防止物料进入底部通气管。在样品仓物料上部也有一个带孔不锈钢隔板,通过该隔板可以使向物料加压的压力均匀传输到整个样品仓的横截面。样品仓由一个盖子密封,在盖子上方有一齿杆,通过旋转齿杆,可以对样品仓内物料加压。加压的目的是测定物料在不同密度(鲜容积重)条件下,堆肥的孔隙比、渗透性以及可压缩比变化,试验装置见图 1。试验中设置 5 个不同的压力(以齿杆的高度表示),分别为 0、50、100、150、180 mm。加热装置能保证试验在所设定的温度下进行。

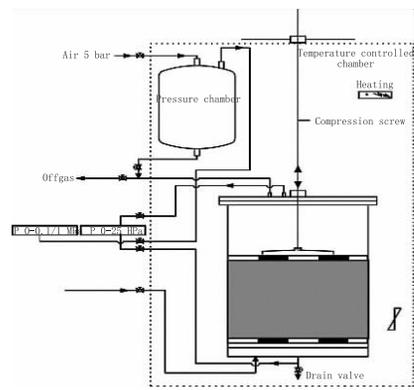


图 1 孔隙比、渗透性及可压缩比测定装置

Figure 1 The apparatus for measuring compaction, porosity and permeability of compost

1.2.2 堆肥的 CPP 测定与计算

1.2.2.1 孔隙比测定

用气体计量仪,即将一已知体积(V_B)与压力(P_i)的容器与样品仓(V_A)连接,再测定平衡后的气体压力(P_f),依下列公式计算样品仓中孔隙比(ε):

$$V_B \times P_i = (V_A + V_B - V_S) \times P_f \quad (1)$$

式中: V_S 是样品仓中物料的固体体积;

$$\varepsilon = V_{\text{air}} / V_A \quad (2)$$

$$V_{\text{air}} = V_A - V_S \quad (3)$$

由(1)式推导得: $V_S = V_A - V_B \times (P_i / P_f - 1)$,代入(3)式得 $V_{\text{air}} = V_B \times (P_i / P_f - 1)$,再代入(2)式得:

$$\varepsilon = V_B \times (P_i / P_f - 1) / V_A \quad (4)$$

上式中: V_A 、 V_B 为已知, P_i 、 P_f 通过测定,即可计算孔隙比。

堆肥的物料其孔隙比也可通过以下公式理论上计算得到:

$$\varepsilon = 1 - \rho_{\text{wb}}(1 - \text{TS}) / \rho_w + \text{TS} \times \text{VS} / \rho_{\text{org}} + \text{TS} \times (1 - \text{VS}) / \rho_{\text{ash}} \quad (5)$$

上式中: ρ_{wb} 为物料容重, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 鲜基; ρ_w 为水的比重, $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_{ash} 为灰分的比重, $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_{org} 为有机物的比重, $1\,400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.2.2.2 可压缩比测定

在图 1 装置中,旋转齿杆对样品仓的物料施压,由于堆肥中有机物料的半塑性特征,在对物料施压中,物料将吸收部分压力,Agnew and Leonard(2002)^[2]认为在加压后,需要 1~3 h 平衡时间,Veecken(2002)^[10]用上述装置试验,平衡 25~45 min 即可,本试验在加压 30 min 后,读取压力值,在施加相同压力(齿杆高度相同)下,压值越大,可压缩比越小。

1.2.2.3 渗透性的测定与计算

这里的渗透性主要是指气体在堆体中的流动速率,当进、出气两端气流产生的压力越大,说明气体在堆体中渗透性越差,反之则堆体的气体渗透性好。在堆肥系统中表观气体的流速变化相差几个数量级,在自然堆肥系统中,气体在垂直方向的流速非常低。Fogiel et al(1999)^[51]报道,流速为 0.000 2~0.001 1 m·s⁻¹。Veeken et al(2002)^[10]报道,在自然静态堆肥中空气流速为:0.002~0.018 m·s⁻¹,而在强化堆肥系统中,空气流速达 0.008~0.02 m·s⁻¹。在本试验中,以 5 个不同表观空气流速,分别为 0.001、0.002、0.005、0.01、0.015 m·s⁻¹测定在样品仓上、下形成的压力差,由下列公式计算堆体的渗透性。

$$dp/dx = \mu / \kappa \times V \quad (6)$$

式中:dp/dx 为样品仓上、下形成的压力差;μ 为气体粘滞系数,Pa·m⁻¹;κ 为气体渗透,m²;V 为表观气体流速,m·s⁻¹。

2 结果

2.1 温度对物料容重的影响

由于堆肥与土壤有相似的性质,许多研究^[3, 11]引用土壤沉降数学模型描述堆肥的沉降模式:

$$h(\sigma) = h_{\infty} + \Delta h \times \exp(-\beta \times \sigma) \quad (7)$$

式中:h(σ) 代表在施加 σ 压力下,堆肥具有无量纲高

度;h_∞代表当 σ 无穷大时,最大的高度;Δh 为最大可压缩高度;β 代表物料的弹性模数(可压缩比/m²·N⁻¹)。

堆肥无量纲高度与堆肥物料容重(ρ)有关,随着容重增加,所产生的沉降压力增加,堆肥中孔隙比变小,堆体高度减低。当容重达到最大时,堆肥中的孔隙等于零。其堆肥容重与沉降压力之间的关系可以下列表达式表示:

$$\rho(\sigma) = \rho_{\max} - (\rho_{\max} - \rho_i) \times \exp(-\beta \times \sigma) \quad (8)$$

式中:ρ(σ)表示在施加 σ 压力下,堆中横截面上的容重;ρ_{max} 为 σ 无穷大时的容重;ρ_i 在开始时即零压力下的容重。

把试验中施加在样品仓上的压力(σ)看作物料沉降产生的压力,堆肥高度越高对下面产生的沉降力越大,将高度与容重作图,可见,堆肥容重随高度增加而减少;不同的温度,相同堆肥高度,温度越高,容重越大;堆肥中猪粪与庭园垃圾比例不同,温度对高度与容重关系影响有所不同。当堆肥中庭园垃圾比例为 0~20% 时,温度对高度与容重关系影响趋势基本相同;而当随庭园垃圾比例增加到 40% 时,温度对高度与容重关系影响表现出不同趋势,不仅随高度不同容重值影响变小,且当高度达最大时,不同温度下容重仍然不同,见图 2。

2.2 温度对堆肥孔隙比的影响

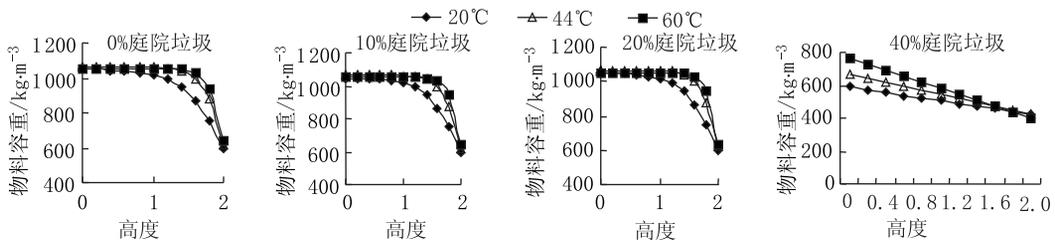


图 2 温度对物料容重的影响

Figure 2 Effect of temperature on the density of feedstock

测定不同压力(σ)下,堆肥的孔隙比,将压力看作高度,用高度对孔隙比作图。相同的高度,相同的物料,温度升高则堆肥孔隙比变小,不同猪粪与庭园垃圾比例,温度对高度与孔隙比关系影响不同,见图 3。

分析温度对堆肥孔隙比以及容重与高度之间关系的原因,从表达式 8 可知,堆肥在不同高度上的容重与堆肥物料的弹性模数(β)有关,用表达式 8 中测定的数据计算不同温度、不同猪粪与庭园垃圾比例下弹性模数(β),将弹性模数(β)的倒数(E=1/β),即:堆肥物料抵抗变形的阻力(E),可见,温度影响了物料的弹性模数(即:可压缩比),当温度升高,物料抵抗

变形的阻力(E)变小,物料变得更易压缩,因此,当堆肥温度升高后,影响了物料的弹性模数,使得堆肥孔隙比变小、容重增加,见表 1。在堆肥设计中,当用孔表 1 不同温度、庭园垃圾比例下,物料抵抗变形的阻力(E)(J·kg⁻¹)

Table 1 Resistance against deformation (E) at different temperatures and ratios of swine manure to green waste (J·kg⁻¹)

| 庭园垃圾 / % | 20 °C | 44 °C | 60 °C |
|----------|--------|--------|--------|
| 0 | 3245 | 1 716 | 1 204 |
| 10 | 8 878 | 5 816 | 5 362 |
| 20 | 21 928 | 9 967 | 10 346 |
| 40 | 43 531 | 26 682 | 16 613 |

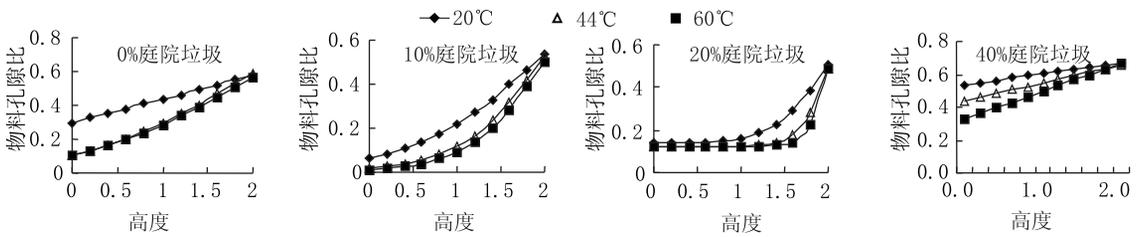


图3 温度对物料孔隙比的影响

Figure 3 Effect of temperature on the porosity of feedstock

隙比作为参数设计量,应考虑温度升高给堆肥孔隙比带来的影响。而当堆肥材料中庭院垃圾比例增加时,物料抵抗变形的阻力(E)也增加,即:温度升高对堆肥堆体物理结构影响较小。

2.3 温度对堆肥中气体渗透性的影响

由图4表明,当庭院垃圾在堆肥材料中比例小于20%时,温度升高对堆肥中气体的渗透性影响不大;而当庭院垃圾在堆肥中比例增加了20%以上,温度对堆肥中气体渗透性影响加大。温度越高,气体的渗

透率越低,其原因除上面讨论的温度升高,使堆肥中孔隙比减少、容重增加而影响气体渗透外,从 Ergum 公式中可以反映出,堆肥中气体渗透(κ)还受到物料颗粒大小(d_p)、颗粒形状因子(K ,它与物料颗粒形状颗粒表面特征以及颗粒大小分布有关)的影响^[7]。

$$\kappa = d_p^2 \times \varepsilon^3 / 150K(1 - \varepsilon)^2 \quad (9)$$

不难理解,温度升高,改变了颗粒表面特征,进而影响了物料的颗粒形状因子,最终使堆体的气体渗透性发生了变化。

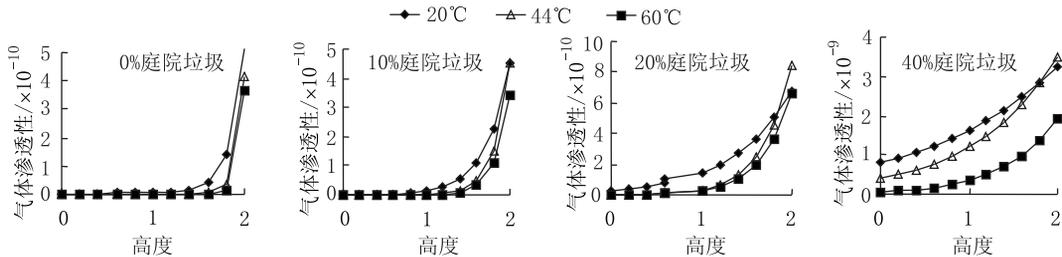


图4 温度对堆体气体渗透性的影响

Figure 4 Effect of temperature on the permeability of feedstock

3 讨论与结论

堆肥技术作为一种固体有机废弃物处理技术,近年来得到了广泛应用^[6]。堆肥按其通气方式不同分为强制通风与自然静态堆肥2种堆肥系统,但其堆肥设计的基本要素是相同的,即维持良好的通风条件(有氧),以减少因厌氧而产生恶臭气体;维持堆体温度处于适宜范围内,以促进快速分解;维持稳定的有机原料,以避免潜在的植生毒素、病原菌及传病媒介繁殖等^[6]。

堆肥中气体流动是保证空气(氧气)交换、 CO_2 与水分散发以及通过热交换维持温度稳定的重要因素^[8],是堆肥成功与否的关键。而堆肥中孔隙度(Free Air Space)与气体渗透性直接影响着堆肥气体流动。孔隙度与渗透性因堆肥所用物料的比重、颗粒大小、形状等不同而不同。堆肥由于其自重产生的沉降,影响堆

体的孔隙度与渗透性,堆体高度作为影响沉降力大小主要因素之一,是堆肥设计重要参数。

堆肥温度的升高,会影响堆肥物料的弹性模数以及物料颗粒表面特征,因而会影响堆体的物理结构,即:可压缩比、孔隙比以及渗透性,这种影响随不同堆肥物料而不同。因此,在进行堆肥高度设计时,应充分考虑温度对堆体可压缩比、孔隙比以及渗透性的影响,使堆肥设计更科学合理。

参考文献:

- [1] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18thed., part 2540D. American public health association, Washington DC. 1992.
- [2] Agnew J M and J J Leonard. 2002 Using a modified pycnometer to determine free air space and bulk density of compost mixtures while simulating compress loading[A]. In: 2002 International symposium on composting and compost Utilization, MichelFC, R Rynk andH A J Hoitink (eds)J G Press, Emmaus, P. A. 2002.

- [3] Keshav Das and Harold M Keener. Moisture effect on compaction and permeability in compost[J]. *J of Envi Eng*, 1997, March: 275 – 281.
- [4] Daryl McCartney and Hongtu Chen. Using a biocell to measure effect of compressive settlement on free air space and microbial activity in windrow composting[J]. *Compost Science & Utilization*, 2001, 9(4): 285 – 302.
- [5] Fogiel A C, R Dvon Bermuth, F C Michel, Jr, et al. Experimental verification of the natural convection transfer of air through a dairy manure compost media Proc. int. meeting of the Am. Soc. of Agric. Engrs, ASAE paper no. 994053, ASAE, St. Joseph. Mich. 1999.
- [6] Tom L Richard, HVM Hamelers, Adrie Veeken, et al. Moisture relationship in composting processes[J]. *Compost Science & Utilization*, 2002, 10(4): 283 – 302.
- [7] Hamelers HVM. A mathematical model for composting kinetics, Ph. D dissertation. Wageningen University, 2001.
- [8] Haug R T. The Practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers. Boca Raton Florida, 1993.
- [9] Van J T Ginkel, P A C Raats, and I A Van Haneghem. Bulk density and porosity distributions in a compost pile[J]. *Netherlands Journal Agricultural Sciences*, 1999, 47: 105 – 121.
- [10] Veeken A Vde Wildle, and HVM Hamelers. Passively aerated composting of straw – rich pig manure: Effect of compost bed porosity[J]. *Compost Sci and Util*, 2002, 10(2): 114 – 128.
- [11] Wall D K and Zeiss C. Municipal landfill biodegradation and settlement [J]. *J Envir Engrg*, 1995, 121(3): 214 – 223.