



温室型太阳能污泥干燥研究

王传奇^{1,2}, 张振涛¹, 吕君^{1,2}, 杨鲁伟¹, 周远¹

1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 首先给出污泥处理的重要性并简介了现有处理方式的利弊, 经过对比给出了一种温室型太阳能干燥的技术, 并就这一技术的效能, 利用能量平衡方程进行分析。分析表明, 这种温室的全年太阳能利用率可达 46%, 对于北京的辐射条件, 每年可得 0.82t/m² 除水量。其干燥能力在夏季远高于冬季, 能量利用率夏季值亦优于冬季值。在设计温室时, 排气温度、相对湿度和气流组织对干燥效果有很大影响, 这些项需根据经济性进行优化。这种干燥方式有较好的经济效益和实用性, 具有进一步深入研究的价值。

关键词 温室; 太阳能; 污泥干燥; 能量平衡方程

中图分类号 TK51

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)22-0033-06

Greenhouse Sludge Dry Treatment

WANG Chuanqi^{1,2}, ZHANG Zhentao¹, LU Jun^{1,2}, YANG Luwei¹, ZHOU Yuan¹

1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Firstly, the significance of dealing with sludge and the advantages and disadvantages of the existing approaches are briefly introduced. Then, a new technique of solar greenhouse drying sludge is recommended based on the comparison among these approaches. At last, the efficiency of this technique is got by the energy-balance equation. The heat transfer of sludge material, the heat change of sludge drying bed, the heat transfer of air flow and the heat loss through greenhouse envelope structure are set as energy destination. And the solar radiation is the energy source of this system. Then, when the destination is equal to the source, energy-balance equation comes up. From the calculation, conclusion is got as below: the annual solar energy efficiency of this greenhouse could reach a rate of 46%, and in the weather conditions of Beijing, it could be get about 0.82t/m² of water removed. In summer, this greenhouse get more water removed rather than in winter through a same time. In addition, lower outlet temperature always results in higher ventilation, which may raise the cost. Besides, good airflow organization can achieve high outlet relative humidity, which will raise the water removed. Visibility, this approach benefits economy and is practical, which deserves deep study.

Keywords greenhouse; solar; sludge drying; energy-balance equation

0 引言

人类在城市生活和工业活动产生大量的城市污水。据统计, 2005 年中国城镇产生污水量超过 400 亿 t^[1], 而且还会以每年 10% 的速率增长。面对如此巨大的污水量, 目前很多城市环保部门给予足够重视, 全国城镇的污水处理率越来越高, 正走向良性的可持续发展。然而伴随污水处理产生的大

量污泥却显得被关注不足。

污泥是一种成分复杂的由多种微生物形成的菌胶团及其吸附的有机物和无机物组成的集合体, 除含水率高外, 还含有大量有机物, 易释放难闻臭气, 并且颗粒较细, 比重较小, 呈液态, 难以通过沉降进行固液分离^[2]。一般, 1t 污水将产生约 1kg 污泥, 即 1/1000 的量, 以此算来, 中国每年将产生数

收稿日期: 2010-11-05

基金项目: 中国科学院院士咨询项目

作者简介: 王传奇, 硕士研究生, 研究方向为新能源技术, 电子信箱: 5angchuan7@163.com; 杨鲁伟 (通信作者), 研究员, 研究方向为新能源技术, 电子信箱: lwyang2002@yahoo.com.cn

千万吨的污泥。如此大量的污泥,如果处置不当,必将引起一系列环境、经济和社会问题。表 1 给出了目前主要的污泥处理方法。这些方法各有特点,由于环境保护和土地的限制,其

中污泥热干化日益显示出优势。热干化又称污泥干燥,是通过加热使水分蒸发,去除污泥水分的过程,是一个典型的耗能过程。

表 1 污泥处理方法

Table 1 Approaches of sludge treatment

污泥处理	简介	去向
土地利用 ^[15]	将符合标准的污泥直接作为肥料用于土地改良,园林绿化和限制性农用。施用量、方法、时间需根据植物和污泥特性合理安排	作为营养物质被植物吸收
发酵,堆肥 ^[15]	通过加入发酵微生物,分解污泥中有机物,产生高温杀死病原菌和寄生虫卵,并得到适合植物吸收利用的腐殖质、氮和无机盐等	肥料
直接填埋 ^[16]	同垃圾埋入地下	被土地吸收
投海 ^[16]	直接投入海中,以海洋自我净化能力处理掉	被海洋吸收
热干化 ^[16]	将脱水后的污泥通过加热方式蒸发其中的水分,达到较低含水率,成为可以更好利用的资源	焚烧,建筑材料,肥料

另外,还有各种各样的新技术,如超声波破解、微型动物捕食、臭氧氧化等工艺正在快速地发展^[3-10]。

常规的污泥干燥机使用电热或蒸汽等高品质能源加热,需要消耗大量能源,增加碳排放。该技术干燥温度高,与环境温差大,排气温度高,导致能源利用效率低。相关的设备、干燥模型、参数设置对干燥的影响都得到大量的研究^[11-14]。而太阳能是清洁可再生能源,太阳能光热利用是太阳能研究的重要方向,而且降低集热温度可以提高光热转化效率。因此研究污泥的太阳能低温干燥技术是污泥干化的一个低能耗路线,需要深入探讨与实践。本文就一种温室型的污泥干燥进行计算,考查其太阳能热能利用率及干燥能力,并希望以此为今后深入研究指明方向。

1 温室干燥模型

1.1 温室结构

温室内的热质传递简要过程如图 1 所示,环境空气从温室东西向墙下部进入,携带污泥里或温室内的水蒸汽,经由屋顶处排出,达到除湿目的。温室内的空气和污泥吸收太阳辐射,在满足污泥中水分蒸发的汽化潜热能量需求同时,还

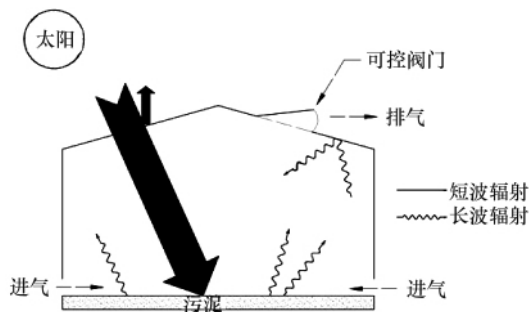


图 1 温室东西向剖面示意图

Fig. 1 East-west profile of greenhouse

提供除湿废气膨胀向上运动的机械动力。为了高效地排出污泥中的水分,还需对污泥进行翻动并对温室气流组织进行设计。基本方法见图 2。

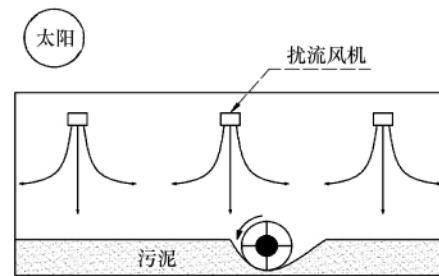


图 2 温室南北向剖面示意图

Fig. 2 South-north profile of greenhouse

1.2 环境参数和任务

北京的辐照条件基本体现了中国大部分地区辐照水平。表 2 和图 3 为北京的气象环境数据,以月为单位。表 3 是假设任务需求。

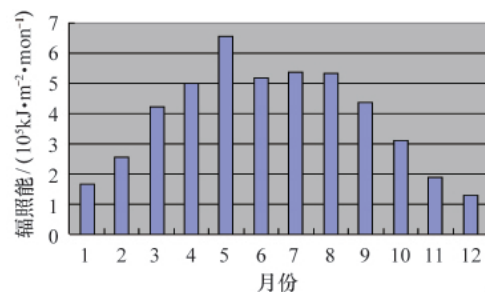


图 3 北京各月份太阳辐照量

Fig. 3 Radiation energy in Beijing in every month

表 2 北京各月份平均气温和相对湿度

Table 2 Average temperature and relative humidity in Beijing in every month

月(天数)	平均气温/°C	相对湿度/%
1(31)	-3.7	66
2(28)	-0.7	66
3(31)	5.8	67
4(30)	14.2	70
5(31)	19.9	71
6(30)	24.4	61
7(31)	26.2	72
8(31)	24.8	75
9(30)	20.0	81
10(31)	13.1	79
11(30)	4.6	76
12(31)	-1.5	70

表 3 污泥处理任务

Table 3 Target of sludge dry treatment

干燥物料	初始含水率 /%	出口含水率 /%	进料温度 /°C	日处理量 /(t·d ⁻¹)
污泥	80	20	10	5

2 计算方法

因温室为工程项目,不像机械设备制造精密,一般假设进入温室的太阳能比例为 60%。综合污泥存料的热量变化(干基和水分)、干化床热量变化、流动空气吸热量和被带走水分吸热量以及维护结构的散热损失,对这几部分进行估算。假设温室长 150m,宽 12m,侧壁高 2m,以气象平均月份 10 月的参数(湿度 79%)为参考,考虑一天时间,计算如下。

1) 透光得热

仅考虑屋顶,侧边维护结构作为墙壁计算。计算得到热量 Q 为

$$Q_{\text{吸收}}=40343400\text{kJ}$$

2) 干化床

温室如果日夜不停工作,则干化床实际处于一个动态稳定的过程,其所储存的热量变化很小,可忽略。而仅白天工作的温室,傍晚停止运行时,进行保温处理,其损失热量极少,也予以忽略。

3) 存料

物料在温室中的处置如图 2 所示,污泥从一端进入温室,经历一段干燥时间后排出。温室内存料随着各月干燥能力的变化而变化。

假设控制参数为:比环境温度高 13.1°C,排气温度比环境温度高 10°C,相对湿度 80%(通过温室内空气流动设计和排

气参数控制实现)。对于温室内所维持的系统,由热空气上升的原理,温室内简化为屋顶内部温度为 23.1°C,墙壁处成线性分布,且从底部补充环境新鲜空气,即温度等于环境值,则温室内空气平均温度为 18.1°C,屋顶装设温湿度传感器,达到设定参数时排除废气。

4) 屋顶散热

假设屋顶采用 20°的东西向坡度。材料的导热性能同普通玻璃,综合传热系数为 6W/(m²·K)。设日照时间为每天 8h,过后进行保温处理:

$$\text{面积: } A_{\text{顶}}=150 \times 12 / \cos 20^\circ = 1915.5 \text{m}^2;$$

$$\text{散热速率}^{[7]}, p_{\text{顶}}=A_{\text{顶}} \cdot \Delta t_{\text{顶}} \cdot h=114930 \text{W};$$

$$\text{天散热量: } Q_{\text{顶损}}=3600 \times 8 \cdot p_{\text{顶}}=3310000 \text{kJ};$$

式中, A 为面积, t 为温度, h 为传热系数, p 为传热速率。

5) 墙壁散热

墙壁设为 2m 高,为与屋顶同样的材料。

$$\text{面积: } A_{\text{墙}}=(150+12) \times 2=324 \text{m}^2;$$

$$\text{散热速率: } p_{\text{墙}}=A_{\text{墙}} \cdot \Delta t_{\text{墙}} \cdot h=9720 \text{W};$$

$$\text{天散热量: } Q_{\text{墙损}}=3600 \times 8 \cdot h_{\text{墙}}=279936 \text{kJ};$$

5t 污泥处理完毕,蒸发水 3.8t,其中蒸发水的显热变化为

$$Q_{\text{水显热}}=-3800 \times 10 \times 4.2=-159600 \text{kJ}$$

6) 污泥出料

污泥出料为

$$Q_{\text{污泥显热}}=1200 \times 10 \times 2.4=28800 \text{kJ}$$

通过上面两个计算可以看出,设定温室干燥系统中屋顶面积约为侧壁面积的 6 倍,屋顶传热温差约为侧壁的 2 倍,两者相乘得屋顶散热约为墙壁的 12 倍,之后依此计算。

7) 空气的热量

空气的热量为

$$Q_{\text{空气}}=Q_{\text{吸收}}-Q_{\text{顶损}}-Q_{\text{墙损}}-Q_{\text{水显热}}-Q_{\text{污泥显热}}=9558984 \text{kJ}$$

查焓湿图可以得出 1kg 干空气的除湿量为

$$\Delta d=0.016424 \text{kg/kg(干空气)}$$

湿空气的焓值计算公式为

$$h=(1.01+1.84d)t+2500d \text{ kg/kg(干空气)}$$

式中, h 为单位质量湿空气焓值, d 为含湿量, t 为摄氏温度。

计算得干空气处理过程焓的变化 Δh 为

$$\Delta h=51.141 \text{kJ/kg}$$

能量平衡时的日通干空气量为 (m 为空气质量)

$$m_{\text{通气}}=Q_{\text{空气}}/\Delta h=186914 \text{kg}$$

8) 除湿量

除湿量为

$$m_{\text{除湿}}=m_{\text{通气}} \cdot \Delta d=3070 \text{kg}$$

此值略小于设定值。然后以排气温度分别高于环境温度 5, 15, 20, 30, 40°C 同上进行计算, 同样将平衡的时间段选为 1d, 列表作为对照。然后根据所得的结果, 将透光材料的导热系数选择不同值, 分别模拟单层玻璃、绝热材料(辐射不绝热)和双层玻璃的工作情况。

采用上述方法,进一步计算不同辐照不同温度月份的特性。通过改变排气口相对湿度值计算得到了该参数的影响特性。下面分别介绍。

3 结果与分析

3.1 不同维护材料对比

表 4 为温度、相对湿度的已知数据。假设单层玻璃维护结构的散热系数为 $6W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 绝热玻璃 (不绝辐射) 为 $0.2W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 双层玻璃为 $2W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 这 3 种材料计算所得工作效果如图 4 和图 5 所示。

表 4 进、出口参数表

Table 4 Inlet and outlet conditions

序号	1	2	3	4
进口温度/ $^\circ C$	13.1	13.1	13.1	13.1
进口含湿量/ $(g \cdot kg^{-1})$	5.8	5.8	5.8	5.8
进口焓/ $(kJ \cdot kg^{-1})$	27.9	27.9	27.9	27.9
温升/ $^\circ C$	10	20	30	40
出口温度/ $^\circ C$	23.1	33.1	43.1	53.1
出口含湿量/ $(g \cdot kg^{-1})$	21.9	57.8	137.3	291.6
出口焓/ $(kJ \cdot kg^{-1})$	79.1	181.4	397.7	811
除湿量/ $(g \cdot kg^{-1})$	16.1	52	131.5	285.8
焓增/ $(kJ \cdot kg^{-1})$	51.2	153.6	369.8	783.2

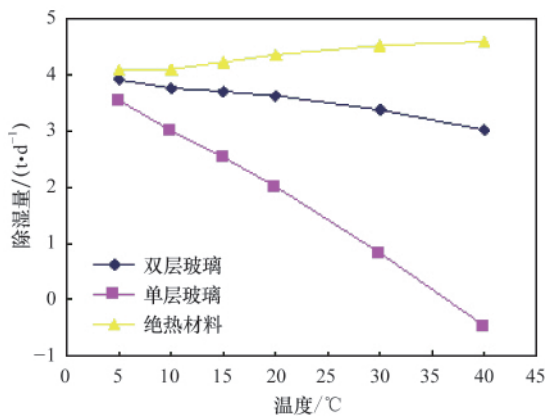


图 4 温室不同维护材料除湿量对比

Fig. 4 Comparison of water removed among different greenhouse wall materials

当使用单层玻璃时,随着排气温度的升高,太阳能的热利用率迅速下降,排气量骤减。这是因为在导热率高的情况下,随着排气温度的提高,通过维护结构损失到环境热量增多,同时将温室内空气加热到排气温度便需要长时间的辐照积累,这导致出口温度越高,热量损失越大,通气量越小的情况。但从 $5^\circ C$ 的通气量可以设想,太低的出口温度设定是不可取的,因为如此大的通气量靠自然通风难以达到,采用机械通风则能耗过大。应根据实际情况确定一个兼顾经济和环境

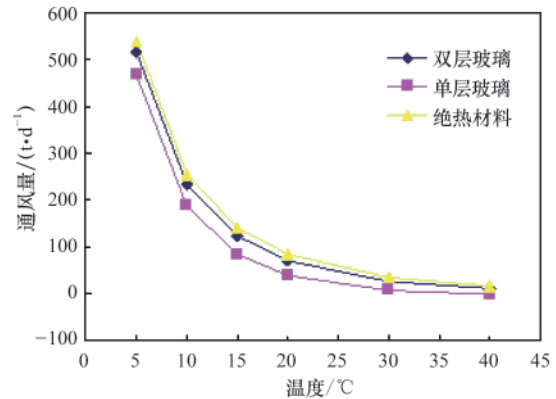


图 5 温室各种维护材料通气量对比

Fig. 5 Comparison of ventilation among different greenhouse wall materials

的最优值。

当维护结构使用导热率极低的材料时,在实际中难以实现,但对于分析具有指导意义。在这种情况下,与单层玻璃情况相反,随着排气温度的提高,反而除湿量升高了。如图 5 所示,对于 3 种材料,通气量变化趋势基本相同,原因是排气在相同的相对湿度情况下载湿能力随温度的升高成指数形式的增大,于是排气量亦成指数倍的下降。

双层玻璃的除湿和热利用率效果介于前两者之间,除湿量及热利用率随出口温度升高而降低,但是排气量却明显地降低,这与以上的原因相同。所以在实际情况中,需要对太阳能除湿效果和风机能耗根据经济因素进行优化,才能得到真正实用的值。

可以看出,维护结构的保温性能直接影响了除湿量和太阳能利用率,保温透光材料技术的进步将提高温室的性能,而在温度越高时这个效果越好。

3.2 不同月份对比

在此用辐射最多和最少的月份计算。因双层玻璃的效果最接近于目前所使用的技术特点,故仅选用双层玻璃做计算。计算结果如图 6 和图 7。

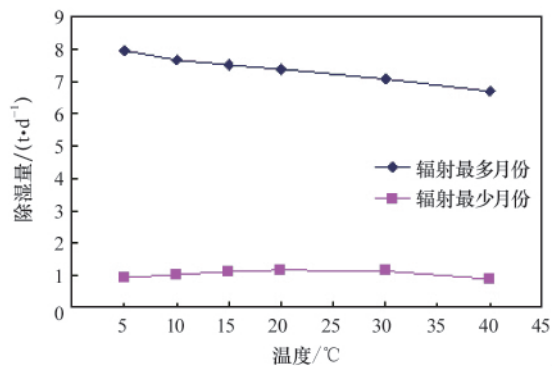


图 6 辐射最多与最少月份除湿量对比

Fig. 6 Comparison of water removed between the months with the most and the least radiation

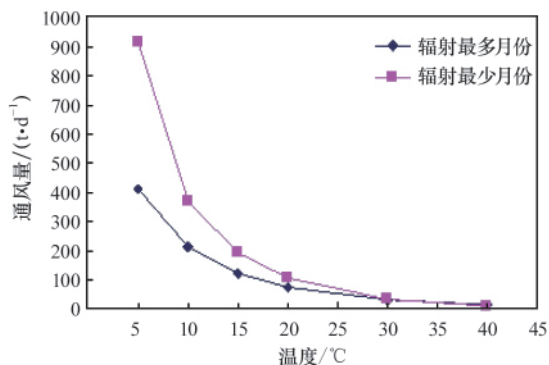


图 7 辐射最多与最少月份除湿量对比

Fig. 7 Comparison of ventilation between the months with the most and the least radiation

从图 6 和图 7 可以看出按所给工作方式,气温低的时候除湿量将比气温高时候小,而通风量则相反。可见,太阳能干燥污泥在辐射量大,气温高的时候更为适宜。另外,在气温低的月份可以看到随着出口温度升高(5~40°C),除湿量出现一个峰值,即存在一个最佳值,既增大了除湿量,又降低了通风要求。这个峰值的出现,说明在低温时,尽管温度升高将加大散热,但却能增加除湿量。原因在于低温时空气携带水分能力较低,较低的出口温度将牺牲大量的能量用来加热大量的空气,即很高的通风量,反之,加热空气量减少提高了能量利用率。

3.3 不同出口相对湿度对比

在平均月份 10 月的干燥条件下,比较出口相对湿度分别为 60%和 80%的双层玻璃温室的工况值,计算结果如图 8、图 9。可以看出,两者之间的除湿量相差不大,但各个温度下 60%出口相对湿度时通风量要比 80%工况大 1/4~1/5,这将会加大温室的进气和排气成本,不利于整个系统的经济性。出口相对湿度进一步降低,排湿量也将随之降低。故而,通过温室内的气流组织优化使得传质充分,对于提高系统效率意义很大。如果温室气流组织存在很多短路和死角情况,就会使得排气湿度明显降低。

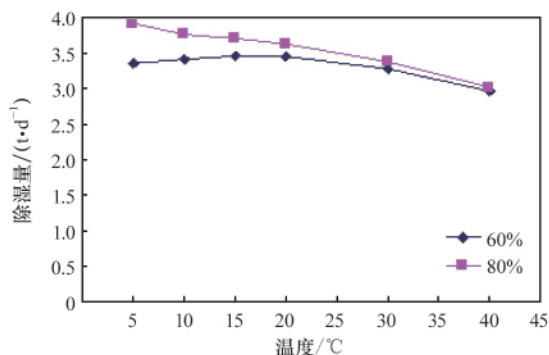


图 8 温室不同出口相对湿度除湿量对比

Fig. 8 Comparison of water removed between different greenhouse outlet relative humidities

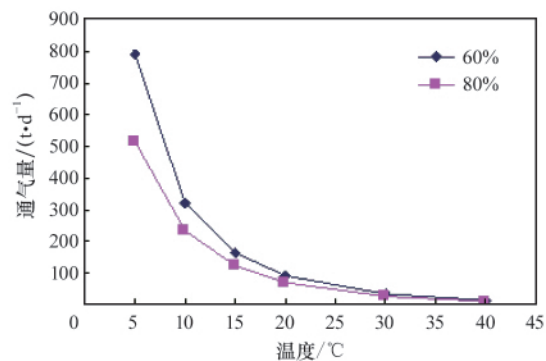


图 9 温室不同出口通风量对比

Fig. 9 Comparison of ventilation between different greenhouse outlet relative humidities

3.4 全年除湿能力

通过上面的比较可以看出,温度 30°C较为合适做出口参数,以其估算使用温室时全年单位面积的干燥能力,结果列于表 5。可以看出,全年的太阳能总利用率为 46%,每平米的干燥量为 0.82t。还可以发现,辐照少的月份,除湿量低,太阳能利用率也低,污泥太阳能干燥的重心应放在辐照充足月份。

表 5 全年干燥能力汇总

Table 5 Annual dry capacity

月份	太阳辐射能 量/10 ³ kJ	太阳能利用 比例/%	总除湿量 /(t·m ⁻²)
1	2.58	36.52	0.03
2	2.90	41.18	0.04
3	4.73	47.20	0.07
4	5.64	49.61	0.10
5	6.55	50.76	0.12
6	6.47	50.95	0.12
7	5.43	48.86	0.10
8	4.79	47.36	0.08
9	3.66	44.00	0.06
10	3.74	43.81	0.06
11	2.18	33.19	0.02
12	2.14	31.68	0.02
合计	50.8	45.98	0.82

4 结论

温室保温材料的性能对污泥干燥效果有着重要影响。在设定出口温度时,需充分考虑到温度低则通风量大,温度高则除湿量低(1月干燥量小,可认为是特殊情况)的选择矛盾,据经济因素取最优值。出口相对湿度对除湿过程的影响则表现为其越高越好,但要达到高的相对湿度需要良好的气流组织设计,而这需要深入研究。另外,在一年中,辐照少的月份,



除湿量低,太阳能利用率也低,故污泥太阳能干燥的重心应放在辐照充足月份。

由计算可以看出,太阳能的利用可以使 1m^2 的面积一年中产生将近 1t 污泥干燥量。而且以上的计算存在一个大前提即太阳光的吸收率为 60% ,相信随着透光材料研究的进步,这个值的提高将进一步促进太阳能利用的发展。此系统非常适合污泥处理量较小的中小城市,而大中城市每天有上百吨的污泥产生量,采用这个系统则占地面积过于巨大,可以通过使用热泵干燥技术使得温室日夜不停运作来满足较大量的处理污水要求。

温室实际除湿过程的运作在很大程度上受气流组织的影响。本文中各参数值仅做假设处理,而通气排气的如何设置及效果并没有讨论,实现以上的假设或者超越它都仍然需要深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] 袁留根. 污泥处理产业化势在必行 [J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(11): 24-25.
Yuan Liugen. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2009, 29(11): 24-25.
- [2] 尹军, 谭学军. 污水污泥处理处置与资源化利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-11.
Yin Jun, Tan Xuejun. *Disposal and resource utilization of sewage sludge* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-11.
- [3] 姚玉洁. 污泥焚烧发电: 绿色产业还需“绿色政策”[N]. 经济参考报, 2007-09-25(7).
Yao Yujie. *Economic Information Daily*, 2007-09-25(7).
- [4] 王守仁, 王增长, 宋秀兰. 污泥处理技术发展[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 80-83.
Wang Shouren, Wang Zengzhang, Song Xiulan. *Water Resources Protection*, 2010, 26(1): 80-83.
- [5] 蔺丽丽, 蒋文举, 金燕, 等. 微波法制备污泥活性炭研究 [J]. 环境工程学报, 2007, 1(4): 119-122.
Lin Lili, Jiang Wenju, Jin Yan, et al. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2007, 1(4): 119-122.
- [6] 李颖, 叶芬霞. 化学解耦剂对活性污泥产率的控制作用 [J]. 环境科学研究, 2006(3): 88-90.
Li Ying, Ye Fenxia. *Research of Environmental Sciences*, 2006(3): 88-90.
- [7] 魏源送, 樊耀波. 蠕虫污泥减量效果及其影响因素分析 [J]. 环境科学, 2005(1): 76-83.
Wei Yuansong, Fan Yaobo. *Environment Science*, 2005(1): 76-83.
- [8] 曹秀芹, 陈璐, 王洪臣, 等. 超声处理对活性污泥系统污泥减量效果的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006(6): 85-88.
Cao Xiuqin, Chen Qun, Wang Hongchen, et al. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006(6): 85-88.
- [9] 白润英, 梁鹏, 黄霞. 卷贝进行污泥减量的应用研究 [J]. 给水排水, 2005(7): 19-21.
Bai Runyin, Liang Peng, Huang Xia. *Water and Wastewater Engineering*, 2005(7): 19-21.
- [10] 王琳, 孙德栋. 臭氧氧化分解污泥的试验研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 83-86.
Wang Lin, Sun Dedong. *Journal of Ocean University of China: Natural Sciences Edition*, 2005, 35(1): 83-86.
- [11] 刘振华, 高建华. 过热蒸汽干燥技术的分析及在污泥处理中的应用 [J]. 甘肃化工, 2001(3): 123-128.
Liu Zhenhua, Gao Jianhua. *Gansu Huagong*, 2001(3): 123-128.
- [12] 倪春林, 张富茂, 郭瑞刚, 等. 污泥干燥工艺介绍[J]. 干燥技术与设备, 2010, 8(2): 74-78.
Ni Chunlin, Zhang Fumao, Gu Ruigang, et al. *Drying Technology & Equipment*, 2010, 8(2): 74-78.
- [13] 袁佳丽, 郭宏伟. 污水污泥干燥特性研究[J]. 化工装备技术, 2009, 30(4): 28-30.
Yuan Jiali, Guo Hongwei. *Chemical Equipment Technology*, 2009, 30(4): 28-30.
- [14] 刘长燕, 葛仕福. 污泥干燥特性及其模型[J]. 化工装备技术, 2010, 31(1): 1-4.
Liu Changyan, Ge Shifu. *Chemical Equipment Technology*, 2010, 31(1): 1-4.
- [15] 孔祥娟. 城镇污水厂污泥处理处置技术现状与发展 [J]. 建设科技, 2009(19): 57-59.
Kong Xiangjun. *Construction Science and Technology*, 2009(19): 57-59.
- [16] 杨文婷. 城市污泥处理现状[J]. 科技信息, 2009(33): 730-731.
Yang Wenting. *China Science and Technology Information*, 2009(33): 730-731.
- [17] 奥齐西克 M N. 热传导[M]. 俞昌铭, 译. 北京: 高等教育出版社, 1983: 1-2.
Ozisk M N. *Convection heat transfer*[M]. Yu Changming, trans. Beijing: Higher Education Press, 1983: 1-2.

(责任编辑 朱宇)

本期好玩的数学——蚂蚁问题答案

这个问题初看上去非常复杂,但只要洞察了问题的关键,便会变得非常简单。我们先来想想当两只蚂蚁相遇后会发生什么。

如图 1 所示: A、B 两只蚂蚁, A 向右, B 向左, 都以每分钟 1 米的匀速爬行。两者相遇了, 按题目已知, 两者都马上掉头往回爬, 于是将会出现图 2 所示的实际情况, 即 A 向左, B 向右, 都以每分钟 1 米的匀速爬行。图 3 表示了一种假想的情况: A 继续向右, B 继续向左, 都以每分钟 1 米的匀速爬行。

关键之处在于: 图 2 所示的实际情况与图 3 所示的假想情况在本质上没有差别。如果在两只蚂蚁相遇的瞬间你闭上眼, 那么当你睁开眼时, 你将无法区分出实际发生的究竟是图 2 还是图 3 表示的情况。也就是说, 我们完全会把假想的图 3 当作

是实际发生的图 2。这意味着, 两只蚂蚁相遇后, 我们可以认为它们在继续爬行, 而没有遇到任何障碍。

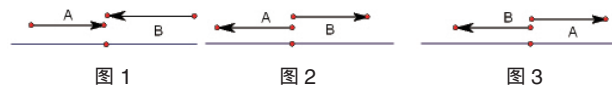


图 1

图 2

图 3

这一分析同样应用于 100 只蚂蚁。当 100 只蚂蚁按题目要求爬行的时候, 我们完全可以认为它们各自处于它们“专用的”行进路线上, 一直爬行, 而没有遇到障碍。

由于分布在尺子上的这些蚂蚁需要走过的最长距离, 就是尺子的全部长度 1 米, 因此所有蚂蚁从尺子上都掉下去所需要等待的最长时间就是 1 分钟。