

论节能式炉气体木材干燥室的设计

姜四维

(中南林学院 湖南株洲 412006)

摘要 本文讨论了节能式炉气干燥室设计的一些技术问题,如提高自生风引力增强通风,多种传热方式并用,增强传热;降低热损失的途径等,以达到节能降耗、快速干燥的目的。

关键词 木材干燥;木材干燥室;炉气体;自生风引力;对流、辐射换热;热损失

以木废料为燃料,自然通风燃烧方式产生的炉气体(烟气)为介质干燥木材,应用极为广泛。为使这种干燥室达到“低能耗,短周期”的目的,笔者在设计过程中从降低热损失出发,对燃烧、通风、换热设备进行了比较选择。对相关结构进行了平衡配置。设计的干燥室于1992年起在湖南省吉首市投入使用,证明该干燥室具有燃料耗量低、干燥周期短的特点。

1 干燥室的总体结构

干燥室分为室体、燃烧、供热、通风四大部分。室体结构为斜侧壁,端吹型,实积容量 10m^3 ,内设轴流风机一台,叶轮直径为1m。燃烧炉炉排分上下两部分,上部是炉膛,为主燃烧区;下部是灰坑,为进风道。燃烧产生的烟气经烟道、烟囱排出。烟道是平滑管排管结构,分两列立于风机正、负压侧,流经烟道的高温烟气在干燥室内散热,烟道同时也是主供热设备。此外还有辅助供热设备——热风管和水箱。在木材预热阶段,三者联合供热;干燥阶段,由烟道和热风管供热。水箱兼顾木材预热、中间处理和终了处理的湿度调节。

2 燃烧与通风

2.1 炉灶的结构及性能 木废料在燃烧时,燃烧越充分,则热损失越低,这就要求

炉灶:①供风量 $6.6\text{标m}^3/\text{kg}$ (干柴),才满足需氧量。②排烟量 $8\text{标m}^3/\text{kg}$ (干柴),以免 CO_2 等气体抑制燃烧。③足够的炉膛容积和高度,使燃烧中产生的飞灰、CO及炉灶上方添加的细木屑在炉膛中充分燃烧而不随烟气排出。结构如图1。

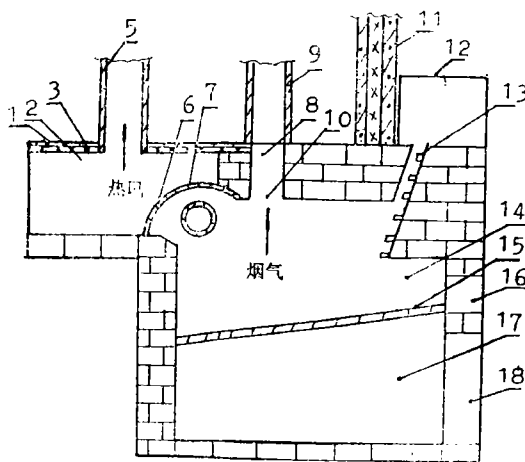


图1 木废料燃烧炉灶的结构

- 1.铁盖板;2.地下热风道;3.隔热层;5.室内热风管;
6.半圆铸铁锅;7.炉内铸铁热风管;8.地下烟道;9.
烟道;10.烟气出口;11.室壁;12.木屑斗;13.木
屑滑道;14.炉膛;15.炉条;16.进柴口;17.灰坑;
18.进风口

完全燃烧的程度取决于通风状况。自然通风的燃烧炉是依靠风道、烟囱的自生风引力为动力克服阻力实现通风的。而引力和阻力都是由多元因素确定的物理量。

收稿日期:1994-02-07

2.2 通风条件的影响因素^[1]

2.2.1 进风动力 $P_{\text{进}}$ 和阻力 Δh

$$\textcircled{1} P_{\text{进}} = h_1 + h_1'$$

式中： h_1 —风道（灰坑）自生风引力 $= \pm H' \cdot (1.2 - r_x)$ ； h_1' —炉膛进口真空度 $= h_1'' + 0.95H'$ ； H' —灰坑高度(m)； r_x —空气容积重 $= 352 / (273 + t_x)$ (kg/m^3)； t_x —空气温度($^{\circ}\text{C}$)； h_1'' —炉膛出口真空度（由烟气出炉流速控制）。各种因素中，随 H' 、 t_x 、 h_1'' 的增加，进风动力也增大。但三者均有限度，尤其是 h_1'' 过大，易造成飞灰等随烟气排出，增大不完全燃烧损失。

②阻力 Δh 是炉条和燃料层的挡风力。选取适宜的通风面积和适当的燃料层厚度可有效降低阻力。

2.2.2 排烟动力 $P_{\text{排}}$ 和阻力 Δh

$$\textcircled{1} P_{\text{排}} = h = H(r_x - r_y)$$

式中： h —烟囱的自生风引力； H —烟囱高度(m)； r_x —烟囱内烟气平均容重 $= 365 / (273 + t)$ (kg/m^3)； t —烟囱内烟气平均温度($^{\circ}\text{C}$)； r_x —常温空气容积重(kg/m^3)。

当 H 、 t 升高时，动力增大，但过大就为造成烟囱材料消耗大、造价高、排烟热损失大。

$$\textcircled{2} \text{阻力 } \Delta h = \Delta h' + \Delta h'' + \Delta h_{f_b}$$

$$\Delta h' = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{rw^2}{2g} (\text{烟道}) + \\ + \frac{0.04}{i} \cdot \frac{r_y w_1^2}{2g} (\text{烟囱})$$

$$\Delta h'' = \xi \cdot \frac{rw^2}{2g}$$

$$\Delta h_{f_b} = \xi \cdot \frac{w_1^2 r_y}{2g}$$

式中： $\Delta h'$ —烟气沿程摩擦阻力 ($\approx 10^{-5}$ MPa)； $\Delta h''$ —局部阻力（弯头等） ($\approx 10^{-5}$ MPa)； Δh_{f_b} —烟囱出口阻力 ($\approx 10^{-5}$ MPa)； λ —沿程摩擦阻力系数，取0.02； ξ —阻力系数； r —烟道内烟气容重； i —烟囱斜度； W —烟道烟气流速； d —钢烟道直径； L —烟道

长度； W_1 —烟囱出口处烟气流速。

从各种因素中可知，降低排烟力的途径是缩短烟道长度 L ，增大钢烟管直径 d ，降低烟道、烟囱内烟气流速 W ， W_1 。但 d 、 W 受排烟量和炉膛出口真空度大小制约，必须与之相适应，一般取 $W = 6 \text{ m/s}$ 。 W_1 太小，会造成冷空气向烟囱内倒灌^[1]，故 $W_1 > 3 \text{ m/s}$ ，因此，主要途径还是缩短烟道长度。

2.3 炉灶设计参数 平衡各种关系后选定的设计参数如下：①炉排通风截面积比22%；②炉膛容积 0.4 m^3 ；③烟道出口截面积 0.0256 m^2 ；④烟囱高度10m；⑤烟囱出口处直径 $\phi 200 \text{ mm}$ ；⑥钢烟管直径 $\phi 125 \text{ mm}$ 。

按此设计的炉灶，使用中未发现火焰和烟尘向炉外反喷。炉内火焰明亮，从炉膛上方添加的细碎料呈悬浮状燃烧。烟囱飞灰少，无黑烟，说明燃料的燃烧较完全。

3 传热方式和设备的选择

传热方式有传导、对流和辐射，实际工作过程是两种或三种方式的复合换热。因此，必须选择适宜的传热方式，增强传热效率，降低传热过程的热损失。

3.1 炉内传热 炉内传热是燃料释放的热量转换为有效热量的第一步。传热方式为辐射（火焰与炉壁）及辐射-对流综合换热（烟气与炉壁）。当炉温在 $600 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 时，辐射和对流换热量约各占一半^[2]。因此，选用的换热设备必须适应两种换热方式。

炉内辐射热能仅能用于升高烟温和炉壁温度，炉壁吸收的热能中，一部分向炉外辐射造成热损失，温度越高，损失越大，而出炉烟温度过高，使降温难度相对增大（如每1万 kcal/h 的热量可使烟温上升 80°C 左右），排烟热损失也随之增加。因此，在炉内设置适量的辐射受热面，可有效地降低热损失。

从传热能力方面考虑，炉内设热风管（图1）作为辐射受热面。因为用蒸汽锅作受热面，它受压力限制，蒸汽温度 $\leq 100^{\circ}\text{C}$ ，传热温差

仅20℃左右,只宜于喷蒸调湿。热风管内的热风,虽对流换热系数小于水,但可随炉温升高而升高,传热温度较高。从换热损失看来,蒸汽锅换热经过烟气→水→蒸汽→干燥介质四个阶段。冷凝水造成的热损失达20%。而热风管换热只经历烟气→干燥介质(热风)一个阶段,没有冷凝损失。

热风管^{〔2〕}分为室内管、炉内管、铁锅及热风道四部分(如图1)。室内管是两组钢管,分列于风机正、负压侧。炉内管和铁锅组成炉内辐射受热面,面积0.5m²。热风道将室内、炉内管连通,干燥介质(空气)从正压进入热风管,加热后从负压侧流出与室内干燥介质均匀混合,使其升温。因辐射吸热量与火焰温度的四次方成正比^{〔1〕},面积虽小,吸热量高,经测试,热风可提供木材预热阶段需热量的16%、干燥阶段需热量的30%。这种办法,可减少钢烟道散热面积,同时缩短烟气流程,降低通风阻力。辐射受热面积的大小可控制出炉烟温在适度范围,利于降低排烟温度,提高热效率。

3.2 干燥室内传热

3.2.1 影响排烟温度的因素 高温烟气从炉内流向钢烟道,在干燥室内与干燥介质进行热交换后从烟囱排出。钢烟道分为高温和低温两个区段,高温区在烟气入口端,此时烟温约700℃,低温区在钢烟管末端与烟囱接口处,温度应控制在52~180℃,烟囱出口烟气温度在32℃~160℃。若排烟温度小于32℃,排烟受阻。而温度过高虽动力增大,但排烟热损失也增大,如100℃时排烟热损失为5%,200℃时,排烟热损失11%^{〔1〕}。因此,排烟温度必须兼顾通风动力与热损失二者的关系,控制最高排烟温度小于160℃。这样,从高温区到低温区的降温量 $\Delta\theta$ 必须达到500~600℃,从公式

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\text{散}}}{BV_r C} \quad (^\circ\text{C})$$

式中: $Q_{\text{散}}$ —传热量(kJ/h); B —燃料量

(kg/h); V_r —排烟容积(标m³/kg); C —烟气平均比热,取0.005kJ/标m³·k。可知,降温量 $\Delta\theta$ 的大小与换热量 $Q_{\text{散}}$ 的多少有关。因此,增强换热设备的传热能力是降低排烟热损失的主要途径。

3.2.2 增强传热的途径 根据传热公式 $Q_{\text{散}} = FK\Delta t_m$ (kJ/h)^{〔5〕},增大散热面积 F 、传热系数 K 、平均对数温差 Δt_m 中的一项或三项都可以提高传热能力。本设计 Δt_m 主要由出炉烟温控制。烟气温度越高, Δt_m 越大,设备的传热能力越强。在兼顾了排烟温度后,用炉内辐射受热面积大小控制出炉烟温在700~800℃,则 $\Delta t_m \approx 200^\circ\text{C}$,而常规蒸汽干燥室的平均温差一般小于100℃^{〔6〕}。所以,传热温差高,传热能力强是炉气体干燥的特点之一。传热系数 K 的大小与材料、传热面材料厚度、设备结构、干燥介质流速及换热方式有关。本设计中烟气通过钢管与空气换热属于单相流体强制对流换热, $K = 4.18 \times 10 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ^{〔6〕}。如果只采取这种方式与热风管配合供热,钢烟管的散热面积就必须以需热量高的预热阶段为准。而在需热量低的干燥阶段,散热面积只需预热段的1/3,这样设置将造成钢材浪费和设备结构复杂化,而且烟道长度增加,还将增大通风阻力。因此,设计中选择了在烟道高温区设置水箱的办法,与烟道、热风管配合,在预热阶段供热,取得了较满意的效果。水箱结构如图2,安装在烟道高温区。烟道从

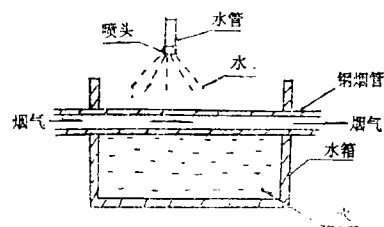


图2 水箱结构示意图

水箱中穿过,下部存水,喷水龙头将水喷在炽热的烟管上,边流动边蒸发。在风机驱动下,水蒸汽流过材堆传热传湿。烟气与水的这种传热方式属于相变换热^{〔5〕},比之烟气

与空气的对流换热, 传热系数 K 大5~7倍。水直接喷在钢管上, 又进一步提高了传热能力, 故可用较小的传热面积获得较高传热量。本设计中, 钢烟道散热面积仅 12m^2 (以干燥段需要量为准), 与水箱、热风管配合, 在满足了预热、干燥段供热的同时, 排烟温度也控制在 $100^\circ\text{C}\sim 160^\circ\text{C}$ 之间, 传热速度和热效率均达预期要求。

4 使用效果

4.1 热效率高 经测算: 燃烧过程热效率89%; 传热过程热效率82%。排烟及不完全燃烧热损失之和为18%, 而机械通风锅炉这两项热损失一般是15%~30%^[1], 自然通风中损失更高。因此, 本设计的节能效果较为显著。

4.2 燃料消耗量低 实际测算, 干燥 1m^3 木材耗干木废料50kg, 比老式炉气体干燥室耗量低30%~40%。

4.3 干燥周期短 采用了连续升温、降湿的干燥基准, 以干球温度 $45\sim 85^\circ\text{C}$, 湿球温度 $43\sim 60^\circ\text{C}$ 干燥2cm厚的马尾松板材为例, 由初含水率50%, 干燥至终含水率12%, 烟气干燥周期为1.5天, 而常规蒸汽干燥需7天。按年工作10个月计算, 可干燥初含水率50%的板材 1400m^3 。生产率是同容量常规蒸汽干燥室的3倍。干燥的马尾松板材板面无污染、无开裂、无横弯, 纵向弯曲 $<3\%$, 达到

国标要求。

5 结论

5.1 自然通风式燃烧方式通过提高自身生风引力, 降低风阻的设计措施可实现良好通风, 有效降低不完全燃烧热损失, 适用于小型干燥室的通风设计。

5.2 炉气体(烟气)干燥具有传热温差大的特点: 是实现快速干燥的基础条件, 适宜于干燥针叶树板材。

5.3 热风管充分利用了炉内辐射热能, 同时控制出炉烟温, 是一种有效的换热方式。

5.4 水箱实质是蒸发器, 应用于预热阶段, 有较强的传热能力, 可使钢烟道散热面积减少, 钢材耗量降低。能使高温烟气快速降温而控制排烟温度, 传热和节能的效能较高。

致谢: 本文得到刘元副教授的指导, 谨表谢忱。

6 参考文献

- 1 同济大学等. 锅炉及锅炉房设备. 中国建筑工业出版社, 1979
- 2 陈宏芳、陆家钦主编. 热工学. 中央广播电视大学出版社, 1986, 372, 391
- 3 徐望飞. 一种节能、实用的简易热风干燥方法. 林产工业, 1993 (3): 31
- 4 《机械制造基础》编写组编. 机械制造基础(上册). 人民教育出版社, 1978, 99
- 5 朱聘冠著. 换热器原理及计算. 清华大学出版社, 1985
- 6 南京林产工业学院主编. 木材干燥. 中国林业出版社, 1979

A study on the designing of energy-saving furnace kiln

Lou Siwei

(Central-South Forestry College, Hunan Zhuzhou 412006)

Abstract In this paper, some technical problems about the designing of energy-saving furnace kiln were discussed, such as increasing selfproduced draught force to improving ventilation; heating the stack by a combination of several heat conduction ways; and reducing heat loss. Thus, the condition of high speed drying and low energy consumption was reached.

Keywords Wood drying; Furnace air; Kiln; Selfproduced draught force; Convection and radiation heat exchange; Heat loss