

实用技术

金属壳体木材干燥窑热损失分析

何清浩

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 本文主要分析了金属壳体木材干燥窑窑体的热损失情况, 并与砖混结构窑窑体的热损失进行了对比。着重说明由窑门及边框冷桥产生热损失的严重程度, 并指出减小热损失的一些途径。

关键词: 木材干燥窑; 热损失

中图分类号: TS652 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654(2002)03-0033-04

Analysis on Heat Energy Loss of Metal-shell Wood Drying Kiln

HE Qing-hao

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: By comparison between metal-shell wood drying kiln and brick-concrete wood drying kiln, the loss of heat energy of metal-shell wood drying kiln was analyzed. Then, the severe degree of loss of heat energy caused by cold bridge of entrance gate frame and jamb were illustrated emphatically. Finally, some efficient ways to reduce the loss were pointed out.

Key words: Wood drying kiln; Loss of heat energy

十几年前国内的木材干燥窑基本上采用砖混结构。近年来, 性能优越的金属壳体干燥窑已越来越多, 似有成为木材干燥窑主流的趋势。但对金属壳体窑的热损失, 尤其是冷桥带来的热损失尚少探讨。本文以105型木材干燥窑为例(以下简称例窑), 主要分析了金属壳体木材干燥窑的热损失情况, 并将其和砖混结构窑进行对比。文中还着重说明由金属壳体窑门扇框(以下简称门框)及边框的冷桥产生热损失的严重程度, 指出减小损失的一些途径。

1 窑壁热损失

105型木材干燥窑的基本结构和参数见图1。

1.1 窑壁传热系数

窑内壁表面换热系数 $\alpha_{\text{内}}$ 定为 $11.63 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 并设外壁表面换热系数 $\alpha_{\text{外}}$ 为 $23.26 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ^[1]。传热系数按公式(1)^[2]计算, 可得金属壳体窑 $k_{\text{窑}} = 0.283 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 砖混结构窑的 $k_{\text{窑}} = 0.448 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 后者比前者大58.4%。由于砖混结构窑外表面积比金属壳体窑大16.7%, 因此, 窑体墙面总的热

损失后者比前者大85%(见表1)。

$$k_{\text{窑}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{内}}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{外}}}} \dots\dots\dots (1)$$

1.2 1m^2 金属壳体窑窑壁热损失

$$q_{\text{窑}} = k_{\text{窑}} \times (t_{\text{窑}} - t_{\text{气}})^{[3]} \dots\dots\dots (2)$$

根据2001年12月在北京对例窑的实测结果, 窑内平均温度 $t_{\text{窑}} = 75.8^\circ\text{C}$ 、气温 $t_{\text{气}} = 0.1^\circ\text{C}$, 代入上式得:

$$q_{\text{窑}} = 0.283 \times (75.8 - 0.1) = 21.4 \text{ W/m}^2$$

由公式(1)可知, 预设 $\alpha_{\text{外}}$ 大于10时, 基本上不影响 k 和 q 值大小。

1.3 外壁传热系数 $\alpha_{\text{外}}$

在上文1.1节中给定的 $\alpha_{\text{外}}$ 系全年平均值, 而实际测量时的即时值可根据公式(3)来进行计算^[3]。

$$\alpha_{\text{外}} = q_{\text{窑}} / (t_{\text{外窑}} - t_{\text{气}}) \dots\dots\dots (3)$$

其中, 窑外壁温度 $t_{\text{外窑}} = 1.3^\circ\text{C}$ 为测量值, 将 $q_{\text{窑}} = 21.4 \text{ W/m}^2$, $t_{\text{气}} = 0.1^\circ\text{C}$ 代入, 由此可得测量时的外壁传热系数为 $17.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

2 窑门的热损失

收稿日期: 2001-09-11, 修改稿: 2002-01-20
作者简介: 何清浩(1942-), 男, 中国林科院木材工业研究所高级工程师。

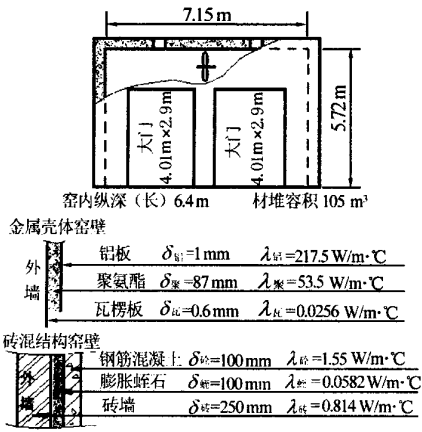


图 1 105 型木材干燥窑的基本结构和参数

Fig. 1 Basic structure and parameters of model 105 wood drying kiln

2.1 两种门的热损失比较

干燥窑入口(大门)及操作间门(小门)是干燥窑热损失的重要环节。木材干燥窑门的结构通常有两种:一种是由铁制内框、铝板覆面内加玻璃丝棉保温层、普通橡胶密封条组成的旧式大门,现已被逐步淘汰;二是现在应用较普遍的铝框、瓦楞板面、聚氨酯保温层、硅胶密封条、吊挂式推拉门。两者的保温性能比较如下:

2.1.1 门壁保温性能 在 $\alpha_{\text{内}}=11.63 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{外}}=17.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 的条件下(下文中的 $\alpha_{\text{内}}$ 、 $\alpha_{\text{外}}$ 均以此值为准),新型大门的传热系数 k 值为 $0.283 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,旧式大门为 $0.468 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。由此可知,两者保温能力相差 65%。且新型大门是以硬质聚氨酯泡沫塑料作保温材料,其内部由封闭的微孔组成,基本上不透气、不吸湿,保温性能得到充分保证。而旧式大门是以玻璃棉作保温材料,一旦发生透气、吸湿后保温性能急剧下降,甚至完全失去隔热保温的作用。

2.1.2 密封条 新型大门密封条以硅橡胶为原料,其柔性好、寿命长、密封性能优良。而旧式大门所采用的普通橡胶易老化、龟裂而漏气,导致热能的损失。

2.2 门(扇)框冷桥

2.2.1 冷桥 是指结构中保温能力薄弱的部位。金属壳体窑门门(扇)框的结构参数见图 2,其中 A=100、B=5、C=102、D=100、E=20、F=20、G=20、H=5、I~250、J=90 mm。

门框材料为纯铝,传热面积 F_1 =门框周长×厚度,即 $13.58 \text{ m} \times 0.005 \text{ m}=0.0679 \text{ m}^2$,门框外表面面积 F_2 (B~E 区)= 3.02 m^2 ,门框侧计算面积 F_4 (A 区)

$=1.26 \text{ m}^2$ 。
门框及相连壁板(展开)的温度曲线(实线部分为实测、虚线为推论)见图 3。

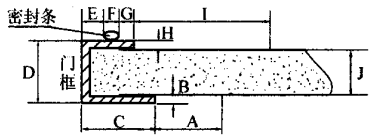


图 2 窑门横截面

Fig. 2 Cross section drawing of entrance gate of kiln

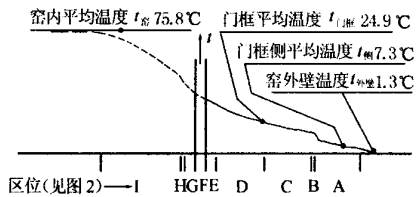


图 3 门框及相连壁板的温度曲线

Fig. 3 Temperature curve of entrance gate frame and wall sheet of kiln

根据图中标例窑实测温度,门框、门框侧、窑壁与气温差 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 分别为 24.8、7.2、1.2 °C。

1 个门框冷桥产生的热损失
 $Q_{\text{门框}} = \alpha_{\text{外}} \times [F_2 \times (\Delta t_1 - \Delta t_3) + F_4 \times (\Delta t_2 - \Delta t_3)]$
 $= 17.8 \times [3.02 \times (24.8 - 1.2) + 1.26 \times (7.2 - 1.2)] = 1403 \text{ W}$

公式中之所以要减去 Δt_3 是因为要减去板壁热传导产生的热损失。 α 在各区段不尽相同,为了简化计算,统一取为 $17.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。同时,为弥补简化所产生的误差,使 $Q_{\text{门框}}$ 有足够的精确度,可将计算值减小 10%,最终取 $Q_{\text{门框}}=1403 \text{ W} \times 0.9=1263 \text{ W}$ (相当于 $\alpha_{\text{门框}}=16.02 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$),其损失相当于 59 m^2 窑壁产生的热损失,可见门框冷桥造成的热损失是相当严重的。

2.2.2 门框冷桥热损失分析及对策

由 $Q_{\text{门框}}=k_{\text{门框}} \times F_1 \times (t_{\text{壁}}-t_{\text{气}})$ 得:
 $k_{\text{门框}}=Q_{\text{门框}}/[F_1 \times (t_{\text{壁}}-t_{\text{气}})]$
 $=1263/(0.0679 \times 75.7)$
 $=246 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

k 值是由:①外部边界情况;②内部边界情况;③材料导热系数和传热长度 3 个因素决定的。其中,第①项受构件强度、外外观感等限制,改动难度稍大,而改变第②项,即内部边界情况以减小热损失是可行的。研究表明,图 2、图 3 中 I 区是向窑外传送热能的有效通道,如果将门框与壁板之间加上 1 个绝热垫,隔断传热通道。同时,把 G 区减小到 5 mm,并在 G、H

* 本文系笔者实验报告的部分内容,文中省略了一些影响不大的传热面,故传热面积 F 的下标编号不连续。

区表面涂以绝热层。采取这些措施后,经计算, $k=35 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$,仅是原 k 值的14.2%,绝对冷桥热损失为 $0.142 \times 1263 \text{ W} = 180 \text{ W}$ 。另外,如将门框与内面板接触处的表面粗糙度提高,也可增加热阻,减小冷桥损失。

对于第③项,如果将门框材料由5 mm厚的纯铝换成2 mm厚的不锈钢,1个门框的冷桥热损失将减少至250 W以下,但加工难度增加。

2.2.3 砖混结构窑门框冷桥的热损失估算 砖混结构窑门框冷桥热损失计算较为复杂,其门框是复合材料(铝皮钢架),存有接触热阻,钢的导热系数又小,是减小冷桥热损失的有利条件,但其骨架较多,又使冷桥损失增加,粗略计算约为金属壳体窑的110%。对于对开式的大门,其冷桥造成的热损失更大,约为金属壳体窑的150%以上。

3 窑门边框的热损失

3.1 金属壳体窑大门边框冷桥的热损失

金属壳体窑与砖混结构窑窑门(大门)边框结构对比见图4。

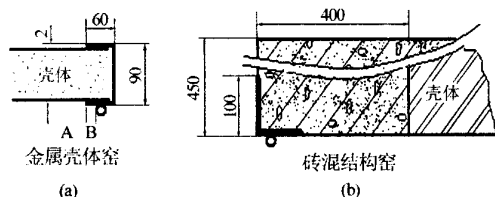


图4 金属壳体窑与砖混结构窑的大门边框结构

Fig. 4 Structure of entrance gate jamb of metal-shell kiln and brick-concrete kiln

大门边框冷桥的热损失计算方法同门框。金属壳体例窑(图4a所示)的材料为2 mm不锈钢,结构参数为:门边框外(B区)表面积 $F_6=0.238 \text{ m}^2$,门边框外侧(A区)计算面积 $F_8=1.11 \text{ m}^2$ 。门边框外面传热系数 $\alpha_{\text{门边框外}} \approx 14 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ 。实测门边框外(B区)平均温度 $t_{\text{门边框}}=25.3 \text{ C}$,门边框外侧(A区)平均温度 $t_{\text{门边框侧}}=8.1 \text{ C}$ 。由此计算出门边框、门边框侧与气温的差分别为: $\Delta t_4=25.2 \text{ C}$, $\Delta t_5=8.0 \text{ C}$,进而推算出1个门边框冷桥产生的热损失为:

$$Q_{\text{门边框}} = \alpha_{\text{门边框外}} \times [F_6 \times (\Delta t_4 - \Delta t_3) + F_8 \times (\Delta t_5 - \Delta t_3)] \\ = 14 \times [0.238 \times (25.2 - 1.2) + 1.11 \times (8 - 1.2)] = 186 \text{ W}$$

从上述计算可看出,金属壳体窑门边框冷桥热损失只有门框的1/7。原因是门边框采用2 mm厚不锈钢,导热系数低^[4,5],传热面积、散热面积又均较门框

小。减小门边框冷桥的方法同门框冷桥,但这些措施应施加于靠窑壁外侧处。

3.2 砖混结构窑大门边框冷桥的热损失

在采用厚度为8 mm的10#角钢为门边框材料(图4b)时,其冷桥热损失计算值为:

$$Q_{\text{砖门边框}} = k \times F \times (t_{\text{窑}} - t_{\text{气}}) = 54.1 \times 0.0856 \times (75.8 - 0.1) = 350 \text{ W} \quad (k \text{ 值计算见参考文献}[3])$$

砖混结构窑门边框冷桥热损失比金属壳体窑门边框大得多的原因是尺寸大、材料导热系数高。在建造干燥窑时,如果能把角钢尺寸适当减小,将会减小热损失。

3.3 砖混结构窑门边框热损失

砖混结构窑门边框(图4)常为钢筋混凝土结构,根据传热的基本公式: $Q = k \times F \times \Delta t$ 可得一个门边框热损失 $Q=818 \text{ W}$ 。减去侧壁已计算部分后,计算值为 $Q=694 \text{ W}$ 。此热损失本应归类于窑侧壁热损失,但为了分析对比,将其列于门边框热损失。

4 小门(扇)框及其门边框的热损失

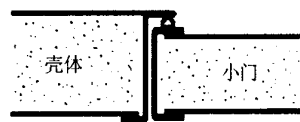


图5 操作间小门(扇)框及其门边框结构

Fig. 5 Structure of small door frame and its door jamb

根据测量数据,计算(略)出操作间小门的表面换热系数 $\alpha_{\text{小门}}=10.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ 。小门(扇)框冷桥产生的热损失:

$$Q_{\text{小门框}} = \alpha_{\text{小门}} \times [F_{10} \times (\Delta t_7 - \Delta t_3) + F_{12} \times (\Delta t_8 - \Delta t_3)] \\ = 10.5 \times [0.21 \times (22.8 - 1.2) + 0.77 \times (8.7 - 1.2)] = 108 \text{ W}$$

小门边框冷桥产生的热损失:

$$Q_{\text{小门边框}} = \alpha_{\text{小门}} \times [F_{14} \times (\Delta t_{10} - \Delta t_3) + F_{16} \times (\Delta t_{11} - \Delta t_3)] \\ = 10.5 \times [0.22 \times (11.3 - 1.2) + 0.36 \times (2.9 - 1.2)] = 29.8 \text{ W}$$

两者之和为138 W,由于小门结构与大门不同,在计算中为了方便,简化了一些问题,其实际值取235 W较为合理。降低这部分热损失的方法可参考大门框及大门边框部分,在加工中,减小小门与门边框之间的间隙也有一定效果。

5 其它冷桥热损失及地基热损失

其它冷桥热损失是指通风口、穿钉及钢轨的热损失。具体为:

(1)通风口热损失 砖混窑通风口热损失不大,暂不讨论。对金属壳体窑,考虑到风门关闭时间只占整个干燥周期的8%左右;出风口热损失主要在于湿空气带走的热量,已计入木材水分蒸发的热耗;进风口是空气从外向里流动,所以主要是计算其传热和辐射热损失;

(2)穿钉热损失 按例窑中实际应用的M8不锈钢穿钉100个计算;

(3)钢轨热损失 按4条轻轨,延伸窑外1.5 m计算。

上述三项的热损失值见表1(具体计算略)。

地基的热损失将另文讨论,但需注意的是通常使用的地、壁“1/2系数”^[6]对金属壳体窑和含有其它保温材料的砖混结构窑并不适用。为了将来便于进行比较,根据传热学的基本原理和实际施工的可能性,可将本文中例窑地基热损失统一为1 400 W,其结构、造价基本相同。

6 两种结构窑体的热损失比较

表1 两种结构窑体的热损失比较

Tab. 1 Comparison of heat-loss between metal-shell kiln and brick-concrete kiln

位置	温差 ℃	金属窑				砖混结构	
		面积 m ²	k W/m ² ·℃	热损失		窑热损失	
				W	%	W	%
1 窑壁				4400	47.4	7744	53.7
其中:侧墙	75.7	119.4	0.2826	2554	27.5		
连操作间墙	51.8	21.6	0.2826	316	3.4		
顶棚	75.7	48.5	0.2826	1038	11.2		
门扇	75.7	23.0	0.2826	492	5.3		
2 冷桥				3491	37.6	5266	36.5
其中:门框				2526	27.2		
门边框				372	4.0		
小门两框				235	2.5		
通风口				210	2.3		
穿钉				54	0.6		
钢轨				94	1.0		
3 地基				1400	15.1	1400	9.7
4 合计				9291		14410	

7 结论

上述分析可见,金属壳体木材干燥窑窑体热损失比砖混结构窑少35.5%,节能效果显著。冷桥热损失占了整个窑体热损失的37.6%,在今后设计木材干燥窑时,应给予足够的重视。

参考资料:

[1] 南京林产工业学院. 木材干燥[M]. 北京: 中国林业出版社, 1979.
[2] 朱政贤. 木材干燥[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
[3] 王补宣. 工程传热传质学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
[4] 李云倩. 传热及换热器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.
[5] 德国工艺与化学工程学会. 传热手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983.
[6] IIB 索柯洛夫. 木材干燥学[M]. 梁世镇译. 北京: 森林工业出版社, 1959.

南京艾林建筑装饰研究所

Nanjing AILIN Institute of Construction Decoration

南京艾林建筑装饰研究所是一所以高校为依托,以高科技和木材利用为特色,以继承发扬中华古木建筑的精华为己任,以木建筑、木结构、木门窗、木质装饰材料和装饰工程为研究对象,以取得高水平的科技成果和良好的社会、经济效益为目的

新型企业。

经营范围及方式:

建筑木制品及配件的设计、研究与开发、制造与销售;室内装饰工程及技术咨询、服务;室内装饰工程监理。

欢迎国内外相关企业并肩合作,委托新产品开发研究;
诚征装饰材料供应商;愿做相关产品的代理商

所长:孙友富 教授

联系人:万先生

地址:南京市龙蟠路南京林业大学364信箱

邮编:210037

Email:ailincnj@hotmail.com

电话:(025)54282228, 5427526