

木材干燥窑内部流场改进与风速均匀性研究

孟兆新¹,李 尚^{1*},肖定福¹,陈广元²

(1. 东北林业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040;2. 东北林业大学 材料科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:木材干燥窑流场均匀性是影响木材整体干燥质量与效率的主要因素。为解决木材干燥窑内部风速分布不均匀的问题,在理论研究和试验的基础上,提出增加导流板、改造窑体结构和优选材堆间隙的措施,并运用 HyperWorks 软件进行解算分析。结果表明,安装导流板、改变窑体结构以及改变材堆梯度间隙后干燥窑内部流场速度分布均匀性得到提高。仿真数据为改善木材干燥质量提供了依据,具有良好的应用前景。

关键词:木材干燥窑;HyperWorks;导流板;结构改造;材堆间隙

中图分类号:S782 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)03-0247-05

Improvement of Internal Flow Field of Wood Drying Kiln and Its Wind Speed Distribution Uniformity

MENG Zhao-xin¹,LI Shang^{1*},XIAO Ding-fu¹,CHEN Guang-yuan²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;

2. College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: Flow field uniformity of wood-drying kilns is the main factor affecting the quality and efficiency of the overall wood-drying. Aiming at solving the problem of the uneven distribution of the internal airflow of wood-drying kilns, based on the theoretical studies and experimental validations, the authors proposed the methods of adding more deflectors, restructuring kilns and optimizing the gap gradient of wood piles, which were calculated and analyzed by HyperWorks software. The simulation results demonstrated that the wind speed distribution uniformity of internal flow field of wood-drying kiln was improved after installing deflectors, restructuring of kiln and changing the gap gradient of wood piles. The simulation data would provide a basis for the improvement of the quality of wood-drying, which showed a great prospect for industrial applications.

Key words: wood drying kiln; HyperWorks; deflector; restructuring; wood pile gap

木材干燥是改善木材物理和力学性能、保障木制品的质量和使用寿命、提高木材利用率的重要工艺过程^[1]。其基本原理是利用木材的含水率梯度、温度梯度和水蒸气压力梯度,采用不同的加热方式,迫使木材中的水分以液态和气态 2 种形式由木材内部向表面迁移,通过干燥循环介质由木材表面向干燥介质蒸发,从而实现木材的干燥过程^[2-4]。干燥过程中的介质循环特性是影响木材干燥质量的主要因

素之一,为使木材干燥质量的均匀度指标达到规定的生产要求,必须形成均匀合理的干燥循环气流来保证材堆和干燥介质间良好的热质交换^[5-6]。在实际干燥过程中,由于木材干燥窑主要采用方形结构,加上干燥室气流通道较长,在窑体内部往往形成局部的高速流场和低速流场,以及各种复杂形式的湍流运动,要保证干燥介质在材堆两侧均匀分布极为困难^[7-9]。因此,为了合理控制干燥介质的流场分

收稿日期:2015-07-20 修回日期:2015-10-29

基金项目:黑龙江省自然科学基金(C201238)。

作者简介:孟兆新,男,博士,教授,研究方向:木材干燥窑耦合分析。E-mail:349325368@qq.com

* 通信作者:李 尚,男,硕士,研究方向:木材干燥窑耦合分析。E-mail:lishang130618@163.com

布,在确保干燥速度和质量的前提下,提高木材干燥效率、降低能耗,应该对干燥窑的内部流场进行数值模拟分析,以改进干燥窑的结构^[10-12]。本研究采用 HyperWorks 软件建立干燥窑模型,通过计算机仿真技术得到干燥窑内部风速分布规律,对不合理的风速分布采用不同方式加以改善,以期获得成材质量较好的循环风速,为木材干燥生产提供依据^[13]。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

樟子松(*Pinus sylvestris*),采自黑龙江省铁力林业局,树龄 10 a,平均初含水率 78.36%。试件尺寸为 1.0×0.1×0.1(m),材堆总体尺寸为 1.0×0.5×0.84(m),木材共放置 6 层。

干燥设备:NM-F03 型试验用顶风式蒸汽除湿木材干燥窑,装材容积:0.25 m³;电机功率:0.55 kW;喷淋电机功率:0.75 kW;加热总功率:8 kW;干燥窑结构尺寸为 2.0×1.08×1.08(m)。其他测量工具:温湿度仪、ZRQF 智能风速计、电锯、电子天平、游标卡尺、钢卷尺、钢直尺等。

1.2 试验方法

1.2.1 材料处理 选取优质原木,按照制材要求将其锯成 1.0×0.1×0.1(m)规格并刨光,共 30 块;隔条尺寸为 0.5×0.04×0.04(m),共 12 根。在每块木材距离端部 0.3 m 的位置钻 2 个小孔作为材芯温度的测量口,并连接好温度测量仪。为防止木材水分从两个端面流失,在每一块试材两端均用硅胶密封。

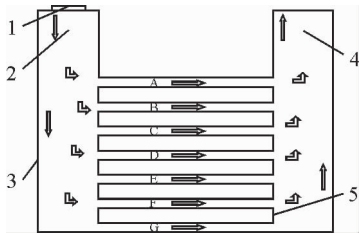
材堆安放:先在干燥窑底部铺设两根隔条并找正,再放置第 1 层木材,共 5 块,依此类堆,每层木材之间均放置两根隔条,直到放置完 6 层木材。

采用蒸汽除湿的干燥法,总干燥用时 600 h。每隔 2 h 用风速计测量 1 次材堆间隙中的循环风速,风速检测位置为每层材堆的进风口附近。为了保证测量数据的准确度,本次试验采取测量材堆左右 3 处位置的风速再取平均值的方法。

1.2.2 建立干燥窑模型 采用 HyperMesh 软件建立干燥窑的几何模型并划分网格,该软件是一个高效的有限元前处理软件,它可以帮助用户在交互可视化环境中建立有限元模型并划分优质网格。在建立干燥窑几何模型的过程中,由于内部风速在纵向截面内分布类似,为简化计算和降低仿真分析难度,因此,截取干燥窑纵向的中面位置建立二维模型,这并不会影响对干燥窑内部风速场的后续研究。同时,为了验证仿真数据的正确性,试验中在材堆距

入风口 0.3 m 位置设立风速检测点,简化后的干燥窑几何模型如图 1 所示。

干燥窑几何模型建立后,运用 Automesh 网格划分工具生成网格模型。通常复杂表面的 2D 网格划分,首先需要根据面的形状以及构件的特征将面分割为便于控制和划分的一些小面。再从一个面入手进行分网,接着划分与其相连的面,以保证网格的连续性。为获得高质量网格和保证网格的连续性,同时考虑到材堆间隙较小,需要对划分的一次网格在材堆间隙处进行加密处理。由于网格的质量对后处理的影响很大,最后还需使用 check elems 面板检查网格质量,最后得到的干燥窑网格模型如图 2 所示。



注:1. 风机,2. 进风口,3. 窑壁,4. 出风口,5. 材堆;A~G 表示各风速检测点位置。

图 1 干燥窑模型
Fig. 1 Model of drying kiln

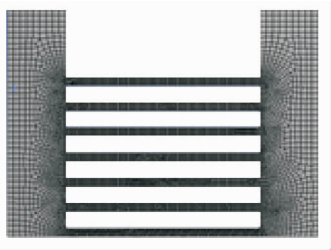


图 2 网格模型
Fig. 2 Grid model

网格划分完成后,还需进行几何清理,之后依次建立材料卡片、建立几何、单元集、划分单元、单元检查与优化、建立载荷集、施加载荷、建立载荷工况、设置计算参数、输出有限元文件、求解器求解、进行后处理^[14]。在边界条件设置、载荷和材料的定义时,选择进风口作为速度入口,速度大小为 2 m·s⁻¹,方向垂直向下;由于出风口的速度条件未知,将出风口定义成自由出口;剩下的窑体和材堆边界作为约束条件,内部的材料选定为空气,并设置相关参数。

1.2.3 数学模型 采用 2 m·s⁻¹ 的定向循环风速,研究等温等湿条件下干燥介质的分布情况,内部流体可视为不可压缩的湍流,采用标准的 *k*- ϵ 模型分析。相关的数学方程如下^[15-16]:

连续方程: $\partial \mu_i / \partial x_i = 0$ (1)

动量方程: $\frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}$

$\left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i$ (2)

式中: u 为窑内气流速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ 为窑内空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); μ 为动力黏度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P 为空气静压 (Pa); g 为重力加速度 ($\text{kg} \cdot \text{ms}^{-2}$)。

(3) 湍动能 k 和耗散率 ϵ 的输运方程:

$\frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon$ (3)

$\frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho c_1 E \epsilon - \rho c_2$

$\frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}}$ (4)

式中: u_i, u_j 分别为 x_i, x_j 方向的时均速度; x_i 为直角坐标系的 3 个坐标轴; μ_t 为湍动黏度 (Pa/s); v 为运动黏度 (m^2/s); E 为时均应变张力 ($E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $E = (2E_{ij}E_{ji})^{\frac{1}{2}}$)。经验常数: $c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$ 。

2 结果与分析

2.1 原干燥窑内部流场分析

将网格模型在 Radioss 下进行有限元求解, 将 HyperWorks 自带的 $k-\epsilon$ 湍流模型按经验常数进行参数修正并解算, 在 HyperView 中进行后处理得到干燥窑内部风速分布云图(图 3)。将模拟得到的数值表结果和试验测量值对比(图 4)表明, 二者数值非常接近, 说明模拟结果与实际情况相符合。

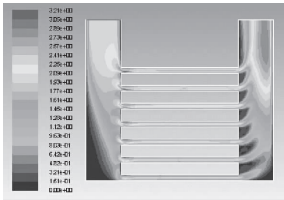


图 3 风速云图

Fig. 3 The wind velocity contour

普通干燥窑内材堆间隙中的风速由上往下呈递减趋势, 最高风速 A 点为 $2.79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最低风速 G 点为 $1.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度变化很大, 使得木材不能均匀干燥, 质量差。从进风口吹入的湿热空气大部分直接从材堆顶部流走, 没有充分进入材堆间隙, 造成中下部分的风速过低。另一方面, 从整个干燥窑来

看, 左下方范围内风速很低, 右下方也存在类似问题, 而右上方的出风口附近又形成局部的高速流场, 该部分的能量损失大, 降低了干燥效率。为解决上述材堆间隙风速分布不均匀以及能量损耗的问题, 需要改善干燥窑的结构和材堆摆放形式来提高干燥效率, 使湿热空气均匀地流过材堆缝隙。

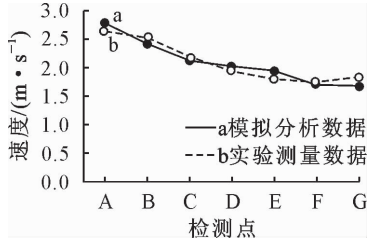


图 4 模拟和实测数据对比

Fig. 4 Comparison between simulated and measured data

2.2 改进后的干燥窑内部流场分析

2.2.1 安装导流板 在干燥窑内部增加导流板后, 需要重新建立干燥窑模型并划分网格, 最后才能求解计算得到速度分布。经过多次调整导流板的安放位置和倾斜角度, 最后得到合适的导流板布置方式以及干燥窑内部的风速分布云图(图 5)。在干燥窑左侧位置适当安装导流板可以显著提高风速分布的均匀性, 各检测点最大风速 B 点速度为 $2.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小风速 E 点和 G 点均为 $2.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在左侧安装导流板主要只是改变了窑内进风口附近的流场, 出风口附近的高速流场依然存在, 材堆顶部风速也比底部偏高。在干燥窑出风口下方也安装合适的导流板来解决这一问题。经多次调整右侧导流板的安装方式, 得到较好的速度分布(图 6)可以看出, 右侧安装导流板后可以明显改善材堆出风口附近的流动情况, 但对材堆间隙风速的均匀性影响不大, 材堆间隙处最高风速 E 点为 $2.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最低风速 B 点为 $2.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.2 改变干燥窑结构 原干燥窑底部两侧都形成局部低速场, 其速度低于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。现采用将方形干燥窑底部两侧设计成斜面的方法对其加以改进, 经多次试验后得到合适的倾斜角度为, 左侧斜面与地面成 60° 、右侧 45° 左右时效果最好。改变干燥窑外形结构时得到的流场分布情况(图 7), 分析比较图 7 和图 8 得知, 改进后材堆顶部风速减小, 而底部风速增大, 大幅度提高了整个流场的均匀性, 各检测点最高风速 A 点降低至 $2.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最低风速 D 点为 $2.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 流过材堆的风速都保持在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近。

2.2.3 改变材堆间隙 采用 5 种材堆梯度间隙建立模型讨论改变间隙对风速分布的影响性, 从最上

面的间隙到最下面的间隙依次增加 1.5、1.3、1.1、1.0、0.9 mm 和 0.7 mm,最后经过求解及后处理得

到的风速分布云(图 9),改变材堆间隙前的实际数据与改变材堆间隙后的模拟数据(图 10)。

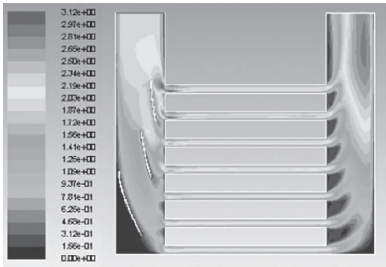


图 5 左侧安装导流板的风速云

Fig. 5 The wind velocity contour of the guide plate installed on left side

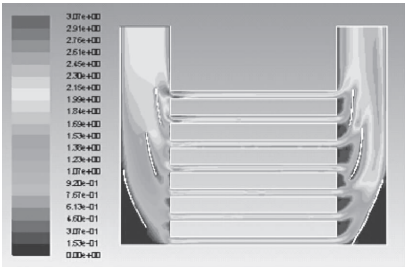


图 6 两侧同时安装导流板的风速云

Fig. 6 The wind velocity contour of the guide plate installed on both sides

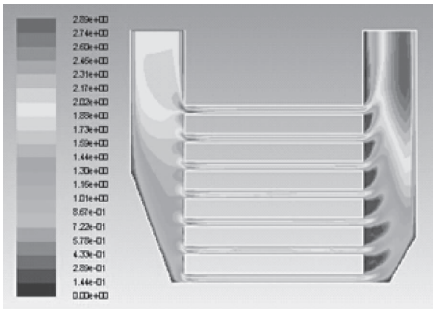


图 7 底部增加斜面的风速云

Fig. 7 The wind velocity contour after adding inclined plane

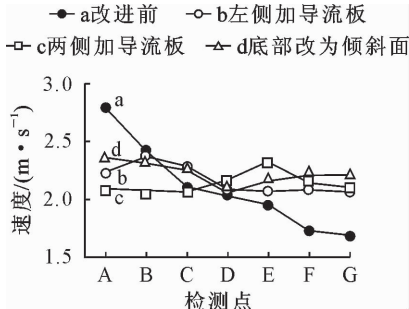


图 8 结构改进前后仿真数据对比

Fig. 8 Comparison of simulation data before and after construction

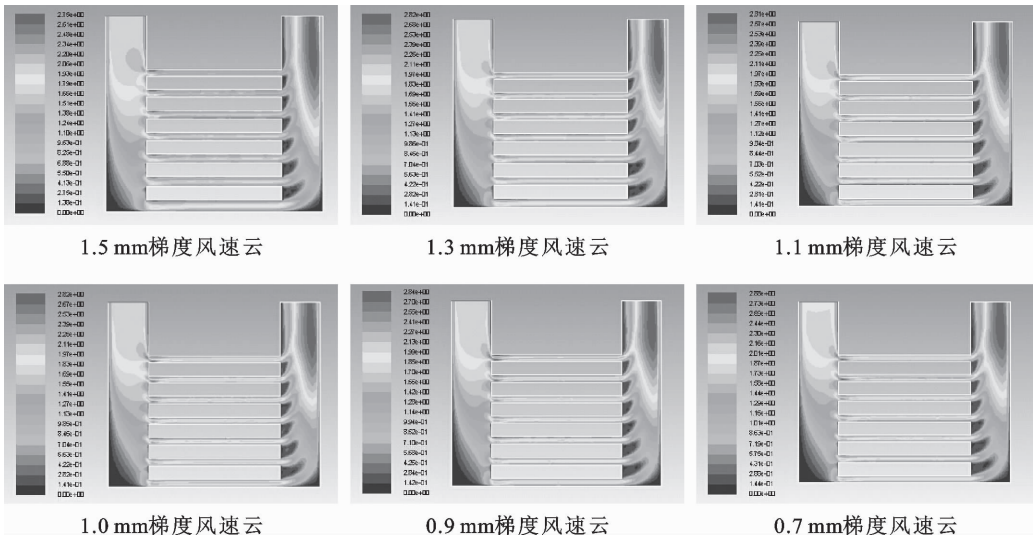


图 9 改变材堆梯度间隙下的风速云图

Fig. 9 The wind velocity contours of gap of wood piles changed

比较 6 种不同梯度间隙条件下的模拟结果可知,在 1.5 mm 和 1.3 mm 的梯度下,由于底部间隙过大,造成上面 4 层材堆中风速明显偏低;在 1.1 mm 和 1.0 mm 梯度下风速分布都很均匀,但是平均风速的大小却有较大差异,1.1 mm 梯度下平均风速保持在 $1.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近,1.0 mm 梯度下平均风速为 $2.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;如果继续减小梯度值,在

0.9 mm 和 0.7 mm 条件下,显然又造成上部分的风速过大。

3 结论与讨论

安装导流板、改变干燥窑结构和改变材堆间隙都对木材干燥窑内部流场的均匀分布有明显影响。在干燥窑进风口一侧安装适当形式的导流板可

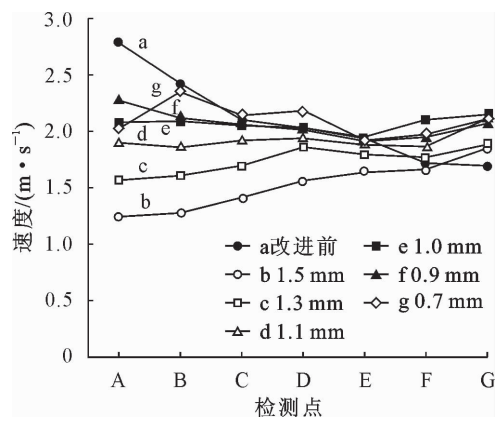


图 10 不同梯度间隙下仿真数据对比

Fig. 10 Comparison of simulation data with different gap of wood piles

以明显改善内部风速的均匀性,对风速大小的影响也较小,能够同时兼顾干燥质量与干燥效率。改变干燥窑结构,将窑体底部变成适当角度的倾斜面后,材堆间隙的风速均匀性大幅度提高,对改善木材的干燥质量有显著效果。通过比较不同梯度间隙下材堆内部风速的分布规律可以得出结论,在 1.0 mm 左右的梯度间隙下可以得到非常均匀的流场分布。该方法是利用材堆自身的不同布置形式来改变内部风速的分布,不需要对干燥窑结构做任何改变,是一种简单有效的方法,也是木材干燥中具有可操作性的新方案。

在实际生产过程中可以对每种方案的利弊综合考虑,同时采用几种方法进行联合干燥,这将有助于木材干燥理论的进一步深化研究,在实际应用中也能起到一定的参考作用。

参考文献:

[1] 王喜明. 木材干燥学[M]. 北京:中国林业出版社,2007.
[2] 张璧光. 实用木材干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
[3] 高建民. 木材干燥学[M]. 北京:科学出版社,2008.
[4] 张英杰,窦延光. 毛白杨防腐处理材干燥工艺[J]. 西北林学院学报,2013,28(3):194-197.
ZHANG Y J, DOU Y G. Drying technology for preservative-treated *Populus tomentosa* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013,28(3):194-197. (in Chinese)
[5] 孟兆新. 木材干燥的多场耦合建模仿真与优化研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011.
[6] 李磊,陈广元,李明君. 多级弧形板导流装置及其对木材干燥室介质循环均匀性的改善[J]. 东北林业大学学报,2010,38(5):128-130.

LI L, CHEN G Y, LI M J. Multileve curved plate airflow guiding device and its improvement on the uniformity of medium circulating in timber-drying kiln[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010,38(5):128-130. (in Chinese)
[7] 丁馨曾,赵海龙,申珂楠,等. 声发射技术在木材干燥中的应用与发展[J]. 西北林学院学报,2015,30(3):242-244.
DING X Z, ZHAO H L, SHEN K N, et al. Application of a-coustic emission technique in wood drying [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015,30(3):242-244. (in Chinese)
[8] 刘宏达,高建民,陈瑶. 预热处理对改善尾巨桉木材干缩性和材色的研究[J]. 西北林学院学报,2014,30(5):176-180.
LIU H D, GAO J M, CHEN Y. Effects of pre-heat treatment on improving the shrinkage and color of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014,30(5):176-180. (in Chinese)
[9] 潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
[10] 张明辉,李新宇,周云洁,等. 利用时域核磁共振研究木材干燥过程水分状态变化[J]. 林业科学,2014,50(12):109-113.
ZHANG M H, LI X Y, ZHOU Y J, et al. Water status change in wood drying studied by time-domain NMR[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014,50(12):109-113. (in Chinese)
[11] 张力,胡传坤,高建民,等. 太阳能与双热源热泵组合干燥落叶松[J]. 东北林业大学学报,2014,42(12):141-144.
ZHANG L, HU C K, GAO J M, et al. Solar energy and dual-source heat pump combined drying system on larch[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014,42(12):141-144. (in Chinese)
[12] 黄琼涛,熊先青,孙宏南,等. 木业企业干燥工段的综合节能措施[J]. 木材工业,2012,26(3):51-54.
HUANG Q T, XIONG X Q, SUN H N, et al. Reducing energy consumption during wood drying[J]. China Wood Industry, 2012,26(3):51-54. (in Chinese)
[13] 茹煜,贾志成,郁金. 基于 Fluent 软件的木材干燥窑内部流场分析研究[J]. 木材加工机械,2010(4):12-15.
RU Y, JIA Z C, YU J. Research on internal flow field of wood-drying kilns by fluent software[J]. Wood Processing Machinery, 2010(4):12-15. (in Chinese)
[14] 王钰栋,金磊,洪清泉. Hyper Mesh & HyperView 应用技巧与高级实例[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
[15] 朱政贤. 木材干燥[M]. 北京:中国林业出版社,1992.
[16] 孟兆新,于彪,李尚,等. 基于热流耦合的木材干燥窑风速温度分布解算[J]. 森林工程,2015,31(1):49-53.
MENG Z X, YU B, LI S, et al. Calculation of temperature and wind speed distribution in wood drying kiln based on the heat flow coupling[J]. Forest Engineering, 2015,31(1):49-53. (in Chinese)