

牧草草捆的干燥效率研究

杨家幸*, 吴仁智#, 秦磊, 周凡

同济大学机械与能源工程学院, 上海

收稿日期: 2021年12月17日; 录用日期: 2022年1月13日; 发布日期: 2022年1月20日

摘要

针对牧草缓慢自然风干营养物质损失的问题, 本文提出以草捆为单位进行干燥的新型牧草干燥设备, 通过实验和仿真进行了牧草草捆的干燥效率影响因素的研究。本文采用人工试验台对初始含水率为35%左右的草捆进行了实验, 利用Fluent软件建立了基于多孔介质的草捆模型, 研究了牧草草捆含水率变化的影响因子。结果表明: 草捆随时间的含水率变化基本遵循指数规律递减。对于给定的草捆, 通过新型牧草干燥设备大约15分钟持续干燥, 草捆的含水率会从35%降低到20%。提出了一个草捆的数学干燥模型, 为后续牧草草捆的干燥研究和设备研发提供参考。

关键词

牧草干燥, Fluent, 仿真分析, 多孔介质

Study on the Drying Efficiency of Hay Bales

Jiaxing Yang*, Renzhi Wu#, Lei Qin, Fan Zhou

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Dec. 17th, 2021; accepted: Jan. 13th, 2022; published: Jan. 20th, 2022

Abstract

Aiming at the problem of the loss of nutrients in the slow natural air drying of the forage, this paper proposes a new type of forage drying equipment that uses the bale as a unit to dry the forage. Through experiments and simulations, the research on the factors affecting the drying efficiency of the forage bale is carried out. In this paper, an artificial test rig is used to experiment with a bale

*第一作者。

#通讯作者。

with an initial moisture content of about 35%. A model of the bale based on porous media is established using Fluent software to study the influence factors of the change in the moisture content of the forage bale. The results show that the moisture content of the bale with time basically follows an exponential law to decrease. For a given bale, the moisture content of the bale will be reduced from 35% to 20% through the continuous drying of the new pasture drying equipment for about 15 minutes. A mathematical drying model of straw bales is proposed to provide reference for the subsequent drying research and equipment development of forage bales.

Keywords

Hay Drying, Fluent, Simulation Analysis, Porous Media

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入 21 世纪以来,随着居民可支配收入的增加,居民的日常饮食营养结构得到进一步改善,肉蛋奶消费在人们消费结构中的比重不断增加[1]。肉蛋奶需求的持续增长离不开畜牧业现代化的支持,而充足的饲料,畜牧业稳定高速发展的先决条件。牧草收割后如果没有快速进行干燥,则会造成营养物质的损失,最高可达 35%~100%,不仅如此,缓慢的自然风干还可能会滋生对家畜有毒害的真菌、放线菌等杂菌[2]。纵观国内外牧草高温快速干燥设备的研发及应用情况,以转筒式牧草干燥设备为主。转筒式牧草干燥设备比较占据空间且安装复杂,并且都是在牧草烘干后进行捆扎[3]。若牧草烘干扎捆后发生返潮,则无法再次进行烘干贮存。在进行大机械化生产的方式下,新型牧草烘干机可以配合捆扎机随时随地针对牧草捆进行干燥,并且移动方便。本文作者通过实验和 Fluent 仿真验证新型移动式针孔烘干机能有效干燥收割苜蓿的水分,并对影响烘干效率的实验因素进行了探究。

2. 牧草干燥设备结构和原理

牧草干燥技术包括自然干燥方法、人工干燥方法和物理化学干燥法[4]。常见牧草干燥方法包括地面干燥法、草架干燥法、发酵干燥法、机械压碎脱水干燥法、常温通风干燥法、低温烘干法、高温快速干燥法和太阳能干燥法。国内外牧草机械化干燥方式包括田间直接干燥和收获后干燥两部分,通过烘干机对牧草的干燥一般是在收获后进行[5]。国内外常用的牧草机械化干燥理论包括了牧草薄层干燥理论、深床苜蓿干燥理论、红外或微波等辐射传热干燥理论、过热蒸汽干燥理论、太阳能干燥技术、高温热风干燥理论等[6]。

2.1. 传统牧草烘干机结构和原理

目前,国内人工干燥牧草设备主要有转筒式饲草干燥机、93QH 系列燃煤牧草干燥机组、93QH 系列干燥机组、93QH-1000 型燃油(气)牧草干燥机组,均采用燃油、燃煤和燃气作为主要能源。传统牧草烘干机为三层回转滚筒结构,设备产量大、高效节能、可以将牧草水分烘干到 14%~18% [7]。

以图 1 HYG-B 型苜蓿草烘干设备为例,传统牧草烘干流程如下:首先牧草通过螺旋输送机进入由进料口送入滚筒,实现顺流烘干,牧草在内层的抄板下不断抄起、散落呈螺旋行进式前进,经过内、中、外三层,实现牧草和热风质热交换,达到干燥效果的牧草在风力作用下快速行进排出滚筒,没有达到干

干燥效果的湿牧草因自重而不能快速行进，牧草在控制行程内进行充分干燥，由此达到干燥效果，牧草水分降低到 14%~18%，完成干燥过程，由螺旋输送机排出。

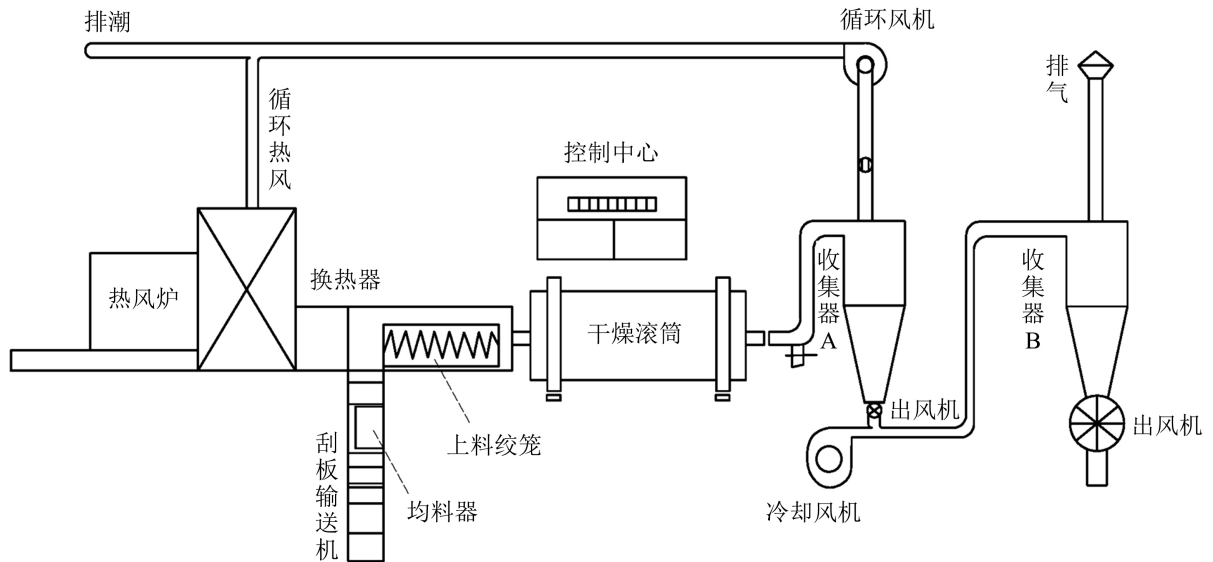
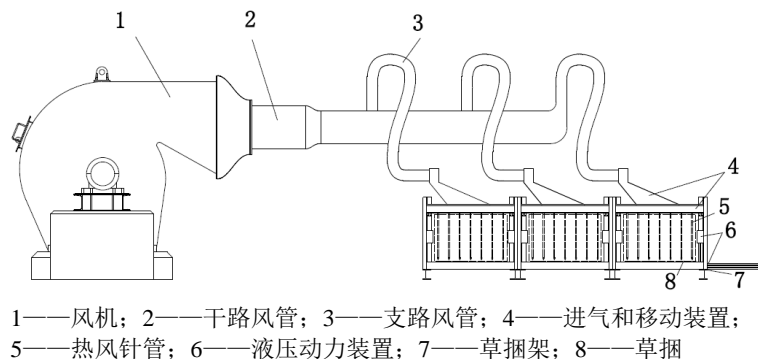


Figure 1. HYG-B alfalfa drying equipment
图 1. HYG-B 型苜蓿草烘干设备[8]

2.2. 新型草捆干燥设备结构和原理

如何使用草捆进行干燥，对接机械化生产，国内也做了一些研究。苜蓿李海龙[9]结合热风循环干燥特性和捡拾打捆工艺，研究了苜蓿草捆合理干燥工艺参数。赵炬锋[10]提出在苜蓿草捆中心处加负压装置、间歇性干燥草捆等概念方案，应用 Fluent 仿真软件，分别对上下进风干燥方式、横纵两向进风干燥苜蓿草捆方式等五种干燥方式进行了仿真，得出了内部中空两向进风模型为最优模型。苜蓿李媛媛[11]苜蓿使用远红外组合干燥试试台，研究了各种因素对苜蓿草干燥过程的影响及其变化规律。钱珊珠[12]利用太阳能干燥台太阳能干燥试验，研究了苜蓿草捆在太阳能干燥过程中干燥介质状态和草捆状态与干燥速率及干燥特性间的关系。

本文所研究的草捆牧草干燥设备采用自内向外的进风方式，可同时配置一组三个的烘干机位，便于移动，可以随时随地对牧草草捆进行干燥。其结构如图 2 所示。



1——风机；2——干路风管；3——支路风管；4——进气和移动装置；
5——热风针管；6——液动力装置；7——草捆架；8——草捆

Figure 2. New type of forage drying equipment structure
图 2. 新型牧草干燥设备结构

加热过的空气从风机吹出后，经过均匀送风管道送入各个烘干机位。热空气从引导装置分散进入到各个热风针管，最终从针管上的孔中进入草垛。热空气从草垛到大气过程中会携带草垛中的水分，在热能和动能的双重作用下，使草垛的含水率下降。相较于传统的牧草干燥设备，热空气直接与草垛接触，与大气的热交换减少，能量利用效率得到了提升。

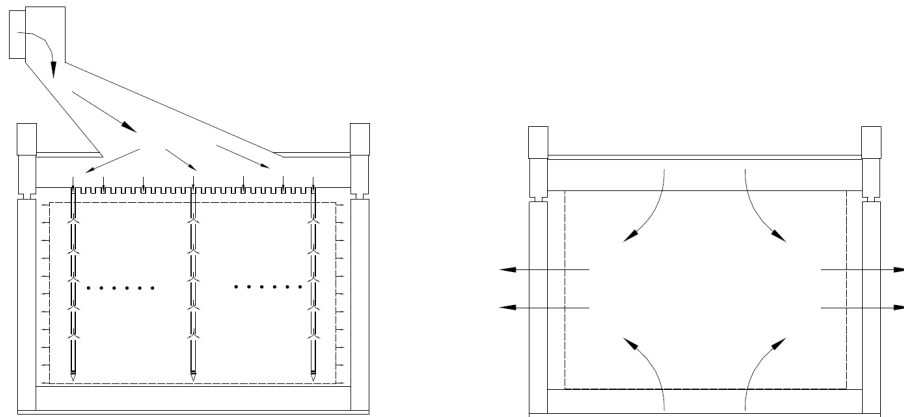


Figure 3. Comparison of two kinds of bale drying equipment
图 3. 两种草捆干燥设备对比

同时和图 3 另一种草捆干燥机构对比，当热空气通过送风管道传输到指定机位时，热空气是通过草垛的上下两面进入，由于牧草内阻力较大，这种方式热空气是从草垛外 - 草垛内 - 草垛外方式。本文所探讨的新型牧草烘干设备，热空气是从草垛内 - 草垛外，明显能够更容易实现热空气对整个草垛的烘干。

3. 牧草草捆的多孔介质化建模

3.1. 数值模拟方法

3.1.1. 控制方程

计算流体力学是在控制方程的下对流体进行传热、传质、动量进行研究的。对草捆的干燥过程模拟需要建立在质量守恒、动量守恒、能量守恒的这些条件下。需要满足连续性方程，动量守恒方程[13]。

流体力学中连续性方程是质量守恒定律的表述形式。相同单位时间中单位流体微元体质量的增加与通过单位时间内流入该微元体的净质量相同，即为连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

式中： u 、 v 、 w 为 x 、 y 、 z 方向上的分量。

微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上各种力的和，即为动量守恒方程：

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_u \tag{2-1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_v \tag{2-2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_w \tag{2-3}$$

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； μ 为流体的动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； t 为时间， s ； P 为空气压力， Pa ； S_u 为 x 方向的广义源项； S_v 为 y 方向的广义源项； S_w 为 z 方向的广义源项[14]。

3.1.2. 湍流模型

流体运动分为层流和湍流两种状态，若流体是内部流，当雷诺数大于 2300 时流体即为湍流。由于湍流运动在物理上是近乎无穷多尺度漩涡流动且在数学上具有强烈非线性，因此其具有高度复杂性，依靠现有的理论和技术很难对其进行准确的模拟。Fluent 提供了许多湍流模型，比较常用的有 Spalart-Allmaras 模型、standard k- ϵ 模型、RNG k- ϵ 模型、Realizable k- ϵ 模型。本文采用的 standard k- ϵ 模型[15]。

3.1.3. 多孔介质模型

多孔介质，即是指多孔固体骨架构成的空隙空间中充满单相或多相非固体介质。多孔介质的骨架之间的孔隙互相连通，其内的介质可以是气相、液相流体或气液两相流体。空隙尺寸微小，比面积数值大，是多孔介质的主要物理特征。多孔介质处处可见，如土壤、沙、砂岩、金属泡沫、海绵、面包、人体肝脏等。本文所研究的牧草草捆也属于多孔介质[16]。

关于多孔介质的传热传质研究中，经常会涉及到以下基本参数：

孔隙率：是指多孔介质内的微小空隙的总体积与该多孔介质的总体积的比值。

比面：是指多孔介质总容积 V 与固体骨架总表面积 A_s 之比。

渗透率：表述在一定流动驱动力下，流体通过多孔材料的难易程度，它表达了多孔介质对流体的传输性能。渗透率通过达西定律来定义：

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

式中： $\frac{\partial P}{\partial x}$ ——流动方向的压力梯度；

k ——渗透率；

μ ——流体的黏度。

在多孔介质中，固体骨架是静态的而流体是流动的。两者之间存在相对运动。流体与固体表面之间会形成“边界层”。流体在该“边界层”产生的速度梯度和粘性力，称之为粘性阻力。而由流体做非定常流动或运动物体在物体重的加速度所引起的阻力称为惯性阻力。

在 Fluent 商用软件中，粘性阻力系数和惯性阻力系数是用来衡量多孔介质中粘性阻力和惯性阻力大小的具体参数。这两个系数可以用 Ergun 公式来近似求解：[17] [18] [19]

$$\alpha = -\frac{D_p^2}{150} \cdot \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (3)$$

式中： α ——粘性阻力系数；

C_2 ——惯性阻力系数；

ϵ ——孔隙率；

D_p ——固体骨架的体积当量直径。

对多孔介质内的传热过程分析可知，它包括固体骨架(颗粒)之间相互接触及空隙中流体的导热过程，

空隙中流体的对流换热, 固体骨架(颗粒)或气体间的辐射换热。

多孔介质传质过程主要包含以下两方面:

1) 分子扩散。这是由于流体分子的无规则随机运动或固体微观粒子的运动而引起的质量传递, 它与热量传递中的导热机理相对应。

2) 对流传质。这是由于流体的宏观运动而引起的质量传递, 与热量传递中的对流换热相对应[16]。

3.2. 草捆干燥模型

整个草捆可视为牧草, 牧草中的自由水与间隙构成的多孔介质, 同时牧草本身又可视为牧草干物质与结合水构成的多孔介质, 因此, 牧草的干燥实际上是一个双重多孔介质的传热传质模型。为方便计算与仿真, 将草捆内部视为一个均匀分布的各向同性的状态, 整个草捆视为一个整体的多孔介质。为模拟草捆内部的真实的传热传质过程, 仿真多孔介质定义为木质。草捆内部水分包含两个相态, 液态水模拟被束缚在草捆的水分, 气态水模拟经过蒸发后被气流带走和自然蒸发的水蒸气。热风通过草捆内的入口以定速吹入, 整个草捆的外表面视为与空气接触, 作为出口。其他根据仿真要求设置[20]。

4. 牧草草捆干燥过程和仿真

本文着重解决牧草烘干过程中烘干效率的研究, 从表征看, 旨在获取不同因素下苜蓿草捆的含水率从 35% 降到 20% 以下的时间。从牧草烘干过程的理论分析中可知, 这中间能够影响到的因素有: 热风温度, 热风速度, 烘干时间。同时由于生产用牧草草捆体积较大, 实验验证所使用的牧草草捆是采用体积更小的牧草捆。因此为了得到与实际相接近的规律, 需要使用合适的热风针比拟真实的牧草烘干过程。鉴于热风针上孔的分布可能影响气流的流动, 因此热风针的结构也是能够影响干燥过程的因素。考虑到热风针结构可变化因素较多, 为了能够较好地探究实际牧草的干燥过程, 采用单位体积热风面积(热风出流面积/牧草体积的比值)作为探究因素。

最终通过比较干燥时间 t (min), 探究热风温度 t ($^{\circ}\text{C}$), 热风流速 v (kg/s), 单位体积热风面积 Ω (1/m) 对干燥过程的影响。

4.1. 牧草草捆干燥实验研究

实验的物料准备:

- 苜蓿草捆 $600 \times 500 \times 400$ mm
- 热风针若干
- 燃烧炉
- 风机 RT-H62122BS 380V/220V
- 进气管架, 风管

实验设备搭建如图 4 所示。单根热风针上有热风孔 20 个, 每个热风孔直径为 12 mm。其他实验参数如表 1 所示。

Table 1. Experimental parameters

表 1. 实验参数

草捆密度 kg/m^3	草捆初始质量 kg	草捆含水率	风机风量 m^3/h	环境温度 $^{\circ}\text{C}$	环境湿度	热风平均温度 $^{\circ}\text{C}$
175	21	30%	270	20~25	23%	70~80



Figure 4. Pasture bale drying experiment
图 4. 牧草草捆干燥实验

通过间隔相同时间测定干燥过程中草捆的质量得到牧草草捆含水率随时间的变化。分别使用一根热风针管，三根热风针管，七根热风针管进行若干次干燥实验。连接这些点绘制样条曲线如图 5 所示。

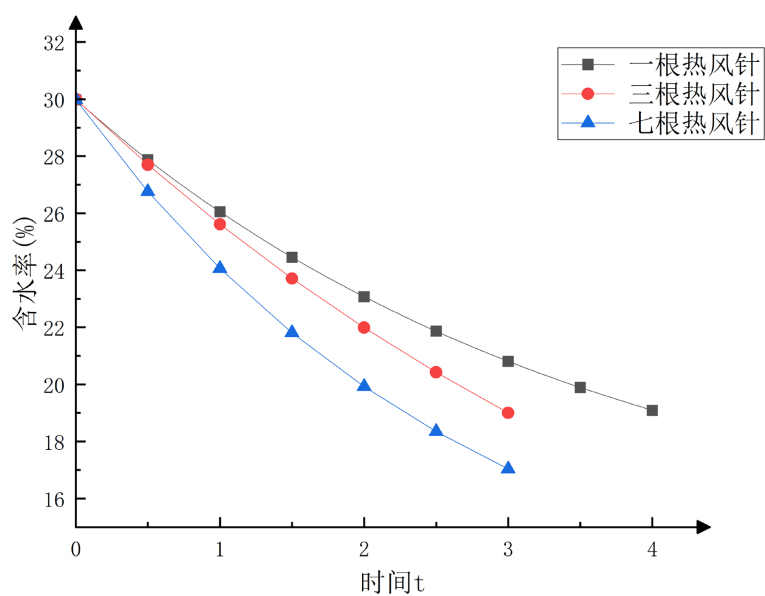


Figure 5. Bale drying experiment results
图 5. 草捆干燥实验结果

可以看到热风温度随时间的变化基本符合指数规律递减。

实验过程中发现热风温度不能稳定，在 70℃~80℃之间浮动，同时由于导热系数较好，与空气热交

换较多，故而送风架入口热风温度可能还要低。同时因为密封性问题，实际风量可能要低于风机额定风量。

4.2. 牧草草捆干燥仿真研究

采用 Solid Works 软件建立牧草草捆设备模型，建模过程中适当简化入口和出口。最终导入 ICEM 软件并进行网格划分，均采用非结构化网格，并在入口和接触面进行网格细分，如图 6 所示。最终网格数量在 300 万到 500 万之间分布。

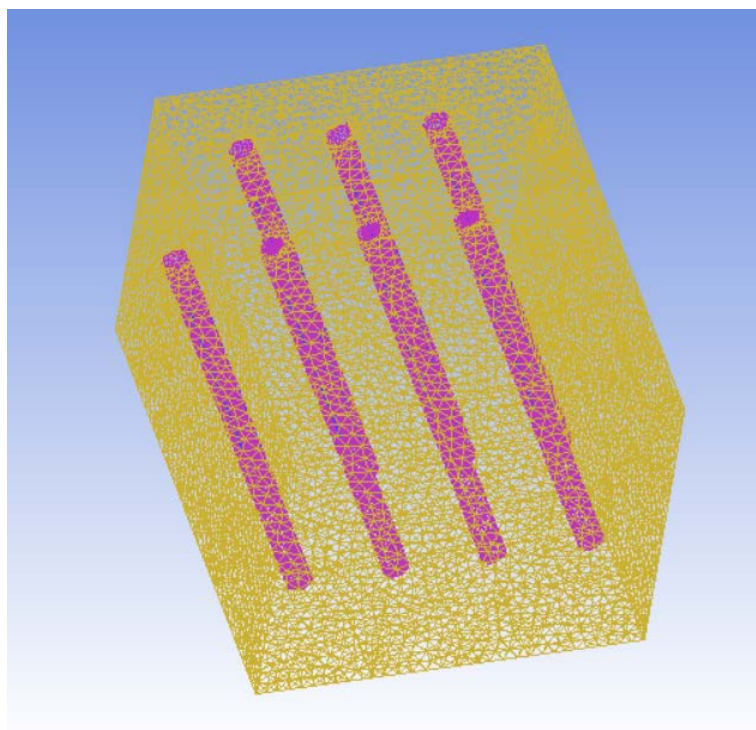


Figure 6. Pasture bale drying model grid
图 6. 牧草草捆干燥模型网格

4.2.1. 中文作者信息不同单位体积热风面积的草捆干燥效率

本次仿真基础实验因素为热风流量 0.2 kg/s ，热风温度为 373 K ，三次实验所用热风针管分别为单根圆热风针管，三根热风针管，七根热风针管。

从图 7 可以看出，随着热风针数量的增加，牧草草捆干燥的时间明显下降。一根热风针管的出流热风面积为 0.0026 m^2 ，三根热风针管的热风出流面积为 0.0078 m^2 ，七根热风针管的热风出流面积为 0.0182 m^2 。牧草草捆体积 0.12 m^3 。通过换算最终得到不同单位体积热风面积 Ω 与干燥时间的关系。

4.2.2. 不同温度的草捆干燥效率

在关于热风温度的仿真过程中，三次均采用七根热风针干燥，热风流量为本次仿真基础实验因素为热风流量 0.2 kg/s ，热风温度分别为 80°C ， 90°C ， 100°C 。

从图 8 可以看出，随着热风温度上升，干燥时间得到明显的缩短。但同时也看出再提升相等的温度，干燥时间并没有保持等量的减少，说明热风温度对干燥效率的提升是有限的，通过提升热风温度提高干燥效率的做法需要综合考虑能源的损耗与干燥效率的提升。

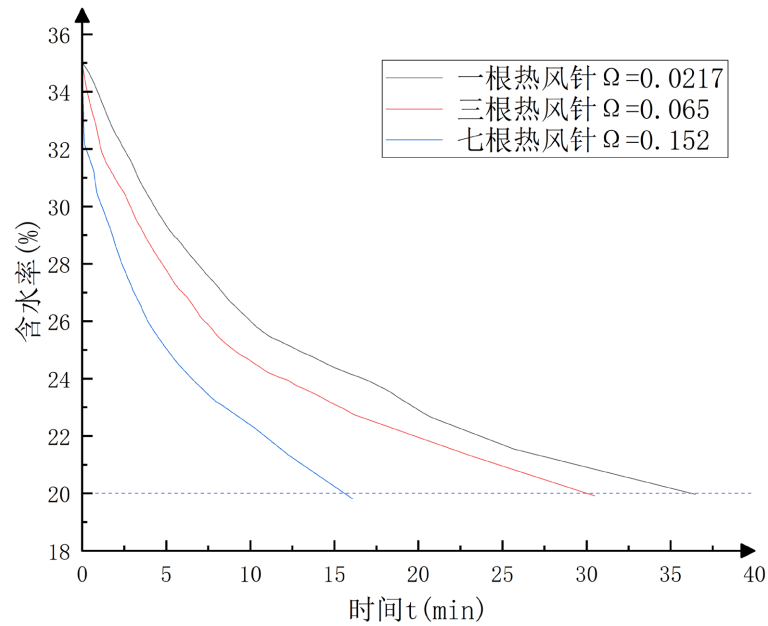


Figure 7. Bale drying efficiency of different unit volume hot air area
图 7. 不同单位体积热风面积草捆干燥效率

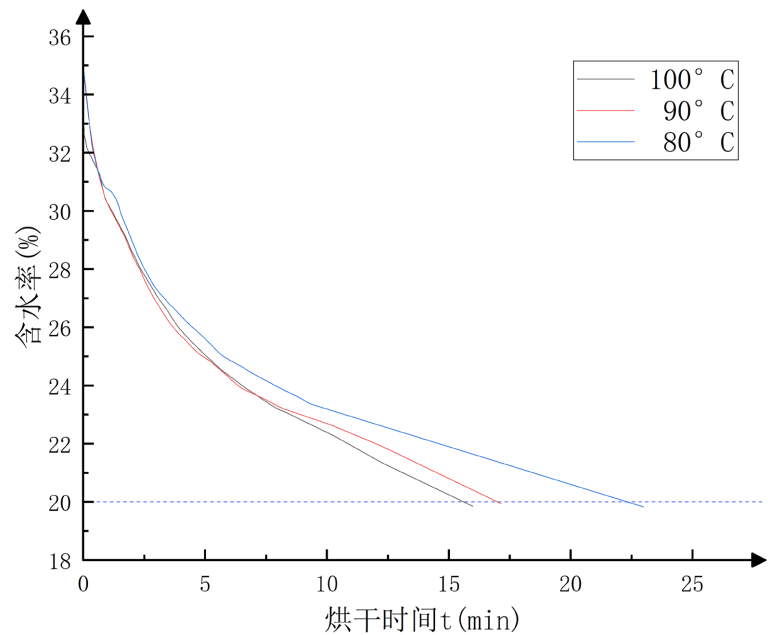


Figure 8. Bale drying efficiency at different temperatures
图 8. 不同温度草捆干燥效率

4.2.3. 不同热风速度的草捆干燥效率

在关于热风速度与干燥效率的仿真中，三次均采用七根热风针干燥，热风流量为热风温度分别为 373 K，热风流量分别为 0.2 kg/s，0.5 kg/s，0.8 kg/s。

从图 9 可以看出，随着热风速度上升，干燥时间得到明显的缩短。而且提升热风速度在较大范围内对干燥速度保持稳定的正效益。因此可以通过持热风温度提高干燥效率。

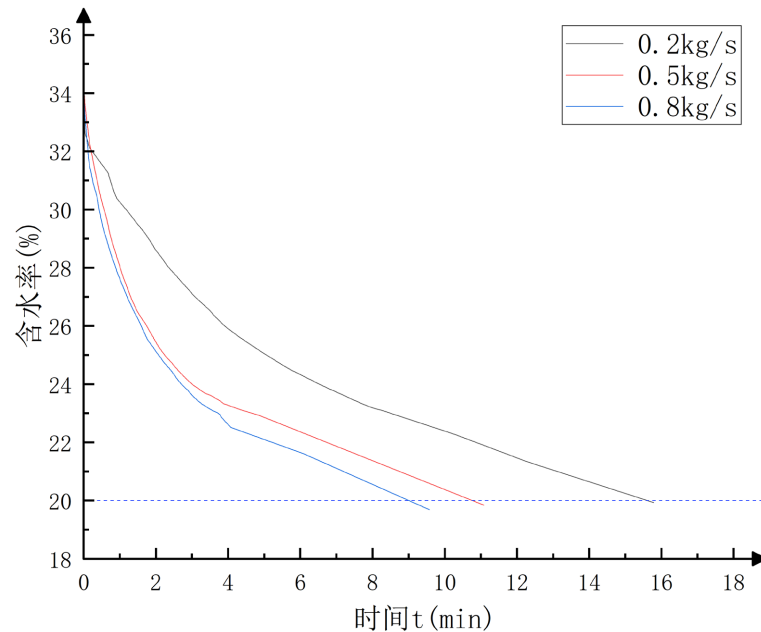


Figure 9. Bale drying efficiency at different temperatures
图 9. 不同温度草捆干燥效率

4.3. 牧草干燥实验与仿真分析

本文对牧草草捆的干燥研究是在小型草捆的实验和仿真基础上进行的，实际的草捆体积以及热风针管数量要远大于实验和仿真。从实验和仿真可以看到，反映的含水率随时间变化的规律基本相同。但实验是在草捆的初始含水率为 30%的情况下进行的，所以一开始实验曲线并没有如仿真下降的那么快。一开始草捆的含水率较高，这时与干燥空气之间的水势差较大，所以干燥速率较快，而随着干燥的进行，含水率的下降，水势差减小，干燥速率变小。温度越高，干燥介质和草捆之间的温差越大，能够提供分子挣脱束缚的能量越多，水分从草捆脱离的驱动力也越大，所以草捆干燥速率越快。风速越快，空气流动越快，脱离的水分能够被及时带走，所以草捆干燥速率越快。单位体积热风面积则会影响接触面积，接触面积越大，受热面积也越大，在单位面积挣脱的分子概率一定的情况下，脱离的水分也越多，干燥速率也越快。

建立牧草草捆的干燥模型对研究牧草草捆干燥规律，预测不同含水率下的干燥时间，提高机械化效率具有重要的意义。目前关于牧草的薄层干燥模型已建立起来，但是有关草捆的干燥模型却几乎没有。可以预见在大工业大机械化生产的背景下，未来将会有越来越多的牧草自收割下来就以草捆的形式贮存，对草捆干燥理论的线型研究很有必要。

4.4. 牧草草捆的干燥数学模型

本文作者运用理论分析通过实验和仿真相结合的方法，首先确定含水率和时间 t 的基本关系中的系数，最后通过多元线性回归确定已知各变量因素之间的关系，最终获得牧草草捆干燥的数学模型。

$$M_t = A + B \exp(-t * C) \tag{4}$$

$$A = 22.8337 - 1.73406\Omega - 0.03011T + 0.2711q$$

$$B = 12.87548 - 115.48674\Omega + 0.02495T - 1.32431q$$

$$C = 0.75163 + 1.07531\Omega - 0.00972T + 0.37004q$$

式中： M_t —— t 时刻的草捆含水率；

t ——草捆干燥时间；

Ω ——单位体积热风面积；

T ——热风温度；

q ——热风流量。

整个数学模型是含水率关于时间 t 的指数递减规律，这和实验数据规律基本保持一致。

5. 结论

本文介绍了基于牧草草捆的新型针孔式牧草干燥设备的结构和工作原理。通过搭建干燥实验台，对牧草草捆含水率随时间的变化的问题进行了实验。在此基础上运用 **Fluent** 软件建立了牧草草捆的干燥仿真模型，针对影响草捆干燥效率的单位体积热风面积、热风温度、热风速度进行了仿真。对比实验和仿真结果发现牧草草捆含水率与干燥时间之间呈指数下降规律，而随着单位体积热风面积的增加，干燥时间明显缩短。热风温度和热风速度的提升虽然也可以缩短干燥时间但从提升幅度较为有限。最终通过数学拟合和线性回归得到几者之间的数学模型公式，该模型可以进一步为草捆干燥设备的优化提供理论依据。

参考文献

- [1] 贺晓丽. 我国城乡居民食品消费差异现状分析[J]. 农业经济问题, 2001, 22(5): 30-34.
- [2] 余成群, 荣辉, 孙维, 邵涛. 干草调制与贮存技术的研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 143-150.
- [3] 卢英林. 苜蓿草干燥成套设备及干燥机理[J]. 中国乳业, 2002(1): 35-36.
- [4] 张岩红, 刘德臣. 牧草的干燥加工方法[J]. 养殖技术顾问, 2009(2): 45.
- [5] 陈红意, 赵满全, 李萍. 苜蓿干燥技术进展研究[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. [出版者不详], 2011: 1753-1756.
- [6] 王德成, 贺长彬, 武红剑, 尤泳, 王光辉. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1-25.
- [7] 杨世昆, 杜建强. 太阳能草捆干燥设备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 81-86.
- [8] 刘琳. 牧草烘干加工技术[J]. 中国畜牧业通讯, 2005(11): 60-61.
- [9] 李海龙, 车刚, 万霖, 李媛媛, 汪杨, 李宇飞. 方捆苜蓿热风循环干燥工艺实验研究[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(8): 82-89. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2018.0566>
- [10] 赵炬锋. 基于 TRIZ 的草捆干燥装置的设计与优化[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- [11] 李媛媛. 苜蓿方捆远红外组合干燥工艺参数的优化[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021. <https://doi.org/10.27122/d.cnki.ghlmu.2021.000243>
- [12] 钱珊瑚, 杨哲. 苜蓿草捆太阳能干燥特性试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 158-161. <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njvi.2017.02.033>
- [13] 郭志勇. TGS-2 型苜蓿太阳能热泵干燥装置性能试验研究与优化[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. <https://doi.org/10.27229/d.cnki.gmnu.2021.000467>
- [14] 李瑶. 基于多物理场分析的太阳能热风干燥箱试验研究与结构优化[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. <https://doi.org/10.27229/d.cnki.gmnu.2021.000506>
- [15] 罗杰. 多孔热风管滚筒式茶叶杀青机技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [16] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [17] 王璐瑶. 含湿多孔介质干燥过程传热传质的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [18] 包亚峰. 烟叶烘烤过程中的热湿分析与优化[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [19] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [20] 贺占清, 郭志平, 李凤伟. 基于多孔介质理论的牧草自然干燥过程仿真与分析[J]. 饲料工业, 2018, 39(23): 8-12. <https://doi.org/10.13302/j.cnki.fi.2018.23.002>