

苜蓿干燥与茎叶分离设备设计与 CFD 模拟^{*}

宁国鹏 王德成 王光辉 罗小燕 李 强

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 设计了滚筒式苜蓿干燥与茎叶分离设备,可在完成干燥的同时实现茎叶分离加工。采用预干燥滚筒与三回程干燥滚筒的组合结构,可实现苜蓿茎、叶的均衡干燥。利用 CFD 方法对设备内部的空气流场进行了仿真模拟,可以看出流场的风速分布反映了设备的结构特点,且不存在明显的涡流现象,能够满足输送物料、均衡干燥和茎叶分离的要求。风门开启面积对分离室内的风速影响显著,并且呈现出一定的规律。根据模拟结果可得,满足茎叶分离风速条件的风门最佳开启面积为 $(150 \times 150) \sim (200 \times 150) \text{ mm}^2$ 。

关键词: 苜蓿 干燥 茎叶分离 设计 数值模拟

中图分类号: S226.6; S54 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0084-06

Design and CFD Simulation of Quad-pass Rotary Drum Dryer-separator

Ning Guopeng Wang Decheng Wang Guanghui Luo Xiaoyan Li Qiang

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

For the sake of achieving uniform drying and separation of alfalfa leaves and stems in one process, a quad-pass rotary drum dryer-separator was designed, which mainly comprised the pre-drying, quick-drying, tempering and separating zones. The air flow in the dryer-separator was simulated by using CFD method with applying the standard $k-\varepsilon$ model, and the effect of different opening areas of the adjusting gate on the velocity in the separating chamber was analyzed emphatically. It was found that the desired velocity for leaf-stem separation in the separating chamber was gained, when the opening area of the adjusting gate was $(150 \times 150) \sim (200 \times 150) \text{ mm}^2$.

Key words Alfalfa, Drying, Leaf-stem separation, Design, Numerical simulation

引言

传统苜蓿干草调制方法容易造成浪费,营养损失严重,特别是落叶损失^[1]。苜蓿叶片中含有约 20%~30% 的粗蛋白质,是茎秆中粗蛋白质含量的 2~3 倍^[2~3]。据估算,当直接用作饲料时,苜蓿的利用率不到 30%,而通过深加工,利用率可达 65%~80%^[4]。

茎叶分离是提高苜蓿利用率的主要加工技术之一。国外关于苜蓿茎叶分离技术的研究较多,而国

内很少。苜蓿茎叶分离技术的研究^[5~6],主要分为田间直接分离和刈割后分离^[7]。田间直接分离难度较大,且效果不好^[8~9]。刈割后分离是主要的分离模式,相关研究较多,包括筛分法、风分法和干燥分离法^[10~14]。其中,干燥分离法因具有效率高、损失少等优点而成为苜蓿茎叶分离技术发展的主要方向^[7]。

虽然已经有关于利用滚筒干燥实现苜蓿茎叶分离的研究^[14],但仍存在茎、叶干燥不均匀的问题。尽管采取了一定措施,但并不能从根本上解决问题,

收稿日期: 2010-03-25 修回日期: 2010-04-22

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A0902)

作者简介: 宁国鹏,博士生,主要从事草产品加工设备研究, E-mail: ngp@cau.edu.cn

通讯作者: 王德成,教授,博士生导师,主要从事草业机械、草场改良、环境保护及区域规划研究, E-mail: wdc@cau.edu.cn

且操作比较麻烦。

从实现茎叶分离和均衡干燥的目的出发,设计滚筒式苜蓿干燥与茎叶分离设备,并实现关键参数的可调可控。对设备内部流场进行 CFD 模拟分析,找出最佳风门开启面积。

1 设计要求及工艺流程

1.1 设计要求

对苜蓿完成干燥的同时实现茎叶分离;出机含水率小于 15% (湿基),茎、叶干燥均匀;茎叶分离率大于 70% ,叶料纯度在 80% 以上;生产率在 200 kg/h (叶料 + 茎料) 以上。

1.2 工艺流程

设备的工艺流程如图 1 所示^[15]。

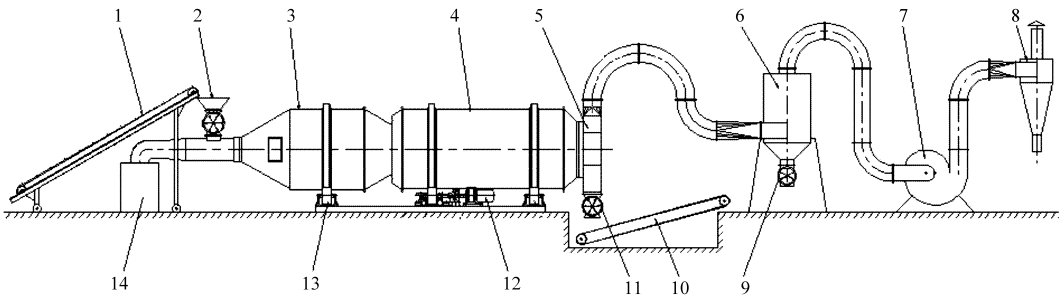


图 2 设备总体组成
Fig. 2 Component parts of the processing line

1. 上料机 2. 喂料器 3. 预干燥滚筒 4. 三回程干燥滚筒 5. 茎叶分离室 6. 旋风分离器 7. 引风机 8. 除尘器 9. 叶料出口
10. 接料输送带 11. 茎料出口 12. 滚筒驱动电动机及传动装置 13. 支承装置 14. 热风炉

2.2 工作过程

切碎的苜蓿经上料机、喂料器喂入设备,并在热风作用下进入预干燥滚筒。因叶的干燥速率较快、悬浮速度较小,故较先进入三回程干燥滚筒的内筒。茎秆干燥速率较慢、悬浮速度较大,因此在预干燥滚筒内停留时间较长,进而被充分干燥。按照“轻走重留”原则,苜蓿叶、茎先后通过三回程干燥滚筒的内、中、外筒,随后进入分离室。根据空气动力学特性差异,叶、茎的悬浮速度不同,在合适的风速下,叶随热风由上出口离开分离室,茎秆在重力作用下沉降,并由底部排出,实现茎叶分离。

3 关键设备设计计算

3.1 三回程干燥滚筒

(1) 每小时水分蒸发量

$$W_h = G_0 \frac{M_0 - M_1}{1 - M_1}$$

(1)

式中 M_0 、 M_1 ——苜蓿入机和出机时的含水率,分别取 70% 和 15%

G_0 ——每小时鲜草处理量,取 600 kg/h

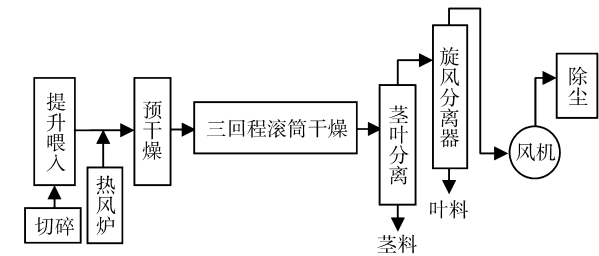


图 1 苜蓿茎叶干燥分离工艺流程
Fig. 1 Flow chart of leaf-stem separation of alfalfa

2 设备组成及工作过程

2.1 设备组成

滚筒式苜蓿干燥与茎叶分离设备主要由预干燥滚筒、三回程干燥滚筒、茎叶分离室、旋风分离器、热风炉及喂/排料系统和除尘系统等组成^[15],如图 2 所示。

由式 (1) 计算可知,每小时水分蒸发量为 388.24 kg/h。

(2) 热空气流量

$$Q = \frac{cW_h}{h_1 - h_0}$$

(2)

式中 c ——热空气的比容,取 1.36 m³/kg
 h_0 、 h_1 ——热空气的初始湿含量和终了湿含量,分别为 0.013 和 0.071 kg/kg

由式(2)计算可知,热空气流量为 9 103.56 m³/h。

(3) 干燥时间

$$t = \frac{M_0 - M_1}{\Delta M}$$

(3)

式中 ΔM ——苜蓿平均干燥速率,约 20% /min

进入三回程干燥滚筒时苜蓿含水率约为 40%,由式(3)计算可知,苜蓿在三回程干燥滚筒内的干燥时间为 1.25 min。

(4) 干燥容积

$$V = \frac{G_0 t}{60 \gamma \eta_v}$$

(4)

式中 η_v ——筒内苜蓿填充率,取 0.1

γ ——苜蓿自然堆积密度,约为 50 kg/m^3

由式(4)计算可知,三回程干燥滚筒的总容积为 2.5 m^3 ,则每层筒的容积约为 0.83 m^3 。

根据经验,一般取三回程干燥滚筒的长径比为 $4\sim6$ ^[16]。本文取长径比为 5。

3.2 预干燥滚筒

由于苜蓿茎、叶干燥不同步,必须防止叶片过度干燥。根据“轻走重留”原则,预干燥滚筒内的风速必须大于叶片悬浮速度而小于茎秆悬浮速度。由于茎、叶悬浮速度随含水率、切段长度及茎秆直径等的不同而变化较大^[17~19],但基于干燥后茎叶分离的要求,预干燥滚筒内的风速应在 $2.0\sim3.5\text{ m/s}$ ^[20~21]。

3.3 茎叶分离室

考虑与干燥滚筒的结合,分离室必须是相对独立的空间。热风进入分离室,风速应迅速降至可调范围。因此,分离室又必须相对开阔。为避免涡流,将分离室设计成梭形,上、下各有一个出口,如图 3 所示。

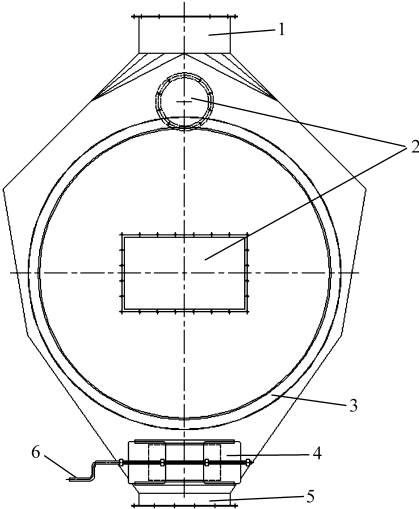


图 3 茎叶分离室及其调节风门结构示意图

Fig.3 Sketch of the adjusting gate and observing window on the separating chamber

1. 叶片及热风出口 2. 观察窗 3. 迷宫密封 4. 调风门 5. 茎秆出口 6. 调节手柄

为调节风速,在分离室下部侧面设置 $(300\times150)\text{ mm}^2$ 的调风门。风门宽度 $0\sim300\text{ mm}$ 可调,高度不变。风门开启面积为 $0\sim(300\times150)\text{ mm}^2$ 。分离室上设有观察窗,可直观地看到内部苜蓿的运动状态和茎叶分离情况,从而判断是否需要调节风门。

4 设备流场的 CFD 模拟

为了解设备内部流场的特点,研究风门开启面积对分离室内风速的影响规律,找出满足茎叶分离的最佳开启面积,利用 CFD 方法对模型内部流场进

行模拟。

4.1 几何建模及网格化

根据预干燥滚筒、三回程干燥滚筒和茎叶分离室的结构尺寸,利用 Fluent 软件包的前处理模块 GAMBIT,按 1:1 构建设备的三维几何模型,并进行网格化,如图 4 所示。

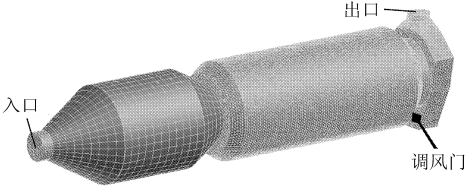


图 4 三维几何模型及网格划分

Fig.4 3-D geometric model and the meshes

考虑到计算机运算能力的限制,网格划分的空间离散间距设定为 50 mm ,只在局部位置(如拐角和壁面附近)进行网格细化。网格总数为 383 915。

4.2 模型设置与边界条件

4.2.1 假设条件

考虑到模型结构的复杂性和计算机的运算能力,这里主要关心模型内部流场的速度特点。为简化模型、便于运算,作以下假设:模型内部为常温空气流场,无颗粒;所有壁面光滑、无厚度,不考虑抄板结构;模型静止、不转动(因不考虑抄板结构,故滚筒转动对流体的影响可忽略)。

4.2.2 流体模型

由条件可知,研究为不可压定常流。采用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行湍流模拟,采用 SIMPLEC 算法进行压力-速度耦合计算。为提高运算精度,对于动量、湍动能以及湍动能耗散率的离散格式均采用二阶迎风格式。求解方式为非耦合隐式。

4.2.3 边界条件

(1)入口条件

由于入口的风速未知,因此采用压力入口边界。为引入热风,设备入口一般需要约 300 Pa 的负压^[22]。结合实际热风炉的工作要求,设置入口压力 $p_0=300\text{ Pa}$ 。湍动能

$$k=\frac{3}{2}(\overline{u}I)^2 \tag{5}$$

其中
$$I=0.16Re_{dn}^{-\frac{1}{8}} \tag{6}$$

式中 $\overline{u}$ ——空气平均流度,约为 15 m/s

I ——湍流强度

雷诺数为

$$Re_{dn}=\frac{D_n\overline{u}\rho}{\mu} \tag{7}$$

式中 ρ ——空气密度, 1.225 kg/m^3

μ ——空气的动力粘度, $1.83\times10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

D_H ——水力直径,取0.5 m,等于入口直径
湍能耗散率为

$$\varepsilon = C_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \tag{8}$$

式中 C_μ ——常数,取0.09
 l ——长度尺度,取 $0.07D_H$
由式(5)和(8)计算得到入口湍动能 k 和湍能耗散率 ε 分别为 $0.32 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $0.85 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。

(2)出口条件
据估算,通过旋风分离器、除尘器及风管等的压降约为6 000~7 000 Pa,又知风机全压为8 915 Pa,因此,出口总压约为1 915~2 915 Pa。由工艺流程可知,风机的进、出口均连接管道,风机全压即进、出口静压之差^[23]。即出口总压可看作风机启动时的瞬时静压,故设出口静压 $p_s = 2\,000 \text{ Pa}$ 。

出口的湍动能 k 和湍能耗散率 ε 的计算方法与入口的相同,其值分别为 $1.17 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $7.81 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。

4.3 结果分析

当迭代计算到140步以后,结果收敛,如图5所示。

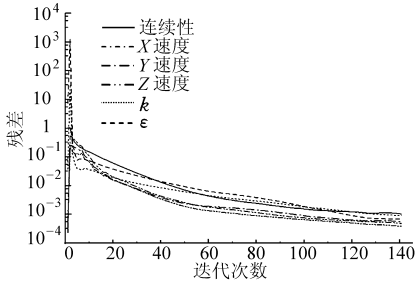


图5 残差
Fig.5 Plot of the residuals

4.3.1 湍流分析

由图6可知,出口风速约为30 m/s,是入口风速的2倍。在预干燥滚筒内,发现一条3.5~5.5 m/s的相对高速带,从入口延伸至三回程干燥滚筒内筒。

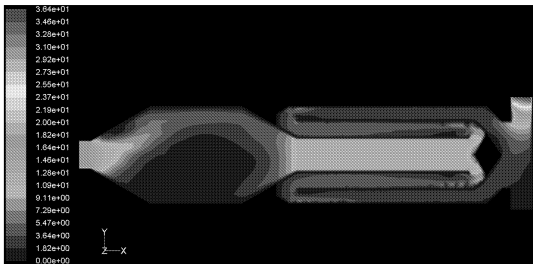


图6 速度云图
Fig.6 Contours of the velocity in the X-Y plane

这种风速分布特点符合物料“轻走重留”的流动特性,即能够使密度较小、干燥速率较快的叶迅速通过预干燥滚筒,而密度较大、干燥速率较慢的茎秆则在预干燥段内停留较长时间。只有当含水率降到

一定程度时,茎秆才会沿相对高速区进入三回程干燥滚筒的内筒,从而达到茎、叶均衡干燥的目的。
由图7可看出,在预干燥滚筒内有少量回流现象,但并没有形成涡流。气流进入三回程干燥滚筒后,迹线即变得连续、平滑,可保证物料迅速通过。



图7 流体迹线图
Fig.7 Traces of the air flow

图8为筒体展开长度上的风速变化曲线。入口风速17.5 m/s,出口风速32.5 m/s。在预干燥筒内,风速明显下降,在即将进入内筒时又迅速增至12 m/s左右,并保持相对平稳。当气流到达内筒尾端并接近中筒首端时,风速迅速减小,并剧烈振荡甚至波及整个中筒。进入外筒后,风速又趋平稳,并逐渐增大。当进入分离室,风速在经过稍许波动之后迅速增大。

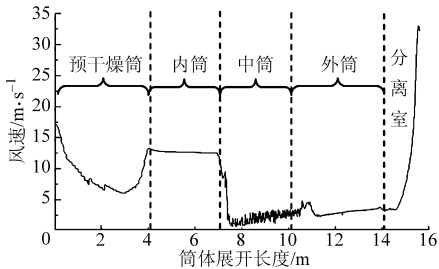


图8 沿筒体展开长度的速度变化曲线
Fig.8 Velocity along the stretched drums' length

4.3.2 风门开启面积

为研究风门开启面积对分离室内风速的影响,针对特定条件的苜蓿确定最佳风门开启面积范围,利用CFD方法模拟了不同风门开启面积条件下风速的变化情况。鉴于茎叶分离主要是在纵向的风力和重力共同作用下实现的,故只分析Y轴方向风速的变化。

如图9所示,当关闭风门时,出口风速大于30 m/s,分离室下部(A区)风速在0.5 m/s以下,B区的风速在0.5~2.7 m/s,在B区内,茎秆在重力作用下沉降,叶片在风力作用下上浮。当进入C区(2.7~4.9 m/s),叶片快速上升,并随气流由上出口离开分离室。

当风门开启面积从(50×150) mm²逐渐增大到(300×150) mm²时,分离室内Y轴方向风速变化如图10所示。

由图10看出,风门开启后,A区中央出现了风速相对较高的G区,且和B区在同一风速范围内。虽然G区对物料的吹散作用增强,但A区的风速仍

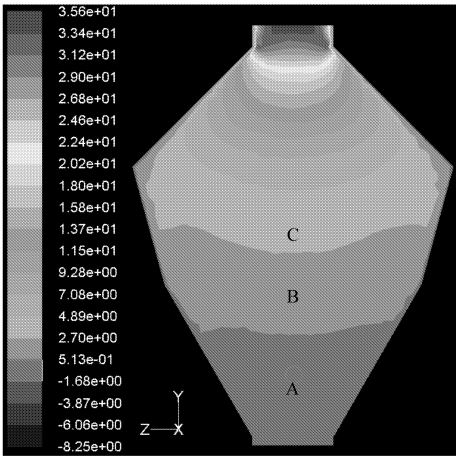


图 9 关闭风门时分离室内的 Y 轴方向速度云图

Fig. 9 Y-velocity in the separating chamber with the adjusting gate closed

然偏低,即使 G 区能够使叶片上浮并进入 A 区,也无法继续上浮。

当风门开启面积为 $(100 \times 150) \text{ mm}^2$ 时, G 区风速为 $0.89 \sim 3.1 \text{ m/s}$, A 区风速接近 1 m/s , B 区和 C 区沿两侧壁面向下延伸,如图 10b 所示。当风门开启面积为 $(150 \times 150) \text{ mm}^2$ 时, G 区、B 区和 C 区趋于连通,如图 10c 所示, B 区和 G 区的连通对茎叶分离有利。当风门开启面积为 $(200 \times 150) \text{ mm}^2$ 时, B 区和 G 区已完全连通,如图 10d 所示,但各区的风速不升反降。由于各点的风压一定,随着风门开启面积的增大,风量的增加速度变慢,因而风速下降。另外,由于 A 区被 B 区和 G 区包围,且风速较低,故有可能成为物料(特别是较轻的叶或碎末)的被困区,因此应当避免。

当风门开启面积达 $(250 \times 150) \text{ mm}^2$ 时,风速降到最低, A 区范围也缩减至最小, C 区沿侧壁已延伸至最底部,图 10e 所示。当风门完全打开(图 10f), A 区转而开始膨胀, B 区和 G 区仍彼此连通,但 C 区

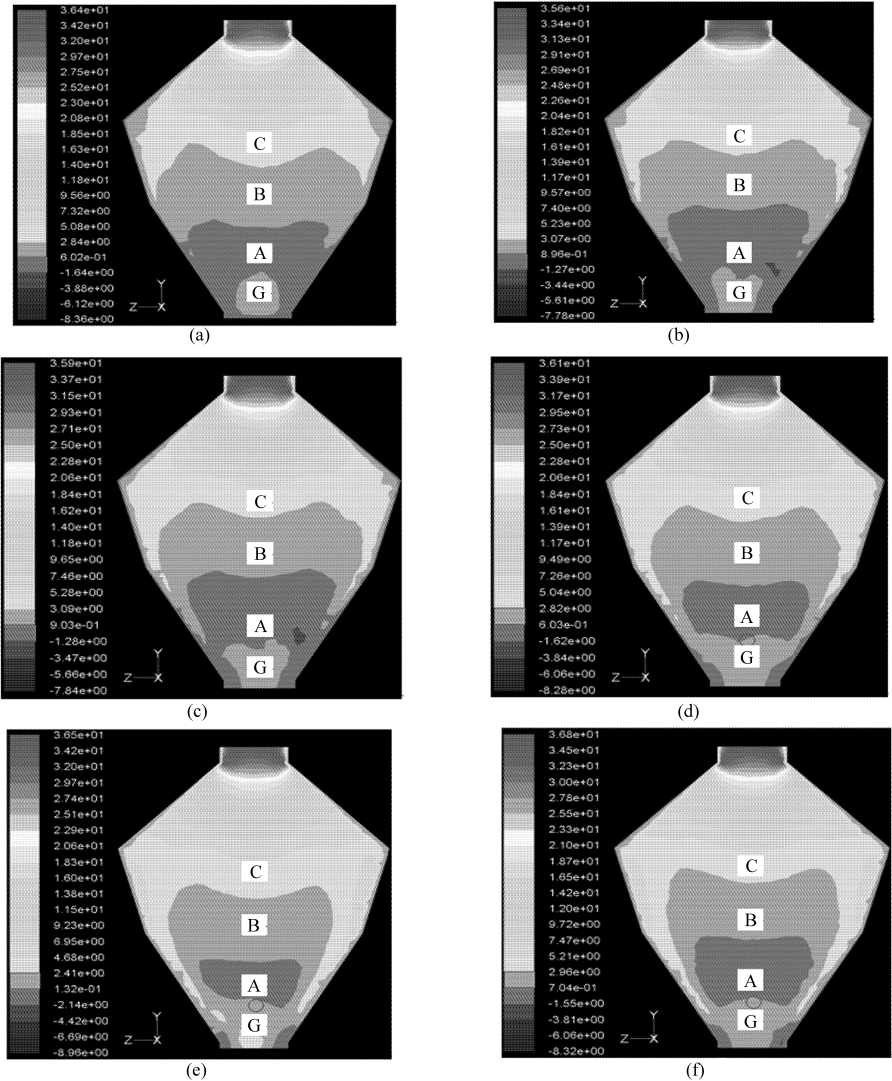


图 10 不同风门开启面积对分离室内 Y 轴方向风速的影响

Fig. 10 Y-velocity in the separating chamber with various opening areas of the adjusting gate

(a) $(50 \times 150) \text{ mm}^2$ (b) $(100 \times 150) \text{ mm}^2$ (c) $(150 \times 150) \text{ mm}^2$
(d) $(200 \times 150) \text{ mm}^2$ (e) $(250 \times 150) \text{ mm}^2$ (f) $(300 \times 150) \text{ mm}^2$

沿侧壁向下延伸过低,容易将底部的茎秆带起,导致叶料纯度降低。

5 结论

- (1) 设计的滚筒式苜蓿干燥与茎叶分离设备可在完成干燥的同时实现茎叶分离。提升了技术集成度,为进一步开发并合理利用优质牧草(苜蓿)的潜在价值提供了技术支持与工业化生产的基础。
- (2) 采用预干燥滚筒与三回程干燥滚筒的组合结构,可实现苜蓿茎、叶均衡干燥,提高干燥均匀度,保证干燥品质。而且结构紧凑、占地面积小、制造成

- 本低、功耗少。
- (3) 利用 CFD 方法,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对设备内部的空气流场进行了仿真模拟,发现流场的风速特点反映了设备的结构特点,且不存在明显的涡流现象,能够满足运输物料、均衡干燥和茎叶分离的要求。
- (4) 风门开启面积对分离室内的风速影响显著,并且呈现出一定的规律。根据对模拟结果的分析可得,满足茎叶分离风速条件的风门最佳开启面积为 $(150 \times 150) \sim (200 \times 150) \text{ mm}^2$ 。

参 考 文 献

1 单贵莲,薛世明. 牧草干燥方法的研究概况[J]. 云南农业大学学报,2006,21(1):90~94.
Shan Guilian, Xue Shiming. Research survey on drying methods of forage grass [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2006, 21 (1): 90~94. (in Chinese)

2 王鑫,马永祥,李娟. 紫花苜蓿营养成分及主要生物学特性[J]. 草业科学,2003,20(10):39~41.
Wang Xin, Ma Yongxiang, Li Juan. Biological characteristics and nutrition contents of alfalfa [J]. Pratacultural Science, 2003, 20 (10): 39~41. (in Chinese)

3 田玉民,龚月生. 刈割期对紫花苜蓿叶粉营养成分含量、茎叶比的影响[J]. 家畜生态学报,2006,27(4):86~88.
Tian Yumin, Gong Yuesheng. Effect of cutting phase on nutrition contents and ration of stalk to leaf of alfalfa [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2006, 27 (4): 86~88. (in Chinese)

4 余群力. 草产品深加工技术及其应用[J]. 草业科学,2003,20(3):37~41.

5 Bilanski W K. Enhanced utilization of forage plants through fractionation—state of the art [J]. Agricultural Engineering Journal, 1992, 1(1):1~13.

6 Arinze E A, Schoenau G J, Sokhansanj S, et al. Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems—a review and new concept [J]. Drying Technology, 2003, 21 (9): 1 673~1 702.

7 宁国鹏,王德成,王光辉,等. 饲草茎叶分离技术发展趋势分析[C]//2007 年中国农业工程学会学术年会论文摘要集, 2007.

8 Ogden R L, Kher W B. Alfalfa management for dehydration [C]//9th Technical Alfalfa Conference Proceedings US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, ARS, 1965: 36~74.

9 Currence H D, Buchele W F. Leaf strip harvester for alfalfa [J]. Agricultural Engineering, 1967, 8 (1): 20~23.

10 Chrisman J, Kohler G O, Mottola A C, et al. High and low protein fractions by separation milling of alfalfa [C]//US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, ARS, 1971: 74~75.

11 Bilanski W K, Jones D K, Mowat D N. Mechanical and aerodynamic separation of whole-plant corn silage into grain and stover [J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29 (5): 1 188~1 192.

12 Gan-Mor S, Wiseblum A, Regev R. Separation of leaves from stems with perforated rotating drum under suction [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 34(4): 275~284.

13 Bilanski W K, Graham W D, Mowat D N, et al. Separation of alfalfa silage into stem and leaf fractions in a horizontal airstream [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32 (6): 1 684~1 690.

14 Adapa P K, Schoenau G J, Arinze E A. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer [J]. Biosystems Engineering, 2004, 91 (4): 455~463.

15 宁国鹏. 苜蓿干燥茎叶分离设备研究[D]. 北京:中国农业大学,2010.

16 王光辉,王德成,吕黄珍,等. 牧草组合干燥装备设计[J]. 农业机械学报,2006,37(8):152~154.
Wang Guanghui, Wang Decheng, Lü Huangzhen, et al. Design of forage drying facility [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37 (8): 152~154. (in Chinese)

17 Menzies D, Bilanski W K. Aerodynamic properties of alfalfa particles [J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(6): 829~831.

参 考 文 献

- 1 刘相东. 介绍一种新技术——脉动燃烧干燥[J]. 化工进展, 1999(1): 71 ~ 72.
- 2 Zinn B T. 脉动燃烧[M]. 程显辰, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- 3 Jangi M, Kobayashi H. Heat and mass transfer of a fuel droplet evaporating in oscillatory flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(4): 729 ~ 740.
- 4 Drummound C K, Lyman F A. Mass transfer from a sphere in an oscillating flow with zero mean velocity[J]. Computational Mechanics, 1990, 6(4): 315 ~ 326.
- 5 Fan Zhongliang, Mao Zhuoxiong, Chen Jiayong. Mass transfer in turbulent pulsating flows[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 1993, 1(3): 127 ~ 140.
- 6 Sujith R I, Zinn B T. A theoretical investigation of enhancement of mass transfer from a packed bed using acoustic oscillations [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000, 78(6): 1 145 ~ 1 150.
- 7 Zogzas N P, Maroulis Z B, Marinou-Kouris D. Moisture diffusivity methods of experimental determination a review [J]. Drying Technology, 1994, 12(3): 483 ~ 515.
- 8 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.
- 9 Knudsen J G, Katz D L. Fluid dynamics and heat transfer[M]. N. Y.: McGraw-Hill Co., 1985.
- 10 陈有庆, 刘相东. 干燥过程中脉动气流与物料间的热量传递特性[J]. 干燥技术与设备, 2007, 5(2): 89 ~ 92.
Chen Youqing, Liu Xiangdong. Heat transfer between material and unsteady airflow from a Helmholtz type combustor[J]. Drying Technology & Equipment, 2007, 5(2): 89 ~ 92. (in Chinese)
- 11 路倩倩, 杨德勇, 郎芝花, 等. 脉动燃烧干燥换热特性分析与实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 123 ~ 127.
Lu Qianqian, Yang Deyong, Lang Zhihua, et al. Analysis and experiment of heat transfer in helmholtz pulse combustion dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 123 ~ 127. (in Chinese)

(上接第 89 页)

- 18 李爱平, 汪春. 苜蓿段长度对干燥速度与悬浮速度影响的试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 168 ~ 170.
Li Aiping, Wang Chun. Experimental study on the effect of alfalfa's length on drying rate and floating velocity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 168 ~ 170. (in Chinese)
- 19 赵艳忠, 郑先哲, 韩永俊, 等. 苜蓿干燥过程中临界速度测定试验研究[J]. 农机化研究, 2003(3): 134 ~ 135.
- 20 王佳玮. 基于茎叶分离的苜蓿悬浮速度实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
Wang Jiawei. Experimental research on the suspension velocity of alfalfa for leaf-stem separation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 21 罗小燕, 王德成, 王光辉, 等. 苜蓿转筒干燥时茎叶分离出口气流场模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 71 ~ 74, 85.
Luo Xiaoyan, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Simulation and optimization of the wind field of the separation exit of alfalfa rotary drum dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 71 ~ 74, 85. (in Chinese)
- 22 曹崇文, 朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- 23 商景泰. 通风机实用技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 24 高扬, 王德成, 王光辉, 等. 紫花苜蓿干燥和茎叶分离效果预测模型与工艺优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 113 ~ 117, 162.
Gao Yang, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Effect prediction model and process optimization of the drying and separating for leaf-stem of fresh chopped alfalfa [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 113 ~ 117, 162. (in Chinese)