

# 苜蓿茎秆压扁系数对水分散失的影响研究

高东明<sup>1</sup> 王德成<sup>2\*</sup>

(1. 北京工商大学 材料与机械工程学院,北京 100048;

2. 中国农业大学 工学院,北京 100083)

**摘要** 为深入研究苜蓿压扁系数与含水率变化的关系,以苜蓿晾晒过程中主茎秆为对象,用研制的压扁间隙性能试验台,对不同部位段苜蓿主茎秆进行不同压扁系数条件下的含水率变化对比试验,研究不同压扁程度对紫花苜蓿茎秆不同部位的水分散失规律影响。结果表明:温度 25 ℃,相对湿度 50%RH,光照度 11 000 lx 条件下,压扁系数 55% 的苜蓿茎秆内不同部位段的含水率变化较一致。在苜蓿压扁晾晒过程中增加压扁的程度虽然可以增加干燥速度,但茎秆不同部位的水分散失速度对压扁程度的敏感度不同。靠近根部的茎秆对不同的压扁系数都比较敏感,其水分散失速度随压扁系数的减小明显的逐步增大。压扁系数 70% 以上的轻度压扁不能显著加快茎秆中上部的干燥速度。

**关键词** 苜蓿;压扁系数;含水率;匹配

**中图分类号** S 225.8; S 817.11

**文章编号** 1007-4333(2016)12-0089-07

**文献标志码** A

## Water loss of alfalfa stem affected by flattening coefficient

GAO Dong-ming<sup>1</sup>, WANG De-cheng<sup>2\*</sup>

(1. College of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** To study the relationship between flattening coefficient and the moisture content changes of alfalfa main stem, a flattening testing device was designed, which provides adjustable spacing between the flattening rolls. Different parts of the main stem segments under different moisture content and flattening coefficients were tested. The water loss laws of alfalfa stems affected by different condition levels to different parts were studied. The results showed that: Under the conditions of temperature 25 ℃, relative humidity 50% RH, 11 000 lx light illumination and 55% flattening coefficient conditions, moisture content changes in different parts of stem were basically the same; Although, the drying speed of alfalfa stem could be increased by using greater flattening coefficient in alfalfa field drying, and the stem water loss sensitivity was different in different parts by using different flattening coefficients. The stem closer to the root was more sensitive to different flattening coefficients, and its water loss rate was gradually significant increased with the decrease of flattening coefficients. The drying speed of the upper stems was not significantly speed up using flattening coefficient more than 70% (slightly flattening).

**Keywords** alfalfa; flattening coefficient; moisture content; matching

苜蓿刈割后,在外界环境的作用下,其本身发生着化学成分变化,如含水率和力学特性变化<sup>[1-2]</sup>。这些变化都直接决定着收获工艺,加工性能,加工方式及草产品的质量优劣。国内外研究表明,苜蓿干草品质与其干燥速度、细胞代谢时间有着直接的关

系<sup>[3-6]</sup>。此外,由于苜蓿叶片与茎秆结构差异巨大而导致的干燥速率差异巨大,使得干燥过程中叶片很容易脱落。这导致了翻晒、捡拾打捆等收获过程的机械损失巨大<sup>[7-10]</sup>。为了加快苜蓿的干燥速率,人们通过破坏茎秆及其表面结构、化学处理或人工烘

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家牧草产业技术体系课题(CARS-35); 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203024)

第一作者: 高东明,讲师,博士,主要从事草业机械研究,E-mail:gaodongming@btbu.edu.cn

通讯作者: 王德成,教授,博士生导师,主要从事草业机械研究,E-mail:wdc@cau.edu.cn

干的方法,加快其内部水分的散失,缩短干燥时间<sup>[11-13]</sup>。国内外学者在苜蓿干草调制和干燥方面的研究主要包括:对比了不同的调制方法对水分散失及干草质量的影响<sup>[14-17]</sup>,干燥方法及干燥特性对干草质量的影响<sup>[18-21]</sup>。上述研究及生产实践均表明压扁处理可以加快苜蓿干燥速度提高干草质量<sup>[22-25]</sup>。但是对机具的设计以及使用者而言,具体的压扁程度对苜蓿水分散失速度的影响研究还较少<sup>[26-28]</sup>。因此,在田间收获环节,如何确定压扁程度,使得苜蓿的干燥速度尽量快的同时并保证苜蓿同一植株的含水率变化尽量一致,显得尤为重要。

本研究在上述研究的基础上,以特定的温度、湿度和光照环境模拟自然环境,对不同压扁程度的苜蓿进行比较研究,探讨不同压扁程度对紫花苜蓿茎秆不同部位的水分散失规律影响,得出使苜蓿的干燥速度尽量快的同时并保证苜蓿同一植株的含水率变化尽量一致的压扁系数。旨在为苜蓿收获过程中的压扁参数设置提供依据,为深入研究不同气候条件及压扁参数对苜蓿失水规律的研究提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 苜蓿压扁试验装置

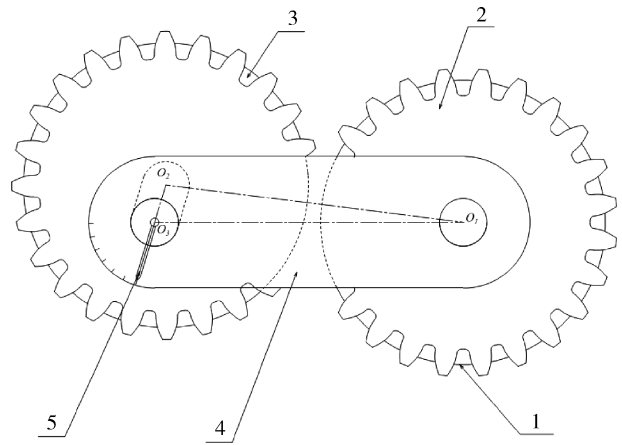
压扁试验采用的压扁试验台结构如图1所示。驱动齿轮和压扁辊同轴安装在机架上,其轴心为 $O_1$ 。偏心辊的轴心为 $O_2$ ,但其通过以 $O_3$ 为轴心的轴安装在机架上。压扁辊和偏心辊上的齿轮相互啮合,驱动2个辊相向转动。由图1结构可知,2个辊的直径不变,则辊间隙值 $h$ 由2个辊的轴心 $O_1O_2$ 之间的距离决定。依据余弦定理:

$$(l_{O_1O_2}) =$$

$$\sqrt{(l_{O_1O_3})^2 + (l_{O_3O_2})^2 - 2(l_{O_1O_3})(l_{O_3O_2})\cos\angle O_1O_3O_2} \quad (1)$$

由于 $l_{O_1O_3}$ 和 $l_{O_3O_2}$ 的长度为定值,结合式(1)的表达式可知,改变 $\angle O_1O_3O_2$ 的值即可得到不同的 $l_{O_1O_2}$ 值和间隙值 $h$ 。在每组试验前将压扁辊之间的间隙调整至所需宽度,并将辊间隙指针固定,然后将处理好的苜蓿草段,放置于2个压扁辊之间,并转动压扁辊进行不同程度的压扁。

采用人工气候箱进行模拟自然干燥条件。BD-PRX型人工气候箱的可控温度为 $0\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,可调相对湿度 $50\%\sim 95\%\text{ RH}$ ,光照度 $0\sim 220\ 00\text{ lx}$ 。环境温度 $24\sim 26\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $33\%\sim 45\%$ 。烘箱为



1. 压扁辊;2. 驱动齿轮;3. 偏心辊;4. 机架;5. 辊间隙指针  
1. Flattening roller;2. Driving gear;3. Eccentric roller;  
4. Frame;5. Roll gap pointer

图1 压扁试验台

Fig. 1 Flattening device

天津市实验仪器厂生产的DL104型电热鼓风干燥箱,用来测取苜蓿的初始含水率。电子天平采用Sartorius BS210S型电子天平,可读性 $0.1\text{ mg}$ ,最大称量是 $210\text{ g}$ 。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 试验材料及条件

试验所采用的苜蓿样本为第二茬现蕾期的中苜1号苜蓿,株高 $70\text{ cm}$ ,刈割时留茬高度为 $8\sim 15\text{ cm}$ 。取刈割后苜蓿的主茎秆直径较均匀的苜蓿作为样本,共计 $200$ 个。将主茎秆由根部到顶端细分为直径不同的5部分,并选取每部分中直径均匀的部分切成长 $3\sim 5\text{ cm}$ 长的草段。定义从根部到顶部依次为:第1段、第2段、第3段、第4段和第5段。分别测量主茎秆根部和顶部的直径,测得第1段的平均直径为 $3.0\text{ mm}$ ,第5段的平均直径为 $2.1\text{ mm}$ 。选取样本中与平均直径相同的苜蓿作为试验样本。

影响苜蓿在晾晒干燥速度的外界因素包括温度、湿度、风速以及铺条厚度等,且上述条件没有可重复性。因此,本试验选择苜蓿晾晒过程中较保守的条件并在同一温度、湿度和光照条件下进行试验。用于模拟自然条件的人工气候箱参数设置为:温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $50\%\text{ RH}$ ,光照度 $11\ 000\text{ lx}$ 。

#### 1.2.2 试验设计

为减小温度与风速的不同所造成的误差,试验采用多次重复试验,然后取平均值的方法来提高可信度。具体为:对5个不同直径草段设计4个压扁

程度不同的组和 1 个未压扁组。首先对各个鲜苜蓿样品进行称重,将处理好的苜蓿样品段放置在人工气候箱中进行干燥试验,各个样本每隔 1 h 称重一次,当苜蓿含水率变化范围小于 0.1 % 时,从人工气候箱中取出,将样品放在 105 °C 烘箱中干燥 5 h 后,取出后放置在密封的干燥器中冷却至常温并立即称重,计算含水率。

在计算和统计不同压扁程度条件下苜蓿茎秆不同部位的含水率值时。在每个称重时间点  $T_i$ , 考察

的试验因子为压扁辊的间隙宽度,记为  $A$ 。试验因子  $A$  的不同水平记为  $A_i$ 。由于试验样本为苜蓿的主茎秆由粗到细分的  $r$  个段,因此在每个水平下的苜蓿的不同部位的样本可以设为  $A_r^i$ 。假设在每个水平下不同部位的苜蓿样本  $A_r^i$  进行  $j$  次重复得到的试验结果(含水率)为  $y_{ij}^r$ , 试验因子  $A$  的水平  $i = 5$ , 试验样本由粗到细分的分段数  $r = 5$ , 每个试验的重复次数  $j = 5$ 。得到每个称重时间点  $T_i$  的试验结果和均值,按表 1 进行排列。

表 1 试验的因素和水平设计  
Table 1 Experimental factors and levels

水平 Level	因素 $A_r^i$ Factors $A_r^i$			
	$r=1$	$r=2$	...	$r=5$
$i=1$	$y_{11}^1, y_{12}^1, \dots, y_{15}^1$	$y_{21}^1, y_{22}^1, \dots, y_{25}^1$	...	$y_{51}^1, y_{52}^1, \dots, y_{55}^1$
$i=2$	$y_{21}^2, y_{22}^2, \dots, y_{25}^2$	$y_{21}^2, y_{22}^2, \dots, y_{25}^2$	...	$y_{21}^2, y_{22}^2, \dots, y_{25}^2$
...	...	...	...	...
$i=5$	$y_{51}^5, y_{52}^5, \dots, y_{55}^5$	$y_{51}^5, y_{52}^5, \dots, y_{55}^5$	...	$y_{51}^5, y_{52}^5, \dots, y_{55}^5$

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 压扁系数的定义

依据苜蓿收获过程可知,决定苜蓿被压扁程度的压扁辊不可能针对苜蓿的根部及顶部施加不同的压扁量。因此,最有意义的做法是以苜蓿茎秆最粗部位的压扁程度作为机具的作业参数进行衡量。对试验因素进行如下定义:

定义苜蓿茎秆直径最大的位置在被压扁前后的截面尺寸比为最大压扁系数  $C_{max}$ 。苜蓿在压扁过程中的压扁系数  $C_{max}$  的测定,按式(2)计算。

$$C_{max} = \frac{h}{H} \quad (2)$$

式中: $H$  为苜蓿茎秆的直径最大处在被压扁前的截面直径; $h$  为 2 个压扁辊之间的间隙。

#### 1.3.2 含水率的测定

初始含水率的测定:苜蓿在田间采用 5 点法取样,每点取样质量不少于 50 g,装入预先干燥好的密闭容器内,立即称其重量。进行 3 次重复取样,每次取样约 1 000 g。依据文献[29]所述。含水率的计算方法如式(3)所示:

$$H = \frac{W_a - W_g}{W_a} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $H$  为苜蓿茎秆含水率; $W_a$  为紫花苜蓿茎秆干燥前的质量; $W_g$  为紫花苜蓿茎秆干燥后的质量。

## 2 结果与分析

### 2.1 苜蓿主茎秆的整体含水率变化

不同压扁系数条件下,苜蓿主茎秆的整体含水率如图 2 所示。由图 2 可看出,在模拟田间晾晒条件下,苜蓿茎秆的水分散失速度随压扁程度的增大而增大。对比苜蓿达到 20% 的安全含水率所用的时间,未压扁的苜蓿茎秆需要约 19.5 h,压扁系数为

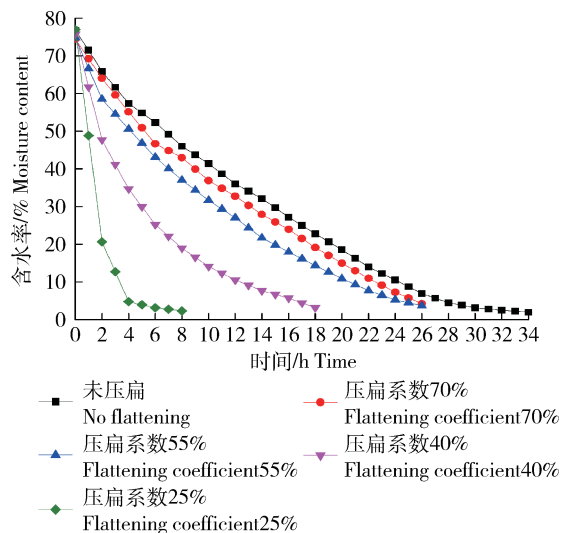


图 2 苜蓿主茎秆的整体含水率变化

Fig. 2 Moisture content changes of the alfalfa main stem

70%的苜蓿茎秆需要 18.0 h,压扁系数为 55%的苜蓿茎秆需要 15.0 h,压扁系数 40%的需要 7.5 h,压扁系数为 25%的只需要 2.0 h。压扁系数大于 55%时,水分散失速度较均匀。压扁系数小于 40%时,水分散失速度先快后慢,尤其在 0~2.0 h 内,水分散失速度最快,然后逐渐下降。

### 2.2 茎秆内不同部位段的含水率变化规律

在不同的压扁系数下,苜蓿主茎秆内不同部位段的含水率变化规律如图 3(a)~(d)所示。图 3(a)~(d)分别为压扁系数 70%、55%、40%、25%的苜蓿茎秆内不同部位段的含水率变化。对比图 3(a)~(d)可以看出,在不同的压扁系数下,苜蓿茎秆内不同部位段的水分散失速度各异,其中,压扁系数 55%的苜蓿茎秆内不同部位段的含水率变化较一致,而压扁系数 40%的苜蓿茎秆内不同部位段茎秆

干燥速度差异较大。由图 3(b)可以看出,对于压扁系数 55%的不同部位段茎秆,各段茎秆含水率降至 20%的安全含水率所用的时间为 14~16 h。由图 3(c)可以看出,当压扁系数为 40%时,各段茎秆含水率降至 20%的安全含水率所用的时间区间为 5~10 h,其中靠近根部的第 1 段用时最短为 5 h,靠近顶部的第 4、5 段用时最长为 10 h。上述变化规律说明,在苜蓿压扁晾晒过程中增加压扁的程度虽然可以增加干燥速度,但由于茎秆不同部位的水分散失速度对压扁程度的敏感度不同,会造成根部和顶部茎秆的含水率差异。苜蓿干燥过程中,当压扁系数是 55%时,苜蓿茎秆不同部位段的含水率变化较一致,因此,55%是一个较合适的压扁系数。

对比图 3 中各图的茎秆平均含水率和不同部位段的含水率可知,在各时间点,整个茎秆的平均含水

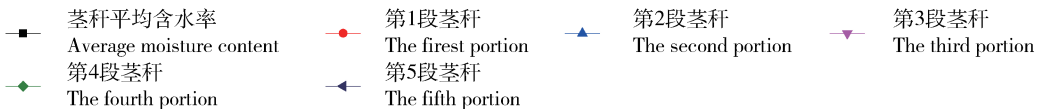
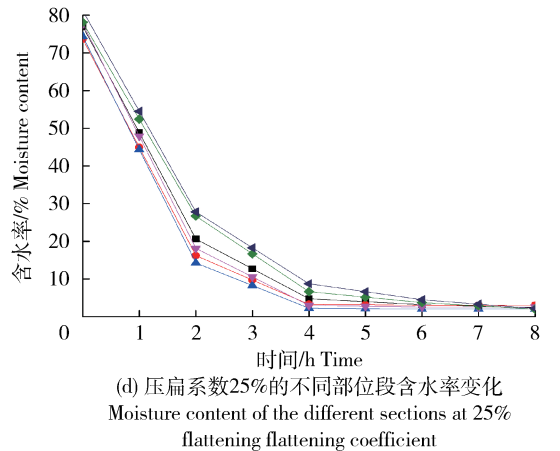
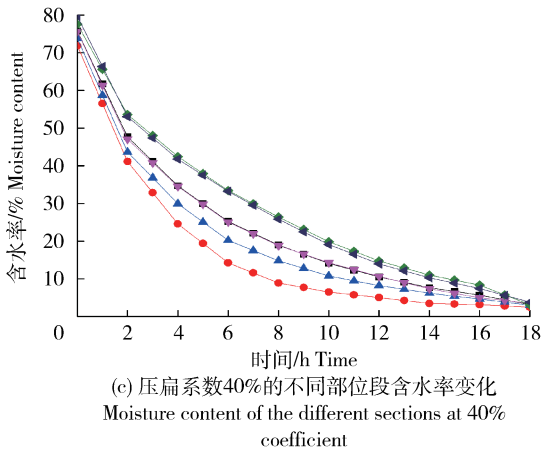
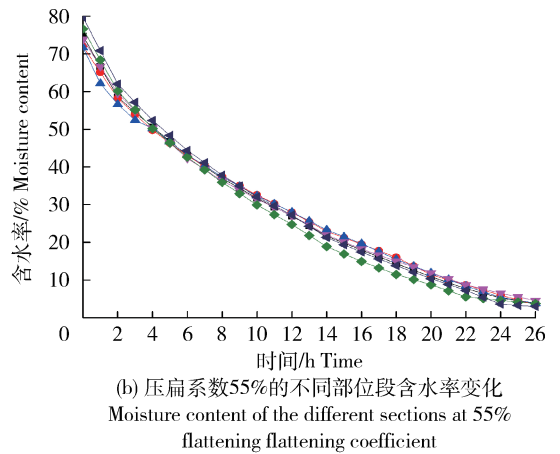
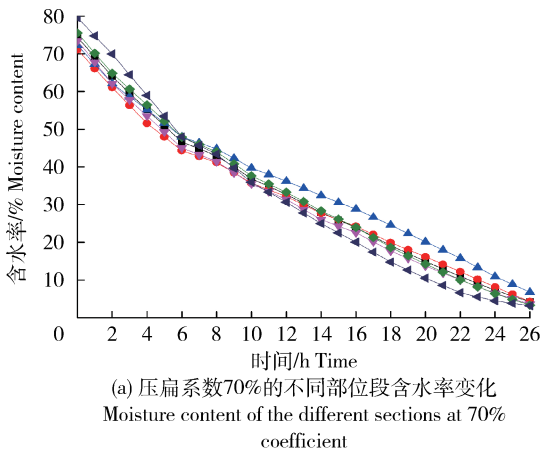


图 3 苜蓿主茎秆内不同部位段的含水率变化

Fig. 3 Moisture content changes in different stem parts of alfalfa

率总是接近或略高于第 3 段的含水率。对于压扁系数为 40% 和 20% 的苜蓿茎秆,当茎秆平均含水率降至 20% 的安全含水率时,靠近茎秆顶部的第 4、5 段的含水率仍高达 25% 以上。这说明在苜蓿晾晒时应注意,重度压扁的苜蓿当平均含水率符合存储要求

时,其顶部茎秆的含水率仍会高于要求 5% 以上。

### 2.3 压扁系数对各段茎秆水分散失的影响

对同一段茎秆在不同压扁系数下的含水率变化进行统计,得到第 1~5 段茎秆在未压扁以及不同压扁系数下的对比结果如图 4 所示。

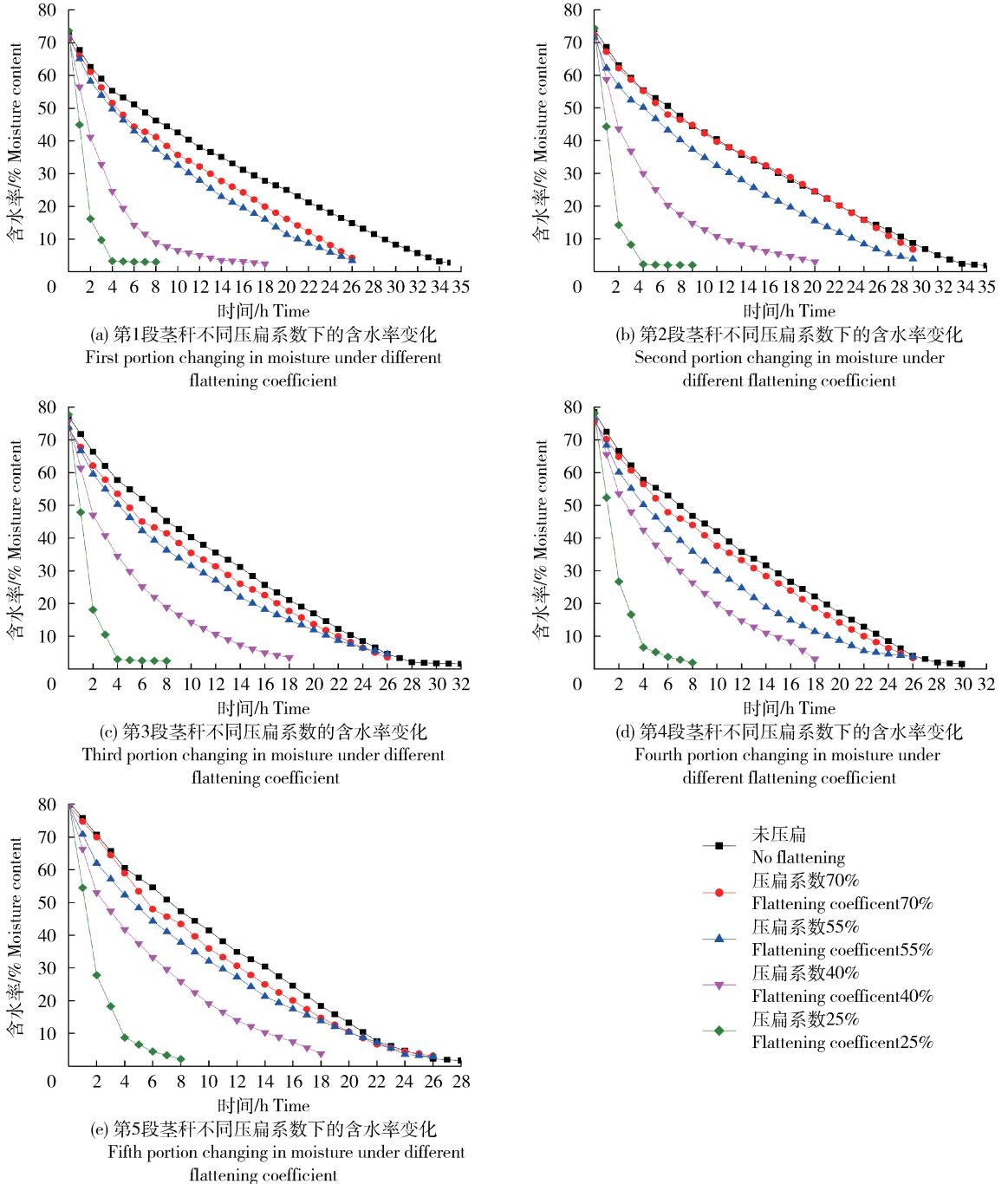


图 4 各段茎秆不同压扁系数下的含水率变化

Fig. 4 Moisture content changes in each section of stem under different flattening coefficient

由图 4 的曲线可以看出,无论是靠近茎秆根部的第 1 段苜蓿还是靠近梢部的第 5 段苜蓿,压扁系

数为 70% 的茎秆相比较未压扁的茎秆含水率变化曲线差异并不明显。这说明,在试验所采用的气候

条件下,压扁系数为70%以上的轻度压扁并不能明显加快苜蓿的干燥速度。对比压扁系数为40%的茎秆达到20%的安全含水率所用的时间可以看出,当苜蓿茎秆受到压扁系数 $\leq 40\%$ 的中度以上压扁时,茎秆各部位的含水率曲线与未压扁的茎秆含水率变化曲线差异明显。第1~5段茎秆的干燥时间相比未压扁分别减少了约78%、70%、59%、48%和46%。由图4(a)可以看出,在其他因素不变的情况下,靠近根部的第1段茎秆对不同的压扁系数都比较敏感,其水分散失速度随压扁系数的减小明显的逐步增大。图4(b)~(e)中,未压扁与压扁系数为70%茎秆的含水率随时间变化的差异较小,由此说明压扁系数70%以上的轻度压扁不能显著加快茎秆中上部的水分散失速度。

### 3 讨论

含水率变化曲线的斜率表明,苜蓿茎秆的干燥过程包括等速失水过程和降速失水过程。不同部位段茎秆的压扁系数越小,等速失水阶段在整个干燥过程中占时间比例越大。这说明重度压扁使得茎秆内部水分的扩散阻力减小,内部水分的外散速率大于或等于外表面水分的蒸发速率,外界向茎秆提供的热量完全用于水分蒸发。等速失水过程发生在茎秆干燥的初期,茎秆散失的水分主要来自于附着在维管束表面的自由水。随着时间的继续,茎秆表面的自由水分消失,此时茎秆内水分的气化主要依赖于细胞壁内的水分向外扩散转移,由于这种水的结合力强,含水率降低速率逐渐减小。随着含水率的不断降低,水分的气化速度也越来越慢。

由各图可知,压扁系数70%的各段茎秆的等速失水时间为6 h,含水率降至40%~50%。压扁系数55%的各段茎秆的等速失水时间为2 h,含水率降至55%~65%。压扁系数40%的各段茎秆的等速失水时间为2 h,含水率降至40%~55%。压扁系数25%的各段茎秆的等速失水时间为2 h,含水率降至15%~30%。该现象表明:等速失水阶段所持续的时间以及降低的含水率与茎秆的部位相关性较小,与压扁程度关系较大;轻度压扁只破坏了茎秆表皮的蜡质层加快了维管束内自由水的散失,中度以上的压扁不但破坏了蜡质层也使大量细胞壁破裂,部分结合水扩散阻力减小,加快了含水率的降低。等速失水阶段时长以及降低的含水率值对品质的影响还需进一步研究。

对于压扁系数为40%和20%的苜蓿茎秆,当茎秆平均含水率降至20%的安全含水率时,靠近茎秆顶部的第4、5段的含水率仍高达25%以上。这表明在实际收获过程中需要注意,重度压扁苜蓿的平均含水率符合存储要求时,其顶部茎秆的含水率仍会高于要求5%以上。

### 4 结论

苜蓿整个茎秆压扁后的平均含水率总是接近或略高于位于茎秆中间部位的第3段的含水率。温度25℃,相对湿度50% RH,光照度11 000 lx条件下,苜蓿的干燥速度尽量快的同时并保证苜蓿同一植株的含水率变化尽量一致的压扁系数为55%。

压扁系数 $\leq 40\%$ 的中度压扁条件下,茎秆各部位的干燥速度明显快于未压扁的茎秆。在扁系数为40%的条件下,从根部到梢部的第1~5段茎秆达到20%的安全含水率所用的时间相比未压扁分别减少了约78%、70%、59%、48%和46%。

### 参 考 文 献

- [1] Srivastava A K, Carroll E G, Roger P R, Dennes R B. *Hay and Forage Harvesting* [M]. Saint Joseph: ASAE, 2006
- [2] Cavalchini A G. *Handbook of Agricultural Engineering* [M]. Saint Joseph: ASAE, 1999
- [3] Rotz C A, Yi Chen. Alfalfa drying model for the field environment [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 1985, 28(5): 1686-1691
- [4] Savoie P, Rotz C A, Bucholtz H F. Hay harvesting system losses and drying rates [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 1982, 25(3): 581-585
- [5] Rotz C. Loss models for forage harvest [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 1995, 38(6): 1621-1631
- [6] Savoie P, Chabot R, Tremblay D. Loss and drying characteristics of forage [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 1993, 36(6): 1533-1539
- [7] Buckmaster D R, Rotz C, Martens D. A model of alfalfa hay storage [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 1989, 32(1): 30-36
- [8] Buckmaster D R, Heinrichs A J. Losses and quality changes during harvest and storage of preservative treated alfalfa hay [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 1993, 36(2): 349-353
- [9] Sokhansanj S, Khoshtaghaza H, Schoenau G J, Arinze E A, Tabil L G. Heat and moisture transfer and quality changes in containerized alfalfa cubes during transport [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 2003, 46(2): 423-432

- [10] 李树,童莉葛,王立. 减少苜蓿茎和叶干燥速率差异的实验研究[J]. 北京科技大学学报,2006,28(4):383-387  
Li S,Tong L G,Wang L. Experimental research on decreasing the drying rate differences between stems and leaves of the alfalfa[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*,2006,28(4):383-387 (in Chinese)
- [11] Shinnars K J,Koegel R G,Straub R J. Leaf loss and drying rate of alfalfa as affected by conditioning roll type[J]. *Applied Engineering in Agriculture*,1991,7(1):46-49
- [12] Rotz C,Abrams S M,Davis R J. Alfalfa drying loss and quality as influenced by mechanical and chemical conditioning [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*,1987,30(3):630-635
- [13] Manor G,Katz J. Hay harvesting on paper to reduce leaf losses [J]. *Applied Engineering in Agriculture*,1989,5(2):158-162
- [14] 单贵莲,薛世明,徐柱,初晓辉. 不同调制方法紫花苜蓿干燥特性及干草质量的研究[J]. 草业学报,2008,17(4):102-109  
Shan G L,Xue S M,Xu Z,Chu X H. Drying characteristics and hay quality of *Medicago sativa* by different hay making methods[J]. *Acta Prataculturae Sinica*,2008,17(4):102-109 (in Chinese)
- [15] 单贵莲,薛世明,郭盼,张鸭关,初晓辉. 刈割时期和调制方法对紫花苜蓿干草质量的影响[J]. 中国草地学报,2012,34(3):28-33  
Shan G L,Xue S M,Guo P,Zhang Y G,Chu X H. Effect of cutting stage and drying method on hay quality of alfalfa[J]. *Chinese Journal of Grassland*,2012,34(3):28-33 (in Chinese)
- [16] 张晓娜,贾玉山,武红,尹强. 苜蓿干草调制过程中水分散失规律的研究[J]. 种子,2010,29(1):53-57  
Zhang X N,Jia Y S,Wu H,Yin Q. Study on moisture dissipation law of alfalfa hay making during modulating[J]. *Seed*,2010,29(1):53-57 (in Chinese)
- [17] 郭江泽,王成章,严学兵,韩明鹏,樊文娜,范开. 压扁处理对苜蓿水分散失的影响[J]. 草业科学,2009,26(6):106-109  
Guo J Z,Wang C Z,Yan X B,Han M P,Fan W N,Fan K. Effect crushing treatment on moisture loss of alfalfa [J]. *Pratacultural Science*,2009,26(6):106-109 (in Chinese)
- [18] 郑先哲,蒋亦元. 苜蓿干燥特性试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):159-162  
Zheng X Z,Jiang Y Y. Experimental study on the drying process characteristics of alfalfa [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2005,21(1):159-162 (in Chinese)
- [19] Zheng Xian-zhe, Jiang Yi-yuan, Pan Zhong-li. Drying and quality characteristics of different components of alfalfa[J]. *Transactions of the CSAE*,2007,23(2):97-101
- [20] 董宽虎,王常慧,牧原. 干燥方法对苜蓿草粉营养价值的影响[J]. 草地学报,2003,11(4):334-337  
Dong K H,Wang C H,Mu Y. Effects of different drying methods on the nutritive value of alfalfa meal [J]. *Acta Agrestia Sinica*,2003,11(4):334-337 (in Chinese)
- [21] 汪春,车刚,李玉清. 干燥过程对紫花苜蓿粗蛋白含量影响规律的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(9):225-228  
Wang C,Che G,Li Y Q. Experimental study on effect of drying process on crude protein content of alfalfa[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2006,22(9):225-228 (in Chinese)
- [22] 尹强. 苜蓿干草调制贮藏技术时空异质性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013  
Yin Qiang. Study on spatial and temporal heterogeneity of alfalfa hay making and storing technology[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2013
- [23] 尹强,武海霞,王志军,荣磊,贾玉山. 环境因子对苜蓿田间自然干燥的影响[J]. 草地学报,2013,21(1):188-195  
Yin q,Wu H X,Wang Z J,Rong L,Jia Y S. Influence of environmental factors on field natural drying of alfalfa [J]. *Acta Agrestia Sinica*,2013,21(1):188-195 (in Chinese)
- [24] 王坤龙. 苜蓿干燥机制与营养物质变化相关性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014  
Wang K L. Study on correlation of alfalfa haying mechanism and nutrition changes [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2014
- [25] 张晓娜. 不同干燥方法对苜蓿干草营养价值的影响[J]. 草地学报,2013,21(5):977-984  
Zhang X N. Influences of different drying treatments of alfalfa hay nutritional value[J]. *Acta Agrestia Sinica*,2013,21(5):977-984 (in Chinese)
- [26] 高东明,王德成,郝丽颖,孙婕,付作立. 割草调制机的调制机构设计与试验[J]. 江苏大学学报,2013,34(3):287-292  
Gao D M,Wang D C,Hao L Y,Sun J,Fu Z L. Research and experiment of new conditioning mechanism for mower conditioner[J]. *Journal of Jiangsu University*,2013,34(3):287-292 (in Chinese)
- [27] 陈凯,赵春花,罗亚兰,马世伦,卞鲁平,周洋,刘甲元. 牧草压扁机压扁间隙调节装置的设计与试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3):278-282  
Chen K,Zhao C H,Luo Y L,Ma S L,Bian L P,Zhou Y,Liu J Y. Design and test research of flattening gap adjustment device of mower conditioner[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2015,33(3):278-282 (in Chinese)
- [28] 赵建柱,郭海林,王枫辰,张筱青,王一如,黄韶炯. 苜蓿草压扁试验台设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,45(增刊):119-123  
Zhao J Z,Guo H L,Wang F C,Zhang X Q,Wang Y R,Huang S J. Design and test of alfalfa flattening test bench [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,45(Z):119-123 (in Chinese)
- [29] GB/T5262-2008. 农业机械试验条件 测定方法的一般规定[S]. 北京:中国标准出版社,2008  
GB/T5262-2008. Measuring methods for agricultural machinery testing conditions-general rules [S]. Beijing: Standards Press of China,2008