doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.012

苜蓿同向异形制备与堆存试验

余　永[1]　贺　刚[2]　王光辉[1]　王德成[1]　刘贵河[3]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院,呼和浩特 010010;
3.河北北方学院动物科技学院,宣化 075100)

摘要:为分析牧草同向异形堆存方式的优势与合理性,进行了苜蓿同向异形制备与堆存理论分析及试验。通过苜蓿同向异形制备试验,分析了抄板高度、抄板数量以及旋转筒转速 3 个因素对苜蓿同向异形单元单位长度质量和产量的影响。通过分析牧草同向异性堆存的传热传质过程,建立了牧草同向异形堆存的传热传质模型;通过与散草堆存热质传递模型的对比,证明了同向异形堆存的热质传递较快,牧草的同向异形堆存有着能够改善牧草自然通风干燥品质的实际意义。通过苜蓿同向异形堆存试验,测定了堆存过程的温度变化以及腐败变质比例。结果显示:经过同向异形调制整理后的苜蓿,在堆存过程中,牧草的植物活性提高,短期内部的发热较为严重,在经过一段时间之后,苜蓿同向异形堆存的温度下降;苜蓿同向异形堆存比散草堆存的腐败变质减少 23.7% ~76%。

关键词:苜蓿;同向异形;制备;堆存;腐败变质

中图分类号:S216.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)03-0099-07

Preparation and Storage Experiment of Cocurrent Special-shaped Alfalfa

YU Yong[1]　HE Gang[2]　WANG Guanghui[1]　WANG Decheng[1]　LIU Guihe[3]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Huhhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Huhhot* 010010, *China*
3. *College of Animal Science and Technology*, *Hebei North University*, *Xuanhua* 075100, *China*)

Abstract: With the aim to analyze and verify the advantages and rationality of cocurrent special-shaped alfalfa, the preparation and storage experiments were designed and the relative theories were analyzed. Through the preparation experiment of concurrent special-shaped alfalfa, the effects of three factors, such as the height of the flight, the number of flight and the rotation speed of the drum, on the density and yield of the cocurrent special-shaped alfalfa were analyzed. Through the analysis of heat and mass transfer process of cocurrent special-shaped alfalfa storage, a heat and mass transfer model of cocurrent special-shaped alfalfa storage was established. In contrast with the heat and mass storage transfer model of grass normal storage, it can be proved that the heat and mass transfer of cocurrent special-shaped storage was faster, the cocurrent special-shaped alfalfa storage had practically and significantly improved the quality of the grass during natural ventilation. Through the storage experiment of alfalfa, the temperature changes, moisture changes and the ratio of decay were analyzed. Results showed that the alfalfa's plant activity was improved after the cocurrent special-shaped preparation to storage. Although in the short-term, the temperature within the alfalfa heat was increased seriously. After a period of time, the temperature of cocurrent special-shaped alfalfa storage was decreased. The alfalfa decay weight of the cocurrent special-shaped storage was reduced by 23.7% ~76% compared with the scattered storage.

Key words: alfalfa; cocurrent special-shape; preparation; storage; decay

引言

牧草收获过程中,普遍面临雨季问题,降雨会导致牧草品质和蛋白质含量大大受损[1],故刈割的牧草不适宜在田间铺放自然晾晒。因此刈割牧草面临着牧草高含水率的贮藏和加工问题。

收稿日期:2016-09-05　修回日期:2016-12-23

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201203007)

作者简介:余永(1989—),男,博士生,主要从事畜牧机械和生物质加工机械研究,E-mail:yyeric@yeah.net

通信作者:王光辉(1974—),男,副教授,博士生导师,主要从事畜牧机械、生物质加工研究,E-mail:guanghui.wang@cau.edu.cn

含水率高的牧草直接贮藏、打捆、压块会导致牧草变质[2-5]。人工机械干燥是牧草调质和降低含水率的有效手段,但会受到燃料价格、机器成本等因素制约[6-8]。牧民生活居住以小范围群居为主,干燥调制装置无法适应不同地区的经济、地况等实际情况[9]。因此,很多地区(例如青藏高原等能源匮乏地区)就需要把高含水率牧草不进行机械干燥工艺就直接进行堆存。而由于较高的含水率,牧草直接堆存会出现细胞呼吸作用,释放大量热量,导致牧草大量变质腐烂。

部分地区采取的“晾草架”形式进行堆贮通风干燥能够有效解决高含水率牧草室内堆存的大量变质腐烂问题。“晾草架”的关键工艺是首先把牧草全部沿着长度方向进行异形整理,然后进行堆存;它的基本加工环节为同方向排列收获的鲜草卷绕牧草形成“麻花辫”。青藏高原牧民的长期实践证明了牧草的同向异形堆存能够在有限的室内晾晒面积情况下,最大限度地减少牧草的堆存发霉、变质。然而,目前还没有针对这种堆存方式能够减少变质和腐败的理论与实践分析。

本文设计一种机械化苜蓿同向异形制备装置并进行试验,探讨同向异形牧草的物理参数与机器参数的关系;然后进行苜蓿的同向异形堆存试验,并与普通堆存方式进行对比,分析同向异形堆存过程中不同含水率苜蓿内部温度与腐败比例的变化。

1 牧草同向异形制备试验

1.1 牧草同向异形特点

图 1 所示为牧草同向异形单元产品。牧民实际使用的单元产品螺距为 150 ~ 250 mm,单位长度质量为 0.4 ~ 1.0 kg/m,直径为 100 ~ 250 mm。



图 1 牧草同向异形单元产品

Fig. 1 Cocurrent special-shaped alfalfa unit

1.2 牧草同向异形制备装置

牧草的同向异形单元产品类似于“麻花辫”,牧草沿着长度方向不断缠绕。因此,同向异形装置必须对牧草完成直线运动与旋转运动,装置的原理如图 2 所示。

针对上述原理,装置采用旋转筒内部布置若干螺旋抄板的形式对牧草进行成型作业。图 3 所示为同向异形装置三维设计图。

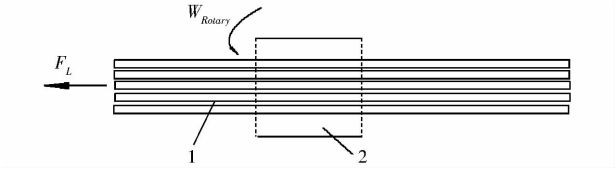

图 2 同向异形装置原理

Fig. 2 Principle of forming equipment

1. 牧草 2. 旋转筒

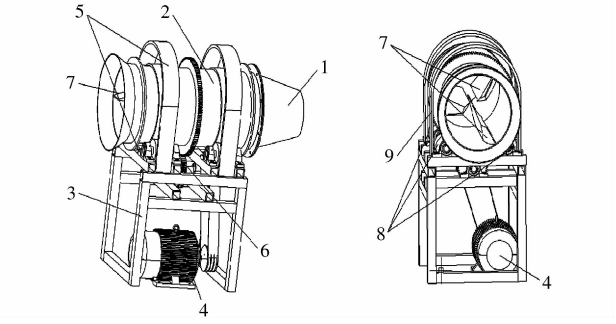

图 3 牧草同向异形装置三维图

Fig. 3 3D graph of cocurrent special-shaped alfalfa preparation equipment

1. 出料筒 2. 旋转筒 3. 机架 4. 电动机 5. 支撑系统 6. 传动系统 7. 螺旋抄板 8. 支撑轮 9. 固定圈

同向异形装置包括旋转筒、出料筒、螺旋抄板、传动系统、支撑系统、电动机和机架。旋转筒和出料筒通过螺栓连接,旋转筒与出料筒转速相同,出料筒的出料口直径小于旋转筒进料口直径。螺旋抄板焊接在旋转筒和出料筒的内部筒壁上,在旋转筒和出料筒内部均布。支撑轮的支撑作用确保旋转筒正常旋转;支撑系统的固定圈约束旋转筒不产生径向运动,挡轮和挡板圈约束旋转筒没有轴向窜动,保证旋转筒正常、稳定地工作。同向异形装置的设计参照文献[10]。

同向异形装置的总体结构尺寸为 1 200 mm × 590 mm × 1 250 mm。旋转筒的大小决定了牧草同向异形单元产品的直径。设计的旋转筒出口直径为 160 mm。拉伸速度与旋转速度决定了单元产品的牧草缠绕螺距。旋转筒转速为 60 ~ 300 r/min 可调,过低的转速会影响生产效率,过高的转速会导致牧草由于离心力而紧贴在旋转筒内壁,拉伸过程会使苜蓿同向异形单元产品断裂。旋转筒长度为 1 200 mm。螺旋抄板的螺距为 600 mm,螺旋抄板在旋转筒内均布 1 ~ 6 个,螺旋抄板高度为 0 ~ 90 mm(高度是指抄板的最高点与旋转筒内壁的距离),抄板数量和高度可根据牧草品种进行调整。

装置工作过程:启动电动机,电动机带轮的转动传递给中间带轮,中间带轮与中间齿轮同转速转动,中间齿轮与外圈齿轮啮合运动,旋转筒旋转。从旋转筒的喇叭状进料口喂入鲜草,内部螺旋抄板能使

鲜草向前运动，在出料筒的出口处，人工通过均匀控制螺距的方式以一定的速度拉伸出牧草同向异形单元产品，成型作业完成。

图 4 所示为使用装置制备的牧草同向异形单元产品。



图 4　使用装置制备的牧草同向异形单元产品

Fig. 4　Cocurrent special-shaped alfalfa unit prepared by using the device

1.3　制备试验与分析

制备试验的目的是探讨机器参数与牧草同向异形单元物理特性的关系。

不同的旋转筒转速、抄板数量和抄板高度都对牧草同向异形单元产品的物理特性产生影响。不同的旋转筒转速，使内部抄板对牧草的缠绕作用不同并且滑移率不一样；不同的抄板数量随着旋转筒的旋转对牧草产生不同的缠绕效果；抄板高度影响抄板对牧草的缠绕滑移率。通过预试验，得出旋转筒转速为 160 ~ 220 r/min 时，可以较好地得到牧草同向异形单元产品，过高转速牧草同向异形单元产品容易断裂，过低转速产率过低；过多的抄板数量以及过高的抄板高度都会阻碍牧草在旋转筒内的移动，而过少的抄板数量和过低的抄板高度，牧草同向异形单元产品的制备效率过低，因此得出抄板高度为 6 ~ 80 mm，抄板数量为 1 ~ 6。

对抄板高度、抄板数量以及旋转筒转速 3 个影响因素进行了三因素三水平的正交试验[11]，试验参数见表 1。通过调节电动机转速来实现旋转筒的转速控制。抄板焊接在旋转筒内部，抄板数量和抄板高度的控制通过更换不同的抄板来实现，每次更换先把上次试验中的抄板切割下来重新焊接上新的抄板。

表 1　试验因素与水平

Tab. 1　Experimental factors and levels

水平	因素		
	抄板高度/mm	抄板数量/个	旋转筒转速/(r·min^{-1})
1	80	6	160
2	40	3	190
3	6	1	220

相同旋转筒转速、抄板数量和高度条件下，牧草同向异形单元的物理特性只与出料口的拉伸速度有关，只要保证牧草不间断的喂入即可。使用同向异形装置进行苜蓿同向异形制备试验，苜蓿含水率为 65.3 %，生产出的样品直径为 160 mm；试验过程中通过调整拉伸速度来控制牧草同向异形的螺距保持在(200 ± 20) mm。

每次试验完毕后统计时间，并且测量成型的牧草同向异形单元的总长度；对成型的牧草同向异形单元进行称量，可以计算单位长度质量，计算产量[11]。试验结果与极差分析结果见表 2。

由极差结果可知，随着抄板高度的减小，产量升高；随着抄板数量减少，产量升高；旋转筒转速在 160 r/min 时，产量最高。旋转筒转速对产量的影响最大。

以单位长度质量为指标考察时，当抄板高度为 6 mm 时，单位长度质量最大；当抄板数量为 3 时，单位长度质量最大为 0.978 kg/m；当转速为 220 r/min 时，单位长度质量最大为 0.892 kg/m。对单位长度质量的影响大小排序依次为抄板高度、抄板个数、旋转筒转速。表 3 为牧草同向异形试验的方差分析结果。

由表 3 可知，抄板高度、抄板数量和旋转筒转速对产量均没有显著影响。但是，可以发现抄板高度、抄板数量和旋转筒转速对单位长度质量的影响大于对产量的影响。另外，抄板高度对牧草同向异形单元的单位长度质量有显著性影响。在产量相当的情况下，牧草同向异形单元的单位长度质量才是影响堆存效果的关键因素。

2　苜蓿同向异形堆存原理分析

图 5 为苜蓿同向异形堆存圆周截面方向的简图。与普通的牧草堆存方式最大不同是单根牧草纤维的孔隙大小不一，普通的牧草堆存单根牧草之间的间隙相近，几乎可以认为均等。通过异形处理后，孔隙差别大。图 5 中的绿色框为控制单元。

图 6 为某异形堆存的控制单元传质分析图。

设某控制单元内的蒸汽密度为 ρ_{vij}^{n}(设该时刻 $t = n\Delta t$，n 表示时间步长)，则控制单元内水蒸气的变化量等于通过对流进入、流出单元的水蒸气净值与源项(释放出来的蒸汽量)之和[12]，即

$$\Delta M = \sum F_k + \sum S_k \tag{1}$$

式中　ΔM——控制单元内蒸汽质量变化率，kg/s

F_k——通过对流进入、流出单元的水蒸气质量流率，kg/s

S_k——控制单元内圆截面释放出来的蒸汽增加率，kg/s

表 2 苜蓿同向异形制备试验安排与试验结果

Tab. 2 Experimental plan and results

试验序号		机器参数			所测指标	
		抄板高度/mm	抄板数量/个	旋转筒转速/(r·min^{-1})	产量/(kg·h^{-1})	单位长度质量/(kg·m^{-1})
1		80	6	160	551.2	0.435
2		80	3	190	323.4	0.647
3		80	1	220	807.6	0.613
4		40	6	190	568.1	0.701
5		40	3	220	1 063.8	0.985
6		40	1	160	656.3	0.941
7		6	6	220	798.9	0.832
8		6	3	160	635.9	1.302
9		6	1	190	923.1	0.832
产量	K_{11}	560.7	639.4	890.1		
	K_{12}	762.7	674.4	604.9		
	K_{13}	785.97	795.7	614.5		
	R_{1j}	225.27	156.3	285.1		
	优水平	6	1	160		
	主次因素顺序	旋转筒转速、抄板高度、抄板数量				
单位长度质量	K_{11}	0.565	0.656	0.810		
	K_{12}	0.876	0.978	0.727		
	K_{13}	0.989	0.795	0.892		
	R_{1j}	0.424	0.322	0.166		
	优水平	6	3	220		
	主次因素顺序	抄板高度、抄板数量、旋转筒转速				

表 3 苜蓿同向异形制备试验的方差分析结果

Tab. 3 Variance analysis of the cocurrent special-shaped alfalfa preparation

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	Sig 值
产量	校正模型	289 853.420	6	48 308.903	0.957	0.592
	截距	4 449 708.988	1	4 449 708.988	88.178	0.011
	抄板高度	92 073.842	2	46 036.921	0.912	0.523
	抄板数量	40 355.629	2	20 177.814	0.400	0.714
	旋转筒转速	157 423.949	2	78 711.974	1.560	0.391
	误差	100 925.722	2	50 462.861		
	总计	4 840 488.130	9			
	校正的总计	390 779.142	8			
单位长度质量	校正模型	0.487	6	0.081	7.326	0.125
	截距	5.901	1	5.901	532.796	0.002
	抄板高度	0.289	2	0.145	13.057	0.071
	抄板数量	0.156	2	0.078	7.058	0.124
	旋转筒转速	0.041	2	0.021	1.863	0.349
	误差	0.022	2	0.011		
	总计	6.410	9			
	校正的总计	0.509	8			

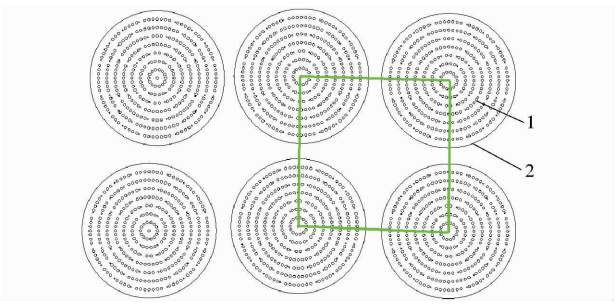

图 5 同向异形堆存原理图

Fig. 5 Principle of cocurrent special-shaped alfalfa storage

1. 单根牧草 2. 同向异形堆存单体

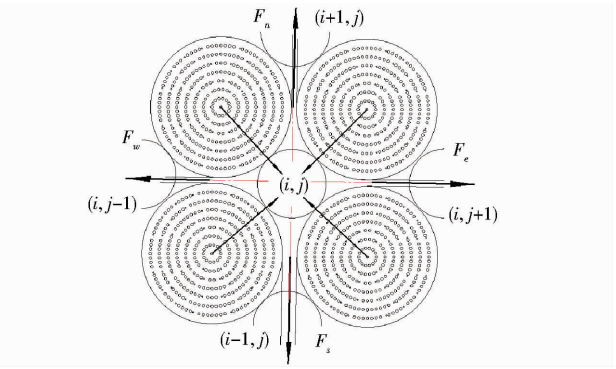

图 6 某异形堆存的控制单元传质分析图

Fig. 6 Mass transfer of control unit

其中非稳态项[13]

$$\Delta M = \frac{4}{3}\pi R_d^3 \frac{\rho_{vij}^n - \rho_{vij}^{n-1}}{\Delta t} \tag{2}$$

式中　Δt——时间，s

R_d——节点孔径，m

ρ_{vij}^n——空隙内蒸汽密度，kg/m^3

图 7 为某异形堆存的控制单元传热分析图。

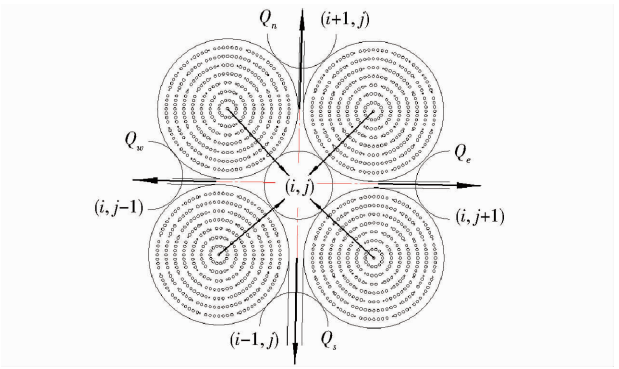

图 7　某异形堆存的控制单元传热分析图

Fig. 7　Heat transfer of control unit

以牧草截面为热源，某节点上控制单元内的温度为 T_{ij}^n，则单元时间内，由能量守恒可得控制单元内，汽相的热焓变化量等于通过汽相流动带入、带出控制单元的热量净值与源项（颗粒吸收的热量为负值）之和[14-15]，即

$$\Delta U = \sum Q_k + \sum q_k \tag{3}$$

式中　ΔU——单位时间内控制单元内热焓的变化率，J/s

Q_k——单位时间内通过汽相流动带入、带出控制单元的传热量，J/s

q_k——单位时间内牧草截面对控制单元的对流吸热，J/s

其中非稳态项[16]

$$\Delta U = \frac{4}{3}\pi R_d^3 \frac{\rho_{ij}^n c_{ij}^n T_{ij}^n - \rho_{ij}^{n-1} c_{ij}^{n-1} T_{ij}^{n-1}}{\Delta t} \tag{4}$$

式中　c_{ij}^n——蒸汽密度

c_{ij}^n——汽相比热容，J/(kg·K)

通过上述的通风干燥过程传热传质的分析，可以得出传热传质过程都与圆截面之间的间隙相关，并且都与孔隙孔径的三次方相关。可以假设牧草同向异形堆存在横截面上满足的传热传质方程均满足

$$Y_S = K \sum_{i=1}^{n} R_i^3 \tag{5}$$

式中　K——系数

R_i——控制单元 i 的节点孔径

Y_S——传热传质的总量

如果牧草进行普通的堆存，即可以认为所有控制单元的节点孔径相等，同等量的散草堆存与异形堆存相比，可以认为总体孔径相等，那普通堆存传热传质方程可以表达为

$$Y_N = K\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n}\right)^3 \tag{6}$$

可知，$Y_S > Y_N$；故而同向异形的堆存热质传递较快。牧草的同向异形堆存有着能够改善牧草自然通风干燥品质的实际意义。但是其中有部分牧草的间隙过小，极其容易变质腐败，控制牧草同向异形单元的单位长度质量尤其重要，同时也为保证堆存过程中尽量少的牧草品质降低。

3　苜蓿同向异形堆存试验

采用不同含水率的苜蓿鲜草进行苜蓿同向异形成型作业试验，并进行堆存，记录苜蓿同向异形堆存过程中的物理参数变化，并与苜蓿散草堆存进行对比。

3.1　试验地点与材料

在河北省张家口市河北北方学院实验室内进行试验，使用的原料为河北北方学院试验用地生长的苜蓿，为第三茬苜蓿，收获时间为 10 月 10 日。初始含水率达 80%。收获同一批苜蓿共计约 1 000 kg。

3.2　试验过程

首先将刚收获的新鲜苜蓿，及时摊晒在通风干燥处，晾晒厚度不大于 20 cm。

针对本试验，特加工制作了 8 个用于堆存牧草同向异形单元与散草的草框，草框全用螺栓连接。所有挡板均为薄板且薄板上紧密冲压多个大圆孔，以便通风，故可以忽略草框的侧板对堆存草的密封作用；草框底部加 200 mm 高立柱垫高，确保底部通风。草框总体大小 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm，牧草同向异形单元和散草堆存高度统一为 800 mm。

使用本文中的牧草同向异形装置将新鲜的苜蓿即时进行苜蓿同向异形成型，装置中的旋转筒转速为 190 r/min，抄板高度为 40 mm，抄板数量为 3。同时测定苜蓿含水率，制作 70 kg 左右的苜蓿同向异形样品，并进行 1 m 间隔的剪切，而后平行铺放在草框内，每层牧草同向异形单元平铺方向统一，铺满草框达 800 mm 高，命名样品 YX－1；同时用同一批苜蓿不作处理堆存放入另外一个草框，堆存高度为 800 mm，命名样品 PT－1。

图 8 为苜蓿堆存现场。

第 2 天使用仍然在自然通风晾晒的苜蓿进行牧草同向异形单元制备，进行含水率测定，进行重复操作，得到堆存样品，命名样品 YX－2、PT－2；连续 4 d 进行同样的牧草同向异形单元制备并堆存，同时测



图 8 苜蓿堆存现场

Fig. 8 Alfalfa storage site

定含水率[17]。第 3 天和第 4 天样品编号为:YX-3、PT-3;YX-4、PT-4。每次样品制备结束后,第 2 天同时刻进行温度测量,测量点在样品的上部、中部和底部。所有样品的晾晒和堆存时间共 8 d。第 8 天后,把全部样品取出,测定腐败变质的苜蓿质量,并计算腐败变质百分比。

3.3 温度变化规律

对草框内堆存牧草同向异形单元和堆存散草的温度,经过 8 d 时间记录,绘制温度变化曲线[16],如图 9 所示。

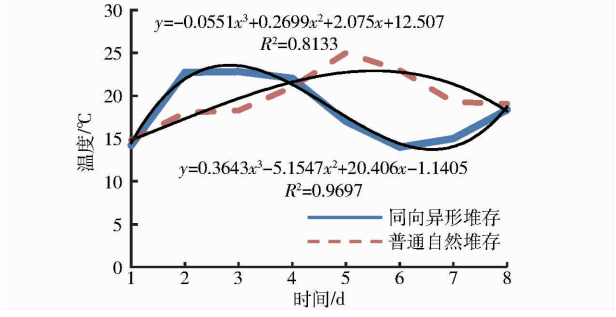

图 9 苜蓿堆存温度变化曲线

Fig. 9 Temperature changing of alfalfa storage

可以得出,苜蓿同向异形堆存的温度短期内升高程度大于散草堆存的温度,但是 4 d 后,苜蓿同向异形堆存的温度急剧下降,而散草堆存的温度持续升高[18],8 d 后,2 种堆存方式下的温度基本相当。可以得出,经过调制整理后的牧草同向异形单元堆存后,牧草的植物活性提高,短期内部的发热较为严重[19-20],在经过一段时间之后,苜蓿同向异形堆存的温度会下降,并在后期升高到一个稳定的水平,但是散草堆存的温度会一直升高,后期的温度会高于苜蓿同向异形堆存的温度。苜蓿同向异形堆存和散草堆存过程的温度变化进行回归分析,得出如图中方程。

3.4 腐败变质规律

图 10 为苜蓿同向异形堆存与普通堆存后发霉变质的照片。



(a) 苜蓿同向异形堆存腐烂 (b) 散草普通堆存腐烂

图 10 苜蓿同向异形堆存与散草普通堆存后发霉变质情况

Fig. 10 Decay situation of alfalfa storage

测定 8 d 后苜蓿同向异形堆存与散草普通堆存的苜蓿腐败变质百分比,绘制腐败变质百分比柱状图[17],如图 11 所示。

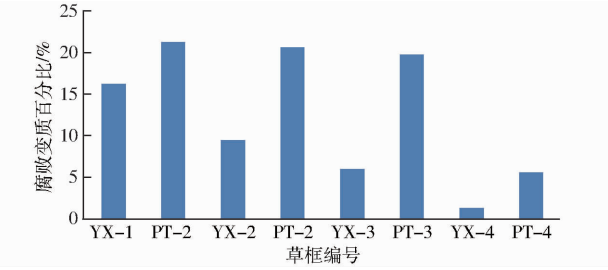

图 11 腐败变质牧草比例

Fig. 11 Proportion of grass decay

可以看出,随着时间的延长,苜蓿同向异形堆存的腐败比例从 1.34% 经过 5.97%、9.45%,最后到 16.22%,腐败变质比例一直在升高,但是草框 YX-1 相比于草框 PT-1,草框 YX-2 相比草框 PT-2,草框 YX-3 相比草框 PF-3,草框 YX-4 相比草框 PT-4,苜蓿的腐败变质百分比一直较小;通过对比,发现散草堆存的腐败变质百分比短期升高较快,4 d 左右就达到 19.76%,但是 3 d 后还是 21.26%,苜蓿同向异形堆存的草框内苜蓿腐败变质百分比变化较大,比散草堆存的腐败变质质量少 23.7% ~ 76%[17],并且随着苜蓿含水率的下降,与散草堆存相比,苜蓿同向异形堆存的腐败变质百分比不断下降。

4 结论

(1)苜蓿同向异形装置的抄板高度、抄板数量和旋转筒转速对单位长度质量的影响大于对产量的影响。另外,抄板高度对牧草同向异形的单位长度质量有显著性影响。

(2)建立了牧草同向异形堆存的热质传递模型,分析了堆存过程中的传热传质过程;牧草同向异形堆存在横截面上传热传质方程均满足 $Y_S = K\sum_{i=1}^{n} R_i^3$;普通堆存传热传质方程可以表达为:$Y_N =$

$K\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n}\right)^3$。$Y_S > Y_N$，故而同向异形堆存的热质传递较快。证明了苜蓿同向异形堆存有改善牧草自然通风干燥品质的实际意义。

（3）苜蓿同向异形堆存试验表明：经过同向异形调制整理后的牧草，在堆存过程中，牧草的植物活性提高，短期内部的发热较为严重，经过一段时间之后，苜蓿同向异形堆存的温度会下降，并在后期升高到一个稳定的水平，但是散草堆存的温度会一直升高，且后期的温度会高于苜蓿同向异形堆存的温度。苜蓿同向异形堆存比散草堆存的腐败变质质量少 23.7% ~ 76%，并且随着苜蓿含水率的下降，与散草堆存相比，苜蓿同向异形堆存的腐败变质比例不断下降。

参 考 文 献

1 杨殿林，巴达尔胡，安胜利. 牧草青贮技术[J]. 黑龙江畜牧兽医，1999(10)：20.

2 巴克提·多司木. 雨季苜蓿草使用及加工调制方法[J]. 中国畜禽种业，2016(3)：14 - 15.

3 李旭英，杨明韶，白雪卫，等. 饲草含水率对压块成形的影响[J]. 农机化研究，2004(4)：150 - 152.
LI X Y，YANG M S，BAI X W，et al. The affection of water ratio of the forage grass to the cube formation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2004(4)：150 - 152. (in Chinese)

4 闫文刚，俞国胜，张海鹰，等. 含水率对草坪草常温开模成型的影响[J]. 农业工程学报，2011，27(增刊 1)：162 - 165.
YAN W G，YU G S，ZHANG H Y，et al. Effects of moisture content on turfgrass forming at room-temperature [J]. Transactions of the CSAE，2011，27(Supp. 1)：162 - 165. (in Chinese)

5 SHNNERS K J，HUENINK B M，MUCK R E，et al. Storage characteristics of large round and square alfalfa bales：low-moisture wra pped bales[J]. Transactions of the ASABE，2009，52(2)：401 - 407.

6 农村养殖技术编辑部. 牧草 3 种自然干燥法[J]. 农村养殖技术，2008(13)：32.

7 刘玲，陈新，李振，等. 含水量及添加剂对高冰草青贮饲料品质的影响[J]. 草业学报，2011，20(6)：203 - 207.
LIU L，CHEN X，LI Z，et al. Effects of moisture content and additives on the quality of agropyron elongatum silage[J]. Acta prataculturae Sinica，2011，20(6)：203 - 207. (in Chinese)

8 潘美娟，张克春. 不同加工工艺对苜蓿草品质的影响[C]//2011 第四届中国苜蓿发展大会论文集，2011.

9 王启基，景增春，王文颖，等. 青藏高原高寒草甸草地资源环境及可持续发展研究[J]. 青海草业，1997(3)：1 - 11.
WANG Q J，JING Z C，WANG W Y，et al. The study of grassland resource，ecological environment and sustainable development in Qinghai - Xizang Plateau[J]. Qinghai Prataculture，1997(3)：1 - 11. (in Chinese)

10 王光辉，余永. 一种苜蓿鲜草草辫成型工艺及专用成型装置：中国，ZL201310243376.0[P]. 2013 - 06 - 19.

11 YU Y，WANG G，WANG D，et al. Braided grass molding equipment design and test[C]//2014 ASABE Annual International Meeting ASABE Paper 141911782，2014.

12 袁越锦. 非固结多孔介质干燥的多尺度孔道网络模拟与实验研究[D]. 北京：中国农业大学，2007.
YUAN Y J. The multi-scale pore network simulation and experimental study，porous media drying non consolidation [D]. Beijing：China Agricultural University，2007. (in Chinese)

13 葛仕福，郑荣和，施明恒. 多孔小颗粒对流干燥的数值模拟[J]. 热科学与技术，2008(2)：104 - 108.
GE S F，ZHENG R H，SHI M H. Numerical simulation of drying of small porous particles[J]. Journal of Thermal Science and Technology，2008 (2)：104 - 108. (in Chinese)

14 袁越锦，杨彬彬，徐英英，等. 非固结多孔介质干燥的双尺度孔道网络模型与模拟[J]. 工程热物理学报，2010，31(2)：302 - 306.
YUAN Y J，YANG B B，XU Y Y，et al. A two-scale pore network model for the drying of non-consolidated porous media[J]. Journal of Engineering Thermo physics，2010，31(2)：302 - 306. (in Chinese)

15 李阳春，陈光明，王剑锋，等. 含湿多孔生物材料干燥过程的传热传质分析[J]. 农业机械学报，2003，34(4)：82 - 85.
LI Y C，CHEN G M，WANG J F，et al. Analysis of simultaneous heat and mass transfer during drying of porous solid[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2003，34(4)：82 - 85. (in Chinese)

16 贾灿纯，曹崇文. 小麦干燥过程中颗粒内部的扩散机理和有限元分析[J]. 洛阳工学院学报，1994，15(4)：32 - 37.
JIA C C，CAO C W. Diffusion theory and finite analysis in wheat kernel drying[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology，1994，15(4)：32 - 37. (in Chinese)

17 YU Y，WANG G，WANG D，et al. Alfalfa braided perishable characteristics of natural ventilation stack storage process[C]//2014 ASABE Annual International Meeting ASABE Paper 141911900，2014.

18 郭江泽. 苜蓿青干草在调制和贮藏过程中的质量变化规律研究[D]. 郑州：河南农业大学，2009.
GUO J Z. Study on the variation law of the quality of alfalfa hay in the process of modulation and storage[D]. Zhengzhou：Henan Agricultural University，2009. (in Chinese)

19 SANTOS M C，KUNG L J. Short communication：the effects of dry matter and length of storage on the composition and nutritive value of alfalfa silage[J]. Journal of Dairy Science，2016，99(7)：5466 - 5469.

20 SHNNERS K J，HUENINK B M，MUCK R E，et al. Storage characteristics of large round alfalfa bales：dry hay[J]. Transactions of the ASABE，2009，52(2)：409 - 418.