

破损青黄贮裹包饲料内部温度动态研究*

程洪^{1,2} 孙宇瑞¹ Wolfgang Buescher³ 程强¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001; 3. 德国波恩大学农业工程学院, 波恩 53115)

摘要: 为了实现对青黄贮裹包饲料有氧变质的风险预测, 针对破损青黄贮裹包饲料内部温度变化问题, 以青黄贮黑麦草及青黄贮苜蓿为对象展开了研究。设计了特定的贯入仪, 在不引入空气的情况下将温度传感器植入裹包饲料内, 实现了监测裹包内特定位置温度变化的可操作化。采用两种方案分别对黑麦草裹包饲料与苜蓿裹包饲料内特定位置的温度进行监测, 发现在裹包破损后, 距离裹包破损口越近的饲料发生温升越早; 对裹包内上部与下部相对应的温度检测值进行配对 *t* 检验, 试验结果表明, 破损裹包内与破损口距离相等但分处在裹包上部与下部对称的两点温升过程具有显著差异; 分别对不同干物质含量的青黄贮苜蓿与黑麦草裹包饲料温升曲线进行对比, 干物质含量较高的青黄贮裹包饲料较干物质含量低的温升快。制定了裹包内温度场分布数据的获取方案, 并实现了温度场的可视化。

关键词: 裹包青黄贮饲料 温度 有氧变质 覆膜破损

中图分类号: S816.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0194-06

Temperature Dynamics in Bale Silage with Damaged Cover

Cheng Hong^{1,2} Sun Yurui¹ Wolfgang Buescher³ Cheng Qiang¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China

3. Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract: The deterioration risk of bale silage is relatively high because of a high surface-area to volume ratio. Therefore, the damages of plastic covers of bales should receive particular attention since it may often occur during removing or transportation process. When bales are punctured, oxygen is allowed to permeate the silage and subsequently aerobic organisms flourish and metabolize the products of fermentation, and the temperature inside the bales will rise up again. So temperature is a key indicator when the material is noticed to be “heating” since while oxygen comes into contact with the silage. In order to forecast the risks of aerobic deterioration of silage, grass bale silage and alfalfa bale silage were selected as study objects. The method which used to embed temperature sensors into the bale to measure the temperature was proposed. The self-developed multi-sensor experimental system with a specific penetration shaft and cone (V-structure) was used. While the cone penetrated into bale, the thermal-couple sensor followed the cone into the bale. If the cone arrived at the place desired, the cone would extract but the thermal sensors would stay at the place. It can put the sensors into bale without introducing air followed. Two schemes measuring temperature changes in punctured bale were designed. The temperature of planned locations in bale was monitored. It was detected that the temperature of the

收稿日期: 2014-11-19 修回日期: 2014-12-20

* 中德合作科研资助项目(GZ888)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 程洪, 博士生, 河北农业大学讲师, 主要从事机器视觉相关技术研究, E-mail: chenghong@cau.edu.cn

通讯作者: 孙宇瑞, 教授, 博士生导师, 主要从事农业自动化研究, E-mail: pal@cau.edu.cn

silage which was closer from the damaged cover rose sooner. Paired t test was done between the corresponding values from the upper and the lower within bale silage. The test results showed that two temperature rising processes of upper and lower had a significant difference. By temperature curve comparison of the same silage materials with different dry matter contents, it was found that the temperature rising of silage with higher dry matter was faster. Furthermore, to measure the temperature field inside bale, a specific penetrometer was designed. It was fixed on the platform of measurement and controlled during temperature measurement. Based on the data of temperature distribution, the temperature distribution in bale silage could be visualized in 3D map. It is a powerful tool to analyze temperature distribution around the bale silage in multi-angle.

Key words: Bale silage Temperature Aerobic deterioration Cover damage

引言

饲料可以被加工成不同的形式存储供畜牧喂养,这些形式包括圆形/方形裹包、塔仓与窖仓等。从减少收获过程青饲料损失与发酵过程干物质损失、保证发酵质量与安全存储等方面综合衡量,裹包饲料是最优的选择。发达国家裹包饲料的应用已经非常普及,发展中国家也在日渐普及过程中。但是对于裹包青黄贮饲料,它的几何结构决定了其很大的表面积/体积比,且易与锋利器物接触导致划伤从而使塑封膜破损率很高。因此,外部空气侵入引起异常温升导致饲料变质的风险度也随之增高。因为伴随着有氧呼吸,饲料中的碳水化合物被分解,过多的空气导致饲料中可观的能量以热能的形式散失,造成可消化营养素的损失(这种损失或直接由呼吸作用产生或间接通过不可逆的缩合反应产生)和霉菌的滋生。因此在影响青黄贮裹包饲料质量的不同因素中,裹包内的温度参数最为关键^[1-6]。

许多学者已对青黄贮饲料有氧变质进行了研究。20 世纪 80 年代就有学者提出了随时间推移青黄贮饲料质量恶化的量化分析模型^[7-9],但是这些模型没有提供青黄贮堆内温度分布的任何信息。早期基于温度变化的青黄贮裹包饲料变质预测模型是由 Ruxton 等^[10-11]建立的,他们提出的偏微分方程可以用来模拟裹包内的温度变化,但是模拟结果没有进行试验验证。Bartzanas 等^[12]建立了流体动力学模型预测青黄贮堆内温度在时间与空间上的变化,但是有关青黄贮裹包饲料(黑麦草和苜蓿)有氧变质产生的温度变化未见报道。

为了实现对青黄贮裹包饲料有氧变质的风险预测,本文以青黄贮黑麦草及青黄贮苜蓿为研究对象,以如何获取裹包内青黄贮饲料的温度动态变化以及温升后裹包内温度场的分布情况为着眼点,进行裹包内饲料温度动态研究。

1 试验设备及方法

1.1 工作平台

如图 1 所示,此平台由中国农业大学与波恩大学联合研发,完成于波恩大学农业工程学院。由此平台硬件核心的 3 个电动机,分别完成裹包旋转、贯入仪承载装置在 x 轴方向的滑动和贯入仪在 y 轴方向的运动。上位机可通过控制系统对 3 个电动机进行控制实现试验要求。

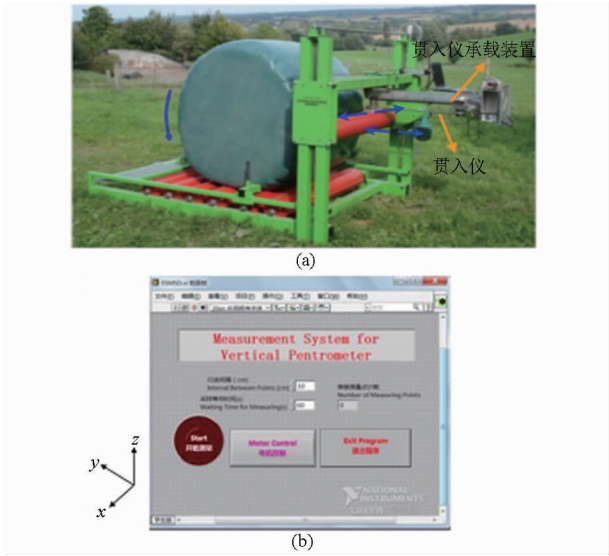


图 1 测控平台

Fig. 1 Platform for measurement and control

(a) 测量控制装置 (b) 控制系统界面

1.2 热电偶植入裹包

要测量裹包内温度必须将温度传感器植入裹包内。为了实现放入温度传感器同时不引入空气进入裹包内,本文设计了一个安置贯入仪,如图 2 所示。温度传感器放置步骤如图 3 所示。将热电偶安置在贯入仪顶部;贯入仪在饲料的紧密包裹下进入包内,热电偶随之进入;当贯入仪到达指定位置,将其撤回,撤回过程中受到挤压的饲料随着贯入仪的撤出迅速回填,于是在不引入空气的情况下将热电偶留

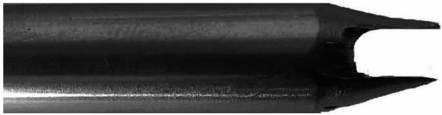


图 2 安置贯入仪

Fig.2 Specific penetration shaft and cone

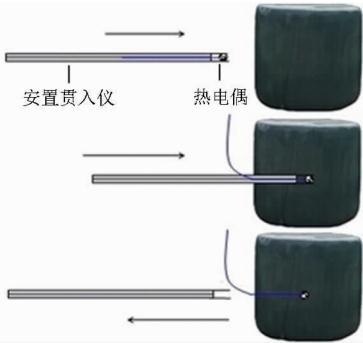


图 3 热电偶放置步骤

Fig.3 Steps of putting thermal-couple

在了指定位置。

1.3 裹包内温度场测量方法

为了测得裹包内温度场的分布,本文设计了测温贯入仪。图 4 为将测温贯入仪安装在工作平台的贯入仪承载装置上,在上位机控制下进行测温的工作场景。

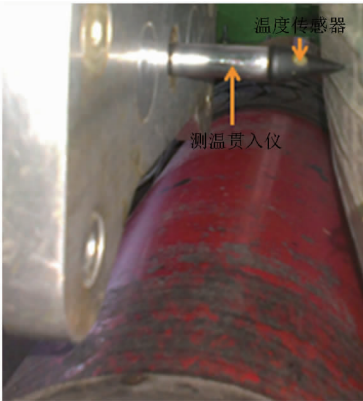


图 4 测温贯入仪的工作场景

Fig.4 Working scene of penetrometer for testing temperature

2 试验设计

本研究已连续进行了两年(2012—2013 年),对裹包采用了不同的破损方式并设置了不同的温度监测点。2012 年试验方案如图 5a 所示,完好的青黄贮饲料裹包横向放置在支撑木板上,试验开始时,在裹包一侧面上用环刀破开一个底面直径约为 10 cm、长约 15 cm 的孔洞。横向中心轴线上有 3 个检测点 5、7、9,距离破损侧面分别为 20、60、100 cm,点 1~5 处于同一轴面上,与横向中心轴距离均为 40 cm。点 1、3 对称分布在轴面纵轴的上部(远地端)与下部(近地端),点 2、4 对称分布在轴面横轴上。点 6~8

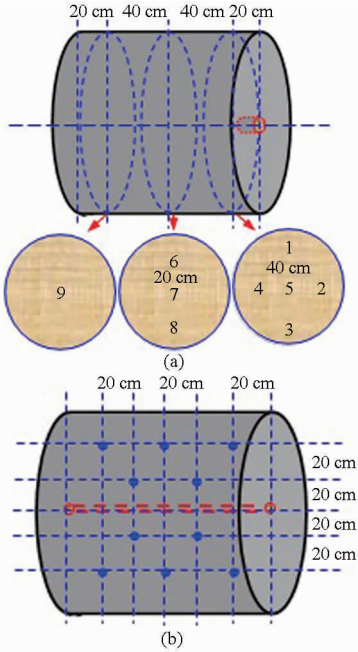


图 5 试验方案设计

Fig.5 Experiment schemes

(a) 2012 年 (b) 2013 年

处于同一轴面,与横向中心轴距离均为 20 cm,对称分布在轴面纵轴上部(远地端)与下部(近地端)。2012 年所用试验材料为 1 个苜蓿裹包饲料(Alfalaf-1)和 1 个黑麦草裹包饲料(Grass-1)。2013 年试验方案如图 5b 所示,裹包饲料横向放置在支撑木板上,试验开始,对裹包进行破损,沿裹包饲料横向中心轴线将裹包打通,孔洞直径约 10 cm,温度检测点分布在裹包饲料的矩形横截面上,上半部 5 个检测点,其中 2 个距离横向中心轴线 20 cm,3 个距离横向中心轴线 40 cm,下半部 5 个检测点与上半部对称分布。所用试验材料为 2 个苜蓿裹包饲料(Alfalfa-2、Alfalfa-3)与 2 个黑麦草裹包饲料(Grass-2、Grass-3)。试验在室内开展。所有试验用裹包均由德国 CIAAS 公司的打包机打包成圆柱形,底面直径 1.2 m,高 1.2 m。试验用裹包饲料,均采用干燥法检测干物质含量。

温度检测结束后,通过测量裹包内 6 个轴面,每个轴面上 84 个点的温度,以实现整个裹包内温度场分布的可视化。如图 6 所示,轴面间的夹角为 30°,轴向方向的点间距为 15 cm,底面直径方向的点间距为 10 cm。

3 数据分析

2012 年裹包饲料中心轴线上监测点的温度动态,如图 7 所示,图中曲线代表了相对监测点的日温度变化。在 Grass-1 与 Alfalfa-1 中均可见距裹包破损口 20 cm 处点 5 的温升较 40 cm 处点 7 的温升

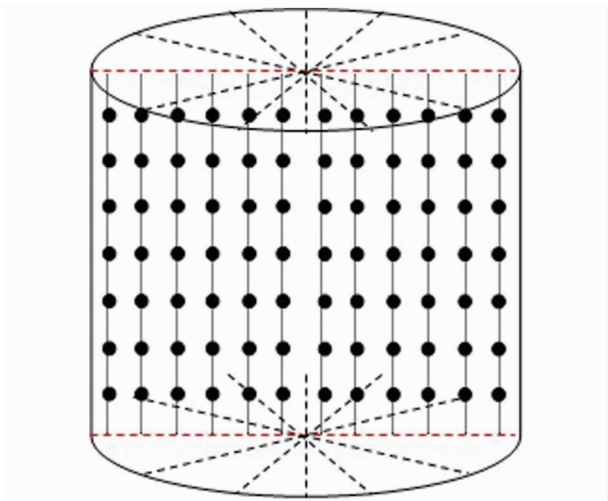


图 6 裹包内温度场测量方案

Fig. 6 Testing scheme of temperature distribution in bale

快,60 cm 处点 9 的温升最慢。在图 8 中也可见,Grass-1 与 Alfalfa-1 中距裹包破损口近的点 1 与 3 较点 6 与 8 温度先发生变化。这是因为距离破损口近的饲料先接触空气发生有氧反应产热而较早产生了温升。空气在裹包饲料内边反应边扩散,在裹包破损后并不能很快弥漫到裹包各处,因此在裹包破损后距破损口越远的饲料因二次发酵而产生温升的情况发生得越晚,有氧变质的风险越小。

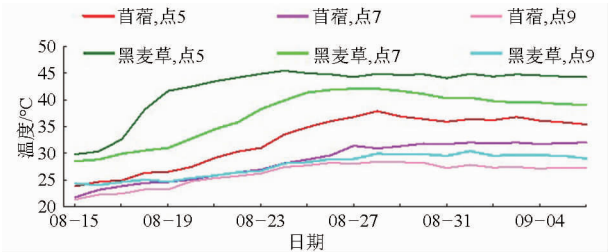


图 7 Grass-1 与 Alfalfa-1 中心轴线上 3 点的温度变化情况

Fig. 7 Temperature dynamic of the points on transverse axis of Grass-1 and Alfalfa-1

2012 年 Grass-1 与 Alfalfa-1 中,点 4 与点 2 距破损口距离相等,对两点的温度变化情况在统计

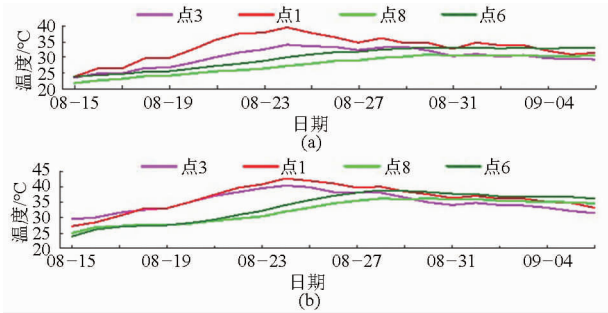


图 8 Alfalfa-1 与 Grass-1 上部与下部检测点温度变化情况

Fig. 8 Temperature dynamic of the points from lower part and upper part of Alfalfa-1 and Grass-1

(a) Alfalfa-1, 干物质质量分数 37.5%

(b) Grass-1, 干物质质量分数 66.7%

软件 SPSS 20 中进行配对 t 检验,结果见表 1。Alfalfa-1 中两配对样本的配对差的均值约为 0.13, t 统计量的值为 0.463,对应的概率 P 值为 $0.646 > 0.05$,点 4 与 2 温度动态变化无明显差异。Grass-1 中两配对样本的配对差的均值约为 0.09, t 统计量的值为 0.349,对应的概率 P 值为 $0.729 > 0.05$,故点 4 与点 2 的温度动态变化亦无明显差异。

如图 8 所示,虽然点 3 与点 1 与破损口的距离相等,但是处于上半部的点 1 较下半部的点 3 温升快,上半部的点 6 较下半部的点 8 温升快。对点 3 与点 1、点 8 与点 6 分别进行配对 t 检验,结果见表 1。

Alfalfa-1 中点 3 与点 1 两配对样本对应的概率 P 值为 $0 < 0.05$,故点 3 与点 1 的温度动态变化有明显差异;点 8 与点 6 两配对样本对应的概率 P 值为 $0 < 0.05$,故点 8 与点 6 的温度动态变化有明显差异。

Grass-1 中点 3 与点 1 两配对样本对应的概率 P 值为 $0 < 0.05$,故点 3 与点 1 的温度动态变化有明显差异;点 8 与点 6 两配对样本对应的概率 P 值为 $0 < 0.05$,故点 8 与点 6 的温度动态变化有明显差异。

表 1 2012 年的配对 t 检验结果

Tab. 1 Results of paired samples t test in 2012

饲料	配对样点	配对差异							
		平均值	标准差	均值标准误差	95% 置信区间		<i>t</i>	自由度	<i>P</i> 值
					下限	上限			
Alfalfa - 1	点 3、点 1	- 2. 792 86	1. 204 95	0. 185 93	- 3. 168 35	- 2. 417 37	- 15. 021	41	0
	点 4、点 2	0. 128 57	1. 800 58	0. 277 84	- 0. 432 53	0. 689 67	0. 463	41	0. 646
	点 8、点 6	- 2. 133 33	0. 447 58	0. 069 06	- 2. 272 81	- 1. 993 86	- 30. 890	41	0
Grass - 1	点 3、点 1	- 1. 395 24	1. 061 51	0. 163 79	- 1. 726 03	- 1. 064 45	- 8. 518	41	0
	点 4、点 2	0. 088 10	1. 635 76	0. 252 40	- 0. 421 64	0. 597 83	0. 349	41	0. 729
	点 8、点 6	- 1. 316 67	0. 851 95	0. 131 46	- 1. 582 15	- 1. 051 18	- 10. 016	41	0

可知,由于裹包破损后,饲料有氧温升情况,不仅与饲料距空气接触面的距离有关,与饲料在裹包内所处的位置也有很大关系,由于受到饲料自重影响,裹包饲料的下部较上部具有较大的容重,发生有氧温升比较缓慢。

为了进一步验证裹包饲料上部与下部有氧变质风险的差异性,于2013年分别对不同干物质含量的黑麦草和苜蓿裹包饲料进行了研究,并对上部与下部相应的监测值分别进行配对 t 检验,结果见表2。如图9、10所示,图中Lower_40为裹包下部距横向

表 2 2013 年试验中的配对 t 检验结果
Tab. 2 Results of paired samples t test in 2013

饲料	配对样点	配对差异							
		平均值	标准差	均值标准误差	95% 置信区间		t	自由度	P 值
					下限	上限			
Alfalfa-2	Lower_40、Upper_40	-6.942 22	1.738 03	0.379 27	-7.733 36	-6.151 08	-18.304	20	0
	Lower_20、Upper_20	-12.154 76	6.448 21	1.407 12	-15.089 95	-9.219 57	-8.638	20	0
Alfalfa-3	Lower_40、Upper_40	-4.084 29	2.265 10	0.494 28	-5.115 98	-3.053 86	-8.264	20	0
	Lower_20、Upper_20	-3.876 19	2.294 37	0.500 67	-4.920 58	-2.831 80	-7.742	20	0
Grass-2	Lower_40、Upper_40	-2.233 60	1.744 35	0.380 65	-3.027 62	-1.439 58	-5.868	20	0
	Lower_20、Upper_20	-3.638 10	2.647 55	0.577 74	-4.843 25	-2.432 94	-6.297	20	0
Grass-3	Lower_40、Upper_40	-1.246 30	0.661 94	0.144 45	-1.547 61	-0.944 98	-8.628	20	0
	Lower_20、Upper_20	-1.551 19	0.779 90	0.170 19	-1.906 20	-1.196 18	-9.115	20	0

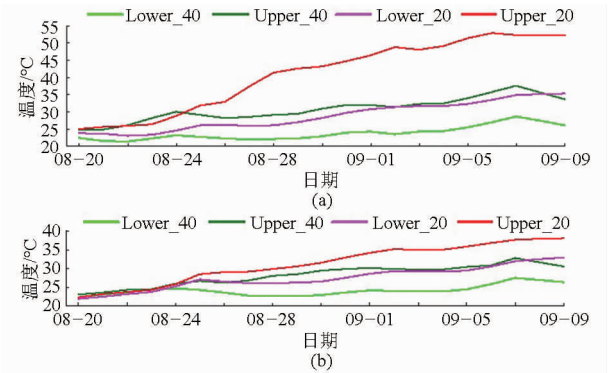


图 9 Alfalfa-2 与 Alfalfa-3 上部与下部温度变化情况
Fig. 9 Temperature dynamic of lower part and upper part of Alfalfa-2 and Alfalfa-3
(a) Alfalfa-2, 干物质质量分数 32.1%
(b) Alfalfa-3, 干物质质量分数 26.3%

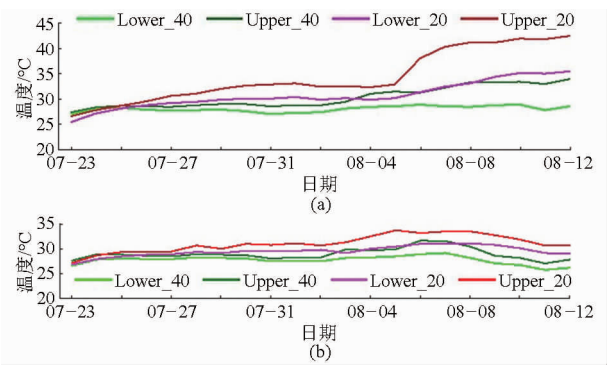


图 10 Grass-2 与 Grass-3 上部与下部温度变化情况
Fig. 10 Temperature dynamic of lower part and upper part of Grass-2 and Grass-3
(a) Grass-2, 干物质质量分数 45.3%
(b) Grass-3, 干物质质量分数 37.6%

中心轴线 40 cm 处温度(取距中心轴线 40 cm 处相应 3 个点的温度平均值)日变化曲线,Upper_40 为

裹包上部距离横向中心轴线 40 cm 处温度日变化曲线,Lower_20 为裹包下部距离横向中心轴线 20 cm 处温度(取距中心轴线 20 cm 处相应的 2 个点温度平均值)日变化曲线,Upper_20 为裹包上部距离横向中心轴线 20 cm 处温度日变化曲线。可见,无论是苜蓿裹包饲料还是黑麦草裹包饲料,上部的温升均高于下部。表 2 中概率 P 值均为 $0 < 0.05$,4 个包内的相应的配对样本均有显著的差异。再一次验证了,同一裹包内,饲料越靠近底部二次发酵产热而温升的态势发展得越缓慢。

由图 9 可见,干物质含量高的苜蓿裹包饲料因有氧反应产热而温升的过程较干物质含量低的苜蓿裹包饲料发展得快。在黑麦草裹包饲料中可发现相同的规律,如图 10 所示。这是因为干物质含量低意味着含水率较高,在打包时相对于较干的饲料会被压得较实,裹包破损后氧气不容易进入。

温升检测结束后,测量裹包内温度场的分布情况。以 Alfalfa_2 为例,展示其内部温度场分布,如图 11 所示。为了便于观察,分别展示了 3D 整体图、剖去了 1/4 的 3D 图与剖去 1/2 的 3D 图。从图中可以清晰地看到裹包内各处的温度情况。此外,

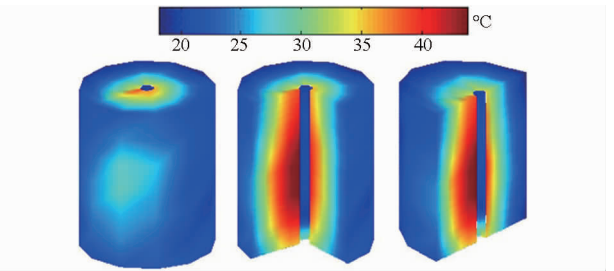


图 11 Alfalfa-2 裹包内温度分布的可视化
Fig. 11 Mapping of temperature distribution in Alfalfa-2

图中可见裹包内温度分布的偏心性,进一步说明了,在试验中裹包上部与下部温升的差异。

4 结论

(1) 在不引入空气的情况下将热电偶植入裹包饲料内,实现了监测裹包内特定位置温度变化的可操作化。

(2) 提出了裹包内温度场分布数据的获取方法,并实现了温度场的可视化。

(3) 试验结果表明:裹包破损后距离破损口越近的饲料发生有氧变质的风险越大;裹包饲料上部与下部有氧变质的风险有明显的差异性;干物质含量较高的青黄贮裹包饲料,较干物质含量低的青黄贮裹包饲料有氧变质的风险要大。

参 考 文 献

1 Ernest Bechtel H, Atkeson F W, Hughes J S. Brown silage from atlas sorgo-chemical composition, and apparent digestibility as determined by feeding to dairy cows[J]. Journal of Animal Science, 1943(2): 295 – 303.

2 Gastón A, Abalone R, Bartosik R E, et al. Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silobags) [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 72 – 85.

3 Khankari K K, Morey R V, Patankar S V. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(5): 1591 – 1604.

4 Müller C E, Pauly T M. Storage of small bale silage and haylage—influence of storage period on fermentation variables and microbial composition [J]. Grass and Forage Science, 2007, 62(3): 274 – 283.

5 Navarro S, Noyes R, Jayas D. The mechanics and physics of modern grain aeration management[M]. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2002:35 – 78.

6 魏炳泉,马奎元. 青贮饲料的二次发酵与防止[J]. 畜禽业, 2014(6): 29 – 30.

7 Leibensperger R Y, Pitt R E. A model of clostridial dominance in ensilage[J]. Grass and Forage Science, 1987, 42(3): 297 – 317.

8 Neal H D, ST C, Thornley J H M. A model of the anaerobic phase of ensiling[J]. Grass and Forage Science, 1983, 38(2): 121 – 134.

9 Pitt R E, Muck R E, Leibensperger R Y. A quantitative model of the ensilage process in lactate silages[J]. Grass and Forage Science, 1985, 40(3): 279 – 303.

10 Ruxton G D, Gibson G J. A critical introduction to mathematical modelling of the aerobic deterioration of silage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1993,62(3): 209 – 217.

11 Ruxton G D, Gibson G J. A mathematical model of the aerobic deterioration of big-hale silage and its implications for the growth of *Listeria monocytogenes*[J]. Grass and Forage Science, 1995, 50(4): 331 – 344.

12 Bartzanas T, Bochtis D D, Green O, et al. Prediction of quality parameters for biomass silage: a CFD approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93:209 – 216.

13 Sun Y, Buescher W, Lin J, et al. An improved penetrometer technique for determining bale density[J]. Biosystem Engineering, 2010, 105(2): 273 – 277.

14 Amours L D, Savoie P. Density profile of corn silage in bunker silos[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2005, 47: 221 – 228.

15 孟繁佳,孙宇瑞,王聪颖,等. 基于嵌入式力学传感器的圆锥指数仪设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(1):80 – 84. Meng Fanjia, Sun Yurui, Wang Congying, et al. Design and experiment on improved cone penetrometer with embedded force sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):80 – 84. (in Chinese)