

密闭式蛋鸡舍外围护结构冬季保温性能分析与试验

王 阳^{1,2}, 李保明^{1,2,3*}

(1. 中国农业大学农业部设施农业工程重点实验室, 北京 100083; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;
3. 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心, 北京 100083)

摘 要: 蛋鸡舍围护结构的保温隔热性能是影响鸡舍温度的稳定性, 进而影响蛋鸡健康和生产性能的关键因素。由于蛋鸡舍一般不采暖, 依靠蛋鸡的自身显热产热量来维持冬季蛋鸡舍内温度, 因此如果蛋鸡舍冬季饲养密度较低、通风过度或围护结构保温性能不足, 都难以满足蛋鸡舍温度环境的要求。如何确定不同气候区鸡舍围护结构必要的保温性能和饲养密度要求是解决蛋鸡舍冬季通风和保温矛盾问题的关键。该文通过建立蛋鸡舍动态热平衡理论模型, 系统分析了不同气候区鸡舍围护结构的最低热阻需求, 得出不同气候区鸡舍围护结构的保温性能要求与蛋鸡饲养方式(密度)的关系。结果表明: 冬季舍外计算温度分别为 -25°C (东北、内蒙古)、 -15°C (华北、西北)、 0°C (长江以南)的地区, 蛋鸡舍墙体、屋面的最小热阻应分别不小于 0.778 、 0.972 ; 0.573 、 0.716 ; 0.266 、 $0.333(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})/\text{W}$; 对应3层全阶梯笼养、4层半阶梯笼养和4层叠层、6层叠层、8层叠层笼养等饲养模式最大饲养密度下, 所能够适应的围护结构冬季室外计算温度应分别不低于 -14 、 -17 、 -19 、 -22 、 -23°C 。研究结果为不同气候地区选择适宜饲养模式以及密闭式蛋鸡舍围护结构保温系统的设计提供了理论依据。

关键词: 设施; 保温; 热阻; 环境控制; 密闭式蛋鸡舍; 围护结构; 耗热量; 饲养密度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.025

中图分类号: S831.9; X512

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0190-07

王 阳, 李保明. 密闭式蛋鸡舍外围护结构冬季保温性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 190—196.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.025 http://www.tcsae.org

Wang Yang, Li Baoming. Analysis and experiment on thermal insulation performance of outer building envelope for closed layer house in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 190—196. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.025 http://www.tcsae.org

0 引 言

北方寒冷地区蛋鸡在冬季常因舍内温度过低而导致产蛋率减少 $5\%\sim 10\%$ 、饲料消耗提高 $3\sim 5\text{ g}/(\text{d}\cdot\text{只})$ ^[1-5]。蛋鸡舍一般无采暖系统供热, 依靠鸡群自身的显热产热量来维持舍内必要的温度水平, 鸡舍围护结构的保温隔热性能是影响鸡舍内温度稳定的关键因素^[6-7]。由于蛋鸡舍冬季也必须提供必要的新鲜空气和排除有害气体^[8], 蛋鸡舍冬季通风耗热是主要热损耗。因此, 不同气候地区、不同类型蛋鸡舍围护结构具有良好的保温隔热性能, 有助于协调蛋鸡舍冬季通风与保温的矛盾, 确保维持鸡舍内温度的稳定性。

近年来, 针对蛋鸡的产热量和蛋鸡舍冬季最小通风量的取值问题已开展了一系列的理论和试验研究^[9-15]。Chepete 等^[13]对蛋鸡产热量与蛋鸡质量的关系进行了回归分析, 得出了产热量与蛋鸡体质量的关系式; Chepete

等^[12,16]对冬季蛋鸡舍最小通风量进行了研究分析, 得出了传送带自动干清粪系统可排除蛋鸡舍有害气体、满足通风换气需求的最小通风量。谢明文等^[17]研究表明发现, 沈阳地区鸡场外围护结构总热阻, 远远小于沈阳地区冬季低限热阻值, 鸡舍保温隔热性能较差。中国不同气候地区如何优化确定蛋鸡舍围护结构的保温隔热性能及饲养密度问题仍然缺少设计依据^[18], 导致对蛋鸡舍围护结构设计建设的随意性和不合理性。中国不同气候地区、不同类型蛋鸡舍的围护结构保温隔热性能设计参数方面缺乏相关研究。

本文通过分析不同气候地区蛋鸡舍外围护结构的最低热阻要求, 根据能量和质量守恒定律, 建立密闭式蛋鸡舍热平衡模型, 得出不同气候地区、不同类型密闭式传送带清粪蛋鸡舍的保温性能要求及其与鸡群饲养密度的影响关系。在满足蛋鸡群冬季舍内环境的前提下, 为降低能耗、节约成本以及蛋鸡舍围护结构保温系统的设计提供理论依据。

1 蛋鸡舍热平衡理论模型

1.1 鸡舍热平衡模型建立

蛋鸡舍的热平衡是为维持鸡舍空气温度的相对稳定, 保持其输入和输出鸡舍的热量之间的动态平衡。蛋鸡舍热量损耗主要包括外围护结构散热、通风耗热等, 蛋鸡群的显热产热量是蛋鸡舍主要得热。为维持蛋鸡舍

收稿日期: 2016-07-25 修订日期: 2017-03-10

基金项目: 国家 863 课题任务(2013AA10230602); 国家蛋鸡产业技术体系(CARS-41); 国家自然科学基金面上项目(31372350)。

作者简介: 王 阳, 女, 博士生, 山东潍坊人, 研究方向为畜禽健康环境及其控制技术。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: wangyang512@cau.edu.cn

*通信作者: 李保明, 男, 教授, 浙江缙云人, 博士生导师, 主要从事畜禽设施养殖工艺与环境研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: libm@cau.edu.cn

内动态热平衡, 根据蛋鸡舍的热量平衡原理, 建立如下数学模型

$$Q_s + Q_m - Q_w - Q_v = 0 \quad (1)$$

式中 Q_s 为蛋鸡群显热产热量, W; Q_m 为设备 (电机与照明等) 发热量, 因夜间无照明等此值可忽略不计, W; Q_w 为围护结构 (墙、地面、屋顶等) 传热耗热量, W; Q_v 为通风换气的热损失, W。

$$Q_w = \sum AK(t_i - t_o) \quad (2)$$

式中 A 为鸡舍外围护结构面积, m^2 ; K 为鸡舍外围护结构的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_i 为冬季舍内计算温度, $^\circ C$; t_o 为供暖舍外计算温度, $^\circ C$; 公式 (2) 为《实用供热空调设计手册》^[19]推荐的热负荷计算式。

$$R_{o,min} = \left(\frac{t_i - t_o}{\Delta t_y} \right) R_n \quad (3)$$

式中 $R_{o,min}$ 为外围护结构最小传热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; Δt_y 为室内计算温度与围护结构内表面温度的允许差值, $^\circ C$, 取值参照《民用建筑热工设计规范》^[20]; R_n 为围护结构内表面换热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; 公式 (3) 为《民用建筑热工设计规范》^[20]推荐的围护结构最小热阻计算式。

$$Q_v = 0.278v \cdot n \cdot \rho_w \cdot C_p \cdot (t_i - t_o) \quad (4)$$

式中 v 为每只鸡的冬季最小通风量, $m^3/(h \cdot \text{只})$; n 为蛋鸡饲养密度, $\text{只}/m^2$; ρ_w 为舍外温度下的空气密度, 通风量按进气量计算时取 $\rho_w = 353/(t_o + 273)$, kg/m^3 ; C_p 为干空气的定压质量比热, $C_p = 1.0056 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ C)$; 0.278 为单位换算系数, $1 \text{ kJ}/h = 0.278 \text{ W}$; 公式 (4) 为《实用供热空调设计手册》^[19]推荐的热负荷计算式。

$$Q = (6.28m^{0.75} + 1.25) \left[(20 - t_i)^3 \times 4 \times 10^{-5} + 1 \right] \quad (5)$$

$$Q_s = 0.67Q_i - 9.80 \times 10^{-8} t_i^6 \quad (6)$$

式中 Q_i 为鸡群总产热量, W; 式 (5)、式 (6) 为 CIGR^[21]推荐的蛋鸡产热量计算公式。

1.2 鸡舍热平衡计算分析简化

由式 (1) 可知, 影响蛋鸡舍内温热环境的主要因素是围护结构传热散热量和通风热损失。蛋鸡舍建筑外围护结构材料实际的传热过程是较为复杂的, 受接触热阻、流动空气间层、屋顶坡度等的影响, 为简化起见, 本文分析中忽略这部分影响, 将外围护结构视为均质多层材料相同条件下的传热, 蛋鸡舍围护结构表面的换热过程为热传导、辐射和对流的综合影响, 蛋鸡舍外表面换热是由于风力作用产生的强迫对流换热, 内表面的换热是壁面与邻近空气和其他壁面由于温差引起的自然对流和辐射换热作用。中国蛋鸡舍建筑地面一般为普通粘土非保温水泥地面, 组成地面的各层材料导热系数都大于 $1.16 \text{ W}/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 此模型研究分析中非保温地面传热系数按照最不利条件下传热系数 $0.47 \text{ W}/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 分析研究简化。

温、湿度是影响蛋鸡健康和生产水平的主要温热因素。研究表明蛋鸡 18 周龄后的质量约为 1.5 kg ^[13], 产蛋鸡的适宜温度为 $13 \sim 27 \text{ }^\circ C$, 适宜的相对湿度为 $60\% \sim$

65% , 蛋鸡舍温度下限控制在 $13 \text{ }^\circ C$ ^[22], 蛋鸡的产蛋性能及饲料转化率相对较好。由上述条件, 式 (1) 简化为

$$4.8K + 0.47 + 0.372v \cdot n = \frac{6.157}{(t_i - t_o)} n \quad (7)$$

蛋鸡舍冬季通风主要为排除多余有害气体, 满足通风换气的要求。由于传送带干清粪系统和乳头式饮水器的普遍应用, 舍内湿度和有害气体浓度较传统的刮板清粪系统等明显减小。Chai 等^[16]通过连续 2a 的试验确定了蛋鸡舍满足通风换气的传送带干清粪蛋鸡舍冬季最小通风量; Pedersen 等^[15]对用 CO_2 确定畜禽场冬季通风量进行了评估; Li 等^[10]研究 CO_2 浓度平衡确定的蛋鸡舍冬季最小通风量为 $0.43 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{只})$ 。本文主要考虑分析传送带干清粪、乳头式饮水器系统蛋鸡舍, 冬季最小通风量取 Li 等^[10]试验研究结果, 此简化取值与美国^[23]对不同品种单个畜禽的推荐通风量和 Chai 等^[16]研究的冬季最小通风量基本一致。不同气候区鸡舍围护结构必要的保温性能和饲养密度要求之间的关系式模型 (7) 可简化为

$$4.8K + 0.47 = (0.16 + \frac{6.16}{t_i - t_o}) n \quad (8)$$

2 密闭式蛋鸡舍外围护结构保温性能解析

2.1 不同气候地区蛋鸡舍外围护结构最小热阻

蛋鸡舍各部分围护结构换热的热损耗多少与蛋鸡舍建筑材料的热阻有直接关系, 实际生产过程中, 在蛋鸡舍室内外温差波动的作用下, 满足围护结构内表面不结露和防止内表面温度过低是保证蛋鸡舍内小环境稳定的前提, 内表面结露可导致耗热量增大和使围护结构易于损坏等, 内表面温度过低将会对畜禽产生不良的冷辐射作用, 因此, 应根据不同气候地区保温要求, 合理选择蛋鸡舍建筑保温材料, 满足最低传热阻要求。

刘以连等^[24]将中国畜禽舍分为 3 个区域 (寒冷区 $< -10 \text{ }^\circ C$ 、温暖区 $0 \sim -10 \text{ }^\circ C$ 、炎热区 $> 0 \text{ }^\circ C$), 并根据日本不同气候区的热阻值, 给出了中国 3 个区域的最小热阻值; 张岫云等^[25]据美国大荷兰人养鸡公司资料介绍, 根据 1 月份平均气温, 得出了 3 个区域 (< -10 、 $0 \sim -10$ 、 $> 0 \text{ }^\circ C$) 围护结构冬季低限热阻值以及美国各个气候区域中鸡舍围护结构材料的选用, 并将中国鸡舍建筑分为五大气候区域, 为蛋鸡舍外围护结构的选择及鸡舍构造改造提供了参考依据。但中国气候类型多样, 蛋鸡舍建筑类型也呈现多样化, 蛋鸡舍内微环境很容易受外界气候条件的影响。鸡舍建筑相同气候区域内不同地区下, 冬季室外计算温度不同且温度差别较大, 但是相同气候区域内温度不同的地区具有相同的最低热阻值, 容易造成鸡舍建筑材料选择不合理, 不利于节约建筑材料以及降低成本; 蛋鸡舍冬季舍外计算温度采用建筑热工设计参数规定的不同地区围护结构冬季采暖室外计算温度, 更利于实现舍内外温差波动较大时, 蛋鸡舍内微环境的相对稳定。

根据《实用供热空调设计手册》^[19]、《民用建筑热工设计规范》^[20]提出的建筑热工分区及设计要求, 外围

护结构最小传热阻不仅与不同气候区的温度有关,而且与围护结构类型密切相关,应考虑围护结构材料的热惰性指标,中国根据热惰性将外围护结构分为 I、II、III、IV 型 4 类 ($\sum D > 6.0$ 为 I 型、 $\sum D = 4.1 \sim 6.0$ 为 II 型、 $\sum D = 1.6 \sim 4.0$ 为 III 型、 $\sum D \leq 1.5$ 为 IV 型) [19-20]。在综合考虑蛋鸡舍冬季保温、通风、防止外围护结构内表面结露的要求下,根据围护结构最小传热阻的计算式 (3),确定不同地区、不同类型围护结构蛋鸡舍建筑设计时需满足的最小热阻,部分城市围护结构冬季室外计算温度参数见表 1,蛋鸡舍外围护结构冬季最低热阻值见表 2。

表 1 部分城市围护结构冬季室外计算温度 [19-20]

Table 1 Outdoor design conditions of temperature for outer building envelope of different cities in winter

序号 No.	城市 City	℃			
		I 型 Type I	II 型 Type II	III 型 Type III	IV 型 Type IV
1	北京 Beijing	-9	-12	-14	-16
2	天津 Tianjin	-9	-11	-12	-13
3	石家庄 Shijiazhuang	-8	-12	-14	-17
4	太原 Taiyuan	-12	-14	-16	-18
5	沈阳 Shenyang	-19	-21	-23	-25
6	长春 Changchun	-23	-26	-28	-30
7	哈尔滨 Harbin	-26	-29	-31	-33
8	上海 Shanghai	-2	-4	-6	-7
9	南京 Nanjing	-3	-5	-7	-9
10	杭州 Hangzhou	-1	-3	-5	-6
11	合肥 Hefei	-3	-7	-10	-13
12	南昌 Nanchang	0	-2	-4	-6
13	济南 Jinan	-7	-10	-12	-14
14	郑州 Zhengzhou	-5	-7	-10	-11
15	武汉 Wuhan	-2	-6	-8	-11
16	长沙 Changsha	0	-3	-5	-7
17	贵阳 Guiyang	-1	-2	-4	-6
18	拉萨 Lhasa	-6	-8	-9	-10
19	西安 Xi'an	-5	-8	-10	-12
20	兰州 Lanzhou	-11	-13	-15	-16
21	西宁 Xining	-13	-16	-18	-20
22	银川 Yinchuan	-15	-18	-21	-23
23	乌鲁木齐 Urumqi	-22	-26	-30	-33
24	呼和浩特 Hohhot	-19	-21	-23	-25

2.2 不同气候地区蛋鸡舍外围护结构保温性能要求

蛋鸡舍围护结构的保温隔热性能影响鸡舍内微环境,然而蛋鸡舍内微环境的稳定性是提高蛋鸡健康及生产性能的关键因素,密闭式蛋鸡舍围护结构的保温性是维持蛋鸡舍温度稳定的前提。不同气候地区,不同饲养方式对蛋鸡舍建筑设计围护结构的保温要求不同,无采暖系统供热蛋鸡舍建筑设计选用适宜密度、厚度的围护结构材料 [26-27] 及蛋鸡群饲养方式 (饲养密度),控制蛋鸡舍动态热平衡 [28],不仅能为蛋鸡提供稳定的小环境,实现鸡舍内温度下限不低于 13 ℃ [22],而且可以降低生产

成本,减少建筑围护结构材料的浪费。

表 2 不同地区蛋鸡舍外围护结构冬季低限热阻值

Table 2 Minimum recommended resistance of heat transfer for outer building envelope of layer house in different cities

序号 No.	城市 City	$\text{m}^2 \cdot \text{℃} \cdot \text{W}^{-1}$							
		I 型 Type I		II 型 Type II		III 型 Type III		IV 型 Type IV	
		墙体 Wall	屋顶 Ceiling	墙体 Wall	屋顶 Ceiling	墙体 Wall	屋顶 Ceiling	墙体 Wall	屋顶 Ceiling
1	北京 Beijing	0.450	0.563	0.512	0.639	0.552	0.691	0.593	0.742
2	天津 Tianjin	0.450	0.563	0.493	0.614	0.512	0.639	0.532	0.665
3	石家庄 Shijiazhuang	0.430	0.537	0.512	0.640	0.552	0.691	0.614	0.767
4	太原 Taiyuan	0.512	0.639	0.552	0.691	0.593	0.742	0.634	0.793
5	沈阳 Shenyang	0.655	0.818	0.696	0.870	0.737	0.921	0.778	0.972
6	长春 Changchun	0.737	0.921	0.798	0.998	0.839	1.049	0.880	1.100
7	哈尔滨 Harbin	0.798	0.998	0.859	1.074	0.900	1.125	0.941	1.177
8	上海 Shanghai	0.307	0.384	0.348	0.435	0.389	0.486	0.409	0.512
9	南京 Nanjing	0.327	0.409	0.368	0.460	0.409	0.512	0.450	0.563
10	杭州 Hangzhou	0.286	0.358	0.327	0.409	0.368	0.460	0.389	0.486
11	合肥 Hefei	0.327	0.409	0.409	0.512	0.470	0.588	0.532	0.665
12	南昌 Nanchang	0.266	0.333	0.307	0.384	0.348	0.435	0.389	0.486
13	济南 Jinan	0.409	0.512	0.470	0.588	0.512	0.639	0.552	0.691
14	郑州 Zhengzhou	0.368	0.460	0.409	0.512	0.470	0.588	0.493	0.614
15	武汉 Wuhan	0.307	0.384	0.389	0.486	0.430	0.537	0.493	0.614
16	长沙 Changsha	0.266	0.333	0.327	0.409	0.368	0.460	0.409	0.512
17	贵阳 Guiyang	0.286	0.358	0.307	0.384	0.348	0.435	0.389	0.486
18	拉萨 Lhasa	0.389	0.486	0.430	0.537	0.450	0.563	0.470	0.588
19	西安 Xi'an	0.368	0.460	0.430	0.537	0.470	0.588	0.512	0.639
20	兰州 Lanzhou	0.493	0.614	0.532	0.665	0.573	0.716	0.593	0.742
21	西宁 Xining	0.532	0.665	0.593	0.742	0.634	0.793	0.675	0.844
22	银川 Yinchuan	0.573	0.716	0.634	0.793	0.696	0.870	0.737	0.921
23	乌鲁木齐 Urumqi	0.716	0.895	0.798	0.998	0.880	1.100	0.941	1.177
24	呼和浩特 Hohhot	0.655	0.818	0.696	0.870	0.737	0.921	0.778	0.972

中国绝大多数蛋鸡采用全程笼养工艺模式,主要有全阶梯笼养、半阶梯笼养和叠层笼养 (4 层、6 层、8 层) 等集约化饲养方式,国内学者研究表明 [28-32]: 3 层全阶梯笼养、4 层半阶梯笼养、4 层叠层笼养、6 层叠层笼养、8 层叠层笼养的饲养密度分别可达 16、22、28、48、60 只/ m^2 。本文据此饲养密度由公式 (8) 分析传送带干清粪蛋鸡舍实现舍内气温不低于 13 ℃ 条件下,不同气候地区不同饲养方式蛋鸡舍建筑设计时外围护结构需满足的热阻值,分析结果见表 3。

实际生产中,蛋鸡的死淘率在低温季节和产蛋期较高。不同饲养方式下蛋鸡死淘率不同,死淘率导致蛋鸡饲养密度降低,蛋鸡舍冬季保温性能提高才能控制舍内温度不低于 13 ℃。全阶梯笼养、半阶梯笼养和叠层笼养 (4 层、6 层、8 层) 等集约化饲养方式的饲养密度降低 1 只/ m^2 ,蛋鸡死淘后根据蛋鸡群饲养密度改变蛋鸡舍冬季通风量,3 层全阶梯笼养、4 层半阶梯笼养、4 层叠

层笼养蛋鸡舍适应的围护结构冬季室外计算温度区域应分别升高 0.5℃ 的地区；6 层叠层笼养、8 层叠层笼养通过改变通风量基本可以维持蛋鸡舍原有动态热平衡。6 层叠层笼养、8 层叠层笼养饲养方式下，蛋鸡群饲养密度较大，死淘率导致饲养密度减小，但及时调节蛋鸡舍通风量，也可以维持蛋鸡舍动态热平衡。

表 3 不同气候地区蛋鸡不同饲养方式下的外围护结构热阻
Table 3 Resistance of heat transfer for outer building envelope with different regions and feeding models of layer house

m ² ·℃·W ⁻¹										
计算温度 Design temperature/℃	3 层全阶梯笼养		4 层半阶梯笼养		4 层叠层笼养		6 层叠层笼养		8 层叠层笼养	
	A-frame cage of three tiers		Semi-A-frame cage of four tiers		4 overlap tiers cages		6 overlap tiers cages		8 overlap tiers cages	
	墙体 Wall	屋顶 Ceiling	墙体 Wall	屋顶 Ceiling	墙体 Wall	屋顶 Ceiling	墙体 Wall	屋顶 Ceiling	墙体 Wall	屋顶 Ceiling
0	0.987	1.234	0.704	0.880	0.547	0.684	0.314	0.392	0.250	0.312
-1	1.214	1.518	0.790	0.988	0.613	0.767	0.351	0.439	0.280	0.349
-2	1.362	1.703	0.884	1.105	0.685	0.856	0.391	0.489	0.311	0.389
-3	1.525	1.906	0.987	1.233	0.763	0.954	0.435	0.544	0.346	0.432
-4	1.704	2.130	1.099	1.374	0.849	1.061	0.483	0.603	0.384	0.479
-5	1.903	2.379	1.223	1.529	0.943	1.179	0.535	0.668	0.424	0.531
-6	2.125	2.656	1.360	1.700	1.046	1.308	0.592	0.740	0.469	0.587
-7	2.374	2.967	1.513	1.891	1.161	1.452	0.654	0.818	0.519	0.648
-8	2.655	3.319	1.684	2.105	1.289	1.612	0.724	0.905	0.573	0.716
-9	2.976	3.702	1.877	2.347	1.433	1.791	0.801	1.001	0.633	0.792
-10	3.346	4.182	2.097	2.621	1.595	1.994	0.888	1.110	0.701	0.876
-11	3.775	4.719	2.349	2.936	1.780	2.225	0.985	1.231	0.777	0.971
-12	4.280	5.350	2.641	3.301	1.993	2.491	1.096	1.370	0.863	1.079
-13	4.884	6.105	2.982	3.728	2.239	2.799	1.223	1.529	0.961	1.201
-14	5.617	7.021	3.389	4.426	2.529	3.161	1.370	1.712	1.074	1.343
-15	—	—	3.880	4.849	2.874	3.592	1.542	1.927	1.206	1.508
-16	—	—	4.484	5.605	3.293	4.116	1.746	2.182	1.362	1.703
-17	—	—	5.247	6.559	3.810	4.763	1.992	2.490	1.549	1.936
-18	—	—	—	—	4.468	5.585	2.295	2.869	1.776	2.221
-19	—	—	—	—	5.330	6.663	2.676	3.345	2.060	2.575
-20	—	—	—	—	—	—	3.171	3.963	2.424	3.031
-21	—	—	—	—	—	—	3.839	4.798	2.908	3.635
-22	—	—	—	—	—	—	4.790	5.987	3.582	4.477
-23	—	—	—	—	—	—	—	—	4.585	5.731
-24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：表中“—”表示不能实现蛋鸡舍动态热平衡理论模型。
Note: “—” represents that can not achieve the dynamic heat balance model of layer house.

不同气候地区、不同饲养方式蛋鸡舍建筑设计时，考虑蛋鸡的死淘率合理提高鸡舍保温性能更利于控制冬季舍内温差。全阶梯笼养、半阶梯笼养和叠层笼养（4 层、6 层、8 层）等集约化饲养方式的饲养密度降低 1 只/m²，不同饲养方式对鸡舍围护结构保温性能的改善要求不同，分析结果见表 4。

表 4 不同饲养方式饲养密度降低 1 只/m²对鸡舍围护结构保温性能的改善要求

热阻增加百分比 Increased percentage of heat resistance/%						
计算温度 Design temperature /℃	3 层全阶梯 笼养 A-frame cage of three tiers	4 层半阶梯 笼养 Semi-A- frame cage of four tiers	4 层叠层 笼养 4 overlap tiers cages	6 层叠层 笼养 6 overlap tiers cages	8 层叠层 笼养 8 overlap tiers cages	
0~ -5	4	10	7	4	3	
-5~ -10	10	13	10	5	4	
-10~ -14	20	21	15	7	5	
-15~ -17	-	30	27	14	10	
-17~ -19	-	-	27	14	10	
-20~ -22	-	-	-	21	20	
-22~ -23	-	-	-	-	20	

3 试验验证

3.1 试验鸡舍条件

为验证上述密闭式蛋鸡舍冬季热平衡系统模型，2015 年 1 月 17—24 日在河北邯郸永年县华裕种鸡示范场进行了验证试验。

试验蛋鸡舍长 90 m，宽 11 m，高 3 m；侧墙小窗规格为长 0.65 m、宽 0.23 m；蛋鸡舍建筑墙体为 370 抹灰砖墙，屋顶为 200 mm 厚加气混凝土，地面为普通水泥地面。试验蛋鸡舍采用传送带清粪、行车自动喂料、乳头式饮水器饮水系统；三层全阶梯笼养、四列五走道布置形式；试验开始时，舍内蛋鸡为海兰褐 10 671 只、328 日龄；试验蛋鸡舍内鸡群密度为 11 只/m²。

3.2 试验方法

试验期间用 HOBO U23—001 型（美国 Onset HOBO 公司）温湿度采集记录仪采集蛋鸡舍内外温、湿度，每 5 min 采集存储 1 次，蛋鸡舍外温、湿度检测点设在两栋场区之间，舍内测点（图 1）设在每列走道中间鸡笼鸡活动高度位置，从湿帘端至风机端分别在 5 个过道依次距湿帘端 5.9、33.0、60.1、87.2 m 测定；NH₃、CO₂ 分别用 VRAE PGM-7800/7840 型手持式气体检测仪、HD-P900

CO₂ 检测仪测试, 测点布置从湿帘端至风机端分别在 5 个过道依次距湿帘端 5.9、46.3、86.7 m 测定; 试验蛋鸡舍采用 AC2000plus 通风控制系统, 风机尺寸为 1.5 m×1.5 m, 通风量在风机开启稳定后测量风机风速, 按 0.3 m×0.3 m 为一个单元, 测得风机 36 个测点的风速。

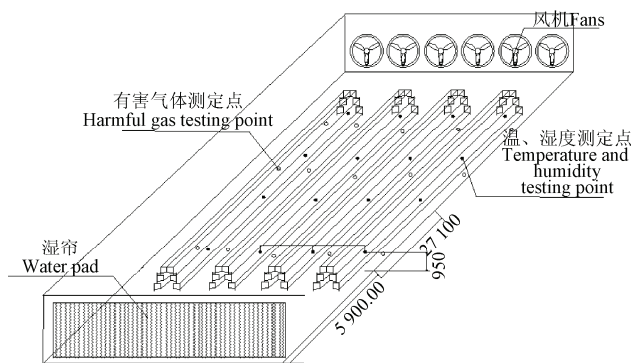
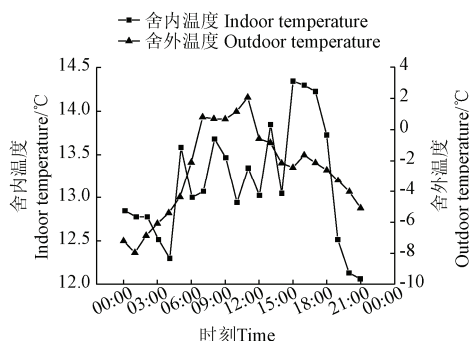


图 1 舍内温湿度、NH₃、CO₂ 测定点布置示意图

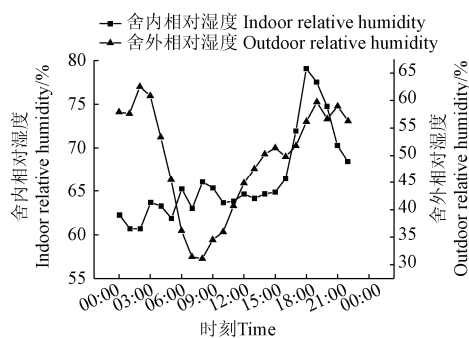
Fig.1 Schematic of measuring locations of temperature, humidity, and NH₃, CO₂ content in layer house

3.3 试验结果

鸡舍建筑外围护结构参数取值参照《民用建筑热工设计规范》^[20], 墙体、屋顶、地面的总热阻分别为 0.64、1.25、0.47 m²·K/W; 按照热惰性指标 D 值, 试验鸡舍围护结构的热惰性指标 $D=4.841$ 为 II 型 ($\sum D=4.1\sim 6.0$ 为 II 型), 试验鸡舍建筑满足最小热阻值要求。



a. 温度变化
a. Mean temperature



b. 相对湿度
b. Relative humidity

图 2 试验蛋鸡舍内外温湿度变化情况

Fig.2 Variation of temperature and relative humidity in layer house and outdoor

试验期间测得蛋鸡舍室外平均温度为 -3.67°C , 湿度为 48.86%, 测得蛋鸡舍内通风量为 $0.42 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{只})$ 。根据蛋鸡舍热平衡系统模型理论, 得出试验场区蛋鸡舍在未考虑冷风渗透、侵入所造成热量损失, 理论条件下蛋鸡舍内温度为 13.85°C , 试验测得温热环境参数变化结果如图 2 所示, 蛋鸡舍内温热环境参数随舍外环境变化波动较小, 蛋鸡舍内平均温度为 13.04°C , 舍内 NH₃、CO₂ 浓度均在标准范围内。试验测得蛋鸡舍内温度略低于理论温度, 其原因可能是试验蛋鸡舍饲养密度略低且冷风渗透、侵入造成部分热量损失所致。

蛋鸡舍实际生产应用中, 冷风渗透不仅造成热损耗, 而且影响舍内温度场分布和气流组织。蛋鸡舍建筑相同缝隙面积下, 鸡舍内外不同压差形成的冷风渗透量不同, 造成的热损失不同; 蛋鸡舍不同建筑外围护结构材料搭接方式不同形成的冷风渗透量也不同^[33]。本文研究分析中将不同气候地区蛋鸡舍建筑视为密闭性强, 未考虑不同压差、缝隙下造成的冷风渗透问题, 更完善的分析有待下一步试验继续研究, 以及冷风渗透热损失对蛋鸡舍冬季保温的影响。

4 结 论

1) 本文根据不同气候地区的围护结构室外设计温度参数和维持舍内 13°C 的正常生产最低气温需求, 明确提出了中国不同气候地区蛋鸡舍建筑外围护结构应满足的低限热阻参数取值。

2) 为同时满足冬季蛋鸡舍最小通风量和维持舍内正常生产气温需求, 3 层全阶梯笼养、4 层半阶梯笼养和 4 层叠层、6 层叠层、8 层叠层笼养等饲养模式最大饲养密度下, 所适应的围护结构冬季室外计算温度区域应分别不低于 -14°C 、 -17°C 、 -19°C 、 -22°C 、 -23°C 的地区。

3) 试验验证表明, 蛋鸡舍在冷风渗透、侵入等造成热量损失, 使蛋鸡舍内实际温度低于理论计算温度, 温差小于 1°C , 冷风渗透问题有待下一步试验继续研究。

[参 考 文 献]

- [1] 俞宏军, 李保明, 施正香, 等. 北京密闭式商品蛋鸡舍冬季环境研究(初报)[J]. 农业工程学报, 1997, 13(5): 68—72. Yu Hongjun, Li Baoming, Shi Zhengxiang, et al. Winter environment analysis on enclosed commercial layer housing in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1997, 13(5): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [2] Al-Saffar A A, Rose S P. Ambient temperature and the egg laying characteristics of laying fowl[J]. World's Poultry Science Journal, 2002, 58(3): 317—331.
- [3] Lessells C M, Dingemans N J, Both C. Egg weights, egg component weights, and laying gaps in great tits (Parus major) in relation to ambient temperature[J]. The Auk, 2002, 119(4): 1091—1103.
- [4] Samli H E, Agma A, Senkoylu N. Effects of storage time and temperature on egg quality in old laying hens[J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2005, 14(3): 548—553.

- [5] Zhao Y, Xin H, Shepherd T A, et al. Modeling ventilation rate, balance temperature and supplemental heat need in alternative vs. conventional laying-hen housing systems[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 115(3): 311—323.
- [6] Garcimartin M A, Ovejero I, Sanchez E, et al. Application of the sensible heat balance to determine the temperature tolerance of commercial poultry housing [J]. *World's Poultry Science Journal*, 2007, 63(4): 575—584.
- [7] Green A R, Xin H. Effects of stocking density and group size on heat and moisture production of laying hens under thermoneutral and heat-challenging conditions[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(6): 20—27.
- [8] David B, Mejdell C, Michel V, et al. Air quality in alternative housing systems may have an impact on laying hen welfare. Part II: ammonia[J]. *Animals*, 2015, 5(3): 886—896.
- [9] Calvet S, Cambra-López M, Blanes-Vidal Victoria, et al. Ventilation rates in mechanically-ventilated commercial poultry buildings in Southern Europe: Measurement system development and uncertainty analysis[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 423—432.
- [10] Li H, Xin H, Liang Y, et al. Comparison of direct vs. indirect ventilation rate determinations in layer barns using manure belts[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(1): 367—372.
- [11] Schauburger G, Piringer M, Petz E. Dynamic model of the indoor climate inside livestock buildings: A case study for fattening pigs[C]//Conference Paper. First International Swine Housing Conference, Iowa, 2000.
- [12] Chepete H J, Xin H. Ventilation rates of a laying hen house based on new vs. old heat and moisture production data[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(6): 835—842.
- [13] Chepete H J, Xin H, Puma M C, et al. Heat and moisture production of poultry and their housing systems: Pullets and layers[J]. *ASHRAE Transactions*, 2004, 110(2): 286—298.
- [14] Genç L, Portier K M. Sensible and latent heat productions from broilers in laboratory conditions [J]. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 2005, 29(3): 635—643.
- [15] Pedersen S, Takai H, Johnsen J O, et al. A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70(1): 25—37.
- [16] Chai L, Ni J Q, Diehl C A, et al. Ventilation rates in large commercial layer hen houses with two-year continuous monitoring[J]. *British Poultry Science*, 2012, 53(1): 19—31.
- [17] 谢明文, 杨钧衡. 沈阳地区集约化猪场和鸡场环境现状调查[J]. *沈阳农业大学学报*, 1996(4): 317—322.
- [18] 李俊营, 詹凯, 刘伟, 等. 我国蛋鸡舍建筑现状与标准化研究[J]. *中国家禽*, 2012, 34(21): 1—5.
- [19] GB50019-2015. 采暖通风与空气调节设计规范[S].
- [20] GB 50176-93. 民用建筑热工设计规范[S].
- [21] Pedersen S, Sällvik K. Heat and moisture production at animal and house levels[C]. *International Commission of Agricultural Engineering, Section II, 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses*, CIGR, Horsens, 2002.
- [22] Kocaman B, Esenbuga N, Yildiz A, et al. Effect of environmental conditions in poultry houses on the performance of laying hens[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2006, 5(1): 26—30.
- [23] Seedorf J, Hartung J, Schröder M, et al. A survey of ventilation rates in livestock buildings in Northern Europe[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70(1): 39—47.
- [24] 刘以连, 于家君. 中国畜禽舍建筑气候区划[J]. *中国农业气象*, 1992, 13(5): 41—44.
- [25] 张岫云, 黄学明. 鸡舍建筑与环境[J]. *同济大学学报自然科学版*, 1981(2): 116—124.
- Zhang Xiuyun, Huang Xueming. Building and environment of poultry houses[J]. *Journal of Tongji University*, 1981(2): 116—124. (in Chinese with English abstract)
- [26] Papadopoulos A M, Giama E. Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(5): 2178—2187.
- [27] Menconi M E, Grohmann D. Model integrated of life-cycle costing and dynamic thermal simulation (MILD) to evaluate roof insulation materials for existing livestock buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 81: 48—58.
- [28] Zhao Y, Xin H, Shepherd T, et al. Ventilation rate, Balance Temperature and Supplemental Heat Need in Alternative vs. Conventional Laying-Hen Housing Systems[C]//2012 IX International Livestock Environment Symposium (ILES IX), American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2012: 1—10.
- [29] 杨选将, 刘盛南, 詹凯, 等. 八层层叠式笼养蛋鸡舍夏季环境质量参数测定与相关性分析[J]. *中国家禽*, 2015, 37(10): 26—29.
- Yang Xuanjiang, Liu Shengnan, Zhan Kai, et al. Measurement of environmental quality parameters and its correlation analysis of layer house with eight overlap tiers cages in summer[J]. *China Poultry*, 2015, 37(10): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张天柱, 潘强, 黄之栋, 等. 海口地区蛋鸡高密度叠层笼养工艺饲养效果的实验研究[J]. *农业工程学报*, 1997, 13(5): 90—95.
- Zhang Tianzhu, Pan Qiang, Huang Zhidong, et al. Feeding effect study on confined high-density stacked-cage laying houses in Haikou[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 1997, 13(5): 90—95. (in Chinese with English abstract)
- [31] 潘强, 黄之栋, 张天柱, 等. 蛋鸡高密度叠层笼养工艺的初步研究[J]. *农业工程学报*, 1997, 13(5): 86—89.
- Pan Qiang, Huang Zhidong, Zhang Tianzhu, et al. Study on high density stacked-cage-raising system of layer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 1997, 13(5): 86—89. (in Chinese with English abstract)
- [32] 耿爱莲, 李保明. 蛋鸡笼养福利问题以及蛋鸡养殖模式[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(增刊 2): 121—126.
- Geng Ailian, Li Baoming. Discussion on welfare problems of caged layer and layer's rearing system in future[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(Supp.2): 121—126. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘晨霞, 马承伟, 王平智, 等. 日光温室保温被保温性能影响因素的分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 186—193.

Liu Chengxia, Ma Chengwei, Wang Pingzhi, et al. Analysis on affecting factors of heat preservation properties for thermal insulation covers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 186—193. (in Chinese with English abstract)

Analysis and experiment on thermal insulation performance of outer building envelope for closed layer house in winter

Wang Yang^{1,2}, Li Baoming^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Beijing Engineering Research Center for Animal Healthy Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: The main considered environmental factors affecting performance of poultry is temperature. Thermal insulation performance of building component is the key factor that affects temperature stability, which is essential to ensure the bird's well-being, maximum productivity and efficient feed utilization. Generally, laying hen houses are not equipped with heating system in winter, the temperature meets the requirements of layer hen rely on sensible heat production of layers. Bird's sensible heat production and good insulation of building component are generally sufficient to maintain the houses temperature. If the stocking density is low or poorly insulated buildings, it's difficult to meet the layer house environment requirements, including temperature, humidity and air quality. Improving thermal insulation performance of the building component would reduce heat loss and increasing stocking density could raise sensible heat production. However, ideal ventilation control system is required to ensure that aerial pollution emissions levels are within the acceptable limits and not to result in unnecessary ventilation heat losses. As such, minimum ventilation rate is particularly important. It is crucial for indoor temperature level and uniformity. Layer house minimum ventilation and air flow are crucial not only for indoor temperature and humidity, but also for temperature control uniformity. But there was a lack of information about the design theories. No information could be found in the literature that optimum relationship between thermal insulation performance of the layer house component and stocking density in laying-hen housing systems with different climatic regions in China. It was required to settle the urgent issue on how to determine the layer houses component thermal insulation performance under different climate zones, especially in the layer house building construction and environmental control fields. The objectives of this article was to analyze on minimum thermal resistance of building component in different climatic regions of China, and according the law of energy and quality conservation, to build dynamic heat balance model for layer house. A model was developed to determine the thermal insulation performance. It was important to build dynamic heat balance model in layer house, in order to maintain the temperature of the house of laying hen and to keep the healthy environment of layer hen. Those can reduce the energy consumption and construction cost, providing a guidance for laying house thermal insulation system design. In this paper, we conducted theoretical analysis and numerical calculation the building component minimum thermal resistance under the different climate regions and built steady-state heat balance theory model for layer house. Results showed that: 1) When calculated temperatures were -25 °C (Northeastern China), -15 °C (Northern and Northwestern China), -0 °C (South of the Yangtze River China), the minimum thermal resistance of the layer hen houses walls should not be less than 0.778, 0.972, and 0.573 m²·°C/W, and the minimum thermal resistance for the ceiling should not be less than, 0.716, 0.266, and 0.333 m²·°C/W respectively for the above mentioned three regions. 2) A-frame cage of three tiers, semi-A-frame cage of four tiers, four overlap tiers cages, six overlap tiers cages, and eight overlap tiers cages, with maximum stocking density and outdoor design temperature should not be lower than -14, -17, -19, -22, -23 °C. As such, dynamic thermal balance of layer house can be achieved. The results of this study provided theoretical foundation for the design of insulation system for closed layer hen house. Those research results can reduce the energy consumption and construction cost and providing a theoretical basis for layer house thermal insulation design system.

Keywords: facilities; thermal insulation; thermal resistance; environmental control; closed layer house; outer building envelope; heat consumption; density of laying hen