

卷帘牛舍矮墙对舍内清粪通道地面温度影响的数值模拟

吴含萍^{1,2} 施正香^{1,2*} 袁小艳^{1,2}

(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 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要 针对西北地区卷帘牛舍冬季地面结冰,造成奶牛行走不便、打滑、跪地甚至伤害牛蹄、乳头,以及无法使机械刮粪系统正常作业,影响舍内卫生等问题,采用计算流体力学的方法,模拟该地区6组矮墙设计方式下卷帘牛舍地面温度场的分布,并对其中3组进行现场试验验证。结果表明,不同矮墙高度和外保温方式对矮墙附近的地面温度场有很大影响:1)矮墙高度对地面温度的影响程度大于墙体保温措施的应用,矮墙高度由0.5 m增加到1.5 m时,距矮墙2 m范围内的地面温度可提高1.0 ℃;2)矮墙高度与墙体保温具有交互效应,采用1.2 m矮墙加外保温时与1.4 m矮墙无外保温时的地面温度基本相同,综合考虑矮墙高度和设置保温层对夏季通风和建造成本的影响,建议采用1.2 m矮墙加外保温设计。

关键词 卷帘牛舍;地面温度模拟;牛舍矮墙设计;模拟验证

中图分类号 S815.2

文章编号 1007-4333(2017)06-0151-07

文献标志码 A

Numerical simulation of curtain barn's low-wall affecting the surface temperature of internal clearance channel

WU Hanping^{1,2}, SHI Zhengxiang^{1,2*}, YUAN Xiaoyan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. The Livestock and Poultry Healthy Aquaculture Environmental Engineering Technology Research Center, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Aiming at the problems cause by the frozen ground of curtain cowshed in winter at the Northwest of China, i. e. cows walking-impaired, skidding, and kneeling, damage of cows hoof and nipples, and un-normal operation of mechanical scraping manure systems affecting barn environment and other issues. adopts Computational Fluid Dynamics method was adopted in this study, Simulations of the three distribution of ground temperature fields in cowshed with different low-wall were conducted, and the results were in a good agreement with field test. The results showed that the height of the wall and external wall insulation had great influence on the ground temperature field which close to low-wall. 1) The influent degree of low wall height on the ground temperature is greater than the wall heat preservation measures of application. When low wall height was increased from 0.5 m to 1.5 m, within 2 m of the low-wall, ground temperature was increased by 1.0 ℃; 2) The low-wall height and wall insulation displayed interaction effect, and the ground temperature of 1.2 m height low-wall with exterior insulation was same with 1.4 m height low-wall without exterior insulation. In conclusion, considering the low altitude, the ventilated thermal insulation layer of summer, the influence of the construction cost, 1.2 m height low-wall with external insulation design was recommended.

Keywords curtain barn; the ground temperature simulation; low-wall design; model validation

近年来,卷帘牛舍在我国西北地区新建牛舍中应用较为普遍,卷帘下方的矮墙,其主要作用是阻挡舍外雨雪、沙尘等飘进舍内以及风直接吹到牛的身上。作为围护结构的主体,墙体在防寒保温中起到

收稿日期: 2016-06-03

基金项目: 现代农业(奶牛)产业技术体系建设专项资金资助(CARS-37); 公益性行业(农业)专项(201303091)

第一作者: 吴含萍, 硕士研究生, E-mail: 18510250904@163.com

通讯作者: 施正香, 教授, 博士生导师, 主要从事畜禽养殖工艺与环境研究, E-mail: shizhx@cau.edu.cn

极其重要的作用^[1-4]。墙体保温及围护结构防寒设计一直是现代农业设施中的研究热点^[5-6]。设计时,一般以满足保温性能的墙体经济厚度为目标,综合考虑所在地气候状况,以及导热系数、化学稳定性、机械强度、施工和维修、使用寿命等条件^[7-12]。研究表明,增加设施墙体高度会显著提高设施内夜间温度、减慢降温速度^[13-16],墙体保温措施对维持墙体结构层温度场稳定性、降低温度变化幅度都是十分有效的^[17-19]。但在现有的卷帘牛舍设计和建造中,对墙体的热工设计以及如何选择合适的构造尚没有引起足够的重视,相关的研究几乎空白^[20-26]。

西北地区卷帘牛舍冬季靠近矮墙的清粪通道经常出现地面结冰,导致刮板清粪系统无法正常作业,链条断裂、电机故障现象十分普遍。地面结冰还会妨碍奶牛行走及造成蹄部伤害,给奶牛健康和生产

带来很多隐患。针对以上问题,本研究选取宁夏典型牛舍,开展矮墙不同设计方案的 CFD 模拟研究,旨在分析矮墙高度和外保温对靠近矮墙的清粪通道地面温度场的变化情况,以期为西北地区卷帘牛舍矮墙的科学设计提供理论参考。

1 矮墙工况选择

本研究对宁夏、陕西、新疆、甘肃等 12 个牛场的牛舍建筑进行了实地调研:目前西北地区的卷帘牛舍墙体构造一般为砖混结构,且未采取保温措施,墙体厚度基本为 300~400 mm,高度 400~1 400 mm。为比较不同矮墙高度、矮墙外保温对舍内清粪通道地面温度的影响程度,本研究选取 3 种矮墙高度,即 500、1 200 和 1 400 mm,对每个高度分有无保温 2 种工况,对这 6 种工况(表 1)的地面温度场分布进行讨论。

表 1 本研究矮墙设计工况
Table 1 Lowwall design conditions in this study

墙体特性 Wall feature	工况 1 Condition 1	工况 2 Condition 2	工况 3 Condition 3	工况 4 Condition 4	工况 5 Condition 5	工况 6 Condition 6
高度/mm Height	500	500	1 200	1 200	1 400	1 400
厚度/mm Thickness	370	墙体厚度 370 保温厚度 10	370	墙体厚度 370 保温厚度 10	370	墙体厚度 370 保温厚度 10
保温方式 Insulation method	无	岩棉板 外保温	无	岩棉板 外保温	无	岩棉板 外保温

2 矮墙对地面温度场分布的数值模拟

2.1 计算模型

本研究模拟的卷帘牛舍原型位于西北银川地区,成乳牛舍。牛舍为薄壁钢结构,长 318 m,宽 30 m,屋脊高 8.86 m,建筑檐高 3.6 m。牛舍为东西朝向,长轴纵向沿南北向布置,南北侧山墙为 50 mm

厚复合彩色钢板墙面,东西面为敞开式设计,设有保温卷帘,屋顶采用 50 mm 厚的彩色单层钢板,屋脊开设 400 mm 宽通风口。单栋饲养量 824 头,卧床采用对头式 4 列布置,单个卧床长 2.5 m、宽 1.2 m。饲喂通道宽 5 m,采食、清粪通道宽分别为 4.2 m、3.3 m,牛舍采用刮板清粪,将粪刮到牛舍北端入横向粪沟。牛舍剖面见图 1。

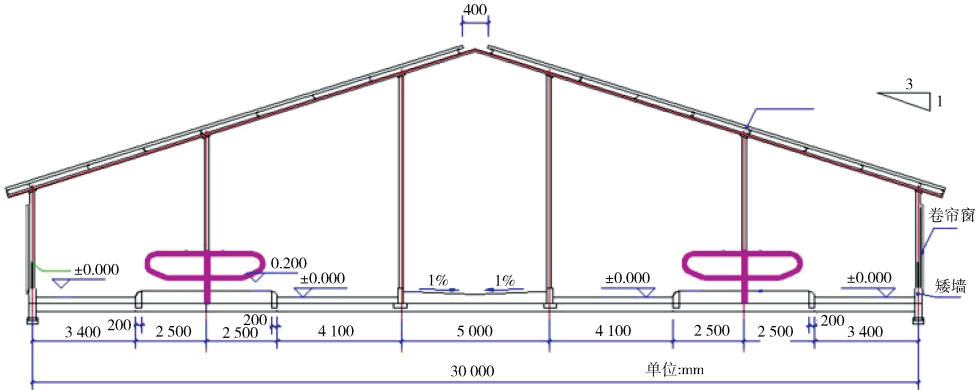


图 1 试验牛舍剖面图

Fig. 1 Sectional view of the test barn

鉴于牛舍长宽比悬殊,而纵向的温湿度条件变化不大,本研究对模型进行简化,长度上选取 2 个柱间 6 m 的长度作为模型计算长度,所确定的牛舍三维数值计算模型见图 2。

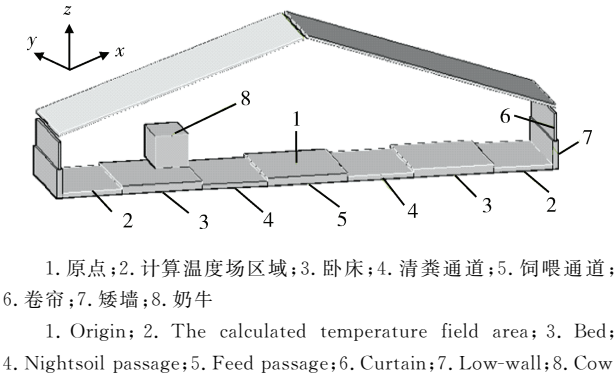


图 2 卷帘牛舍三维数值计算模型

Fig. 2 3-D numerical model of rolling barn

2.2 网格划分

在对模拟牛舍进行网格划分(图 3)时,忽略颈枷、立柱、水槽等局部结构的影响。由于网格多少对计算结果的准确性和计算效率影响很大,故本研究就 998 430、1 922 880 和 3 242 240 个网格下的舍内温度进行了初步的模拟计算。结果表明,1 922 880 和 3 242 240 个网格下差别很小,而 998 430 和 1 922 880 差别较大。权衡后取网格单元数量为 1 922 880 个。

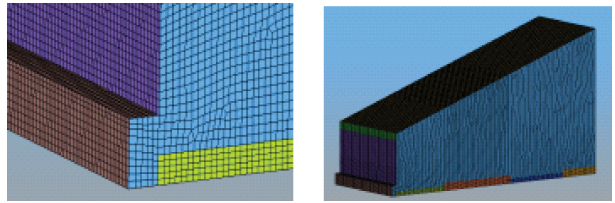


图 3 数值模拟模型网格图

Fig. 3 Grid graph of the model

2.3 控制方程

在本研究计算中,从流体热混合到固体的热传导采用耦合求解。为减少计算量,单一改变矮墙设计参数,只考虑有内热源和自然对流方式对地面温度场的影响。空气流动遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒。

各守恒方程可以表示成以下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S$$

式中: ϕ 为通用变量,可以代替等求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项; ρ 为材料密度; t 为热传递时间; u 为热传递速度矢量。式中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项。

2.4 边界条件

模型中,假设卷帘窗和矮墙连接处密闭无空隙,舍内外温度、壁面温度根据作者现场测试结果设定。对于奶牛模型中的壁面,固体域的导热和流体界面使用耦合边界条件。在不加温奶牛舍,奶牛机体产生的显热量和太阳辐射热热量为牛舍内主要热源,舍内照明以及设备等的产热通常可以忽略不计。此外舍饲散栏牛舍中不考虑太阳辐射热,仅考虑奶牛显热散热量,作为唯一热量来源。

2.4.1 奶牛显热量

单头奶牛的显热散热量为 750 W^[27],模型中,将每侧的 10 头奶牛简化成一个矩形,显热散热量为 7 500 W。舍饲散栏牛舍中不考虑太阳辐射热。

2.4.2 各壁面边界

将舍内侧墙壁、屋面、饲喂通道、采食通道、粪道及卧床等均设为壁面边界,壁面温度利用红外测温枪现场实测获得(表 2)。模型中,壁面和舍内外空气进行对流换热,满足第三类边界条件^[29],即给定物体边界与周围流体间的表面传热系数 h 及周边流体的温度 t_f ,即固体壁导热热量与表面传热量相等:

$$-\lambda_s(\partial t/\partial n)_w = h(t_w - t_f)$$

式中: λ_s 为各壁面的导热系数, W/(m · K); $(\partial t/\partial n)_w$ 为温度经过材料一定厚度的函数; h 为各壁面边界与周围流体间的表面传热系数, W/m² · K; t_w 为舍外空气的温度; t_f 为各壁面周边流体的温度。计算时,上、左和右边界外表面与室外空气、檐口处舍内外空气、及舍内各壁面与舍内空气之间均存在对流换热;矮墙与卷帘、矮墙与舍内地面、卧床和地面、地面与地面下的土壤之间均具有热传导。根据实测结果,温度最低值出现在早上 7:00—8:00,模拟时以此温度作为计算条件。有关牛舍壁面边界材料参数、计算温度等见表 2^[28]。

2.4.3 进、出风口风速

牛舍进行自然对流换热,进风口位于屋檐与卷帘之间的开口,宽 400 mm,入口风速为 1.7 m/s;出风口为沿屋脊的连续开口,宽度 400 mm,设为出流边界。

表 2 壁面边界材料参数值

Table 2 Parameters of wall boundary material

壁面类别 Wall boundary category	导热系数/ (W/(m·K)) Thermal conductivity	比热容/ (J/(kg·K)) Specific heat capacity	密度/(kg/m³) Density	温度/℃ Temperature
奶牛体表 Cow body surface	0.464	3 500.00	1 100	32.5
屋面 Roof	0.793	0.75	150	0.3
卷帘 Curtain	1.830	1.51	1 020	−9.9
牛卧床 Cow bed	0.060	2 010.00	120	3.5
饲喂通道 Feed passage	1.740	920.00	2 500	1.5
采食通道 Feeding channel	1.740	920.00	2 500	1.1
墙体 无保温 Non-thermal insulation	2.054	0.83	1 800	−3.7
Wall 有保温 Thermal insulation	0.580	1.52	700	−3.7
舍内 Inside of cowshed	0.024	1.00	1 290	0
舍外 Outside of cowshed	0.024	1.00	1 290	−15.0

2.5 模拟结果

模型中设定卷帘处于关闭状态,对 6 种工况(表 1)地面温度场分布进行模拟分析,结果见图 4。可以看出,在舍外温度为−15℃时,矮墙高度及保温处理与否,会影响靠近矮墙的地面温度,且越靠近矮墙(2 m 范围内),对地面温度的影响越大。增加矮墙高度对地面温度的影响较为明显,当矮墙高度

达到 1.5 m 后舍内地面温度基本可维持在 0℃以上,较 0.5 m 矮墙时的地面温度平均提高约 1℃。矮墙经过保温处理后,地面平均温度较同高度未经保温处理工况约提高 0.5℃。在 6 种工况中,工况 3、4、6 均可实现地面基本不结冰。考虑到矮墙高度会影响夏季通风和增加建设成本,故认为采用矮墙高 1.2 m 加外保温处理的设计方法较为合理。

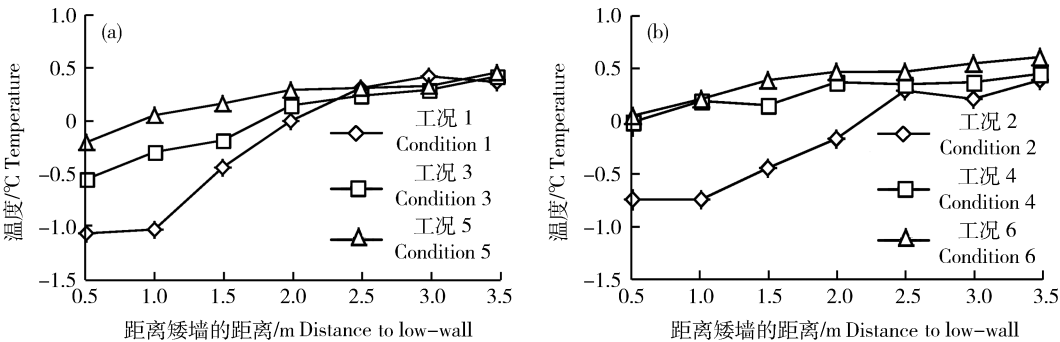


图 4 矮墙无保温(a)和有保温(b)不同工况地面温度的分布

Fig. 4 Distribution of ground temperature under low-wall with insulation (a) and without insulation (b)

3 模型验证

为了验证对 6 种工况数值模拟的准确性,选取表 1 所示的 3 种工况(工况 1~3)进行了现场测试,并与模拟值进行对比。

3.1 现场测试条件

现场数据采集选择的牛舍与 CFD 模拟原型一致,对每种工况进行 12 d 连续测量。测试前,按照

工况要求对牛舍矮墙做了局部改造,对牛舍矮墙进行外保温:50 mm 岩棉板+50 mm 水泥砂浆抹面。测试期间,门口配置了与卷帘相同材料的门帘,除喂料、清粪、消毒等必要日常活动需要开启外,保持门帘处于关闭状态。地表温度采用贴片式 T 型热电偶(测量范围−200~350℃,±0.5℃)和数据采集器自动采集,每隔 10 min 记录 1 次。测点布置在牛舍两侧靠近矮墙的清粪通道居中部分,测点距离矮墙

的距离以及相关之间的间隔见图 5。

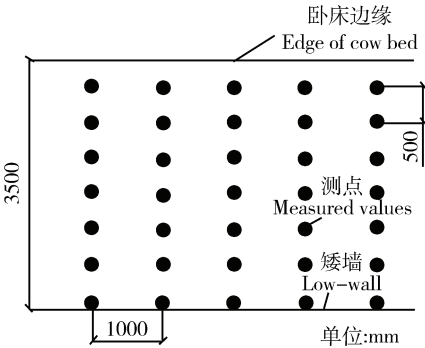


图 5 卷帘牛舍地面温度测点布置

Fig. 5 Point spacing of the curtain barn

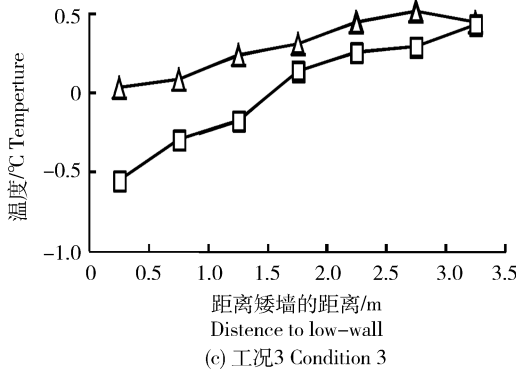
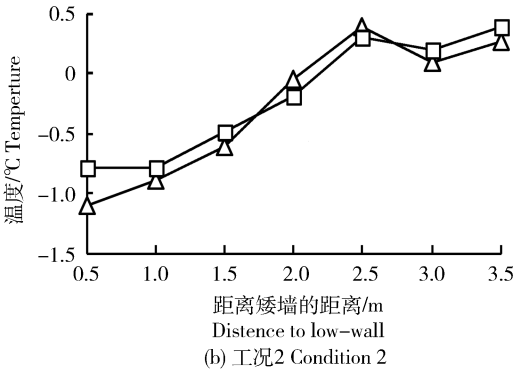
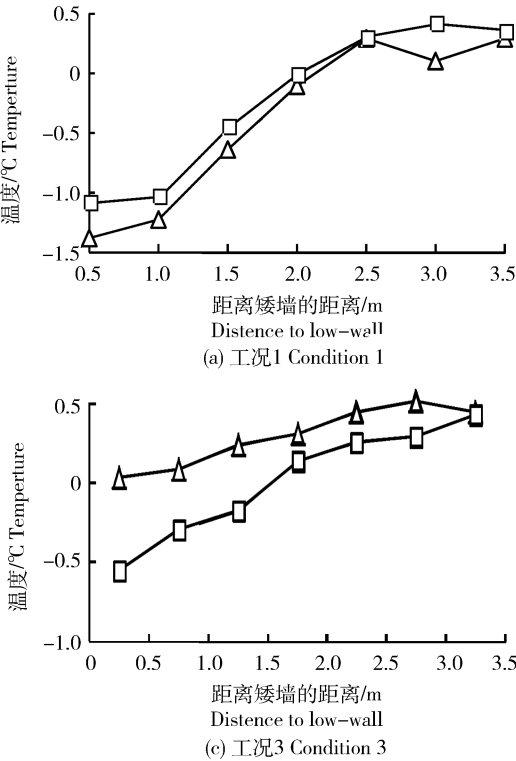


图 6 卷帘牛舍矮墙工况地面温度模拟值与实测值

Fig. 6 Comparison of different conditions of simulated and measured values

4 结 论

本研究就西北地区典型卷帘牛舍的矮墙做法及其对清粪通道地面温度场分布的影响进行了数值模拟和现场实测验证,得出以下结论:

1)矮墙高度对地面温度的影响程度大于墙体保温措施的应用。矮墙高度由 0.5 m 增加到 1.5 m 时,距矮墙 2 m 范围内的地面温度可提高 1.0 °C。

3.2 模拟结果验证

卷帘牛舍矮墙不同工况下地面温度现场实测值与模拟计算结果的对比见图 6。分析表明,实测温度与模拟温度的变化趋势吻合度较好,最大相对误差为 7.49%,平均相对误差为 5.08%。模拟值温度曲线较为平缓,而实测值有一定的波动,究其原因可能与奶牛不定时排便,以及清粪、喂料等活动有关。此外,模拟中设定的边界条件较实际状况理想,尤其是实际生产中牛舍密闭性达不到模拟条件下的假设。但就总体而言,模拟结果和实测结果一致性较好,表明本研究所建立的模型是可靠的。

2)矮墙高度与墙体保温具有交互效应,采用 1.2 m 矮墙加外保温时与 1.4 m 矮墙无外保温时的地面温度基本相同,综合考虑矮墙高度、设置保温层对夏季通风、建造成本的影响,建议采用 1.2 m 矮墙加外保温设计。

3)对比现场测试结果与数值模拟结果,二者的温度曲线变化趋势一致,平均相对误差为 5%,最大相对误差为 7.5%,表明本研究所建模型是可靠的。

参考文献 References

- [1] 邓利军,高腾云,刘伟,李明,王淑梅. 散栏饲养棚式奶牛舍温热环境评价[C]//2006全国畜禽健康养殖模式与产业发展学术研讨会论文集. 郑州:河南农业大学,2006:78-80
Deng L J, Gao T Y, Liu W, Li M, Wang S M. Assessment of Shed stall feeding cows homes warmed Environment[C]. In: 2006 National Conference on Health Cultivation Mode and Industrial Development of Livestock and Poultry. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006:78-80 (in Chinese)
- [2] 陈林,吴中红,王美芝,刘继军,张文华. 西北地区冬季肉牛舍环境指标测定与评价[J]. 黑龙江畜牧兽医,2009(1):24-27
Chen L, Wu Z H, Wang M Z, Liu J J, Zhang W H. Northwest winter cattle shed environmental indicators determination and evaluation[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2009(1):24-27 (in Chinese)
- [3] 高腾云,张德勋,孔庆友,李明. 棚式牛舍的温热环境及其对乳牛产奶量的影响[J]. 农业工程学报,2000,16(4):118-121
Gao T Y, Zhang D X, Kong Q Y, Li M. Environment and its impact on the shelf type barn warm milk production of dairy cows[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000,16(4):118-121 (in Chinese)
- [4] 白义奎,刘文合,柴宇,车忠仕,佟国红. 防寒沟对日光温室横向地温的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5):595-597
Bai Y K, Liu W H, Chai Y, Che Z S, Tong G H. Effect of cold ditch solar greenhouse transversely temperature[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5):595-597 (in Chinese)
- [5] 马承伟,陆海,李睿,曲梅. 日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(6):231-237
Ma Chengwei, Lu H, Li Rui, Qu M. One-dimensional differential model and numerical simulation of heat transfer wall in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6):231-237 (in Chinese)
- [6] 王晓欢,费本华,任海青,周海宾,郭伟. 轻型木结构墙体传热数值计算与试验研究[J]. 建筑材料学报,2011,14(4):517-522
Wang X H, Fei B H, Ren H Q, Zhou H B, Guo W. Numerical and experimental study of heat transfer calculation wood frame wall[J]. *Journal of Building Materials*, 2011,14(4):517-522 (in Chinese)
- [7] 白义奎,李天来,张文基. 日光温室地基温度场数学模型及试验分析[J]. 北方园艺,2010(13):49-53
Bai Y K, Li T L, Zhang W J. Solar Greenhouse ground temperature field mathematical model and experimental analysis [J]. *Northern Horticulture*, 2010,(13):49-53 (in Chinese)
- [8] Chen Wei, Liu Wei. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a lean-to greenhouse[J]. *Renewable Energy*, 2006,31(4):517-535
- [9] 李保明,施正香. 设施农业工程工艺及建筑设计[M]. 北京:中国农业出版社,2005
- Li B M, Shi Z X. *Facilities Agricultural Engineering Technology and Architectural Design* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [10] 李小芳,陈青云. 墙体材料及组合对日光温室墙体保温性的影响[J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):185-189
Li X F, Chen Q Y. Effect of wall materials and combinations of wall insulation ingreenhouse [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006,14(4):185-189 (in Chinese)
- [11] 李震钟. 畜牧场生产工艺与畜舍设计[M]. 北京:中国农业出版社,2000:28-29
Li Z Z. *Livestock Production Technology and Barn Design* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:28-29 (in Chinese)
- [12] 朱新荣,刘加平. 关于底层地面传热系数的探讨[J]. 暖通空调,2008,38(5):105-108
Zhu X R, Liu J P. Discussion about the underlying surface heat transfercoefficient[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2008,38(5):105-108 (in Chinese)
- [13] 徐凡,马承伟,刘洋,宋道林. 天津一种典型砖墙日光温室热环境现状的测试与分析[J]. 中国农业大学学报,2013,18(4):188-195
Xu F, Ma C W, Liu Y, Song D L. Thermal environmental status testing and analysis of a typical brick-wall solar greenhouse in Tianjin[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 18(4):188-195 (in Chinese)
- [14] 管勇,陈超,凌浩恕,韩云全,闫全英. 日光温室三重结构相变蓄热墙体传热特性分析[J]. 农业工程学报,2013,29(21):166-173
Guan Y, Chen C, Ling H S, Han Y Q, Yan Q Y. Regenerative wall heat transfer analysis in greenhouse triple structural phasetransition [J], *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013,29(21):166-173 (in Chinese)
- [15] 谈莹莹. 建筑墙体简化传热模型及触地结构传热计算方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2006
Tan Y Y. Calculation methods of heat transfer model to simplify the building wall and touch the fabric heat [D]. Changsha: Hunan University, 2006 (in Chinese)
- [16] 张君,黄振利,李志华,阎培渝,张盼. 不同保温形式墙体温度场数值模拟与分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2009,30(12):1356-1365
Zhang J, Huang Z L, Li Z H, Yan P Y, Zhang P. Different forms of insulation wall temperature field numerical simulation and analysis[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009,30(12):1356-1365 (in Chinese)
- [17] 贺城. 基于 CFD 的猪舍内气流场和温度场模拟研究[D]. 武汉:华中农业大学,2009
He C. CFD flow field inside the barn and temperature field simulation basedon [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [18] 李永博,周伟,李鹏飞,汪小岳,丁为民. 基于 CFD 模拟模型的

温室温度场均匀性控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 156-161.

Li Y B, Zhou W, Li P F, Wang X L, Ding W M. Based on the greenhouse temperature field uniformity control CFD simulation model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4): 156-161 (in Chinese)

[19] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学报, 2002, 24(2): 137-144

Yao Z, Chen K M. CFD general software [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2002, 24(2): 137-144 (in Chinese)

[20] 刘一哲, 喻宏. 快堆燃料组件热工流体力学计算研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(2): 128-134

Liu Y Z, Yu H. Thermal-hydraulic analysis of fuel subassemblies for sodium-cooled fast Reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(2): 128-134 (in Chinese)

[21] Gajapathy R, Velusamy K, Selvaraj P. CFD investigation of effect of helical wire-wrap parameters on the thermal hydraulic performance of 217 fuel pin bundle[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 77: 498-513

[22] 邓书辉, 施正香, 李保明. 低屋面横向通风牛舍空气流场 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 139-146

Deng S H, Shi Z X, Li B M. Low transverse roof barn ventilation air flow field CFD simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 139-146 (in Chinese)

[23] 孙国涛. 构件集热式日光温室墙体集热系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011

Sun G T. Research on heat assistant systems in the north wall of structured heat collecting solar greenhouses [D]. Beijing: China Agricultural University, 2011 (in Chinese)

[24] 宋丹. 日光温室土质墙体研究及温度环境模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013

Song D. Solargreenhouse soil research and wall temperature environment simulation [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013 (in Chinese)

[25] 崔文慧. 日光温室对流循环蓄热墙体特性的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014

Cui W H. Study on the performance of convective circulation thermal storage wall in solar greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)

[26] 郝飞麟, 沈明卫, 张雅. 单栋塑料温室内温度场 CFD 三维稳态模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 222-228

Hao F L, Shen M W, Zhang Y. Single-span plastic greenhouse CFD simulation of three-dimensional steady-state temperature field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12): 222-228 (in Chinese)

[27] 李如治, 颜培实. 家畜环境卫生学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 50-208

Li R Z, Yan P S. *Livestock Environment Hygiene* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 50-208 (in Chinese)

[28] 翟红侠. 土木工程材料[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2009

Zhai H X. *Civil Engineering Materials* [M]. Anhui: Hefei University of Technology Press, 2009 (in Chinese)

责任编辑：刘迎春