

井下避难硐室温湿度分布及耦合机理研究

詹子娜¹, 金龙哲^{1,2}, 王奕¹, 汪声¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 矿山避险技术研究中心, 北京 100083)

摘 要: 为提高避险人员的生存舒适品质, 建立基于密闭小空间的载人试验, 对人体热舒适的温湿度耦合影响进行了定量分析和研究, 验证了避难硐室配置制冷除湿装置的必要性, 并对硐室内温湿度的主要扰动源进行分析和计算. 采用 CFD 技术, 构建了氧气瓶供氧时的避难硐室三维模型. 模拟结果表明: 无空调时避难硐室温湿度在 9 h 内能达到 33 ℃, 90%, 即人体闷热的环境条件; 通过制冷除湿装置能有效地将其控制在 30 ℃, 83% 以下. 通过现场载人试验, 验证了数值模拟的可靠性, 并得硐室内温度达到 28 ℃时, 相对湿度应控制在 80% 以下. 为避险设施设计提供指导性依据.

关 键 词: 密闭空间; 避难硐室; 人体热舒适; 温湿度分布; 数值模拟

中图分类号: X 936 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2014)11-1636-05

Distribution and Coupling Mechanism of Temperature and Relative Humidity in Underground Mine Refuge Chamber

ZHAN Zi-na¹, JIN Long-zhe^{1,2}, WANG Yi¹, WANG Sheng¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Mine Emergency Technology Research Center, Beijing 100083, China. Corresponding author: JIN Long-zhe, E-mail: ljzin@ustb.edu.cn)

Abstract: To improve living comfort quality in refuge chamber, based on manned test in small confined space, coupling effect of temperature and relative humidity (RH) on body thermal comfort was quantitatively analyzed, which verifies the necessity to configure the apparatus in refuge chamber. The main disturbance sources affecting on temperature and RH were analyzed, and the key parameters were calculated. Using CFD technology, three-dimensional model of refuge chamber with oxygen bottle supply was constructed. Without air conditioning, the internal temperature and RH are up to 33 ℃, 90% within 9 h, where the human being has felt muggy. In this respect, cooling and dehumidifying apparatus can effectively control temperature and RH at 30 ℃, 83% or less. Finally, the feasibility of the simulation process is verified, and it is deemed that RH can be controlled at 80% or less when the temperature reaches to 28 ℃. This provides basis guidance for the design of underground mine refuge chamber in future.

Key words: confined space; refuge chamber; human thermal comfort; temperature and relative humidity distribution; numerical simulation

井下避难硐室在无外源供给条件下, 处于完全封闭状态, O_2 , CO_2 , 温度、湿度是影响空间环境质量和人体舒适度品质的重要因素^[1-2]. 井下避难硐室的压风供氧方式基本可满足内部温湿度的自我调节, 而氧气瓶供氧方式下硐室温湿度会随着时间的持续而不断地升高^[3]. 在硐室避灾期间, 其不仅影响人体基本生存需求环境, 降低了人

体舒适度, 更会引起人员生理心理负面波动, 而其状态的稳定性对于救援能否成功至关重要; 为避险人员创造一个舒适的环境, 亟需解决温湿度不断上升的问题.

由于国内外避险设施条件和标准不同, 现阶段针对完全密闭下容纳 80 ~ 100 人的避难硐室的温湿度变化和其对人体舒适度的影响尚无定量的

系统研究. 针对氧气瓶供氧下温湿度变化规律进行系统研究. 通过密闭小空间内温湿度对人体舒适度的实验, 利用 CFD 对井下避难硐室氧气瓶供氧方式下温湿度变化规律进行系统研究, 为井下避难硐室内温湿度的调节提供科学依据.

1 温湿度对人体舒适度的耦合影响

构建容纳 8 人的密闭实验舱, 外形尺寸为 4 500 mm × 1 300 mm × 1 800 mm, 设两道门, 人体生存空间总容积为 8.6 m³. 满足舱内氧气、二氧化碳浓度在《煤矿井下紧急避险系统建设管理暂行规定》(以下称为《规定》)下的条件^[4]. 通过不同温度、湿度的环境控制, 进行所有受试人员对舱内热湿环境的热舒适感觉调查评估. 将舒适度划为稍凉(1 分)、舒适(0 分)、热(-1 分)、闷热(-2 分)、无法忍受(-3 分)等 5 个等级, 进行定量考察和评价^[5]. 针对矿山井下环境状态, 本文偏重于较高温度范围的研究. 将相同时刻不同受试人员热舒适感觉的人均总得分与该时刻的温湿度数据对应, 获得密闭小空间环境中人体热舒适性与温湿度的关系, 如图 1 所示.

当舱内温度控制在 25 ~ 28 ℃ 时, 湿度对人体舒适感觉影响不大, 受试人员普遍感觉舒适; 当温度大于 28 ℃ 后, 湿度的影响逐渐增大. 相同温度时, 湿度越大, 人越容易感到闷热. 在应急救援条件下, 避险设施的目标是保障和维持避险人员的

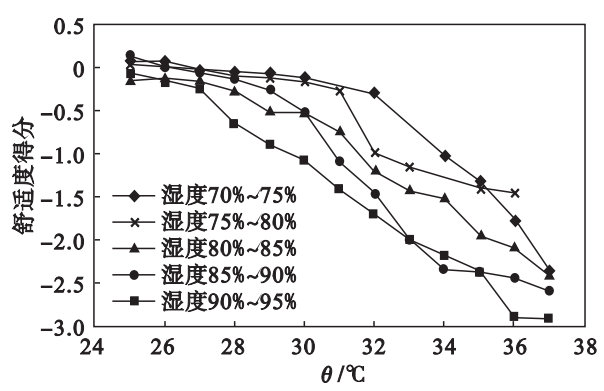


图 1 密闭空间内人体热舒适性与温湿度关系曲线
Fig. 1 Relationship curves of body thermal comfort and temperature and humidity in confined space

生命安全. 因此避险设施内部温湿度的控制可以牺牲部分舒适感觉为代价, 将舒适度下限评分为 -2 即可. 由试验数据可确定密闭避险设施环境中人体温湿度耐受上限温度应为 35 ℃, 85% RH.

2 避难硐室温湿度扰动源分析和模拟

2.1 避难硐室密闭空间温湿度扰动源分析

根据《规定》, 氧气瓶供氧作为避难硐室供氧的一个重要方式^[6]. 本文氧气瓶供氧方式是在压风供氧管网布风的基础上, 高压氧气通过氧气控制柜降压, 并与净化器内净化空气混合, 经空压机引入压风管网中, 通过布气装置在硐室内均匀弥散和循环^[7]. 见图 2.

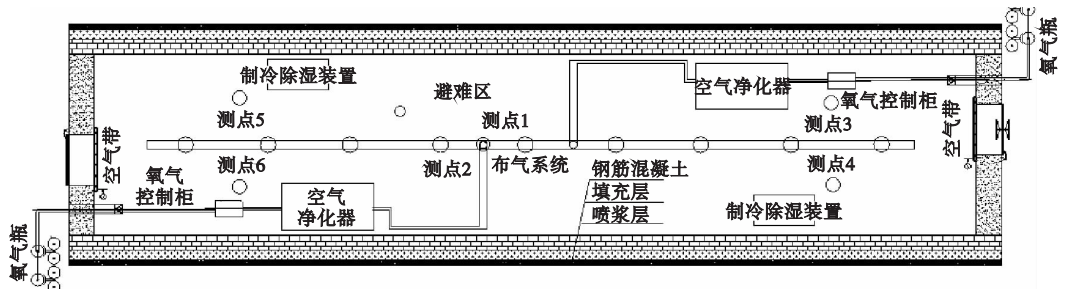


图 2 避难硐室氧气瓶供氧系统示意图
Fig. 2 Oxygen bottle supply system in refuge chamber schematic diagram

避难硐室内热量来源主要包括人体散热、设备放热和壁面热传导^[8]. 避险人员在救援工况下, 机体始终处于热平衡状态, 能够维持正常的体温^[9-10]. 设定避险硐室内人员 90% 的安静状态和 10% 的简单行走和轻微活动状态, 其个体产热量约为 86.5 W; 设备散热主要来源于空压机设备和气体净化装置的 JS-1 剂的化学吸附反应产热; 由于避难硐室的防护结构的岩体温度一般低于内部温度, 通过热传导可散失一部分热量.

湿度来源主要根据人体散湿、空气净化装置产水等两方面进行分析. 人体散湿量主要与周围环境、活动状态、生理条件等因素有关, 本文按照人体活动状态分析, 其个体散湿量为 3.5 × 10⁻⁵ kg/s; 净化装置散湿量按照处理 1 mol 二氧化碳产 1 mol 水计算, 其人均散湿量为 3 × 10⁻⁶ kg/s; 通过密闭小空间内水的蒸发效率的测定, 其湿度总载荷为 4.1 × 10⁻⁴ kg/s.

2.2 模型建立及边界条件设定

建立尺寸 1:1 的避难硐室物理模型,长(x)为 29 m,宽(z)为 4.4 m,高(y)为 3.8 m,拱顶半径为 2.2 m,直墙高 1.6 m.并根据第 50 百分位数的男性人体坐姿参数建立人体模型^[11],如图 3 所示.

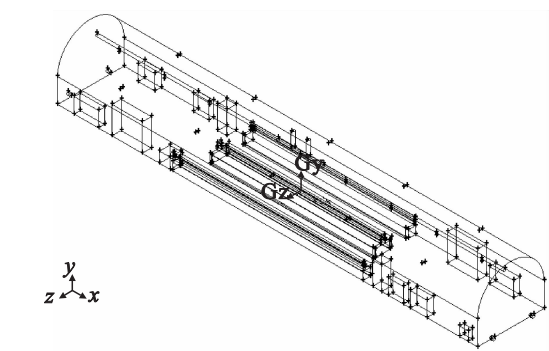


图3 避难硐室 3D 模型
Fig. 3 The 3D model of refuge chamber

100 人需氧量为 60 L/min,生氧净化器按照规定的极限二氧化碳吸收要求,则进风量设为 40 m³/min;壁面设置为热传导墙壁类型^[12],进气口处设置为速度入口,出气口处设置为出流^[13];设置个体产热量为 86.5 W,温度 35 ℃,散湿量为 3.5 × 10⁻³ kg/s.主要边界参数如表 1 所示.

表 1 主要边界参数表			
Table 1 Main boundary parameter list			
位置	边界类型	温度/℃	组分
氧气布气口	速度入口 4 m/s	21	100% 的 O ₂
人体吸气面	流量出口	—	—
人体呼气面	速度入口 0.000 3 m/s	35	20.5% O ₂
			0.9% CO ₂
			2.1% H ₂ O
	进气扇		21% O ₂
净化器风机	阻力方向向上	30	0.4% CO ₂
	阻力 300 Pa		78.5% N ₂ 和 H ₂ O
	进气扇		21% O ₂
空调风机	阻力方向向左	0	1% H ₂ O
	阻力 300 Pa		78% N ₂ 和 CO ₂
所有壁面	热传导系数 1.745	20	—

2.3 数值模拟结果分析

首先进行无空调状态下温湿度分布的稳态模拟,分析随着时间的推移温湿度耦合作用影响.由于在避难硐室内部,人员通常为坐式状态,本文重点分析 $y = 1.3$ m 水平面及中线和硐室垂线处的温度、湿度稳定云图和随时间变化规律(图 4 ~ 图 6).

由于模拟中开启了左侧的供氧净化系统,所以云图呈不完全对称现象.

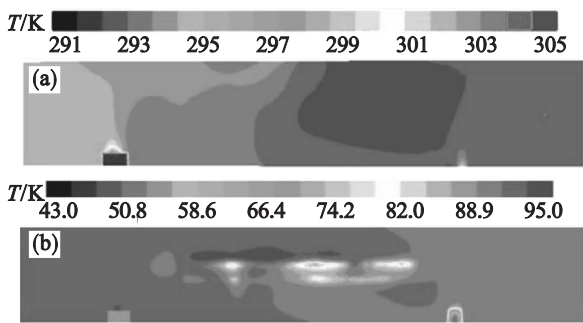


图4 $y = 1.3$ m 时云图
Fig. 4 Distribution nephogram of $y = 1.3$ m
(a)—温度;(b)—湿度.

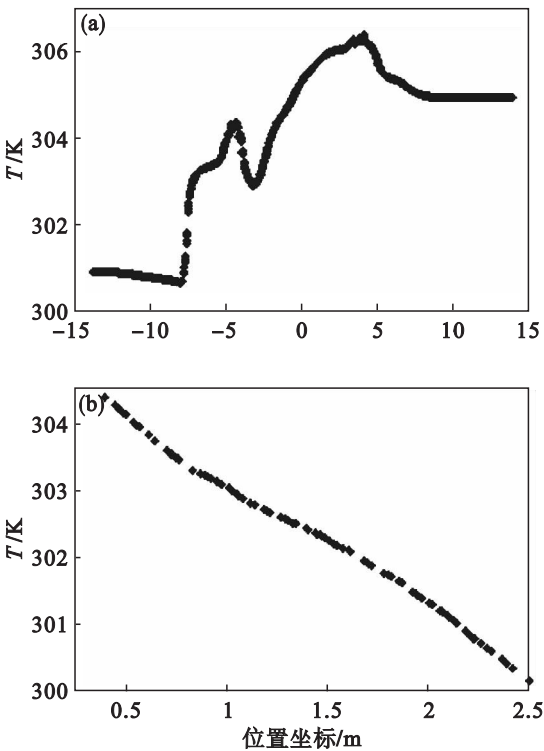


图5 温度散点图
Fig. 5 Temperature distribution scatter diagram
(a)— $y = 1.3$ m;(b)—中垂线上.

1) 无空调状态下模拟结果分析.由图 4a 和图 5 可见,在 1.3 m 的高度上,在空调未运行条件下,硐室温度维持在 29 ~ 33 ℃之间,两侧温度基本上在 30 ℃以上,在中心位置中垂线上,温度基本维持在 30.2 ℃左右.中心位置的温度一般比两端的温度略高,通过硐室速度分布和流线分析,在中心位置易形成几个小涡流,不利于空气的循环,造成热量的聚集,使得温度易升高.在高度方向中垂线上,温度基本在 27 ~ 31 ℃之间,可知温度随高度的增加而降低,底部温度较高是由于人体和设备不断地辐射热量.随着高度的增加,较高处空气与管网中

气体混合,使温度不断降低.

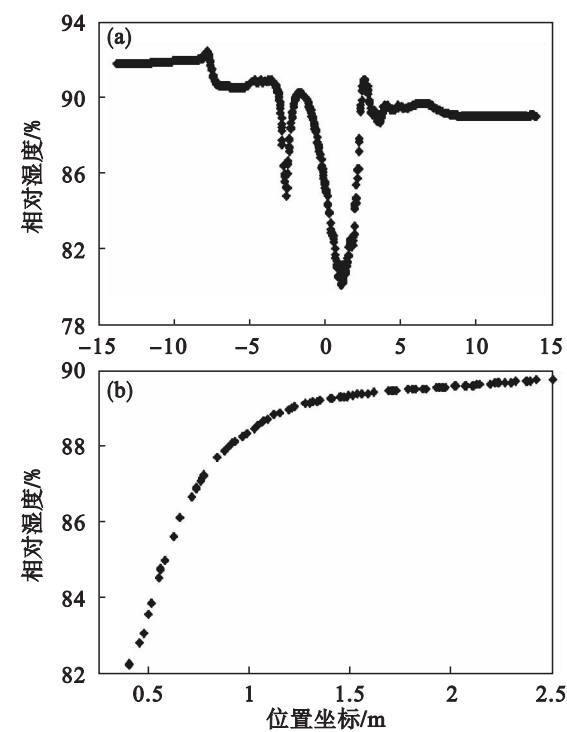


图 6 相对湿度散点图
Fig. 6 Relative humidity distribution scatter diagram
(a)— $y=1.3\text{ m}$; (b)—中垂线上.

由图 4b 和图 6 可得,无空调时中心位置相对湿度维持在 80.0% ~ 90.5%, 两侧相对湿度已达到 90.0% ~ 92.0%;在高度方向相对湿度为 82.5% ~ 89.5%,随着高度的增加而增加,硐室两端湿度比中部湿度较高,可见设备产湿量影响较大,在采取空调控制时,应将空调放置在硐室的两端,则除湿效果会更好.

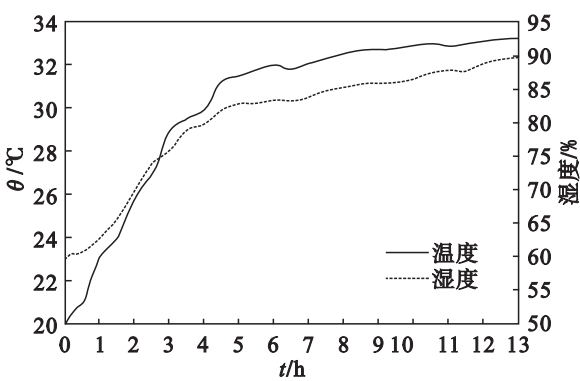


图 7 温湿度随时间变化曲线图
Fig. 7 Temperature and humidity versus time diagram

由图 7 可知,随着时间的推移,温度在前 5 h 内升高速率较快,以 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速率上升,之后缓慢升高,基本在 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;相对湿度的变化分 3 个阶段:迅速升高期、平缓期、缓慢上升期;在开始 4 h 内升高迅速,湿度由 60% 达到 83%,在之后的 3 h 内

基本维持在 84%,之后又缓慢上升,湿度可达到 90%.

可见,在无空调控制下,容纳 100 人的避难硐室在氧气瓶密闭供氧时,硐室内温度在 5 h 内可迅速上升到 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度可达到 83%,从人体舒适度角度分析,人体已经感到热,心理惊慌情绪已经出现,必须开启空调系统进行温湿度控制.

2) 空调运行下模拟结果分析. 图 8 为开启空调时的计算云图. 由图可知,两端增加两台空调,可使硐室内温度基本上控制在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下. 硐室中心位置相对湿度在 64.5% ~ 83%,两侧相对湿度基本上在 80% 以下,硐室中心部位的相对湿度略高于硐室两侧. 因此,在避难硐室两端布置两个空调,对密闭空间内温湿度有很好的调控作用,并且所有点处的相对湿度均符合《规定》要求.

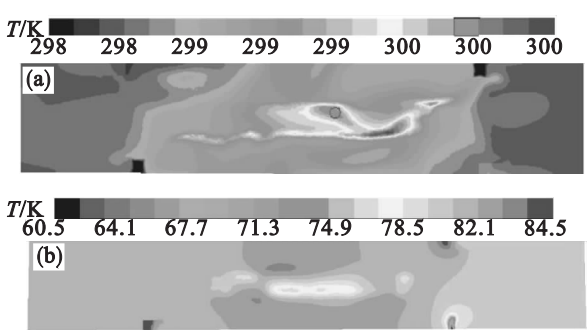


图 8 空调运行下云图
Fig. 8 Distribution nephogram with air-conditioning
(a)—温度; (b)—湿度.

3 与现场试验的对比较证

对常村煤矿避难硐室进行 16 h, 100 人氧气瓶供氧试验,并对硐室内的环境参数进行监测,根据实际情况需要在后期开启除湿制冷系统. 该载人试验在硐室内布置测点如图 2 所示. 选取影响最大的测点 1 ($y=1.3\text{ m}$) 和测点 2 ($y=1.8\text{ m}$) 作为对比分析对象,对稳定状态下测定均值与图 8 进行对比分析,温度:试验结果 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,模拟结果 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,误差 7.14%;湿度:试验结果 80%,模拟结果 83%,误差 3.75%.

由此可知,温湿度变化的模拟结果和试验结果相似,误差较小,因此验证了避难硐室内温湿度扰动源分析的准确性以及制冷除湿装置设计和使用的科学性和可行性. 但载人试验中发现,当温度达到 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 80% 相对湿度的环境下,硐室内部分人员已逐渐感到闷热,所以通过 100 人的现场载人试验,可见当温度达到 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应尽量控制相对湿度在 80% 以下.

4 结 论

1) 本文以密闭小空间为研究对象,基于人体热舒适度标准,对温湿度对人体热舒适度的耦合作用机理进行定量研究,并得出密闭避险设施环境中人体温湿度耐受上限温度应为 35℃,85% RH.

2) 通过避难硐室内温湿度主要扰动源分析,准确地预测和得出了数值模拟的物理模型和边界条件参数的设定;模拟误差主要是由于模型简化、温湿度和围岩边界条件常量化的综合因素引起的.

3) 以避难硐室生存区为研究对象,模拟结果显示:避难硐室在氧气瓶密闭供氧方式下,无制冷除湿装置时,温湿度会持续升高,在 9 h 内温度和相对湿度分别达到 33℃,90%,验证了避难硐室配置制冷除湿装置的必要性;在硐室两端放置 2 台制冷除湿装置,能有效地控制硐室内温湿度在 30℃,83% 以下,为制冷除湿装置的设计提供了科学的依据.

4) 模拟结果与现场载人试验对比中,温湿度误差比较小,可验证模拟过程的可靠性;并得到当温度达到 28℃时,应尽量控制相对湿度在 80% 以下.

参考文献:

[1] 赵山峰,丁云飞,周孝清. 室内空气热舒适评价及空调系统控制模式探讨[J]. 建筑热能通风空调,2008,27(2):29-31.
(Zhao Shan-feng, Ding Yun-fei, Zhou Xiao-qing. Affecting of indoor air for thermal comfort and application of air-conditioning system control models[J]. *Building Energy & Environment*,2008,27(2):29-31.)

[2] Deng S M, Li Z, Qu M L. Indoor thermal comfort characteristics under the control of a direct expansion air conditioning unit having a variable-speed compressor and a supply air fan[J]. *Applied Thermal Engineering*,2009,29(11):2187-2193.

[3] 王云航,蒋曙光,邵昊,等. 煤矿井下避难硐室除湿实验研究[J]. 矿业研究与开发,2013,33(3):81-84.
(Wang Yun-hang, Jiang Shu-guang, Shao Hao, *et al.* Experiment study on dehumidification of refuge chamber in

underground coal mine [J]. *Mine Research and Development*,2013,33(3):81-84.)

[4] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 煤矿井下紧急避险系统建设管理暂行规定[N]. 中国煤炭报,2011-02-16(003).
(State Administration of Work Safety, State Administration of Coal Mine Safety. Coal mine underground emergency system construction management interim provisions [N]. Beijing: China Coal Newspaper,2011-02-16(003).)

[5] Nicol F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics[J]. *Energy and Buildings*,2004,36(7):628-637.

[6] 高娜. 常村煤矿永久避难硐室关键技术研究与应用[D]. 北京:北京科技大学,2011.
(Gao Na. Research and application of the key technology of the permanent refuge haven of Changchun coal mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2011.)

[7] Tsutsumia H, Tanabea S, Harigaya J, *et al.* Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid environment [J]. *Building and Environment*,2006,42(12):4034-4042.

[8] Atmaca I, Yigit A. Predicting the effect of relative humidity on skin temperature and skin wettedness [J]. *Journal of Thermal Biology*,2006,31(5):442-452.

[9] Kunzel H M, Holm A, Zirkelbach D, *et al.* Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope [J]. *Solar Energy*,2005,78(4):554-561.

[10] Li F W, Jin L Z, Zhan Z N. Numerical simulation study of air distribution law of air pressure system in the mine refuge chamber[J]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*,2012,45(1):205-211.

[11] Yi L, Fengzhi L, Li Y X, *et al.* An integrated model for simulating interactive thermal processes in human-clothing system[J]. *Journal of Thermal Biology*,2004,29(7):567-575.

[12] 周成梅. 某候车室气流组织的模拟研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2011.
(Zhou Cheng-mei. The simulation analysis of air distribution for waiting room[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology,2011.)

[13] Kima K, Yoon J Y, Kwon H J. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers [J]. *Biosystems Engineering*, 2008,100(2):245-255.