

地源热泵换热器随机传热及可靠性设计方法探讨

管昌生, 刘卓栋

(武汉理工大学土木工程工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘要: 介绍了国内外地源热泵换热器技术的理论与试验研究现状, 分析了地源热泵换热器传热基本理论, 以及现有的各种常用传热设计理论和数值模型, 并指出了确定性分析理论与设计方法存在的缺陷。针对地源热泵换热器的复杂实际工况, 探讨了地源热泵换热器影响因素的随机特征, 提出了地源热泵换热器的可靠度概念和定义、基于可靠性理论的地源热泵换热器研究方法, 给出了地源热泵换热器设计步骤。

关键词: 地源热泵; 换热器; 传热; 随机特征; 可靠性

Research on Random Heat Conduction and Reliability Design of Heat Exchanger of Ground Source Heat Pumps

GUAN Chang-sheng, LIU Zhuo-dong

(School of Civil and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 China)

Abstract: The state of theory and experiment on heat exchanger of ground source heat pumps (GSHP) is introduced in domestic and abroad, also several basic theories of various heat conduction traditionally used, and heat transfer design theory and numerical model of GSHP are analyzed, the defect of the determinate theory and design method are indicated. Based on practical complex condition to the heat exchanger, random characteristic of effect factors to the heat exchanger of GSHP is discussed. The conception and definition of reliability on heat exchanger of GSHP is given, based the reliability theory the analyses and design procedure are proposed in this paper.

Key words: GSHP; heat exchanger; heat conduction, random characteristic; reliability

近年来, 随着全球能源危机的加剧和环境恶化, 节能和环保已成为世界各国发展的主题。地热(冷)源作为可再生能源, 其资源的合理开发与利用已日益受到广泛的关注。应用地源热泵(GSHP)技术提取地源进行采暖或制冷, 在发达国家或地区已进入实用阶段, 并产生了显著的节能效益, 许多发展中国家也在积极探索地源热泵技术的应用^[1]。我国作为经济高速增长的发展中国家, 能源消耗巨大。为保持经济稳步增长, 必需加快可再生能源的开发利用。

地源热泵技术的应用, 已引起我国政府和科技工程界的高度重视。面对全球能源问题, 我国已出台了一些相关政策, 鼓励和推广地源热泵技术的研究和应用。

由于我国地域辽阔, 各地区气候差异较大, 地质状况错综复杂, 全面推广地源热泵技术应用还需对许多技术难题进行研究。国际上的成功经验可做借鉴, 但不能照搬。

地源热泵技术是使用少量的高位能(如电能), 将浅层地能(如土壤热能、地下水或地表水中的低位热能)向高位热能转换的技术^[2]。由于地源热泵换热器的工作环境极其复杂, 现有的换热器传热模式较为简单, 导致相应的设计方法不尽完善, 直接影响了地源热泵技术的推广应用。在影响地源热泵换热器的诸多因素中, 有些因素具有随机性或不确定性本质。如地下岩土导热系数, 随季节变化的地源热(冷)采用量。有些因素具有非稳态性, 如地下导热及埋管流体热交换。因此, 采用现有的设计理论与

方法可能使得地源热泵空调系统投资偏大,或者无法满足经济利用地源热(冷)能要求。

该文阐述了近年来国内外地源热泵换热器传热研究成果,分析了我国目前使用该技术的现状,提出了当前必须加强研究的关键问题及可能采取的理论方法。

1 地源热泵换热器传热模型研究现状

1.1 地源热泵换热器传热基本理论

20世纪40~50年代,欧美各国开始注重研究地源热泵(GSHP)技术,最有代表性的是1948年Ingersoll和Plass根据Kelvin线源概念提出了地下埋管传热的线热源理论,目前大多数地源热泵设计皆以该理论为基础。之后,出现了BNL的改进线源理论,其特征是考虑埋管周围的岩土划分。直到1986年,Mei提出了三维瞬态远边界传热模型,该理论是建立在能量平衡基础上,由系统能量平衡建立热传导方程。到20世纪90年代初,美国广泛开展了地源热泵换热器的传热模拟研究。在此期间,还有IGSHPA方法,这是北美确定地下埋管换热器尺寸的标准方法,该方法按最冷月或最热月负荷为计算根据。还有NWWA方法,这也是一种常用的地下换热器计算方法,它可以直接给出换热器内平均流体温度,并采用叠加法模拟热泵间歇运行的情况。该方法应用Kelvin线源方程,求得土壤的温度场,进而确定换热器尺寸^[3]。

1.2 国内外研究现状

地源换热器中的传热过程是一个复杂的、非稳态的传热过程,所涉及的时间尺度很长,至少为数月至数年。该传热过程所涉及到的几何条件和物理条件也非常复杂。一般说来,传热模型应能描述土壤热物性、密度、温湿度、管材、管径、管中流体物性、流速等诸多因素对传热的影响,但这将使数学求解十分困难,因此通常的研究都只能使用简化的传热模型。在国际上,至今还没有一致公认的地源换热器设计计算方法。换热器传热模型的研究一直是地源热泵空调技术的难点,同时也是该项技术研究的核心和应用的基础。目前国外应用比较广泛的传热模型主要有3种:V. C. Mei模型,IGSHPA模型和NWWA模型。这些模型或者对不同的影响因素有所考虑,或者在计算方法上有所差异。但本质都是确定性模型与方法。

近年来试验研究的成果主要体现在以下方面:

2004年Mustafa研究了水平地源热泵热性能评价,James研究了地源换热器的优化深度布置^[4,5],

2005年Onder分析了太阳能-地源热泵性能^[6],2007年Guohui研究了雨水地源热泵测试与模拟,Onder和Ozgener提出了地源热泵热能经济性评价参数,Louis研究了地源孔井热交换器数值解法及改进有限线性源模型,Hikmet研究了水平地源热泵数值试验,Arif研究了热泵系统模拟与效能评价^[7-12]。2008年Hikmet运用神经网络和模糊理论研究了地源热泵系统效率预测,Sarkhi研究了标准柱井效率评价应用,Katsura研究了群交换器的地源温度计算方法^[13-15]。

国内对地源换热器传热理论的研究起步较晚,主要成果有:2002年曾和义等人提出了U型埋管换热器轴向介质温度模型^[16],2004年任晓红研究了U型埋管换热器三维数值模拟,方肇洪研究了地热换热器的传热特性,刁乃仁提出了地源热泵地热换热器优化设计方法,李新国等研究了U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度;2005年李新国研究了桩埋管与井埋管实验与数值模拟,以及U型管桩埋换热器稳态传热模拟,涂爱民对地下U型换热器传热模拟进行了研究^[17-22],吕丽霞研究了垂直换热埋管周围非稳态温度场的数值模拟^[23];2006年崔淑琴提出了地源热泵非连续过程地下传热特性及其控制,高青分析了地下群井换热强化与运行模式,顾中焯研究了U型管地下换热系统非稳态传热数值模拟,范蕊研究了热渗耦合作用下埋管换热器传热^[24-27];2007年唐逸提出了U型埋管换热器传热的非稳态数值方法,王勇研究了基于层换热理论的竖直埋管换热器设计方法,纪世昌研究了U型垂直埋管换热器管群间热干扰^[28-30];2008年李永研究了土壤源热泵夏季供冷模拟模型;韩宗伟研究了太阳能-土壤源热泵相变蓄热供暖系统运行模式^[31,32]。

此外,我国一些研究单位已经开始逐步建立实验基地加紧理论与试验研究。如我国的天津大学、浙江大学、山东建工学院、哈尔滨工业大学等高校研究机构,也对地源热泵系统进行了研究,并取得了阶段性成果。但是,由于该问题的复杂性,目前的研究理论与设计方法有待进一步完善。

2 地源热泵换热器传热随机特征

2.1 岩土热物性随机参数

地源热泵系统性能与当地岩土热物性密切相关,其换热器布局取决于岩土的热物性和气候条件。岩土的热物性研究主要包括:岩土的能量平衡、热工性能、岩土传热与传湿、以及环境对岩土热物性的影

响等。上述参数具有明显的不确定性。确定地源岩土的热物性参数是地源热泵设计的基础,由于岩土的热物性难以测定,且换热器换热性能影响因素复杂,岩土热物性的不确定性是地源热泵设计的难点。因此,应采取实验室或现场测试法,并结合随机分析及统计计算,综合测试热物性特征。主要的岩土参数有导热系数、热扩散率、及比热容等。

2.2 影响埋管形式的随机因素

地源热泵埋管形式主要有水平式和垂直式2种,水平埋管安装较简单且费用较低。但埋管较浅,需较长的管长来适应随季节变化的岩土温湿度的改变。对于同一系统,水平式较垂直式所占用的场地要大些。当场地有限制时,垂直式较为理想。尤其当建筑附近土质为坚硬岩石的时候垂直式是唯一的选择。地下埋管系统环路方式有串联方式和并联方式。影响埋管形式的有如下因素:埋管材料、埋管间距、埋管内工作流体(可取盐溶液、乙二醇水溶液、乙醇水溶液)同程式和异程式等。以往的设计基本没有考虑影响埋管形式的随机影响因素。然而,由于岩石、埋管材料热参数固有的随机性,以及施工过程的不确定性,必然引起埋管间距、埋管失效、及埋管内工作流体的随机性。因此,有必要根据现场实际,建立埋管形式的随机影响机制。

2.3 地源岩土热平衡问题随机性

在地源未开发前由于地下水渗流等因素,可能出现失衡。当设计施工、运行之后,由于季节变化及采热或取冷失衡,其失衡状态明显。因为地源热泵系统夏季运行时,系统吸收室内热量,向岩土排放冷凝热,岩土吸收热量后,会改变其自身温度场,使其温度逐渐升高;在冬季运行时,系统需吸收岩土热量,从而降低岩土温度。就季节性而言,如夏季排放的热量与冬季吸收的热量相吻合,则全年岩土温度场变化不大,因而系统可长期持续稳定运转;否则将影响地源热泵系统的长期运行效果,同时也会给生态环境带来不可预料的影响。系统冷热负荷比通常是不平衡的,而且这种平衡往往是不确定的。如果还要考虑平衡的时间效应,宜采用随机过程分析方法。在这种情况下,应研究地源换热器的吸热和放热不平衡,多余的热量(或冷量)引起的随机积累量,借以描述地下随机温度场及其变异性。

2.4 地源热泵其他随机影响因素

地源热泵换热器其他影响因素包括:埋管进水温度变化、渗流对系统运行特性的影响,渗流对盘管换热量及出水温度的影响,垂直埋管管群周围非稳态温度场;管群间的热干扰及其发生时间,定量预测

热干扰,垂直竖井的回填料,管长与埋管深度等,岩土冻结对埋管换热器传热的影响。这些因素的不确定性不容忽视。

上述分析表明,影响地源热泵系统正常运行的因素极其复杂,而许多因素本身具有显著的不确定性(主要是随机性)。而现阶段的设计理论与方法基本采用确定性分析方法,从而导致工程投资偏高或者不能获得满意的效能比。然而,要完全考虑这些随机因素是不可能的。合适的做法是,在可能的条件下应尽量考虑起主导作用的随机因素,采用随机传热分析与可靠性理论设计方法。

目前的地源热泵研究设计中,有关地源热泵换热器的技术理论研究明显滞后于工程实践。这使得地源热泵系统运行效率和经济性无法达到理想程度。笔者认为主要的问题是,现有的设计依据是传统的热传导线源模型。若将其运用于具有随机特性的复杂条件及工况下的地源热泵系统,忽略随机因素本质特征,将无法获得相对科学的地源热泵热传导模式。不可避免会出现较大的误差。因此,深入开展该领域的研究、探索新的理论方法已刻不容缓。

3 地源热泵换热器可靠性分析方法

3.1 地源热泵换热器可靠性定义

地源热泵换热器设计、安装、维护的目的,是为了系统在设计寿命期安全可靠稳定运行。应用可靠性理论与方法,首先需对地源热泵换热器建立可靠性指标体系。如地源热泵地下换热量、地下热源(冷源)稳定性、地源热泵空调能效比等(按可靠性理论可作为系统的“抗力”),这些指标可以作为确定性指标,也可作为随机量指标。而设计的地源热泵换热器在运行中所处的实际工况,则是系统的真实反应,(按可靠性理论可作为系统的“效应”)。显然,系统的“效应”适合作为随机变量考虑。反映地源热泵换热器系统安全运行的状况,可以用系统的“效应”与系统的“抗力”之间的某种关系来确定。如果是阈值关系,则可以用超越概率来描述,如果是区间或集合关系,则可用交集的概率来描述。因此,我们可以定义地源热泵换热器系统可靠性如下:

地源热泵换热器系统在规定的条件下、在规定的时间内,满足规定的要求的概率。称概率值为换热器系统的可靠度。

在满足使用与维护的条件下,通常可将源热泵换热器的功能要求或指标作为系统的确定性“抗力”,而地源热泵换热器设计的重要参数应尽可能考虑其随机性特征。有些参数,可以通过试验获得,如

岩土热物性参数,而温度分布应建立地源随机传热模型获得。

3.2 基于可靠性理论的地源热泵换热器设计步骤

1) 确定随机参数特性

随机因素应包括:岩土参数及其热物性、地源温度场分布、地埋管几何尺寸及空间布局、地埋管内流热特征、及地源热量(冷量)采取的随机量等。对于系统而言,还可考虑地源热泵换热器连接方式以及使用寿命的随机性等。

2) 计算各随机参数的数字特征或概率分布

通常是通过随机试验或直接采用工程试验数据进行随机分析,在数据不完备情况下可采用计算机随机模拟方法获得参数近似值。

3) 建立地源热泵换热器的可靠性指标体系

可靠性指标可根据地源热泵换热器的实际应用状况确定。这里首先应考虑的是地源热泵换热器的热(冷)负荷、能效比,地源热能储量、及地源热泵换热器使用寿命等指标。

4) 建立功能状态方程

根据地源热泵换热器的随机参数、可靠性指标体系,建立地源热泵换热器系统功能状态方程,该方程中应包含岩土热物性、管内热流、几何尺寸、热量(冷量)等参数。

5) 计算系统可靠度

由上述过程获得的参数,计算出系统的可靠度。设计依据应以可靠度指标及使用寿命为界限,据此计算出较为合理的地源热泵换热器埋管几何尺寸和地下空间布局。

由于地源热泵换热器工况固有的复杂性与隐蔽特性,以及诸多参数的不确定,使得可靠性理论在该领域具有较大的实用价值。可以预见地源热泵技术在我国将会得到快速普及与应用。但是,目前还没有更加合适的设计方法。因此,加强地源热泵换热器可靠性理论及其工程应用研究,对优化地源热泵设计、提高可再生能源利用效率具有重要作用。

3.3 地源热泵系统随机传热理论研究

我国地域辽阔地质状况复杂,区域气候差异较大,要推广应用地源热泵技术,其关键理论与技术是地源热泵随机传热特性研究。当前紧迫的工作是,对将要使用地源热泵地区,进行系统的试验研究,取得基本的岩土热物性随机分析数据,建立可靠的地质随机传热数据库。在此基础上,根据地质环境与流体介质传热,应用随机分析方法,研究较为符合实际的含有随机参量的地源热交换模型。据此,可获得地源热泵开采区域的热能储量及可持续利用量

的随机分布状态。这些都可作为可靠性研究与设计的参考指标。这方面的主要工作应包括:

1) 深入开展地源热泵岩土热物性参数的试验研究,建立不同地区地质条件下的岩土随机热物性参数数据库,为地源热泵换热器理论分析及设计提供基础数据。

2) 探索地源换热器的随机换热机理,建立符合实际的换热分布规律,为地源热泵换热器理论分析及设计提供经济实用模型。

3) 对岩土随机热物性及换热器的随机换热过程进行计算机模拟分析,作为试验研究的必要补充。

4) 考虑关键随机因素作为地源换热器的效应参数,研究以可靠性理论为依据的系统状态方程。

5) 研究地源热泵热源(或冷源)的贮热量、热能的开采量、以及地源热泵系统的使用寿命、及相关功能要求的可靠性指标体系。

6) 基于可靠性理论,建立地源热泵热源换热器可靠度分析和计算方法。

7) 以系统的可靠性、经济性为指标,研究以可靠度为约束条件的地源热泵换热器设计方法。

8) 综合考虑季节环境、地下流、及非稳态流等复杂工况条件下,地源热泵换热器可靠性设计理论及工程应用。

9) 地源热泵热源热能平衡及环境影响。

10) 地源换热器稳定性长期检测控制技术、运行寿命预测评估理论和维修保养方法。

地源热泵空调系统的关键技术是地源换热器的效率,要做到既经济又满足使用要求,必须相对准确把握场地的地质热物性数据。通常的做法是直接钻井取样,如何根据小样本获得较为可靠的分析数据也是当前需要解决的课题。

4 结 语

目前,已有一些描述地源热泵换热器传热机理的模型,但这些模型往往与工程实践有较大的差异。寻求复杂环境下地源热泵换热器理论模型及应用技术,一直是地源热泵系统设计的重点和难点。

自20世纪90年代以来,地源热泵技术研究热点主要在地源换热器的换热机理与强化换热、热泵系统与换热器匹配等方面。近期的研究已开始关注地源热泵工程的隐蔽性,地质条件和系统工况的复杂性,工程系统的耐久性与稳定性,及系统运行预测与控制性,地质环境热稳定性,地源热泵整体系统高效及可靠性等。此外,对耦合传热传质研究,可以更好地模拟地源热泵换热器的换热情况;对回填

材料热物性的研究,可以强化埋管在岩土内的导热过程,从而可降低岩土埋管的初投资。

但是,地源换热器设计的根本方法,还是应从地源换热器所处的环境,及其工作状态的客观性进行研究,以求抓住问题的本质。显然,地源换热器的设计、安装、运行与维护过程,具有诸多的不确定性(主要是随机性),这使得可靠性理论在该领域的应用具有独到的优势。深入进行地源热泵换热器的可靠性理论研究,对当前推广地源热泵技术的普及具有重要意义。该文提出的地源热泵换热器可靠性理论分析方法,为地源换热器的研究提供了新的思路。

参考文献

[1] 吕悦,莫然,周沫,等. 中国地源热泵技术应用发展情况调查报告(2005~2006) [R]. 工程建设与设计, 2007(9): 4-11.

[2] 马最良,吕悦. 地源热泵系统设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[3] 刘宪英,胡鸣明,魏唐棣. 地源热泵地下埋管换热器传热模型的综述[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(4): 106-111.

[4] Mustafa Inalli, Hikmet Esen. Experimental Thermal Performance Evaluation of a Horizontal Ground-source Heat Pump System [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 2219-2232.

[5] James W. Stevens. Optimal Placement Depth for Air-ground Heat Transfer Systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 149-157.

[6] Onder Ozgener, Arif Hepbasli. Performance Analysis of a Solar-assisted Ground-source Heat Pump System for Greenhouse Heating, An Experimental Study [J]. Building and Environment, 2005, 40: 1040-1050.

[7] Guohui Gan, Saffa B. Riffat, Chong C S A. A Novel Rainwater-ground Source Heat Pump-measurement and Simulation [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 430-441.

[8] Onder Ozgener, Arif Hepbasli, Leyla Ozgener. A Parametric Study on the Exergoeconomic Assessment of a Vertical Ground-coupled (Geothermal) Heat Pump System [J]. Building and Environment, 2007, 42: 1503-1509.

[9] Louis Lamarche, Benoit Beauchamp. A New Contribution to the Nite Line-source Model for Geothermal Boreholes [J]. Energy and Buildings, 2007, 39: 188-198.

[10] Louis Lamarche, Benoit Beauchamp. New Solutions for the Short-time Analysis of Geothermal Vertical Boreholes [J]. International Journal of Heat and Mass Trans-

fer, 2007, 50: 1408-1419.

[11] Hikmet Esen, Mustafa Inalli, Mehmet Esen. Numerical and Experimental Analysis of a Horizontal Ground-coupled Heat Pump System [J]. Building and Environment, 2007, 42: 1126-1134.

[12] Arif Hepbasli, Ozay Akdemir, Ebru Hancioglu. Experimental Study of a Closed Loop Vertical Ground Source Heat Pump System [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 527-548.

[13] Hikmet Esena, Mustafa Inalli, Abdulkadir Sengur, et al. Forecasting of a Ground-coupled Heat Pump Performance Using Neural Networks with Statistical Data Weighting Pre-processing International [J]. Journal of Thermal Sciences, 2008, 47: 431-441.

[14] Al-Sarkhi A, Abu-Nada E, Nijmeh S, et al. Performance Evaluation of Standing Column Well for Potential Application of Ground Source Heat Pump in Jordan [J]. Energy Conversion and Building and Environment, 2007, 42: 11-24.

[15] Katsura T. Method of Calculation of the Ground Temperature for Multiple Ground Heat Exchangers [J]. Appl Therm Eng, 2008, (in press).

[16] 曾和义,方肇洪. U型管地热换热器中介质轴向温度的数学模型 [J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(1): 7-11.

[17] 任晓红,孙纯武,胡彦辉. U型埋管换热器三维数值模拟和供热实验研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(5): 90-95.

[18] 方肇洪,刁乃仁. 地热换热器的传热分析 [J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(1): 11-20.

[19] 刁乃仁,方肇洪. 地源热泵优化设计地热换热器 [J]. 建设科技, 2004(7): 32-33.

[20] 李新国,赵军,周倩. U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟 [J]. 太阳能学报, 2007, 25(5): 703-707.

[21] 李新国,陈志豪,赵军,等. 桩埋管与井埋管实验与数值模拟 [J]. 天津大学学报, 2005, 38(8): 679-683.

[22] 涂爱民,周恩泽,佟少臣,等. 地源热泵及地下U型换热器传热模拟研究 [J]. 制冷与空调, 2005, 5(5): 34-38.

[23] 吕丽霞,李素芬,李亮,等. 土壤源热泵地下垂直埋管周围非稳态温度场的数值模拟 [J]. 节能, 2005(6): 6-9.

[24] 崔淑琴,高青,李明,等. 地源热泵非连续过程地下传热特性及其控制 [J]. 吉林大学学报, 2006, 36(2): 172-176.

[25] 高青,李明,闰燕. 地下群井换热强化与运行模式影响规律 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(1): 83-89.

(下转第93页)

在正视使用功能的前提下, 建筑设计的考虑因素被精简为静态的基本要素、建筑的用途以及达到该用途的方法等几方面, 建筑的构造、材料和视觉形象构成了一个整体。

5 极少主义原则在现实语境中的启示

作为一种前卫姿态与唯美趣味, 极少主义伴随着二十世纪文艺思潮的不断发展演变, 其内涵与特征在不同时期亦有不同含义。美学与科技的潮起潮落让每种主义都变得不再持久。极少主义之于建筑, 尤其于当下中国建筑, 剔除其审美偏执的一面, 其超凡境界与纯粹形式理当具备很强的操作可能与现实意义。在商业趣味横行的都市, 简约、几何、纯净的建筑形态, 足堪以少胜多, 净化商业文化的喧嚣氛围, 减少庸俗主义的视觉污染。在资源集约化的当下, 减少额外装饰, 化解纷繁矛盾, 培养有格调的建筑鉴赏群体, 以素面朝天的直抵本质的设计手法来解决过度包装的时代痼疾。活跃在当代建筑界的设计师们, 在有意或无意间已创作若干符合极少主义原则的建筑作品, 并日益不断地产生持续影响。以2008 中国建筑传媒奖获奖作品为例, 带极少主义倾向的作品约占 1/3 左右, 其中尤以维思平的国安客房与张雷的高淳住宅为代表。由此可见, 极少创造极多的概念事实上已成为新一代建筑师的共识。

极少主义与其是一种手法, 不如说是一种态度, 一种标准, 从现实语境出发, 以最本质、最直观、最坦诚、最小代价与最简线索来完成庞大的工程操作, 走出遗老心态与炫耀心理, 让建筑回归生活背景、回归空间、回归本源, 使我们的城市从喧嚣与粗砺、华美

与错愕中得到一丝喘息, 一些思考。

6 结 语

极少主义或许和中国画有些许共性, 国画的韵律在于其中的大量留白, “无”之中意味着“有”的无限可能, 极少主义作为艺术理念, 已经或多或少地渗透到许多建筑师的创作理念中, 成为了一种自觉自省的思路, 但我们也必须清楚极少主义建筑是建造在高技术高施工水平的基础上的, 如果只是出于模仿, 不注意它的技术和精神内涵, 那么这样流行只会是一种炒作而已, 因此中国建筑师迫切需要的是学习西方建筑创作中理性、严谨的精神, 力求避免建筑作品的简单贫乏, 创造出真正的精品建筑。

参考文献

- [1] 彭一刚. 建筑空间组合论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [2] 罗伯特·文丘里(美). 建筑的复杂性和矛盾性[M]. 1966.
- [3] 奥罗拉·奎特(西). 极少主义——极多主义[M]. 冯萍, 宁满海, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [4] 罗小未. 外国近现代史[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] 刘先觉. 密斯·凡·德·罗[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [6] 李翔宁. 当代欧洲极少主义建筑评述(上)[J]. 时代建筑, 2002.

收稿日期: 2009-04-07.

作者简介: 黄 奎, 工程师.

(上接第 81 页)

- [26] 顾中焯, 吴玉庭, 唐志伟. U 型管地下换热系统非稳态传热数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 313-315.
- [27] 范 蕊, 马最良. 热渗耦合作用下地下埋管换热器的传热分析[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 6-10.
- [28] 唐 逸, 耿鹏云, 鄂广全. 土壤源热泵 U 型埋管换热器传热的非稳态数值模[J]. 节能技术, 2007(6): 512-515.
- [29] 王 勇, 刘 方, 付祥钊. 基于层换热理论的竖直地埋管换热器设计方法[J]. 暖通空调, 2007, 37(9): 35-39.

- [30] 纪世昌, 胡平放. U 型垂直埋管换热器管群间热干扰的研究[J]. 制冷与空调, 2007, 7(4): 35-37.
- [31] 李 永, 王侃宏, 王宏伟, 等. 土壤源热泵夏季供冷模拟模型的建立与验证[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(4): 37-40.
- [32] 韩宗伟, 郑茂余, 孔凡红, 等. 太阳能-土壤源热泵相变蓄热供暖系统运行模式[J]. 可再生能源, 2007, 25(4): 10-14.

收稿日期: 2009-07-16.

作者简介: 管昌生(1957), 教授, 博导.