

Integrate application of low exergy and low carbon heat source for district heating

Lei Wang¹, Jianing Zhao²

School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China

1. wanglei1030@126.com, 2. zhaojianing@sina.com

Abstract: In order to save fossil energy and protect the environment, people have realized the important of energy cascade use. China, America and European Union all put forward the plan of rapid developing CHP. Many studies have focused on energy and exergy analysis and optimization of CHP plant. Matching the energy quality between heat source side and user side is very important for energy saving. Low exergy and low carbon heating has become guiding concept for choosing heat source. Many countries are attempting to introduce low carbon energy for heating. Industry waste heat, waste incineration, biomass and geothermal energy have become supplemental heat source for district heating. The changing heat source has given rise to a series of new questions and new idea for energy saving. This paper presents the status of low exergy and low carbon heat source for district heating, and new technology for integrate application of multi-heat-source.

Keywords: district heating; low exergy heating; low carbon; integrate of multi-heat-source

低火用低碳热源在区域供热中的集成应用

王 磊¹, 赵加宁²

哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨, 中国, 150090

1. wanglei1030@126.com, 2. zhaojianing@sina.com

【摘要】为节约化石能源和保护环境, 人们逐渐认识到按质用能的重要性。中国政府和欧盟都提出了大力发展热电联产的计划。很多文献针对热电联产系统的能源效率和火用效率进行分析和优化。热源侧和用户侧的能质匹配是节能工作的重要内容, 降低热源侧的能源品位, 低火用低碳供热的理念成为供热热源选择的指导思想。各国正在努力探索利用低碳能源供热, 工业余热, 垃圾焚烧, 生物质能和地热能等成为热电联产区域供热的补充热源。热源形式的巨大变化, 给区域供热的节能工作带来了新问题和新思路。本文分析了区域供热热源的低火用低碳化技术现状及发展趋势, 介绍了多热源集成应用新技术。

【关键词】区域供热; 多热源集成; 低火用; 供热; 低碳

1 引言

能源, 环境与发展是当今世界面临的不可分割的三大主题。如何让能源可持续利用, 保护人类赖以生存的环境, 实现与自然环境的和谐发展是人类共同奋斗的目标。

建筑能耗占世界一次能源消耗的比例超过三分之一^[1], 其中一半为供热能耗。为节约化石能源和保护环境, 各国正在努力探索利用低碳能源供热, 工业余热, 垃圾焚烧, 生物质能和地热能等低碳能源越来越

受到重视并逐渐用做供热系统的热源。但化石燃料热电厂和锅炉房的主体地位依然没有改变。由于热电联产可以实现能源的梯级利用, 按质用能, 减少一次能源的消耗量, 从而减少 CO₂ 的排放。所以近些年, 为应对能源危机和环境恶化, 很多国家都在鼓励和推广热电联产技术。自 1998 年起, 中国已出台了一系列措施^[2,3], 对区域供热热源进行大规模的热电联产改造, 拆除小锅炉, 推广大型热电联产机组。欧盟以及联合国亚太经济社会委员会 (ESCAP) 都将热电联产视作污染物控制和提高能源效率的一项措施^[4,5]。2002 年欧盟提出了支持热电联产的发展战略, 计划到 2010 年,

资助信息: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAJ01A00)

热电联产发电量占总发电总量的比例从 9%增大到 18%^[6,7]。2002 年,美国仅有 9%为热电联产发电,预计到 2020 年,热电联产发电占总发电量的比例将达到 29%^[8]。

热电联产已经成为区域供热的主要热源形式。在供热系统日趋庞大的形势下,很多供热企业开始尝试多热源联合供热方式。热电联产、多热源供热等成为目前研究的热点问题^[9-11]。热源形式的巨大变化,给区域供热的节能工作带来了新问题和新思路。现阶段,区域供热热源还有很多技术难题,使得其节能减排的优势难以充分发挥,主要表现在以下几个方面:

1 人们用于供热的能量品位很高,却有大量的工业余热无法回收利用。如何利用低品位热能供热,节约高品位能源。

2 供热系统规模日益庞大,多热源优化配置和调度方法还不够成熟。

3 如何增加低碳能源在区域供热中的使用,缓解化石能源危机,保护环境。

4 采暖季热负荷波动范围大,高峰热负荷时间短,所以热电机组多在非满负荷状态下运行,如何提高热电联产区域供热系统能源利用效率。

5 区域供热热源在夏季长期处于停机状态,如何延长设备的使用时间。

节约高品位能源,减少碳排放是能源系统的工作重点。下面笔者对区域供热热源低火用低碳化趋势和多热源集成应用新技术展开讨论。

2 梯级用能及低火用供热

梯级用能是指按能量品位的高低逐级利用。能量品位的高低,是用它可转换为机械功的大小来度量的。由于热能不可能全部转换为机械功,因而,与机械能、电能相比,其品位较低。热功转换效率与温度高低有关。越接近环境温度,其热能品位越低。为把房间加热至 20℃,需要的能量品位是很低的,如表 1 所示,但长期以来,人们用于供热的能量品位很高^[1],火用损失较大。主要表现在:

(1) 锅炉房热源用化石燃料直接燃烧供热,牺牲了化石燃料的发电能力。

(2) 区域供热一级网供水温度一般为 110~130℃左右,热电厂常用 0.5-0.8MPa(表压)压力对外供热,这个压力范围的饱和温度为 158.8-184.06 度。考虑到端差为 5 度,加热温度也在 150 度以上。这是极

大的浪费。压力为 0.07(表压)饱和温度就是 115.17 度。考虑 5 度端差和管阻,实际上 0.1 MPa(表压)足够。

(3) 供热系统二级网一般采用 95℃的热水,其火用损失仍然很大。德国学者 Herena Torio 和 Dietrich Schmidt 研究发现,若将 95℃的供水温度降到 57.7℃,系统火用效率可以从 32%提高到 39.3%;若将回水温度从 40.8℃降低到 37.7℃,火用效率可提高 3.7%^[13]。

Table1, Quality factors of different energy sources at reference temperature 20℃
表 1 不同供热能源的能质因数^[12]

热源	能质因数 q
机械能	1
电能	1
核能	1
化石燃料	0.9
100℃热能	0.21
40℃热能	0.06
20℃热能	0

低火用供热是指利用低品位热能供热,例如利用工业余热、地热能、太阳能、生物质能、蓄热能等,从而节约化石燃料,电能等高品位能源。国际能源署为鼓励应用低火用供热系统,特别出台了低温供热系统研究计划(Annex 37)。并出版了低火用供热指导书^[12]。

目前低火用供热技术还不够成熟,在利用高品位能供热的同时,大量的工业余热难以回收利用。例如电厂循环水和锅炉排烟带走的热量占 60%,目前还没有较理想的技术方案将其回收利用。20 几度的循环水,属于低品位热能,国内外常用的技术措施是,采用低真空供热或热泵技术提升循环水的温度用于供热,但低真空技术还只能用于小型凝汽式机组,大型机组的安全性难以保证;热泵技术已有多种形式:机械压缩式热泵、吸收式热泵和化学热泵等^[15]。但因投资较大,限制了热泵技术的推广和应用。

综上,目前供热系统的能质损失很大,还有很大的节能空间。热能梯级利用理论还不够完善,余热回收和低火用供热技术还有待进一步研究。

3 多热源集成应用技术

3.1 热负荷蓄热调峰技术

由于热负荷变化范围大，高峰热负荷时间短，所以热电机组多在非满负荷状态下运行。为延长机组满负荷运行时间，热电厂的热化系数约在0.5-0.8之间(即热电联产承担全负荷的50%-80%)，尖峰热负荷时汽轮机抽汽供热不足部分由新蒸汽减温减压供给(如图1(a))，或电厂内装设调峰锅炉(如图1(b))补充，这部分蒸汽不参与生产电能，损失了一部分高品位能源的做功能力。

国外一些学者已经对热负荷调峰问题进行了研究。比利时 Leuven 大学(University of Leuven)的 Dries Haeseldonckx, Leen Peeters 等^[16]研究了采用蓄热调峰(如图1(c))方式来降低热电厂的装机容量，可以延长机组满负荷运行时间，提高了能源利用效率，同时减少了CO₂排放量。

目前蓄热方法主要有以下几种：显热蓄热，潜热蓄热和化学蓄热^[17]等。

1) 显热蓄热

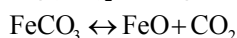
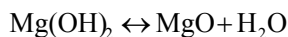
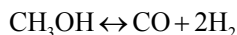
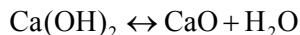
显热蓄热可以选用固体热媒或液体热媒，常见的固体热媒有土壤，沙石，混凝土等；常见的液体热媒有水，油等。

2) 潜热蓄热^[18]

潜热蓄热是基于蓄热材料在相变过程中吸热或放热现象。目前应用较多的是固—固、固—液、液—气相变蓄热。潜热蓄热材料主要有三类：(1)无机化合物，包括结晶水合盐类、熔融盐类、金属或合金；(2)有机化合物，这类材料有石蜡类、脂肪酸类、酯类、醇类和高分子类等；(3)共熔体系及复合材料，分为有机/有机、有机/无机、无机/无机共熔物和复合材料。

3) 化学蓄热^[17]

化学蓄热是利用化学反应过程中吸收和放出热量来实现蓄热。因此所采用的化学反应必须是完全可逆的。化学蓄热不需要保温装置，适用于长期蓄热。下面是几种常见的化学蓄热反应式：



蓄热技术在热负荷变化时能够起到良好的移峰填谷的作用，从而延长设备满负荷运行时间。但目前的

技术水平下，受蓄热材料的价格影响，当需要蓄存大量热能时，只能考虑水蓄热和大地及岩石蓄热^[19]。

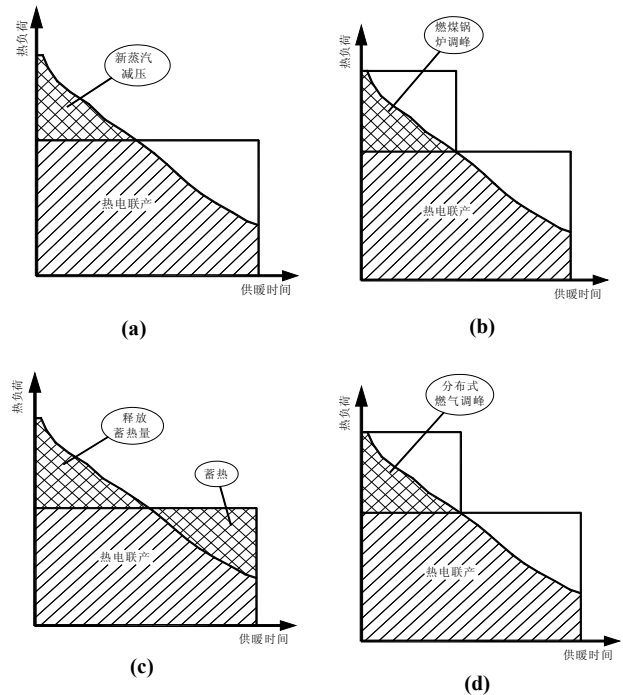


Figure 1. Several scenarios of heat source for peak heat load
图 1. 热负荷调峰的几种形式

3.2 多热源优化配置与调度

随着供热系统的日趋庞大，多热源联合供热将是大势所趋。目前多热源联合供热技术还不够成熟。有的城市虽然把几个热网联在一起，但在供热时又用阀门断开，分别运行，这样就失去了多个热源的互补性。

多热源联合供热的优势有以下几个方面：

- 提高能源利用效率
- 减少了过度供热量
- 减小干管管径，降低低热网的输送电耗
- 可增大主热源承担的供热面积（供热面积一定条件下，可降低主热源装机容量）
- 减少污染物排放，有利于改善大气环境。
- 提高大型供热管网的安全可靠性。

多热源联合供热系统在北欧已有成功的案例。丹麦哥本哈根拥有当前欧洲最大的热网，九个热源连接，三个热力公司经营。挪威奥斯路热网、波兰弗罗茨瓦夫 MPEC 和波兹南 PEC 热网也是多热源联网。他们的共同特点是：热电厂负责基本负荷，常年运行，气(油)锅炉房调峰，调峰热源有较多的备用富裕量，循环水

泵变频调速运行。调峰热源分散在各热力站内，规模较小。热力站内的调峰锅炉一般单台容量为 1~2t/h 的燃气(油)锅炉。根据用户的要求和室外气候条件的变化，自动启停，无人值守^[20]。

近几年中国也开始尝试采用燃煤燃气联合供热方式（如图1(d)）。燃煤热电厂或大型锅炉房作为基本热源承担供热的基本负荷，在二级网侧热力站内设置小型燃气锅炉作为调峰热源的联合供热系统。这种联合供热系统的运行方式是，在供暖初末期室外温度较高的情况下，只运行基本热源即热电厂或大型燃煤锅炉房，在热负荷超过基本热源的供热能力时，开启调峰锅炉将到达换热站的供水进一步加热以满足用户的需求。哈尔滨工业大学对这种燃气调峰供暖方式的经济性进行了分析，得出了最优经济负荷比^[21]。并研究了燃气调峰锅炉房的设置位置对大气环境的影响^[22]。

燃煤基本热源和燃气锅炉调峰联合供热系统的节能途径可概括为以下几方面：

(1) 对于燃煤热电厂和小型燃气锅炉联合供热系统，一方面主热源在额定负荷下运行的时间增长；另一方面燃气锅炉本身效率高，没有不完全燃烧的问题，不受炉膛温度的影响，而且燃气锅炉效率与负荷变化关系不大，所以提高了联合供热系统的热源运行效率。

(2) 利用燃气调峰热源减少了系统的过量供热量：一部分过量供热是由热网为满足少数不利用户而导致其他用户过热，另一部分是由于采暖初末期，由于电厂基本热源主动调节性差引起全网过量供热。

(3) 由于减少了一级网的流量，降低了热网的输送热损失和电耗。

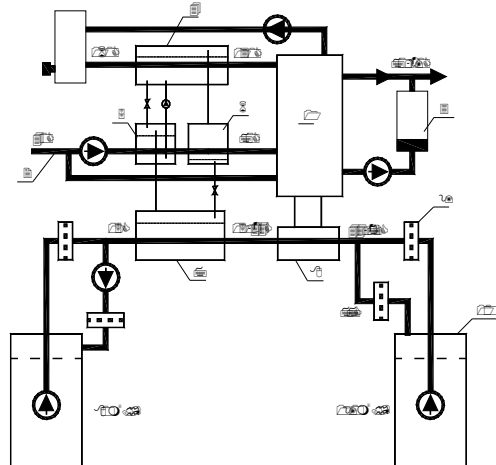
综合以上几点原因，考虑我国的实际情况，在燃气资源丰富、燃气价格不高或城市环境要求较高的地区，采用燃煤为主的大型锅炉房和热电联产同时配以燃气锅炉调峰的供热方式，是区域供热系统节能的有效形式。应发挥不同类型能源的优势，合理匹配集中式热源与分布式热源，才能使变负荷条件下更具灵活性和可靠性。

3.3 常规能源与低碳能源的集成应用

3.3.1 地热能

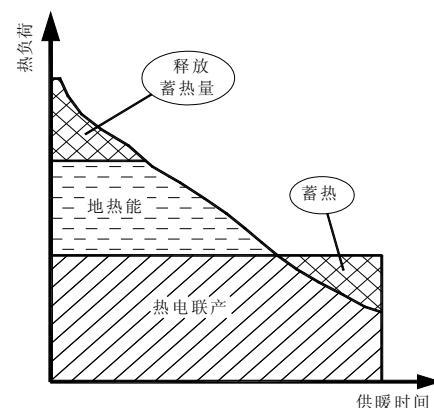
化石能源日趋短缺和燃烧所带来的环境污染逐渐受到世界各国的关注。可持续发展已经成为人类面临

的关键问题。推广可再生能源是缓解能源危机和环境恶化的有效途径。欧盟已经提出将可再生能源比例增加到 20% 的目标^[23]。地热能是一种清洁、无碳能源，储量巨大但品位低，适合作为区域供热的热源。近年来，地热能已被许多国家成功用于区域供热，例如美国、法国、罗马尼亚、加拿大、意大利、冰岛、日本、新西兰、中国和土耳其^[24]。地热能利用的最大技术难题就是回灌问题。工程上经常出现因不能完全回灌所引起的地质环境破坏。



1. 热电厂；2. 供热管道；3. 蓄热器；4. 发生器；
5. 吸收器；6. 冷凝器；7. 蒸发器；8. 换热器；
9. 水处理设备；10. 地热井

(a) 系统流程图



(b) 热负荷延续时间图

Figure 2. Integrate application of CHP and geothermal for district heating

图 2 热电厂与地热能联合供热系统

除了独立作为热源之外，地热能也可以与常规能源联合供热。丹麦 DONG 公司和热电联产企业合作，

在 Thisted, Copenhagen 等地区建立了多座热电厂与地热能联合供热系统。

如图 2(a) 所示, 该系统包括热电厂 1, 供热管道 2, 蓄热装置 3 和由发生器 4, 吸收器 5, 冷凝器 6, 蒸发器 7 等组成的吸收式热泵。热电厂 1 的抽汽或汽轮机排汽通过吸收式热泵的发生器 4, 作为吸收式热泵的高温热源; 地热能通过管道输送穿过吸收式热泵的蒸发器 7, 作为吸收式热泵的低温热源。供热管道 2 穿过吸收式热泵的吸收器 5、冷凝器 6 和蓄热器 3, 实现了多级换热; 该系统有以下几个优点:

(1) 用蒸汽驱动吸收式热泵, 提取地热能的热量, 从而减少了因高温蒸汽直接供热所引起的能质损失, 同时又解决了低位热能难以直接利用的难题。

(2) 利用蓄热装置调峰, 代替以往的减温减压器调峰和调峰锅炉, 延长了热电厂的满负荷运行时间, 减小了机组装机容量, 见图 2(b)。

(3) 节省化石燃料, 提高了可再生低位热能的利用率, 减少了对环境的污染。

3.3.2 生物质能

生物质能源在减少 CO₂ 排放和节约化石燃料方面具有很大的潜力。在芬兰, 瑞典和奥地利, 生物质能在一次能源中占有相当大的比例。其中芬兰占 17%, 瑞典占 14%, 奥地利占 11%^[25]。在瑞典区域供热占总供热量的 48%, 其中生物质热源占 66%^[26]。

生物质最常见的利用形式是直接燃烧或压缩成型后燃烧。生物质燃料压缩成型技术已经成熟, 将松散的生物质原料压缩成棒状或颗粒状的成型燃料, 可以减少运输费用和提高热效率^[27]。

近年来对生物质能的化学转换技术研究较多。可以利用生物质原料制成生物柴油, 甲醇, 二甲醚, 合成燃气等。Marbe et al. 讨论了生物质气化与天然气共同作为热电联产燃料的经济性^[28]。比较了传统的蒸汽轮机生物质热电联产和生物质气化联合循环(BIGCC)热电联产。结果表明生物质气化联合循环热电联产比传统的蒸汽轮机热电联产发电能力强, 且更具经济优势^[29]。丹麦 Babcock 和 Wilcox Vølund 提出了一种利用余热和生物质为热源的热电联产系统, 如图 3 所示。一般的余热发电系统, 因蒸汽温度较低, 故发电效率不高, 该系统利用生物质气化燃烧后的热量再次加热蒸汽, 提高了蒸汽温度和发电效率。

Kristina Difs et al.^[30]研究表明生物质区域供热具有很大的经济效益, 并预测生物质气化用于区域供热

将有广阔的前景, 是减少温室气体排放和推广可再生能源的重要措施。在推进低碳能源的进程中, 生物质能源将有很大的发展潜力。

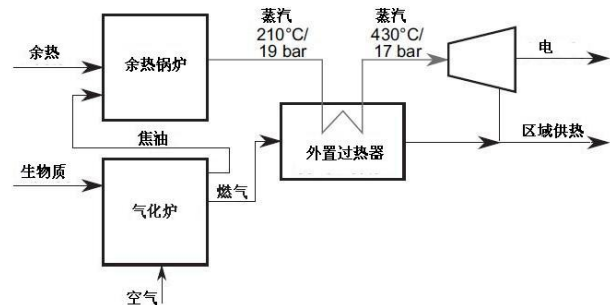


Figure 3. Integrate application of of biomass and waste heat
图 3 生物质和余热为热源的联产系统

4 结语

区域供热在近年来的蓬勃发展, 进入了崭新的时代。今后区域供热不仅在规模上会继续扩大, 而且伴随技术进步和行业竞争, 人们对供热质量也会提出新的要求。供热系统的节能要从提高热源效率着手, 努力探索梯级用能, 余热回收和低火用供热技术, 降低热源侧的能源品位, 节约高品位能源。同时应发挥多种能源的优势互补作用, 发展多热源联合供热技术。合理配置热源装机容量, 有效地匹配城市区域供热基本热源与调峰热源、延长设备的满负荷运行时间。总之, 区域供热热源具有较大的节能潜力, 还需要进一步研究新的设计方法和节能措施, 以提高能源利用效率, 减少环境污染。

致谢

感谢国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAJ01A00)专项基金的资助。

References (参考文献)

- [1] Dietrich Schmidt, low exergy systems for high-performance buildings and communities. *Energy and Buildings* 2009; 41: 331-336.
- [2] Heping Chen. Policy and status review on CHP in China. *Thermal Power Generation* 2001; 2: 2-4.
- [3] Zhang Qi, Zhao Baoan. Sustainable development of heat and power cogeneration. *Gas and Heat* 2007; 27(8): 76-79.
- [4] David Knutsson, Sven Werner, Erik O. Ahlgren. Combined heat and power in the Swedish district heating sector—impact of green certificates and CO₂ trading on new investments. *Energy Policy* 2006; 34: 3942-3952.

- [5] Aiying Rong, Henri Hakonen, Risto Lahdelma. An efficient linear model and optimisation algorithm for multi-site combined heat and power production. *European Journal of Operational Research* 2006; 168: 612–632.
- [6] European Communities. Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy-market. COM(2002)415 final 2002/0185(COD) 2002.
- [7] Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending directive 92/42/EEC.
- [8] Aiying Rong, Risto Lahdelma. An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration. *Applied Energy* 2005; 82: 40–63.
- [9] Zhang yan, Liu Yongfeng, Zhang Rong. Networking operation technology of heat-supply system with multiple heat sources. *Gas and Heat* 2009; 29(8): 9-10.
- [10] Li Angui, He Sifeng, Zhang Xinji et al. Dispatching management of interconnected multi-heat-source heating systems: a regulation analysis for central heating system in Baoji. *Heating Ventilating & Air Conditioning* 2008; 38(2): 129-133.
- [11] Ben Hua. Development trend of China's CHP in low carbon era. *Journal of Shenyang Institute of engineering(Natural Science)* 2010; 6(2): 97-101.
- [12] <http://www.lowex.net/guidebook/index.htm>.
- [13] H. Torío, D. Schmidt. Development of system concepts for improving the performance of a waste heat district heating network with exergy analysis. *Energy Buildings* (2010), doi:10.1016/j.enbuild.2010.04.002.
- [14] Fu Lin, Jiang Yi, Zhang Shigang. District heating system based on Co-ah cycles in combined heating and power systems. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)* 2008; 48(9): 1377-1380.
- [15] A.N. Ajah, A. Mesbah, J.Grievink. On the robustness, effectiveness and reliability of chemical and mechanical heat pumps for low-temperature heat source district heating: A comparative simulation-based analysis and evaluation. *Energy* 2008; 33: 908–929.
- [16] Dries Haeseldonckx, Leen Peeters, Lieve Helsen, et. al. The impact of thermal storage on the operational behaviour of residential CHP facilities and the overall CO₂ emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007; 11: 1227–1243.
- [17] Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell et al.. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14: 31–55.
- [18] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13: 318–345.
- [19] Tor-Martin Tveit, Tuula Savola, Alemayehu Gebremedhin. Multi-period MINLP model for optimising operation and structural changes to CHP plants in district heating networks with long-term thermal storage. *Energy Conversion and Management* 2009; 50: 639–647.
- [20] Xianglin Zeng, Qisen Cai, Lusheng Xie et al. Development of district heating in Europe. *District Heating* 2002; 1: 1–8.
- [21] Jingcheng Liu, Liqun Ding, Hua Zhao. Economic analysis on combined heating of coal and gas for peak load regulating. Biennial meeting of China's HVAC & R 2008.
- [22] Haichao Wang, Wenling Jiao, Pinghua Zou. Atmospheric environmental impact simulation of gas fired boilers as peak load heat-sources. *Journal of Civil Architecture & Environmental Engineering* 2009; 31 (2): 131–137.
- [23] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 2009.
- [24] Leyla Ozgener, Arif Hepbasli, Ibrahim Dincer. A key review on performance improvement aspects of geothermal district heating systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007; 11: 1675–1697.
- [25] Reinhard Madlener, Martin Koller. Economic and CO₂ mitigation impacts of promoting biomass heating systems: An input–output study for Vorarlberg, Austria. *Energy Policy* 2007; 35: 6021–6035.
- [26] Martin Börjesson, Erik O.Ahlgren. Biomass gasification in cost-optimized district heating systems—A regional modelling analysis. *Energy Policy* 2010; 38: 168–180.
- [27] Jiang Jian-chun. Conversion Technology and Utilization of Biomass Energy (I). *Biomass Chemical Engineering* 2007; 41(3): 59-65.
- [28] Åsa Marbe, Simon Harvey. Opportunities for integration of biofuel gasifiers in natural-gas combined heat-and-power plants in district-heating systems. *Applied Energy* 2006; 83: 723–748.
- [29] Harvey S, Marbe Å, Berntsson T. Biofuel gasification combined heat and power – new implementation opportunities resulting from combined supply of process steam and district heating. *Energy* 2004;29(8):1117–37.
- [30] Kristina Difs, Elisabeth Wetterlund, Louise Trygg et al.. Biomass gasification opportunities in a district heating system. *Biomass and Bioenergy* 2010; 34: 637–651.