

天窗昼光照明能耗特性的研究^{*}

重庆大学 郑洁[☆]

陕西省建筑设计研究院有限责任公司 彭鹏

重庆大学 周玉礼

摘要 以能耗模拟软件 eQUEST 为工具,分析了采用天窗昼光照明对夏季峰值供冷负荷的影响,以及不同天窗开口面积下照明能耗、供冷能耗、供热能耗及建筑总能耗减少量的变化规律,探讨了天窗遮阳系数对能耗的影响,针对不同气候条件下的典型城市分析了天窗昼光照明的气候差异性。

关键词 天窗 昼光照明 能耗 SFR 遮阳系数 气候

Energy consumption characteristics of day lighted buildings with skylight

By Zheng Jie[★], Peng Peng and Zhou Yuli

Abstract With an energy simulation software—eQUEST, analyses the influence of skylight day lighting on peak cooling load in summer, and the variation of reduction quantity of lighting energy consumption, cooling energy consumption, heating energy consumption and total building energy consumption with the open area of the skylight. Discusses the impact of skylight shading coefficient on energy consumption. For the typical cities in different climate conditions, analyses the energy consumption difference of skylight day lighting.

Keywords skylight, day lighting, energy consumption, skylight to floor ratio, shading coefficient, climate

[★] Chongqing University, Chongqing, China

^①

0 引言

随着经济的发展,建筑能耗在国家的能源消耗中所占的比例越来越大。在保证良好的室内环境的同时,降低建筑能耗,促进城市的可持续发展已成为一个重要的课题。据调查,目前公共建筑能耗中,供暖空调和照明能耗所占比例很大,以北京市某大型商场为例,其用电量中,空调系统所占比例最大,达 50%,其次为照明用电,达 40%,其余 10%为电梯用电^[1]。而在美国商业建筑中,照明用电所占比例为 39%^[2];在荷兰这一比例高达 55%^[3];在巴西,照明用电在有空调的商业建筑中所占比例为 24%,而在无空调的商业建筑中所占比例更是高达 70%^[4]。可见,照明用电有着巨大

的节能潜力。

在绿色照明工程中,需要特别重视的是昼光照明(day lighting)。利用昼光进行室内采光照明显是对自然资源的有效利用,不仅有益于环境,而且有利于身心健康,提高视觉功效。然而,目前国内有关昼光照明对建筑能耗影响方面的定量研究还很欠缺。鉴于此,本文在定性分析昼光照明对建筑能耗影响的基础上,利用基于 DOE-2.2 的 eQUEST 能耗模拟软件分析了天窗的昼光照明对供冷、供热

^{①☆} 郑洁,女,1960 年 5 月生,大学,副教授
400045 重庆大学城市建设与环境工程学院
(023) 65126270
E-mail: jiezheng999@yahoo.com.cn

收稿日期:2006-04-05

一次修回:2007-03-08

二次修回:2007-05-17

^{*} 重庆市建委科技计划项目(编号:城科学 2006-37)

及照明能耗的影响,探求最佳的天窗开口面积;并分析了不同城市采用天窗昼光照明的差异性。

1 定性分析

通过调查发现,在办公楼、厂房等建筑中,白天开灯的情形十分常见,存在着巨大的能源浪费,在这类建筑的能耗中照明电耗占有相当大的比例,且其用电时段大部分是在白天,因此,如果在白天充分利用自然光来进行照明,则可减少大量的人工照明电耗,对我国实施建筑节能目标有着重要的意义。

本文提到的昼光照明是指天然采光与合理控制的人工照明系统的结合。当室内光线的照度达到或超过工作面的照度设定值时,调暗或关掉人工照明,这样可以最大限度地利用自然光,从而达到节能的目的。单纯的天然采光如果不采用照明控制的话,除了建筑美学上的意义外,根本不能降低照明能耗,从而也达不到有效节能的目的。

天然采光根据窗户的位置和朝向可分为侧窗采光、顶侧窗采光和天窗采光^[5]。天窗采光的优点是可提供均匀和照度级较高的光线,但也存在不足的地方,如只能适用于单层建筑或建筑的顶层等,因此对于多层建筑来说,其应用非常有限。尽管如此,仍有相当数量的厂房、学校、超市等建筑可以应用天窗来进行采光照明。

天窗的昼光照明主要影响建筑的照明能耗、供冷能耗和供热能耗,三者之间的交互作用决定着采用昼光照明对整幢建筑的能耗影响情况。一方面,当室内照度水平达到或超过设计标准值时,通过调暗或关掉照明灯具,利用自然光照明,从而降低了照明能耗;另一方面,在调暗或关掉照明灯具的同时,减少了照明散热量,在夏季会降低空调冷负荷,而在冬季又会增加供暖热负荷。与此同时,通过天窗的导热和太阳辐射得热对供暖和空调能耗都有着重要的影响。天窗的昼光照明对建筑能耗各因素的影响可用图 1 表示。

2 计算原理

eQUEST 的计算内核是基于 DOE-2 的高级版本——DOE-2.2,其中采光计算部分用于分析昼光照明对整幢建筑能耗、峰值负荷等的影响。

采光的模拟计算是在 DOE-2 的 LOADS 模块下进行的,通过计算逐时日照特性、太阳辐射得热、眩光以及各种不同的照明控制策略来分析天然

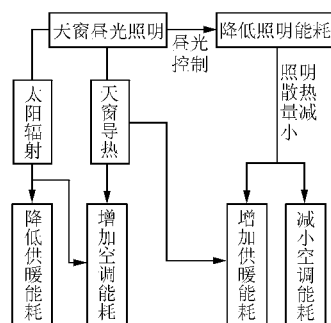


图 1 天窗昼光照明对建筑能耗各因素的影响

采光的能耗^[6]。计算过程主要有以下三个步骤:1) 采光系数的计算——结合每个窗户(或天窗)的面积,计算标准晴天空和全云天空条件下 20 种不同太阳方位的室内照度,计算的照度来源包括来自太阳光及天空光的各种直射及反射光线的照度,如图 2 所示。照度的计算还考虑到了天空亮度分布,日光控制方法如遮阳、屋檐及外遮挡等。2) 逐时昼光照度及眩光计算——通过添加预先计算好的由当前逐时太阳位置与云量计算得到的采光系数获取进入各个窗户的逐时照度及眩光。3) 逐时照明控制的计算——计算各种照明控制方式下的照明电耗,然后将照明所需的能耗信息传送到负荷计算模块,来计算整幢建筑的能耗^[7]。

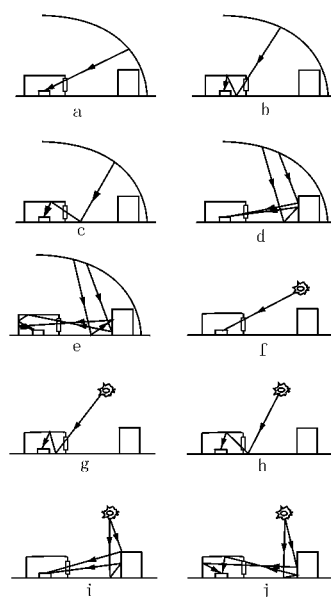


图 2 程序计算中考虑的照度来源

3 模型的建立

根据重庆市典型年逐时气象数据,利用

eQUEST 能耗模拟软件,建立了一办公楼仿真模型,建筑模型外观如图 3 所示。由于天窗采光只对顶层能耗产生影响,所以所建模型为一栋 $1\,384\text{ m}^2$ 的单层建筑。为了保证昼光照明计算的准确性,建模过程中充分考虑了顶棚高度对自然采光的影响,并尽可能使各种参数设置更为理想。计算的主要初始设置参数见表 1。

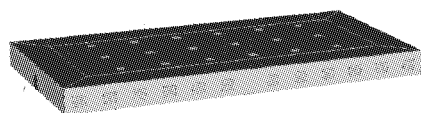
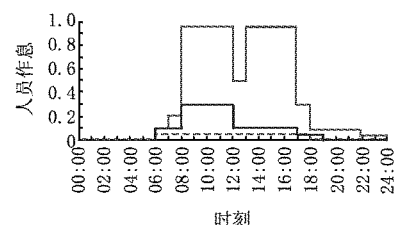


图 3 建筑模型外观

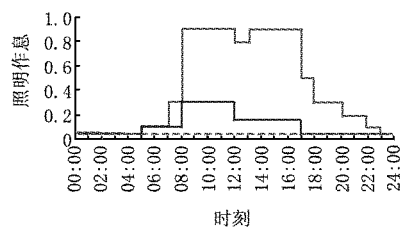
表 1 主要初始设置参数

建筑外形	单层矩形结构,面积 $52.8\text{ m} \times 26.4\text{ m} = 1\,384\text{ m}^2$
天窗	弧形天窗,传热系数 $K=5.2\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,透光率 $VT=0.495$,遮阳系数 $S_c=0.54$,天窗井深度为 0.15 m ,内反射系数为 70%
人员密度	$0.06\text{ 人}/\text{m}^2$
设备负荷	$10\text{ W}/\text{m}^2$
照明负荷	$13\text{ W}/\text{m}^2$
照度	300 lx
控制方式	10%型连续调光控制
HVAC	采用风机盘管空调系统,利用集中供应的冷、热水供暖、空调

室内热扰作息模式如图 4 所示^[8]。作息的设计参数主要包括:



a 人员作息模式



b 照明作息模式

——工作日 ——周六 ---周日及节假日

图 4 室内热扰作息模式

1) 人员作息——某时刻的人员密度和设定最大人员密度的比值;

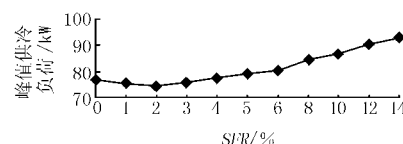
2) 照明作息——某时刻的灯光功率和设定最大灯光功率的比值。

4 昼光照明能耗特性解析

为了表示方便,笔者定义天窗总面积与屋顶总面积之比为天窗的开口率 SFR (skylight to floor ratio)。 SFR 对建筑能耗有着重要的影响。 SFR 越大,室内获得的自然光越多,昼光照明作用越好;但 SFR 过大又会导致过多的太阳辐射热进入室内,从而增加夏季的空调能耗,同时, SFR 过大,还会增加冬季通过天窗导热而造成的热损失,增加供暖能耗;另一方面, SFR 过小又会使进入室内的自然光不足,达不到理想的节能效果。因此,合理的 SFR 对照明和太阳得热负荷之间的平衡就显得格外重要。

4.1 SFR 对峰值供冷负荷的影响

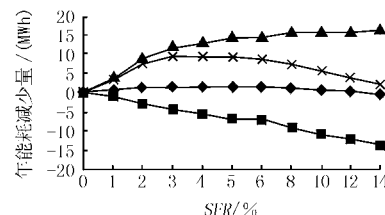
图 5 给出了无天窗($SFR=0$)及采用昼光照明后 $SFR=1\% \sim 14\%$ 时建筑夏季峰值供冷负荷的变化趋势。

图 5 峰值供冷负荷随 SFR 的变化

从图 5 可以看出,采用天窗的昼光照明后,峰值供冷负荷随着 SFR 的增大开始时有减小,当 SFR 为 2% 时,达到最小值,而后又随着 SFR 的增大而增大。这是由于采用天窗的昼光照明后,虽然开天窗增加了太阳辐射和导热冷负荷,但与此同时,照明灯具的散热量明显减少,从而导致其供冷负荷在较小的天窗开口面积时比未开窗时更小。同时还可以看出,当 SFR 超过 3% 时,峰值供冷负荷即超过了未采用天窗时的峰值负荷。

4.2 SFR 对建筑各用能项的影响

图 6 显示了采用天窗昼光照明后照明能耗、供冷能耗、供热能耗及建筑总能耗减少量在不同 SFR 下的变化趋势。

图 6 能耗减少量随 SFR 的变化

从图 6 可以看出,采用天窗昼光照明后照明能耗的减少是影响建筑能耗的主要因素。随着 SFR 的增大,照明能耗减少量刚开始时迅速地增加,后来逐渐平缓;供冷能耗减少量刚开始时有较小的增加,当 SFR 达到 4% 后开始随着 SFR 的增大而减少,这是由于采用昼光照明后,照明的散热量显著减小,但空调冷负荷增大而造成的;供热能耗减少量始终为负值,而且随着 SFR 的增大而增大。综合照明、供冷、供热能耗的影响,建筑总能耗的减少量则开始时随 SFR 的增大而增大,当 SFR 为 4% 左右时达到最大值,而后随着 SFR 的继续增大而逐渐减小。 SFR 为 4% 时,照明能耗减少量为 13 250 kWh/a,占照明总耗电量的 24.6%;供冷能耗减少量为 1 630 kWh/a,占供冷总能耗的 7.3%;建筑总能耗减少量为 9 570 kWh/a,节能率为 7.7%。从图 5 可看出,尽管此时峰值供冷负荷比未采用天窗昼光照明时稍大,但其年供冷能耗仍是减少的。

4.3 遮阳系数对能耗的影响

遮阳系数仅对供冷能耗、供热能耗及建筑总能耗产生影响,而对照明能耗无任何影响。图 7 显示了 $VT=0.52$,遮阳系数 S_c 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 时该建筑模型供冷能耗、供热能耗及总能耗随 SFR 的变化曲线。

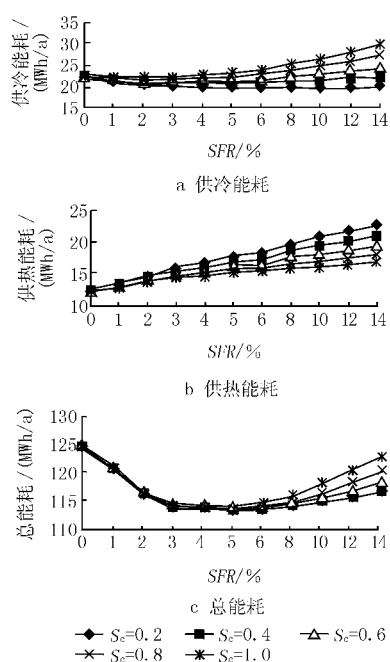


图 7 供冷能耗、供热能耗及总能耗随 S_c 和 SFR 的变化

从图 7a, 7b 可以看出,遮阳系数对供冷和供热能耗有一定的影响,而且随着天窗开口率的增大,其影响程度增大。然而从图 7c 可以看出,当 SFR 不是很大时 ($SFR \leq 5\%$),遮阳系数对建筑总能耗的影响并不大。例如在 $SFR=4\%$ 的情况下,当 S_c 从 1.0 变为 0.2 时,其供冷能耗减少量为 2 630 kWh/a,节能率为 11.6%;而供热能耗则增加 1 880 kWh/a,增加能耗占供热能耗的 12.6%;但总能耗的变化却不明显,总能耗减少量为 760 kWh/a,节能率仅为 0.7%。这是由于在既有夏季供冷又有冬季供暖的情况下,小的遮阳系数同时具有减少夏季供冷能耗和增加冬季供暖能耗的作用,两者综合的结果是在 SFR 较小时,全年总能耗变化并不显著。从图 7 还可以看出,当天窗开口率继续增大时,不同遮阳系数对总能耗的影响逐渐增大,且遮阳系数越小总能耗越小。因此,在同时有夏季供冷和冬季供暖的情况下,要综合考虑遮阳系数对供冷和供暖能耗的影响,选择合适的玻璃类型,平衡考虑经济性和节能效果之间的关系。

4.4 昼光照明的气候差异性

建筑节能的一个重要原则是气候适应性原则,即建筑节能的相关技术都有其形成的特定气候和背景。

为了研究不同气候地区天窗的自然采光对建筑能耗的影响,针对同一建筑模型分别在严寒地区的哈尔滨、长春,寒冷地区的北京、郑州,夏热冬冷地区的上海、武汉、重庆以及夏热冬暖地区的广州、福州等城市进行了模拟研究。图 8 显示了各城市总能耗减少率随 SFR 的变化。

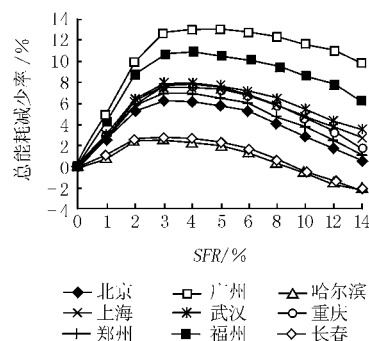


图 8 各城市总能耗减少率随 SFR 变化的比较

从图 8 可以看出,严寒地区的哈尔滨、长春与其他城市的总能耗减少率有着显著的差异。哈尔滨、长春的总能耗减少率非常接近,且均当 SFR 为

3%时有最大总能耗减少率,分别仅为 2.6% 和 2.8%;广州的总能耗减少率最大,且当 SFR 为 5%时,总能耗减少率达到最大值,为 13%;其次为福州,最大总能耗减少率为 11%;其他几个城市最大总能耗减少率由小到大依次为北京(6.3%)、郑州(7.1%)、重庆(7.7%)、上海(7.7%)和武汉(8%)。从图 8 可以看出,当采用相同热物性的天窗进行采光照明时,夏热冬暖地区的广州、福州的总能耗减少率要远大于严寒地区的哈尔滨、长春。另外,夏热冬暖地区的广州较严寒地区的哈尔滨、寒冷地区的北京在其他设定条件相同时,有更大的最佳天窗开口率,其中,广州的最佳天窗开口率为 5%,年能耗减少量达 16 770 kWh/a,而哈尔滨和北京的最佳天窗开口率为 3%,年能耗减少量分别为 5 390 kWh/a 和 9 440 kWh/a。

以上是不同气候地区的城市采用相同热物性的天窗进行昼光照明时的计算结果。然而在实际设计中,建筑师会根据各地区的气候特点设置不同隔热性能的天窗,例如在严寒地区的哈尔滨,会使用隔热性能好的天窗,以降低传热损失,而在夏热冬暖地区对天窗传热系数的限制则没有严寒地区严格,这一点从《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005)对不同地区的围护结构限定值可以看出^[9]。

为此,笔者提高了严寒地区哈尔滨和寒冷地区北京的天窗隔热性能后分别计算各 SFR 下的能耗。具体设置情况如下:哈尔滨 $K=3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,北京 $K=3.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,广州 $K=6.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。各城市天窗的遮阳系数和透光率均相同,分别为 0.54 和 0.5。计算结果见图 9。

从图 9 可以看出,哈尔滨采用隔热性能好的天窗后,最佳 SFR 增大为 5%,且计算可知其最大总能耗减少率也有所增大,为 4.0%;北京和广州的最佳 SFR 均为 5%,北京最大总能耗减少率为 7.2%,而广州尽管此时天窗的传热系数 $K=6.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,其总能耗减少率也相当可观,为 12.1%。另外,值得注意的是,此时哈尔滨的 SFR 从 0 变为 2%时,供热能耗增加,但 SFR 从 2%变为 3%时,供热能耗却有一定程度的减小,这与其他城市供热能耗随 SFR 的增大而增大有所不同。

从上面的计算分析可以看出,严寒地区的哈尔滨尽管提高了天窗的隔热性能,但其节能率较夏热

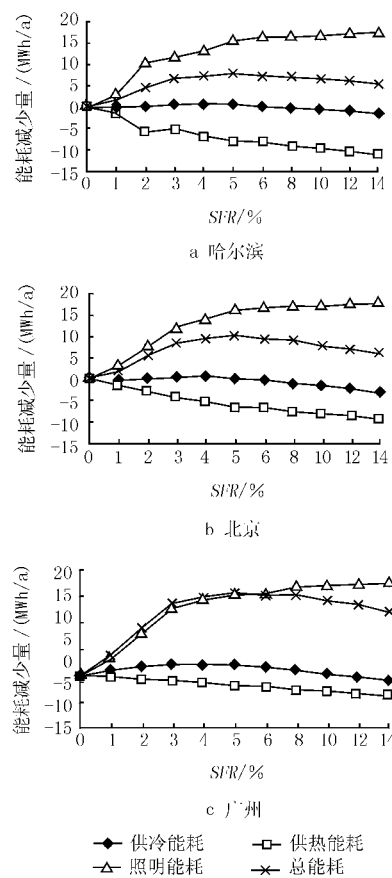


图 9 采用不同天窗传热系数时各城市的能耗减少量

冬暖地区的广州仍要小很多。这主要是由于两个地区的建筑能耗构成不同造成的,在严寒地区主要是供热能耗和照明能耗,而在夏热冬暖地区供冷能耗和照明能耗则起主导作用(由于昼光照明对设备能耗无影响,所以无需考虑)。采用天窗昼光照明后,一方面可以很大程度上减小照明能耗,另一方面又减小了照明散热量,而照明散热量的减小会增大供热能耗,减小供冷能耗,这是造成两个地区节能效果差异大的重要原因。从另一方面讲,同一建筑在严寒地区的能耗基数相对较大也是造成其节能率偏小的一个原因,但即使从计算所得的节能量来看,夏热冬暖地区的广州的节能量也比哈尔滨要大,约为哈尔滨的 2 倍。因此,在本研究模型条件下,夏热冬暖地区的广州采用昼光照明的节能潜力比严寒地区的哈尔滨等城市相对要大。

5 结论

5.1 模型建筑采用天窗昼光照明后,夏季峰值冷负荷在天窗开口率 SFR 为 2%时达最小值,但当 SFR 超过 3%时,峰值冷负荷即超过了无天窗时的

峰值负荷。另外,照明能耗减少量随着 SFR 的增大而增大,且照明能耗的减少是建筑能耗减少的主要因素;而供冷能耗减少量刚开始时有小幅度的增加,后来随着 SFR 的增大而减小;供热能耗减少量则始终为负值。

5.2 昼光照明时,存在一最佳 SFR,此时供冷能耗、供热能耗、照明能耗达到最佳平衡点,使得建筑总能耗减少量达最大值。

5.3 昼光照明在不同气候地区的节能效果有所差异。在本研究模型中,在以供冷为主导的地区如广州等城市采用昼光照明有着更大的节能潜力,而在以供暖为主导的地区如哈尔滨等地区,其节能潜力则相对要小些。

5.4 在同时有夏季供冷和冬季供暖的情况下,要综合考虑遮阳系数对供冷和供暖能耗的影响,选择合适的玻璃类型,综合考虑经济性和节能效果之间的关系。

5.5 天窗昼光照明涉及的建筑能耗因素较多,各因素之间的交互作用也很复杂。因此,有必要着重针对不同的气候地区进行深入的探讨,研究适合不同地区的最佳昼光照明形式,如照明控制方式、天窗热物性的选择等都是有待进一步深入探讨的课题。

参考文献:

[1] 薛志峰,江亿.北京市大型公共建筑用能现状与节能

潜力分析[J].暖通空调,2004,34(9):8-10

[2] EIA. Energy end-use intensities in commercial buildings [R]. US Department of Energy, Washington, 1994

[3] Sliepenbeek W, Van Broekhoven L. Evaluation of stimev, the all-Dutch utility-sponsored lighting rebate programs[C]// Right Light Three, Third European Conference on Energy-Efficient Lighting. England, 1995

[4] PROCEL. Handbook of energy savings in public and commercial buildings[M], 1993

[5] (日)照明协会.照明手册[M].李农,杨燕,译.北京:科学出版社,2005

[6] Frederick Winkelmann, Stephen Selkowitz. Daylighting simulation in DOE-2: theory, validation and applications [R]. Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California Berkeley, California, 1984:326-336

[7] James J H. DOE-2. 2 building energy use and cost analysis program volume 3: topics [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004:166-179

[8] James J H. eQUEST energy simulation training for design and construction professionals[M], 2004

[9] 中国建筑科学研究院,中国建筑业协会建筑节能专业委员会. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005

(上接第 30 页)

of Micro-organisms to Surface. New York: Wiley-Interscience Publishers, 1980:59-104

[20] Kjaer E B. Bioactive materials for antifouling coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 1992, 20(9): 339-352

[21] Müller-Steinhagen H, Zhao Q. Investigation of low fouling surface alloys made by ion implantation technology[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52: 3321-3332

[22] 司秀华. 改性表面及磁化水防垢的研究[D]. 大连:大连理工大学,1999

[23] 刘天庆,李香琴,于瑞红,等. 表面材料性质对生物垢形成过程的影响[J]. 大连理工大学学报,2002,42(2)

[24] Forster M, Augustin W, Bohnet M. Influence of the adhesion force crystal heat exchanger surface on fouling mitigation [J]. Chemical Engineering and

Processing, 1999, 38(4): 449-461

[25] Suwon Lee, Hyunuk Lee, Samchul Ha. Plasma hydrophilic surface treatment for dehumidifying heat exchangers[C]// The 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2003

[26] 俞秀民,吴金香,俞天兰. 流振旋转螺旋自动除垢防垢技术研究[J]. 化学清洗,1996,12(3)

[27] 贺运初,彭德其,俞秀民,等. 套管式换热器管间污垢循环流态化在线清洗技术[J]. 化工装备技术,1999, 20(5):24-26

[28] Yoshii T. Technology for utilizing unused low temperature difference energy [J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2001, 80(8):696-706

[29] 吴荣华,孙德兴,马广兴. 城市原生污水冷热源水参数特性与应用方法评价[J]. 可再生能源,2005,123(5)

[30] 吴荣华,张承虎,孙德兴. 城市污水类非牛顿幂律湍流流动特性研究[J]. 水动力学研究与进展,2005,20(6)