

湿热气候区建筑防热研究进展

刘加平, 罗戴维, 刘大龙

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 湿热气候区高温高湿, 太阳辐射强烈, 夏季漫长。自然通风工况下建筑的室内热环境指标远离人体热舒适区。建筑防热措施与技术是湿热气候区改善热舒适性与建筑节能的重要途径。针对建筑遮阳、自然通风、蒸发冷却和围护结构隔热四种常用防热措施, 深入开展了文献研究, 详细分析了这四种防热方式在湿热气候区的应用效果和存在问题, 探索了湿热气候区建筑防热技术的发展方向。

关键词: 建筑防热; 建筑遮阳; 自然通风; 被动蒸发冷却; 围护结构隔热

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0001-09

Review of building thermal protection in the hot and humid climate

LIU Jiaping, LUO Daiwei, LIU Dalong

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In the hot and humid region, the solar radiation is intense during the long summer. So the building indoor environment is far away from human thermal comfort zone under natural ventilation condition. Building thermal protection measures and techniques are an important way of building energy-saving in hot and humid region. In this paper, it has conducted the literature research of thermal protection measures in the hot and humid climate, which include envelop enclosure heat insulation, building shading, natural ventilation, and passive evaporation cooling. Based on this study, summarizes the effect of application and existing problems of the above four methods. The development direction of building thermal protection in hot and humid region was explored.

Key words: building thermal protection; building shading; natural ventilation; passive evaporation cooling; envelope insulation

我国湿热气候区包括广东、广西、海南、香港、澳门、台湾、福建南部和云南小部, 范围广阔, 但在室内热环境营造上却是最难以应付的气候, 其特点为典型的亚热带季风气候, 夏热冬暖, 湿度大, 气温年较差和日较差均小, 降雨量大, 太阳辐射强, 日照丰富^[1]。我国湿热气候区既有建筑大多隔热性能较差, 建筑能耗高, 室内热环境质量差, 城市能源形势紧张, 导致该地区空调能耗居高不下。文献[2]对广州 15 栋不同功能的公共建筑能耗调查中发现, 空调系统的能耗占建筑总能耗 25.55%~65.04%, 平均高达 43.67%。因此湿热气候区建筑防热研究成为建筑节能的研究重点。常见的防热设计策略有: 建筑遮阳、自然通风、被动蒸发冷却和围护结构隔热^[3-5]。因此本文针对湿热气候区的气候特征, 通过文献分析研究上述防热措施在湿热气候区应用的优缺点及气候适应性, 总结我国湿热地区建筑防热经验, 为优化并提高建筑防热性能奠定基础, 实现节能及提高环境质量的研究目的。

1 建筑遮阳

太阳辐射是建筑的主要热源, 特别是在夏

季。太阳辐射可以通过透明围护结构使室内直接得热, 还可以通过非透明围护结构向室内传热。因此在湿热地区遮阳防热这一措施被普遍采用, 它不仅是一项重要的建筑防热技术, 还是丰富建筑物的立面艺术效果的重要途径。

1.1 传统的遮阳措施

Mandalaki 等^[6]模拟分析了雅典和哈尼亚的两个地方办公建筑所需的制冷能耗, 结果表明了遮阳设施会大大降低建筑能耗。Nikoofard^[7]在加拿大通过模拟研究住宅周边的建筑和植物对家庭能耗的影响, 结果发现空调和采暖能耗被影响的程度分别为 90%和 10%。Chan^[8]在香港通过实验研究了建筑互遮阳对建筑能耗的影响, 结果发现有遮挡的建筑比没有任何遮阳措施的建筑每年节约制冷能耗高达 18.3%。Ouedraog 等^[9]对非洲的公共建筑能耗进行了研究, 结果表明在该地区进行遮阳措施可降低制冷能耗 40%。Elvis Wati 等^[10]通过模拟计算研究遮阳面积对围护结构最佳保温层厚度和节能效果的影响, 结果发现随着外遮阳水平的提高, 最佳保温层厚度和制冷能耗显著下降, 而投资回收期显著增加。

国内学者寇扬^[11]将多种多样的传统遮阳措施进行有规律的划分,总结出长江中下游地区建筑遮阳设施的设计原则。冯林东^[12]以广东地区传统的民居建筑 and 现代建筑为对象,分析其防太阳辐射的做法、遮阳方式、构造做法等;并以典型的建筑遮阳为例利用阴影法、透光系数等来分析其遮阳的效果,总结出适宜该地区的建筑遮阳方法。陈勇明^[13]针对建筑外遮阳与建筑一体化设计进行研究,总结出建筑外遮阳应该遵循“并行设计”、“协同设计”和“多学科优化设计”。

1.2 太阳辐射热反射涂层

太阳的辐射能主要集中在可见光和红外光区,因此科学家研发了一种对可见光和红外光波段具有高反射率的涂料。由于大气对红外辐射在 2.5~5 μm 和 8~13.5 μm 有两个窗口,即大气对这两个区域的红外辐射吸收能力较弱,透过率一般在 80%以上。因此,要实现物体的持续降温,就要把吸收的热量尽可能通过这两个窗口辐射到外层空间去。因此太阳能反射涂料能够将所吸收的辐射能全部转化为 2.5~5 μm 和 8~13.5 μm 波长范围内的红外光辐射到外层空间去,具有良好的降温效果。

Haberl 和 Cho^[14]研究热反射屋顶发现,热反射材料在居住和商业建筑上的应用带来的节能率为 2%~44%,平均为 20%,制冷能耗峰值减少为 3%~35%(根据屋顶的保温级别、风道的放置方式和顶楼配置的不同而不同)。Levinson 等^[15]对温暖气候下热反射材料在非居住建筑应用效果方面进行了研究,结果表明在夏季建筑整体空调能耗降低了 10%~30%。Akabari 等^[16]对比了反射率为 0.1 的传统屋顶和反射率为 0.4 热反射屋顶在不同温度下的节能效率,表明在温和气候下热反射涂层每年可节能 250 kWh,炎热气候下每年可节能 1 000 kWh。

在我国,郭晓娟^[17]研究发现热反射涂层在杭州可有效地减少外壁的表面温度,最大温度变化约为 8~10 $^{\circ}\text{C}$,节约空调用电约 5.8 kWh/($\text{m}^2\cdot\text{mon}$)。沈辉等^[18]通过实测分析了上海地区采用热反射涂料对室内环境和建筑能耗的影响,结果显示,墙体外表面和内表面温度降低幅度分别可达到 20 $^{\circ}\text{C}$ 、4.7 $^{\circ}\text{C}$ 。在空调工况下,热反射涂料可使建筑全年空调能耗降低 116 kWh。李宁^[19]研究了建筑玻璃的热反射涂料,通过实验表明涂膜玻璃与未涂膜玻璃相比能够阻隔大约 50%的太阳总辐射,全年冷负荷降低 6.3 kWh/ m^2 。孟庆林等^[20]提出了热反射涂料现场实测的方法,此方法可以对已施工完毕的建筑热

反射涂料进行反射率检测。

1.3 绿化遮阳

除了上述两种人工的遮阳措施,绿化也是一种大自然提供给人类的天然遮阳手段,绿化遮阳不同于人工遮阳之处在于对太阳辐射的处理。人工遮阳措施在吸收太阳能后,本身温度会显著升高或者将能量散发到周边环境,造成室外环境的过热,而绿化遮阳利用植物本身的光合效应以及蒸腾作用,切断了太阳能的二次传播。

Sternberg^[21]通过实验收集记录了 5 种不同的常青藤绿色外墙在一年时间内的温度变化,发现绿化外墙表面平均每日最高温度降低 36%,范围从 1.7 $^{\circ}\text{C}$ (常青藤厚度<10 cm),到 9.5 $^{\circ}\text{C}$ (常青藤厚度 45 cm)。Wong^[22]通过模拟分析了垂直绿化对建筑能耗的影响,结果发现叶面积指数与遮阳系数线性相关,遮阳效果取决于绿化的厚度,根据厚度的不同,空调能耗将减少 10%~31%。

Jaffal 等^[23]考虑了 4 种不同的叶面积指数(0.5、2、3.5 和 5)模型来研究屋顶绿化的热性能,结果表明随着 LAI 值的增大,夏季室内气温将最多减少 2 $^{\circ}\text{C}$,空调能耗的需求降低 6%。Feng^[24]通过实验研究了影响屋顶绿化效果的因素,他发现 58.4%的热量是通过植物和土壤的蒸腾作用散发出去的,9.5%的能量用于光合作用,剩余部分以长波辐射的形式和周围环境进行热交换,仅 1.2%的能量存储下来向室内传递。Jong-Jin Baik 等^[25]利用模拟软件模拟了屋顶绿化对城市街道的影响,模拟结果表明屋顶绿化可以改善道路附近的空气质量,改善的程度取决于环境风向。

Edward Ng^[26]在香港的一个高度密集的区域进行了研究。这项研究是基于 ENVI-met 的建模和集合不同的绿化因子组合。结果表明如果想降低某个地区行人高度处气温 1 $^{\circ}\text{C}$,需要植树的区域应达到 33%。Srivani^[27]在日本佐贺大学对绿化的降温效果进行了评估,通过模拟研究发现提高目前的树木数量 20%,可以降低平均气温 2.27 $^{\circ}\text{C}$,结合绿化屋顶可以降低室外气温最多 2.29 $^{\circ}\text{C}$ 。

绿化遮阳虽然有相当大的降温效果,但是树木阻碍了空气流通,再加上植物的蒸发作用增加了空气湿度,这些无疑更加重了原先的不适感,尤其是在市区通风能力本来就较弱的时候。因此在运用绿化遮阳时必须注意与整体环境集合考虑,当通风与遮荫起冲突时,通风更为重要,这时就要避免树木对风的阻碍作用。根据资料[28]显示,湿热气候区

市区较为理想的植被类型是草坪、花圃和高大树木的结合,避免种植高耸的灌木丛。

1.4 建筑遮阳的发展

通过上述研究发现,遮阳措施无论是传统的利用设施遮挡阳光,还是新型的利用热反射涂层反射太阳辐射,以及利用不同的绿化手段遮阳,都可以降低 20%~45%左右的空调能耗,起到显著节能效果。国外在热反射涂料性能及应用研究起步较早,特别是屋顶反射技术发展成熟,值得我们借鉴。而在国内热反射涂料全年实测研究较少,缺乏湿热气候区应用的相关资料,亟需开展在湿热气候区的热反射实测研究,确定其全年节能效果及在高湿条件下的物性参数。

2 自然通风

自然通风属于常见建筑的被动式降温设计措施,自然通风可以在不消耗能源的情况下降低室内温度,带走潮湿气体,降低空调能耗,同时更大限度地为人们提供健康舒适的室内环境,但自然通风降温效果受气候、地形、建筑布局等影响因素较多。

2.1 自然通风影响因素分析

Geros 等^[29]综合运用实验和理论推导的手段认为自然通风效果与以下三个参数关系最为密切:室内外温差、有效气流速度和建筑的热容量。Shaviv 等^[30]利用 Energy 软件模拟了以色列 4 个湿热气候区的夏季自然通风情况,自然通风的效果与围护结构的蓄热、通风换气次数以及昼夜温差有很大的关系。D.Connolly^[31]在爱尔兰地中海气候区的一个图书馆进行实验测量,分析了此气候下,自然通风的降温效果的影响因子如蓄热体、建筑内散热、换气次数、通风时间段的作用。

Leila Moosavi^[32]对建筑物中庭的自然通风效果进行了研究,得出了在不同气候条件下建筑中庭自然通风保持高效的影响因素参数,这些参数包括各种中庭配置和组件,如中庭的几何形状,打开特征,屋顶特性,材料和开窗特性。

从上述的研究成果来看,自然通风的影响因素根据建筑类型和所处气候环境略有不同,但是大致可以降影响自然通风降温效果的因素归结为以下三类。(1) 外在因素:主要指当地的气候环境,包括太阳辐射、室外空气温湿度、室外风速和风向、其他建筑或植物对自然通风的干预等;(2) 内在因素:主要指建筑本身的特性,包括建筑形体特征、开口及建筑平面布局、围护结构的热工指标等;(3)

人为因素:主要指通风时间和自然通风的通风方式和控制方法等。

2.2 自然通风降温潜力

自然通风潜力(Natural Ventilation Potential, 简称 NVP),是指仅依靠自然通风就可确保有可接受的室内空气品质和室内热舒适性的潜力。自然通风潜力分析应综合考虑建筑所在地区的典型气象参数以及建筑自身与周边地貌特点等因素,同时结合自然通风原理来综合评估自然通风。

Givoni^[33]在围护结构为绝热条件下提出了根据室内蓄热量预测室内最大温度的公式,并定义了最小建筑蓄热量(热惯量最小值),认为蓄热能力越大,夜间通风效果越好。他还提出了 TDR(Temperature difference ratio)的概念,被后来的研究者作为一个比较夜间通风降温效果的指标。Artmann 等^[34]提出了一种新的预测方法,这种方法被称为 CCP(Climatic Cooling Potential)法。它是指在不考虑建筑参数的情况下预测某一特定气候条件下指定时间段的夜间通风潜力,即通过分析气象数据来评价建筑利用夜间通风可能达到的降温潜力。

国内学者张国强等^[35]提出了一种新的自然通风潜力评估体系框架,引入新的分析指标:自然通风风压差帕时数(Pressure Differences Pascal Hours, 简称 PDPH),建立了自然通风潜力评估模型。该模型简单实用,能够对不同气象参数地区的通风潜力进行评估,有助于选择适宜的建筑设计方案。亓晓琳等^[36]根据我国北方严寒和寒冷地区 167 个气象站典型气象年气象数据,定量分析夜间通风降温技术在我国北方严寒和寒冷地区的气候适宜性,以“CCP”作为指标量化分析夜间通风的适用性,得出各台站夜间通风气候降温潜力值,并结合地理信息系统(GIS)的分析软件给出夜间通风气候降温潜力分布图,将分析结果可视化。

2.3 自然通风效率

自然通风的效率与建筑物中的蓄热有密切的关系。不同级别的蓄热体对室温有显著的调节作用,对室内舒适度可起到很好的改善作用。Wang^[37]研究了新加坡公寓各种通风策略和自然通风下的室内热环境。指出隔热和蓄热差的建筑夜间通风和全天通风降温效果都比较差。李百战等^[38]将相变蓄热材料和夜间自然通风结合,通过实验研究发现,相变材料应用于轻质房间,能显著增强围护结构的热惰性,提高室内的热舒适性;采取夜间通风技术可以有效将日间蓄积的热量散至室外。陈士凌等^[39]

提出一种太阳能通风屋顶结合相变蓄热系统,能有效的强化建筑物夜间自然通风,改善建筑室内热环境,减少空调用能。

自然通风的控制方法对提高自然通风的效率也效果显著。Elmualim^[40]研究了自然通风和空调系统相结合的混合通风方式,基于室内空气质量(温度、湿度、CO₂含量等)的改善,结合夏、冬季等不同气候的自然通风特点,研究了混合通风策略下的系统控制模式。Aradag等^[41]针对土耳其若干城市的气候特点,对比分析了自然通风和风机相结合的混合通风系统与常规空调系统的能耗情况,与常规空调系统相比,混合通风系统可节约能耗25%~30%。Rongpeng Zhang^[42]提出了一种考虑室外气候条件的空调与自然通风的控制方法,结果表明新的优化控制方法比传统方法在不同的气候条件下节约能源23.19%~49.31%,比使用普通的自然通风方法节能14.97%~39.70%。

一些地区利用“烟囱效应”的竖向通风设计也值得我们借鉴,比如风塔、太阳能烟囱等技术。Dehghani-sani^[43]提出一种新的风塔来降低建筑的空调能耗,该风塔设计简单安装方便,可以通过旋转使得自身处于最大风速方向,有效提高通风效率。Dominic Connor^[44]将风塔加上了热回收系统,并对风塔进行了模拟分析,结果表明新式风塔的出口温度降低3℃,节能达20%。Rakesh Khanal^[45]通过模拟研究太阳能烟囱在一定范围内倾斜带来的自然通风的影响,给出了太阳能烟囱的最佳设计角度是4°。

2.4 自然通风的缺陷和发展前景

一些研究表明自然通风在湿热气候区应用会存在一些问题。Tetsu Kubota等^[46]针对马来西亚居民开窗和使用空调的行为模式进行了调查分析,总结出开启空调和开窗的时间,然后对不同通风方案下的室内热环境进行测试,结果指出夜间通风制冷效果好,但在湿热气候下自然通风会导致室内湿度过大。S.C. Chan^[47]在马来西亚一所学校进行了自然通风的满意度调查,结果发现在马来西亚这种极端湿热的气候条件下,采取被动式设计来提高建筑自然通风不能发挥很大的作用,因为空调系统会被更多地使用来消除室内和室外较大的热湿负荷。研究还进一步显示,受访者一致认为,被动式设计虽然对维持热舒适度起到一些作用,但是这种贡献的程度不显著。此外,受访者没有表现出对增加了被动式设计元素,进一步提升透气性能的兴趣。

从目前的研究来看,在过去的几十年间,关于自然通风及其相关领域的研究已经有了很大的进展。自然通风影响参数分析、自然通风气候潜力的确定以及自然通风效率提高方式都已经取得了显著的成果,这些成果为自然通风的设计使用提供了指导。但是,在一些问题的处理上还存在薄弱的环节:(1)在湿热气候区采用自然通风这个防热手段时,如何设计出适宜于热湿条件下的自然通风方式,降低室外湿度对室内空调能耗的影响,目前的研究还较为缺乏;(2)自然通风降温技术在实际建筑应用中和建筑遮阳、建筑隔热等往往存在相互影响的关系,如何有效地进行综合利用是非常值得探讨的问题。

3 被动蒸发冷却

建筑表面的被动蒸发冷却技术是一种低价、高效、无害、节能的技术措施,且效果显著而一直受到重视。理论上,以降低建筑围护结构外表面温度为目的的利用太阳能被动蒸发冷却问题,按蒸发机理可分为两类:一类是自由水表面的蒸发冷却问题,包括蓄水屋面、蓄水漂浮物、浅层蓄水、流动水膜及复杂的喷雾措施等;另一类则是多孔材料蓄水蒸发冷却问题,这类问题的机理十分复杂,一般认为是在以毛细作用为主的热湿耦合迁移机理作用下所完成的热质交换过程。

3.1 自由水面蒸发冷却

Eduardo González^[48]提出了一种适应于整个巴西领土的被动式蒸发冷却系统,这个系统是利用屋顶蓄水池来进行降温。并且通过文献[49]在不同的地方进行实验,验证该系统的适用性,结果发现对于大多数测试的城市,这个系统可以提供足够的热舒适,平均室内气温可以比普通住宅多降低2.5℃。

国内张磊等^[50]利用风洞实验对蒸发冷却效果进行了研究,实验结果表明,在广州典型的夏季气候条件下,蒸发量的80.4%是由于太阳辐射,空气对流只占19.6%。这意味着在湿热气候区即使室外空气湿度很高,只要有足够的太阳辐射和水,蒸发过程将发生在建筑表面,起到降温作用。同时他们还通过实验发现蒸发冷却技术可以降低太阳辐射大约70%。

3.2 多孔材料蓄水蒸发冷却

Karamanis^[51]研制出一种新型纳米多孔材料,它可以通过吸附水蒸气、冷凝、蒸发循环来降低太阳辐射,最多可以降低52%的太阳辐射。Sancinejad^[52]

利用计算机模拟软件模拟街谷中多孔介质墙的蒸发冷却效果,结果表明人站在街道中,蒸发冷却技术可以降低平均辐射温度 4 °C,降低 SET 值 2.2 °C.

Oliveira 等^[53]在巴西 14 个城市进行被动冷却技术效率的研究,选择了四种不同的壁结构作为研究对象:高反射率墙面,被动蒸发冷却墙壁,高反射和被动蒸发冷却复合墙体,普通隔热墙.研究结果表明不同地区隔热技术效果不一,应该针对当地气候选择不同的隔热技术.Pires^[54]提出水存储介质是影响蒸发冷却效果的重要因素.他们对十一种不同材料进行了被动蒸发冷却实验,根据实验结果他们认为具有蜂窝结构的聚酯隔板具有最佳的被动蒸发冷却效果.

国内学者黄翔等^[55]提出一种应用建筑墙体表面的被动蒸发冷却方式,在自行搭建的测试风道进行了实验研究,得出了调湿材料自动吸放湿能力及蒸发冷却性能曲线.何江^[56]提出基于 CFD 和三维传热计算工具的被动蒸发冷却墙体(FECW)的一种计算方法,使该技术贴近于人居环境的应用开发.

3.3 被动蒸发冷却的发展

尽管国内外学者对建筑被动蒸发冷却技术进行了一系列研究,但无论在发达国家还是国内,更多的工作还是局限在建筑本身的蒸发降温的效果上,而缺乏对天然降水补偿条件的深入研究.此外,各种建筑材料在不同湿度条件下的物性参数数据库亟需完善,建筑材料导热系数与湿状态的关系是影响建筑能耗计算的关键所在.因此,今后的研究应该在这基础上进一步地探寻推广被动蒸发冷却技术的方法,提高对雨水的利用率,对墙体外表面与主体墙体的防水措施进行更深入的研究,找寻安全有效的技术措施以便能更广泛的应用墙面淋水技术来实现被动蒸发冷却.

4 围护结构的隔热设计

围护结构是围合室内空间的屏障,是建筑与室外环境进行热交换的界面.围护结构的隔热性能很大程度上决定着整个建筑的隔热性能水平.屋顶和外墙是围护结构的隔热重点部位.

4.1 隔热外墙

Kossecka 和 Kosny^[57]利用 DOE2.1E 对重质围护结构的六种隔热作法进行了研究,模拟分析了建筑在六种不同的气候下的能耗.结论是外保温的隔热性能最好,内保温的隔热效果较差.Wilhelm 等^[58]

在迪拜研究了别墅的墙体保温性能,发现采用外保温可以导致节省 30% 的能源.Elisabeth^[59]则对 6 种不同的保温层作法在美国 6 种不同的气候条件下进行了模拟研究,结果表明保温层的不同作法对节能有很大的影响,影响的程度取决于气候条件,最多有 11% 的差距.

围护结构隔热层厚度、围护结构传热系数和蓄热系数的不同,将造成围护结构的隔热性能存在一个理论最佳值,不同学者根据这些因素进行了研究.Niccolo 等^[60]分析了隔热性能好的外墙在热惰性上对能量传输的影响.其结果表明,当外墙同时拥有合适的传热系数和蓄热系数时其热工性能将达到最佳.Naouel Daouas^[61]研究发现经济参数对建筑隔热的影响,如隔热成本,能源成本,通货膨胀、折现率和建筑的使用寿命,这些因素对最佳保温层厚度和节能减排有明显的效果.Subhash 等^[62]通过实验发现在印度的气候条件下,最佳保温厚度位于 0.154~0.171 m 之间,投资回收期在 1.17~1.53 a 之间变化,数值具体取决于外墙隔热材料类型.Moghim 等^[63]分析了位于赤道地区的医院围护结构的传热性能,结果表明随着使用寿命的增加,最佳保温层厚度也随之增加,这意味着围护结构的使用期限与保温层厚度有直接关系.

国内对围护结构的隔热也进行了许多研究,白贵平等^[64]引入了围护结构的“热稳定性度时数(DH)”和“反应系数(BER)”的概念,分析了不同形式的围护结构对室内空调冷负荷及室内空气热稳定性的影响,研究结论对如何针对不同的使用条件下合理选择围护结构的隔热形式有参考意义.窦枚^[65]分析了金属夹芯轻质绝热围护结构的热工特点,给出了在夏季空调建筑中可应用的简化传热计算公式,并针对其防潮性能进行了分析,提出了有针对性的湿控制要点和相关热工参数的定量控制条件.

从上述研究来看设置外隔热层有利于缓解室外高温对室内环境的影响,然而在湿热气候区室外湿度很大,水蒸气将向室内传递,外隔热层相对内隔热层将会更加容易引起围护结构内部冷凝,现有文献研究中缺乏对这方面的研究.此外针对不同地区外围护结构隔热性能有着不同的理论最佳值,在做隔热的时候需要针对当地的气候环境选取适宜的隔热层构造、隔热材料、保温层厚度,然而当前湿热气候区的区划较为笼统,需要进一步细分.因此,未来的研究方向在以下两个方面:(1)针对当前湿热气候区外墙隔热构造的不足点,提出适宜于湿热气候的外墙隔热构造设计方案;(2)将湿热气候区根据不同的气候指标再进一步细分成小的气

候分区,针对每个气候分区的气候特点提出新的热工设计指标。

4.2 隔热屋顶

Brito Filho 等^[66]的研究表明用传统的隔热层和反射表面涂层来组合是更有效和充分的提高屋顶隔热的方法,这样兼顾了制冷节能(降低整个屋顶的传热量)和减轻热岛(降低屋顶的外表面温度)。Sproul 等^[67]在美国通过对比白色、绿化屋顶和传统深色屋顶在 50a 生命寿命周期的经济性,深色屋顶需要被淘汰,绿化屋面相比白色屋面每年仅多花 \$3.2/m^2\$,因此如何选择这两种屋面完全可以根据屋主的需求。Santamouris^[68]提出屋顶绿化是缓解城市热岛的重要手段,并利用四种参数来评价屋顶绿化的效果:气候变量、光学变量(反射率)、蓄热变量、水分变量。Rosado 等^[69]选取了 2 个相似的房间进行了屋顶反射率对比实验,结果表明高反射率节能屋顶每年能节约制冷用电 26%,节约用量为 2.82 kWh/m²,空调能源费用(制冷和采暖)节约 20%,节约花费为 \$0.886/m^2\$。Rosenfeld^[70],Barkaszi 等^[71]在美国不同地方也验证了提高屋顶反射率对建筑节能的巨大影响。唐鸣放等^[72]针对自然气候作用下的草地式屋顶绿化形式,提出采用屋顶绿化隔热效果实测与屋顶热传导计算分析相结合的方法确定绿化层等效热阻,等效热阻为 0.56 m²·K/W。

此外,针对湿热气候区的太阳辐射充足,屋顶隔热还可以集合太阳能空调设备来达到综合利用的目的,太阳能空调设备不仅起到屋顶隔热的作用,同时将多余的太阳辐射能利用起来,防止热量的二次传递,下面是一些学者的研究成果。

Allouhi 等^[73]通过对比常规空调和太阳能空调经济和环境上的不同,探索了太阳能空调在摩洛哥的应用潜力,结果表明它可以显著降低 CO₂ 的排放量,有助于能源节约,但是,较高的初始投资是它进一步应用的障碍。Baniyounesd 等^[74]利用 TRNSYS 软件对澳大利亚昆士兰一栋办公建筑进行了敏感性分析,通过用太阳能能源取代常规能源来评价太阳能空调的效率。结果表明,通过安装 50 m² 的太阳能集热器和 1.8 m² 的热水罐可以节约 80% 的常规能源使用。李永华等^[75]以屋顶式太阳能光伏发电系统为研究对象进行了经济性计算,给出了影响屋顶式光伏发电系统经济性的因素。

通过对屋顶隔热的文献研究可以发现,想要提高屋顶的隔热效果需要在注重隔热的同时加强反射太阳辐射,两种方式的结合才可以达到节能和经

济性的双赢。此外,未来研究的重点可以放在将屋顶隔热措施和太阳能空调设备有效地结合起来,这样一来在屋顶安装太阳能集热板不仅可以起到提高屋顶隔热效果的作用,而且可以利用太阳辐射为太阳能空调提供动力,防止屋顶反射太阳辐射造成的“二次加热”,具有良好的季节适应性。然而太阳能空调系统是一种新型的技术,目前还缺少合理的物理模型来描述这种新型的构造形式对建筑能耗的影响,不利于该项低能耗技术的推广应用,此外并没有文献阐述针对湿热气候条件下光伏板的耐盐蚀,耐紫外老化等问题。

4.3 墙体相变蓄冷

虽然隔热层降低了围护结构的传热系数,但是其作用也只是起到了隔热保温的作用,在蓄能方面起到的作用有限。为了缓解室外温度波动,围护结构还需要有一定的蓄热能力。相变蓄冷技术利用潜热吸收环境的热量或释放所吸收的热量到环境中,通过反复的循环,将建筑室内温度维持接近恒定的范围内,相比传统的围护结构显热蓄热,相变潜热蓄冷技术具有很大的研究价值。

Ebrahim Solgi 等^[76]研究了相变蓄冷技术对办公建筑能耗降低的影响,结果发现当使用合适的相变材料与夜间通风方案时,可以节约建筑能耗 46.5%。Thiele 等^[77]通过在混凝土外墙中加入微胶囊化相变材料来分析全年建筑能耗的变化,实验结果表明当相变材料的体积分数从 0.1 变化到 0.3 时,普通家庭每年制冷能耗的减少量在旧金山是从 85%~99.6%,在洛杉矶是 53%~82%,相应的每年节约电费为 \$36~\$42 和 \$94~\$143。Shi 等^[78]通过实验研究了相变材料对室内温度和相对湿度的影响,当相变材料位于围护结构内侧的时候表现出最好的温湿度调节能力,白天最大温度将降低 1.1~4 °C,夜间最低温度将增加 0.3~0.8 °C,相对湿度将降低 19.7%。孔祥飞^[79]研究了一种与建筑围护结构结合的新型相变蓄冷材料,通过实验研究了两套相变蓄冷系统的蓄冷情况,且实验过程中对比了三种操作策略的效率:自然蓄冷策略、夜间自然对流策略和夜间强制排风策略,结果表明夜间自然对流策略最优,相变蓄能板位于内侧较好。

墙体相变蓄冷技术利用相变材料作为媒介,由于巨大的潜热作用使相变材料能够产生相当于几倍等量传统保温材料的隔热、蓄冷效果,增加了围护结构的热惰性、减少热量损失,降低空调或供暖负荷。然而根据目前的研究进展来看,相变材料还

是存在某些缺陷的,比如说相变材料与传统材料组合时存在力学强度降低问题,相变材料的成本过高与大规模工业化生产的问题,材料耐燃烧问题。因此未来相变蓄冷技术的发展应该放在以下几个部分:(1)进一步加强相变材料与传统材料相结合的问题,同外墙隔热问题统筹考虑,确定围护结构的最佳构造形式,材料的最佳物性与适用范围和条件;(2)根据当地的实际需求,提出和完善相变建筑围护结构的设计原则与方法,并且进行经济性分析,为推广做出贡献。

5 总结

目前建筑的防热措施及技术多种多样,就设计原理而言,在理论上已很清晰,效果也极其明显,然而针对湿热气候这个特殊的气候,不同地方的建筑防热方式起到的效果不尽相同,需要具体问题具体分析。本文针对湿热气候区建筑防热问题,分析了建筑遮阳、自然通风、被动蒸发冷却和围护结构隔热四种防热策略的研究进展,并且对它们在湿热气候下应用存在问题和发展前景进行了探索。研究总结如下:

(1) 遮阳手段主要包括遮阳构件、热反射涂料和绿化遮阳,遮阳构件是个良好的防热手段,热反射涂料在湿热气候区的应用时需要提高热反射涂料在高热高湿条件下的耐久性,绿化遮阳与通风之间的相互关系需要进一步的研究。

(2) 自然通风是夏季防热的有效措施,但在湿热气候区需要解决好除湿与降温的矛盾,如何解决通风带来的室内湿度过大是亟需解决的难点。

(3) 湿热气候区如果有足够的太阳辐射和降雨,被动蒸发冷却技术仍可以起到较好的节能效果。未来研究的重点应该放在如何评价被动蒸发冷却技术对围护结构热物性的影响,提高雨水的利用也是其发展所不可忽视的问题。

(4) 墙体隔热研究的难点在于如何选取适宜当地气候特点的隔热构造,此外高湿环境下墙体材料的物性参数需要补充完善;屋顶隔热可以与太阳能系统发展相结合,需要注意太阳能系统集热板的耐久性问题;围护结构隔热不能忽略蓄热的重要性,相变蓄冷技术是建筑蓄热发展的方向,其成本和与传统材料结合问题需要得到解决。

(5) 对多种防热方式之间的综合利用的研究相对较少,需要进一步探讨不同防热方式之间的关系,例如被动蒸发冷却技术对围护结构热性能的影响,

遮阳对通风组织的影响,遮阳和围护结构隔热一体化设计等。

参考文献 References

- [1] 董玮. 湿热气候区建筑复合表皮遮阳构件设计方法探索[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
DONG Wei. Research on shade component design of architecture's composite skin in hot and humid climate district [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [2] 周孝清, 刘芳, 陈伟青. 广州公共建筑能耗调查及研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(12): 76-80.
ZHOU Xiaqing, LIU Fang, CHEN Weiqing. Investigation and study on energy consumption of public buildings in Guangzhou[J]. Building Science, 2007, 23(12): 76-80.
- [3] 杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
YANG Liu. Climatic analysis and architectural design strategies for bio-climatic design [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2003.
- [4] 李愉. 应对气候的建筑设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
LI Yu. Architecture design with climate [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [5] 汤莉. 我国湿热地区传统聚落气候设计策略数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
TANG Li. Numerical simulation of the bioclimatic design strategies in historic settlements in Chinese hot-humid region [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [6] MANDALAKI M, ZERVAS K, TSOUTSOS T, et al. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use[J]. Sol Energy, 2012, 86(9): 2561-2575.
- [7] NIKOOFARD S, UGURSAL V I, BEAUSOLEIL Morison. Effect of external shading on household energy requirement for heating and cooling in Canada [J]. Energy Build, 2011, 43: 1627-1635.
- [8] CHAN A L S. Effect of adjacent shading on the thermal performance of residential buildings in a subtropical region [J]. Appl Energy, 2012, 92(2): 516-522.
- [9] OUEDRAOGO B I, LEVERMORE G J, PARKINSON J B. Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso [J]. Building and Environment, 2012, 49(3): 270-282.
- [10] ELVIS Wati, PIERRE Meukam, MODESTE K. Influence of external shading on optimum insulation thickness of building walls in a tropical region [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90(5): 754-762.
- [11] 寇扬. 长江中下游地区建筑外围护结构遮阳策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
KOU Yang. The study on the sun-shading measures of building envelope in middle-lower reaches of the Yangtze river region [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
- [12] 冯林东. 适宜夏热冬暖地区的建筑遮阳技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
FENG Lindong. Study on appropriate building shading technology in hot summer and warm winter zone [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [13] 陈勇明. 夏热冬暖地区建筑外遮阳与建筑一体化设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

- CHEN Yongming. The research on integrated design of exterior shading and building in hot summer and warm winter areas[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [14] HABERL J S, CHO S, HABERL J S, et al. Literature review of uncertainty of analysis methods (cool roofs), report to the Texas commission on environmental quality [R]. Texas A & M University, 2004.
- [15] LEVINSON R, BERDAHL P, BERHE A. Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane [J]. *Journal of Atmospheric Environment*. 2005, 39(40): 7807-7824.
- [16] AKBARI H, KONOPACKI S. Calculating energy saving potentials from heat island reduction strategies [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(6): 751-756.
- [17] GUO W, QIAO X, HUANG Y, et al. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 50(7):196-203.
- [18] SHEN Hui, TAN Hongwei, ATHANASIOS Tzempelikos. The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption—An experimental study [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(s2-3): 573-580.
- [19] 李宁. 建筑玻璃隔热涂料研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- LI Ning. Research on building glass thermal insulated pain [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [20] 李宁, 孟庆林, 张楠. 建筑热反射涂料现场反射率检测研究[J]. *建筑技术*, 2013,44(7):614-616.
- LI Ning, MENG Qinglin, ZHANG Nan. Inspection and research on site reflectivity of heat reflection coating for building[J]. *Architecture Technology*, 2013,44(7): 614-616.
- [21] STERNBERG T. Evaluating the role of ivy (Hereda helix) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings [J]. *Build Environ*, 2011, 46(2):293-297.
- [22] WONG N H. Energy simulation of vertical greenery systems [J]. *Energy Build*, 2009,41(12): 1401-1408.
- [23] JAFFAL I, OULDOUKHITINE S E, BELARBI R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance [J]. *Renewable Energy*, 2012, 43: 157-164.
- [24] FENG C, MENG Q, ZHANG Y. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs [J]. *Energy Build*, 2010, 42(6): 959-965.
- [25] BAIK Jongjin, KWAK Kyunghwan, PARK Seungbu, et al. Effects of building roof greening on air quality in street canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 61(12): 48-55.
- [26] EDWARD NG, CHEN Liang, WANG Yingna, et al. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong [J]. *Building and Environment*, 2012, 47(1): 256-271.
- [27] MANAT Srivani, KAZUNORI Hokao. Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer [J]. *Building and Environment*, 2013, 66(4): 158-172.
- [28] DONALD Watston, ALAN Plattus, ROBERT G. Shibley. Time-Saver Standards for Urban Design[M]. New York: McGraw-Hill, 2001:7-11.
- [29] GEROS V, SANTAMOURIS M, TSANGRASOULIS A, et al. Experimental evaluation of night ventilation phenomena [J]. *Energy and Buildings*, 1999, 29(2):141-154.
- [30] SHAVIV E, YEZIORO A, CAPELUTO I G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy [J]. *Renewable Energy*, 2001, 24 (3/4):445-452.
- [31] CONNOLLY D. Sensitivity analysis of a maritime located night ventilated library building [J]. *Solar Energy*, 2007, 81 (6):697-710.
- [32] LEILA Moosavi, NORHAYATI Mahyuddin, NORAFIDA Ab Ghafar, et al. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 34: 654-670.
- [33] GIVONI B. Comfort, climate analysis and building design guidelines[J]. *Energy and Buildings*, 1992,18(1): 11-23
- [34] ARTMANN N, MANZ H, HEISELBERG P. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe [J]. *Applied Energy*, 2007, 84(2): 187-201.
- [35] 张国强, 阳丽娜, 周军莉, 等. 自然通风潜力评估体系的建立与应用[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1):25-28.
- ZHANG Guoqiang, YANG Lina, ZHOU Junli, et al. Development and application of natural ventilation potential evaluation system [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 2006, 33(1):25-28.
- [36] 亓晓琳, 杨柳, 刘加平. 北方地区办公建筑夜间通风适用性分析[J]. *太阳能学报*, 2011,32(5):669-673.
- QI Xiaolin, YANG Liu, LIU Jiaping. the applicability of night ventilation on office building in north china [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2011,32(5):669-673.
- [37] WANG L, WONG N H. The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore [J]. *Building and Environment*, 2007,42(12): 4006-4015.
- [38] 李百战, 庄春龙, 邓安仲, 等. 相变墙体与夜间通风改善轻质建筑室内热环境[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(3): 109-113.
- LI Baizhan, ZHUANG Chunlong, DENG Anzhong. Improvement of indoor thermal environment in light weight building combining phase change material wall and night ventilation [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, 31(3): 109-113.
- [39] 陈士凌, 卢军, 李永财. 太阳能相变蓄能通风系统实验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011,33(2): 97-100+111.
- CHEN Shiling, LU Jun, LI Yongcai. Experimental analysis of solar energy combined with phase-change energy storage ventilation system [J]. *Journal of Civil, Architectural Environmental Engineering*, 2011,33(2):97-100+111.
- [40] ELMUALIM A. Integrated building management systems for sustainable technologies: Design aspiration and operational shortcoming [C]//1st International Conference on Sustainability in Energy and Buildings. 2009: 275-280.
- [41] ARADAG S, BAYE O, KARATAS C, et al. Hybrid ventilation system simulation for several cities in Turkey [J]. *International Journal of Ventilation*, 2011, 9(4):351- 357.
- [42] ZHANG Rongpeng, NIE Yisu, LAM Khée Poh, et al. Dynamic optimization based integrated operation strategy design for passive cooling ventilation and active building air conditioning [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 85(85): 126-135.
- [43] DEGHANI sanij, SOLTANI M, RAAHEMIFAR K. A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015,42:

- 182-195.
- [44] DOMINIC O'Connor, JOHN Kaiser Calautit, BEN Richard Hughes. A study of passive ventilation integrated with heat recovery [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82:799-811.
- [45] RAKESH Khanal, LEI Chengwang. A numerical investigation of buoyancy induced turbulent air flow in an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation [J]. *Energy and Buildings*, 2015,93(2): 217-226.
- [46] KUBOTA T, HOOI Chyee D T, AHMAD S. The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia[J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(8): 829- 839.
- [47] CHAN S C, CHE-ANI A I, NIK Ibrahim N L. Passive designs in sustaining natural ventilation in school office buildings in Seremban, Malaysia [J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2013,2(2):172-182.
- [48] KRÜGER E, GONZÁLEZ E, GIVONI B. Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate [J]. *Build Environment*, 2010,45(6): 1422-1433.
- [49] EDUARDO González Cruz, EDUARDO Krüger. Evaluating the potential of an indirect evaporative passive cooling system for Brazilian dwellings [J]. *Building and Environment*, 2015,87: 265-273.
- [50] ZHANG Lei, FENG Yanshan, MENG Qinglin, et al. Experimental study on the building evaporative cooling by using the Climatic Wind Tunnel [J]. *Energy and Buildings*, 2015,104: 360-368.
- [51] KARAMANIS D, KYRITSI E, KRIMPALIS S. Well-ordered nanoporous materials for low-temperature water phase changes and solar evaporative cooling [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015,139: 34-43.
- [52] SABA Saneinejad, PETER Moonen, THIJS Defraeye, et al. Coupled CFD, radiation and porous media transport model for evaluating evaporative cooling in an urban environment [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012,s104-106(3): 455-463.
- [53] OLIVEIRA J T, HAGISHIMA A, TANIMOTO J. Estimation of passive cooling efficiency for environmental design in Brazil [J]. *Energy Build.* 2009, 41(8):809-813.
- [54] PIRES L, SILVA P D, CASTRO Gomes J P. Performance of textile and building materials for a particular evaporative cooling purpose [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*. 2011, 35(4):670-675.
- [55] 黄翔, 范影, 狄育慧. 用于墙体表面的多孔调湿材料实验研究[J]. *西安工程科技学院学报*, 2006,20(6):731- 734. HUANG Xiang, FAN Ying, DI Yuhui. Experimental study on porosity moisture-conditioned material used on building envelope[J]. *Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology*, 2006, 20(6): 731-734.
- [56] HE Jiang. A design supporting simulation system for predicting and evaluating the cool microclimate creating effect of passive evaporative cooling walls [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(3): 584-596.
- [57] KOSSECKA M, KOSNY J. Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(4): 321- 331.
- [58] WILHELM A F, KAMBIZ R T, HENDAWIB A, et al. Wall insulation measures for residential villas in Dubai: a case study in energy efficiency [J]. *Energy and Buildings*, 2012,44: 26-32.
- [59] ELISABETH K, JAN K. Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building [J]. *Energy and Building*, 2002, 34(4): 321-331.
- [60] NICCOLO A, ADRIANA A, MICHELA B. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2009,41(11): 1181-1187.
- [61] NAOUEL D. A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads [J]. *Appl Energy*, 2011,88(1):156-164.
- [62] SUBHASH Mi, USMANI J A, BHAGMAN S. Study on energy saving in residential building using life cycle cost analysis [J]. *Int J Eng Math Sci*, 2013(4):8-17.
- [63] MOGHIMI S, BAKHTYAR B, AZIZPOUR F, et al. Maximization of energy saving and minimization of insulation cost in a tropical hospital: a case study in Malaysia [J]. *WSEAS Trans Environ Dev*, 2013 (9):105-115.
- [64] 白贵平,冀兆良. 围护结构隔热对室内热稳定及空调负荷的影响[J]. *建筑热能通风空调*, 2005,24(1):69-72. BAI GuiPing, JI Zhaolaing. The effects of thermal insulation formon thermal stability and the cooling load of air conditioning[J]. *Building Energy and Environment*, 2005, 24 (1): 69-72.
- [65] 窦枚. 金属夹芯轻质绝热围护结构热湿功能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. DOU Mei. Study on performance of heat and moisture in light metal insulating sandwich building envelope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [66] BRITO Filho, HENRIQUEZ J R, DUTRA J C. Effects of coefficients of solar reflectivity and infrared emissivity on the temperature and heat flux of horizontal flat roofs of artificially conditioned nonresidential buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2011,43(s2-3): 440-445.
- [67] SPROUL J, WAN M P, MANDEL B H, et al. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 71(3): 20-27.
- [68] SANTAMOURIS M. Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments [J]. *Solar Energy*, 2014,103: 682-703.
- [69] ROSADO P J, FAULKNER D, SULLIVAN D P. Measured temperature reductions and energy savings from a cool tile roof on a central California home [J]. *Energy and Buildings*, 2014,80: 57-71.
- [70] ROSENFELD A H, AKBARI H, BRETZ S, et al. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates [J]. *Energy and Buildings*, 1995,22(3): 255-265.
- [71] PARKER D S, BARKASZI S F. Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida [J]. *Energy and Buildings*, 1997,25(2):105-115.
- [72] 唐鸣放,杨真静,郑开丽. 屋顶绿化隔热等效热阻[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2007,30(5):1-3. TANG Mingfang, YANG Zhenjing, ZHENG Kaili. Thermal R-values of green roof [J]. *Journal of Chongqing University(Natural Sciences edition)*, 2007,30(5):1-3.
- [73] AMINE Allouhi, TARIK Kousksou. Economic and environmental assessment of solar air-conditioning systems in Morocco [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015,50: 770-781.