

# 绿色建筑材料研究与应用综述及发展趋势<sup>①</sup>

郑 捷, 陈景恒, 雷震东, 郑山锁, 刘 巍

(西安建筑科技大学 建筑设计研究院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**对目前几种常用绿色建筑材料在国内外的研究现状及应用状况进行简述,对其存在的问题进行总结与分析,探讨其潜在的负面影响,并对其在未来绿色建筑应用中的发展趋势进行展望,得出以下结论:未来绿色建筑材料的发展要注重多种材料的复合,充分发挥不同种材料各自的优势以弥补某种单一材料所存在的缺陷;注重材料的循环利用,避免由于材料替换所带来的二次污染;开发研制新材料、新技术以改善现有材料在绿色建筑应用中的缺陷和不足。

**关键词:**绿色建筑材料;绿色建筑;节能;潜在负面影响;发展趋势

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)06-0985-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.06.0985

## A Review of Research and Application of Green Building Materials and Their Developing Trends

ZHENG Jie, CHEN Jing-heng, LEI Zhen-dong, ZHENG Shan-suo, LIU Wei

(Architectural Design Institute, Xian University of Architecture and Technology, Xian 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** In this study, the research status and practical application of frequently used green building materials were surveyed, in addition to a brief analysis of existing problems in the current study. The potential negative effects of existing green building materials were discussed and developing trends in green building materials were forecast. We conclude, in the future development of green building materials, attention should be given across the complete suite of materials used in order to give full play to the advantages of various materials and to make up for any defects in a single material; attention should also be paid to the use of recycled materials to avoid secondary pollution caused by the material substitution; research and development of new materials and new technologies should be encouraged to improve the defects and deficiencies of existing materials used in green buildings.

**Key words:** green building materials; green buildings; energy conservation; potential negative effect; developing trend

### 0 引言

随着社会经济的发展和低碳时代的来临,建筑业越来越朝着低碳建筑和绿色建筑的方向发展。目前,绿色建筑发展所依据的主要经济技术指标包括节地、节能、节水、节材、环境保护等方面,而这些四

节一环保的绿色建筑技术指标要求均要以绿色建筑材料为基础才能得以实现。所以绿色建筑性能目标的实现离不开绿色建筑材料的发展,同时,绿色建筑材料的发展将会为绿色建筑的发展提供强有力的保障。本文主要对目前国内外一些常用绿色建筑材料

① 收稿日期: 2016-10-21

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAJ08B03, 2015BAL01B02-04); 国家自然科学基金(51678475); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20136120110003)

作者简介: 郑捷(1988-), 女, 陕西西安人, 讲师, 从事建筑与结构设计研究。E-mail: julie1314fl@126.com。

的研究现状进行概括和汇总,对其存在的问题进行简要的分析,并对绿色建筑材料的应用发展趋势进行展望。

## 1 建筑围护结构的节能保温材料

围护结构(外墙、门窗玻璃和屋面)用于抵御外部恶劣环境的侵袭,阻挡外来噪声、射线等有害物质的侵扰,具隔热御寒、使室内形成舒适环境的作用。且在绿色建筑节能设计中占有很大比例,因此研究和开发建筑围护结构的节能保温材料对绿色建筑的发展和具有重大意义。

### 1.1 外墙的节能设计

外墙作为最主要的围护结构,其设计旨在提高和改善其热工性能,即通常所说的外墙要具有良好的保温隔热效果。国内外学者对外墙的保温材料进行了较为系统的研究。郭幻等<sup>[1]</sup>研究分析了在烧结烟气脱硫灰化物特性的基础上复掺钢渣、粉煤灰和水泥制成蒸压加气混凝土砌块,该方法在充分利用工业固体废物的同时降低了水泥的使用量,并改善了传统方法由于脱硫而造成的二次污染。Quan等<sup>[2]</sup>研究了蒸压加气混凝土砌块在新型节能建筑中的应用,结果表明:新型节能结构体系很好地使蒸压

加气混凝土的物理性能与建筑结构的承载能力结合在一起,在新型节能建筑中具有良好的发展前景。顾天舒等<sup>[3]</sup>通过对比目前我国建筑围护结构节能技术的三种形式,发现在墙体保温中,外墙体保温施工做法的优点最为突出,今后应成为我国建筑墙体保温的主要形式之一及建筑节能保温墙体发展的新方向。张巨松等<sup>[4]</sup>开发研制了新型保温浆料(夹心墙保温浆料),并在其中加入“膏状”泡沫,结果发现,在强度不同的情况下引入约 30%的“膏状”泡沫明显改善保温浆料的保温性能。王伟鉴<sup>[5]</sup>探讨了粉煤灰、乳胶粉、氢氧化钙、纤维素醚等材料对无机轻集料聚合物保温砂浆性能的影响,结果表明:掺加合适的粉煤灰、氢氧化钙和纤维素醚能明显改善砂浆的和易性和保温性能;纤维能增强砂浆的拉伸粘结强度。

表 1 和图 1 给出了几种保温材料的优缺点及其最高使用温度。可以看出:建筑保温材料主要包括无机保温材料、有机保温材料和有机无机复合保温材料<sup>[6]</sup>。有机保温材料的抗压性和抗渗性都较好、质量轻、耐腐蚀、使用寿命较长、便于安装拆卸,导热系数低,但由于其最高使用温度较低,很容易引发火灾。表 2 给出了一些由有机保温材料引发火灾的例

表 1 几种保温材料的优点及缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of several kinds of thermal insulation materials

材料类别	有机材料			无机材料		新型复合材料
	模塑聚苯乙烯板(EPS)	挤塑聚苯乙烯板(XPS)	聚氨酯(PU)	岩棉	膨胀珍珠岩	泡沫玻璃
优点	防水性能好,抗风压、抗冲击性能好,质量轻,易加工,成本低,技术成熟等	导热系数小,保温性能好,强度较高,抗水汽渗透性能较 EPS 好等	保温隔热性能好,环境污染小,高抗压,防潮,质量轻,耐腐蚀,节能效果好等	保温性能优异,耐久、耐火性好,不受虫蛀等	质量轻,耐火性能好,由于空隙较多,吸声效果较好等	容重低,强度高,保温隔声效果好,耐火性好,使用寿命长等
缺点	耐火等级低,受热容易燃烧,放出大量热等	耐火等级低,易燃烧等	耐火等级低,燃烧释放出大量有毒气体等	容重大,内部强度低,易吸水,吸水后保温性能降低	吸水率高,易膨胀开裂等	生产成本低,应用较少,缺乏市场竞争力等

子。显然该材料可能引起火灾,会给人民的生命和财产安全带来较大的隐患,因此在绿色建筑外墙节能保温中应该避免单独使用某种有机保温材料,以避免火灾发生。对于无机保温材料,其耐火性能较好,但也存在缺点,如珍珠岩重量大,吸水膨胀会导致墙体开裂等。

针对有机保温材料和无机保温材料存在的问题,可采用有机无机复合的外墙保温材料,既可以发挥有机材料轻质、耐腐蚀等优点,又可以充分利用无机材料耐火的性能特点。但目前此种材料存在生产成本低、缺乏市场竞争力等缺点。尽管如此,其

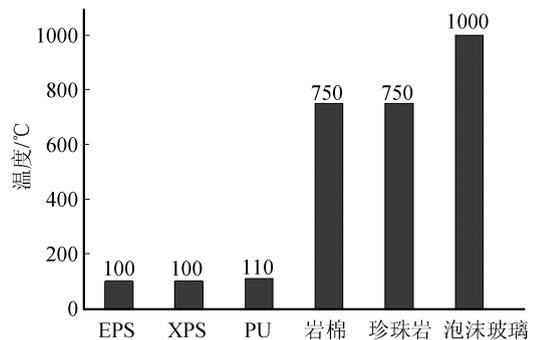


图 1 几种保温材料最高使用温度对比

Fig.1 Comparison between the maximum use temperatures of several kinds of thermal insulation materials

表 2 与有机保温材料有关的典型火灾案例

Table 2 Typical fire cases related to organic thermal insulation materials

序号	建筑名称	火灾发生时间	造成的损失	外墙保温材料
1	北京电视文化中心	2009-02-09	过火面积 10 万 m <sup>2</sup> , 损失估计超过 7 亿元, 1 人死亡 6 人受伤	主要是挤塑聚苯乙烯板, 还有一部分岩棉
2	哈尔滨“经纬 360°”公寓	2008-10-09	过火外墙面积 2 000 m <sup>2</sup> , 损失 216 万元	聚氨酯发泡保温层
3	乌鲁木齐金华城	2007-07-02	过火面积 1 200 m <sup>2</sup> , 损失估计超过 91 万元	聚苯板保温, 铝塑板幕墙

发展前景与优势还是十分明显的。因此在未来绿色建筑发展中,如何改善新型复合材料的生产工艺、扩大生产规模、降低成本等,仍是一个值得深入研究的课题。

### 1.2 门窗玻璃节能设计

门窗作为建筑外墙围护结构的开口部位,不但要满足建筑上采光通风的要求,还要具有良好的节能性能。有资料表明,在我国窗户造成的能耗占住宅建筑能耗的 40%,这一数据是发达国家的 2 至 3 倍,而对门窗耗能影响最大的就是玻璃。国内外学者对其节能效果进行了大量研究。蒋毅<sup>[7]</sup>介绍了真空玻璃在绿色建筑中的应用,指出真空玻璃的遮阳系数和传热系数可根据不同的设计要求进行选取。卜增文等<sup>[8]</sup>模拟分析了不同气候条件下 Low-E 玻璃传热系数和遮阳系数对空调负荷和能耗的影响,并提供了依据气候条件选取各种 Low-E 玻璃的范围。潘伟等<sup>[9]</sup>以热量传导的三种方式(导热、辐射和对流)为出发点,对中空玻璃中的空气、玻璃、Low-E 膜与环境温度之间的关系和相互作用进行了系统的研究,结果表明 Low-E 玻璃对阻断建筑物热量的散失能起到关键作用。Gustavsen 等<sup>[10]</sup>采用有限元软件分析了隔热木框、断热铝框和 PVC 框的三层玻璃系统在不同情况下的热工性能,结果表明 U 值(边缘传热系数)随固体替代物导热系数的增大而提升,窗框热传递系数随固体替代物导热系数和隔热窗框中隔热材料导热系数的增大而提升。Yueping Fang 等<sup>[11]</sup>系统地研究了带电变色层真空玻璃在玻璃涂层不同时的发射率和玻璃嵌入框的深度对热传导的影响,结果发现传热系数随玻璃涂层发射率的提升而增加,传热系数随玻璃嵌入框深度的增加而减小。Danny H.W.LI 等<sup>[12]</sup>对单层玻璃贴太阳控制膜后对空调能耗及采暖能耗的影响进行了实验研究,揭示出玻璃处理前后传热系数等热工性能对能耗的影响效果。

基于以上研究成果,目前门窗玻璃在绿色建筑

节能设计应用中主要采用中空玻璃、真空玻璃和 Low-E 玻璃(低辐射玻璃)。中空玻璃由两层或多层玻璃夹着空气或惰性气体制成,不仅能降低热传导系数,保温效果良好,还具有良好的隔声效果<sup>[13]</sup>。近年来随着房地产开发的发展,中空玻璃获得迅猛发展,目前在节能玻璃中占据主导地位。但其不足之处是制作与加工流程相对复杂,型材与玻璃之间密封的缺陷或两片玻璃合片时质量不佳会一定程度上影响其节能保温效果,若水蒸气渗入中空层则会直接影响其采光效果,且破损后不便更换<sup>[13]</sup>,因此不可重复利用。相对于中空玻璃,起步较晚的真空玻璃的传热系数更低,具有更好的保温节能效果。由于真空玻璃自身特殊的真空层,使其具有优良的隔声效果。但从玻璃制造产业技术的成熟性和规模化来说,目前真空玻璃的发展还处在初级阶段,相对于中空玻璃,其制作生产工艺更为复杂,成本投入较大,不适合大规模的使用。但随着生产规模扩大和制造工艺的改进,其价格会逐步降低,在不久的将来,真空玻璃极有可能替代中空玻璃而在节能玻璃中占主导地位。低辐射玻璃 Low-E 对远红外光具有较高的反射率并具有良好的透光性,能有效降低室内热量的散发,减小外界条件对室内温度的影响,其节能保温的效果显著<sup>[13]</sup>。但目前国内掌握 Low-E 玻璃生产和制作工艺的厂家不多,技术受到限制,Low-E 玻璃的光学性能和力学性能还有待提高。

针对目前制作节能玻璃存在的问题,一方面应把好质量关,确保玻璃质量良好,完善玻璃行业的相关行业标注和国家标注,并严格执行;另一方面应注重选用新的材料,采用新的制作工艺,提高技术手段,降低制作成本,注重材料的循环利用,充分结合各种玻璃节能保温的优点,研制出一种更适合在未来绿色建筑设计中广泛应用的玻璃。

## 2 相变材料

相变材料(PCM)是一种具有特定功能的材料,在

一定的温度范围内(称相变温度),它可以发生物质相态的变化,并伴随着相变过程来吸收或释放出大量的相变潜热,从而可实施储热或蓄冷。相变材料具有储能密度高、储放能近似等温、过程易控制等优点,对解决能量供给与需求失衡难题更为适用<sup>[14]</sup>。

表 3 给出了相变材料与传统保温材料(EPS)在性能方面的差异。可以看出,与 EPS 相比,相变材料在节能保温方面优势显著,正因为此,国内外学者对其进行了大量研究。杜开明<sup>[15]</sup>利用物理吸附方法制备相变型建筑节能材料,获得了轻质、保温性良好的墙体材料。孟多<sup>[16]</sup>研究了一种新型相变蓄热材料及其在建筑节能中的应用,制备了相变位温度在 20~56 °C 范围内的定形相变材料,进而以纳米二氧化硅和聚甲基丙烯酸甲酯为基体,研制了适合在绿色建筑中使用的无机纳米材料基定形相变材料和

聚合物基定形相变材料。Kalagasidis A S<sup>[17]</sup>研究表明,相变材料可提高建筑物的蓄热能力,可根据建筑物的温度对其进行合理的加热和冷却;相变材料对建筑物保温节能影响显著,其每年对建筑物加热和冷却所节省的能量约占总能量的 5%~21%,这主要取决于相变位材料放置的位置。K.Nagan 等<sup>[18]</sup>基于颗粒状相变储能材料增大建筑物蓄热能力的地板空调系统试验研究,得到如下结论:30 mm 厚地板空调系统装满颗粒状相变材料时每晚能储存 89% 的日间冷负荷,具有良好的冷/热量蓄能能力。Suat Canhazoglu 等<sup>[19]</sup>对硫代硫酸钠化合物太阳能热水系统进行了系统研究,结果表明,含有相变材料的太阳能热水系统,其热水储存时间、热水产量、总吸收热量等是未采用相变材料热水系统的 2.59~3.45 倍。

表 3 相变材料与 EPS 的对比

Table 3 Comparison of phase change material and EPS

材料类别	导热系数 /(w/m·k)	材料性能	耐火性	经济性	强度
相变材料	0.030	突破传统保温材料单一热阻性能,具有热容性和热阻性量大绝热性能	A 级不燃性。在目前保温材料市场是防火等级最高的墙体保温材料	施工简便,对于施工队伍要求不高,节约成本,缩短施工周期	抗压强度高,可达 114 kPa
EPS	0.042	单一热阻性	B1 级	施工复杂,成本较高	自身强度不高

目前在绿色节能建筑中使用的相变材料主要有固-固相变储热材料和固-液相变储热材料,其中固-固相变储热材料可分为无机盐、多元醇和高分子交联树脂三类,固-液相变储热材料又可以分为无机、有机和高分子三个种类。

对于固-固相变储热材料,其中无机盐类相变贮能材料主要是利用无机盐固体在不同种晶体形态下的变化进行吸热和放热,一般情况下,其相变温度高、变化范围较小,适合在高温条件下的贮能和控温,因此在实际工程中应用相对较少<sup>[14]</sup>。多元醇类相变材料的相变焓较大,相变温度较高,适用于中、高温条件下的贮能和控温,在低温条件下贮能效果不太理想。这种材料性能稳定,多次使用不会出现分解和分层的现象,使用周期较长,其缺陷是:当达到特定的相变温度以上,将由固态变成流塑性的晶体,塑性晶体蒸汽压较大,容易发生升华,在使用时需用密封容器包装,导致难以充分发挥固-固相变材料的优越性<sup>[14]</sup>。对于高分子交联树脂类相变蓄热材料,其改变了非交联高分子相变材料在使用时难以定型的缺点,提高了相变蓄热能力,易于加工,具有良好实用价值<sup>[14]</sup>。

对于固-液相变储热材料,其中无机类相变材料

适用于中低温环境;有机类相变材料具有较高的蓄能能力,一般不会出现分解和分层现象,无毒副作用,但由于该材料价格比较高、熔点低、易挥发,不适用于高温场合;对于高分子化合物类相变材料而言,由于其具有一定分子量分布的混合物,且分子量链较长,结晶不完全,因此其相变过程需具有一定的温度控制变化范围<sup>[14]</sup>。

由于相变材料自身的优点,其在建筑行业中的应用比较广泛,但同时也存在一些问题:如相变材料的再循环利用问题,相变材料在经过多次储能和放能之后,自身的性能发生退化,很难继续循环使用;相变材料与建筑中其他建筑材料的兼容性问题,由于相变材料自身带有一定的腐蚀性,会对其他材料造成腐蚀。这些问题都是今后相变材料在绿色建筑发展过程中所遇到的亟待解决问题。

针对相变材料在建筑中存在的问题,选择合适的相变材料时应注意:(1)熔化潜热高,使其在相变过程中释放或储存大量的热;(2)相变过程的可逆性;(3)相变材料的无腐蚀性、无毒性;(4)有合适的相变温度。目前解决这些问题最好的办法是:(1)把相变材料与传统保温隔热材料结合起来,这样既能

解决传统保温隔热材料蓄热系数相对小的问题,又能发挥出相变材料节能的优势。该方法在绿色建筑中可以适当采用,但相变材料要想在未来绿色建筑发展中得到普遍采用,还需要国内外研究者共同努力,去研发可持续利用的新材料,解决目前其自身存在的一些问题;(2)研究将纳米材料合成技术应用于相变蓄能材料中,用来解决既有相变材料导热系数低、易出现分离和分层现象、稳定性差、腐蚀密封外壳等问题。研制和开发满足各种储热要求的纳米结构储热相变材料是今后的发展趋势,更是具有挑战性的研究课题<sup>[20]</sup>。

### 3 纳米材料

基础纳米技术和纳微粒子的新型建筑材料不仅能够弥补既有建筑材料的某些缺陷,且能更好地发挥既有建筑材料的功能和特点,对于我国绿色建筑的发展有着指导意义<sup>[21]</sup>。就目前形势来看,纳米技术以及纳米材料在建筑领域的研究是一个最新的热点。张瑞锐等<sup>[22]</sup>研究了目前纳米材料在国内绿色建筑的应用现状,并对存在的问题进行归纳与分析,指出纳米材料潜在的负面效应,并展望其在绿色建筑应用中的发展趋势。刘军<sup>[20]</sup>研究了建筑中纳米材料的各种性能及其对混凝土的影响,分析了纳米材料在建筑相关领域所带来的经济效益和必要性,并指出纳米材料掺入到混凝土中,使得其各种性能

能得到改善,是未来新型建筑材料的发展方向。Bozsaky D<sup>[23]</sup>为设计人员提供了纳米材料在绿色建筑应用领域的基本信息,并描述了其在建筑方面的材料特性、功能原理、应用、建筑施工以及潜在的应用价值。Milliron等<sup>[24]</sup>将钢锡氧化物纳米晶体掺杂到氧化铍玻璃中,通过电解的方法制成了一种新型的智能玻璃,能在不增加额外热量的情况下使室内的采光得到保障,从而减少对人工照明的依赖,适合在绿色建筑中大量使用。

基于上述研究成果,目前纳米材料在绿色建筑中的应用有:环境治理与太阳能转化,用于混凝土材料的改性及智能化发展,门窗玻璃及外围护结构的节能等方面。纳米材料具有很好的伸缩性、防水性、抗异物粘附性、除臭、杀菌、防尘以及保温隔热性能等。尽管纳米材料以其独特的优势为绿色建筑的发展带来了广阔的空间,但其在建筑中大量的使用将释放大量的人工纳米颗粒到空气中,从而带来健康风险和环境污染<sup>[20]</sup>。Liu Z等<sup>[25]</sup>通过小白鼠系列实验验证了呼吸系统长期暴露于碳纳米管下将导致循环系统氧化损伤、肺部炎症和纤维化、动脉粥样硬化、全身免疫系统异常等一系列疾病。表4给出了一些在建筑中常用的纳米材料的优点及其对动植物的毒理性能。由此可见纳米材料确实对动植物的健康存在伤害,这也是其在未来绿色建筑应用和发展中需改进的课题。

表4 常见纳米材料的优点及其毒理学影响

Table 4 Advantages and toxicological effects of the common nano materials

纳米材料	碳纳米管	二氧化硅纳米管	二氧化钛纳米管
优点	提高耐久性,防裂,增强机械和热性能等	增强机械强度,提高耐火性,冷却剂,防反射等	快速水化,自清洁,超亲水性,抗污垢性等
毒理学影响	抗菌,细胞膜损伤,细胞凋亡或坏死,抑制呼吸功能,损伤线粒体DNA等	产生活性氧造成轻微中毒,细胞凋亡等	急性致死,生长抑制,光合作用抑制,活性氧造成的氧化物损伤等

纳米材料在建筑中的应用已成为国内外研究的一个热点。作为一种新型材料,纳米材料不仅在建筑材料领域有着广泛的应用价值,其在智能建筑、建筑设计、建筑加固改造等方面也意义重大,但其本身释放的纳米颗粒对动植物造成的危害是不容忽视的。目前要解决纳米材料在建筑中带来的问题,关键是要从源头上控制纳米颗粒物的危害。主要措施是:生产应用纳米材料的各个工业环节应防止材料的泄漏,研究设计纳米材料建筑废弃物的分离和提纯方法,制定相关行业标准,降低健康风险;同时提升和改善纳米材料本身的性能,减少纳米颗粒的

使用,延长其使用寿命,并保证在其全寿命周期内的安全;提高纳米材料再回收、再利用和再处理技术<sup>[20]</sup>,研究开发可循环利用的新材料,避免由于材料更换带来的二次污染。

### 4 结论

本文总结了近年来国内外建筑业所使用的一些绿色建筑材料,对比分析了现阶段绿色建材的研究现状与应用状况,结果表明,现在的绿色建筑材料普遍存在生产成本高、制作工艺复杂、材料单一、不可重复利用等问题。这些问题为未来绿色建材的发展

指明了方向:

(1) 注重多种材料的复合使用。研制开发复合材料,包括物理材料与化学材料的复合,有机材料与无机材料的复合等,以弥补某种单一材料所存在的缺陷,发挥材料各自的优势,改善其工作性能。

(2) 注重材料的循环利用。建筑作为自然环境的一部分,只有注重建筑材料的循环利用,未来的建筑才能朝着低碳、绿色的方向发展。将新型材料应用于建筑中,不仅要关注其是否带来建筑能耗的减少,还要强调能源和材料循环化利用,尽可能使用废弃物回收利用加工而成的再生能源,少使用天然能源。

(3) 开发研制新材料、新技术以改善现有材料在绿色建筑应用中的缺陷和不足。关注新型建筑材料在其全寿命周期的使用过程中对空气、水体、土壤以及生物体的影响,趋利避害,使建筑材料朝着多元化、多功能化的方向发展,并确保产品有益于人体健康,改善生活环境。

## 参考文献(References)

- [1] 郭幻,宋存义.烧结脱硫灰制备蒸压加气混凝土砌块的研究[J].环境工程学报,2011,5(3):689-695.  
GUO Huan, SUN Cun-yi. Research on Preparing Autoclave Daerated Concreteb Lock with Sintering FGD Ash[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(3): 689-695. (in Chinese)
- [2] Quan Y, Nianxiang Y. Applications of Autoclaved Aerated Concrete Block in New Energy-saving Building Structure [C]// Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), 2011 International Conference on IEEE. 2011: 1066-1069.
- [3] 顾天舒,谢连玉,陈革.建筑节能与墙体保温[J].工程力学, 2006, 23(增刊 2): 167-184.  
GU Tian-shu, XIE Lian-yu, CHEN Ge. Building Energy Conservation and Wall Thermal Insulation [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Supp2): 167-184. (in Chinese)
- [4] 张巨松,金建伟,时跃明,等.建筑夹心墙复合保温浆料的试验研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(3):443-447.  
ZHANG Ju-song, JIN Jian-wei, SHI Yue-ming, et al. Study on Composite and Thermal Insulation Mortar Used in Architecture Interlayer Wall[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23(3): 443-447. (in Chinese)
- [5] 王伟鉴.无机轻集料聚合物保温砂浆配比设计及试验方法研究[D].杭州:浙江大学,2008.  
WANG Wei-jian. Study on Design and Test Method of Inorganic Lightweight Aggregate Polymer Insulation Mortar[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [6] 安伟光.PS建筑外墙保温材料燃烧及火蔓延行为研究[D].合

肥:中国科学技术大学,2015.

- AN Wei-guang. Study on Combustion and Fire Spreading Behavior of Exterior Wall Thermal Insulation Material of PS Building[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [7] 蒋毅.真空玻璃在绿色建筑中的应用[J].绿色建筑,2011(6): 21-22.  
JIANG Yi. Application of Vacuum Glass in Green Building[J]. Green Building, 2011(6): 21-22. (in Chinese)
- [8] 卜增文,毛洪伟,杨红.Low-e玻璃对空调负荷及建筑能耗的影响[J].暖通空调,2005,35(8):119-121.  
BU Zeng-wen, MAO Hong-wei, YANG Hong. Influence of Low-e Glass on Air Conditioning Load and Building Energy Consumption [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2005, 35(8): 119-121. (in Chinese)
- [9] 潘伟.Low-E中空玻璃节能原理的简述[J].玻璃,2007(1):60-63.  
PAN Wei. A Sketch of Energy-saving Principle of Low-E Insulating Glazing Unit[J]. Glass, 2007(1): 60-63. (in Chinese)
- [10] Arild Gustavsen, Dariush Araste, Christian Kohler, et al. Two-dimensional CFD and Conduction Simulations of Heat Transfer in Horizontal Window Frames with Internal Cavities[J]. ASHRAE Transactions, 2007, 113(1): 165-175.
- [11] Yueping Fang, Philip C Eames. The Effect of Glass Coating Emittance and Frame Rebate on Heat Transfer Through Vacuum and Electrochromic Vacuum Glazed Windows[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(16): 2683-2695.
- [12] Li D H W, Lam J C, Lau C C S, et al. Lighting and Energy Performance of Solar Film Coating in Air-conditioned Cellular Offices[J]. Renewable Energy, 2004, 29(6): 921-937.
- [13] 陈何国,张冠琦,黄凯,等.建筑玻璃节能技术[J].门窗,2009(5):47-53.  
CHEN He-guo, ZHANG Guan-qi, HUANG Kai, et al. Building Glass Energy Saving Technology[J]. Doors and Windows, 2009(5): 47-53. (in Chinese)
- [14] 张巨松,金亮,吴晓丹.相变材料发展及在建筑节能工程中的应用[J].辽宁建材,2010(2):38-45.  
ZHANG Ju-song, JIN Liang, WU Xiao-dan. Development of Phase Change Material and Its Application in Building Energy Saving Engineering[J]. Liaoning Building Materials Liaoning Building Materials, 2010(2): 38-45. (in Chinese)
- [15] 杜开明.相变型保温墙体材料的制备及性能研究[D].重庆:重庆大学,2009.  
DU Kai-ming. Study on Preparation and Properties of Phase Change Thermal Insulation Wall Materials[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- [16] 孟多.定形相变材料的制备与建筑节能应用[D].大连:大连理工大学,2010.  
MENG Duo. Preparation and Building Energy Conservation Application of Form-stable Phase Change Material [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

- [9] 王锋吉,林眉,许丹,等.地震台站的防雷技术探讨[J].地震地磁观测与研究,2008,29(6):80-85.  
WANG Feng-ji, LIN Mei, XU Dan, et al. Discussion on Lightning Protection Technology of Seismic Station[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2008, 29(6): 80-85. (in Chinese)
- [10] 全建军,陈珊桦,刘水莲,等.永安地震台 TJ-II 型体应变仪观测资料干扰分析[J].地震地磁观测与研究,2014,35(5):206-207.  
QUAN Jian-jun, CHEN Shan-hua, LIU Shui-lian, et al. About Interference Factors Analysis of TJ-II Borehole Strain Instrument Data at Yong'an Seismic Station[J]. Analysis Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2014, 35(5): 206-207. (in Chinese)

\*\*\*\*\*  
(上接 990 页)

- [17] Kalagasidis A S. A Multi-level Modelling and Evaluation of Thermal Performance of Phase-change Materials in Buildings [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2014, 7(4): 289-308.
- [18] Canbazoglu S, Sahinaslan A, Ekmekyapar A, et al. Enhancement of Solar Thermal Energy Storage Performance Using Sodium Thio-sulfate Pentahydrate of a Conventional Solar Water-heating System[J]. Energy & Buildings, 2005, 37(3): 235-242.
- [19] Koschenz M, Lehmann B. Development of a Thermally Activated Ceiling Panel with PCM For application in Lightweight and Retrofitted Buildings [J]. Energy & Buildings, 2004, 36(6): 567-578.
- [20] 叶锋,曲江兰,仲俊瑜,等.相变储热材料研究进展[J].过程工程学报,2010,10(6):1231-1241.  
YE Feng, QU Jiang-lan, ZHONG Jun-yu, et al. Research Advances in Phase Change Materials for Thermal Energy Storage [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(6): 1231-1241. (in Chinese)
- [21] 刘军.纳米材料在建筑领域中的应用[J].山西建筑,2013,39(36):118-119.  
LIU Jun. The Application of Nanometer Materials in the Field of Architecture [J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(36): 118-119. (in Chinese)
- [22] 张瑞锐,郭永聪,罗刚,等.纳米材料在绿色建筑中的应用及其挑战[J].硅酸盐通报,2014,33(6):1408-1412,1417.  
ZHANG Rui-rui, GUO Yong-cong, LUO Gang, et al. Applications and Challenges of Nanomaterials in the Green Building [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(6): 1408-1412, 1417. (in Chinese)
- [23] Bozsaky D. Application of Nanotechnology-based Thermal Insulation Materials in Building Construction [J]. Slovak Journal of Civil Engineering, 2016, 9(1): 17-23.
- [24] Llordés A, García G, Gazquez J, et al. Tunable Near-Infrared and Visible-Light Transmittance in Nanocrystal-in-Glass Composites [J]. Nature, 2013, 500(7462): 323-6.
- [25] Liu Z, Cai W, He L, et al. In Vivo Biodistribution and Highly Efficient Tumour Targeting of Carbon Nanotubes in Mice [J]. Nature Nanotechnology, 2007, 2(1): 47-52.