

# 亚热带地区建筑能源效率与节能分析

李志生<sup>1,2</sup>, 张国强<sup>2</sup>, 刘建龙<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 建设学院, 广东 广州 510090; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**介绍了我国建筑节能和国外的差距,阐述了嵌入式能量(Embodied Energy)和建筑能量密度(Building Energy Intensity)的特点,说明了亚热带地区的气候与热湿负荷特点,对建筑材料和建筑过程中的能源消耗问题也做出了论述.建筑能耗包括建造过程和使用过程中的总能耗,不能只注重建筑节能的初次投资,或只对运行成本进行节能考虑,要使整个建筑寿命期内嵌入的建筑能量最小,才能有利于建筑节能.

**关键词:**亚热带;建筑能源效率;嵌入式能量;能量密度;节能

**中图分类号:** TU831.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-7162(2006)01-0001-07

## 1 我国建筑节能与国外的差距

自 20 世纪 90 年代以来,由于我国经济的快速发展,以及随后实行的住房货币化政策,极大地促进了建筑及其房地产业的迅速发展.1989 年我国城镇的人均居住面积仅约为  $3.6 \text{ m}^2$ ,而到 1997 年城镇的人均居住面积就已达  $8.7 \text{ m}^2$ .相比城镇的建筑和房地产发展,农村住宅的数量更多,其发展的速度更快.尽管我国的建筑与房地产取得了很大的进步,但与世界发达国家人均住房面积  $30 \text{ m}^2$  相比,我国人均居住面积的水平还是很低的.同时,与人民群众的住房面积和质量需求相比,也还有较大的差距.我国政府已经把住宅建设作为今后我国国民经济的一个的新增长点.可以预计,在今后很长一段时期内,我国住宅面积的数量还会有相当大的增长.

据国家发展改革委员会 2003 年的发展白皮书统计<sup>[1]</sup>,2002 年我国一次能源生产总量为 13.87 亿 t 标准煤,比上年增长 18.5%.建筑面积的快速增加意味着建筑能耗也越来越大,据中国建筑科学院情报研究所统计资料显示:我国年建筑能耗已达到 16 160 万 t 标准煤,每平方米建筑耗能达到 23.8 kg 的标准煤.目前,我国的经济还处在粗放型的资源消耗型阶段,以我国最发达的上海为例,上海能源利用率每吨煤工业产值仅为 4 600 元,而一般地区每吨煤工业产值仅为 1 800 元.与粗放型资源消耗的经济模式相对应的是,全社会尚未形成节能的概念,同时导致我国的能源供应远远跟不上能源消耗的增长速度.从 2003 年以来,全国大面积地出现“油荒”,“电荒”和“煤荒”,仅在 2003 年,由于空调负荷而限电拉闸的省份就达到 17 个,2004 年入冬以后,由于天气变冷,供暖需求增加,我国又发生了多年非常罕见的冬季拉闸限电,严重影响了人们的生活.在 2004 年,中国首次超过日本成为全球第二大石油进口国,而中国所创造的 GDP 只有日本的 1/4 左右,何况中国还自己生产大量的石油和煤炭.所以能源供给甚至成为了制约我国经济发展和影响国家安全的大问题.

收稿日期:2004-09-09

基金项目:国家十五科技攻关项目(2002 BA 806 B02)

作者简介:李志生(1972-),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为建筑环境与设备工程及其自动化.

建筑能耗作为社会总能耗的一个消耗终端之一,随着房屋建筑特别是住宅建筑的不断增加,其能耗将大幅上升.1999年我国建筑能耗占总的能耗为27.8%,根据工业发达国家的经验,建筑能耗将占总能耗的35%<sup>[2]</sup>左右.发达国家都把建筑节能看成建筑技术政策的一个重要课题,因此,他们在建筑设计、施工和投产运行阶段都制定措施来鼓励节能<sup>[3]</sup>.

我国是能源大国,但是人均能源占有率低于世界平均水平,且能源利用率很低.中国的能源利用率与工业发达国家有很大的差距,建筑能耗也是如此.例如,作为我国经济比较发达的北京市,其相同类型商业建筑的单位面积能耗比气候条件差不多的日本多40%以上,其住宅供暖能耗比同纬度的北美和西欧多50%~100%.1995年以后,尽管我国实施了新的住宅供暖能耗标准,北京市的能源消耗(20.6 W/m<sup>2</sup>)仍然差不多是瑞典(11 W/m<sup>2</sup>)的2倍.能源利用率低不仅造成能源的巨大浪费,而且给环境带来严重的污染.我国能源利用效率与国外的差距表明,节能潜力巨大.根据有关单位研究,按单位产品能耗和终端用能设备能耗与国际先进水平比较,目前我国的节能潜力约为3亿t标准煤.随着能源危机的加重,环境保护意识的增强,怎样提高能源利用率将成为我国节能的首要问题之一.当前,“绿色建筑”和“生态建筑”逐渐成为建筑的发展趋势,如何以对环境的最小影响来建造建筑,如何以最小的能耗来维持建筑使用寿命,推动全社会开展节能降耗,缓解能源瓶颈制约,建设节能型社会,促进经济社会可持续发展将成为建筑产业的一个重要目标.

## 2 亚热带地区的气候特点与建筑热环境

亚热带地区或气候是个很笼统的名词,例如香港就是位于亚热带<sup>[4]</sup>.亚热带地区气候泛指介于环绕赤道的热带与温带两者之间的气候.例如我国东南部、美国南部、南美洲中部、非洲北部和南端、及澳大利亚东部.每处地方的实际天气也会受地理、山势、海洋和自然现象所影响而有所变化.在气候学里还可按干湿程度、季候风的影响,再细分为若干气候带<sup>[5]</sup>.在中国的版图上,亚热带是大约从北纬15至27左右的地区,按中国建筑气候区划分,大致相当于A、B、C、A和B等二级气候区,即包括广东、广西、福建、台湾,以及云南、湖南和江西的一些地方(见表1).这些地方属于“夏热冬暖”及“温和”的建筑气候区,与国际制冷学会(IIR)于1994年在《Heat pump survey, China》报告中定义的“过渡区”有一些交叉<sup>[6]</sup>.

表1 亚热带气候区对应的建筑气候区

气候区			气象参数		
一级气候区	二级气候区	对应地区或城市	1月平均气温/	7月平均气温/	最大风速/(m·s <sup>-1</sup> )
	A	上海		26~29	25
	B	长沙	0~10	28	<25
	C	重庆		<28	<25
	A	湛江	>10	25~29	25
	B	广州	>10	25~29	<25

广州地区是典型的亚热带气候,亚热带地区的气候特点是夏季时间长,高温高湿气候持久,湿负荷大.最热月14时的平均气温达32~33℃,而室内温度一般又高于室外1~2℃.再加上这些地区水网地多,十分潮湿,湿度常保持在80%左右.由于人体汗难以挥发,普遍感到闷热难受(见表2).人体热反应认为:围护结构内表面温度的最高值如不超过人体皮肤平均温度,约

33 ~ 35 较为合理,高于此值,人们将感受到明显的热辐射,尤其是在 36 以上,身体的热感极其明显.

表 2 我国亚热带地区主要城市的夏季气象参数

主要参数	广州	海口	厦门	福州	南宁	上海	长沙
夏季室外最高温度/ 相对湿度/%	35.6	36.3	35.5	37.2	36.7	36.1	37.9
	83	83	81	78	82	83	75

基于历史和发展原因,对炎热地区建筑节能的处理手法比较单薄,仍不够健全.亚热带建筑节能需要考虑的因素,有些是跟其它气候区无多大分别,但也有一些不太相同的地方,应该细心研究与比较,才能发挥本身地域特性和建筑设计的特色.亚热带地区建筑节能有一些不利因素,例如炎热的室外气温、猛烈的太阳辐射、潮湿的室外空气、难测的下雨和风暴.怎样有效地满足冬季的采暖需求,有时候也是非常伤脑筋的问题.当然,亚热带气候也有些特点对建筑设计有一定帮助,或是具有节能潜力,例如春秋季节(有时包括冬季)清凉之室外气温、季节风有良好的通风效果、太阳能资源丰富(可作日光、太阳光发电和热利用)及昼夜辐射不同特性等.

亚热带地区夏季热环境较差,其原因首先是气候条件所致;其次是通风方案不当,对于不用空调的住宅,以持续自然通风为降温主措施,效果不尽如人意;其三是围护结构隔热性能不良.亚热带地区外墙普遍采用 180 mm 厚墙,因造价限制,大多数的外墙是采用红砖或灰砂砖.架空通风屋面虽有一定的隔热效果,到炎热夏天,其内表面最高温度仍高达 39 左右;窗户是隔热的薄弱环节,空调能耗有一半是通过窗户和阳台门的得热引起的,目前广泛使用的单层窗的隔热性能和气密性都很差.此外,近年来,建筑物窗户面积有增大趋势.我国的亚热带地区经济发达,人口众多,空调使用比率非常高,因此,建筑节能尤为重要.建筑能源效率也引起了政府的高度重视,如广东省政府为了对付日间电力供求的高峰(空调负荷的高峰期),鼓励大力发展蓄冷系统来“移峰填谷”,并制订了优惠的“峰谷差”电价比来减轻电力需求高峰急升的压力.

### 3 嵌入式能量(Embodied Energy)与建筑能源密度(Building Energy Intensity)

#### 3.1 嵌入式能量(Embodied Energy)

从节能的角度,在建筑寿命周期内,低能量的建筑成为提高建筑能源效率的目标和重要的研究课题.建筑是高能耗的产业,因此对人类生存的环境有显著的影响.在建筑寿命循环评价(Life Cycle Assessment, LCA)中,嵌入式能量<sup>[7-9]</sup>(Embodied Energy)使我们对建造建筑需要多少能源以及能源用在什么地方,能源循环所带来的利益是多少有一个清晰的理解.因此常用来进行建筑能源效率分析和节能研究.1983年,维多利亚大学的 Baird 和 Chan<sup>[10]</sup>发表了一篇报告,提出了嵌入式能量的概念.它被定义为完成各种活动(Activity)以及相联系的产品生产过程中所需要的能量数量,包括获取原材料、运输、建造、运行、回收等方面的能耗总和.举例来说,一块黏土砖,包括挖取黏土,运输到砖厂,做成砖的土胚,在砖窑中高温烧结,然后运输到建筑工地,最后被砌在大楼的墙上,整个过程所消耗的能量和人工成本之和,就是这块砖的嵌入式能量.又例如,一栋建筑的嵌入式能量,就包括各种建筑材料本身的嵌入式能量,以及运输、建造、维修、维护、运行乃至拆除(Demolition)和建材回收(cycle)所需要的能量总和.嵌入式能量更精确的解释是:累积的能量需求(Cumulative Energy Demand),因为它代表了各个阶段输入产品或系统的各种

能量之和. 嵌入式能量的单位是 MJ/kg. 以建筑的嵌入式能量来说, 它的大小主要取决于地理位置, 加工工程中的技术水平, 自动化程度, 机械化水平和制造方法等. 表 3 和表 4 说明了各种建筑材料嵌入式能量的大小<sup>[11-12]</sup>.

由于建筑对环境的影响可以用所产生的 CO<sub>2</sub> 总量来表示<sup>[13]</sup>, 并且能源消耗的最终结果也会产生 CO<sub>2</sub>, 所以可以用的 CO<sub>2</sub> 总量来表示建筑的能源消耗嵌入式能量, 也就是说, 只要控制了 CO<sub>2</sub> 的排放量, 相当于控制了能源消耗. 从表 3 可以看到, 发达国家(如美国)能耗比发展中国家(如印度)能耗要低, 从表 4 可以得出, 钢材的嵌入式能量比水泥的要高. 一般来说, 平均每 0.098 t CO<sub>2</sub> 的排放量相当于 10<sup>9</sup>J 的嵌入式能量<sup>[10]</sup>.

在建筑的建造过程中, 建筑的设计和建材的选择对嵌入式能量大小以及建筑对环境的影响是非常显著的, 但以前很少被注意到. 现在嵌入式能量大小已经成为衡量建筑能源效率的指标之一.

建筑寿命周期包括原材料生产(包括原材料运输), 建筑物建造、运行、维护和拆除的时间. 所以建筑节能也应包括建筑原材料的节能、建造过程的节能、运行和维护过程的节能. 大量研究表明<sup>[13]</sup>: 建筑运行的能耗占了绝大部分, 而建筑原材料的生产仅占 10% ~ 15%. 建筑运行过程中的能源需求随建筑的围护结构绝缘性能的提高而下降, 所以建筑运行能耗也跟建筑材料有关.

### 3.2 建筑能量密度 (Building Energy Intensity)

建筑能量密度跟嵌入式能量有关, 它指的是制造或生产某单位质量的产品, 需要输入的嵌入式能量之和<sup>[11]</sup>. 从表 4 得知, 建筑材料依能量密度, 可以分为高能量密度, 中等能量密度和低能量密度材料 3 种. 嵌入式能量高的建材, 其建筑能量密度就大, 反之, 就小. 建筑能源消耗可以分为直接的能源消耗和间接的能源消耗. 建筑直接能源消耗指建筑运行过程中所消耗的能源, 如建筑采暖、空调、通风、消防、电梯和照明过程中所需要的热负荷, 而建筑间接能源消耗是指建筑材料生产、运输和建造过程中所需要的能量(包括人力). 一般来说, 建筑的直接能耗要比间接能耗大很多倍. 尽管建筑材料生产过程中能耗占建筑总能耗的比重很小, 但决不可能忽略. 表 5 说明了建筑总能耗(直接能耗和间接能耗)的情况. 同样类型和性质的建筑材料, 由于运输距离的不同, 嵌入的能量就不同, 能源密度也不同, 所以从节能的角度讲, 在满足建筑功能的前提下, 应尽量避免远距离运输和豪华装修的建筑.

## 4 能源效率目标函数

现今建筑节能标准有两大手法: 规限性的 (Prescriptive) 手法和效益为本的 (Performance-based) 手法. 规限性的手法设定每个单元的节能要求, 例如外墙最大传热系数和设备最少能效比率等等. 效益为本的手法则按能耗性能指标控制, 并无规定用什么方法和材料去达成, 所以建

表 3 部分国家每吨基本建筑材料嵌入式能量表 G/t

国家	钢材	水泥
美国	25.4	4.0
日本	17.5	5.0
瑞典	21	5.9
印度	39.7	8.4

表 4 几种主要建筑材料的嵌入式能量(累积能量)大小

	材料	需要的能量 (G/t)
高能量密度材料	钢材	30 ~ 60
	锌	> 25
	玻璃	10 ~ 25
	水泥	5 ~ 8
中能量密度材料	石灰	3 ~ 5
	砖	0.8 ~ 3.5
	塑料	1 ~ 4
低能量密度材料	沙子	< 0.5
	砾石	

建筑师有较大的自由度去发挥。早期和现今许多建筑节能标准是规限性比较大的,因为实施起来较为简单、容易。较先进的建筑节能标准会通过全面的节能效益探讨,鼓励创新、灵活和具综合效能的建筑设计。推行这些标准最大的困难就是节能判别比较复杂和不易掌握。

这里介绍一种效益为本的建筑能源效益评价方法,即国外常用的建筑能源效率分析目标函数<sup>[14-15]</sup>:

$$\text{建筑寿命期内总成本} = \sum_i c_i a_{ij} x_j + \sum_q w_q d_{qj} x_j$$

上式中,以建筑寿命期内总成本最小为优化函数,其中  $c_i$  是相应于  $i$  个中间活动(见表 5,指运输、建造、运行等……)所对应的输入成本的系数, $a_{ij}$  是第  $i$  个中间输入产生第  $j$  活动所对应的单位输出, $x_j$  是第  $j$  个活动的生产技术的水平。 $w_q$  是  $q$  类型劳工的工资水平, $d_{qj}$  是所直接雇佣的  $q$  类型劳工生产出来的第  $j$  个活动所对应的单位产品。

通俗地讲,上式中,要使建筑能源效率高,即要使建筑节能,在整个建筑寿命期内,要使目标函数最小。对上式来说,前面部分是中间过程的能量输入,以嵌入式能量表示,如砖、瓦、水泥、玻璃……从原材料生产开始,到运输、建造、使用、维护乃至建筑寿命过程结束的一切过程的一切产品和中间产品;后面部分是直接的劳工成本,也用嵌入式能量来表示,如广州地区一个建筑工人每天工资 40 元,一个项目经理每天工资 400 元,总劳工成本也换算成能量(如能购买多少石油相当的能)。这样,如果建筑寿命期内总成本较低,就说明这个建

表 5 建筑生产和运行过程中平均每平方米地板面积所需要的能量

建筑过程	需要的能量	
	E/MJ	E/(kW·h)
建造总能量 (建筑寿命内)	7033	1954
建材生产	5526	1535
出厂储存、转运	473	131
运到建筑工地	158	44
建筑材料、设备维护	832	231
运输回收建材	44	12
50 a 内运行总能量	8205	2279
空间加热量/a	18	5
热水/a	45	13
照明/a	84	23
泵、风扇/a	17	5

筑是节能的,能源效率高。当然,这个目标函数要优化的话,必须加上各种约束条件,如资源约束条件、雇工工资条件、工程约束条件等等。前面提到过,建筑的嵌入式能量大小主要取决于地理位置,加工工程中的技术水平,自动化程度,机械化水平和制造方法等。这就可以说明,为什么在某些不发达地方,使用简单的沙石和木材,使用很少的机械,建造一间房子需要的嵌入式能量反而比发达国家要小。因为,投入的人工低,科技含量低,使用简单的材料,使建造过程中需要的能量小,但建筑的气密性、隔热性、功能等方面未必比嵌入性能量大的建筑材料好,那么将来在建筑寿命期内,运行起来也许需要输入更多的能量才能达到相同的功能,或要么达不到与较大建筑能源密度建材建成的相同功能的建筑。

在大多数发展中国家,劳动力成本,特别是非熟练劳工成本与材料成本、运输成本和设备成本比较,是相对低的。有证据显示,发达国家的建筑材料能耗占建筑间接总能耗的 70% 左右,剩下的 30% 能耗是由于与建造过程相关而发生的能耗。而发展中国家,在建材生产过程中的能耗要占到 90%~100%。研究表明,建筑节能效果好的房子,其建材能耗占 40%~60%,换句话说,

即使是运行能耗占总能耗低的建筑,对一个寿命为 50 a 的建筑来说,其总能耗也有可能比使用高能耗建材的建筑高.由于在建筑寿命期内,建筑的运行费用和建造费用有一定的比例关系,所以可以用运行能耗和建造能耗作为参考,又由于建材能耗代表了建材的成本,所以也可以用建材成本考察建筑的能源利用问题.

## 5 亚热带地区节能建筑的开发

我国建筑节能的潜力还很巨大,特别是我国的亚热带地区,基本上是人口稠密,经济发达的南方和沿海地区.当前,建筑节能成为贯彻可持续发展战略和实施科教兴国战略的一个重要方面,引起了各级政府的高度重视,如国家首部住宅性能国家标准即将出台,中国空调能效国家标准已经实施.再比如重庆市建委制定了一个重庆市建筑节能的 5 年规划(2005 年到 2010 年),在网上进行了发布,两次进行修订,上海地区公共建筑节能设计标准也已经出台.

寒冷气候地区的节能标准往往只针对建筑保温,未必符合亚热带地区的需求.很多亚热带地区的夏季气候,跟热带地区的相差不远,只是热的程度稍低和日期比较短而已.既然彼此气候相近,热带的建筑设计和节能标准相信可以为亚热带地区所借鉴.热带或亚热带地区的建筑节能工作通常会先从商业建筑入手,控制高层建筑的空调制冷和各类建筑设备,这样比较符合和暖地区和现代化都市的建筑特点.获得实际经验之后,日后再把节能标准扩展到其它建筑上(例如住宅建筑),是顺理成章的发展.

综观近代世界上建筑节能标准的发展,以美国以及一些东南亚国家(例如新加坡)最为显著<sup>[16]</sup>,它们为亚热带地区建筑节能提供了宝贵经验,成为一些新兴地区制订建筑节能标准时的重要参考数据(例如香港).最早由美国 ASHRAE Standard 90A - 1980 引入的 OTTV (overall thermal transfer value,综合热传值)就被许多国家所引用和遵从.

以亚热带城市广州来说,多层建筑外墙一般采用页岩实心砖,高层建筑一般采用加气混凝土砌块、混凝土空心砌块或页岩空心砖,剪力墙结构则采用普通钢筋混凝土墙,一般不再作保温隔热处理,其热工性能均不能满足亚热带气候对墙体的热工要求.窗户一般采用铝合金单玻璃窗或塑钢单玻璃窗.现在的发展商为了追求美观,窗墙面积比普遍偏大,外墙很少采用外遮阳措施,窗户的能量损失很大.虽然广州市大多数的屋面作保温隔热处理,但传热系数普遍达不到要求.再比如,亚热带气候在过渡季节有大量的室外冷负荷可以使用,在商场,剧院等人多的场合,只需要开启通风设备就可以,节省大量的能源,也保证了室内的空气品质.

目前亚热带地区建筑节能主要的弱点是宣传的广度、深度不够,民众的节能意识淡薄,很多业主、发展商甚至政府往往只注重建筑的初次投资,对运行成本和建筑寿命期内的总成本没有清醒的认识.其次是政府对建筑节能的投入过少,由于资金短缺,许多建筑节能研发项目难以进行,建筑节能技术水平较低.建筑节能的监管体系不健全,仅有的节能标准也执行不力,执法不严,监督不力,这些都使建筑节能效果大打折扣.

## 6 结论

通过本文的分析,可以得到如下结论:

- 1) 我国建筑节能与国外发达国家有较大的差距,建筑节能将成为可持续发展的重要目标之一.
- 2) 对亚热带地区的建筑节能措施提出了新的观点.亚热带地区的气候特点是炎热的夏季

室外气温,猛烈的太阳辐射和潮湿的室外空气,建筑节能方面的主要措施是要注意建筑的气密性,减少窗户的面积,窗户采用外遮阳措施,加强建筑围护结构的隔热性能,以及过渡季节使用室外的冷负荷等。国外关于热带的建筑设计和节能标准可以为我国亚热带地区建筑节能所借鉴。

3) 嵌入式能量可以用来进行建筑能源效率分析和节能研究,它能够使人们对建造建筑需要多少能源以及能源用在什么地方,能源循环所带来的利益是多少有一个清晰的理解。建筑(建材)嵌入式能量越大,建筑(建材)的能量密度越大,需要投入的成本越多,对环境的影响(排放的  $\text{CO}_2$ ) 越大。

4) 在建筑寿命周期内,建筑能源效率分析目标函数包括了建筑的建造、运行、管理等过程中一切活动和原材料的总能耗,如果只有在建造阶段使用嵌入式能量小的建材,而对建筑使用过程中的能耗和技术考虑不足的话,则整个建筑寿命期内未必节能,只有把包括人工在内的建筑能源效率目标函数最小化,才能使建筑在整个寿命期内最节能。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国民经济和社会发展第十个五年计划能源发展重点规划[R/OL]. [2004-06-28] <http://www.sdpc.gov.cn>.
- [2] Yingxin Zhu, Borong Lin. Sustainable housing and urban construction in China[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(12): 1289-1297.
- [3] Janda K B, Busch J F. Worldwide status of energy standards for buildings[J]. Energy, 1994, 19(1): 27-44.
- [4] Joseph C Lam. Energy analysis of commercial buildings in subtropical climates[J]. Building and Environment, 2004, 35(1): 19-26.
- [5] 张家诚, 林之光. 中国气候[M]. 台北: 明文书局出版社, 1987. 22-58.
- [6] 颜侗明. 风冷式热泵技术在我国现状与发展问题[C]//2001年全国热泵和空调技术交流会论文集. 宁波: 中国暖通空调协会, 2001.
- [7] Tharmark C. Calculation of a building's recycling capacity concerning building materials and embodied energy[C]//E. Parzhauser. Proceedings for the International symposium CIB W67 International. Vienna: Austrian patent Nr. AT, 1996.
- [8] Crowther P. Design for disassembly to recover embodied energy[C]//Lawson. The 16<sup>th</sup> International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Melbourne: The council of the European Communities, 1999.
- [9] Wackernagel M. Ecological Footprints of Nations[OL]. [2003-08-13] <http://www.strategicdata.co.nz/mukhtar/sam2.htm>.
- [10] CSIRO MANUFACTURING & INFRASTRUCTURE Technology[OL]. [2002-12-18] <http://www.cmit.csiro.au/btochures/tech/embodied>.
- [11] Shonali Pachauri, Danil Speng. Direct and indirect energy requirements of households in India[J]. Energy Policy, 2002, 30(6): 511-523.
- [12] Bullard C W, Herendeen R. The energy costs of goods and services[J]. Energy Policy, 1975, 3(4): 268-278.
- [13] Catarina Thormark. A low energy building in a life cycle-its embodied energy, energy need for operation and recycling potential[J]. Building and Environment, 2002, 37(4): 429-435.
- [14] Piyush Tiwari. Energy efficiency and building construction in India[J]. Building and Environment, 2001, 36(10): 1127-1135.
- [15] Tiwari P, Parikh J, Sharma V. Performance evaluation of cost effective buildings-a cost, emissions and employment point of view[J]. Building and Environment, 1996, 31(1): 75-90.
- [16] Lam J C, Hui S C M. A review of building energy standards and implications for Hong Kong[J]. Building Research and Information, 1996, 24(3): 131-140.

(下转第 13 页)

in rules. The conclusion can be used in the design of CFST joint.

**Key words**: concrete-filled tube ; joint ; moment ; axial force ; mechanics performance

---

(上接第 7 页)

## Building Energy Efficiency and Energy Saving Analysis in Subtropical Climates Zone

LI Zhi-sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-qiang<sup>2</sup>, LIU Jiang-long<sup>2</sup>

(1. Faculty of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510090, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, 410082, China)

**Abstract**: The presentation about the gap of building energy saving between China and other countries is illuminated, and the features of embodied energy and building energy intensity are also narrated. Moreover, the introduction is present about the features of subtropical climates, thermal-humidity load and the energy consumption of building materials and construction process. The building total energy consumption involves construction and operation energy, so it can't be done only to consider building original investment or operation cost. On the contrary, it convicts that it is helpful to building energy saving to minimize energy intensity embodied in building lifetime.

**Key words**: subtropical ; building energy efficiency ; energy embodied ; building energy intensity ; energy saving