

# 被动式低能耗建筑围护结构 关键技术与材料应用

彭梦月

(住房和城乡建设部科技与产业化促进中心, 北京 100835)

**摘要:**通过分析中德被动式低能耗建筑示范项目的关键技术和材料的应用,说明被动式低能耗建筑与我国常规节能建筑在细部构造、关键产品应用、热桥和建筑气密性处理等方面的差异。

**关键词:**被动式低能耗建筑;围护结构;关键技术

**中图分类号:** TU111.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-702X(2015)01-0077-06

## Application of key technology and materials in the building envelop of passive house and low energy buildings

PENG Mengyue

(Science and Technology Promotion Center under Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100835, China)

**Abstract:** Analyze the difference between passive low energy building and conventional energy efficient building in China in terms of design and construction details, key products application, treatment of thermal bridge and improvement of airtightness based on analysis of application of key technology and materials in Sino-German pilot projects for passive house and low energy building.

**Key words:** passive house and low energy building, building envelop, key technology

我国自2008年开始,引进欧洲高效建筑——被动房的理念,积极探索、开发和推广适宜我国国情的被动式低能耗建筑以减缓建筑领域对气候变化的影响。2009年至今,住房和城乡建设部与德国能源署合作在全国开展了中德被动式低能耗建筑示范项目27个(截至2014年8月),总建筑面积约为50万m<sup>2</sup>,涉及全国4个气候区8个省,其中山东与河北发展势头尤为迅猛,示范项目数占现有总量约70%。

被动式低能耗建筑是采用各种节能技术构造最佳的建筑围护结构,最大限度地提高建筑保温隔热性能和气密性,使建筑的采暖和制冷需求降到最低。在此基础上,通过最大限度利用被动式手段,如自然通风、自然采光、太阳辐射得热、室内人体及设备散热等实现室内舒适的湿热环境和采光环境,从而最大限度降低对主动式机械采暖和制冷系统的依

赖或完全取消此类设施。在北方采暖地区,被动式房屋能极大地降低冬季采暖需求,减少夏季空调时间,显著提高室内舒适度和空气质量。在夏热冬冷地区和炎热地区,被动式房屋能解决冬季室内发霉结露,使室温在无供暖系统情况下保持18℃以上,夏季缩短空调时间且有效除湿,从而在不增加能源消耗的情况下显著改善该地区的居住舒适度。

## 1 被动式低能耗建筑

在北方采暖地区,与传统节能建筑相比,基于德国标准的中国被动式低能耗建筑不仅围护结构的热工性能更为卓越,而且对于建筑气密性、通风系统、室内温湿度和空气质量要求更高。被动式低能耗建筑与传统节能建筑相比,其关键技术包括:(1)高效保温隔热系统(外墙、屋面和地面等);(2)高效门窗系统;(3)无热桥的设计与构造;(4)卓越的建筑气密性;(5)带高效热回收的新风系统;(6)与可再生能源结合的辅助供热制冷。本文着重介绍围护结构的关键技术和材料的设计与应用。被动式低能耗建筑与我国节能建筑的能效比较见表1,室内环境比较见表2。

收稿日期:2014-11-13

**作者简介:**彭梦月,女,1976年生,重庆人,硕士,副研究员,从事建筑节能政策技术与推广。地址:北京市三里河路9号,E-mail: peng\_my12@163.com。

表 1 被动式低能耗建筑与我国节能建筑的能效比较

项目	德国节能建筑 (EnEV2014)	德国被动房	我国节能 65%居住建筑 (JGJ 26—2010)	
			秦皇岛 (寒冷地区)	哈尔滨 (严寒地区)
屋顶传热系数 /[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	≤0.20	≤0.15	≤0.45	≤0.25
外墙传热系数 /[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	≤0.28	≤0.15	≤0.60	≤0.40
外窗传热系数 /[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	≤1.1	≤0.8	≤2.0	≤1.6
最大采暖负荷 /(W/m <sup>2</sup> )	-	10	32	-
采暖需求 /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	30	15	45.53	73.35
制冷需求 /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	-	15	-	-
总一次能源需求 /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	-	120	-	-
新风系统 热回收效率/%	≥70	≥75 <sup>①</sup>	-	-
通风系统	机械通风或 窗户通风	带热回收的 新风系统	自然通风	自然通风
采暖制冷系统 (示例)	冷凝式锅炉	热泵/ 生物质 颗粒	集中供暖(热电联产、燃 煤燃气锅炉)	

注:①电耗不超过 0.45 W·h/m<sup>3</sup>。

表 2 被动式低能耗建筑与我国节能建筑室内环境比较

指标	被动式低能耗建筑	我国节能建筑
室内温度/℃	20~26	18
局部温差(水平温差) /℃	≤3(墙体表面与 室内空气温差)	
空气相对湿度/%	40~60	
室内二氧化碳含量 (居住空间)/%	≤0.1	
室内噪音控制/dB	卧室≤30; 起居室≤35	卧室≤37; 起居室≤45
超温频率/%	10	
室内风速/(m/s)	0.15	0.2~0.3

## 2 高效保温隔热系统

### 2.1 外墙外保温

以 B1 级的模塑聚苯板(EPS)为保温材料的外墙外保温系统是被动式低能耗建筑主要采用的保温形式。在寒冷地区,被动房保温层厚度通常为 200~250 mm,以实现较好的保温效果。为了降低保温层厚度,被动房越来越多采用改性的 EPS 板,俗称灰板(Neopor),导热系数≤0.032 W/(m·K)。该板由于

添加了红外吸收剂能更好地吸收、反射热辐射,从而极大地提高材料的保温隔热性能。施工过程中,施工人员必须按照正确的施工工艺和顺序排板、计算和布置锚栓、粘接并锚固板材,避免出现通缝、裂缝或板材之间缝隙过大等质量问题。多层的保温层必须采用错缝敷设,以保证内层的缝隙不暴露在外。门窗洞转角处应采用斜向增强网,呈 45°,避免开裂。

除了选用高质量的保温材料,完整的外墙保温系统还需配备各种配件,如窗口连接线条、滴水线条、护角线条、伸缩缝线条、断热桥锚栓及止水密封带等,从而提高了外保温系统的保温隔热、联接稳定、防水透气性能,保证了系统的耐久性、安全性和可靠性。

被动式低能耗建筑设置防火隔离带宜高于国家现行的防火规范要求。由于建筑保温层厚度通常大于 100 mm,为了降低高厚度保温系统的火灾风险,通常每层设置宽度不小于 300 mm 的环绕型防火隔离带。防火隔离带采用与 EPS 板等厚度的不可燃材料(如岩棉)设置于门、窗、过梁处,且必须超出两侧窗框至少 300 mm,防火隔离带距窗洞口上檐不超过 500 mm。防火材料必须与基层墙面满粘,并用锚栓加以固定。外墙外保温系统构造见图 1,防火隔离带构造见图 2,外墙外保温系统构件见图 3。

与被动式低能耗建筑相比,我国节能建筑外保温系统的差距在于:(1)保温层厚度偏低,保温隔热效果不够好;(2)保温材料质量参差不齐,低价劣质材料大量使用;(3)外保温施工没有引入系统供应商机制,通常由开发商或总包单位分别采购材料,系统内各材料匹配和兼容性差;(4)缺乏精细化的施工工艺,施工粗放随意,不符合相关规范要求。

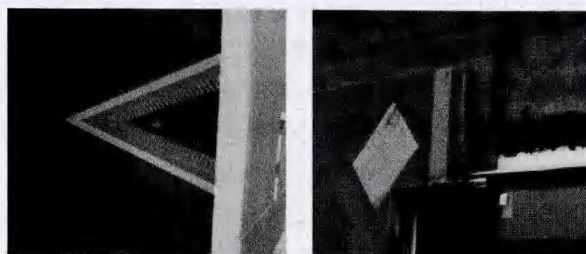


图 1 外墙外保温系统构造

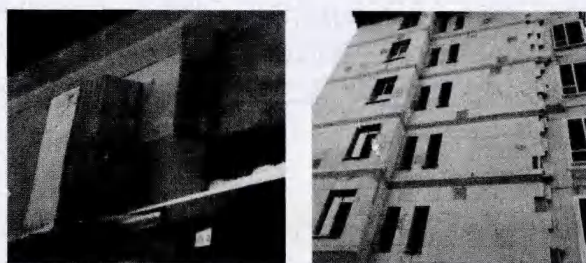


图 2 防火隔离带构造

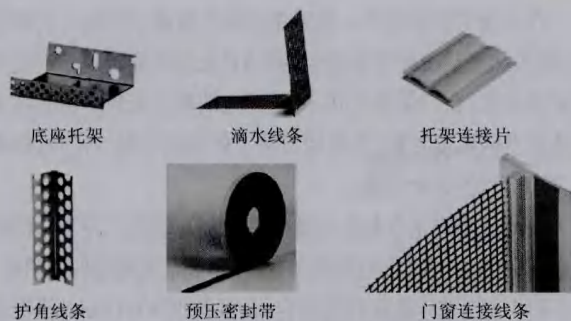


图3 外墙保温系统构件

## 2.2 屋面保温(檐口、女儿墙)

一般而言,由于屋面流失的热量较大,被动式建筑屋面保温比外墙保温层厚度大,且采用抗压强度和防水性能更好的保温板(如 XPS)上下各有一层防水,其中靠近室内房间一侧应是防水隔汽层,靠近室外一侧是防水透气层。其目的是防止室内的水蒸气进入保温系统又散失不出去,从而破坏保温系统的耐久性。《河北省被动式低能耗居住建筑节能设计标准》(送审稿)中对屋面用防水隔汽层和防水透气层的要求分别见表3、表4。

表3 被动式低能耗建筑屋面用防水隔汽层的性能指标

项目	性能指标	试验方法
拉伸力/(N/50 mm)	纵向 $\geq 120$ ;横向 $\geq 180$	GB/T 328.9—2007
断裂伸长率/%	纵向 $\geq 70$ ;横向 $\geq 60$	GB/T 328.9—2007
撕裂强度(钉杆法)/N	纵向 $\geq 60$ ;横向 $\geq 60$	GB/T 328.18—2007
不透水性 (1000 mm 水柱, 20 h)	不透水	GB/T 328.10—2007
透水蒸汽性 [g/(m <sup>2</sup> ·24 h)]	$\leq 30$	GB/T 1037—1988
低温弯折性(-40℃)	无裂纹	GB 18173.1—2012
耐热度(100℃, 2 h)	无卷曲,无明显收缩	GB/T 328.11—2007

注:GB/T 328.9—2007《建筑防水卷材试验方法 第9部分:高分子防水卷材 拉伸性能》;GB/T 328.18—2007《建筑防水卷材试验方法 第18部分:沥青防水卷材 撕裂性能(钉杆法)》;GB/T 328.10—2007《建筑防水卷材试验方法 第10部分:沥青和高分子防水卷材 不透水性》;GB/T 1037—1988《塑料薄膜和片材透水蒸汽性试验方法 杯式法》;GB 18173.1—2012《高分子防水材料 第1部分:片材》;GB/T 328.11—2007《建筑防水卷材试验方法 第11部分:沥青防水卷材 耐热性》。

表4 被动式低能耗建筑屋面用防水透气层的性能指标

项目	性能指标	试验方法
拉伸力/(N/50 mm)	纵向 $\geq 160$ ;横向 $\geq 220$	GB/T 328.9—2007
断裂伸长率/%	纵向 $\geq 60$ ;横向 $\geq 60$	GB/T 328.9—2007
撕裂强度(钉杆法)/N	纵向 $\geq 140$ ;横向 $\geq 150$	GB/T 328.18—2007
不透水性 (1000 mm 水柱, 20 h)	不透水	GB/T 328.10—2007
透水蒸汽性 [g/(m <sup>2</sup> ·24 h)]	$\geq 300$	GB/T 1037—1988

与普通节能建筑相比,被动式建筑屋面女儿墙的上部、内侧面须全部包裹在防水和保温层内,这样有利于保护主体结构,减少因温度变化引起的应力破坏,避免女儿墙墙体产生裂缝。

女儿墙保温系统上面安装铝合金盖板抵御外力撞击。金属板向内倾斜,两侧向下延伸至少150 mm,并有滴水鹰嘴,防止雨水渗入保温层,提高系统的耐候性。金属盖板的固定有特殊构造,从而避免锚固件产生的热桥。女儿墙防水保温及金属盖板见图4。

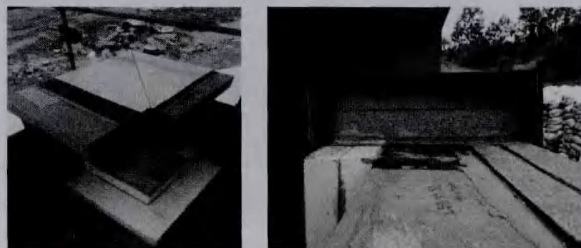


图4 女儿墙防水保温及金属盖板

## 2.3 地下室外墙、散水与地下室顶板

采暖地下室需要在地板和外墙做保温。不采暖地下室需要在顶板和外墙做保温,顶板保温层必须采用不燃材料,且保温层沿外墙内侧垂直方向向下延伸1 m。

冻土层以下1 m自室外地坪以上300 mm处的地下室外墙,应粘接连续的沥青防水层,防水层上面铺设防潮、耐腐蚀且具有高抗压性的保温材料,如泡沫玻璃或XPS板。地坪以上300 mm以上外墙粘接B1级的EPS保温板,泡沫玻璃和EPS板交接处设置高约1 m的折叠性金属雨水导流板,以避免对墙基处保温系统的侵蚀。如果导流板以下的泡沫玻璃出现污损,也便于更换。

在距离外墙300 mm处安装竖向水泥挡板或石头组件,竖向挡板和外墙之间回填沙土,上面铺设散水用鹅卵石。鹅卵石的散水可以将雨水导入土壤,同时防止雨水溅射到外墙上,增强散水美观性。

地下室外墙、散水处理示意图5。

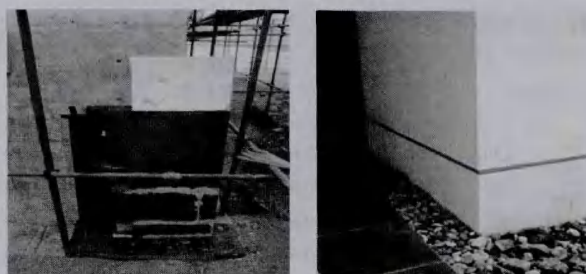


图5 地下室外墙、散水处理

## 2.4 地板保温隔声

首层楼板或地下室地板的保温隔声可采用防水抗压性能

较好的 XPS 板。如果是双层保温板,需错缝铺设,保温板之间的缝隙用胶粉聚苯颗粒保温砂浆密封。首层楼板在保温层下面要先铺设防水层,保温板上再覆盖 1 层 PE 薄膜,作为水蒸气阻隔层,上面浇筑 60 mm 的水泥地面,最后铺设地板面层。楼板与地面均铺设 5 mm 厚隔声垫。并上返到踢脚线高度。隔声垫的设置可显著改善楼板的隔声效果,杜绝楼板传声。

地板防水保温与隔声作法示意图 6。



图 6 地板防水保温与隔声作法

### 3 高效门窗系统

外门窗系统是围护结构保温、防水和气密性最薄弱的环节,通过外门窗损失的能耗通常占建筑总能耗的 30%~40%。因此采用高效节能门窗至关重要。被动房窗户是目前市场上性能最优最节能的窗户,它不仅考虑了窗户的传热系数,还考虑玻璃的太阳能总透射比( $g$  值)、玻璃的选择性系数等多个控制性参数,从而达到既保温隔热、隔声又不影响自然采光的三重目的。被动房窗户通常采用 5~6 腔木框或 PVC 塑料型材,填充高效的发泡芯材保温,采用双 Low-E 三玻两腔中空玻璃,玻璃间充惰性气体(氩气或氪气)或采用复合真空玻璃。玻璃间隔条采用耐候性极好的暖边条,不再使用导热系数高且耐久性较差的橡胶条或铝合金间隔条,整窗的  $U$  值  $\leq 0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。目前国内节能 75% 标准的整窗  $K$  值为  $1.5 \sim 2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。中国建筑玻璃与工业玻璃协会会标 HB 002—2014《被动式低能耗建筑透明部分用玻璃》中对不同地区被动式低能耗建筑透明部分用玻璃光热参数的要求见表 5。

表 5 不同地区被动式低能耗建筑透明部分用玻璃光热参数

气候带	传热系数 $K$ [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]	可见光透射比 $\tau_v$	太阳红外热能总透射比 $g_m$	太阳能总透射比 $g$	光热比 $LSG$	
严寒地区	(A)	$\leq 0.70$	$\geq 0.65$	$\geq 0.20$	$\geq 0.45$	$\geq 1.30$
	(B)	$\leq 0.70$	$\geq 0.63$	$\geq 0.20$	$\geq 0.45$	$\geq 1.30$
	(C)	$\leq 0.70$	$\geq 0.60$	$\geq 0.20$	$\geq 0.45$	$\geq 1.30$
寒冷地区	(A)	$\leq 0.80$	$\geq 0.60$	$\geq 0.20$	$\geq 0.35$	$\geq 1.40$
	(B)	$\leq 0.80$	$\geq 0.55$	$\geq 0.20$	$\geq 0.35$	$\geq 1.40$
夏热冬冷地区		$\leq 1.00$	$\geq 0.55$	$\leq 0.35$	$\leq 0.40$	$\geq 1.40$
夏热冬暖地区	北区	$\leq 1.50$	$\geq 0.50$	$\leq 0.20$	$\leq 0.35$	$\geq 1.40$
	南区	$\leq 1.80$	$\geq 0.50$	$\leq 0.20$	$\leq 0.35$	$\geq 1.40$

在传统节能建筑中,外窗都安装在窗洞口中间,热桥明显,防水和密封设计非常薄弱。被动式低能耗建筑通过改变窗户安装位置、窗户保温方式、采用高效的防水密封材料和防水构造以及应用窗台板,显著地提高了外窗的保温气密性,解决了窗户节点的防水问题。

被动房窗户是安装在主体外墙外侧,借助于左右两侧的角钢固定,锚固件后面有隔热垫片,以降低金属固定件的热桥。整个窗框 2/3 被包裹在保温层内,最多留出 10~15 mm 窗框可视面,形成无热桥的构造。被动房窗户构造示意图 7。

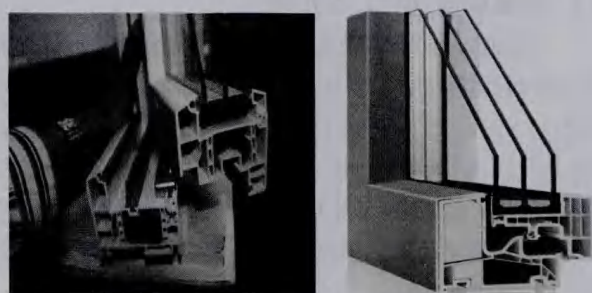


图 7 被动房窗户构造

窗框与窗洞口之间的缝隙填充了自粘性的预压自膨胀密封胶带,窗框与外墙连接处采用防水隔气膜和防水透气膜组成的密封系统。室内一侧采用防水隔气密封布,室外一侧应使用防水透气密封布,从而在构造上完全强化了窗洞口的密封与防水性能。与传统泡沫胶相比,此类密封布具有不变形、抗氧化、延展性好、防水透汽性能好、寿命长等特点。保温系统上设计安装了金属窗台板,窗台板有滴水线造型,从而既保护保温层不受紫外线照射老化,也导流雨水,避免雨水对保温层的侵蚀破坏。《河北省被动式低能耗居住建筑节能设计标准》(送审稿)中对可抹灰外围护结构门窗洞口的密封材料性能的要求见表 6。

表 6 可抹灰外围护结构门窗洞口的密封材料性能

项目	室外一侧防水透汽膜性能指标	室内一侧防水隔汽膜性能指标	试验方法
最大抗拉强度 / ( $\text{N}/50 \text{ mm}$ )	纵向	$>450$	DIN EN 12311-2/A
	横向	$>80$	
最大伸长率 / %	纵向	$>20$	DIN EN 12311-2/A
	横向	$>90$	
燃烧性	B2 级,一般可燃		DIN 4102-1
气密性	燃烧等级 E		DIN EN ISO 11925-2
水密性-抗暴风雨性	气密		DIN 4108-7
$S_d$ 值/m	$>200 \text{ mm}$ 水柱		DIN EN 20811
	$>50$	$<0.2$	DIN EN ISO 12572
			DIN EN 1931

目前国内几乎没有生产和使用该类密封布,也无相关的产品标准。《河北省被动式低能耗居住建筑节能设计标准》(送审稿)中,该产品引用了欧盟的标准,被动式低能耗建筑示范项目则需要进口相关材料。

被动房的门  $U$  值也要  $\leq 0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,要求保温、气密、防火、防盗 4 大功能兼备,其安装方式及气密性的处理和窗户基本一致。窗户的安装保温及窗台板构造见图 8,外窗预压膨胀密封条见图 9,外窗防水隔气密封布见图 10。



图 8 窗户的安装保温及窗台板构造

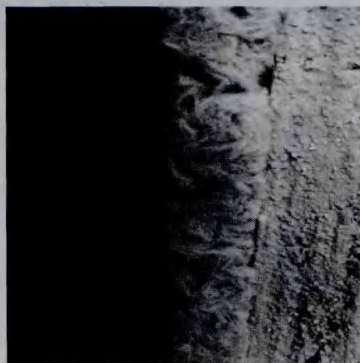


图 9 外窗预压膨胀密封条



图 10 外窗防水隔气密封布

## 4 无热桥的设计与构造

建筑热桥包括:几何热桥(如墙角)、材料传热差异形成

的热桥(如钢筋水泥和加气混凝土砌块搭接部位)、集中热流形成的热桥(如贯穿部位造成空气泄露)以及建筑构件保温层厚度不一致造成的热桥。我国的节能建筑缺乏有效的热桥处理措施和构造,而欧洲的被动式低能耗建筑在热桥设计方面有较为可行的构造和构件。核心原则是避免出现结构性热桥,如将采暖楼梯间布置在采暖空间外,从基础处与建筑主体断开,建筑立面的突出构件(平台、阳台)与保温主体结构之间隔断并进行保温隔热处理,与地面接触的基墙部位通过一圈具有一定承重能力的保温垫块实现上部墙体与地面间的热隔断等。以下介绍几种主要热桥的处理方法。

### 4.1 阳台的处理

突出建筑外立面的悬挑阳台建筑中明显的热桥薄弱环节,在欧洲国家被动房设计中往往采用 2 种方式减少热桥:(1)采用预制独立式钢结构阳台(见图 11),通过锚固件固定在建筑结构上,通常适用于多层建筑;(2)采用无热桥阳台专用构件(见图 12),该构件由高性能的保温材料和高强度水泥板构成,通过高强度钢筋将阳台板与室内楼板连接,从而有效地阻断阳台热桥。



图 11 预制钢结构阳台

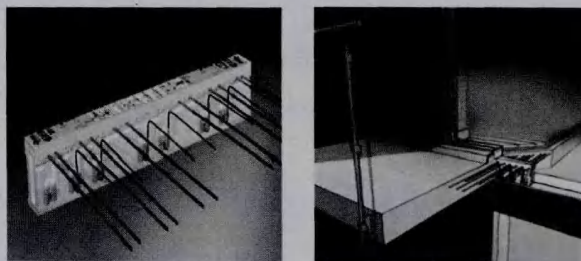


图 12 无热桥阳台专用构件

在国内的示范项目中,考虑到建筑设计规范的限制,且当前无法引进专用构件,项目采用了折衷的构造设计,即阳台板与主体结构断开,中间填充与外墙同厚度的保温材料,阻断热桥(见图 13)。阳台板靠挑梁支撑,保温材料将挑梁整体包裹。



图 13 减少热桥的阳台构造设计

阳台门框部位也应尽量用保温材料进行覆盖,阳台门应设计为朝内开,否则将因无法用保温材料包裹门框而产生热桥。阳台护栏不应安装在混凝土楼板、柱或女儿墙垂直上方,而应在侧面,以防止连接部位的防水层受损,进而导致保温层渗水,破坏保温系统。阳台护栏的防渗水处理见图 14。

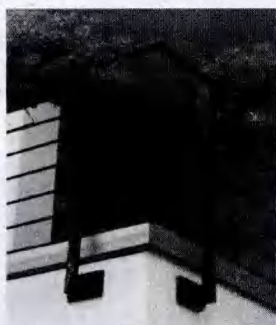


图 14 阳台护栏的防渗水处理

#### 4.2 外墙金属支架的无热桥构造

外墙上的各种支架如空调支架、太阳能热水器支架和雨水管支架都属于系统性热桥。传统工艺通常是保温做完后,再安装相应的支架,从而直接破坏保温系统的完整与密封性。正确方法是不要直接穿透保温层,要事先规划和预留金属构件安装的部位(见图 15)。金属构件和主体结构之间宜采用 20 mm 的隔热材料,如泡沫玻璃、石膏板等,然后将金属构件完全包裹在保温层里。

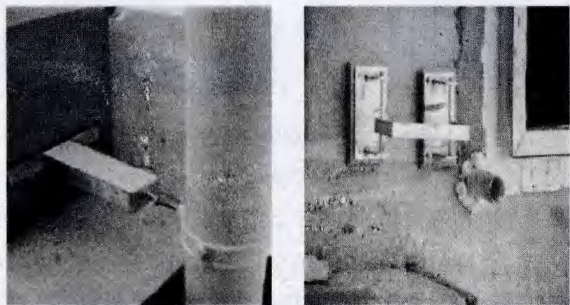


图 15 外墙支架断热桥的处理

## 5 卓越的建筑气密性

气密性是决定建筑能效的核心要素之一。保障建筑气密性并不是限制住户主动开窗透气意愿,而是在需要采暖或制冷时期,避免室内外空气通过建筑缝隙和漏点“无控”进行交换,造成热(冷)量的损失或高湿度对建筑构件的破坏。建筑的气密性由连续不断的内抹面、防水、密封性的连接材料和构件共同构成,而施工质量在很大程度上决定了建筑的气密性水平,是精细化施工的集中体现。气密性的主要处理方式主要有:

(1) 重视抹灰对于提高建筑密封性的重要性。建筑基墙从上到下、门窗洞口进行无断点的抹灰处理;燃气开关箱或电配电箱在安装前抹灰,安装后存留的狭孔和槽口用灰浆填实。气密性插座及电电缆密封作法示意图 16。

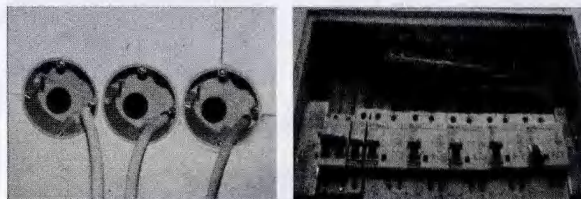


图 16 气密性插座及电电缆密封

(2) 防止密封平面被穿透,采用专用构件连接和密封处理或设置专门的安装平面。如穿墙管道与电线的密封(见图 17),将管道或电缆放置在专用的气密性套环里,套环带有自粘性的防水密封布,可以粘贴在墙上。在防水密封布上再进行抹灰。采用不同尺寸的气密性套环可以减少裁剪密封布的工序,使安装更简洁、专业、易操作,洞口处理更平整清洁。然而,目前国内在气密性套环的设计和和生产都是空白。

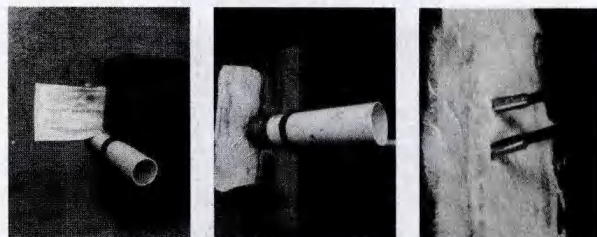


图 17 穿墙管道气密性处理

建筑竣工后和精装修后要分别进行一次整体气密性测试,以查找建筑漏点,从而进一步完善建筑的施工质量。

