

对预制混凝土夹心保温外墙板热桥影响的再认识

谷明旺

(深圳市现代营造科技有限公司 518000)

前言:

近几年来,预制混凝土夹心保温外墙板(以下简称夹心保温外墙板)技术开始在国内兴起并迅速普及,保温拉接件是制作夹心保温外墙板的关键产品。拉接件在与内、外叶墙板混凝土共同工作时,除了要求具有足够的承载能力和耐久性能以外,还需要具有很低的导热系数,以降低外墙板热桥的影响。常用的保温拉接件有 GFRP 拉接件和金属拉接件两类,它们对外墙板的热桥影响也有很大的差异。

经常有技术人员提出“拉接件的截面积很小,因此热桥影响可以忽略不计”和“南方地区不需要夹心保温外墙”的观点,这是真的吗?笔者结合美国的研究资料,以及国内的相关检测报告,分析金属和非金属保温拉接件热桥对外墙板损失率问题,以及怎样从技术上消除热桥,实现本质上的节能。

关键词: 预制混凝土夹心保温外墙板、保温拉接件、热桥损失率

一、热量传递和热桥的基本概念

1、热传导的方式

热传导有传导、对流、辐射(包含反射)三种方式。在建筑中,室内外的能量交换过程,主要通过建筑的外围护表面完成,并且三种方式同时存在,这就对建筑外围护提出了一定的技术要求,如屋顶、外墙、门窗的密闭性、隔热性、热辐射性等。随着城市建筑越来越高,外墙和门窗所占的建筑表面积超过了 80%,而外墙所占比例又很大,成为建筑热量交换的主要媒介,且主要以传导方式为主,因此,提高建筑外墙的热阻值(或降低外墙的热传导系数)可以阻止和减缓建筑室内外的热交换。

人类在室内生活工作的适合温度为 16~25℃左右,当夏天温度较高和冬季温度较低时,为了保持室内的舒适性,往往需要输入能量进行制冷和供暖来调节温湿度。如果外墙的保温或隔热性能不好,就会提高建筑能耗。据统计,我国建筑消耗了社会能源的 45%左右,节能空间很大,提高墙体的热阻对于建筑节能意义重大。

2、墙体传热性能热工指标之间的关系

在民用建筑的外墙节能中，墙体的传热系数是衡量保温隔热性能的关键指标之一，不同的材料具有不同的导热系数，材料导热系数越低表示在材料中热量传递越缓慢，一般来说外墙都是由多层不同的材料构成，因此墙体的传热性能用传热系数或者热阻值指标来衡量（传热系数 K 与热阻值 R 成反比）， R 值越高（ K 值越低）代表保温隔热性能越好。相反地， R 值越低（ K 值越高）代表保温隔热性能越差，建筑工程在外墙节能上的投入，可以理解为花钱提高墙体的热阻，是为了创造长期的节能效益；在各层墙体所用材料和构造的厚度确定以后，墙体的传热系数和热阻值可以通过计算获得，其传热性能指标也可以通过实验进行检测。

3、热桥的概念

在实际工程中，由于建筑构造的要求，墙体由多种不同材料的层片组成，如承重层、保温层、装饰层组合成为一道墙体，多层构造之间需要通过拉结件（或称为“连接器”）进行连接。如果室外悬挑阳台和空调板等需要伸入到室内才能获得受力的支撑，就会穿过墙体的保温层，穿过的部位就成为联通室内外的“桥”，尽管保温层隔绝了大部分的室内外构造，提高了墙体的热阻，但是这些“桥”就成为了室内外热量交换的热桥。局部的热桥就像一个装水的玻璃杯上被开了孔洞一样，会使水流干，只是墙体中热桥的存在所导致的能量流失过程难于直接观察，也难以分析计算和检测，因此很容易被人忽视，事实上对墙体的热工性能影响很大。

热桥的存在不但会降低墙体的热阻，导致长期的能耗损失，同时在一定温差和湿度条件下，会导致室内空气中的水分凝结露，甚至结霜，导致霉菌生长，不利于影响室内环境健康，因此在建筑设计时，应该重视外墙热桥的治理。

二、拉结件的导热性能对夹心保温外墙板热工性能的影响研究

到底热桥对于夹心保温外墙板的热工性能有多大影响？这是很多工程师普遍关心的问题，笔者收集了两组试验检测资料，通过对比也许可以给我们一些启发。一组是来自中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心的两份检测报告，检测报告的编号分别为“BETC-JN1-2007-161”和“BETC-JN1-2017-00141”，这两份报告为分别采用美国 Thermomass 的 GFRP 拉结件和国内某企业不锈钢拉结件的夹心保温外墙板热阻值测试值；另一组检测试验来自于美国 Oak Ridge 国家

实验室建筑技术中心对于不同拉结件和热桥的夹心保温外墙板进行试验研究, 报告日期为 2001 年 10 月 26 日。

1、GFRP 拉结件和不锈钢拉结件夹心保温外墙板热阻值检验结果

北京万科是国内首家在装配式建筑中采用夹心保温外墙板的企业, 为了保证项目满足节能要求 (北京的节能标准为 50%), 拉结件供应商在中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心对夹心保温外墙板的热工性能进行检验, 并取得了编号为 BETC-JN1-2007-161 的检验报告 (图 1), 该检验采用 1000mmx980mm 的试验墙板, 墙身构造为 60mm 厚钢筋混凝土+50mm 厚 XPS 保温+60mm 厚钢筋混凝土。两层墙板混凝土之间用 6 只 MS50 型 Thermomass 的 GFRP 保温拉接件连接, 墙身构造如图 2。

国家建筑工程质量监督检验中心检验报告 TEST REPORT OF NATIONAL CENTER FOR QUALITY SUPERVISION AND TEST OF BUILDING ENGINEERING				
报告编号(No. of Report):		BETC—JN1—2007—161		共 2 页 第 1 页(Page 1 of 2)
委托单位(Client)		澳大利亚 Composite Global Solutions (CGS)		
地址(ADD)		6A Monomeath Avenue, Toorak VIC 3142, Australia	电 话 (Tel)	13811973039
样 品 (Sample)	名称(Name)	Thermomass 预制混凝土绝热夹心板	状 态 (State)	正常
	规格型号 (Type/Model)	规格: 1000mm×980mm 夹心板总厚度 220mm (构造见附页)	商 标 (Brand)	Thermomass
生产单位(Manufacturer)		Composite Technologies Corporation 美国		
送样/抽样日期 (Date of delivery/sampling)		2007.09.19	地 点 (Place)	_____
工程名称 (Name of engineering)		中国预制混凝土夹心板性能研究工程		
检 验 (Test)	项 目 (Item)	热阻: 传热系数	数 量 (Quantity)	1m ²
	地 点 (Place)	试验室	日 期 (Date)	2007.10.08 ~10.11
	依 据 (Reference documents)	GB/T 13475-92 建筑构件稳态热传递性质的测定 标定和保护热箱法		
	设 备 (Equipment)	JW-1 型墙体保温性能检测装置		
检验结论(Conclusion)				
砌体热阻 $R=1.7\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ 传热系数 $K=0.54\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (本栏以下无正文)				
检验条件 (Test condition)		热室空气温度 20.5℃, 冷室空气温度 11.7℃		
签字 (Signatures):		关冰君	冯金秋	杨玉忠
		批准 (Approval)	审核 (Verification)	主检 (Chief Test)
				报告日期 (Date) 2007/10/25

图 1 编号为 BETC-JN1-2007-161 的检验报告

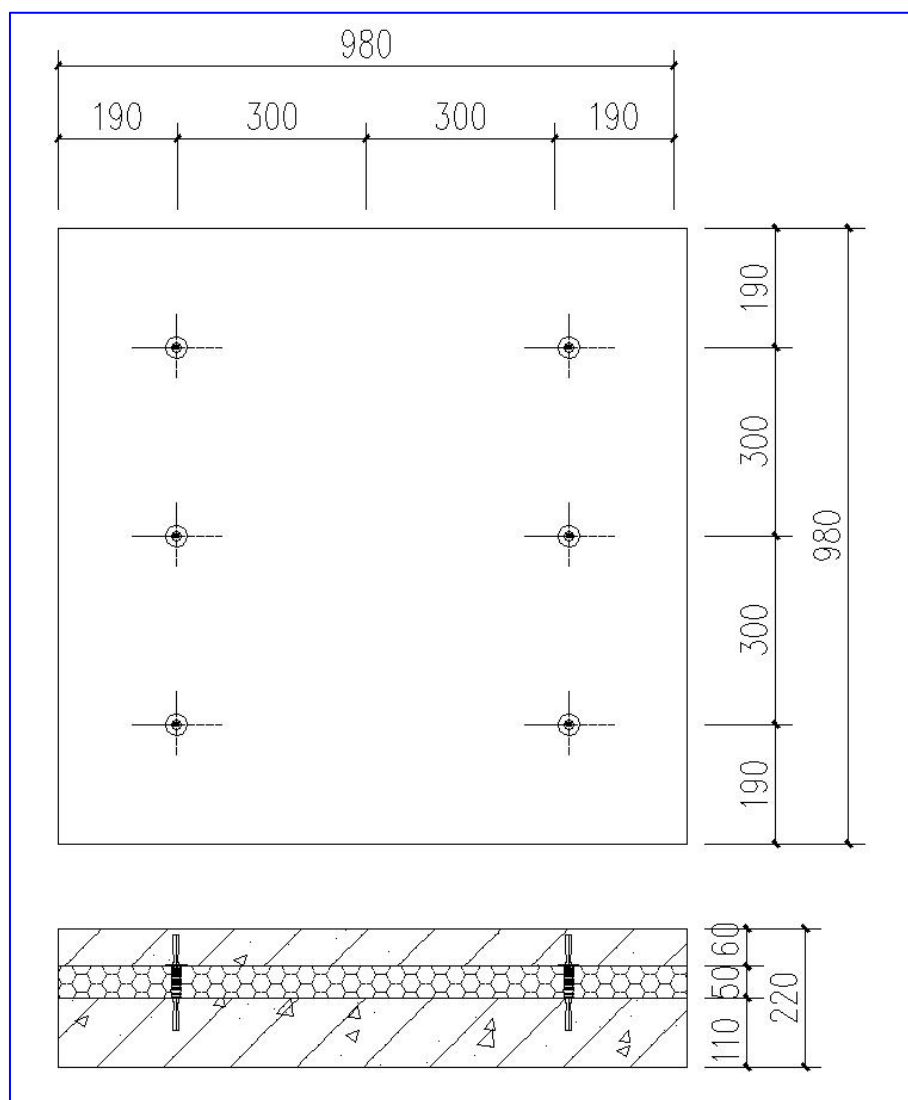


图 2 GFRP 拉结件试件的墙身构造图（摘自“BETC-JN1-2007-161”检测报告）

根据编号“BETC-JN1-2007-161”报告的检验结果，其检验结论为“砌体热阻=1.7 (m².K/W)，传热系数=0.54 (W/m².K)”。

国内某企业采用 4 只直径 8mm 的不锈钢保温拉接件，制作了相同的夹心保温外墙板，同样在中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心检验，取得编号 BETC-JN1-2017-00141 (图 3) 的检验报告，该检验采用 980mmx980mmx300mm 的夹心保温外墙板，构造为 200mm 厚钢筋混凝土+50mm 厚 XPS 保温板+50mm 厚钢筋混凝土”，两层墙板混凝土之间用 4 只直径 8mm 的不锈钢（金属）拉结件连接。

根据“BETC-JN1-2017-00141”检验报告，检验结论为“所送检验品传热系数为 0.70 (W/m².K)”。

该报告没有给出墙板的热阻值。

委托编号 (Commission No.): 2017-003002				第 1 页 共 3 页 (Page 1 of 3)	
报告编号 (No. of Report): BETC-JN1-2017-00141					
委托单位 (Client)		建设有限公司			
地址 (ADD.)		湖南省长沙市		样品编号 (NO.)	JN1-2017-00141
样品 (Sample)	名称 (Name)	锚固件夹芯板		状态 (State)	正常
	商标 (Brand)			规格型号 (Type/Model)	980mmX980mmX300mm
生产单位 (Manufacturer)		建设有限公司			
送样日期 (Date of delivery)		2017-05-08		数量 (Quantity)	1 块
工程名称 (Name of engineering) -----					
取样部位 (Sampling position) -----					
检验 (Test)	项目 (Item)	传热系数		地点 (Place)	葛渠节能试验室
	仪器 (Instruments)	墙体保温性能检测装置		日期 (Date)	2017-10-08~10-16
检验依据 (Test based on)		GB/T 13475-2008 《绝热 稳态传热性质的测定 标定和保护热箱》			
判定依据 (Criteria based on)		-----			
检验结论 (Conclusion)					
经检验, 所送检样品传热系数为 $0.70\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。 (以下空白)					
备注		(此栏空白)			
批准 (Approval)	审核 (Verification)	主检 (Chief tester)	联系电话 (Tel.)	报告日期 (Date)	
字HJ	杨王忠	江斌	010-64517104	2017-10-18	

图 3 编号为 BETC-JN1-2017-00141 的检验报告

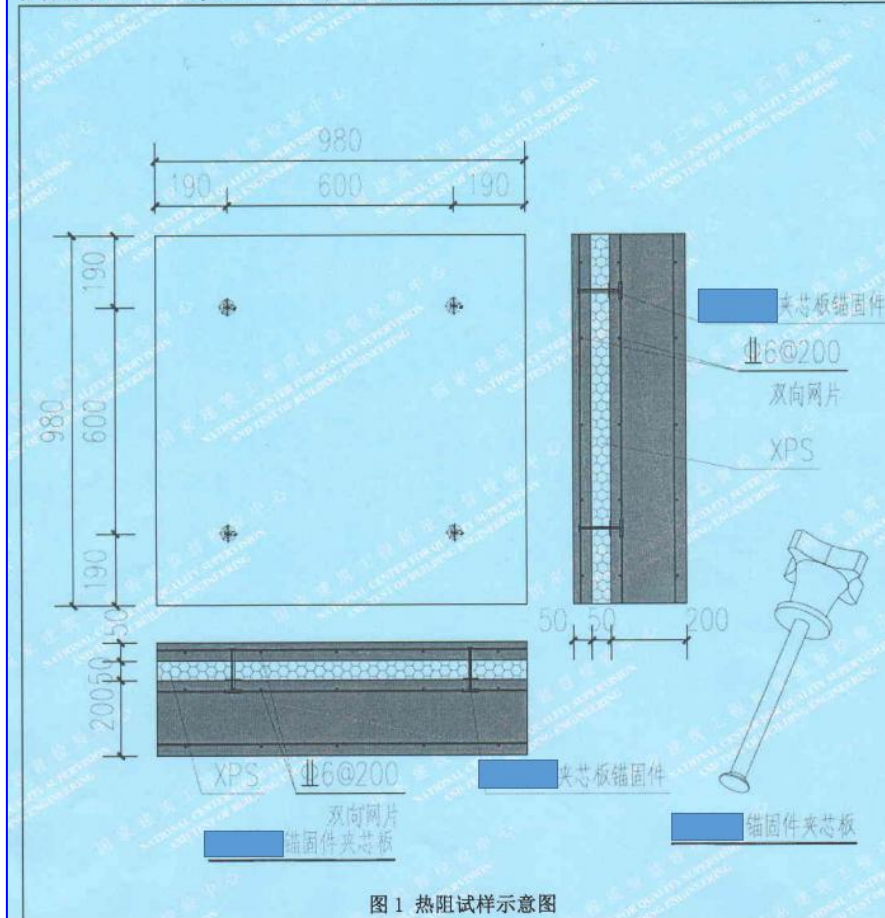


图 1 热阻试样示意图

图 4 不锈钢拉结件试件的墙身构造图（摘自“BETC-JN1-2017-00141”检测报告）

2、对金属和 GFRP 材料拉结件热桥损失率的分析

众所周知，GFRP 是由玻璃纤维和 高分子树脂制成的复合材料，其导热性能介于玻璃和塑料之间，导热系数为 0.4W/m.K 左右，不锈钢材料的导热系数为 17W/m.K 左右，两者的热导率相差 40 倍左右，因此不锈钢拉结件的传热会明显高于 GFRP 拉结件，其热桥效应不容忽视。普通钢材的导热系数更是高达 50W/m.K 左右，因此更不能用作制造保温拉接件的材料。

表 1 不锈钢拉接件和 GFRP 拉结件夹心保温外墙板热工性能对比

墙板对比	BETC-JN1-2007-161 (TM)	BETC-JN1-2017-00141(不锈钢)
墙板总厚度	220mm	300mm
墙板面积	1000mmx980mm	980mmx980mm
拉结件面积	6x51mm ² ≈300mm ² (GFRP)	4x50.24mm ² ≈200mm ² (不锈钢)
墙板传热系数	0.54 (W/m ² .K)	0.70 (W/m ² .K)

对比两个实验报告的测试数据可以发现，虽然采用不锈钢拉接件的墙板比 GFRP 拉结件的墙板混凝土厚度增加了 80mm，且拉结件的截面积少了 1/3，但是由于不锈钢的热导率很高，墙板的传热系数比 GFRP 夹心保温外墙板增大了 29.6%，差异非常之大。

这就意味着，尽管不锈钢拉接件的截面积只有夹心保温外墙板面积的 0.02%，但是由于不锈钢热桥的存在，墙板的热工性能下降了 30%之多，这似乎很难让人理解。大多数的人都会认为：保温材料只是被拉结件占去了不到 0.02% 的面积，热桥的损失应该也是在 0.02% 左右，那么前面实验报告的结论应该怎么解释？其实道理很简单，用保温材料来隔绝热量交换，类似于我们用杯子盛水一样，热桥就相当于在底部开了“小孔”，由于水流损失是持续的，即使小孔的面积不到杯子表面积的 1%，也可以让杯子里面的水流光。而且墙板混凝土的表面积很大，扩大了热桥与空气进行热交换的面积，进一步加速了热量的流失，东北谚语“针尖大的洞，斗大的风”说的就是这一现象。

从这一检测结果对比情况看，如果在夹心保温外墙板的各层构造厚度基本相同的情况下，采用不锈钢保温拉结件，比 GFRP 的热工性能下降了 30%，在国内对建筑节能要求越来越高的情况下，这 30% 的节能差距不容小觑。

3、美国试验研究的简介。

美国 Oak Ridge 国家实验室建筑技术中心在 2001 年对不同构造的夹心保温外墙板进行了热工性能检测，用于研究墙体热性能受连接墙体两层混凝土的金属或者纤维复合连接器影响，并发布了研究报告（图 5）。

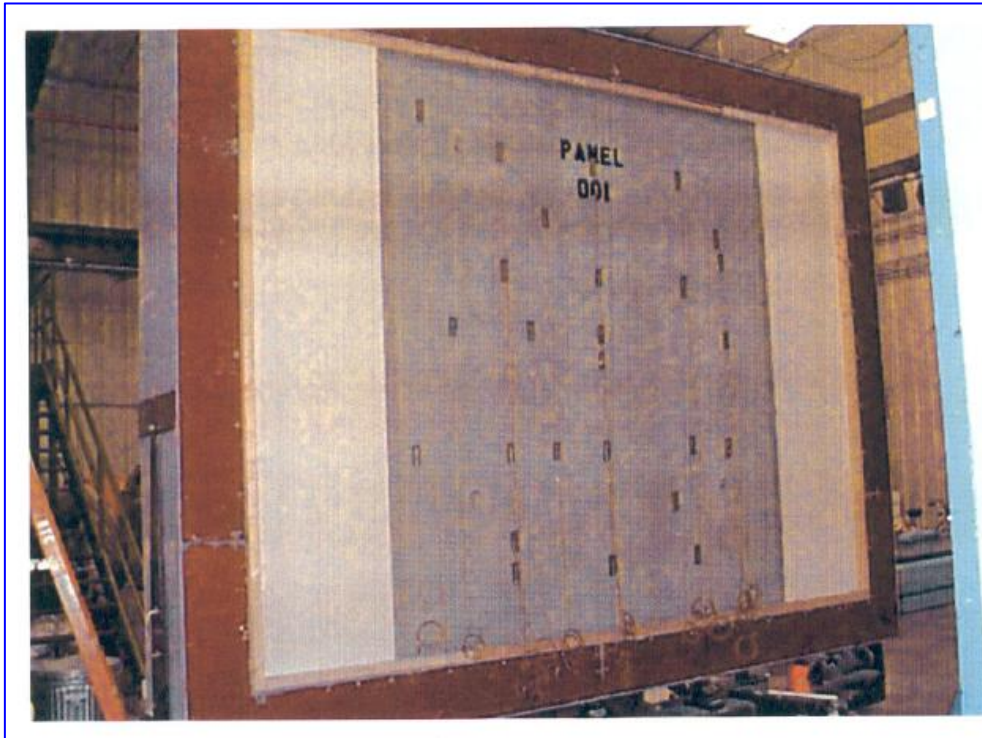


图 5 美国 Oak Ridge 国家实验室建筑技术中心检测场景

测量值	单位	稳定状态					动态		
		墙板 1	墙板 2	墙板 3	墙板 4	墙板 6	墙板 1	墙板 4	墙板 6
计量器边大气温度	°C	21.7	21.2	24.8	24.6	21.9	21.9	25.8	22.4
计量器边大气速率	km/h	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	0.6	0.8
计量器边连接器面积温度	°C	19.8	19.1	-	19.7	21.0	20.8	22.9	21.8
计量器边混凝土浸透点温度	°C	-	-	14.6	14.2	-	-	19.7	-
计量器边钢筋条面积温度	°C	19.7	18.9	20.5	21.2	21.1	20.7	23.8	21.9
计量器连接部位面积温度	°C	-	-	-	-17.8	20.9	-	-	21.7
计量器边混凝土板表面温度	°C	20.2	19.3	22.2	20.6	21.1	21.0	23.5	21.9
计量器边墙体表面平均温度 (t _s)	°C	20.2	19.3	21.6	20.4	21.1	20.9	23.4	21.9
气候边大气温度 (t _a)	°C	-7.3	-6.6	-9.0	-9.0	-20.8	5.6	5.9	-0.2
气候边大气速率	km/h	3.5	3.9	4.7	4.7	4.5	3.9	5.0	4.5
气候边连接器面积温度	°C	-6.4	-5.3	-	-7.1	-20.2	6.1	7.1	0.1
气候边混凝土浸透点温度	°C	-	-	-3.2	-2.9	-	-	9.4	-
气候边钢筋条面积温度	°C	-6.6	-5.7	-6.4	-7.3	-20.4	5.9	6.9	0.0
气候边连接部位面积温度	°C	-	-	-	-	6.1	-	-	-
气候边混凝土板表面温度	°C	-6.4	-5.6	-7.3	-6.8	-20.3	6.1	7.2	0.1
气候边墙体表面平均温度	°C	-6.4	-5.6	-6.9	-6.7	-20.3	6.1	7.2	0.1
计量器边中心孔面积温度	°C	-6.5	-	-	-	-	6.1	-	-
墙板平均温度	°C	6.8	6.8	7.3	6.8	0.4	13.5	15.3	11.0
测量箱测量的总能量 (TMP)	kJ/h	311.9	399.5	602.1	723.3	172.7	182.2	424.1	90.8
通过测量箱墙体的能量 (Q _{ext})	kJ/h	-0.021	-0.021	-0.011	-0.011	-0.011	-0.021	-0.063	0.00
能量输入 (通过墙体的总能量) (Q _s +Q _e)	kJ/h	312.0	399.5	602.0	723.3	172.7	183.6	424.2	90.8
无障碍墙R值 (R)	m ² .K/W	1.9	1.4	1.0	0.8	5.2	1.8	0.8	3.0
计量器边气卷阻率 (R _{ext})	m ² .K/W	0.1	0.1	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
气候边气卷阻率 (R _{ext})	m ² .K/W	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
R值 (R _{ext} +R+R _{ext})	m ² .K/W	2.1	1.5	1.2	1.0	5.4	2.0	1.0	5.4

图 6 研究报告测试结果数值的附表

该试验研究一共制作了 5 块夹心保温外墙板，对其中的 5 块测试墙板进行了稳态检测，并对 3 块墙板进行了动态检测，形成了系列检测数据，简述如下。

(1) 墙板的构造和连接情况简介

根据 Oak Ridge 国家实验室建筑技术中心的试验报告，在一系列的对比试验检测中，共使用了 5 块测试墙板试件，1#~4#测试墙板均由两层混凝土层中间夹一层绝热板组成。两个混凝土层分别由 GFRP 拉结件、金属拉结件或混凝土肋穿过保温层进行连接，测试墙板的尺寸均为 2590mmx2970mm，测试用热箱的尺寸为 2440mmx2440mm。

其中 1#~4#测试墙板包括两个 3 英寸（约 76mm）厚的混凝土层，中间夹一个 2 英寸（约 50mm）厚的挤塑混凝土绝热板，6#测试墙板的保温层由 2 英寸和 6 英寸的混凝土组成，保温由 6 英寸厚的黑色聚苯颗粒保温板（EPS）和 1/2 英寸厚的蓝色挤塑苯板（XPS）组成，并且在蓝色挤塑板的两个表面均附加了粘合聚苯烯膜（防潮层）。

各测试墙板的保温厚度和拉结件连接方式情况如表 2：

表 2 各测试墙板保温厚度及拉结件情况汇总表

构造情况	1#墙板	2#墙板	3#墙板	4#墙板	6#墙板
墙板尺寸 (mm)	2590x2973	2590x2973	2590x2973	2590x2973	(1285+20 缝 隙+1285) x2973
混凝土层厚度 (mm)	75+75	75+75	75+75	75+75	150+50
保温板 (mm)	50 厚 XPS	50 厚 XPS	50 厚 XPS	50 厚 XPS	150 厚 XPS+13 厚 EPS
拉结件布置情况 (mm)	GFRP 拉结件 布置间距 400x400	直径 6mm 碳钢 拉结件布置间 距 300x300	200x200 截面 的混凝土肋， 布置间距 633	直径 6mm 碳钢 间距 300x300， 8 个 200x200 的混凝土肋， 间距 633	GFRP 拉结件 布置间距 400x400
拉结件总面积 (mm ²)	GFRP， 48x50=2400	碳钢， 86x28.3=2433	混凝土肋， 200x200x8=3 20000	碳钢， 86x28.3=2433 以及混凝土肋 200x200*8=32 0000	GFRP， 48x50=2400
热箱覆盖的拉结件	约覆盖 85%GFRP=204	约覆盖 82%碳 钢=1995	约覆盖混凝 土肋=200000	约覆盖 82%碳 钢=1995	约覆盖 85%GFRP，

热桥面积 (mm ²)	0			以及约覆盖混凝土肋 200000	2040
联通桥占墙板的面积比	0.026%	0.025%	2.597%	2.622%	0.026%
测试内容	稳态热阻 动态热阻	稳态热阻	稳态热阻	稳态热阻 动态热阻	稳态热阻 动态热阻

注：依据 ASTM C 236-1989 “用保温箱法测定建筑部件稳态热性能的试验方法”中描述的装置进行测试，该测试方法的测量误差约为 8%。

(2) 夹心保温外墙板的稳态和动态热箱测试结果对比

此试验研究中，1#~4#测试墙板的混凝土和保温厚度均一致，只是使用的保温拉接件形式不同，也就是所形成的热桥与差别，通过测试结果可以对比反映不同的拉接件所形成的热桥损失，由于美国使用 °F 和 f_t、Btu 作为温度和尺寸、热量单位，为了方便国内读者参考，根据其试验检测结果，翻译和换算结果摘录如下表 3 (1h. f_t². °F/Btu=0.1761m². K/W)。

表 3 各测试墙板热阻测试结果对比表(小数点后保留两位)

测量结果	单位	稳态					动态		
		1#墙板	2#墙板	3#墙板	4#墙板	6#墙板	1#墙板	4#墙板	6#墙板
墙板热阻	m ² . K/W	1.85	1.34	1.02	0.81	5.12	1.76	0.81	5.16
内表面 换热阻	m ² . K/W	0.10	0.10	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11
外表面 换热阻	m ² . K/W	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
总热阻	m ² . K/W	2.01	1.49	1.20	1.00	5.30	1.94	0.99	5.33
剩余热阻	1#墙板 为 100%	100%	74.1%	59.7%	49.8%	263.7%	100%	51%	270%
热阻损失			-25.9%	-40.3%	-50.2%			-49%	

在以上表格中，我们假定采用 GFRP 保温拉接件的 1#墙板热阻值为 100%；2#墙板采用了碳钢拉接件，导致墙板热阻下降 25%；3#墙板采用混凝土肋穿过保温，导致墙板热阻下降 40%；4#墙板同时采用碳钢金属拉接件和混凝土肋穿过保温，导致墙板的热阻下降 50%。

从以上试验检测结果可以看出，金属拉接件和混凝土穿过保温板时，虽然所形成的热桥面积只有墙板面积的 0.025~0.26%，也会导致墙板的热工性能下降 25%~50%，墙板的热阻值就是人们花钱所购买得到的保温隔热性能，如果保温拉接件设计有问题，一旦形成了热桥就会极大地降低墙板热工性能，不但损失了投

资成本，还会造成长期的能源浪费，因此，在进行建筑节能设计时，不能够忽视热桥的影响。

4、夹心保温外墙热桥损失对节能设计的影响分析

通过前面两个检测报告的对比以及美国对夹心保温外墙板热桥试验研究的报告可以看出，热桥的存在会导致墙板热工性能指标下降，为了满足正常的建筑节能要求，在对夹心保温外墙板设计时，应该注意哪些问题？

首先，应该重视保温拉接件的选型。根据常识，金属材料具有较高的导热性能，应该尽量选用导热系数较低的GFRP保温拉接件，有利于彻底消除热桥。

如果采用金属材质制作的保温拉接件，应尽量选用导热系数较低的不锈钢材料，可以比普通碳钢减少1/2~2/3左右的热桥损失。

其次，阳台和空调板由于受力要求，钢筋和混凝土往往要穿过夹心保温外墙，也会形成较大的热桥，当室内外温差较大时，甚至会局部引起凝结露或墙体发霉，应该采取措施进行治理。通过以上分析，只要有不到3%的墙板保温缺失，形成的内外混凝土联通，就会使墙板的保温性能下降40~50%，一般阳台和空调板的热桥面积分别占墙板的6~7%和2%左右，必须引起重视，应该采取措施避免联通桥对墙板的保温性能影响，如采用哈芬的阳台断桥连接器，隔绝阳台板与室内的热交换（见图7）。必要时，也可以将空调板改为不锈钢室外支架，直接挂装在外叶墙上，既轻便也有利于施工，并节省造价。

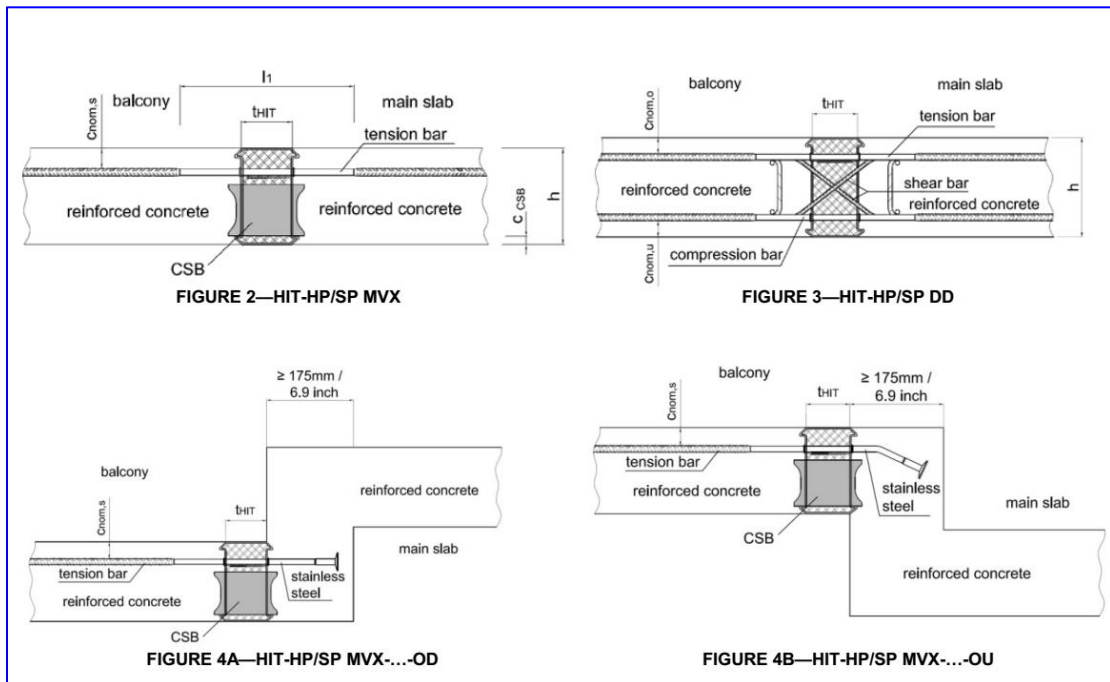


图 7 德国哈芬的热断桥阳台构造

另外，通常门窗洞口部位往往是墙体热阻的薄弱环节，容易形成热桥。对夹心保温外墙板的设计，应该用保温材料完全阻断内外层混凝土的连接。除了门窗的节能性达标以外，门窗洞口的构造方法非常重要，夹心保温外墙板的内外表面温度不同，因此产生的热胀冷缩也有差异，应该用保温层完全隔开，如果在洞口部位把混凝土联通，不但会存在严重的热桥，同时也无法避免联通桥混凝土的开裂，上海地区大量三明治外墙曾经采用钢筋混凝土封边，所出现的问题也证实了这一点，因此设计时应该尽量避免室内外混凝土联通。

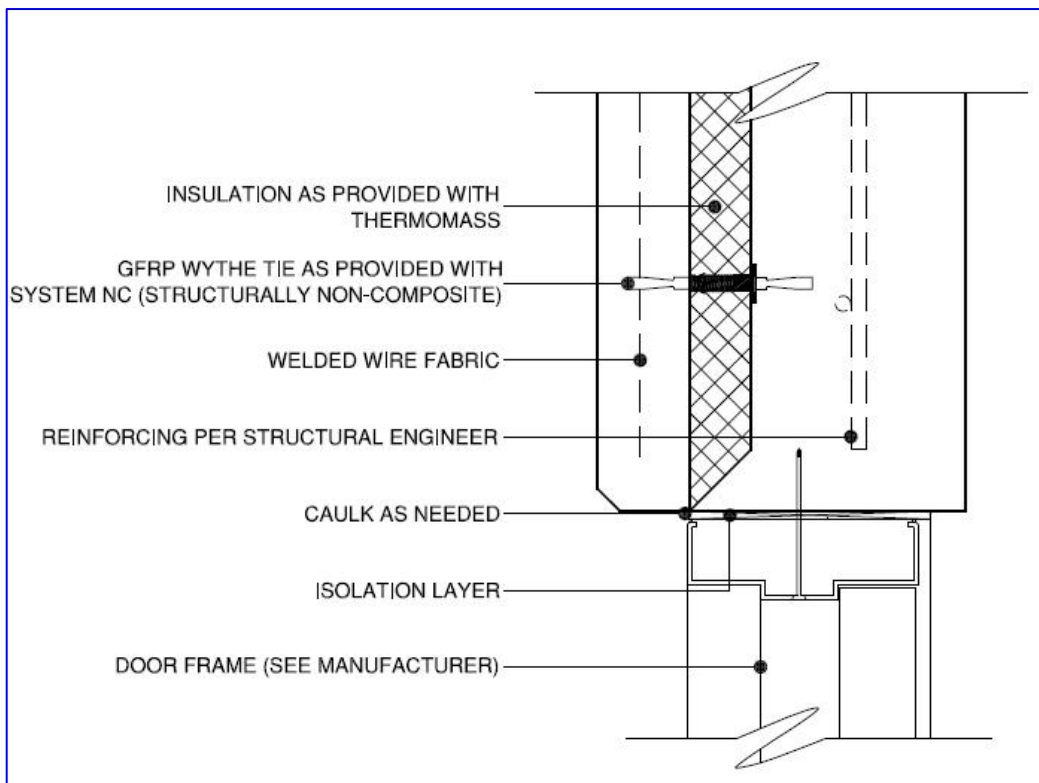


图 8 美国 Thermomass 的门窗洞口构造做法

三、采用不同类型拉接件的夹心保温外墙板热桥对比计算分析

假设有三个实心山墙的尺寸均为 3600*2800mm，采用“200 厚混凝土内叶墙+50 厚 XPS+50 厚混凝土外叶墙”构造的夹心保温外墙，如果分别采用 Thermomass 截面 5*10mm 的 GFRP 保温拉结件和截面直径 8mm 不锈钢保温拉接件、碳钢拉结件制作，布置间距均为 500*600mm，试分别计算三个墙板的热阻值和热桥造成的热阻值损失率。（导热系数取值：混凝土为 1.28W/m.K，XPS 为 0.03W/m.K，GFRP 为 0.4W/m.K，不锈钢为 17W/m.K，普通碳钢为 48W/m.K。）

(1) GFRP 夹心保温外墙板的热工性能指标计算

250 厚混凝土的热阻为： $R_{\text{砼}}=0.25/1.28=0.195\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

50 厚 XPS 的热阻为： $R_{\text{XPS}}=0.05/0.03=1.67\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

外空气幕热阻为： $R_e=0.04\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

内空气幕热阻为： $R_i=0.11\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

总热阻为： $R_{\text{总}}=R_{\text{砼}}+R_{\text{XPS}}+R_e+R_i=1.67+0.195+0.04+0.11=2.015\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

墙板主体的传热系数为： $K_p=1/R_{\text{总}}=0.49\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$

GFRP 拉结件的传热系数为： $K_{b1}=0.4/0.05=8\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$

不锈钢拉接件的传热系数为： $K_{b1}=17/0.05=340\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$

普通碳钢拉接件的传热系数为： $K_{b1}=48/0.05=960\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$

(2) 计算热桥损失后的墙板平均传热系数

考虑热桥损失后的墙板平均传热系数，按照以下公式计

$$K_m=(K_p F_p+K_{b1} F_{b1})/(F_p+F_{b1})$$

其中 F_p 和 F_{b1} 分别为墙板面积和热桥面积（墙板中的拉结件面积）。

GFRP 拉结件为： $3600*2800/(500*600)*5*10=1680\text{mm}^2$

不锈钢拉结件为： $3600*2800/(500*600)*4^2*3.14=1688\text{mm}^2$

经计算，GFRP 夹心墙的平均传热系数为：

$$K_m=(0.49*3600*2800+8*1680)/(3600*2800+1680)=0.491\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$$

热阻损失率= $(K_m-K_p)/K_p=(0.491-0.49)/0.49=0.02\%$

用 GFRP 做拉结件，热桥损失为 0.2%，几乎可以忽略。

不锈钢拉接件夹心墙的平均传热系数为：

$$K_m=(0.49*3600*2800+340*1688)/(3600*2800+1688)=0.54\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$$

热阻损失率= $(K_m-K_p)/K_p=(0.54-0.49)/0.49=10.2\%$

用不锈钢做拉结件，热桥损失为 10.2%，有一定的影响。

碳钢拉接件夹心墙的平均传热系数为：

$$K_m=(0.49*3600*2800+960*1688)/(3600*2800+1688)=0.65\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$$

热阻损失率= $(K_m-K_p)/K_p=(0.65-0.49)/0.49=32.6\%$

用普通碳钢做拉结件，热桥损失为 32.6%，影响很大。

从以上对比可以看出，用 FRP 拉结件制作的夹心保温外墙板，几乎没有热桥损失，采用金属材料拉结件制作的夹心保温外墙板，热桥损失为 10~30%左右。

对于不锈钢拉接件的热阻值损失率，计算为 10.2%，与国外的技术经验基本吻合，而国内试验检测却高达 30%，几乎接近普通碳钢拉结件的理论计算值，出现了较大的差异，经过分析，可能是由于不锈钢材质不同所致。

四、热桥治理对于建筑节能的意义

1、我国建筑外墙的节能发展情况

上世纪 90 年代以前，中国的建筑处于房屋短缺的阶段，对于房屋的舒适性和建筑节能都重视不够，由于北方地区冬季普遍需要采暖，随着经济的发展和物质水平的提高，“节能墙改”工作逐渐提上议事日程，2000 年前后，北方地区首先提高了外墙保温标准，制定了节能 50% 的技术目标，这促进了外墙保温性能的提高，外墙的外保温技术得到快速发展，尽管在外墙防火、外装饰面开裂、保温脱落等方面还存在很多的问题，但对于建筑节能起到了很大的作用，具有显著的意义。

在一些夏热冬冷地区，外墙外保温和外墙内保温技术并存，当采用外墙内保温型式时，阳台、空调板部位会形成严重的冷热，导致了能量的大量流失，无形中白白浪费了能源。

南方地区由于不需要采暖，但在夏季需要使用空调，特别是 2000 年以后，新建的建筑几乎都安装了空调，多数以使用电能为主，由于不是采用集中能源供应，外墙的保温性能不足所导致的能源损失始终没有引起足够的关注，每年夏天空调使用高峰期都会发生拉闸限电停产等情况，近几年这一现象越来越严重。其实在南方地区，提高外墙的热阻，也是提升建筑节能标准的重要手段。

但由于南方地区多雨和台风的影响，外墙一般难以采用外保温的形式，大多数建筑都是采用外墙内保温形式，以玻化微珠保温砂浆为主，虽然 90% 以上使用保温砂浆的建筑，并不能真正满足节能标准的要求，且外墙内侧无法钉挂重物，但由于缺乏技术而得不到改变；甚至很多项目交工后，住户装修前的第一件事情就是铲除外墙的内保温，不但花掉了基建成本，而且没有得到一点节能的效果，同时产生了大量的建筑垃圾，这一现象应该引起重视。

夹心保温外墙的保温材料是夹在两层不燃的混凝土之间，在满足墙板节能要求的同时，彻底地避免了火灾危险和保温材料受潮失效，经过欧美发达国家近五十年的实践，技术已经非常成熟，是一种非常可靠的保温节能技术，可以适合于

我国任何气候的地区，也适用于多雨和台风地区，详见深圳市住建局《深圳市PC建筑外墙节能集成技术研究》课题报告，本文不再赘述。

2、夹心保温外墙板热桥治理的意义

随着国内装配式建筑的兴起，夹心保温外墙的应用越来越广泛，这一技术应用成功的关键是保温拉结件的设计、选型，通过前文的对比试验和计算分析可以发现，热桥对于夹心保温外墙板的热工性能影响非常大，特别是金属材料保温拉接件所形成的热桥，会使墙板的热阻损失高达10~30%，楼板和阳台等混凝土联通桥形成的热桥更是高达40~50%，使业主在外墙保温节能方面造成巨大的浪费，有必要进行治理。

我国的建筑节能经历了节能30%、节能50%、节能65%几个阶段，北方地区已经上升到节能75%的标准，每一次标准的提升，都是在前一标准的节能基础上提高了30%的要求，如果不重视热桥的影响，一旦热桥损失过大，就会使保温节能成为自欺欺人的“安慰性计算”，而实际效果却大打折扣。

南方地区由于没有采暖的要求，节能主要体现在节省空调的电耗方面，如果外墙存在较大的热桥，同样地会大大降低节能的效果；如果东、西墙体的蓄热能力较强，由于白天外墙表面的温度已经非常高，即使是在夜晚也还会大量消耗空调能源，因此热桥治理对于南方地区同样重要。

最有效的措施就是尽量避免内外叶墙的钢筋和混凝土形成联通，联通材料只能使用导热系数较低的高强度材料，才能防止造成热桥损失，达到较高的热阻和较低的墙体传热系数，真正地实现节能目的。

五、总结

1、在夹心保温外墙板设计时，必须采用有一定强度的结构性材料穿透保温层时，由于热桥而产生的热阻损失率，并不与热桥面积率成正比，而与穿透材料的导热系数关系很大。热桥的导热系数越大，损失率越大，反之则越小。

2、连接内外叶墙板保温拉接件宜采用GFRP等低导热系数的高强度材料制作，所形成的热桥损失小于1%，可以忽略不计。

3、如果采用金属材料保温拉结件（不锈钢、普通碳钢），即使拉结件总面积达到墙板总面积的0.2~0.3%时，金属拉结件热桥会导致墙板传热系数增大10~30%，不容忽视，应该适当加厚保温厚度。

4、不锈钢材料的种类很多，并且化学成分和分子结构的差异会造成导热系数变化很大，对用于制作保温拉结件的不锈钢材料，应该进行导热系数检测，提供其热工参数后方可计算。

5、如果有钢筋混凝土穿过夹心保温外墙板保温层时，会形成严重的热桥，当热桥的面积达到墙板面积的3%左右时，将造成墙板热阻值下降40~50%，在对夹心保温外墙板设计时，应对热桥影响进行分析，经计算确定保温厚度，并进行防结露验算。

6、在采用夹心保温外墙的装配式建筑中，对于阳台、空调板的热桥影响，如果不采用断桥措施，应该计算热桥损失。（正文完）

参考资料和文献：

《Thermal Performance of Prefabricated concrete Sandwich Wall Panels（预制混凝土夹层板的热工性能研究）》Jan Kosny, Phill Childs, André Desjarlais; oak Ridge National Laboratory Buildings Technology Center（橡树岭国家实验室建筑技术中心）2001. 10. 26

《Thermomass 预制混凝土绝热夹心板》“BETC-JN1-2007-161”检验报告；国家建筑工程质量监督检验中心，2007. 10. 25

《XXXX 锚固件夹心板》“BETC-JN1-2017-00141”检验报告；国家建筑工程质量监督检验中心；2017. 10. 18

《中国建筑节能标准发展历程及展望》；邹瑜，郎四维，徐伟，李正，汤亚军，张婧，王东旭（中国建筑科学研究院，北京 100031；中国工程建设标准化协会，北京 100037），建筑科学 2016 年 2 月第 32 卷第 12 期

《民用建筑热工设计规范》JGJ24-1986；建筑工业出版社

《民用建筑节能设计标准（采暖居住建筑部分）》JGJ26-1986；建筑工业出版社

《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ26-2010；建筑工业出版社

《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ134-2010；建筑工业出版社

《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》JGJ75-2010；建筑工业出版社

《公共建筑节能设计标准》GB50189-2015；建筑工业出版社

《民用建筑热工设计规范》GB50176-2016，建筑工业出版社