

建筑围护结构中热桥 稳态传热计算研究^{*}

西安建筑科技大学 闫增峰[☆]

中国建筑科学研究院建筑物理研究所 林海燕 周 辉 刘月莉

摘要 在实验室进行了稳态传热条件下热桥表面温度和热流强度的测试实验,将实验结果分别与二维稳态传热模拟软件 PTDA 的模拟计算结果及我国现行标准中规定的一维简化方法的计算结果进行了对比。结果表明,PTDA 的模拟结果较精确,而现行标准中的简化方法的误差较大,应及时修订。

关键词 围护结构 热桥 二维稳态传热 实验 模拟软件 一维简化方法

Research on steady-state heat transfer calculation of thermal bridge in building envelopes

By Yan Zengfeng[★], Lin Haiyan, Zhou Hui and Liu Yueli

Abstract Tests the surface temperature and heat flow rate per unit area of the thermal bridge in steady-state heat transfer condition in a laboratory. Compares the experimental results with those from the simulation using a two-dimensional steady-state heat transfer software—PTDA (planar temperature distribution and analysis) and the calculation by the one-dimensional simplified method defined in the current design codes of China. The result shows that the simulation results by the PTDA software agree well with the experimental results, and that the calculation results by the simplified method are not sufficiently accurate and the current design codes should be revised in time.

Keywords envelope, thermal bridge, two-dimensional steady-state heat transfer, experiment, simulation software, one-dimensional simplified method

★ Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, China

①

0 引言

在建筑围护结构热工计算中,通过围护结构的传热通常按照一维传热计算,这是因为,建筑围护结构两侧承受温差传热作用,沿厚度方向的温度变化远大于高度或宽度方向的温度变化^[1]。然而,在实际建筑围护结构中,二维和三维传热普遍存在,这就产生了所谓的建筑围护结构中的热桥^[1]。

根据国际标准^[2-4],热桥部位定义为:非均匀的建筑围护结构部分,该处的热阻被明显改变,由于建筑围护结构被另一种不同导热系数的材料完全或部分穿透,或者结构的厚度改变,或者内外表面积不同,如墙体、地板、顶棚连接处。

根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—93)^[5],热桥定义为:围护结构的热桥部位是指嵌入墙体的混凝土或金属梁、柱,墙体和屋面板中的混凝土肋或金属件,装配式建筑中的板材接缝以及墙角、屋顶檐口、墙体勒脚、楼板与外墙、内隔墙与外墙连接处等部位。

建筑围护结构中的热桥会改变建筑结构的温度分布和通过结构的热流强度。在冬季,热桥处内表面的温度低于围护结构主体部位,常常会导致表

①☆ 闫增峰,男,1969 年 10 月生,博士研究生,工学博士,副教授
710055 西安建筑科技大学建筑学院
(029) 82202943
E-mail: zfyang@263.net

收稿日期:2006-09-20

一次修回:2006-12-18

二次修回:2007-06-04

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50408013),陕西省教育厅专项科研计划项目(编号:04JK215)

面结露,甚至发霉,影响室内卫生状况^[1-3]。此外,热桥处的热流强度大于围护结构主体部位,如计算不合理,会导致通过建筑围护结构的传热耗热量计算得过小,影响建筑节能计算精确度^[6]。因此,为了更好地进行建筑围护结构热工计算及建筑能耗分析,必须准确计算建筑围护结构中热桥内表面的温度及通过热桥处的热流强度。

我国现行建筑热工设计规范和建筑节能设计标准分别于 1993 年和 1995 年颁布,在这两个标准中采用面积加权平均的方法计算热桥传热系数^[5-6]。10 多年过去了,随着建筑围护结构材料的更新和保温水平的不断提高,这两个标准中介绍的方法的局限性逐渐显现。可以证明,随着保温层厚度的增加,建筑围护结构保温性能越好,热桥的影响就越大。研究表明,在目前建筑围护结构保温水平情况下,上述计算方法的误差可达到 10%~30%^[7],而在 10 年前,上述计算方法的误差则小于 10%^[6]。工程实践和检测都表明,在保温性能较好的节能建筑中,热桥的附加耗热量损失占建筑围护结构能耗的比例在增大^[8-9]。

由于我国建筑围护结构保温性能较差,加之人们生活水平的不断提高,建筑能耗占我国总商品能耗的比例在不断增加,目前已经超过 27%^[10]。因此,提高建筑围护结构保温水平,减少建筑能耗已经成为建筑行业的一项重要任务。随着我国建筑节能工作的不断深入,特别是建筑节能 65% 目标的提出^[8],外墙内、外保温技术的应用日益广泛。而目前绝大部分建筑能耗计算方法和软件都采用一维传热模型计算围护结构耗热量^[9],无法计算热桥附加能耗,对热桥引起的建筑能耗增加量的计算成为建筑节能技术的关键问题,迫切需要对各种建筑节能构造技术中的热桥进行定量分析。

本文主要介绍了热桥模拟计算结果与实验测试结果的对比分析。利用本文第二作者开发的二维模拟计算软件计算了热桥温度分布和传热系数,在实验室进行了热桥稳态传热实验,实验测试结果与模拟计算结果的对比结果证明了模拟软件的精确性。本研究为我国建筑节能设计标准的制定提供了科学基础。

1 研究方法

从 20 世纪 60 年代开始,考虑到建筑围护结构对建筑能耗及结构耐久性的影响,学者们对热桥传

热计算方法开展了深入研究^[11-12]。虽然关于热桥对建筑能耗影响的动态计算方法仍在不断深化,但是在国际标准中介绍的稳态计算方法已经能够比较精确地获得热桥的表面温度和通过热桥的热流强度^[2-4]。

国际标准中引入了热桥的线传热系数的概念,线传热系数 Ψ 利用下式计算^[2,4]:

$$\Psi = L^{2D} - \sum U_i l_i \quad (1)$$

式中 L^{2D} 为线性耦合系数, $W/(m \cdot K)$, 由二维传热计算得到; U_i 为建筑围护结构第 i 部分的一维传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; l_i 为二维计算模型中传热系数 U_i 值对应的围护结构长度, m 。

根据国际标准中的计算方法,线性耦合系数 L^{2D} 是计算的关键,为了准确计算得到 L^{2D} , 必须进行二维传热计算,对于复杂的建筑围护结构热桥,是无法进行手工计算的。因此,本文第二作者开发了一套计算软件 PTDA (planar temperature distribution and analysis), 该软件是一套基于有限容积法的二维稳态传热计算工具,通过输入围护结构图形,确定边界条件和划分网格,软件可自动进行离散,完成稳态传热计算,从而得到热桥表面温度和热流强度。

为了验证该软件的计算精度,也为了考察目前我国建筑节能设计标准中的简化方法的准确性,在实验室进行了稳态传热条件下热桥表面温度和热流强度的测试实验,将实验测试结果分别与二维模拟软件计算结果及我国现行标准中引用的一维简化方法计算结果进行了对比。

2 实验测试

在实验过程中,将带有热桥的建筑围护结构试件 A 和 B 放置在中国建筑科学研究院建筑物理研究所的人工调控的带有热室和冷室的防护热箱中。该防护热箱装置设计满足国家标准规定^[13],每年标定一次,并通过国家建筑工程质量监督检验中心的年审。建筑围护结构主体为加气混凝土砌筑,尺寸为 $1\,000\,mm \times 290\,mm \times 1\,200\,mm$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高);在试件正中预埋 H 型钢构件,尺寸为 $200\,mm \times 200\,mm \times 1\,200\,mm$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。主体试件表面为水泥砂浆,但试件 B 在 H 型钢冷侧表面作 EPS (聚苯乙烯泡沫塑料) 保温处理,即外保温处理。两组试件如图 1 和图 2 所示。试件中

所用建筑材料的热工参数见表 1。实验时,利用铜-康铜热电偶测量建筑围护结构表面温度,利用建筑用热流计测量试件表面热流强度。试件表面热电偶和热流计布置如图 3 所示。热电偶和热流计传感器测量的数据由采集仪自动收集,结果自动存储在计算机中。

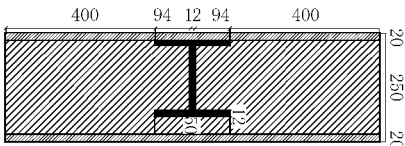


图 1 不带保温的测试试件 A

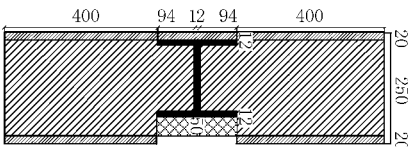


图 2 带有外保温的测试试件 B

表 1 试件中所用建筑材料的热工参数^[5]

材 料	导热系数 λ / (W/(m·K))	比热容 c / (J/(kg·K))	密度 ρ / (kg/m ³)
加气混凝土	0.19	1 050	500
水泥砂浆	0.93	1 050	1 800
H 型钢	58.2	480	7 850
EPS(聚苯乙烯泡沫塑料)	0.042	1 380	30

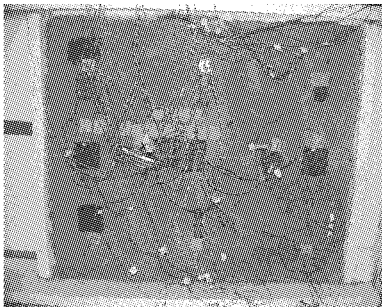


图 3 热侧试件表面热电偶和热流计的布置

实验用的防护热箱热流测量误差不大于±0.5%,热电偶温度测量误差不大于±1%,冷室空气强迫对流,试件表面传热系数依据标准查表得到^[13]。

在测试过程中,利用两个热电偶分别连续测量热室与冷室的空气温度。13 个热流计和 22 对热电偶布置在试件的热侧;试件冷侧布置了 22 对热电偶。

在测试过程中,热室保持在 19℃,冷室保持在-12℃。在采集数据前,试件放置在设置温度(热室 19℃,冷室-12℃)条件下 7 天,确保试件的温

度分布接近均匀。

3 对比分析

图 4 和图 5 给出了两个试件热侧表面温度测量值与计算值的对比结果。表 2 和表 3 给出了热侧表面温度最小值和传热系数的测量值与计算值的比较结果。

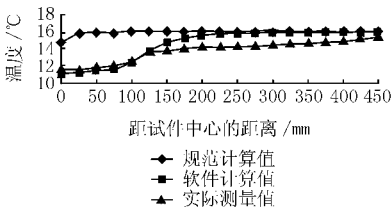


图 4 试件 A 热侧表面温度测量值与计算值的对比
(热室:温度 18.68℃,相对湿度 64%;冷室:温度-12.28℃)

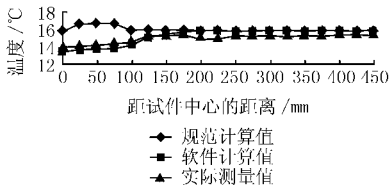


图 5 试件 B 热侧表面温度测量值与计算值的对比
(热室:温度 18.56℃,相对湿度 58%;冷室:温度-11.97℃)

表 2 试件 A 的测量值与计算值的比较

	测量值	利用现行规范		利用 PTDA	
		计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%
热侧表面最低温度/℃	11.58	14.80	32.6	11.16	3.8
传热系数/(W/(m ² ·K))	1.12	0.73	53.4	1.06	5.7

表 3 试件 B 的测量值与计算值的比较

	测量值	利用现行规范		利用 PTDA	
		计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%
热侧表面最低温度/℃	14.26	16.07	17.3	13.70	4.1
传热系数/(W/(m ² ·K))	0.91	0.63	44.4	0.85	7.0

由图 4、5 可见,利用模拟软件计算得到的试件表面温度值与测量值比较接近,表 2 和表 3 表明其相对误差小于 5%;然而,利用我国现行规范规定的计算方法得到的热桥试件表面温度值与测量值相差较大,表 2 和表 3 表明其相对误差甚至达到 32.6%,特别是在热桥中心点相差最大。由图 4、5 可见,在远离热桥处,两种计算方法得到的数值完全一样,而且与测量值基本一致。这说明,在远离热桥处可以按照一维稳态传热方法计算试件表面温度。

根据前文所述,对于热桥,其总传热应包括一维稳态传热部分外加二维线性传热部分。表 2 和表 3 中传热系数对比结果也证明了这一点,利用二

维模拟软件计算得到的试件传热系数值与测量值比较接近,相对误差小于 10%。而利用现行规范规定的方法计算得到的传热系数与测量值相差很大,相对误差甚至大于 50%。

4 结论

由于热桥的存在,与现行规范规定的一维热桥传热简化计算方法相比,实际通过建筑围护结构的传热耗热量大 30%~50%。利用一维简化方法计算得到的热桥中心点的内表面温度与实际测试结果相差较大。热桥的简化一维传热计算方法无法准确计算通过建筑围护结构中热桥的表面温度和热流强度,急需及时修订,以满足建筑节能技术科学发展的需要。

本文第二作者开发的二维模拟软件可以足够精确地模拟计算热桥稳态传热过程,为相关规范的修正提供了工具准备。

参考文献:

- [1] 刘加平. 建筑物理[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,2000
- [2] ISO. ISO 10211-1 Thermal bridges in building construction—heat flows and surface temperatures, part 1 general calculation methods[S], 1996
- [3] ISO. ISO 10211-2 Thermal bridges in building construction—heat flows and surface temperatures, part 2 linear thermal bridges[S], 2001
- [4] ISO. ISO 14683 Thermal bridges in building construction—linear thermal transmittance—simplified methods and default values[S], 1999
- [5] 中华人民共和国建设部. GB 50176—93 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,1993
- [6] 中国建筑科学研究院. JGJ 26—95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996
- [7] 林海燕. 墙体传热的三维模拟分析[C]//中国建筑学会建筑物理分会第八届年会学术论文集,2000:48—53
- [8] 刘月莉,林海燕. 建筑围护结构热桥部位的热工性能分析[C]//中国建筑学会建筑物理分会第九届年会学术论文集,2004:197—200
- [9] 赵敬源,闫增峰. 建筑外墙热损失计算误差的修正[C]//中国建筑学会建筑物理分会第八届年会学术论文集,2000:40—42
- [10] 郎四维. 公共建筑节能设计标准宣贯辅导教材[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [11] Zuk W. Thermal behaviour of composite bridges—insulated and uninsulated [J]. Highway Research Record,1965,76 (2):231—253
- [12] Threlkeld J L. Thermal environmental engineering [M]. Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc,1970
- [13] 国家建筑材料工业局. GB/T 13475—92 建筑构件稳态热传递性质的测定标定和防护热箱法[S]. 北京:中国标准出版社,1992

(上接第 10 页)

见在有渗流、特别是渗流速度较大的情况下,渗流成为影响埋管换热器换热效果的重要因素。

4.2 虽然由于实验条件的限制,本实验的渗流速度与实际地下水渗流速度相差较大,但实验结果已经明确说明:对有水渗流的富水土壤其换热模型不能套用贫水土壤的模式,而必须加入地下水渗流的影响因子。

4.3 在渗流速度较大的富水地区,在保证常规换热效果的情况下,管井布局间距可适当减小,以节约埋地换热器的土地占用面积;或在同样管井间距下,由于吸热(散热)效果明显提高,可减少管井数量或减小埋管长度,节省土壤换热器的投资。

参考文献:

- [1] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes[D]. Sweden:Lund University,1987
- [2] Chiasson A D, Rees S J, Spitler J D. A preliminary assessment of the effects of ground water flow on closed-loop ground heat pump systems [G] // ASHRAE Trans,2000,106(1):380—393
- [3] 谭显辉,丁力行. 影响地下环路热交换器设计的地下水流动的理论分析[J]. 制冷空调与电力机械,2003,24 (5):14—16
- [4] 刁乃仁,李琴云,方肇洪. 有渗流时地热换热器温度响应的解析解[J]. 山东建筑工程学院学报,2003,18 (3):1—5
- [5] 李旻,刁乃仁,方肇洪. 单井回灌地源热泵承压含水层渗流解析解[J]. 山东建筑工程学院学报,2006,21 (1):1—5
- [6] 赵军. 竖直埋管型地源热泵地下传热及热力性能的研究[D]. 天津:天津大学,2002
- [7] 范蕊,马最良. 热渗耦合作用下地下埋管换热器的传热分析[J]. 暖通空调,2006,36(2):6—10
- [8] Chiasson A D. Advances in modeling of ground source heat pump systems [D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1999