

北京振利节能环保科技股份有限公司 主 编
住房和城乡建设部科技发展促进中心

墙体保温技术探索

EXTERNAL WALL THERMAL

TECHNOLOGY EXPLORE

中国建筑工业出版社

墙体保温技术探索

北京振利节能环保科技股份有限公司
住房和城乡建设部科技发展促进中心 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

墙体保温技术探索/北京振利节能环保科技股份有限公司, 住房和城乡建设部科技发展促进中心主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009

ISBN 978-7-112-10692-9

I. 墙… II. ①北…②住… III. 墙体材料: 保温材料-研究
IV. TU522

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 032426 号

《墙体保温技术探索》一书就是在总结以往经验的基础上, 结合多年的理论研究和实践, 并参考各单位的科研成果, 由全国知名的墙体保温专家和直接从事外墙保温研究、生产、销售、施工的技术人员共同编写而成。

本书通过科学试验、计算机模拟、工程实践等多种形式, 从理论上分析研究了热应力、水、风荷载、火、地震力等五个方面, 对墙体保温系统的影响; 同时, 也研究了墙体保温系统粘贴面砖技术和固体废弃物的利用技术, 对墙体保温的基础理论进行了研究和探索。同时, 本书作者是在理论的指导下, 从大量工程实践中总结出来的实用技术, 这些墙体保温的关键技术, 解决了墙体保温工程中的技术难题, 在墙体保温的工程实践中, 有着较强的实践性和可操作性。

本书对于从事建筑节能的工作人员, 对墙体保温技术的研究人员、设计人员和施工技术人员有很好的参考价值, 也可以供相关专业人员参考和使用。

* * *

责任编辑 曲汝铎
责任设计 赵明霞
责任校对 梁珊珊 关 健

墙体保温技术探索

北京振利节能环保科技股份有限公司 主编
住房和城乡建设部科技发展促进中心

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京天成排版公司制版
北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 14¼ 字数: 445 千字

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-10692-9
(17626)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

开展节能研究
指导工程实践

宋春华题



(原建设部副部长宋春华同志为本书题词)

编 委 会

主编单位：北京振利节能环保科技股份有限公司
住房和城乡建设部科技发展促进中心

参编单位：中国建筑科学研究院防火所
清华大学土木工程系

支持单位：住房和城乡建设部住宅产业化促进中心
国家住宅和居住环境工程技术研究中心

顾问：赖 明 陈宜明 涂逢祥 田 明 范 勇 甫拉提·乌马尔

主 编：黄振利

副 主 编：梁俊强 张 君 季广其

编 委：(按姓氏笔画排序)

王庆生	王俊清	王满生	付海明	冯葆纯	白胜芳	任 琳	刘小军
孙四海	孙克放	朱 青	佟万江	宋 波	宋长友	张燕忠	李东毅
李晓明	林燕成	金鸿祥	拜合提亚		祝根立	胡永腾	赵 旭
赵成刚	郝 斌	徐东林	徐晨辉	顾泰昌	游广才	解福州	

序

建筑节能走过了二十多年的发展历程，节能减排已成为我们的基本国策，绿色环保的可持续发展已成为了人们的一种追求。

《墙体保温技术探索》一书的出版，是建筑节能发展到一定阶段的产物。墙体保温经过十几年的工程实践总结，并以大量的实验数据分析为基础，通过有限元法、有限拆分法建立温度场热应力的数学模型，总结了墙体保温技术发展至今的规律性轨迹。

该书以五种自然破坏力对保温墙体的影响为研究基础，让人们从着重关注墙体热阻，转变到当前关注墙体保温的安全隐患和整体寿命，让专业人员更加关注保温层构造位置，对建筑物整体稳定性的影响。

在五种自然破坏力中，火灾对建筑的影响和损害是巨大的。该书提出了以构造防火为主的技术路线，积累了燃烧试验过程中所采集的 120 万个数据，特别是对墙体保温系统衡量其抗火灾攻击能力技术标准的提出，进一步量化了控制高层火灾的技术数据值。

建筑节能技术的发展与墙体外保温的基础理论研究，需要得到社会各界人士的广泛关注，需要产、学、研共同支撑与协作，使建筑节能在自主创新的道路上有更快、更好、更大的发展。

陈宜明

住房和城乡建设部建筑节能与科学技术司

2009 年 3 月于北京

前 言

墙体保温已成为当今建筑节能的主要实现方式之一，是建筑节能的一个主要组成部分。在国家节能降耗政策和节能标准的推动下，我国墙体保温技术取得了长足而迅速的发展，出现了诸多采用不同材料、不同构造做法的外墙保温技术。目前，我国的墙体保温技术相对来讲，还处在一个发展阶段，还存在着许多问题需要进一步改进和提高。

为使我国的墙体保温技术达到理想效果，理清墙体保温的基本思路，纠正一些错误的认识，提高从事墙体保温事业人员的技术水平，北京振利节能环保科技股份有限公司同清华大学、中国建筑科学研究院等单位合作，通过科学试验、计算机模拟、工程实践等多种形式，从理论上分析研究了热应力、水、风荷载、火、地震力等五个方面，对墙体保温系统的影响；同时，也研究了墙体保温系统粘贴面砖技术和固体废弃物的利用技术，对墙体保温的基础理论进行了研究和探索。

北京振利节能环保科技股份有限公司从 2005 年开始和清华大学土木工程系合作，建立了考虑太阳辐射作用、环境温度变化时的建筑墙体温度场的数值计算模型，对外墙外保温、外墙内保温、夹芯保温和框架墙填充加气混凝土自保温等各种保温墙体，在北京地区一年四季条件下的实时温度场进行了模拟，并对外墙外保温墙体各构造层的温度应力进行了计算，同时对特殊结构（如女儿墙、雨篷等），在外界环境温度变化下，进行了温度场和温度应力的模拟计算和分析。

北京振利节能环保科技股份有限公司和中国建筑科学研究院防火所从 2001 年就开始合作，对市场应用比较广泛的几种外墙保温系统进行了多次防火试验研究，包括锥形量热计试验研究、燃烧竖炉试验研究、大尺寸模型防火安全性能试验研究等，通过试验提出了外保温防火分级划分和适用高度标准，以及墙体保温防火构造做法。

《墙体保温技术探索》一书就是在总结以往经验的基础上，结合多年的理论研究和实践，并参考各单位的科研成果，由全国知名的墙体保温专家和直接从事外墙保温研究、生产、销售、施工的技术人员共同编写而成。

本书共分七章，第一章、第五章由王满生博士编写；第二章、第三章由张桂宝工程师编写；第四章由宋长友工程师编写；第六章由付海明、解福州工程师编写；第七章由胡永腾工程师编写。

本书对于从事建筑节能的工作人员，对墙体保温技术的研究人员、设计人员和施工技术人员有很好的参考价值，也可以供相关专业人员参考和使用。

墙体保温技术发展迅速，存在许多尚待解决的问题，书中难免会存在一些错误，欢迎读者批评指正。

编者

2009 年 3 月

目 录

1 保温层构造位置对外墙温度场及温度应力的影响	1
1.1 保温墙体温度场计算原理	1
1.1.1 温度场微分方程	1
1.1.2 有限差分法求解保温外墙的一维热传导方程	2
1.1.3 有限元法求解保温外墙的热传导方程	4
1.1.4 温度场计算的边界条件	8
1.2 保温墙体温度应力计算原理	8
1.2.1 保温墙体温度应力计算模型	8
1.2.2 保温墙体温度应力有限元分析	10
1.3 温度场模拟计算	11
1.3.1 外界温度环境	11
1.3.2 温度场模拟结果和分析	12
1.3.3 温度场分析结论	18
1.4 温度应力模拟计算	18
1.4.1 温度应力数值模拟分析	18
1.4.2 温度应力分析结论	25
1.5 外墙外保温耐候性能等级研究	26
1.5.1 研究的目的是和意义	26
1.5.2 研究的方法和内容	27
1.5.3 试验研究的基本内容	28
2 系统防水透气	32
2.1 外墙外保温系统的防水性和透气性	32
2.1.1 Kuenzel 外墙保护理论	32
2.1.2 材料吸水性能	33
2.1.3 材料透气性能	33
2.1.4 国内外保温装饰系统标准的吸水和透气性能描述	33
2.1.5 外墙系统吸水性和透气性能分析	34
2.1.6 气迁徙的影响因素分析	35
2.2 渗透冷凝分析	35
2.2.1 参数选择	35
2.2.2 基层聚苯板保温层厚度的改变对系统冷凝的影响	36
2.2.3 钢筋混凝土基层聚苯板保温层厚度的改变对系统冷凝的影响	37
2.2.4 结论	38
3 风对外墙外保温系统的影响	39
3.1 风荷载计算	39
3.1.1 保温构造模型	39
3.1.2 风荷载计算	39

3.1.3 聚苯板受力分析	40
3.1.4 聚苯板粘接率和所受荷载的关系	41
3.1.5 保温系统风荷载应力分析	41
3.1.6 结论	42
3.2 聚苯板脱落的实际工程案例	42
3.2.1 案例一	42
3.2.2 案例二	42
3.2.3 案例三	43
4 系统防火	44
4.1 概述	44
4.1.1 外保温防火技术现状	44
4.1.2 外保温火灾案例分析	48
4.1.3 外保温系统的防火安全性分析	56
4.1.4 外保温防火存在的几个误区	59
4.1.5 解决外保温防火安全的技术途径	61
4.2 外保温标准解析及防火试验与评价方法	61
4.2.1 解析《建筑材料及制品燃烧性能分级》	61
4.2.2 解析《高层民用建筑设计防火规范》和《建筑设计防火规范》	65
4.2.3 外保温材料及系统常用试验方法	66
4.3 外保温材料及系统防火试验研究	73
4.3.1 保温及复合材料的燃烧性能研究	73
4.3.2 外保温构造防火的试验研究	88
4.4 系统防火等级划分及适用建筑高度	126
4.4.1 防火分级重点考虑的因素	126
4.4.2 系统防火等级划分及适用建筑高度	127
4.5 施工过程防火安全管理	129
4.6 防火外保温系统示例	131
4.6.1 岩棉外保温系统技术研究	131
4.6.2 有机/无机复合型防火技术构造体系及材料技术的研究	135
5 外墙外保温系统抗震	141
5.1 外墙外保温体系抗震要求	141
5.1.1 外墙外保温体系的抗震	141
5.1.2 外墙外保温体系抗震的基本要求	141
5.2 外墙外保温体系抗震的验算	142
5.2.1 建筑结构的抗震计算原理	142
5.2.2 外墙外保温体系抗震验算	143
5.2.3 外墙外保温体系抗震试验	143
5.2.4 外墙外保温体系地震作用力与其他荷载的组合	144
5.3 外墙外保温体系抗震试验实例	145
5.3.1 试验目的	145
5.3.2 试验试件	145
5.3.3 试验设计	146
5.3.4 试验结果及分析	148

5.3.5 实际应用情况	149
6 外墙外保温系统粘贴面砖技术研究	150
6.1 外墙外保温粘贴面砖系统构造	150
6.2 外保温粘贴面砖系统构造的受力分析	150
6.2.1 系统自重	150
6.2.2 温度应力	150
6.2.3 风荷载	151
6.2.4 水的破坏	152
6.2.5 地震荷载	152
6.3 墙体饰面砖层出现脱落和开裂的原因分析	152
6.4 外保温粘贴面砖加固增强措施研究	152
6.4.1 聚合物砂浆环境特征	153
6.4.2 玻璃纤维网格布	153
6.4.3 镀锌四角钢丝网	154
6.4.4 增强结构的比较	154
6.4.5 镀锌四角网的选择及研究	156
6.5 外保温粘贴面砖系统配套材料的研究	159
6.5.1 外保温粘贴面砖对系统的基本要求	159
6.5.2 外保温粘贴面砖系统中抗裂砂浆层的研究	160
6.5.3 外保温粘贴面砖系统中面砖粘结砂浆层的研究	161
6.5.4 外保温粘贴面砖系统中勾缝胶粉层的研究	163
6.5.5 面砖的性能指标	164
6.6 外保温粘贴面砖系统的施工技术	165
6.6.1 工艺流程	165
6.6.2 施工要点	165
6.7 外墙外保温面砖系统大型试验验证	166
6.7.1 抗震试验	166
6.7.2 耐候性试验	166
6.7.3 现场拉拔试验	166
6.8 总结	166
7 固体废弃物在外保温系统中的应用	168
7.1 固体废弃物概念及分类	168
7.1.1 概念	168
7.1.2 分类	168
7.2 建筑节能行业消纳固体废弃物的潜力分析	169
7.2.1 我国固体废弃物存量分析	169
7.2.2 固体废弃物再生利用的国内外技术现状	171
7.3 固体废弃物在外保温系统中的应用概述	174
7.3.1 固体废弃物在外保温系统中应用的可能性分析	174
7.3.2 固体废弃物在外保温系统中的应用及发展现状	174
7.4 固体废弃物外保温系统与传统外保温系统对比	175
7.5 固体废弃物在保温材料中的综合利用	175
7.5.1 废聚苯乙烯泡沫塑料综合利用	176

7.5.2 废聚酯塑料瓶综合利用	177
7.6 固体废弃物在砂浆产品中的综合利用	177
7.6.1 基础试验	177
7.6.2 外保温体系干拌砂浆产品开发试验研究	200
7.7 外保温体系和砂浆产品中固体废弃物含量	209
7.7.1 砂浆产品中固体废弃物含量	209
7.7.2 外保温体系中固体废弃物含量	210
7.8 外保温系统中固体废弃物性能要求及质量标准制定	214
7.8.1 废聚苯颗粒	214
7.8.2 废橡胶颗粒	214
7.8.3 废纸纤维	215
7.8.4 粉煤灰	215
7.8.5 尾矿砂	215
7.9 外保温系统固体废弃物综合利用评价	215

1 保温层构造位置对外墙温度场及温度应力的影响

随着目前我国经济建设的快速发展,建筑耗能在我国能源总消费量中所占有的比例逐年上升。我国自1997年就已经开始强制实行建筑节能,其中一个主要措施就是对外围护结构进行保温。目前的普遍做法是在外围护结构中加入保温层,以此控制室内外热量的传递,达到建筑节能的效果。保温层的位置对围护结构的保温效果有一定的影响,同时对外围护结构本身的温度场也有明显的影响。在国内外墙保温技术,尤其是外墙外保温技术的发展较快,工程应用越来越多,但是相关理论研究还相对缺乏,明显跟不上发展的需求。目前保温墙体内部温度场的分析还停留在稳态传热分析,而建筑物在实际的使用过程中,外界环境包括太阳辐射、大气温度等都在不断地发生变化。因此,通过稳态传热分析方法得到的保温墙体内部温度场的分布结果与实际情况会存在较大差异,而随着计算机技术的发展和数值模拟理论的进步,数值模拟分析越来越多地应用于实际工程分析,在这样的条件下,对保温墙体的温度场进行实时数值计算分析是可行的,也是必要的。同时,建筑物外围护结构置于自然环境中,长期经受自然界环境条件变化和太阳辐射等温度作用的影响,由此产生的温度应力对围护结构造成的损害是严重的^[1]。借助于高效的数值分析方法,对保温墙体实时温度场及温度应力进行计算,可以更加确切地了解保温墙体内部各功能层的温度及其温度应力的发展情况,有利于更好地完成保温墙体设计,并进行深入的耐久性和使用寿命的研究和改进。

本次研究是北京振利节能环保科技股份有限公司和清华大学共同研究的成果,建立了考虑太阳辐射作用、环境温度变化条件下建筑外墙实时温度场的数值计算模型,对外墙外保温、外保温内保温、夹芯保温和框架墙填充加气混凝土自保温等各种保温墙体,在北京地区一年四季条件下的实时温度场进行了模拟,并对外墙外保温墙体各构造层的温度应力进行了计算,同时对特殊结构(比如:女儿墙、雨篷等)在外界环境温度变化下,进行了温度场和温度应力的模拟计算和分析。

1.1 保温墙体温度场计算原理

计算在大气变温及太阳辐射、空气对流等复杂边界条件下保温墙体内部温度场是对保温墙体进行应力及耐久性分析的基础。常用的温度场计算的数值方法包括有限差分法、有限元法^[2,3]。

1.1.1 温度场微分方程

建立典型保温墙体在外界大气温度变化等条件下温度场的计算模型。模型中假设墙体为均匀连续并具有通常物理特性的多层复合结构;板材各层间紧密,并忽略层间热阻。板材中任意时刻 t ,任意位置 (x, y, z) 处的温度 T 应满足:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1-1)$$

其中 λ 为导热系数 $[\text{kJ}/(\text{mh} \cdot ^\circ\text{C})]$; c 为材料的比热 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$; ρ 为材料的密度 (kg/m^3) 。对于建筑外墙(忽略门窗等部位的影响),其内部温度在长度(y)和宽度(z)两个方向的温度变化很小,即 $\partial T/\partial y = \partial T/\partial z \approx 0$,仅在其厚度方向温度变化剧烈,所以通常条件下建筑外墙的热传导方程可简化为沿墙厚方向的一维的热传导方程,即:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1-2)$$

墙体内部沿厚度方向温度场的求解就是在给定边界条件和时间下对方程式(1-2)的求解问题。

1.1.2 有限差分法求解保温外墙的一维热传导方程

首先将保温墙体结构按照其构成分成若干层,对应各层输入几何尺寸、材料性质等,为了对比内保温和外保温两种常见的保温模式的保温性能,在建立模型的过程中,将内保温和外保温相对应各层的材料属性取相同的数值。保温墙体沿厚度方向的节点可分为内部节点、内表面节点、外表面节点和两种不同性质材料的交汇点。内表面边界条件主要包括室内空气对流换热、外表面的边界条件包括太阳辐射、外表面辐射和室外空气对流换热等。

1.1.2.1 围护结构内外表面对流换热边界条件

对流是指流体内部各部分发生相对位移,依靠冷热流体互相混杂和移动引起的热量传递方式。墙体表面和流体之间在对流和导热同时作用下进行的能量传递称为对流换热。对流换热热流密度与壁面和主流区(大气)温度之差成正比。对墙体内表面,设室内空气温度为 $T_{in}(t)$,室内空气与墙体内表面对流换热系数为 β_{in} ,墙体内表面温度为 $T_1(t)$ (第一个节点),忽略室内和墙体内表面之间以及各层墙体材料的相互热辐射。此时,墙体内表面与室内空气的对流热交换量可表达为:

$$q_{in} = \beta_{in} [T_{in}(t) - T_1(t)] \quad (1-3)$$

在我国《民用建筑热工设计规范》中^[4],详细规定了换热系数的取值,本文取 $\beta_{in} = 8.7W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

与墙体内表面类似,对墙体外表面,设室外空气温度为 $T_{out}(t)$,室外空气与墙体外表面对流换热系数为 β_{out} ,墙体外表面温度为 $T_n(t)$ (第 n 个节点),墙体外表面与室外空气的对流热交换量可表达为:

$$q_{out} = \beta_{out} [T_{out}(t) - T_n(t)] \quad (1-4)$$

β_{out} 与室外建筑物表面风速有关。本文为便于比较,将春夏秋冬四个季节的 β_{out} 值分别取为 21、19、21、23W/(m² · °C)。

1.1.2.2 太阳辐射

对于建筑物的热环境来说,太阳辐射是一项非常重要的外部影响因素。到达地面的太阳辐射由两部分组成,一部分是方向未经改变的,叫做直射辐射;另外一部分是由于大气中气体分子、液体或固体颗粒反射,达到地面时没有特定的方向,这部分叫散射辐射^[1,3]。直射辐射和散射辐射之和就是达到地面的太阳总辐射,简称太阳辐射。太阳辐射强度大小用单位面积、单位时间内接收的太阳辐射的能量来表示,分别叫做太阳直射辐射照度、太阳散射辐射照度和太阳总辐射照度。太阳辐射的问题实际上比较复杂,影响太阳辐射的因素很多。由于地球自转形成昼夜,地球公转形成四季,不同时间、不同季节的太阳入射角度、地球与太阳的距离等都有变化,直接影响太阳辐射强度;天气阴晴雨雪、大气透明度、地面情况、建筑物表面材料特性等对太阳辐射的影响也都比较大。本文的出发点是对典型条件下的保温墙体结构内部的温度场进行研究,因此在考虑各种因素时尽可能地避免特殊情况,对一些次要影响因素等作了合理的简化和处理,避免研究过程复杂化,并保证最终的结果具有普遍性。

太阳辐射强度的具体计算方法^[5]:

1. 直射辐射照度

地球上某一垂直于太阳光线表面上的直射辐射照度可表达为:

$$I_{DN} = I_0 P^m \quad (1-5)$$

其中 I_{DN} 为太阳直射辐射照度, I_0 为太阳常数, m 为大气光学质量, $m = 1/\sin(h_s)$, h_s 为太阳高度角, P 为大气透明度。水平面上和垂直面上的太阳直射照度 I_{DH} 的 I_{DV} 可分别表达为:

$$I_{DH} = I_{DN} \sin(h_s) \quad (1-6)$$

$$I_{DV} = I_{DN} \cos(h_s) \cos\gamma \quad (1-7)$$

其中, γ 为墙面法线在水平面上的投影与太阳光线在水平面投影之间的夹角, $\gamma = A_s - A_w$, A_s 与 A_w 分别为壁面太阳方位角和墙面方位角。太阳高度角 h_s 可由式(1-8)计算:

$$\sin(h_s) = \sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (1-8)$$

其中 ϕ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬角。 ω 为时角, 由式(1-9)计算:

$$\omega = 15(t - 12) \quad (1-9)$$

t 为地方太阳时。太阳方位角 A_s 由式(1-10)计算:

$$\cos A_s = \frac{\sin h_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos h_s \cos \phi} \quad (1-10)$$

2. 散射辐射照度

墙体外表面从天空中所接受的散射辐射包括了三个部分: 天空散射辐射、地面反射和大气长波辐射。

1) 天空散射

天空散射辐射时阳光经过大气层时, 由于大气层中薄雾、尘埃的作用, 使光线向各个方向反射和折射, 形成一个由整个天穹所照射的散射光。对于晴天水平地面的天空散射辐射照度, 一般由贝拉格公式近似计算, 即:

$$I_{SH} = 0.5 I_0 \frac{1 - P^m}{1 - 1.4 \ln P} \sin h_s \quad (1-11)$$

对于各朝向的垂直墙面上所受到的散射辐射照度为:

$$I_{SV} = 0.5 I_{SH} \quad (1-12)$$

2) 地面反射

太阳光线辐射到达地面之后, 其中的一部分被地面反射。垂直墙面受到的地面反射辐射为:

$$I_{RV} = 0.5 \rho_s (I_{DH} + I_{SH}) \quad (1-13)$$

其中 ρ_s 为地面对太阳辐射的反射率, 一般城市地面反射率可近似取 0.2, 有雪条件下取 0.7。由于大气长波辐射照度比较小, 比较其他部分可以忽略不计。

3. 太阳总辐射照度

太阳总辐射照度是直射辐射照度和散射辐射照度之和, 水平面和垂直墙面上的太阳辐射照度分别为:

$$\begin{aligned} I_{ZH} &= I_{DH} + I_{SH} \\ I_{ZV} &= I_{DV} + I_{SV} + I_{RV} \end{aligned} \quad (1-14)$$

按上述计算过程, 即可得到不同地区、不同方向上太阳辐射照度。同时, 不同的表面材料对太阳辐射的吸收能力也各不相同, 所以墙体外表面的太阳辐射边界条件为:

$$q_r = \alpha_s I_Z \quad (1-15)$$

其中 α_s 为墙体外表面太阳辐射吸收率。

1.1.2.3 保温墙体温度场有限差分方程

根据保温墙体的结构, 可将有限差分计算节点分成四类, 即内部节点(同一材料内部)、内表面节点、外表面节点和两种性质相异的材料的结合点。图 1-1 为外墙板一维温度场求解中典型四类节点示意图, 下面分别导出每类节点的差分方程。

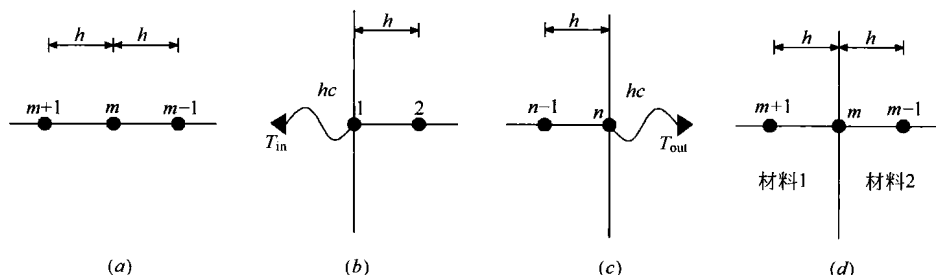


图 1-1 墙体中典型节点示意图

(a)内部节点; (b)墙体内部节点; (c)墙体外部节点; (d)两种材料结合节点

1. 墙体内部节点

对内部节点 m (如图 1-1a 所示), 依据有限差分原理, t 时刻温度 T 对位 x 的二阶微分可近似表达为:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{m,t} \approx \frac{1}{h^2}(T_{m+1,t} + T_{m-1,t} - 2T_{m,t}) \quad (1-16)$$

节点 m 处温度 T 对时间 t 的变化率可近似为

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{m,t+\Delta t} - T_{m,t}}{\Delta t} \quad (1-17)$$

将式(1-16), 式(1-17)代入到一维热传导方程式(1-2)中, 得到节点 m 经过时间间隔(Δt)后温度计算表达式为:

$$T_{m,t+\Delta t} = (1-2r)T_{m,t} + r(T_{m+1,t} + T_{m-1,t}) \quad (1-18)$$

式中, $r = \lambda \Delta t / (c \rho h^2)$ 。利用式(1-18), 根据 t 时刻相邻三个节点的温度, 就可以直接求出 $t + \Delta t$ 时刻 m 点的温度 $T_{m,t+\Delta t}$, 而不必求解方程组, 故被称为显式差分法。由式(1-18)获得稳定解的条件为 $1 - 2r \geq 0$, 即 $\Delta t \leq c \rho h^2 / (2\lambda)$ 。

2. 墙体内表面节点

对与空气接触的墙体内表面节点(图 1-1b), 设混凝土表面对流换热系数为 $\beta_{in} [\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$, 由能量平衡原理有:

$$\beta_{in}(T_{in,t} - T_{1,t}) + \frac{\lambda}{h}(T_{2,t} - T_{1,t}) = \rho c \frac{h}{2} \frac{T_{1,t+\Delta t} - T_{1,t}}{\Delta t} \quad (1-19)$$

整理, 得到:

$$T_{1,t+\Delta t} = (1-2r-2rB_1)T_{1,t} + 2r(T_{2,t} + B_1 T_{in,t}) \quad (1-20)$$

式中, $r = \lambda \Delta t / (c \rho h^2)$, $B_1 = \beta_{in} h / \lambda$ 。上式获得稳定解须满足 $\Delta t \leq c \rho h^2 / 2(\lambda + \beta_{in} h)$ 。

3. 墙体外表面节点

对与空气接触的墙体外表面节点(图 1-1c), 墙体表面换热需增加太阳辐射部分。设墙体外表面对流换热系数为 $\beta_{out} [\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$, 太阳总辐射量为 I_z (单位面积、单位时间内接收的太阳辐射能, $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), 墙体表面对太阳辐射的吸收系数为 α_s , 同样由能量平衡有:

$$T_{n,t+\Delta t} = (1-2r-2rB)T_{n,t} + 2r(T_{n-1,t} + BT_{out,t}) + \frac{2\alpha_s I_z \Delta t}{c \rho h} \quad (1-21)$$

式中, $r = \lambda \Delta t / (c \rho h^2)$, $B_1 = \beta_{out} h / \lambda$ 。同样, 上式获得稳定解须满足 $\Delta t \leq c \rho h^2 / 2(\lambda + \beta_{out} h)$ 。

4. 墙体内不同性能材料之间的连接点

设第 n 个节点左侧材料导热系数为 λ_1 , 节点间距为 h_1 , 右侧材料导热系数为 λ_2 , 节点间距为 h_2 (图 1-1d), 由该类节点的边界条件, 有:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_{n,t+\Delta t}}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_{n,t+\Delta t}}{\partial x} \quad (1-22)$$

由有限差分方程可得:

$$T_{n,t+\Delta t} = \frac{\frac{\lambda_1}{h_1}(4T_{n-1,t+\Delta t} - T_{n-2,t+\Delta t}) + \frac{\lambda_2}{h_2}(4T_{n+1,t+\Delta t} - T_{n+2,t+\Delta t})}{3\left(\frac{\lambda_1}{h_1} + \frac{\lambda_2}{h_2}\right)} \quad (1-23)$$

由上式即可由非界面节点($t + \Delta t$)时刻的温度求出界面节点($t + \Delta t$)时刻的温度。

1.1.3 有限元法求解保温外墙的热传导方程^[6,7,8]

根据方程式(1-1)可知, 保温外墙的热传导方程求解可以分为两种情况: 稳态热传递和瞬态热传递

过程, 对应的有限元求解也是不同的。

1.1.3.1 稳态温度场有限元法

考虑到三维稳定温度场, 即温度场不随时间变化, 在式(1-1)中, $\frac{\partial T}{\partial t}=0$, 求解的问题为:

$$\frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1-24)$$

根据变分原理, 这个问题等价于下述泛函的极值问题。若函数 $T(x, y, z)$ 在边界上满足 $T=T_h$; 并使下列泛函实现极值

$$I(T) = \frac{1}{2} \iiint_R \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (1-25)$$

由欧拉方程可知, 如果 $T(x, y, z)$ 在区域 R 内有解, 满足方程(1-24), 并能够满足边界条件, 则 $T(x, y, z)$ 就为所求解。

把解域 R 剖分为有限个单元, 设单元节点为 $i, j, m, \dots, p$, 节点温度为 $T_i, T_j, T_m, \dots$, T_p , 单元内任一点的温度 $T^e(x, y, z)$ 用节点温度表示如下:

$$\begin{aligned} T^e(x, y, z) &= [N] \{T\}^e \\ [N] &= [N_i, N_j, N_m, \dots, N_p] \\ \{T\}^e &= [T_i, T_j, T_m, \dots, T_p] \end{aligned} \quad (1-26)$$

式中 $[N]$ 为形函数矩阵, 是坐标 x, y, z 的函数, 可通过节点坐标求解; $\{T\}^e$ 为节点温度矩阵。把单元 e 作为求解区域 R 的一个子区域 ΔR , 在这个子区域上的泛函数为

$$I^e(T) = \frac{1}{2} \iiint_{\Delta R} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (1-27)$$

对上式求微分, 得到

$$\frac{\partial I^e(T)}{\partial T_i} = \iiint_{\Delta R} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (1-28)$$

在单元 e 内有

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= \left[\frac{\partial N_i}{\partial x}, \frac{\partial N_j}{\partial x}, \frac{\partial N_m}{\partial x}, \dots, \frac{\partial N_p}{\partial x} \right] \{T\}^e \\ \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \dots \\ \frac{\partial T}{\partial T_i} &= N_i \end{aligned} \quad (1-29)$$

把式(1-29)代入式(1-28)得到

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial I^e}{\partial T_i} \\ \frac{\partial I^e}{\partial T_j} \\ \frac{\partial I^e}{\partial T_m} \end{Bmatrix} = \frac{\partial I^e}{\partial \{T\}^e} = [h^e] \{T\}^e = 0 \quad (1-30)$$

式中 $[h^e]$ 为单元热传导矩阵, 可由式(1-31)计算各元素值:

$$h_{ij}^e = \iiint_{\Delta R} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (1-31)$$

将各单元的 $\frac{\partial I^e}{\partial \{T\}^e}$ 加以集合, 对于求解区域的全部节点, 得到式(1-32)。

$$\frac{\partial I}{\partial \{T\}} = [H]\{T\} = 0 \quad (1-32)$$

式中 $\{T\} = [T_1, T_2, \dots, T_n]^T$ 为全部节点的温度矩阵, $[H]$ 为热传导矩阵, 其元素由与节点 I 有关的各单元的集合而成, 即: $H_{ij} = \sum_e h_{ij}^e$

当边界上节点的温度为已知边界时, 就可以求解式(1-32)得到全部节点的温度。

1.1.3.2 瞬态温度场有限元法

根据变分原理, 瞬态热传导问题等价于下列泛函数极值问题, 温度 $T(x, y, z, t)$ 在 $t=0$ 时, 取给定的初始温度 $T_0(x, y, z)$, 在边界温度条件下, 使泛函数取极小值:

$$I(T) = \iiint_R \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{Q}{cp} - \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right\} dx dy dz + \iint_C \left(\frac{1}{2} \bar{\beta} T^2 - \bar{\beta} T_a T \right) ds \quad (1-33)$$

上式右端第一项是在求解域 R 内的体积积分, 第二项是在第三类边界上 C 的面积分。

由上式可见, 瞬态温度场和稳态温度场的主要差别是瞬态温度场的场函数中, 温度不仅是空间域 R 的函数, 而且还是时间域 t 的函数, 但时间和空间域并不耦合, 因此建立有限元格式时可采用部分离散方法, 首先对空间进行离散, 将求解域分为有限个单元。设单元 e 的节点 $i, j, m, \dots, p$ 的温度 $T_i(t), T_j(t), \dots, T_p(t)$, 单元内任一点温度即可表示为:

$$T^e(x, y, z, t) = [N]\{T\}^e \quad (1-34)$$

式中: $[N] = [N_i, N_j, N_m, \dots, N_p]$
 $\{T\}^e = [T_i, T_j, T_m, \dots, T_p]^T$

形函数 $N(x, y, z)$ 是坐标 x, y, z 的函数, 而节点温度是时间的函数。

把单元 e 作为求解域 R 的一个子域, 在这个域内的泛函数值为:

$$I^e(T) = \iiint_{\Delta R} \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{Q}{cp} - \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right\} dx dy dz + \iint_{\Delta C} \left(\frac{1}{2} \bar{\beta} T^2 - \bar{\beta} T_0 T \right) ds \quad (1-35)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = [N_i, N_j, N_m, \dots] \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial T_i}{\partial t} \\ \frac{\partial T_j}{\partial t} \\ \frac{\partial T_m}{\partial t} \\ \vdots \end{array} \right\} = [N] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} \quad (1-36)$$

对式(1-35)在积分号内求微商, 得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial I^e}{\partial T_i} &= h_{ii}^e T_i + h_{ij}^e T_j + h_{im}^e T_m + \dots + f_i^e \frac{Q}{cp} + r_{ii}^e \frac{\partial T_i}{\partial t} + r_{ij}^e \frac{\partial T_j}{\partial t} + r_{im}^e \frac{\partial T_m}{\partial t} \\ &\quad + g_{ii}^e T_i + g_{ij}^e T_j + g_{im}^e T_m + \dots - p_i^e T_0 \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned} h_{ij}^e &= \iiint_{\Delta R} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz \\ f_i^e &= \frac{1}{\alpha} \iiint_{\Delta R} N_i dx dy dz \\ r_{ij}^e &= \frac{1}{\alpha} \iiint_{\Delta R} N_i N_j dx dy dz \end{aligned}$$