

江苏省墙体材料革新科研项目资助

江苏建筑节能与建造技术协同创新中心开放基金项目资助

粉煤灰混凝土砌块 自保温墙体技术研究

吕恒林 冯 伟 黄建恩 田国华 张丽娟 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏省墙体材料革新科研项目资助

江苏建筑节能与建造技术协同创新中心开放基金项目资助

粉煤灰混凝土砌块自保温 墙体技术研究

吕恒林 冯伟 黄建恩 田国华 张丽娟 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书基于节能、利废、环保的理念,以蒸压粉煤灰加气混凝土砌块和粉煤灰混凝土复合砌块为研究对象,借助文献查阅、现场调查、理论分析、物理模拟试验、数值模拟分析等手段,研究了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块及墙体性能、粉煤灰混凝土复合砌块及墙体性能和粉煤灰混凝土砌块自保温墙体技术。研究提出了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体抗裂技术措施,得到了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块自保温墙体最小计算厚度,开发出了一种粉煤灰混凝土复合自保温砌块及其配套砂浆,提出了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体和粉煤灰混凝土复合砌块墙体热桥保温措施,建立了外墙保温系统适用性评价模型。从材料、建筑设计与构造、施工和验收等方面,系统地提出了粉煤灰混凝土砌块自保温墙体技术,为粉煤灰混凝土砌块自保温墙体应用提供理论参考和技术支撑。

本书可供从事新型墙体材料及建筑节能技术研究的工程技术人员、科研人员以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉煤灰混凝土砌块自保温墙体技术研究/吕恒林等

著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3015 - 7

I. ①粉… II. ①吕… III. ①粉煤灰混凝土—保温砌块—砌块墙体—研究 IV. ①TU364

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 027562 号

书 名 粉煤灰混凝土砌块自保温墙体技术研究

著 者 吕恒林 冯 伟 黄建恩 田国华 张丽娟

责任编辑 仓小金 崔永春

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 880×1230 1/16 印张 10 字数 331 千字

版次印次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着工业化、城镇化进程的加快和消费结构的升级,我国的能源消费总量持续增长,2012年能源消费总量达到了36.2亿t标煤,节能形势非常严峻。建筑领域是能源消耗的重要领域,建筑能耗近年来呈稳步上升趋势,2011年总建筑能耗(不含生物质能)达到6.9亿t标煤,占当年能源消费总量的19.7%。建筑节能已成为我国建设低碳经济,完成节能减排目标,保持经济可持续发展的一个重要环节。

建筑外围护结构节能对建筑节能的长期效益起着极其重要的作用,在建筑外围护结构节能中,外墙保温隔热技术又占有非常重要的地位。以北方城镇采暖建筑为例,采暖能耗约占城镇建筑总能耗的40%左右,围护结构热损失约占采暖能耗的四分之三,而外墙又在围护结构热损失中占25%左右。因此,改善外墙的热工性能,减少热(冷)损失,从而降低采暖空调系统的能耗,是实现建筑节能目标的一个重要途径。

现阶段,我国建筑外墙外保温技术得到广泛的应用,已成为很多地区外墙建筑节能的标准做法。但随着工程应用的普及,外保温墙体系统存在的耐久性、防火性、环保性等方面的问题逐渐暴露出来。与外保温相比,自保温系统耐久性好,防火、抗冲击性能佳,系统安全、可靠,施工便捷。因此,在当前国家全面推进建筑节能的背景下,开展自保温墙体技术研究对推进建筑节能工作开展具有重要的现实意义。

资源和能源是制约人类社会可持续发展的重要因素。我国是个产煤大国,电力工业发展迅速,燃煤电厂的粉煤灰排放量逐年增加,1995年约为1.25亿t,2000年约为1.50亿t,2013年达到约5.85亿t,给我国的国民经济建设和生态环境保护造成巨大的压力。我国又是一个人均占有资源储量较低的国家,综合利用粉煤灰,变废为宝、化害为利,已成为我国一项重要的技术经济政策。

本书基于节能、利废、环保的理念,以蒸压粉煤灰加气混凝土砌块和粉煤灰混凝土复合砌块为研究对象,通过现场调查和文献查阅获得了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块生产及应用现状,总结了存在的问题。物理试验测试了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块及其配套砂浆的基本性能、蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体的力学和热工性能。在人工气候环境模拟的热/雨、热/冷循环试验测试的基础上,提出了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体抗裂技术措施,得到了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体热桥保温措施,理论计算得到了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体平均传热系数和满足寒冷地区不同节能要求的自保温墙体最小计算厚度。通过正交物理试验,并借助ANSYS数值模拟等手段,得到了粉煤灰混凝土复合砌块原材料配合

比和优化孔型,试生产出了粉煤灰混凝土复合自保温砌块产品。物理试验研究得到了粉煤灰混凝土复合砌块配套砂浆的配合比。对粉煤灰混凝土复合砌块及其配套砂浆的基本性能、粉煤灰混凝土复合砌块墙体的力学和热工性能进行了试验测试,结果表明粉煤灰混凝土复合砌块及其配套砂浆性能优良,墙体可实现自保温。借助优属度与层次分析综合法,对应用蒸压粉煤灰加气混凝土砌块和粉煤灰混凝土复合砌块的某两栋建筑物进行了外墙保温系统的适用性评价,得到了自保温系统较为优越的结论。从材料、建筑设计与构造、施工和验收等方面,系统地提出了粉煤灰混凝土砌块自保温墙体技术,为粉煤灰混凝土砌块自保温墙体应用提供理论参考和技术支撑。

本书是江苏省墙体材料革新科研项目和江苏建筑节能与建造技术协同创业中心开放基金项目等的最新研究成果,由吕恒林负责本书整体策划、组织和编写过程中的协调工作并拟定编写了本书大纲。书稿具体的编写分工如下:绪论由冯伟、闫加贺编写;第1章由吕恒林、黄建恩编写;第2章由田国华、周泰编写;第3章由冯伟、黄建恩编写;第4章由吕恒林、马奔编写;第5章由黄建恩、冯伟编写;第6章由吕恒林、冯伟编写;第7章由黄建恩、闫加贺编写;第8章由田国华、周泰编写;第9章由田国华、张丽娟编写;第10章由吕恒林、马奔编写;第11章由冯伟、张丽娟编写;第12章由黄建恩、冯伟编写;第13章由吕恒林、田国华编写。另外,研究生张丙利、陈艳霞、周永阳、张胜旺、刘朋、李思慧等参与了现场调查、文献查阅、数值模拟计算、物理模拟试验等工作。

由于时间仓促,作者水平所限,本书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

目 录

0 绪论	1
0.1 建筑节能概述	1
0.2 蒸压粉煤灰加气混凝土砌块及墙体性能	4
0.3 粉煤灰混凝土复合砌块及墙体性能	9
0.4 自保温墙体技术	14
0.5 研究内容与技术路线	16

上篇 蒸压粉煤灰加气混凝土砌块及墙体性能

1 砌块生产与应用现状	21
1.1 生产现状	21
1.2 应用现状	28
2 砌块与配套砂浆基本性能	31
2.1 砌块	31
2.2 配套砂浆	39
3 墙体抗裂性能	43
3.1 抗裂性能试验	43
3.2 材料性能对墙体开裂的影响	47
3.3 施工工艺对墙体开裂的影响	48
3.4 构造措施对墙体开裂的影响	48
4 墙体力学性能	50
4.1 抗压强度	50
4.2 抗剪强度	53
5 墙体热工性能	55
5.1 主体部位	55
5.2 热桥部位	63
5.3 平均传热系数	67
5.4 自保温墙体最小计算厚度	68

中篇 粉煤灰混凝土复合砌块及墙体性能

6 砌块原材料及配合比	73
6.1 原材料	73
6.2 主体材料配合比	75

6.3 填充材料配合比..... 79

7 砌块块型及孔型..... 80

7.1 块型..... 80

7.2 孔型..... 80

8 砌块制备及基本性能..... 93

8.1 制备工艺..... 93

8.2 基本性能..... 96

9 配套砂浆基本性能 104

9.1 原材料 104

9.2 砌筑砂浆 106

9.3 抹面砂浆 112

10 墙体力学性能..... 114

10.1 抗压强度..... 114

10.2 抗剪强度..... 117

11 墙体热工性能..... 119

11.1 主体部位..... 119

11.2 热桥部位..... 122

11.3 平均传热系数..... 122

11.4 节能性分析..... 122

下篇 粉煤灰混凝土砌块自保温墙体技术

12 墙体适用性评价..... 125

12.1 评价模型..... 125

12.2 评价案例..... 127

13 自保温墙体技术..... 140

13.1 材料..... 140

13.2 建筑设计与构造..... 142

13.3 施工..... 143

13.4 验收..... 144

参考文献..... 145

后记..... 152

0 绪 论

0.1 建筑节能概述

0.1.1 建筑能耗

能源和气候变化问题是人类 21 世纪面临的重大挑战,能源消耗主要包括建筑能耗、工业能耗和交通能耗。建筑领域一直都是全世界能源消耗的主导领域,广义建筑能耗由建筑物内使用能耗、建材生产能耗和建筑物建造能耗三部分组成,狭义建筑能耗只包括建筑物内使用能耗。国际通行的惯例采用狭义建筑能耗,即建筑物(包括商业、民用及其他非物质生产部门)建成以后,在使用过程中每年消耗商品能源的总和,包括采暖、通风、空调、热水供应、照明、电气、厨房炊事等方面的用能。据联合国环境规划署统计,全世界范围内,建筑领域的能耗占到全社会总能耗的 30%~40%^[1],排放的温室气体占与能源有关的总排放量的 33%^[2]。

近年来,我国经济高速增长,建筑业发展迅猛,城市化进程不断加快,各类建筑面积逐年增加,2011 年全国建筑总面积达到 469 亿 m^2 ,如图 0-1 所示^[3]。预计到 2020 年全国建筑总面积将达到约 700 亿 m^2 ^[4]。

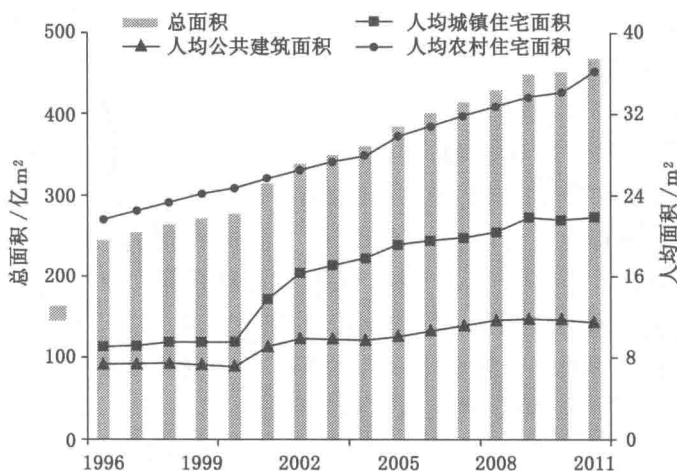


图 0-1 1996~2011 年我国各类建筑面积

随着我国建筑面积的持续快速增长以及人民生活水平的不断提高,建筑能耗呈现稳步上升的趋势。据 2011 年统计,我国建筑商品能耗从 1996 年的 2.59 亿吨标煤(tce)增长到 6.87 亿吨标煤(tce),增加了 1.65 倍,约占当年全社会总能耗的 19.74%,单位面积的建筑商品能耗达到 14.7 kgce/m^2 ,如图 0-2 所示。北方城镇采暖能耗从 1996 年的 0.72 亿 tce 增长到 2011 年的 1.66 亿 tce^[3]。当前,我国建筑能耗占全社会总商品能耗的比例已达到 27.5%^[5],按照国际经验和我国建筑能耗发展的趋势,有关专家预测,到 2020 年,我国建筑能耗占全社会总商品能耗的比例将达到 35%左右^[6]。

0.1.2 建筑节能

建筑节能指依照国家有关法律、法规的规定,采用节能型的建筑材料、产品和设备,提高建筑物围护结构的保温隔热性能和采暖空调设备的能效比,减少建筑使用过程中的采暖、空调、制冷、照明等能耗,合理地利用能源。20 世纪 70 年代,世界各国政府受全球性能源危机的影响,开始认识到建筑节能的重要

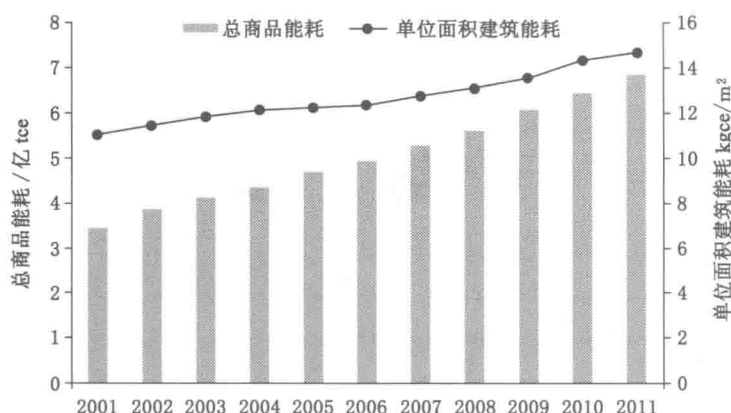


图 0-2 2001~2011 年我国建筑能耗

性,逐步建立了适合本国国情的建筑节能标准,推广节能建筑。当前,各国在建筑节能法规和政策、建筑节能技术等方面做了大量的工作,节省了很多能源,取得了可观的经济效益^[7]。

(1) 建筑节能法规和政策

1974 年,法国制定了建筑节能标准,在保证和提高居住舒适度的同时,提高能源利用效率,降低能源消耗。德国 1976 年首次颁布了《建筑法》,2002 年开始实行新的建筑节能规范《EnEv2002》,从控制单项建筑围护结构的最低保温隔热指标转化为控制建筑物的实际能耗,实行建筑能耗量化,新建住宅必须出具采暖需能量和住宅能耗核心值^[8]。在英国的建筑节能法规中,主要是控制外墙的传热系数,而且保温要求在不断提高^[9]。美国建筑节能标准是目前世界上公认最详细的,美国有 40 个州制定了本州的公共建筑节能标准,其中有 6 个经济比较发达的州(如纽约州和加利福尼亚州等)的建筑节能标准比国家标准更为严格,对新建节能建筑实施减税政策^[10]。

我国的建筑节能工作开始于 20 世纪 80 年代,最初主要是针对严寒和寒冷地区开展采暖建筑保温工作。1986 年建设部颁布了《民用建筑节能设计标准》,要求新建居住建筑,在 1980 年当地通用设计能耗水平基础上节能 30%。《民用建筑节能设计标准》是我国第一部建筑节能设计标准,它的颁布开启了我国建筑节能新阶段。以它提出的指标为目标,建筑节能设计、节能技术纷纷发展起来,一系列的标准和法规先后制定。1990 年,建设部提出了“节能、节水、节材、节地”的战略目标。1994 年起,国家对北方节能建筑实施免征固定资产投资方向调节税,促进了一批节能小区的相继建成。1995 年《民用建筑节能设计标准》修订并于次年执行,修订后的《民用建筑节能设计标准》将第二阶段建筑节能指标提高到 50%。1998 年 1 月 1 日实施的《中华人民共和国节约能源法》将建筑节能明确纳入其中。21 世纪的到来,在科学发展观的指引下,建设领域明确了必须走资源节约型、环境友好型的新型道路,建设科技工作将“四节一环保”作为科技攻关的主要方向,取得了明显效果。2008 年 4 月,修订后的《中华人民共和国节约能源法》明确规定了建筑节能工作的主要内容,为建筑节能工作的开展提供了法律基础。2008 年 10 月,《民用建筑节能条例》颁布实行,标志着我国民用建筑节能标准体系已基本形成,基本实现对民用建筑领域的全面覆盖。2012 年 5 月,住建部颁布《“十二五”建筑节能专项规划》,确定了“十二五”期间我国建筑节能和绿色建筑事业发展的方向和目标。2015 年前,我国城镇新建建筑执行 65% 建筑节能标准,部分发达地区执行节能 75% 标准。

(2) 建筑节能技术

建筑节能技术主要包括四个方面:节能与新能源开发利用、节能与地下空间开发利用、节材与材料资源合理利用、节水与水资源开发利用。节能与新能源开发利用技术基本上又包括建筑物围护结构保温隔热技术与新型节能建筑体系、供热采暖与空调制冷节能技术、可再生能源与新能源应用技术和城市与建筑绿色照明节能技术等方面。后三种技术相对第一种技术而言,其节能能力较易通过使用新的节能技术得到较快提高,而一旦建筑物建设完工后,建筑物围护结构的节能能力就很难再改变,即使暖通、空调设备的效率再高,能耗也会非常大,且室内的热环境无法达到基本舒适的要求。因此,就节能的长期效益来说,建

筑围护结构的节能起着极其重要的作用。

采暖空调能耗是建筑能耗的最大构成部分,约占总建筑能耗的 60%^[11],而采暖空调能耗中约有 1/3 以上是建筑围护结构的耗热量,其中墙体所占比重最大,约占围护结构耗热量的 75%~80%^[12]。合理设计和选择建筑墙体类型和组成部分,改善墙体的热工性能,采取墙体保温技术,减少热(冷)损失,降低采暖空调系统的能耗,是实现围护结构节能的重要途径之一。

国外关于建筑墙体保温技术的研究起步较早,早在 30 多年前就制定了很多的相关法规。国外称外墙保温系统为 EIFS 系统——外墙保温和装饰系统。德国在过去的几十年里使保温系统变成了建筑标准构件,在 1973 年至 2004 年间,德国有大约 6.5 亿 m² 的外墙使用了 EIFS 系统。瑞典在 20 世纪 40 年代就将抹灰砂浆喷在较高密度的矿棉板上,形成一种外墙保温系统,在二战及之后的一段时期内有了很显著的发展。20 世纪 70 年代,石油危机使得能源出现了短缺,外墙保温系统迅速发展起来。20 世纪 80 年代中期,经过对大量的既有建筑进行翻新改造,德国和瑞士约有 40% 的建筑采用了 EIFS 系统^[13]。20 世纪 90 年代,欧洲的外墙保温系统逐渐趋于成熟并稳定发展。目前,国外对于外墙保温的研究主要集中在材料上,并且重点考虑材料的燃烧性、适用性,美观性等,使外墙保温体系更加趋于完善。

我国外墙保温技术开始于 20 世纪 80 年代,随着建筑节能工作的不断推进,外墙保温技术得到了快速发展,在我国的严寒、寒冷和夏热冬冷地区得到普遍推广应用,建成的节能建筑改善了居住舒适度,实现了较好的节能效果。目前外墙保温技术基本上可分为两大类,即自保温墙体技术和复合保温墙体技术。自保温墙体技术具体在 0.4 节中论述,此处仅对复合保温墙体技术做一简单概述。

复合保温墙体技术以各种墙体附加外保温或内保温为主,目前应用最普遍的是粘贴、锚粘保温板和多种保温浆料,以及近几年刚刚发展起来的聚氨酯喷涂、浇筑等现场成型技术。共同特点是界面层、联结层、保温层、防护层、饰面层多道工序现场施工形成完整构造。随着技术发展,保温防水装饰一体化复合板的干挂、粘贴或锚粘施工技术已迅速得到市场认可。而免拆模浇筑聚氨酯一次施工完成保温装饰一体化技术也获得良好评价^[14]。外保温将保温层置于墙体主体结构外侧,使主体结构所受温差作用大幅下降,温度变形减少,对主体结构起到保护作用,有利于建筑物寿命的延长。外保温可以有效减少热桥和消除冷凝,有利于建筑节能和室内舒适度的提高。但外保温施工工艺复杂,施工难度较大,施工质量不易控制,易产生开裂,墙体饰面涂料龟裂,保温层空鼓、渗水、脱落等;保温材料大多为有机材料,达不到防火要求。内保温施工难度不大,对建筑物外墙的垂直度要求不高,施工进度快,对外墙装修的影响也不大。但由于对抗震柱、楼板、隔墙等周边部位不能保温,内保温容易产生“热桥”而使局部温差过大造成结露,结露水的浸渍或冻融很容易造成内墙面的发霉、开裂等,影响使用和美观;并且内保温占用建筑使用面积,居民进行二次装修容易破坏保温层,影响保温层的使用寿命。

我国的建筑节能工作虽然取得了一些进展和成绩,但受经济发展水平、科技水平、节能执行能力等方面的影响,与相似气候条件的发达国家相比还存在着较大差距,单位建筑面积采暖空调能耗约为相似气候条件发达国家的 3~5 倍^[15],建筑节能工作整体上仍处于起步阶段,且发展不平衡。墙体节能作为建筑围护结构节能乃至建筑节能的重要组成部分,墙体保温技术的发展离不开墙体材料本身的发展。在当前建筑节能的形势下,亟需进行新型节能墙体材料产品开发和墙体保温技术的进一步深入研究。

0.1.3 新型墙体材料

新型墙体材料是相对于传统实心黏土砖而言的,泛指综合利用本地资源,采用先进生产技术,加工具有轻质、高强、热工性能优良、耐久性好和施工便捷等优点的建筑墙体材料。新型墙体材料有利于建筑节能、节地、节约成本和环保,是现代化高标准建筑不可或缺的材料。新型墙体材料规格多样且易于后加工,砌筑、安装方便快捷,有利于建筑施工机械化和建筑业的工业化发展。

(1) 国外的发展

20 世纪以来,特别是第二次世界大战以后,世界各国在建筑墙体材料领域有了较快发展。20 世纪五六十年代,工业发达国家的墙体材料就已经完成了从实心黏土砖向轻质、高强新型墙体材料的转变^[16]。国外新型墙体材料种类繁多,主要有混凝土砌块、灰砂砖、石膏板等^[17]。混凝土砌块因具有生产工艺简单、强度高、质轻、砌筑方便、施工效率高、价格低廉等众多优点,在世界各国得到广泛应用。以美国为例,

目前美国混凝土砌块制品有 2 000 多种,混凝土砌块年消费量约 5 000 万 m^3 ,占到美国墙体材料总量的 34%^[18]。欧洲国家混凝土砌块用量占墙体材料用量的 10%~30%^[17],而德国的这一比例更高,达到了 40%^[19]。混凝土砌块已成为目前建筑墙体材料的主要品种之一,并日益朝着节能、利废、环保、企业规模化、生产技术智能化、产品多样化、功能复合化的方向发展^[20]。

(2) 国内的发展

我国新型墙体材料的发展始于 20 世纪 70 年代末,近年来,伴随着我国建筑行业的快速发展,墙体材料的需求大幅增加,同时国家对建筑墙体材料的标准要求不断提高,新型墙体材料的生产和应用越来越广泛。截至 2010 年底,全国所有城市城区实现了禁止使用实心黏土砖,这为新型墙体材料的发展提供了广阔的空间。同时,一系列建筑节能法规、政策和标准的出台,也为新型墙体材料的发展提供了重要支持。1987 年至 2010 年间,我国新型墙体材料总量增加了二十多倍,年产能折合 6 000 万块标砖以上的新型墙体材料生产企业达到 5 000 多家。2010 年全国新型墙体材料的产量达到 4 700 亿块标砖,占当年墙体材料总产量的 55%,北京、上海等地生产的墙体材料全部为新型墙体材料^[21]。新型墙体材料应用量 3 500 亿块标砖,占当年墙体材料应用总量的 70%^[21],以新型墙体材料为主的生产和应用格局已经形成。目前,我国新型墙体材料主要有砖、建筑板材和建筑砌块三大类。

砖是我国墙体材料的主导产品,并以空心砖为主,可用于墙体的承重和非承重部位。烧结空心砖孔洞率大,表观密度小,可节省相同比例的原料和燃料,保温隔热性能好,我国西部地区及有黄土资源的地区可着重发展烧结墙体材料,在价格、资源、生产等方面具有较大的优势。

我国的轻质板材在传统板材的基础上,近年来研发并应用了玻璃纤维增强水泥轻质多孔隔墙板(GRC)、钢丝网架水泥(聚苯乙烯)夹芯板、石膏夹芯板、金属面夹芯板等新型轻质板材。

建筑砌块主要包括蒸压加气混凝土砌块、混凝土砌块和石膏砌块等。目前,我国年产建筑砌块 2 800 万 m^3 ,其中 80%为普通混凝土砌块,20%为轻质砌块^[18]。普通混凝土砌块的缺点是容易出现裂缝,因此必须改善生产工艺,不断提高产品性能。加气混凝土砌块保温隔热性能优良,可利用工业废渣如粉煤灰、炉渣等,有利于固体废弃物的综合利用,缺点是吸水性大,体积稳定性差,如不能解决存在的问题会对砌块的推广应用造成一定的限制。

近年来,我国电力工业发展迅速,燃煤电厂数量众多、规模庞大,粉煤灰排放量逐年增加,1995 年粉煤灰排放量约为 1.25 亿 t,2000 年约为 1.50 亿 t^[22],2013 年达到约 5.85 亿 t^[23],而当前粉煤灰的综合利用率仅为 30%左右^[24],与现行国家政策要求达到 60%以上的综合利用率相距甚大。为了提高粉煤灰固体废弃物的综合利用率,减少粉煤灰对环境的污染,以粉煤灰为主要原材料生产新型墙体材料,是其有效途径之一,在化害为利、变废为宝、保护环境、节约土地、实现可持续发展等方面具有深远的意义。

0.2 蒸压粉煤灰加气混凝土砌块及墙体性能

蒸压粉煤灰加气混凝土砌块是以硅质材料(粉煤灰)和钙质材料(石灰、水泥)为主要原材料,掺加发气剂(铝粉),经搅拌、浇注、预养、切割、高压蒸养等工艺过程制成的一种具有高分散性多孔结构的混凝土制品,具有质轻、保温、隔热、吸声隔音、抗震防火、施工简便等优点,是一种节能、节土、利废、环保的新型墙体材料。

但蒸压粉煤灰加气混凝土砌块也有其自身的缺点,由于砌块的自身材性,块体大、干燥风干快、体积收缩明显、吸水性强、抗剪切强度低等特点,以及施工和使用管理等不合理因素的影响,蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体易出现开裂、空鼓、渗漏等问题。这不仅影响了建筑的美观和墙体的整体性能,还进一步影响建筑的使用寿命。此外,蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体存在热桥部位,热桥部位如处理不当,将产生结露现象,影响室内环境卫生和人员健康。因此,防治墙体裂缝,处理好墙体热桥成为蒸压粉煤灰加气混凝土砌块推广应用亟需解决的重要问题。

0.2.1 砌块与配套砂浆基本性能

(1) 砌块基本性能

1889 年,捷克人霍夫曼发明了加气混凝土,并取得专利。其后,经过许多专家的不断完善,技术逐渐

趋于成熟,成为世界上广泛应用的轻质墙体材料之一。日本在引进生产专利后,主要以生产板材为主,并研发了其后续加工设备,在板材表面加工花纹、图案等。目前,日本在这方面居世界领先地位。其他国家引进专利技术后在生产工艺上也实现了多次创新和改进,波兰的蒸压加气混凝土制品在生产技术上已进入第三代,产品也实现多样化,包括混凝土砌块和板材。从工艺技术来看,从开始工业化生产以来取得了显著的进步,瑞典不但获得了“伊顿(Ytong)”和“西波列克斯(SiPorex)”两大专利并且建立了相应的一批工厂。其他国家也在引进生产技术的基础上研发具有自己特点的生产技术,特别是一些气候寒冷的国家如挪威、荷兰、波兰、丹麦等,不仅成功研究自己的生产技术还形成了新的专利,如德国的“海波尔(Hebel)”、荷兰的“求劳克斯(Durox)”、波兰的“乌尼波尔(Unipol)”和丹麦的“司梯玛(Stema)”。其中,德国已成为蒸压加气混凝土的技术中心,伊通技术已在 23 个国家建立了 44 条生产线,生产规模达到每年 1 184 万 m^3 ;威翰技术已在世界各国建立了 26 条生产线;求劳克斯技术也在 6 个国家建立了 10 条生产线,年生产能力超过 350 万 m^3 ;海波尔技术在 22 个国家建立了 51 条生产线,年生产能力约 850 万 m^3 [25-27]。

Narayanan 等 [28] 对蒸压加气混凝土材料的结构及性能进行了全面的总结,蒸压粉煤灰加气混凝土砌块强度的高低与其所含有的活性硅含量有重要关系。Isu 等 [29] 研究了使用不同粒径的石英来改变蒸压加气混凝土的力学性能。

Hu, W. Y 等人对北美地区多个厂家的多种粉煤灰加气混凝土进行大量的试验研究,发现粉煤灰加气混凝土在含水率小于 15% 时材料的强度较高,随着抗压强度的提高,其抗拉强度也会增大 [30]。

Hussin 等 [31] 以火山灰为主要成分制备加气混凝土,分别从引气量、不同性质的减水剂以及沙子的尺寸,研究其加入后对加气混凝土抗压强度、干密度等的影响,试验结果表明原材料及掺量都将影响加气混凝土的抗压强度与干密度。美国学者利用纤维对加气混凝土进行了改性研究并取得良好的技术效果。日本的西波列克斯公司通过利用体积憎水处理法在加气混凝土配料中掺入硅油,大大提高了产品的性能 [32]。

目前,国际上有两个非常有影响力的加气混凝土技术委员会,拥有许多来自各国的顶尖专家学者。他们分别是国际材料与结构研究实验联合会(RILEM)和国际建筑协会(WACF)。两个委员会中一个主要制定、改进加气混凝土的使用性能标准测试方法,另一个则主要制定与加气混凝土的构件计算、设计相关的国际标准 [33]。这两个技术委员会对世界加气混凝土工业的发展起到了至关重要的作用。

当前,国外对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块性能的研究向轻质、高强、多功能方向发展。在原材料方面,加大了对粉煤灰、炉渣、工业废石膏、废石英砂和高效发泡剂的利用。通过采用新技术、新工艺和高强水泥,提高了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块的强度,并降低了产品密度。法国、瑞典和芬兰已研发出表观密度小于 300 kg/m^3 且吸水率较低、保温性较好的产品并将其应用于实际工程。

我国的蒸压粉煤灰加气混凝土砌块最早出现在 20 世纪 30 年代的上海,1966 年北京建成第一条蒸压加气混凝土砌块生产线。伴随着《蒸压加气混凝土砌块》(JC315—82)标准的颁布和三次修订,蒸压粉煤灰加气混凝土砌块得到了很快发展,砌块性能也不断改进提高。

蔡辉 [34] 分析了粉煤灰的理化特性,提出了适宜生产蒸压粉煤灰加气混凝土砌块的粉煤灰原材料的活性、有害物质含量、细度和容重等方面的性能要求,即活性高(玻璃态 SiO_2 和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比较高)、有害物质如硫化物、可溶盐和未燃尽物质等少、细度适当(在 0.045 mm 方孔筛筛余 12%~20% 之间)、容重较大(在 600 kg/m^3 以上)的粉煤灰才是适宜生产蒸压粉煤灰加气混凝土砌块的原材料。

蔡振哲、彭军芝、吴敬龙 [35] 通过加气混凝土小模试验研究得到随着水料比的增加,砌块试样的容重和强度均随之降低,并分析了水料比对加气混凝土发气孔形态和分布的影响。当水料比小时,发气孔孔径较小,孔隙均匀;水料比增加,孔隙均匀度降低,孔径增大。

贾兴文、钱觉时 [36] 试验研究了初始含水率、相对湿度、温度和试件尺寸等因素对砌块干燥收缩的影响。吕春飞、吴文军、杨柳 [37] 通过测定不同试件含湿量和收缩值的经时变化,描述了加气混凝土砌块收缩变形的规律。结果显示,环境湿度越低,初始含湿量越高,加气混凝土砌块的收缩值越大,砌块的含湿量与收缩值存在相关性。

桂苗苗 [38] 试验研究了含水率对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块力学性能的影响,通过回归分析得到了砌块抗压强度和劈裂抗拉强度与含水率之间的函数关系,根据试验结果,对国标规定的试验方法进行了探

讨。刘会军^[39]通过分析影响发气与稠化速度的多种因素,提出生产中需重视的工艺参数,以保证料浆稠化与铝粉发气相互匹配,控制其浇注稳定性。

(2) 配套砂浆基本性能

众多研究表明:墙体自保温系统必须选用与其配套的砌筑砂浆,若使用普通水泥砂浆砌筑轻质保温砌体,会导致整个砌体存在“冷桥”现象,甚至在砌筑灰缝、整个墙面出现结露现象,对自保温墙体的强度和传热性能带来不利影响^[40]。

国外一些应用加气混凝土砌块配套砂浆的研究取得了较多成果,瑞典及西欧的一些国家多年来一直使用从造纸木浆中提炼的名为 MODOCONE600 的木制纤维材料作为胶凝材料,通过与水泥进行混合做成的砂浆用于加气混凝土砌块制品的砌筑配套材料,并进行相应研究,制订了相关试验方法。这种砂浆黏稠性、流动性、保水性、附着性能好、黏结力强、制作使用方便。砌筑时,加气混凝土砌块的表面不用浇水、干作业、灰浆厚度仅 1~2 mm。

国内对加气混凝土砌块配套砂浆性能进行了很多方面的研究,获得了一些性能优良的配套砂浆产品。郑欣、马德功^[41]通过分析普通砂浆不适合加气混凝土砌块的砌筑和抹面的原因,研究了 NK 系列配套砂浆,并做了大量与普通砂浆性能的对比试验。结果表明,NK 系列配套砂浆有效地解决了加气混凝土砌块常见的质量通病,而且具有施工方便快捷、综合造价低等优点。

肖力光等^[42]研究了北方寒冷地区蒸压加气混凝土砌块专用保温砌筑砂浆,针对蒸压加气混凝土砌块与普通砌筑砂浆导热系数相差过大,易使砌体出现“冷桥”,造成砌体能量损失,甚至结露现象,研究了与蒸压加气混凝土砌块相配套的一种新型保温砌筑砂浆。

陈志聪、季韬、黄萍^[43]针对传统砂浆存在的保水性差、黏结强度低、易开裂等缺点,通过对比试验,研究了粉煤灰、UEA 膨胀剂和电石渣对砂浆保水性、和易性、抗压强度、抗折强度、黏结强度、折压比、黏压比、抗裂性能的影响,研制出各项性能指标满足相关规程要求的加气混凝土砌块配套砂浆。段鹏选、王肇嘉、郭建平^[44]研究了加气混凝土配套砌筑砂浆和抹灰砂浆的技术性能。

国内外研究者借助理论分析及物理实验手段,研究了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块和配套砂浆的含水率、干燥收缩值、强度等基本性能参数及生产工艺要求,提出了具体的改进方法和措施,但对应用于自保温墙体中利于墙体抗裂的粉蒸压煤灰加气混凝土砌块和配套砂浆的性能研究还较少,有待进一步研究。

0.2.2 墙体抗裂性能

对于加气混凝土干燥收缩性能的研究是控制墙体裂缝产生的有效途径之一,早在 1977 年,波兰的 Ziembicka 对多孔混凝土的微孔结构与其收缩性能的关系进行了细致的研究^[45]。在 Ziembicka 研究的基础上,希腊的 Georgiades 和 Marinou^[46]于 1991 年对加气混凝土的微孔结构与收缩之间的关系进行了系统研究,并建立了它们之间的函数关系式。

高连玉等^[47]以粉煤灰加气混凝土为试验研究对象,获得了加气混凝土的干燥收缩规律、建筑墙体裂缝产生原因及为减少裂缝而应采取的构造措施。苏振华^[48]在总结实际工程中出现开裂、空鼓等现象并分析其原因的基础上,从砌块的干燥收缩值、吸水性和干燥收缩速度三个方面对砌块抗裂性能进行了研究,得到了砌块有利于抗裂的干燥收缩值、含水率和含水深度等指标的范围。

柯丽君^[49]从实际工程中总结了墙体裂缝的形式,分析了开裂的原因,并依据实际经验提出了砌块含水率大小的适宜范围。赵书杰等^[50]研究得到了关于砌块排列、高度、混砌及砂浆灰缝等砌筑要求,墙面抹灰的操作方法,界面剂宜采用的种类及涂刷要求,玻纤网格布的贴设要求等措施。

杨芳^[51]对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块养护时间、围护结构的水平长度和高度等进行了研究,并经工程应用试点验证了防裂效果。刘江波、石剑^[52]从抹灰时间的控制、抹灰层厚度的控制、分层抹灰时间间隔控制以及抹面层养护和干燥时间的控制等角度提出了防开裂控制措施。通过工程应用试点,裂缝控制取得了很好的效果。

国内外研究者对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体出现开裂、空鼓、渗漏等问题的成因和防治措施等进行了深入的研究,提出了一些解决技术和措施,但目前尚无相对成熟的配套技术,并缺乏对应用这些技术措施的墙体在自然气候条件下的长期的抗裂性能的研究。

0.2.3 墙体力学与热工性能

(1) 墙体力学性能

目前,日本、印度、美国等国家对加气混凝土的研究保持活跃,他们的研究重点主要是加气混凝土的抗裂性能和抗震性能的研究^[33]。很多学者已经不局限于对加气混凝土单独砌体的力学性能进行研究,对加气混凝土与其他高强度的材料进行组合搭配,把更多优越的性能拼凑在一起,这样使整体具有更加优越的性能。目前国外一种新颖的混合纤维增强聚合物(FRP)——蒸压加气混凝土夹心板材已经被认证为是一种轻质的组合结构墙体材料^[32]。Nasim U. 等^[53]分析了在低速冲击作用下,加气混凝土 FRP 夹心板材的抗冲击效应,并对板材的损伤性能进行评估。David Z. 等^[54]研究了加气混凝土墙体体系在高强作用力下的动态力学性能。Varela 等^[55]基于 14 片蒸压加气混凝土剪力墙的低周反复荷载的试验结果,研发了蒸压加气混凝土结构设计的应用程序。

20 世纪 80 年代,清华大学、中国建筑东北设计研究院等对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体的力学性能、抗震性能等进行了系统的理论与试验研究。但之后的近 20 年时间里我国却并未对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块的研究工作给予足够的重视,以致研究工作实际上是处于一种缓慢发展的状态^[56]。进入 21 世纪,随着低碳建筑的兴起,人们愈来愈重视新型墙体材料的研究工作,相应地,对于蒸压粉煤灰加气混凝土砌块及墙体的研究也给予了较多科研力量的投入,取得了一定的研究成果,并制定了行业标准与技术规范。

赵成文等^[57]采用普通砂浆、普通砂浆配筋、普通砂浆配纤维以及专用配套砂浆等方式对加气混凝土砌体的轴心抗压强度进行研究,砌体开裂后还可以承受一定的压力,试验数据表明开裂荷载为破坏荷载的 34%~58%,采用专用配套砂浆薄灰缝的砌筑方式显著提高了抗压砌体的开裂强度,约为普通砂浆的 1.25 倍。

任国鹏^[58]对蒸压粉煤灰加气混凝土复合保温砌块填充墙框架结构进行有限元分析,提出该复合保温砌块砌体填充墙的一些抗震措施建议,并对一六层复合保温砌块填充墙框架结构作反应谱分析与时程分析,在此基础上总结在地震作用下的带有蒸压加气混凝土复合砌块填充墙的钢筋混凝土框架结构力学性能规律。

吴东云等^[59]通过对多片粉煤灰加气混凝土砌块墙体进行抗剪试验,研究了强度等级相同而外形不同的粉煤灰加气混凝土砌块砌体的配筋墙体、无筋墙体的抗剪性能及其破坏特征,为粉煤灰加气混凝土砌块作为承重墙体材料应用提供试验依据。

董博文^[60]通过对 8 片蒸压加气混凝土砌体的水平低周反复荷载抗震试验、研究墙体的抗震抗剪强度、破坏形态、变形性能和刚度退化耗能性能等特性,综合分析蒸压加气混凝土砌体的抗震性能,研究不同高宽比、竖向压应力、砂浆强度及种类对砌体破坏形态和抗震性能的影响。

(2) 墙体热工性能

瑞典研究者在实践中利用各种材料并考虑结构设计特点改进围护结构的设计,克服热桥的影响,改进了提高了墙体的热工性能。美国、加拿大等国家研究了一系列的复合节能墙体,在热桥部位作了一些特殊处理,以降低热桥传热在整个建筑能耗中所占的比重^[61]。

Deque F. 等^[62]采用二维方法分析了某一建筑的热桥,并得出热桥的存在导致建筑能耗增加 5% 的结论。Adnan 和 Krati^[63]采用局部/全局分析的方法分析了楼板与地面的传热问题,这种方法非常适合建筑围护结构的多维传热分析。

Larbi A. B. ^[64]提出了用于计算二维热桥热传导的统计数学模型,并对三个实例进行计算分析,发现用这种方法计算二维热桥的热传导相对误差小于 5%。由于任意二维热桥的模型边界及物性参数都是相似的,因此这种方法可以广泛应用。

Bellia L. 等^[65]利用 TMCE 软件对冬季某多层结构墙体表面的结露问题进行了计算分析,由此得到了墙体的最小热阻值,并判断是否会发生结露。Aelenei D. 等^[66]对建筑外表面的结露问题进行了分析,得出建筑外表面是否发生结露主要取决于墙体表面的能量平衡与环境空气的含湿量。

Gong G. 等^[67]采用正交试验方法与 CFD 计算方法对处于高湿环境的某造纸车间墙体的结露问题进行了分析,研究了结露现象随控制参数的变化情况,其判断是否会发生结露的指标是墙体内部表面与靠近内

表面空气的露点温度差,该温度差与控制参数具有线性关系,此文献为研究结露问题提供了有效方法。

我国研究者近年来对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体热工性能、建筑热桥和建筑内部冷凝等进行了较为深入的研究,取得了一些成果。

高原、张君^[68]对比研究了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块自保温墙体与胶粉聚苯颗粒贴砌聚苯板外保温墙体的保温隔热性能,研究表明:在不增加墙体总厚度的情况下,采用蒸压粉煤灰加气混凝土砌块,辅之以较薄的保温砂浆,可以达到以聚苯板为主要保温材料的外保温墙体相同的保温隔热效果,且蒸压粉煤灰加气混凝土砌块自保温墙体的造价明显较低。

陈利群^[69]对夏热冬冷地区烧结多孔砖砌体、加气混凝土砌块砌体、陶粒混凝土空心砌块砌体三种自保温体系的传热系数和热惰性指标进行了计算与对比,分析了三种自保温体系在夏热冬冷地区应用推广的可行性,为建筑节能提供参考数据。

王斌^[70]计算了自节能蒸压粉煤灰加气混凝土墙体的经济厚度,模拟分析了自节能墙体、外保温墙体和内保温墙体的温度场分布及热流密度,同时研究了灰缝厚度及砌筑砂浆导热系数对自节能墙体传热性能的影响,研究表明:灰缝厚度小于 3 mm 和砂浆导热系数小于 0.5 W/(m·K)时,自节能蒸压粉煤灰加气混凝土墙体热工性能较好。

赵立华等^[71]利用面积加权法对不同单元的复合墙体平均传热系数作了研究。胡平放,胡幸生^[72]以居住建筑为例,分析了不同结构、不同外墙宽度以及不同窗墙比情况下热桥对墙体平均传热系数的影响。张淑红^[73]分析了热桥出现的部位与表面温度分布的一般规律,通过对严寒地区砌体结构建筑热桥部位热工指标进行测试,分析了热桥对外墙体平均传热系数的影响趋势,通过平均传热系数公式的演变,指出热桥是影响外墙平均传热系数的主要因素。刘学来等^[74]建立了构造柱热桥的数学模型,利用二维有限元方法,对住宅建筑构造柱热桥散热量及构造柱热桥内表面温度进行了计算与分析,绘制了热桥部位温度分布与热流分布图。

何水清、朱兴连^[75]以蒸压粉煤灰加气混凝土砌块复合外墙节能建筑为实例,对在冬季采暖期间的冷辐射和冷凝水进行了计算,结果表明:一个采暖期的冷凝量小于湿度允许增量,满足使用要求。赵立群,陈宁^[76]研究了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块自保温墙体系统的内部冷凝问题,研究表明:蒸压粉煤灰加气混凝土砌块自保温墙体系统应用于上海地区,结构内部不会产生冷凝现象。

国内外研究者对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体的基本力学性能与热工性能、热桥部位保温处理、墙体防结露处理等进行了研究,但缺乏对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块满足自保温要求下的墙体最小厚度的确定,对热桥处理技术措施等还需要进行深入研究。

0.2.4 墙体能耗与适用性

董臻旻^[32]利用天正建筑节能分析软件(TBEC)对寒冷地区典型框架结构建筑与剪力墙结构建筑进行了能耗模拟分析,验证了单一材料的加气混凝土自保温体系在寒冷地区的适用性。

王宏业等^[77]结合太原市某小区一栋一梯两户三个单元的六层建筑节能工程,设计采用蒸压粉煤灰加气混凝土砌块填充墙的玻化微珠保温混凝土框架结构体系,运用能耗分析理论对其建筑耗能进行了分析。

张艳等^[78]结合在舟山地区的应用情况,对墙体经济性进行了分析,证明蒸压加气混凝土砌块的使用可以使制造成本、运输费用、建筑能耗、使用耗材、建筑用地等得到不同程度的节约,为蒸压加气混凝土砌块在夏热冬冷地区的推广应用提供了依据。刘剑波等^[79]通过能耗模拟软件,从节能与热舒适性两个方面分析得到了加气混凝土砌块墙体的适用性,认为加气混凝土适合用做建筑外围护材料。

李清疆、刘军^[80]从理论和实际应用两个角度,对比加气混凝土砌块与烧结页岩空心砖的能耗和碳排放量。从理论上,加气混凝土砌块因轻质多孔能够显著降低建筑能耗和碳排放。但从实际应用角度来看,加气混凝土砌块与平衡饱水后页岩空心砖相比,不再具有节能减排优势。应控制加气混凝土砌块的吸水率,以保证在使用过程中良好的保温隔热效果,减少能耗和碳排放。

国内外研究者研究了蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体的建筑能耗、与其他墙体保温系统的节能性与经济性等适用性差异。但在考虑热桥作用前提下,对我国寒冷地区蒸压粉煤灰加气混凝土砌块自保温墙体适用性综合评价还需进行深入研究。

0.3 粉煤灰混凝土复合砌块及墙体性能

粉煤灰混凝土复合砌块是一种在粉煤灰混凝土空心砌块的孔洞内填充保温材料复合而成的砌块。国外对粉煤灰混凝土复合砌块的研究起步较早,帕尔墨(Harmon S. Palmer)是生产混凝土砌块的先驱,他设计了空心砌块成型机,1887年在施工现场就地生产砌块,并建造了第一栋砌块房屋。1905年,美国政府经试验测试验证,允许巴拿马运河区、菲律宾岛等地区的建筑采用空心砌块。随后的几十年间,空心砌块在美国快速发展,成为建筑砌块市场上的主力产品。1945年砌块产量达到50 000万块,1951年,美国创造了年产砌块160 000万块^[81]的记录。目前,小型空心砌块占美国全国建筑用砌块总量的50%以上^[82]。

与西方发达国家相比,我国开始研发及应用粉煤灰混凝土复合砌块较晚。20世纪60年代至70年代是我国空心砌块的发展初期,在这一时期,吉林地区研制开发了小型砌块,广州、贵州等地区应用简单的振动机械生产了小型空心砌块。20世纪80年代是小型空心砌块发展的新时期,湖南、安徽、四川、广西等省份相继建成了砌块生产企业,同时建造了一批砌块建筑。20世纪90年代,我国小型空心砌块逐渐应用到高大空间建筑中。进入21世纪后,新型空心砌块(KP1型黏土空心砖、页岩粉煤灰烧结承重多孔砖,S3型节能烧结砖、复合保温大孔砖、复合保温多孔砖、混凝土多孔保温砖、轻集料混凝土多孔砖以及复合保温砌块等)品种越来越丰富,原材料越来越倾向于轻质多孔材料,填充保温材料后的复合砌块的保温隔热性能越发改进提高,其产量占建筑用砖(砌块)的份额也逐年增大。

0.3.1 砌块原材料及配合比

Hadhrami等^[83]研究了七种烧结多孔砌块和两种混凝土砌块的热工性能,其研究结果表明:在砌块生产原材料中加入保温材料比在砌块孔洞中插入保温材料效果更好。Yesilata等^[84-86]试验研究了废塑料和橡胶片对增强多孔砌块热工性能的作用,废塑料的掺入量范围为10.27%~18.10%,砌块热阻增加18.52%。

曹万智等^[87]研发了一种以水泥、膨胀珍珠岩、粉煤灰及发泡剂为主要原材料的新型多功能微孔轻质混凝土复合砌块,该砌块的导热系数为0.072~0.074 W/(m·K)。律宝莹等^{[88][89]}对粉煤灰挤塑泡沫复合砌块进行了优化研究,得出了在粉煤灰构架层中加入珍珠岩等原材料,有利于进一步降低材料热阻,进而提高复合砌块的传热热阻。廖正坤等^[90]研究研发了一种以建筑垃圾(废旧聚苯乙烯(EPS)颗粒)为混凝土轻骨料的混凝土空心砌块。

范军等^[91]将小麦的秸秆经过粉碎、搅拌(加入适量的石灰浆),然后压缩成秸秆块,放入纤维混凝土空心砌块中制作成秸秆纤维混凝土复合砌块。经检测,秸秆纤维混凝土复合砌块砌体(厚度200 mm)传热系数为1.08 W/(m²·K),比相应厚度的空心砌块传热系数(1.57 W/(m²·K))减小了31.2%。江嘉运^[92]研究分析了夹芯式复合保温砌块的生产原材料、工艺流程以及在吉林省应用状况。

国内外研究者研究了粉煤灰混凝土复合砌块的主体材料、填充材料及其配合比,其中主体材料以水泥、膨胀珍珠岩、粉煤灰等轻质材料为主。砌块主体材料中粉煤灰掺加量多为30%左右,缺乏对满足寒冷地区建筑节能标准的粉煤灰混凝土复合自保温砌块原材料及配合比的研究。

0.3.2 砌块块型及孔型

Lorente等^[93]对不同孔洞排列方式的复合砌块热阻进行模拟计算,得到了在一定温度条件下,提高多孔砌块的高度更有利于砌体保温隔热性能的提高。

SISMIBLOC砌块是法国研制的代表性砌块,该类型砌块将上砌块的壁底凹形与下砌块的壁顶凸形组合成燕尾结合,同时左右砌块也类似的凸凹结合,使用SISMIBLOC砌块砌筑成砌体后,墙面上下和左右均紧密结合,形成统一整体^[94]。

Diaz等^[95]用二维、三维的有限元模型求解空心砌块传热方程,分析了不同孔洞尺寸、排布方式的空心砌块传热,选定了最有利于提高空心砌块热阻的孔洞。

Alhazmy^[96]应用数值分析的方法研究得到了通过向空心砌块孔洞中插入折叠的纸(或其他材料)来提高砌块整体热阻,其研究结果表明:用折叠材料分成6~8区可以有效地将空心砌块传热系数降低37%~42%,聚苯乙烯、纸、玻璃纤维以及传热的塑料材料都是较适合的折叠材料。

Sun 等^[97]运用 Fluent 软件(基于有限元体积法)模拟了混凝土空心砌块的传热过程;混凝土空心砌块的等效导热系数取决于混凝土导热系数、孔洞内空气自然对流换热强度以及热辐射强度。热辐射对砌块等效导热系数的影响范围为 7.41%~25.39%,自然对流换热对等效导热系数的影响为 0.0049%~22.50%,导热系数为 1.4 W/(m·K)的混凝土制作的空心砌块(S3-8)等效导热系数为 0.32619 W/(m·K)。

Zukowski 等^[98]通过试验和数值模拟研究确定了一种新型复合砌块(烧结黏土砌块,保温材料为珍珠岩),等效热容为 855.1 J/(kg·K),等效导热系数为 0.09 W/(m·K),等效密度为 653.15 kg/m³,砌体整体传热系数为 0.29 W/(m²·K)。

Hazmy^[99]研究了三种不同孔洞排列方式砌块(包含空心砌块与复合砌块)的传热过程,研究成果表明孔洞的缺陷是影响砌块热阻的重要因素,孔洞中加入实心保温材料棒最大可减少 36%的热流,而空心保温材料棒由于存在空气对流仅减少热流 6%。

Antar^[100]通过三维数值模拟发现总宽度相同的条件下两排孔比一排孔更有利于减小辐射传热,进而增加整个砌块的热阻。

Li 等^[101]运用有限体积法进行数值模拟,研究成果表明:孔洞之间热辐射量的变化导致砌块传热系数的变化,其最大变化为 25.8%(L2W1H1 砌块),最小变化为 4.6%(L14W6H1 砌块)。孔洞数量的增加有利于辐射传热的减少。砌块导热系数受室内外温度变化的影响较小,在 5%左右,L8W4H1 砌块几乎不受温度影响。砌块孔洞大小及排列方式对砌块导热系数的影响规律同样适用于其他空心砌块。常见的七孔和两孔保温砌块如图 0-3 和图 0-4 所示。

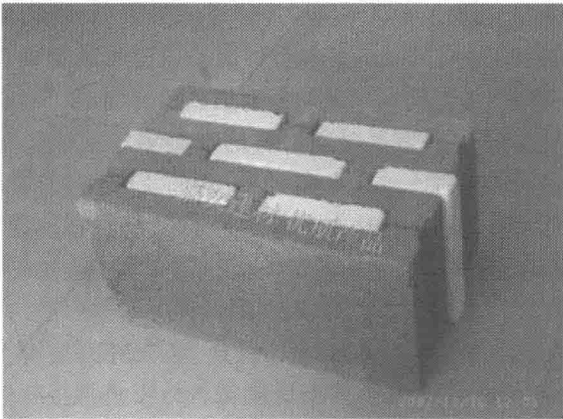


图 0-3 七孔保温砌块

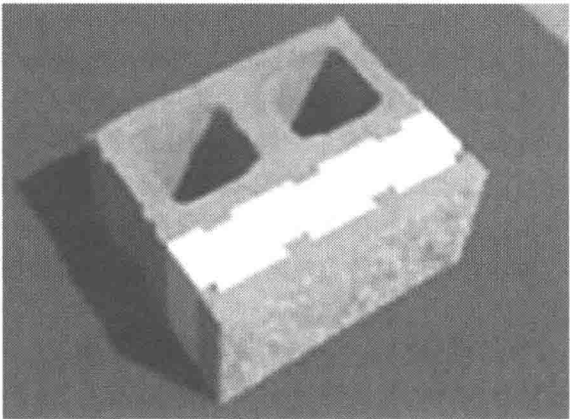


图 0-4 两孔保温砌块

我国复合砌块的块型及孔型主要有普通小砌块优化、N 式砌块、联锁砌块、填充砌块等。普通小砌块优化是在普通混凝土小型砌块(单排二孔)的基础上优化而成的,例如混凝土小型空心节能砌块,见图 0-5,砌体传热系数为 0.57 W/(m²·K)(砌体厚度 310 mm,试件冷侧抹 10 mm 水泥砂浆);复合保温砌块,见图 0-6,砌体厚度 240 mm,传热系数为 0.8 W/(m²·K)。普通小砌块本身复合了保温材料,因而节省了外保温的工序,也提高了砌块本身的保温性能,但该类型砌块存在铺浆面少、施工中容易漏浆、承重肋壁少、不宜打洞、灰缝不密实等问题。

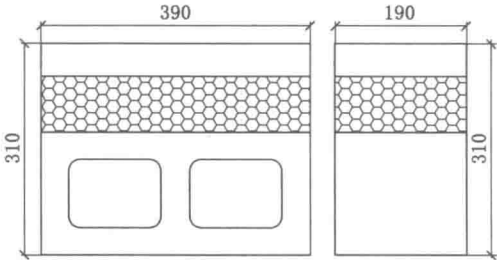


图 0-5 混凝土小型空心节能砌块

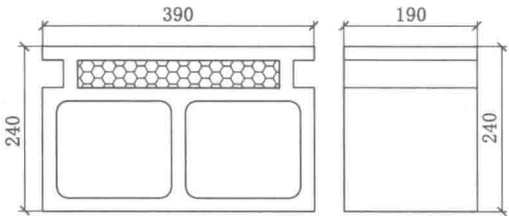


图 0-6 复合保温砌块