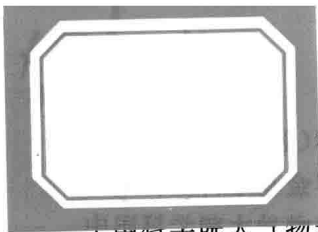


# 室内 ●核生化危害 数值模拟

● 柯佳雄 宋黎 刘峰 黄顺祥 编著



气象出版社  
China Meteorological Press



科研专项(编号:GYHY201106033)

项目(编号:40975089)

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开发课题(编号:  
LAPC-KF-2011-05)

国家科技支撑计划重大项目(编号:2006BAK01A14)

# 室内核生化危害数值模拟

柯佳雄 宋黎 刘峰 黄顺祥 编著



 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

针对室内核生化危害的现实问题,系统地阐述了对危害进行数值模拟、预测、评价和实验验证的原理,并通过实例对模拟方法进行应用演示。对于核生化危害模拟中特有的问题,如释放源的处理、危害评价模型等进行了专门的研究。

本书可供室内环境污染治理、安全管理、通风防护、消防等相关领域的科研人员、管理人员、高校教师和研究生阅读和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

室内核生化危害数值模拟/柯佳雄等编著. —北京:  
气象出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5029-5658-5

I. ①室… II. ①柯… III. ①室内空气-核污染-  
数值模拟 IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 313781 号

Shinei Heshenghua Weihai Shuzhi Moni

## 室内核生化危害数值模拟

柯佳雄 宋 黎 刘 峰 黄顺祥 编著

---

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室: 010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑: 简学东

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 215 千字

版 次: 2012 年 12 月第 1 版

定 价: 30.00 元

邮政编码: 100081

发 行 部: 010-68409198

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

终 审: 章澄昌

责任技编: 吴庭芳

印 张: 8.75

印 次: 2012 年 12 月第 1 次印刷

## 序

近年来,室内空气污染及其对人们健康的危害得到越来越多的关注,各国科学家从不同的角度,利用各种手段对室内空气污染的来源、成分、环境健康效应等进行了广泛而深入的研究,取得了大量的理论和技术成果。采用数值模拟,对室内污染物的源项、扩散分布和危害后果进行分析和预测,是研究室内空气污染的重要方法。室内空气污染的数值模拟领域已经有不少优秀的专著出版,但对于放射性、化学和生物物质等特种污染物在室内造成危害的模拟研究还不多见。由于核生化物质较之普通污染物具有特殊的危险性,在室内人群密集场所可能造成更加严重的伤害后果,已经成为迫切需要研究的课题。

室内核生化危害的数值模拟,包括对核生化物质源项的分析,对物质扩散、沉降、衰减等过程进行数学建模,对危害效应进行定量评价等,涉及环境科学、安全科学、计算流体力学、毒理学、微生物学等一系列理论和技术,属于多学科交叉的研究领域。本书的几位作者有着多年从事核生化危害模拟、评价、应急处置科研和教学工作的丰富经验,从大量的业务工作中提炼出重要的科学问题,并发展了数值模拟的方法进行分析和预测,取得了丰硕的创新成果。

本书从当前面临的室内核生化危害现实问题出发,系统地阐述了对危害进行数值模拟的原理,并结合实验数据,对有毒有害物质扩散分布的模拟结果进行了验证。对于核生化危害模拟中特有的问题,如释放源的处理、危害评价模型等也进行了深入的研究。由于室内核生化物质扩散的复杂性,除了对计算流体力学模拟方法进行了研究和应用之外,对于一些简化快速算法,如多区模型、区域模型等方法也进行了

介绍,并对模拟技术的优化和应用效率进行了专门的探讨,旨在提高模拟技术的实用性。在作者实践的基础上,对当前常用的计算流体力学模拟软件也进行了介绍,为读者提供参考。

总之,本书的出版,是对核生化危害评价领域的重要贡献,相信它能够对环境、安全等相关专业的科研和管理人员提供理论和技术上的帮助,也可为相关领域的研究提供有益的思路。

陈海平

2012年9月

## 前 言

20 世纪 90 年代以来,国际上恐怖事件爆发频繁,其中核生化恐怖更是各国所面临的重大安全威胁之一。此外,由于战争、自然灾害或事故造成放射性、化学物质泄漏,或者由于传染病流行造成致病微生物的传播,也对人们的健康和生命构成严重威胁。这些核生化物质,以气态或者气溶胶状态造成室内空气污染,由于空间受限不易稀释,可能达到较高的浓度并持续较长的时间,与室外污染相比可造成更加严重的后果。

核生化物质在空气中的扩散和危害评价是应对核生化威胁所必须重点研究的科学问题。“9·11”恐怖袭击事件后,美国等科技发达国家加紧研究先进的核生化环境模拟和风险评价技术,力求实现全球、战场、建筑物内等全方位高准确度的核生化危害预测。国内也开展了一系列核生化环境数值模拟研究,对放射性粒子、毒剂云团和致病微生物粒子扩散浓度的计算都有较多的研究成果发表。

本书针对室内核生化物质扩散传播和危害评价的多学科交叉的特点,力求从实际应用的角度出发,重点阐述基本的、常用的理论和方法,避免繁琐的数学推导过程,并与作者业务工作经验紧密结合,通过实例对所述原理进行应用示范。主要包括以下内容:(1)计算流体力学基本方程、湍流模型、数值计算格式、边界条件处理和网格技术等;(2)简化实用模型,如室内通风射流理论、多区模型、区域模型等;(3)核生化危害模拟中的特殊问题,如释放源的处理、危害评价模型等;(4)模拟结果的实验验证,包括实验设计与实施、流场模拟的验证和浓度预测的验证等;(5)常用数值模拟软件的介绍。

本书的出版得到了公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201106033)、国家自然科学基金项目(编号:40975089)、中国科

学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开发课题(编号:LAPC-KF-2011-05)、国家科技支撑计划重大项目(编号:2006BAK01A14)的资助,在此一并致谢。感谢中国科学院大气物理研究所胡非研究员、程雪玲博士等专家为作者在计算流体力学软件使用方面,北京建筑工程学院李德英教授等老师在实验研究方面提供的指导和帮助。在本书出版过程中,得到了防化学院各级领导和相关专家的大力支持和热心指导,在此表示特别的感谢。作者衷心地感谢气象出版社蔺学东编辑等各位同仁在本书出版过程中提供的热情帮助和宝贵建议。

由于作者水平有限,有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2012年6月

# 目 录

## 序

## 前 言

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| 第 1 章 概 论 .....             | ( 1 )   |
| 1.1 室内核生化危害环境的范畴 .....      | ( 1 )   |
| 1.2 室内核生化危害物质的类别 .....      | ( 3 )   |
| 1.3 数值模拟研究现状及发展趋势 .....     | ( 4 )   |
| 第 2 章 多区模型和区域模型 .....       | ( 8 )   |
| 2.1 室内送风射流基本理论 .....        | ( 8 )   |
| 2.2 多区模型 .....              | ( 13 )  |
| 2.3 区域模型 .....              | ( 16 )  |
| 2.4 多区—区域耦合模型 .....         | ( 23 )  |
| 第 3 章 计算流体力学基础 .....        | ( 29 )  |
| 3.1 室内核生化物质扩散的数学模型 .....    | ( 29 )  |
| 3.2 湍流模型 .....              | ( 31 )  |
| 3.3 数值计算方法 .....            | ( 35 )  |
| 3.4 边界条件定义方法 .....          | ( 41 )  |
| 第 4 章 室内核生化危害模拟中的特殊问题 ..... | ( 45 )  |
| 4.1 释放源的处理方法 .....          | ( 45 )  |
| 4.2 核生化危害评价模型 .....         | ( 48 )  |
| 4.3 模拟技术优化与应用效率研究 .....     | ( 54 )  |
| 第 5 章 室内核生化物质扩散模型验证 .....   | ( 57 )  |
| 5.1 实验基础 .....              | ( 57 )  |
| 5.2 气流运动的数值模拟与验证 .....      | ( 71 )  |
| 5.3 有毒物质扩散分布数值模拟与验证 .....   | ( 78 )  |
| 第 6 章 典型数值模拟软件应用 .....      | ( 82 )  |
| 6.1 PHEONICS 软件 .....       | ( 82 )  |
| 6.2 FLUENT 软件 .....         | ( 99 )  |
| 6.3 Tecplot 后处理 .....       | ( 117 ) |
| 参考文献 .....                  | ( 125 ) |

# 第1章 概论

## 1.1 室内核生化危害环境的范畴

美国蒙特雷国际研究学院的防扩散研究中,建立了自1900年以来全球范围内涉及生物、化学、放射性与核材料的各类恐怖袭击事件的开放性数据库。截至2003年6月,数据库中收录的上述类型的恐怖事件已达到1154起,图1-1中按照时间顺序列举了自1970年以来在世界范围内产生较大影响的生化及放射性恐怖袭击的事件。1995年3月20日东京地铁沙林事件最终造成13人死亡,5550人受伤,1036人住院治疗。“9.11”事件后,美国政府部门、主要媒体、国会首脑和其他一些重要目标遭受了连续的炭疽恐怖袭击,造成美国国内的恐慌。截至2001年11月30日,先后有18人感染炭疽,其中5人死亡。此外,诸如“非典型肺炎”传染病、禽流感及甲型H1N1流感等生物病毒在人群中的扩散和传播,给社会稳定和人民生命安全带来了巨大影响。

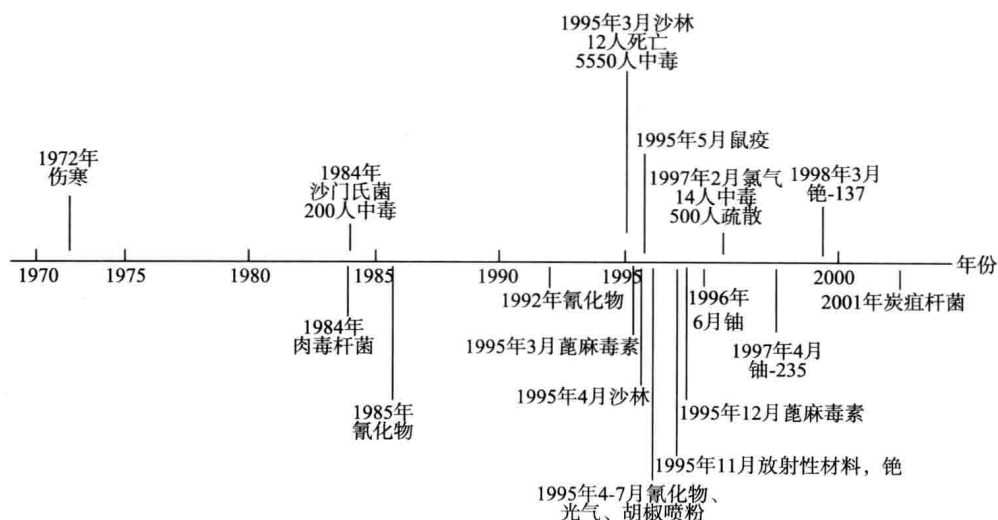


图 1-1 1970 年以来历史上典型的放射性化生恐怖袭击事件

在诸如写字楼、酒店、商场、体育馆、剧院、车站、机场等典型商用建筑,地铁、人防工程等地下建筑,汽车、火车、飞机、轮船等交通工具,军舰、坦克、装甲车、潜艇等军用装备,核电站、化工厂、生物安全实验室等核生化设施,所有这些室内环境都面临着各种不同的核生化威胁。从产生导致室内核生化危害的原因分析,以人为主观原因造成核生化物质泄漏或施放,其危害后果最为严重,难以防范。

### 1.1.1 室内核生化危害物质的存在状态

核生化有毒有害物质在室内空气中的存在状态,是由其本身理化性质及其形成过程决定的,通风环境、气温、湿度等对其产生一定的影响,通常呈气态或者气溶胶状态。气态是指物质在常温下以气体形式分散在空气中,如甲醛、氨、氯化氢和易挥发性有机物等;而在常温常压下是液体或固体的物质,如苯、酚、汞等,由于其沸点或熔点低,挥发性大,因而能以蒸汽态挥发到空气中。不论是气体分子还是蒸汽分子,其运动速度都较大,扩散快,并在空气中分布比较均匀。且扩散情况与其相对密度有关,相对密度小者向上漂浮,相对密度大者向下沉降。

另一存在状态是气溶胶状态,即固态或液态物质以微小的颗粒形式分散在气流或空气中形成的均匀分散系。颗粒大小以颗粒的物理形状和直径来表示,极细的颗粒受布朗运动所支配。细小颗粒能聚集或凝并成较大的颗粒;较大的颗粒多具有固体物质的特点,受重力影响大。气态(蒸汽)物质和气溶胶都随着室内空气流动而不断扩散,其扩散过程受到室内布局、通风方式、热源等多种因素的影响,十分复杂,不同的室内环境,其核生化危害程度也不尽相同。

有毒有害气态物质能够直接通过呼吸道吸入、皮肤沾染、黏膜刺激等产生毒害效应。而颗粒物是一种成分复杂的混合物,其毒害效应与其来源、形态、粒径及吸附在其表面上的各种有毒有害核生化物质相关。颗粒物粒径越小,在空气中的稳定程度越高,沉降速度越慢,被吸入呼吸道的几率就越大,因而增大了其毒害效应。颗粒物对人体健康的危害与颗粒物的粒径大小和成分以及在呼吸道中沉积的部位有着密切关系。通常粒径大于  $30\ \mu\text{m}$  的颗粒很少能进入呼吸道,故对人体健康危害较小;粒径  $10\ \mu\text{m}$  以上的颗粒物大部分被阻挡在上呼吸道(鼻腔和咽喉部),小于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒物能够穿过咽喉部进入下呼吸道,特别是粒径小于  $5\ \mu\text{m}$  的颗粒物能沉积在呼吸道深部肺泡内,对人体健康危害更大。

### 1.1.2 室内核生化危害环境的分类

#### 1.1.2.1 室内核危害环境

室内核危害环境,亦可称为室内放射性危害环境,指放射性物质及其气溶胶在室内散布或泄漏形成的危害环境。相对化学、生物危害而言,室内核危害产生的可能性更低,但一旦形成,其危害也更加严重,处置也更加复杂困难。其主要威胁源于室外放射性危害对室内的影响,这是因为放射性物质更容易被探测,而利用高放射性废料制造“脏弹”对重要目标实施袭击的可能性不能排除,一旦发生袭击,对下风方向一定距离内的建筑物均会造成影响。

#### 1.1.2.2 室内化学危害环境

室内化学危害环境,是指化学有毒有害物质在室内散布形成的危害环境,是最可能发生的一种类型。平时建筑室内环境本身就面临各种化学危害,如家具、涂料散发的有毒有害物质,化学环境污染形成室内污染等;人为故意释放也会产生化学危害环境,如国外发生的历次化学恐怖袭击,恐怖组织在恐怖活动中使用有毒化学物质的技术相对成熟,使用的频率较高,而且可用于化学恐怖活动的物质较多。

#### 1.1.2.3 室内生物危害环境

室内生物危害环境,是指致病微生物、生物毒素或制剂在室内散布形成的危害环境。室内

空气中存在着大量的微生物,通常可用菌落总数指标来衡量,菌落总数越高,存在致病性微生物(细菌、真菌、病毒)的可能性越高,可使人感染而致病,或引发哮喘等变态反应性疾病。常见的过敏原有真菌孢子、纺线菌孢子、尘螨、花粉等。近年来,流感等传染病时有发生,而大多都可通过唾沫等在空气中传播,尤其是人员聚集的室内环境中,人员极易受到感染。此外,不排除人为故意投放病毒、毒素制造生物恐怖的可能,如美国发生的邮件携带炭疽杆菌的事件。

### 1.1.3 室内核生化危害特点

#### 1.1.3.1 危害途径广,持续时间长,后果严重

核生化有毒有害物质可通过多种途径对人员产生伤害。生物化学有毒物质可通过呼吸道吸入、皮肤渗透、食入等方式对人员造成伤害;放射性物质可通过体外照射、体内照射、皮肤沾染等方式对人员造成伤害。许多核生化物质的危害都具有潜伏期,危害效应须长时间后才能显示出来。如放射性物质污染所引起的致癌、致突变作用需要在较长时间后才能显示出来,炭疽的潜伏期为1~7天,“非典”感染者的潜伏期为10~15天。

人员密集的地铁、体育场、会议室、车站、机场等公共场所,一旦遭受核生化恐怖袭击,将造成大规模的人员死伤,可导致社会大范围的精神恐惧和混乱,在较长时间内出现人人自危的现象,严重影响正常的经济建设和社会秩序。例如,2001年3月,日本《读卖新闻》对2000人进行的民意调查显示,81%的人仍对东京地铁沙林事件心存忧虑;2003年爆发的“非典”灾害,其感染范围、危害后果是空前的,共造成了全球20多个国家的8439人感染,812人死亡,并给受害地区的经济建设和社会秩序造成了较大影响。

#### 1.1.3.2 危害处置技术性要求高、难度大

对室内核生化危害物质的处理工作要求高、技术性强,需要有专业的技术装备和专门的处置人员。例如,为切断和控制放射性或有毒有害物质外泄,须采取各种工程技术手段;为鉴别确定和抢救治疗受害人员,需要使用特殊的医疗设备、专用的药品和技术手段;为检测确定污染危害的性质、程度和范围,需要使用宽量程、高灵敏度、高精度的核生化监测设备;为对污染区实施有效洗消,需要使用特殊的消毒剂;为使人员免受核生化危害,需要采取特殊的防护措施等。

## 1.2 室内核生化危害物质的类别

### 1.2.1 有毒有害核物质的类别

国际原子能委员会从工业、医疗、农业、科教、军事等领域所应用的各种放射源的安全与保安角度,将有毒有害核物质分为3个类别,其中包括:钴-60、铯-137、铀-192、钚-170(较少用)、镭-226、铟-90、钋-103、钋-241等放射性同位素的密封源;用于制造核武器的核原料铀-235、钚等;用于核电站发电的核原料等。核与放射性恐怖事件核素统计如图1-2所示。

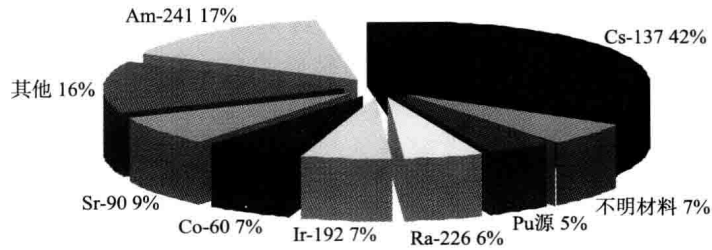


图 1-2 核与放射性恐怖事件核素统计

### 1.2.2 有毒有害化学物质的类别

中国安全生产科学研究院根据《危险化学品安全管理条例》(中华人民共和国国务院第334号)规定,汇编了《危险化学品名录汇编》,其中,将有毒有害化学物质分为“危险化学品”、“剧毒化学品”、“高毒物品”三大类,其中,“危险化学品”有高氯酸、硝酸脲、重氮甲烷等2800多种;“剧毒化学品”有硫酸(二)甲酯等335种;“高毒物品”有氰化氢、砷化(三)氢、苯、氟乙酸等54种。在我国,生产多、应用广、流通性大的常见常用有毒有害化学物质约1000种,包括氯、光气、苯酚、氨等。

### 1.2.3 有毒有害生物的种类

据有关机构统计,有可能用于制造生物恐怖的微生物(毒素)总计约44种之多。包括:

(1)细菌类:炭疽杆菌(炭疽)、土拉弗朗西斯菌(土拉菌病)、布鲁氏菌(波浪热)、类鼻疽伯克氏菌(类鼻疽假单胞菌病)、伯克考克斯氏菌(Q热)、鼻疽伯克氏菌(鼻疽)、伤寒沙门氏菌(伤寒)、志贺氏菌(痢疾)、耶尔森氏菌(鼠疫)、霍乱弧菌(霍乱)等。

(2)病毒类:汉坦病毒、刚果克里米亚出血热病毒、利夫热山谷热病毒、埃博拉病毒、马尔堡热病毒、淋巴细胞性脉络丛脑膜炎病毒、阿根廷出血热病毒、玻利维亚出血热病毒、拉沙热病毒、森林脑炎病毒、登革热病毒、黄热病病毒、鄂木斯克出血热病毒、日本脑炎病毒、西方马脑炎病毒、东方马脑炎病毒、基孔肯亚病毒、委内瑞拉马脑炎病毒、天花病毒、猴痘病毒、流感病毒、艾滋病毒、疱疹病毒等。

(3)立克次(衣原)体类:五日热巴尔通体(战壕热)、立氏立克次体(斑点立克次体病)、梅毒螺旋体(梅毒)、普氏立克次体(斑疹伤寒)、鹦鹉热衣原体(鹦鹉热)等。

(4)真菌及原生动物类:恙虫病东方体(恙虫病)、粗球孢子菌(球孢子菌)、杜波组织胞浆菌(组织胞浆菌病)、弓形虫(弓形体病)、血吸虫(血吸虫病)等。

(5)毒素类:蓖麻毒素、相思豆毒素、肉毒毒素、河豚毒素、石房蛤毒素、黄曲霉毒素、葡萄球菌肠毒素、志贺氏毒素等。

## 1.3 数值模拟研究现状及发展趋势

随着计算机技术的不断发展,越来越多的研究者采用数值模拟方法来解决建筑物设计和评估中所涉及的建筑物内空气流动和空气质量等问题。其主要优点是模拟精确度高,所得的流动参数信息量大,能满足工程设计的现实需求。数值模拟方法已成为解决工程应用问题的

一种重要方法和手段,得到广泛的应用。这些理论和技术为准确计算室内有毒有害物质的扩散浓度分布、正确评估有毒有害物质对人员的伤害提供了坚实基础。

### 1.3.1 室内核生化危害数值模拟研究的意义

针对室内环境所面临的现实核生化威胁,研究室内有毒物质释放、扩散规律和特点,采用数字化仿真技术手段,科学准确地计算毒物的扩散分布,正确评价毒物的危害后果,利用可视化技术将仿真结果以图形或视频等形式展示核生化危害态势,如有毒物质扩散范围、危害持续时间、危害区域等。能够直观再现室内有毒核生化物质的扩散过程,仿真结果的可视化图片或视频文件可存放在网络服务器的共享数据库中,供指挥信息系统调用,为重要建筑环境反核生化恐怖、核生化应急救援行动、人员疏散路径选择、传感器监测点的布设等提供科学定量依据。

### 1.3.2 室内空气环境数值模拟方法

目前,工程应用中针对民用建筑通风和气流组织问题研究,通常采用的数值模拟方法有 Zonal 模型、Multizone 模型和 CFD(Computational Fluid Dynamics, 计算流体力学)方法。Multizone 模型将建筑物内各房间假设为均匀混合的网格,即速度、温度、浓度等参数处处相等,各房间通过门窗、回风口等开口与外界或相邻房间连接,用于模拟由风压、温差和机械送风系统引起的整个建筑物系统的气体流向。其优点是模型方法简单,易与建筑热能模拟软件相耦合;缺点是不能获得房间内部温度、速度、浓度等参数的详细分布信息。CFD 方法通过数值求解流体运动和物质扩散的守恒方程组,获得在空间网格节点上气流运动速度、温度及物质扩散浓度的时空详细分布信息。而 Zonal 模型介于 Multizone 模型和 CFD 方法之间,该方法将房间划分为多个均匀网格,每个网格内流动参数均匀分布,其网格数相对于 CFD 方法少得多,能提供室内热能参数的全局信息,且求解方法简单,计算较快。先期的 Zonal 模型需要提前清楚室内的气流模式,而 POMA 模型中采用压力化方法,可用于预测室内气流模式和热量分布,但其物质扩散浓度模拟精度尚未得到验证。

#### 1.3.2.1 多区模型(Multizone Network Model)

多区模型,又称为多区网络模型,是一种简化模型,宏观上将整栋建筑物作为一个系统,其中的每个房间作为一个控制体(网络节点),其内部参数假设均匀,即具有相同的压力、温度和污染物浓度,各个网络节点之间通过各种空气流通路径相连,利用质量、能量守恒等方程对整个建筑的空气流动、压力分布和污染物的传播情况进行模拟。多区模型计算量小,适用计算建

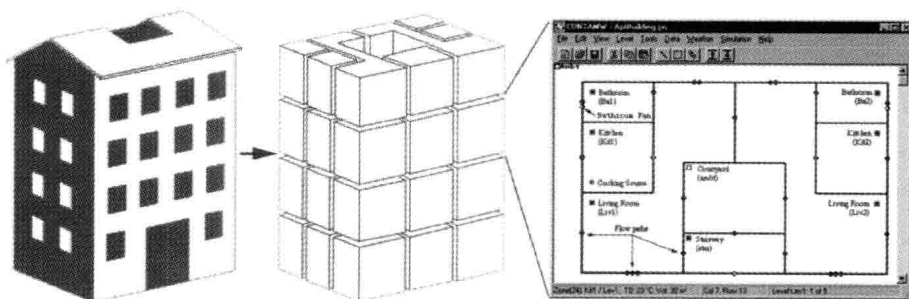


图 1-3 CONTAMW 建模示意图

筑物内由于风、温差、空调系统造成的总体流动预测,在国际上已有较多的研究,国际能源组织的 Annex23 项目就是专门对该方法进行的专题研究,不同国家的研究者开发了多种此类软件,其中以美国国家标准和技术研究院(NIST)建筑和火灾研究实验室开发的用于多区域空气流动模拟研究软件 CONTAMW(图 1-3)和美国劳伦斯·伯克利国家实验室(LBNL)开发的 COMIS 颇具代表性。多区模型在国外应用广泛,其优点是计算速度快,能快速获得毒物在建筑内的传输特征,对于事件后应急控制策略的选择具有很好的实效性。

### 1.3.2.2 区域模型(Zonal Model)

区域模型于 1970 年由研究人员正式提出,起源于对供暖房间温度分层的研究。此后,针对各种特殊室内结构和气流形式进行了模型的应用研究。早期多区模型忽略动量的影响,对房间气流形式进行预先假设,因此,不能建立普遍适应的数学模型,影响了方法的推广使用。近年来,研究人员将压力因素考虑到区域模型中,通过适当的数学处理,模型得以定解,这样建立的模型具有普适性,应用领域扩展到机械通风和自然通风情况下室内环境的模拟,其研究焦点是分区方法和流量计算。

区域模型的基本思想是:将房间划分为一些有限的宏观区域,认为区域内的相关参数如温度、浓度相等,而区域间存在热质交换,通过建立质量和能量守恒方程并充分考虑了区域间压差和流动的关系来研究室内的温度分布及流动情况。然而,由于该方法的自身特性所限,在应用于预测室内气流分布时存在一些局限性。如不宜用于温度梯度很大的情况;没有涉及稳定和速度边界层的问题,静压近似只在平行流型的情况下才合理;辐射传热没有考虑在内;对于射流或喷流中一个区域或多个区域的情况,需要分别考虑。

### 1.3.2.3 计算流体力学方法(Computational Fluid Dynamics, CFD)

计算流体力学方法的基本原理是基于质量、动量和能量守恒定律,将其方程组综合起来称为流体运动的控制方程组。在室内空气流动和热量传递模拟中,大多应用高雷诺数(完全发展的湍流)流动的  $k-\epsilon$  湍流模型。标准  $k-\epsilon$  湍流模型是针对完全发展的湍流流动建立的模型,然而,室内空气流动通常不是完全发展的湍流。Baker 等认为,许多室内空气流动都是局部湍流,在远离 HVAC(加热、通风和空调系统)送风口和障碍物的流动区域呈弱湍流状态,他们指出,标准  $k-\epsilon$  模型对弱湍流区域热量和动量传递的预测值偏高。虽然排气口的气流呈湍流状态,实验测量显示,通风房间的主要区域流动处于层流和湍流的转换状态。在大多数加热或制冷的物体表面,如散热器和窗户,流动呈混合机制。

要克服这些问题,主要有两种方法:一是采用壁面函数法处理近壁面流动,壁面函数法假设边界层的速度和温度廓线形状,而近壁网格点位于完全湍流区, $k$  和  $\epsilon$  的变化同速度函数一致,常采用对数律壁面函数。标准  $k-\epsilon$  模型结合对数律壁面函数方法广泛应用于室内空气流动和热量传递的预测;二是选用恰当的湍流模型,包括低雷诺数湍流模型、两层模型、多尺度模型、RNG  $k-\epsilon$  模型及零方程模型等。

赵彬等针对风口模型、湍流模型、热源和辐射模型及复杂几何物理条件的描述等暖通空调气流组织数值模拟的特殊问题,分别提出了相应的对策或解决思路,如采用 N 点风口模型,采用 MIT 零方程湍流模型、误差预处理法,以及辐射换热、热源传热和 CFD 耦合计算等方法。在湍流的模拟方面,陈清焰比较了不同  $k-\epsilon$  湍流模拟对室内空气流动的模拟效果,建立了零方程模型,还构造了双层湍流模型,发展了节能分析和 CFD 模拟耦合模型,用于建筑节能设计

领域。

### 1.3.3 室内空气环境数值模拟的发展趋势

室内 CFD 模拟的本质是要数值求解室内气流运动和物质扩散的控制方程组。数值计算结果的可靠性和准确性受到多方面因素的影响,如边界条件的合理简化、湍流模型的适应性、网格质量、离散格式的精确度及数值算法等。改进方程的求解算法、改进对流项的数值格式、提高计算精度、误差估算、非结构网格、出入口和壁面边界层流动的更精确处理、引入太阳辐射热量影响及 CFD 方法与 Multizone 模型的结合问题等方面均是 CFD 研究领域的热点问题。

近年来,人们开始将更高级和复杂的数值模拟技术用于室内环境的模拟,但以目前的计算机运算速度及实际应用的需求,高级数值模拟技术,尤其是大涡模拟技术和直接数值模拟技术还难以推广运用。同时,另一个思路是改进方程和求解算法,以期提高运算速度,如 Fast Fluid Dynamics(FFD)方法,简化了对湍流运动的处理,虽然计算准确度有所降低,但其计算的速度比 CFD 方法提高了 50 倍,达到了近实时的计算需求。

此外,商业软件也在改进完善。特别是在帮助那些非 CFD 专业人员建立模型、运行模拟过程和显示结果等方面,提供简单易操作的用户界面,减少了模拟过程先期所花费的时间和精力,使用户将精力集中在后期分析和设计上,能达到更好的使用效果。

## 第2章 多区模型和区域模型

送风口空气的射流是形成室内不同气流组织的主要因素。由于送风末端不同、射流空气与室内空气温度不同,可形成不同类型的送风口空气射流。一般来说,当射流的雷诺数  $Re$  大于 30 时,射流就成为湍流流动。空调房间中的送风口射流的雷诺数通常远大于 30,因此均可视为湍流射流。本章首先介绍不同类型射流的流动规律,分别介绍多区模型、区域模型及二者的耦合模型方法。

### 2.1 室内送风射流基本理论

#### 2.1.1 射流的分类

根据送风类型及送风条件,如初始温度、房间几何尺寸、送风角度等,可将送风射流分为不同类型;如果送风温度和室内空气温度相同,称为等温射流,否则称为非等温射流;如果送风射流进入一个相对足够大的空间而不受墙壁或天花板限制,称为自由射流,反之称为受限射流。对于受限射流,如果贴附于墙壁或者天花板则称为贴壁射流,如果由于射流前方的墙壁阻挡使得射流受回流影响,则叫受限射流(狭义)。射流特性受送风口类型的影响最大,而通常利用射流公式计算室内气流组织时,主要根据送风口种类选用不同的射流公式。根据送风口的种类可将射流分为以下几类。

(1)密集射流。从百叶、格栅、圆形喷嘴、圆形送风口、方形送风口及长宽比较小的送风口送出来的射流属于此类,其特点是射流为三维或者轴对称的,或者发展到一定阶段是轴对称的。

(2)线性(平面)射流。从条缝风口或者具有大长宽比矩形风口送出的射流属于此类,具有二维特性,射流速度在平面内对称,故有时也称作平面射流。

(3)径向射流。盘形散流器的送风射流属于此类,其通常安装于天花板上,送风在水平面内呈  $360^\circ$  扩散。

(4)不完全径向射流。从带有张角的百叶送风口或者扇形送风口送出的射流属于此类,其扩散角度小于  $360^\circ$ ,故称为不完全径向射流,一定距离后会变为密集射流。

(5)锥形射流。从锥形送风口或方形、圆形射流器送出的送风射流属于此类,其射流是轴对称的。

(6)旋转射流。从能产生涡旋的旋流风口送出的空气射流属于此类,其特点是衰减快、扩散混合充分。

## 2.1.2 自由射流

### 2.1.2.1 等温自由射流

等温自由射流理论是室内空气流动研究的基础。自20世纪40年代以来,众多学者对其进行了大量的理论和实验研究,得到了比较一致的结果。通常,对于空调通风系统中的湍流自由射流,沿射流轴线方向可分为四个区域:

起始段:长度约为 $2\sim 6D_e$ ,其射流轴心速度和温差保持不变;

过渡段:约 $8\sim 10D_e$ ,射流特性无统一规律;

主体段:约 $25\sim 100D_e$ ,湍流充分发展,轴心速度衰减、断面流速分布等规律一致;

末端段:很小,通常忽略不计。

上述各段长度因送风口类型而异。其中, $D_e$ (m)为与送风口外形面积相等的圆形开口的直径,称为送风口的等效直径。

$$D_e = \sqrt{\frac{4A_e}{\pi}} \quad (2.1)$$

式中: $A_e$ ——送风口外形面积, $\text{m}^2$ 。

平面自由射流的三个典型区域如图2-1所示。通常,由于起始段和过渡段相对较短,与室内空气流动密切相关的是射流的主体段,工程中关心的时均特性主要由如下三个指标来描述:轴心速度衰减、射流扩展角及断面速度分布。

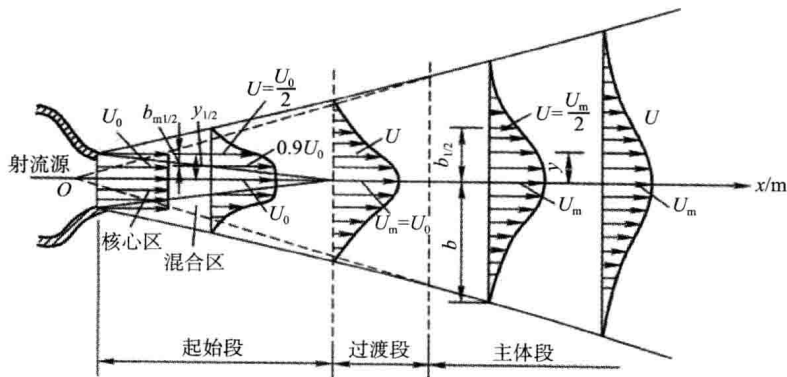


图 2-1 等温自然射流示意图

#### (1) 射流轴心速度衰减

射流轴心速度是影响射流在室内的射程及工作区速度的最主要因素。送风射流不断卷吸周围空气,断面沿程扩大,轴心速度沿程衰减。主体段速度衰减可按下式表示。

$$\frac{U_m}{U_0 \sqrt{C_d R_{fa}}} = K \frac{\sqrt{A_c}}{X} \quad (2.2)$$

$$\frac{U_m}{U_0} = K \frac{\sqrt{A_c C_d R_{fa}}}{X} = K \frac{\sqrt{A_0}}{X} \quad (2.3)$$

式中: $U_m$ ——射流轴心速度, $\text{m/s}$ ;

$U_0$ ——射流出口速度, $\text{m/s}$ ;