

制 · 造 · 业 · 高 · 端 · 技 · 术 · 系 · 列

焊接车间 通风空调系统 研究与工程实践



刘秋新 李晶 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

制造业高端技术系列

焊接车间通风空调系统 研究与工程实践

刘秋新 李 晶 著



机械工业出版社

本书采用了理论计算、物理模型试验、CFD 数值模拟相结合的研究方法,研究了汽车制造厂大型焊接车间内有害物浓度场、温度场、气流流动的速度场,在最大限度节能的条件下,保证工人的安全与舒适环境。研究是针对三种通风结构型式进行的。车间内设置的三种通风气流:一是车间通风大气流采用诱导式单向流,保证车间有害物的有序流动并排除;二是采用节能的工位送风方式,夏天送空调风,冬天送室外风,以期消除车间内的余热,给工人带来舒适的工作环境;三是焊架上设局部排风且与工位送风相结合,形成的小气流为吹吸式通风,排除有害物,降低工作地带的温度,保证工作地带的环
境与安全。这种三种通风空调的有机结合是一种创新,在国内外尚无先例。

试测结果表明,本书提出的大型焊接车间内的通风与空调系统能完全满足车间有害物安全浓度标准和车间温度设定值,具有较大的推广应用价值。

本书可供生产工艺流程、通风制冷系统设计、厂房设计研究院所技术人员,以及生产运行、设备管理者和相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接车间通风空调系统研究与工程实践/刘秋新,李晶著. —北京:机械工业出版社,2016.12
ISBN 978-7-111-54752-5

I. ①焊… II. ①刘… ②李… III. ①焊接-车间-通风系统-研究 ②焊接-车间-空气调节系统-研究 IV. ①TU834.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 210209 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:沈红 责任编辑:沈红 责任校对:刘岚
封面设计:马精明 责任印制:常天培
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 8.5 印张·6 插页·154 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-54752-5
定价:65.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

近年来,制造业已成为国民经济中的重要支柱产业之一,焊接工艺广泛应用于制造业。焊接技术是现代工业中不可缺少的一种工艺,焊接工艺种类很多,主要有焊条电弧焊、二氧化碳气体保护焊、氩弧焊、埋弧焊等。但在焊接过程中,会产生大量的电焊烟尘,不仅污染了作业环境,尤其在通风不良的情况下,烟尘浓度通常超出了国家标准数倍;对人的危害十分严重。可引起电焊工尘肺、锰中毒、呼吸道炎症、神经衰弱症等多种职业危害。当前提倡以人为本、关注环境与健康及实现安全生产和社会经济协调发展,并已经成为人类追求生活质量提升和社会稳定进步的新目标。开展焊接与环境、焊接与健康方面的研究与探讨,对推动焊接技术的清洁、环保、可持续发展,具有参考价值和重要意义。

因此,电焊烟尘治理也成为当前职业卫生、环保工作中的当务之急。由于焊接是一种劳动强度比较大的工种,所以创建良好的焊接环境,对于提高劳动生产率起着决定的作用。解决电焊烟尘污染,除在工艺上采取减少发尘量的措施外,在车间内采取有组织的通风,是改善作业环境的有效措施^[1]。目前国内外焊接烟尘的治理主要以局部排风、局部送风为主,全面通风为辅的手段来改善焊接车间的劳动卫生环境。全面通风也称稀释通风,包括自然通风和机械通风两种主要方式。我国现在工业厂房大部分仍采用射流形式的机械通风,不仅耗电量大、运行成本高,同时还往往由于设计不合理及运行管理不完善而达不到预期的通风效果。鉴于此,需要研究找到安全、舒适与节能的通风方式,消除焊接烟尘的危害。

《焊接车间通风空调系统研究与工程实践》一书中积累了著者30多年从事通风空调和工业安全方面的科研成果和工程工作经验。也是著者和科研团队通过长时间的大量的理论计算分析、物理模型试验、CFD数值模拟研究得出的,采用了诱导式单向流、工位送风、焊架上设局部排风三种通风形式的有机结合,改变了目前国内外焊接烟尘的治理主要以局部排风、局部送风为主,全面通风为辅的单一格局,对焊接行业的烟尘有效治理有指引和借鉴作用。本书旨在响应国家当前热门的职业健康安全和节能减排的政策,研究内容详细全面、案例典型,理论与工程案例的结合可以给读者提供很好的设计参考,在系统设计方面也有好的启发。

特别感谢皇家动力(武汉)有限公司对本项目的鼎力支持,在本项目研究期间提供了焊接车间资料和试验设备帮助,致使本研究能顺利高效地完成。本书

内容从科研研究到著作完成耗时较长，感谢本人的研究生陈芬、蔡美元、向金童、吴炯、王能、王心慰、潘华阳、童亮、梅钢、吕学林、罗继春、余彦洲、姜伯锋、陈添寿、薛娜、席洋、黄惊、徐伟、丁照球、杨二平、胡中平、吴海涛、陶小龙、白明强、余明威、覃大朋、叶小宁、余法文、孔朝晖、李森生、丁云、石文、黄丽、程浩、姚奇志、包阔为本书做出的重要贡献。

因时间限制及著者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者不吝赐教，提出斧正意见，甚为感谢！

武汉科技大学

刘秋新

2016.5 于武汉

目 录

前言

第 1 章 焊接车间基本情况	1
1.1 汽车生产中的焊接技术	1
1.2 汽车焊接技术与安全危害的主要问题	2
1.3 车间有毒物质及卫生作业标准	2
1.4 汽车焊接车间的建筑特点与地理特点	4
1.5 汽车焊接车间通风现有状况及特点	5
第 2 章 焊接车间通风空调系统研究概况	6
2.1 焊接车间通风空调系统研究方法	6
2.1.1 理论计算	6
2.1.2 物理模拟	6
2.1.3 数值模拟	7
2.2 通风效果的评价方法	7
2.3 国内外研究进展	10
2.3.1 国外的研究现状	10
2.3.2 国内的研究现状	11
2.3.3 焊接车间通风空调系统发展趋势及存在的问题	18
2.4 系统研究的主要工作	19
2.4.1 研究对象存在及要解决的问题	19
2.4.2 课题研究所做的主要工作	20
2.5 研究课题的主要创新点	20
第 3 章 汽车制造厂大型焊接车间通风空调系统计算研究	21
3.1 汽车制造厂焊接车间电焊烟尘及热射流放散计算	21
3.2 研究对象的通风空调系统配置	22
3.3 全面通风量的计算	23
3.4 诱导风机的风量计算与配置	25
3.4.1 射流诱导原理	25
3.4.2 诱导风量计算	26
3.5 空调工位送风计算	26
3.5.1 工厂的空调热平衡方程	26
3.5.2 工位冷负荷计算	27
3.5.3 新风冷负荷	27

3.5.4 湿负荷的计算	28
3.5.5 送风参数点的确定	28
3.5.6 送风射流的气流组织	28
3.6 局部排风罩设置与排风量的计算	28
3.6.1 局部排风罩设置	28
3.6.2 风量计算	29
3.7 小结	32
第4章 汽车制造厂大型焊接车间通风空调系统物理模型试验研究	33
4.1 物理模拟的相似理论	33
4.1.1 力学相似性原理	33
4.1.2 相似准数	35
4.1.3 模型律	41
4.2 物理模型	43
4.2.1 参数计算	43
4.2.2 试验模型	45
4.3 物理模拟试验	48
4.3.1 第一次试验	48
4.3.2 第二次试验	53
4.4 汽车制造厂大型焊接车间通风空调系统的设定	62
4.5 小结	63
第5章 汽车制造厂大型焊接车间通风空调系统数值模拟研究	64
5.1 数值模拟计算方法与步骤	64
5.2 数值模拟计算的控制方程	64
5.2.1 质量守恒方程	64
5.2.2 动量守恒方程	65
5.2.3 能量守恒方程	66
5.2.4 控制方程的通用形式	67
5.3 $K-\varepsilon$ 双方程模型	67
5.3.1 与湍流长度标尺有关的物理量	67
5.3.2 脉动动能耗散率的定义及其控制方程	68
5.3.3 $K-\varepsilon$ 两方程湍流模型的控制方程组	69
5.3.4 三维直角坐标中 $K-\varepsilon$ 模型的控制方程	69
5.4 控制方程的离散	70
5.5 空间区域的离散化	72
5.5.1 区域离散化的实质与内容	72
5.5.2 两类设置节点的方法	72
5.6 SIMPLE 算法的计算步骤及其讨论	72
5.7 汽车制造厂大型焊接车间的数值计算模型	73

5.7.1 建立数值模拟计算的模型	73
5.7.2 数值模拟的边界条件设定	75
5.7.3 数值模拟计算的网格划分	75
5.7.4 数值模拟的计算方法	76
5.8 数值模拟的计算结果与分析	76
5.8.1 模型一的模拟计算结果	76
5.8.2 模型二的模拟计算结果	80
5.8.3 模型三的模拟计算结果	83
5.8.4 数值模拟计算的三种模型计算结果分析	87
5.9 数值模拟计算三种模型通风效果的分析	88
5.9.1 数值模拟计算三种模型风速的分析	88
5.9.2 数值模拟计算三种模型温度的分析	88
5.9.3 数值模拟计算三种模型浓度的分析	89
5.9.4 数值模拟计算的三种模型通风空调效果分析结论	89
5.10 小结	89
第6章 研究结果及其分析	91
6.1 模型试验通风效率计算	91
6.1.1 试验条件与数据	91
6.1.2 通风效率计算	91
6.2 计算机数值模拟计算结果的通风效率	99
6.3 关于系统通风效率问题的研究	100
6.3.1 系统通风效率计算汇总	100
6.3.2 关于系统通风效率问题的研究	100
6.4 小结	103
第7章 研究成果应用与结论	104
7.1 车间内温度场与焊枪热射流	104
7.2 被测区域的粉尘浓度	105
7.3 被测区域的 CO ₂ 和 CO 浓度	109
7.4 小结	110
第8章 研究成果的推广与应用	111
8.1 大连某大型汽车公司焊装车间工程案例	111
8.1.1 工程概况	111
8.1.2 设计方案	111
8.1.3 设计图样	111
8.2 广州某大型汽车公司焊装车间工程案例	111
8.2.1 工程概况	111
8.2.2 设计方案	112
8.2.3 设计图样	112

8.3 郑州某大型汽车公司焊装车间工程案例	112
8.3.1 工程概况	112
8.3.2 设计方案	112
8.3.3 设计图样	113
第9章 总结与展望	114
9.1 总结	114
9.2 展望	116
参考文献	117

第1章 焊接车间基本情况

1.1 汽车生产中的焊接技术

1. 激光焊接技术

激光技术采用偏光镜反射激光产生的光束使其集中在聚焦装置中产生巨大能量的光束,如果焦点靠近工件,工件就会在几毫秒内熔化和蒸发,这一效应可用于焊接工艺。激光焊接的特点是被焊接工件变形极小,几乎没有连接间隙,焊接深度与宽度的比很高,因此焊接质量比传统焊接方法要好。汽车工业中,激光技术主要用于车身拼焊、焊接和零件焊接。

2. 超声波焊接技术

超声波塑焊是将高频率机械振动通过工件传到接口部分,使分子加速运动。分子摩擦产生的热量使接口处塑料溶化,从而使两个焊件以分子连接方式真正结合为一体。超声波焊接技术已被成功地运用于汽车保险杠、仪表板和仪表盘、制动显示灯、方向指示器、汽车门板及其他与发动机有关的零部件制造工业中。

3. 电阻焊的节能及控制技术

电阻焊机大量使用交流 50Hz 的单相交流电源,容量大、功率因数低。发展三相低频电阻焊机、三相次级整流接触焊机(已在普通型点焊机、缝焊机、凸焊机中应用)和 IGBT 逆变电阻焊机,可以解决电网不平衡和提高功率因数的问题。同时还可进一步节约电能。利于实现参数的计算机控制,可更好地适用于焊接铝合金、不锈钢及其他难焊金属的焊接。另外还可进一步减轻设备重量。

4. 等离子弧焊

氩气保护的等离子弧焊接切割早已在各行业应用,主要用于合金钢和有色金属加工。发动机气阀体也早已采用填充圈等离子弧焊接。

5. 焊缝自动跟踪技术

这种方法只能应用于角接接头,对于轿车底盘零件大量的薄板搭接焊缝,因无法寻找弧长参考点暂无法应用。

6. 机器人焊接

机器人焊接目前已广泛应用在汽车制造业,汽车底盘、座椅骨架、导轨、消声器及液力变矩器等焊接,尤其在汽车底盘焊接生产中得到了广泛的应用。用这种技术可以提高焊接质量,因而甚至用它来代替某些弧焊作业。矮小的点焊机器

人还可以与较高的机器人组装在一起,共同对车体上部进行加工,从而缩短了整个焊接生产线长度。应用机器人焊接后,大大提高了焊接件的外观和内在质量,并保证了质量的稳定性,降低了劳动强度及改善了劳动环境。

7. 自动化焊接

在焊接方面,主要使用的是点焊机器人和弧焊机器人。焊接生产线的高度自动化是广泛采用6自由度的机器人,且机器人具有焊钳储存库,可根据焊装部位的不同要求或焊装产品的变更,自动从储存库抓换所需焊钳。传输装置则已发展为采用无人驾驶的更具柔性化的感应导向小车。

1.2 汽车焊接技术与安全危害的主要问题

1) 焊接有害物质是在电弧高温作用下,焊条端部的熔化物及熔滴和熔池表面生成的过热蒸气,被迅速氧化凝聚成细小固态粒子,以及熔滴过渡区化学冶金反应产生的大量气态物质。

2) 焊接材料特性是影响发尘量的内在因素,焊接参数、焊接条件及焊接方法则是外因,其发尘量最终受焊接有害物质产生机理控制。焊接发尘量的改变或降低,归根结底要从焊接材料入手,即研发新型低有害物质焊接材料。

3) 焊接有害物质种类较多,单组分作用对健康的影响各异。实际的有害物质是多组分混合物,对健康的影响更复杂,还必须考虑有害物质的实际浓度及侵害时间等因素。

4) 在焊条电弧焊接方法中,对健康影响较大的是形成电焊尘肺;在氩弧焊方法中则是出现神经衰弱症候群与呼吸道刺激症;在等离子弧焊接及切割方法中,除了出现神经衰弱症候群与呼吸道刺激症之外,还必须注意金属烟尘热和形成焊工尘肺等问题;在 CO_2 气体保护焊中主要是出现神经衰弱症候群和金属烟尘热及呼吸道刺激症。

5) 不锈钢烟尘中的六价铬化物有强烈的致癌诱变作用,镍的氧化物也有致癌作用;铝及铝合金焊接时焊工的铝尘肺、铜及铜合金焊接时焊工的急性铜中毒症等,都是材料焊接对健康的主要影响。

1.3 车间有毒物质及卫生作业标准

(1) 车间空气中电焊烟尘卫生标准 GB 16194—1996 的主要内容

1) 主题内容与适用范围:该标准规定了车间空气中电焊烟尘的最高容许浓度及其监测检验方法。该标准适用于进行电焊作业的各类企业。

2) 引用标准:GB 5748—1985 作业场所空气中粉尘测定方法。

3) 卫生要求：车间空气中电焊烟尘最高允许浓度为 $6\text{mg}/\text{m}^3$ 。在施焊过程中产生的其他有害物质仍按这些毒物现行规定的卫生标准执行。

4) 监测检验方法：车间空气中电焊烟尘浓度、游离二氧化硅含量的测定按 GB 5748—1985 执行。

5) 监督执行：各级卫生行政部门负责监督该标准的执行。

(2) GBZ 1—2010 工业企业设计卫生标准 工作场所每名工人所占容积小于 20m^3 的车间，应保证每人每小时不少于 30m^3 的新鲜空气量；如所占容积为 $20 \sim 40\text{m}^3$ 时，应保证每人每小时不少于 20m^3 的新鲜空气量；所占容积超过 40m^3 时允许由门窗渗入的空气来换气。采用空气调节的车间，应保证每人每小时不少于 30m^3 的新鲜空气量。

(3) GBZ 2.1—2007 和 GBZ 2.2—2007 对工作场所有害因素职业接触限值进行了规定，与焊接车间相关的有害物限值详见表 1-1。

表 1-1 工作场所空气中有毒物质允许浓度

中文名	最高允许浓度/ (mg/m^3)	时间加权平均允许浓度/ (mg/m^3)	短时间接触允许浓度/ (mg/m^3)
氨	—	20	30
氨基氰	—	2	—
二氧化氮	—	5	10
二氧化硫	15	5	10
二氧化氯	—	0.3	0.8
一氧化碳	—	20	33
二氧化碳	—	9000	18000
氟化氢(按 F 计)	2	—	—
氟化物(不含氟化氢)	—	2	—
镉及其化合物(按 Cd 计)	—	0.01	0.02
金属汞(蒸气)	—	0.02	0.04
有机汞化合物(皮)	—	0.01	0.03
钴及其氧化物(按 Co 计)	—	0.05	0.1
光气	0.5	—	—
过氧化氢	—	1.5	—
硫化氢	10	—	—
锰及其无机化合物	—	0.15	—
金属镍与难溶性镍化合物	—	1	—
可溶性镍化合物	—	0.5	—

(续)

中文名	最高允许浓度/ (mg/m ³)	时间加权平均允许浓度/ (mg/m ³)	短时间接触允许浓度/ (mg/m ³)
铍及其化合物(按 Be 计)	—	0.0005	0.001
铅尘	—	0.05	—
铅烟	—	0.03	—
氢化锂	—	0.025	0.05
氰化钙	—	1	3
氰化氢(按 CN 计)(皮)	1	—	—
氰化物(按 CN 计)(皮)	1	—	—
三氟化氯	0.4	—	—
三氟化硼	3	—	—
臭氧	0.3	—	—
氧化铝	4	—	—
铁的氧化物	—	—	6
氧化钾	2	—	—
氧化钠	2	—	—
二氧化钛	8	—	—
钡化物(可溶性)	—	—	0.6
氧化铅	—	—	0.1
锰的氧化物	—	—	0.5
五氧化钒	—	—	0.05
氧化铜、氧化锌	5	—	—
氧化镉	0.1	—	TRK★ 0.03
六价铬化物	—	—	TRK0.1①,0.05②
氧化钴	—	—	TRK 0.1
氧化镍	—	—	TRK 0.1
二氧化钍	—	—	—
HCN	—	—	11
COCl ₂	—	—	0.4
TDI	—	0.1	0.2
CH ₂ O	0.5	—	0.6

注：★工作地点技术指导浓度：①焊条电弧焊。②其他焊接方法。

1.4 汽车焊接车间的建筑特点与地理特点

汽车焊接车间的建筑形式主要有如下几个特征：①高大的工业厂房；②全封闭的工业厂房；③半封闭的工业厂房；④开敞式的工业厂房；⑤气楼式的工业

厂房。

汽车焊接车间的地理特征主要有如下几个特征：①寒冷地区；②过渡地区；③非采暖地区。

我们研究的对象是半封闭的高大工业厂房，且地处广州属非采暖地区的汽车焊接车间的安全与节能通风空调系统。

1.5 汽车焊接车间通风现有状况及特点

目前，国内外焊接烟尘的治理主要以局部排风、局部送风为主，全面通风为辅的手段来改善焊接车间的劳动卫生环境。全面通风也称稀释通风，包括自然通风和机械通风两种主要方式。工业厂房大部分采用射流形式的机械通风，耗电量高，运行成本高，同时往往由于设计不合理及运行管理不完善而达不到预期的通风效果。高大厂房也常应用自然通风的形式，自然通风利用风压、热压、风压与热压相结合及机械辅助通风等形式来实现，是一种经济的通风方式，但由于自然通风易受到室外气象条件的影响，特别是依赖风压作用的自然通风的稳定性和可控性都较差，所以对于有粉尘、有害气体等污染物产生的厂房难以达到理想的通风效果。局部通风是通过设在污染源上的密闭装置和排风装置直接控制受污染的空气运动。采用局部通风可以阻止无组织气流在车间内带动污染源扩散，减少必需的补给空气量。但大型汽车制造厂焊接厂房的工艺设备布置密集，焊接工位多，加之受场地、工件转移、行车运行等条件限制，除尘设备及吸气臂影响生产和工作作业，车间内的焊接烟尘很难彻底根除。

焊接厂房空间一般比较高大，采用自然通风的形式，在生产工艺确定的条件下，其通风效果取决于自然通风条件和运行管理等方面。采用自然通风虽然节能，但是自然通风受室外气象条件的影响，特别是在风力作用很不稳定的情况下，往往达不到要求的通风效果。

1) 南方地区焊接厂房均为半开放空间，旧厂房的屋顶通风气楼结构简陋，自然通风效果差，开启处于无控状态，年久失修，且会因外部风向的变化出现气流倒灌现象。

2) 部分厂房两侧内墙上安装有轴流风机，但厂房跨度大，效果甚微，基本无气流组织可言。

3) 装有屋顶通风机的厂房实际上由于效果不佳而基本不开启通风机。

4) 寒冷地区的焊接厂房在冬季为封闭状态，屋顶设置通风器，但无补风措施，室内通风条件差，烟尘浓度高。

5) 外部自然风一般呈非连续状态，特别是不利条件（静风）下自然风停歇时间长，对于纵深大的大型焊接厂房，内部空间自然通风效果难以期待。

第2章 焊接车间通风空调系统研究概况

2.1 焊接车间通风空调系统研究方法

2.1.1 理论计算

传统非等温射流理论,考虑了由室内热源形成的羽状气流对非等温空调射流的热浮升作用,可以得到在内热源作用下非等温射流运动轨迹方程表达式。可以借鉴射流计算理论对我们的研究对象进行研究。现有的一系列射流公式用于室内空气分布的预测,成为最经济简单的室内空气分布预测方法;但是射流公式揭示的多为射流主体段的流动特性,对于送风射流不能充分发展的情形,射流公式预测的结果有可能产生偏差。

按照通风空调送风口射流在室内的状态,可分为自由射流、受限射流等;按射流温度与空气温度是否相等,又分为等温射流和非等温射流;结合送风口形态又分为平面射流、方形和圆形射流、径向射流、锥形射流和旋转射流等。

关于各种射流的半经验公式,主要是关于射流平均特性主体段中心速度、温度衰减、断面流速分布、射流扩展角、冷射流贴附长度等的。这些公式可以简单、快捷地预测空调、通风房间内沿射流方向各个位置的速度或温度分布,从而了解室内空气分布情况。

2.1.2 物理模拟

对通风空调射流问题在实物或模型上进行试验求解的方法,仍然是研究射流的主要和可靠手段。借助相似理论及利用模型试验对室内空气分布进行预测,不需依赖经验理论,是最为可靠的方法。

一般地说,在影响因素比较少,或者允许采取某些简化措施的情况下,采用模型试验研究结果是很准确的。通常可在试验中变动一个量而设法固定其他量,以此逐个研究各变量的影响,从而找到现象的变化规律。但当影响因素较多或各影响因素不能单独改变,例如对流换热现象,不仅影响因素多,而且有些影响因素之间是相互制约的,如改变温度物性也随之变化,类似这样的问题,试验次数就多;另外由于试验技术和测量仪器的限制,模型试验还不能对所有参数进行测量,如热环境是否满足要求的情况,模型试验法就比较困难。而且由于模型试验的试验条件不同,得出的结论也各异,因此也有其局限性。

Zhang J S 等人在非等温通风房间的比例为 1/12 的模型上测得空气流动模

型,列出了详细的各点参数测量值。这样的测量结果对了解实际房间的流动情况有很好的指导意义。在如何通过试验寻找现象的规律及推广应用试验的结果等方面,用相似理论指导试验的方法得到了普遍的应用。

针对我们的研究对象,采用无相变对流换热的相似理论的基本原理,作为模型化试验的理论基础。

2.1.3 数值模拟

流动与热交换现象大量地出现在自然界及各个工程领域中,其具体的表现形式多种多样。从现代楼宇的暖通空调过程到自然界风霜雨雪的形成,从航天飞机重返大气层时壳体的保护到微电子器件的有效冷却,从现代汽车流线外形的确定到紧凑型换热器中翅片形状的选取,无不都与流动和传热过程密切相关。所有这些变化万千的流动与传热过程都受最基本的三个物理规律的支配,即质量守恒、动量守恒及能量守恒。计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, 简称为 CFD)是通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。CFD 的基本思想可以归结为:把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场,如速度场和压力场,用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替,并通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得场变量的近似值。计算流体力学是始于 20 世纪 30 年代初的计算机模拟技术,集流体力学、数值计算方法及计算机图形学于一体。

CFD 可以看作是在流动基本方程(质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程)控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟,我们可以得到极其复杂的流场内各个位置上的基本物理量(如速度、压力、温度、浓度等)的分布,以及这些物理量随时间的变化情况,进而确定旋涡分布特性、空化特性及脱流区等。还可据此算出相关的其他物理量,如旋转式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外,与 CAD 联合,还可进行结构优化设计等。

目前,数值模拟技术应用非常广泛,如在北京国家体育馆的设计过程中,利用 PHOENICS 软件,模拟预测出一多功能厅夏季空调工况下的室内温度场和速度场,且结合数据分析了其室内热环境特性,进而给出了设计方案的调整措施,有利于使用者在使用前进行科学的技术分析。又如某体育馆建筑模型采用 EnergyPlus 和自编的热舒适计算程序,按设计工况确定数值模拟的边界条件,对该体育馆空调系统的气流场进行了 CFD 模拟,再根据模拟结果,提出了适合的气流组织方式。

2.2 通风效果的评价方法

随着人们对室内环境品质要求的不断提高,通过通风来改善室内环境品质已

成为一个重要的手段。如何评价通风的作用显得较为重要，正确的评价方法不仅可反映通风系统的功效，而且可以为通风系统的改造提供依据。

(1) Rydberg 和 Sandberg 提出的表示方法 这是一种以通风效率为评价指标的方法。

$$E = \frac{C_p - C_0}{\bar{C} - C_0} \quad (2-1)$$

式中： C_p 为排风口处污染浓度； $\bar{C}$ 为室内平均浓度； C_0 为送风中的浓度。

当 $C_0 = 0$ 时，有

$$E = \frac{C_p}{\bar{C}} \quad (2-2)$$

通风效率它可理解为稀释通风时，参与工作区内稀释污染物的风量与总送入风量之比，或是污染物排风浓度与工作区浓度之比。由此可见， E 也表示通风或空调系统排出污染物的能力，因此 E 也称为排污效率。当送入房间空气与污染物混合均匀，排风的污染物浓度等于工作区浓度时， $E = 1$ 。一般的混合通风的气流分布形式 $E < 1$ 。但是，若清洁空气由下部直接送到工作区时，工作区的污染物浓度可能小于排风的浓度，这时 E 会大于 1。 E 不仅与气流分布有着密切关系，而且还与污染物分布有关，污染源位于排风口处， E 增大。

(2) 空气龄的概念 空气质点的空气龄简称为空气龄 (Age of air)，是指空气质点自进入房间至到达室内某点所经历的时间。局部平均空气龄定义为某一微小区域中各空气质点的空气龄的平均值。空气龄的概念比较抽象，实际测量很困难，目前都是用测量示踪气体的浓度变化来确定局部平均空气龄。由于测量方法不同，空气龄用示踪气体的浓度表达式也不同。例如用下降法（衰减法）测量，在房间内充以示踪气体，在 A 点起始时的浓度为 $C(0)$ ，然后对房间进行送风（示踪气体的浓度为零），每隔一段时间，测量 A 点的示踪气体浓度，由此获得 A 点的示踪气体浓度的变化规律 $C(\tau)$ ，于是 A 点的平均空气龄（单位为 s）为

$$\tau_A = \frac{\int_0^{\infty} C(\tau) d\tau}{C(0)} \quad (2-3)$$

全室平均空气龄定义为全室各点的局部平均空气龄的平均值：

$$\bar{\tau} = \frac{1}{V} \int_V \tau dV \quad (2-4)$$

式中， V 为房间的容积。

如用示踪气体衰减法测量，根据排风口示踪气体浓度的变化规律确定全室平