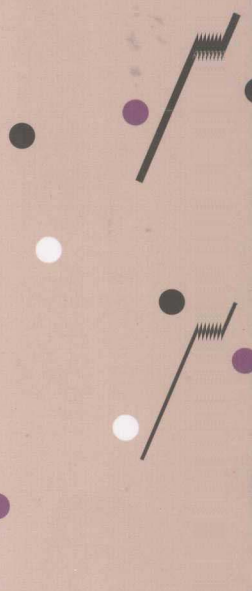


洁净室及相关受控环境 ——理论与实践

Cleanroom and Associated Controlled Environments

——Theory and Practice

涂光备 著



中国建筑工业出版社

洁净室及相关受控环境 ——理论与实践

Cleanroom and Associated Controlled Environments
——Theory and Practice

涂光备 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

洁净室及相关受控环境——理论与实践/涂光备
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-112-17149-1

I. ①洁… II. ①涂… III. ①洁净室-环境控制-研究 IV. ①TU834.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 186752 号

本书凝结了作者及其科研团队几十年的研究成果, 其中有科研成果的分享, 也有经验的总结。书中对洁净室及相关受控环境相关内容的历史演变脉络做了概括的介绍。以便于了解某项技术的方法、标准等的发展和变化, 有助于把握这种技术的规律和思路; 介绍了作者及其研究团队几十年来科研项目以及工程实践的案例, 这些案例的研究思路、方法至今依旧具有借鉴价值。

本书把重点放在更实际的工程应用上, 有助于读者在了解原理的前提下, 把握实现洁净室及相关受控环境的方法和手段, 创造性地应用于工程实践中去。

责任编辑: 姚荣华 张文胜

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 党 蕾

洁净室及相关受控环境——理论与实践

Cleanroom and Associated Controlled Environments——Theory and Practice

涂光备 著

*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 31¼ 字数: 778 千字

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月第一次印刷

定价: 88.00 元

ISBN 978-7-112-17149-1

(25898)

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)

前言

历经四、五年时间的“挤兑”，总算结稿。尽管再细读仍有不少差强人意、未能透彻之处，也还有许多尚宜补充的余地。限于精力决计不再拖延了。本来水平有限，再怎么删改斟酌也难尽善，何况新技术、新概念、新问题连绵不断，个人的一本书不应指望承载那么多的责任，这也算是自我解嘲的一个说辞吧！年近八旬、来日有限，留一点时间陪伴家人，能动得了再多观光、游历几处，以补偿年轻时的缺失，不算为过吧？

之所以不过是几十万字的一本书，在手中拖延好几年，外出、参会虽也占据些时光，主要还是工效低，既不能在电脑前久坐，软件设置又不熟，那只可采用手写后分段请人输入，我再校稿，一般需要两、三个来回，有些章节往复多达七、八次。有的因相隔三四年找不到原稿了，还有忘了存盘而丢失的，也难怪如此磨蹭，真恨不成器。好在这几年已处于当年清华母校蒋南翔校长倡导的“为祖国健康地工作五十年”的界外，聊以此自我宽慰。

几年前着手撰写本书时，想的是这几十年中，自己和合作伙伴们搞了些研究、做了些工程，在洁净室及相关受控环境领域多少积累了些心得、经验，应该有个总结，留供同行参考。但毕竟自己身处教学岗位，教书育人为先，此外还受项目来源、科研费用等所限，因此研究工作既欠深入，又不十分完整。好在许多工作都是跟随“洁净室及相关受控环境”这门学科在国内生根发芽、茁壮成长的历程进行的，或许多少有些参考价值。

本书中的许多内容是我、我的团队及合作伙伴在 40 多年中共同取得的成果，这个集体除部分天津大学的教师外（杨洁、邢金城、凌继红、周志华、安大伟、姜承芝、刘明素、**朱恒忠**），主力军还是研究生，在我的 85 位硕、博士研究生中，约有 1/2 的研究课题与“洁净室及相关受控环境”有关，毕业后，他们有的在所在单位技术岗位上身居要职（**李恒业**、朱能、张少凡、程秋红、张厚羽、王丽旻、胡振杰、李景广、那艳玲、黄保民、李斌、关旭、贺克瑾、吕芳、嵇赟喆、高峰、王江标、刘冰、周远斌、杨智明、曹国庆、李涛、陈雪芬、董书云……），有的从事与本领域相关的设计与工程承包（朱楠城、贾俊煌、姜汝嵩、刘传宝、于振峯、李江……），还有一批在海外任教、创业（费鹏、王少杰、赵瑞明、周文忠、陈文浩、王良柱、冀英、张蕊、孔维秀……）。这本书中不少章节都包含了他们的工作成果，天津大学和我都应该感谢他们所付出的劳动。

从科技层面审视，撰写本书时，有如下一些考虑：

（1）在不少章节中尽可能地把相关内容的历史演变脉络做了概括的介绍。个人的体会是了解某项技术的方法、标准等的发展和变化，有助于把握这种技术的规律和思路。

（2）书中某些案例，虽是十几年，甚至几十年前的科研项目，尽管当时所采用的仪器、仪表可能不够精准，数据处理方法稍显粗略，有的数值是靠现今青年不曾见过的计算尺逐个拉出来的。但之所以将其采入，是因为我认为这些实例的研究思路、方法至今依旧

具有借鉴价值。

(3) 按照习惯,“书”不同于“论文”,一些未被“公认”或未经过严格证实的内容一般不列入其中。但本书有个别之处,把某些根据作者实际经验而得的认识也纳于其中,目的是期盼有兴趣者给予更深入的分析与论证。

(4) 个人认为“洁净室及相关受控环境”不过是依赖于某些技术措施和方法来实现的。从工程应用角度考量,其基本理论就是这些措施和方法的理论依据。它们涉及流体力学、气溶胶理论、分子运动学、统计学、微生物学等。本书在必要处既引述这些基本理论作支撑,有助于读者寻根问源,但本书把重点放在更实际的工程应用上,希望有助于读者在了解事理的前提下,把握实现洁净室和相关受控环境的方法和手段,创造性地应用于工程实践中去。意图把这门技术打扮成某种“理论”的做法显得牵强,可能难以持久传播。这是个人拙见,未必合时宜。

本书撰写过程中,涂有协助查阅和校核了大批资料,并起草了本书第5章和第8章、第12章的部分内容,约8万字,他认为本书内容涉及科研项目多,跨越年代宽,他入行晚不宜署名为作者,我尊重他的意见。在此对他的工作表示谢意。

我真诚地感谢邢金城、凌继红两位老师给予的人力、物力的支持,他们的研究生帮助完成了本书的大部分录入工作,其中特别是贺鹏举、李元辰两位同学更为本书贡献良多。

还真得感谢天津龙川净化工程公司、上海德威净化设备工程有限公司、南京天加空调设备有限公司等单位的领导对本书出版的支持和帮助。

最后,要感谢中国电子学会洁净技术分会、全国洁净室及相关受控环境标准化技术委员会(SAC/TC319)和中国制冷空调工业协会洁净室技术委员会及三会的领导人王尧主任对本书撰写的支持与鼓励。

涂光备
2014年6月

目 录

第1章 洁净室及相关受控环境的历史与发展	1
1.1 洁净室及相关受控环境	1
1.1.1 洁净室及相关受控环境的诞生	2
1.1.2 洁净室及相关受控环境技术的发展	3
1.2 中国洁净室及相关受控环境技术的发展历程	6
1.2.1 起步与奠基阶段	6
1.2.2 成熟与壮大阶段	8
1.2.3 步入快速发展阶段	12
1.3 继往开来,任重道远	15
本章参考文献	17
第2章 气溶胶基本理论	20
2.1 气溶胶和气溶胶粒子	20
2.2 气溶胶粒子的粒径	20
2.2.1 显微镜法	21
2.2.2 光散射法	23
2.2.3 空气动力学法	24
2.3 气溶胶粒子的平均直径与粒径分布	25
2.3.1 粒径分布频率和累计频率	26
2.4 气溶胶的粒子平均直径	30
2.5 气溶胶粒子粒径分布函数	31
2.5.1 正态分布	31
2.5.2 对数正态分布	33
2.5.3 具有粒径上限的对数正态分布	34
2.5.4 威布尔(Weibull)分布和罗辛—拉姆勒(Rosin-Rammler)分布	36
2.6 气溶胶粒子的光学性质	37
2.7 气溶胶粒子的电学特性	39
本章参考文献	41
第3章 纤维滤材的过滤机理	42
3.1 单根纤维过滤机理的基本理论	42
3.1.1 截留作用	43
3.1.2 惯性作用	45
3.1.3 扩散作用	50
3.2 单根纤维总的捕集效率	52
3.3 纤维滤材的过滤效率	54

3.3.1 相邻纤维的干涉作用	57
3.3.2 纤维滤材的过滤效率	58
3.4 气流通过纤维滤材的压力降	60
3.5 基本理论的实验检验	62
3.5.1 单根纤维捕集效率理论式的实验检验	62
3.5.2 对数穿透理论的实验检验	63
3.6 判断滤材技术性能的一些指标	64
3.6.1 判断滤材品质的准则式	65
3.6.2 滤材原材料耗量指标和容尘空隙指标	66
本章参考文献	66
第4章 纤维滤材的理论计算、试验验证与应用	68
4.1 纤维滤材的理论过滤效率与阻力	68
4.1.1 滤材的纤维直径对过滤效率的影响	68
4.1.2 气溶胶通过滤材的流速对过滤效率的影响	71
4.1.3 滤材的填充密度与厚度对过滤效率的影响	73
4.1.4 气流通过纤维滤材的阻力	75
4.2 试验结果和理论计算值的对照与分析	76
4.2.1 纤维直径填充密度和滤速不同时过滤效率的实测验证	77
4.2.2 不同滤速下滤材对不同直径微粒过滤效率的实测数据	79
4.2.3 流通阻力实测值和理论计算值的比较	81
4.2.4 两种滤材理论计算值与实测值的比较	86
4.3 运用计算曲线图分析、判断滤料性能	91
本章参考文献	102
第5章 空气过滤器	103
5.1 空气净化装置的类别	103
5.1.1 空气污染物及其净化处理方法	103
5.1.2 空气过滤器的类别	104
5.2 空气过滤器的过滤性能	106
5.2.1 空气过滤器的效率及穿透率	106
5.2.2 人工尘计重法	106
5.2.3 比色效率法	111
5.2.4 计数计径法	112
5.2.5 钠焰法和油雾法	117
5.2.6 DOP 法	119
5.2.7 最易穿透粒径法 (MPPS)	120
5.3 空气过滤器的阻力及容尘量	123
5.3.1 空气过滤器阻力的构成	123
5.3.2 空气过滤器的初阻力与终阻力	125
5.3.3 空气过滤器的容尘量	126
5.4 空气过滤器的分级	129
5.4.1 一般通风用空气过滤器的分级	129

5.4.2 高效空气过滤器分级	137
5.5 空气过滤器的滤菌效率	141
5.5.1 空气过滤器滤菌效率的试验	141
5.5.2 空气过滤器除尘、滤菌效率的关系	144
本章参考文献	145
第6章 空气过滤材料和滤器的研究与实践	149
6.1 化纤抽丝工序冷却风的净化	149
6.1.1 “环吹”空调净化系统的净化要求	149
6.1.2 “环吹”空调净化系统空气过滤材料的筛选	152
6.1.3 三级串联实验测值与“经验”计算值的比较	153
6.1.4 “环吹”三级过滤器的容尘量及使用寿命	154
6.1.5 结论及建议	157
6.2 关于细纱车间防止“黑灰纱”的研究	158
6.2.1 对“黑灰纱”的微观观测	158
6.2.2 对“黑灰纱”上所附着灰尘的分析	161
6.2.3 对防止“黑灰纱”的几点认识	162
6.2.4 在天津棉纺一厂细纱车间的工程实践	164
6.3 潜艇主推进机循环冷却空气的净化	164
6.3.1 潜艇主推进机冷却空气的净化要求	165
6.3.2 主推进机冷风净化滤料的筛选与试验	166
6.3.3 潜艇主推进机冷却空气净化装置的研制	169
6.4 超高效空气过滤器滤材的研制问题	170
6.4.1 国外超高效空气过滤器	171
6.4.2 高效空气过滤器滤材的理论计算	171
6.4.3 影响超高效空气过滤器滤材性能的因素分析	173
6.4.4 多分散纤维的离散度 σ 和不均匀分布因子 ϵ	177
6.4.5 对超高效滤纸研发与改进的意见	178
本章参考文献	179
第7章 洁净室及洁净区空气悬浮粒子洁净级别	181
7.1 空气洁净度分级	181
7.1.1 等级序号间的关系	182
7.1.2 占用状态及洁净度的命名	183
7.1.3 空气中悬浮粒子的测试	185
7.1.4 空气中悬浮粒子浓度的采样及数据整理	186
7.1.5 洁净度级别的计算例题	188
7.1.6 空气中悬浮粒子的一些特殊检测方法	192
7.1.7 超出分级粒径范围的粒子计径计数	194
7.2 空气洁净度分级的发展与历史	196
7.2.1 美国空军技术指令 TO. NO. 00-25-203	196
7.2.2 美国联邦标准 209	199
7.3 ISO 14644-1 空气洁净度分级标准的沿革	205
7.3.1 中国“空气洁净度分级”的演变	205

7.3.2 ISO 14644-1 等级标准和 FS-209 标准	207
本章参考文献	210
第 8 章 气相空气净化装置及洁净室空气分子污染的防治	213
8.1 气相空气净化装置的工作原理	214
8.2 气相空气净化装置的吸附剂材料及构造	215
8.2.1 活性炭吸附材料	215
8.2.2 化学过滤器构造	217
8.3 气相空气净化装置的性能	218
8.3.1 去除效率及初始效率吸附容量	218
8.3.2 吸附容量 M_s	219
8.3.3 保持能力 M_t	221
8.4 气相空气净化装置的试验系统	221
8.5 实验气体、污染物浓度和测量手段	225
8.5.1 试验气体和污染物浓度	225
8.5.2 现场或在线测量设备	226
8.5.3 现场采样易地分析技术	229
8.6 空气悬浮分子污染分级	230
8.6.1 分级描述符	230
8.6.2 空气悬浮分子污染分级	231
8.7 防止洁净室及相关受控环境的空气分子污染	232
8.7.1 确定分子污染控制等级及 ISO-AMC 描述符	232
8.7.2 空气分子污染源	233
8.8 材料和器件挥发有机化合物的测定方法	236
8.8.1 检测方法	237
8.8.2 试验材料和样品的准备	237
8.8.3 检测报告	238
8.8.4 关注材料和需要检测的有机挥发物	238
8.9 气相空气净化装置在微电子工业中的应用	239
8.9.1 微电子工业的化学污染物控制标准	240
8.9.2 微电子行业化学污染控制日趋严格	241
8.9.3 微电子工业中 AMC 过滤装置的应用	243
本章参考文献	245
第 9 章 洁净室气流流型及其室内通风模式	247
9.1 通风房间室内的主要气流特征	247
9.1.1 送风口的空气流动规律	248
9.1.2 回(排)风口处的空气汇流	251
9.1.3 通风房间的气流流态	253
9.2 洁净室的气流组织与气流流型	254
9.2.1 洁净室的基本气流流型	255
9.2.2 洁净室的通风及其洁净度	264
9.3 洁净室内污染物浓度的预测	266

9.3.1 稳定状态的理论计算	267
9.3.2 稳定状态下洁净室通风系统所需净化能力的计算	273
9.3.3 非稳定状态的理论式	275
9.4 满足室内洁净度所需通风量	279
9.4.1 室外空气含尘浓度	279
9.4.2 室内产尘及产菌量	290
9.4.3 满足室内洁净度的设计通风量	295
本章参考文献	302
第10章 洁净室的空调通风系统	305
10.1 空调净化通风系统	305
10.1.1 空调通风系统的分类	305
10.1.2 全空气空调系统分类	306
10.1.3 空调净化通风系统的基本形式	308
10.2 集中式空调净化通风系统	309
10.2.1 单风机与双风机串联系统	309
10.2.2 双风机或多风机并联系统	310
10.2.3 新风集中处理的空调净化系统	311
10.2.4 设置值班风机的空调净化系统	312
10.2.5 集中式空调净化通风系统的划分	312
10.3 分散式空调净化通风系统	313
10.3.1 分散式空调净化系统的基本形式	313
10.3.2 集中空调与分散净化方式	315
10.4 洁净室及相关受控环境的压差控制	316
10.4.1 邻室间压差值的相关规定	316
10.4.2 压差控制的基本方式	318
10.5 微电子行业洁净室的空调净化通风系统	321
10.5.1 二次回风空调净化机组通风系统或称 AHU 方式	324
10.5.2 新风机组 (MAU) 和循环机组 (RCU) 方式	325
10.5.3 空调机组 (AHU) 和风机过滤器单元 (FFU) 系统	329
10.5.4 微电子行业的新风机组	334
10.6 医院手术室的空调净化通风系统	336
10.6.1 空调机组循环方式	337
10.6.2 空调机组与室内循环机组并用方式	340
10.6.3 新风机组与带冷热盘管的室内循环机组并用方式	342
10.7 制药工业的空调净化通风系统	344
10.7.1 冻干车间采用直接蒸发式表冷器的空调方式	346
10.7.2 冻干车间采用去湿机的空调方式	348
本章参考文献	353
第11章 空气过滤器及滤材检测试验台的研发	356
11.1 全系列空气过滤器性能检测台	356
11.1.1 全系列空气过滤器性能检测台的基本情况	356

11.1.2	风量测量段和发生系统	357
11.1.3	采样、数据采集和控制系统	359
11.1.4	过滤器性能检测台的计算机控制及数据采集	360
11.1.5	计算机控制及数据采集系统的元件和设备选择	361
11.1.6	检测台软件开发	363
11.1.7	风量—阻力关系的曲线拟合	367
11.1.8	检测台的调试和标定	370
11.2	高效空气过滤器最易穿透粒径 (MPPS) 效率检测台	373
11.2.1	研发 MPPS 效率检测台的依据	374
11.2.2	MPPS 全效率检测台主体结构及材质	376
11.2.3	被试过滤器的装卸机构	378
11.2.4	测试台的辅助风道及风路切换	380
11.2.5	检测台的气动机构及空压系统	381
11.2.6	检测台的信号采集和控制系统	382
11.2.7	检测台的性能检验	384
11.2.8	检测台的工程实例	387
11.3	高效过滤器滤纸 MPPS 测试台	389
11.3.1	高效空气过滤器滤纸的测试方法	390
11.3.2	高效滤纸 MPPS 测试台研发中的一些问题	392
11.3.3	高效滤纸 MPPS 测试台的示例和操作	400
11.4	高效空气过滤器 MPPS 扫描检测台	403
11.4.1	MPPS 扫描检测台的相关国际标准	403
11.4.2	MPPS 扫描测试台系统设计	405
11.4.3	扫描检测台设计	407
11.4.4	扫描采样头行走和采样	409
11.4.5	扫描检测台的相关技术数据	411
11.4.6	扫描检测试验参数	414
	本章参考文献	417
第 12 章	计算流体力学 (CFD) 及其在本领域的应用	420
12.1	关注计算流体力学技术在本领域的应用	420
12.2	计算流体力学的发展概况及其在本领域的应用	421
12.2.1	CFD 发展概况	421
12.2.2	在洁净室及相关受控环境等方面的应用	422
12.3	基本理论与守恒方程	425
12.3.1	质量守恒方程	425
12.3.2	动量守恒方程	426
12.3.3	能量守恒方程	428
12.3.4	质量组分方程	429
12.4	紊流结构及时均化守恒方程	430
12.4.1	紊流结构 (Turbulent Flow Model)	431
12.4.2	时均化守恒方程	432
12.4.3	紊动能方程 (K 方程) 和耗散方程 (ϵ 方程)	434

12.4.4 紊流扩散系数	435
12.5 紊流模型.....	437
12.5.1 零方程模型	437
12.5.2 单方程模型	438
12.5.3 双方程模型	438
12.6 数值模拟求解方法及计算软件	439
12.6.1 数值计算基本方法	439
12.6.2 目前流行的 CFD 软件	440
12.7 数值求解基本过程	443
12.7.1 建立物理、数学模型	443
12.7.2 区域的离散化	444
12.7.3 建立离散方程	448
12.7.4 求解离散方程	450
12.8 CFD 应用研究的示例	451
12.8.1 高级别洁净手术室通风效果的研究（示例 I）	452
12.8.2 颗粒污染物在受控环境的运动规律（示例 II）	463
12.8.3 动网格的应用（示例 III）	468
12.8.4 数值模拟在工业洁净室的应用（示例 IV）	478
本章参考文献	485

第 1 章 洁净室及相关受控环境的历史与发展

洁净室及相关受控环境是一门以防止生产与研究工作中受环境因素的干扰和影响,保护产品或研究对象不受有害物质污染为核心内容的新兴学科。它是一门综合建筑、空调通风和纯水、纯气供应等多个专业的专门技术。

了解或总结一门学科或技术的历史与发展,是推动这门学科或技术继续向前迈进的一个重要方面。而作者囿于学识,实难独担此重任,期盼抛砖引玉,为共同促进本学科的发展,尽绵薄之力。受作者所从事研究领域的局限,本书仅侧重在空气净化技术范围;又由于国内相关文献资料匮乏零散,难于逐一核查,文中难免发生遗漏或偏颇之处,尚盼给予赐教。

1.1 洁净室及相关受控环境

洁净室及相关受控环境 (Cleanrooms and Associated Controlled Environments) 是适应实验研究与产品制造的高纯度、高质量、高可靠性、精密化和微型化等方面要求而诞生的一门新兴技术。

洁净室 (Clean Room) 这个名词和概念源于 18 世纪 60 年代欧洲的医疗部门,1861 年法国科学家 L·巴士特鲁以实验证明,有机物的腐败和发酵是微生物的作用,并认为微生物大部分来自于空气中。当时医学家们就懂得了只有有效控制细菌等微生物才能防止某些疾病传播和阻止伤口感染。1867 年,英国外科医生 J·理斯塔提出了著名的制腐法 (Antisepsis),即以碳酸稀释液消毒创口,使战地医院伤口化脓发生率骤减,随后开始用碳酸喷雾方法,对手术环境进行消毒,以期达到杀灭手术室空气及室内建筑表面、设备表面的微生物。

19 世纪后期以来,医学家们还采取了室内器具设备的紫外线照射或甲醛等药物的熏蒸消毒,手术器械、敷料及手术衣的高温消毒等措施,以期处置室、手术室等成为无菌的工作环境,最终达到降低手术感染率的目的,这就是在文字记录中最早出现的“洁净室”名词的含义^[1]。

现代洁净室虽然沿用了这个名词,但与 18 世纪所理解的经喷洒消毒后可以控制创部感染率的处置室、手术室这类工作环境,在定义和内涵上都有根本的不同。现代洁净室及相关受控环境是指“空气悬浮粒子浓度受控的房间或空间区域,其建造和使用方式可最大限度地减少受控房间或受控空间区域内进入的、产生的和滞留的粒子,房间或空间区域内的温度、湿度、压力等其他相关数值也按要求受控”。按现行国际标准、国内标准一致的概念:空气中悬浮粒子是指“有规定物理边界的微小物质,其粒径阈值范围为 $0.1 \sim 5\mu\text{m}$,呈累计分布的固体或液体物质”^[2]。当然,这些悬浮粒子可能是非生物的,也可能是生物的、具有活性的粒子 (Viable Particle),如细菌、病毒等。通常空气中悬浮粒子的

粒径在 $0.005\sim 100\mu\text{m}$ 范围,而洁净室及相关受控环境为洁净度分级的需要,将目前认为对受控影响显著的悬浮粒子粒径范围 $0.1\sim 5\mu\text{m}$,用作为衡量洁净室洁净度差异的标志范围。20 世纪 90 年代,国际学术界为将现代概念的洁净室与传统的“洁净室”相区别,特别将其命名为“Cleanroom”,这个专用词在国际学术交流中沿用至今,但截至目前尚未被字典所吸纳。

洁净室及相关受控环境是涉及建筑、水、气、电等多门学科的专门技术,其中空气净化是关键环节之一,也是本书主要关注的方面。而以控制环境空气悬浮粒子为核心内容的空气净化技术在很大程度上依附于空调通风技术,更何况洁净室及相关受控环境同时也需要控制环境的温度、湿度、气流、噪声、振动等,众所周知,这些内容都是属于空调通风技术的职责范畴。因此,也可将洁净室的空气净化技术看作空调通风技术的特殊应用。

1.1.1 洁净室及相关受控环境的诞生

现代洁净室最早是根据航空、导弹、核武器等军事工业的需要而产生和发展的。现代洁净室形成一项专门技术,其历史不过只有半个多世纪。一切技术的产生与发展,都是出于生产、生活的需要,洁净室及相关受控环境也不例外。

在第二次世界大战期间,美国生产的飞机、导航用气浮陀螺仪,由于质量不稳定,每 10 个陀螺仪平均要返工 120 次。20 世纪 50 年代初朝鲜半岛战争期间,美国的 16 万台电子通信设备由于电真空管等器件性能不稳定、持久性差,其间更换了百万个以上的电子部件。此外,雷达出故障的时间占 84%,潜水艇声纳出故障的时间占 48%,原因都是电子器件、零部件的可靠性差、质量不稳定。军方与厂商究其原因,最终从多方面判定与生产环境不清洁有关。最早出现的、意图控制室内环境空气含尘量的洁净室雏形,是用以研制诺尔顿轰炸瞄准器和导航陀螺仪的。当这些精密加工器件中侵入了 $20\sim 50\mu\text{m}$ 粒径微粒时,其功能完全丧失。以现代洁净室所能达到的水平来看,这种需求是微不足道的。但尽管当时曾不惜工本,采取了种种严密措施来封闭生产车间,但收效甚微。直到 20 世纪 50 年代初,美国原子能委员会为解决对人体有害的放射性尘埃的捕集问题,将于 1951 年研制成功的高效空气过滤器(HEPA—High Efficiency Particulate Air Filter)应用于生产车间的送风过滤,才真正诞生了具有现代意义的洁净室。

1961 年,美国桑第阿国家实验室(Sandia National Laboratories)的高级研究人员怀特菲尔特(Willis Whitfield)提出了当时称之为层流(laminar flow),1988 年正名为单向流(unidirectional flow)的洁净室气流组织方案,并应用于实际工程。从此洁净室达到了前所未有的更高洁净级别。

同年,美国空军制定颁发了世界上第一个洁净室标准 TO (Technical Order)-00-25-203 空军指令《洁净室与洁净工作台的设计与运转特性标准》。在此基础上,1963 年 12 月公布了将洁净室划分为三个级别的美国联邦标准 FED-STD-209《洁净室和洁净区中空气悬浮粒子洁净度分级》(Airborne Particulate Cleanliness Classes in Clean Rooms and Clean Zones)。至此形成了较为完善的洁净室及相关受控环境的技术与理论。以上三个关键的进步,常被誉为现代洁净室发展历史上的三个里程碑^[3]。

1.1.2 洁净室及相关受控环境技术的发展

20 世纪 60 年代中期, 洁净室在美国如雨后春笋般涌现在各种工业部门。它不仅用于军事工业、宇航技术, 也在电子、光学、微型轴承、微型电机、感光胶片、超纯化学试剂等工业部门得到推广, 对当时科学技术和工业发展起了很大的促进作用。除美国而外, 其他工业先进国家, 如日本、德国、英国、法国、瑞士、原苏联、丹麦、荷兰等也都十分重视, 并先后大力发展了洁净室及相关受控环境技术。其涉及领域拓展之宽, 发展速度之快, 令工业与科技界格外关注, 视之为改进产品质量与性能的一条新途径, 特别是为微电子技术的飞速进步创造了必要条件。

20 世纪 70 年代初, 洁净室的建设重点开始转向医疗、制药、食品及生化等行业, 也就是开始了将工业洁净室及相关受控环境 (Industrial Cleanroom, ICR) 移植到生物洁净室 (Biological Cleanroom, BCR) 的历程^[4]。

1966 年, 在美国新墨西哥州巴顿纪念医院建成了世界上第一个垂直单向流的生物洁净手术室 (Biological Clean Operating Room, BCOR)。同年, 当时的美国污染控制协会 AACC (American Association of Contamination Control, 后并入 Institute of Environmental Science and Technology, IEST), 发表了《层流手术室的设计与建造》、《层流洁净空气在外科领域的应用》等指导性文件。同年, 还在美国明尼苏达大学建成了世界上第一个水平层流的无菌室。1967 年在德克萨斯州的 M·D·安德逊病院建成了世界上最早的生物洁净白血病室。

在英国, 著名的整形外科专家恰利 (D·J·Charnley), 也于 1966 年建起了称之为洁净房 (Clean House) 形式的生物洁净手术室; 1969 年, 在奥地利的里茨急救病院建成了欧洲第一个层流病房; 1970 年, 在瑞士萨加内市州立病院的整形外科建立了 Allopro 式垂直层流手术室; 1971 年, 德国柏林的英阶鲁病院建成了用于人工关节手术的垂直层流手术室……

在日本发展得更快, 1965 年日本国立公众卫生院建成了采用高效过滤器的生物洁净室 (BCR) 用于无菌动物 (Specific Pathogen Free, SPF) 的饲育室; 1970 年在爱知县职工病院建成了装配式垂直层流白血病房; 1972 年建成了国立大阪医院垂直层流流型无菌手术室; 至 1977 年底, 病院的生物洁净室已达 131 个。

为确保药品的安全性、有效性, 1964 年美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 开始在美国实施“医药品的制造和质量管理规范”, 简称 GMP (Good Manufacturing Practice)。1969 年, 世界卫生组织 (WHO) 颁发了 GMP, 规定了为保证药品无菌生产, 对生产环境和用水质量等的要求。从此, 生物洁净室及相关受控环境在美、日、西欧等工业国家和地区的制药工业得到了广泛应用^[5]。

美国 FDA 于 1969 年颁布了《食品制造标准》, 即食品工业的 GMP, 要求在制造和包装过程中严格控制生产环境的微生物和温湿度, 以防止食品变质。当时食品无菌装罐的洁净室在欧美得到迅速推广。以美国为例, 1971 年无菌装罐食品总量为 25.4 亿 t, 1980 年增长为 132.7 亿 t, 其中肉制品增长幅度近 19 倍。在食品酿造、发酵工业对纯种的培养、接种、扩种等工艺也都采用了洁净室及相关受控环境^[6]。

以占有七成左右洁净室市场的电子与半导体工业而言, 20 世纪 70 年代被称为大规模

集成电路 (Large Scale Integration, LSI) 时代, 而 19 世纪 80 年代则被称为超大规模集成电路 (Very Large Scale Integration, VLSI) 时代。

20 世纪 70 年代末, 64K 位存储器 (Random-Access Memory, RAM) 作为进入超大规模集成电路阶段的标志性产品在研制过程中注意到其典型线宽为 $3\mu\text{m}$, 需控制的最小粒径约为 $0.3\sim 0.8\mu\text{m}$ 。也就是说, 以 $0.3\mu\text{m}$ 效率为标准的 HEPA 过滤器已不能适应电子技术的进一步发展。美国、日本相继研制与制造了对 $0.1\mu\text{m}$ 尘粒计数过滤效率达 $99.99\%\sim 99.995\%$ 的超高效空气过滤器——ULPA (Ultra low penetration air) 过滤器 (亦常译为“极低穿透率空气过滤器”)。

1982 年, 每个芯片上约有 5 万~6 万个器件的 16K 位随机存储器已成畅销品。1984 年, 256K 位 RAM 已进入实用阶段。同年初, 日本宣布每芯片设置有约 200 万个器件的一兆位 (M) DRAM (Dynamic Random Access Memory——动态随机存取存储器) 试制成功。1985 年, 美国研制完成 4M 的集成电路。到 20 世纪年代末, 4M 位的 DRAM 已商品化。

各种降低能耗、配合工艺过程自动化与高洁净度要求的洁净室, 其气流组织方案及技术在此阶段也陆续诞生。如隧道式洁净室 (Tunnel Type Cleanroom)、洁净管道 (Duct Type Cleanroom) 以及标准机械接口 SMIF (Standard Mechanical Interface) 技术等。

从 20 世纪 80 年代中期以来, 对于微电子行业来说, 1976 年 4 月 24 日颁发的美国联邦标准 209B 所规定的最高洁净级别——100 级 ($\geq 0.5\mu\text{m}$, $\nless 100\text{ pc./cu. ft}$) 已不能满足需要, 1M 的 DRAM 的线宽仅 $1\mu\text{m}$, 要求环境级别为 10 级 ($\geq 0.5\mu\text{m}$)。事实上, 从 20 世纪 70 年代末, 配合微电子技术的发展, 更高级别的洁净室已在美、日陆续建成。相应的检测仪器——激光粒子计数器、凝聚核粒子计数器 (Condensation Particle Counter, CNC) 也应运而生。总结这个时期的经验和适应技术进步的需要, 于是 1987 年 10 月 27 日颁发美国联邦标准 209C, 将洁净等级从原有的 100~100000 四个等级扩展为 1~100000 六个级别, 并将鉴别级别界限的粒径从 $0.5\sim 5\mu\text{m}$ 扩展至 $0.1\sim 5\mu\text{m}$ 。

1992 年 9 月 11 日颁布的美国联邦标准 FED-STD-209E 更进一步取代 1988 年 6 月 15 日颁布的 FED-STD-209D, 将洁净等级分级指标从英制改为米制, 洁净度等级分为 M1~M7 七个级别。与 209D 相比, 最高级别又向上延伸了半个级别 (209D 的 1 级空气中 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 尘粒 $\nless 35.3\text{ pc./m}^3$, 而 209E 的 M1 级, $\geq 0.5\mu\text{m}$ 尘粒 $\nless 10\text{ pc./m}^3$)^[7]。

三十多年来, 美国联邦标准 FS209 一直是世界各国洁净室及相关受控环境行业公认的通行标准。美国总服务局 (U. S. General Services Administration, GSA), 也就是批准美国联邦标准、供联邦政府各机构使用的权威单位, 于 2001 年 11 月 29 日发布公告, 废止美国联邦标准 FED-STD-209E, 等同采用 ISO14644 相关标准。这个决定标志着洁净室及相关受控环境随同世界经济一体化进一步走向国际大同。

在过去的三十多年中, 微电子工业在越来越大的数据处理市场需求的驱动下, 其技术进步的速度, 如同美国英特尔公司 (Intel) 创始人之一的戈登·摩尔 (Gordon Moore) 所观测归纳的规律, 即所谓的“摩尔定律” (此“定律”既非自然法则的, 又非物理的, 而是当时摩尔依据微电子技术发展过程的推断): “当价格不变时, 集成电路上可容纳的晶体管数, 约每隔 18 个月将增加一倍, 性能也将提升一倍。”的确, 这些年来微电子技术依此态势的飞跃发展令人咋舌, 而其发展始终离不开洁净室及相关受控环

境技术相应提升的支撑。因为集成电路集成度越高，相应光刻尺寸越小，器件密度越高，生产环境中受控悬浮颗粒物的尺寸也越小，受限浓度也越低，也就是说所要求的生产环境洁净度更高^[8]。

表 1-1 给出了自 1987 年以来大规模集成电路的工艺发展大致历程。

大规模集成电路的发展历程和对洁净度的要求的演变 表 1-1

年份 工艺	1987	1993	1998	2000	2006	2012
硅片直径(mm)	125	200	200	300	300	400
DRAM 技术 ^①	1M	16~64M	256M	1G	16~64G	64G~256G
最小光刻尺寸(μm)	0.8~1.0	0.35~0.6	0.25	0.15	0.10	0.05
工艺步数 ^②	100~150	300~400	500~600	600~700	700~800	800~1000
洁净度级别 ^③	4	3~4	2	1	<1	<1

- ① DRAM——动态随机存取存储器 (Dynamic Random Access Memory)，作为集成电路最具代表性的器件，以其容量反映集成电路的水平。1G=10³M (G-giga, 千兆或 10 亿)
- ② 工艺步数——随着集成度增大，缩小芯片光刻尺寸的同时，通过多次掩膜以增加层数的方式，立体地增加电子器件的密度，因此工艺步骤增多。
- ③ 洁净度级别——表中数值为 ISO 级别分级号，ISO 5 级与原通行的美国联邦标准 FS-209 的英制 100 级相当，ISO 4 级则相当于英制 10 级，ISO 3 级相当于英制一级，详见本书第 7 章洁净室及洁净区空气悬浮粒子洁净级别。

图 1-1 较形象地给出了近二十年来微电子工业 (Industry Cleanroom, IC) 技术进步的演变，从 8 寸 (200mm) 增大到 18 寸 (450mm)^[9]。

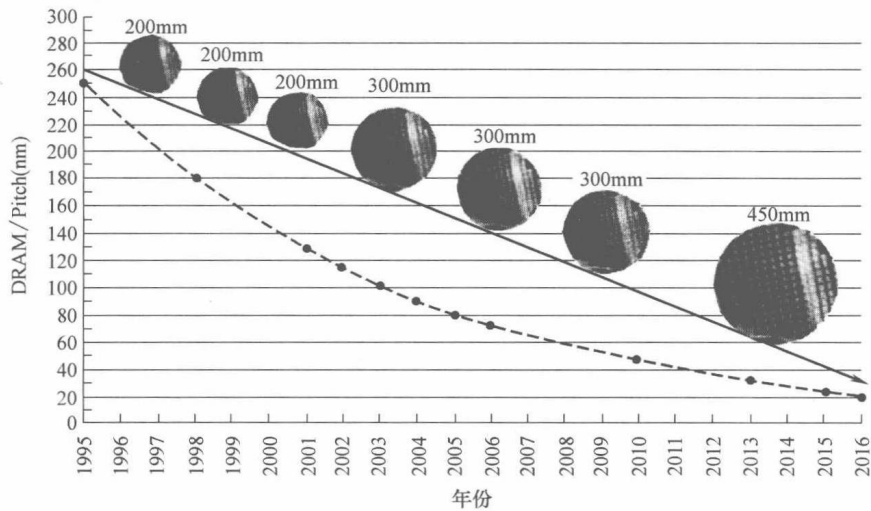


图 1-1 近二十年微电子工业技术进步的演变

图 1-1 中的原点代表相应年代动态随机存取存储器产品 1/2 节园 (DRAM 1/2Pitch) 的尺寸 (nm)，从 1995 年的 0.25μm (250nm) 到 1998 年的 0.18μm (180nm)，再到 2001 年的 0.13μm (130nm)，2003 年的 0.10μm (100nm)，随集成度增大逐年缩小到 2013 年达到 0.03μm (30nm)，预计 2016 年将缩小为 0.02μm (20nm)。

依据以往的生产经验，对微电子产品质量和成品率产生显著影响的，即生产环境中需要控制的有害悬浮颗粒物的直径，约相当于其线宽或光刻最小尺寸的一半，甚至 1/3。按