



集体防护装备技术基础

□ 程代云 史喜成 编著 □



国防工业出版社
National Defense Industry Press



责任编辑：王 鑫 xwang@ndip.cn

文字编辑：孙汝忠

责任校对：钱辉玲

封面设计：彭建华 jhpeng@ndip.cn

集 体 防 护 装 备 技 术 基 础

► 上架建议：武器工业 ◀

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-05435-4



9 787118 054354 >

ISBN 978-7-118-05435-4

定价：36.00 元

集体防护装备技术基础

程代云 史喜成 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

集体防护装备技术基础 / 程代云, 史喜成编著. —北京:
国防工业出版社, 2008. 3

总装备部研究生教育精品教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05435 - 4

I. 集... II. ①程...②史... III. 集体防护 - 防护设备 -
研究生 - 教材 IV. E929

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 169142 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

开本 880 × 1230 1/32 印张 14 1/4 字数 416 千字

2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

PDG

前 言

本书介绍了军用集体防护装备的基础理论和专业理论知识。作者根据从事集体防护装备论证、研制、评价的实践经验,以滤毒器等6种集体防护装备为主线,着重介绍各型装备的技术原理和总体设计;并针对地方高等院校毕业生缺乏军用装备论证和研制的实践经验,结合担任型号研制总设计师的经验体会,介绍了如何解决装备论证和研制工作中遇到的一些问题。

全书共分8章。第1章介绍了集体防护及集体防护装备的发展情况及其重要性。第2章介绍了集体防护装备研制程序及其节点的把握,防护装备特征性能指标的论证知识。第3章在介绍气溶胶过滤理论的基础上,论述了滤尘器和微粒过滤器设计原理。第4章在介绍军用浸渍炭和颗粒填充床层特性的基础上,论述了滤毒器的气流均布设计和防毒性能的设计计算方法。第5章在介绍防护工程空气质量控制重要性的基础上,论述了空气净化装置所涉及到的气-固催化反应动力学和反应器设计、低温等离子体反应器的原理和操作参数对反应器转化效率的影响、光催化反应器原理和反应器类型,以及通过多种技术的集成进行空气净化装置的总体设计。第6章介绍了氧气再生装置的反应原理和控制,结合气-固非催化反应过程的分析,论述了氧气再生装置的总体设计。第7章在介绍变压吸附床层动力学数学模型基础上,论述了军用变压吸附装置的总体设计。第8章介绍了一维并联滤器系统流量均布设计的理论方法,风量测控技术和新型风量测控装置;介绍了滤毒器防毒性能非破坏性检验方法的研究进展。

本书是在多年来为研究生讲授“吸附技术基础”课程的基础上,吸收了多种新型集体防护装备的论证和研制经验撰写而成的,反映了这一研究领域的最新成果,并进行了学术总结。本书可作为军队院校和科研单

位的“军事化学与烟火技术”、“环境工程”专业硕士研究生的专业课参考教材,也可供从事集体防护装备设计、生产、使用、评价的科技工作者阅读。

本书在编写和出版过程中,得到了许多同志的关心和帮助,没有防化研究院机关和国防工业出版社的大力支持,本书的面世是不可能的,在此一并表示衷心的感谢。希望本书能给防化同行和青年科技工作者提供一份有益的资料,对教学和科研发挥积极的作用。由于作者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正,使其日臻完善。

作者

2007年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 集体防护	1
1.2 集体防护装备	2
1.3 集体防护装备的技术现状和发展趋势	5
参考文献	7
第2章 集体防护装备的论证和研制	9
2.1 化学威胁分析与防护指标论证	9
2.1.1 化学威胁形势分析	9
2.1.2 防护指标的论证	13
2.2 立项综合论证	24
2.3 研制总要求的论证	28
2.4 工程设计评审	29
2.5 工艺评审	30
2.6 设计定型	32
参考文献	33
第3章 滤尘器和微粒过滤器	34
3.1 灰尘和毒剂气溶胶的特性	35
3.1.1 微粒的分类	35
3.1.2 核、生、化微粒特征	37
3.2 灰尘和毒剂气溶胶过滤机理	38
3.2.1 气溶胶过滤过程概述	38
3.2.2 粒子被孤立圆柱体捕获的效率	43
3.2.3 用纤维过滤器过滤气溶胶	57
3.2.4 捕获效率与过滤过程基本参数的关系	65

3.2.5	纤维过滤器的阻力和透过系数	71
3.2.6	过滤器的阻力和透过系数	79
3.2.7	气溶胶过滤的次级过程	81
3.3	滤尘器和微粒过滤器的设计	93
3.3.1	过滤材料(滤料)	93
3.3.2	滤料的选择原则	94
3.3.3	设计参数——滤速的计算	94
3.3.4	滤尘器和微粒过滤器的结构设计	96
3.3.5	结构参数对性能的影响和优化设计	99
	参考文献	110
第4章	滤毒器	112
4.1	浸渍活性炭	112
4.1.1	ASC 型浸渍炭	112
4.1.2	抗陈化 ASC 型浸渍炭	114
4.1.3	无铬浸渍炭	115
4.1.4	穿透性毒剂防护炭	116
4.2	防毒动力学及防毒性能计算方法	117
4.2.1	基于物理吸附的防毒性能计算方法	117
4.2.2	基于吸附—反应的防毒动力学方程	128
4.2.3	径向吸附器的床层吸附动力学	141
4.2.4	径向滤毒器防毒动力学的近似计算方法	148
4.2.5	滤毒器设计参数的计算方法	152
4.3	滤毒器的工程流体力学	163
4.3.1	颗粒床层的几何特征	163
4.3.2	颗粒床层的工程流体力学	179
4.4	滤毒器的结构设计	206
4.4.1	滤毒器结构设计的基本要求	206
4.4.2	防止边际效应的结构设计	208
4.4.3	防止炭层下降的结构设计	210
4.4.4	双床层结构设计	212
	参考文献	213

第5章 空气净化装置	215
5.1 概述	215
5.1.1 微粒的净化方法	216
5.1.2 有毒有害气体(蒸气)的净化方法	216
5.2 催化过程和催化反应器	221
5.2.1 空气净化催化过程	221
5.2.2 催化反应器的设计	236
5.3 等离子体反应器	246
5.3.1 低温等离子体化学反应原理	246
5.3.2 介质阻挡放电与自由基反应动力学	259
5.3.3 介质阻挡放电等离子体反应器	269
5.4 光催化反应器	276
5.4.1 光催化过程原理	276
5.4.2 光催化反应动力学	278
5.4.3 光催化反应器种类	281
5.5 后置过滤器	285
5.5.1 后置过滤器的作用	285
5.5.2 反应产物吸收材料	285
5.6 空气净化装置的总体设计	286
参考文献	287
第6章 氧气再生装置	291
6.1 化学生氧材料	292
6.1.1 过氧化物生氧材料	292
6.1.2 超氧化物生氧材料	293
6.1.3 氯酸盐类生氧材料	294
6.1.4 生氧及二氧化碳脱除机理	294
6.2 非催化气—固反应动力学	296
6.2.1 反应过程的一般描述	296
6.2.2 宏观反应动力学	296
6.3 氧气再生装置的设计	309
6.3.1 对流式氧气再生装置的设计计算	309

6.3.2 床层结构的设计计算	310
6.3.3 对流式氧气再生装置的结构设计	317
6.4 再生能力的试验评价	319
参考文献	321
第7章 军用变压吸附装置(NBC/PSA)	322
7.1 概述	322
7.2 操作原理	324
7.3 PSA 过程的数学模型	328
7.3.1 PSA 操作准则的平衡理论	328
7.3.2 非平衡 PSA 的数值解	332
7.4 NBC/PSA 的关键技术	347
7.4.1 吸附剂的选择和微孔吸附平衡	347
7.4.2 NBC/PSA 的吸附—脱附动力学	360
7.5 NBC 变压吸附装置的总体设计	376
参考文献	378
第8章 滤毒通风系统的优化设计和运行	379
8.1 一维并联滤器系统的流量均布设计	379
8.1.1 一维并联滤器系统风量分布计算公式的推导	380
8.1.2 一维并联滤器系统的系统静压差 R_0 的计算 方法	386
8.1.3 均匀风量分布对滤器阻力的要求	388
8.1.4 等阻力滤器对风量分布不均匀性的影响	390
8.1.5 计算举例和试验结果	393
8.2 风量测控技术	397
8.2.1 气体流量测量技术	397
8.2.2 差压传感变送技术	406
8.2.3 风量调节技术	409
8.3 滤毒器防毒性能的无损检验	414
8.3.1 物理吸附性能的非破坏性检验方法	414
8.3.2 化学吸附剩余防毒时间的非破坏性检验方法	431
参考文献	445

第1章 绪论

1.1 集体防护

集体防护是同个人防护相对而言的,是利用防护工程、战斗车辆、舰船等防护核、生、化武器杀伤作用的又一种手段。在现代战争条件下,仅限于使用个人防护装备来防护毒剂、放射性灰尘和生物战剂显然是不可能的。因为在很多场合使用个人防护装备是很困难的,甚至会破坏指挥防护工程、战斗车辆和技术保障车辆、通信枢纽、医院等正常工作的进行,影响战斗车辆和技术保障车辆乘员操纵武器装备的效能。

自从第一次世界大战中德军使用化学毒剂以后,几乎在出现个人防护器材的同时,就开始有了工事防化设施。最初的工事防化设施是在有盖战壕的出入口加上绒毯做成的防毒门帘,构成一个密闭空间。以后对门帘提出了不透气、低温下保持柔软、不易燃烧、容易靠重力在门框上贴密实和制作处理容易等要求。后来又发展浸渍化学药剂的防毒门帘,仅在第一次世界大战中,美国一家工厂就生产了19万多个^[1]防毒门帘。

最初的集体防护概念是指保障多数人不受毒剂伤害的各种措施,包括:在染毒地域构筑防毒工事;对工事进行排毒;对染毒地域进行消毒,以保障多数人在其中自由行动;为多数人的安全而保存粮食、饮水、军需和弹药不受污染;设立防护组织,对毒袭进行报警与报知;训练和监督成员正确使用防毒器材等。第二次世界大战以后,特别是在冷战时期,由于核、生、化等大规模杀伤性武器的发展,防护工程在战争中的地位和作用也越来越大,化学侦察和洗消技术、核监测和辐射报警技术有了很大的发展,集体防护的任务逐渐集中在保障防护工程、战斗车辆和技术保障车辆、舰船等大型防护—作战平台内部不受放射性灰尘、毒剂蒸气和气溶胶、生物战剂气

溶胶的污染和内部空气质量的保障,确保待蔽人员在不穿戴个人防护器材的情况下,能有效地遂行指挥、作战任务,正常工作、进食和休息。

我军集体防护的研究工作可以追溯到 20 世纪 50 年代^[2]。在这期间,提出了指挥防护工程防化设施的战术技术要求,开始仿制各种制式集体防护装备。直至 20 世纪 60 年代至 70 年代,实现了主要集体防护装备的国产化和批量生产。其间,主战坦克和步兵战车陆续装备了滤毒通风装置。到 20 世纪末,我军集体防护技术逐渐接近世界军事强国和发达国家的水平。

就防护工程(以后简称工程)而言,除了抗力外,实现集体防护的基本要求如下:

(1) 工程结构及所用材料应有良好的气密性,能使工程内外隔绝,防止毒气、放射性灰尘及生物战剂气溶胶的透入,防止冲击波和高温气体袭入。

(2) 工程应能防护光辐射和常规武器造成的火灾。

(3) 工程应能防护核武器爆炸产生的早期核辐射。

(4) 工程应有完善的集体防护装备体系,包括核化报警、监测、防护、洗消等装备。

(5) 在核化条件下,应允许一定数量的人员进出工程,而不产生次生污染。

(6) 工程应具有较长时间的隔绝防护能力。

(7) 工程应储备适量的生活用品和物资。

(8) 工程应配备适量的个人防护器材。

1.2 集体防护装备

仅有坚固的防护工程或依靠作战平台本身,而不配备集体防护装备是不能实现集体防护的。同样,仅有集体防护装备而没有密闭的防护工程和防护平台也是不能实现集体防护的。广义上,集体防护装备是装备于防护工程、战斗车辆和技术保障车辆、舰船中,用于对核、生、化武器的袭击实施报警、监测、防护、洗消的“三防”装备的统称。狭义上,集体防

护装备仅指承担防护功能的装备。完善的集体防护装备体系应有:

1) 核监测装备

核监测装备的功能是对工程遭受的核武器袭击进行快速、准确的报警,对进入防护工程的人员实施放射性污染检查和剂量监督,对防护工程内部空气的放射性污染情况进行连续监测,为采取相应的防护、洗消措施提供信息。

(1) 核监测报警仪 对防护工程遭受核武器袭击进行监测和报警,并与防化信息处理中心互联。

(2) 门式放射性污染检查仪 对从核爆炸落下灰的放射性污染区进入工程的人员和洗消后的人员进行全身放射性污染水平的检查,以防止受污染人员进入工程内部后对工程造成危害。

(3) 空气放射性监测仪 监测工程内部主要部位(滤尘器室、滤尘器进出口、内室重要房间)的空气放射性水平,并与防化信息处理中心互联。

(4) 氡监测仪 测量平时室内氡的累积活度(浓度)。

2) 化学报警和监测装备

化学报警和监测装备的功能是对工程遭受的化学武器袭击进行快速、准确的报警,对工程内部空气的化学战剂染毒情况进行监测,为采取相应的防护、洗消措施提供信息。

(1) 口部毒剂报警器 监测工程口部的空气染毒,通过防化信息处理中心传输给工程中央控制室,快速关闭清洁通风并转入隔绝式防护状态;滤毒通风时监测空气中的染毒水平,以确定转为清洁通风的时机,并与防化信息处理中心互联。

(2) 化学毒剂监测仪 用于工程内部空气染毒的监测,并与防化信息处理中心互联。

(3) 空气质量监测仪 用于工程内重要部位空气质量的巡检,连续监测空气中的氧气、二氧化碳、一氧化碳、硫化氢和可燃物总烃,为启动或停止使用内循环空气净化装置及氧气再生装置提供依据。

3) 滤毒通风和防护装备

滤毒通风和防护装备的功能是当工程遭受核、化袭击时,将外部空气

滤除化学毒剂(蒸气或气溶胶)、放射性灰尘和生物气溶胶后送入内室,供人员呼吸并造成规定超压。

(1) 微粒过滤器 滤除滤毒通风空气中的灰尘、放射性灰尘、毒剂气溶胶和生物气溶胶,并对滤除的生物战剂进行灭活。

(2) 滤毒器 滤除滤毒通风空气中的毒剂蒸气,将清洁空气送入内室供人员呼吸,并建立规定超压。

(3) 风量测控装置 测量和控制滤毒器和滤毒通风系统的风量在规定的水平上,并与防化信息处理中心互联。

4) 核化洗消装备

核化洗消装备的功能是当工程遭受核、化武器袭击后,对工程口部和进入工程的受沾染人员实施快速洗消,确保工程内部不受污染。

(1) 口部洗消机 对工程口部或局部染毒部位进行洗消,以保障工程内部安全。

(2) 人员洗消装置 对进入工程的受沾染人员进行洗消和淋浴,以避免进入人员对工程内部产生二次污染。

5) 内部空气循环和净化装备

内部空气循环和净化装备的功能是当工程实施隔绝防护时,通过内部空气循环净化,滤除源发性有害气体、气溶胶和二氧化碳,进行氧气再生和空气清新,提供可长期居住的环境。

(1) 空气净化装置 安装于工程内的重要房间,当工程实施隔绝防护时,循环净化室内的污染空气,去除可吸入颗粒物、异味及有机、无机有害气体,并释放负氧离子,改善空气质量。

(2) 氧气再生装置 安装于工程内的重要房间,在工程实施隔绝防护时,当室内空气中的 CO_2 浓度超标时启动,吸收 CO_2 并释放出氧气供待蔽人员呼吸。

6) 防化信息处理中心

防化信息处理中心的功能是接收核、化报警和监测装备提供的信息,进行综合分析处理,并向中央控制台提供工程遭受核、化袭击和防护态势的信息,为控制工程密闭机构和滤毒通风系统的运行提供依据,以实现工程有效的核、化防护。

1.3 集体防护装备的技术现状和发展趋势

狭义集体防护装备主要包括滤毒通风防护装备和内部空气循环和净化装备两类。这两类装备的功能就是采用有效、可行的技术手段,脱除和净化空气中的毒剂蒸气和有毒有害气体、放射性灰尘、毒剂气溶胶、生物气溶胶和可吸入颗粒物。

目前,用于从空气中脱除军用化学毒剂蒸气的净化技术是浸渍活性炭吸附和催化分解技术。这一技术存在以下一些缺点:

(1) 吸附容量有限,失效后需及时更换。

(2) 对高挥发性的小分子毒剂吸附能力弱。必须浸渍特定的活性组分,借助化学吸附或催化作用将其破坏,生成无毒的产物。

(3) 对湿度敏感。相对湿度大于95%以上时,水的竞争吸附可以使已经吸附在活性炭上的毒剂分子脱附出来,使得神经性毒剂和糜烂性毒剂几乎立刻穿透。

(4) 空气中的水蒸气和二氧化碳会使浸渍炭陈化变质, Cr^{+6} 被还原或活性组分的结构发生变化会使化学反应性能下降,甚至丧失防护能力;虽然浸渍三乙撑二胺(triethylenediamine, TEDA)后,抗陈化性能可以得到某些改善,但却导致物理吸附容量的降低。

(5) 设备庞大、笨重,限制了在某些场合下的使用。

因此,多年来化学防护工作者一直在寻求一种经济、方便、高效的从空气中脱除军用化学毒剂的净化方法。

针对上述问题,期望通过研究,寻找非再生性活性炭过滤器的替代技术。下列四个活跃的研究领域代表了这一趋势^[3]:

(1) 可再生吸附技术——变压吸附或变温吸附。

(2) 催化分解技术。

(3) 高分子膜分离技术。

(4) 气体等离子体技术。

利用吸附剂的吸附能力受压力、温度影响的规律,Skarstrom 在 1958 年提出了变压吸附(pressure swing adsorption, PSA)的概念,并逐步开发成

为工业上用于富集分离氧气和氮气的成熟技术。该过程由于循环周期短、系统和设备紧凑、所需吸附剂少等优势,受到美军^[4-8]的重视。我军也开展了军用变压吸附技术的应用基础研究,在高度选择性和良好吸附性的吸附剂选择、吸附动力学模型及吸附—解吸附控制方案的研究方面取得了一定进展。

几乎所有的化学战剂都可以在空气中燃烧破坏。但是这个过程需要大量的能量以满足反应速率和分解率的要求,这会增大设备尺寸。然而催化反应器能够促进燃烧反应使其在较低的温度下进行,从而节能、减小设备尺寸和质量。军用催化分解技术的开发前景是由于:适用于所有的化学毒剂——所有化学毒剂都能被催化氧化所破坏;此外,生物战剂在空气高温下被消毒;同时催化燃烧反应器的寿命较长。但是,催化剂在高温下存在有机杂原子(N、P、S)的中毒失活问题^[9-14]。美国空军对成熟的候选的化学毒剂防护技术的比较评估列于表1.1。比较表明:以常规的ASC浸渍炭技术为基本技术(100分),非再生吸附和催化氧化的得分比其他技术要高得多。

表 1.1 化学毒剂防护技术的比较评估

化学毒剂 防护技术	评价准则(罚分)				罚分总和
	设备质量	发展风险	后勤负担	实用性	
ASC 浸渍炭	35	30	25	10	100
先进的低压 ASC 浸渍炭	27	40	25	7	99
先进的高压 ASC 浸渍炭	12	40	25	5	82
变压吸附 大气压下解吸 真空解吸	139	50	19	9	217
	122	70	19	9	220
变压—变温吸附	89	115	25	8	237
低温催化剂	37	52	1	1	91
高温催化剂	42	45	5	3	95

膜分离是一项新兴的高效分离技术,它是利用物质透过膜的速率不同,从而使得溶液或气体中各组分得以分离、分级或富集。目前,膜分离技术的应用遍及化工、电子、轻工、纺织、食品、冶金、石油等领域。大多数

膜分离过程中,物质不发生相的变化,分离系数较大,操作温度为室温。所以,一般认为膜分离过程是节能、高效的分离技术。因而世界上很多国家将其列入本国的科技发展计划中。特别是 Stone^[15] 在 1990 年首次报道了用膜法分离氯氟烃(chloro-fluorocarbons, CFC)的工作,可将体积分数为 $500 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 的 CFC 混合气体浓缩 10 倍的研究成果后,很多学者^[16] 对 CFC 的膜分离进行了大量有意义的工作。最近已有专利报道^[17] 利用膜分离技术对军用化学战剂的富集分离研究。目前,存在的主要问题是膜分离的效率不够高和膜的使用寿命较短。

非平衡等离子体技术利用气体放电产生的具有高度反应活性的电子、原子、分子和自由基与各种有机、无机污染物分子反应,从而使污染物分子分解成为小分子化合物。这一技术的最大特点是对各种污染物的破坏分解具有广谱性,它不仅可以对气相中的化学、生物战剂进行破坏^[18],而且可以对液体、固体的化学—放射性废料进行破坏分解^[19,20];不仅可以对低浓度的有机污染物进行分解,而且对高浓度的有机污染物也有较好的分解效果。当等离子体技术与催化技术耦联时,可以更加有效地控制反应副产物的生成与分布。另外,所用设备简单便于移动,适合于多种环境下的使用也是这一技术近年来在环境治理领域日益受到关注的主要原因。

非平衡等离子体技术由于对污染物的破坏分解具有高效、便捷、广谱等特点,与催化技术结合可以免除或减少吸附法的后处理过程,适合于多种环境和场合的使用。这一技术不仅成为现有活性炭过滤技术的补充,而且为催化剂的研究制备和抗中毒失活提供了新的途径。

参 考 文 献

- [1] C. B. Коротков. Коллективная противохимическая защита. Москва, 1952.
- [2] 程代云等. 化学防护装备研制 50 年回顾. 防化研究, 2003(1): 6-12.
- [3] Claey s H M, Smisek R F. Nuclear, Biological, Chemical (NBC) Contamination Avoidance Concepts for Aircraft Applications. B92056-3.
- [4] Mahle J J, Buettner L C. Laboratory-scale pressure swing adsorption system. AD-A268068, 1993.