

Advances in Wind Engineering  
and Atmospheric Environment

# 风与大气环境 科学进展

主 编 刘永贵

副主编 刘树华 陈海平 罗 勇



气象出版社  
China Meteorological Press

# 风与大气环境科学进展

主 编：刘永贵

副主编：刘树华 陈海平 罗 勇

气象出版社

## 内 容 提 要

本书收录了由中国空气动力学会风工程和工业空气动力学专业委员会与中国气象学会大气环境学委员会联合主办的2008年全国风与大气环境学术会议的优秀论文,内容包括风对社会和经济的影响、风引起的质量迁移、大气环境监测、突发大气环境污染事件预警预测、大气环境污染控制技术与优化理论、气溶胶等监测与控制、城市风环境、建筑物风环境、风能利用、处理日本遗弃化武和危险化学品工程中的大气环境问题、军事行动对大气环境的影响等,全面反映了近年来中国在风与大气环境领域所取得的最新进展及成果。本书可供相关专业的高等院校和研究院部门的师生和研究人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

风与大气环境科学进展/刘永贵主编. —北京:气象出版社,2008.10

ISBN 978-7-5029-4592-3

I. 风… II. 刘… III. ①风—环境科学—学术会议—文集②大气环境—环境科学—学术会议—文集 IV. X16-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第151998号

Feng Yu Daqi Huanjing Kexue Jinzhan

## 风与大气环境科学进展

刘永贵 主编

---

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://cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:蔺学东 李太宇

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:787mm×1092mm 1/16

字 数:900千字

版 次:2008年10月第1版

定 价:120.00元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:35

印 次:2008年10月第1次印刷

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

# 《风与大气环境科学进展》 编委会

主 编:刘永贵

副主编:刘树华 陈海平 罗 勇

编 委:(以笔划为序)

刘 峰 刘永贵 刘树华 沈庭云 陈海平

周学志 洪钟祥 符天保 黄顺祥

**Editor-in-Chief:** LIU Yonggui

**Vice Editor-in-Chief:** LIU Shuhua CHEN Haiping LUO Yong

**Members:** LIU Feng LIU Yonggui LIU Shuhua

SHEN Tingyun CHEN Haiping ZHOU Xuezhi

HONG Zhongxiang FU Tianbao HUANG Shunxiang

## 序

风工程与工业空气动力学和大气环境学分别属于中国空气动力学学会和中国气象学会,但两个领域的学者常有交流,有不少研究课题实际上属于两者的交叉领域,这其中的根本原因是两个领域的研究都与各种尺度流体运动密切相关,最新的流体力学理论成果、实验技术和数值模拟方法在两个领域都得到了广泛而充分的应用。为了总结交流该领域我国近年来的研究成果,中国空气动力学学会风工程与工业空气动力学专业委员会和中国气象学会大气环境专业委员会联合组织召开了 2008 年全国风与大气环境学术研讨会。

研讨会共收到投稿论文 100 余篇,经组委会评审选用 79 篇。文章来自多个相关专业的大学和科研院所,论文内容涵盖了风工程、风环境、风能利用、工业空气动力学、大气环境和气象场模拟、大气环境监测分析、大气污染控制、环境安全和军事环境等相关研究领域。

从会议收到论文的内容和质量来看,组织这样一个全国性的多学科联合学术会议是有重要意义的,其成功超出了我们预期的估计。这次会议论文中有相当比例报道了令人瞩目的创新成果,简述如下:

在风工程领域,对桥梁、建筑的风载荷的理论分析、数值模拟和实验研究都更强调逼近实际需求,展示了工程应用研究的发展趋势和最新进展。与风工程研究者着重分析建筑物形状和排列对气流的影响不同,气象工作者则从风力的分布和微尺度边界层气象学角度来探讨气象要素对风工程的影响。可以期待两方面研究的交流产生出新的研究思路,改进研究方法。风能利用是本次会议增加的一个新方向,从气象背景场和工程应用等不同角度展开了研究。

数值模拟显然是本次会议的重要内容,大到中尺度气象场和环境质量的预报,小到运用 CFD 方法研究建筑物对风场反馈的细致模拟,体现了空气动力学与气象学的交融。实际上我们是从不同角度和尺度来研究同一个大气层,气象要素场的变化必然影响到建筑和桥梁的风环境,而建筑物构成的下垫面也必然对气象场有所反馈。当我们将对微气象环境的关注越来越多时,细致的定量研究也就变得更加重要。我们看到一些作者在两种尺度相互作用研究方面的大胆而有趣的尝试,当然更加全面而深刻的认识还需要更多的研究。

在大气环境领域,污染物监测分析技术的论文占了相当比重,其中关于有毒

物质监测技术的研究论文是本次会议的一个鲜明特色。同时我们也可以看到多篇关于污染物浓度模拟和危害评估的研究论文,涵盖了室内尺度、微尺度到区域尺度,其中不少论文研究的是高毒性或放射性污染物,属于大气环境与安全 and 军事环境的交叉领域,其中数值模式与 GIS 系统耦合在化学危害预警预测中的研究报道就是该领域的可喜研究成果。可以预计,未来大气环境研究必然更多地涉及到环境安全内容,军事行动对于大气环境的影响也将引起更多的关注。本次会议收到多篇关于大气环境质量评价方法的论文,它们运用模糊数学、神经网络等新近发展起来的数学工具,更加客观地对包含多种大气污染物的环境质量进行评价。

我们注意到,关于奥运会安全保障和环境治理的论文占有相当比重,这反映了相关科研工作者为北京奥运会胜利举办所做出的重要贡献,也是本次会议的又一个突出特点。

总之,本次会议不仅充分地反映了近年来我国风工程和大气环境方面的研究热点和重要进展,也使我们看到许多令人欣喜的新的研究增长点,这些新的增长点是气象、环境、流体力学和安全科学等学科交叉产生的。我们认为,正是由于实际问题的多学科性,由于学科间的思想和方法交流,新的研究增长点才不断迸发出来,并逐渐形成活跃的研究方向。同时也应该清醒地看到,这些研究领域所涉及到的现象和机理是极其复杂的,我们的研究基础和认识水平还远远没有达到满意的程度,还有许多根本性的难题有待我们的艰苦探索。我们希望通过这次会议的交流,通过论文集的出版,促进相关专业领域的基础理论和工程应用研究。

本次会议的组织、文集的组稿、稿件的评审、文集的出版等一系列工作,都得到了中国人民解放军防化指挥学院领导的大力支持,我谨代表中国空气动力学学会风工程与工业空气动力学专业委员会和中国气象学会大气环境专业委员会表示衷心的感谢!

在学术研讨会召开之际,写下这篇短序,谨与各位同仁共勉。

刘树华

2008年9月10日

# 前 言

风与大气环境在国民生活和国防工程中的地位和作用越来越突出。大气环境直接受风的制约,比如污染物的扩散、城市风环境、建筑物风环境、风对军事行动的影响等。自古就有“万事俱备、只欠东风”的说法,这表明了风对人类生活具有重大的作用。从三国时期的“草船借箭”到近代化学武器的使用,“风”这把双刃剑一直在军事行动中扮演着重要角色;近几十年来,人类在航天航空事业上得到了飞速发展,风在航天航空领域具有至关重要的作用;高速车辆外形设计或高层建筑、桥梁设计都与风密不可分;风能利用改善了我们的生产和生活;一定条件下,风又具有破坏作用。大气环境时时影响着我们的生活和健康,一方面,我们要利用大气环境;另一方面,我们也要保护和改善大气环境。风与大气环境有不可分割的关系,而风与大气环境又对人类生活和国防工程有重大影响,为了促进风与大气环境科学研究的发展,中国空气动力学会风工程和工业空气动力学专业委员会和中国气象学会大气环境学委员会决定于2008年10月21—25日在北京联合召开“2008全国风与大气环境学术会议”,会议主题为“风和大气环境——现在与未来”。

本次学术会议的论文征集得到了该领域相关的各所高校、科研院所和军队单位的支持,广大风与大气环境科研和教学工作者踊跃投稿,共收到论文107篇。会务组组织专家进行了认真评阅,最后在论文集《风与大气环境科学进展》中录用了79篇论文,为便于同仁们研究使用和保存,该论文集由气象出版社正式出版。

论文集以“风与大气环境科学进展”为名,为本领域以后召开系列的学术会议起到引导作用。本论文集包括“环境安全模拟与评价”、“军事环境”、“风工程与风环境”、“风能利用”、“大气环境和气象场模拟”、“大气环境监测和分析技术”、“大气环境评价方法”和“大气环境污染控制”等七大部分,论文较为全面地反映了风与大气环境的研究现状和研究进展,既有理论创新的研究论文,又有应用性很强的最新成果,涵盖了风与大气环境及相关领域,尤其是部分论文将最前沿的基础理论和最前端的实际应用有机地结合起来,具有广阔的应用前景和重要的学术价值。

论文集的出版得到了中国空气动力学会风工程和工业空气动力学专业委员

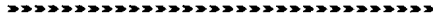
会负责人的具体指导,得到了中国气象学会大气环境学委员会负责人的支持,同时也得到了中国人民解放军防化指挥工程学院领导和有关同志的鼎力支持。在此,向所有支持和参与本书编辑、出版的单位和个人表示衷心感谢!

由于论文集编印的时间仓促,未能与作者进行充分沟通,加之编者水平有限,不妥之处在所难免,敬请作者和广大读者谅解。

编 者  
2008年10月于北京



# 目 录



## 序 前言

### 环境安全模拟与评价、军事环境

军事装备涂层解吸毒剂的危害评估·····	郝荣章 陈海平 程振兴等(3)
本质安全原则在日本遗弃化武销毁设施设计中的应用·····	徐文莉 张 草 梁哲明(11)
核事故后果评价研究的进展·····	姚仁太(19)
燃烧武器的使用及对大气环境的影响·····	王 瑾 徐 莉 鲁艳英等(33)
“脏弹”放射性烟云在小区中的扩散研究·····	王百荣 王庆波 黄顺祥等(38)
大气稳定度对红磷烟幕衰减 10.6 μm 激光试验的影响·····	王玄玉(44)
化学事故危害评估与应急救援系统研制·····	王玄玉 黄汉林 李来玉等(51)
公共场所内生化学物质扩散的 CFD 模拟与实验研究·····	柯佳雄 宋 黎 刘 峰(57)
地铁反化学恐怖有关问题研究·····	王新明 孙诗德 魏栓紧等(64)
化学事故风险评价的理论难点分析·····	刘 峰 黄顺祥(71)
气象条件对构成烟幕的影响因素分析·····	邱 峰 刘志龙 彭 鹏等(77)
军事环境的研究现状与展望·····	陈海平 李 静 黄顺祥(82)
APAWP 系统的理论框架及应用概述·····	黄顺祥(89)
防护等级和劳动强度对处理日遗化武作业人员热应激的影响 ·····	梁 涛 李 雷 曾向军(98)
销毁工程大气扩散水槽模拟实验研究·····	朱凤荣 黄顺祥(104)

### 风工程与风环境

苏州城市风环境的数值模拟研究·····	戎春波 朱 焱 刘红年等(115)
大风下风向角对高速列车空气动力性能的影响·····	马 静 张 杰 杨志刚(122)
高层建筑密集区的风环境数值模拟研究·····	许 伟 李庆祥 杨仕超等(132)
桥梁截面形状对高速列车横风稳定性影响研究·····	张 杰 马 静 杨志刚(139)
防风网压力损失系数的实验研究·····	陈 凯 朱凤荣 梁 彬等(149)
双立柱体建筑物风荷载干扰实验研究·····	王卫华 李明水 曲晓玲(157)
高层建筑密集区人行高度风环境的风洞实验研究·····	李庆祥 杨仕超 黄啟明(165)
大跨度桥梁风工程的现状与展望·····	葛耀君(171)

大跨悬挑屋盖结构的辅助气动措施研究…………… 林 斌 耿 璐 孙 璞等(184)

应用非对称台风模型计算中国近海台风大风分布…………… 李 强 张秀芝 孙即霖(191)

Poisson-Gumbel 联合分布在中国东南沿海风工程设计风速计算中的应用  
…………… 张容焱 张秀芝 蔡连娃(198)

北京铁路局提速线路大风分析…………… 张秀芝 秦悦虹 柳艳香等(206)

建筑物周边风场环境舒适度研究…………… 朱凤荣 梁 彬(212)

满足国民经济需求 建设空气动力设备平台…………… 王勋年 陈 立 李 明等(220)

### 风能利用

小型风力机负载匹配性能计算及实验研究…………… 韩 璐 张召明(227)

加快可再生能源——风能的开发与利用…………… 鲁胜利 白晓波 周黎明等(235)

CFD 技术与风能利用 …………… 李树民 朱国林 黄 勇等(239)

中国风能资源数值模拟研究…………… 张 德 朱 蓉 罗 勇等(246)

### 大气环境和气象场模拟

京津冀地区夏季大气局地环流耦合效应的数值模拟…………… 刘树华 刘振鑫 李 炬等(257)

天坛公园绿地对污染扩散影响研究…………… 张碧辉 刘树华 谢军飞等(265)

室内公共场所空气微生物检测及消毒灭菌方法…………… 鲁艳英 王 谨 朱 荣等(272)

FLUENT 应用于复杂地形风场精细模拟的研究 …………… 李 磊 张 宁 张立杰等(277)

中国硫沉降现状及未来可能变化的数值模拟研究…………… 权建农 李 磊 张 蕾等(286)

东北地区复杂地形风场结构研究…………… 李慧敏 陈海平 黄顺祥等(295)

复杂地形上建筑物对风场与污染扩散影响的数值研究…………… 张立杰 胡 非 李 磊等(302)

城市建筑物动力冠层方案的引入及应用研究…………… 周荣卫 蒋维楣 何晓凤(309)

MM5 与 CFD 软件相结合对复杂地形风资源模拟初探 …… 何晓凤 周荣卫 朱 蓉(318)

基于 HLA 的大气环境联邦构建 …………… 黄 华 徐幼平 邓志武(325)

开路涡动相关系统观测资料野点剔除方法的比较分析…………… 张 宇 张文煜 张北斗(332)

大气污染观测信息空间密度对 CMAQ 源同化模型客观性的尺度影响特征  
…………… 程兴宏 徐祥德 丁国安(338)

浅析地铁内部空气污染与控制…………… 曾向军 张 英 顾莲芳等(347)

空调节能降耗新技术…………… 石文平 石文义(353)

基于三维 PIV 系统的室内空气环境模拟研究 …………… 宋 黎 柯佳雄 刘 峰等(359)

通风换气对室内空气污染治理的影响…………… 赵 洁(366)

### 大气环境监测和分析技术

生物安全实验室内微生物气溶胶扩散验证实验研究…………… 徐 莉 刘 敏 宋 黎等(373)

激光雷达技术在大气污染监测中的应用…………… 王德钊 张红兴 陈传治(380)

突发性大气环境污染事故应急监测体系研究…………… 陈传治 牛东明 张金芳等(385)

纳米材料催化发光测定气溶胶硫二甘醇的研究…………… 唐荣军 刘国宏 左伯莉(390)


气相色谱法测定染毒空气中的沙林·····	曲刚莲	张 草	马果花等(395)
热解吸-气相色谱法测定染毒空气中的二苯氯肿 ·····	马果花	蔡冠梁	潘荣荣等(399)
微生物气溶胶采样技术研究·····	齐秀丽	董中朝	鲁艳英(403)
日本遗弃化武对大气环境的影响及作业区环境监测初探 ·····	朱宝霞	周黎明	周建梅等(411)
哈尔巴岭销毁设施中毒剂自动监测方案的基础性问题研究 ·····	周 廷	芮 畅	周黎明等(416)
日本遗弃化武销毁设施工作区空气监测基本设想·····	周黎明	周建梅	鲁胜利等(423)
大气中化学战剂的环境监测技术·····	周建梅	周黎明	李兴阔等(430)
城市小区突发化学事件示踪实验(SF <sub>6</sub> )与数据分析 ·····	周学志	黄顺祥	刘 峰等(435)
多卫星云图拼接与融合处理·····	罗志荣	孙 晶	(441)
热解吸-气相色谱法测定空气中西阿尔的方法研究 ·····	曲刚莲	蔡冠梁	马果花等(446)
空气样品的浓缩采样方法·····	李芬润	曲刚莲	马果花等(450)
新型光气报警防护两用型检测卡的研究与设计·····	卢彩虹	李 杰	谭 峰等(458)

## 大气环境评价方法

基于神经网络的大气环境质量评价·····	张良华	葛卫华	章柏红等(465)
基于 AHP 与 GRAP 集成方法的大气环境质量评价研究 ·····	谢孔峰	张良华	章柏红等(471)
基于多属性决策的建设项目选址择优·····	章柏红	陈文义	纪海龙(477)
区域大气环境质量的模糊综合评价·····	李兴阔	张良华	周建梅等(482)
基于贝叶斯网络的大气环境质量评价模型研究·····	刘志龙	诸雪征	梁 婷等(486)
基于粗糙集近似分类法的大气颗粒物排放源的重要性评价 ·····	陈文义	张良华	章柏红(492)
基于主成分分析法的大气颗粒物排放源的重要性评价·····	王怀勇	葛卫华	章柏红等(497)
基于拉开档次组合评价法的大气环境质量评价·····	张良华	王怀勇	吴明飞等(502)

## 大气环境污染控制

非平衡等离子体技术在突发性大气污染控制中的应用展望 ·····	李战国	胡 真	刘志农等(509)
农村大气污染防治技术研究·····	王 瑾	徐 莉	鲁艳英等(516)
节能减排与国防实践·····	关彩虹	胡 炜	(522)
环境矿物材料在大气污染防治中的应用·····	李文丹	韩莎莎	王 瑾等(527)
温室效应及控制对策研究·····	彭 鹏	岳鸿志	张良华等(535)
北京奥运会期间机动车控制措施及效果分析·····	葛卫华	张良华	彭 鹏等(542)



# 环境安全模拟与评价、军事环境



# 军事装备涂层解吸毒剂的危害评估

郝荣章 陈海平 程振兴 周朝华 黄顺祥

(防化指挥工程学院,北京 102205)

**摘要** 当军事装备遭受化学战或化学恐怖袭击时,被装备涂层吸收的毒剂很难被洗消掉,其持久度被大大提高,缓慢解吸的毒剂蒸气会对周围人员和环境构成危害,但有关资料不详。本文依据毒剂在涂层内的传质规律和大气扩散基本原理,在密闭空间和野外开阔地域两方面构建了解吸毒剂的危害评估模型;以 HD(芥子气)为例,综合考察了装备涂层、遭受程度、气象条件、评估位置、作用时间等 5 类 17 个参数,对装备涂层解吸毒剂的危害情况进行了评估,并编写了应用程序;可为受染装备洗消后的安全性评价和处置措施的制定提供依据,并对化工厂有害气体泄漏事故的处理等民间应用具有参考意义。

**关键词** 装备涂层 毒剂 解吸 危害评估 模型

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 200810WAE001

## 1 引言

军事装备涂层染毒后的洗消问题,自一次世界大战以来,一直困扰着各国防化洗消专家<sup>[1~3]</sup>。当军事装备遭受化学战或化学恐怖袭击时,装备表面极易沾染毒剂,虽然涂层表面的毒剂液滴可以被消毒剂消除,但渗透进入涂层体相的毒剂将很难被洗消掉,毒剂的持久度将会被大大提高。接着涂层内的毒剂就会缓慢解吸出来,尽管浓度较低,但仍有可能造成人员伤害,但装备涂层解吸毒剂对人员伤害情况的有关资料不详<sup>[4~6]</sup>。减小涂层解吸毒剂的方法之一便是研制抗毒剂渗透的涂层,例如聚氨酯,该类材料可以提高涂层对毒剂的抗渗透能力。这方面已经取得了一些进展,但该类涂层的造价很高,且并不能起到绝对抗毒剂渗透的效果<sup>[7,8]</sup>。目前醇酸漆仍是应用最广的装备涂层<sup>[9]</sup>,因此毒剂在醇酸漆涂层内的吸收、解吸和降解仍是装备涂层洗消的基本课题,该课题的研究在防核生化武器和化学恐怖袭击方面具有非常重要的意义。

到目前为止,有关毒剂在涂层内传递过程的研究较少。1986 年 Schwope 等采用实验和模型的方法研究了毒剂模拟剂二乙基丙二酸酯的吸着和解吸<sup>[10]</sup>。1990 年 Sturdivan 等开发了一种叫做“round-robin”的方法来测量抗毒涂层中残余的毒剂量<sup>[6]</sup>。1992 年 Marten 等报道了他们对芥子气和梭曼从染毒涂层中的解吸情况,设计了一种溶剂吸收的方法来测量从涂层中解吸的毒剂量<sup>[4]</sup>。2001 年我们建立了一个系统地研究毒剂在涂层中吸收和解吸的方法,获得了解吸毒剂的表现动力学方程<sup>[5]</sup>,后来又对毒剂在醇酸漆涂层内的传递情况进行了更为详细

资助项目:国家重点基础研究发展规划“973”项目(2006CB300401)和国家自然科学基金(40405025)

作者简介:郝荣章(1980—),男,博士生,军事化学与烟火技术专业

的研究,建立了能与实验结果较好吻合的理论传质模型,测定了毒剂在醇酸漆涂层内的扩散系数和降解速率常数,分析了降解产物<sup>[11, 12]</sup>。

获得毒剂在醇酸漆涂层内的传质规律以后,便可以对解吸毒剂进行危害评估。本文依据危害评估基本原理,从密闭空间和野外开阔地域两方面建立了解吸毒剂的危害评估模型。以HD(芥子气)为例,综合考虑了装备涂层、遭袭程度、气象条件、评估位置、作用时间等5类17个参数,对装备涂层解吸毒剂的危害情况进行了评估。运用 Visual Basic 语言,编写了装备涂层解吸毒剂的危害评估应用程序。

## 2 评估原理和方法

扩散至空间某点的毒剂对人员的伤害是通过在时间上的累积(即浓时积)来体现的。不同毒剂的毒性大小不同,表1列出了几种毒剂的伤害程度与浓时积范围<sup>[13]</sup>。

表1 毒剂的伤害程度与浓时积范围

Table 1 Ct value for Chemical Warfare Agents (CWAs) and their dangers to personnel

伤害程度	芥子气	沙林	症状后果
	μg min/L		
轻度伤害	1~25	1~5	人员出现轻微中毒症状,但部队战斗力不降低
中度伤害	26~50	6~10	发生中毒,部队战斗力有所降低,但仍能执行任务
严重伤害	51~100	11~15	严重伤亡,战斗力下降很大

利用毒剂在装备涂层中的传质规律便可以计算出解吸至大气中毒剂浓度的时空分布,进而可以估算出解吸毒剂在空间某点的浓时积,实现对解吸毒剂的危害评估。

### 2.1 装备涂层解吸毒剂的源强

我们已经在以前的工作中得到了满面染毒涂层洗消后毒剂自涂层解吸的源强<sup>[11,12]</sup>,化学战条件下,对于非满面染毒的情况,可通过染毒面积百分率  $r$  来修正,得到装备涂层解吸毒剂的源强:

$$Q_s = r \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{2D_{out}c_0}{L} f(t_{in}) [1 - f(t_{out})] \right\} \quad (1)$$

其中,有关函数的定义见文献<sup>[11,12]</sup>。式(1)含有环境温度  $T$ 、涂层厚度  $L$ 、染毒时间  $t_{in}$ 、解吸时间  $t_{out}$ 、染毒百分率  $r$  等参数。其中,大部分参数比较容易获得:溶胀极限  $c_0$  由毒剂与涂层的物性决定,可通过文献数据或实验测定的方法来获得;扩散系数与环境温度、涂层老化程度和厚度有关,其中与温度的关系可以由 Arrhenius 方程来表示,与涂层厚度和老化程度的关系可由实验数据来拟合。

### 2.2 装备涂层解吸毒剂危害评估模型

#### 2.2.1 密闭空间内的危害评估<sup>[14,15]</sup>

如果染毒装备经洗消后立即置于仓库内,那么滞留在涂层内的毒剂便会逐渐解吸,充满整个密闭空间,造成染毒空气。设密闭空间的体积为  $V$ ,装备的数量为  $n$ ,单个装备的外表面积为  $S_0$ 。如果自装备涂层解吸出的毒剂在密闭空间内无损失,则从装备入库起,仓库内毒剂的

平均浓度为：

$$c(t_{out}) = \frac{\int_0^{t_{out}} n Q_s S_0 dt}{V} \tag{2}$$

式中  $Q_s$  为毒剂在装备涂层表面处的解吸通量，可由式(1)求得。

设仓库内毒剂的允许浓度为  $c_p$ ，该值可取为毒剂的阈浓度，则装备涂层内允许的毒剂残存量  $q_p$  应满足：

$$q_p = c_p V \tag{3}$$

设装备在入库之前需要经过  $t_{out}$  时间的晾置，残存量才能达到允许量，可通过式(1)来计算所应采取的晾置时间  $t_{out}$ 。

在一定误差范围内，式(1)可简化为：

$$Q_s \approx \frac{2r D_{out} c_0}{L} (1 - e^{-D_{in} \beta_0^2 t_{in}}) e^{-D_{out} \beta_0^2 t_{out}} \tag{4}$$

则

$$q_p = \int_{t_{out}}^{\infty} Q_s n S_0 dt_{out} = \frac{2nr S_0 c_0}{\beta_0^2 L} (1 - e^{-D_{in} \beta_0^2 t_{in}}) e^{-D_{out} \beta_0^2 t_{out}} \tag{5}$$

变形得洗消晾置时间与染毒时间的关系：

$$t_{out} = \frac{-\ln[g(t_{in})]}{D_{out} \beta_0^2} \tag{6}$$

式中

$$g(t_{in}) = \frac{q_p \beta_0^2 L}{2nr S_0 c_0 (1 - e^{-D_{in} \beta_0^2 t_{in}})} \tag{7}$$

### 2.2.2 开阔地域的危害评估

自装备涂层解吸的毒剂扩散至空气中的浓度，可以采用拉赫特曼方程<sup>[15]</sup>来计算，进而求得空间某点处毒剂浓度在时间上的累积量，即浓时积；根据毒剂伤害剂量标准，便可以对解吸毒剂进行危害评估。

#### (1) 有关假设

实际的军事装备具有复杂的结构，但从研究涂层染毒和解吸毒剂的角度出发，可将其简化为一个空间立方体，见图1。设立方体的长、宽、高为  $a, b, d$ ，离地面高为  $h$ ，立方体  $a$  边与  $x$  轴

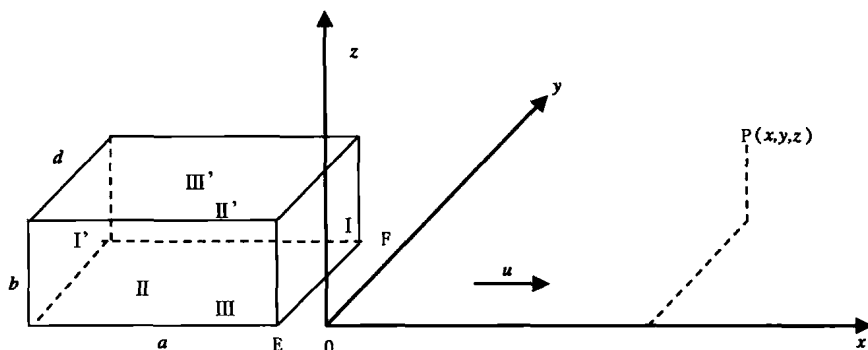


图1 装备涂层解吸毒剂的危害评估模型

Fig.1 Schematic illustration for the evaluation model for CWAs desorbed from contaminated equipment



平行,  $b$  边与  $z$  轴平行,  $d$  边与  $y$  轴平行, 各面编号为 I、II、III、I'、II'、III'。风向平行于  $x$  轴, 风速为  $u$ , 平稳流动, 不考虑近距离内的回流。

这样对装备涂层解吸毒剂的危害评估便是求待评估点  $P(x, y, z)$  处的毒剂浓度, 以及在作用时间 ( $t_1$  至  $t_2$ ) 内的累积毒害剂量。

(2) 各面源解吸毒剂在大气中扩散方程的推导

6 个面源同时对  $P$  点贡献浓度, 可以先推导 I、II、III 面源的扩散方程, 进而类推得到它们平行对面的扩散方程, 有关推导过程略。

表 2 方体面源的  $A_i$  表达式

Table 2 Formulas for the intensity of cubic source of CWAs

I 面	$A_I = \frac{1}{4u} \left[ \Phi\left(\frac{y+d}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) - \Phi\left(\frac{y-d}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) \right] \left[ \Phi\left(\frac{z-h}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) - \Phi\left(\frac{z-h-b}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) + \Phi\left(\frac{z+h+b}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) - \Phi\left(\frac{z+h}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \right]$ <p style="text-align: center;">式中, <math>\sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1}, \sigma_z = \gamma_2 x^{\alpha_2}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>A_{I'}</math> 同 <math>A_I</math> 表达式, 但 <math>\sigma_y = \gamma_1 (x+a)^{\alpha_1}, \sigma_z = \gamma_2 (x+a)^{\alpha_2}</math></p>
II 面	$A_{II'} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi u} \int_0^a \frac{1}{\sigma_y} \left[ \Phi\left(\frac{z-h}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) - \Phi\left(\frac{z-h-b}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) + \Phi\left(\frac{z+h+b}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) - \Phi\left(\frac{z+h}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \right] \left( e^{-\frac{(y-\frac{d}{2})^2}{2\sigma_y^2}} + e^{-\frac{(y+\frac{d}{2})^2}{2\sigma_y^2}} \right) d\xi$ <p style="text-align: center;">式中, <math>\sigma_y = \gamma_1 (x+\xi)^{\alpha_1}, \sigma_z = \gamma_2 (x+\xi)^{\alpha_2}</math></p>
III 面	$A_{III'} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi u} \int_0^a \left\{ \frac{1}{\sigma_z} \left[ \Phi\left(\frac{y+d}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) - \Phi\left(\frac{y-d}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) \right] \left[ e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} e^{-\frac{(z-h-b)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h+b)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \right\} d\xi$ <p style="text-align: center;">式中, <math>\sigma_y = \gamma_1 (x+\xi)^{\alpha_1}, \sigma_z = \gamma_2 (x+\xi)^{\alpha_2}</math></p>
六面	$A = A_I + A_{I'} + A_{II'} + A_{III'}$

(3) 大气扩散系数

根据消毒对象大小及解吸规律可知, 毒剂浓度较低, 因此主要考虑近距离的毒害剂量评价, 因此大气扩散系数  $\sigma_y, \sigma_z$  可取幂函数形式:

$$\sigma_y = \gamma_1 (x + \xi)^{\alpha_1} \tag{8}$$

$$\sigma_z = \gamma_2 (x + \xi)^{\alpha_2} \tag{9}$$

式中  $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$  为稳定度的函数。

(4) 毒剂剂量计算

毒剂在空间某点的浓度为:

$$c_s = AQ_s \tag{11}$$

式中  $A$  为  $c_s$  方程中除  $Q_s$  外的所有表达式, 立方体各面的  $A_i$  的表达式见表 2。

解吸毒剂在空间某点的浓度随时间衰减, 可对其作关于时间的积分, 得到在  $t_1$  至  $t_2$  时间段内的毒害剂量:

$$Lct = \int_{t_1}^{t_2} c_s dt = \int_{t_1}^{t_2} AQ_s dt \tag{12}$$