

Detection Technologies for Chemical Warfare
Agents and Toxic Vapors

化学战剂和有毒气体 检测技术

[美] Yin Sun & Kwok Y.Ong 编著
郭成海 杨柳 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

820-0105-军:字图 51登同合对计著

译者的话

化学战剂和有毒气体检测技术

Detection Technologies for Chemical Warfare

Agents and Toxic Vapors

[美] Yin Sun & Kwok Y. Ong 编著

郭成海 杨柳 译

参译 曹树亚 秦墨林 赵建军 曹丙庆

校对 余建华

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2010-058

图书在版编目(CIP)数据

化学战剂和有毒气体检测技术/(美)塞姆(Sun, Y.), (美)欧恩(Ong, K. Y.) 编著;郭成海,杨柳译. —北京:国防工业出版社, 2010. 7

书名原文: Detection Technologies for Chemical Warfare Agents and Toxic Vapors

ISBN 978-7-118-06981-5

I. ①化... II. ①塞... ②欧... ③郭... ④杨... III. ①化学战-军用毒剂-检测 ②化学战-有毒气体-检测 IV. ①TJ92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 124354 号

Translation from the English language edition:

Detection Technologies for Chemical Warfare Agents and Toxic Vapors

by Yin Sun, Kwok Y. Ong.

Copyright © 2005 CRC Press.

All Rights Reserved.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

版权所有,侵权必究。

※

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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 16 字数 276 千字

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 42.00 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

译者的话

“和平与发展”是当今世界的两大主题。政治民主、经济繁荣和环境优美是人类共同追求的美好愿望。然而,由于民族的、宗教的和社会各阶层之间的利益不同所引发的矛盾和冲突从来就没有停止过,不断发生的局部战争和恐怖袭击活动,特别是大规模杀伤性武器的存在和使用,对世界安全和人类和平都是巨大的威胁。化学武器具有成本低、容易制造和使用隐蔽的特点,因此,很容易成为恐怖分子选用的大规模杀伤性武器。《禁止化学武器公约》虽已缔结,但在你死我活的未来战争中我们仍将面临残酷的核、生、化战场环境。在这种形势下,世界各国始终也没有放弃对化学侦检和防护技术的研究,防化装备也一直在不断地更新换代。为了保护本土的安全,美国早在1996年就制定了“国内准备计划”(Domestic Preparedness Program, DPP),以应对可能发生在美国本土的核化生恐怖袭击。《化学战剂和有毒气体检测技术》就是在这样的情况下编写和出版的。

Yin Sun 博士和 Kwok Y. Ong 分别在美国军方的埃奇伍德化学和生物中心(the U. S. Army Edgewood Chemical and Biological Center, ECBC)和埃奇伍德兵工厂,即美军的化学兵司令部长期工作过。后者工作的重点是化学毒剂的检测和检测器的评价研究。因此,他们对美国的化学反恐和毒剂检测技术非常了解。作者在该书中从化学战剂及其检测技术的发展史、各种毒剂和有毒工业化合物的性质及相关术语、美国政府的政策和计划、毒剂蒸气发生技术、毒剂监测器的性能指标要求,一直到各种检测技术的原理、方法和性能优缺点及未来的发展趋势都进行了较为全面、系统的介绍。本书编写和出版的目的,是为了帮助美国应急人员和公民了解和掌握相应的化学反恐知识,一旦发生化学恐怖袭击事件时能够采取正确的防护措施,最大限度地减少恐慌和人员伤亡。我国也同样面临着各种分裂势力利用化学武器进行恐怖袭击的威胁。翻译此书,一方面可以作为我们化学检测装备研制的参考资料和化学侦检专业人才培养的教材,另一方面也有助于我们在反恐斗争中借鉴美国化学反恐方面的技术、对策和经验。

本书的翻译和出版得到了总装备部“1153”人才工程专项经费的资助,也得到防化研究院和第四研究所机关、领导和许多同事的支持与帮助,在此一并表示感谢。

在翻译本书的过程中,我们对一些可能的书写错误进行了更正,有些地方加了译注。但由于译者水平所限,翻译的不足和错误在所难免,敬请读者批评指正。

译者

2010年2月于北京

原 书 前 言

恐怖分子已在多种场合使用高毒性化合物和高威力的爆炸物进行过恐怖活动。例如 1993 年的世贸中心爆炸案、1995 年东京地铁的沙林事件和同年俄克拉荷马市联邦大楼爆炸案。2001 年 9 月 11 日,发生在纽约和首都华盛顿的“9·11”事件改变了美国和世界许多国家人民的生活。

沙林是被确定为大规模杀伤性武器(Weapons of Mass Destruction, WMDs)的高毒性化合物之一。WMDs 是指能够进行大规模破坏和/或以杀伤大量人员的方式使用的武器,可以是高威力的爆炸物或核、生、化和放射性武器,但不包括作为分离部件的运输和发送这些武器的运载工具。“除了高威力的爆炸物, WMDs 还包括化学、生物和核武器”(Dictionary of Military and Associated Terms, U. S. Department of Defense, Joint Publication, 2002)。恐怖分子使用核、生、化这样的大规模杀伤性武器袭击民用目标,会造成大量的人员伤亡。最近发生在美国的炭疽事件(anthrax incidents)就是一个重要的例子,它说明生物毒剂是如何造成伤亡和恐慌的。炭疽和东京地铁事件共造成 10 多人死亡和数千人受伤,这震惊了世界,使人们认识到,即使恐怖分子是小规模地使用 WMDs 也会造社会的恐慌和混乱。利用 WMDs 对民用目标进行攻击已不再是不可能的事,也没有哪个国家能对这样的恐怖袭击置身事外。事实上,近年来恐怖分子使用化学战剂(Chemical Warfare Agents, CWAs)和工业有毒化合物(Toxic Industrial Compounds, TICs)的潜在危险在不断的增加。

相对来讲, CWAs 的制造成本并不高。这样的毒剂可以偷偷地进行释放,当受害人出现中毒症状时才能意识到自己已暴露在毒剂中。美国政府已在加强对这些化合物及其必要的合成试剂的控制。然而,在工业上使用的许多其它化合物也都具有相当高的毒性,而且这些工业有毒化合物(TICs)是很容易大量获取的。因此,尽管它们的毒性不及 CWAs,但对恐怖分子还是有很大吸引力的。

假定恐怖分子能够合成 CWAs 或能够轻易得到大量的 TICs,那么他们随时都有可能使用 CWAs 或 TICs 对政府或民用目标进行攻击。这将成为人们十分担心的现实威胁。无论做多大的努力进行防止,都不可能预先知道何时会发生

这类恐怖事件。因此,当恐怖事件发生时,有快速可靠的装备检测空气中这些化合物的存在是至关重要的。世界各国政府都在积极地寻求快速有效的方法来检测空气中的 CWAs 或 TICs ,以便在发生恐怖袭击事件时能及时使染毒区的人员进行有序的疏散,从而减少可能的伤亡。

对 CWA 检测器,包括现有的大多数点采样检测器,我们已进行了多年的测试和评价工作。我们希望本书能够帮助普通民众及公共和私营部门的决策者了解检测有毒化合物的技术和方法。对能够导致死亡的或引起严重伤害的危险化合物,本书提供了它们的物理、化学和毒性信息,并重点介绍了检测的需求、讨论了美国政府的政策、讲解了各种用于检测 CWAs 和 TICs 的技术,同时总结了許多现有的检测仪器的特点。我们还介绍了蒸气的发生技术和用选择的检测仪器进行分析的方法,以便对有毒气体检测仪器进行有效的实验室评价。本书提供了很好的有毒气体检测的新资料,重点是关于 CWAs 的检测技术,而这些技术对 TICs 的检测也同样适用。

在本书中,我们力求尽可能多地为读者提供有关目前检测技术的有用资料,但由于时间和篇幅的限制,我们无法将目前已有的全部检测仪器和方法都包括在内。因此,有关的讨论只能限定在最常用的仪器和方法方面。然而,这样并不意味着美国政府(或任何其它政府)对这些仪器和方法的认可,也不意味着我们的肯定。

本书是在很多人的帮助下完成的。我们特别感激家人的理解和支持,也十分感谢许多评审者的意见和建议。

作者

作者简介

Yin Sun 博士 中国江苏省徐州人,在南京大学获得学士学位,在成都科技大学获得硕士学位,在(美国)康涅狄格大学获得博士学位,在分析化学、环境化学、应用化学和分析仪器领域从事研究工作近 20 年。在早期工作中,他就对像金和银这样的贵金属的地球化学行为很感兴趣。他的主要研究是通过对微量元素分布和化合物组成的分析来探测珍贵的矿藏。后转为环境问题,特别是重金属的污染问题成为他的研究重点,即用放射性同位素作示踪原子研究江河入海口中重金属的污染情况。在这期间,他用各种现代仪器进行了大量的研究工作,研究出了对他所用的示踪原子进行分析的新技术。

几年前,Yin Sun 开始关注对检测爆炸物和夹在各种材料中的违禁药品的分析方法的研究。随后,他花费了数年时间研究对工业有毒化合物(TICs)和化学战剂(CWAs)的监测。由于 CWAs 是被严格控制的,所以他将更多的时间用来在美国军方的埃奇伍德化学和生物中心(the U. S. Army Edgewood Chemical and Biological Center, ECBC)的实验室进行研究工作。在 ECBC(他的第二个家)工作期间,他结识了 Kwok Y. Ong。

Kwok Y. Ong 在洛杉矶加利福尼亚州立大学获得化学学士学位。就在大学毕业时他应征加入美军并被派到埃奇伍德兵工厂(美军的化学兵司令部),参加科学与工程计划的项目工作。他退伍后又作为文职人员继续留在那里,直到 2001 年 9 月从文职机构辞职。现在他与美国电子联合公司(EAI Corp)合作,继续为美国政府工作,重点开展 CWA 的检测和检测器的评价研究。

Ong 有极其丰富的工作经验。从美军的 M43 到现在的 ACADA 所有的点采样检测仪器,包括在美国国内反恐准备项目中筛选的美国和其它国家研制的检测仪器,他都做过大量的评价工作。他在蒸气发生和分析方法方面都有专利,而且他建立的方法已经成为工业上使用的标准。在有毒化合物检测领域,Ong 是很受人尊敬的专家。像在“Kwok 的实验室”一样,人们都愿意将自己的检测仪器在埃奇伍德化学和生物中心(ECBC)进行测试,因为 Ong 的推荐意见具有很高的权威性。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 化学战剂发展史	1
1.2 化学战剂	2
1.2.1 神经性毒剂	3
1.2.2 糜烂性毒剂	3
1.2.3 窒息性毒剂	3
1.2.4 血液性毒剂	3
1.2.5 其它类型的毒剂	4
1.3 工业有毒化合物	4
1.4 化学战剂和工业有毒化合物的检测	5
1.4.1 CWAs 和 TICs 检测的发展史	5
1.4.2 检测要求和检测器的研发	5
第二章 化学战剂和工业有毒化合物	9
2.1 CWAs 和 TICs 的物理、化学性质和毒理学性质	10
2.1.1 分子式	10
2.1.2 分子结构式	10
2.1.3 分子量	11
2.1.4 蒸气的相对密度	11
2.1.5 蒸气压	11
2.1.6 挥发度	12
2.1.7 浓度	13
2.2 CWAs 和 TICs 的毒性	13
2.2.1 IDLH 值	13
2.2.2 LCt ₅₀	14
2.2.3 TWA	15

2.2.4	其它术语	16
2.3	常用化学战剂	16
2.3.1	神经性毒剂	16
2.3.2	糜烂性毒剂	20
2.3.3	血液性毒剂	23
2.3.4	窒息性毒剂	25
2.3.5	其它 CWAs	26
2.4	工业有毒化合物	26
2.4.1	高危险等级的 TICs	27
2.4.2	中等危险等级的 TICs	29
2.4.3	低危险等级的 TICs	30
第三章	政府的政策和计划	32
3.1	化学战剂的检测标准和使用依据	33
3.1.1	低浓度暴露和作战的风险决策	33
3.1.2	在风险评估和研究中的不确定性	35
3.1.3	现有的和新提议的空气标准概要	36
3.1.4	推荐的评价检测器的化学毒剂浓度标准	38
3.2	化学战剂检测器的联合保障作战要求	40
3.3	达格韦试验场的试验目的和方法	42
3.3.1	同时发生两种毒剂蒸气的稳定浓度	42
3.3.2	同时发生两种毒剂蒸气的动态浓度	43
3.3.3	化学干扰物的表征	43
3.3.4	毒剂剂量的定量	43
3.3.5	危险级别的量化	43
3.3.6	数据的监测和记录	44
3.3.7	TICs 的定量	44
3.4	JCAD 的检测和鉴定功能要求	44
3.4.1	检测和鉴定	44
3.4.2	采样要求和其它问题	47
3.5	检测器的必备能力和改进	48
3.6	商业化检测器用作 CWA 检测器的试验评价和证明	49
3.6.1	相关背景	49
3.6.2	建议的试验方案	49

3.6.3	目的	50
3.6.4	一般试验协议的内容	50
3.6.5	稳定性和可靠性	56
3.6.6	相关说明	56
3.6.7	毒剂灵敏度的测试	57
3.6.8	检测器的测试	58
3.6.9	毒剂试验后仪器的回收	58
3.7	试验用过的器材归还合同商的风险评估	58
第四章	毒剂蒸气的发生技术	66
4.1	气体定律和气体浓度	67
4.1.1	摩尔、摩尔重量、摩尔体积和摩尔数	67
4.1.2	理想气体定律	68
4.1.3	蒸气浓度	68
4.2	毒剂蒸气的发生	71
4.2.1	蒸气发生方法	71
4.2.2	蒸气的稀释和混合系统	80
4.2.3	发生方法的比较	86
4.2.4	发生蒸气的增湿	89
4.3	CWA 或 TIC 与干扰气体的一起发生	91
4.4	CWA 模拟剂	94
第五章	检测器的性能要求	97
5.1	选择性	98
5.2	灵敏度	99
5.3	检测限	100
5.4	动态响应范围	100
5.5	定量分析性能	101
5.6	误报率和漏报率	101
5.7	响应时间	102
5.8	环境适应性	102
5.9	安装和预热时间	103
5.10	野外使用时的校准	103
5.11	其它性能	103

第六章	离子迁移谱	105
6.1	IMS 的工作原理	105
6.1.1	漂移	106
6.1.2	碰撞	107
6.1.3	扩散	107
6.1.4	检测	107
6.2	典型的 IMS 检测仪器	107
6.2.1	进样口	107
6.2.2	电离区	109
6.2.3	离子栅门	111
6.2.4	漂移管	111
6.2.5	离子收集极和信号处理器	112
6.3	技术特性	113
6.3.1	可检测的物质	113
6.3.2	选择性	113
6.3.3	灵敏度和检测限	114
6.3.4	动态响应范围和定量性能	114
6.3.5	环境适应性	115
6.3.6	其它性能	115
6.4	应用	116
6.5	部分 IMS 检测器的有关资料	118
第七章	火焰光度法	125
7.1	工作原理	126
7.2	FPD 检测仪器	129
7.2.1	直接进样和通过 GC 柱进样	129
7.2.2	氢火焰和氢气源	130
7.2.3	信号检测	131
7.3	技术性能	133
7.3.1	选择性	133
7.3.2	灵敏度和检测限	133
7.3.3	动态响应范围	133
7.3.4	定量分析性能	134

7.3.5	误报率	134
7.3.6	响应时间	134
7.3.7	其它性能	134
7.4	脉冲火焰光度法	135
7.5	应用	136
7.6	结论	138
7.7	基于光度测定原理的检测器的相关资料	138
第八章	红外光谱技术	141
8.1	工作原理	142
8.1.1	红外光源	142
8.1.2	分子的红外吸收	143
8.1.3	比尔定律	144
8.1.4	红外传感器	145
8.1.5	光声效应	146
8.2	红外滤光和光声检测器	147
8.2.1	IR 光源和波长的控制	147
8.2.2	样品池	148
8.2.3	光强度检测器	148
8.2.4	光声检测器	148
8.2.5	检测器的组成和工作方式	149
8.2.6	红外滤光和光声检测器的技术特性	150
8.3	傅里叶变换红外检测器	151
8.3.1	干涉仪	151
8.3.2	傅里叶变换	153
8.3.3	背景处理	154
8.3.4	CWA 和 TIC 的检测	154
8.4	远距离红外检测器	154
8.5	应用	154
8.6	基于 IR 光谱原理的检测器的相关资料	157
第九章	表面声波和电化学技术	162
9.1	SAW 检测器的工作原理	162
9.1.1	压电效应	163

9.1.2	表面声波	163
9.1.3	表面吸附作用	164
9.1.4	SAW 化学传感器	166
9.2	SAW 检测仪器	167
9.2.1	进样方式	167
9.2.2	SAW 传感器的结构	168
9.2.3	温度的影响和补偿	169
9.3	分析过程	170
9.4	技术性能	170
9.4.1	选择性	170
9.4.2	灵敏度、最低检测限和动态响应范围	170
9.4.3	响应时间	171
9.5	应用	172
9.6	电化学传感器	174
9.6.1	氧化—还原反应	174
9.6.2	电化学传感器	175
9.6.3	工作方式、灵敏度和选择性	176
9.7	SAW 和/或电化学检测器的有关资料	177
第十章	比色技术	181
10.1	工作原理	182
10.2	检测器	182
10.2.1	侦检徽章和侦检纸	183
10.2.2	侦检管	183
10.2.3	转带式比色法检测器	185
10.3	应用	187
10.4	比色法检测器的有关资料	189
第十一章	光致电离和火焰电离检测技术	192
11.1	光致电离技术	192
11.1.1	光致电离	193
11.1.2	电离源	194
11.1.3	离子的检测	194
11.1.4	光致电离检测器	195

11.1.5 技术特点	196
11.2 火焰电离技术	197
11.3 光致电离、火焰电离和火焰光度技术的比较	199
11.4 应用	200
11.5 光致电离和火焰电离检测器的有关资料	203
第十二章 CWA 和 TIC 检测技术的发展趋势	207
附录 A 化学品的材料安全数据表	213
附录 B 标准操作步骤	222
附录 C (国外)化学毒剂检测器的供应和制造商索引	228
附录 D 缩写和术语	230
参考文献	234

1.1 化学战剂发展史

自古以来人类就使用毒物对付敌人,捕猎鱼类和某些动物的历史,为了不同的目的可以将其从猎物中它们杀死。化学战剂(Chemical Warfare Agent, CWA)是以前是造成敌人人员伤亡或死亡的有毒性化合物。化学武器的毒害,最早是在战争时期有目的使用有毒化合物大规模地杀死敌人或使他们在丧失作战能力。在第一次世界大战(World War I, WWI)期间,德国用光气、氯气、芥子气和其它伤害呼吸系统的化学战剂都被使用过。例如,1915年4月22日,德军在战场上大规模地使用毒气导致了3000多盟军士兵的死亡。在WWI期间,因化学武器导致的伤亡总数估计在100万人左右,其中约40万人,约被杀90万人。

1925年的日内瓦国际会议上,许多国家投票反对使用化学武器,并签署了“在战争和冲突中使用窒息性、有毒的或其它气体和液体战手段的议定书”。然而,与战时时期不同,战前和战时敌方士兵的有毒化合物的研究活动仍在继续。第二次世界大战期间,德国人研究和储存了像塔崩和梭离这样的神经性毒剂,成千上万的盟军士兵受害甚至都是使用毒气是害的。

在第二次世界大战期间,日本帝国军队使用化学和生物武器杀死,伤了近10万人。日本投降前,但在1945年日本投降前,日本帝国化学战剂和大炮的毒剂被遗弃下来。这些日本战剂被盟军发现并不断造成伤亡。最后一战是在2000年

第一章 绪 论

大规模杀伤性武器 (Weapons of Mass Destruction, WMD) 是指能够造成巨大破坏和大量人员伤亡的武器。除了核武器, WMD 还包括化学、生物和放射性武器。化学武器的使用已有很长的历史, 而且全世界都一直在不断地发展这类武器。特别是近年来化学武器被用来攻击平民的事件时有发生。另外, 废弃的化学武器如果未做适当的处理也会造成无辜者的伤亡。为了减少可能的伤亡, 迫切需要灵敏可靠的检测器材对存在的化学毒剂进行预先报警。因此, 许多国家的政府都全力支持检测器技术的研究, 以构建性能更好的检测器系统。

1.1 化学战剂发展史

自古, 人类就有使用毒物对付昆虫、抓捕鱼类和其它动物的历史, 为了不同的目的可以使其失能或将它们杀死。化学战剂 (Chemical Warfare Agents, CWAs) 是可以迅速使敌人失能或致敌死亡的高毒性化合物。化学武器的部署, 就是为了在战争时期有目的地使用有毒化合物大规模地杀死敌人或使他们丧失作战能力。在第一次世界大战 (World War I, WWI) 期间, 催泪剂、光气、氯气、芥子气和其它伤害呼吸系统的化学毒剂都曾被使用过。例如, 1915 年 4 月 22 日, 德军在战场上大规模地使用氯气导致了 5000 多盟军士兵的死亡。在 WWI 期间, 因化学武器导致的伤亡总数估计在 100 万人左右, 其中死亡 10 万人, 伤残 90 万人。

1925 年的日内瓦国际会议上, 许多国家投票反对使用化学武器, 并签署了“在战争中禁止使用窒息性、有毒的或其它气体和细菌战手段的议定书”。然而, 与此同时用来杀死、致废和刺激敌方士兵的有毒化合物的研究活动却仍在继续进行。第二次世界大战期间, 德国人研究和储存了像塔崩和沙林这样的神经性毒剂, 成千上万的集中营受害者都是被用毒气杀害的。

在第二次世界大战期间, 日本帝国军队用化学和生物武器杀死、杀伤近 10 万人。日军投降时, 仅在中国估计就有 200 万发化学炮弹和大约 100t 毒剂被遗弃下来。这些日军遗弃的化学武器在不断地造成伤亡。最近一次是在 2003 年

8月4日,在中国东北,从一个日军遗弃的化学武器工厂泄漏的芥子气导致平民至少1人死亡,伤35人。从第二次世界大战至今,日军在华遗弃的化学武器已导致大约2千人死亡。

第二次世界大战后,化学武器的研究还在继续进行。1952年,英国科学家发现了一种比G类毒剂毒性更高的新的神经性毒剂,称之为VX。VX是一种含硫的有机磷化合物,其毒性远大于G类神经性毒剂。与G类毒剂相比,VX是一种挥发度极低(25°C 时为 $10.5\text{mg}/\text{m}^3$)的持久性毒剂。因为VX的毒性和持久性,它被认为是最危险的CWA。越战期间,美军使用的植物落叶剂据说被人员接触后也造成了死亡。化学武器造成伤亡的其它事件还有20世纪80年代两伊战争期间芥子气和神经性毒剂的使用。1988年,伊拉克军队用神经性毒剂镇压伊拉克平民,使大约5千人死亡。化学武器在最近也被恐怖分子用来对平民进行袭击。1995年,奥姆里真主教制造的东京地铁沙林事件导致10多人死亡,数千人受伤。鲜明的例子表明,即使是小规模地使用化学毒剂也会造成惨重的伤亡后果。

历史已经证明,使用化学毒剂(CWAs)已造成了大量的伤亡。为了减少化学攻击和意外化学事故造成的伤亡,让士兵和普通百姓了解CWAs的行为具有极为重要的意义。当化学袭击事件发生时,这些知识有助于缓解人们的焦虑并避免由此导致的恐慌和继发性的灾难。掌握这些知识的人就知道如何采取正确的防护措施和进行疏散,从而减少在毒剂中的暴露和避免染毒的扩散。

1.2 化学战剂

为了不同的目的研制的化学战剂(CWAs)也有不同的种类。有的是为了大量地杀死敌人,有的是为了使人丧失能力,也有的仅是为了进行骚扰。CWAs要求具有如下性能:

- (1) 高毒性;
- (2) 稳定性;
- (3) 容易进行大批量生产;
- (4) 能够在野外进行大量的布撒并生成足够高的浓度,以达到期望的效果;
- (5) 便于运输;
- (6) 对储存容器没有腐蚀性或腐蚀作用很小;
- (7) 能使敌人的防护装备的防护效能降到最低;
- (8) 其作用机理、防护措施和处理方法是已知的;
- (9) 在敌人身上产生生理或心理效应之前难以被检测到;