

舰艇舱室环境中的恶臭污染和优先控制策略

方晶晶¹, 刘虹², 陈少杰², 许林军¹, 徐新宏¹, 肖存杰¹

(1. 海军医学研究所, 上海 200433; 2. 海军司令部军训部, 北京 100841)

摘要: 介绍了恶臭物质对人体健康的影响, 分析了舰艇舱室内常见恶臭物质的分类、气味性质及来源, 比对了国内外恶臭污染控制的相关标准。通过分析恶臭污染物的检出频次、毒性效应、气味安全级别、综合分值和艇内危害等级等指标, 提出了舰艇舱室环境中24种恶臭物质的优先控制名单, 指出舰艇的通风设计和硬件设备改进对于控制恶臭污染也很重要。

关键词: 舰艇舱室; 恶臭污染; 优先控制; 气流组织

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2014)03-0011-05

Odor Pollutants in Ship Cabin and Priority Control Policy

FANG Jing-jing¹, LIU Hong², CHEN Shao-jie², XU Lin-jun¹, XU Xin-hong¹, XIAO Cun-jie¹

(1. Navy Medical Research Institute, Shanghai 200433, China; 2. Department of Military Training Headquarters of Navy, Beijing 100841, China)

Abstract: This paper introduced the health risk of odor pollutants to the crew, analyzed the category of the common odor substances in ship cabin, the nature and the source of these compounds as well. The domestic and foreign criteria related the odor control were also compared in this paper. Through the detection frequency, toxic effect, smell security level, the comprehensive scores and the hazard classes to the ship cabin, the list of 24 odor compounds for priority control in ship cabin was recommended. Moreover, the improvement of ventilation system and the hardware were very critical to control the odor pollution.

Key words: Ship cabin; Odor pollutant; Priority control; Air current

全封闭型水面舰艇舱室空间密闭, 艇上的卫生间和污水柜是艇内臭味物质释放的重要来源。这些臭味物质主要由粪便和污水中的有机物质分解产生, 如人体代谢物粪便产生吲哚、粪臭素等物质, 尿酸分解产生氨气; 污水中的有机物如胱氨酸或半胱氨酸分解产生硫化物和芳香烃。在一般情况下, 污水柜只接收洗漱产生的灰水, 水中含固率较低, 产生的气体量较少。在战备和紧急状态时, 艇内的餐厨垃圾等废弃物无法外排, 打成浆状排入污水柜中, 含有大量混合垃圾的污水在缺氧和厌氧环境下发酵, 会释放大量的含硫和含氮恶臭物质。

恶臭物质中除了氨、硫化氢等少数无机化合物外, 绝大多数是挥发性有机物。作为舱室空气污染的一种形式, 恶臭具有相等于空气污染物的一些特性, 如以空气作为传播介质, 通过呼吸系统对人体

产生影响等。同时, 恶臭又具有以人的嗅觉感知为判断标准的特殊性, 因而恶臭污染具有不同于其他污染的许多特性。恶臭会对人的嗅觉器官造成强烈刺激, 引起人的不愉快, 还可引起呼吸障碍、头痛、恶心、心血管病、神经功能减退等多种疾病。为了保障舰艇人员的身体健康和安全, 提高潜艇的续航能力, 必须采取重点恶臭污染物的优先控制策略, 从源头治理, 保证密闭舱室空间中始终有适宜的大气环境。基于该思路, 分析了舰艇舱室恶臭污染的主要物质和危害, 比对了国内外恶臭污染控制的相关标准, 提出了舰艇舱室环境中24种恶臭物

收稿日期: 2014-01-09; 修订日期: 2014-03-12

基金项目: 海军装备部基金资助项目(10A306)

作者简介: 方晶晶(1978—), 女, 湖北枝江人, 助理研究员, 博士, 主要从事舰船舱室空气品质调查、有害物质控制及舰船非金属材料毒性评价研究。

质的优先控制名单,对舰艇舱室空气品质控制和有害物质消除具有一定的参考价值。

1 舰艇舱室常见恶臭物质

舰艇舱室内仪器设备众多,空间较小,温度较高,加之大气与外界交换频率低、化学材料释放、人体代谢、垃圾分解腐烂和厨房烹调活动等因素,导致舱室内的恶臭物质与一般环境相比,成分更复杂,种类更繁多,污染物浓度虽然普遍较低,但复合污染程度比较严重。近几年来,我国从各型潜艇和水面舰艇舱室空气中检测出无机组分 44 种,有机组分 608 种,在有机气体中脂肪烃为主要物质,有 175 ~ 350 种,芳香烃 53 ~ 104 种,含氧化合物 37 ~ 104 种,卤代烃 14 ~ 27 种^[1-3]。这些恶臭物质的来源类型基本可以分为非生物型和生物型两种。非生物型来源的恶臭物质包括烷烃、芳香烃和卤代烃,多为污染源自身含有,如舰艇润滑油挥发、制冷剂泄露与油漆涂料释放,因温度变化和通风作用而自然挥发,受环境参数影响很大。生物型来源与有机物的代谢和分解密切相关,如有机酸、硫化物等,其浓度与污染源的微生物活性和稳定参数有显著的相关性^[4]。

从前期的检测研究发现,大部分恶臭污染物主要来源于人体的活动和新陈代谢,以及垃圾、粪便的分解和发酵。厨余垃圾中的蛋白质组分降解产生氨气和硫化氢;腐烂的蔬菜产生硫醇、二硫化碳、硫醚等;餐厨残渣中的鱼类、辛辣组分腐烂降解产生乙胺、三甲胺等胺类物质,这些物质在水中厌氧发酵前期还会产生大量的短链挥发性脂肪酸,如乙酸、丁酸、戊酸等。采集舰艇大气样品,分析发现部分嗅阈值低的气体如正丁醛、硫化氢、甲硫醚、二甲基二硫醚在舱室中反复检出^[5],其中硫化氢、二甲基二硫醚具有较高毒性。厕所检出了大量的氨、吲哚、粪臭素、腐胺;厨房等处检出了三甲胺、丙烯醛等;住舱、餐厅等人员活动密集的地方检出大量醇、醛、酮等含氧物质。人员的新陈代谢活动、生活垃圾的腐烂,以及食物储藏室、厨房和厕所散发的气

味,构成了潜艇舱室内生物型恶臭物质的主要来源。此外,艇内还存在一些特殊的非生物型来源恶臭物质,如非金属材料释放的气体、生命支持系统泄露的乙醇胺、致冷剂和灭火剂系统产生的微量卤代烃等^[6]。

恶臭污染往往不是单一组分,而是多种成分组成的复合臭。这种复合臭味并不是单个物质气味的简单叠加,而是各种气味相抵、相加、促进等多重作用结果的反应。对一种或几种污染组分进行恶臭评价,往往无法体现恶臭污染的真实程度。因此,对于恶臭的评价需要采用物质分析与感官嗅别相结合的方法,前者有助于恶臭的溯源,后者可真实地评判其影响程度。

2 恶臭物质对人体健康的影响

恶臭物质在高浓度和中、低浓度条件下,对人体健康的影响有较大差异。极大部分恶臭物质在高浓度时可引起人体的急性毒性反应,主要途径是直接刺激呼吸道或经刺激中枢神经再影响呼吸系统,轻则使人瞬时昏迷,重则因呼吸麻痹而致死。当恶臭物质浓度高于嗅阈值(OTV)而低于毒性阈值(TLV)时,虽然不会直接致病,但是会使人改变正常的行为方式和心理状态进而患病^[7]。此外,部分恶臭物质还有一定的致癌作用,不能排除有引起接触人群肿瘤发病率提高的可能。源于恶臭对人体健康的危害,加之其所具有的易为人群感知特性,恶臭尽管从总体上称不上舱室内最突出的环境问题,但会极大地影响艇员的生活质量。

常见恶臭物质的嗅阈值和毒性阈值见表 1。毒性阈值中 TLV - TWA 为美国工业卫生协会的 8 h 加权平均值,人员 8 h 暴露在低于该浓度的环境中不会引起不可逆的伤害;TLV - STEL 为短时间 15 min 的加权平均值,人员在该浓度下短间接接触该物质不会引起不可逆的伤害。由表 1 可见,除了苯,大部分恶臭物质的毒性阈值高于嗅阈值。

表 1 常见恶臭物质的嗅阈值和毒性阈值
Table 1 Odor and toxicity threshold value of some common odor compounds

恶臭物质	OTV ^[8]	TLV - TWA ^[9]	TLV - STEL ^[9]	TLV 制定依据
含硫化物				
硫化氢	0.000 57	13.9	20.9	对眼、呼吸系统及中枢神经刺激
甲硫醇	0.000 13	0.98		肝损伤
二甲基硫醚	0.006 4	25.4		上呼吸道刺激
二硫化碳	0.65	3.11		周围神经系统损害

续表

恶臭物质	OTV ^[8]	TLV – TWA ^[9]	TLV – STEL ^[9]	TLV 制定依据
二甲基二硫醚	0.000 62			
二甲基三硫醚	0.000 026			
芳香烃类				
苯	8.62	1.61	7.99	白血病
甲苯	1.24	188		上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
乙苯	0.74	434	543	上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
苯乙烯	0.15	85	170	上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
对二甲苯	0.25	434	651	上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
间二甲苯	0.18	434	651	上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
邻二甲苯	1.65	434	651	上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
羰基化合物				
丙酮	101	1 200	1 800	眼刺激、中枢神经系统损害
丁酮	148	590	885	上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
3 – 戊酮	246	700	1 050	周围神经病、睾丸损害
乙醛	0.027		45.1	上呼吸道刺激、眼刺激
正丁醛	0.002			
丙烯醛	0.008		0.23	肺水肿、肺气肿
醇类化合物				
甲醇	43.1	262	328	眼刺激、中枢神经系统损害
乙醇	0.99	1 881		上呼吸道刺激、中枢神经系统损害
正丁醇	0.114	60		眼刺激、上呼吸道刺激
3 – 戊醇	1.0	360	450	眼刺激、上呼吸道刺激
挥发性脂肪酸				
乙酸	0.015	24.6	36.9	眼刺激、上呼吸道刺激
丙酸	0.017	30.3	30.3	眼刺激、皮肤刺激、上呼吸道刺激
丁酸	0.006			
异丁酸	0.000 7			
正戊酸	0.000 155			
异戊酸	0.000 201			
含氮化合物				
氨	1.04	17.4	24.3	眼损害、上呼吸道刺激
甲胺	0.044	6.35	19.1	眼刺激、皮肤刺激、上呼吸道刺激
二甲胺	0.061	9.2	27.6	上呼吸道刺激、胃肠道损害
三甲胺	0.000 144	12.1	36.2	上呼吸道刺激
三乙胺	0.022 3	4.13	12.4	视觉损害
吲哚	0.001 44			
粪臭素	0.000 030 2			

3 舰艇舱室恶臭污染的控制策略

日本是亚洲最早进行恶臭污染控制与研究的国家。20 世纪 60 年代初, 畜禽养殖场、石油炼厂、纸浆厂等在日本各地大规模兴起, 随着城市扩张, 新建居民区距离此类工厂越来越近, 恶臭污染逐渐引起人们的关注, 恶臭投诉案件也逐年增加。20 世纪 60 年代后期, 日本开始开展恶臭管理对策研究。1971 年, 日本制订了《恶臭防止法》, 针对石油企业、化工企业、垃圾填埋场及畜禽饲养和加工企业, 规定了氨、甲硫醇、硫化氢、甲硫醚和三甲胺等 5 种恶臭物质的排放浓度限值, 该法规于 1972 年 6 月正式实施^[10]。在随后的 30 年, 《恶臭防止法》不断修订和完善, 共包含 22 种恶臭物质, 见表 2。《恶臭防止法》实施后, 日本恶臭投诉案件数量明显递减, 从 1972 年的 2.1 万件减少到 1993 年的

1 万件。中国的《恶臭污染物排放标准》(GB 14554 – 93) 与韩国的《大气和环境保护法》规定了 8 种恶臭物质的浓度限值(见表 2), 分别对应居民区、风景区和工业区^[11 – 13]。

中国军用舱室空气容许浓度相关标准^[14 – 16]中的部分指标也涉及恶臭气体, 见表 2。军用标准相对国家标准宽松得多, 主要是因为舰艇舱室空气的复杂程度更高, 气体指标控制难度更大。大部分有机恶臭气体与艇内一氧化碳、氯气、臭氧等无机化合物相比, 毒性相对较小, 因而在制定标准时未完全纳入。鉴于此, 在开展舰艇舱室恶臭污染控制研究时, 需要了解存在广泛、对人体健康影响较大、对舱室整体环境恶化有决定性作用的恶臭污染物, 以此为关键指标, 实施长期监测, 或列入标准限值并加大治理。

表 2 有关恶臭的部分标准限值比较
Table 2 The standards of odor pollutants

mg/m³
mg/m³

恶臭物质	国家标准			中国军用标准		
	日本 ^[10]	韩国 ^[11]	中国 ^[12]	水面舰艇 ^[14]	常规潜艇 ^[15]	核潜艇 ^[16]
氨	1~5	1~2	1~4	75	75	40
硫化氢	0.02~0.2	0.02~0.06	0.03~0.32	0.15	0.15	0.07
甲硫醇	0.001~0.002	0.002~0.004	0.004~0.02			0.2
甲硫醚	0.01~0.2	0.01~0.05	0.03~0.55			
二硫化碳			2~8		0.5	
二甲二硫	0.009~0.1	0.009~0.03	0.03~0.42			
三甲胺	0.005~0.07	0.005~0.02	0.05~0.45			
异丁醇	0.9~20					
丙酸	0.03~0.2					
正丁酸	0.001~0.006					
正戊酸	0.0009~0.004					
异戊酸	0.001~0.01					
苯乙烯	0.4~2	0.4~0.8	3~14	34		2
甲苯	10~60			30	40	10
二甲苯	1~5			25		10
乙酸乙酯	3~20					
甲基异丁酮	1~6					
乙醛	0.05~0.5	0.05~0.1		18		3
丙醛	0.05~0.5					
正丁醛	0.009~0.08					
异丁醛	0.02~0.2					
正戊醛	0.009~0.05					
异戊醛	0.003~0.01					

对于恶臭关键物质的控制,需要了解其对环境影响的大小,考虑多方面因素。首要因素是恶臭物质的嗅阈值,嗅阈值越低的物质对环境的影响越大。其次,蒸气压是判断污染物进入环境空气可能性和环境迁移的重要参数,蒸气压越大,污染物进入空气的可能性越大,对环境的影响也越大。此外,某些恶臭物质还具有较高的毒性效应。国外研究者以化合物的毒性阈值与嗅阈值之商作为气味安全倍数,划分了 A~E 共 5 个等级^[17],在某物质的毒性阈值,A 级别化合物有超过 90% 的人能感知,而 E 级别只有不到 10% 的人能鉴别。国内也有学者对恶臭污染物作优先控制筛选研究,选取蒸气压、嗅阈值、气味安全级别、检出频次、受关注程度、毒性效应等 6 个单项指标作为筛选参数,根据单项分值和权重系数综合评分,结合 10 类典型恶臭排放源,选出 30 种气体列入我国现阶段优先控制的恶臭污染物名单(见表 3)^[18]。

表 3 中有 15 种气体在中国军用舱室空气容许浓度相关标准中有限值规定,而二甲二硫、乙酸、丙酸、三甲胺等典型的生物型恶臭污染物则没有标准覆盖。20 世纪 90 年代,研究人员根据急性毒性、

急性中毒发病状况、慢性中毒患病状况、慢性中毒后果、致癌性和最高容许浓度等指标,对核潜艇空气中的 52 种组分进行了分级研究,将其分为极度危害、严重危害、中度危害和轻度危害共 4 级,其中也包含部分恶臭污染物^[19]。筛选舰艇舱室优先控制恶臭污染物也可以借鉴该方法,建立舰艇环境敏感指标评分系统,并结合不同舰型、不同服役年限的舰艇空气质量调查数据。通过上述研究及相关标准的比对,初步确定将硫化氢、甲硫醇、乙醛、二硫化碳、丙烯醛、二甲苯、氨、二甲二硫、苯乙烯、甲苯、乙苯、甲胺、氯苯、丙酸、甲醛、乙酸、三甲胺、丙酮、苯和苯胺等 20 种物质列入舰艇舱室环境优先控制名单。此外,吡啶、粪臭素、乙醇胺、丁酸等低嗅阈值的恶臭物质普遍存在且反复检出,也应列入该名单。

有效的气流组织形式和合理的工程设计对于改善舱室内的恶臭环境非常重要^[20-22],送(回)风口形式、位置、规格、数量,以及送(回)风风量、风速、温度等参数,直接影响着室内空调效果和人体舒适感觉。因此,应运用合理的数值方法计算通风房间的室内气流组织,优化气流流动参数、温度和

表 3 30 种优先控制恶臭污染物推荐名单及危害等级

Table 3 The list of 30 odor pollutants for priority control and classification

恶臭物质	气味安全级别 ^[17]	综合分值 ^[18]	艇内危害等级 ^{[19]①}
硫化氢 ^②	A	4.3	+++
甲硫醇 ^②	A	3.7	++
乙醛 ^②	A	3.6	+
二硫化碳 ^②	C	3.5	++
丙烯醛 ^②	C	3.45	+++
二甲苯 ^②	A	3.43	++
氨 ^②	C	3.4	+
苯酚	B	3.35	+
二甲二硫	B	3.3	++
乙硫醇	A	3.25	++
苯乙烯 ^②	A	3.24	++
甲苯 ^②	B	3.2	++
乙苯 ^②	B	3.2	++
甲胺 ^②	B	3.18	+
乙酸乙酯	B	3.16	++
氯苯 ^②	B	3.15	++
丙醛	A	3.1	+
间甲酚	A	3.08	+
戊醛	A	3.05	+
1,3-丁二烯	A	3.03	+
丙酸	A	3	++
丁醛	A	2.95	+
甲醛 ^②	D	2.9	+++
乙酸	A	2.87	++
三甲胺	A	2.85	+
三乙胺	A	2.85	+
丙酮 ^②	C	2.83	+
苯 ^②	D	2.8	++++
苯胺	D	2.78	++
异丁醇	A	2.75	+

① ++++表示极度危害, +++表示严重危害, ++表示中度危害, +表示轻度危害; ②在相关军用标准中有限值规定。

湍流场分布,通过评价不同形式的室内气流组织来研究人体舒适性和室内空气品质,以提出更合理的通风系统设计方法,更有效地控制恶臭污染物对空气质量的影响。

综上所述,舰艇舱室环境中的恶臭污染源广泛,组成复杂,对艇员影响较大。制定优先控制策略是目前较为可行的方法,除此之外,舰艇的通风设计和硬件设备改进对于控制恶臭污染也很重要。

【参考文献】

[1] 潘沪湘,陈茜,袁海霞,等. 某两类全封闭水面舰艇舱室空气质量调查与评价[J]. 海军医学杂志 2013, 34(2): 88-91.
 [2] 肖存杰,王腾蛟,刘洪林,等. 潜艇大气组分的研究[J]. 解放

军预防医学杂志 2003, 21(1): 16-19.
 [3] 李祥东,汪荣顺. 水下密闭空间生存环境的综合改善技术[J]. 舰船科学技术 2008, 30(6): 105-107.
 [4] 沈培明,陈正夫,张东平,等. 恶臭的评价与分析[M]. 北京: 化学工业出版社 2005.
 [5] 方晶晶,何艳兰,许林军,等. 舰艇舱室封闭环境中挥发性化合物分析[J]. 舰船科学技术 2013, 35(6): 90-94.
 [6] 陈根年. 潜艇人一机一环境系统工程的进展和展望[J]. 舰船科学技术 2001, 23(3): 3-7.
 [7] LANCET D. The complete human olfactory subgenome[J]. Genome Res. 2001, 11(5): 685-702.
 [8] NAGATA Y. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method[M]//Odor measurement review. Tokyo: Japan Ministry of the Environment 2003: 118-127.
 [9] 张敏,王丹,杜雯. ACGIH 有关化学因素的 TLVs[J]. 国外医学分册 2007, 34(1): 4-24.
 [10] 日本环境省. 日本恶臭防止法的规制基准[EB/OL]. [2011-11-30]. <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F03101000039.html>.
 [11] 包景岭,邵克华,王连生. 恶臭环境管理与污染控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社 2009: 115-117.
 [12] 国家环境保护局. GB 14554-93 恶臭污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
 [13] 杭维琦,薛光璞,尹卫萍. 浅议《恶臭污染物排放标准》的修订[J]. 环境监测管理与技术 2011, 23(5): 74-75.
 [14] 中国人民解放军总装备部. GJB 7497-2012 水面舰艇舱室空气组分容许浓度[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部 2012.
 [15] 国防科学技术工业委员会. GJB 11.3-91 常规动力潜艇舱室空气组分容许浓度[S]. 北京: 国家军用标准出版社, 1991.
 [16] 中国人民解放军总装备部. GJB 11B-2012 核潜艇舱室空气组分容许浓度[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部 2012.
 [17] AMOORE J E, HAUTALA E. Odor as an aid to chemical safety: Odor thresholds compared with threshold values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution[J]. Journal of Applied Toxicology, 1983, 3(6): 272-290.
 [18] 李伟芳. 国内恶臭污染物优先控制的筛选研究[J]. 上海环境科学 2012, 31(1): 1-4.
 [19] 郭丰涛,刘忠权,王腾蛟,等. 核潜艇有害气体危害程度的分级[J]. 上海预防医学杂志, 1995, 7(12): 535-538.
 [20] 潘毅群,龙惟定,范存养. 办公楼的室内空气品质与新风[J]. 暖通空调 2002(6): 28-30.
 [21] 蔡芬. 气流组织对室内空气品质影响的数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学 2005.
 [22] 曾燕君,苏行. 室内空气污染调查[J]. 环境监测管理与技术, 2001, 13(6): 15-17.

本栏目责任编辑 姚朝英