

深海之下，如何“自由呼吸”

——潜艇空气质量控制系统发展简史

■ 鲍 萍 张佳豪

探索期 从“一根伸向海面的 通气软管”起步

潜艇最早面临的挑战，并非如何隐蔽或攻击，而是最基础的生存需求：如何在水下呼吸？潜艇发展初期，空气保障的核心思路始终围绕“借气”与“造气”两大方向。

1801年，法国的“鸚鵡螺号”潜艇在布雷斯特港成功作沉一艘40吨重的单桅帆船，标志着海战新纪元的开始。这艘小型潜艇的各项性能指标可称得上“简陋”：潜深不到8米，潜航时间不超过5小时，依靠一根伸向海面的通气软管获取空气，同时携带压缩空气作为备用。

真正意义上的密闭循环探索始于19世纪中叶。1844年，法国“贝勒多纳号”潜艇尝试通过生石灰、氯酸钾的化学反应实现供气的自给自足，奠定了“制氧+除碳”的基本技术框架。19世纪中后期，美国“鳐鱼号”潜艇配备了最早的粗制净化装置，虽然简陋，却已具备空气净化与氧气制备的基本功能，成为潜艇空气净化系统的雏形。

这一阶段的空气管理技术，整体上高度依赖外部环境或简易化学反应，设备简陋、可靠性低，仅适用于短时潜航，却是潜艇人员实现深海呼吸过程中最艰难同时也是最坚实的一步。

进入20世纪，潜艇正式成为海军主力装备，潜航时间延长、人员编制增多，除氧气供应与二氧化碳清除问题外，密闭环境中的空气质量问题也日益严峻，在众多污染气体中，又以汽油蒸汽的危害最为棘手。1905年，英国的潜艇就曾因电火花引燃艇内浓度超标的汽油蒸汽而发生爆炸。一战期间，英国皇家海军在潜艇上放几只小白鼠，借助它们在汽油泄漏时的异常反应为艇员提供预警。然而，这种生物监测方式并不可靠。

二战期间，潜艇空气质量控制系统在实践中不断完善，除利用高压氧气瓶组提供氧气外，还在通风排气管路上安装氢氧化锂罐和活性炭罐，用于吸收二氧化碳及其他有害气体。

两次世界大战的实战需求，倒逼潜艇空气质量控制系统从“应急求生”转向“体系化防控”，将有毒气体监测与净化作为技术突破的重点。尽管此时的潜艇空气质量控制系统仍属于被动应对，技术水平有限，但已实现了功能模块化的雏形，为后续长期潜航技术的发展奠定了坚实基础。

成熟期 解决长期水下驻留 的核心难题

冷战期间，潜艇迈入核动力时代。



苏联2B9“矢车菊”82毫米自动迫击炮。资料图片

在世界火炮发展史上，有一款火炮以独特的设计理念打破了迫击炮延续数百年的传统形态，它便是苏联2B9“矢车菊”82毫米自动迫击炮。

20世纪60年代末，苏联陆军正面临一场火力支援的战术困局。传统迫击炮依靠人力装填、单发射击的模式，在应对遭遇战和需要瞬间火力压制的场景时，往往力不从心。大口径火炮虽然威力巨大，却因体积过大无法伴随步兵分队在第一线快速响应。

因此，苏联图拉兵工厂的设计师们



法国海军“凯旋”级战略核潜艇。

资料图片

核动力技术使潜艇摆脱了对水面充电的依赖，传统的氧气瓶供氧和一次性吸附剂除碳模式已无法满足核潜艇长期潜航需求，空气质量控制系统迎来了“生存保障”向“长期驻留”的革命性升级，并形成了“制氧—除碳—净污”三位一体的核心架构。

这一阶段的潜艇空气质量控制系统，成功解决了长期水下驻留的核心难题，使潜艇具备了连续数周甚至数月的水下续航能力，为执行远洋战略任务提供了坚实保障。

早期使用的氢氧化锂虽能有效吸收二氧化碳，但不可再生，长期潜航时需要大量储备，可再生利用的吸附除碳技术也在这一时期应运而生，它利用一乙醇胺溶液与二氧化碳在常温下能迅速结合，而在加热处理后又重新分解为一乙醇胺和二氧化碳的特性，实现二氧化碳的集中收集和吸附剂的反复利用。这大幅减少了吸附剂的消耗，成为长期潜航不可或缺的关键技术。

潜艇舱室内的有害气体来源复杂，包括设备运行产生的一氧化碳、氢气，涂装挥发、炊事活动产生的有

机物等，这些气体在密闭舱室中长期积累会严重危害艇员身体健康。面对这一问题，催化燃烧技术应运而生，特别是以铂系催化剂为核心的新型催化燃烧装置，因在潜艇高温环境下能够运行稳定、能耗较低，得以在各国潜艇广泛应用。

这一阶段的潜艇空气质量控制系统，成功解决了长期水下驻留的核心难题，使潜艇具备了连续数周甚至数月的水下续航能力，为执行远洋战略任务提供了坚实保障。

前沿期 从“被动净化”全面 转向“源头控制”

进入21世纪，随着对人因工程和作战效能研究的不断深入，各国逐渐认识到：舱室空气质量不仅关乎艇员的基本生存，更直接影响他们的决策能力、反应速度和士气。相应地，研发理念也从“被动净化”全面转向“源头控制”，力求让舱内空气无限接近自然环境，为艇员打造舒适、健康的工作和生活空间。

传统电解水制氧装置存在体积大、能耗高、腐蚀性强、噪音大等弊端，为了

控制系统运行的稳定性……

空气质量控制系统的技术跃迁，不但意味着艇员将拥有更好的生存保障，也是提升潜艇战斗力的一项关键所在。回望潜艇200多年发展历程，空气质量控制系统如何演变至今？未来还将朝着什么方向发展？本期，我们一探究竟。

未来展望 在深海如同在陆地般 “自由呼吸”

未来的潜艇空气质量控制系统，将不再是孤立设备的简单堆砌，而是朝着智能化、集成化、绿色化的方向全面发展，让艇员在深海拥有如同在陆地般“自由呼吸”的体验。

智能化技术的发展，让潜艇空气质量控制从“被动响应”转化为“主动预判”。借助大数据分析、人工智能等先进技术，未来的潜艇空气质量控制系统将具备精准预判和主动调控能力。系统将实时收集艇员活动强度、设备运行状态、环境参数等多源数据，运用深度学习算法建立精确的空气质量预测模型，提前洞察潜在的污染风险。例如，根据官兵的训练计划和日常活动安排，自动调节制氧设备的产氧量，确保氧气供应始终与人员需求精准匹配；针对厨房油烟排放、设备舱有害气体泄漏等不同舱室的污染源特点，精准启动相应的净化装置，实现对污染的源头防控和精准治理。通过这种“主动控制”模式，彻底摆脱传统“被动响应”的局限，为艇员创造一个始终清新、健康的呼吸环境。

为满足不同吨位、不同任务类型潜艇的多样化需求，同时提高系统的可靠性和可维护性，未来的潜艇空气质量控制系统可将制氧、净化、监测等功能设备进一步整合为高度集成的小型化模块。在潜艇建造或升级时，根据实际需求灵活选择和组合不同模块，实现快速安装和调试；当设备出现故障时，直接更换对应的功能模块，而无需对整个系统进行大规模拆解，大幅缩短维修时间。

随着环保理念和可持续发展要求的不断深入，未来潜艇空气质量控制系统将更加注有害气体“转化”而非单纯的“清除”，从而实现从废气到资源的闭环循环。如通过开发先进的催化转化技术和资源回收工艺，将二氧化碳转化为甲烷、甲醇等燃料或其他化工原料的同时，回收其中蕴含的能量，为潜艇的设备运行提供额外的能源支持；协同处理舱内废水和废气，实现水资源与空气资源的联动循环。这种绿色发展模式，不仅能显著减少潜艇对外部资源的依赖，降低运营成本，还能有效减少污染物排放，为保护海洋环境做出积极贡献。

潜艇空气质量控制系统的发展史，是一部从满足基本生存需求逐步迈向追求极致作战效能的进化史。未来，随着材料科学、能源技术、信息技术等多学科的深度融合创新，潜艇舱内的空气将无限接近自然环境，这座钢铁堡垒也将成为官兵们更加舒心值守的“水下家园”。

（作者单位：海军工程大学）

太行深处响惊雷

杨家庄兵工厂

■ 王艺桐 陈龙

几经勘察，杨家庄村凭借隐蔽险要的地形、进退自如的区位，加之深厚的群众基础，成为建厂首选。次年初，杨家庄炸弹厂正式投产，20余名老红军为骨干力量，杨锡禄担任厂长，太行深山的兵工火种就此点燃。

“看似寻常最奇崛，成如容易却艰辛。”炸弹厂初创，没有冶炼设备，就以作坊式土法生产，风火炉熔铁、大铁锤锻打；没有电力驱动，就靠人力运转石磨盘带动车床；没有制式钢材，就靠死偷袭击交运线拆运铁轨；没有雷管火具，就从战场捡拾未爆炸弹，拆解回收炸药……每一份原料、每一道工序、每一件武器，都凝结着杨家庄兵工工人的血汗与赤诚。

当时，兵工厂没有专门的厂房，车间就设在老百姓的石头房里，全村60多处院落，几乎每一处都变成了生产车间，甚至不少村民主动搬至后山暂住，腾出自家房屋用于兵工生产。不仅如此，乡亲们主动捐出家中废铁、铜元、制钱，乃至铜锅、铜香炉、铜水壶等器皿，全力保障生产。

凭着这股军民团结、自力更生、百折不挠的精神，杨家庄炸弹厂在战火中扎根，成为太行深处打不烂、炸不毁的军工堡垒。据资料记载，全面抗战期间，各抗日根据地地军工直属厂共生产手榴弹450余万枚，为八路军、新四军及民兵作战提供了坚实支撑。

1939年6月，八路军军工部成立后，将“杨家庄炸弹厂”正式更名为“杨家庄兵工厂”，并入位于武乡境内的柳沟铁厂。从此，杨家庄成为军工部三所驻地的一部分，在生产手榴弹、地雷的同时，开始了50毫米小炮和炮弹的生产，为抗战的火力再添新利器。

1946年，因战略调整，杨家庄兵工厂人员、设备逐步分流，这里的兵工厂种逐渐转移到其他地方。

如今，杨家庄兵工厂曾经的机器轰鸣和叮当锻打声已渐渐消散在岁月深处，但留存至今的兵工厂旧址与斑驳老物件仍在向后人诉说：在那个山河破碎、民族危亡的年代，有这样一群人、这样一座小村庄，挺身而出，以械卫国，用热血与坚守撑起了敌后抗战的兵工脊梁。



杨家庄兵工厂旧址。资料图片

苏联2B9“矢车菊”自动迫击炮—— 倾泻“弹雨”的战场利器

■ 史 双

接到了一个看似“异想天开”的任务：设计一种兼具迫击炮弹道特性和高射速的新型火炮。这一理念的源头来自二战时期的“波波斯”冲锋枪——能否让迫击炮像冲锋枪一样，在极短时间内向敌人倾泻“弹雨”？

苏军当时正大力推进“摩托化”改革，要求所有装备都必须适应高速度、高强度的突击作战。传统迫击炮已难以满足“纵深”作战理论对瞬时火力密度的极致追求。2B9自动迫击炮的诞生，正是对这种需求最直接的回应。

2B9自动迫击炮的研发始于1967年，代号“矢车菊”项目。传统迫击炮依靠炮弹自重下滑击发，而自动射击需要

强制装填和抽壳，这对只能承受低压的迫击炮而言技术难度极高。早期样炮的自动机故障频发，供弹机构卡壳、炮管过热变形等问题困扰了团队整整3年。

1970年，设计师瓦西里·格拉西莫夫大胆引入了后坐作用式自动原理，将整个炮管作为活动部件，利用发射后坐力驱动自动机完成循环。这一设计借鉴了航空机炮的思路，但在体积和重量上进行了极限压缩。同时，团队创新性地采用了4发弹匣供弹，既保证了爆发火力，又将机械复杂度控制在可接受范围。

2B9自动迫击炮的理论射速高达每分钟100至120发，4发弹匣可在数秒内

倾泻完毕，对压制暴露的步兵集群、摧毁临时工事具有奇效。更令人意想不到的是，该炮射界宽阔，既可大仰角曲射打击反斜面目标，又能放平炮管进行直瞄射击，在巷战中直射火力点。这种“平曲两用”的灵活性，在当时的迫击炮家族中绝无仅有。

但是高射速带来的剧烈震动，使其连发精度远逊于传统迫击炮，在持续射击时，炮管升温极快，连续发射百余发后即需冷却，持续作战能力大打折扣。600多公斤的战斗全重使得该炮远重于同口径的传统迫击炮，只能依托车辆进行搭载和牵引。此外，复杂的自动机结构对战场维护提出了更高要求，远不如传统滑膛迫击炮“皮实耐用”。正是这

些“硬伤”，使其在苏军内部始终毁誉参半。一些炮兵军官嘲讽它是“浪费炮弹的玩具”，而一线步兵却对其爆发火力赞不绝口。

2B9自动迫击炮是世界范围内第一款真正实现自动连发的中口径迫击炮，也是苏联军工“暴力美学”的典型代表。它并不完美，甚至充满争议，但它用最直接的方式回答了一项战场基本命题——如何在最短时间内向敌人投射最大的火力，它持续启发着后来者对陆战火力的思考。