

doi: 10.7690/bgzdh.2024.02.003

## 4D 打印技术在舰炮武器装备维修保障中的应用

杜永强<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 郑坚<sup>2</sup>

(1. 海军大连舰艇学院导弹与舰炮系, 辽宁 大连 116001; 2. 陆军工程大学石家庄校区火炮工程系, 石家庄 050000)

**摘要:** 为适应未来信息化作战的需要, 优化舰炮武器装备的维修保障工作, 探讨 4D 打印技术在全寿命周期维修保障中的应用。将舰炮武器装备的维修保障提前至论证决策阶段, 并贯穿全寿命周期, 分析 4D 打印技术原理, 梳理维修保障的关键问题, 以期拓展信息化作战条件下舰炮武器装备的维修保障工作思路。结果表明, 4D 打印技术为相关研制部门和一线作战使用单位提供参考依据。

**关键词:** 4D 打印技术; 舰炮; 全寿命周期; 维修保障

**中图分类号:** TJ391 **文献标志码:** A

### Application of 4D Printing Technology in Maintenance Support of Naval Gun Weapon Equipment

Du Yongqiang<sup>1</sup>, Wang Lei<sup>1</sup>, Zheng Jian<sup>2</sup>

(1. Department of Missile and Naval Gun, Dalian Naval Academy, Dalian 116001, China;

2. Department of Artillery Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of future information warfare and optimize the maintenance and support work of naval gun weapon equipment, the application of 4D printing technology in life cycle maintenance and support is discussed. The maintenance support of naval gun weapon equipment is advanced to the stage of demonstration and decision-making, and through the whole life cycle, the principle of 4D printing technology is analyzed, and the key issues of maintenance support are sorted out, in order to expand the maintenance support ideas of naval gun weapon equipment under the condition of information warfare. The results show that 4D printing technology can provide reference for relevant development departments and front-line combat units.

**Keywords:** 4D printing technology; naval gun; life cycle; maintenance support

## 0 引言

4D 打印技术是在 3D 打印技术的基础上发展而来, 起初被简单定义为“3D+时间”, 认为通过 3D 打印技术获得的结构可以随着时间发生变化<sup>[1-2]</sup>。随着对 4D 打印技术的深入研究, 其时间维度的概念被重新定义, 而 4D 打印技术也被全面理解为: 3D 打印的结构在受到外部环境刺激(如水、热、光、电、磁等)下, 其形状、性能和功能等发生有目的的演变<sup>[3]</sup>。

相比于 3D 打印技术, 4D 打印技术主要采用智能材料, 能够实现自适应、自组装和自修复<sup>[4-6]</sup>, 因而 4D 打印技术的概念一经提出, 就受到国内外各领域研究人员的追捧, 尤其在军事装备研制和维修保障领域表现出巨大的应用潜力<sup>[7-9]</sup>。舰炮武器装备作为重要的海上作战力量, 其健康状态是充分发挥作战效能的重要保证。从立项研制到型号废止的全寿命周期内, 舰炮武器装备会经历多因素耦合的影

响, 为有效进行装备维修保障工作带来了挑战。4D 打印技术所采用的智能材料, 不但具有在不同外界激励下发生形变或性变的驱动功能, 而且还具备感知温度、应力应变、裂纹等传感功能<sup>[10-11]</sup>, 这也是 4D 打印产品能够实现自适应、自组装和自修复的前提。4D 打印产品的驱动和传感功能为舰炮武器装备全寿命周期的维修保障工作提供了可行性手段。

笔者在分析 4D 打印技术原理的基础上, 结合舰炮武器装备的全寿命周期, 梳理维修保障的关键问题, 探讨 4D 打印技术在全寿命周期维修保障中的应用, 为未来信息化作战条件下的装备维修保障提供拓展思路。

## 1 4D 打印技术原理

4D 打印技术以 3D 打印技术为基础, 融合智能材料、外部环境刺激作用机制以及数学建模<sup>[12-13]</sup>, 能够实现自组装、自适应和自修复。

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-11-20

第一作者: 杜永强(1991—), 男, 江苏人, 博士。

### 1.1 3D 打印融合智能材料

与 3D 打印技术仅能设计获得静态的打印结构不同, 4D 打印技术是在将 3D 打印技术与智能材料融合, 从而生产出形状、功能可变的动态结构。在整个 4D 打印过程中, 3D 打印技术是基础, 同时 4D 打印的产品可以不直接呈现最终状态, 而是由 4D 打印技术研制出半成品, 进而发挥 4D 打印智能材料自组装自适应的特点, 通过拓扑优化最终成型<sup>[14]</sup>。

### 1.2 动态结构依赖环境刺激作用机制

4D 打印技术采用的智能材料与外界环境刺激之间具有特定的作用机制, 通过响应外界环境刺激, 从而实现 4D 打印产品形状、结构、功能等方面的动态变化。外界环境刺激即 4D 打印技术的第 4 维度, 由最开始单一的时间维度逐渐拓展为温度、湿度、应力、应变、pH 值、酸碱度等<sup>[15]</sup>。为实现 4D 打印产品能够按照设计要求进行动态变化, 就需要根据智能材料与环境刺激的作用机制, 按照逻辑关系和顺序施加外界环境刺激, 或是适应可能遇到的外界环境刺激情况, 改变 4D 打印产品的结构设计<sup>[16]</sup>。

### 1.3 数学建模实现精准预测

无论是 3D 打印技术还是 4D 打印技术, 都需要建立打印产品的数学模型。4D 打印技术建立的数学模型, 除了实现最终的产品设计形状、结构、功能外, 还需要结合 4D 打印产品自适应、自组装、自修复的特点, 综合考虑外部环境刺激特点、结构动态变化的合理性和可行性, 精准预测和实现产品形状、结构、功能的理想变化<sup>[17]</sup>。

## 2 全寿命周期维修保障的关键问题

舰炮武器装备的维修保障不仅仅是在出现故障或定期维护时进行, 在 21 世纪 50 年代, 以美国为首的西方军事强国就已经将维修保障工作提前到武器装备研制阶段, 并贯穿于武器装备的全寿命周期。对于舰炮武器装备而言, 其全寿命周期主要包括论证决策、工程研制、生产运用、维修保障、退役处理等阶段<sup>[18]</sup>, 为更好地进行舰炮武器装备维修保障工作, 在各阶段需要重点关注的关键问题如下:

#### 1) 论证决策阶段。

论证决策方案的合理性、可行性、经济性、先进性等会直接影响舰炮武器装备的维修保障工作。在论证决策阶段, 经过反复迭代验证, 攻关解决影响舰炮武器装备研制的关键技术手段, 决策出切实可行的技术途径, 从根本上减小舰炮武器装备发生

故障的概率。同时, 为紧前开展维修保障工作, 要确定舰炮武器装备的薄弱环节, 同步进行故障研判, 基于不同故障形式制定维修保障措施。

#### 2) 工程研制阶段。

工程研制阶段是全面验证论证决策方案、暴露舰炮武器装备未来维修保障重点问题的重要依据。这一阶段研制的试验样机在试验环境下, 将理论上的维修保障重点落实到实际试验结果上, 为全面生产运用阶段舰炮武器装备的维修保障工作提供试验基础。

#### 3) 生产运用阶段。

在这个阶段舰炮武器装备批量生产, 并在实际使用过程中检验武器装备的可靠性, 是产生维修保障问题的主要阶段。除了监测舰炮武器装备的薄弱部位, 定期进行维护保障, 还需要综合考虑战场环境的多因素耦合影响, 收集一线使用单位反馈意见, 拓展维修保障工作的开展内容和形式。

#### 4) 维修保障阶段。

维修保障阶段是舰炮武器装备保障的主要阶段, 针对可能出现及已经出现的装备故障进行维修保障工作, 探索战场快速抢修及低成本保障方法; 同时, 基于战场多因素耦合环境, 提出改型设计方案, 立足装备发展和实战需求对舰炮武器进行升级改造。

#### 5) 退役处理阶段。

若舰炮武器装备无法满足性能指标就有可能面临退役处理。退役的舰炮武器装备可进一步作为维修保障的研究载体, 并用于制定可定量描述的失效判据。同时, 舰炮武器装备退出现役后可进行回收处理, 用于新型号舰炮武器装备的保障工作中。

## 3 4D 打印技术在维修保障中的应用

4D 打印技术颠覆了武器装备“研制—部署—使用—报废”的传统流程, 使之进一步优化为“半成品研制—部署—自适应塑造—使用—回收—再部署”。在舰炮武器装备全寿命周期中应用 4D 打印技术, 其维修保障工作也将产生根本性变革, 并促进未来信息化战争向低成本、智能化、快速化发展。

### 3.1 论证决策阶段一定量模拟, 主动研判

4D 打印技术所采用的智能材料, 也被称为可编程材料<sup>[19-20]</sup>, 其形状、结构、功能的改变可以通过数学建模实现, 而论证决策方案的合理性、可行性、经济性、先进性能够借助数学模型验证<sup>[1,16,21]</sup>。在

论证决策阶段，重点关注战场环境多因素耦合产生的刺激作用，使基于4D打印技术的舰炮武器装备能够根据战场环境自适应塑造。同时，在数学建模过程中，可以定量模拟和研判舰炮武器装备的薄弱点、故障类型和维修保障周期，例如：对于舰炮武器自动机中可能出现的故障，传统的做法是根据故障统计规律，开展定期维护以及出现故障后的事后维修保障，这就使得故障点预估不足以及维修保障不及时，尤其是在战场环境下维修保障进程受阻会直接影响战局。通过4D打印技术采用的数学建模方法，在论证决策阶段能够定量模拟舰炮武器装备的薄弱点，预估可能出现故障的形势和周期，并确定维修保障的方法措施，由被动转为主动，从源头统筹舰炮武器装备的维修保障工作。

### 3.2 工程研制阶段—一体制造，拓扑优化

4D打印技术的应用将彻底改变舰炮武器装备的工程研制流程。传统的工程研制阶段环节相对复杂，研制周期较长，通常包括初样、正样和试验验证3部分，研制过程中要严格按照论证决策方案进行。而4D打印技术简化了工程研制环节，能够实现材料合成—结构设计—功能需求的一体化制造。与传统工程研制最大的不同，就是4D打印技术并不需要直接研制出完整的舰炮武器装备，而是打印出舰炮武器装备的半成品，当部署到实际作战地域，舰炮武器装备的半成品能够在自适应作战环境下进行自组装，因而只要掌握了数学模型的编程方法，各生产部件之间的结合将不再依赖于人力物力实现。同时由于舰炮武器装备的作战环境会发生变化，相同的舰炮武器装备结构，其容易发生的故障问题不同，需要进行维修保障的内容和方式也有所区别，这就进一步体现出4D打印舰炮武器装备自适应、自组装的优势。4D打印结构与拓扑优化<sup>[22-23]</sup>相结合，能够在不同战场环境下获得最优的结构性能，从而大大降低发生故障的概率，减轻了维修保障工作的难度。

### 3.3 生产运用阶段—灵活机动，动态调整

相比于传统舰炮武器装备生产方式，运用4D打印技术，能够简化生产流程，批量生产舰炮武器装备的半成品，进一步提高了装备生产效率。同时，将舰炮武器装备由生产单位运输到指定地域也是装备保障中的一大难题，通常武器装备质量大、体积大、不便于长途机动，在运输过程中也可能发生损

伤，加大了装备维修保障工作的难度。而4D打印的舰炮武器装备半成品，能够制造成可折叠形状，质量、体积均优于传统制造方式，即使在远程机动过程中也能够减小发生损坏的概率。运输到不同作战地域后的舰炮武器装备，能够自适应作战环境特点塑造组装，从而更好地发挥作战效能。另外，当前信息化战争条件下战场环境多变，传统方式生产的舰炮武器装备结构、设计参数相对固定，有可能出现无法适应新环境特点而丧失作战能力的情况。4D打印生产的舰炮武器装备，在实际运用过程中可以快速适应战场环境的变化，并针对目标特点优化结构和相关参数，实现动态调整，在多变的信息化战争条件下保持高水平作战能力。

### 3.4 维修保障阶段—精确感知，自主修复

战场环境下舰炮武器装备的故障情况很难精确预测，通常采用冗余备份的方法，即提前准备好舰炮武器装备的零部件，当发生故障或损伤时进行更换<sup>[24-25]</sup>。这种维修保障方式相对被动，会产生由于备份不足导致维修保障不及时以及备份过量致使保障压力过大的问题。4D打印技术借助智能材料的感知功能，能够精确感知温湿度变化、应力应变的改变、裂纹的产生等，使舰炮武器装备本身就能够完成自检和研判，从而及时进行自修复，避免了故障预测不准确或维修保障不及时影响舰炮武器装备的作战使用。4D打印产品的自修复功能也为舰炮武器装备维修保障提供了变革性的新思路。

舰炮武器装备维修保障工作的另一项重要内容就是改型升级。传统舰炮武器装备的改型升级环节相对复杂，牵扯到改型升级方案论证、研制环节组织分工、模型修正甚至重建、制造设备优化等，冗长的过程导致舰炮武器装备改型升级的周期变长、进程变慢。4D打印技术的运用将大大缩短改型升级的周期，软硬件的紧密结合实现舰炮武器装备的一体化改型升级制造，使军事装备上的改革创新迅速应用于典型装备，促进舰炮武器装备的更新换代，也更有利于在信息化战场上发挥先进武器装备的作战优势。

### 3.5 退役处理阶段—回收再研，节约成本

4D打印的舰炮武器装备退出现役后，可结合其在役期间自组装、自适应和自修复的情况，进一步研究装备失效判据，细化数学建模方案，优化智能材料合成，全面提升舰炮武器装备维修保障工作。

另外, 4D 打印技术采用的智能材料仍能够回收利用, 重新编程建模再部署<sup>[26]</sup>, 投入到新的武器装备中, 这种循环利用的方式能够极大地节约研制成本。

#### 4 结束语

4D 打印技术作为一种新兴技术手段在军事装备维修保障领域表现出巨大的应用潜力。笔者将舰炮武器装备的维修保障工作提前至论证决策阶段, 结合 4D 打印材料的驱动功能、传感功能以及自适应、自组装、自修复的特点, 探讨了 4D 打印技术在舰炮武器装备全寿命周期维修保障中的应用, 为未来信息化战场上的装备维修保障工作拓展了思路。目前, 在舰炮武器装备维修保障中应用 4D 打印技术还处于起步阶段, 其适用的智能材料、完整的环境刺激作用机制以及数学模型尚需进行深入理论研究和实践探索。下一步, 需要根据舰炮装备维修保障工作, 选择适用的智能材料, 构建完备的环境刺激作用机制信息库, 同时借助计算机技术搭建细化数学模型, 以期实现 4D 打印技术在舰炮装备维修保障领域的快速应用。一旦 4D 打印技术广泛应用于舰炮武器装备维修保障中, 将从根本上改变装备研制和维修保障态势, 甚至对未来信息化战争产生颠覆性影响。

#### 参考文献:

- [1] MOMENI F, MEHDI S M, HASSANI N, et al. A review of 4D printing[J]. *Materials & Design*, 2017, 122: 42-79.
- [2] 印祝宸, 李强云, 高望. 基于 3D 打印的智能化装备保障体系[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(12): 10-12.
- [3] 赵先锋, 汤朋飞, 史红艳. 4D 打印复合软材料力学性能预测研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(6): 1651-1668.
- [4] 王群. 4D 打印及其军事应用前景[J]. *国防科技*, 2016, 37(4): 36-39.
- [5] ZHOU Y, HUANG W M, KANG S F, et al. From 3D to 4D printing: approaches and typical applications[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(10): 4281-4288.
- [6] KUANG X, CHEN K, DUNN C K, et al. 3D printing of highly stretchable, shape-memory, and self-healing elastomer toward novel 4D printing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10: 7381-7388.
- [7] 张文毓. 4D 打印技术的研究与应用[J]. *船舶物资与市场*, 2016(3): 56-60.
- [8] ZHANG W, ZHANG F, LAN X, et al. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed textile functional composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 160: 224-230.
- [9] KHOO Z X, TEOH J E M, LIU Y, et al. 3D printing of smart materials: a review on recent progresses in 4D printing[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015, 10(3): 103-122.
- [10] LI X, LI X, SHANG J, et al. Intelligent materials: a review of applications in 4D printing[J]. *Assembly Automation*, 2017, 37(2): 170-185.
- [11] 王亚男, 王芳辉, 汪中明, 等. 4D 打印的研究进展及应用展望[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 70-76.
- [12] 张雨萌, 李洁, 夏进军, 等. 4D 打印技术: 工艺、材料及应用[J]. *材料导报*, 2021, 35(1): 01212-01223.
- [13] 毛羽忻, 毋立芳, 邱健康, 等. 面向 3D 打印的模型优化研究综述[J]. *兵工自动化*, 2017, 36(8): 27-32.
- [14] POTY M, LUMAY G, VANDEWALLE N. Customizing mesoscale self-assembly with three-dimensional printing[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16: 141-151.
- [15] MENG H, LI G. A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites[J]. *Polymer*, 2013, 54: 2199-2221.
- [16] GLADMAN A S, MATSUMOTO E A, NUZZO R G, et al. Biomimetic 4D printing[J]. *Natural Materials*, 2016, 15(4): 413-418.
- [17] 刘灏, 何慧, 贾云超, 等. 4D 打印技术的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(7): 175-181.
- [18] 王满林, 王鹏. 舰炮武器装备综合保障数据管理[J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(7): 98-101.
- [19] 李涤尘, 刘佳煜, 王延杰, 等. 4D 打印—智能材料的增材制造技术[J]. *机电工程技术*, 2014, 43(5): 1-9.
- [20] 苏亚东, 王向明, 吴斌, 等. 4D 打印技术在航空飞行器研制中的应用潜力[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 59-69.
- [21] 沈自才, 夏彦, 丁义刚, 等. 4D 打印及其关键技术[J]. *材料工程*, 2019, 47(11): 11-18.
- [22] LIU S T, LI Q H, LIU J H, et al. A realization method for transforming a topology optimization design into additive manufacturing structures[J]. *Engineering*, 2018(4): 277-285.
- [23] WANG K, HO C C, ZHANG C, et al. A review on the 3D printing of functional structures for medical phantoms and regenerated tissue and organ application[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 653-662.
- [24] 陈淳辉. 刍议 3D 打印技术在舰船装备维修保障中的应用[J]. *现代制造技术与装备*, 2015(1): 46, 60.
- [25] 王鑫, 彭绍雄, 卜亚军. 基于 3D 打印的备件保障系统可用度模型[J]. *兵工自动化*, 2016, 35(2): 17-21.
- [26] LEE A Y, AN J, CHUA C K. Two-way 4D printing: a review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials [J]. *Engineering*, 2017(3): 663-674.