

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.005

3D 打印应用于装备角度调节器的快速抢修

温凯华^{1,2}, 孔 辉^{1,2}, 李 欣^{1,2}, 王 立^{1,2}, 王柄锐^{1,2}, 高兴隆^{1,2}

(1. 中国人民解放军 77680 部队, 西藏 山南 856100;

2. 中国人民解放军国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 3D 打印技术在复杂零件制造方面具有传统制造技术难以比拟的独特优势, 且在战场装备抢修领域的成功应用为该领域提供了技术支持。围绕新型战争形态和作战样式下的装备维修保障体系发展目标, 论述了 3D 打印技术在构建新型装备保障体系方面的重要作用。以某型装备的角度调节器为研究对象, 分析其结构特点和功能特性, 并对其进行结构优化。结果表明, 在实战背景下该 3D 打印技术应用于战场抢修具备可行性。

关键词: 3D 打印; 战场抢修; 角度调节器

中图分类号: E246 **文献标志码:** A

Application of 3D Printing to Rapid Repair of Equipment Angle Adjuster

Wen Kaihua^{1,2}, Kong Hui^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Wang Li^{1,2}, Wang Bingrui^{1,2}, Gao Xinglong^{1,2}

(1. No. 77680 Unit of PLA, Shannan 856100, China; 2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: 3D printing technology has unique advantages over traditional manufacturing technology in the manufacturing of complex parts, and its successful application in the field of battlefield equipment repair provides technical support for this field. Based on the development goal of equipment maintenance support system under the new form of war and combat mode, the important role of 3D printing technology in the construction of new equipment support system is discussed. Taking the angle regulator of a certain type of equipment as the research object, its structural characteristics and functional characteristics are analyzed, and its structure is optimized. The results show that the 3D printing technology has feasibility applied to battlefield repair under the background of actual combat.

Keywords: 3D printing; battlefield repair; angle adjuster

0 引言

3D 打印技术, 又称为“快速成型技术”, 是一种基于材料堆积法的高新制造技术。该技术利用计算机将成形零件的 3D 模型切成一系列一定厚度的“薄片”, 然后 3D 打印设备自下而上地制造出每一层“薄片”, 最终将这些层叠加成形成 3 维的实体零件^[1]。与传统的刀具或模具不同, 这种制造技术可以实现传统工艺难以或无法加工的复杂结构的制造, 并且可以有效地简化生产工序, 缩短制造周期^[2]; 因此, 3D 打印技术在装备维修领域具有广泛的应用前景。

目前, 我国的 3D 打印技术还处于初期发展阶段, 与 3D 打印技术发展最为领先的美国还有一定的差距, 但得益于国内大批科研机构 and 工业部门积极投身研发队伍, 有力地推动了 3D 打印技术在我国的发展, 取得了丰硕的运用成果。王华明^[3]所带领的科研团队, 凭借“飞机钛合金大型复杂整体构件激光成型技术”获得“2012 年度国家技术发明一

等奖”, 并且以该技术打印出的钛合金零部件将很可能大规模应用于我军第四代战斗机上; 2015 年, 在“补给行动—2015”军需物资油料保障演练现场, 西部战区某部使用集成在装备保障车上的 3D 打印机现场打印制作出联轴器, 大大提高了装备保障效率^[4]; 2016 年, 军事交通学院在某次演习行动中, 利用 Softsmart-40 s 型打印机打印出的低压油管成功修复了车辆装备的油箱出油管^[5]。

笔者以某型装备的角度调节器为例, 研究如何在新型战争形态和作战样式下, 利用 3D 打印技术提升保障效率, 并探索易损易耗零件的新式保障体系。通过本案例, 更好地论证了 3D 打印技术在战场装备抢修领域中的应用前景, 以及如何通过技术创新提高保障能力。

1 新型战争形态和作战样式下装备维修保障体系发展目标

当前以及未来一段时间, 我军装备维修保障发

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-20

第一作者: 温凯华(1999—), 男, 河南人。

展应确立以下战略目标：实现装备维修保障由机械化向信息化转型，综合性形成一体化、可视化、快反化、精确化的装备维修保障体系，为打赢高端信息化局部战争奠定坚实基础^[6]。通过构建起易损易耗零件模型数据库，并结合起 3D 打印技术，可以为战场抢修提供更加合理的解决方案(如图 1 所示)，从而为战场装备抢修开辟巨大的设计空间，满足“需要即获取，损伤即修复”的精确保障需求^[7]，这些都与装备维修保障发展的战略目标相适应。

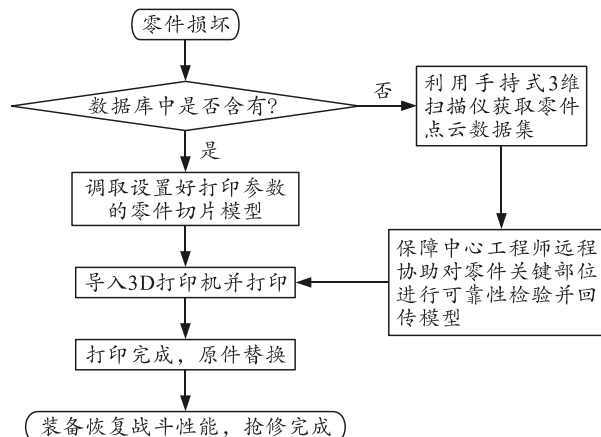


图 1 基于 3D 打印技术的战场装备抢修流程

1) 一体化。在 3D 打印技术的支持下，信息化局部战争中的战场空间相对模糊的挑战可以得到缓解。通过构建易损易耗零件的 3D 模型数据库，可以将松散的零件实体模型转换为紧密、整体和综合的状态，实现装备维修保障同作战一体化联动。这种方法不仅可以提高装备维修保障的效益，还可以减少维修成本和时间。

2) 可视化。利用 3D 打印技术，可以将各种自动识别技术、虚拟现实技术、现代通信技术、数据库以及计算机辅助决策技术等整合在一起，将复杂的零件数据集转换为基层官兵容易理解和接受的 3D 模型、图像等形式，并提供易操作的交互手段。这样可以建立一个客观可信的装备零件 3D 打印数据库，为战时装备维修保障的分析、决策和评估提供支持。

3) 快反化。在利用 3D 打印技术进行装备维修保障的过程中，快速感知维修保障需求并迅速做出反应是至关重要的。为此，需要广泛开展易损易耗零件的调研，并将其建模并收录于 3D 打印数据库中，以此增加零件数据库的广度和深度。同时，还需要对基层官兵进行基本 3D 建模方法的培训，以充分利用 3D 打印技术进行快反化的装备维修保障，确保在战时能够让损坏和故障装备得到快速修复，

提高装备维修保障效率和效益。

4) 精确化。利用 3D 打印技术进行装备维修保障可以实现对装备精确化维修保障。最终目的是在恰当的时间、恰当的地方，为恰当的对象，提供恰当的维修保障。为此，需要通过最大限度地优化配置和节约保障资源，建立高效的保障网络和庞大的保障数据库，实现对任何地点、任何时间的作战部队提供精确的维修保障。同时，通过 3D 打印技术制造维修零部件，可以实现品种项目精巧和质量精巧的要求，提高装备维修保障的效率和精度。

2 角度调节器的 3D 打印抢修方案

通过实际调研发现：由于操作者施加外力过大或调节器长期使用老化，使得角度调节器把手处出现断裂、变形等情况，进而影响其调节效果，如图 2 所示。针对此问题，本方案一方面对其保障思路、3 维模型建立、打印材料、打印设备及打印参数进行设计；另一方面拟通过结构优化的方法使其稳定性增强。



图 2 角度调节器

2.1 保障思路

该角度调节器具有可拆卸的特点，一旦受损就会失去功能。因此，可采用原件替换的方法，即对损坏的调节器进行更换，以恢复装备的性能。在平时，可以对该调节器建立 3 维模型并导出，以备战时使用。这种方法可以将“有形”的备件转化为“无形”的数字备件，从而实现更高效的保障。同时，数字备件还可以通过网络进行传输和共享，进一步提高保障效率。

2.2 角度调节器 3 维模型建立

充分发挥 3D 打印技术模型参数修改的优势，对角度调节器关键部位进行建模，并采用“由局部到整体”的检验方法，提升保障效率。

1) 关键部位模型设计检验功能。角度调节器的功能主要依靠其内部 24 个齿轮与装备齿轮连接，从

而实现啮合传动,以达到角度调节的效果,如图 3 所示。可以通过局部建模的方式对含齿轮啮合部分工件进行打印,以达到检验关键性能的目标。这种方法不仅能够有效缩短打印时间(从 1 h 36 min 缩短到 42 min),还能够节省材料(从 6.47 m 减少到 3.52 m)。同时,对该零件的关键性能也能够进行准确把握。这种方法不仅可以提高生产效率和降低成本,而且可以为装备维护提供更为精准的技术支持。

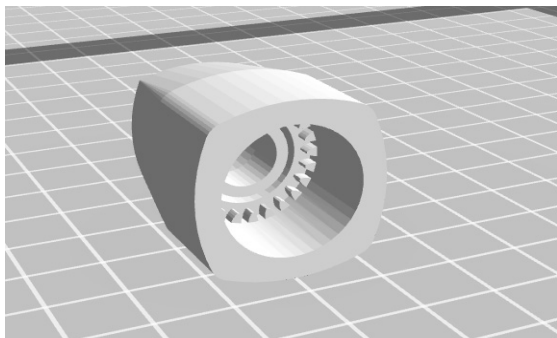


图 3 含齿轮啮合结构部分

2) 模型结构优化增加耐用性。为了优化把手的结构,需要采取 3 个步骤:① 根据实物建立 1:1 的数字模型;② 根据现实情况对把手连接部位的横截面积进行调整;③ 通过 SolidWorks 中的“拔模”操作对把手长度和接口的截面积合理设计。这样可以使把手的结构更加优化,提高其强度和耐用性,如图 4-5 所示。这种方法可以有效地提高产品的质量和可靠性,同时也能够降低维护成本和故障率。

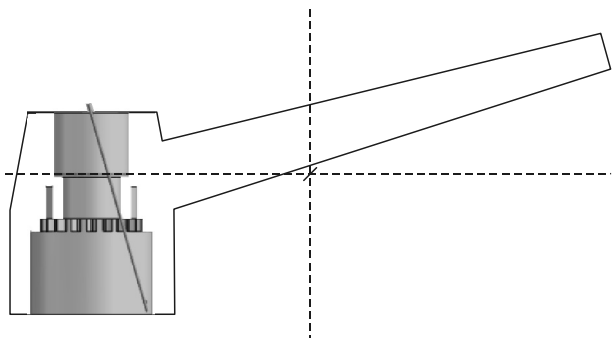


图 4 优化前的角度调节器剖面

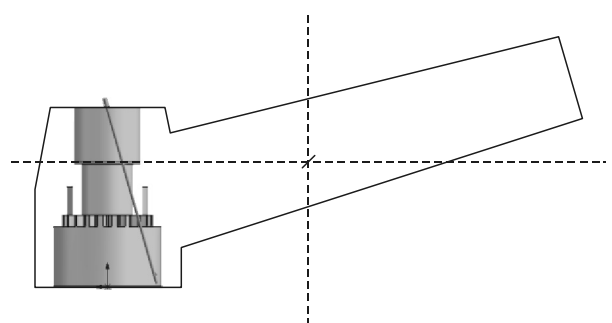


图 5 优化后的角度调节器剖面

3) 基于 STL 数据模型的切片。STL 模型是一种用一系列小三角形平面逼近自由曲面的方法,从而近似表示原 SolidWorks 模型的文件格式。它被广泛应用于从 SolidWorks 系统到 3D 打印系统的数据交换中。在将 STL 模型导入到 3D 打印软件中之后,可以进行切片处理。在这个过程中,选择的是 Flash Print 软件进行切片,其流程如图 6 所示。这种方法可以有效地将 3D 模型转换为可打印的文件,并且可以进行一系列的后续处理,如支撑结构的添加、打印参数的调整等。这样可以提高打印质量和效率,同时也能够降低打印成本和时间。

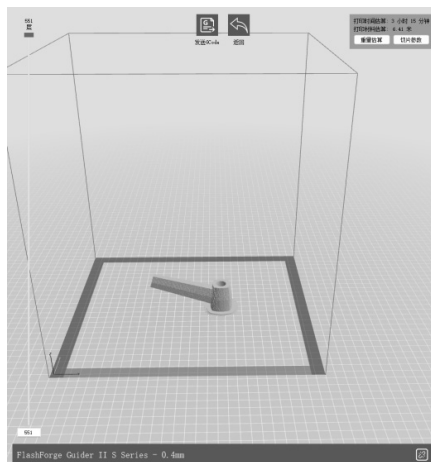


图 6 分层切片过程

2.3 打印材料选取

打印材料的选取取决于制件的工作环境和操作手的具体使用感受。综合考虑复杂的战场环境,为确保角度调节器性能稳定,制备角度调节器的材料须具有耐高温、耐腐蚀、耐冲击等特点,且制件应具有便携、易于操作等特点。综合考虑以上因素后,选择相容性好、可降解性优、热稳定性高、机械性能好且制件光泽度、透明度、拉伸强度和可扩展性优异^[8]的 PLA 生物塑料作为 3D 打印抢修耗材。

2.4 打印设备选取

PLA 材料通常作为熔融沉积成型技术(fused deposition modeling, FDM)的打印耗材。该技术下的成型件具有较高的强度和精度,同时材料环保而且价格低廉,制造成本相对较低。由于打印设备体积小且易于集成,适用于战场环境下的装备抢修。为此,选择了 FlashForge Guider II S Series 型 3D 打印机作为打印设备。该设备具有高效的打印速度和出色的打印质量,可以满足我们的需求。其规格参数如表 1 所示。

表 1 FlashForge Guider II S Series 型 3D 打印机规格参数

结构性能	规格参数
技术类型	熔融沉积成型 (FDM)
打印层厚/mm	0.05~0.4
最大打印尺寸/mm ³	280×250×300 (长×宽×高)
耗材类型	PLA、ABS、TPU、PETG
运动轴速度/(mm/s)	最高 200
喷嘴口径/mm	0.4
连接方式	U 盘、WiFi

2.5 成型方向以及打印参数设置

采用 FDM 成型技术打印出的制件需要进行后期处理，如去除支撑等。对于该角度调节器的关键部分，其内部含有 24 个尺寸较小的齿轮；因此，提升打印精度、减小阶梯效应、提高制件表面质量显得尤为重要。这将确保齿轮的尺寸和位置精度得到保证，从而保证该部件的性能和可靠性。

1) 减小阶梯效应。以 FlashForge Guider II S Series 型打印机打印高度 1 mm 斜面为例，打印机参数设置中有 4 种精度选项，分别对应着 0.25、0.20、0.15 和 0.10 mm 4 种不同的分层厚度。在标准精度和超精细精度的情况下，打印效果如图 7 和 8 所示。然而，成型方向对阶梯效应也有一定的影响。

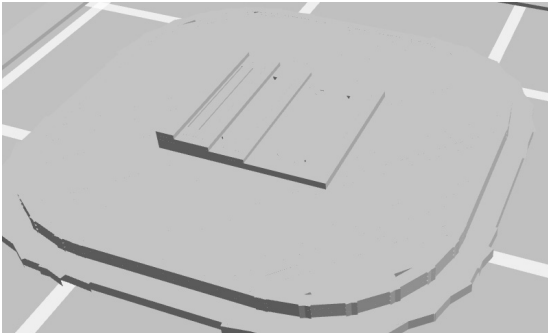


图 7 标准精度下的阶梯效应影响

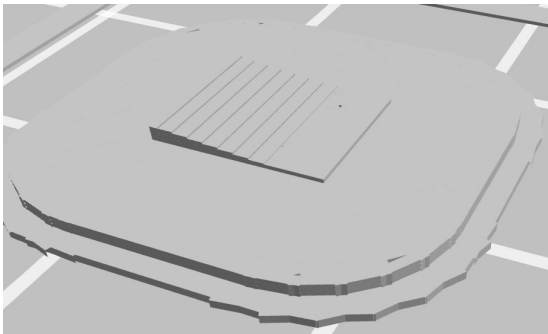


图 8 超精细精度下的阶梯效应影响

如图 9 所示，当将斜面沿 Y 轴顺时针旋转 90° 后，使用标准精度进行打印。可以明显看出：斜面表面的梯度效应有所改善，并且对阶梯效应的消除效果明显优于超精细精度下的制件。

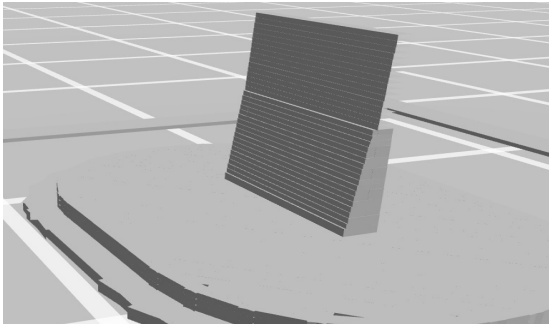


图 9 旋转后的制件打印浏览效果

应采用超精细精度，并选择图 10 所示的成型方向进行打印，以获得最佳效果。

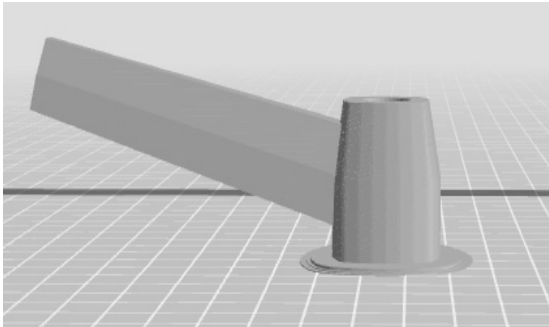


图 10 制件成型方向及超精细精度下打印预览

2) 其他打印参数设置。为保证 PLA 材料保持较好的流动性，选择打印温度为 210 ℃。将填充率设置为 100%，以保证角度调节器拉伸强度。

3 角度调节器 3D 打印试验

3.1 试验背景

在一次演练中，由于长期使用角度调节器而老化，把手处发生断裂，无法正常发挥功能。这导致装备展开受限，需要立即进行抢修。

3.2 试验过程

1) 提取数据库中已存储的角度调节器 3 维立体模型，这是一个非常重要的步骤，能够节省大量的 3D 建模时间。

2) 利用 FlashForge Guider II S Series 型 3D 打印机实施打印，该打印机具有高精度、高速度、高效率等特点，是保证打印成品质量的关键之一，其具体规格参数见表 1。

3) 将打印成品去除支撑，并处理其表面毛刺，以此提升零件的光滑程度和美观性。

4) 将处理好的角度调节器进行安装，确保齿轮啮合紧密，这是保证角度调节器稳定性和可靠性的重要步骤，而后检验实际使用效果。如图 11 所示。

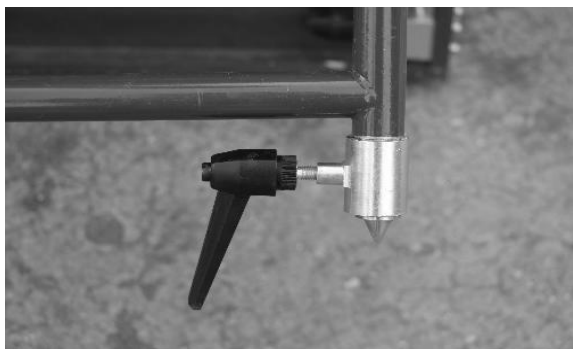


图 11 角度调节器实装检验效果

5) 对角度调节器进行实装检验, 确保其能够实现角度调节功能, 满足实战需求。

3.3 试验结果分析

经过检验, 优化后的角度调节器稳定性得到了增强, 使用寿命也得到了提升, 能够长时间使用而无需更换。其次, 保障时间也得到了缩短, 原本需要几天时间的原厂发件, 现在可以在现场打印制作, 时间缩短到了几个小时, 大大提高了保障效率。最后, 在演习的战场环境下, 成功完成了本次保障任务, 这表明利用 3D 打印设备保障易损易耗零件是可行的, 并为新型作战样式下的创新装备保障方法提供了新思路。

4 3D 打印技术在未来战场装备维修的应用前景

利用 3D 打印技术对易损易耗零件进行战场抢修与未来新型战争形态和作战样式相适应, 主要表现为:

1) 零件类别复杂性。在“平战结合”思维的引导下, 在充分发挥 3D 打印技术的灵活性、快速性、经济性的基础之上, 可以将 3 维扫描技术引入装备维修流程, 这能够大大缩短易损易耗零件的建模时间, 从而加速损伤装备的“再生”速度。通过在平时广泛调研, 深入基层, 对各类装备易损易耗零件进行扫描建模, 一方面实现了从“实体模型”到“数字模型”的转变, 另一方面对这些零件模型办理“电子身份证”并录入数据库统一管理, 最终实现化有形为无形的目的, 从而为备件保障模式下的后勤保障工作减轻压力, 实现“随用随打印”的目标。

2) 战场状况突发性。现代战争特别是信息化战争呈现出许多新的特点, 战场环境瞬息万变, 维修保障点位呈现多而散的趋势^[9], 相应地对装备维修保障也提出了新的更高的要求。若将 3D 打印机集

成于装备车上, 在战时即可实现“自助式保障”。通过培训基层官兵使用 3 维扫描仪和 3D 打印机, 一方面可以在装备零件受损时, 调取数据库中的零件模型打印, 从而更换原件使装备恢复战斗性能; 另一方面也可以现场对受伤零件扫描建模, 如图 12 所示, 通过集成于装备车上的 3D 打印机快速打印, 从而实现战场快速抢修的目标。

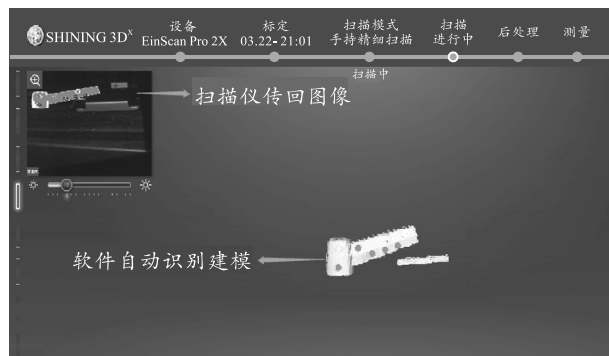


图 12 手持式扫描仪反向建模软件界面

3) 备件保障局限性。多数零件损坏多因使用时间过长、环境因素造成零件锈蚀, 加之操作手经验不足等因素。而传统的备件保障模式下只能能够对零件进行单纯替换, 却不能从零件本身结构出发, 对零件进行优化^[10]。因此, 基于 3D 打印技术的自由性, 笔者可以在建模阶段对零件结构进行优化, 在打印参数设置方面对零件的材料、填充率等进行优化。

5 结束语

笔者以某型装备角度调节器为研究对象, 采用 FDM 成型技术, 在预先设计保障方案的基础上, 有效开展了实战化背景下的利用 3D 打印技术保障易损易耗零件的试验。这一试验进一步论证了 3D 打印技术应用于装备战场抢修的可行性。相较于传统机械加工方式, 3D 打印技术具有更高的灵活性和适应性, 未来基层官兵只需要接受 3 维建模软件的培训, 就能够在战场上完成战损零件的修复。这将大大提高装备的战场抢修效率, 是未来战场装备抢修的重要发展趋势^[11]。

参考文献:

- [1] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122-128.
- [2] 杨德建. 大型复杂金属零件 3D 打印技术及研究进展[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 8-12.
- [3] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013(3): 5-7.

[4] 欧阳治民. 3D 打印提升装备野战抢修效率[N]. 解放军报, 2015-08-12.

[5] 封会娟, 杨明, 唐彦峰, 等. 3D 打印应用于车辆低压管路的抢修设计与试验[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(12): 39-42.

[6] 袁晓静, 苏勋家, 侯根良. 装备损伤与维修技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

[7] 王鑫. 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.

[8] 刘梦梦, 朱晓冬. 3D 打印成型工艺及材料应用研究进展[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(4): 197-202.

[9] 郭继周, 吴集, 邓启文. 3D 打印技术对装备维修保障的影响与对策[J]. 装备学院学报, 2016, 27(2): 22-25.

[10] 叶冬森, 沈培良, 张大川, 等. 3D 打印技术与传统加工技术对比的优缺点[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(4): 126-130.

[11] 訾飞跃, 李坡, 张志雄. 3D 打印技术与装备快速维修保障[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(4): 106-110.

(上接第 4 页)

表 3 主要预置气孔规格及数量

工况	拟预置气孔规格/mm	计划试验样本数量	实际获得试验数量
1	5	10	9
2	8	10	8
3	10	10	8
4	11	10	9
5	12	10	10

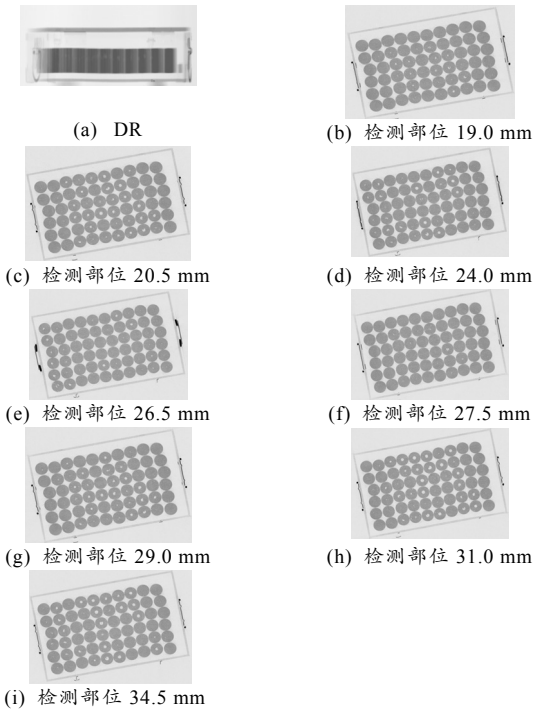


图 11 装药药柱 CT 检测结果

综合分析以上数据, 可得如下:

- 1) 考虑 CT 图片测试误差, 药柱内部气孔尺寸设计规格与实际气孔规格相当, 可近似为相同。
- 2) 预置气孔疵病位置通常处于药柱的中上部。

3 结束语

笔者提出了采用注射器注入气体的方法预置熔

铸装药药柱气孔疵病, 成功进行了熔铸装药药柱气孔疵病的预置, 可为弹药战斗部熔铸装药抗过载性能正向设计提供基础支撑。

表 4 装药药柱气孔疵病尺寸实测结果 mm

序号	设计尺寸	距离药柱底部缺陷投影尺寸实际测量结果						
		20.5	24	26.5	27.5	29	31	34.5
1	5	—	—	—	—	—	4	5
2	5	—	—	—	4	—	5	5
3	5	—	—	—	—	—	5	6
4	5	—	—	—	—	—	4	5
5	8	7	8	—	—	—	—	—
6	8	—	7	8	6	—	—	—
7	8	5	7	—	—	—	—	—
8	8	5	8	5	—	—	—	—
9	8	—	8	6	6	—	—	—
10	10	—	4	8	10	8	4	—
11	10	—	—	—	7	9	10	8
12	10	—	5	8	10	5	—	—
13	10	—	—	9	10	8	6	—
14	10	—	8	9	10	10	9	—
15	11	8	10	—	—	—	—	—
16	11	8	11	—	—	—	—	—
17	11	8	11	11	10	—	—	—
18	11	—	10	11	10	7	—	—
19	11	6	10	—	—	—	—	—
20	12	—	10	11	10	8	6	—
21	12	—	10	11	9	—	—	—
22	12	10	11	10	5	—	—	—
23	12	—	—	—	10	11	8	—
24	12	—	4	10	11	10	4	—

参考文献:

[1] 胡菲, 刘玉存, 袁俊明, 等. 炸药熔铸装药成型质量监测技术研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(9): 1-6.

[2] 易茂光, 张明明, 冉靖, 等. 弹药熔铸装药水浴护理凝固控制技术[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 14-18.

[3] 花成, 黄明, 黄辉, 等. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷表征与冲击波敏感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 152-156.

[4] 陈国光, 董素荣. 弹药制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004, 10: 321-322.

[5] 温世武, 姚兰英. 装药学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2008: 46-47.