

doi: 10.7690/bgzd.2015.06.015

# 含能材料 3D 打印技术及应用现状研究

朱 珠<sup>1</sup>, 雷 林<sup>1</sup>, 罗向东<sup>2</sup>, 秦回升<sup>3</sup>

(1. 中国兵器工业第五八研究所弹药中心, 四川 绵阳 621000; 2. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010;  
3. 重庆长江电工工业集团有限公司市场部, 重庆 401336)

**摘要:** 针对我国爆炸元件、精密微小型火工产品制造工艺落后等问题, 对国内外军工领域采用含能材料 3D 打印技术制造先进武器的现状进行对比分析, 得出含能材料 3D 打印技术得到成功实现需要突破的 3 个关键技术: 专用含能材料筛选/含能材料制造快速成型, 以及含能材料制造系统集成技术。分析结果表明: 采用含能材料 3D 打印制造先进武器能够解决固有装药成型工艺周期过长, 装填密度不均匀和药条接触不可靠等方面的问题。

**关键词:** 含能材料; 3D 打印; 现状

**中图分类号:** TJ410.5 **文献标志码:** A

## Research on Application of 3D Printing Technology of Energetic Materials

Zhu Zhu<sup>1</sup>, Lei Lin<sup>1</sup>, Luo Xiangdong<sup>2</sup>, Qin Huisheng<sup>3</sup>

(1. Ammunition Center, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industry, Mianyang 621000, China;  
2. College of Information Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China;  
3. Market Department, Chongqing Changjiang Electrical Appliances Industries Group Co., Ltd., Chongqing 401336, China)

**Abstract:** Aiming at problems like poor manufacturing of explosion elements and sophisticated and miniature explosive products in China, make comparative analysis on producing advanced weapons through 3D printing technologies of China and overseas in military industries. It is concluded that 3 key technologies play important role in 3D printing of energetic materials: special energetic material selection, rapid forming in energetic material manufacturing, and system integration of energetic material manufacturing. Result shows adopting 3D printing of energetic material can solve natural problems like redundant charging forming cycle, uneven loading density and unstable bar contact in advanced weapon manufacturing.

**Keywords:** energetic materials; 3D printing; status

## 0 引言

3D 打印是一种以数字模型文件为基础, 运用可粘合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的快速成型技术。该技术一开始应用于工业领域的模具制造, 后用于产品的直接制造。近些年伴随数字技术的飞速发展, 3D 打印又在建筑、医疗、汽车、电子甚至食品、美容、珠宝等领域风生水起, 被誉为“21 世纪最具潜力的技术”。

而在军事领域, 3D 打印使用最多的, 仍是在军备保障方面, 如制造武器装备的复杂配件、伪装防护器材、医疗部件和救护用具等, 部分零部件或配件已实现小批量生产, 美国甚至开始着手研究打印物可进行自我修复或随周围环境变化的 4D 打印技术, 以便更好地满足个性化、智能化、轻便化的武器装备需求。此外, 以美国为首的拥有先进武器制造技术的国家, 也在不遗余力地研究 3D 打印在含能材料, 如双基推进剂、发射药、包覆材料等领域的应用。试想一下, 将传统的自动称量和成型技术相结合, 克服含能材料起爆点温湿度、环境安全等

方面的限制, 将粉末进行粘结, 或使材料具有流动性, 完成打印并进行自动化的注装, 必将更好地解决当前我国爆炸元件、精密微小型火工产品制造工艺落后、产品质量不稳定、生产效率低、材料利用率极低的局面, 从而更好地满足高新弹药对起爆、传爆准确性和可靠性的精确需求。基于此, 笔者对含能材料 3D 打印技术及应用现状进行研究。

## 1 含能材料 3D 打印应用的必要性和可行性

### 1.1 必要性分析

目前战斗部装药主要采用压装和注装 2 种方式。多年来国内外在这 2 种装药方式上实施了大量研究, 军事发达的国家已实现上述 2 种装药方式的自动化与数字化, 显著提高了生产的安全性与生产的效率, 产品质量的一致性也有了极大提升, 然而受限于固有的装药原理, 为保证装药质量, 一些装药环节耗费时间长, 过程繁杂, 控制因素较多, 部分复杂异型产品仍存在一定的疵病率。而随着制造快速成型技术的不断发展与成熟, 由于其广泛的材料适应性

收稿日期: 2015-03-17; 修回日期: 2015-04-22

作者简介: 朱 珠(1981—), 女, 四川人, 工程师, 从事项目管理和情报编译方面的研究。

以及其特殊的成型原理, 具备固化时间短、瑕疵率极低、精度高、密度一致性好、低耗材的特点, 为战斗部药柱的直接快速成型以及将装药直接写入战斗部提供了一个可供研究的技术解决途径, 也为我国在战斗部装药领域晋升国际领先地位提供了宝贵的平台。

除此之外, 当前我国爆炸逻辑网络和微小火工药件的生产, 仍普遍采用机械化设备加人工控制的模式。由于产品尺寸微小, 人工控制装药质量偏差大, 也就无法对微小药柱内部进行装药质量检测, 企业通常只能通过多批生产、多中选优的方式实现交货, 生产能力仅能满足现有需求, 一旦顾及战时需求, 企业进入批量供给时, 生成能力、产品一致性均面临严峻挑战。因此, 开展含能材料 3D 打印技术与应用研究, 提高高新武器弹药配套部件生产的快速反应能力, 能够通过先进工艺装备的技术储备替代传统的人员与武器储备, 保障战时动员能力, 进而为高新装备的研制和批生产提供保障, 有力保障军队顺利推进军事斗争准备工作。

## 1.2 可行性分析

纵观传统的弹药装药工艺及技术, 无论是注装、捣装、压装, 还是螺旋装药, 均存在过程冗繁、成型固化控制因素多、复杂异型件适应性差等缺点。与国外发达国家生产线大都实现了计算机控制的连续化、遥控化和自动化相比, 我国缺少装药方面的原创技术, 工艺和设备升级步伐又较慢, 因此装药精度和速度都较发达国家有较大差距。将含能材料 3D 打印技术应用于高效毁伤的战斗部装药, 含能材料的适应特性和 3D 打印的成型原理能够帮助实现沟槽装药的高度均匀性和连续性, 逐层凝固也可避免内部气孔同缩孔的产生, 完全可以避免因药条镶嵌装药搭接不可靠、挤注装药溶剂挥发内部产生气孔、压装密度一致性差的缺陷, 保证起爆、传爆的可靠性。

此外, 我国战斗部及火工装药装备一直以来都朝着具有适应多品种柔性化的方向发展, 尽管近年来部分装备在此方面取得了一定进展, 但适应品种仍然偏低。含能材料 3D 打印技术可对任意形状的产品进行直接成型, 产品适应性极高; 而在针对航天、航空以及核工业以及军工行业内其他具有危险性的复杂构型产品生产时, 与复杂异型战斗部及小型精密火工品装药具有相似的难点急待突破, 将含能材料增材制造技术面向这些行业进行推广, 完

全可以提升我国弹药制造行业的战时响应能力, 提高我国高危行业的工艺技术发展以及装备保障能力。

## 2 含能材料 3D 打印的关键性技术

3D 打印与喷墨打印的工作原理基本相同, 打印机内装有液体状或粉末状的“打印材料”, 通过电脑控制把分层打印的材料逐步叠加, 最终将计算机上的蓝图变为立体实物。从理论上讲, 含能材料包含的火炸药、发射药、推进剂、炸药、起爆药和烟火剂也有液体和粉末, 对其进行 3D 打印完全可行。然而, 制造快速成型技术在战斗部装药领域的应用在国际上却鲜有报道, 即便如美国这样军事发达的国家, 此类研究论述也是屈指可数, 且都还集中在火工品的小配件, 如引信上。究其原因, 一方面因为含能材料的传统机械加工随时都伴随着能量释放, 易燃易爆, 故而对远程控制、隔离操作和冷却系统的要求极高, 以免影响操作员安全<sup>[1]</sup>; 另一方面, 作为重要的化学能源, 含能材料具备的高能量密度、瞬间功率大和亚稳定的特性, 也为其后期妥善处理带来了不小难度。要实现含能材料的 3D 打印, 需要突破 3D 打印用含能材料筛选, 含能材料制造快速成型和含能材料制造系统集成三方面的关键技术。

### 2.1 3D 打印用含能材料筛选技术

3D 打印原理离不开将三维部件转化为二维图像并进行逐层叠加, 涉及计算机技术、CAD/CAM、数控技术和精密传动技术等领域。其材料包括粉末材料、与之匹配的粘结溶液和后处理材料。3D 打印用含能材料为满足成型要求, 需综合考虑材料本身的物化性能及安全性能<sup>[2]</sup>。同时, 不同的应用, 如制作火工品的零部件, 或是推进剂等高聚物, 前者需考虑材料的冲击感度和损伤机理, 后者则涉及粉末或药剂成分配比, 甚至包括 3D 打印原理与材料间的相互作用, 需要经过多次反复建模及试验论证。

### 2.2 含能材料制造快速成型技术

含能材料制造快速成型技术应包含实体模型及模具制造、零件快速复制等方面。而将快速成型技术应用于含能材料装药需针对含能材料的供料方式、挤出方式、成型方式进行研究, 并考虑含能材料在挤出打印头前能否保持原有的均匀性、流动性等性能, 关系成型质量与成型效率, 从而影响产品最终性能。

### 2.3 含能材料制造系统集成技术

含能材料制造系统集成技术以具有特殊成型机

理的制造技术为核心,开展完整的含能材料制造全工艺流程设计及硬件系统集成研究,解决现阶段传统方式对生产复杂、异型、微小精密装药中存在的自动化程度低、质量一致性不好、效率低、周期长等难题,满足异型战斗部、复杂精密微小型火工品的发展需要;实现具有复杂、异型、微小精密特点的战斗部或火工品的自动精密生产,为含能材料的精密安全挤出及粘结、固化成型提供必要的硬件设备条件,开展系统设计、真空及惰性氛围系统、安全过程控制、智能控制系统集成等关键技术攻关,以满足含能材料制造工艺需求的系统技术指标。

### 3 含能材料 3D 打印技术的国内外现状

#### 3.1 现状对比

表 1 以目前检索到的有限资料为依据,能够看出国外对含能材料 3D 打印技术的重视。

表 1 国内外含能材料 3D 打印研究现状对比

项目	国外	国内
起步时间	1999 年以前	2003 年
投入经费	1999 年即投入 4000 万美元推动直写入火工品技术的发展	专项经费投入不多
研究内容	微电子引信、MEMS(微机电系统)等火工品,纳米 RDX 打印	化学芯片、MEMS
取得成果	已成功运用于多种微电子引信	正处于基础理论研究阶段

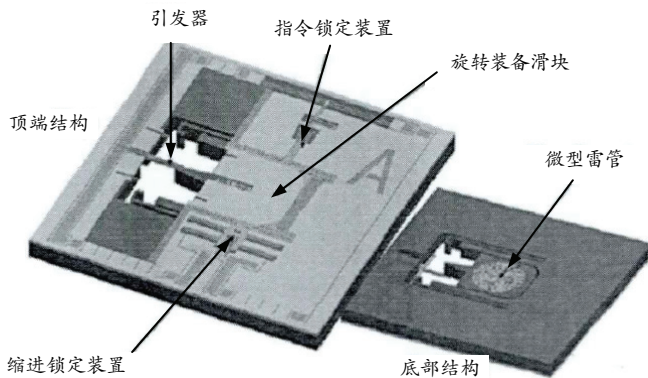


图 1 带安保机构的微电子引信<sup>[3]</sup>

2008 年,美国有学者研究了一类采用含高能炸药或拟高能炸药的生物降解聚合物进行喷墨打印<sup>[6]</sup>,制造聚合物微球体的方法。基于油/水乳状溶剂提取方法,进行聚乙烯微球体生产。该喷墨打印方法能够对微球体直径和化学组成进行精确控制。采用微球体作为炸药微量检测仪器的校准物或检验标准,通过气体色谱法/质谱测定法证明该微球体的化学成分与通过聚合物溶剂内分析物剂量和喷墨运行参数推测的浓度一致,论证了该微球体能够通过 70%质

#### 3.2 美国的技术现状

DARPA(美国国防高级研究计划局)在 1999 年即投资 4 千万美元,用于发展直写(direct write, DW)技术<sup>[3]</sup>。直写技术的许多装置及能量模式都能够用于制作纳米到毫米范围的产品,其材料范围也相当广泛,涉及金属粒子、制陶术、电介质,含能材料、生物材料聚合物等<sup>[4]</sup>,一个重要的研究方向即是含能材料的 3D 打印及快速成型。

将 3D 打印用于火工品制造,如智能火工芯片、微推进器阵列芯片、微小动力源等。使 3D 打印中的喷墨打印与传统火工技术相结合:在某类火工品所需的含能材料(如起爆药、猛炸药等)中混合粘结剂和有机溶剂,对其进行液化后装入成型机的各个喷头中,再将不同含能材料油墨打印到基片所需位置,烘干或光固化后形成引信中所需要的传火或传爆序列。图 1 为美国海军水面战中心某类带安保机构的微电子引信。图 2 为美国海军水面战中心某微型引信,直径仅为硬币大小<sup>[3]</sup>。

20 世纪末至 21 世纪初,美国国防先进研究项目总署在针对 79 项军用快速成型技术研究中的 7 项均涉及火工系统制造。美国海军水面武器中心也在同时研究可用于快速成型引信/安全与解锁的火工系统和微尺寸爆炸序列项目,其中的快速成型火工系统已进行 6.25 英寸高速防鱼雷的深海发射试验<sup>[5]</sup>。

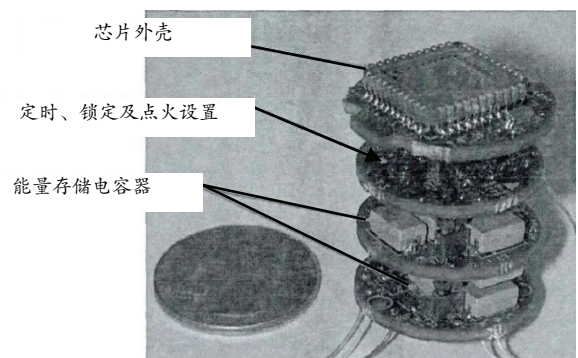


图 2 微电子引信<sup>[3]</sup>

量分率的分析化合物进行制作。

此外,美国研究人员也在分析基底配置、喷墨类型、热退火步骤及封装工艺对 3D 打印技术的影响,研究将纳米黑索今(RDX)混以有机溶剂,液化后制成含能材料油墨用于直写入引信的制备<sup>[3]</sup>。以美国为首的先进武器制造国家都在更深入地探索随着新型材料和纳米喷墨材料堆积技术发展起来的 3D 打印技术及设备对新一代武器装备小型化、轻便化的影响。

### 3.3 国内的技术现状

国内对含能材料 3D 打印技术的研究以南京理工大学为首,主要集中在高等学院。从已有资料看,2003—2014 年,南理工许迪、王建、朱锦珍、宋健康、邢宗仁等研究员基于 SLA 成形、喷墨快速成形、直写入等技术,先后探索了国内 3D 打印在化学芯片、微尺度装药、引信试验样件等领域的应用。其理念直指当前含能材料 3D 制造需攻克的两大难点,一是塑造适当的成型工艺环境,二是选取合理的含能材料配方。适当的成型工艺系统由于涉及实时且高密度的信息与能量互换,需综合考虑软件、硬件和模式 3 个方面。软件负责读取和设定参数,完成复杂模型的数据处理、信息传输和三维控制;硬件负责执行,接受指令,完成响应协调<sup>[3]</sup>;模式则依据 3D 打印常用模式,主要选取光固化和熔融等模式进行。而合理的含能材料配方,不光要与不同的成型工艺相匹配,还需考虑材料的存储性、二次利用和废料处理。

使用 3D 技术制造化学芯片,完成微尺寸快速装药,将光固化成型与喷墨 3D 打印成型两项工艺技术相结合,利用光固化树脂固化和喷墨喷涂原理,将含能材料混合配制成 UV(紫外光)固化油墨,提升材料的安全性和均质性。再依据原型层片数据,通过喷头喷洒、经紫外光照射后快速固化成型。证实了用喷墨快速成型技术进行微型装药快速、安全、精确、自动化程度高,以及无药剂浪费的优点<sup>[5]</sup>。

使用 3D 技术制造含能芯片,采用 SLA(立体光刻成型)工艺,选择聚氨酯丙烯酸酯、环氧丙烯酸酯、EO-TMPAT、TPGDA 和光引发剂 D-1173 作为芯片主要材料,通过分析材料附着力情况,将上述材料按相关比例完成树脂配比,通过紫外激光,选择性扫描液态光敏树脂,最后逐层固化成型。其工艺过程主要有模型设计、切片、数据处理(含内外轮廓识别、光斑补偿、扫描路径生成)、成型加工、后固化 5 个环节<sup>[7]</sup>。

使用 3D 技术进行引信的研制,在对引信进行预研的前提下,应用 ZPrinter310 系统优化引信设计,制造引信零部件(如部件座和电子模块座)原型,选用聚酯乙烯为材料,通过基于 SLS(激光烧结)工艺的 AFS-320 快速成型系统制造引信本体,通过对成型材料及本体进行力学性能、本体尺寸精度及表面粗糙度方面的分析测试,得出可将本体直接应用于引信研制阶段的局部性及实验室验证中的结论<sup>[8]</sup>。

使用 3D 技术实现 MEMS(微机电系统)微孔自动化装药,针对 MEMS 微推进芯片药室尺寸较小的难题,将湿法装药和针管注射装药 2 种工艺相结合,通过自动化程序精确控制喷头按要求完成药室装药。步骤是先将粘结剂、有机溶剂与含能材料进行混合,使其具有流动性,便于通过喷头,再将配置好的含能材料油墨装入点胶机喷头,将其移至芯片装药位,通过程序设定将针头移至药室上方,针头向下伸入药室孔,接近底部后停止运动,然后针头向上运动的同时打开喷头控制开关进行注药,到达规定位置时关闭喷头控制阀,完成注药,如图 3<sup>[3]</sup>。重复上述动作直至完成每个药室孔的装药,解决 MEMS 芯片药室孔“小”且“多”,不易精确控制和容易造成药剂浪费的难题。

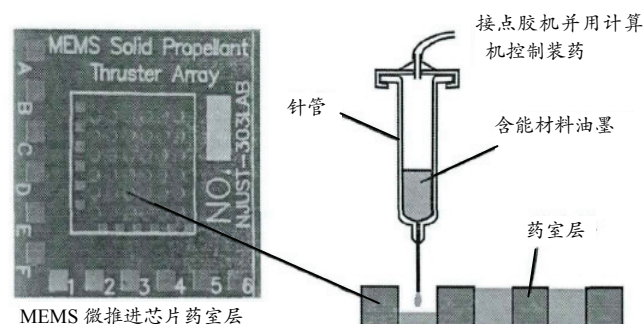


图 3 MEMS 微推进芯片药室及装药原理<sup>[5]</sup>

经过 10 余年的探索,国内上述研究许多已突破了理论验证和实验室论证,但离批量试制和生产仍有待深入并拓宽范围<sup>[9]</sup>。此外,3D 打印技术在一些医学领域的应用,如制备区位控制药物释放的给药系统,尽管与含能材料关系不大,但其中的药物载入方式、工艺参数操作控制、剂型构建等方面的新型模式,待时机成熟,相信也能为在军工武器方面的应用提供参考。

## 4 结束语

出于保密和竞争原因,将含能材料 3D 打印用于军工行业,尤其是先进武器装备制造领域,国内外能够搜集到的信息不多。对比国内外对该技术应用的重视程度和研究进展,以美国为首的先进军事技术国家已采用 3D 制造工艺验证各种精确制导武器中的关键火工元件和精密微小型火工品的制作,以便更好地解决固有装药成型工艺因生产过程过长,装填密度和药条接触不可靠等因素造成的熄爆问题。