

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.04.001

增材制造技术以及在火炸药研究中的现状与发展^{*}

张 亮 刘 晶 张 哲 马 宁 孙晓朋
中国兵器工业集团第二〇四研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 首先,介绍了增材制造技术的概念与技术特点,回顾与总结了其产生与发展的技术历程;其次,陈述了增材制造在国防军工领域应用的现状与取得的成果;接下来,重点阐述了增材制造在火炸药行业的国内外研究现状,介绍了目前国内推进剂药柱增材制造的阶段性研究成果;最后,对火炸药增材制造技术发展方向进行了预测。指出在火炸药增材制造领域,国内外研究差距不大;未来若干年火炸药增材制造技术的发展主要集中在火炸药先进装药、火炸药一体化制造以及火炸药微型特种装备制造这 3 个领域。

[关键词] 增材制造技术;发展历程;国防军工;火炸药;研究现状;发展方向

[分类号] TH164 ; TJ55

引言

增材制造技术根据材料累加理论、计算机控制实现三维模型的分层加工、迭加成型,以点、线、面、体的升维叠加堆积成型实体产品,过程不需要工装夹具,可制造任意形状的零件,特别适用于传统加工工艺难以或无法成型的特殊、复杂产品的制造^[1]。增材制造技术作为一种先进的制造技术,涵盖了数字化设计、制造、管理和集成,顺应当今数字化发展的趋势,可实现设计、制造、成型一体化完成,缩短了产品的研制时间,节约了研发成本,并且制造材料被充分利用,基本无耗损,可实现自动、精确、快速、直接的数字化制造过程^[2]。增材制造技术的以上特点十分适合于国防军工领域众多装备的特殊零部件与结构的制造,将最优设计从理想变为现实,减轻质量,提升功能,使产品更加精密,达到传统工艺无法实现的功能与效果。

未来武器装备精密控制与精确打击的发展趋势必然促使推进与毁伤单元向多样、异形、精巧的方向发展,导弹发动机与战斗部需破解多层材料装药、复杂形状装药、高精度装药等问题^[3-4]。针对增材制造技术本身的特点与优势,借鉴国防军工的成功经验,开展增材制造技术在火炸药领域的相关基础性研究,未来可以将其应用于火炸药行业的生产制造中。

增材制造技术为多层、异形、微型药柱的制造提供了一条全新的途径,并发展出增材制造技术的分支——火炸药增材制造技术。火炸药增材制造技术

综合考虑火炸药增材制造过程中的物料特殊性、工艺适用性与安全性等问题,运用增材制造的基本原理,针对火炸药物料体系的特征,设计全新的火炸药增材制造系统或者在现有成熟的增材制造装置基础上进行改造,最终形成一系列能够支撑火炸药产品增材制造的工艺与设备。

本文中,笔者在总结增材制造技术的发展历程以及其在国防军工领域的发展应用的基础上,针对性阐述了其在火炸药制造领域的研究现状与发展趋势,最后给出了几点结论。

1 增材制造技术以及火炸药增材制造的研究现状

1.1 增材制造技术历史沿革

增材制造的前身是快速原型技术(rapid prototyping,简称 RP 技术)^[5]。1979 年,中川威雄在东京创造了叠层模型造型法,实现了成型模具、冲裁模具和金属注塑模的分层制造^[6]。美国的 Hebert、Hull 与日本的小玉秀男等人,开创性地分别提出了分层制造三维实体的理念^[7]。1984 年,Hull 构建了一套立体激光快速成型装置,该系统能自动制造零部件,并依据其技术创新性于 1986 年获得专利,简称 SLA^[8];同年,Hull 等人创建 3D Systems,该公司致力于发展增材制造技术,并在全世界范围内率先研发出 SLA 设备,这是增材制造技术发展史上的重要节点事件^[9]。

随着扫描振镜性能的提高以及材料科学与计算机技术的发展,增材制造技术进入了快速发展阶段,

^{*} 收稿日期:2015-11-17
基金项目:基础产品创新火炸药专项
作者简介:张亮(1986-),男,硕士,工程师,主要从事火炸药工艺与设备的研究。E-mail:tianliang529@163.com

新成型原理及相应的系统相继开发成功。1984 年, Michael 掌握了薄材叠层的原理, 简称 LOM, 并于 1992 年制造出世界上首台商业 LOM 增材成型系统 LOM-1015^[10]。1986 年, Deckard 提出了选择性激光烧结的方法, 简称 SLS, 经过不懈努力, 终于在 1992 年研发出了 SLS 商业成型系统^[11]。Crump 在 1988 年提出了熔融成型的思想, 简称 FDM, 并于 1992 年开发了第一台商业机型 FDM-Modeler^[12]。1991 年, 麻省理工学院的 Scans 和 Cima 等人申报了关于三维实体印刷制造技术的专利, 并于 1995 年创造了“3D 打印”这个名词^[13]。1996 年, 3D Systems、Stratasys、Z Corporation 分别推出 Actua 2100、Genisys、Z402, 首次将它们定义为 3D 打印机, 从而使增材制造技术发展到了 3D 打印阶段^[14]。至此之后, 增材制造技术与 3D 打印技术相互融合、相互渗透, 不断向前发展。

自 20 世纪 90 年代以来, 国内多所高校开展了有关 3D 打印的自主研发工作。清华大学在现代成型学理论、分层实体制造、FDM 工艺等方面走在了前列^[15]; 华中科技大学在分层实体制造工艺方面具有学科优势, 已推出了 HRP 系列成型机和成型材料^[16]; 西安交通大学自主研发了光固化成型系统及相应成型材料, 成型精度达到 0.2 mm^[17]; 中国科技大学自行研制的 8 喷头组合喷射装置未来有望应用于微制造, 如光电器件制造等领域^[18]。

20 世纪 90 年代末至今, 增材制造技术的发展进入黄金时期, 目前 SLA、LOM、SLS 和 FDM 4 种技术已经成为了增材制造的主流技术, 不断有将其应用于机械加工、生物医学、建筑、珠宝、电子消费品等行业的报道, 特别是近 3~4 年。增材制造技术发展重要节点见表 1。

1.2 增材制造技术在国防军工的应用现状

增材制造技术在国防军工领域应用较多, 大多用作整体成型或零部件精密加工^[23]。2012 年的夏天, 驻守在阿富汗的士兵使用 3D 打印机制造雷达防护隔离罩。2014 年 1 月, 3D Systems 公司对外宣布: 工业级 3D 打印机目前已经可以制造航空发动机的复杂零部件, 从而有效减轻发动机质量^[24]。2014 年 10 月, 美国海军实施了一项“舰艇打印”计划, 即在舰艇上建立 3D 打印商店, 士兵们可以在里面生产出需要的产品^[25]。NASA、GE、Boeing、Airbus 等航空航天巨头将 3D 打印技术应用于卫星、飞机引擎以及载人航天器等复杂部件的制造, 包括卫星支架、复杂内流道的叶片、燃料喷嘴、空气通风管道、机翼与尾翼以及复杂装配工具等, 其中, LEAP 发动

表 1 增材制造技术发展重要节点^[19-22]

Tab.1 Key notes in development of additive manufacture^[19-22]

年份	事 件
1984	Hull 在美国发明了立体光刻技术 stereo lithography appearance
1986	世界上首家增材制造设备制造公司——3D Systems 公司诞生
1988	3D System 公司研发出一款选择性光敏液态树脂固化成型机 SLA-250 Crump 发明 fused deposition modeling 技术, 即热熔成型技术, 并成立 Stratasys 公司
1989	Deckard 发明了 selective laser sintering 技术, 即选择性激光烧结技术
1992	Helisys 公司发明 laminated object manufacturing 技术, 即分层实体制造技术, 并于同年研制出全球第一套商业成型装置
1993	麻省理工学院 Sachs 发明 three-dimensional printing 技术, 即三维印刷技术
1996	3D Systems、Stratasys、Z Corporation 在分别推出的 Actua 2100、Genisys、Z402 机型中第一次使用了 3D 打印机的称谓
2005	Z Croporation 公司研发出全球第一台高精度彩色 3D 增材制造机 Spectrum Z510
2008	美国旧金山一家医疗公司利用增材制造技术定制假肢, 为有需求的病患提供相关医疗服务
2009	美国 Organovo 公司首次证明: 人造血管可以增材制造
2011	英国南安普敦大学制造出世界首架完全利用 3D 打印原理制造的无人飞机 I. Materialise 公司提供以 14K 金和纯银为原材料的 3D 打印服务
2013	苏州盈创新材料有限公司使用 3D 打印技术建造的建筑亮相江苏省苏州工业园内, 包括一幢 1100 m ² 的 3 层别墅和一幢 6 层、近 1000 m ² 的在建住宅楼
2014	美国密歇根理工大学研究人员开发出一种小型生物 3D 打印机, 可用于制造人体神经组织
2015	浙江大学傅建中教授成功解决了 3D 打印细胞工艺中营养维持的问题, 课题组开发出一种全新工艺, 在打印组织结构的同时打印出微小的营养通道

机、Orion 多用途载人航天飞船、F/A-18 超级大黄蜂战斗机、F-35 战斗机以及 Juno 宇宙飞船等项目已经将 DMD、DMLS、EBM、FDM、SLS 等增材制造技术成功应用^[26-29]。见图 1 和图 2。

我国自主研发的大型运输机运-20 中, 许多零部件的制造都采用了增材制造技术; 歼-15 战斗机的钛合金主承力部分, 包括整个前起落架的研制,



图 1 Navy“舰艇打印”商店的部分产品

Fig. 1 Part of products in Navy’s “Print the Fleet” Shop

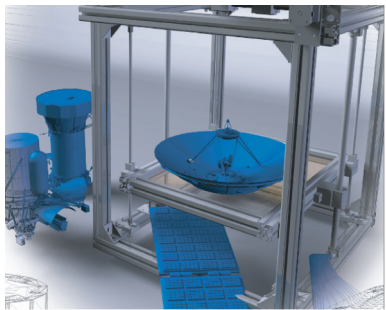


图 2 美国利用增材制造技术打印卫星支架

Fig. 2 Satellite stents printed by additive
manufacture technology in USA

均采用了增材制造技术^[30](图 3)。2013 年 1 月,北京航空航天大学王华明教授在飞机钛合金整体主承力结构件激光快速成型工艺研究中获得了突破性成果,团队利用 3D 激光打印技术,成功制造出 C-919 大型客机风挡窗框结构,各项性能指标均符合标准,从而使我国成为目前唯一利用激光 3D 技术成型钛合金大型主承力核心组件,并在飞机上成功应用的国家^[31]。



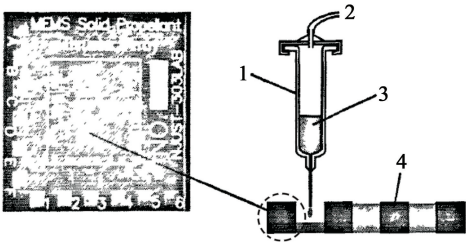
图 3 歼-15 战斗机的研制中使用了增材制造技术

Fig. 3 Additive manufacturing used
in development of Jian-15 fighter

1.3 增材制造技术在火炸药领域的研究现状

目前,火炸药增材制造领域的研究主要集中在含能油墨配制、含能芯片与传爆网络的打印等方向^[32]。早在 1999 年,美国国防高级研究计划局便开始研究含能材料的增材制造技术,其主要技术手段是将火工品中所需的不同组分(包括含能组分)、黏结剂和有机溶剂配置为可打印的含能油墨,装入

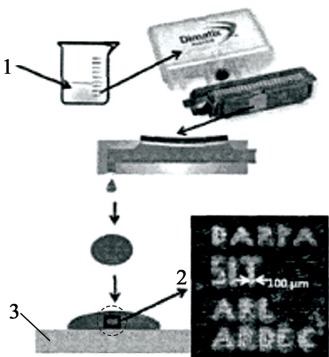
3D 打印机的喷头中,分别或同时打印到基片特定位置上,然后烘干,并固化成型为引信中的传火传爆序列,直接完成绝大部分或者全部火工芯片装药,形成微机电系统(MEMS)推进芯片^[33],如图 4 所示。2010 年,Ihnen 等以 RDX 作为含能原料,乙酸乙酯纤维素和聚乙酸乙酯作为黏结剂,配制成含能油墨打印材料,进行引信直写入的试验,所得 RDX 含能油墨适合于喷墨打印体系,得到了符合要求的含能材料油墨图形,并且分辨率高^[34],如图 5 所示。同年,Fuchs 等以 EDF-11 作为含能油墨原料,配制出可进行复杂图形爆炸传递及起爆网络打印的含能油墨直写体系^[35]。



1 - 针管;2 - 接头(接点胶机);3 - 含能材料油墨;
4 - 药室层。

图 4 MEMS 推进芯片药室及装药原理

Fig. 4 MEMS propellant chip and schematic diagram of charge



1 - 液体油墨;2 - 炸药/聚合物纳米复合材料;3 - 基底。

图 5 纳米 RDX 油墨打印示意及效果图

Fig. 5 Printing effect of nano-RDX ink

国内方面,2003 年,许迪研究了将增材制造技术应用于化学芯片制造的可能性,按照 SLA 成型原理,设计、搭建了试验平台^[36]。2005 年,朱锦珍利用光固化树脂模拟含能材料物料特性,阐述了含能材料反应固化原理,尝试配置了若干光固化成型组分配方,并分别进行光固化树脂类配方的固化剥离强度测试^[37]。2006 年,王建探索了基于喷墨的增材制造技术在化学芯片和微观装药方面的应用,初步构建了基于喷墨的增材制造装置,设计优化了喷射挤出喷头,并利用模拟仿真的手段,研究了出料过程微流体流动状况,为将增材制造技术应用于

MEMS 推进芯片自动装药领域奠定了技术基础^[38]。2012 年,邢宗仁对基于斯蒂芬酸铅(LTNR)含能油墨体系增材制造技术进行了研究,确定了适合于该体系成型匹配度较高的针头尺寸^[39]。2013 年,朱自强以细化的 CL-20 做为含能原料,选用聚乙烯醇(PVA)和乙基纤维素(EC)作为黏结剂,水和异丙醇(IPA)作为溶液,配制成一种可书写的炸药油墨复合物 CL-20/PVA/H₂O/EC/IPA,对不同黏结剂和溶剂以及其配置比例对含能油墨性能的影响进行了研究,并进行了对比分析^[40]。

南京理工大学、中国兵器第二〇四研究所、北京理工大学、北化集团等多家单位都提出了增材制造技术在推进剂药柱制造领域的应用设想。其中,南京理工大学在国内率先开展了增材制造技术在固体推进剂体系成型方面的可行性研究,验证了复杂结构的火药采用增材制造成型的可行性。通过研究,提出了对原有成型系统结构改进和新的成型系统设计方案,为进一步研究开发可以满足制式推进剂产品的工程样机奠定了良好的基础^[41]。有关的前期研究进展包括以下几个方面:

1) 硬件系统的构建。分别研制和改造了开源型单喷头机器、双喷头样机(图 6)及有效成型尺寸为 250 mm × 800 mm 的成型试验平台,并在这些样机上开展了火药智能成型的可行性研究,提出了系统改进和新系统的设计思想。通过惰性物料、推进剂包覆材料以及接近真实配方的模拟推进剂物料成型加工试验,掌握了这些物料在原理样机上的成型规律,为典型推进剂的成型新工艺研究积累了经验和基础数据^[42]。

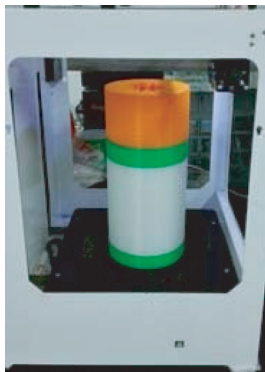


图 6 改进后的双喷头增材制造原理样机

Fig. 6 Improved double-nozzle additive manufacturing principle prototype

2) 系统局部结构及控制系统的改造研究。开展了原理样机加热系统改造初步研究,通过加热控制系统的改进研究,提高了喷头出料温度的控制精度,温度偏差大幅度缩小,从 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

以内。开展了原理样机出料系统改造研究,出料的改进研究大幅度提高了成型效率,在基本不降低尺寸精度的前提下,成型速度从(3~5)g/h 提高到(20~80)g/h。开展了原理样机控制系统和局部结构的改造研究,通过固件和结构改造,可以将成型高度提高 3 倍,对成型的尺寸精度基本没有影响^[43]。

3) 双基体系和高固含量的推进剂体系增材制造成型可行性研究。开展了双基和改性双基推进剂物料体系的成型试验研究,结果表明,现有的工艺和设备条件无法满足双基及改性双基火药的成型需要,必须研究开发新的硬件系统,核心是新的供料和成型部件。采用固体氧化剂质量分数为 30%~50% 的模拟推进剂物料,成功地制备了小尺寸的推进剂样品,样品密度已经达到理论密度的 95% 以上,获得了适宜的工艺参数^[44]。见图 7。



图 7 打印出的复杂结构代料药柱

Fig. 7 Printed alternate grain with a complex structure

中国兵器第二〇四研究所前期开展了一定的工作,如利用 SLA 技术成型光固化剂与 Al 粉的混合物料,利用代料体系模拟 HTPB 推进剂配方体系,并利用活塞挤出式增材制造技术进行成型试验等,论证了增材制造技术在推进剂药柱成型领域应用的可行性,见图 8~图 9^[45]。



图 8 HTPB 复合推进剂代料体系的配制

Fig. 8 Alternate preparation of HTPB composite propellant

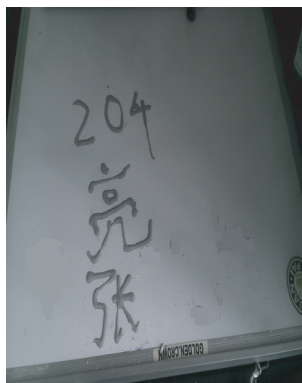


图 9 活塞挤出式增材制造成型试验

Fig. 9 Molding experiment of piston-extrusion additive manufacture

2 火炸药增材制造技术发展展望

随着增材制造技术工艺、材料、设备研发的技术革新,加之火炸药行业在产品质量、工艺自动化与安全性上的现实需求,未来火炸药增材制造技术将向纵深发展。探索增材制造技术在战斗部精密制造、发动机推进剂药柱柔性制造与精密装药、战斗部与发动机一体化制造、弹体装药与包覆层一体化成型、多层复合药柱一体化制造、传爆起爆药柱 3D 打印制造、微型特种装备 3D 打印制造加工等方面的研究,将是火炸药增材制造技术今后若干年发展的重点领域。

归纳起来有以下 3 个重点发展方向。

2.1 火炸药先进装药

火炸药装药是武器系统不可或缺的重要组成部分,作为武器系统的动力源和毁伤源,在实现武器系统的功能中发挥了重要作用。现代战争对武器装备的要求越来越高,如具有超远程精确打击能力以及高效毁伤能力。因此,武器系统对火炸药装药也提出了更高要求,要求具有更高的能量,具有更加复杂的装药结构、更加精确的能量释放控制^[46]。传统的火炸药装药成型技术(熔铸、浇铸、粒铸、挤压)存在诸如在制量大,生产周期长,人员与生产现场未隔离,原材料利用率低,对高固含量、药柱截面较为复杂及大尺寸装药无法成型,加工工序繁琐,后处理(如车药、整形)工序复杂等缺点,因而无法满足现代战争对火炸药装药提出的更高要求^[47]。增材制造技术有望解决火炸药装药工艺中存在的上述问题,尤其可以成型具有复杂截面的异形装药,多层多材料装药、微型、高固含量的装药等传统火炸药工艺无法成型的药柱。将火炸药增材制造技术应用于火炸药装药可实现精确、柔性、安全、快速化制造;有效提高原材料利用率,降低三废排放,是一种真正实现人机隔离、自动化操作的绿色火炸药成型工艺。同

时,可有效降低制造成本,省去大量的设备费、模具制作费用及产品后续加工费用,大幅减少工房使用面积,减少一线操作人员数量,减少在制量,降低安全风险。有报道称,国外已经开展增材制造技术在火炸药装药领域的研究,美国开发出一种新的装药成型手段,可以实现多品种单批次生产,生产周期相对传统工艺缩短近一倍,并且装药成型的精密度非常高,由于技术保密,目前没有相关资料。

2.2 火炸药一体化制造

火炸药药柱与包覆层、壳体一道构成了发动机、战斗部的有机组成部分。目前的工艺需要将制造好的各类药柱装填进不同的壳体中,有些药柱为了控制燃烧面与燃烧速率,需要添加高分子包覆层。由于制造工艺的缺陷与制造精度的限制,火炸药药柱与其包覆层、壳体会产生匹配性问题。以自由装填式固体推进剂药柱包覆为例,目前为药柱添加包覆层基本采用纯人工,不仅费时费力,而且由于目前包覆层与药柱之间采用有机黏胶连接,人工赶胶不能保证连接的紧密性与完整性,特别对于球头赶胶更是如此,如果存在黏胶局部堆积或者气泡未赶出的情况,将会很大程度上改变药柱燃烧轨迹,易于形成热点,甚至发生膛炸,药柱就会存在极大的安全隐患,甚至使药柱不合格,成为废品^[48]。

多喷头 3D 打印机目前已经可以实现不同材料的同时打印,如果将增材制造技术成功引入,不仅可一体化成型多层多材质药柱,还将有望实现火炸药药柱、包覆层、壳体等的一体化制造,并且药柱与包覆层、包覆层与壳体之间紧密贴合,其贴合度有望达到微米级别,完全不用担心有空气滞留在空隙处的问题。这样将会简化药柱制造的工艺环节,减少发动机、战斗部,甚至弹药、导弹的生产周期与制造工序,有利于实现自动化、数字化、一体化、柔性化与集成化制造,从而颠覆传统的火炸药制造理念,革新火炸药制造的技术手段,极大地提高行业的生产力与竞争力^[49]。

2.3 火炸药微型特种装备制造

几乎所有的火炸药制造工艺中都会用到特种装备,特种装备是基于标准装备的概念提出的,是指没有国家、行业统一标准,为了满足特殊、高危的反应、工艺、制造过程的需求的一类设备、仪器,其功能与用途的特殊性决定了其外观尺寸、内部结构与组合方式的特有性与独立性,微型反应器就属于微型特种装备的典型代表^[50]。微反应器是微化工技术中的核心,是指尺寸在 10 ~ 1 000 μm 之间的反应器,具有反应比表面积大、反应条件温和、反应迅速、转

化率高、安全可靠等突出优点^[51],十分适用于含能材料的合成反应工艺。微型反应器可以通过对成百上千的微型通道的有效集成,整体达到宏观上的效果,这样同样可以实现很高的产量,并且物料在分子级别充分接触、反应在微观层面充分进行,收率与转化率有望达到 100%。但微型化工设备的制造一直以来是一个难题,其微米级的尺寸以及内部复杂的管道构型需利用先进的精密加工技术制造,增材制造技术的生产精度高,完全可以作为微型反应器制造的一个有效途径。

3 结论

1)增材制造技术也称 3D 打印技术,起源于快速原型技术(RP),经过 30 多年,特别是近十年的快速发展,技术不断进步与成熟,目前已形成了以 SLA、SLS、FDM、LOM 为代表的十几种增材制造技术手段,被应用于装备制造、生物医药、机械加工、建筑、珠宝、食品以及电子消费品等行业的产品与零件的制造。

2)增材制造在国防军工的应用取得了不少成果。国外已将增材制造技术应用于微小卫星支架、飞机引擎、机翼与尾翼以及载人航天器发动机中复杂部件如空气通风管道、燃料喷嘴等的制造;国内已将增材制造技术应用于大型运输机、大型客机以及新型战斗机零部件的生产,包括钛合金主承力部分、起落架等。

3)火炸药增材制造技术属于增材制造技术的分支,目前仍处于研究阶段。国外在火炸药领域的研究主要集中在含能油墨、含能芯片与传爆网络等方向;国内与国外研究方向与进度基本保持一致,研究基本处于同一水平。以南京理工大学、中国兵器第二〇四研究所等为代表的院校、机构积极开展推进剂药柱增材制造技术探索研究,在设备、工艺、材料等方向获取了一些成果。

4)未来火炸药增材制造技术将颠覆火炸药传统制造理念,将会提升火炸药制造连续化、自动化、集成化、柔性化水平,发展主要集中在火炸药先进装药、火炸药一体化制造以及火炸药微型特种装备制造等研究方向上。

参 考 文 献

[1] 刘志伟,张海鹰. 面向增材制造的快速建模若干关键技术的探讨[J]. 现代制造技术与装备,2015(2):20-21,85.
LIU Z W, ZHANG H Y. Discussion of key technologies of rapid modeling of additive manufacturing[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2015(2):20-

21,85.
[2] 胡祥涛,陈兴玉,肖承翔. 简述增材制造技术在雷达装备研制中的应用[J]. 机械工业标准化与质量,2014(12):14-16.
[3] 杨立峰. 精确制导武器及发展趋势[J]. 现代防御技术,2010,38(4):18-21.
YANG L F. Precision guided weapon and its development trend[J]. Modern Defence Technology,2010,38(4):18-21.
[4] 刘文叶. 新概念武器的发展趋势及对策[J]. 飞航导弹,2003(1):36-42.
[5] KRUTH J P. Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,1991,40(2):603-614.
[6] 张昌明. 基于 RP 的快速模具制造技术研究[D]. 太原:太原理工大学,2006.
ZHANG C M. Rapid tooling manufacturing technology research based on RP technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006.
[7] 刘伟军. 快速成型技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
[8] IKUTA K, HIROWATARI K. Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding [C]//Micro Electro Mechanical Systems, MEMS'93, Proceedings An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems. IEEE,1993:42-47.
[9] CHENG W Q, FUH J Y H, NEE A Y C, et al. Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography[J]. Rapid Prototyping Journal,1995,1(4):12-23.
[10] MUELLER B, KOCHAN D. Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry[J]. Computers in Industry,1999,39(1):47-53.
[11] GRIFFIN C. Rapid prototyping of structure ceramic components using selective laser sintering[J]. Journal of Material Technology,1996(11):48-49.
[12] HUANG X M, YE C S, MO J H, et al. Slice data based support generation algorithm for fused deposition modeling[J]. Tsinghua Science & Technology,2009,14(1):223-228.
[13] 刘海涛. 光固化三维打印成形材料的研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
LIU H T. Study on the processing materials of UV curing three-dimensional printing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2009.
[14] 刘晓辉. 快速成型技术发展综述 [J]. 农业装备与车辆工程,2008(2):11-14.

- LIU X H. Development of rapid prototyping technology [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2008(2):11-14.
- [15] 陈燕和. 3D打印产业经济学分析[J]. 湖北师范学院学报(哲学社会科学版), 2013, 33(5):53-57, 118.
CHEN Y H. Economics analysis on three dimensional printing industry[J]. Journal of Hubei Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2013, 33(5):53-57, 118.
- [16] 陈燕和. 中国的3D打印研究(1993-2014):基于文献计量学的分析[J]. 现代情报, 2015, 35(6):86-89.
CHEN Y H. Analysis on studies of Chinese 3D printing (1993-2014):based on the bibliometric[J]. Journal of Modern Information, 2015, 35(6):86-89.
- [17] 王忠宏, 李扬帆, 张曼茵. 中国3D打印产业的现状及发展思路[J]. 经济纵横, 2013(1):90-93.
- [18] 王雪莹. 3D打印技术与产业的发展及前景分析[J]. 中国高新技术企业, 2012(26):3-5.
WANG X Y. Development and prospect analysis of 3D printing technology and industry [J]. China High Technology Enterprises, 2012(26):3-5.
- [19] 黄健, 姜山. 3D打印技术将掀起“第三次工业革命”[J]. 新材料产业, 2013(1):62-67.
- [20] ADAMYAO. 开源3D打印机之父 Adrian Bowyer 和他的小伙伴们[EB/OL]. [2014-08-10]. <http://www.vx.com/news/2014/4093.html>.
- [21] 连岑, 李涤尘, 陈成, 等. 面向组织工程化软组织的制造技术及增材制造[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(8):1263-1269.
LIAN C, LI D C, CHEN C, et al. Tissue-engineered soft tissue oriented manufacturing technologies and additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2014, 18(8):1263-1269.
- [22] 吴苒婷, 王春. “生物3D打印机”使修复手术更完美[N]. 科技日报, 2015-03-16(1).
- [23] 胡晓睿. 增材制造技术在国防领域的应用[J]. 国防制造技术, 2010, 8(4):41-43.
- [24] Aerospace sector embraces 3D printing[OL]. <http://bit.ly/19i1zzi>, 2014, 01.
- [25] TADIDEH Y. Navy beefs up 3D printing efforts with new ‘Print the Fleet’ program [J]. National Defense, 2014, 99(731):24-26.
- [26] TADIDEH Y. 3D printing promises to revolutionize defense, aerospace industries [J]. National Defense, 2014, 98(724):20-23.
- [27] 祈萌, 李晓红, 胡晓睿, 等. 增材制造技术在国外国防领域的发展现状与趋势[J]. 国防制造技术, 2013, 10(5):12-16.
- [28] 未来轨道卫星或可3D打印, 实现“自我复制”[EB/OL]. [2012-09]. <http://office.pconline.com.cn/news/1209/2945159.html>.
- [29] ANDY G. This is the world’s first entirely 3D printed gun[EB/OL]. [2013-03]. <http://www.foe-rbes.com>.
- [30] 杨恩泉. 3D打印技术对航空制造业发展的影响[J]. 航空科学, 2013(1):13-17.
YANG E Q. The influence of 3D printing to the development of aviation manufacturing [J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(1):13-17.
- [31] 刘俊卿. 王华明打印大飞机[N]. 中国经济和信息化, 2014-02-25.
LIU J Q. WANG M H had printed big aircraft [N]. China Economy & Informatization, 2014-02-25.
- [32] 张金勇. 异形结构传爆药装药工艺研究[D]. 太原: 中北大学, 2006.
ZHANG J Y. Study on irregular booster pellet charge process[D]. Taiyuan: North University of China, 2006.
- [33] ZUNINO III J L, SCHMIDT D P, PETROCK A M, et al. Inkjet printed devices for armament applications [J]. Nanotech, 2010(2):542-545.
- [34] IHNEN A, LEE W, FUCHS B, et al. Inkjet printing of nanocomposite high-explosive materials for direct write fuzing [C]//54th Annual Fuze Conference. Kansas, NV: 2010.
- [35] FUCHS B E, WILSON A, COOK P, et al. Development, performance and use of direct write explosive inks [C]//The 14th International Detonation Symposium. Idaho: 2010.
- [36] 许迪. 化学芯片的快速成型技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
XU D. The research of rapid prototyping technology of chemical chip [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [37] 朱锦珍. 含能芯片的快速成型技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [38] 王建. 化学芯片的喷墨快速成型技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [39] 邢宗仁. 含能材料三维打印快速成形技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
XING Z R. Research of three-dimensional printing for energetic materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [40] 朱自强, 陈瑾, 谯志强, 等. CL-20基直写炸药油墨的制备与表征[J]. 含能材料, 2013, 21(2):235-238.
ZHU Z Q, CHEN J, QIAO Z Q, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20 [J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2013, 21(2):235-238.
- [41] 伍咏晖, 李晓燕, 张曙. 粒状熔融材料三维打印成形

- 系统的设计与研究[J]. 机电产品开发与创新, 2005, 18(6):71-72, 88.
- WU Y H, LI X Y, ZHANG S. Design and research of three dimensional printing system with fused material pellet[J]. Development & Innovation of machinery & electrical products, 2005, 18(6):71-72, 88.
- [42] 王锦. 金运激光联手南京理工大学推进 3D 打印应用[N]. 中国证券报, 2014-12-18.
- [43] 美国宇航局的团队利用 3D 打印技术研发的火箭发动机已接近成功[EB/OL]. [2012-09]. http://www.360doc.com/content/16/0101/17/10760360_524644764.shtml.
- [44] 原光. 面向增材制造的球形金属粉的制备、表征与应用[D]. 南京:南京理工大学, 2015.
- YUAN G. Preparation, characterization and application of spherical metal powder for additive manufacturing [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [45] 徐林峰. 均匀液滴喷射微制造技术基础研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
- XU L F. Foundational research on uniform droplets spraying micro-fabrication technology [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [46] 黄凤军, 赵晋宏. 国外炸药装药新技术的发展[J]. 水雷战与舰船防护, 2013, 21(2):55-58.
- HUANG F J, ZHAO J H. Developments of new technologies for foreign explosive charge[J]. Mine Warfare & Ship Self-defence, 2013, 21(2):55-58.
- [47] 朱丽华, 陈尚龄. 关于现代炸药装药的要求[J]. 现代兵器, 1987(1):40-43.
- [48] 王长起. 固体火箭发动机无烟隔热/包覆材料的研究[J]. 飞航导弹, 1992(6):31-39.
- [49] 彭翠枝, 范夕萍, 任晓雪, 等. 国外火炸药技术发展动向分析[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3):1-5.
- PENG C Z, FAN X P, REN X X, et al. Analysis on recent trends of foreign propellants and explosives technology development[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(3):1-5.
- [50] 赵发锐. 辽宁庆华公司发展战略研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
- ZHAO F R. Research on developing strategy of Liaoning QH company [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [51] 刘冠颖, 方玉诚, 郭辉进, 等. 微反应器发展概况[J]. 当代化工, 2010, 39(3):315-318.
- LIU G Y, FANG Y C, GUO H J, et al. Development of microreactors [J]. Contemporary Chemical Industry, 2010, 39(3):315-318.

Additive Manufacture Technology and Its Research Status and Development in Propellant and Explosive Industry

ZHANG Liang, LIU Jing, ZHANG Zhe, MA Ning, SUN Xiaopeng

Institute of Xi'an Modern Chemistry Research, China North Industries Group Corporation (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Concept and characteristic of additive manufacture was introduced at first, and its generation and development history were reviewed and summarized. Secondly, application status and achievement were recommended in national defense and military industry. What's more is that additive manufacture research status at home and abroad in propellant and explosive field was emphasized. Then, domestic phased results in propellant grain additive manufacture at present were introduced. There is invisible difference between home and abroad in propellant and explosive additive manufacturing field. Finally, the development direction of propellant and explosive additive manufacture was forecasted in the future years, including advanced propellant and explosive charge, propellant and explosive integrated manufacture, and propellant and explosive micro special equipment manufacture.

[KEYWORDS] additive manufacture technology; development history; defense and military; propellant and explosive; research status; development direction