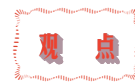


DOI: 10.11943/CJEM2019065

文章编号: 1006-9941(2019)06-0445-03



## 含能材料增材制造技术——新兴的精密高效安全制备技术

**含能材料增材制造技术**(俗称“3D打印技术”)是以数字模型为基础并通过软件与数控系统将专用含能材料浆料逐层累加成实体物品的数字化制造技术,是含能材料制备领域的前瞻性工艺技术。它能快速精密制备常规和特定结构的火炸药装药、引信、火工品、活性材料战斗部壳体等含能部件,具有设计灵活、按需打印、成本低、安全性好、研发周期短等特点。与含能材料的熔铸、浇铸和压装等传统减材加工模式不同,增材制造技术可用于制备复杂药型结构、能量密度递变的高能炸药装药和固体推进剂药柱以及高堆积密度和多孔发射药等火炸药装药,实现微电子引信、微机电系统、微小型弹药等的微小用量含能材料的精密装填。增材制造技术有多种方法,如喷墨打印、激光熔化沉积、熔融固化、光固化等方法(*Samuel Emery. Energetic material additive manufacturing*[R]. *NSWC-IHEODTD 16-061*, 2016)。其中,喷墨打印技术是含能材料最常用的增材制造方法,按喷嘴数量可分为单喷嘴和多喷嘴两大类,当前含能材料领域采用较多的是单喷嘴和双喷嘴两种;按作用方式又可分为喷射、挤注、振动、压电等,目前喷射方式在含能材料中的应用较为广泛。

**近年来**,含能材料增材制造技术研究活跃。美陆军先后设立“先进制造创新”、“先进含能材料研究”等项目,支持下一代弹药用含能材料增材制造技术开发。美空军研究实验室启动柔性电子与通用弹药制造项目,支持增材制造用含能材料的配方研发,并研究利用直接金属激光烧结的增材制造技术优化侵彻战斗部结构以减轻战斗部的重量(*Provchy Z A, Palazotto A N, Flater P. Additively manufactured perforators*[C]. *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2017)。美海军设立小企业创新项目,支持铝热剂、金属间化合物、金属-准金属体系等活性结构材料的增材制造技术研究;美国普渡大学启动纳米铝热剂和高能固体推进剂的增材制造技术研究项目。美国国防威胁降低局通过小企业技术转让计划提出,要开发和验证利用增材制造技术快速制造含能材料载荷和弹药的能力(*Department of Defence. Rapid development of weapon payloads via additive manufacturing*[R]. *DTRA16A-001*, 2016)。此外,英、澳、印等国也积极跟进研究。澳大利亚启动含能材料增材制造技术联合研发项目(*Jackson B. Australian researchers launch explosive \$2 million 3D printer materials partnership*[EB/OL]. (2018-03-05 [2019-04-26]. <http://3Dprintingindustry.com/news/australian-researchers-launch-explosive-2-million-3d-printer-materials-partnership-129997/>),印度科学研究院建有含能材料增材制造研究实验室并启动含能材料增材制造技术研发项目,英国克兰菲尔德大学、荷兰代尔夫特理工大学等高校设立博士点研究项目,以推动含能材料增材制造技术开发。

**迄今**,含能材料增材制造技术研发已取得一些进展。美国已成功采用单喷嘴喷墨打印技术实现微小型弹药用含能材料的精密安全制备;美国海军采用喷墨打印制得的某微型引信,直径仅为硬币大小,现已进行深海试验;美国海军水面作战中心采用单喷嘴挤注打印技术依次打印出多种炸药配方,制备出能量密度梯

变的PBX炸药( Samuel Emery. *Energetic material additive manufacturing*[R]. NSW-IEODTD 16-061, 2016)。美国国家标准与技术研究院采用压电喷墨打印技术,按需制备出 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 黑索今、 $40 \mu\text{m}$ 硝酸铵等微米级炸药颗粒( Staymates M E, Fletcher R, Verkouteren M. *The production of monodisperse explosive particles with piezo-electric inkjet printing technology*[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(12): 125114)。美国普渡大学开发出双喷嘴喷墨打印技术,可准确定量制备出性能良好的微量纳米铝热剂,其喷嘴下方的平台能够以 $0.1 \mu\text{m}$ 的精度移动,墨水控制精度可达微微升级( Murray A K, Isik T, Ortalan V, et al. *Two-component additive manufacturing of nanothermite structures via reactive inkjet printing*[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(18): 184901-5);该大学还发明了一种高粘度火炸药振动打印法,这种方法可打印粘度高达 $1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 及以上的含能材料, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下打印火炸药产品的孔隙率低于10%( Rhoads J F. *Method and apparatus for 3D printing of highly viscous materials*, WO2018089341A1[P]. 2018)。荷兰应用科学院采用紫外光固化3D打印技术制得具有纵向和径向穿孔的少量多孔发射药药粒和新型高堆积密度发射药(如图1),其开发的3D打印适用发射药基础配方组成为50%黑索今和50%惰性粘合剂( Driel C A, Straathof M, Lingen, J V. *Developments in additive manufacturing of energetic materials at TNO*[C]. *The 30th international symposium on ballistics*, 2017)。

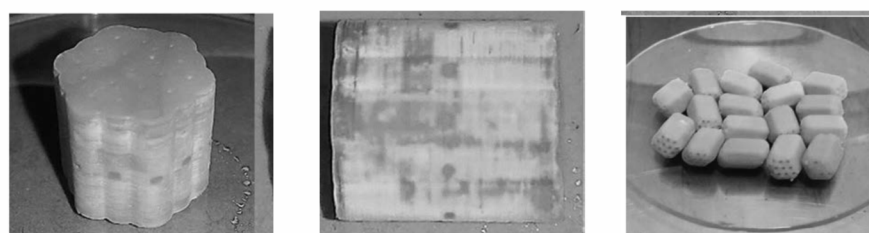


图1 荷兰采用3D打印技术制备的多孔发射药(左、中)和高堆积密度发射药(右)

印度科学研究院采用单喷嘴喷墨打印技术制得常规和特殊内孔形状的高氯酸铵/端羟基聚丁二烯/铝粉固体推进剂,并通过改变内孔形状和孔隙内填充物的种类与密度,制得能量密度递变的推进剂药柱(如图2)( Chandru R A, Balasubramanian N, Oommen C, et al. *Additive manufacturing of solid rocket propellant grains*[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2018, 34(4): 1090-1093)。

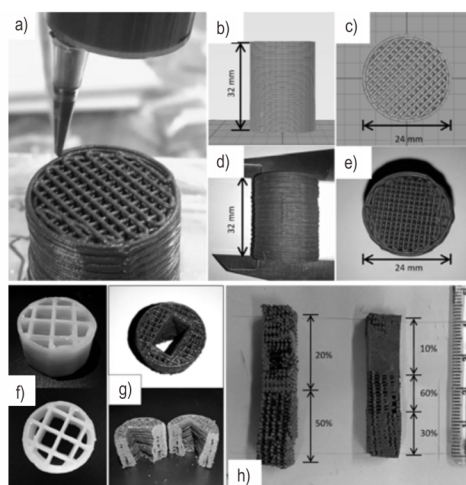


图2 印度采用增材制造技术制备的复合固体推进剂(a. 打印过程; b-c. CAD模型; d-h. 复合固体推进剂)

上述研发进展将极大地推动含能材料增材制造技术的发展,并最终实现高能量、能量释放可控火炸药的高效安全生产和微小型弹药含能材料的精密装填,满足常规和新型智能武器弹药的新要求。但是,含能材料增材制造技术作为一项新兴的精密高效安全制备新技术,当前还处于探索与研发初期阶段,尚未实现工业化制备,有关火炸药适用配方、墨水控制等关键技术亟待攻关;适于增材制造的含能材料,对于其颗粒度大小、可纳米化、有机粘结剂和其他低密度聚合物的用量等都有一定的特殊要求,需要对现有火炸药配方调整后方可使用。有关科研人员可优先开展双喷嘴喷墨打印技术用于制备军械可燃元器件、层状发射药、复合固体推进剂药柱、PBX炸药装药、纳米铝热剂等的研究。

**总之**,增材制造技术具有传统减材工艺所无法比拟的诸多优势,目前已在金属材料、非金属材料、生物材料成形等方面实现3D打印能力,预示着在含能材料制造领域也极具有发展潜力。含能材料增材制造作为一种可重复设计和快速成形的高效工具,正在改变火炸药和弹药行业的制造模式,将对敏捷制造发展产生重大影响,并提供前所未有的灵活性。当前,含能材料增材制造技术的可行性与独特优势业已得到验证,已初步实现纳米铝热剂(Murray A K, Isik T, Ortalan V, et al. Two-component additive manufacturing of nanothermite structures via reactive inkjet printing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(18): 184901-5)、30 mm×100 mm复杂内孔形状燃速可控固体推进剂(Chandru R A, Balasubramanian N, Oommen C, et al. Additive manufacturing of solid rocket propellant grains[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2018, 34(4): 1090-1093)等的小尺寸制备,但尚未实现大尺寸炸药、发射药、固体推进剂等多类含能材料的规模化制备。未来,增材制造适用含能材料的配方设计、工艺参数优化、工艺规模放大以及含能材料-包覆层-壳体的一体化制备将是各国研发的重点。含能材料增材制造技术一旦获得应用,将颠覆火炸药制造业的发展模式,实现含能材料的精密高效安全制备。

彭翠枝

北方科技信息研究所,北京 100089

(责编:姜梅)