

文章编号: 1003-1480(2024)04-0045-10

# 火工品装药增材制造技术研究现状与发展趋势

辛浩月, 闫一涵, 任慧, 陈永进

(北京理工大学 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京, 100081)

**摘要:** 增材制造技术是基于数字化加工的新一代先进快速成型技术, 因其在火工品装药中能够有效发挥高精度、高安全和自动化连续生产的优势而受到广泛关注。本文介绍了喷墨打印技术、墨水直写技术和基于光固化的墨水打印技术的工作原理和特点, 综述了这3种增材制造技术在火工品装药领域的研究现状, 分析了相关技术的发展趋势, 以期之火工品装药以及武器装备的数智化发展提供参考。

**关键词:** 火工品装药; 增材制造; 喷墨打印; 墨水直写; 数智化

**中图分类号:** TJ450.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.04.006

## Research Status and Development Trends of Additive Manufacturing Technology for Pyrotechnic Charges

XIN Hao-yue, YAN Yi-han, REN Hui, CHEN Yong-jin

(State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

**Abstract:** Additive manufacturing technology is a new generation of advanced rapid prototyping technology based on digital machining, which has attracted widespread attention due to its advantages of high precision, high-security and automated continuous production in pyrotechnic charges. This paper introduces the working principles and characteristics of inkjet printing technology, direct ink writing technology and ink printing technology based on light curing. It summarizes the current research status of these three additive manufacturing technologies in the field of pyrotechnic charges, analyzes the development trends of related technologies, and provides reference for the digital intelligence development of pyrotechnic charge and weapon equipment.

**Key words:** Pyrotechnic charges; Additive manufacturing; Inkjet printing; Direct ink writing; Digital intelligence

面对武器装备快速研制和列装的迫切需求, 推动军工制造业数智化转型, 以系统提升全链条、全寿命周期的制造能力是我国军工制造业的发展重心之一<sup>[1]</sup>。火工品作为武器系统的始发能源和最敏感部件, 现有的装药配方、结构设计、加工工艺、功效评价等方面的能力水平已不能满足智能化、信息化、小型化等发展需求, 而数智化制造是提升火工品生产效率、产品创新能力和质量控制能力的重要途径, 必须通过新技术来快速迭代新产品, 以适应快速变化的战场形势<sup>[2-4]</sup>。火工品装药技术是涉及单元或组合火工装置及

火工系统中火工药剂的装填方法、装填工艺及作用原理的精密制造技术。与战斗部和发动机装药技术不同, 火工品装药技术涉及的药剂种类和配方很繁杂, 包括起爆药、传爆药、点火药、延期药、做功药、烟火药等; 装药尺度从亚微米到百毫米; 装药质量的跨度也非常大, 最少的仅有十几微克, 最多可达百克量级。长期以来, 我国主要采用精密压装、挤注装药、手工点涂等传统的火工品装药方法, 存在生产效率偏低、制造周期长、人机混合作业、在线危险品量大、自动化程度很低的问题, 并且装药质量和装药结构长

收稿日期: 2024-05-27

作者简介: 辛浩月(2000-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事火工品增材制造技术研究。

通讯作者: 任慧(1973-), 女, 教授, 主要从事含能材料与火工品技术研究。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2902904)。

引用本文: 辛浩月, 闫一涵, 任慧, 等. 火工品装药增材制造技术研究现状与发展趋势[J]. 火工品, 2024(4): 45-54.

期处于“黑箱”状态,缺乏数字化记录手段,一旦发生事故,很难追溯加工过程<sup>[5]</sup>。此外,传统的装药方法面临诸多技术瓶颈,如微细尺寸装药精度差、性能不稳定;装药效果严重依赖手工作业人员的装配技能<sup>[6]</sup>;新产品定型投产前需要配备大量工装模具;减材制造工艺造成大量废弃火工药剂,销毁及后处理风险高;“目测+量具”的手工检验环节隐患高,难免有漏检或者误判,等等。因此,火工品装药技术急需向装药质量可控、流程安全透明的方向发展。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术,又称为快速成型技术或3D打印技术,是以数字模型为基础,在计算机控制下通过分层制造、逐层叠加的方式来构造物体,可完成高复杂度、高精度产品的设计与制造,是集先进制造、数字制造、智能制造、绿色制造于一身的数智化制造技术<sup>[7-9]</sup>。该技术具有设计自由度高、产品研发和生产周期短、节约资源且具备生产可预测性等优势<sup>[10]</sup>。并且,其适用材料种类繁多,包括塑料、金属、陶瓷和复合材料等,材料利用率高且功能丰富,广泛应用于航空航天、医疗、汽车等行业<sup>[11]</sup>。最重要的是,因其逐点逐层的制造方式,增材制造技术具备高度柔性和适应性,在复杂结构件的制造领域具有不可替代的优势<sup>[12]</sup>。

近年来,增材制造技术在国防领域的应用呈持续快速发展态势。其中,喷墨打印(Inkjet printing)、墨水直写(Direct ink writing, DIW)以及基于光固化的墨水打印技术等已在火工品装药领域有所应用。相关技术避免了浇注、熔铸、压制等传统装药技术柔性差、人机无法真正隔离等问题,并且可以拓展和创新火工品装药结构,制造出复杂截面非对称外形的产品<sup>[13-14]</sup>。本文介绍了喷墨打印、墨水直写以及基于光固化的墨水打印技术的工作原理及特点,综述了其在火工品装药领域的研究现状,并分析了相关技术的发展趋势,以期对火工品装药的发展提供参考。

## 1 增材制造技术

### 1.1 喷墨打印技术

喷墨打印技术基于液滴喷射原理,将打印材料制

成的油墨以液滴的形式在喷射、挤注、振动、压电等作用下打印至指定位置并固化,逐点打印整层后,逐层堆叠,从而实现打印材料在基底上的薄膜沉积和图案化。该技术具有高效率、高精度、低成本、柔性制造等优点,但对打印材料的流变性和表面张力的要求较高,且需要支撑材料<sup>[15]</sup>。在火工品装药领域,喷墨打印技术主要用于爆炸序列、微装药和集成芯片(MEMS),将火工药剂、粘结剂和功能助剂溶解或分散在易挥发或低沸点的有机溶剂中制成油墨,按照制定图案喷射出液滴,在基底上通过溶剂挥发或光固化形成所需要的装药结构。

### 1.2 墨水直写技术

墨水直写技术是在计算机控制下,使存储于料筒中的油墨在机械压力或气动压力的作用下从喷头连续挤出,依据预设打印路径在基底上预成型,然后进行相应的后处理即可得到三维实体构件。与喷墨打印技术相似,DIW技术同样需将原料配制为油墨并从喷头挤出使之成型,区别在于喷墨打印的油墨为低粘度和低模量的全液体或悬浮液,呈液滴状挤出;而墨水直写的油墨多为高粘度浆料,通过持续施压连续挤出线性材料<sup>[8]</sup>。此外,DIW技术对设备的要求和制造成本较低,与喷墨打印相比喷嘴直径更大,因此打印效率更高,制造灵活;并且其原材料适用范围广,既可用于打印微观材料,也可用于打印宏观材料,如复合材料、金属、聚合物、陶瓷、水凝胶等。因此,DIW是研究最多的含能材料打印技术,主要用于爆炸逻辑网络和MEMS爆炸序列装药。

### 1.3 基于光固化的墨水打印技术

基于光固化的墨水打印技术是将光聚合固化技术(Vat photopolymerization)与喷墨打印或DIW技术相结合,将打印装置、光固化系统和光固化油墨整合在一起,从而实现功能性3D打印的技术<sup>[16]</sup>。实现光固化的关键是光敏树脂,光敏树脂由光敏预聚体、活性稀释剂、光引发剂和光敏剂组成。其固化原理是:在一定波长的紫外光(Ultra violet, UV)照射下,光引发剂激发形成阳离子或自由基,引发光敏树脂中含有活性基团的自由基或阳离子立刻发生聚合反应,散乱的高分子结合成长长的交联聚合物高分子,在键结

时, 聚合物由胶质树脂转变为坚硬物质, 从而实现快速固化成型。光固化墨水打印技术具有很高的成型精度和成型效率, 无需复杂的后处理工艺, 但由于大多数光敏树脂是非含能组分, 合理调控光敏树脂含量是保证油墨能量效益的前提。光固化油墨打印技术同样应用于火工品的微装药中。

## 2 增材制造技术在火工品装药中的研究现状

### 2.1 喷墨打印技术研究现状

喷墨打印油墨的可打印性受到油墨的物理性能和喷射成型工艺参数的影响。油墨的物理性能包括粘度、表面张力、密度、润湿性及溶质分子的形态(如颗粒、聚合物、晶体)等, 喷射成型工艺参数包括喷嘴直径、基板温度、微滴间距等<sup>[7, 15]</sup>。Murray A K 等<sup>[17]</sup>制备了纳米铝(n-Al)/纳米氧化铜(n-CuO)/聚乙烯吡咯烷酮(PVP)/二甲基甲酰胺(DMF)悬浮型纳米铝热剂油墨, 探究了 MicroDrop MD-K-130 (喷

嘴直径为 70  $\mu\text{m}$ )、MicroFab MJ-AL-01 (喷嘴直径为 80  $\mu\text{m}$ ) 和 BioFluidix PipeJet P9 (喷嘴直径为 500  $\mu\text{m}$ ) 3 种压电喷墨打印系统打印纳米铝热剂的液滴形成可靠性、高固含量油墨的鲁棒性以及成型样品的点火传播能力。3 种压电喷墨打印系统及液滴形成情况如图 1 所示。研究表明, MicroDrop 系统打印的液滴体积为 20 ~ 180 pL, 油墨粘度要求小于 20 mPa·s, 液滴能可靠形成, 具备可重复打印性, 适用于低固含量含能材料微米级精度的小规模沉积, 但堵塞和清洁问题限制了该系统的实际应用价值。MicroFab 系统打印的液滴体积为 20 ~ 300 pL, 油墨粘度也要求小于 20 mPa·s, 适合沉积用于电路设计的金属油墨, 例如金属桥膜, 但由于喷嘴口出现润湿效应, 无法形成可靠的液滴。BioFluidix 系统打印的液滴体积为 10 ~ 60 nL, 油墨粘度范围更大, 为 1 ~ 200 mPa·s, 因此含能材料适用范围广, 且点火试验表明 BioFluidix 系统打印的纳米铝热剂能够稳定燃烧, 但由于沉积发生在纳升级而不是皮升级, 阻止了该系统在小规模空间内的应用。

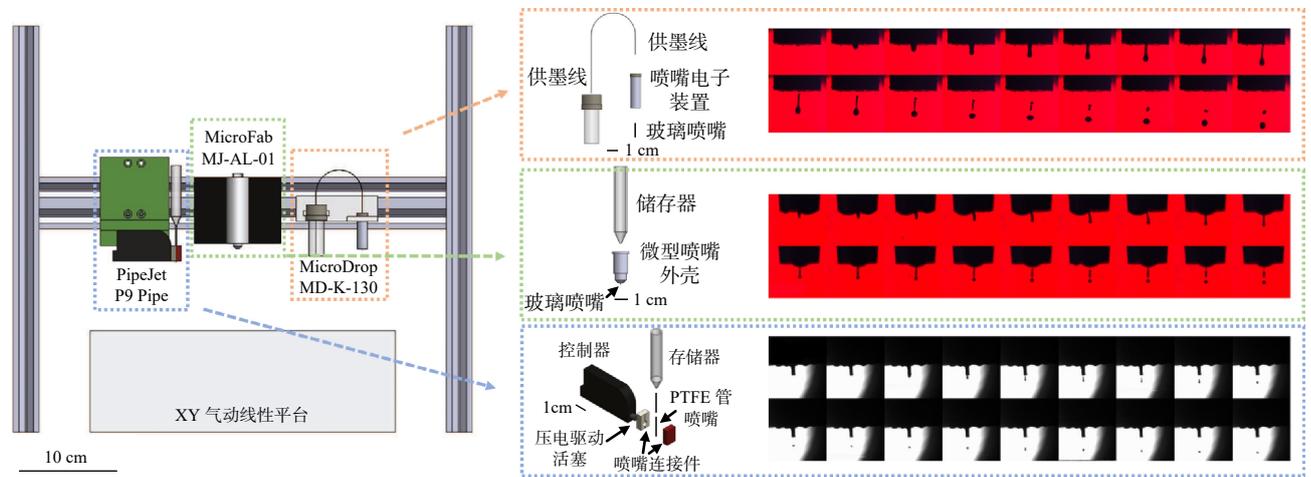


图 1 3 种压电喷墨打印系统及液滴形成情况<sup>[17]</sup>

Fig.1 Three piezoelectric inkjet printing systems and droplet formation

Ihnen A C 等<sup>[18]</sup>将环三亚甲基三硝胺(RDX)分散在醋酸纤维素丁酸酯(CAB, 溶解在 DMF 中)基体中制得全液体型油墨, 通过直接相变可得到宏观为纳米尺度的结构。采用 DIMATIX DMP-2800 喷墨打印机, 理想油墨的粘度范围为 10 ~ 12 mPa·s, 表面张力范围为 28 ~ 33 mN·m<sup>-1</sup>, 因此粘结剂和溶剂分别选用 CAB 和 DMF, 全液体 RDX-CAB 墨水的粘度和表

面张力为 10 mPa·s 和 37 mN·m<sup>-1</sup>, 溶液中溶解的 RDX 达到 10 wt%。实验过程中基板在 21 ~ 60 °C 范围内加热, 单个液滴的间距为 5 ~ 254  $\mu\text{m}$ 。不同基板温度下晶体生长情况及 XRD 如图 2 所示。实验结果表明喷墨工艺参数可以改变含能晶体的形态, 在室温下(基板温度为 21 °C), 由于 DMF 溶剂缓慢挥发, 液滴在基板上凝聚并形成墨水池, 即喷墨打印材料中常见的

“咖啡环”结构，通过提高基板温度，“咖啡环”结构的形成得到显著缓解，但 RDX 枝晶更加突出。将墨滴间距从  $10\ \mu\text{m}$  增加至  $75\ \mu\text{m}$ ，将喷嘴与基板之间的距离从  $1\ \text{mm}$  增加至  $15\ \text{mm}$ ，晶体成核和生长被限制在蒸发墨滴的微流体范围内，成功产生了纳米级晶体形态。

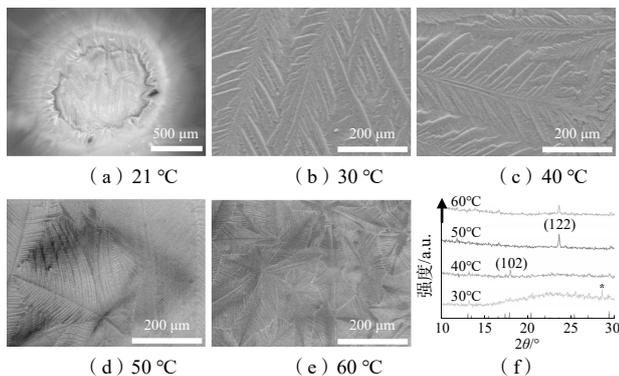


图2 不同基板温度下晶体生长情况及 XRD<sup>[18]</sup>

Fig.2 Crystal growth at different substrate temperatures and XRD

此外，火工品装药性能还与配方自身的性质有关。目前文献报道的喷墨打印油墨主要应用了六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20)、环四亚甲基四硝胺 (HMX)、RDX、3, 4 - 二硝基呋喃基氧化呋喃 (DNTF)、纳米铝热剂等含能材料，粘结剂主要采用氟碳树脂 (FEVE)、聚乙烯醇 (PVA)、聚乙烯吡咯烷酮 (PVP)、海藻酸钠 (SA)、丙烯酸树脂 (AE)、硝化棉 (NC)、乙酸丁酸纤维素 (CAB)、聚二甲基硅氧烷 (PDMS)、乙基纤维素 (EC)、缩水甘油叠氮化物聚合物 (GAP)、氟橡胶 (Viton) 等，相关文献重点研究了油墨的流变性、成型样品的形貌、密度、感度及能量特性。

为解决微传爆药剂的微尺度释能问题及微尺度装药问题，闫晓虹等<sup>[19]</sup>以微纳米 HMX 为主体炸药，以 FEVE 的乙酸乙酯溶液和 PVA 的水溶液为双组分粘结剂体系，制得 HMX 基炸药油墨，通过喷墨打印得到的成型样品密度为  $1.5326\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，达到最大理论密度 (TMD) 的 83%；撞击能、摩擦能分别为  $7\ \text{J}$  和  $144\ \text{N}$ ，与原料相比感度降低；爆速为  $7076\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；爆轰临界尺寸为  $1\ \text{mm}\times 0.087\ \text{mm}$ ，说明喷墨打印的 HMX 基成型样品在满足微尺度释能要求的情况下也兼顾了一定的安全性要求。

此外，为测试喷墨打印装药在微小型火工品中的点火情况，汝承博等<sup>[20]</sup>制备了 n-Al/n-CuO/NC 油墨，运用喷墨打印技术将纳米铝热剂打印到金属桥膜和半导体桥塞上，点火试验表明含能油墨可以被金属桥膜点燃，但是不能持续燃烧；半导体桥塞上裸露的纳米铝热剂不能被点燃；有管壳约束时纳米铝热剂被点燃，并出现燃烧转爆轰现象，这意味着可以取消半导体桥雷管中的起爆药，进一步实现火工品的微型化。

钱力等<sup>[21]</sup>进一步探究了喷墨打印微装药发火，在具有核壳结构的 Al/Cu<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)(OH)<sub>3</sub> 溶胶中加入 NC 及溶剂制成含能油墨，含能油墨通过喷墨打印在 Cr 金属桥上，采用电容放电方式激发 Cr 金属桥，发火情况如图 3 所示。试验结果表明装药可以在 Cr 金属桥电流通电作用下发火，发火时间持续约  $0.8\ \text{ms}$ 。

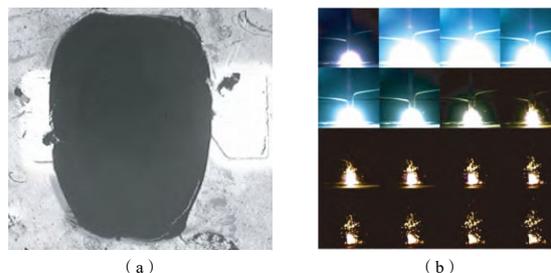


图3 Cr 金属桥上的喷墨打印装药及发火情况<sup>[21]</sup>

Fig.3 Inkjet printing charge on Cr metal bridge and firing states

## 2.2 墨水直写技术研究现状

关于 DIW 技术在火工品装药领域的研究主要围绕油墨配方的优化设计。可打印的油墨配方不仅要满足直写技术的流变性要求，还要保证较高的固含量 (大于  $80\ \text{wt}\%$ )，以达到装药的能量需求。

为研究油墨的流变性和可打印性，Sweeney M 等<sup>[22]</sup>制备了含有季戊四醇 (PET) 颗粒和聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 粘合剂的模拟含能油墨，固含量为  $80\ \text{wt}\%$ ，流变性测试结果表明油墨为具有剪切变稀特性的非牛顿流体，在低剪切速率下具有很高的粘度 ( $1\times 10^6\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ )，表明打印时需要巨大的压力才会产生流动，会使打印变得困难；而在高剪切速率下，油墨向流体过渡，打印会变得轻松。Clark B 等<sup>[23]</sup>研究了铝热剂含能薄膜的流变性、浆料粘弹性和薄膜能量传播特性，将铝 (Al)、三氧化二钼 (MoO<sub>3</sub>) 和高氯酸钾 (KClO<sub>4</sub>) 悬浮在由丙酮溶剂和丙烯腈丁二烯苯乙

烯 (ABS) 粘合剂组成的溶剂-粘合剂体系中,流变学结果表明浆料表现出非牛顿剪切稀化行为;对浆料粘弹性的研究表明该配方具有高弹性,因此可以诱导薄膜中导致裂纹形成的薄片;燃烧试验表明粘结剂浓度为 20 wt% (即固含量为 80 wt%) 的火焰速度最高,为  $1.21 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 能量密度约为  $5\,737 \text{ kJ/kg}$ 。

为进一步研究粘结剂对油墨流变性和可打印性的影响,Wang 等<sup>[24]</sup>开发了一种固含量为 90 wt% 的纳米铝热剂配方,将聚偏氟乙烯 (PVDF) 和羟丙基甲基纤维素 (HPMC) 2 种聚合物粘结剂加入高固含量 Al/CuO 油墨中,前者兼为氧化剂,后者兼为增稠剂,可以形成凝胶,油墨的凝胶化过程及流变性如图 4 所示。流变性测试发现 HPMC 在油墨的凝胶化中起着关键作用。

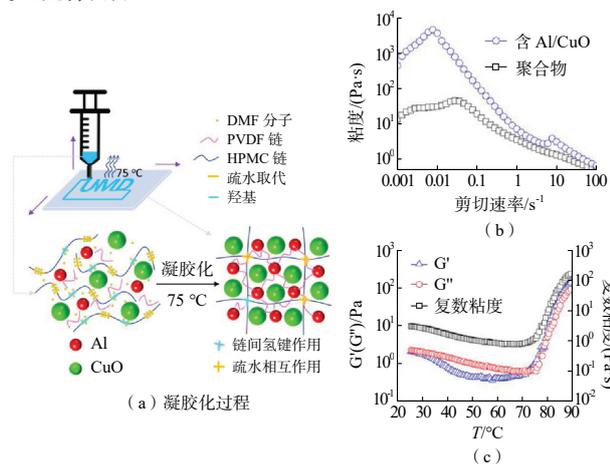


图 4 油墨凝胶化过程及流变性<sup>[24]</sup>

Fig.4 Gelation process and rheology of ink

Woods H 等<sup>[25]</sup>研究了聚合物粘结炸药 (PBX) 基油墨在 PVP/甲醇粘结剂体系和双酚 A-甲基丙烯酸缩水甘油酯 (Bis-GMA) /二甘醇二甲基丙烯酸酯 (TEGDMA) 粘结剂体系下的流变性和可打印性随粘结剂分子量和固含量的变化,前者采用溶剂蒸发的固化方式,后者采用紫外光 (UV) 固化。研究表明,在这 2 种情况下,油墨均可以调整到可打印的粘度,范围为  $1\times 10^4 \sim 1\times 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 并打印为宽度一致的线条以及圆盘形式的三维结构。对于高分子量聚合物粘结剂,30 vol% PVP 在甲醇溶液中,PVP 分子量对粘结剂粘度和油墨粘度均有较强影响,这与 UV 固化粘合剂体系 Bis-GMA/TEGDMA 相反,在 Bis-GMA/TEGDMA 体系中,单体的比例仅影响粘合剂的粘度,

而固含量决定着油墨的粘度。在这 2 种情况下,粘度均随着固体颗粒体积分数的增加而增加,最高可达约 67 vol%, 表明高固含量含能油墨设计的可行性。

在以猛炸药为核心组分的微传爆药剂中,研究人员将 CL-20、HMX、RDX、DNTF、季戊四醇四硝酸酯 (PETN)、2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物 (LLM-105) 等火炸药与墨水直写技术相结合,不断优化含能油墨配方,以期解决微传爆药剂在微装药下的微尺度传爆问题。其中,CL-20 因为具有极高的能量密度和较小的爆轰临界尺寸,用作微传爆药剂的主装药较为有利。

2005 年,美国 Ihnen A 等<sup>[26]</sup>配制了代号为 EDF-11、以 CL-20 为主要炸药的炸药油墨 (CL-20/EC/PVA/H<sub>2</sub>O),采用 DIW 技术将其填入 MEMS 引信装置中并验证了传爆能力,于 2010 年将其应用在美国陆军某弹药的传爆序列中。此后,国内外学者相继对 DIW 炸药油墨的配方开展研究,实现了微米级装药,其中一些炸药油墨已成功应用在爆炸网络中。

2018 年,Li 等<sup>[27]</sup>以亚微米 CL-20 为本体炸药,PVA 水溶液/Viton 乙酸乙酯溶液为粘结剂体系,通过 DIW 得到固含量为 88%、致密性良好、无明显气孔的样品,密度为  $1.71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 达到 89% TMD,撞击感度  $H_{50}=40.1 \text{ cm}$ ,比亚微米 CL-20 ( $H_{50}=34.2 \text{ cm}$ ) 和原始 CL-20 ( $H_{50}=13.0 \text{ cm}$ ) 撞击感度低,CL-20 的晶型变化不大,爆轰速度为  $8\,079 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,爆轰临界尺寸在  $1 \text{ mm}\times 0.17 \text{ mm}$  左右。

为解决粘结剂体系稳定时间短、含能油墨成型试样临界尺寸大的缺点,2023 年,Han 等<sup>[28]</sup>设计了一种以 PVA 水溶液为水相,FEVE 乙酸乙酯溶液为油相,并加入改性 TDI 的油包水乳液粘结剂。将亚微米 CL-20 加入粘结剂体系制备了固含量为 90% 的 CL-20 基炸药油墨,测试结果表明成型试样表面颗粒分散均匀,呈蜂窝状结构;CL-20 炸药在炸药油墨中的晶型没有变化,成型试样的撞击和摩擦感度分别比亚微米 CL-20 低 1 J 和 32 N,成型试样的爆轰速度为  $6\,655 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,爆轰临界尺寸和爆轰临界厚度分别为  $1\times 0.0078 \text{ mm}$  和  $0.1 \text{ mm}$ ,可实现  $90 \sim 160^\circ$  的临界爆轰转角。同年,Li 等<sup>[29]</sup>以亚微米 CL-20 为主要炸药,PVA 水溶

液和酚醛树脂 (PF) 乙醇溶液为双组分粘结体系, 设计了一种小临界尺寸炸药油墨, 结果表明成型试样内部颗粒分布均匀, 无裂纹和断裂, CL-20 晶型保持  $\epsilon$  型, 机械感度和热稳定性降低, 固含量 92% 的炸药油

墨成型后, 爆轰速度达到  $7\,281\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 临界爆轰尺寸为  $1\times 0.027\text{ mm}$ , 爆轰角度可达  $160^\circ$ , 表现出优异的微尺寸爆轰性能。CL-20 基炸药油墨 DIW 打印示意图、成型样品形貌及爆轰临界尺寸测试结果见图 5。

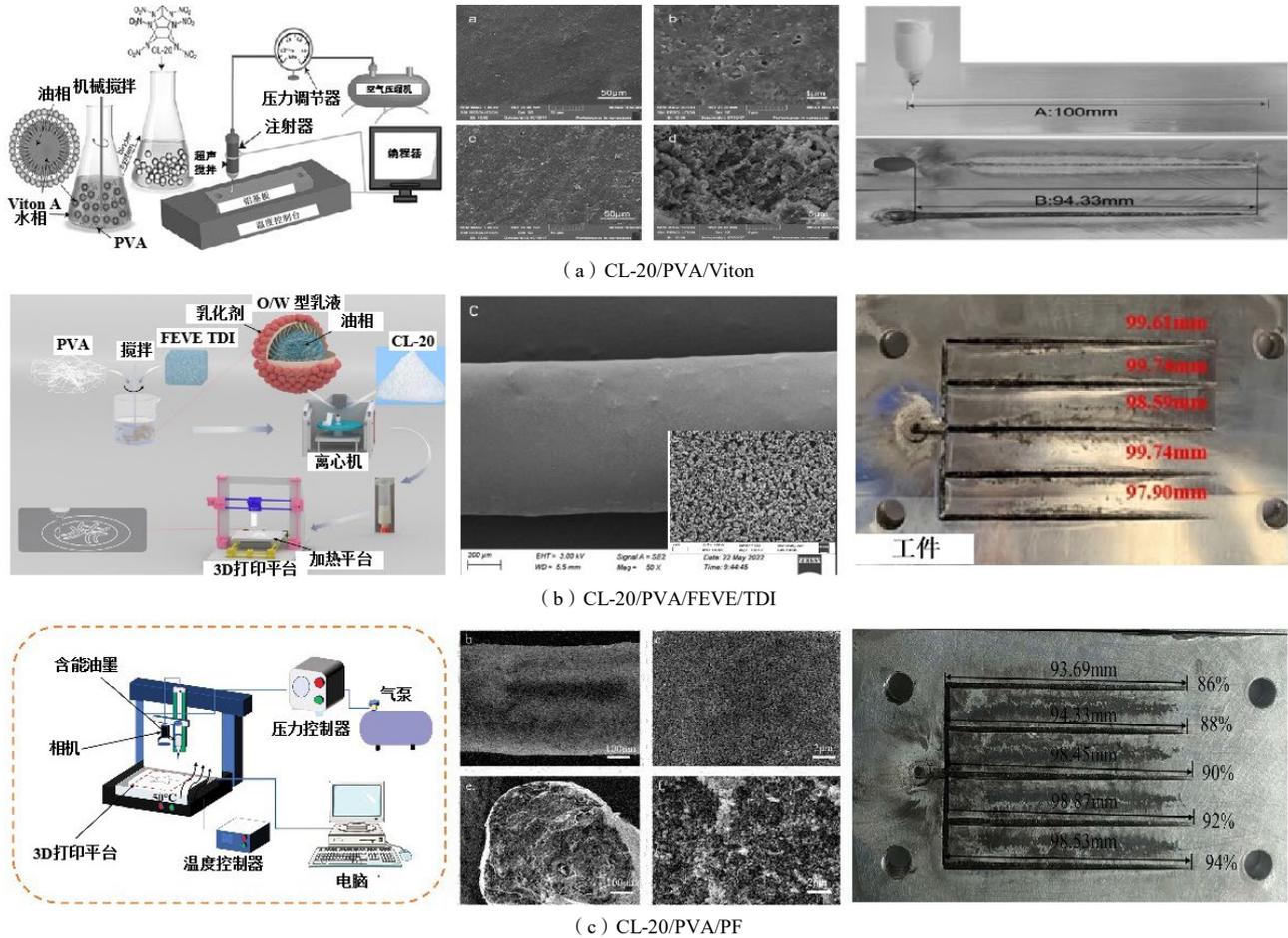


图 5 CL-20 基炸药油墨 DIW 打印示意图、成型样品形貌及爆轰临界尺寸测试<sup>[27-29]</sup>

Fig.5 DIW printing schematics, morphology of molded samples, and detonation critical size tests of CL-20-based explosive inks

但由于 CL-20 感度较高, 安全性较差, 研究人员继续研制能够代替 CL-20 的高能量、低爆轰临界尺寸、高安全性的炸药油墨。2018 年, Xu 等<sup>[30]</sup>制备了 DNTF/NC/Viton 炸药油墨, 通过直写成型的 DNTF 基复合材料密度为  $1.785\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 达到 93.16% TMD, 撞击感度  $H_{50}=38.1\text{ cm}$ , 与原始 DNTF 相比, 所得样品具有较低的撞击感度和较高的热稳定性。此外, 样品还具有优异的爆轰性能, 爆速为  $8\,580\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 爆轰临界尺寸约为  $0.01\text{ mm}$ , 与之前报道的 CL-20 基炸药油墨相比, 具有更好的能量特性和安全性。

2022 年, Cai 等<sup>[31]</sup>以 LLM-105 为主体炸药, 以含氟聚合物 ( $\text{F}_{2311}$ ) /端羟基聚丁二烯 (HTPB) /癸二酸二辛酯 (DOS) /甲苯二异氰酸酯 (TDI) 为粘结剂

体系, 采用墨水直写技术制备了 84 wt%、86 wt%、88 wt% 3 种固含量的含能油墨, 所得样品的撞击感度  $H_{50}=110.1\text{ cm}$ , 低于原始 LLM-105 ( $H_{50}=52.2\text{ cm}$ ) 和亚微米 LLM-105 ( $H_{50}=71.4\text{ cm}$ ), 当 LLM-105 含量为 88% 时, 密度为  $1.79\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 达到 95% TMD, 爆轰速度和爆轰临界尺寸分别为  $7\,771\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 。与 CL-20 基炸药油墨相比, LLM-105 基炸药油墨在微传爆方面具有优异性, 且具有更好的撞击感度。这种基于 LLM-105 的含能油墨将是小型爆炸网络装药的候选。

2023 年, Han 等<sup>[32]</sup>以亚微米 HMX 为主要炸药, 聚乙烯醇 (PVA) 水溶液/氟碳树脂 (FEVE) 乙酸乙酯溶液乳液为粘结剂体系, 制备了固含量为 88%、

90%、92%和94%的炸药油墨。其中固含量为90%的炸药油墨打印适应性最好,成型试样表面光滑,内部颗粒分散均匀,HMX晶型( $\beta$ 型)未改变。感度方面,与原始HMX相比,打印样品的临界撞击能量和临界摩擦力分别提高了114%和100%,与基于CL-20的爆炸性油墨打印样品<sup>[33]</sup>相比,临界撞击能量增加了67%,表明打印样品在机械感度下具有较高的安全性。打印样品的爆轰速度为 $6\,902\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,爆轰临界尺寸为 $1\times 0.095\text{ mm}$ ,稳定爆轰的拐角不超过 $120^\circ$ 。

### 2.3 基于光固化的墨水打印技术研究现状

国内外对于光固化墨水打印技术的研究主要集中在光敏树脂的设计及合成、打印工艺参数和产品应用3个方面。2015年,李静<sup>[34]</sup>设计并合成了含能预聚物单体以及含能单体,利用NC调节粘度,采用超声混合法制备含能油墨,通过喷墨打印分别在硅板、损坏的半导体桥以及完好的半导体桥基底上打印含能图形,经过UV固化后成功制得含能薄膜。通过点火试验证明含能薄膜能够成功实现发火,为点火或起爆火工品的发展带来新的突破。

2019年,Guo等<sup>[35]</sup>采用CL-20为主体炸药,以聚氨酯丙烯酸酯(PUA)为粘结剂,选用2,4,6-三甲苯甲酰基二苯基氧化膦(TPO)为光引发剂,溶剂使用乙醇,通过UV固化墨水直写技术制备了CL-20基UV固化复合材料。测试了样品的固化速率,结果如表1所示。由表1可见,CL-20基UV固化炸药油墨进行UV固化3 min后,在7 min内完成固化过程,硬度达到2H,从7 min到12 h,硬度保持不变。通过XRD测试结果显示CL-20的晶型没有变化,表明UV固化不会对CL-20晶型造成影响。

表1 UV固化后样品硬度随时间的变化<sup>[35]</sup>

时间	1 min	3 min	5 min	7 min	1 h	5 h	12h
硬度	2B	2B	HB	2H	2H	2H	2H

为了提高沟槽装药的一致性和密度,降低刚性多点起爆爆炸网络的起始同步性误差,2021年,Li等<sup>[36]</sup>制备了CL-20基UV固化炸药油墨,由42 wt%的亚微米CL-20、55.4 wt%的粘结剂体系(包括2.0 wt%的NC和53.4 wt%的乙酸丁酯)和2.6 wt%的UV固化树脂组成,通过DIW技术和精确压力加载,将装

药密度提高到 $1.890\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,有效地提高了沟槽通道与输出端( $\rho_0=1.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )之间的装药密度一致性,并将网络的起始同步误差降低到62 ns。该网络可以启动形状良好、横向偏移小的喷射弹装药(JPC),这意味着网络启动能力和同步性满足了JPC聚能装药的运行要求。

## 3 火工品装药增材制造技术发展趋势

数智化制造是新一代信息技术与先进制造技术深度融合,贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动各个环节的先进生产技术<sup>[37]</sup>。增材制造技术自带数字化基因,因其特有的逐层制造方式,是未来最有可能实现数智化的技术之一。信息交互、网络互联及智能响应是现代武器系统的鲜明特征。火工品作为装备首发能源,需要良好地匹配和兼容微电子、网络、通讯、电路、激光、人工智能等高科技平台,同时满足体积小、重量轻、加工精度高和作用可靠的要求<sup>[38]</sup>。从上述文献分析来看,火工品装药增材制造技术已基本实现数字化,但智能化程度相对较低,为满足火工品的多元化需求,未来火工品装药增材制造技术应加强数字化与智能化融合,发展趋于以下几个方面。

### 3.1 仿真驱动设计,提升研发效率

数字化仿真通过建立数字模型,模拟增材制造系统或产品在现实环境(实验平台、产线、工厂)中的行为或特性,运用模型计算分析和测试验证,优化火工品装药的配方、工艺参数及制造流程。数字化仿真主要应用在研发设计环节,具有实时性和可预测性,有效帮助制造企业提升产品质量,降低研发环节的试错成本,缩短研发周期,大幅提高产品研发效率<sup>[39]</sup>。

数字化仿真包括油墨喷(挤)出、堆叠、固化等微观过程以及装药成型的宏观过程,涉及材料参数、打印机工艺参数以及环境参数等多参数,包含温度场、压力应变场、流体动力场、化学场、热力场等多物理场。数字化仿真利用增材制造数字化加工的特点,可以将装药在宏观、微观层面上的“构效关系”转化为装药应用调控的数字信息,建立仿真模型和数据库,结合机器学习,在装药配方、结构设计、加工

工艺、产品功效等全过程实现精准控制，将输入信号和火工品装药能量相融合，在空间或时间尺度上调控燃爆能量启动时机和释放方式，实现火工品装药智能化控制。

### 3.2 在线监控检测，提高产线品控

现阶段火工品制造通过人工目视和量具进行检测，检测效率低，准确性差，检测结果稳定性不高，易出现瑕疵漏检等情况，难以满足先进生产和产品质量的要求。基于机器视觉的表面缺陷检测技术可以应用于火工品装药的数智化发展中，在提高产线品控效率的同时，解放人力，降低人工成本，避免主观因素影响检测结果的准确性和稳定性。

在火工品装药系统中，机器视觉检测系统通过安装的光源和图像传感器（CCD 摄像机）获取装药的表面图像，利用图像处理算法提取图像的特征信息，将图像信息转换成数字信号，与神经网络和深度学习算法有机结合，对表面缺陷进行定位、识别和分类等判别，进而根据判别的结果控制现场的设备执行相应的操作<sup>[40-41]</sup>。基于机器视觉的表面缺陷检测技术全程与样品无接触、对样品无损伤，是实现火工品装药自动化、智能化的有效手段。

### 3.3 个性定制生产，网络智能运维

生产线、车间、工厂的网络化建设是实现智能制造的关键之处。首先，利用信息物理系统（Cyber-physical systems, CPS），通过 MEMS 传感器、智能摄像头、智能终端等感知设备对生产节点进行状态感知与数据收集、数据处理与分析、科学决策和精准控制<sup>[42]</sup>；进而采用数字孪生（Digital twins, DT）建立与真实制造环节相连接的虚拟环境，利用采集的数字化信息及仿真模型实现虚实交互，基于生产制造的保密原则，结合 5G、物联网（Internet of things, IoT）等通信传输技术完成不同节点间低成本的高效连接，加速数据的流通和共享；最后，基于云计算（Cloud computing）和人工智能（Artificial intelligence）技术，进行低成本存储和海量数据资源处理，并通过自主学习形成一系列决策指令，以智能指导各制造环节的企业活动。

基于以上数智化技术的智能运维，能够以场景化

方式推动数智化生产线、车间、工厂建设，网络连接用户、管理人员与生产过程，管理人员根据用户的个性化需求，通过虚实交互定制化设计，迅速组织生产，从而实现低成本的柔性化生产，提高产品的生产价值，有助于打造“移动兵工厂”，满足战时火工品制造需求。

## 4 结论

目前，增材制造技术已在火工品装药中广泛应用，在油墨配方的设计优化、工艺参数的调节和装药的能源控制等方面取得了可喜的进展，但火工品装药增材制造的数智化仍处于研究探索阶段，对火工品装药过程的信息采集、数字仿真、缺陷检测、智能运维等方面仍缺乏先进技术手段的创新运用。未来，综合运用各种信息技术和智能监控检测技术，循序渐进地推动增材制造技术在火工品装药领域的数智化，是火工品装药增材制造发展的重要方向。

### 参考文献：

- [1] 郭菲, 汪滔洁, 覃文志, 等. 火工品数字化车间的概念与要求[J]. 火工品, 2023(06): 88-93.
- [2] 刘壮壮, 丁明路, 谢建新. 金属 3D 打印数字化制造研究进展[J]. 金属学报, 2024, 60(05): 569-584.
- [3] 张伟, 孙安昌, 王宏丹, 等. 德国“工业 4.0”带给火工品生产行业的启示与思考[J]. 国防制造技术, 2016(01): 30-35.
- [4] 陆兴凤. 我国制造业数智化转型面临的挑战及对策[J]. 产业创新研究, 2023(08): 22-24.
- [5] 王雪晶, 朱全松, 严尚贤. 基于点火药的火工品高精度安全自动装药技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(07): 55-57.
- [6] 聂坤亮, 朱全松, 蒋波, 等. 火工品生产自动化的影响因素[J]. 兵工自动化, 2014, 33(02): 84-86.
- [7] 杨伟涛, 肖霞, 胡睿, 等. 增材制造技术在火炸药成型中的研究进展[J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 1-11.
- [8] 姜一帆, 赵凤起, 李辉, 等. 墨水直写增材制造技术及其在含能材料领域的研究进展[J]. 火炸药学报, 2022, 45(01):

- 1-19.
- [9] 赵界强, 张有恒, 李亚婷, 等. 含能材料的 3D 打印技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2023, 21(05): 20-27.
- [10] Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing[J]. Business Horizons, 2017, 60(5): 677-688.
- [11] Ngo T D, Kashani A, Imbalzano G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2018(143): 172-196.
- [12] 董军, 杜茂华, 王晓峰, 等. 3D 打印技术在火工品和炸药中的应用研究[J]. 爆破器材, 2021, 50(04): 1-7.
- [13] 苏醒, 那青, 党丽, 等. 增材制造技术在含能材料领域中的应用[J]. 新技术新工艺, 2020(12): 26-30.
- [14] 韩嘉禾, 文明杰, 陈东平, 等. 3D 打印铝基含能材料的研究进展[J]. 火炸药学报, 2023, 46(11): 937-949.
- [15] 李春燕, 李晨阳, 李敏杰, 等. 喷墨打印墨滴成形机理及其在含能领域应用进展[J]. 含能材料, 2022, 30(09): 937-951.
- [16] 刘迎沛. 紫外光固化喷墨墨水的配方研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [17] Murray A K, Novotny W A, Fleck T J, et al. Selectively-deposited energetic materials: A feasibility study of the piezoelectric inkjet printing of nanothermites[J]. Additive Manufacturing, 2018(22): 69-74.
- [18] Ihnen A C, Petrock A M, Chou T, et al. Crystal morphology variation in inkjet-printed organic materials[J]. Applied Surface Science, 2011, 258(2): 827-833.
- [19] 闫晓虹, 徐传豪, 李千兵, 等. HMX 基 O/W 型悬浮油墨的喷墨打印成型及性能[J]. 含能材料, 2024(05): 1-10.
- [20] 汝承博, 张晓婷, 叶迎华, 等. 用于喷墨打印微装药方法的纳米铝热剂含能油墨研究[J]. 火工品, 2013(4): 33-36.
- [21] 钱力, 胡艳, 吴立志, 等. 基于核壳结构  $\text{Al/Cu}_2(\text{NO}_3)(\text{OH})_3$  的喷墨打印含能油墨的制备与性能研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(03): 1-6.
- [22] Sweeney M, Campbell L L, Hanson J, et al. Characterizing the feasibility of processing wet granular materials to improve rheology for 3D printing[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(22): 13 040-13 053.
- [23] Clark B, Zhang Z, Christopher G, et al. 3D processing and characterization of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) energetic thin films[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(2): 993-1 004.
- [24] Wang H, Shen J, Kline D J, et al. Direct writing of a 90 wt% particle loading nanothermite[J]. Advanced Materials, 2019, 31(23): 1 806 575.
- [25] Woods H, Boddorff A, Ewaldz E, et al. Rheological considerations for binder development in direct ink writing of energetic materials[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(1): 26-35.
- [26] Ihnen A, Fuchs B, Petrock A, et al. Inkjet printing of nanocomposite high-explosive materials[C]//Proceedings-14th International Detonation Symposium. IDS, 2010.
- [27] Li Q, An C, Han X, et al. CL-20 based explosive ink of emulsion binder system for direct ink writing[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(6): 533-537.
- [28] Han K, Xie Z, Deng L, et al. Design of TDI modified oil-in-water emulsion and its application in explosive ink[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2023, 48(8): e202 300 047.
- [29] Li S, Han K, Li C, et al. Design of PVA/PF/CL-20 explosive ink with small critical size and research on micro-sized detonation performance[J]. Journal of Energetic Materials, 2023: 1-19.
- [30] Xu C, An C, He Y, et al. Direct ink writing of DNTF based composite with high performance[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(8): 754-758.
- [31] Cai J, Luo G, Huang H, et al. Preparation of LLM-105-based explosive ink and its detonating transfer performance in explosive network[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(9): e202 100 313.
- [32] Han K, Feng Z, Liu Q, et al. An investigation on the microscale detonation transmission performance of HMX-based explosive ink[J]. Journal of Energetic Materials, 2023: 1-15.
- [33] 韩凯, 丁任琪, 李连强, 等. PVA/FEVE/CL-20 炸药油墨设计、直写成型及其微尺度传爆特性[J]. 含能材料, 2022, 30(09): 911-919.

- [34] 李静. 用于喷墨打印工艺的光固化含能墨水的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [35] Guo H, Xu S, Gao H, et al. CL-20 based ultraviolet curing explosive composite with high performance[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2019, 44(8): 935-940.
- [36] Li R, Li W, Guo X, et al. Preparation and performance of CL-20-based ultraviolet-curable high-explosive ink and its application in rigid explosive networks by direct ink writing[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2021(18): 86-111.
- [37] 张龙治, 鲍俊. 高温合金数字化铸造现状及发展趋势[J]. 冶金与材料, 2024, 44(01): 145-147.
- [38] 朱艳丽, 陈恒帅, 赵婉君, 等. 信息化火工品概念初步探讨[J]. 火工品, 2023(6): 49-55.
- [39] 唐毅强, 窦克勤, 蒋莹. 制造业数字化仿真发展现状及提升路径研究[J]. 新型工业化, 2024, 14(01): 12-19, 28.
- [40] 吴绍锋, 白云娇. 基于机器视觉的表面缺陷检测关键技术[J]. 农业技术与装备, 2023(10): 66-69.
- [41] 程锦锋, 方贵盛, 高惠芳. 表面缺陷检测的机器视觉技术研究进展[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(04): 967-977.
- [42] 孟德状, 杨伟东, 蔡子行, 等. 面向增材制造的数字孪生实施方法综述[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(04): 1 171-1 188.

## 2024 国际防务技术大会会议通知

《火工品》国际防务技术大会 (International Conference on Defence Technology, ICDT) 是国际化、专业化、开放性的学术交流平台, 由中国兵工学会联合相关单位共同搭建, 目的在于加强国际、国内防务技术方面的交流与合作, 洞悉防务领域的国际学术前沿动向, 扩大兵器科技工作者在世界科学界的影响, 旨在共同分享防务前沿科技研究成果, 共同追求防务科技价值理性, 共同探寻止戈之道与和平发展之路。ICDT 每两年召开一次, 已成功举办三届。每届大会规模约 600 ~ 1 000 人, 涉及领域包括特种车辆、含能材料、光电应用技术、冲击动力学 (爆炸、冲击与防护)、定向能技术、先进发射技术、自主技术、高超音速飞行技术、电子对抗、先进材料等, 往届参会人员分别来自法国、意大利、英国、德国、俄罗斯、波兰、新加坡、南非、瑞士、美国、以色列和中国等 20 多个国家。

2024 国际防务技术大会 (2024 International Conference on Defence Technology, 2024 ICDT) 暂定于 2024 年 9 月 23-26 日在西安曲江国际会议中心举行。大会设有特邀大会主旨报告、分论坛专题报告、海报展示、企业展览等学术交流活动, 现竭诚邀请各相关专业院校、企业、研究院/所的广大科技人员踊跃投稿, 积极参会。

大会主席: 杨树兴, 中国工程院院士, Defence Technology 主编, 中国

Clive Woodley, 教授, Defence Technology 执行主编, 英国

大会执行主席: 栗保明, 教授, Defence Technology 执行主编, 中国

指导单位: 中国兵器工业集团有限公司

主办单位: 中国兵工学会

联合主办单位: 中国兵器科学研究院 中国北方工业有限公司

会议网址: <https://www.icdt-conf.com/>。会议注册截止日期: 2024 年 9 月 23 日。

大会联系人: 刘莉, 010-68965141, 15811211800

孙婧, 010-68965141, 18810610599

徐颖, 010-68965141, 18201170862

王欢, 010-68968684 (中英文论文相关事宜)