

文章编号:1006-9941(2020)12-1211-10

# 含能材料领域的几类颠覆性技术进展

曾贵玉<sup>1</sup>,齐秀芳<sup>2</sup>,刘晓波<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 西南科技大学 国防科技学院, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 21世纪以来,颠覆性创新技术取得了快速发展并已渗透到许多领域,成为推动科技发展和军事变革的重要力量,也将对含能材料的发展产生深刻影响。为认识颠覆性技术对含能材料发展的影响,简介了颠覆性技术的内涵及作用,重点阐述了含能材料领域目前发展迅速的超高能化技术、纳米技术、增材制造技术和材料基因组技术等颠覆性技术,以及这些技术将对含能材料的创新发展提供的新机遇和挑战。指出未来含能材料领域的颠覆性技术将重点朝着金属氢的制备与应用、含能墨水的设计与3D打印成型、含能材料基因数据库的建立及三要素融合几个方向发展。

**关键词:** 颠覆性技术;含能材料;发展现状;综述

**中图分类号:** TJ55; O62

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019241

## 1 前言

“颠覆性技术(Disruptive Technology)”概念最早出现在美国哈佛大学商学院Christensen教授1995年出版的《Disruptive technologies: catching the next wave》一书中<sup>[1]</sup>,也称为颠覆性创新、革命性技术等,目前还无权威的统一定义。一般认为,颠覆性技术是指对现有技术体系、应用系统或行业格局产生颠覆性效果的一种技术,主要体现在功能或性能上有重大突破,强调技术应用所带来的“颠覆性效果”而不是技术本身。从属性上讲,颠覆性技术既可以是基于新概念、新原理的原始性技术,也可以是多项技术跨领域、跨学科交叉融合而产生的创新性技术<sup>[2-6]</sup>。

颠覆性技术对科技发展及产业变革的推动作用十分明显,工业革命多以颠覆性技术的出现和成熟使用为标志<sup>[7]</sup>。美英俄等强国十分重视颠覆性技术的开发和应用,将颠覆性技术作为占领经济、科技特别是国防军事制高点的重要抓手和主要途径<sup>[8-9]</sup>。美国国防部先进研究计划局(DARPA)是全球最早的颠覆性技术

规划和研究机构,被称为美军甚至全美的技术创新引擎,它将国防和军事领域的颠覆性技术描述为“抵消美国在关键作战领域优势的突破性技术”<sup>[10-11]</sup>。DARPA早期曾提出获得了互联网、隐身、GPS等多项颠覆性技术,极大促进了美国国防能力的发展和提升。近几年,DARPA又持续发布和启动了多项创新项目,武器领域主要聚焦于高动能(助推滑翔、高超声速、先进全速域发动机)、高聚能(激光、太赫兹)、高智能(量子、认知、人机互动、智能制造)等方向<sup>[12-13]</sup>,目的在于催生能“改变游戏规则”的新型武器装备。

作为国防领域的一个重要组成部分,含能材料是各类武器装备的关键毁伤和能源材料,颠覆性技术在含能材料领域的应用有望显著提升现有含能材料及武器装备的应用效能,或者催生新概念武器装备,进而形成新的作战能力和方式,因此颠覆性技术在含能材料的发展进程中必将发挥重要推动作用,跟踪含能材料领域的相关颠覆性技术动态,对我国开展相关研究具有重要参考意义。

## 2 含能材料领域的颠覆性技术

对含能材料来说,高能量、高安全、高可靠应用是其追求和发展的几大主题,传统含能材料及其研发技术在同时满足上述几个要求上已受到极大制约。结合

收稿日期:2019-09-16;修回日期:2019-10-03

网络出版日期:2020-11-11

作者简介:曾贵玉(1968-),男,研究员,主要从事微纳米含能材料研究。e-mail:guiyuzeng@caep.cn

引用本文:曾贵玉,齐秀芳,刘晓波.含能材料领域的几类颠覆性技术进展[J].含能材料,2020,28(12):1211-1220.

ZENG Gui-yu, QI Xiu-fang, LIU Xiao-bo. Progress on Several Disruptive Technologies of Energetic Materials Field[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(12):1211-1220.

国内外含能材料发展现状和颠覆性技术发展方向,含能材料领域目前需要重点关注4类颠覆性技术:超高能化技术、纳米技术、增材制造技术和材料基因组技术。

## 2.1 超高能化技术

CHON(F)类常规含能材料的能量是基于元素间形成的化学能,能量水平通常在 $10^3 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 级别。研究表明<sup>[14-15]</sup>,以 $-\text{NO}_2$ 为致爆基团的CHON类炸药的最大理论密度在 $2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右、爆炸能量极限只比环四亚甲基四硝胺(HMX)高30%左右;20世纪末期出现的六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)理论密度已经达到 $2.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、爆速达到 $9.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以看出,CHON(F)类含能材料的能量已接近理论极限,再提升潜力较小。超高能化技术是大幅度提高含能材料能量、获得超高密度材料(UHEDM)的一个可行方法,UHEDM的能量密度比常规含能材料至少高一个数量级,也被称为颠覆性含能材料<sup>[16-18]</sup>。由于其极高的能量,UHEDM不仅可促进武器的高效化和小型化,还可能改变武器毁伤方式、推动武器系统发生颠覆性变革。

获得UHEDM的超高能化技术主要有两类:一类基于化学能,另一类基于物理能。基于化学能的UHEDM典型代表是金属氢、全氮化合物和高张力键能释放材料等,其能量水平一般处于 $(10^4 \sim 10^5) \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其中金属氢和全氮化合物在当前受到了极大关注<sup>[18-20]</sup>;基于物理能的UHEDM主要是亚稳态核同质异能素、反物质材料等,其能量水平可达 $10^5 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上<sup>[19]</sup>。

金属氢可存储巨大能量且对环境无污染,是迄今所知化学能最高的爆炸物,其理论能量密度可达 $216 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ,是TNT( $4.5 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ )的40倍以上、氢氧燃料发动机能量( $10 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ )的20倍以上,理论比冲 $I_{sp}$ 可达 $1700 \text{ s}$ <sup>[21-22]</sup>,极可能成为强劲的超高密度物质和火箭推进剂。金属氢同时也是一种超导材料,在航空和国防等领域具有极大的应用前景。美国在金属氢方面开展了大量理论和实验研究,2017年起,哈佛大学Silveira团队<sup>[23-24]</sup>称其在495 GPa的高压和5.5 K的超低温条件下获得了固态金属氢,如图1所示。

2019年,Loubeyre等<sup>[25]</sup>采用一种类似“甜甜圈”环形构造的钻石压砧技术,可将实验压力升至600 GPa,并在压力425 GPa、温度80 K下观测到氢样品吸收了所有的红外辐射,表明在此条件下氢电子发生了“带隙闭合”及一级相变,成为金属氢。Xia Y等<sup>[26]</sup>利用碳纳米管的高机械强度特性,在相对低的压力(163.5 GPa)下制备了准一维的“金属氢”,并发展出

相应的理论模型。这些研究成果标志着金属氢的制备不断取得突破,制备方法多样化,所需压力条件也在不断降低。但金属氢的制备和应用条件苛刻,离实际应用还远,有很多技术和工程难题需要突破,未来研究需要重点解决金属氢的便宜及规模制备和工程应用问题。

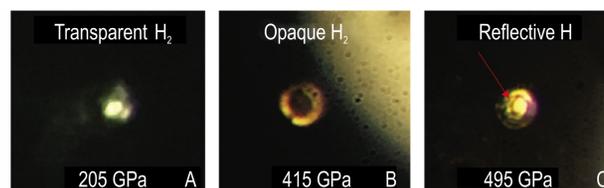


图1 不同压力下形成的氢<sup>[24]</sup>

Fig.1 Photographs of hydrogen with increasing pressure<sup>[24]</sup>

理论计算表明,随着含能分子中氮含量的增加,分子密度和能量也有所提高,因此对高氮化合物的理论模拟与合成研究成为获取UHEDM的一个努力方向<sup>[27-29]</sup>。俄、美、德等国对高氮化合物的研究十分活跃,已合成出众多具有潜在应用的化合物,如Klapotke团队<sup>[30]</sup>开发出了5,5'-联四唑-1,1'-二氧化物二羟铵(TKX-50),计算爆速达到 $9.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,感度(撞击感度20 J)低于HMX;张庆华团队<sup>[31]</sup>合成出二硝胺联噁二唑(ICM-101),计算爆速达到 $9.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,能量水平和机械感度与CL-20相当,无转晶现象且合成成本较低,有望替代CL-20;张嘉恒团队<sup>[32]</sup>发现:1,2,9,10-四硝基二并吡唑[1,5-d;5',1'-f][1,2,3,4]四嗪(TNDPT)的爆速和爆压分别达到 $9.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和44.0 GPa,能量与CL-20相当,但机械感度显著低于CL-20,具有明显的应用潜力。上述高氮化合物虽然具有较好的应用潜能,但能量基本上和CL-20相当,还达不到UHEDM的能量水平。

全部由氮原子组成的全氮化合物为UHEDM的实现带来了希望,其研究也已取得很大进展<sup>[33]</sup>。1999年美国Christe等<sup>[34]</sup>合成出 $\text{N}_5^+$ 阳离子型全氮化合物, $\text{N}_5^+$ 的理论能量密度在 $21 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右。2017年我国陆明团队<sup>[35]</sup>合成出环状 $\text{N}_5^-$ 阴离子铵盐和五唑系列含能金属盐, $\text{N}_5^-$ 释放的化学能可达 $46 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ,高于 $\text{N}_5^+$ 和 $\text{N}_3^-$ ( $24.9 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ );并陆续合成出一系列五唑金属盐类化合物<sup>[36]</sup>。但要注意的是:含水的 $\text{N}_5^-$ 离子及五唑金属盐能量水平并不高,且重金属的五唑盐因机械感度极高或成本过大,限制了其应用<sup>[37]</sup>。若能在全氮阴离子与全氮阳离子进行有效组装,则可能得到全新的UHEDM。国内外对 $\text{N}_4$ 、 $\text{N}_6$ 、 $\text{N}_8$ 等共价型全氮化合物也开展了大量理论和实验研究,黄辉等<sup>[38]</sup>研究表明:

共价氮具有高的能量,如 $N_4$ 的生成焓为 $798 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、爆速为 $15.7 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、爆压 $125 \text{ GPa}$ ,其加速金属的能力是HMX的3倍。俄罗斯在氮原子簇聚合氮方面做了大量工作<sup>[39-42]</sup>,采用金刚石压砧技术得到了立方聚合氮(Cubic gauche polymeric Nitrogen, Cg-N)等固体聚合氮,结构如图2所示。Cg-N,坚硬的固体,密度可达 $3.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,生成焓达到 $20.8 \text{ MJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

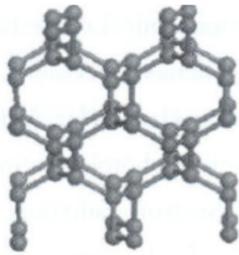


图2 聚合氮(Cg-N)的结构示意图<sup>[39]</sup>

Fig.2 The structure of Cubic gauche polymeric Nitrogen (Cg-N)<sup>[39]</sup>

虽然全氮类UHEDM的能量高且爆轰产物对环境无污染,其深入研究也将带动新型含能材料制备、表征及应用等相关技术的发展和创,并将推动超高能含能材料的进步。但全氮化合物不同于传统含能材料的理化性能、安全性能和爆轰性能也给合成、表征和应用带来极大挑战。未来的一个主要发展方向是设计和合成出更稳定的全氮化合物,这是其贮存和应用的前提。分子能垒是化合物稳定的一个重要参数,设计时可考虑选用能垒足够高的全氮分子;合成方法上可借鉴其它不稳定化合物的方法,如采用不影响性能分子离子等进行配位或修饰、以碳纳米管或其它类似纳米阱结构对其进行捕获稳定,从而提高全氮化合物的稳定性。

## 2.2 纳米技术

纳米材料是指三维尺度中至少有一维处于纳米尺寸( $1 \sim 100 \text{ nm}$ )的材料,或由它们作为基本单元构成

的材料。有的学者将尺寸在数百纳米范围内的材料也统称为纳米材料。研究表明,含能材料的安全性、热稳定性、输出能量、临界直径和短脉冲起爆等性能均与材料粒度密切相关<sup>[43-45]</sup>,随着粒度减小特别是到纳米级后,其撞击、摩擦、冲击波等长脉冲感度显著降低<sup>[46-48]</sup>,安全性增加;能量利用率大幅提升,输出能量增大<sup>[49]</sup>;分解活化能和热分解温度下降<sup>[50-51]</sup>,热分解活性提高;短脉冲起爆感度增加<sup>[52-53]</sup>,起爆可靠性增强。因此,通过含能材料的结构设计和纳米技术应用,可显著提升材料性能并促进武器的发展。微纳米含能材料在冲击片雷管始发装药、逻辑网络炸药、传爆药、主炸药及推进剂等领域都有重要应用前景,纳米技术已在含能材料领域得到高度重视和广泛应用,成为含能材料领域最富活力和关注的研究方向之一。

纳米尺度铝、镁、硼、氢化物等高活性金属的应用是利用纳米技术提升含能材料性能的一个重要途径。纳米铝粉具有表面活性大、爆热高、点火能量较低、价格较低廉等优点,成为高威力弹药的重要和首选材料。数据表明<sup>[54-57]</sup>,纳米铝粉可显著提高含铝炸药的综合爆轰性能,在TNT等较低爆速炸药体系中,纳米铝粉基炸药配方的爆速、爆压、爆热均高于相同用量的微米铝粉基配方,纳米铝粉的应用也使高爆速炸药体系的综合爆轰性能得以提高。铝粉颗粒越细,其在爆轰反应区参加反应的程度越高、能量释放越快,纳米铝粉基复合炸药表现出更短的反应时间和更高的爆轰反应程度,因而爆轰性能及作功能力较含相同比例的微米级铝粉复合炸药明显提高<sup>[58]</sup>。铝粉粒径对复合炸药爆速<sup>[54]</sup>和炸药加速 $0.54 \text{ mm}$ 铜板自由面速度<sup>[58]</sup>的影响见图3。

美俄等研究了多种高活性纳米金属的制备和性能,并将其用于武器弹药。2003年美国研制了含纳米

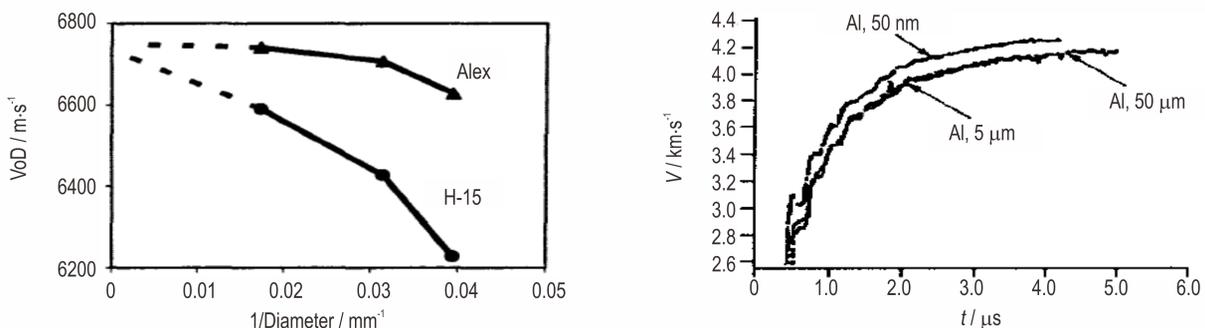


图3 铝粉粒径对爆速(左)<sup>[54]</sup>和炸药加速 $0.54 \text{ mm}$ 铜板自由面速度(右)<sup>[58]</sup>的影响

Fig.3 Effects of aluminium powder size on detonation velocity(Left)<sup>[54]</sup> and explosives accelerating  $0.54 \text{ mm}$  copperplate free-face velocity(Right)<sup>[58]</sup>

铝粉的 GBU-43/B 大型空爆炸弹-“炸弹之母”, 爆炸威力达到 11 吨 TNT 当量。俄罗斯在炸药配方中使用了能量更高的氢化铝高活性纳米金属, 制造出了威力更大的巨型炸弹——“炸弹之父”, 爆炸威力达到 44 吨 TNT 当量<sup>[59]</sup>。纳米金属及合金的应用前提是要保持高活性并与含能组分相容, 采用有机物对纳米金属颗粒进行表面包覆处理是一条有效途径, 能有效发挥纳米颗粒的优势<sup>[60-61]</sup>。近年来研究者<sup>[62]</sup>也在关注纳米金属羧化物及在含能材料中的应用, 发现羧化铝基纳米含能材料的能量理论上可达  $50 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 且大多数羧化铝基配方具有更大的放气量 ( $2 \text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$  以上) 和高的绝热燃烧温度 (达 3000 K), 因此在炸药、固体推进剂、安全气囊等领域具有重要应用潜力。

微纳米材料技术是促进炸药、推进剂等领域创新发展的重要基础与支撑, 其在含能材料领域的应用将

显著提升传统含能材料的综合性能, 应用前景广阔。但含能材料的性能受到组分状态和微观结构的显著影响, 相容性良好及组分均匀接触的纳米含能体系才能发挥出更优的综合性能。另外, 目前纳米含能材料的制备规模过小, 限制了其应用范围。未来研究应重点是解决好纳米材料的活性保护、复合含能体系的均匀性和大批量、低成本纳米含能材料的规模制备等问题。

### 2.3 增材制造技术

增材制造技术 (Additional Manufacturing, AM) 由快速成型技术 (Rapid Prototyping, RP) 发展而来, 后俗称 3D 打印技术, 该技术可用于制造任意形状的零部件, 特别适用于传统工艺难以或无法成型的特殊、复杂结构产品的制造<sup>[63]</sup>, 近年来又发展出融合了智能材料元素的 4D 打印技术<sup>[64]</sup>, 增材制造过程及 4D 打印模型如图 4 所示。

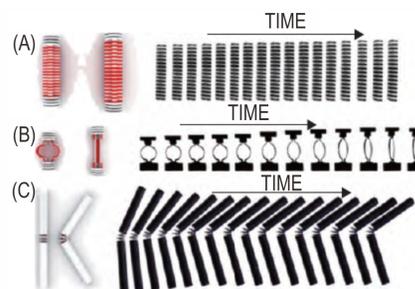
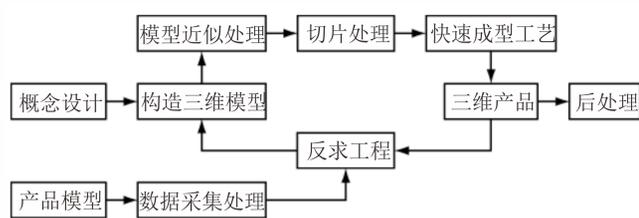


图 4 增材制造过程(左)<sup>[63]</sup>及 4D 打印模型(右)<sup>[64]</sup>

Fig.4 The additional manufacturing process(Left)<sup>[63]</sup> and 4D printing model(Right)<sup>[64]</sup>

武器装备精密控制与精确打击的发展趋势必然促使武器推进系统及毁伤单元向多样化、异形化和灵巧化方向发展, 导弹发动机与战斗部需破解多层装药、复杂形状装药、高精度装药、微尺度装药等问题, 增材制造技术为多层、异形、微装药的制造提供了一条全新的途径, 在高精度和特定结构爆炸网络、火工品、整体装药、推进剂及活性材料战斗部等含能部件制造上具有极大应用前景, 因此受到含能材料及弹药研究者的关注, 目前已在铝热剂、烟火材料、传爆网络等方向开展了大量研究<sup>[65-73]</sup>, 取得了较大进展。Staymates 等<sup>[74]</sup>采用按需压电喷墨打印技术, 将炸药溶液以微小流滴状喷射到热的干燥管中, 溶液挥发后留下组成和尺寸受控的细小颗粒, 制备的 RDX 颗粒直径为  $10\sim 30 \mu\text{m}$ 、硝酸铵颗粒为  $40 \mu\text{m}$ 。McClain 等<sup>[75]</sup>开发出一种 AM 直写系统, 能够将具有高混合粘度的含能浆料打印成低空隙的推进剂, 所打印的 AP 复合推进剂的固体加载量可达 85%。张洪林等<sup>[76]</sup>采用 3D 打印技术制备了具有多列环形空槽管形结构的整体发射药, 与 19 孔粒状

发射药相比, 该整体发射药燃烧结束时的相对燃面增大 3.1 倍, 燃气生成量提高 27.6%。肖磊等<sup>[77]</sup>将 3D 打印技术应用到熔铸炸药的成型中, 成功制备出含有纳米 HMX 和 TNT 的熔铸炸药药柱。与传统浇铸成型工艺相比, 采用 3D 技术打印出的药柱密度提高 2.0%、抗压强度提高 273%、爆速提高 2.1%, 综合性能明显优于传统浇铸成型的药柱。Zhang L 等<sup>[78]</sup>设计了一种 CL-20 基炸药墨水, 并采用微喷射直写技术制备了光滑的炸药薄膜, 其临界直径达到  $0.153 \text{ mm}$ , 平均爆速为  $8.09 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Wang D 等<sup>[79]</sup>设计了一种 CL-20/HTPB 基墨水, 并进行 3D 打印, 测试表明 3D 打印出的炸药材料具有高的燃烧性能。Xu C 等<sup>[80]</sup>采用喷墨打印技术制备了高密度的含能复合物, 复合物的密度均超过 90%TMD, DNTF/RDX/EC/GAP (54/36/5/5) 体系的密度甚至达到 96.88%TMD, 复合物中的颗粒为球形、大小在  $500 \text{ nm}\sim 2 \mu\text{m}$  之间, 直接沉积在楔形孔道中的含能复合材料在  $1\times 0.32 \text{ mm}$  以上的尺寸范围内均具有良好的稳定爆轰能力。黄璠等<sup>[81]</sup>设计了 3 种由高能

量的CL-20炸药和高安全性的TATB炸药组成的新型复合多层装药结构,并采用3D打印技术予以实现(图5),其轴向/径向复合装药结构的特性落高( $H_{50}$ )较CL-20装药提高了4倍。采用3D打印技术制备复合装药结构,为高能、高安全装药设计和精密成型提供了全新的思路和技术途径。

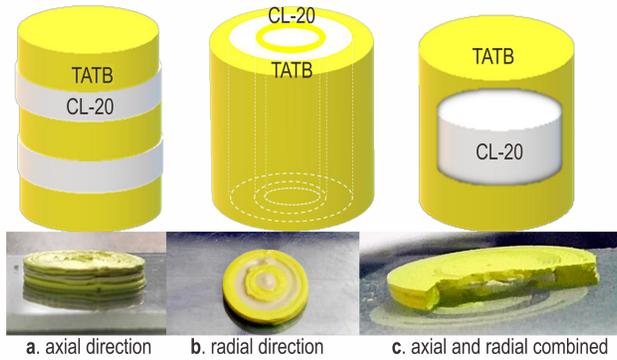


图5 三种CL-20/TATB新型复合装药结构示意图及实物图<sup>[81]</sup>  
Fig.5 Sketch pictures of CL-20/TATB three new structures and objective pictures<sup>[81]</sup>

上述研究成果反映了增材制造技术在含能材料领域具有极大的优势和发展潜力,但该技术还处于探索实践阶段,尚未得到规模制备和应用<sup>[82]</sup>。今后需综合考虑制造过程中的物料特殊性、工艺适用性与过程安全性等

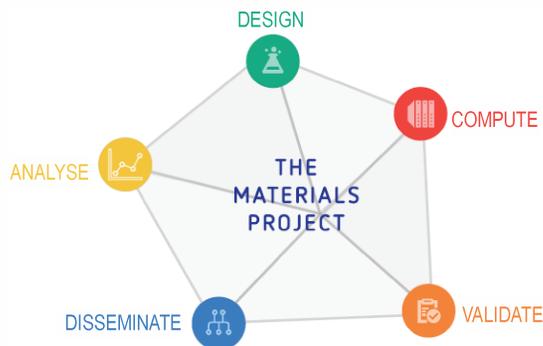


图6 材料计划概述(左)<sup>[84]</sup>及三要素间协同工作流程(右)<sup>[85]</sup>

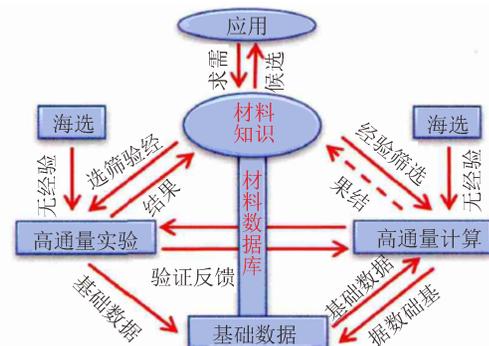
Fig.6 Overview of materials project (left)<sup>[84]</sup> and the workflow of its three elements collaboration (right)<sup>[85]</sup>

将MGI方法引入含能材料领域,实施含能材料基因组计划(EMGI),通过含能材料特征“基因”的识别,可快速进行分子结构的设计和筛选,再将具有所需性能的目标分子进行高通量实验,必将加速新型含能分子的开发进程。潘富斌等<sup>[86]</sup>对含能材料基因组数据库的技术架构、功能结构进行了详细设计,建立了含能材料数据库的功能模块,可用于查询含能材料结构、性能等基础信息。张朝阳<sup>[87]</sup>提出了EMGI的阶段目标和具体措施,并指出EMGI平台应由四个部分组成:数据库、设计与计算、制备与表征和服役与失效评估,在

问题,针对含能材料体系的特点,搭建适宜的含能材料增材制造系统、研究炸药体系及成型工艺参数,最终形成适于含能材料产品增材制造的设备、配方与工艺。

## 2.4 材料基因组技术

含能材料需同时满足能量、安全性、起爆传爆可靠性、热稳定性、环境适应性等多方面的性能要求,只有综合性能良好的含能材料才能在武器系统中得到应用。但含能材料的各性能间往往难于兼顾,采用传统技术途径来设计和合成综合性能好的含能材料耗时长、效率低,材料基因组技术为新材料研发提供了新的技术途径。材料基因组技术来源于材料基因组计划(Materials Genome Initiative, MGI),该计划是美国在2011年6月宣布实施的,它提出了材料研发的崭新模式,其三个核心要素是基础数据库、高通量计算及高通量实验,通过数据库、材料计算和材料实验之间的技术融合与协同,将材料计算工程扩展到整个材料科学、技术与工程链条,贯穿于新材料从开发到应用的全过程(图6),从而全面提升材料从发现到应用的速度、降低新材料开发成本<sup>[83-85]</sup>。MGI的终极目标是:在材料数据库的基础上,通过理论模拟和计算完成材料的“按需设计”并实现全程智能化制造,这为发展新型关键材料及其高端制造奠定了创新基础。



MGI三要素基础上增加了应用方面的要素。Tsyshkevsky等<sup>[88]</sup>采用类似基因组策略的组合方法,设计了几种含能分子,预计其综合性能优于现有含能材料,实现了高能量密度材料的高效设计。王毅等<sup>[89]</sup>采用材料基因组方法设计和合成了一种新的IHE:2,4,6-三氨基-5-硝基嘧啶-1,3-二氧化物(ICM-102),该分子具有石墨的层状晶体结构,实际密度达到 $1.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,热分解温度 $284 \text{ }^\circ\text{C}$ ,计算爆速接近 $9.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,撞击感度( $>60 \text{ J}$ )、摩擦感度( $>360 \text{ N}$ )和静电火花感度接近TATB(图7)。

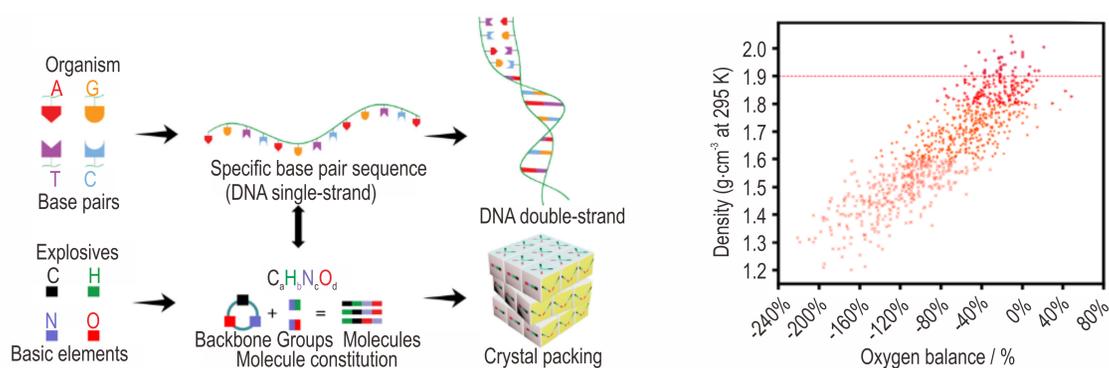


图7 有机炸药的可能材料基因方法图解(与有机体对照)和关键基因特征识别(晶体密度与氧平衡的关系)<sup>[89]</sup>

Fig.7 Illustration of possible materials genomes approach of organic explosives(Comparison with that of organism) and identification of key gene feature(the relation between crystal density and oxygen balance)<sup>[89]</sup>

EMGI方法在含能材料领域的应用尚处于探索阶段,成功应用的例子还不多,目前仍在进行含能材料基础数据库的积累和计算模型的建立与完善,这方面的难度很大,特别是特征基因的识别及其与性能的关联性难于界定。但作为一种先进材料的高效设计和开发工具,一旦建立起含能材料的基因组方法并获得应用,将大大改变含能材料的研发思路、颠覆含能材料的现有开发模式,实现新型高性能含能材料的快速研发和应用。未来研究将主要聚焦在进一步丰富含能材料基础数据库、识别含能材料特征基因、界定特征基因与性能间的关联程度和发展更适宜的计算模型等方面。

### 3 结束语

(1) 含能材料将继续朝着更高能量、更低感度、更优应用性能和更快研发速度的方向发展,CHON类常规含能材料的能量潜力已经很小,其能量及综合性能唯有大幅度提升,需开发或采用新的技术手段;

(2) 颠覆性技术的迅猛发展为含能材料的技术创新提供了良好途径和机遇,颠覆性技术在含能材料领域的应用有助于推动含能材料的加速发展、提高现有含能材料的综合性能,并在某些方向上取得了进展,超高能化技术、纳米技术、增材制造技术及材料基因组技术均展现出广阔的应用前景;

(3) 含能材料领域几类颠覆性技术的未来发展趋势在于:① 超高能化技术,重点解决金属氢的便宜及规模制备问题、全氮化合物的合成稳定问题等;② 纳米技术,重点关注纳米高活性金属与合金的活性保持、纳米复合体系的均匀性及低成本纳米含能材料的工程化制备等;③ 增材制造技术,着重研究适宜的含能材料增材制造设备、配方及成型工艺;④ 材料基因组技

术,主要聚焦于丰富含能材料基础数据库、识别含能材料特征基因及三要素的融合协同。

#### 参考文献:

- [1] Christensen C M. Disruptive technologies: catching the next wave[M]. Harvard Business Review, 1995.
- [2] 王志勇,党晓玲,刘长利等.颠覆性技术的基本特征与国外研究的主要做法[J].国防科技,2015,36(3):14-17.  
WANG Zhi-yong, DANG Xiao-ling, LIU Chang-li, et al. Characteristics of disruptive technology and international research survey[J]. National Defence Science & Technology, 2015, 36(3):14-17.
- [3] 包为民,王凤伟,西隆等.改变游戏规则、颠覆传统认知、推动变革发展——颠覆性技术革命及未来趋势展望[J].智库理论与实践,2017,2(6):31-33.  
BAO Wei-min, WANG Feng-wei, XI Long, et al. Outlook on the disruptive technology revolution and the future trend—Changing the game rule, subverting the traditional thoughts, promoting the reform and development[J]. Thing Tank: Theory & Practice, 2017, 2(6):31-33.
- [4] 侯树强,王豪杰.加强颠覆性军事技术战略预研的思考[J].信息安全与通信保密,2015,2:63-65.  
HOU Shu-qiang, WANG Hao-jie. The thinking on strengthening disruptive military technology strategy advanced-research [J]. Information safety & communication secrecy, 2015, 2: 63-65.
- [5] 李政,刘春平,罗晖.浅析颠覆性技术的内涵与培育——重视颠覆性技术背后的基础科学研究[J].全球科技经济瞭望,2016,31(10):53-59.  
LI Zheng, LIU Chun-ping, LUO Hui. Analysis of essence and nurturing of disruptive technology: highlighting basic science researches behind disruptive technology [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2016, 31(10):53-59.
- [6] 李静,王勇,郑斌.国外可穿戴装备用新材料技术研究进展[J].兵器装备工程学报,2017,38(12):142-145.  
LI Jing, WANG Yong, ZHENG Bin. Research progress in development of new materials for wearable equipment in foreign countries [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12):142-145.
- [7] 张海平.关于“第四次工业革命”的探讨[J].流体传动与控制,2014,2:1-3.

- ZHANG Hai-ping. Discussion about "The fourth industry revolution" [J]. *Fluid Power Transmission and Control*, 2014, 2: 1-3.
- [8] Lele A. *Disruptive Technologies for the Militaries and Security* [M]. Springer, 2019.
- [9] Wagen C M. Twenty-First century defense and disruptive innovation[R]. ADA563406XAB, 2012.
- [10] 方勇. 2017年世界武器装备与军事技术发展重大动向[J]. 科技中国, 2018, 2: 48-53.
- FANG Yong. 2017 the momentous movement of world weapon equipment and military technology development [J]. *The Science & Technology of China*, 2018, 2:48-53.
- [11] 窦超, 代涛, 李晓轩, 等. DARPA颠覆性技术创新机制研究—基于SNM理论的视角[J]. 科学学与科学技术管理, 2018, 39(6): 99-108.
- DOU Chao, DAI Tao, LI Xiao-xuan, et al. Research on DARPA's disruptive technological innovation mechanism: Based on the perspective of SNM theory[J]. *Science of Science and Management of S.&T.*, 2018, 39(6): 99-108.
- [12] David T M, Joseph S N. Defense 2045: Assessing the future security environment and implications for defense policymakers [M]. US Centre for strategic & international studies, 2015.
- [13] 袁成. DARPA重要航空项目研究进展[J]. 科技中国, 2017, 7: 8-11.
- YUAN Cheng. The research development of DARPA's important aviation programs [J]. *Science & Technology of China*, 2017, 7: 8-11.
- [14] 董海山. 高能量密度材料的发展及对策[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 1-12.
- DONG Hai-shan. The development and countermeasure of high energy density materials [J]. *Chinese Journal of energetic materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(Supplement): 1-12.
- [15] 张永丽, 杨慧群. 新型含能材料的研究进展[J]. 四川兵工学报, 2012(2): 125-134.
- ZHANG Yong-li, YANG Hui-qun. Review on new energetic materials [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012(2): 125-134.
- [16] Jennifer A, Ciezak J. Disruptive energetics-fundamental science for the future[R]. US Army ARL, 2016.
- [17] 彭翠枝, 范雪坤, 范夕萍等. 国外颠覆性含能材料发展综述[C]. OSEC首届兵器工程大会, 2017.
- PENG Cui-zhi, FAN Xue-kun, FAN Xi-ping, et al. Review on foreign disruptive energetic materials [C]//OSEC the first congress of weapon engineering, 2017.
- [18] 彭翠枝, 郑斌, 秦润等. 颠覆性含能材料—高风险/高回报的远期战略性基础材料[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 198-200.
- PENG Cui-zhi, ZHENG Bin, QIN Jian, et al. Disruptive energetic materials- The high-risk/high-respond forward stratagem foundation materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(3): 198-200.
- [19] 彭翠枝, 范夕萍, 任晓雪. 国外超高能含能材料研发状况分析[J]. 飞航导弹, 2011, 7: 92-95.
- PENG Cui-zhi, FAN Xi-ping, REN Xiao-xue. The development status analysis of foreign ultra-high energetic materials [J]. *Journal of Winged Missile*, 2011, 7: 92-95.
- [20] 陆明. 对全氮阴离子 $N_5^-$ 非金属盐能量水平的认识[J]. 含能材料, 2017, 25(7): 530-532.
- LU Ming. The understanding on the energy level of all-nitrogen anion  $N_5^-$  metal-free salt [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(7): 530-532.
- [21] Thierschmann M. Comparison of super-high-energy-propulsion-systems based on metallic hydrogen propellant for ES to LEO space transportation[R]. N91-22154, 1991.
- [22] Silvera I F, Cole J W. Metallic hydrogen: the most powerful rocket fuel yet to exist [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 215(17): 1-9.
- [23] Dias R, Silvera I F. Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen [J]. *Science*, 2017, 355(6326): 715-718.
- [24] Silvera I F, Dias R. Metallic hydrogen [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018, 30(25): 254003.
- [25] Loubeyre P, Occelli F, Dumas P. Observation of a first order phase transition to metal hydrogen near 425 GPa [J]. *arXiv preprint*, 2019, 1906: 05634.
- [26] Xia Y, Yang B, Yin F, et al. Hydrogen Confined in a Single Wall Carbon Nanotube Becomes Metallic and Superconductive Nanowire under High Pressure [J]. *Nano Lett*, 2019, 19(4): 2537-2542.
- [27] 许诚, 毕福强, 葛忠学, 等. 全氮阴离子 $N_5^-$ 的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(9): 2019-2024.
- XU Cheng, BI Fu-qiang, GE Zhong-xue, et al. Research progress of all-nitrogen anion  $N_5^-$  [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(9): 2019-2024.
- [28] 韩志跃, 姚谦, 杨月桢, 等. 富氮含能化合物合成方法研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(11): 119-123.
- HAN Zhi-yue, YAO Qian, YANG Yue-zhen, et al. Review on synthetic methods of nitrogen-rich compounds [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(11): 119-123.
- [29] Keshavarz M H, Abadi Y H, Esmaeilpour K D, et al. Novel high-nitrogen content energetic compounds with high detonation and combustion performance for use in plastic bonded explosives (PBXs) and composite solid propellants [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2018, 15(2): 364-375.
- [30] Fischer N, Fischer D, Klapotke T M, et al. Pushing the limits of energetic materials—the synthesis and characterization of dihydroxylammonium 5, 5'-bisterazole-1, 1'-diolate [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(38): 20418-20422.
- [31] Zhang W, Zhang J, Qi X, et al. A promising high energy density material [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-7.
- [32] 张计传, 王振元, 王滨桑, 等. 富氮稠环含能化合物: 平衡能量与稳定性的新一代含能材料[J]. 含能材料, 2018, 26(11): 983-990.
- ZHANG Ji-chuan, WANG Zhen-yuan, WANG Bin-shen, et al. Fused-ring nitrogen-rich heterocycles as energetic materials: maintaining a fine balance between performance and stability [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(11): 983-990.
- [33] 李玉川, 庞思平. 全氮型超高能含能材料研究进展[J]. 火炸药学报, 2012, 35(1): 1-8.
- LI Yu-chuan, PANG Si-ping. Progress of all-nitrogen ultra-high-energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2012, 35(1): 1-8.
- [34] Christe K O, Wilson W W, Sheehy J A, et al.  $N_5^+$ : a novel homoleptic polynitrogen ion as a high energy density material [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 1999, 38(13-14): 2004-2009.

- [35] Zhang C, Sun C, Hu B, et al. Synthesis and characterization of the pentazolate anion cyclo- $N_5^-$  in  $(N_5)_6(H_2O)_3(NH_4)_4Cl$ [J]. *Science*, 2017, 355(6323): 374-376.
- [36] Xu Y, Wang Q, Shen C, et al. A series of energetic metal pentazolate hydrates[J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 78-81.
- [37] 陆明. 对全氮阴离子 $N_5^-$ 金属盐的密度和能量水平的思考[J]. 含能材料, 2018, 26(5): 373-376.  
LU Ming. Thinking on the density and energy level of all-nitrogen anion  $N_5^-$  metal salt[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(5): 373-376.
- [38] 黄辉, 王泽山, 黄亨建. 新型含能材料的研究进展[J]. 火炸药学报, 2005, 28(4): 9-13.  
HUANG Hui, WANG Ze-shan, HUANG Heng-jian. Researches and progresses of novel energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(4): 9-13.
- [39] Eremets M I, Gavriluk A G, Trojan I A, et al. Single-bonded cubic form of nitrogen [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(8): 558-563.
- [40] Lempert D B, Nechiporenko G N, Soglasnova S I. Energetic potential of compositions based on high-enthalpy polynitrogen compounds [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, 45(2): 160-168.
- [41] Zarko V E. Searching for ways to create energetic materials based on polynitrogen compounds (review) [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2010, 46(2): 121-131.
- [42] Smirnov A, Lempert D, Pivina T, et al. Basic characteristics for estimation polynitrogen compounds efficiency [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2011, 8(4): 233-247.
- [43] 曾贵玉, 郁卫飞, 聂福德, 等. 超细炸药粉体性能及其应用研究进展[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 349-353.  
ZENG Gui-yu, YU Wei-fei, NIE Fu-de, et al. Review on properties of ultrafine explosives powder and its application [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(5): 349-353.
- [44] 曾贵玉, 聂福德, 杨志剑, 等. 微纳米含能材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.  
ZENG Gui-yu, NIE Fu-de, YANG Zhi-jian, et al. Micro-nano energetic materials [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015.
- [45] 李凤生, 刘杰. 微纳米含能材料研究进展[J]. 含能材料, 2018, 26(12): 1061-1073.  
LI Feng-sheng, LIU Jie. Advances in micro-nano energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(12): 1061-1073.
- [46] Liu J, Jiang W, Yang Q, et al. Study of nano-nitramine explosives: preparation, sensitivity and application [J]. *Defence Technology*, 2014, 10(2): 184-189.
- [47] 李宇翔, 吴鹏, 花成, 等. 微纳米HMX基PBX力学、导热性能及药片撞击感度[J]. 含能材料, 2018, 26(4): 334-338.  
LI Yu-xiang, WU Peng, HUA Cheng, et al. Mechanical thermal conductive properties and tablet impact sensitivity of micro-nano-HMX based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(4): 334-338.
- [48] Liu Y, An C W, Luo J, et al. Faster and cleaner method to mass produce nano HMX/TNT energetic particles for significantly reduced mechanical sensitivity [J]. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2019, 19(9): 5783-5789.
- [49] 梁逸群, 张景林, 姜夏冰, 等. 超细A5传爆药的制备及表征[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 515-518.  
LIANG Yi-qun, ZHANG Jing-lin, JIANG Xia-bing, et al. Preparation and characterization of ultrafine A5 propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 515-518.
- [50] 艾进, 李建军, 陈建波, 等. LLM-105基PBX炸药的热分解反应动力学[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4): 37-41.  
AI Jin, LI Jian-jun, CHEN Jian-bo, et al. Kinetics of thermal decomposition reaction of LLM-105 based PBX explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(4): 37-41.
- [51] Song X, Wang Y, Zhao S, et al. Characterization and thermal decomposition of nanometer 2, 2', 4, 4', 6, 6'-hexanitro-stilbene and 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene fabricated by a mechanical milling method [J]. *Journal of energetic materials*, 2018, 36(2): 179-190.
- [52] Zeng G, Huang H, Zeng X. The shock wave sensitivity selectivity of nanoenergetic materials [C]//2018 International conference on defence technology proceedings, 2018, P609-612.
- [53] Guo, X, Wang J, Ran J, et al. Shock initiation of nano-TATB explosives under short-duration pulses [J]. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 2019, 44(2): 138-143.
- [54] 黄亨建, 林蓉, 吴奎先. 纳米铝粉对含铝炸药爆轰性能的影响 [C]//2010年火炸药技术学术研讨会论文集, 南昌 2010: 88-94.  
HUANG Heng-jian, LIN Rong, WU Kui-xian. Effects of aluminum nanometer powders on detonation performances for aluminumized explosives [C]//Proceeding of 2010 seminar on propellant & explosives technology, Nanchang, 2010: 88-94..
- [55] Wang J, Qu, Y, Gong F, et al. A promising strategy to obtain high energy output and combustion properties by self-activation of nano-Al [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 2: 220-226.
- [56] Comet M, Martin C, Schnell F, et al. Energetic nanoparticles and nanomaterials for future defense applications [J]. *Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety*, 2019, 3(1): 1.
- [57] Wu X, Liu Dn, Xu S. Effect of magnesium hydride(MgH2) on the explosion properties of novel hydrogen-containing metallic composites [C]//The 21st seminar on new trends in research of energetic materials, Czech, 2018: 1152-1159, Czech Republic.
- [58] 黄辉, 黄勇, 李尚斌. 含纳米级铝粉的复合炸药研究[J]. 火炸药学报, 2002, 2: 1-3.  
HUANG Hui, HUANG Yong, LI Shang-bin. Research on composite explosive with nano-aluminium [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 2: 1-3.
- [59] 庞彦国, 王祝堂. 铝及铝合金在高新兵器中的应用[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(6): 1-7.  
PANG Yan-guo, WANG Zhu-tang. Application of Al and Al alloys in high-tech and new weapons [J]. *Journal of Light Alloy Fabrication Technology*, 2018, 46(6): 1-7.
- [60] Vorozhtsov A B, Rodkevich N G, Lerner M I, et al. Metal nanoparticles in high-energetic materials practice [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2017, 16(3): 231-241.
- [61] 鲁彦玲, 赵然, 高欣宝, 等. 高能混合炸药用铝粉的硅烷偶联剂表面改性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(6): 57-60.  
LU Yan-ling, ZHAO Ran, GAO Xin-bao, et al. Surface dis-

- posing Al powder with silane coupling agents[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(6): 57-60.
- [62] Yolchinyan S A, Eads R W, Hobosyan, M A, et al. Hydroxide-based nanoenergetic materials[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2019, 44(4): 464-471.
- [63] 张洪宝, 胡大超. 增材制造技术的应用及发展[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2016, 16(1): 93-98.  
ZHANG Hong-bao, HU Da-chao. Application and development of additional material manufacturing technology[J]. *Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science)*, 2016, 16(1): 93-98.
- [64] 王亚男, 王芳辉, 汪中明, 等. 4D打印的研究进展及应用展望[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 70-76.  
WANG Ya-nan, WANG Fang-hui, WANG Zhong-ming, et al. Research progress and application perspectives of 4D printing[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(2): 70-76.
- [65] Ruz-Nuglo F, Groven L, Puszynski J A. Additive manufacturing for energetic components and materials[C]//50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, 2014:3894.
- [66] 朱珠, 雷林, 罗向东, 等. 含能材料3D打印技术及应用现状研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 52-56.  
ZHU Zhu, LEI Lin, LUO Xiang-dong, et al. Research on Application of 3D printing technology of energetic materials[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(6): 52-56.
- [67] Christopher W, Alice K. 3D Co-Printing of multiple pyrotechnic materials with novel geometries[C]//42nd international pyrotechnics society seminar, Colorado, 2016.
- [68] 韩瑞鑫, 陶泽, 曾鹏飞, 等. 含能材料3D打印系统及控制技术研究[J]. 成组技术与生产现代化, 2017, 34(2): 24-29.  
HAN Rui-xin, TAO Ze, ZENG Peng-fei, et al. Study on 3D printing system and control technology of energetic materials[J]. *Journal of Group technology & production modernization*, 2017, 34(2): 24-29.
- [69] Durban M M, Golobic A M, Bukovsky E V, et al. Development and characterization of 3D printable thermite component materials[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 12(3): 1800120.
- [70] 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.
- [71] Chiroli M, Cizek F, Baschung B. Additive manufacturing of energetic materials[C]//29th annual international solid free-form fabrication symposium-an additive manufacturing conference, Austin, 2018: 1003.
- [72] Muravyev N V, Monogarov K A, Schaller U, et al. Progress in additive manufacturing of energetic materials: creating the reactive microstructures with high potential of applications[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(8): 941-969.
- [73] Ihnen A, Lee W, Fuchs B, et al. Inkjet printing of nanocomposite high-explosive materials for direct write fuzing[C]//54th Fuze Conference, Kansas City, 2010.
- [74] Staymates M E, Fletcher R, Verkouteren M, et al. The production of monodisperse explosive particles with piezo-electric inkjet printing technology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(12): 125114.
- [75] McClain M S, Gunduz I E, Son S F. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3135-3142.
- [76] 张洪林, 刘宝民, 马新安, 等. 基于3D打印技术的发射药燃烧增面设计[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 491-496.  
ZHANG Hong-lin, LIU Bao-min, MA Xin-an, et al. Design of increased burning area of propellant based on 3D printing technology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 491-496.
- [77] 肖磊, 王庆华, 李万辉, 等. 基于三维打印技术的纳米奥克托今与梯恩梯熔铸炸药制备及性能研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1000-1093.  
XIAO Lei, WANG Qing-hua, LI Wan-hui, et al. Preparation and performances of Nano-HMX and TNT melt-cast explosives based on 3D printing technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(7): 1000-1093.
- [78] Zhang L, Zhang F, Wang Y, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20[C]//Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1209(1): 012016.
- [79] Wang D, Guo C, Wang R, et al. Additive manufacturing and combustion performance of CL-20 composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(7): 2836-2845.
- [80] Xu C, An C, Long Y, et al. Inkjet printing of energetic composites with high density[J]. *RSC advances*, 2018, 8(63): 35863-35869.
- [81] 黄璠, 王军, 毛耀峰, 等. CL-20/TATB复合装药结构的3D打印成型及安全性研究[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 931-935.  
HUANG Jin, WANG Jun, MAO Yao-feng, et al. 3D print writing and its safety study on CL-20/TATB complex loaded structure[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(11): 931-935.
- [82] 彭翠枝. 含能材料增材制造技术——新兴的精密高效安全制备技术[J]. 含能材料, 2019, 27(6): 445-447.  
PENG Cui-zhi. Additive manufacturing for energetic materials: Emerging precision loading & efficient and safe preparation technology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(6): 445-447.
- [83] Patel P. Materials Genome Initiative and energy[J]. *MRS Bulletin*, 2011, 36(12): 964-966.
- [84] Jain A, Ong S P, Hautier G, et al. Commentary: The materials project: A materials genome approach to accelerating materials innovation[J]. *APL Materials*, 2013, 1(1): 011002.
- [85] 汪洪, 向勇, 项晓东, 等. 材料基因组——材料研发新模式[J]. 科技导报, 2015, 33(10): 13-19.  
WANG Hong, XIANG Yong, XIANG Xiao-dong, et al. Materials genome enables research and development revolution[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(10): 13-19.
- [86] 潘富斌, 王冬磊, 杨柳, 等. 含能材料基因组数据库设计与实现[R]. GF-A0211853, 2015.  
PAN Fu-bin, WANG Dong-lei, YANG Liu, et al. The design and development of energetic materials genome database[R]. GF-A0211853: 2015.
- [87] 张朝阳. 含能材料研发的新模式含能材料基因组研究计划(EMGI)[J]. 含能材料, 2016, 24(6): 520-522.  
ZHANG, Chao-yang. The new mode of energetic materials development—Energetic Materials Genome Initiative(EMGI)[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(6): 520-522.

- [88] Tsyshevsky R, Pagoria P, Smirnov A S, et al. Comprehensive end-to-end design of novel high energy density materials: II. Computational modeling and predictions [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(43): 23865–23874.
- [89] Wang Y, Liu Y, Song S, et al. Accelerating the discovery of insensitive high-energy-density materials by a materials genome approach[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1–11.

## Progress on Several Disruptive Technologies of Energetic Materials Field

ZENG Gui-yu<sup>1</sup>, QI Xiu-fang<sup>2</sup>, LIU Xiao-bo<sup>1</sup>

(1. Institute of chemical materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. School of National Defence Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The disruptive innovating technology has developed rapidly and become a significant power of promoting science & technology development and military change. In order to realize its impact on the energetic materials studies, the concept and role of disruptive technology is introduced, and several rapid growing disruptive technologies are discussed, including ultra-high energy technology, nanometer technology, additional manufacturing technology and materials genome technology. Results show that the focus on the future disruptive technologies lies on the preparation and application of metallic hydrogen, design and 3D printing of energetic ink, establishment of energetic materials genome database and fusion of its three elements, which is new opportunities and challenges for energetic materials innovation development.

**Key words:** disruptive technology; energetic materials; current development; review

**CLC number:** TJ55; O62

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019241

(责编: 姜梅)