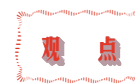


DOI: 10.11943/CJEM2021227

文章编号: 1006-9941(2021)10-0885-03



高活性金属在炸药中的应用思考

含能材料是武器系统的毁伤源和动力源,是战略性的基础材料,也是武器高能和安全的重要保证。在颠覆性含能材料获得工程应用前,传统CHON类含能材料对提升炸药的威力作用有限,而高活性金属材料具有巨大发展潜力,对提升武器装备毁伤效能具有重要意义。适用于炸药的高活性金属材料泛指点火燃烧性能好,可明显提升炸药威力的金属粉体,包括但不限于超细粉体、超级铝热剂、亚稳态合金、贮氢材料等,涉及金属冶炼、复合材料设计与制备、应用与性能评价等多个方面的研究,对推动学科发展,提升我国在本领域科技自立自强能力具有重要意义。

1. 基于高活性金属发展而成的纳米铝基复合含能材料被赋予了深刻内涵

铝粉是目前综合性能较好、使用最广泛的一种金属材料(Yen N H, Wang L Y. *Reactive metals in explosives* [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(2): 143-155)。微米粒度的铝粉具有点火温度高、释能速率慢、反应效率低等缺点。纳米铝粉反应速率可达微米铝粉几百倍,但纳米铝粉易氧化团聚(Wang J K, Chen J, Sui H L, et al. *Review on micro-nano Aluminum oxidation kinetics* [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng-Cailiao)*, 2021, 29(3): 251-266),较小的堆积密度会增加火炸药浆料的黏度,恶化其工艺性能;且纳米铝粉活度低、生产成本低,工程化放大制备能力不足。围绕铝粉及其它金属粉的点火燃烧、燃烧转爆轰等研究,国内外普遍采用含氧、含氟等元素的有机小分子、聚合物、高氯酸盐、金属氧化物等材料对活性金属材料进行包覆,或利用合金化产生更强的释能效应,开发了适用于不同尺寸铝粉的包覆、接枝、合金化、微纳米复合等改性方法,设计出了多种具有纳米微结构的新型高活性金属材料,改善了活性金属颗粒表界面特性,提高了燃烧性能、燃烧转爆轰性能、能量利用率及热释放效率,能量、安全性、贮存等综合性能不断提升,为高活性金属的工程应用奠定了物质和技术基础。

这类基于高活性金属发展而成的纳米铝基复合含能材料被赋予了深刻内涵,即:纳米铝基复合含能材料是以铝为可燃组分,添加功能助剂如其他活性金属及其合金、金属氧化物、氟聚物、高氯酸盐等组分,使其具有纳米结构及独特的反应特性,最终形成在燃烧或爆轰条件下,综合性能大幅改善的复合含能材料体系。

2. 高活性金属材料设计的关键目标是实现炸药的功能化调控

各种高速突防、远程精确打击、高效毁伤武器系统是当前装备领域研究热点,这必然需要战斗部装药实现能量输出结构可控、目标匹配、高能高效等功能,特别是不同类型的战斗部作战环境和使用对象各异,炸药装药(金属加速、爆破、温压、水下等)的能量输出结构也有较大差异,实现炸药的功能化调控,才能使战斗部达到最佳应用效能。高活性金属材料由于元素种类、形貌、粒度、表界面及理化性能的多样性,可以在炸药的

功能调控中扮演重要角色。不同类型炸药需要性能各异的金属材料,甚至是定制化的金属材料,这需要从金属粉体的微介观反应特性及应用场景进行综合性能匹配设计,通过金属材料的热性能、点火燃烧性能、炸药的燃烧转爆轰性能以及装药的毁伤效能等,进行金属材料的系统评估和迭代优化,最终高效调控炸药功能和战斗部应用效能。

3. 基于反应热力学和动力学的组分及微结构设计是高活性金属材料设计的有效方法

图1显示了活性金属颗粒在微观状态下的演化与微爆氧化过程(短时间体积快速膨胀和氧化反应, microexplosive oxidation process, 简称 MEOP),这一过程证实了铝粉反应活性与氧浓度和反应温度密切相关 (Li G, Niu L L, Liu Y, et al. Atomic-scale identification of microexplosion of aluminum nanoparticles as highly efficient oxidation[J]. *Energetic Materials Frontiers*, 2021, 2: 40-50),该结果可为设计反应性能更好的高活性金属微结构提供理论支撑。无论是铝与空气、铝与氧化剂、铝与黏结剂、铝与单质炸药,其反应界面的演化和反应都会极大地影响复合材料的点火温度、化学反应动力学过程。将活性金属燃料、氧化剂或其他功能助剂设计于同一微反应单元中,增加接触面积、减小两者间传热传质距离,是高活性金属材料组分及微结构设计的核心思想,是改变高活性金属材料反应动力学的有效途径,也是高效调控炸药功能的重要技术手段。

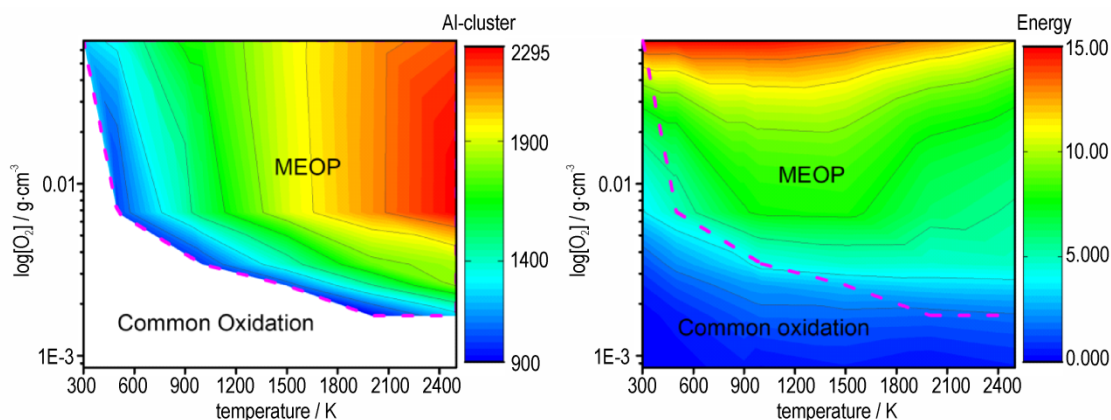


图1 不同条件下的铝纳米颗粒氧化过程

Fig.1 Oxidation of aluminum nanoparticles under different conditions

4. 高活性金属材料拓宽了混合炸药组分设计方法

混合炸药配方设计的传统方法,一般是通过改变猛炸药的种类及含量调节炸药的爆速、爆压及对金属的加速能力,同时也可通过改变金属粉(一般是铝粉)含量调节爆热及冲击波威力和水中爆炸威力,设计方法单一,且难以同时获得较高的金属加速能力和冲击波威力。而高活性金属材料可调控混合炸药的能量输出结构,应用于炸药配方中可部分起到猛炸药的作用,因此在金属粉及猛炸药的组分含量设计上具有更多选择性并能产生更新颖的结果,联合效应炸药即是这一新颖结果的典型代表。联合效应炸药爆轰反应时,高活性金属材料提前在爆轰反应区反应,释放大量能量作用于金属驱动,在后续爆轰膨胀过程中,前期爆轰产物与空气中的氧反应,再次释放能量加强冲击波作用,打破了传统炸药不能同时获得高金属加速能力和高冲击波能的局限 (Baker E L, Balas W, Capellos C, et al. Combined effects aluminized explosives[C]//*Proceeding of the Internation-*

al Ballistics Symposium. New Orleans: LA, 2008)。按照上述思路,综合高活性金属材料及其它技术,有希望获得具有高冲击波能和高气泡能的水下炸药及具有极不敏感特性的金属加速炸药。

5. 高活性金属材料近期发展路线

Al粉及其复合材料仍需持续深入研究。Al粉作为高能炸药的关键基础材料,目前还无可替代。目前需要以纳米Al或微米Al为基,在微结构优化设计、工程化制备、性能评价、应用验证等方面深入研究,形成系列化、标准化的纳米铝基复合含能材料产品并实现工程化制备,应用于战斗部装药配方研制,最终实现武器装备的高效毁伤和升级换代。

开展B粉及其复合材料的关键技术攻关。硼粉的单位体积热值达Al粉的1.6倍,是继Al粉后最具潜力获得应用的金属单质。目前,王泽山院士团队研制的95%纯度硼粉单质硼含量高、氧化硼含量明显降低,已达到国际先进水平。高纯硼的成功制备解决了炸药用硼基关键基础材料研制技术壁垒和规模化问题,后续还需加快对高纯单质硼的工程化、形貌、结构、质量稳定性控制等相关研究,并推进高纯硼复合材料的改性设计、工程化、性能表征、装备应用评价等相关工作。

高活性金属的结构功能一体化材料性能提升研究。高活性金属材料除了应用于炸药外,也可用于武器弹药的壳体、药型罩、破片等结构材料中,高反应活性的合金材料以及非晶合金材料,表现出了提高武器综合毁伤效能的潜在优势,是高活性金属材料研究不可或缺的组成部分。

综上所述,高活性金属是炸药研究的重要方向之一,虽然技术途径各异,但需要指出的是,不同类型的炸药需要不同的高活性金属材料甚至是定制化的金属材料;围绕炸药功能调控的关键目标,基于反应动力学的组分及微结构设计是高活性金属材料设计的有效方法;Al粉仍是不可替代的金属材料,开发综合性能优良的纳米铝基复合含能材料产品是当前炸药装药的迫切需求。

罗 观, 李海波, 郑保辉, 刘绪望, 胡 驰, 郭 亚, 黄 川
中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999
国家基础产品创新科研重大专项
通信联系人: 郑保辉 e-mail: zhengbh@caep.cn