

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0251

金属型含能材料力学行为研究进展*

王存洪, 曹玉武, 陈进, 孔霖, 孙兴昫
(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 含能材料是一种在高温/高压作用下能够发生化学反应, 并释放大量的新型材料。金属型含能材料作为其中一类, 因密度大、强度高、稳定性好等优异性能, 成为了现代武器装备中关注的重点材料之一, 在破片战斗部等军事领域有着广泛的应用潜力。其中, 材料的力学性能直接影响武器装备对目标的侵彻能力, 决定着对目标的最终毁伤威力, 一直是武器装备应用中关注的关键参数之一。为实现金属型含能材料高穿甲能力并保证高释能特性, 研究人员对其力学性能开展了大量研究。本文中, 对金属型含能材料力学行为的研究现状进行了综述, 包括简单介绍金属型含能材料的制备工艺和力学性能测试系统, 详细梳理金属型含能材料力学性能研究、微观分析及理论研究等 4 个方面的研究进展。总结认为, 目前对金属型含能材料力学性能的研究已经有了一些成果, 但是缺乏其他复杂环境条件以及其他关键工艺对其力学性能影响的研究, 同时缺少材料微观性能对其力学性能的影响以及微观行为和宏观行为之间关联机制的研究, 并且尚未建立能够准确反映材料在热、力、率等复杂条件下的力学理论模型。因此, 制备性能优异的金属型含能材料、开展复杂条件下金属型含能材料力学性能研究、探索微观行为与宏观行为之间的关联机制, 以及建立和完善材料本构模型等研究内容, 将是推动金属型含能材料工程应用的重点。

关键词: 金属型含能材料; 力学行为; 测试系统; 微观分析; 理论模型

中图分类号: O347 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Research progress in mechanical behaviors of metallic energetic materials

WANG Cunhong, CAO Yuwu, CHEN Jin, KONG Lin, SUN Xingyun
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: Energetic materials are a novel class of substances that can produce chemical reactions, releasing significant amounts of energy when exposed to high temperatures and pressures. Metallic energetic materials have become a key component in modern weaponry and equipment due to their exceptional properties, including high density, strength, and stability. These materials possess significant potential for use in fragmentation warheads and other military applications. Among various characters, the mechanical properties of materials directly affect the penetration ability of the weapons equipment on the target and determine the final damage power of the target, which has always been one of the key parameters in the application of the weapons and equipment. In order to achieve high armor-piercing ability and high energy release characteristics of metallic energetic materials, extensive research has been conducted by scholars on their mechanical characteristics. In this paper, the current research status on the mechanical behavior of metallic energetic materials is reviewed, including a brief introduction of the preparation technology and mechanical property testing system of metallic energetic materials, as well as a detailed review of research progress in their mechanical properties, microscopic analysis, and theoretical studies. It is concluded that there have been significant achievements in studying the mechanical properties of these materials, but there remains a lack of investigation into their behavior under complex environmental conditions and other key processes.

* 收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(14021005020302)

第一作者: 王存洪(1992—), 男, 博士, 助理研究员, wangcunhong15@163.com

通信作者: 孙兴昫(1977—), 男, 硕士, 研究员, sxy599@126.com

At the same time, there is a lack of research on the influence of material microscopic properties on their mechanical properties and the correlation mechanism between microscopic and macroscopic behaviors. Furthermore, an accurate mechanical theoretical model that can effectively capture the complex conditions of materials such as temperature, loading rate, and stress has yet to be established. Therefore, the development of metallic energetic materials with superior performance, investigation into the mechanical properties of metallic energetic fragments under complex conditions, exploration of the correlation mechanism between micro and macro behavior, and establishment and refinement of material constitutive models will be the key issue for advancing the engineering application of metallic energetic materials.

Keywords: metallic energetic materials; mechanical behavior; measurement system; micro-analysis; theoretical model

近年来, 研究人员发现了一种具有高毁伤性能的含能材料, 这种材料相比惰性材料具有两方面优势: (1) 一般条件下, 化学反应呈钝性、力学强度高, 可用作结构件; (2) 在冲击载荷作用下, 可诱发组分间或组分与环境间的化学反应, 产生燃烧/爆炸, 同时释放出大量能量, 既具备类似惰性材料的动能侵彻能力, 又具有燃烧/爆炸能力。相关研究^[1]发现, 由含能材料制备的破片的毁伤威力和杀伤半径分别是惰性破片的 5 倍和 2 倍, 显著提高了破片战斗部的毁伤威力, 已经在破片战斗部等^[2-3]武器装备中得到了广泛应用。

目前, 研究者对含能材料进行了大量的研究, 对其力学性能和冲击释能进行了深入了解, 已经从制备工艺、反应机制以及冲击释能等方面进行了综述。如: 张先锋等^[4]从实验测试方法、作用机理、冲击诱发化学反应方法理论和数值模拟等方面对含能材料的作用特性进行了综述; 叶文君等^[5]从反应材料的组分、结构特点、制备关键技术以及反应材料各项性能指标等方面对氟聚物基含能材料进行了概述; 陶玉强等^[6]对含能材料制备技术进行了综述; 陈鹏等^[7]对金属/氟聚物反应材料研究进展进行了概述; 汪德武等^[8]对含能材料的冲击诱发化学反应机理、动力学以及相关效应的研究现状进行了综述; 陈进等^[9]对金属型含能破片在战斗部中的应用进行了综述。上述从含能材料制备技术、释能特性、反应机制及其在武器装备应用等方面进行了相关评述, 但是缺乏含能材料力学性能研究方面的综述。

因含能材料种类多, 应用范围广, 本文中, 仅对具有优异材料性能、巨大应用潜力的金属型含能材料的力学行为研究进行综述。因篇幅有限, 主要对目前重点关注的 Al/X(X 代表 Ni、Nb、W、Ta、Fe) 等金属型含能材料的研究进行梳理。首先, 简单介绍制备工艺; 其次, 介绍力学性能测试系统; 再次, 介绍金属型含能材料的力学性能, 主要包括静力学、动力学性能研究以及微观分析; 然后, 介绍理论和数值模拟; 最后, 对全文进行总结, 并对后续进一步的研究进行展望, 以期能促进金属型含能材料在实际工程中的广泛应用。

1 制备工艺

金属型含能材料的力学性能主要受制备工艺、材料成分、外界条件等的影响, 其中制备工艺是决定材料力学性能的关键。因此, 选择合适的制备工艺至关重要。随着制备技术的不断发展, 目前已经存在多种成熟的工艺方法, 主要包括积叠轧制法^[10-11]、模压烧结法(冷/热压烧结)^[12]、冷/热等静压法^[13-14]、爆炸粉末烧结法^[15]、动力喷涂法^[16]、电沉积与热压复合法^[17]等。表 1 中列举了 5 种典型的金属型含能材料及其制备工艺。

下面将从工艺流程、技术特点等方面对上述 5 种主要的制备工艺进行简要介绍, 并对技术特点及应用进行归纳总结。

(1) 积叠轧制工艺。1998 年, Saito 等^[10]正式提出了积叠轧制(accumulative roll-bonding,

表 1 典型金属型含能材料及其制备工艺

Table 1 Typical metal type energetic materials and their preparation technologies

含能材料	制备工艺
Al/Ni	积叠轧制工艺、冷等静压工艺等
Al/Ta	爆炸粉末烧结工艺等
Fe/Al	冷等静压工艺等
W/Zr	冷/热压烧结工艺等
Al/Ni/W	冷/热压烧结工艺等

ARB)工艺,并用这一工艺成功将纯铝晶粒细化至 $1\ \mu\text{m}$ 以下,工艺流程如图 1(a) 所示。第 1 步,首先将初始板材切割成相同的 2 块,然后对板材表面进行去油脂、打磨处理等;第 2 步,将 2 块板材新鲜表面接触叠合,并将 2 块板材固定紧;第 3 步,将叠合的板材先加热,而后进行轧制,在轧制力和金属的摩擦力作用下将 2 块板材复合在一起;第 4 步,重复以上 3 步。轧制的原料一般为板材或箔片;在轧制过程中,原料受剪切力发生变形、断裂、复合,最终形成相分布均匀的复合材料;经过一定变形后,颗粒内晶粒大小可达纳米级,细晶强化作用比较明显,易获得高强度力学性能的复合材料。其中,影响轧制样品性能的因素包括轧制速率、轧制温度和原材料表面状态等。

(2) 模压烧结工艺。模压烧结包括冷压烧结和热压烧结。简单来说,冷压烧结工艺主要是在常温下压制成素胚,再烧结,而热压烧结工艺则是先将材料混合,然后在一定的温度和压力下烧结,最后再切割成样品,图 1(b) 为冷压烧结工艺装置及实物图^[12]。模压烧结工艺易实现小件和批量生产,是金属型活性材料常用的制备技术,但是较难获得高致密度和高强度的样品,并且通过此工艺制备的材料力学性能会受压制压力、烧结温度和保温时间等工艺参数的影响。Xiong 等^[18-19]采用模压成型制备了 Al/Ni 等 3 种复合材料,压制压强为 850 MPa,材料的致密度分别达到 94.3%、95.2% 和 98.5%,未经烧结的材料压缩强度分别为 266、114 和 240 MPa。另外,如较高熔点的 Ni、Fe、Ti 混合物,当温度达到它们的烧结温度时,Al 已经熔化而发生了反应,实际上该类复合材料在 Al 熔化前就可反应^[20]。因此,通过烧结较难提高该类材料的致密度和力学性能。

(3) 爆炸粉末烧结工艺。爆炸粉末烧结工艺是利用炸药爆轰产生的能量,以冲击波的形式瞬间作用于金属或非金属粉末,在瞬态、高温、高压下发生烧结的一种材料加工或合成的新技术,图 1(c) 为爆炸粉末烧结法装置图^[21]。爆炸粉末烧结法作为一种新型材料加工技术,具有烧结时间短(一般为几十微秒)、作用压力高(可达 $0.1\sim 100\ \text{GPa}$) 等特征,制备的金属型含能材料具有力学强度高、致密性好等特性。但是,当冲击波的强度达到材料的反应阈值时会引起材料发生放热反应,导致材料提前反应,造成能量损失^[22]。因此,在制备过程中,控制爆炸冲击波的强度,使其低于材料反应阈值,一直是爆炸粉末烧结工艺的技术难点。

(4) 冷/热等静压工艺。冷等静压(cold isostatic pressing, CIP)工艺主要用于粉体材料成型。一般用橡胶或塑料作包套模具材料,以液体为压力介质,工艺流程主要包括原料混合、模具制成胚体、冷等静压、烧结等。热等静压(hot isostatic pressing, HIP)工艺是将样品置于密闭容器中,在高温和各向同等压力的条件下制备出高致密度的样品^[13]。该技术克服了冷等静压及粉末冶金工艺的缺点,相比于冷等静压工艺所需要的压力更低,可实现金属型活性材料的致密化,能够获得良好的力学性能,保持材料的能量特性,是制备纳米复合材料的一种有效工艺。其中,冷/热等静压工艺的基本原理及应用现状参见 Atkinson 等^[23]和姜卓钰等^[24]的综述性文章。

(5) 动力喷涂工艺。动力喷涂,也称为冷喷涂,最早由 Alkhimov 等^[25]提出,主要用于制备表面涂层,以改善材料的耐蚀、摩擦、隔热等性能,同时也可用于制备薄壁管形器件。为了获得较好的致密度和黏着性,喷速一般较高,达 $800\ \text{m/s}$ ^[16]。其中,喷涂工艺参数是控制材料反应的关键因素,主要包括粉末驻留时间、基体温度、撞击速率等。粉末的高速撞击类似于样品的冲击实验,当冲击速度高于临界阈值时也会引起材料反应,工作原理如图 1(d) 所示^[26]。粉末粒子在高速冲击条件下发生剧烈的塑性变形,可以使 Al 粉等活性金属粉末表面的致密氧化层发生破碎,使新的组元表面接触。冷喷涂工作温度低于组分熔点,对喷涂粒子的热影响较小,避免了喷涂过程中组分之间发生反应^[27]。相比于冷压工艺,冷喷涂过程中粉末可以在惰性气氛(He、 N_2)下进行加速,有效避免了粉末的氧化^[27],而且材料致密度高,沉积效率高,尤其适用于块体活性材料及形状复杂件的制备^[28]。

除上述 5 种主要的制备技术外,还存在高压扭转法^[29]、物理气相沉积法^[30]和挤出成型法^[31]等技术。其中,Horita 等^[32]采用高压扭转法制备了不同 Ti 质量分数的 Ti/Al 复合材料,其中 Ti/3.2Al 的拉伸强度达 400 MPa; Russell 等^[31]采用包套热挤压工艺制备了 80Al/20Ti、80Al/20Ti/20Ti 棒材,其中,80Al/20Ti 拉伸强度达 890 MPa。表 2 中对主要制备工艺技术特点及其应用进行了归纳。

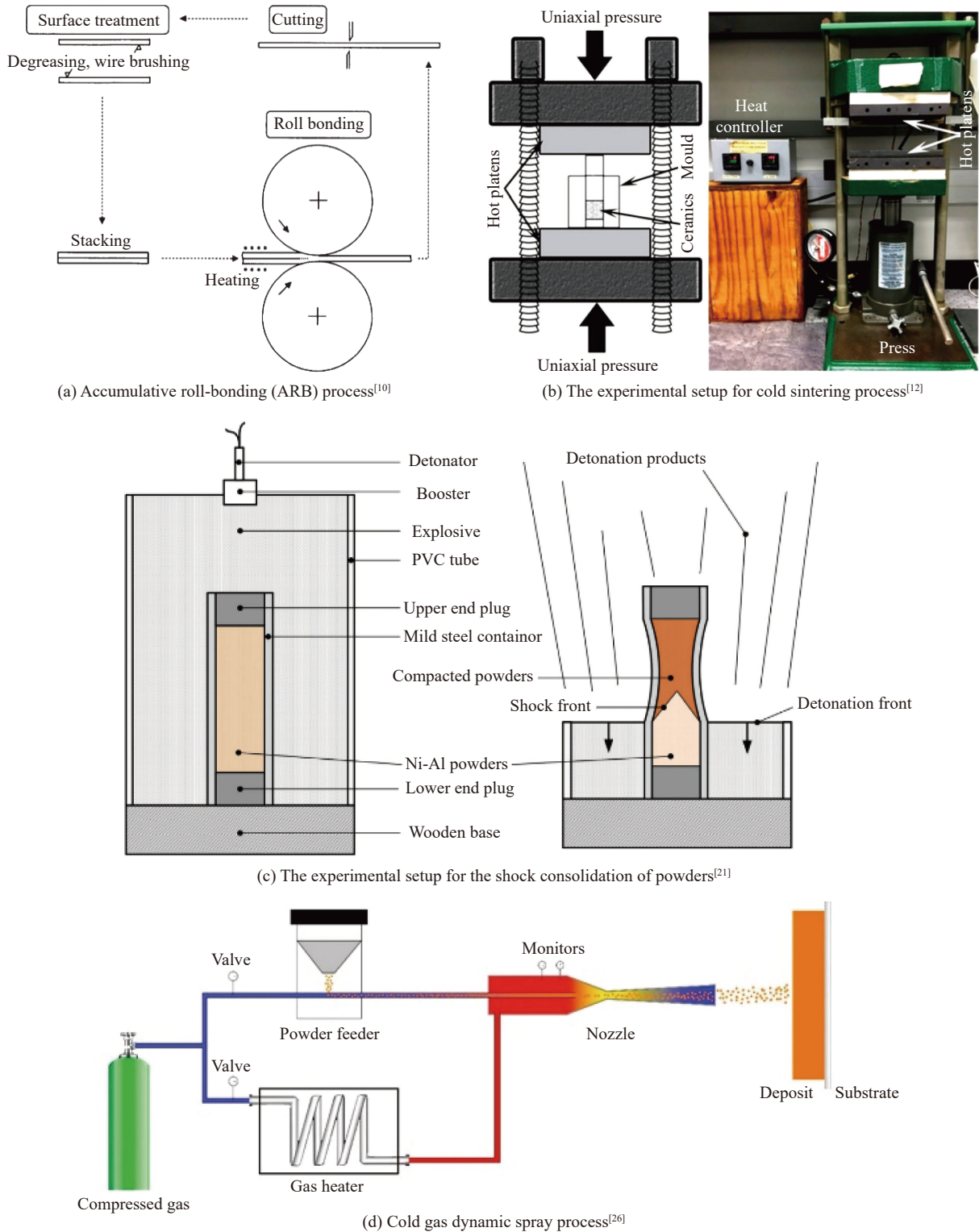


图 1 金属型活性材料制备工艺^[10, 12, 21, 26]

Fig. 1 Preparation technologies of metallic active material^[10, 12, 21, 26]

综上所述, 制备金属型含能材料的工艺技术较多, 但每种技术均有自己的局限性, 如表 2 所示。目前, 热等静压工艺因易于控制, 并且能制备出力学性能良好、致密度高的大样本材料而被广泛应用于块体材料制备; 爆炸粉末烧结工艺因能制备出高密度、高强度材料而被用于小尺寸样品制备。因此, 针对不同的

工艺要求和材料性能,选择合适的制备工艺至关重要。此外,开发新的制备技术仍将是制备高密度、高强度金属型含能材料的研究重点。

表 2 主要制备工艺技术特点及其应用

Table 2 Characteristics and applications of main preparation technologies

工艺	特点	应用
积叠轧制	优点: 工艺简单, 成本低, 适用于制备高强度的复合材料; 缺点: 工序相对复杂, 材料对温度敏感, 退火过程中较易发生反应	Mozaffari等 ^[33] 采用ARB工艺制备了35Al-65Ni含能材料, 实验得到其拉伸强度约为370 MPa; 崔岩等 ^[34] 采用ARB工艺制备了Ni/Al多层复合材料, 并对不同叠轧道次后复合材料的纵切面的显微组织进行了分析; Yang等 ^[35] 采用ARB工艺制备了细等轴晶的Ti/4.26Al含能材料, 材料的拉伸强度达到524 MPa
模压烧结	优点: 工艺简单, 成本低, 效率高; 缺点: 致密度相对较低, 冲击点火反应阈值较高	Patselov等 ^[36] 通过热压烧结工艺制备了Al/Ti复合材料, 并对力学性能进行了研究; 张度宝等 ^[37] 采用冷压烧结工艺制备了Ni/Al含能材料, 研究了烧结温度对材料界面扩散、力学性能、起始反应温度和能量密度等的影响
爆炸粉末烧结	优点: 材料致密度高, 密度高, 力学强度高, 适用于小尺寸样品; 缺点: 装置较复杂, 成本较高, 不易控制	Thadhani等 ^[15, 38] 和Ferranti等 ^[39] 采用爆炸成形技术制备了致密的Al/Ni、Al/W、Al/Ta复合材料, 其中Al/Ta的强度高达450 MPa
冷/热等静压	优点: 材料致密度高, 易于控制和制备大样本; 缺点: 成本高, 生产效率低	Chiu等 ^[40] 利用CIP工艺制备了Al/Ni含能材料, 并进行了材料压缩实验, 研究表明孔隙率和W颗粒形态对材料的断裂行为影响明显; Grudza等 ^[41] 采用HIP工艺制备了密度约7.8 g/cm ³ 的近全致密的Al/Hf等复合材料; Olney等 ^[42] 通过CIP工艺和HIP工艺制备了Al/W多孔含能材料, 并进行了动态实验研究
动力喷涂	优点: 材料致密度高, 沉积效率高, 适用于块体及形状复杂件的制备; 缺点: 喷雾速度有限, 对致密化有一定影响	Bacciochinit等 ^[16] 先采用机械合金化制备纳米级 Al/Ni混合粉, 然后采用冷喷涂工艺制备出了高反应活性、低孔隙率的Al/Ni纳米复合材料; 宋丹丹等 ^[43] 采用冷喷涂制备了不同组分的Ni/Al/W复合材料, 材料的致密度为92%~94%

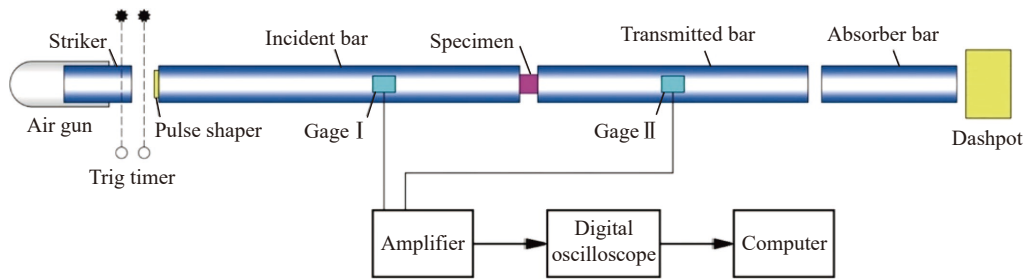
2 力学性能测试系统

金属型含能材料在爆炸驱动作用下高速撞击目标时,会产生燃烧/爆炸现象,同时释放出大量能量,对目标既产生类似惰性材料的动能侵彻,又产生燃烧/爆炸的二次毁伤效果。其中,材料力学性能决定着侵彻能力,严重影响武器装备的毁伤能力,一直是研究人员关注的关键问题。为深入了解金属型含能材料的力学性能,研究人员设计了多种力学测试系统,主要分为静力学和动力学测试系统。

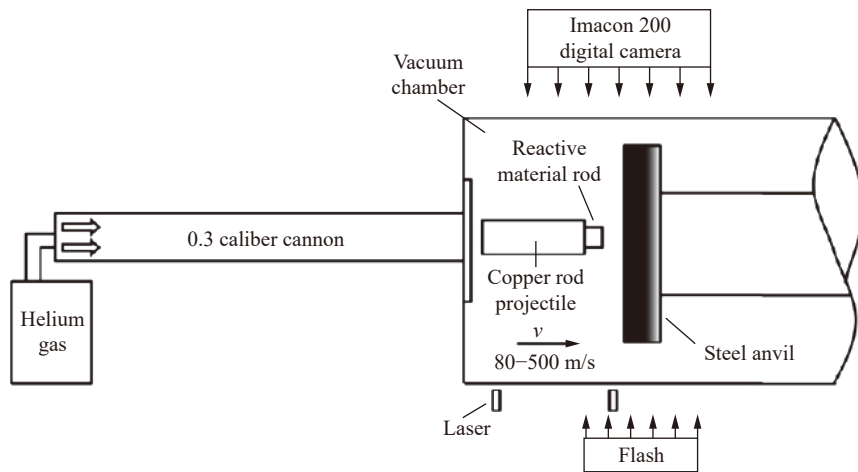
静力学行为即低应变率($\dot{\epsilon} \leq 1.0 \text{ s}^{-1}$)情况下材料的力学行为,通常采用材料试验机进行材料静力学性能测试,实验技术成熟,此处不再赘述。相比静力学性能,动态力学性能才是金属型含能材料实际应用中考核的首要指标。因此,研究人员根据加载方式的不同,分别设计了低、中、高3类应变率加载系统,包括摆锤实验系统^[44]、落锤实验系统^[45]、分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)^[46]、泰勒(Taylor)杆^[47]和脉冲加载实验系统^[48]等。在低应变率($\dot{\epsilon} \leq 10^2 \text{ s}^{-1}$)研究中,一般采用摆锤实验系统和落锤实验系统;在中高应变率($10^2 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^5 \text{ s}^{-1}$)研究中,主要采用分离式霍普金森压杆和泰勒杆等实验技术,通过对样品在不同应变率情况下的应力-应变曲线的分析,得到材料的力学本构模型参数,并利用有限元模拟来验证参数的可靠性;在更高应变率($10^4 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^6 \text{ s}^{-1}$)实验中,研究者通常采用化爆飞片增压技术或气体炮高压技术得到含能材料的 Hugoniot 相关参数和冲击压缩物态方程。下面主要对动力学测试系统及工作原理进行简单介绍。

落锤实验系统主要由提升机构、释放机构、测量系统和数据采集分析系统等组成,可进行中低应变率条件下的压缩实验^[45]。该方法是通过改变落锤质量或落高,使落锤以不同的速度撞击压缩试件,经过分析落高、撞击速度和试件破坏结果之间的关系,研究材料的力学响应和破坏特性。

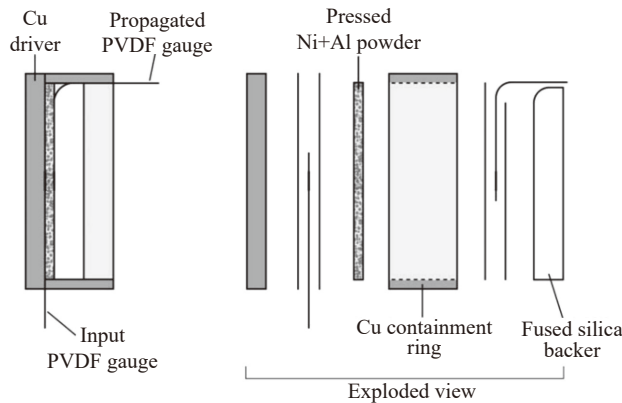
SHPB 系统主要由加载驱动系统、弹性压杆系统、信号测试和数据处理系统组成, 如图 2(a) 所示。SHPB 技术要求准确测定撞击杆撞击输入杆时的末速度, 当撞击杆撞击输入杆时, 将会依次遮挡图 2(a) 中的两激光束, 通过光电放大转换电路可以得到撞击杆通过两激光束的时间差 Δt , 由于两激光束的距离 L 已知, 即可求得撞击杆的末速度 $v=L/\Delta t$ 。其中, 应变测量由粘贴在入射杆和透射杆上的电阻应变片、超动态应变仪等组成的应变测试系统完成, 详细的系统要求和测试原理见文献 [46]。



(a) Split Hopkinson pressure bars system^[17]



(b) Taylor impact experiment system^[47]



(c) Plate impact experiment system^[48]

图 2 力学性能测试系统^[17, 47-48]

Fig. 2 Mechanical property test systems^[17, 47-48]

Taylor 杆实验系统主要由发射装置、撞击杆、测速系统和刚性靶板等系统组成。如图 2(b) 所示^[47], 先发射圆柱形弹体撞击刚性靶板, 然后测量得到子弹变形前后的尺寸, 最后结合理论分析得到材料的动态屈服应力, 该技术是一种验证材料本构模型及参数的实验方法, 也是评估数值分析软件的较理想的手段。

脉冲加载实验系统的主要加载方式有炸药驱动技术、轻气炮技术、激光加载技术、高能粒子束的能量沉积技术等。图 2(c) 为轻气炮脉冲加载平板撞击实验装置^[48], 实验中利用轻气炮对弹托和金属飞片进行加载, 飞片以一定的速度撞入入射层产生初始冲击波, 冲击波依次通过入射层、传感器、材料试件、传感器、透射窗口, 其中传感器用来记录输入和透射出试件的冲击波瞬态波形; 根据加载条件、压力瞬态波形和试件尺寸参数来确定冲击波压力、冲击波速度等。

表 3 对上述力学性能测试系统原理及特点进行归纳和总结。

表 3 测试系统原理及特点
Table 3 Principles and characteristics of test systems

测试系统	测试原理	系统特点
落锤实验系统	重锤从不同高度落到试样上, 求取落下高度与试样破坏率的关系, 用破坏率为 50% 时的落下高度来表示试样的抗冲击能力	装置结构简易、操作简便, 可实现中低应变率条件下的压缩实验研究
分离式霍普金森压杆系统	以细长杆中弹性应力波传播理论、一维线弹性波假定和应力均匀性假定为基础, 通过准确测定撞击杆撞击输入杆时的入射波等参数, 最终计算得到样品的平均应力、平均应变和平均应变率	操作方便、装置简单、加载信号易测易控等优点, 适用于中高应变率研究
泰勒杆撞击系统	先通过发射圆柱形弹体撞击刚性靶板, 然后测量得到子弹变形前后的尺寸, 最后结合理论分析得到材料的动态屈服应力	操作方便、装置简单, 适用于中高应变率研究
轻气炮脉冲加载系统	通过压缩气体膨胀做功为样品提供动能, 依据输入和透射出试件的冲击波瞬态波形以及试件尺寸等参数来确定冲击波压力、冲击波速度等参数	控制精确、加载应变率高, 可实现高应变率条件下的压缩实验研究

目前, 存在许多成熟的材料力学性能测试技术, 能够实现不同应变率下金属型含能材料力学性能测试。在众多动力学测试方法中, SHPB 技术因操作方便、装置简单、加载信号易测易控等优点, 成为了中高应变率条件下材料力学性能研究中最常用的实验方法^[49]; 轻气炮平板撞击技术因能精确控制加载条件, 方便进行各种光、电等的测量, 成为了实验室中广泛使用的高速加载实验手段^[48]。

3 力学性能及其微观分析

基于上述实验测试系统, 研究者分别对金属型含能材料的静力学性能和动力学性能进行了实验研究, 开展了工艺参数、应变率、元素成分等对材料力学性能影响规律的研究, 并且通过扫描电子显微镜等微观分析手段对材料微观性能进行了分析, 揭示了影响材料力学性能的机制。

3.1 静力学行为研究

研究人员对金属型含能材料的静力学行为进行了大量实验研究, 发现材料的制备工艺、元素成分及分布等对材料静力学性能有显著影响。

在制备工艺方面, 徐涛等^[50]对比了爆炸加载工艺与压制成型工艺对样品力学性能的影响, 发现爆炸加载后 Al/Ni 含能材料的密实度、维氏硬度、屈服强度和失效强度均有提升, 相比于压制成型的样品, 失效应力提升 34% 和 52.2%; 王比等^[51]通过爆炸粉末烧结工艺制备了 Al/W 含能材料, 研究发现爆炸烧结后材料的致密度由原来的平均 65% 提高到 98%, 几乎接近理论值, 所制备样品的最大抗压强度和失效应变分别达到 288 MPa 和 20%。可以发现, 相比于压制成型工艺, 爆炸粉末烧结法能显著提高材料的致密度及其力学性能。

在元素成分及其配比方面, Wei 等^[52]研究了 Al/Ni、Al/W、Al/Ta 等多种 Al 基金属型含能材料在爆炸烧结后的静态力学性能, 通过准静态应力-应变曲线(见图 3)发现, Al/W 的压缩强度最小, 约为 240 MPa, Al/Ta 的压缩强度最大, 约为 450 MPa。Ren 等^[53]对 Al/Ni、Al/Ni/CuO 和 Al/Ni/MoO₃ 等 3 类 Al/Ni 基金属型含能材料的静力学性能进行了测试, 发现材料的屈服强度分别为 (202±10)、(200±3) 和 (190±2) MPa。曹召勋等^[54]对采用模压成型方法制备的 3 种不同 Ni 含量的 Al/Ni 金属型活性材料的力学强度进行了测试, 发现 3 种材料在单轴压缩状态下的强度分别达到 372、395 和 264 MPa; 通过微观分析

得到, Ni 相由团聚分布变为均匀分布时, 材料准静态压缩强度由 264 MPa 上升到 395 MPa, 提高了 40.9%。可以发现, 相同工艺条件下元素成分以及配比均能对材料静力学性能造成显著影响。因此, 选择合适的元素及其成分分配比对制备高强度金属型含能材料至关重要。

此外, 研究人员还研究了材料结构对其力学性能的影响, 如 Patselov 等^[36]在一定温度和压力下, 利用热压法制备了 Al/Ti 含能材料, 实验发现沿金属箔叠加方向的抗压强度达 512 MPa; 丁青云等^[55]采用化学镀和热压复合法制备了微米级尺度的 Al/Ni 多层含能材料, 研究了层厚比对其组织结构、放热性能和力学性能的影响, 发现原始层厚比为 2/3 的 Al/Ni 多层含能材料具有最高的能量密度和良好的强度及塑性, 其抗拉强度、伸长率和抗弯强度分别达 285.05 MPa、8.87% 和 309.09 MPa, 并且随着 Al/Ni 原始层厚比从 1/2 增大到 1, 抗拉强度和抗弯强度不断提高, 塑性逐渐降低, 但是界面分层现象不断加剧, 这种现象主要是由材料成分和界面结构导致的。

综上, 金属型含能材料的静力学行为会受制备工艺、元素成分及其配比等的影响, 通过改变制备工艺、调节元素成分等方法可以改善材料的力学性能。目前, 研究人员对金属型活性材料的制备工艺、元素成分及其配比等方面研究众多, 但是缺乏对不同工艺之间材料力学性能的对比研究。

3.2 动力学行为研究

金属型含能材料的动力学性能直接影响武器装备的毁伤威力。因此, 弄清金属型含能材料在动态加载下的力学行为, 研究不同条件下的动力学性能尤为重要。随着测试手段的不断发展和成熟, 研究人员对金属型含能材料的动力学性能开展了大量研究, 并取得许多研究成果, 对含能材料的工程应用做出了重要贡献。目前, 研究人员主要从应变率加载、工艺参数(烧结温度等)、微观性能(颗粒尺寸、孔隙率等)、材料成分等方面对金属型含能材料的动力学性能开展了研究。

3.2.1 应变率对力学性能的影响

金属型含能材料在爆炸加载驱动和撞击目标的过程中会受到高应变率加载, 而高应变率加载则是造成材料失效的主要原因。早期, 国外研究者对金属型含能材料力学行为进行了初步探索, 得到了材料的应力-应变关系及相关 Hugoniot 参数, 为金属型含能材料力学行为研究奠定了基础。Dunbar 等^[56]通过研究爆炸粉末烧结工艺制备的 Al/W、Al/Ni、Al/Nb、Al/Ta 和 Al/Mo 等含能材料的动态破坏响应, 发现 Ni、W、Mo、Nb、Ta 等粉末与 Al 复合后爆炸烧结致密物的力学性能和破坏模式取决于不连续相与连续相界面的强度; Thadhani 等^[38]通过飞片增压技术测量了 Ti/Si 含能材料的 Hugoniot 参数和冲击压缩物态方程, 对其微观结构变化进行了分析; Ferranti 等^[39]基于改进的反向 Taylor 杆技术, 测量了 Al/Fe₂O₃ 含能材料的力学性能, 给出了不同组分材料的应力-应变关系。

随后, 国内研究人员对金属型含能材料的动力学行为也进行了研究。Ren 等^[57]和刘晓俊等^[58-59]基于 SHPB 系统研究了加载应变率对 Zr/W 含能材料动力学性能的影响以及烧结前后材料的释能特性, 实验得到 Zr/W 材料的动态压缩强度在 1060~2690 MPa 之间, 材料具有高强度和弹脆特性^[57], 同时发现材料在准静态和动态加载下均呈现良好的线弹性, 弹性模量对应变率效应不敏感, 约为 186 GPa, 烧结后的试样在强冲击载荷作用下发生破碎反应并释放大量的热量, 表现出很高的含能特性^[59]。宋超慧等^[60]对不同应变率下不同配比的 Al/W 含能材料进行了动态压缩和破坏特性实验研究, 发现 W 的质量分数为 44% 和 64% 时, Al/W 材料的应力-应变曲线呈现弹塑性强化的变形特点, 破坏应变随应变率升高而增大, 图 4 为不同应变率下 Al/W 材料的动态真应力-真应变曲线。

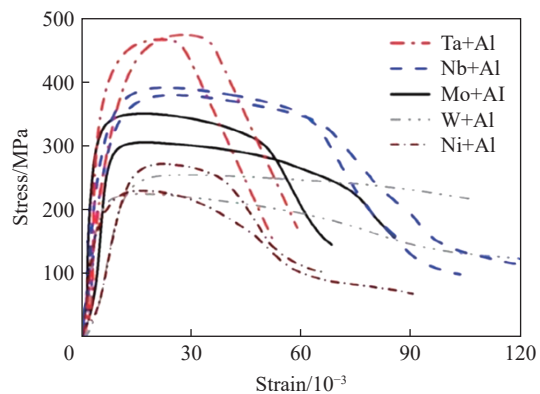


图 3 Al 基含能材料准静态应力-应变曲线^[52]

Fig. 3 Quasi-static compressive stress-strain curves of Al-based energetic material^[52]

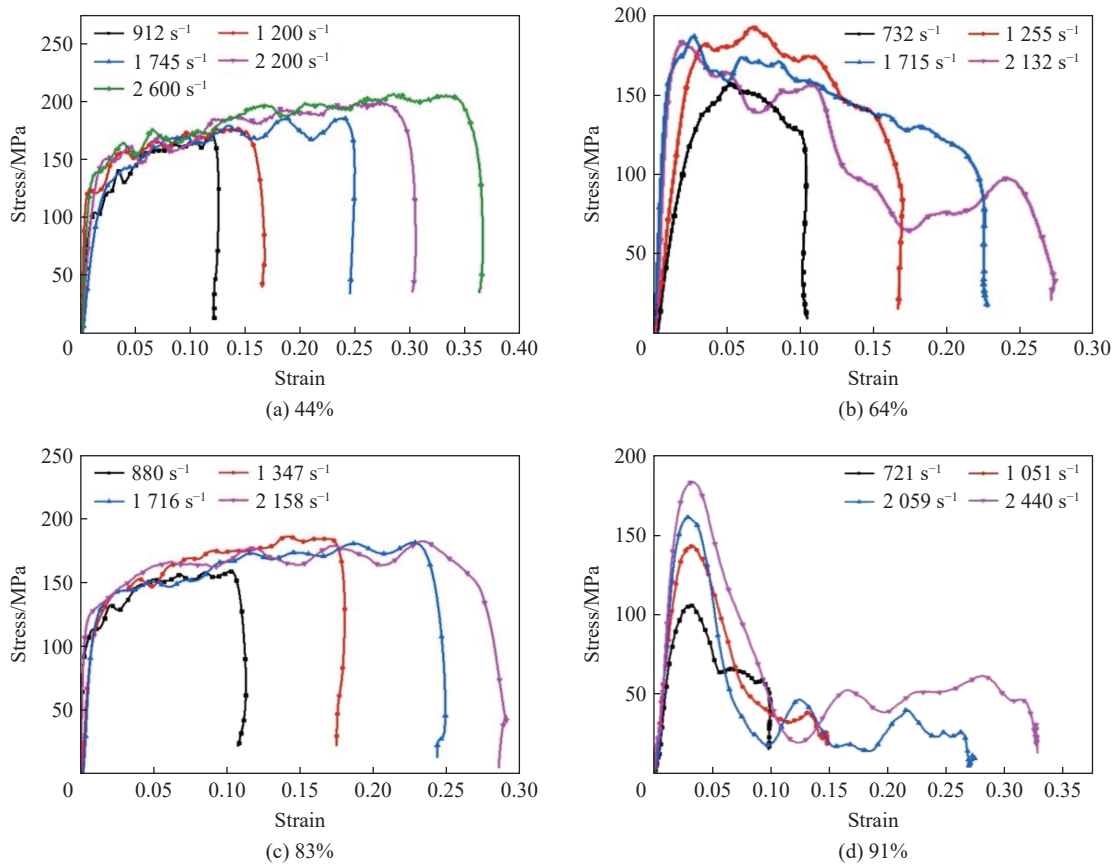


图 4 W 质量分数不同的 Al/W 含能材料在不同应变率下的动态真应力-真应变曲线^[60]

Fig. 4 Dynamic true stress-strain curves of Al/W energetic materials with different mass fractions of W under different strain rates^[60]

Zhang 等^[61]和张将等^[62]对 Zr/W 含能材料的动态力学性能及冲击金属腔体的侵爆行为进行了研究,发现 Zr/W 合金在冲击压缩过程中会出现中应变率 ($< 500 \text{ s}^{-1}$)脆性断裂和高应变率 ($> 1000 \text{ s}^{-1}$)冲击反应 2 种状态,能量释放率随冲击速度的升高明显提高。可见, Zr/W 含能材料是一种典型的弹脆性材料,能量释放率明显受冲击速度的影响。近年来,陈元建等^[63]、陈进等^[64]和 Chen 等^[65]采用冷压后烧结热处理方法制备一种高密度 Al/Ni/W 含能材料,并通过 SHPB 对含能材料的动态力学行为进行研究,发现在应变率为 1000 s^{-1} 的条件下动态压缩强度约为 500 MPa ^[63],并且发现材料的成形温度会明显影响压缩强度,当应变速率为 4000 s^{-1} 时,动态压缩强度可达 952 MPa ^[64]。

上述研究主要针对单一条件下加载应变率对材料力学性能的影响,得到了不同材料的动态压缩强度,给出了不同应变率下材料的动态力学特性,而对含能材料在爆炸加载条件下面临的复杂环境对其力学性能的影响还缺乏研究。

3.2.2 工艺参数对力学性能的影响

工艺参数是材料制备的核心,通过调节工艺参数可以制备出具有不同性能的材料。因此,为了制备出高性能金属型含能材料,研究者研究了不同工艺参数对其力学性能的影响。

熊玮等^[66]研究了 Al/Ni 多层含能材料的轧制次数及结构对其力学性能和冲击释能特性的影响,发现基于冷轧技术制备的 Al/Ni 多层复合材料比粉末压制而成的 Al/Ni 复合材料塑性更强,材料的抗压强度总体随冷轧次数的增加呈上升趋势,并且发现在相同撞击速度 ($800 \sim 1500 \text{ m/s}$) 下,释放的化学能随着轧制道次的增加而逐渐降低。耿铁强等^[67]研究了烧结温度对 Al/Ni 含能材料动力学行为的影响,发现烧结温度对其动力学性能有明显的影 响,平均流变应力随着烧结温度的升高逐渐升高,当烧结温度为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,材料的平均流变应力约为 205 MPa ,当烧结温度为 $540 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,平均流变应力约为 249.2 MPa 。陈

进等^[64]和 Chen 等^[65]研究了不同成形温度对 Al/Ni/W 含能材料动态力学行为的影响,发现材料的流变应力随成形温度提高而大幅提高。此外, Wang 等^[17]制备了集放热性能和力学性能于一体的多层 Al/Ni 含能材料,研究了室温下多层 Al/Ni 含能材料的热压时间及其动态压缩应变率对微观组织演变和压缩性能的影响,发现热压时间从 1 h 延长到 4 h 时, Al/Ni 复合材料的动态压缩强度显著提高,应变率为 $6\,500\text{ s}^{-1}$ 时压缩强度提升最显著,图 5 为不同热压时长下 Al/Ni 样品的应力-应变曲线。

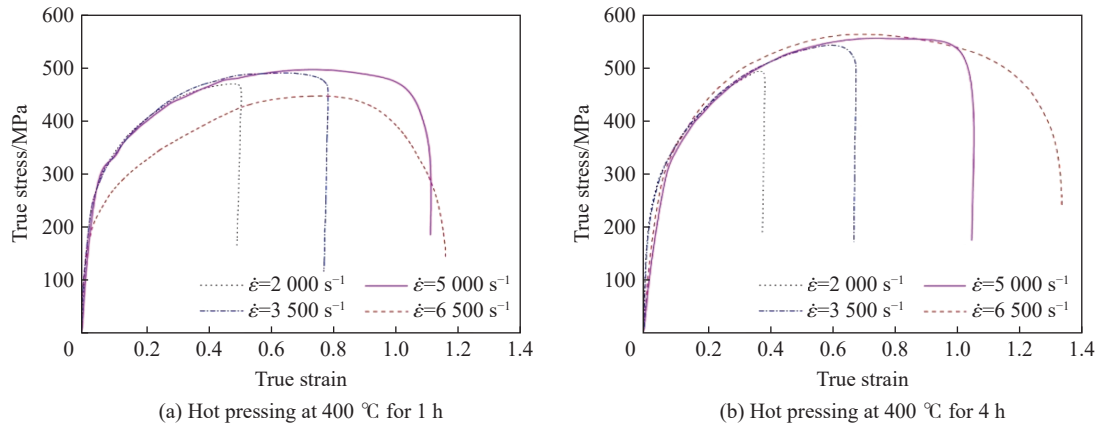


图 5 2 种热压条件下 Al/Ni 试样的动态压缩真应力-应变曲线^[17]

Fig. 5 Dynamic compressive true stress-strain curves of Al/Ni samples under two different hot-pressing conditions^[17]

另外, Guo 等^[68]对不同环境温度和应变率下 Al/W 含能材料的力学性能进行了研究,发现随着环境温度升高或应变率降低,材料的流变应力持续降低,并通过实验数据构建了 Al/W 合金的本构方程,很好地描述了高温下材料的变形行为。

金属型含能材料制备性能会受多种工艺参数影响,目前只针对个别工艺参数进行了研究,如烧结温度、轧制次数、热压时间等,而对于其他工艺参数研究报道较少。因此,进一步开展其他关键工艺参数研究是尤为重要的。

3.2.3 微观性能对力学性能的影响

随着对金属型含能材料力学性能研究的深入,研究人员发现材料微观性能(颗粒微观尺寸、形状、孔隙率等)对材料动力学行为以及断裂损伤行为具有一定的影响。

早期, Eakins 等^[48]研究了颗粒形状和密实度对 Al/Ni 粉末混合物抗压强度的影响,发现颗粒尺寸和形态变化导致材料的抗压强度发生显著变化($0.5\sim 6\text{ GPa}$),粉末混合物的冲击致密化行为对颗粒尺寸等参数非常敏感,其混合参数(颗粒尺寸等)和抗压强度之间有很强的关联性,这为后期微观性能方面的研究奠定了基础。随后, Olney 等^[42]研究了 Al/W 含能材料的颗粒间的黏结、孔隙率、Al 和 W 的颗粒尺寸对材料动力学性能的影响,通过动态压缩实验结合数值模拟,发现 Al 颗粒间的黏结、孔隙率、Al 和 W 的颗粒尺寸、W 颗粒的排列以及各颗粒的力学性能均对材料的整体变形行为产生直接影响, W 颗粒初始排列的变化是决定样品中全局剪切带形成位置的主要驱动因素,颗粒复合材料的剪切局部化机制是由于软质 Al 颗粒在刚性 W 颗粒周围的局部高应变流动导致的局部损伤积累和中/宏观剪切带/裂纹的生长引起的。Nesterenko 等^[69]在 Olney 等^[42]研究的基础上,研究了不同工艺(CIP 和 HIP)条件下 Al/W 含能材料的颗粒尺寸及孔隙率对材料动态力学性能和断裂模式的影响,基于实验研究和模拟计算发现, Al/W 材料的力学性能和破碎产生的碎片尺寸对微观结构高度敏感, W 颗粒的形态对动态强度和断裂形态有很大影响,并且在相同孔隙率下,含有细 W 颗粒样品的动态强度明显高于含有粗 W 颗粒样品的动态强度。此外, Dolgoborodov 等^[70]对高孔隙率含能材料的力学性能开展了研究,发现在爆炸冲击波作用下孔隙率对含能材料力学特性有显著影响。另外,耿铁强等^[67]基于 SHPB 系统,研究了不同烧结温度下 Al/Ni 含能材料的微观组织形貌和力学性能,通过对比不同烧结温度下 Al/Ni 含能材料的微观组织,发现

烧结温度会改变 Ni 颗粒和 Al 颗粒之间的空隙, 改变材料的密度, 进一步影响材料的抗压强度, 但没有分析材料孔隙及其形态对力学性能的影响。

相比于对应变率加载和工艺参数方面的研究, 针对微观性能对材料动力学性能影响的研究报道普遍较少, 并且相关研究主要侧重于数值模拟(见第 4 节), 缺乏相关的实验研究。

3.2.4 材料成分对力学性能的影响

在 3.1 节静力学部分中已经介绍, 金属型含能材料的成分会影响材料的静力学性能, 同理, 它也会对材料的动力学行为产生一定影响。刘晓俊等^[58] 基于 SHPB 系统对不同成分配比的 Zr/W 含能材料进行了动力学加载实验, 发现试件 1(W 和 Zr 的质量分数分别为 34% 和 66%) 的动态压缩强度明显高于另外 2 组, 应变率为 1000 s^{-1} 时其值为 2690 MPa; 试件 1 在应变率 $230\sim 1200\text{ s}^{-1}$ 下的压缩强度变化不大, 仅提高了 7%; 试件 3(W 和 Zr 的质量分数分别为 66% 和 34%) 在低应变率下的压缩强度与准静态压缩强度差别不大, 但当加载应变率为 $690\sim 1120\text{ s}^{-1}$ 时, 试件 3 的动态压缩强度则提高至 $1410\sim 1581\text{ MPa}$ 。结果表明: 3 种材料的压缩强度都表现出一定的正应变率效应, 材料成分对其动力学性能有明显的影 响。宋超慧等^[60] 采用模压烧结工艺, 制备了 4 种不同 W 含量的 Al/W 含能材料, 基于 SHPB 系统研究了 W 含量变化对其动力学行为的影响。研究发现, 应变率为 1750 s^{-1} 时, 随着 W 含量的增大, Al/W 含能材料的动态压缩力学性能呈先增后减的趋势, 分析得到导致这种现象的主要原因是 Al/W 含能材料内部缺陷和增强相 W 的相互竞争, 图 6 为 4 种不同 W 含量的 Al/W 材料的动态真应力-真应变曲线, 其中 AW-44、AW-64、AW-83、AW-91 分别代表 W 质量分数为 44%、64%、83%、91% 的 Al/W 试件。

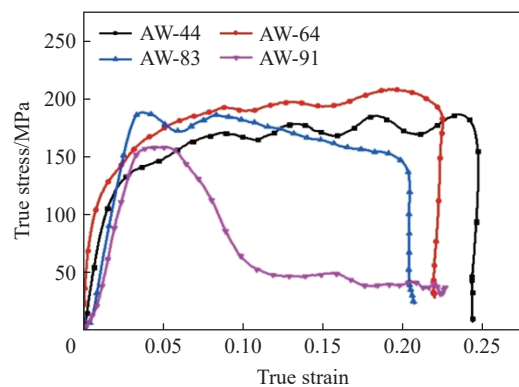


图 6 Al/W 材料的动态真应力-真应变曲线^[60]

Fig. 6 Dynamic true stress-true strain curves of Al/W^[60]

此外, 研究人员发现掺杂其他金属或金属氧化物对材料动力学性能具有显著影响。如宋丹丹^[43] 采用冷喷涂工艺制备了密度接近 6 g/cm^3 的 Al/Ni/W 活性材料, 研究发现 W 元素除了提高材料的密度外, 还与 Al 发生反应, 生成一系列 Al/W 金属间化合物, 相比于同一组分 Al/Ni 含能材料, W 元素的增加可以有效提高其动力学强度。同理, 陈元建等^[63] 将 Al/Ni/W 含能材料中的 W 粉替换成 Ta 粉, 并且加入其他 3 种微量稀土金属, 经热处理后发现材料的密度由 7.82 g/cm^3 提高到了 8.05 g/cm^3 。由此发现, 增添其他金属元素会改变材料的密度和力学强度。另外, Ren 等^[53] 对添加不同金属氧化物的 Al/Ni 含能材料进行了动态压缩实验研究, 发现加入 CuO 的 Al/Ni 材料的屈服应力低于无金属氧化物的 Al/Ni 材料, 并且发现在不同应变率下, 加入 MoO_3 使 Al/Ni 含能材料的屈服应变显著减小, 得到添加金属氧化物会显著影响 Al/Ni 含能材料动力学性能的结论。

由此看出, 金属型含能材料的材料成分对其动力学性能有显著影响, 通过改变成分配比或者添加其他金属元素/金属氧化物可以提高材料的力学性能。这将为制备高密度、高强度的金属型含能材料开辟了一条新的技术路线。

综上, 在金属型含能材料动力学性能研究方面, 现有的工作主要研究了应变率、工艺参数、微观性能及材料成分等对力学性能的影响, 发现通过改变制备工艺、调节制备温度以及添加微量元素等方法可以有效地改善材料的力学性能, 为制备高性能金属型含能材料及其工程应用提供了有效的指导。需要指出的是: (1) 针对金属型含能材料在碰撞过程中所面临的复杂环境, 除考虑应变率对其力学性能的影响外, 还需进一步研究其他环境条件(如温度、磁场等)对其力学性能的影响; (2) 目前针对部分工艺参数(轧制次数、烧结温度等)对材料力学性能的影响已经进行了研究, 而对其他关键工艺参数(压制压力等)的研究报道较少; (3) 在材料微观性能对其动力学行为的影响方面, 研究者主要侧重于数值模拟研究, 缺

乏相关的实验研究和验证; (4) 通过合理的成分配比以及添加其他金属元素/金属氧化物等, 能够制备出高性能、高强度的金属型含能材料。

3.3 微观分析

金属型含能材料内部微观结构是决定其力学性能的重要因素之一。为揭示材料成分、工艺参数以及外载荷等对金属型含能材料宏观力学行为的影响及其内在机制, 研究者利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)和能谱仪等设备对不同状态下材料微观行为(微观形貌、物相组成和元素分布等)进行了分析和讨论。

材料成分对金属型含能材料的力学性能有明显影响, 为进一步分析其内在机制, 研究人员对其微观形貌进行了分析。宋超慧等^[60]对采用模压烧结法制备的 4 种 W 质量分数不同(44%、64%、84% 和 91%)的 Al/W 含能材料进行了微观表征与分析, 发现 Al/W 材料中的缺陷会随着 W 含量的提高而明显增多(见图 7), 结合材料动力学实验数据分析得到, 材料动态压缩力学性能是由材料增强相 W 和内部缺陷决定的。Kelly 等^[71]基于激光驱动飞片技术, 研究了 Al/Ni 多层复合材料的冲击压缩特性, 通过微观结构分析发现, Al/Ni 多层复合材料内部的不均匀处更容易引发化学反应。

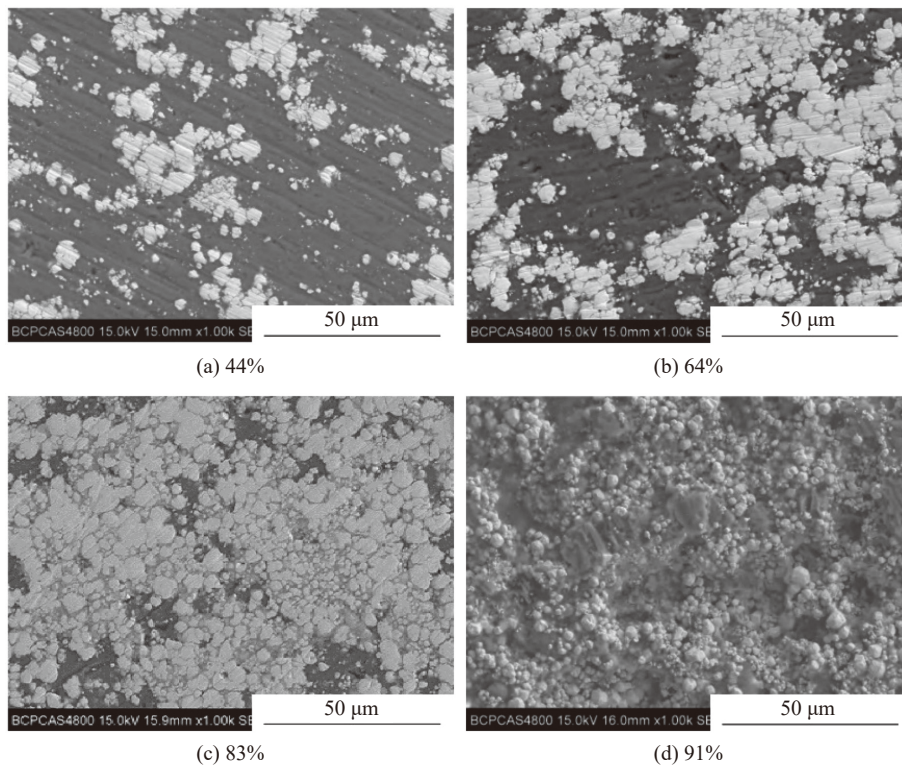


图 7 不同 W 含量的 Al/W 含能材料的 SEM 图像^[60]

Fig. 7 SEM images of Al/W energetic materials with different W additions^[60]

金属型含能材料的工艺参数是决定材料力学性能的关键因素, 在其微观分析方面, 耿铁强等^[67]对不同烧结温度下 Ni/Al 含能材料的微观组织进行对比, 如图 8 所示。图 8(a)~(b) 为冷等静压态, 图 8(c)~(f) 分别为 510、520、530 和 540 °C 烧结后的微观组织形貌, 颜色较深的为 Al, 颜色较浅的为 Ni。通过 SEM 图像分析得到, 当烧结温度较低时, Al 和 Ni 扩散较慢, Ni 颗粒和 Al 颗粒之间为简单机械结合, 且存在较多的空隙; 当烧结温度升高时, Al 和 Ni 扩散加快, 颗粒黏结面增大, 颗粒间的联结增强, 能够减小 2 种单相之间存在的空隙, 使得颗粒间的结合变得致密, 促使材料的密度有所提升, 这与 Al/Ni 含能材料的塑性和强度随着烧结温度的升高均得到优化的结论保持一致。徐涛等^[50]对爆炸加载前后 Al/Ni 含能材料的 SEM 微观形貌进行了对比分析, 发现炸药爆炸产生的高温高压会使表面的含能材料发生熔化,

底部的含能材料没有受到高温的直接作用, 含能材料内部的孔隙被挤压, 含能材料逐渐密实, 这为爆炸加载后含能材料的密实度、维氏硬度、屈服强度和失效强度均有提升的实验结果提供了支撑。Chen 等^[65]在研究 Al/Ni/W 含能材料微观组织性能时发现, 单质 Al 相的体积分数随成形温度提高而减少, 成形温度的升高是导致材料压缩强度大幅度提高的主要原因。李强等^[72]研究了富铝 Fe/Al 粉末在不同烧结压力和温度条件下烧结产物的组织形貌, 发现 10 MPa 压力下固态扩散生成 Fe_2Al_5 的临界温度为 550 °C, 随着压力提高到 20 MPa, 该温度下转生成 FeAl_3 。王肖义等^[73]研究了烧结温度对 Fe/Al 含能材料微观组织结构的影响, 发现烧结温度为 530 °C 时, 烧结试样 Fe/Al 界面清晰, 并且结合良好, 界面处无明显的反应产物存在, 而烧结温度为 540 °C 时, Fe/Al 界面处出现新的过渡层。

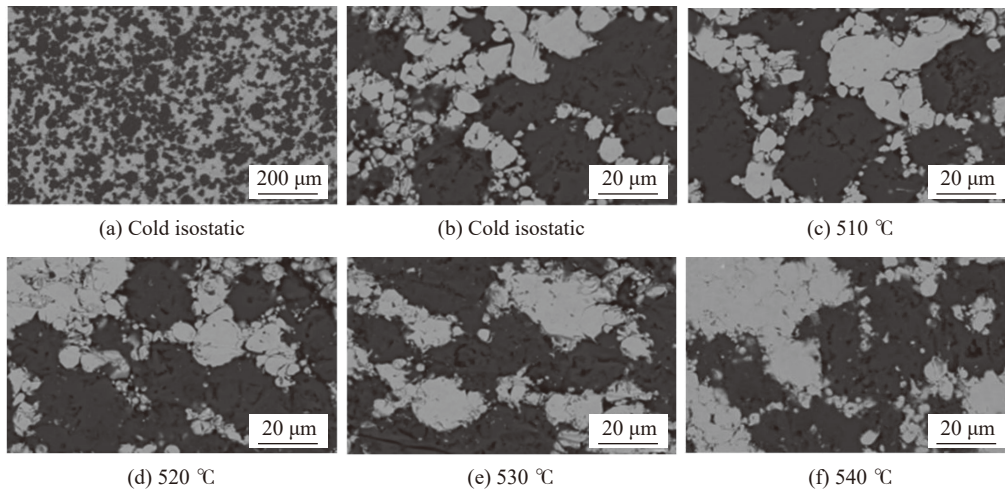


图 8 不同温度烧结的 Ni/Al 含能材料的 SEM 图像^[67]

Fig. 8 SEM images of Ni/Al energetic materials with different sintering temperatures^[67]

此外, 研究人员对外载荷加载后材料的微观形貌进行了分析。如: Wei 等^[52]对 Al/Ta、Al/Nb 等材料进行了静态和动态压缩, 并对其显微组织进行了分析, 发现显微组织中硬质相的连通结构以及组元间的界面结合力对材料的力学性能具有关键影响, 并且通过数值模拟得到, 增大 Al 与 Ni 的界面结合力, 可以大幅度提高材料的力学性能。曹召勋等^[54]在研究 Al/Ni 活性材料的力学性能及其释能行为的过程中发现, 相比于原始材料的显微组织, 不同应变率加载后样品的 SEM 图(见图 9)中 Ni 分布发生明显取向性变化, 且应变率越高, 取向性变化越大, 当应变率达到 4000 s^{-1} 时, 材料局部发生了明显变形; 还发现动态加载条件下团聚的 Ni 相会发生溃散, 由连续相转变为不连续相, 随应变率的提高, 溃散现象逐渐加重。陈元建等^[63]对不同应变率加载下 Al/Ni/W 试件的微观形貌进行了分析, 发现随着加载应变率的提高, Al 相和 Ni 相明显被拉长。

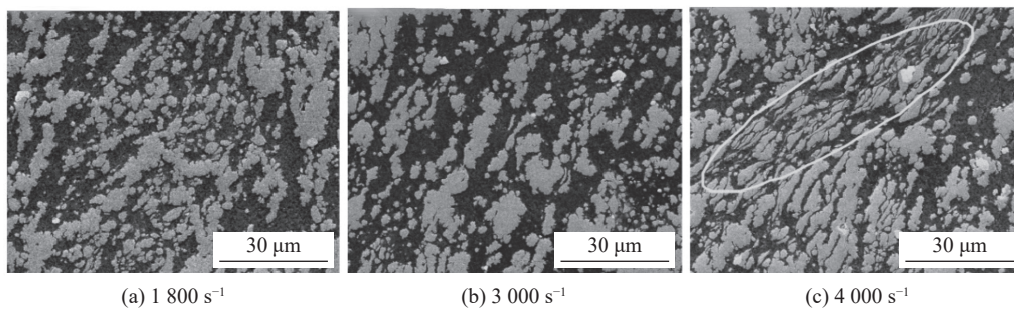


图 9 不同加载率下 Ni/Al 试件的 SEM 图像^[54]

Fig. 9 SEM images of Ni/Al samples under different strain-rate loading conditions^[54]

刘晓俊等^[59]对 W/Zr 含能材料力学加载后断口处的微观形貌进行了分析, 图 10(a) 为准静态压缩后试样断口的 SEM 图, 可以看出一条明显的裂纹贯穿 Zr 和 W_2Zr 相, 呈现穿晶断裂, 其中灰色区域为 Zr, 较亮的为 W_2Zr 相; 图 10(b) 为 SHPB 实验后回收试样断口的 SEM 图, 发现表面布满大量的白色碎末, 其中有不少是球形小颗粒, 这是由于破碎的细小的 Zr 颗粒与空气剧烈反应生成 ZrO_2 , 在表面张力的作用下形成小球, 冷却并最终粘附于较大碎块的表面; 通过对冲击反应后的碎片进行微观分析, 发现不同化合物生成的主要原因是燃烧温度所致。王比等^[51]对爆炸烧结的 Al/W 含能材料进行了研究, 对比了制备前和准静态压缩后材料的微观形貌, 发现冲击压力是粉末致密化的主导因素; 粉末粒径对烧结密度影响显著, 粒径越小, W 颗粒团聚越明显, 阻碍了材料的致密化; 并且得到 Al/W 材料的力学性能和断裂模式主要取决于连续相, Al 相连续的样品抗压强度低、塑性较好, 呈轴向劈裂破坏, 而 W 相连续的样品则表现出脆性和高抗压强度, 破坏模式为剪切破坏。

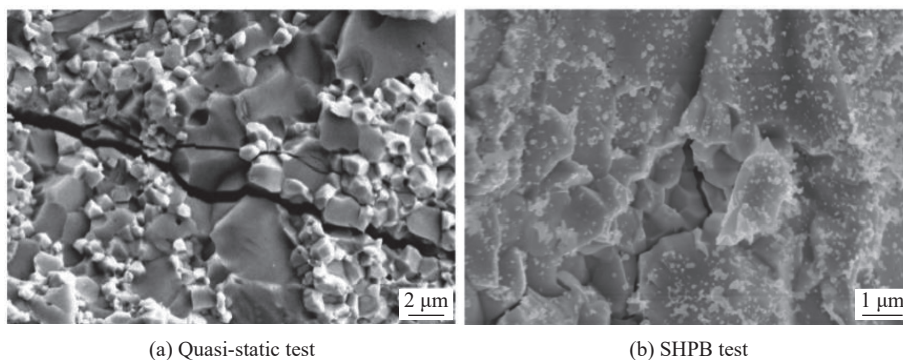


图 10 W/Zr 试样断口处 SEM 图^[59]

Fig. 10 SEM images of fracture for W/Zr samples^[59]

另外, 研究人员对金属型含能材料在不同条件下的物相结构进行了分析。耿铁强等^[67]对 Al/Ni 含能材料在静态和动态压缩失效后的样品进行了物相结构分析, 发现在准静态载荷作用下, 经不同温度烧结后材料能够保持各自的独立组元, 并不会生成其他金属间化合物; 动态压缩后样品中仅存在着 Ni、Al 单质衍射峰, 表明在 1000 s^{-1} 应变率下不会发生金属间化合反应; 由此证明, 材料在准静态载荷和 1000 s^{-1} 应变率下能够保持足够的钝感。刘青等^[74]利用差示扫描量热法对冷喷涂方法制备的 Ni/Al/W 活性复合材料进行了反应阈值温度及能量释放水平的测定, 并结合 SEM 和 XRD 检测手段确定了活性复合材料在不同温度下的反应情况, 发现在制备过程中材料并没有发生金属间化合反应。

综上, 通过金属型含能材料微观分析发现, 材料内部硬质相的连通结构以及组元间的界面结合力是决定材料力学性能的关键因素, Al/W 材料中的缺陷会随着 W 含量的提高而明显增多, Al/W 材料的动态压缩力学性能是由材料增强相 W 和内部缺陷决定的, Al/Ni 材料的塑性和强度随着烧结温度的升高均得到优化, 这些结论将为制备高性能金属型含能材料及其宏观力学行为研究提供可靠支撑。然而, 对于材料微观行为在时间与空间上连续的变化过程, 目前缺乏有效的研究手段。因此, 为了给材料宏观动力学性能研究提供更准确的分析, 需对整个动态过程中材料的微观行为进行研究。

4 理论与数值模拟

目前, 针对金属型含能材料的动力学理论和数值模拟研究主要有 2 种方法: 一种是通过材料性能实验及数值模拟来确定本构模型中的各项参数, 得到材料力学本构模型; 另一种是从微观尺度上建立含能材料动力学仿真模型, 研究动力学加载下材料微观特性对金属型含能材料动力学行为的影响。在本构模型研究中, 已有的金属材料动力学本构模型有 Johnson-Cook (J-C) 模型、Khan-Huang 模型、Zerilli-Armstrong 模型和 Lim-Huh 模型等^[75]。其中, J-C 模型中考虑了应变硬化、应变率硬化和热软化对材料流动应力的影响, 用该模型描述冲击载荷下材料的强度和延性有较高的精确性, 并且其形式简单、物理解

释清晰等, 研究者经常将它与一维弹脆性损伤本构模型结合, 一起来描述含能材料的本构关系。J-C 模型的具体形式为:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) [1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中: A 为初始屈服应力; B 为应变强化参数; n 为应变强化指数; C 为应变率强化参数; m 为温度敏感指数; ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T_r 和 T_m 分别为室温和材料熔化温度。

基于 J-C 本构模型, 研究人员通过材料性能实验或者数值模拟的途径来确定模型中的各项参数, 从而得到材料动态本构模型。Ren 等^[53] 利用 SHPB 技术获得了 Al/Ni 等 3 种含能材料的压缩曲线以及 J-C 本构模型参数, 采用冷能叠加法和 Wu-Jing 方程计算了材料的 Hugoniot 参数, 并且通过直接弹道实验和冲击诱导化学反应模型拟合得到了材料的化学反应动力学方程参数; 张将等^[62] 对钨钼合金的动态力学性能进行了实验研究, 建立了一维弹脆性损伤本构模型来描述其动态响应特性; Gao 等^[76] 对 W/Ta 合金的动态力学行为及其本构模型进行了研究, 得到了 2 种 W/Ta 合金的 J-C 模型材料常数, 并通过模拟与实验对比验证了所建立的本构模型; 史安顺等^[77] 基于混合物冷能叠加原理以及 W/Cu、Al/Ni 等含能材料的 Hugoniot 数据, 得到了密实材料的冲击压缩方程; 罗普光等^[78] 对新型铅基非晶含能材料在动态加载条件下的力学性能及本构关系进行了研究。

从细观尺度建立含能材料动力学仿真模型方面, 研究人员分析了含能材料的冲击动态力学响应特性, 阐明其冲击反应机制, 基于材料细观结构或材料颗粒初始形态建立了含能材料冲击响应模型, 对冲击压缩下金属颗粒材料间的碰撞、孔隙压垮、接触面变化及温度分布等规律进行了研究。Williamson^[79] 将不锈钢材料简化为细观尺度上由均匀、等粒径颗粒构成, 生成了相应细观数值模型, 为后续细观模拟研究奠定了基础。Benson 等^[80-81]、Austin 等^[82-84]、乔良等^[85] 和 Qiao 等^[86] 随后改进了该类细观模型的建立方法, 结合材料中颗粒细观分布特性, 建立了相应的数学模型, 并利用随机数生成方法、模拟退火算法等方法生成了满足细观分布统计规律的模型。此外, Eakins 等^[87-88] 通过 SEM 得到了 Al/Ni 含能材料的细观照片, 并以此建立了细观尺度数值模型, 研究了材料颗粒形状和密实度等细观特性对 Al/Ni 类含能材料冲击响应行为的影响规律, 同时确定了状态方程参数。这种从细观照片出发建立模型方案, 为宏观材料性能变化研究提供了有效支撑。随后, Reeves 等^[89] 研究了热和冲击反应引发的 Al/Ni 非均相反应, 发现 Al/Ni 类含能材料的细观结构(颗粒尺寸、形状以及颗粒分布等)对其力学行为及冲击反应特性的影响十分显著。Aydelotte 等^[90] 基于真实微观结构进行了细观模拟, 研究了纯 Ni、Ta、W 粉末与 Al 粉在爆炸加载过程中发生冲击反应的影响机理, 揭示了相似冲击条件下 Al/Ni、Al/Ta 和 Al/W 含能材料在爆炸压实过程中变形行为的差异; 模拟结果表明, 在 Al/Ni 和 Al/W 体系中, 冲击诱导的变形主要集中在 Al 组分中, 而在 Al/Ta 体系中 Ta 和 Al 等 2 种组分的塑性变形显著, 使 Al/Ta 成为一个反应性更强的体系。熊玮等^[91] 结合 SEM 图像分析了 3 种典型 Al/Ni 类含能材料的细观结构特性, 研究了材料配比、制备工艺对材料细观结构的影响规律, 并从细观结构照片和细观颗粒初始形态入手, 分别建立了 Al/Ni 类含能材料冲击压缩细观模型。基于细观结构建模的研究结果表明, 冲击压缩作用下材料内部主要发生了颗粒变形和体积压缩 2 个过程(见图 11^[91])。基于材料初始形态建模的研究结果表明: 在冲击加载条件下, 初始颗粒形状规则且尺寸均匀的 Al 颗粒发生了变形; 当颗粒速度达到 800 m/s 以上时, 能够明显观测到 Al 颗粒的大变形及颗粒间的融合现象(见图 12^[91])。通过上述数值模拟发现, 细观尺度上由均匀、等粒径颗粒构成细观数值模型的建立更方便快捷, 而基于细观照片生成细观尺度数值模型更能体现材料细观尺度上的实际分布特点。但是, 这 2 种建模方法对含能材料冲击响应细观模拟结果的影响机制仍有待探索。

可以看出, 金属型含能材料力学行为的理论与数值模拟研究有 2 种思路: 一种是基于 J-C 本构模型和一维弹脆性损伤本构建立含能材料动力学本构模型, 通过材料性能实验及数值模拟来确定模型中的各项参数, 最终得到材料本构模型; 另一种是基于材料微观结构从细观尺度上建立含能材料动力学数值模型, 研究动力学加载下材料颗粒间的碰撞、孔隙压垮、温度等变化规律以及工艺参数、材料成分等细

观特性对金属型含能材料动力学行为的影响。上述研究为金属型含能材料的工程应用提供了有效的理论指导, 然而无法准确地反映金属型含能材料在复杂条件下的动力学行为。因此, 理清宏观与细观之间的关系, 发展并完善动力学本构模型是当前研究的关键问题, 为推动金属型含能材料工程应用提供理论支撑。

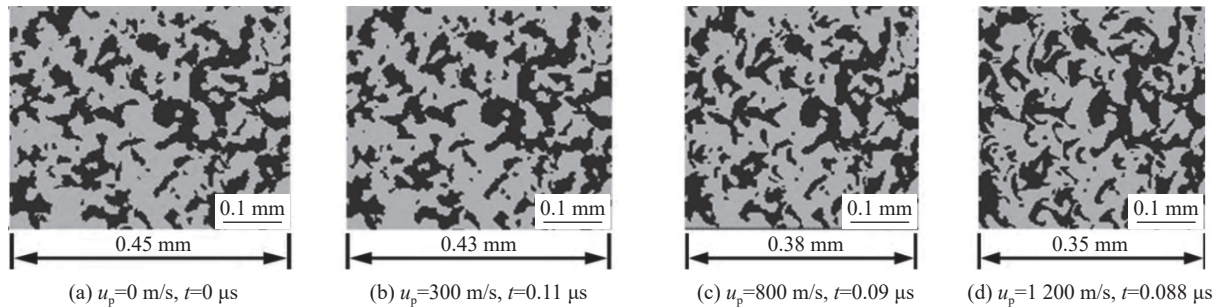


图 11 基于细观模型不同粒子速度颗粒的变形情况^[91]

Fig. 11 The deformation of particles at different particle velocities based on the mesoscale model^[91]

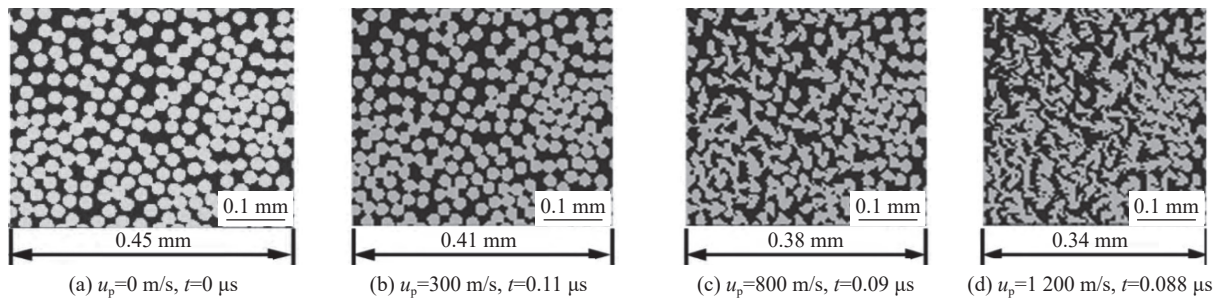


图 12 基于均匀化细观模型不同粒子速度颗粒的变形情况^[91]

Fig. 12 The deformation of particles at different particle velocities based on the mesoscale model with uniform particles^[91]

5 总结与展望

近年来, 金属型含能材料因强度高、密度大等优异特性, 在工程中尤其在武器装备中具有巨大的应用前景, 其中材料在动载荷作用下的力学性能一直是破片战斗部、聚能战斗部等军事领域关注的焦点。目前, 研究人员通过多种工艺技术和材料配方筛选制备出了性能优异的金属型含能材料, 建立了多种力学性能测试系统, 研究了应变率、工艺参数、微观性能以及材料成分等对力学性能的影响, 同时对其微观结构进行了分析, 并且基于材料 J-C 模型及数值模拟给出了相应材料的力学参数, 得到了材料动力学本构模型, 为金属型含能材料在武器装备中的广泛应用提供了支撑。虽然对金属型含能材料的力学性能已经开展了大量研究, 但是目前仍然存在一些问题需进一步探讨。通过上述相关文献的查阅、整理、分析与思考, 得到的主要结论和展望如下。

(1) 金属型含能材料的制备工艺较多, 但每种工艺均有自己的局限性。因此, 针对不同性能的样品应选择合适的制备工艺, 如热等静压法适用于块体材料, 爆炸粉末烧结法适用于小尺寸样品, 同时开发先进的制备技术, 对提高金属型含能材料的力学性能尤为关键。

(2) 金属型含能材料的力学性能决定其工程应用价值, 目前研究者主要聚焦于应变率、工艺参数以及微观性能等对力学性能的影响, 但是缺乏除应变率之外其他环境条件(如温度、磁场等)以及其他关键工艺参数(压制压力等)对力学性能影响的研究报道。

(3) 金属型含能材料的微观行为分析为宏观力学行为研究提供了可靠支撑, 目前研究者主要对实验前后材料的 2 种微观行为进行对比分析, 而对材料微观行为在时间和空间上连续的变化过程缺乏有效

的研究。因此, 研究材料微观行为在时间和空间上的变化规律, 以及探讨如何将微观机制和宏观行为有效关联起来, 具有重要价值。

(4) 目前, 针对金属型含能材料动力学理论研究主要是基于 J-C 本构模型, 结合材料性能实验以及数值模拟来确定模型参数, 这种方法简单方便, 但不能准确反映材料的动力学行为, 并且缺乏能够准确反映材料在热、力、率等复杂条件下的力学理论模型。因此, 基于现有模型发展并完善本构模型是当前研究关注的焦点。

参考文献:

- [1] Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies, National Research Council. Advanced energetic materials [M]. Washington DC, USA: The National Academies Press, 2004: 20–23.
- [2] 王宝成, 袁宝慧. 防空反导破片杀伤战斗部现状与发展 [J]. *四川兵工学报*, 2013, 34(9): 20–24. DOI: 10.11809/scbgxb2013.09.007.
WANG B C, YUAN B H. Research states and trend of fragment warhead for air-defense and anti-missile [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2013, 34(9): 20–24. DOI: 10.11809/scbgxb2013.09.007.
- [3] WADDELL J T, BOOTES T H, BUDY G D, et al. Reactive shaped charge, reactive liner, and method for target penetration using a reactive shaped charge: US8037829B1 [P]. 2011-08-18.
- [4] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展 [J]. *含能材料*, 2009, 17(6): 731–739. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021.
ZHANG X F, ZHAO X N. Review on multifunctional energetic structural materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(6): 731–739. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021.
- [5] 叶文君, 汪涛, 鱼银虎. 氟聚物基含能反应材料研究进展 [J]. *宇航材料工艺*, 2012, 42(6): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2012.06.003.
YE W J, WANG T, YU Y H. Research progress of fluoropolymer-matrix energetic reactive materials [J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2012, 42(6): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2012.06.003.
- [6] 陶玉强, 白书欣, 阳世清, 等. 反应结构材料制备技术的研究现状 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(10): 2079–2090. DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.10.15.
TAO Y Q, BAI S X, YANG S Q, et al. Research status of preparation technology for reactive material structures [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(10): 2079–2090. DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.10.15.
- [7] 陈鹏, 袁宝慧, 陈进, 等. 金属/氟聚物反应材料研究进展 [J]. *飞航导弹*, 2018(10): 95–98, 84. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.20180129.
CHEN P, YUAN B H, CHEN J, et al. Research progress of metal/fluoropolymer reactive materials [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2018(10): 95–98, 84. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.20180129.
- [8] 汪德武, 任柯融, 江增荣, 等. 活性材料冲击释能行为研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(3): 031408. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0337.
WANG D W, REN K R, JIANG Z R, et al. Shock-induced energy release behaviors of reactive materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3): 031408. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0337.
- [9] 陈进, 梁争峰, 周涛. 金属型活性破片战斗部技术研究进展 [J]. *飞航导弹*, 2019(4): 89–95. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.20180309.
CHEN J, LIANG Z F, ZHOU T. Research progress of metallic active fragmentation warhead technology [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(4): 89–95. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.20180309.
- [10] SAITO Y, TSUJI N, UTSUNOMIYA H, et al. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process [J]. *Scripta Materialia*, 1998, 39(9): 1221–1227. DOI: 10.1016/S1359-6462(98)00302-9.
- [11] RAHMATABADI D, TAYYEBI M, HASHEMI R, et al. Evaluation of microstructure and mechanical properties of multilayer Al5052-Cu composite produced by accumulative roll bonding [J]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2018, 57(3/4): 23–34. DOI: 10.1007/s11106-018-9962-4.
- [12] GUO Z H, BAKER A, GUO J, et al. Cold sintering process: a novel technique for low-temperature ceramic processing of ferroelectrics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 99(11): 3489–3507. DOI: 10.1111/jace.14554.

- [13] 蔡高参, 符巨博, 张东星, 等. 热等静压技术在钨合金领域的应用研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2021, 64(23/24): 14–20. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.014.
CAI G C, FU J B, ZHANG D X, et al. Application of hot isostatic pressing technology in tungsten alloy [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(23/24): 14–20. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.014.
- [14] CHANG L, SUN W, CUI Y, et al. Influences of hot-isostatic-pressing temperature on microstructure, tensile properties and tensile fracture mode of Inconel 718 powder compact [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 599: 186–195. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.095.
- [15] THADHANI N N. Shock-induced chemical reactions and synthesis of materials [J]. *Progress in Materials Science*, 1993, 37(2): 117–226. DOI: 10.1016/0079-6425(93)90002-3.
- [16] BACCIOCHINI A, BOURDON-LAFLEUR S, POUPART C, et al. Ni-Al nanoscale energetic materials: phenomena involved during the manufacturing of bulk samples by cold spray [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(7): 1142–1148. DOI: 10.1007/s11666-014-0078-1.
- [17] WANG M Z, LI J L, ZHANG J Z, et al. Microstructure evolution and compressive properties of multilayered Al/Ni energetic structural materials under different strain rates [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29: 506–514. DOI: 10.1007/s11665-020-04589-0.
- [18] XIONG W, ZHANG X F, WU Y, et al. Influence of additives on microstructures, mechanical properties and shock-induced reaction characteristics of Al/Ni composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 648: 540–549. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.07.004.
- [19] XIONG W, ZHANG X F, TAN M T, et al. The energy release characteristics of shock-induced chemical reaction of Al/Ni composites [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(43): 24551–24559. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b06530.
- [20] 陶玉强, 白书欣, 李顺. Ni/Al 复合材料的起始反应温度研究 [J]. *南华大学学报 (自然科学版)*, 2016, 30(3): 73–78. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0062.2016.03.017.
TAO Y Q, BAI S X, LI S. Research on the initial reaction temperatures of Ni/Al composites [J]. *Journal of University of South China (Science and Technology)*, 2016, 30(3): 73–78. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0062.2016.03.017.
- [21] ZHOU Q, HU Q W, WANG B, et al. Fabrication and characterization of the Ni-Al energetic structural material with high energy density and mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 832: 154894. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154894.
- [22] EAKINS D E, THADHANI N N. Shock compression of reactive powder mixtures [J]. *International Materials Reviews*, 2009, 54(4): 181–213. DOI: 10.1179/174328009X461050.
- [23] ATKINSON H V, DAVIES S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: an overview [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(12): 2981–3000. DOI: 10.1007/s11661-000-0078-2.
- [24] 姜卓钰, 张朋, 包建文, 等. 等静压技术在材料加工领域的应用现状 [J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(1): 13–19. DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.003.
JIANG Z Y, ZHANG P, BAO J W, et al. Current applications of isostatic pressing technology in materials processing field [J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2017, 47(1): 13–19. DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.003.
- [25] ALKHIMOV A P, KOSAREV V F, PAPYRIN A N. A method of “cold” gas-dynamic deposition [J]. *Soviet Physics Doklady*, 1990, 35(10): 1047.
- [26] GUO D, KAZASIDIS M, HAWKINS A, et al. Cold spray: over 30 years of development toward a hot future [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2022, 31(4): 866–907. DOI: 10.1007/s11666-022-01366-4.
- [27] LEE H, SHIN H, LEE S, et al. Effect of gas pressure on Al coatings by cold gas dynamic spray [J]. *Materials Letters*, 2008, 62(10/11): 1579–1581. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.09.026.
- [28] CHAMPAGNE V K. The cold spray materials deposition process [M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2007.
- [29] 王成国, 林俐菁, 刘红丽, 等. 基于高压扭转法制备 SiCp/Al 基复合材料 [J]. *精密成形工程*, 2012, 4(6): 82–84. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2012.06.023.
WANG C G, LIN L J, LIU H L, et al. SiCp/Al composites fabricated by high-pressure torsion [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2012, 4(6): 82–84. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2012.06.023.
- [30] LANGAN T, RILEY M A, BUCHTA M W. Reactive shaped charges and thermal spray methods of making same: US, 7278353 [P]. 2007-10-09.

- [31] RUSSELL A M, LUND T, CHUMBLEY L S, et al. A high-strength, high-conductivity Al-Ti deformation processed metal matrix composite [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, 30(3): 239–247. DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00163-8.
- [32] HORITA M, NAKAYAMA N, SAITO N, et al. Mechanical properties of titanium/aluminum composite material by compression shearing method at room temperature [C]//Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy: European Society for Composite Materials, 2012: 1–5.
- [33] MOZAFFARI A, MANESH H D, JANGHORBAN K. Evaluation of mechanical properties and structure of multilayered Al/Ni composites produced by accumulative roll bonding (ARB) process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 489(1): 103–109. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.09.022.
- [34] 崔岩, 王利成, 董常青, 等. 累积叠轧制备 Ni/Al 多层复合材料 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(24): 78–80. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.24.018.
- CUI Y, WANG L C, DONG C Q, et al. Preparation of Ni/Al multilayer composites by accumulative roll bonding [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(24): 78–80. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.24.018.
- [35] YANG D K, CIZEK P, HODGSON P, et al. Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding [J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(5): 321–324. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.11.036.
- [36] PATSELOV A, GREENBERG B, GLADKOVSKII S, et al. Layered metal-intermetallic composites in Ti-Al system: strength under static and dynamic load [J]. *AASRI Procedia*, 2012, 3: 107–112. DOI: 10.1016/j.aasri.2012.11.019.
- [37] 张度宝, 汪涛, 鱼银虎, 等. Ni-Al 含能结构材料的制备和性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(11): 3469–3473.
- ZHANG D B, WANG T, YU Y H, et al. Preparation and properties of Ni-Al energetic structural material [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(11): 3469–3473.
- [38] THADHANI N N, GRAHAM R A, ROYAL T, et al. Shock-induced chemical reactions in titanium-silicon powder mixtures of different morphologies: time-resolved pressure measurements and materials analysis [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(3): 1113–1128. DOI: 10.1063/1.365878.
- [39] FERRANTI JR L, THADHANI N N. Dynamic mechanical behavior characterization of epoxy-cast Al+Fe₂O₃ thermite mixture composites [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(11): 2697–2715. DOI: 10.1007/s11661-007-9272-9.
- [40] CHIU P H, NESTERENKO V F. Dynamic behavior and fracture of granular composite Al-W [C]// Proceedings of DYMAT International Conferences. France: EDP Sciences, 2009: 947–953. DOI: 10.1051/dymat/2009133.
- [41] GRUDZA M E, FLIS W J, LAM H L, et al. Reactive material structures: W911NF-09-C-0014 [R]. King of Prussia, PA, USA: DE Technologies Inc., 2014.
- [42] OLNEY K L, CHIU P H, LEE C W, et al. Role of material properties and mesostructure on dynamic deformation and shear instability in Al-W granular composites [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(11): 114908. DOI: 10.1063/1.3665644.
- [43] 宋丹丹. Ni-Al-W 活性复合材料组织与性能关系研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 1–48.
- SONG D D. Study on the relationship between microstructure and properties of Ni-Al-W active composite materials [D]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology, 2015: 1–48.
- [44] JEON B S, LEE J J, KIM J K. Low velocity impact and delamination buckling behavior of composite laminates with embedded optical fibers [J]. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8(1): 41–48. DOI: 10.1088/0964-1726/8/1/004.
- [45] CAI J, WALLEY S M, HUNT R J A, et al. High-strain, high-strain-rate flow and failure in PTFE/Al/W granular composites [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 472(1/2): 308–315. DOI: 10.1016/j.msea.2007.03.068.
- [46] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. *Proceedings of the Physical Society: Section B*, 1949, 62(11): 676–700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302.
- [47] TAYLOR G I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress: I. theoretical considerations [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 194(1038): 289–299. DOI: 10.1098/rspa.1948.0081.
- [48] EAKINS D E, THADHANI N N. The shock-densification behavior of three distinct Ni+Al powder mixtures [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(11): 111903. DOI: 10.1063/1.2896653.
- [49] AGHAYAN S, BIELER S, WEINBERG K. Determination of the high-strain rate elastic modulus of printing resins using two different split Hopkinson pressure bars [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2022, 26(4): 761–773. DOI: 10.1007/s11043-021-09511-2.

- [50] 徐涛, 何源, 焦俊杰, 等. 爆炸加载 Al/Ni 活性材料的准静态力学行为 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(7): 258–262. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.07.044.
XU T, HE Y, JIAO J J, et al. Quasi-static mechanical behavior of Al/Ni active material after explosive loading [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(7): 258–262. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.07.044.
- [51] 王比, 安二峰, 陈鹏万, 等. 爆炸烧结制备 W-Al 含能结构材料及其准静态压缩特性研究 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(6): 063401. DOI: 10.11858/gywlb.20190753.
WANG B, AN E F, CHEN P W, et al. Fabrication of W-Al energetic structural materials by explosive consolidation and investigation of its quasi-static compression properties [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(6): 063401. DOI: 10.11858/gywlb.20190753.
- [52] WEI C T, VITALI E, JIANG F, et al. Quasi-static and dynamic response of explosively consolidated metal-aluminum powder mixtures [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(3): 1418–1432. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.10.027.
- [53] REN K R, CHEN R, LIN Y L, et al. Probing the impact energy release behavior of Al/Ni-based reactive metals with experimental and numerical methods [J]. *Metals*, 2019, 9(5): 499. DOI: 10.3390/met9050499.
- [54] 曹召勋, 王军, 徐永东, 等. Al-Ni 活性金属材料力学性能及其释能行为研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(5): 90–96. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20180828.005.
CAO Z X, WANG J, XU Y D, et al. Mechanical properties and impact energy release behavior of Al-Ni reactive metallic materials [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(5): 90–96. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20180828.005.
- [55] 丁青云, 骆心怡, 陶杰, 等. 原始层厚比对 Ni/Al 多层含能结构材料放热性能及力学性能的影响 [J]. *材料工程*, 2020, 48(12): 156–162. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000954.
DING Q Y, LUO X Y, TAO J, et al. Effects of original layer thickness ratio on exothermic and mechanical properties of Ni/Al multilayered energetic structural composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(12): 156–162. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000954.
- [56] DUNBAR E, THADHANI N N, GRAHAM R A. High-pressure shock activation and mixing of nickel-aluminium powder mixtures [J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(11): 2903–2914. DOI: 10.1007/bf00354693.
- [57] REN H L, LIU X J, NING J G. Microstructure and mechanical properties of W-Zr reactive materials [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 660: 205–212. DOI: 10.1016/j.msea.2016.02.009.
- [58] 刘晓俊, 任会兰, 宁建国. 不同配比 W/Zr 活性材料冲击反应实验研究 [J]. *材料工程*, 2017, 45(4): 77–83. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.001212.
LIU X J, REN H L, NING J G. Experimental study on impact response of W/Zr reactive materials with different proportions [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(4): 77–83. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.001212.
- [59] 刘晓俊, 任会兰, 宁建国. Zr-W 多功能含能结构材料的制备及动态压缩特性 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(10): 2297–2303. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160315.001.
LIU X J, REN H L, NING J G. Preparation and dynamic compression properties of Zr-W multifunctional energetic structural material [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(10): 2297–2303. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160315.001.
- [60] 宋超慧, 任会兰, 李尉, 等. 不同 W 含量 Al/W 活性材料的冲击压缩特性 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(6): 064106. DOI: 10.11858/gywlb.20210738.
SONG C H, REN H L, LI W, et al. Impact compression characteristics of Al/W active materials with different W additions [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(6): 064106. DOI: 10.11858/gywlb.20210738.
- [61] ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(8): 083508. DOI: 10.1063/1.4793281.
- [62] 张将, 张先锋, 范秉源, 等. 钨锆合金的动态力学特性研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2013, 36(1): 3–6. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2013.01.020.
ZHANG J, ZHANG X F, FAN B Y, et al. Dynamic mechanical properties of W-Zr alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(1): 3–6. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2013.01.020.
- [63] 陈元建, 陈进, 王军, 等. Al-Ni-W 活性材料动态力学行为及其释能特性 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(4): 71–75. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20180615.002.

- CHEN Y J, CHEN J, WANG J, et al. Dynamic mechanical behavior and energy release characteristics of Al-Ni-W reactive material [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(4): 71–75. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20180615.002.
- [64] 陈进, 曹召勋, 郭双锋, 等. Al-Ni-W 活性材料组织性能及毁伤效应研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(4): 29–35. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200609.002.
- CHEN J, CAO Z X, GUO S F, et al. The structure properties and damage effects of Al-Ni-W reactive material [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(4): 29–35. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200609.002.
- [65] CHEN J, CHEN Y J, LI X, et al. Metallic reactive materials application in fragmentation warhead [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1507(6): 062004. DOI: 10.1088/1742-6596/1507/6/062004.
- [66] 熊玮, 张先锋, 陈亚旭, 等. 冷轧成型 Al/Ni 多层复合材料力学行为与冲击释能特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 055301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0451.
- XIONG W, ZHANG X F, CHEN Y X, et al. Mechanical properties and shock-induced chemical reaction behaviors of cold-rolled Al/Ni multi-layered composites [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 055301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0451.
- [67] 耿铁强, 金光, 朱正旺, 等. Ni-Al 含能结构材料的制备及性能 [J]. *金属热处理*, 2019, 44(7): 93–96. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2019.07.020.
- GENG T Q, JIN G, ZHU Z W, et al. Preparation and properties of Ni-Al energetic structural material [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(7): 93–96. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2019.07.020.
- [68] GUO L F, ZHANG Z M, LI B C, et al. Modeling the constitutive relationship of powder metallurgy Al-W alloy at elevated temperature [J]. *Materials and Design*, 2014, 64: 667–674. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.031.
- [69] NESTERENKO V F, CHIU P H, BRAITHWAITE C H, et al. Dynamic behavior of particulate/porous energetic materials [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1426(1): 533–538. DOI: 10.1063/1.3686334.
- [70] DOLGOBORODOV A Y, MAKHOV M N, KOLBANEV I V, et al. Detonation in an aluminum-Teflon mixture [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2005, 81(7): 311–314. DOI: 10.1134/1.1944069.
- [71] KELLY S C, THADHANI N N. Shock compression response of highly reactive Ni+Al multilayered thin foils [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(9): 095903. DOI: 10.1063/1.4942931.
- [72] 李强, 姜春兰, 杜焯. 富铝 Fe-Al 粉末的热压烧结工艺及组织研究 [J]. *功能材料*, 2014, 18(45): 20138–20141. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2014.20.029.
- LI Q, JIANG C L, DU Y. Investigation on preparative technology and microstructure of Fe-Al mixture with rich aluminum by hot-pressing sintering [J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 18(45): 20138–20141. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2014.20.029.
- [73] 王肖义, 王扬卫, 王在成, 等. 成分及烧结温度对 Fe-Al 反应材料反应热的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(10): 3043–3047.
- WANG X Y, WANG Y W, WANG Z C, et al. Effect of composition and sintering temperature on reaction heat of Fe-Al reactive material [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(10): 3043–3047.
- [74] 刘青, 廖雪松, 张峰浩, 等. 冷喷涂 Ni-Al-W 活性复合材料反应性能研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(7): 225–228. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2019.07.046.
- LIU Q, LIAO X S, ZHANG F H, et al. Study on reaction performance of Ni-Al-W active composites consolidated by cold spraying [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(7): 225–228. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2019.07.046.
- [75] 尚宏春, 武鹏飞, 姜燕山. SPRC340S 金属在不同应变率下的本构模型评估 [J]. *精密成形工程*, 2020, 12(6): 44–48. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.06.006.
- SHANG H C, WU P F, LOU Y S. Constitutive model evaluation of SPRC340S metal at different strain rates [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2020, 12(6): 44–48. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.06.006.
- [76] GAO F, ZHANG X F, AHMAD S, et al. Dynamic behavior and constitutive model for two tantalum-tungsten alloys under elevated strain rates [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(10): 2753–2762. DOI: 10.1016/s1875-5372(18)30002-x.
- [77] 史安顺, 张先锋, 乔良, 等. 多功能含能结构材料冲击压缩特性的理论计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(2): 148–155. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)02-0148-08.

- SHI A S, ZHANG X F, QIAO L, et al. Theoretical calculation on shock compression characteristics of multifunctional energetic structural materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(2): 148–155. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)02-0148-08.
- [78] 罗普光, 毛亮, 魏晨杨, 等. 锆基非晶活性材料动态力学性能及本构关系 [J]. *含能材料*, 2021, 29(12): 1176–1181. DOI: 10.11943/CJEM2021068.
- LUO P G, MAO L, WEI C Y, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive relations of Zr-based amorphous reactive material [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(12): 1176–1181. DOI: 10.11943/CJEM2021068.
- [79] WILLIAMSON R L. Parametric studies of dynamic powder consolidation using a particle-level numerical model [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(3): 1287–1296. DOI: 10.1063/1.346730.
- [80] BENSON D J. The calculation of the shock velocity-particle velocity relationship for a copper powder by direct numerical simulation [J]. *Wave Motion*, 1995, 21(1): 85–99. DOI: 10.1016/0165-2125(94)00044-6.
- [81] BENSON D J, CONLEY P. Eulerian finite-element simulations of experimentally acquired HMX microstructures [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1999, 7(3): 333–354. DOI: 10.1088/0965-0393/7/3/304.
- [82] AUSTIN R A. Modeling shock wave propagation in discrete Ni/Al powder mixtures [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010: 1–20.
- [83] AUSTIN R A, MCDOWELL D L, BENSON D J. Numerical simulation of shock wave propagation in spatially-resolved particle systems [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2006, 14(4): 537–561. DOI: 10.1088/0965-0393/14/4/001.
- [84] AUSTIN R A, MCDOWELL D L, BENSON D J. Mesoscale simulation of shock wave propagation in discrete Ni/Al powder mixtures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(12): 123511. DOI: 10.1063/1.4729304.
- [85] 乔良, 张先锋, 何勇, 等. 颗粒金属材料冲击压缩细观力学仿真模型生成方法 [J]. *南京理工大学学报*, 2013, 37(2): 219–225. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2013.02.004.
- QIAO L, ZHANG X F, HE Y, et al. Study on generation of shock compression meso-mechanic simulation model for particle metal materials [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2013, 37(2): 219–225. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2013.02.004.
- [86] QIAO L, ZHANG X F, HE Y, et al. Mesoscale simulation on the shock compression behaviour of Al-W-Binder granular metal mixtures [J]. *Materials and Design*, 2013, 47: 341–349. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.013.
- [87] EAKINS D E, THADHANI N N. Mesoscale simulation of the configuration-dependent shock-compression response of Ni+Al powder mixtures [J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(7): 1496–1510. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.12.009.
- [88] EAKINS D, THADHANI N N. Discrete particle simulation of shock wave propagation in a binary Ni+Al powder mixture [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(4): 043508. DOI: 10.1063/1.2431682.
- [89] REEVES R V, MUKASYAN A S, SON S F. Thermal and impact reaction initiation in Ni/Al heterogeneous reactive systems [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(35): 14772–14780. DOI: 10.1021/jp104686z.
- [90] AYDELOTTE B B, THADHANI N N. Mechanistic aspects of impact initiated reactions in explosively consolidated metal+aluminum powder mixtures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 570(15): 164–171. DOI: 10.1016/j.msea.2013.01.054.
- [91] 熊玮, 张先锋, 陈海华, 等. Al/Ni 类含能结构材料冲击压缩特性细观模拟 [J]. *含能材料*, 2020, 28(10): 984–994. DOI: 10.11943/CJEM2020171.
- XIONG W, ZHANG X F, CHEN H H, et al. Mesoscale modeling on dynamic behavior of Al/Ni energetic structural materials under shock compression [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(10): 984–994. DOI: 10.11943/CJEM2020171.

(责任编辑 张凌云)