

高熵合金在活性毁伤领域的研究进展*

杨乐, 王可慧*, 戴湘晖, 王凯强, 段建, 邹慧辉, 党天骄

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 高熵合金作为一种新型活性毁伤材料, 近年来在活性毁伤领域受到广泛关注。高熵合金不仅具有高强度、高硬度、优异的塑性和能量释放特性, 且材料成分和性能参数可设计, 可满足不同应用场景下对材料的需求。此外, 高熵合金在加工成型、力学强度和冲击释能等方面也具有潜在应用优势, 特别是 Ti-Zr 基体系因具备侵彻-释能耦合效应成为研究热点, 已有实验证实了高熵合金在活性毁伤领域的应用潜力。目前, 活性高熵合金在弹体壳体、活性破片、药型罩和穿甲弹等领域具有广阔的应用前景。本文介绍了活性高熵合金的定义和特点, 归纳了现有活性高熵合金体系, 梳理和总结了活性高熵合金在动态力学行为和冲击释能特性方面的研究现状, 以及高熵合金的潜在应用领域, 并对高熵合金在活性毁伤领域的未来发展方向进行了展望。

关键词: 活性材料; 活性高熵合金; 冲击释能; 动态力学行为; 工程应用

中图分类号: O385; O521.9

文献标识码: A

高熵合金 (high-entropy alloys, HEAs) 的设计理念是 21 世纪初由英国牛津大学 Cantor^[1]和清华大学叶均蔚^{Error! Reference source not found.}分别独立提出的, 是材料科学领域近 20 年来的突破性概念。它彻底改变了传统合金的设计思路, 不同于传统的以 1 种或 2 种元素为主要基体、通过添加少量其他元素来改善合金性能的设计方法, 高熵合金是由 4 种或 4 种以上元素等摩尔比或近等摩尔比组成的高混合熵多主元合金。它颠覆了人们普遍认为复杂的元素组成会形成金属间化合物的理解, 而是更倾向于形成简单固溶体结构^[3-6]。

通常认为, 高熵合金在结构上的特点可归纳为四大“核心效应”, 即高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应和“鸡尾酒”效应^[7-9]。高熵效应是指多种组元等比或近等比混合形成高混合熵, 致使合金倾向于形成简单固溶体, 而非金属间化合物, 高熵效应是高熵合金的基本特点。晶格畸变效应是指高熵合金普遍存在大于传统合金的晶格畸变, 严重的晶格畸变显著阻碍了位错滑移运动, 从而产生显著的强化作用, 是高熵效应的延伸。实验结果显示, CrNbTiZr 高熵合金的维氏硬度达 4.10 GPa^[10], 而 AlMo_{0.5}NbTa_{0.5}TiZr 高熵合金的维氏硬度更是达到 5.8 GPa^[11]。迟滞扩散效应是指高熵合金中的元素普遍具有较低的扩散速率, 其扩散难度的增大被认为主要与较强的晶格畸变有关^[12-13]。“鸡尾酒”效应是指具有不同物理和结构特点的组元进行组合得到高熵合金时, 该高熵合金的相关特性不止是组元特性的简单加和或平均, 组元间的相互协同往往会造成高熵合金具有特殊性质。这些特性赋予了高熵合金超越传统合金的性能潜力。

部分高熵合金不仅有优异的力学性能, 还有良好的冲击释能特性, 可作为活性材料使用, 这类高熵合金也称活性高熵合金。20 世纪 70 年代初, 美国科学家 Willis 等^[14]在使用轻气炮装置探究高速撞击条件下的材料动力学响应时发现, 在常规形态下表现为钝感的聚四氟乙烯/铝 (poly tetra fluoro ethylene/aluminum, PTFE/Al) 在高速撞击时出现发光发热现象, 通过深入分析, 证实这一现象源于材料组元间突发的剧烈化学反应释放大量热能和光辐射。这类在冲击作用条件下释放能量的

*收稿日期: 2026-03-26; 修回日期: 2026-04-16

作者简介: 杨乐 (2002-), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: yangle@nint.ac.cn

通讯作者: 王可慧 (1975-), 女, 博士, 研究员, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: wangkehui@nint.ac.cn

材料被称为活性材料 (reactive materials, RMs)。从国内外研究发展看, 活性材料体系大致可分为金属含氟聚合物、金属间化合物、非晶合金和高熵合金 4 类^[15]。早期研究中, 金属含氟聚合物活性材料因具有较高的能量释放效率, 成为科研人员的热门材料, 但其强度较低, 极大地限制了其应用范围。对于金属间化合物活性材料, 虽然强度得到了提升, 但是能量释放效率较低, 而且材料脆性高, 依然无法满足人们对强冲击载荷下材料的性能要求。之后提出的非晶合金活性材料虽然具有高强度, 但是塑性较差。相比之下, 活性高熵合金具有优异的力学性能 (高强度、高硬度、良好的塑性、高应变率强化效应以及强剪切自锐特性) 和良好的释能特性^[16-21], 可被广泛应用于活性毁伤材料领域。其中, 难熔高熵合金, 特别是 Ti-Zr 基体系^[22], 具备侵彻-释能耦合效应, 且强度-硬度-塑性组合相比于其他材料更优异, 成为近年来的研究热点。

本文将简要介绍活性高熵合金, 归纳已有研究中的活性高熵合金体系, 进而梳理和总结活性高熵合金的动态力学行为和冲击释能特性及其实验和数值模拟方法, 提出活性高熵合金的工程应用前景, 及其未来在活性毁伤领域中发展的一些思考。

1 活性高熵合金

1.1 活性高熵合金的定义

活性高熵合金是指具有高强度、高塑性和良好冲击释能特性的高熵合金体系。这类高熵合金, 尤其是部分难熔高熵合金, 具有优异的力学性能和良好的反应释能特性, 可应用于活性毁伤领域。活性高熵合金独特的性能组合源于其高混合熵所诱导的体心立方 (body-centered cubic, BCC) 固溶体结构及严重的晶格畸变效应。这种构型不仅保障了材料在超高温下的相稳定性和抗软化能力, 还使其内部储存较高的化学势能, 为高速冲击过程中的剧烈氧化释能提供了物质基础。

2010 年, 美国空军实验室的 Senkov 等^[23]首次公开提出了基于新型高温结构金属而开发的新型高熵合金体系——难熔高熵合金 (refractory high-entropy alloys, RHEAs)。难熔高熵合金是一类主要由难熔金属元素以及非难熔金属元素 Al 等比或近等比组成的高熵合金, 既具有高熵合金的高熵效应、晶格畸变效应等特点, 又拥有难熔金属元素高熔点、高氧化活性、高燃烧潜热的优异特点, 在活性毁伤领域具有巨大的应用潜力。

2017 年, 国防科技大学白书欣团队^[24]首次提出了活性高熵合金材料的概念, 即拥有高强度、高塑性、高活性的活性高熵合金体系, 并验证了 HfZrTiTa_{0.53} 新型高熵合金的冲击释能特性。目前, 有多种高熵合金具有优异的力学性能和良好的冲击释能特性, 有很大潜力应用于活性毁伤领域, 如 HfZrTiTa_x、NbZrTiTa、TiZrNbV、WMoFeNi、AlFeCrCoNi 等。

1.2 活性高熵合金的特点

活性高熵合金不仅有高熵合金的高强度、高硬度和良好的塑性等特点, 最重要的是, 具有良好的冲击释能特性。相比于惰性金属, 活性高熵合金通过动能-化学能耦合毁伤模式和“先穿后爆”的时序毁伤机理, 使武器装备对目标的毁伤能力得到质的提升。活性破片或含能弹体对目标的毁伤过程遵循先动能侵彻、后化学反应的时序耦合机制, 在强冲击载荷作用下, 材料首先凭借自身动能实现贯穿, 随即被激活并发生剧烈的化学反应, 从而通过动能与化学能的协同叠加效应实现高效毁伤的目的。活性高熵合金在高速撞击条件下呈现破碎行为, 并伴随着侵彻穿孔、碎片飞散、穿燃后效等多物理场与化学场耦合现象, 其优异的反应释能特性与力-热-化耦合响应能力, 成为新一代活性毁伤材料的候选材料。

活性高熵合金在冲击释能领域展现出独特的综合优势, 其内在机理主要体现在力学与化学能的耦合释放机制上。首先, 其“拓扑有序”的晶体学特征为位错提供了充裕的运动空间, 赋予了非晶合金所欠缺的本征塑性, 从而确保了良好的后续加工性能。其次, 合金内部以简单固溶体结构为主, 原子间依赖无方向性的弱金属键结合。在高速冲击下, 高活性组元极易挣脱晶格束缚并暴露于空气中, 进而触发剧烈的氧化反应实现瞬态释能。最后, 显著的晶格畸变不仅引发强大的固溶强化效应, 确保材料的高强高硬特性, 同时也为氧原子的内扩散构建高速通道, 有效加速并提升氧化反应的动力学过程与释能效率^[25]。

2 活性高熵合金材料体系

活性高熵合金作为一种新型活性材料，相比于传统的活性材料，具有高强度和良好的释能特性等优异性能。例如：王海福等^[26]在实验中采用的活性破片材料的压缩强度为 65 MPa，而高熵合金的压缩强度普遍在 700 MPa 以上^[19]；TiZrHfCu_{0.3} 高熵合金弹丸撞击钢板后，每克材料可释放的能量为 6.68 kJ^[27]，而 Al/Teflon 弹丸撞击钢板后，每克材料可释放的能量仅为 4.663 kJ^[28]。以下将介绍目前有潜力作为活性材料的高熵合金体系及其研究现状。

2.1 HfZrTiTa 系高熵合金

Zhang 等^[24]首次提出，可以采用难熔高熵合金替代传统的惰性破片作为活性释能材料。他们采用电弧真空熔炼法制备了一种新型 HfZrTiTa_{0.53} 高熵合金，其准静态屈服强度、抗压强度和断裂应变分别达到 786 MPa、1314 MPa 和 13.5%。在高速撞击下，HfZrTiTa_{0.53} 高熵合金弹丸与空气发生反应，释放出大量的能量，并在穿透钢板后发生了明显的释能燃爆现象。HfZrTiTa_{0.53} 高熵合金优异的力学性能、良好的侵彻性能和释能特性展示了作为高强度活性材料的巨大潜力。

2.2 TiZrNbV 系高熵合金

Ren 等^[29]通过电弧真空熔炼工艺并辅以铜模快速水凝固方法，制备了 TiZrNbV 难熔高熵合金试样，并对其在冲击加载下的能量释放特性开展了研究。研究发现，该合金在冲击载荷作用下的失效机制可归因于绝热剪切带的萌生与扩展所导致的脆性断裂，断口表面呈现的熔化形貌特征表明，剪切局域化区域内的温度已攀升至材料熔点之上。他们对冲击后碎屑进行了表面成分分析，检测到极高的氧元素含量，这一证据明确指向了材料在碎裂瞬间与氧气发生了强烈的金属氧化放热反应。定量分析进一步证实，冲击速度是调控化学释能效果的关键参量，速度越高，氧化反应的剧烈程度越高、能量释放越大。

王洁^[22]在对 TiZrNbV 高熵合金体系的拓展研究中获得了对更具深度的认识。通过实验观察证实，在高速撞击的极端条件下，TiZrNbV 高熵合金能够被有效激活并进入持续燃烧状态，燃烧过程本质上是合金中高活性金属组元与氧气发生快速氧化并生成稳定氧化物的放热反应，该过程伴随着可观的热能输出。这一系列发现充分验证了 TiZrNbV 高熵合金作为一种高性能冲击释能材料的可靠性与潜力。

2.3 NbZrTiTa 系高熵合金

王睿鑫^[30]依据高熵合金设计理念，自主设计并制备了 NbZrTiTa 难熔高熵合金体系，并采用弹道冲击实验手段对其反应释能特性进行了定量表征与评估。研究数据揭示，在冲击作用过程中，弹靶相互作用区域内的靶室环境经历了剧烈的热力学状态变化，具体表现为内部温度与气体压力的同步急剧上升，由此形成了明显的超压现象。定量分析结果表明，靶室内超压幅值与弹丸侵彻速度之间呈现正相关关系，即侵彻速度越大，超压响应越强烈，实验中记录到的超压峰值高达 0.18 MPa。

高熵合金在动态载荷下的变形机制也更加复杂，位错运动更加剧烈，并常伴有孪生诱发塑性 (twinning induced plasticity, TWIP) 或相变诱导塑性 (transformation induced plasticity, TRIP) 效应等^[31]。为了突破 NbZrTiTa 高熵合金在塑性储备与冲击碎裂程度方面的性能瓶颈，王睿鑫^[30]在后续工作中通过调整材料制备工艺参数，创造性地提出了利用原位 TRIP 效应来优化单相均匀亚稳态 NbZrTiTa 合金综合性能的技术方案。该方案旨在通过调控合金的相稳定性，使其在变形前即处于一种富含大量可动位错的热力学亚稳态结构。后续的释能特性验证实验表明，该合金在受力变形期间成功激活了预期的 TRIP 效应，不仅实现了高强度与高塑性的协同提升，更关键的是，使诱发绝热剪切失稳的应变率阈值推向更高水平。这一机制有效保障了材料在高速撞击下的充分碎裂与高比率化学能释放，从而显著强化该合金的侵彻贯穿与后效毁伤能力。

2.4 NbZrTiW 系高熵合金

姬文苏等^[32]研究了 NbZrTiW 难熔高熵合金的冲击释能与破碎行为，通过与常规钨合金的对比试验，证实了 NbZrTiW 高熵合金在高速冲击载荷作用下具有显著的释能效应。采用 32.7 L 准密闭容器进行了破片的冲击释能测试，结果表明，破片在速度为 1631 m/s 的条件下可产生 0.176 MPa 超

压。NbZrTiW 高熵合金在高速冲击载荷作用下先破碎后燃烧，产生类爆轰的释能效应，主要是 Zr 元素的氧化反应释放了大量化学能，破碎后产生的碎片分布遵循幂律分布，碎片尺寸与释能密切相关。

2.5 WFeNiMo 系高熵合金

Liu 等^[33]开发了一种新的具有优异自锐能力的化学无序多相 WFeNiMo 高熵合金，通过力学性能试验，证明了其具有优异的强度和塑性。他们还对 WFeNiMo 高熵合金的侵彻性能进行了研究，结果表明，WFeNiMo 在高速侵彻过程中释放大量能量的同时，出现动态再软化现象，从而产生自锐化行为，增强了其侵彻性能。

随后，陈海华等^[34]针对 WFeNiMo 高熵合金进行了准静态压缩、动态压缩及破片冲击实验，研究了 WFeNiMo 高熵合金在不同应变率下的变形行为、微观变形机制及侵彻性能。通过弹道实验，发现 WFeNiMo 破片侵彻靶板时存在释能现象。此外，在相同的撞击速度下，WFeNiMo 高熵合金侵彻靶板消耗的能量低于钨合金，对薄钢靶具有更强的侵彻穿透能力。

侯先苇等^[35]对比分析了 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 2 种典型高熵合金的冲击释能特性，发现 2 种高熵合金破片分别在 1356 和 1217 m/s 出现能量释放现象，且随着破片速度的增加，冲击释能反应程度加剧。他们进一步开展了 2 种高熵合金破片穿过薄靶后侵彻多层铝靶的毁伤特性研究，结果表明，随着前置薄靶厚度的增加，高熵合金冲击释能反应程度先增强后减弱。

2.6 含 Al 高熵合金

Geantă 等^[36]采用实验测试与数值模拟相结合的方法，评估了 AlFeCrCoNi 系高熵合金的抗冲击性能，研究表明，通过调整化学成分，可以优化高熵合金的动态冲击性能。在穿甲试验中，AlFeCrCoNi 高熵合金样品表现出良好的韧性和力学性能，在高速撞击过程中产生了显著的侵爆破坏效应。

Ma 等^[37]研究了 Ce 含量对 $\text{Al}_{0.5}\text{NbZrTi}_{1.5}\text{Ta}_{0.8}$ 动态压缩力学特性的影响，结果表明，在 719 m/s 的速度下，含 Ce 的 $\text{Al}_{0.5}\text{NbZrTi}_{1.5}\text{Ta}_{0.8}$ 高熵合金破片可以穿透 6 mm 厚的钢板，并成功点燃靶后方的棉花，随着 Ce 含量的增加，材料的释能效果逐渐增强。

2.7 小结

活性高熵合金的研究已初步形成了从合金体系设计到能量释放机制探索的多元格局。从以 Ti、Zr 等活泼金属为主元的全活性组元高熵合金，到引入难熔金属或过渡族元素构建“结构-能量”双功能一体化合金，各类研究路径均展现出高熵合金在含能材料领域的独特潜力。不同体系在热力学驱动力、反应释热阈值、力学承载能力、反应完全度等方面呈现出一些差异化特征，但共性地印证了高熵合金的高熵效应对于提升反应活性、降低扩散势垒、调控释能速率的正向作用。

3 活性高熵合金动态力学行为及实验方法

3.1 活性高熵合金的动态力学行为

活性高熵合金凭借独特的晶格畸变效应、迟滞扩散效应以及优异的强韧性匹配，在准静态力学性能方面展现出超越诸多传统合金的显著优势。然而，在实际毁伤工程应用中，材料往往承受动态载荷，从高速冲击、爆炸加载到高频振动等，其应变率范围横跨 10^{-5} s^{-1} 至 10^5 s^{-1} 以上，远超准静态范畴。在动态载荷下，材料的力学响应、变形机制乃至失效模式均发生本质性转变，使得活性高熵合金的动态力学行为成为该领域由实验室走向工程化应用必须跨越的关键科学问题。

近年来，针对高熵合金动态力学行为的研究呈现出快速发展态势，研究对象从经典的面心立方 (face-centered cubic, FCC) 体系 (如 CoCrFeMnNi ^[38]) 逐步扩展至 BCC 难熔高熵合金、双相/多相高熵合金及活性高熵合金等多元体系。研究表明，活性高熵合金在动态加载下普遍表现出显著的应变率强化效应——屈服强度和流变应力随应变率升高而大幅提升。例如，轻质 BCC 结构 $(\text{Ti}_2\text{Zr})_{1.5}\text{NbVAl}_{0.5}$ 高熵合金在 10^4 s^{-1} 应变率下的屈服强度可达 2646.5 MPa，较 6000 s^{-1} 时提升约 34%^[38]；新型 TiZrHfTaMo 难熔高熵合金在 $3.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 下的动态屈服强度较准静态条件提升了约 72.7%^[39]。WFeNiMo 多相活性高熵合金在应变率从 1490 s^{-1} 提升到 2500 s^{-1} 时，合金的屈服强度从 1389

MPa 提升到 1688 MPa, 表现出显著的正应变率强化效应和应变率敏感性^[34]。这种强化效应与晶格畸变所导致的高位错运动能垒密切相关, BCC/多相结构高熵合金的热激活体积较传统 FCC 金属低约 1 个数量级, 这一特征定量揭示了其较高的应变率敏感性。

在变形机理层面, 相结构是决定高熵合金动态力学行为的核心因素。FCC 结构高熵合金在高应变率下通常以位错滑移为主, 伴随层错、孪晶及相变等多重变形机制的协同激活^[40]; 而 BCC 结构难熔高熵合金的变形机制则随应变率升高呈现由滑移向局域化剪切乃至绝热剪切带的递进演化^[41]。特别需要关注的是, 绝热剪切作为高应变率变形条件下材料的主要失效模式, 已成为动态力学行为研究的前沿热点。程兴旺团队^[42]通过原位动态监测手段, 实时捕获了难熔高熵合金在动态载荷下的力学性能与温度演化过程, 创新性地提出在剪切带形成前结构软化相较于热软化占据主导作用, 澄清了温升是剪切带形成后的能量耗散结果而非诱发剪切带的根本原因, 为动态性能优化提供了重要的理论参考。与此同时, 薛云飞团队^[43]揭示了 FCC 基纳米析出相强化高熵合金中全新的“回溶软化”机制——动态变形过程中局部温升触发析出强化相的瞬时溶解, 使局部剪切强度骤降, 极大地加速了剪切带的形成和扩展。这些发现表明, 高熵合金在动态加载下的失效行为远较传统合金复杂, 所蕴含的物理机制有待深入探索。

综合来看, 相结构对高熵合金动态性能的调控主要体现在以下方面: FCC 结构合金通过层错能调控可在孪生与相变之间实现变形机制切换, 在高应变率下往往表现出良好的强塑性匹配; BCC 结构合金则依靠高 Peierls 应力带来的显著应变率敏感性实现动态强化, 但其塑性相对有限; 双相/共晶结构通过 FCC 与 BCC (或 B2) 相的协同作用, 在强度与塑性之间取得更好的平衡, 且相界面对位错运动的阻碍效应进一步提升了应变硬化能力。这一认知为面向动态冲击应用的活性高熵合金成分设计提供了重要指导。活性高熵合金的核心特性在于“结构-能量一体化”: 准静态条件下, 材料保持化学惰性, 并具备可测量的承载能力; 而在极端动态条件下, 如冲击加载、高速碰撞等, 组分之间或组分与环境氧化剂之间发生显著的放热反应, 使材料兼具毁伤效应和释能特性。

3.2 活性高熵合金动态力学行为实验方法

分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 技术自 1949 年由 Kolsky 完善以来, 已成为研究材料在高应变率 ($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$) 下动态力学行为的核心实验手段^[44]。近年来, 研究者将 SHPB 技术应用于各类高熵合金的动态性能研究中, 在变形机制、失效规律和本构建模等方面取得了丰硕成果^[17, 19, 22, 30-31, 34, 45-46]。

SHPB 系统是基于—维弹性应力波传播理论。如图 1 所示, SHPB 实验装置主要由气枪、子弹 (撞击杆)、入射杆、透射杆、吸收杆、阻尼器、超动态应变仪等组成, 试样夹持于入射杆与透射杆之间。撞击杆以一定速度撞击入射杆产生压缩应力波, 应力波在入射杆中传播至试样界面时一部分反射、一部分透射, 通过记录入射杆和透射杆上的应变信号, 即可获得试样的动态应力-应变关系。

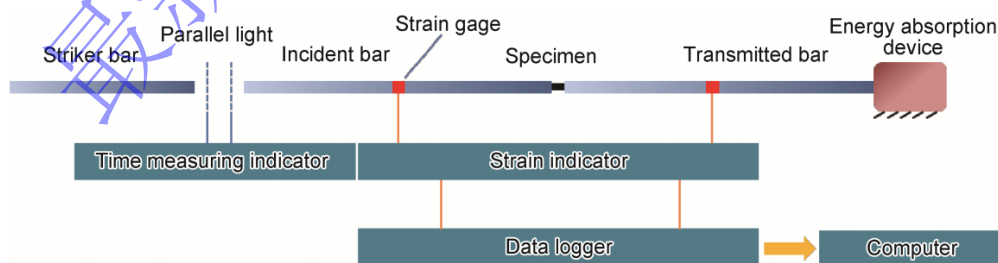


图 1 SHPB 示意图^[45]

Fig.1 Schematic diagram of SHPB^[45]

陈海华等^[34]为了探究 WFeNiMo 活性高熵合金在高应变率下的变形行为, 基于 SHPB 装置开展了室温下不同应变率下的动态压缩实验, 讨论了不同应变率下 WFeNiMo 变形特征的微观机制。图

2 为处理后高熵合金的应力-应变曲线。在不同应变率下，高熵合金呈现出不同的变形模式。随着应变率从 1490 s^{-1} 增大到 2500 s^{-1} ，实验后的试样由保持完好变为产生崩落碎片，再到破碎成多块碎片，最后破碎并粘滞在垫片上。这表明在较高的应变率下高熵合金仍具有一定的塑性，随着应变率提升，材料由塑性变形主导转变为塑性与脆性变形共存，再到呈现出明显的偏脆性特征，最后在高温高应变率下先熔化后凝结，说明材料变形存在明显的不均匀性。

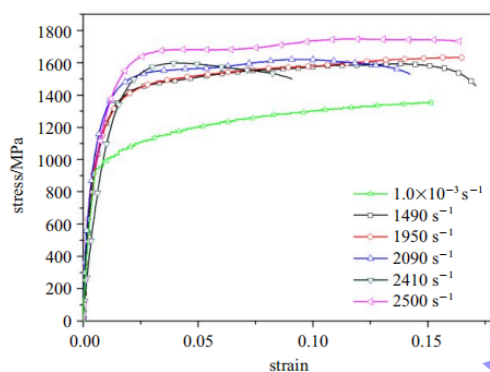


图2 高熵合金的应力-应变曲线^[34]

Fig.2 Stress-strain curves of HEAs^[34]

图3 为处理后的高熵合金屈服强度-应变率曲线。可见，屈服强度呈现应变率正相关效应，即随着应变率的提升，合金的屈服强度增大，表现出显著的正应变率强化效应和应变率敏感性。

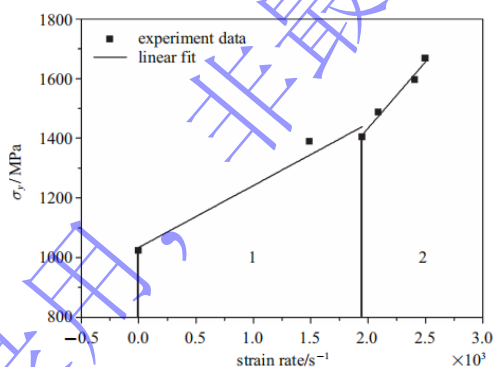


图3 高熵合金的屈服强度-应变率曲线^[34]

Fig.3 Yield strength-strain rate curve of HEAs^[34]

当前，活性高熵合金的动态力学研究正处于快速发展期。从最初的性能表征到深层次的微观机制解析，从单一应变率实验到温度-应变率耦合效应探索，从力学性能测试到释能特性与侵彻行为研究，该领域的研究广度和深度均在不断拓展。在此背景下，高熵合金 SHPB 实验的相关研究对于理解材料在动态加载下的响应规律、指导新型抗冲击材料设计具有重要意义。

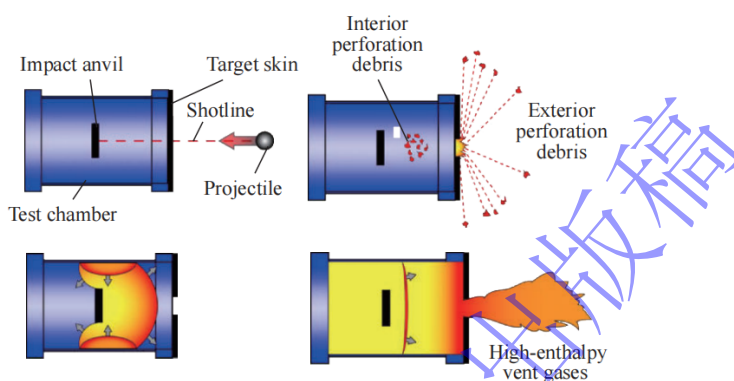
4 活性高熵合金冲击释能特性实验方法

4.1 准密闭容器测试

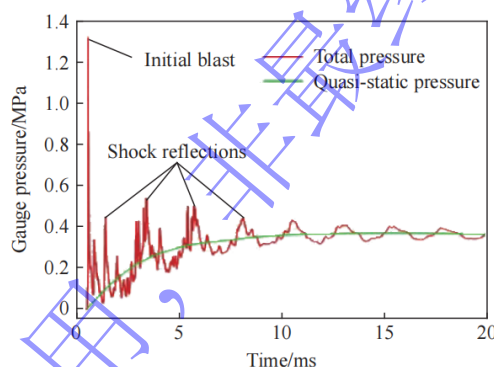
准密闭容器测试法是一种专门用于研究材料在受冲击载荷下能量释放机制的实验方法。该方法通过设计特定的准密闭实验容器，在可控条件下模拟冲击环境，实时监测材料反应过程中能量释放的物理化学行为，广泛应用于高能材料、活性材料以及复合材料等领域的性能评估。其原理是通过弹道枪或轻气炮加载（直接弹道实验）产生高速破片，撞击密闭容器内的靶材，测量内部超压、温度及气体传播速度。2005年，Ames^[47-48]率先系统地提出了活性材料在冲击作用下的能量释放特性

评估方法 (vented chamber calorimetry, VCC), 建立了活性材料释放能量和准静态压力的函数关系。

图 4(a)所示的密闭圆柱腔室为主体实验装置, 其一侧以薄铝板封闭, 腔室内置硬质砧板, 并设置壁载压力传感器。试样由气枪加速发射, 利用破膜原理测定入射速度。在弹丸穿透蒙皮铝板并与硬砧发生高速撞击的过程中, 材料内部发生急剧的组分间化学反应, 随之形成的破碎体在飞散期间持续与空气作用燃烧。碎片云释放的热能驱动腔内气体升温升压, 依据图 4(b)记录的典型压力时程, 可反演评估材料的冲击诱发化学能释放量级和反应完成度。



(a) Schematic diagram of the experiment



(b) History curve of quasi-static pressure

图 4 准密闭容器测试^[48]
Fig.4 Direct trajectory test^[48]

准密闭容器为耐高温、高压的密封容器 (由金属或复合材料制成), 允许材料在冲击过程中可控释放部分能量 (如气体、热量), 但需要避免完全封闭导致的极端危险环境。容器中配备传感器和监测窗口, 用于采集压力、温度、光学信号等数据。冲击加载系统通常为弹道枪、轻气炮、霍普曼装置或爆炸驱动器, 以高应变率 (如超过 10^5 s^{-1}) 对试样施加冲击载荷, 模拟真实场景中的碰撞或冲击工况^[49]。

4.1.1 弹道枪加载实验

侯先苇等^[35]研究了 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 2 种活性高熵合金的冲击释能和毁伤特性, 通过准密闭容器测试, 探究其在 500~1800 m/s 破片速度范围内的冲击反应释能行为。破片通过直径为 14.5 mm 的弹道枪加载, 试验装置还包括准密闭实验容器、测压装置、高速相机等, 图 5 为实验布局示意图。

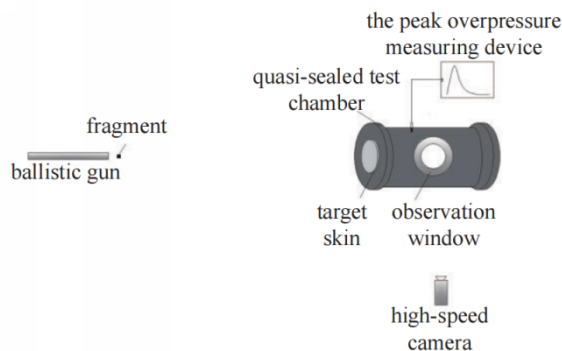


图 5 实验布局示意图^[35]

Fig.5 Schematic diagram of the experiment layout^[35]

图 6 和图 7 为高速摄像机记录的 2 种活性高熵合金破片在典型速度 (v) 下撞击实验容器时的冲击释能反应现象。FeNiMoW 和 FeNiCoCr 破片在速度分别为 1356 和 1217 m/s 时发生冲击释能反应, 破片发生碎裂, 部分发生化学反应; 随着撞击速度的继续增加, 释能反应程度和释能效率逐渐增强, 在 500~1800 m/s 速度范围内, FeNiMoW 和 FeNiCoCr 破片的单位质量冲击反应最大释能效率分别为 16.47% 和 32.18%。

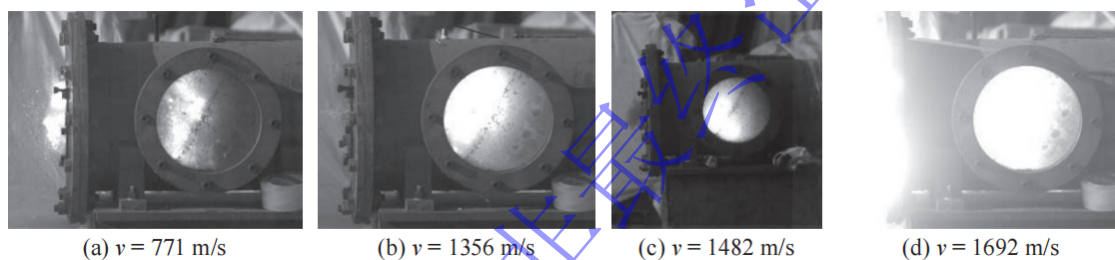


图 6 典型速度下 FeNiMoW 破片的冲击反应现象^[35]

Fig. 6 Impact reaction of FeNiMoW fragments with typical velocities^[35]

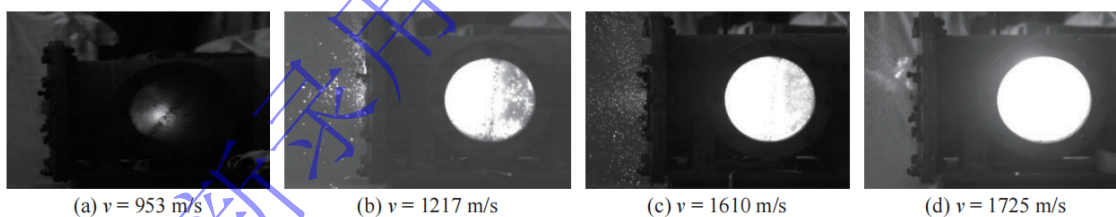


图 7 典型速度下 FeNiCoCr 破片的冲击反应现象^[35]

Fig.7 Impact reaction of FeNiCoCr fragments with typical velocities^[35]

进一步, 利用该实验平台开展了 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 活性高熵合金破片侵彻多层目标的毁伤特性研究。通过改变准密闭试验容器中前置钢靶厚度, 研究了 2 种活性高熵合金破片对后续多层靶板的侵彻毁伤规律。图 8 为高熵合金破片对多层铝板的毁伤示意图。前端靶板为不同厚度的钢靶, 内部 3 层靶板为等间隔铝靶板, 破片撞靶速度控制在 1600 m/s 左右。实验过程中, 释能毁伤过程及现象由高速摄影记录, 容器内的超压变化由测压装置测试。

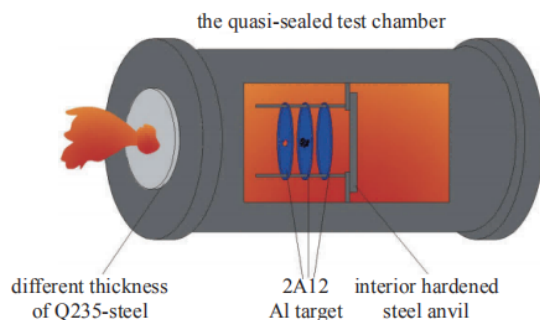


图 8 高熵合金破片对多层铝板的毁伤示意图^[35]

Fig. 8 Schematic diagram of damage of high-entropy alloy fragments to multi-layered aluminum plates^[35]

在不同前靶厚度 (h) 条件下, 2 种活性高熵合金破片侵彻多层目标的冲击反应实验现象如图 9 所示。当撞击速度在 1600 m/s 左右时, 在一定靶厚范围内, FeNiMoW 和 FeNiCoCr 破片的释能反应程度随钢靶厚度增加呈现显著的增强趋势, 表现为腔内火光亮度提升和发光区域扩展, 而当靶厚增至 5 mm 时, 容器内火光逐渐减弱, 表明其反应程度反而减弱。

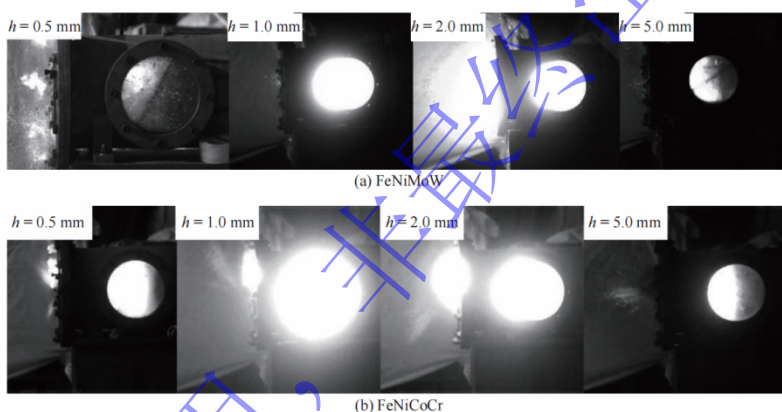


图 9 2 种高熵合金破片在不同靶厚条件下的冲击反应实验现象^[35]

Fig.9 Experimental phenomenon of impacting of two high-entropy alloy fragments under the targets of different thicknesses^[35]

4.1.2 轻气炮加载实验

受限于弹道枪的膛压衰减特性, 其弹丸加速能力难以满足更高撞击速度的实验需求, 而加载能力强的二级轻气炮可以实现对弹丸更高速度的加载。二级轻气炮通过引入活塞-泵管耦合机制克服这一局限: 高压气室驱动活塞压缩泵管内轻质气体, 利用被压缩气体的高平均压力推动弹丸, 从而显著提升弹底驱动效率和出口速度。

郭孜涵等^[50]利用二级轻气炮装置在真空条件下开展了 HfZrTiTaNb 系活性高熵合金弹丸对 GCr15 轴承钢靶的冲击实验, 定量解析了弹靶作用过程中的能量分配, 并探讨了组元成分对释能特性的影响规律, 结果显示: 冲击反应释放的能量主要由准密闭容器壁吸收; 单位质量释能随 Cu 或 Al 含量的增加而上升, 且在相近撞击速度下, 含 Cu 高熵合金的释能水平优于含 Al 体系。

图 10 为高熵合金弹丸冲击反应释能实验加载与测试系统。冲击反应释能实验平台由加载驱动单元和多物理场测试单元两部分构成。其中, 加载驱动单元集成了两级气室、高压锥段、发射管及膨胀室; 测试单元则配备了瞬态光纤高温计、超压传感器、红外热像仪、高速摄像机及电磁测速装置。上述测试设备经由脉冲触发器统一控制, 以保障信号采集的同步性。实验过程中, 高熵合金弹

丸的撞击速率由电磁测速装置实时测定，而容器内的闪光响应、准静态压力变化、外壁温升过程及火焰传播形貌则分别依靠光纤高温计、超压传感器、红外热像仪及高速摄像机同步采集，最终由示波器完成数据的整合记录。

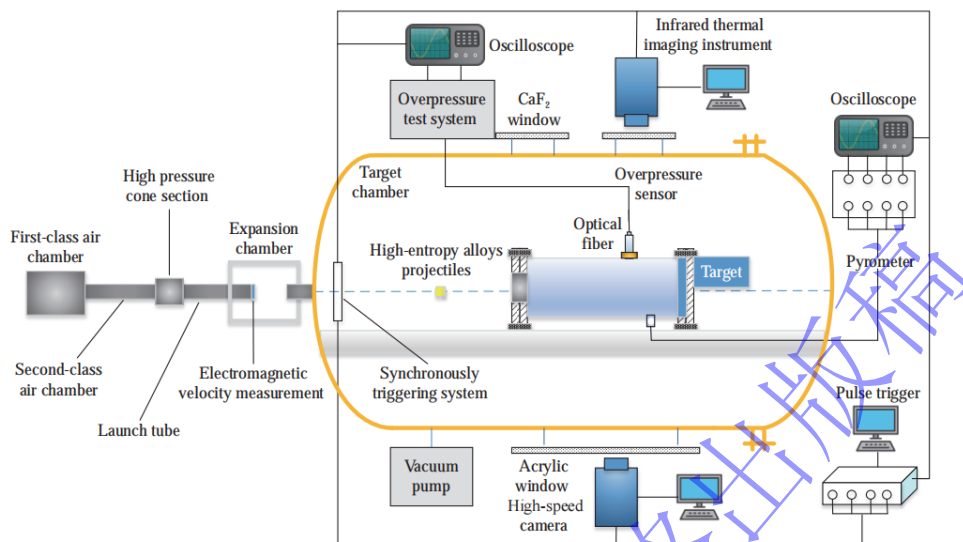


图 10 高熵合金弹丸冲击反应释能实验加载与测试系统^[50]

Fig.10 Experimental loading and testing system for impact reaction energy release of HEA projectiles^[50]

4.2 侵彻及穿燃后效实验

侵彻及穿燃后效实验是评估和提升武器系统效能的核心测试，大多数研究采用破片/弹体侵彻靶标和穿燃后效实验来验证材料的力学性能和冲击释能特性。

Ma 等^[37]研究了 $\text{Al}_{0.5}\text{NbZrTi}_{1.5}\text{Ta}_{0.8}$ 活性高熵合金的侵彻能力和引燃效果，在 719 m/s 速度下，高熵合金破片完全穿透 6 mm 厚钢板，并成功点燃了靶后方的棉花，表现出良好的冲击释能特性及穿燃后效。Zhao 等^[51]开发了一种新型双相 BCC $\text{TiZrHfTa}_{0.5}\text{W}_{0.5}$ 活性高熵合金材料，其在弹道冲击下表现出明显的穿透与爆炸耦合现象。 $\text{TiZrHfTa}_{0.5}\text{W}_{0.5}$ 活性高熵合金经高速撞击后会发生严重碎裂，并引发剧烈的氧化反应，从而提升破片扩孔效率，对后效靶板造成更大的毁伤效果。

4.3 回收试样分析

单纯依靠上述实验获取的数据、曲线等难以满足对高熵合金动态变形机制和冲击释能特性的深入理解需求。为了进一步探究活性材料的多尺度化学反应行为，还可以对上述实验的回收试样进行分析测试。通过将 SHPB 实验、准密闭容器测试、侵彻及穿燃后效实验等与多种微观表征手段相融合，可以形成“宏观力学响应-微观结构演化”的综合研究模式。对回收试样的表征手段通常包括：扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM），用于断口形貌和剪切带形貌观察；电子背散射衍射（electron back scatter diffraction, EBSD），用于晶粒取向、孪晶分布和相组成分析；透射电子显微镜（transmission electron microscope, TEM），用于位错结构、纳米孪晶和相变产物的精细表征；X 射线衍射（X-ray diffraction, XRD），用于物相鉴定和残余应力分析。此外，原位高速成像和红外热成像技术的引入使研究者能够实时追踪绝热剪切带的形成和温升过程，极大地推进了对绝热剪切失稳机制的认识。

Meng 等^[52]为了进一步探索高熵合金作为活性毁伤材料的潜力，探讨了具有良好力学性能和能量释放特性的 TiZrNbV 高熵合金的能量释放行为，通过对收集到的碎片的尺寸、形貌和晶格结构以及穿透目标板的 XRD、SEM 等分析，结果表明： TiZrNbV 高熵合金的剧烈变形和绝热温升导致

目标板熔化、合金破碎、成分分离、氧化反应和能量释放；合金破碎、氧化反应和能量释放行为均由贯穿速度直接决定；随着贯穿速度的增大，冲击动能和绝热温升提高，导致碎片数量增加且尺寸更小，氧化反应的表面积增大，最终释放更多能量。

5 活性高熵合金冲击释能数值模拟方法

活性高熵合金兼具优异的力学性能和显著的冲击释能特性，冲击释能过程涉及材料从弹性变形→塑性变形→绝热剪切→碎片化→点火燃烧的多物理场耦合行为，实验表征极为困难，数值模拟成为研究该类材料动态行为的关键手段。目前，该领域的数值模拟研究主要沿着2个方向展开：一是从材料本构关系出发的宏观连续介质力学模拟，二是从原子/位错尺度出发的微观力学模拟。以下将分别阐述各方法的概念、研究现状和局限性。

5.1 基于连续介质力学的有限元方法

5.1.1 Johnson-Cook 本构模型及其修正

Johnson-Cook (J-C) 模型因形式简洁、参数物理意义明确，是目前高熵合金冲击模拟中使用最广泛的本构模型，配合 J-C 损伤失效模型，可以描述材料的损伤演化。Liu 等^[53]拟合了适合 HfZrTiTaNbCu_x 难熔高熵合金的 J-C 动态本构参数，并通过 ABAQUS 验证了参数的准确性，发现 Cu 含量增加可提高屈服强度，但降低韧性。Tu 等^[54]通过 SHPB 实验获取了 CrMnFeCoNi 高熵合金的 J-C 本构参数，建立了有限元模型，重现了 500~2213 m/s 速度范围内的弹道侵彻行为，成功预测了碟形变形、鼓胀、塞块等失效模式。高茂国等^[55]拟合了 HfZrTiTaAl 系合金的 J-C 本构参数及失效参数，模拟显示，高应变率下损伤集中于 45° 方向截面。

传统 J-C 模型的不足之处在于：难以捕捉高熵合金独特的动态变形机制，如位错微带诱导塑性等；J-C 模型对温度和应变率效应的解耦处理过于简化，难以描述高熵合金复杂的温度-应变率耦合行为；活性高熵合金冲击释能中的化学反应放热过程难以用纯力学本构模型描述。

5.1.2 冲击释能中的光滑粒子流体动力学方法

对于超高速撞击和碎片云形成等问题，传统有限元方法 (finite element method, FEM) 面临网格畸变和失效单元删除导致的物质不守恒问题，而光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 方法因其无网格特性在碎片云模拟中具有天然优势。尹云飞等^[56]基于 AUTODYN 软件的 SPH 方法模拟了球形弹丸超高速撞击高熵合金防护结构，分析了不同工况下碎片云的数量、质量和动量特性，结果表明：在相同撞击条件下，高熵合金防护结构产生的碎片总量较铝合金增加约 51.86%，低质量碎片数量增加约 79.56%，沿撞击方向碎片云的最大动量仅为铝合金的 75%。Lu 等^[57]采用修正的 J-C 模型与 Cowper-Symonds 耦合 (JC-CS)，建立了 AlCoCrFeNi 高熵合金的本构模型，结合 FEM 模拟了 769~2400 m/s 速度范围内的侵彻行为，成功揭示了应力状态与变形/损伤机制之间的关联。

5.2 分子动力学模拟

分子动力学 (molecular dynamics, MD) 模拟可从原子尺度揭示冲击载荷下材料的变形机制、相变行为及能量耗散途径，是对宏观连续介质模拟的重要补充。MD 模拟通常使用 LAMMPS 等开源软件研究冲击加载条件下材料的结构演化。Stewart 等^[58]通过 MD 模拟表征了 CoCrFeMnNi 在宽密度和压力范围内的状态方程以及超高应变率下的层裂强度，揭示了局域相变对层裂强度的影响，模拟的冲击 Hugoniot 结果与实验数据吻合。Wu 等^[59]通过大规模 MD 模拟研究了 FCC 结构 CoNiFeAlCu 单晶在冲击加载下的响应，发现在 [001] 方向以 FCC→BCC 相变为主，而 [110] 和 [111] 方向则以 Shockley 位错运动主导的层错机制为主，揭示了晶体取向对层裂强度的显著影响。Song 等^[60]通过 MD 模拟研究了 Mn 元素浓度波动对 CoCrFeNiMn 冲击响应的影响，发现 Mn 元素的梯度分布导致异质组织间的晶格失配，增加了位错介导滑移能垒，将无序原子生成概率从 27.9% 降至 11.5%，Hugoniot 弹性极限从 69.1 GPa 提升至约 72.9 GPa。Fang 等^[61]采用大规模非平衡 MD 模拟研究了等原子比 CoCrCuFeNi 在 0.6~1.45 km/s 冲击速度下的动态响应，结果表明，晶格畸变显著改变了位错和层错的活跃滑移面，引入了额外的应力和应变集中位点，促进了空洞形成，并降低了层

裂强度，挑战了传统观点中晶格畸变始终起强化作用的认知。陈嘉琳等^[62]采用 MD 模拟系统分析了 AlCoCrFeNi 在单次和二次冲击下的动态响应，发现能量吸收机制随冲击速度变化：低速区（0.5~1.0 km/s）以位错网络吸能为主，中速区（1.0~2.0 km/s）位错和无序原子共同贡献，高速区（2.0~3.0 km/s）无序原子主导吸能。

高熵合金的 MD 模拟方法也存在缺陷和不足：其模拟时间尺度局限在纳秒量级，与实际冲击过程的毫秒级反应存在数量级差距；缺乏普适的跨合金体系势函数，其精度直接影响结果的可靠性；系统尺寸通常限制在微米/纳米尺度，难以直接外推至宏观工程应用。

5.3 跨尺度模拟方法探索

由于高熵合金冲击释能涉及从原子到宏观的多个尺度，跨尺度模拟是当前研究的前沿方向。熊玮等^[63]从不同时空尺度对活性材料的冲击压缩和反应行为模拟方法进行了系统梳理，归纳了 4 个方面的研究进展：MD 模拟、冲击压缩特性细观模拟、冲击反应行为跨尺度模拟、宏观尺度模拟。目前，考虑反应弛豫时间和非自持反应特性的点火模型已在宏观尺度数值模拟中得到初步发展。

6 活性高熵合金的应用前景

6.1 弹体壳体

高熵合金凭借其独特的多组元协同效应与优异的力学-释能特性，在军事装备领域展现出革命性潜力，尤其在弹体壳体方面，其性能优势与技术创新价值尤为显著。目前，已有关于高熵合金应用于弹体壳体的探索。马田等^[64]为了验证 TiZrNbVAl 高熵合金弹体的可行性，开展了材料力学性能及弹体侵靶实验研究：首先对 TiZrNbVAl 高熵合金的静态力学性能、冲击韧性、应变率效应及温度效应进行了分析，发现该高熵合金的强度较好，抗冲击性能优异，在高温和动态加载条件下具有温度软化效应和应变率强化效应；随后，设计并开展了 125 mm 口径火炮侵靶验证实验，在 786 m/s 的速度下，TiZrNbVAl 高熵合金弹体成功穿透 2 层 Q345 钢板，且主体结构完整，验证了此材料用于弹体壳体的可行性；最后，根据力学性能实验数据，拟合得到了 TiZrNbVAl 高熵合金的 J-C 模型参数，采用数值仿真模型对侵彻过程进行了模拟，弹体头部侵蚀仿真结果与实验结果较为吻合，验证了材料模型和数值仿真模型的可靠性。该研究结论和成果为高熵合金侵彻弹体设计提供了思路和依据。

在弹体壳体方面，高熵合金的高屈服强度和优异的抗侵彻能力可显著抑制弹体壳体在爆炸时的早期失效与破片飞散。同时，通过调控高熵合金的应变硬化指数和断裂韧性，优化爆炸能量在壳体结构中的耗散与释放路径，精准控制破片分布密度与抛射方向。

6.2 活性破片

目前，已有不少关于活性高熵合金破片的研究^[24, 30-32, 34-35, 50, 53]。相关研究表明，其良好的冲击释能特性可对目标造成特殊的动能-化学能耦合毁伤，同时，高熵合金的高硬度和高断裂韧性使其在高速撞击中兼具优异的抗压强度与断裂韧性，有效提升破片的穿透深度和存速能力。另外，NbZrTiTa 高熵合金^[30]在冲击破碎过程中会通过 TRIP 效应实现断裂面的自锐化，在撞击时通过相变实现断裂面动态锐化，大幅增强对目标的切割和贯穿能力，提升穿透概率。

6.3 药型罩

聚能装药的性能优化是反装甲领域的核心课题，其关键在于药型罩材料能否同时满足高侵彻深度和大后效毁伤的双重需求。针对聚能装药侵彻深度与后效毁伤难以兼顾的难题，Liu 等^[65]通过相工程调控解决了这一难题。他们选用 TiZrNbAl 体系高熵合金作为模型材料，通过设计高熵合金的相结构，精准控制 α_2 相的析出，制备出单相 BCC 和 BCC+ α_2 双相 (S1) 合金，并系统研究了 2 种合金的动态力学性能和射流形态。研究发现：双相 S1 合金通过调控动态拉伸塑性形成彗星状粒子射流，且双相 S1 合金射流粒子中的 Ti、Al 等活性元素在高速撞击时引发剧烈的氧化反应，靶板穿孔周围出现明显的熔融区域；在保持侵彻能力的同时，双相 S1 合金的后效毁伤面积提升 3 倍，并引发高温燃烧效应，这种动能-化学能耦合毁伤机制突破了传统材料单一动能毁伤的局限，为药型罩设计提供了新思路。

传统药型罩材料受限于其自身综合性能的短板，难以进一步满足侵彻能力提升需求。高熵合金凭借其高强度、高硬度、良好的动态断裂韧性和冲击释能特性，被视为极具发展潜力的新型药型罩材料体系。孟钰权等^[66]采用激光熔化技术制备了 CoCrFeMnNi 高熵合金，并系统开展了该材料的静、动态力学响应测试，据此标定了其 J-C 动态本构模型参数，利用 LS-DYNA 分别构建了紫铜和高熵合金的聚能射流数值模型，对比分析了 2 种射流的成型演化和侵彻靶板过程。数值模拟显示，高熵合金药型罩能够生成更为稳定且连续的射流形态，其特有的成型与断裂机制最终体现为侵彻深度的显著增加，从而验证了高熵合金在强化毁伤效能方面的突出优势。

6.4 穿甲弹

动能穿甲弹的弹芯材料面临一个根本性矛盾：一方面要求高绝热剪切敏感性（易失稳），以诱导弹芯发生剪切失效，促使弹芯头部保持尖锐（自锐性），减少穿甲阻力；另一方面又要求良好的加工硬化能力，以确保优异的强韧性，维持弹芯结构完整，减少动能损耗。在传统材料体系中，具有强剪切敏感性的 BCC 合金往往加工硬化能力不足，而具备良好硬化能力的 FCC 合金却普遍缺乏足够的剪切敏感性。

Wang 等^[67]通过共格纳米析出相设计解决了这一矛盾。他提出，若能促使局部应变集中区域的析出相快速回溶，则可实现剪切区域强度的急速下降，极大地提升剪切敏感性。基于这一思路，结合高熵合金的全域晶格畸变与迟滞扩散效应，他们研制出新型高强韧 FCC 结构高熵合金 AlCrFeNiV。MD 模拟进一步证实，该高熵合金中析出相的纳米结构和低能量界面对回溶软化的实现具有决定性作用。通过高熵合金中多尺度结构调控，实现了穿甲过程中“自锐化”与“结构完整性”的动态平衡，有望显著提升穿甲武器的作战效能。

7 总结与展望

作为一种具有特殊设计理念、结构和性能的新型合金，高熵合金具有“成分设计自由”、晶体结构简单、强畸变、强度和硬度高等特点，而且其静态和动态力学行为可以通过工艺调整和成分设计在很宽的范围内调节，可以说，高熵合金在可加工性、高强度和冲击释能等方面具有成为高强度活性材料的潜在优势。大量研究表明，高熵合金的动态力学性能更优异，且拥有良好的冲击释能特性，在强冲击载荷的服役环境下具有突出优势。然而，目前，活性高熵合金研究还处于力学性能和冲击释能实验研究阶段，尚未真正运用于含能弹体、航空航天等领域。要实现高熵合金活性材料的真正应用，还需要合金设计、动态力学行为研究、冲击释能特性研究、模拟仿真和实验验证等多个方面的持续研究和不断创新。

(1) 高熵合金的性能优势未完全凸显，合金成分调控尚未达到最优。目前，高熵合金的成分优化多依赖于相图计算和反复实验，效率较低。未来的研究重点在于利用机器学习势函数结合第一性原理计算，建立“成分-局域化学有序-力学性能”的高通量预测模型，通过调控特定元素的近邻排布，在保持高熵结构的同时，激活多种强化机制（如纳米析出与固溶强化的协同），从而突破强度与塑性的倒置关系。高熵合金的下一步突破，其本质在于从“熵的最大化”走向“晶格畸变的有序化利用”。

(2) 高熵合金拥有优异的动力学性能，可通过位错运动、绝热剪切、相变和孪晶等多重机制协同作用实现动态变形，展现出广阔的应用前景，但当前研究仍面临诸多挑战。一方面，不同相结构高熵合金在宽应变率范围内的变形机制尚未系统建立，特别是从热激活控制区到声子拖曳控制区的过渡规律仍缺乏统一的理论框架；另一方面，动态加载下绝热剪切带的形成判据、临界条件及其与微观结构（如纳米析出相尺寸、体积分数、界面特性）的定量关联仍待深入厘清。同时，能够准确描述高应变率下高熵合金塑性流动行为的本构模型仍有待完善，实验验证与理论预测之间的鸿沟制约着动力学性能的精准设计。

(3) 高熵合金在冲击释能领域的应用研究极具战略价值和工程前景，但现阶段的发展仍面临基础理论与实验技术的双重瓶颈。相关报道较为匮乏，机理探索相对浅显，且实验获取的数据量有限且质量欠佳，对冲击过程中高熵合金材料的微观动态行为观测与表征存在较大的技术瓶颈，这些

因素进一步加剧了实验研究难度。另外,高熵合金的冲击释能特性缺乏统一规范评价,有待深入研究。究其根源,极端加载条件对实验平台的苛刻要求导致实验的可重复性不足,加之冲击过程中的微秒级动态响应特征使得高保真数据采集面临严峻挑战,现有研究多停留于宏观性能表征阶段,对材料破碎机制、能量耗散路径等关键科学问题的揭示仍较为表层。针对这一困境,当前研究应通过调控合金的相变诱导破碎与应变率敏感性,优化其冲击破碎效能;同时,基于界面强化机理构建自锐化结构设计模型,实现材料在冲击载荷下断裂面的动态钝化与能量重分配,从而显著提升结构-能量转化效率。

(4) 高熵合金冲击释能过程涉及多物理场耦合行为,目前,对于该过程的数值模拟研究存在明显的缺陷和不足。当前的数值模拟仅能实现对冲击反应行为的表现呈现,对活性毁伤元作用过程中关键参数的精确预测仍存在显著差距,碎片化-燃烧耦合建模是其面临的挑战之一;冲击释能涉及力学能-化学能的耦合转化,目前缺乏统一的反应动力学模型,缺少能够同时描述冲击压缩引起的温度升高、碎片形成过程中的能量耗散、碎片与氧气的化学反应动力学等过程的理论模型;本构模型的普适性和精度有限,不同高熵合金体系具有显著差异的微观结构和变形机制,传统的 J-C 模型难以统一描述;多尺度耦合方法尚未成熟,虽然 MD 模拟可揭示原子尺度的变形机制, FEM/SPH 可模拟宏观碎片云行为,但是目前缺少有效的跨尺度信息传递方法,难以将原子尺度的相变、位错演化信息融入宏观连续介质模拟。

(5) 高熵合金大尺寸样件制备工艺存在缺陷,无法满足大型实验要求,其铸造开裂倾向与粉末制备成本制约了工程应用。大尺寸铸锭缺陷的根源在于高熵合金多主元导致的宽固-液两相区,未来有望通过大功率行波磁场驱动熔体在糊状区进行长程对流,抵消枝晶间通道的渗透阻力,这或许是解决大铸锭心部疏松最直接的物理手段;从“消除偏析”到“利用偏析”,大尺寸制备中完全消除偏析在热力学上极为困难,可调控凝固速率梯度,利用高熵合金扩散慢的特性,有意在铸锭径向形成成分梯度,为大尺寸高熵合金找到特定的服役场景;制备缺陷的随机性源于对熔体热物理性质的未知,可通过建立高精度的高熵合金熔体黏度-温度-成分数据库作为工艺突破的前提。针对大尺寸高熵合金铸锭中普遍存在的宏观成分偏析、疏松缩孔以及热裂倾向等问题,未来的工艺需跳出传统冶金铸造的线性思维,转向近终成形与外场辅助控凝相结合的技术路线。

参考文献

- [1] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 375/376/377: 213-218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
- [2] YEH J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5): 299-303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
- [3] ZHANG L S, MA G L, FU L C, et al. Recent progress in high-entropy alloys [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 631/632: 227-232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.227.
- [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] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts [J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448-511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
- [6] 张勇, 陈明彪, 杨潇, 等. 先进高熵合金技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.

- ZHANG Y, CHEN M B, YANG X, et al. Advanced technology in high-entropy alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [7] YE H J W. Recent progress in high-entropy alloys [J]. *Annales de Chimie Science des Matériaux*, 2006, 31(6): 633-648.
- [8] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys [J]. *Intermetallics*, 2010, 18(9): 1758-1765. DOI: 10.1016/j.intermet.2010.05.014.
- [9] VAIDYA M, TRUBEL S, MURTY B S, et al. Ni tracer diffusion in CoCrFeNi and CoCrFeMnNi high entropy alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 688: 994-1001. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.07.239.
- [10] SENKOV O N, SENKOVA S V, WOODWARD C, et al. Low-density, refractory multi-principal element alloys of the Cr-Nb-Ti-V-Zr system: microstructure and phase analysis [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(5): 1545-1557. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.11.032.
- [11] SENKOV O N, SENKOVA S V, WOODWARD C. Effect of aluminum on the microstructure and properties of two refractory high-entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2014, 68: 214-228. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.01.029.
- [12] ZHANG J F, XU X, KÖRMANN F, et al. Lattice distortions and non-sluggish diffusion in BCC refractory high entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2025, 297: 121283. DOI: 10.1016/j.actamat.2025.121283.
- [13] LI Y L, QIANG W J. Dynamic heterogeneity of atomic transport in a body-centered cubic WTaVCr non-equiatomic high-entropy alloy [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, 587: 154737. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154737.
- [14] WILLIS M J, HOLT W H. Shock-induced reaction in PTFE/aluminum mixtures [C]//Proceedings of the 4th Symposium (International) on Detonation, 1970: 540-545.
- [15] 王海福, 向镜安. 活性毁伤材料及其应用技术研究进展 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(9): 1434-1448. DOI: 10.1360/SST-2023-0063.
- WANG H F, XIANG J A. Progress in reactive materials and their applications [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2023, 53(9): 1434-1448. DOI: 10.1360/SST-2023-0063.
- [16] GASKELL D R. Introduction to the thermodynamics of materials [M]. 4th ed. New York: Taylor & Francis, 2003.
- [17] 高炜, 余竹焕, 阎亚雯, 等. Cr对FeCoNiAlCr_x高熵合金组织与力学性能的影响 [J]. *材料工程*, 2023, 51(2): 91-97. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2022.000128.
- GAO W, YU Z H, YAN Y W, et al. Effect of Cr on microstructure and mechanical properties of FeCoNiAlCr_x high entropy alloys [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(2): 91-97. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2022.000128.
- [18] ZHANG W R, LIAW P K, ZHANG Y. Science and technology in high-entropy alloys [J]. *Science China Materials*, 2018, 61(1): 2-22. DOI: 10.1007/s40843-017-9195-8.
- [19] 李建国, 黄瑞瑞, 张倩, 等. 高熵合金的力学性能及变形行为研究进展 [J]. *力学学报*, 2020, 52(2): 333-359. DOI: 10.6052/0459-1879-20-009.
- LI J G, HUANG R R, ZHANG Q, et al. Mechanical properties and behaviors of high entropy alloys [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(2): 333-359. DOI: 10.6052/0459-1879-20-009.
- [20] 刘丘林, 刘允中, 王艳群. 高熵合金的研究现状和应用前景 [J]. *粉末冶金工业*, 2017, 27(6): 64-69. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20160115.
- LIU Q L, LIU Y Z, WANG Y Q. Research status and application prospect of high-entropy alloy [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2017, 27(6): 64-69. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20160115.

- [21] 唐宇, 王睿鑫, 李顺, 等. 高熵合金含能结构材料的潜力与挑战 [J]. 含能材料, 2021, 29(10): 1008-1018.
TANG Y, WANG R X, LI S, et al. Potential and challenges of high-entropy alloy energetic structural materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(10): 1008-1018.
- [22] 王洁. Ti-Zr-Nb-V 高熵合金的相组成演变规律及力学性能研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2022. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2022.000136.
WANG J. Study on the evolution of phase composition and mechanical properties of Ti-Zr-Nb-V high-entropy alloys [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2022.000136.
- [23] SENKOV O N, WOODWARD C, MIRACLE D B. Microstructure and properties of aluminum-containing refractory high-entropy alloys [J]. JOM, 2014, 66(10): 2030-2042. DOI: 10.1007/s11837-014-1066-0.
- [24] ZHANG Z R, ZHANG H, TANG Y, et al. Microstructure, mechanical properties and energetic characteristics of a novel high-entropy alloy HfZrTiTa_{0.53} [J]. Materials & Design, 2017, 133: 435-443. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.08.022.
- [25] SHENG D L, LI T, ZHANG W H, et al. Impact initiated chemical energy release of TiZr-based reactive high-entropy alloy [J]. Journal of Applied Physics, 2025, 137(8): 085904. DOI: 10.1063/5.0248891.
- [26] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引燃航空煤油实验研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1148-1152. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.09.022.
WANG H F, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1148-1152. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.09.022.
- [27] CHEN C, GAO R K, GUO K, et al. Quantitative determination of impact release energy for TiZrHfX_{0.3} multicomponent materials in vacuum environment [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 133: 105958. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105958.
- [28] TANG E L, WANG Q C, CHEN C, et al. Quantitative reactive release energy models of Al/Teflon material during high velocity impact [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(15): 23069-23082. DOI: 10.1002/er.8606.
- [29] REN K R, LIU H Y, CHEN R, et al. Compression properties and impact energy release characteristics of TiZrNbV high-entropy alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 827: 142074. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142074.
- [30] 王睿鑫. NbZrTiTa 高熵合金的组织结构演变及结构释能特性研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2018.001416.
WANG R X. Microstructure evolution and energetic structural properties of NbZrTiTa high-entropy alloy [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2018.001416.
- [31] 王睿鑫, 唐宇, 李顺, 等. 高熵合金动态载荷下变形机制的研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35(17): 17001-17009. DOI: 10.11896/cldb.21040273.
WANG R X, TANG Y, LI S, et al. Research progress on deformation mechanisms under dynamic loading of high-entropy alloys [J]. Materials Reports, 2021, 35(17): 17001-17009. DOI: 10.11896/cldb.21040273.
- [32] 姬文苏, 尹肖云, 邹强, 等. Nb₁Zr₂Ti₁W₂ 高熵合金的冲击释能与破碎行为 [J]. 火炸药学报, 2025, 48(3): 230-237. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202409017.

- JI W S, YIN X Y, ZOU Q, et al. Impact energy release and crushing behavior of Nb₁Zr₂Ti₁W₂ high entropy alloy [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2025, 48(3): 230-237. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202409017.
- [33] LIU X F, TIAN Z L, ZHANG X F, et al. "Self-sharpening" tungsten high-entropy alloy [J]. Acta Materialia, 2020, 186: 257-266. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.01.005.
- [34] 陈海华, 张先锋, 熊玮, 等. WFeNiMo 高熵合金动态力学行为及侵彻性能研究 [J]. 力学学报, 2020, 52(5): 1443-1453. DOI: 10.6052/0459-1879-20-166.
- CHEN H H, ZHANG X F, XIONG W, et al. Dynamic mechanical behavior and penetration performance of WFeNiMo high-entropy alloy [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(5): 1443-1453. DOI: 10.6052/0459-1879-20-166.
- [35] 侯先苇, 熊玮, 陈海华, 等. 两种典型高熵合金冲击释能及毁伤特性研究 [J]. 力学学报, 2021, 53(9): 2528-2540. DOI: 10.6052/0459-1879-21-327.
- HOU X W, XIONG W, CHEN H H, et al. Impact energy release and damage characteristics of two high-entropy alloys [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(9): 2528-2540. DOI: 10.6052/0459-1879-21-327.
- [36] GEANTĂ V, VOICULESCU I, STEFĂNOIU R, et al. Dynamic impact behaviour of high entropy alloys used in the military domain [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 374(1): 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/374/1/012041.
- [37] MA Y S, ZHOU L, ZHANG K C, et al. Effects of cerium doping on the mechanical properties and energy-releasing behavior of high-entropy alloys [J]. Materials, 2022, 15(20): 7332. DOI: 10.3390/ma15207332.
- [38] ZARE GHOMSHEH M, KHODABAKHSI F, KHATIBI G, et al. Cryogenic high-pressure torsion of a single-phase CoCrFeNiMn high-entropy alloy: nanoindentation strain-rate sensitivity and creep deformation behavior [J]. Materials & Design, 2025, 258: 114567. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.114567.
- [39] ZHENG H L, WANG Z X, WANG M Y, et al. Study on mechanical response and penetration mechanism of lightweight BCC high-entropy alloy (Ti₂Zr)_{1.5}NbVAl_{0.5} under extreme dynamic loads [J]. Intermetallics, 2025, 186: 108966. DOI: 10.1016/j.intermet.2025.108966.
- [40] KHAN M A, WANG J J, BRECHTL J, et al. Unveiling the dynamic mechanical behavior with phase-transformation and microstructural evolution in a novel dual-phase high-entropy alloy [J]. Materials & Design, 2025, 257: 114485. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.114485.
- [41] WANG Z X, ZHOU Y K, ZHENG H L, et al. Mechanical response and deformation mechanism of Zr-Ti-Nb-Ta-Al refractory high-entropy alloy under the synergistic effects of temperature and strain rate [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2026, 240: 65-79. DOI: 10.1016/j.jmst.2025.02.065.
- [42] HE J Y, LI Z Z, LI L K, et al. An in-situ study on the formation mechanism of adiabatic shear band in refractory high-entropy alloys [J]. Acta Materialia, 2026, 306: 121843. DOI: 10.1016/j.actamat.2025.121843.
- [43] XIAO Y, ZENG Q L, XUN K H, et al. Novel mechanism of ultra-high adiabatic shear susceptibility in FCC-based high-entropy alloys via high-content nanoprecipitate dissolution [J]. Acta Materialia, 2025, 296: 121280. DOI: 10.1016/j.actamat.2025.121280.
- [44] HOKAMOTO K. Explosion, shock-wave and high-strain-rate phenomena of advanced materials [M]. London: Academic Press, 2021. DOI: 10.1016/C2019-0-03954-4.
- [45] 王开心, 仝永刚, 陈永雄, 等. 高熵合金动态力学行为研究进展 [J]. 材料工程, 2024, 52(1): 57-69. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2022.000874.

- WANG K X, TONG Y G, CHEN Y X, et al. Research progress in dynamic mechanical behavior of high-entropy alloys [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(1): 57-69. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2022.000874.
- [46] 王璐, 马胜国, 赵聃, 等. AlCoCrFeNi 高熵合金在冲击载荷下的动态力学性能 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47(24): 86-89. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.24.021.
- WANG L, MA S G, ZHAO D, et al. Dynamic mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloys under impact load [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(24): 86-89. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.24.021.
- [47] AMES R G. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials [C]//*Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, USA: AIAA, 2005: 1013. DOI: 10.2514/6.2005-279.
- [48] AMES R G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials [C]//*MRS Online Proceeding Library*. Boston: Cambridge University Press, 2005: 0896-H03-08. DOI: 10.1557/PROC-0896-H03-08.
- [49] 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.
- [50] 郭孜涵, 陈闯, 涂益良, 等. HfZrTiTaNb 系高熵合金的冲击反应释能定量确定 [J]. *高压物理学报*, 2024, 38(1): 014103. DOI: 10.11858/gywlyxb.20230817.
- GUO Z H, CHEN C, TU Y L, et al. Quantitative determination of impact reaction energy release for HfZrTiTaNb based high-entropy alloys [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(1): 014103. DOI: 10.11858/gywlyxb.20230817.
- [51] ZHAO P, JIAO Z M, ZHANG T W, et al. Coupling effect of penetration and explosion in a novel high-entropy alloy energetic structural material under ballistic impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2026, 209: 105592. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2025.105592.
- [52] MENG J Y, SHEN B H, WANG J, et al. Energy-release behavior of TiZrNbV high-entropy alloy [J]. *Intermetallics*, 2023, 162: 108036. DOI: 10.1016/j.intermet.2023.108036.
- [53] LIU Q, HUA J Y, FAN D, et al. High-speed perforation of high-entropy alloy CrMnFeCoNi plates: experiments and modeling [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108083. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.108083.
- [54] TU Y L, CHEN C, TANG E L. Dynamic constitutive parameters determination and numerical simulation verification of HfZrTiTaNbCu_x high entropy alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34(2): 1283-1292. DOI: 10.1007/s11665-023-09097-5.
- [55] 高茂国, 刘睿, 郭岩松, 等. HfZrTiTaAl 系高熵合金动态变形、损伤及破坏行为 [J]. *兵工学报*, 2025, 46(1): 290-300. DOI: 10.12382/bgxb.2023.1183.
- GAO M G, LIU R, GUO Y S, et al. Dynamic deformation, damage and failure behaviors of high-entropy HfZrTiTaAl alloy [J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46(1): 290-300. DOI: 10.12382/bgxb.2023.1183.
- [56] 尹云飞, 杨秋足, 郭家傲, 等. 高熵合金防护结构的超高速撞击数值模拟研究 [J/OL]. *高压物理学报* (2026-01-23)[2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1147.O4.20260122.1920.007>.
- YIN Y F, YANG Q Z, GUO J A, et al. Numerical simulation study on hypervelocity impact of high-entropy alloy protective structure [J/OL]. *Chinese Journal of High Pressure Physics* (2026-01-23)[2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1147.O4.20260122.1920.007>.

- [57] LU L, WAN C K, CHEN L X, et al. High-speed penetration of dendritic high-entropy alloy $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$: an experimental and modeling study [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 945: 148970. DOI: 10.1016/j.msea.2025.148970.
- [58] STEWART J, STARTT J, DINGREVILLE R. Atomistic simulations on the Mie-Gruneisen equation-of-state and high strain-rate behavior of equiatomic CoCrFeMnNi [C]//TMS Annual Meeting & Exhibition. San Diego: TMS, 2026.
- [59] WU Y C, SHAO J L. Unraveling anisotropy in crystalline orientation under shock-induced dynamic responses in high-entropy alloy $\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Al}_{7.5}\text{Cu}_{17.5}$ [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(17): 2446. DOI: 10.3390/nano13172446.
- [60] SONG S W, LI H T, LIU P W, et al. Dynamic shock response of high-entropy alloy with elemental anomaly distribution [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 253: 108408. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108408.
- [61] FANG J Z, LI R, YAO S L, et al. Role of lattice distortion on spallation of CoCrCuFeNi high-entropy alloy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(24): 245901. DOI: 10.1063/5.0241905.
- [62] 陈嘉琳, 李述涛, 安明, 等. 重复冲击载荷下 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的动态响应机制与累积损伤效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2026, 46(3): 031401. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0106.
CHEN J L, LI S T, AN M, et al. Dynamic response mechanism and cumulative damage effect of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloy under repeated impact loading [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2026, 46(3): 031401. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0106.
- [63] 熊玮, 张先锋, 李逸, 等. 活性材料冲击压缩及反应行为模拟方法研究进展 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(10): 995-1015. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.125.
XIONG W, ZHANG X F, LI Y, et al. Simulation method on shock compression and shock-induced chemical reaction behaviors of reactive materials [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(10): 995-1015. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.125.
- [64] 马田, 吕永柱, 张博, 等. TiZrNbVAI 高熵合金弹体侵彻双层钢板可行性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(11): 23-28. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.11.003.
MA T, LYU Y Z, ZHANG B, et al. Feasibility study on TiZrNbVAI high-entropy alloy projectile penetrating double layer steel plates [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(11): 23-28. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.11.003.
- [65] LIU X D, LU Y H, WANG X T, et al. Moderating jet coherency to enhance the aftereffect damage while retaining desired penetration capability of shaped charge liners with Ti-Zr-Nb-Al energetic high-entropy alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1035: 181585. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.181585.
- [66] 孟钰权, 雷榕, 刘姗姗, 等. CoCrFeMnNi 高熵合金聚能射流及侵彻靶板数值模拟研究 [J/OL]. *高压物理学* (2026-01-23) [2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1147.O4.20260122.1847.005>.
MENG Y Q, LEI R, LIU S S, et al. Numerical simulation of CoCrFeMnNi high entropy alloy shaped charge jet and penetrating target [J/OL]. *Chinese Journal of High Pressure Physics* (2026-01-23) [2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1147.O4.20260122.1847.005>.
- [67] WANG L J, XIAO Y, REN Y, et al. Hierarchical nanostructure stabilizing high content coherent nanoprecipitates in Al-Cr-Fe-Ni-V high-entropy alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 200: 61-68. DOI: 10.1016/j.jmst.2024.02.045.

Research Progress of High-Entropy Alloys in the Reactive Damage Field

YANG Le, WANG Kehui, DAI Xianghui, WANG Kaiqiang, DUAN Jian, ZOU Huihui, DANG Tianjiao

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: As a novel reactive damage material, high-entropy alloys (HEAs) have garnered widespread attention in the field of reactive damage in recent years due to their excellent mechanical properties and favorable energy release characteristics. HEAs not only possess high strength, high hardness, outstanding plasticity, and energy release capabilities, but their material compositions and performance parameters are also designable, enabling them to meet the material requirements of various application scenarios. Furthermore, HEAs have demonstrated potential application advantages in aspects such as processing and forming, mechanical strength, and impact-induced energy release. In particular, Ti-Zr-based systems have become a research hotspot due to their penetration-energy release coupling effect, and a growing body of experimental results has confirmed the application potential of HEAs in the field of reactive damage. Currently, reactive high-entropy alloys hold broad application prospects in areas such as projectile casings, reactive fragments, shaped charge liners, and armor-piercing projectiles. This paper introduces the definition and characteristics of reactive high-entropy alloys, summarizes existing reactive HEA systems, and reviews the current research status regarding the dynamic-mechanical behavior and impact-induced energy release characteristics of reactive HEAs. It also outlines the potential application fields of HEAs and provides a preliminary outlook on the future development directions of high-entropy alloys in the reactive damage domain.

Keywords: reactive materials; reactive high-entropy alloys; impact-induced energy release; dynamic mechanical behavior; engineering applications