

面向高速冲击试验需求的发射技术研究进展*

高利华¹, 高玉琪^{2, 3}, 刘津阁⁴, 刘艳¹, 张舵⁵, *姚术健^{2, 3}

(1. 中国兵器工业集团江山重工研究院有限公司, 湖北 襄阳 441057;

2. 中南大学极端流动力能前沿科学中心, 湖南 长沙 410075;

3. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075;

4. 中国人民解放军 63863 部队, 吉林 白城 137000;

5. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 随着国防安全与高端装备发展对深埋加固目标毁伤、工程结构防护等领域的需求不断升级, 面向高速冲击试验需求的高效驱动发射技术已成为支撑相关领域研究的核心关键。本文系统综述了高速冲击试验发射技术的研究进展, 重点围绕气体驱动发射技术、化学能发射、电磁能聚能发射等多种高速驱动技术的原理、发展现状、实验能力与技术瓶颈展开分析。在此基础上, 重点介绍了新兴的液气相变发射技术, 并比较了不同发射技术的速度潜力、能量来源与技术特点, 分析了当前发展中面临的速度-质量-重复性-环保四维矛盾。未来研究应聚焦于多源能量协同驱动、人工智能闭环优化控制、模块化、可重构发射平台构建等方面, 以推动超高速发射技术向更高速度、更高重复性与更广应用范围发展。

关键词: 高速冲击试验技术; 轻气炮; 化学能发射; 电磁能聚能发射; 液气相变

中图分类号: O521.3

文献标识码: A

随着科学技术的发展, 现代战争正朝着信息化方向演进, 制信息权在战争中的作用不断凸显, 但对敌方目标的硬杀伤仍然是摧毁敌方, 赢得战争的主要方式。根据新军事理论, 敌方的通讯指挥中心是战争中的首要摧毁目标, 如果能成功摧毁敌方通讯指挥中心将迅速摧毁敌方作战意志, 大大缩短战争时间, 减少己方伤亡。为了防止被敌方空中和地面武器摧毁, 通讯指挥中心等高价值目标已逐渐由地面转移至地下并采用钢筋混凝土浇筑等方式进行加固, 传统炮弹或航空弹药难以对其进行有效摧毁。为打击深埋坚固的地下防护工程, 军事强国已将高速对地动能武器纳入新型战略打击武器系统研发范围^[1], 并付诸实施。高速冲击对地毁伤效应及其工程计算理论研究, 已经成为国内外武器研发和工程防护领域的一项崭新而重要的课题。

为了实现高速武器的深入发展^[2-3], 研究人员沿着一条不断突破物理极限的技术路径, 发展了多种发射技术。最早可追溯至二战末期, 为解决传统火药燃气推动弹丸时因声速限制而出现的“初速瓶颈”, 美国于 1946 年研制出第一门轻气炮, 利用低分子量的氢气或氦气作为工质, 成功将弹丸加速至传统火炮难以企及的速度^[4]。为了追求更高的撞击速度, 轻气炮技术随后从一级发展为二级乃至三级: 20 世纪 60 至 70 年代, 二级轻气炮通过火药推动活塞压缩氢气, 将克级弹丸推至 8.5 km/s 以上, 而三级轻气炮通过增加一级“阻抗梯度飞片”实现准等熵压缩, 进一步将速度提升至 10–15 km/s, 成为空间碎片防护与超高压物理研究的核心平台。与此同时, 科学家也在探索颠覆化学能的全新发射原理。早在 1918 年, 法国发明家维勒鲁伯便提出了利用洛伦兹力发射弹丸的电磁轨道炮构想; 1944 至 1945 年, 德国汉斯勒博士首次将其工程实现, 将 10 克铝弹丸加速至约 1 km/s;

*收稿日期: 2026-07-14; 修回日期: 2026-09-02

基金项目: 国家自然科学基金 (12272414); 湖南省科技创新计划湖湘青年英才项目 (2023RC3045)

作者简介: 高利华 (1986—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事弹药发射技术研究. E-mail: 13697219578@163.com

通讯作者: 姚术健 (1988—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: yaoshujian@126.com.

而 1978 年澳大利亚国立大学团队突破材料和电力瓶颈, 将 3.3 克弹丸推进至 5.9 km/s, 使电磁轨道炮展现出超越轻气炮的潜力^[5]。另一方面, 化学能发射技术也在追求极限速度: 20 世纪 70 至 80 年代, 研究人员受聚能射流启发, 发展了强爆轰与定向聚能发射技术, 利用炸药的瞬间能量将克级金属碎片加速至 10–12 km/s 以上, 用以模拟空间超高速碎片撞击^[6]。纵观这一发展史, 从气动压缩到电磁驱动再到化学聚能, 每一代新技术的出现都是为了突破前者的速度天花板, 同时也在速度、可重复性、发射质量与安全性之间寻求新的平衡。

纵观这一发展历程, 高速发射技术的每一次跃升, 都直接推动着侵彻力学研究的深化。无论是深埋加固目标的毁伤评估、空间碎片对航天器的撞击防护, 还是材料在极端应变率下的动态响应, 都依赖于发射平台能否在实验室条件下复现真实的高速冲击过程。然而, 当前各类发射技术面对不同应用场景和需求时, 仍各自存在难以回避的短板: 气体驱动发射技术虽成熟可重复, 但氢气易燃易爆、三级炮结构复杂且维护成本高昂; 电磁轨道炮初速潜力大, 却受困于轨道烧蚀与电枢熔蚀, 寿命仅数发, 能量利用率低; 化学能发射虽能实现极限速度, 但属一次性加载, 冲击波超压高、碎片气相污染严重, 实验经济性与环保性差。正因如此, 面对未来更高速度、更重弹丸、更好重复性以及更绿色环保的复合需求, 亟需发展更新、更好的高速驱动技术, 在速度-质量-重复性-环保的四维矛盾中寻求新的平衡, 为侵彻效应研究提供更加高效、可控且可持续的实验手段。

本文系统综述了高速冲击试验技术的研究进展, 重点围绕气体驱动发射技术、化学能发射、电磁能聚能发射以及新兴的液气相变发射四种高速驱动技术的原理、发展现状、实验能力与技术瓶颈展开分析。特别值得关注的是, 液气相变发射技术利用液态工质瞬态相变产生高压驱动弹丸, 兼具环保无毒、成本低廉、可重复使用及压力调控范围宽等显著优势, 为突破传统发射技术在速度-质量-重复性-环保四维矛盾中的瓶颈提供了全新的技术路径。本文结合各类技术在深埋加固目标毁伤评估、空间碎片防护、材料动态行为研究等领域的应用成果, 展示了其在高应变率加载条件下的实验支撑作用。上述高速冲击试验技术将为武器研发与工程防护领域提供重要的技术参考和实验手段。

1 气体驱动发射技术

气体驱动发射技术是以气体为工质、通过气体膨胀做功驱动弹丸的发射技术体系。其核心物理原理是: 工质气体在高压状态下快速膨胀, 将内能转化为弹丸动能, 推动弹丸沿发射管加速至超高速。按照工质来源与能量释放机制的不同, 该技术主要分为轻气炮和氢氧爆轰驱动发射两大类。

1.1 轻气炮发射技术

轻气炮是一种以压缩气体膨胀做功发射弹丸的试验装置, 堪称“通用型”加速器: 它可接纳任意头形、任意材质的弹丸, 且弹丸质量与几何尺寸的可调域宽达两个数量级。其最突出的优势在于加载过程相对平缓——弹丸在膛内承受的加速度 (约 $10^3\sim 10^4$ g) 显著低于传统火炮 (可达 10^5 g 量级), 弹体结构应力可控制在材料屈服限的 30% 以下, 因而可被平稳地推进到超高速 (0.3–4 km/s)^[7]。需要指出的是, 弹丸底部的驱动压力仍可达数百 MPa, 但该压力通过弹体惯性力转化为结构应力时, 由于加载速率可控且加速度较低, 弹体自身并未达到高应力状态——这与传统火炮中弹体承受的冲击应力存在本质区别。轻气炮根据压缩级数不同分为一级, 二级和三级类型, 以匹配从低速到超高速的不同发射需求, 相关示意图如图 1 所示。

轻气炮最早可追溯至 19 世纪末, 当时受气枪原理启发, 美国陆军上尉 Zalinsky 于 1883 年开始研究压缩空气驱动弹丸的可能性, 并在 1894 年研制出 381 毫米口径的“空气大炮”, 利用多个高压气瓶的压缩空气推动弹丸, 射程可达 4600 米^[8]。然而, 受限于空气分子量较大, 这类空气炮的速度潜力有限, 最终未能取代传统火药火炮。真正的技术突破发生在 20 世纪中期。为解决传统火药燃气因分子量大而导致的声速限制问题——常规火炮仅能将弹丸加速至 2–3 km/s——科学家提出了利用低分子量轻质气体作为工质的新思路^[9]。基于这一思想, 美国人于 1946 年研制出第一门利用轻质气体作发射气体的轻气炮^[9]。其核心工作原理是: 以氢气或氦气等小分子量气体为工质, 通

过压缩气体膨胀做功推动弹丸加速。由于氢气、氦气的分子量远小于火药燃气，其声速更高，因此能够突破传统火炮的速度上限。轻气炮随后从单级发展为多级结构，能力不断提升。

纵观轻气炮的发展史，它从 19 世纪末压缩空气炮的初步尝试，到 1946 年首门轻气炮的诞生，再到一级、二级、三级结构的持续演进，始终以突破速度极限为核心驱动力。正是这种对更高速度的不断追求，使得轻气炮成为空间碎片防护、深埋目标侵彻评估、材料动态行为研究等领域的核心试验平台。

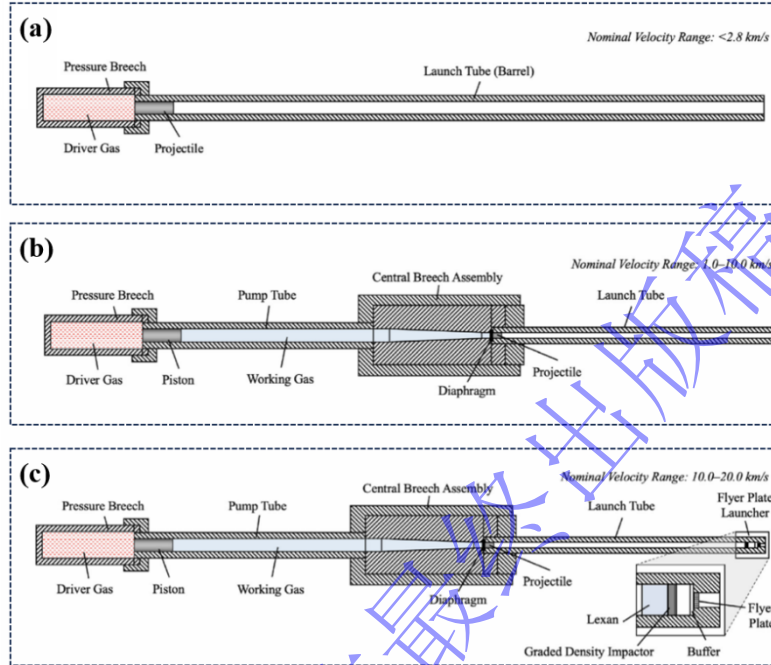


图 1 炮体示意图。(a)一级轻气炮；(b)二级轻气炮；(c)三级轻气炮^[4]。

Fig. 1 Schematic diagram of the gun body. (a) Single Stage Gun; (b) Two-Stage Light Gas Gun; (c) Three-Stage Light Gas Gun^[4].

1.1.1 一级轻气炮

一级轻气炮是结构最为简单的轻气炮类型，主要由高压气室、发射管、弹丸及快速释放阀门等部件构成，其工作原理为：高压气室中预充的压缩气体（通常为空气、氮气、氦气或氢气）快速释放，通过膨胀做功将内能转化为弹丸动能，推动弹丸沿发射管加速^[10]。其核心优势在于加载过程相对平缓——弹丸在膛内承受的加速度（ $\approx 10^3 \sim 10^4$ g）显著低于传统火炮（可达 10^5 g 量级），弹体在飞行及撞击前的结构应力可控制在材料屈服限的 30% 以下，因而可被平稳地推进到高速度（0.3~4 km/s）^[11]。需要指出的是，弹丸底部的驱动压力仍可达数百 MPa，但该压力通过弹体惯性力转化为结构应力时，由于加载速率可控且加速度较低，弹体自身并未达到高应力状态。

从内弹道机理来看，一级轻气炮的发射过程本质上是一个高压气体绝热膨胀做功的非定常热力学过程。当阀门瞬间开启后，高压气室中的压缩气体快速流入身管，在弹后空间形成高压驱动场，推动弹丸沿身管加速运动。现有的一级轻气炮内弹道模型主要分为两类：一类基于等温膨胀假设，认为气体膨胀过程中温度保持不变；另一类基于绝热膨胀假设，认为气体膨胀过程与外界无热交换，后者适用范围更广。在经典绝热膨胀模型中，假设膛内气体速度呈线性分布，以平均膛压作为弹底压力计算弹丸运动，并通过引入次要功系数 ϕ 对各类能量损失进行修正。以空气为工质（绝热指数 $k=1.4$ ）、忽略弹前空气阻力的条件下，绝热膨胀假设下的内弹道方程可表示为^[12]：

$$v_m = \sqrt{\frac{2}{\phi m} \left[\frac{p_0 V_0}{k-1} \left(1 - \left(\frac{V_0}{V} \right)^{k-1} \right) \right]} \quad (1)$$

其中 v_m 为弹丸初速, p_0 为气室初始压力, V_0 为气室初始容积, V 为气体瞬时膨胀容积, m 为弹丸质量, ϕ 为次要功系数。次要功系数 ϕ 综合考虑了弹丸摩擦、弹丸旋转、气体运动动能等多类能量损失, 其一般形式为 $\phi = K + m_g/(3m)$, 其中 K 为与摩擦和旋转相关的修正系数 (通常取 1.05), m_g 为气体质量, 由理想气体状态方程确定。

然而, 上述经典模型在气室容积较大时存在明显偏差。研究表明, 传统火炮内弹道计算假设膛内气体速度线性分布, 这一假设对火炮是合理的, 但气体炮通常具有远大于火炮的气室容积与身管截面积比 (容积比), 气室与身管连接处的截面积突变会导致显著的速度梯度和压力梯度。

针对轻气炮发射装置结构与性能测试, Sasoh 等^[13]构建了一套单级轻气炮 (25 mm 内径、2 m 身管), 在膛压低于 50 MPa 的范围内分别采用液体发射药 (LP1846) 和单基固体发射药 (NY-500) 驱动, 对脆性弹体的高速冲击场景进行实验室级复现。实验通过 VISAR 系统连续记录弹体在膛内的速度-时间历程, 获得了 0.6–1.0 km s⁻¹ 范围内的精确枪口速度, 并据此反推出沿程加速度分布。彭小武等^[14]基于动高压理论构建了一级气体炮的内弹道方程, 研制了发射口径为 50 mm 弹丸质量大于 1 kg 的一级气体炮, 发射试验测试系统构成示意图及测试系统平台搭建如图 2 (a) 和 (b) 所示。他们对不同出膛速度和不同质量弹丸发射响应试验测试, 分析了冲击响应时域、频域和时频特征规律。苏红星等^[15]研究得出增长发射管长度可以有效合理地提高气体炮的弹丸初速, 降低炮口压力值, 加强气体炮的发射稳定性。该研究结果能够为气体炮的设计和 optimization 提供一定的理论依据。

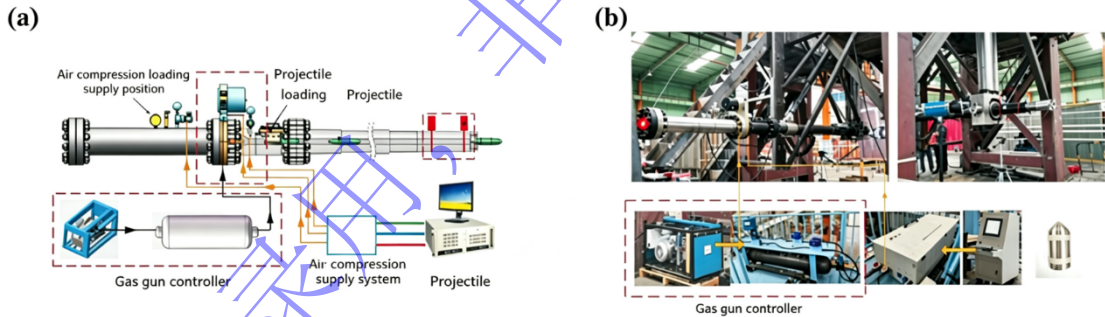


图 2 一级气体炮示意图。(a) 一级气体炮发射试验测试系统构成示意图, (b) 一级气体炮测试系统平台搭建^[13]。

Fig. 2 Schematic diagram of a single stage gun. (a) Schematic diagram of the composition of the first level gas gun launch test system, (b) Construction of the single stage gun test system platform^[13].

1.1.2 二级轻气炮

二级轻气炮则在一级基础上增加了泵管和活塞结构: 首先利用火药或高压气体驱动活塞, 在泵管中绝热压缩轻质气体 (氢气或氦气) 至 1000~10000 bar (约 100~1000 MPa) 的高压状态, 温度可达 1000~10000 K^[16], 随后高压气体冲破膜片, 将弹丸进一步加速至 3~8 km/s 以上^[17]。中国研制的 $\Phi 100/30\text{mm}$ 口径二级轻气炮, 已将 100g 弹丸驱动至 3005 m/s。其典型工作流程可概括如下: 首先, 通过火药燃烧或高压气体释放驱动泵管中的活塞高速运动; 活塞向前推进, 对泵管中预先充入的轻质气体 (通常为氢气或氦气) 进行绝热压缩, 使其压力和温度在毫秒级时间内急剧攀升, 达到数百兆帕和上千开尔文量级。随后, 高温高压气体被导入连接泵管与发射管的锥段 (高压锥段), 该段内径呈锥形逐渐收缩, 通过几何汇聚效应使气体压力和能量密度进一步提升。当锥段尾部的高压气体作用于膜片上的压力超过其设计的破裂阈值时, 膜片瞬间发生韧性破裂, 形成一个可控的释能通

道。紧接着, 高压气体迅速膨胀进入发射管, 作用于弹丸底部, 推动弹丸沿发射管持续加速, 最终以超高速飞离炮口。在这一过程中, 锥段的汇聚增压效应和膜片的阈值破裂机制共同构成了能量高效释放与平稳传递的核心环节, 直接决定了弹丸的最终发射速度与发射过程的重复性^[11]。

针对超高速发射装置的结构创新与性能提升, Rogers 等^[4, 18-20]系统综述了二级轻气炮技术的发展脉络与实验能力: 利用火药或高压气体驱动活塞, 在泵管中把气体瞬间压缩至数百兆帕、上千开尔文, 随后冲破刻槽膜片, 将弹丸加速到 3–10 km/s。Lixin Yi 等^[21]为提高二级轻气炮弹丸发射速度, 在 57/12.7mm 轻气炮上进行了试验研究, 以实现燃烧模式的两级轻气炮, 包括气流和弹丸刚体运动模式, 然后利用该模型分析了不同活塞质量对弹丸发射速度的影响。王东方等^[22]系统介绍了 HVIT 实验室二级轻气炮主要用于小规模超高速撞击地面模拟实验, 如图 3 (a) 所示, 其依托火药点燃后推动泵管内活塞运动, 压缩轻质气体至高压状态, 冲破膜片后将毫米级弹丸沿发射管加速, 最高速度可达 7.2 km/s, 具备独立的超高速撞击实验能力; 而白沙实验场的 25.4 mm 口径二级轻气炮则为大口径设备, 如图 3 (b) 所示, 可将直径 0.4~25.4 mm 的弹丸加速至 1.5~7.0 km/s, 靶舱尺寸达直径 274.32 cm、长度 914.4 cm。

但是采用火药作为驱动能源, 存在火药分子质量大、声速低、产物有毒、运输和存储受限等缺点, 针对发射驱动能源的绿色化与高效化改进, 董石等^[17]设计并发展了用气体反应释能代替火药作为驱动能源的反应气体驱动二级轻气炮技术, 实测发射弹速达到 5.6km/s, 反应气体驱动是一种环境友好、高效的驱动技术, 其成本也远低于固体发射药驱动, 其产物为完全无毒害的水和二氧化碳。

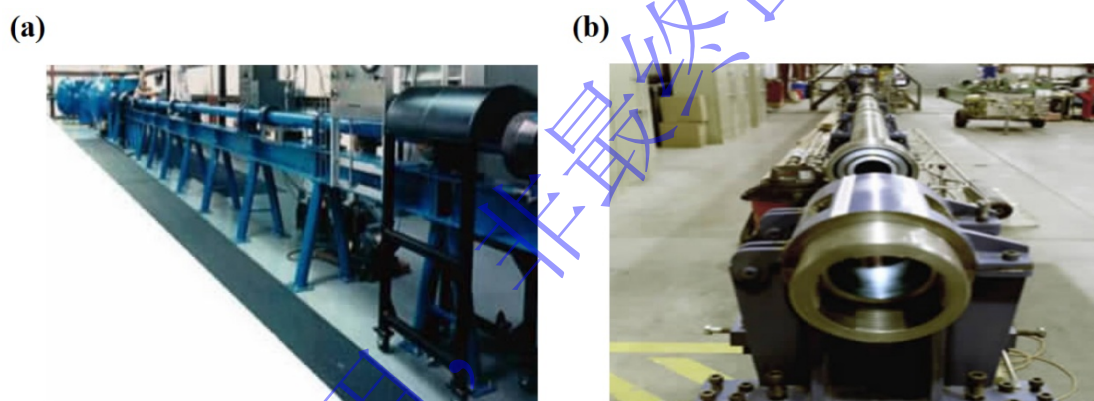


图 3 二级轻气炮装置图。(a) HVIT 实验室二级轻气炮, (b) 25.4mm 口径二级轻气炮^[22]。

Fig. 3 Diagram of the secondary light gas gun device. (a) HVIT laboratory secondary light gas gun, (b) 25.4mm caliber secondary light gas gun ^[22].

1.1.3 三级轻气炮

在二级轻气炮技术日趋成熟、弹丸发射速度达到 8~10 km/s 后, 为进一步突破该上限并覆盖空间碎片 8~11 km/s 的撞击速度需求, 科学家开始探索多级串联加速方案。三级轻气炮的核心思路是在传统两级轻气炮基础上再“叠”一级能量级, 通过“梯度阻抗+几何汇聚”^[23]双增益机制, 将克级金属飞片的速度提升至 8~15 km/s^[24, 25], 为空间碎片防护、行星撞击、高压物态方程等研究提供地面模拟平台。按发射原理, 三级轻气炮主要分为串联压缩型与阻抗梯度飞片型两大类。

1.1.3.1 串联压缩型三级轻气炮

串联压缩型三级轻气炮的基本原理是将两座二级轻气炮串联, 形成三级压缩结构, 实现气体能量的多级“接力”传递。20 世纪 60 年代, 加拿大的麦吉尔大学率先设计并使用了此类装置, 成功将 1.5 g 和 1.1 g 的弹丸分别加速至 9.6 km/s 和 10.5 km/s^[26]。其工作过程可概括为: 第一级压缩(一级泵管)产生高压气体, 驱动第二级压缩(二级泵管)中的活塞运动, 进而压缩轻质气体至更高压力,

最终推动弹丸沿发射管加速。Piekutowski 等^[23] 进一步在二级炮发射管末端附加一段高压段和发射管，将原二级炮的发射管作为泵管使用，构成传统意义上的三级轻气炮，成功将直径 2.38 mm 的铝球以 9.1 km/s 的速度发射。在技术路径上，针对气体工质预处理与系统结构创新，Moritoh T 等^[27] 采用在泵管外增加一级将轻质气体预热加压的方法设计三级轻气炮，相关工作原理示意图如图 4 所示。在预加热测试中，氢气被预热至 500 K，而后温度在 250 毫秒内回落至室温；发射测试中，使用 1.0 g 弹丸实现了 7.2 km/s 的速度。

1.1.3.2 阻抗梯度飞片型三级轻气炮

阻抗梯度飞片 (Graded Density Impactor, GDI) 型三级轻气炮是另一种重要的技术路线，其核心在于通过飞片材料波阻抗的梯度设计来实现准等熵压缩加载。该方法将波阻抗沿厚度方向呈连续或准连续变化的多层复合结构飞片作为一级飞片，先通过二级轻气炮加速至高速度，再利用其撞击并加速二级飞片。在此过程中，GDI 飞片产生准等熵加载波，将更多加载能量转化为二级飞片的动能，同时有效抑制其温升。

自 2003 年起，国内率先突破 GDI 三级轻气炮技术链^[28-33]，贯通阻抗梯度飞片“设计—制备—发射”全流程，将宏观级 Al、TC4 飞片常规推至 10~15 km/s，并将克级钽片推进 10 km/s，刷新国内超高速发射纪录。非汇聚型超高速发射装置将 25 mm 直径的铝合金飞片加速至 11 km/s 以上，增益约 1.6，峰值 12 km/s；汇聚型利用几何聚能，增益跃升至 2.3 以上，可将 10 mm 直径的钛合金飞片加速至 15 km/s。UDRI^[34]为研制三级轻气炮，将尼龙、铝、氧化铝和不锈钢球加速至 10 km/s，攻克一体弹托及抛托技术，完成 9.23 km/s 与 9.90 km/s 两次实物撞击试验，装置示图如图 5 所示。与此同时，美国圣地亚国家实验室 (SNL) 也发展了基于 GDI 的三级轻气炮加载技术和基于电磁驱动的超高速飞片发射技术，其三级炮装置将 26 mm×0.56 mm 的钛飞片发射速度提升至 5.6 km/s。三级轻气炮的出现，标志着超高速发射技术从二级压缩向多级压缩的重要跨越。

同时，Chhabildas 等提出了基于 GDI 的三级轻气炮技术。该方法将波阻抗沿厚度方向连续或准连续变化的多层复合结构飞片作为一级飞片，先通过二级轻气炮加速至高速度，再利用其撞击并加速二级飞片。此过程能够产生准等熵加载波，将更多加载能量转化为二级飞片动能，同时有效抑制其温升。针对材料超高压状态方程研究需求及测速要求，Chhabildas 等^[35]提出了一种基于 GDI 的三级轻气炮技术。该方法将阻抗梯度飞片作为一级飞片，先通过二级轻气炮加速至高速度，再利用其撞击并进一步加速二级飞片。阻抗梯度飞片是一种波阻抗沿厚度方向呈连续或准连续变化的多层复合结构，当其撞击二级飞片时，能够产生准等熵加载波，从而将更多加载能量转化为二级飞片的动能，同时有效抑制其温升，其速度曲线如图 6 所示。

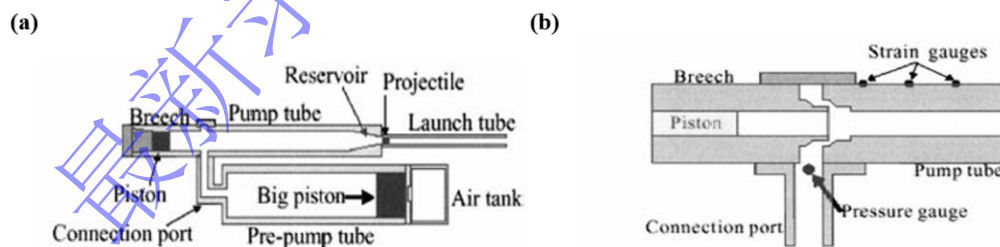


图 4 三级轻气炮工作原理的示意图。(a)初始设置，(b)靠近连接端口处部分的放大示意图。图中显示了压力计和应变计的安装位置^[27]。

Fig. 4 Schematic diagram of the working principle of a three-level light gas gun. (a) Initial setup, (b) enlarged schematic diagram of the part near the connection port. The installation positions of the pressure gauge and strain gauge are shown in the figure^[27].

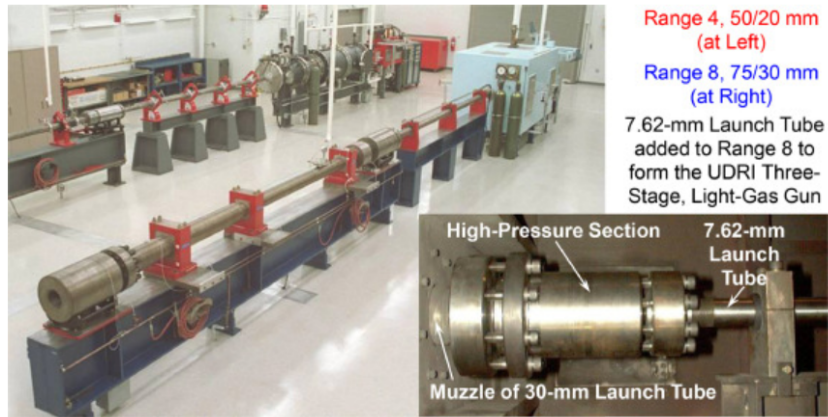


图 5 UDRI 两阶段、轻燃气枪发射装置的视图^[34]。

Fig. 5 View of UDRI two-stage, light gas gun firing device^[34].

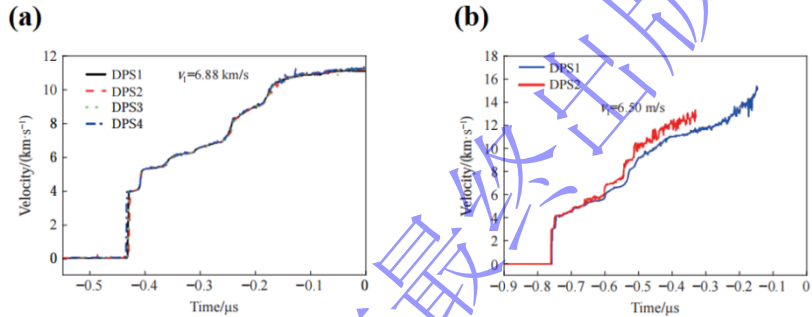


图 6 速度曲线。(a) 三级炮发射的 LY-12 铝合金飞片速度曲线(非汇聚型);(b)三级炮发射的 TC4 钛合金飞片速度曲线(汇聚型)^[35]。

Fig. 6 Speed curve. (a) Velocity curve of LY-12 aluminum alloy flyers fired from a three-level gun (non convergent type); (b) Velocity curve (convergent type) of TC4 titanium alloy fins fired by a three-stage gun^[35].

总而言之，上述轻气炮从一级到三级的发展脉络清晰地表明，随着压缩级数的增加，发射速度不断提升，但系统复杂度、工质危险性及维护成本也随之显著增加。为了更直观地对比国内外主要研究机构在不同类型轻气炮上的设备能力与技术水平，下表 1 汇总了典型单位在一级、二级、三级轻气炮领域的关键参数与发射性能。通过这一系统梳理，可为分析各类轻气炮的技术优势、适用场景及发展瓶颈提供基础数据支撑。

表 1 国内外轻气炮研究现状

Table 1 Research Status of Light Gas Gun at Home and Abroad

Equipment type	Organization/ Unit	Caliber/ Specification	Launch capability	Technical characteristics
Single Stage Gun	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	$\Phi 101$ mm	20~1400 m/s	The first domestically designed and developed single stage gun
	Nanjing University of Aeronautics and	$\Phi 58$ mm	20~600 m/s	Used for lightweight materials and structural characterization

Astronautics				
Two-Stage Light Gas Gun	Johns Hopkins University	Φ12.7 mm	1.5~8.0 km/s	HyFIRE laboratory, equipped with high-speed optical diagnostics and X-ray systems for secondary gun firing
	Texas A&M University	Φ12.7 mm	1.5~8.0 km/s	Ultra High Speed Impact Laboratory (HVIL) equipped with 450kV flash X-rays, ultra high speed schlieren imaging, etc
	China Aerodynamics Research and Development Center	Φ25 mm	>6.0 km/s (14 g aerodynamic separation model, 2025) ^[36] 6~8 km/s (gaseous detonation drive, interchangeable 7.62-45 mm launch tube) ^[37]	Realize the launch of a 14g aerodynamic separation model at 6.366 km/s by 2025
	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	DBR30		Gas phase detonation drive, interchangeable 7.62-45mm caliber launch tube ^[38]
	Johns Hopkins University	HyFIRE	1~7 km/s	Equipped with a 10 Mfps high-speed camera, 300kV flash X-ray, and photon Doppler velocimetry (PDV)
Three- Stage Light Gas Gun	Texas A&M University	HVIL	1.5~8.0 km/s	Equipped with 450kV flash X-ray (dual head), ultra high speed schlieren imaging, and particle tracking technology
	China Academy of Engineering Physics	Non convergent type	>11 km/s (25 mm diameter aluminum alloy flyer, based on Graded Density Impactor technology) ^[29]	Based on Impedance Gradient Flyer (GDI) technology ^[29]
	China Academy of Engineering Physics	Convergent type	>15 km/s (10 mm diameter titanium alloy flyer, geometric focusing gain) ^[29]	Geometric focusing gain based on impedance gradient flyer (GDI) technology ^[29]
	Sandia National Laboratories	GDI	10~15 km/s (0.5-1.0	The earliest to conduct research on GDI based three-level gun

mm thick, 6–19
mm diameter
plates; 1 mm
titanium flyer
to 12.2 km/s;
enhanced
configuration
approaching 16
km/s)^[28]

1.2 氢氧爆轰驱动发射技术

氢氧爆轰发射技术利用低分子量可燃气体（主要为氢氧混合气）燃烧产生的高温高压气体推动弹丸，具有推进效率高、初速潜力大、燃烧产物清洁等显著优势。美国 UTRON 公司从 20 纪 90 年代就已经开始研究燃烧轻气炮发射技术^[39]，研究表明，燃烧轻气炮的炮口动能可比先进固体发射药火炮高出至少 30%，理论初速可达 4 km/s 以上。

针对氢氧炮内部弹道过程中的火焰加速及爆燃转爆轰（DDT）机理，Zhou 等^[40]构建了大涡模拟与详细化学反应机理相结合的数值模型。在高压、低温条件下，模拟了不同氢氧摩尔比混合气的燃烧过程。研究获得了火焰速度的三阶段演化规律，并揭示了两种 DDT 触发机制：一是冲击波与火焰反应区的直接耦合，二是局部爆炸产生的多点压缩波协同增强。结果表明，降低氢氧摩尔比会显著缩短 DDT 距离，而反射压力波对火焰传播存在明显抑制作用。

针对氢氧炮内氢氧预混气体燃烧过程的化学动力学影响，Deng 等^[41]建立了一套单区数学模型，在 45 mm 口径、5 L 燃烧室容积条件下，分别采用单步、两步、七步及十九步氢氧详细化学反应机理，对高压低温下氢气与氧气（摩尔比 8:1）的燃烧过程进行了数值模拟。研究通过耦合 CHEMKIN 化学反应动力学子程序，获得了不同机理下的温度-时间曲线及弹丸速度-时间历程，如图 7 所示。并据此分析了各关键中间物种（OH、H₂O₂、HO₂）的摩尔分数演化规律。结果表明，不同化学反应机理对点火延迟时间和点火温度影响显著。胡天翔等^[42]系统构建了氢氧爆轰气体炮内弹道性能的数值模型与初始条件影响规律，氢氧炮试验装置如图 8 所示。基于 9 组分 19 步详细化学反应机理与 RNG k-ε 湍流模型。利用 FLUENT 软件模拟了氢氧混合气体的爆轰驱动过程，揭示了初始压力提升可有效提高弹丸发射速度、氮气含量增加可降低气室平均温度并提升能量利用率、以及存在优化气体配比使弹速与能量利用率协同最优的关键规律。

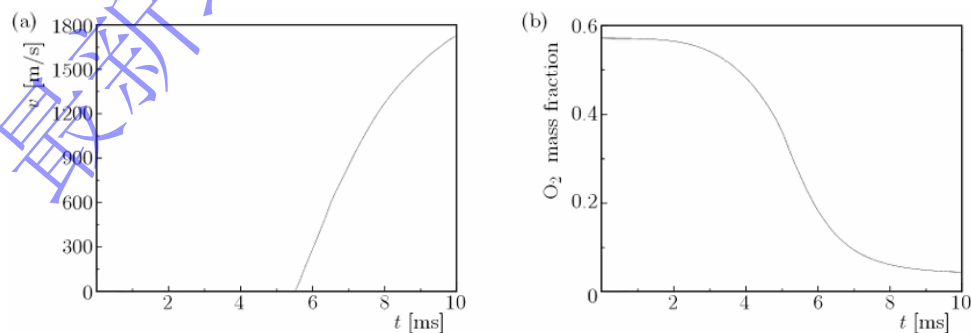


图 7 试验结果曲线。(a)弹丸速度时程曲线,(b)氧质量时程曲线^[41]。

Fig. 7 Experimental result curve. (a) Bullet velocity time history curve, (b) oxygen mass time history curve^[41].

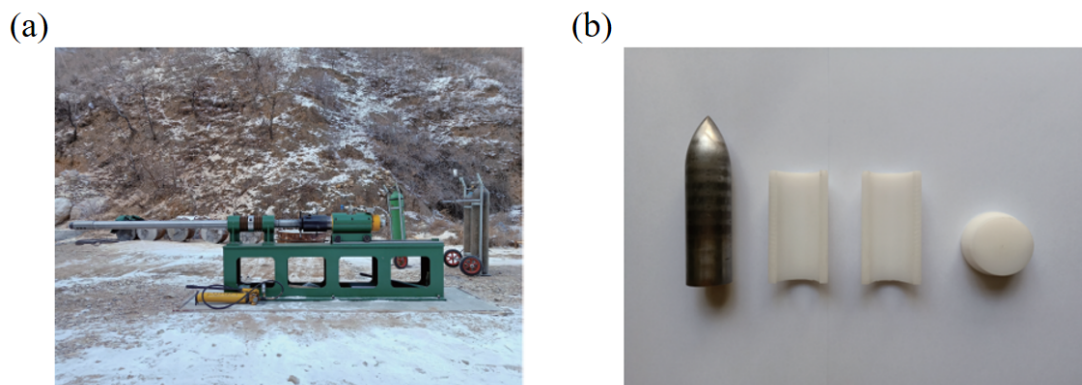


图 8 氢氧炮试验装置。(a) 发射装置, (b) 弹丸、弹夹和枪托^[42]。

Fig. 8 Hydrogen oxygen gun test device. (a) Launching device, (b) projectile, magazine, and stock ^[42].

2 电磁能聚能发射技术

电磁能聚能发射技术, 即电磁轨道炮, 是一种利用洛伦兹力替代传统火药燃气压力推动弹丸的全新发射方式^[43]。其主体结构由两根平行导轨组成, 导电弹丸(或电枢)置于两轨之间; 当脉冲电源接通时, 电流经一导轨流向弹丸(电枢), 再经另一导轨回流, 在两轨之间产生强磁场; 通电弹丸在洛伦兹力作用下沿导轨加速, 最终以高速射出^[33]。与传统火炮相比, 电磁轨道炮具有初速高、射程远、反应速度快等显著优势, 是一种极具潜力的新概念动能武器。轨道炮系统通常包括轨道发射器、电枢与射弹、脉冲功率电源(PPS)及控制开关等核心部件^[44, 45], 基本结构如图 9 所示。

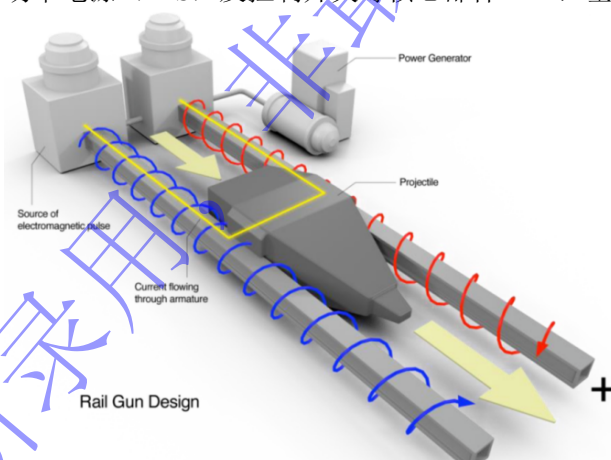


图 9 电磁轨道炮的工作原理^[33]。

Fig. 9 Working principle of electromagnetic railgun^[33].

电磁轨道炮的探索可追溯至 20 世纪初。1918 年, 法国发明家维勒鲁伯最早提出利用电磁力发射弹丸的构想, 并于 1920 年研制出原理性的电磁轨道炮。然而, 受限于材料和电力技术的早期瓶颈, 这一构想长期停留在原理验证阶段^[46]。二战期间, 德国取得首次工程突破: 1944 年汉斯勒博士研制出长 2 m、口径 20 mm 的轨道炮, 将 10 g 铝弹丸加速至 1.08 km/s; 1945 年他将两门炮串联, 速度提升至 1.21 km/s。同期日本也开展了感应加速式电磁炮研究, 将 2 kg 弹丸加速至 335 m/s。然而, 大电流通过导轨-电枢滑动接触面时引发的严重轨道烧蚀和电枢熔蚀问题, 加之脉冲电源小型化等核心技术难以攻克, 电磁轨道炮研究在此后数十年间陷入停滞^[47]。

20 世纪 70 年代, 随着脉冲功率技术、材料科学和计算电磁学的长足进步, 电磁轨道炮研究重新兴起。1978 年, 澳大利亚国立大学物理学家理查德·马歇尔和约翰·巴伯等人使用 5 m 长的轨道炮, 将质量 3.3 g 的塑料弹丸以 5.9 km/s 的高速成功发射。这一突破性进展标志着电磁发射技术从原理

验证迈入实用化探索阶段。此后，美国国防部成立“电磁轨道炮联合委员会”，系统推动了电磁发射技术的研发进程。2005年起美国海军重启电磁轨道炮研发计划，2010年成功试射“闪电”电磁轨道炮，设计指标为将炮弹加速至 2.5 km/s、射程达 180 km，相关试验图如图 10 所示。近年来，日本在电磁发射领域进展迅速，2023 年在海上完成电磁轨道炮试射，初速超过 2.5 km/s，2025 年进一步在“飞鸟”号试验舰上安装新型电磁轨道炮进行测试^[48]。

国内电磁轨道炮研发起步于 20 世纪 90 年代末。2018 年，中国实现 30 兆焦级全尺寸舰载试验炮的公开测试，具备 200 km 以上射程与约 2.5 km/s 的初速。美国自 2003 年由海军主导推进，如图 11 所示，已发展出初速马赫 7、射程 200 km 的试验系统，并配套开发“超高速射弹”（HVP），致力于实现 64 兆焦耳发射能量目标^[49]。

除轨道炮外，磁驱动加载装置是电磁能发射技术的另一重要分支。国际上最具代表性的是美国 Sandia 国家实验室的 Z 脉冲功率装置（Z machine）。该装置通过 18 对独立触发的的气体开关实现电流波形的精确整形，可向负载输送约 20 MA 的峰值电流，上升时间约 100~600 ns。在平面构型中，Z 装置产生的磁感应强度超过 1200 T，对应磁压力超过 600 GPa。在飞片发射方面，Z 装置采用平行板带状线（stripline）构型，可在增大飞片面积的同时提升加载压力，将约 25 mm×13 mm×1 mm 的铝飞片加速至约 45 km/s，铜飞片峰值速度约为 22 km/s。在冲击实验方面，Z 装置可覆盖从约 8 km/s 到 34 km/s 的可靠飞片速度范围，铜-铜对称撞击实验中已实现约 29 Mbar（约 2900 GPa）的峰值冲击压力。该装置可在单发实验中同时对多达 8 个样品进行诊断测量，涵盖 3 个数量级的压力范围，并可通过 VISAR 和 PDV 等多达 38 通道的测速系统实现优于 0.5% 的飞片速度测量精度^[50]。

在加载方式上，Z 装置具有显著的灵活性。其核心优势在于可通过精确整形电流脉冲，使飞片在加速过程中实现准等熵（无冲击）压缩，从而避免冲击波导致材料熔化和温升，确保部分飞片材料在撞击靶板时仍保持固态，为高精度物态方程测量提供必要条件。基于这一能力，Z 装置可在材料中实现峰值纵向应力 4~400 GPa、上升时间约 300~800 ns 的准等熵压缩加载。然而，该装置运行维护成本极为高昂，实验周期长，且仅在少数大型国家实验室具备开展条件，这限制了其普及性^[51]。

国内方面，中国工程物理研究院流体物理研究所先后研制了放电电流峰值达 1.5 MA、4.0 MA 和 7.0 MA 的磁驱动加载装置 CQ-1.5、CQ-4 与 CQ-7，系统开展了超高速飞片发射技术攻关，CQ-4 装置磁驱动高飞片速度曲线如图 12（a）、（b）所示。其中，CQ-4 装置可将宏观金属飞片发射至 15 km/s 以上，CQ-7 装置有望将更大尺寸飞片加速至更高速度^[52-56]。

综上，电磁能聚能发射技术历经百年发展，从早期的原理探索到如今的工程化应用，已在超高速发射领域展现出不可替代的潜力。然而，制约其大规模应用的核心瓶颈——轨道烧蚀、电枢熔蚀及脉冲电源小型化等问题——尚未根本解决，仍是有待持续攻关的关键技术难题

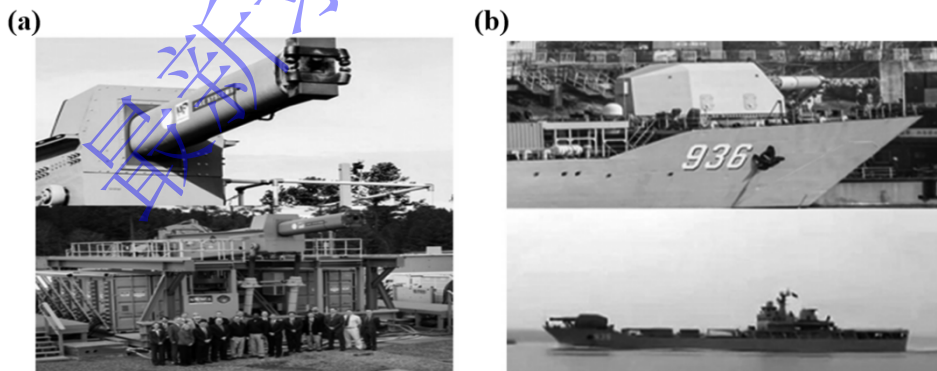


图 10 电磁轨道炮试样图。(a) 美海军电磁轨道炮试验样机，(b) 安装在“海洋山”号试验船上的电磁轨道炮^[46]。

Fig. 10 Sample diagram of electromagnetic railgun. (a) The prototype of the US Navy electromagnetic railgun test, (b) the electromagnetic railgun installed on the "Ocean Mountain" test ship ^[46].

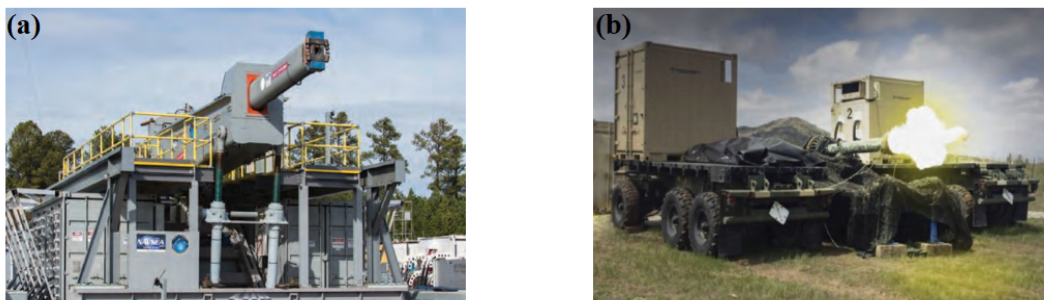


图 11 电磁轨道炮演示系统。(a) 美国海军电磁轨道炮演示系统, (b) 美国陆军电磁轨道炮演示系统^[57]。

Fig. 11 Electromagnetic railgun demonstration system. (a) The US Navy Electromagnetic Rail Gun Demonstration System, (b) the US Army Electromagnetic Rail Gun Demonstration System ^[57].

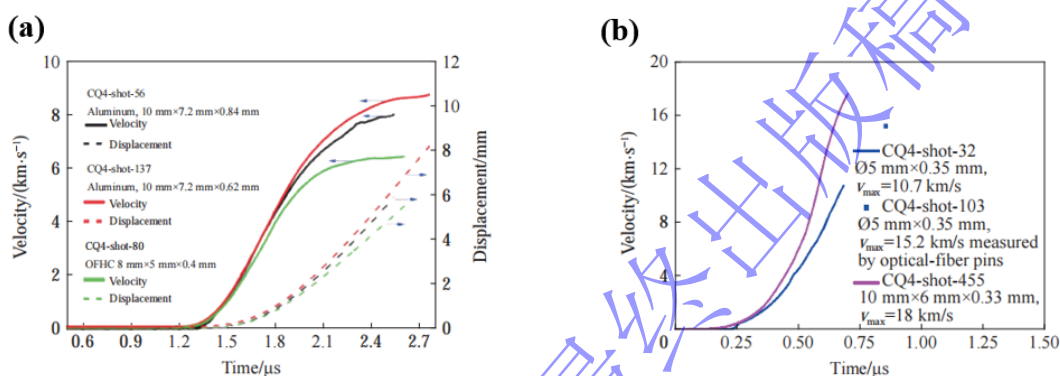


图 12 速度曲线。(a) CQ-4 装置驱动飞片速度曲线, (b) CQ-4 装置驱动薄铝飞片速度曲线^[33]。

Fig. 12 Speed curve. (a) CQ-4 device drives the speed curve of the flyer, (b) CQ-4 device drives the speed curve of the thin aluminum flyer ^[33].

3 化学能发射技术

化学能发射技术是最早被应用于高速发射的技术途径,其历史可追溯至中国古代的火药发明。13 世纪,中国的突火枪和火箭已利用黑火药燃烧产生的高温高压气体推动弹丸,开创了化学能发射的先河。其核心工作原理是:在密闭的膛室内引燃发射药(含能材料),火药快速燃烧释放大化学能并生成高温高压燃气,燃气膨胀推动弹丸沿身管加速运动,最终将化学能转化为弹丸的动能。然而,受限于黑火药的燃速和能量密度,早期火炮的初速仅约 200~300 m/s。

进入 19 世纪,化学能发射技术迎来两次重大革命。1884 年,法国化学家 P.维埃利发明了无烟火药(单基火药),以硝化纤维素为主要成分,燃烧后几乎不产生烟雾,且能量密度和燃速可调控,使弹丸初速大幅提升至 500~800 m/s。几乎同期,瑞典化学家阿尔弗雷德·诺贝尔发明了 ballistic 火药(双基火药),进一步提升了发射药的稳定性和做功能力。这两项发明奠定了现代火炮发射药的基石。20 世纪以来,为突破传统火药燃气声速限制所导致的“初速瓶颈”(常规火炮初速极限约 2~3 km/s),研究人员开始探索将化学能以更加剧烈和集中的方式释放^[58]。

在所有化学能驱动方式中,强爆轰驱动与聚能射流是实现极限速度(>10 km/s)的最有效途径,在超高速碎片模拟、空间碎片防护和材料极端动态响应研究中具有不可替代的作用。与常规火药燃烧发射不同,这两类技术通过炸药的瞬态爆轰或药型罩的汇聚效应,将化学能在微秒甚至纳秒尺度内集中释放,从而突破传统火炮的速度瓶颈。

3.1 强爆轰驱动高速金属飞片

强爆轰驱动是利用高密度炸药在爆轰波传播过程中产生极高的压力和能量密度,直接驱动相邻

的金属飞片或弹丸达到超高速。与常规爆轰相比，强爆轰通常通过增加装药质量或采用高阻抗约束来提升爆轰压力，使飞片底部承受的冲击压力远超 C-J 压力，从而获得更高的飞片速度。

美国、欧洲、日本、俄罗斯等国家和地区均已成功研制出此类加速器，广泛应用于相关研究。尤为值得一提的是，该加速装置能够将 1g 的铝弹丸加速至 11 km/s 以上，这一独特优势使其在超高速撞击试验中发挥着不可替代的作用^[59, 60]。赵峰^[61-63]从试验和理论证实了炸药强爆轰驱动高速金属飞片是可行的。利用占据式聚能装药空间碎片生成装置，可以得到 10.62 km/s 的射流头部，以及射流速度大于 10 km/s 的碎片云，试验装置如图 13 所示。与自由空气爆炸相比，该定向聚能结构产生的载荷脉冲具有更高的峰值压力和更持续的作用时间，为分析材料在极端高速撞击下的动态响应提供了更严苛的加载条件。

值得注意的是，与自由空气爆炸载荷相比，强爆轰定向聚能结构产生的冲击载荷具有更高的峰值压力和更长的持续作用时间，这为研究材料在极端高速撞击下的动态响应提供了更为严苛的加载条件，有助于揭示材料在极高应变率下的本构行为和失效机制。

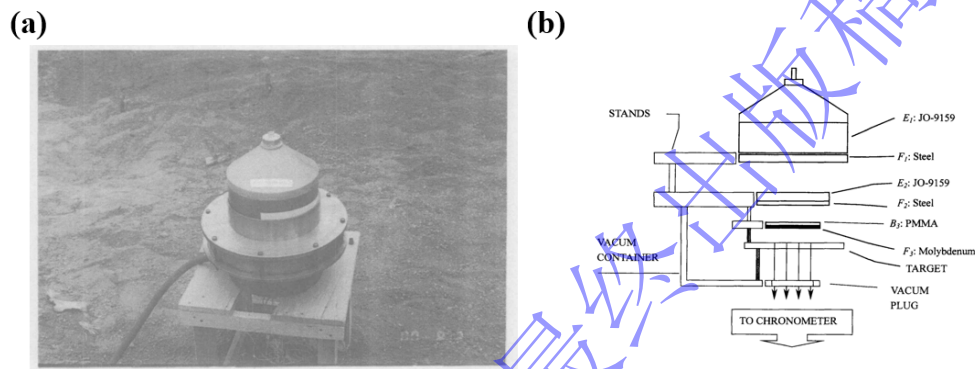


图 13 炸药强爆轰驱动装置。(a) 多级驱动试验的装置照片，(b) 多级串联装药驱动试验装置示意图。

Fig. 13 Explosive strong detonation driving device. (a) Photo of the multi-stage driving test device, (b) Diagram of the multi-stage series-charged driving test device^[61-63].

除此以外，补充内爆驱动式超高速发射，其也是一项常用化学能发射技术，利用炸药爆轰驱动薄壁金属管向内爆缩（内爆），从而将管内工质气体压缩至极端压力和温度状态，进而推动弹丸加速。该领域的开创性工作由加拿大麦吉尔大学完成。其内爆驱动发射器的工作原理为：围绕薄壁管的柱形炸药装药起爆后，驱动管壁向内高速爆缩，将管内氦气压缩至约 10 GPa 压力、超过 10,000 K 温度。这一内爆压缩过程发生在微秒时间尺度内，产生的高压气脉冲沿发射管推动弹丸加速。采用该技术路线，麦吉尔大学的装置已实现 0.1 g 弹丸 9.1 km/s、0.36 g 镁合金弹丸 10 km/s 以及 15 g 弹丸约 7.5 km/s 的发射能力^[64]。上述结果表明，内爆驱动发射器可获得与二级、三级轻气炮相当的弹丸速度，同时在结构简单性方面具有优势，无需复杂的活塞或机械压缩部件。国内方面，中国空气动力研究与发展中心在内爆驱动技术领域取得了重要进展。其研制的 8 mm 口径内爆发射器，在压缩管中充装 5 MPa 氦气的条件下，分别实现了 0.55 g 铝合金弹丸 7.95 km/s 和 0.37 g 镁合金弹丸 10.28 km/s 的发射速度^[65]。这些成果表明，内爆驱动方式可有效覆盖空间碎片防护研究和超高速侵彻研究所需的 7~10 km/s 中高速发射需求。

3.2 聚能装药超高速碎片生成技术

聚能装药（shaped charge）技术是利用药型罩在爆轰波驱动下压垮、汇聚形成高速金属射流或密实碎片的方法。其核心物理机制可追溯至 Gurney 公式^[60]和聚能射流定常理论^[59]：爆轰波沿药型罩表面传播时，驱动罩体材料向轴线方向压垮，形成高速向前运动的金属流，其头部速度可达 10 km/s 以上。

在空间碎片地面模拟试验中, 研究人员发展了占据式聚能装药碎片生成装置。该装置通过在聚能射流路径上设置占据体 (obturator), 截断射流头部并形成密实的圆柱状碎片, 从而获得质量可控、速度可调的超高速碎片源。邢柏阳等^[66]设计了一种强爆轰驱动超高速碎片发射装置。通过采用凹形曲面装药结构实现定向聚能效应, 将 1.533 g 紫铜碎片加速至 11.649 km/s, 不同炸药配比, 其验证了定向聚能加速技术在高速冲击领域的可行性。该装置利用占据体截断聚能射流头部形成密实圆柱状碎片, 其动能可达 85.6 kJ。由聚能射流定常理论^[67]以及 Chanteret 关于药型罩压垮速度的理论^[68]可知, 通过优化装药长径比 (λ)、药型罩锥角 (2θ) 及材料参数, 可在保持碎片质量大于 1 g 的前提下实现速度突破 11 km/s, 满足空间碎片防护试验对超高速冲击体的需求。

基于聚能射流定常理论^[67], 射流头部速度 V_j 可近似表示为:

$$V_j = \sqrt{2E} \left(\frac{1 + \cos\theta}{\sin\theta} \right) \quad (2)$$

其中 $\sqrt{2E}$ 为药型罩材料的 Gurney 常数, θ 为药型罩半锥角。由该式可知, 通过优化装药长径比 (λ)、药型罩锥角 (2θ) 及罩体材料 (如铜、钨或钛合金), 可在保持碎片质量大于 1 g 的前提下实现超过 11 km/s 的碎片速度, 从而满足空间碎片防护试验对超高速撞击体的需求。

4 液气相变发射技术

液气相变发射技术是利用液态工质受热发生液-气 (或液-超临界) 相变, 体积急剧膨胀产生高压, 推动弹丸和载荷加速。其核心在于将工质受热贮存的内能通过相变快速转化为膨胀功, 实现能量密度高、响应速度快、可控性强的能量输出。

常用的相变工质包括液态二氧化碳^[69]、四氟乙烷^[70]、丙烷、液氮、氨等。其中二氧化碳的临界温度仅 31 °C、临界压力 7.4 MPa, 可在室温附近完成液超临界快速汽化, 同时二氧化碳无毒、不燃、廉价且过冷度小, 是用于高速驱动最为常用的相变工质^[69], 为重复、安全、低成本的高速冲击实验提供了理想动力源^[71-73]。

在二氧化碳安全贮存、运输、泄放等方面, Zhang 等^[74]为确保二氧化碳储存的安全性, 必须考虑在外部热泄漏条件下可能出现的自增压现象, 以避免二氧化碳储罐内压力过高, 研究了高压二氧化碳自增压过程中的压力演变和热分层现象。Wang 等^[75]提出了针对 Lee 模型的优化蒸发松弛时间系数 (T_{ev}), 通过改进非平衡相变建模来推进 CO₂ 管道安全提供了可量化的框架。这些研究表明, 超临界二氧化碳发射技术具有结构紧凑、能量密度高、输出冲量大等优势, 因此在气体炮、导弹发射等军事应用领域展现出良好的应用潜力。Xiao 等^[76-78]系统构建了高压 CO₂ 管道泄漏瞬态行为的非平衡相变数值模型及其演化规律: 通过用户自定义函数将 Span-Wagner 状态方程与 Lee 相变模型嵌入 Fluent 求解器, 引入松弛时间系数控制气液相间质量传递, 在管内将压力突变过程捕捉至约 100 微秒、在管外捕捉马赫盘结构与欠膨胀射流演化; 揭示了初始密度与温度对压力变化幅值、出口质量流量的正向调控规律, 发现初始流速对管内压力平台影响较小但对温度下降影响显著、且管外近场射流区域温度低于环境温度并可低至 254 K。Zhang 等^[79]系统构建了高压密相 CO₂ 管道泄漏近场流动特性与射流结构的实验及数值研究框架: 搭建小尺度管道泄漏试验装置, 结合嵌入 Span-Wagner 状态方程与 Lee 相变模型的 CFD 方法, 揭示了近场压力峰值与上游初始压力呈负相关、与泄漏口径呈正相关的规律。Wang 等^[80]针对高压管道中气液平衡态 CO₂ 的突发泄漏行为, 建立了考虑非平衡相变和真实气体效应的 CFD 模型。研究发现, Peng-Robinson 方程在预测过热度时比 Span-Wagner 和 GERG-2008 方程更保守; 初始气相体积分数显著影响管道内外的压力、温度和减压波速度, 但不影响马赫盘位置, 其中当初始气相分数为 0.2 时影响最为突出——其初始减压波速比纯液态 CO₂ 慢约 1.46 倍, 压力和温度开始下降的时间延迟约 0.46ms (约晚 5.1 倍), 且近场射流的峰值压力和最大速度分别高出 6.3% 和 11.4%。

在二氧化碳相变膨胀做功驱动方面, Yao 等^[81]系统构建了高压 CO₂ 相变驱动大质量弹体高速

冷发射的理论模型与实验验证体系：利用多组相变动力单元时序激发液态 CO_2 发生液气相变，在预燃室内产生高压气体并均压后推动弹体沿发射筒加速，相变启动器如图 14 所示。通过零维内弹道模型与 CFD 仿真相结合的方法，揭示了弹体质量与 CO_2 质量对发射速度和峰值压力的显著影响规律；在 650 kg 弹体发射实验中实现了 109 m/s 的发射速度，峰值压力达 5.06 MPa，理论模型与实验结果的压力误差仅 0.98%、速度误差仅 2.34%，为冷发射技术在更大质量载荷平台上的拓展应用提供了理论依据与实验支撑。王甲强等^[82]系统构建了 CO_2 液气相变驱动轨道车辆碰撞试验台的数值模型与做功特性分析框架：利用储液缸内 CO_2 相变产生高温高压超临界态工质，试验装置如图 15 所示，经阀门节流进入驱动缸建立压力，推动活塞及试验车加速；揭示了在相同结构条件下 CO_2 较空气驱动时间缩短 10.5%、末速度增大 21.2% 的规律，发现储液缸初始压力由 8 MPa 增至 20 MPa 时试验车末速度增大 58.3%、加速时间减少 32.2%，并明确了初始温度对相态影响显著、驱动缸初始容积对过载与加速时间具有调控作用的关键机制。Li 等^[69]针对热参数与结构参数对发射过程的影响机制被系统探讨，从而验证了超临界二氧化碳发射技术的可行性。Yao 等^[83]进一步基于质量与能量守恒，构建了气动弹射器的理论模型，并通过对比分析指出，以超临界二氧化碳为介质时，其发射性能显著优于传统气体。

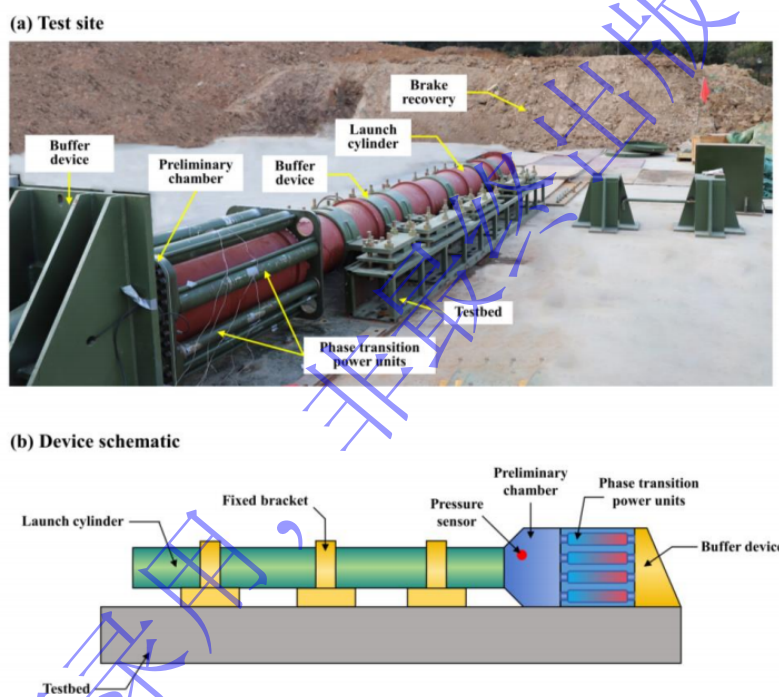


图 14 相变启动器。(a) 测试站点，(b) 设备示意图^[81]。

Fig. 14 Phase change starter. (a) Test site, (b) Equipment schematic diagram^[81].

在二氧化碳相变高速发射侵彻试验方面，Yao 等^[84]通过二氧化碳相变高速发射弹体，在 480 m/s、650 m/s 和 770 m/s 三种典型速度下开展了侵彻试验，获取了弹坑形貌、鼓包高度、侵彻深度等关键参数，侵彻试验图如图 15 所示，并结合经系统标定的 HJC 本构模型进行了高精度有限元模拟，验证了模型在预测侵彻深度与损伤形态方面的准确性。姚术健等^[85]系统构建了基于 CO_2 液气相变的新型发射技术及其试验装置体系：利用发热装置激发液态二氧化碳发生液气相变，在相变室内产生高压气体，经初容室均压后推动弹体沿发射筒加速，实现 100–1000 m/s 速度范围内的可控发射；通过配置多根相变管并按时序激发，可将 20 kg 级重型弹体加速至 400 m/s 以上，试验装置如图 16 所示。

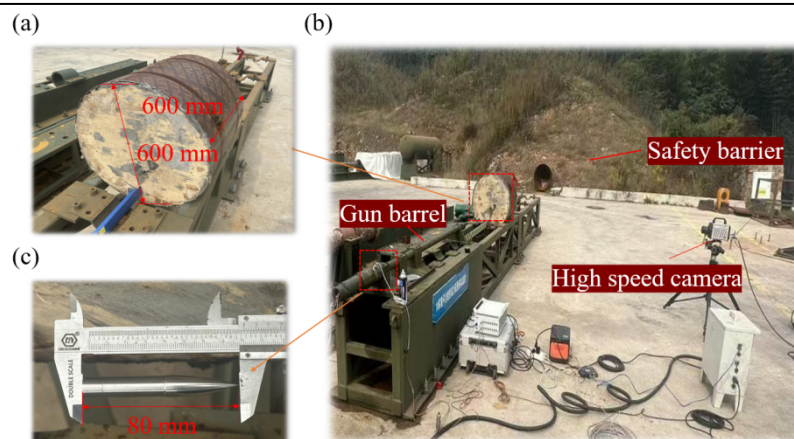


图 15 侵彻试验图。(a) 靶子, (b) 试验装置, (c) 弹丸^[84]。

Fig. 15 Penetration test diagram. (a) Target, (b) experimental apparatus, (c) projectile^[84].

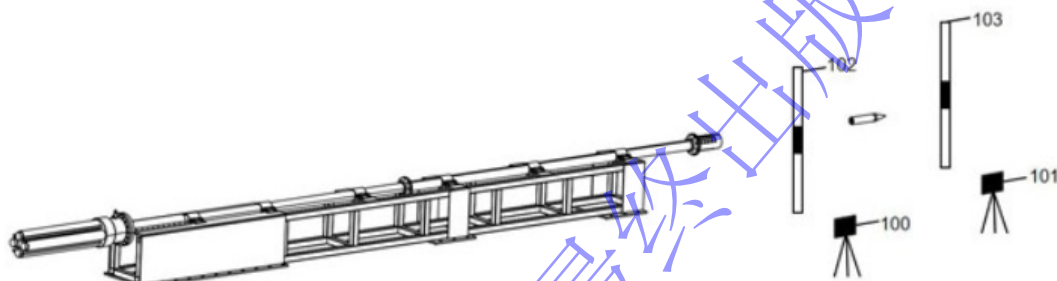


图 16 一种液气相变发射装置、超高速冲击试验装置及其测试方法^[85]。

Fig. 16 A liquid gas phase change emission device, an ultra high speed impact test device, and a testing method thereof^[85].

尽管液气相变发射技术具备上述显著优势,但其技术短板同样不容忽视。首先, CO_2 分子量较大 (44 g/mol), 远高于轻气炮所用氢气的 2 g/mol 和氦气的 4 g/mol 。在相同温度与压力条件下, 工质的声速与其分子量的平方根成反比, 因而 CO_2 的声速 (约 260 m/s , 常温常压) 远低于氢气和氦气, 这从根本上限制了液气相变发射方式的理论速度上限。其次, 液气相变过程涉及非平衡相变动力学, 工质的初始温度、充装量、加热速率及相变室容积等参数的微小波动均会影响压力上升速率与峰值压力, 导致控制难度较大。上述不足表明, 液气相变发射技术更适用于对成本、环保和重复性要求较高但对速度上限要求相对适中的场景, 而在追求极限超高速 ($>3 \text{ km/s}$) 的发射任务中, 仍需借助轻气炮或电磁能发射等技术手段^[69]。

针对上述不足, 现有解决手段主要包括: 一是采用多根相变管时序激发, 通过配置多根相变管并按预设时序依次激发, 可在一定程度上减小相变高压脉冲的影响, 降低内弹道压力峰平比, 提升发射速度^[85]; 二是结合 CFD 与非平衡相变动力学模型进行内弹道精细化参数优化, 利用嵌入真实气体状态方程 (如 Peng-Robinson 方程) 和 Lee 相变模型的仿真方法^[75], 可有效预测不同初始温度和充装量条件下的压力-时间曲线, 为参数优化提供量化依据; 三是引入初容室均压结构, 在相变室与发射筒之间设置缓冲容积, 对相变产生的高压气体进行均压, 降低压力脉动对速度重复性的影响^[85]。通过以上方法初步解决了技术的工程化问题, 但在全流程高精度仿真模型、精确控制方面仍需持续攻关。

5 结论与展望

本文系统综述了气体驱动发射技术、化学能发射、电磁能聚能发射及液气相变发射四种典型高速冲击试验技术的原理、发展现状与实验能力。表 2 中给出了不同高速冲击发射技术的加载能力和

技术特点之间的比较, 对比分析表明: 气体驱动技术技术成熟、可重复性好, 覆盖 0.3~10 km/s 速度范围, 但三级结构复杂、氢气易燃易爆; 化学能发射极限速度可达 10~12 km/s 以上, 但传统固体发射药火炮的单发身管热散失占总能量的 16.45%, 连发射击时该比例约为 13.81%~16.45%, 若计入弹带挤进阻力消耗、未完全燃烧产物化学能损失及燃气带走的热量等, 实际有效做功比例更低, 并且实验经济性与环保性较差^[86]; 电磁能聚能发射可将飞片加速至 18 km/s 以上, 连发潜力大, 但轨道烧蚀严重、寿命仅数发; 液气相变发射以 CO₂ 为工质, 兼具环保、低成本、可重复及压力调控宽等优势, 已在 650 kg 弹体上实现 109 m/s 发射, 但初速重复性不足。当前高速冲击试验技术仍面临速度-质量-重复性-环保四维矛盾构成的共性技术壁垒, 实际应用中需根据试验目标的速度量级、载荷质量、重复性要求及环保约束进行综合选型与组合使用。

表 2 高速发射技术比较

Table 2 Comparison of High Speed Launch Technologies

Launch technology	Maximum speed/(km·s ⁻¹)	Energy source	Technical features (advantages and limitations)	Applicable scenarios
Gas-driven launch technology	10	high-pressure gas	Advantages: pneumatic drive, mature, stable, repeatable, wide range of projectile mass and geometry adjustability. Limitations: three-stage structure is complex; hydrogen is flammable and explosive; DDT mechanism is complex, with significant challenges in combustion stability control and hydrogen safety issues.	Space debris simulation, material impact testing, penetration experiments, scientific research and teaching, etc
Electromagnetic energy gathering and emission technology	7.45	electromagnetic energy	Advantages: electromagnetic propulsion, no gunpowder, high overload capacity, fast continuous firing potential, high theoretical velocity ceiling. Limitations: severe rail ablation and armature melting at high currents; barrel life only a few shots; pulsed power supply miniaturization remains a challenge.	Remote strike, shipborne weapons, high-frequency launch, high overload resistance testing
Chemical energy emission technology	12	chemical energy	Advantages: energy focused, achieves extreme ultra-high speeds (10–12 km/s) with gram-level fragments; compact device structure. Limitations: single-use only (destructive test); high blast overpressure; severe	Ultra high speed impact simulation, spacecraft protection testing, material limit response

			gaseous and particulate contamination.	research, one-time high-energy experiment
			Advantages: environmentally friendly (CO ₂ is non-toxic, non-flammable, and inexpensive); simple structure; low experimental cost; reusable; wide pressure regulation range; gas temperature below 300 °C; reduces barrel ablation. Limitations: CO ₂ molecular weight is large (44 g/mol), resulting in low sonic velocity, which fundamentally limits the theoretical velocity ceiling; phase-change process involves complex non-equilibrium kinetics, making precise pressure control and shot-to-shot velocity repeatability difficult to achieve.	Research on new launch principles, miniaturized platforms, low-cost experiments, and teaching verification
Liquid gas phase change emission technology	No data available	liquid gas phase transition energy		

本研究围绕高速冲击试验技术展开系统综述，全面梳理了气体驱动发射技术、化学能发射技术、电磁能聚能发射技术及液气相变发射的多种高应变率加载手段的技术原理、发展现状与适用场景，指出其在深埋加固目标毁伤评估、空间碎片防护及材料动态响应机制研究中的关键支撑作用，强调试验-模型耦合验证在提升数值预测精度；展望未来，高速冲击发射技术可以重点围绕以下几个方向开展深入研究：一是发展多源能量协同驱动技术，探索电磁预加速与相变续推、气体驱动技术与电磁末速等复合方案，实现能量梯级利用与性能互补；二是引入人工智能闭环优化控制，构建数据驱动模型，实现发射参数自适应优化；三是构建高保真实验-数值耦合验证体系，建立多靶体类型的高保真侵彻效应数据库；四是发展模块化、可重构发射平台，灵活适配多种能级载荷的多样化发射任务。通过上述攻关，有望推动高速冲击发射技术向更高速度、更大质量、更高重复性与更绿色环保的方向发展，为钻地武器效能评估、深埋防护工程设计及空间碎片防护提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] ANTOUN T, GLENN L, WALTON O, et al. Simulation of hypervelocity penetration in limestone [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1-12): 45–52.
- [2] 裴桂艳, 梁家豪, 刘睿, 等. WMoZrNiFe 活性材料破片冲击半油油箱结构响应与毁伤特性数值研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2026, 47(7): 10–22.

GUIYAN P, JIAHAO L, RUI L, et al. Numerical study on the structural response and damage characteristics of a half-filled fuel tank target to impact by WMoZrNiFe energetic structural material fragments [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2026, 47(7):

- 10–22.
- [3] 张钰忠, 郑昊, 赵丰鹏, 等. 基于 FE-SPH 自适应方法的长杆弹撞击陶瓷靶数值模拟分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2026, 47(7): 45–56.
- YUZHONG Z, HAO Z, FENG PENG Z, et al. Numerical simulation on impact response of long rods onto ceramic targets based on the FE-SPH adaptive method [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2026, 47(7): 45–56.
- [4] ROGERS J A, BASS N T, WIEST M L, et al. The pursuit of hypervelocities: A review of two-stage light gas gun aeroballistic ranges [J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 185: 104861.
- [5] 杨艺, 郭静. 美军电磁轨道炮发展综述 [J]. 国外坦克, 2015, (4): 35–8.
- YI Y, JING G. Overview of the Development of US Electromagnetic Rail Guns [J]. Foreign Tank, 2015, (4): 35–8.
- [6] 高著秀, 冯春华, 杨宣宗, 等. 微小碎片加速器同轴枪内等离子体轴向速度研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(14): 280–6.
- ZHUOXIU G, CHUNHUA F, XUANZONG Y, et al. Research on plasma axial velocity generated by small debris accelerator coaxial gun [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(14): 280–6.
- [7] 何宗颖, 解凤娟, 郭旻, 等. 高能量冲击条件下的加速度测试 [J]. 火炮发射与控制学报, 2011, (1): 85–8.
- ZONGYING H, FENGJUAN J, MIN G, et al. Acceleration Measurement Technology in High Energy Shock Environment Test [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2011, (1): 85–8.
- [8] 王金贵. 气体炮及其常规测试技术 (一) [J]. 爆炸与冲击, 1988, 8(1): 89–96.
- JINGUI W. GAS GUN AND ITS ORDINARY MEASURING TECHNIQUES (I) [J]. Explosion and Shock Waves, 1988, 8(1): 89–96.
- [9] 王金贵. 气体炮及其常规测试技术 (二) [J]. 爆炸与冲击, 1988, 8(2): 186–92.
- JINGUI W. GAS GUN AND ITS ORDINARY MEASURING TECHNIQUES (II) [J]. Explosion and Shock Waves, 1988, 8(2): 186–92.
- [10] SEIGEL A E. The theory of high speed guns [R], 1965.
- [11] SWIFT H F. Light-gas gun technology: a historical perspective [M]. High-pressure shock compression of solids VIII: the science and technology of high-velocity impact. Springer. 2005: 1–35.
- [12] 熊镐, 王惠源, 王海旭. 基于 fluent 的一级气体炮内弹道研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 77–81.
- HAO X, HUIYUAN W, HAIXU W. Research on Internal Ballistics of Single-Stage Gas Gun Based on Fluent [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 77–81.
- [13] SASOH A, OHBA S, TAKAYAMA K. Projectile acceleration in a single-stage gun at breech pressures below 50 MPa [J]. Shock Waves, 2000, 10(4): 235–40.
- [14] 彭小武, 马国鹭, 张浩, 等. 一级气体炮发射冲击响应测试分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2024, 45(01): 23–7.
- XIAOWU P, MAGUOLU, HAO Z, et al. Experimental Test and Analysis of the Launch Impact Response of a Single Stage Light Gas Gun [J]. Journal of Gun Launch & Control,

- 2024, 45(01): 23–7.
- [15] 苏红星, 赵俊利, 彭双志. 气体炮弹丸初速的影响因素分析 [J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(01): 105–8+13.
- HONGXING S, JUNLI Z, SHUANGZHI P. Analysis of the Influencing Factors of the Initial Velocity of GasGun Projectile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(01): 105–8+13.
- [16] QUICKGUN: an algorithm for estimating the performance of two-stage light gas guns [J]. 1990.
- MILORA S, COMBS S, GOUGE M, et al. 1990.
- [17] 董石, 孟川民, 肖元陆, 等. 反应气体驱动二级轻气炮技术的初步研究 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 182–6.
- SHI D, CHUAN-MIN M, YUAN-LU X, et al. Preliminary Study of Two-Stage Light Gas Gun Using Reactive Gas as Driving Energy [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(2): 182–6.
- [18] BOGDANOFF D W. Use of a Tantalum liner to reduce bore erosion and increase muzzle velocity in two-stage light gas guns; proceedings of the Meeting of Aeroballistics Range Association, F, 2015 [C].
- [19] CROZIER W, HUME W. High-velocity, light-gas gun [J]. Journal of Applied Physics, 1957, 28(8): 892–4.
- [20] PATIN R, COURTER R. A one-dimensional simulation model for a two stage light gas gun with deformable piston; proceedings of the 24th Aerospace Sciences Meeting, F, 1986 [C].
- [21] YIN L, QIAN B, LI H, et al. Influence of Piston Mass on Hydrogen Detonation Two-Stage Light Gas Guns [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2025.
- [22] 王东方, 肖伟科, 庞宝君. NASA 二级轻气炮设备简介 [J]. 实验流体力学, 2014, 28(04): 99–104.
- DONGFANG W, WEIKE X, BAOJUN P. A brief introduction on NASA's two stage light gas guns [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(04): 99–104.
- [23] WINFREE N, CHHABILDAS L, REINHART W, et al. EOS Data of Ti-6Al-4V to Impact Velocities of 10.4 km/s on a Three-Stage Gun; proceedings of the AIP Conference Proceedings, F, 2002 [C]. American Institute of Physics.
- [24] STEINBERG D. The electric gun: A new method for generating shock pressures in excess of 1 TPa; proceedings of the Molecular and Chemical Physics, Chemistry, Biological Effects, Geo and Planetary Sciences, New Resources, Dynamic Pressures, High Pressure Safety: Proceedings of the VIIth International AIRAPT Conference (Organised Jointly with the EHPRG), Le Creusot, France, July 30-August 3, 1979, F, 2017 [C]. Elsevier.
- [25] OSHER J E, BARNES G, CHAU H H, et al. Operating characteristics and modeling of the LLNL 100-kV electric gun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(3): 392–402.
- [26] PIEKUTOWSKI A, POORMON K. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute [J]. International journal of impact engineering, 2006, 33(1-12): 615–24.
- [27] MORITOH T, KAWAI N, NAKAMURA K G, et al. Three-stage light-gas gun with a preheating stage [J]. Review of scientific instruments, 2004, 75(2): 537–40.
- [28] 王青松, 王翔, 戴诚达, 等. 三级炮加载技术在超高压状态方程研究中的应用 [J]. 高压

物理学报, 2010, 24(3): 187–91.

QINGSONG W, XIANG W, CHENGDA D, et al. Research on EOS at Extremely High Pressure Using a Three-stage Gas Gun Hypervelocity Launcher Techniques [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(3): 187–91.

[29] 王青松, 王翔, 郝龙, 等. 三级炮超高速发射技术研究进展 [J]. 高压物理学报, 2014, 28(3): 339–45.

QINGSONG W, XIANG W, LONG H, et al. Progress on Hypervelocity Launcher Techniques Using a Three-Stage Gun [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(3): 339–45.

[30] 柏劲松, 谭华, 李平, 等. 阻抗梯度飞片加载下的超高速发射二维数值模拟方法 [J]. 计算物理, 2004, 21(4): 305–10.

JINSONG B, HUA T, PING L, et al. Numerical Simulation Method for 2-D Hypervelocity Launcher Under the Graded Density Impactor Drives [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2004, 21(4): 305–10.

[31] 沈强, 张联盟, 王传彬, 等. 梯度飞片材料的波阻抗分布设计与优化 [J]. 物理学报, 2003, 52(7): 1663–7.

QIANG S, ALLIANCE Z, CHUANBIN W, et al. Design and optimization of wave impedance distribution for flyer materials [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(7): 1663–7.

[32] 王翔, 王青松, 彭建祥. 三级炮超高速发射技术在空间碎片防护研究中的初步应用 [J]. 高能密度物理, 2017, 4: 115–22.

XIANG W, QINGSONG W, JIANXIANG P. Progress on Hypervelocity Launcher Techniques Using a Three-Stage Gun [J]. CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS, 2017, 4: 115–22.

[33] 罗斌强, 张旭平, 郝龙, 等. 7 km/s 以上超高速发射技术研究进展 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(2): 021401–1–11.

BINQIANG L, XUPING Z, LONG H, et al. Advances on the techniques of ultrahigh-velocity launch above 7 km/s [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(2): 021401–1–11.

[34] PIEKUTOWSKI A J, POORMON K L. Meeting the challenges of hypervelocity impact testing at 10 km/s [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 180: 104665.

[35] CHHABILDAS L, BARKER L M, ASAY J. Sandia's hypervelocity launcher—HVL: SAND91-0657 [R]: Sandia National Laboratories, 1991.

[36] 黄洁, 梁世昌, 李海燕, 等. 二级轻气炮发射过程内弹道数值计算研究 [J]. 空气动力学学报, 2021, 31(5): 657–61.

JIE H, SHICHANG L, HAIYAN L, et al. Numerical research on interior ballistics of the launch process of two-stage light gas gun [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 31(5): 657–61.

[37] Shell-Stripping Mechanism of Red Sandstone Under Hypervelocity Impact with Aluminum Spheres [J]. Aerospace, 2025, 12(6): 534.

LIU Y, JIANG Q, LIU Z, et al. 2025, 12(6): 534.

[38] 尚甲豪, 邢好运, 汪球, 等. 气相爆轰驱动二级轻气炮内弹道数值模拟 [J]. 力学学报, 2022, 54(3): 810–21.

SHANG JIAHAO, XING XINGYUN, WANG QIU, et al. NUMERICAL RESEARCH ON

- INTERIOR BALLISTICS OF THE TWO-STAGE LIGHTGAS GUN DRIVEN BY GASEOUS DETONATION [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(3): 810–21.
- [39] KRUCZYNSKI D, MASSEY D, MILLIGAN R, et al. Combustion light gas gun technology demonstration [J]. 2007.
- [40] ZHOU F, LIU N, ZHANG X. Numerical study of hydrogen–oxygen flame acceleration and deflagration to detonation transition in combustion light gas gun [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(10): 5405–14.
- [41] LIU N, DENG F, ZHOU F, et al. Modeling of combustion and propulsion processes of a new concept gun using a gaseous propellant [J]. Journal of theoretical and applied mechanics, 2015, 53(3): 531–41.
- [42] 胡天翔, 张庆明, 薛一江, 等. 初始条件对氢氧爆轰气体炮内弹道性能的影响规律 [J]. 高压物理学报, 2021.
- TIANXIANG H, QINGMING Z, YIJIANG X, et al. Influence of Initial Conditions on the Interior Ballistic Performance of Hydrogen-Oxygen Detonation Gas Gun [J]. CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS, 2021.
- [43] MCNAB I, BEACH F. Naval railguns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 463–8.
- [44] HSIEH K, KIM B. One kind of scaling relations on electromechanical systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 33(1): 240–4.
- [45] KONDRASHOV D, KEEFER D. A Maxwell's equation solver for 3-D MHD calculations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 33(1): 254–9.
- [46] 沈金华, 贾浩. 电磁轨道炮及其应用 [J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(2): 90–6.
- JINHUA S, HAO J. ELECTROMAGNETIC RAILGUN AND ITS APPLICATIONS [J]. Explosion and Shock Waves, 1984, 4(2): 90–6.
- [47] 李军, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状 [J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1052–64.
- JUN L, PING Y, WEIQUN Y. Electromagnetic Gun Technology and Its Development [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052–64.
- [48] 周媛, 李敏堂, 王菁华. 美国电磁轨道发射技术现状及特点分析 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(9): 1–4.
- YUAN Z, MINTANG L, JINGHUA W. Analysis on Present State and Characteristics of the U.S. Electromagnetic Rail Launch Technology [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(9): 1–4.
- [49] FAIR H D. The science and technology of electric launch [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 25–32.
- [50] Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(6): 480–5.
- LEMKE R W, KNUDSON M D, DAVIS J-P. 2011, 38(6): 480–5.
- [51] Shockless magnetic acceleration of al flyer plates to ultra-high velocity using multi-megabar drive pressures [J]. Proposed for presentation at the The 14th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter held July 31-August 5, 2005 in Baltimore, MD, 2005, (SAND2005-4683C): 16 p. of viewgraphs.

- COCHRANE K R, KNUDSON M D, SLUTZ S A, et al. United States [J]. Sandia National Laboratories, 2005, (SAND2005-4683C): 16 p. of viewgraphs.
- [52] ZHANG X, WANG G, ZHAO J, et al. High velocity flyer plates launched by magnetic pressure on pulsed power generator CQ-4 and applied in shock Hugoniot experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(5).
- [53] WANG G, SUN C, TAN F, et al. The compact capacitor bank CQ-1.5 employed in magnetically driven isentropic compression and high velocity flyer plate experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(5).
- [54] WANG G, LUO B, ZHANG X, et al. A 4 MA, 500 ns pulsed power generator CQ-4 for characterization of material behaviors under ramp wave loading [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(1).
- [55] 张旭平, 赵剑衡, 谭福利, 等. 一种耦合电路分析的磁驱动飞片数值计算方法 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(3): 257–63.
- XUPING Z, JIANHENG Z, FULI T, et al. A method for magnetically driven flyer simulation coupled with electrical circuit of generator [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 257–63.
- [56] 张旭平, 赵剑衡, 谭福利, 等. 磁驱动飞片的三维数值模拟及分析 [J]. 高压物理学报, 2014, 28(4): 483–8.
- XUPING Z, JIANHENG Z, FULI T, et al. Three-Dimensional Numerical Simulation and Analysis of Magnetically Driven Flyer Plates [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(4): 483–8.
- [57] 乔志明, 雷彬, 吕庆敖, et al. 电磁轨道炮关键技术与发展趋势分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(2): 91–5.
- [58] 金红光, 王宝群. 化学能梯级利用机理探讨 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 181–4.
- HONGGUANG J, BAOQUN W. PRINCIPLE OF CASCADING UTILIZATION OF CHEMICAL ENERGY [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 181–4.
- [59] KATAYAMA M, TAKEBA A, TODA S, et al. Analysis of jet formation and penetration by conical shaped charge with the inhibitor [J]. International journal of impact engineering, 1999, 23(1): 443–54.
- [60] 张伟, 管公顺, 庞宝君, 等. 超高速撞击加速技术及其应用研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(10): 1324–6.
- WEI Z, GONGSHUN G, BAOJUN P, et al. Research on hypervelocity impact acceleration technology and applications [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(10): 1324–6.
- [61] 赵峰. 炸药强爆轰驱动高速金属飞片的实验和理论研究 [J]. 中国工程物理研究院, 2005.
- FENG Z. Experimental and Theoretical Study on High Speed Metal Flyer Driven by Explosive Strong Detonation [J]. China Academy of Engineering Physics, 2005.
- [62] 李志龙, 徐全军, 姜楠, 等. 实验室聚能高速碎片生成装置设计与研究 [J]. 爆破器材, 2012, 41(5): 5–8.
- ZHILONG L, QUANJUN X, NAN J, et al. Design and Research of Laboratory Hypervelocity Debris Launcher Based on Shaped Charge [J]. Explosive Materials, 2012, 41(5): 5–8.
- [63] 徐全军, 白帆, 伍睿星. 占据式聚能装药射流形成的数值模拟及试验研究 [J]. 爆破器材,

- 2011, 40(3): 11–3.
- [64] LOISEAU J, HUNEAULT J, SERGE M, et al. Phase velocity enhancement of linear explosive shock tubes; proceedings of the AIP Conference Proceedings, F, 2012 [C]. American Institute of Physics.
- [65] 王马法, J H A, 焦德志, 等. 内爆驱动式超高速发射技术的初步研究 [J]. 高压物理学报, 2020, 34(3): 58–65.
- FA W M, J H A, DEZHI J, et al. Hypervelocity Launching Technology Preliminary Simulation and Experimental Study on Implosion-Driven [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3): 58–65.
- [66] 邢柏阳, 刘荣忠, 郭锐, 等. 强爆轰驱动超高速碎片发射装置设计因素分析 [J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(04): 151–8.
- BAIYANG X, RONGZHONG L, RUI G, et al. Analysis on design factors of hypervelocity fragment launcher using strong detonation drive [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(04): 151–8.
- [67] CARLEONE J. Tactical missile warheads [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1993.
- [68] GURNEY R W. The initial velocities of fragments from bombs, shell and grenades [J]. 1943.
- [69] LI C, WEN J, WANG S, et al. Thermodynamic analysis on Rapid pressurization of supercritical CO₂ for pneumatic launch performance [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2021, 53: 101710.
- [70] 王志富, 姚术健, 鲁寨军, 等. 四氟乙烷弹射无人机试验及仿真 [J]. 航空学报, 2024, 45(21): 181–93.
- ZHIFU W, SHUJIAN Y, ARMY L, et al. Experimental and simulation of tetrafluoroethane catapult UAV [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(21): 181–93.
- [71] 尹红果, 全海燕, 李亚军. 超临界流体萃取技术在中药提取物制备中的应用 [J]. 科技创新与生产力, 2024, 45(07): 123–6.
- HONGGUO Y, HAIYAN Q, YAJUN L. Application of Supercritical Fluid Extraction Technology in the Preparation of Traditional Chinese Medicine Extracts [J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2024, 45(07): 123–6.
- [72] 丁天聪, 杨帅, 孙冲, 等. 超临界 CO₂ 和 H₂S 环境中 N80 钢腐蚀形态及腐蚀膜演化机制 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(06): 224–33.
- TIANCONG D, SHUAI Y, CHONG S, et al. Evolution mechanism of corrosion morphology and corrosion film on N80 steel in supercritical CO₂ and H₂S environment [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2025, 49(06): 224–33.
- [73] 李强, 张盛森, 陈延伟, 等. 超临界二氧化碳压差控制阀式气体炮设计与实验研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2025, 46(03): 1–9.
- QIANG L, SHENGSEN Z, YANWEI C, et al. Design and Experimental Study of Supercritical Carbon Dioxide Differential Pressure Control Valve Type Gas Gun [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2025, 46(03): 1–9.
- [74] ZHANG Q, QIN B, JIN C, et al. Experimental research on self-pressurization and thermal stratification of high-pressure carbon dioxide with different storage densities under external heat leakage [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2026: 104712.

- [75] WANG J, LU Z, WU S, et al. Research on non-equilibrium characteristics and relaxation time parameter optimization in high-pressure CO₂ pipeline depressurization [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 169: 109527.
- [76] XIAO C, LU Z, YAN L, et al. Effects of flow velocity on transient behaviour of liquid CO₂ decompression during pipeline transportation [J]. *Processes*, 2021, 9(2): 192.
- [77] XIAO C, LU Z, YAN L, et al. Transient behaviour of liquid CO₂ decompression: CFD modelling and effects of initial state parameters [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 101: 103154.
- [78] 鲁寨军, 严利果, 肖程欢, 等. 高压 CO₂ 管道泄漏的瞬态行为数值研究 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(2): 758–63.
- ARMY L, LIGUO Y, CHENGHUAN X, et al. Numerical study on the transient behavior of high-pressure CO₂ pipeline leakage [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(2): 758–63.
- [79] ZHANG Z, LU Z, YAN L, et al. Experiment and numerical investigation on flow characteristics and near-field structure of dense phase CO₂ pipeline leakage [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 182: 327–44.
- [80] WANG J, XIAO C, WU S, et al. Numerical study of the transient behaviors of vapour-liquid equilibrium state CO₂ decompression [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121861.
- [81] YAO S, SU J, MA Y, et al. Experimental and numerical study on high-pressure CO₂ assisted high-speed launch of large mass projectiles [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2026, 73: 104693.
- [82] 王甲强, 鲁寨军, 刘东润, 等. 轨道车辆碰撞试验台 CO₂ 相变驱动过程仿真研究 [J]. *中国铁道科学*, 2023, 44(06): 113–24.
- JIAQIANG W, ARMY L, DONGRUN L, et al. Simulation Study on Driving Process Powered by CO₂ Phase Transition of Rail Vehicle Collision Testbed [J]. *China Railway Science*, 2023, 44(06): 113–24.
- [83] YAO H-X, WEI X-Z, YE H. Supercritical carbon dioxide as a new working medium for pneumatic launch: A theoretical study [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 1296–306.
- [84] GAO Y, LONG G, ZHANG D, et al. Penetration Resistance and Mechanisms of Micro-Steel-Fiber-Reinforced Ultra-High-Strength Concrete under Medium to High-Velocity Impact [J].
- [85] 姚术健, 周惠, 刘凯, 等. 一种液气相变发射装置、超高速侵彻试验装置及其测试方法 [J]. 21.
- SHUJIAN Y, HUI Z, KAI L, et al. A liquid gas phase change launch device, ultra high speed penetration test device, and their testing method [J]. 21.
- [86] 朱磊, 陆欣. 固体发射药火炮身管热散失模拟研究 [J]. *弹道学报*, 2020, 32(3): 19–24.
- LEI Z, XIN L. Simulation Study on Heat Dissipation of Barrel of Solid-propellant Gun [J]. *Journal of Ballistics*, 2020, 32(3): 19–24.

Research Progress on Launch Technology for High-Speed Impact Testing Requirements

GAO Lihua¹, GAO Yuqi^{2,3}, LIU Jinge⁴, LIU Yan¹, ZHANG Duo⁵, YAO Shujian^{2,3}

(1. NORINCO Group Jiangshan Heavy Industries Research Institute Co., Ltd., Xiangyang 441057, Hubei, China;

2. Frontiers Science Center for Extreme Flows and Energies, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;

3. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;

4. No. 63863 Unit of PLA, Baicheng 137000, Jilin, China)

5. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: With the increasing demand for deep buried reinforcement target damage and engineering structure protection in the fields of national defense security and high-end equipment development, efficient driving launch technology for high-speed impact testing has become the core key to supporting research in related fields. This article systematically reviews the research progress of high-speed impact testing technology, focusing on the principles, development status, experimental capabilities, and technical bottlenecks of various high-speed driving technologies such as gas-driven launch, chemical energy launch, and electromagnetic energy gathering launch. It discusses in detail the application prospects and existing problems of various launch technologies in the fields of deep buried reinforcement target damage assessment, space debris protection, and material dynamic behavior research. On this basis, the emerging liquid gas phase change emission technology was highlighted, and the speed potential, energy sources, and technical characteristics of different emission technologies were compared. The four-dimensional contradiction of speed quality repeatability environmental protection faced in current development was pointed out. Future research should focus on multi-source energy collaborative driving, artificial intelligence closed-loop optimization control, application of new working fluids and structural materials, and construction of high fidelity experimental numerical coupling verification system to promote the development of ultra high speed launch technology towards higher speed, higher repeatability, and wider application range.

Keywords: high-speed impact testing technology; light gas gun; chemical energy launch; electromagnetic energy focused launch; liquid-gas phase transition