

强动载下加载压力与间隙尺寸对间隙射流形成的影响*

康怀浦¹, 邓秋阳¹, 任国武¹, 孙占峰¹, 陈永涛¹, 汤铁钢¹

(1.中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 加工与装配的公差导致间隙在工程结构中广泛存在, 强动载下间隙内可能产生威胁结构可靠性与安全性的间隙射流, 而间隙射流的形成机制与传统高速金属射流不同, 其形成过程尚需进行系统的研究。基于二级轻气炮对带有间隙的金属钨样品进行超高速冲击加载实验, 通过高速分幅照相系统记录了间隙射流的形成及演化过程。采用 ANSYS Autodyn 软件建立了预测间隙射流形成的数值模型, 并基于代表性实验获取的射流形态及头部速度历史验证了该数值模型的适用性。通过调整数值模型中的飞片速度、间隙宽度和间隙半角, 分别研究了这三者对间隙射流形成的影响, 分析了定常射流模型的局限性。在此基础上, 结合数值模拟结果, 提出了预测间隙射流头部速度与质量的经验模型。研究表明, 基于欧拉方法建立的数值模型能够较为准确地预测强动载下间隙射流的形成。加载压力是控制射流头部速度与质量的主要因素, 随着加载压力的增加, 射流头部速度与质量也相应增加。间隙宽度与间隙半角对射流头部速度的影响较小, 但其质量随间隙宽度与间隙半角的增加呈线性增长。由于间隙闭合速度的估算存在较大误差, 定常射流模型未能准确预测间隙射流的形成, 而所提出的经验模型与数值模拟结果具有较好的吻合度。

关键词: 超高速碰撞; 高速射流; 数值模拟; 加载压力; 间隙尺寸

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Effects of loading pressure and gap size on the formation of gap jet under strong dynamic loading

KANG Huaipu¹, DENG Qiuyang¹, REN Guowu¹, SUN Zhanfeng¹, CHEN Yongtao¹, TANG Tiegang¹

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Tolerances in machining and assembly often result in gaps in engineering structures. Under strong dynamic loading, gap jets may form within these gaps, posing a threat to the reliability and safety of the structure. However, the formation mechanism of gap jets differs from that of traditional high-speed metal jets, and its formation process still requires systematic research. Based on a two-stage light gas gun, hypervelocity impact loading experiments were conducted on tungsten samples with gaps. The formation and evolution of the gap jet were recorded using a high-speed framing camera. A numerical model for predicting the formation of gap jets was established using ANSYS Autodyn. The applicability of the numerical simulation method was validated by comparing the numerical results with the jet morphology and head velocity history data obtained from a representative experiment. By adjusting the flyer velocity, gap width, and gap half-angle in the numerical model, the effects of

*收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2025-01-12;

基金项目: 国家自然科学基金 (12372369, 11872346, 11932018); 中国工程物理研究院院长基金 (YZJJZL2024002)

第一作者: 康怀浦 (1994—), 男, 博士, 助理研究员. E-mail: huaipu_kang@163.com;

通信作者: 任国武 (1981—), 男, 博士, 高级工程师. E-mail: gwrenifp@163.com。

these three factors on the formation of the gap jet were studied. The variations in the gap jet head velocity and mass with respect to these factors were obtained, and the limitations of the steady-state jet model were analyzed. Based on the findings from numerical simulations, an empirical model was developed to predict the jet head velocity and mass. The results show that the numerical model based on the Eulerian method can accurately predict the formation of the gap jet under strong dynamic loading. Loading pressure is the main factor controlling the jet head velocity and mass; as the loading pressure increases, both the jet head velocity and mass increase accordingly. The gap width and half-angle have little effect on the jet head velocity, but the mass increases linearly with the gap width and half-angle. Due to significant errors in estimating the gap closing velocity, the steady jet model fails to accurately predict the formation of the gap jet. In contrast, the developed empirical model shows good agreement with the numerical results.

Keywords: hypervelocity collision; high-speed jet; numerical simulation; loading pressure; gap size

在国防与军事应用领域，强动载下产生的高速金属射流一直是研究的重点。当前的研究主要聚焦于两类高速金属射流：一是由金属表面微缺陷引发的微射流^[1-4]，二是由聚能装药结构中药形罩压垮形成的聚能射流^[5-9]。此外，因实际工程结构中存在着加工、装配等引入的公差，间隙在工程结构中广泛存在。强动载作用下，这些间隙可能产生威胁结构可靠性和安全性的间隙射流。例如，在惯性约束聚变实验中，间隙射流可能损坏邻近的测试诊断设备^[10, 11]。从基础研究角度来看，间隙射流的形成涉及金属间隙闭合过程中冲击波与反射稀疏波的相互作用，这是一个复杂的物理过程。在军事工程应用中，间隙射流的形成不仅威胁到武器装备的可靠性，还可能破坏诊断设备，导致测试信号丢失。虽然间隙射流的形成问题在冲击动力学和武器物理领域具有强烈的研究需求，但目前相关研究仍然较为有限^[12, 13]，因此开展间隙射流形成过程的基础研究具有重要意义。

在强动载下，金属缺口、裂纹和沟槽等缺陷会产生高速微射流^[14-17]，这一现象可以通过里克特迈耶-梅什科夫（Richtmyer-Meshkov, RM）不稳定性理论^[18, 19]来解释。Rességuier 等^[20]与 Zellner 等^[21]的实验研究表明，加载压力、间隙形状及尺寸是影响微射流速度与质量的关键因素。金属间隙射流与金属表面微射流是不同的物理现象，因此有必要研究加载压力和间隙尺寸对间隙射流形成的影响。童慧峰等^[13]通过 X 光照相技术获取的定量诊断数据发现，间隙射流的质量随着加载压力和间隙宽度的增大而增加。然而，这项研究仅在较窄的加载压力范围（19.1 GPa~35.0 GPa）和较小的间隙宽度（0.02 mm~0.10 mm）条件下进行，无法反映较大加载压力和间隙尺寸范围内间隙射流的形成及演化规律。Liu 等^[12]近期对间隙闭合过程中激波相互作用进行了细致的理论分析，并基于定常射流形成假设建立了预测间隙射流速度与质量的理论模型，但该研究仅与童慧峰等^[13]获得的小尺寸间隙射流实验数据进行了对比，相关研究仍有较大提升空间。这些研究结果表明，加载压力和间隙尺寸可能是影响强动载下间隙射流形成的关键因素，但由于间隙射流形成过程的复杂性及实验诊断技术的局限性，目前相关研究仍处于初步阶段。此外，现有的研究大多关注强动载下金属浅表缺陷所形成的微射流，极少有研究关注由加工和装配引入的结构间隙中可能产生的高速间隙射流，亟待系统性研究揭示加载压力与间隙尺寸等因素对间隙射流形成的影响。

综上所述，由于间隙射流的形成机制与广泛关注的金属表面微射流不同，且现有研究成果存在一定局限，进一步细致研究间隙射流的形成机制具有重要意义。同时，强动载下金属部件间的间隙射流威胁可能远大于低强度、低熔点金属表面产生的微射流，因此亟需开展相关研究，深入厘清加载压力与间隙尺寸对间隙射流形成的影响。本文选取高强度、高熔点金属钨作为研究对象，基于二级轻气炮平台设计间隙射流的形态考察实验并开展代表性实验研究。在验证模拟方法适用性后，进一步进行系统的数值模拟研究，探讨加载压力与间隙尺寸对间隙射流形成的影响。

1 实验与数值模拟方法

1.1 实验装置及诊断技术

本文的间隙射流形态考察实验基于二级轻气炮平台开展，实验加载与诊断系统的组成如图 1 所示。实验装置通过铝盖将其固定在密封舱的靶架上（真空度不超过 200 Pa）。厚度为 2 mm 的钨飞片位于弹托前方，飞片的速度通过磁测速系统获取。测试系统的触发信号由撞击面处的铜箔电探针提供，用于精确控制照相系统的曝光时刻。如图 2 所示，二级轻气炮驱动弹托及钨飞片至设定速度后，冲击由 2 mm 厚钨靶板与 10 mm 厚带间隙钨主体板（主体板由两个削去设定宽度区域的半圆柱组成）组成的组合靶，该组合靶间隙内形成高速间隙射流。高速间隙射流的形成及演化过程由高速分幅照相系统记录，该系统主要包括激光照明光源和分幅相机系统。通过实验获得的间隙射流动态演化过程可用于校验数值模拟的准确性。本文的间隙射流形态考察实验仅在飞片速度为 3.0 km/s、间隙长度为 10 mm、间隙宽度为 0.2 mm 的条件下开展。

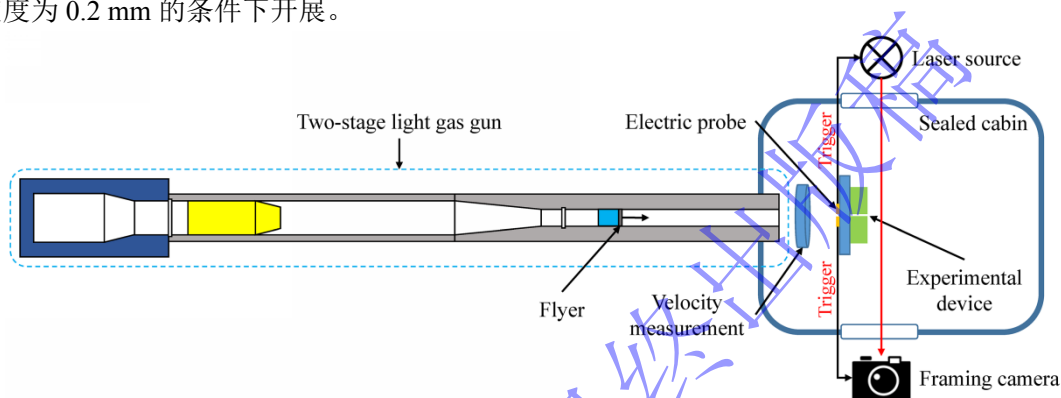


图 1 实验加载系统及诊断布局示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental loading system and diagnostic layout

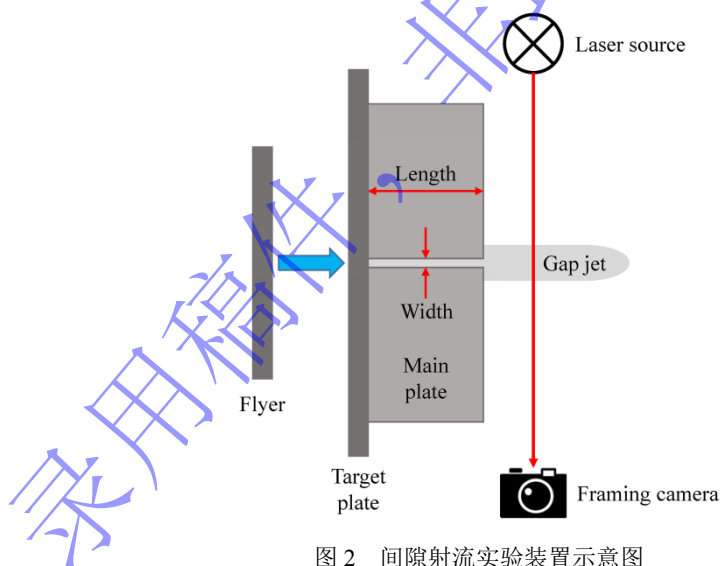


图 2 间隙射流实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of gap jet experimental device

1.2 计算方法及模型

强动载下间隙射流的形成过程涉及材料的大变形，而传统的拉格朗日方法在处理网格畸变严重的工况时存在局限性，因此本文基于欧拉方法建立了数值模型，用于预测间隙射流的形成及演化过程。欧拉方法是一种流体动力学计算方法，结合欧拉单元与体积分数法，使其能够有效描述强动载下金属材料的变形^[22, 23]。

金属间隙在强动载作用下的闭合过程伴随高速射流的产生，这一过程与密实聚能射流的形成过程相似，但与强动载下金属表面微缺陷产生的低密度微射流有本质区别。因此，本研究采用适用于描述

高压、高应变率状态下射流形成过程的斯坦伯格-圭南 (Steinberg-Guinan, SG) 本构模型与 Mie-Grüneisen 状态方程^[7]。其中, SG 本构模型中的剪切模量与屈服强度定义如下:

$$G = G_0 \left[1 + \left(\frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right] \quad (1)$$

$$Y = Y_0 (1 + \beta \varepsilon_p)^n \left[1 + \left(\frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{Y'_T}{Y_0} \right) (T - 300) \right] \quad (2)$$

式中: η 为压缩比, β 与 n 均为加工硬化参数, ε_p 为等效塑性应变, T 为温度, p 为压力, G'_p 和 G'_T 分别表示 G 对压力 p 与温度 T 的一阶导数, Y'_p 为 Y 对压力 p 的一阶导数, G_0 和 Y_0 分别为零压 300 K 温度状态下的剪切模量和屈服强度, 屈服强度应满足 $Y_0(1 + \beta \varepsilon_p)^n \leq Y_{\max}$, 其中 Y_{\max} 为最大屈服强度。

Mie-Grüneisen 状态方程定义如下:

$$p = p_H + \gamma \rho (E - E_H) \quad (3)$$

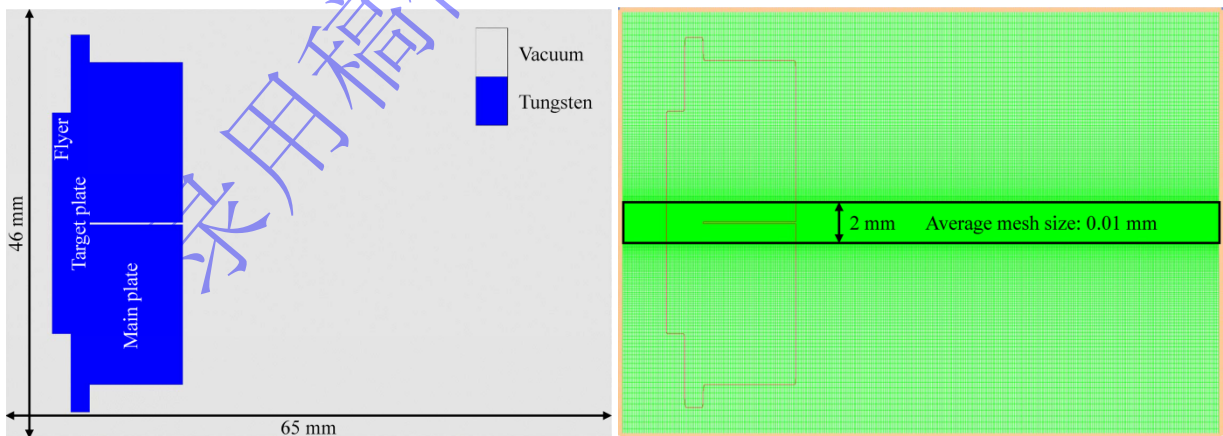
式中: γ 为 Grüneisen 常数, ρ 为密度, E 为内能, p_H 和 E_H 分别为 Hugoniot 压力和 Hugoniot 能量, 分别由式(4)与式(5)计算。

$$p_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (S_1 - 1)\mu]^2} \quad (4)$$

$$E_H = \frac{p_H}{2\rho_0} \left(\frac{\mu}{\mu + 1} \right) \quad (5)$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ_0 为初始密度, C_0 为初始波速, S_1 为材料参数。

本研究采用 ANSYS Autodyn 软件模拟间隙射流的形成, 建立的计算模型与网格划分如图 3 所示。模型采用梯度网格划分, 间隙及其邻近区域的网格进行了局部加密, 加密区域网格尺寸为 0.01 mm, 边界处设置了 flow-out 边界条件。计算中通过追踪流体的体积分数来捕捉射流的界面位置。在模型中, 飞片、靶板与主体板的半径分别为 12 mm、20 mm 与 17.5 mm, 材料均为钨, 飞片与靶板的厚度均为 2 mm, 主体板的厚度为 10 mm。研究中通过变化飞片速度、间隙宽度与间隙半角, 分析这三者对间隙射流形成的影响。钨的 SG 本构模型参数与 Mie-Grüneisen 状态方程的参数分别列于表 1 和表 2。



(a) Schematic diagram of the numerical model

(b) Mesh generated in the numerical model

图 3 间隙射流形成的计算模型

Fig.3 Numerical model of gap jet formation

表 1 钨的 SG 本构模型参数^[7]

Table 1 The material parameters in SG constitutive relation for tungsten^[7]

G_0 /GPa	Y_0 /GPa	Y_{max} /GPa	β	n	G'_p	G'_T /($\text{MPa}\cdot\text{K}^{-1}$)	Y'_p	T_{melt} /K
160	2.2	4.0	7.7	0.13	1.501	-22.08	0.0206	4520

注: T_{melt} 为熔化温度。

表 2 钨的 Mie-Grüneisen 状态方程参数^[7]

Table 2 The material parameters in Mie-Grüneisen equation of state for tungsten^[7]

ρ_0 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	C_0 /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	S_1	γ
19.30	4.03	1.237	1.67

2 结果与分析

2.1 实验与仿真结果的对比

二级轻气炮平台加载获得的代表性间隙射流形态考察实验（飞片速度：3 km/s，间隙宽度：0.2 mm）图像如图 4 所示。实验中，飞片撞击靶板的时刻为零时，高速分幅照相的拍摄时间间隔为 0.55 μs 。由于射流头部前沿在图像中呈现强间断，在灰度图像模式下，每幅图像中射流前沿灰度值突变的像素点即为射流头部的位置。因此，相邻图像间射流头部的移动距离可通过射流前沿像素坐标的相对变化量与像素和实际距离的对应关系来近似估算，从而得到射流头部的平均速度。在冲击波到达间隙底部后，间隙的动态闭合过程伴随着高速间隙射流的形成。通过前两幅图像估算，射流在间隙内的头部速度约为 10.74 km/s，而 1.85 μs 时，射流刚刚从自由面射出，其头部速度为 10.54 km/s，此时主体板中的冲击波尚未到达自由面。在 2.40 μs 时，冲击波已到达主体板自由面，柱状间隙射流的头部开始形成，随后发展成具有球形发散轮廓的低密度喷射物质。在 2.95 μs ~4.60 μs 的四幅图像中，均可见本研究关注的柱状间隙射流主体。此处的柱状与球形射流均为投影图像。由于柱状间隙射流的密度远大于球形发散的密度喷射物质，因此在激光照明下拍摄的可见光照相图像中，柱状射流呈现为黑色阴影。球形膨胀的低密度喷射物质推测为二级轻气炮前冲气体与靶室内杂质的混合物。在后续三幅图像中，主体板自由面两侧产生的喷射物质属于主体板与靶架之间产生的边侧射流，边侧射流发生较晚，且位于间隙射流形成区域之外。

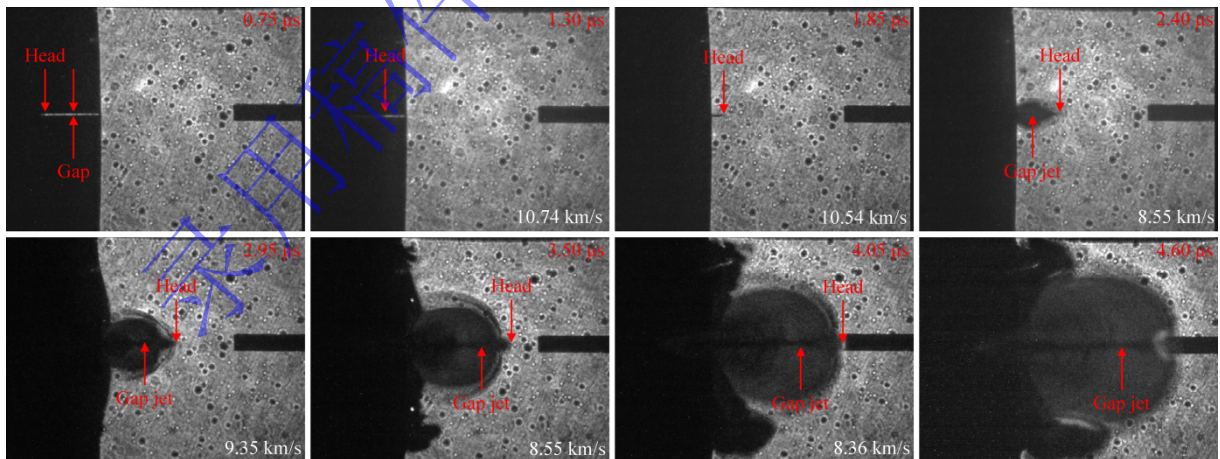


图 4 间隙射流形成的实验图像（飞片速度：3 km/s，间隙宽度：0.2 mm）

Fig.4 Experimental images of gap jet formation (flyer velocity: 3 km/s, gap width: 0.2 mm)

对图 4 中间隙射流的形成过程进行了数值模拟研究，模拟结果展示了飞片冲击靶板后不同时刻的速度梯度分布，如图 5 所示。速度云图的标尺统一设置为 0 km/s~10 km/s，每幅图像的右下角给出了

仿真结果中射流头部的速度。云图中，沿冲击方向移动的浅蓝色速度带反映了主体板内粒子速度的变化，同时也显示了冲击波在主体板中的传播过程。模拟结果表明，间隙射流的速度明显大于冲击波的速度，在 $1.85 \mu\text{s}$ 时，冲击波尚未到达主体板自由面，但间隙射流的头部已经脱离自由面。在 $0.75 \mu\text{s} \sim 1.85 \mu\text{s}$ 的三幅模拟图像中，计算得到的间隙射流形态与实验中获得的图像非常相似。在后五幅模拟图像中，柱状间隙射流与可见光照相图像中的黑色阴影吻合较好。由于图 4 中得到的射流头部速度是相邻图像之间的平均速度，可能存在一定误差，因此采用多项式对射流头部位移的变化趋势进行了拟合，结果如图 6(a)所示。随后，对拟合曲线进行微分得到了实验中射流头部速度随时间的变化趋势，图 6(b)展示了仿真与实验中射流头部速度的对比。图中时间跨度涵盖了射流在间隙内以及射流出间隙后的全过程。结果表明，仿真模型能够较好地预测间隙射流形成过程中的速度特征。结合实验和模拟结果，可以得出结论：间隙射流在形成的初期阶段会不断加速，直到达到最大速度；随后，射流头部的速度呈整体下降趋势。实验中，高速射流与稀薄气体的相互作用导致其头部速度逐渐下降。图 7 展示了在 $2.95 \mu\text{s}$ 时刻间隙射流沿间隙方向的速度梯度分布，结果表明，间隙射流头部顶端的速度略低于紧随其后的射流速度，这会导致射流在头部区域堆积，从而使得射流的头部速度随着时间的增加而缓慢下降。总的来说，该间隙射流形成的模拟预测方法得到了验证，表明其能够有效预测间隙射流的形成过程，并且可用于研究不同加载压力与间隙尺寸对间隙射流形成的影响。

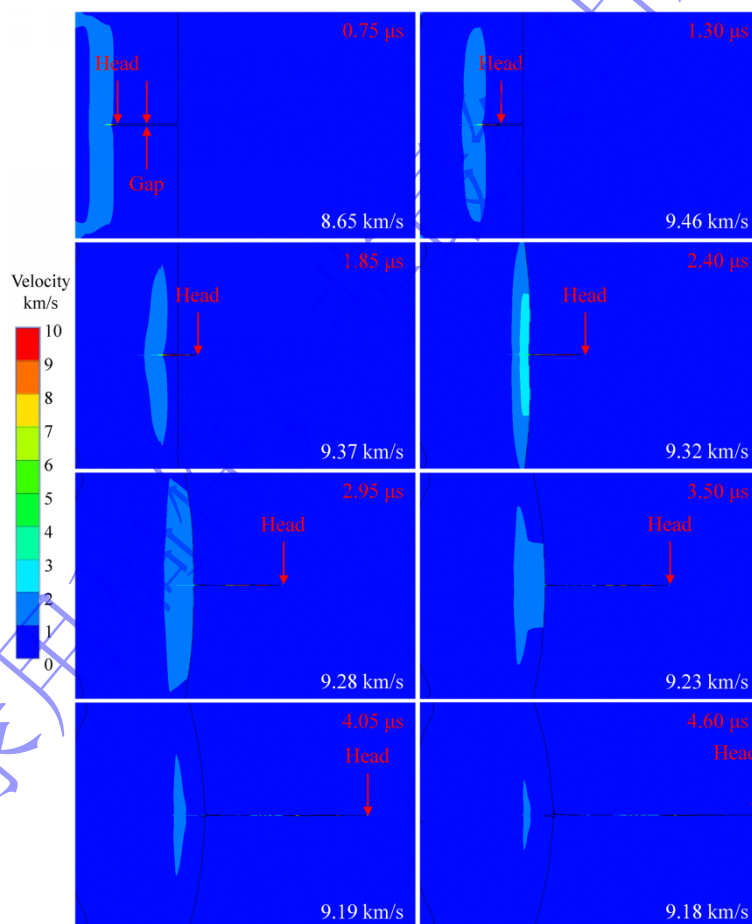


图 5 间隙射流形成的模拟结果（飞片速度：3 km/s，间隙宽度：0.2 mm）
Fig.5 Numerical results of gap jet formation (flyer velocity: 3 km/s, gap width: 0.2 mm)

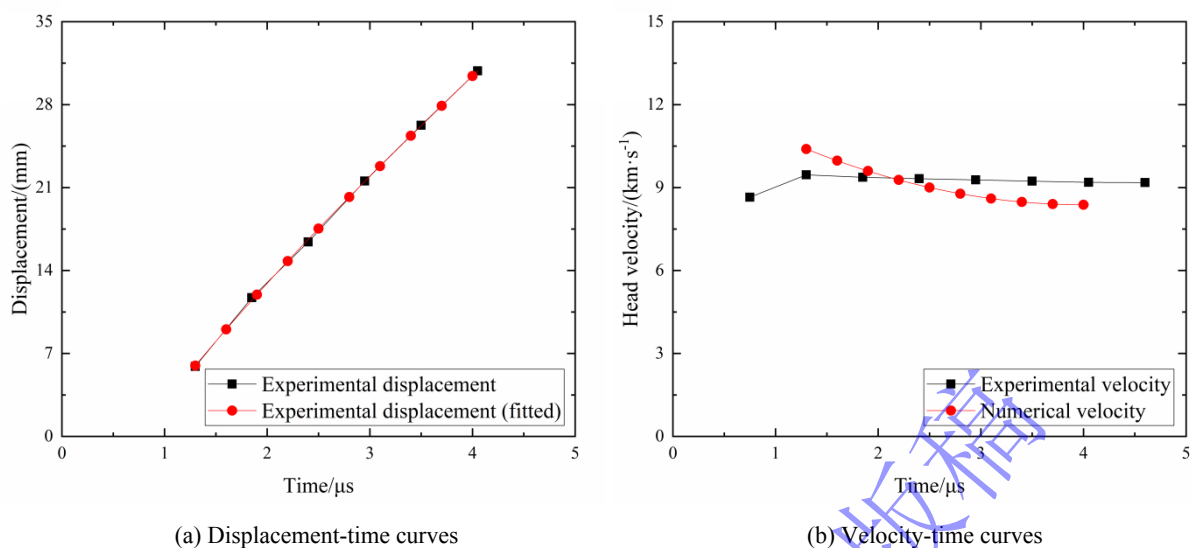


图6 实验中位移-时间历程的拟合与实验及仿中间隙射流头部速度的对比 (飞片速度: 3 km/s, 间隙宽度: 0.2 mm)

Fig.6 Fitting of displacement-time history in experiments and comparison of gap jet head velocity between experiment and simulation (flyer velocity: 3 km/s, gap width: 0.2 mm)

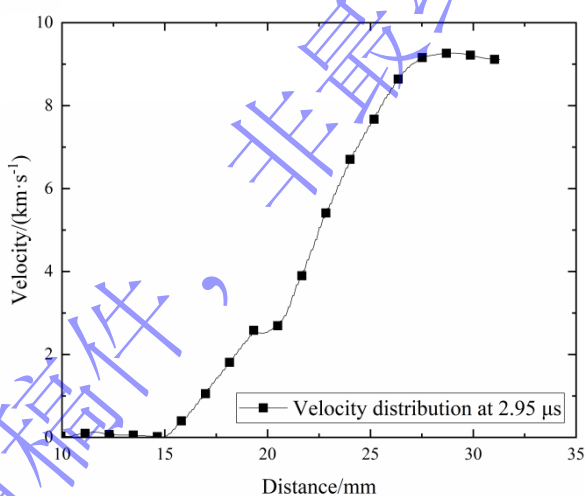


图7 2.95 μs 时刻间隙射流沿间隙方向的速度梯度分布 (飞片速度: 3 km/s, 间隙宽度: 0.2 mm)

Fig.7 Velocity gradient distribution of gap jet along the gap direction at 2.95 μs (flyer velocity: 3 km/s, gap width: 0.2 mm)

2.2 不同状态下形成间隙射流的异同

为了综合研究加载压力与间隙尺寸对间隙射流形成的影响, 本研究基于经过实验验证的数值模型, 分析了不同加载压力、间隙宽度和间隙半角下间隙射流形成的异同。为了研究加载压力对间隙射流形成的影响, 本研究通过调整图 3 计算模型中飞片的初始撞靶速度 (1 km/s~5 km/s), 实现了 45 GPa~344 GPa 的冲击加载压力范围。图 8 展示了五种不同加载压力下, 在撞靶后 2.95 μs 时刻的间隙射流速度梯度分布, 并在每种状态图像的右下角标注了相应的间隙射流头部速度。在不同加载压力下, 间隙射流的形态保持相似, 且间隙射流的头部速度随着加载压力的增加而增大。此外, 随着加载压力的增大, 间隙射流头部速度与飞片撞靶速度 (即主体板自由面起跳速度) 之间的比值逐渐下降, 表明间隙射流头部速度的增长率逐渐放缓。这一现象可能是由于较高的加载压力使得间隙射流头部在

形成初期加速较快,但随着压力的进一步增加,射流的形成过程趋于饱和,导致头部速度增长的速度逐渐减缓。

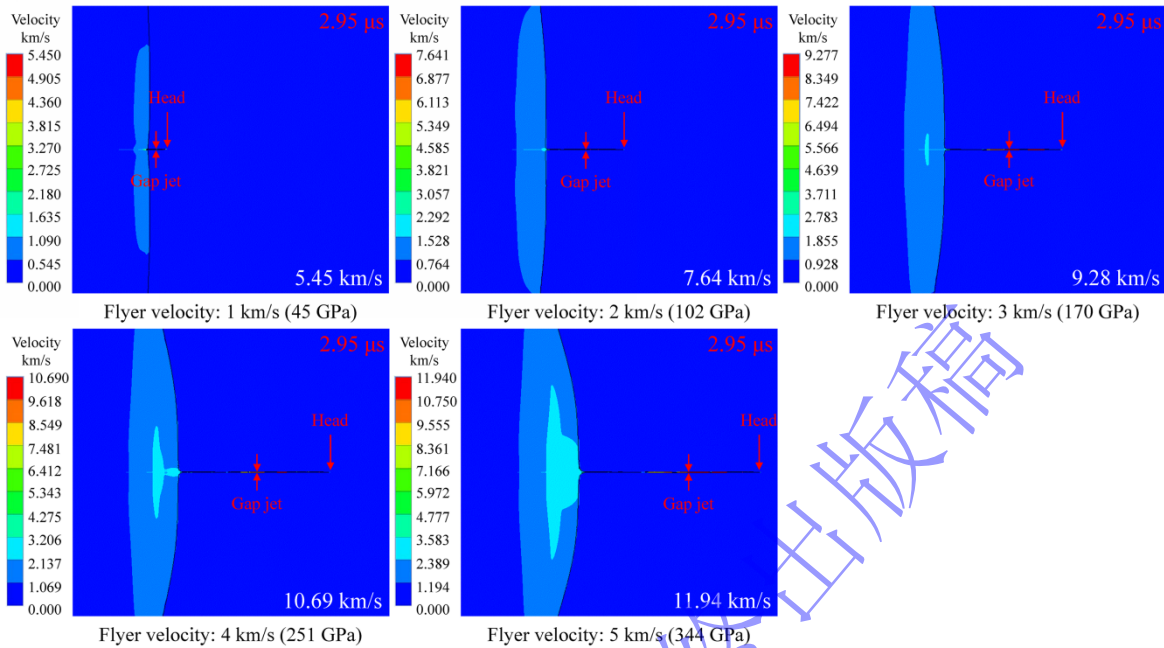


图 8 不同加载压力下形成的间隙射流 (间隙宽度: 0.2 mm)

Fig.8 Gap jet formed under different loading pressures (gap width: 0.2 mm)

本研究通过在 0.2 mm~1.0 mm 的范围内等间距变化间隙宽度,研究其对间隙射流形成的影响。图 9 展示了在飞片速度为 3 km/s 且撞靶后 2.95 μs 时,不同宽度间隙内形成的射流形态及速度梯度分布。仿真结果表明,除 0.2 mm~0.4 mm 间隙宽度外,间隙射流头部的速度随间隙宽度的增大而减小。随着间隙宽度的增加,射流在头部的堆积现象变得越来越显著,射流的形态逐渐从宽度均匀的长条形转变为纺锤形。此外,强动载下形成的间隙射流的最大宽度与间隙宽度成正比,且射流沿间隙方向呈现明显的速度梯度分布。值得注意的是,在不同间隙宽度状态下,射流的速度梯度分布具有相似性,这表明间隙宽度的变化对射流的形态和速度分布有重要影响,且射流的总体行为仍呈现出一致的趋势。

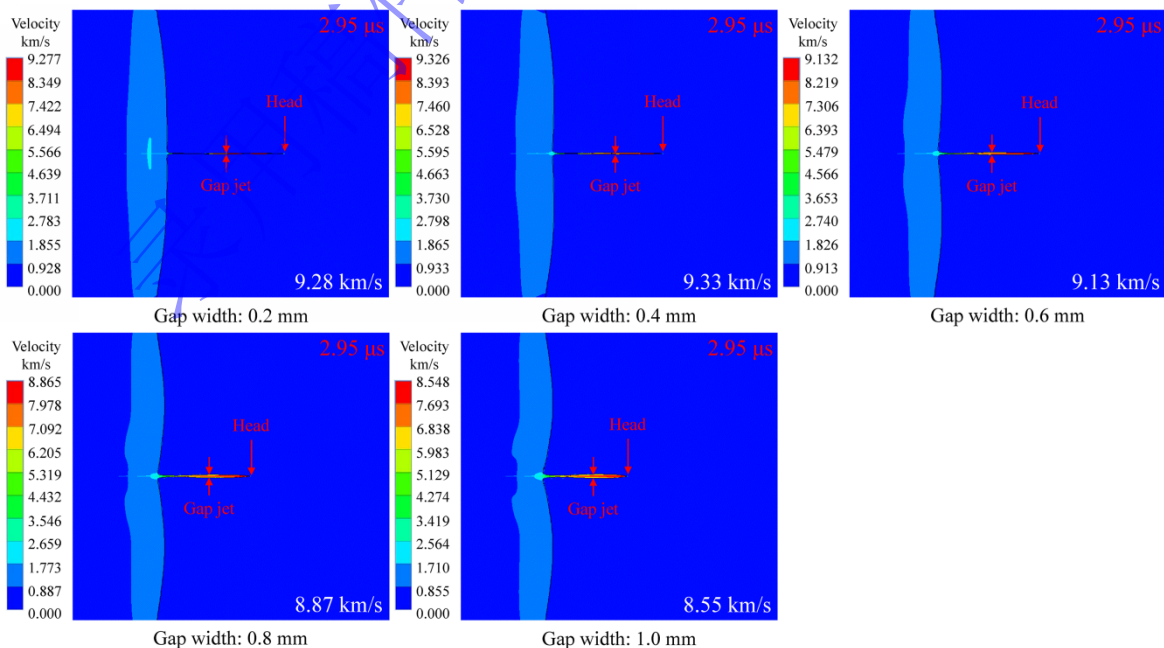


图9 不同间隙宽度下形成的间隙射流 (飞片速度: 3 km/s)

Fig.9 Gap jet formed under different gap widths (flyer velocity: 3 km/s)

除间隙宽度外, 间隙张角 (即间隙半角) 也是影响间隙射流形成的重要尺寸因素。本研究通过固定靶板与主体板界面之间的间隙宽度为 0.2 mm, 并在 0.2 mm~0.6 mm 范围内变化主体板自由面间隙宽度, 研究了间隙半角对间隙射流形成的影响。此处的间隙半角指的是对称两侧间隙面夹角的一半。图 10 展示了不同间隙半角下, 间隙射流的形态及速度梯度分布。结果表明, 间隙半角在小范围内的变化对间隙射流头部速度及速度梯度分布的影响有限。然而, 间隙射流的质量则呈现随间隙半角增加的趋势。尽管间隙半角的变化对速度特征的影响较小, 但它对射流质量的影响不容忽视。

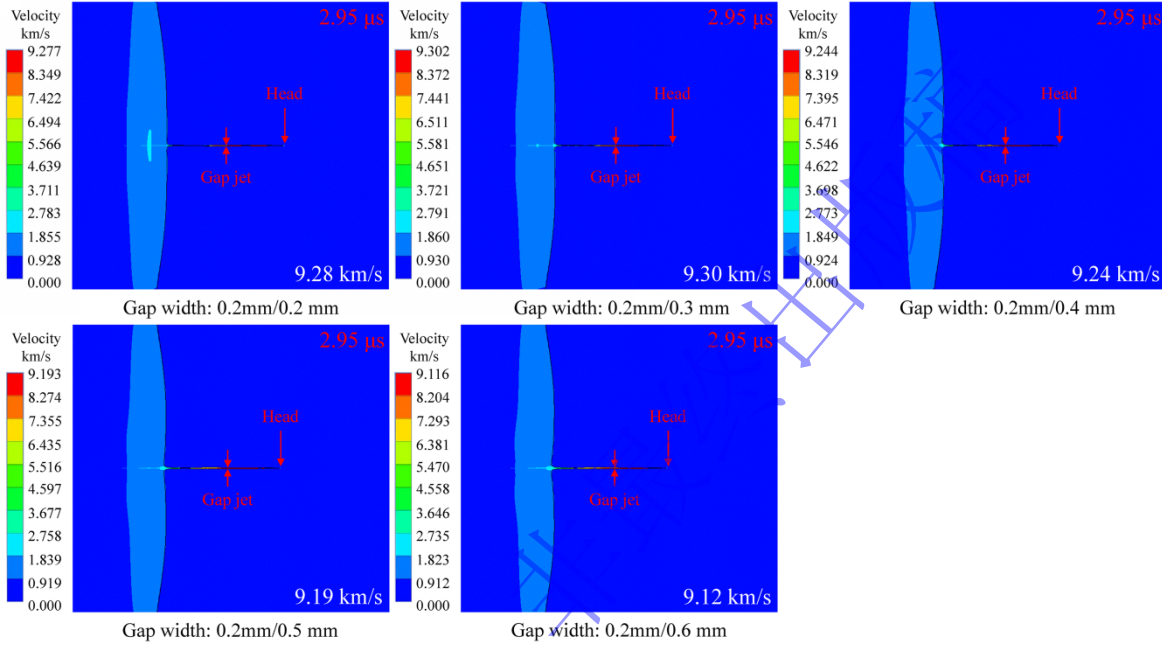


图 10 不同间隙半角下形成的间隙射流 (飞片速度: 3 km/s)

Fig.10 Gap jet formed under different gap half angles (flyer velocity: 3 km/s)

2.3 预测间隙射流形成的模型

因钨飞片与钨靶板厚度相同, 其碰撞过程为对称碰撞, 故靶板与主体板中的粒子速度 u 为飞片撞靶速度 V_0 的一半:

$$u = \frac{1}{2}V_0 \quad (6)$$

激波速度 D 可由下式计算得到:

$$D = C_0 + S_1u \quad (7)$$

根据定常射流假设下金属间隙闭合过程中激波相互作用的细致分析, 间隙的闭合速度 U_0 与间隙射流的头部速度 v_j 可分别由式(8)与式(9)计算得到^[12]:

$$U_0 \approx D - u \quad (8)$$

$$v_j = U_0 + \frac{U_0 - u}{\cos(\theta)} \quad (9)$$

式中: θ 为间隙两侧自由面的偏转角。

在已知激波速度 D 、间隙宽度 w 与间隙深度 L 的条件下, 间隙闭合过程中底部凹槽的深度 l 与间隙两侧自由表面的偏转角 θ 可由式(10)与式(11)近似计算得到^[12]:

$$l = \frac{uL}{D} \quad (10)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{w}{2l}\right) \quad (11)$$

综合上述各式，在 1 km/s~5 km/s 初速度（45 GPa~344 GPa 加载压力）飞片加载下带间隙主体板中粒子速度 u 、激波速度 D 、间隙闭合偏转角 θ 与间隙射流头部速度 v_j 的理论估算值如表 3 所示：

表 3 不同加载压力下间隙射流的相关参数

Table 3 The parameters of gap jet under different loading pressures

$V_0 / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	p / GPa	$u / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta / ^\circ$
1.00	45.00	0.50	4.65	5.31
2.00	102.00	1.00	5.27	3.01
3.00	170.00	1.50	5.89	2.25
4.00	251.00	2.00	6.50	1.86
5.00	344.00	2.50	7.12	1.63

基于定常射流模型，同样可以得到不同间隙宽度下的间隙射流相关参数，如表 4 所示。结果表明，间隙两侧自由表面的偏转角 θ 随间隙宽度的增大而增大。将表 3 与表 4 中的参数代入式(8)与式(9)后，可以在定常射流假设下，计算得到间隙射流的头部速度。

表 4 不同间隙宽度下间隙射流的相关参数

Table 4 The parameters of gap jet under different gap widths

w / mm	$u / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta / ^\circ$
0.2	1.50	5.89	2.25
0.4	1.50	5.89	4.49
0.6	1.50	5.89	6.71
0.8	1.50	5.89	8.92
1.0	1.50	5.89	11.10

图 11(a)中的方形数据点显示了数值模拟中间隙射流头部速度随加载压力变化的趋势。随着加载压力的增加，间隙射流头部速度的增长率逐渐放缓。基于定常射流模型得到的圆形数据点表明，该模型预测的间隙射流头部速度与数值模拟结果之间存在较大差异，且两者的变化趋势相反。此外，图 11(b)显示了通过数值模拟获得的间隙射流质量随着加载压力增加而增大，并且增长率逐渐放缓，现有的理论模型无法准确预测间隙射流质量的变化趋势。图 12 进一步揭示了，随着加载压力的增加，间隙射流加速到匀速运动所需的时间不断缩短，但加速时间的减少量逐渐趋于饱和，表明间隙射流的形成是一个复杂的非定常过程。

图 13(a)展示了间隙宽度对间隙射流头部速度的影响，方块数据点为数值模拟得到的间隙射流头部速度值，圆形数据点则为定常射流模型的预测结果。结果表明，定常射流模型的预测结果与数值模拟结果差异较大，且两者的变化趋势相反。定常射流模型假设射流在头部没有堆积效应，因此其预测的间隙射流头部速度偏低，无法准确捕捉射流头部速度随间隙宽度增加而下降的趋势。图 13(b)中，数值模拟数据表明，间隙射流质量随间隙宽度线性增加。图 14(a)和图 14(b)分别展示了间隙射流头部速度与质量随间隙半角变化的趋势。结果表明，间隙半角的变化对间隙射流头部速度的影响较小，而间隙射流质量随间隙半角的增加呈线性增加。

强动载下间隙射流的形成是一个复杂的非定常过程，基于理论分析建立间隙射流的预测模型极为困难。间隙射流头部速度与质量均呈现随加载压力的非线性变化，且变化趋势具有相似性；而两者均随着间隙宽度与间隙半角近似线性变化。为此，本研究基于间隙射流头部速度与质量随加载压力 p （粒子速度 u ）、间隙宽度 w 与间隙半角 α 的变化规律，建立了经验模型。模型采用三参数的非线性

乘积项来反映加载压力的影响，并用单参数的线性乘积项来反映间隙宽度与半角的影响。预测间隙射流头部速度与质量的表达式分别如式(12)与式(13)所示：

$$v_j = A_v(1 - B_v e^{-\xi_v u})(1 - M_v w)(1 - N_v \alpha) = 16.78(1 - 0.83e^{-0.44u})(1 - 0.094w)(1 - 0.0024\alpha) \quad (12)$$

$$m_j = A_m(1 - B_m e^{-\xi_m u})(1 + M_m w)(1 + N_m \alpha) = 1.49(1 - 1.16e^{-0.39u})(1 + 42.21w)(1 + 0.077\alpha) \quad (13)$$

式中： $A_v, B_v, \xi_v, M_v, N_v$ 与 $A_m, B_m, \xi_m, M_m, N_m$ 分别为与预测间隙射流头部速度与质量相关的两套经验参数，经验参数均通过拟合确定。

图 11，图 13 和图 14 中的红色实线代表了该经验模型的预测结果。通过对比发现，该模型与数值模拟结果吻合较好。这表明，间隙射流头部速度主要受加载压力控制，而间隙宽度则是间隙射流质量的主要影响因素。该经验模型将加载压力、间隙宽度及间隙半角对间隙射流头部速度与质量的影响表示为多个影响因子的乘积形式。这种结构使得各影响因素能够独立表征，互不干扰。此外，该乘积形式不仅在保证精度的前提下降低了建模和分析的复杂度，还具有较强的扩展性。根据需要，可在不破坏现有框架的情况下引入新的影响因子，或针对某一因子进行单独优化。

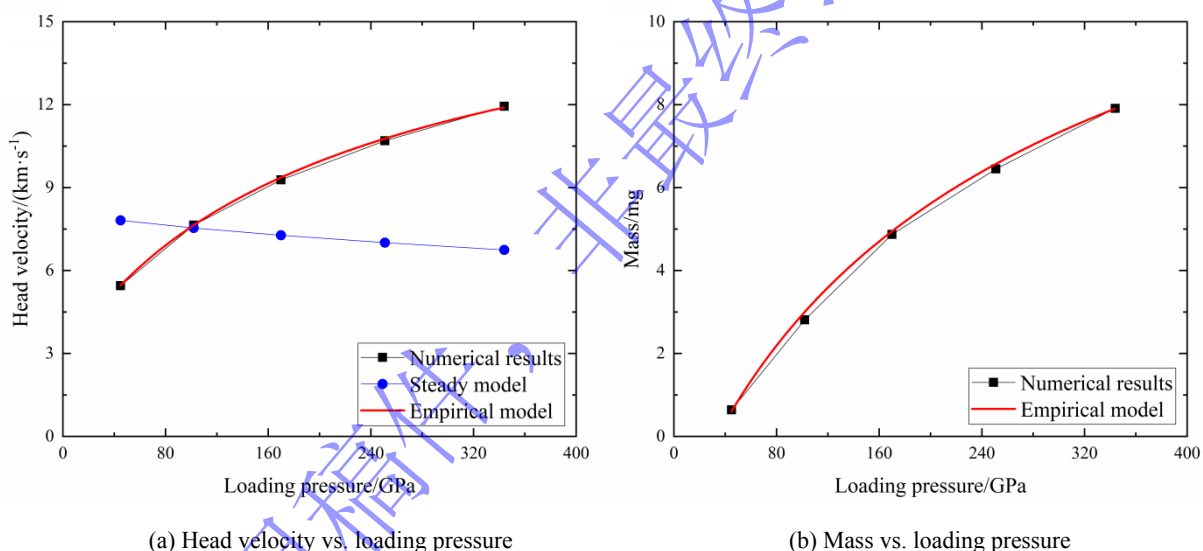


图 11 加载压力对间隙射流头部速度和质量的影响（间隙宽度：0.2 mm）

Fig 11 Effects of loading pressure on head velocity and mass of gap jet (gap width: 0.2 mm)

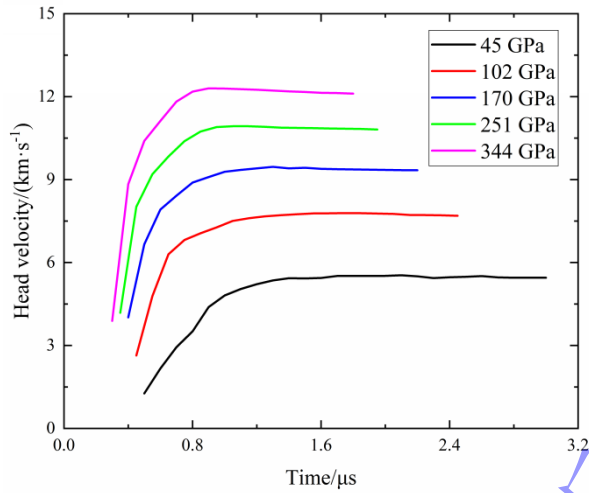
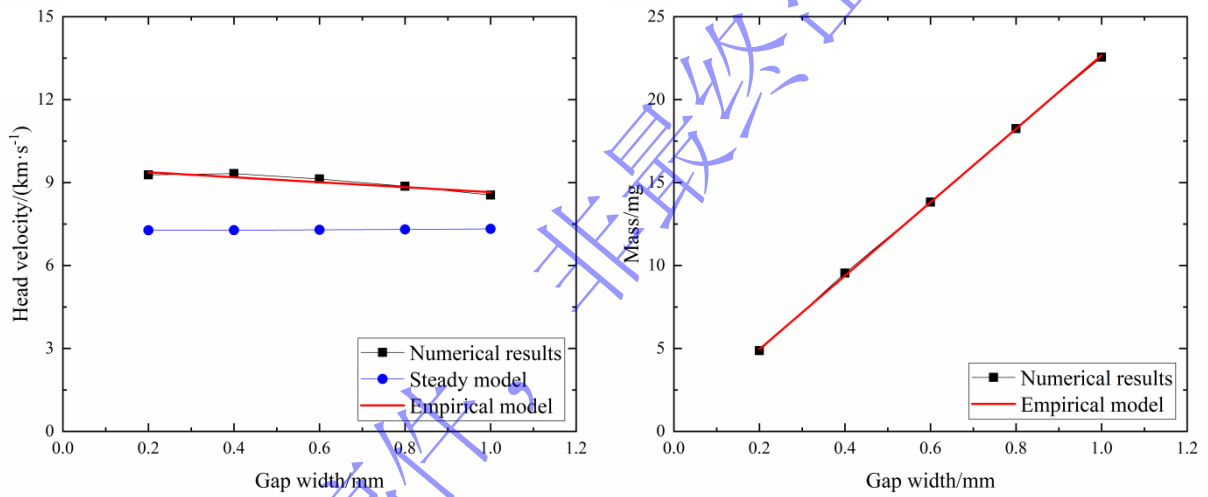


图 12 不同加载压力下射流在间隙内的加速历程 (间隙宽度: 0.2 mm)

Fig.12 Acceleration process of jet within the gap under different loading pressures (gap width: 0.2 mm)

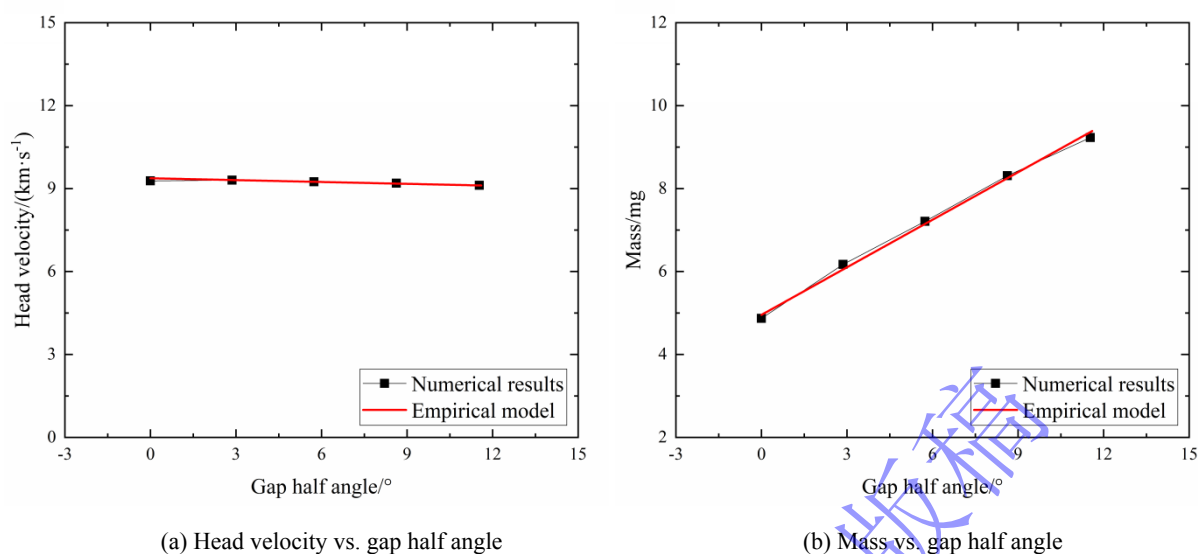


(a) Head velocity vs. gap width

(b) Mass vs. gap width

图 13 间隙宽度对间隙射流头部速度和质量的影响 (飞片速度: 3 km/s)

Fig.13 Effects of gap width on head velocity and mass of gap jet (flyer velocity: 3 km/s)



(a) Head velocity vs. gap half angle

(b) Mass vs. gap half angle

图 14 间隙半角对间隙射流头部速度和质量的影响 (飞片速度: 3 km/s)

Fig.14 Effects of gap half angle on head velocity and mass of gap jet (flyer velocity: 3 km/s)

3 结论

基于二级轻气炮平台开展了代表性的间隙射流形态考察实验, 并对计算方法及模型的准确性进行了验证。通过数值模拟, 研究了间隙射流头部速度和质量随加载压力、间隙宽度和间隙半角的变化规律, 建立了预测间隙射流头部速度和质量的经验模型。主要结论如下:

(1) 在强动载作用下, 金属间隙会不断闭合, 过程中形成的间隙射流在加速至最大值后保持稳定。基于欧拉方法建立的数值模型能够较好地反映间隙射流的形成过程, 并较为准确地预测间隙射流的头部速度;

(2) 间隙射流的头部速度和质量随加载压力的增加而增加, 且增长率逐渐放缓。间隙射流的头部速度随间隙宽度和间隙半角的增大而线性下降, 而间隙射流的质量随间隙宽度和间隙半角的增大而线性增加。其中, 加载压力是间隙射流头部速度的主控因素, 而间隙宽度则是间隙射流质量的主控因素;

(3) 定常射流模型预测的间隙射流头部速度与数值模拟结果差异较大, 原因在于间隙闭合速度的估算存在较大误差。强动载作用下的间隙闭合过程是一个复杂的非定常问题, 基于数值模拟结果建立的经验模型能够准确地反映间隙射流头部速度和质量的变化趋势。

需要指出的是, 本文中采用的高速分幅照相系统对低密度物质的分辨能力有限, 后续研究需基于 X 光照相技术开展间隙射流密度分布的诊断实验, 以期从实验中获取更清晰的间隙射流形态, 并统计其质量。

参考文献

- [1] BUTTLER W T, ORó D M, PRESTON D L, et al. Unstable Richtmyer-Meshkov growth of solid and liquid metals in vacuum [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 703: 60-84. DOI: 10.1017/jfm.2012.190.
- [2] DIMONTE G, TERRONES G, CHERNE F J, et al. Ejecta source model based on the nonlinear Richtmyer-Meshkov instability [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(2): 024905. DOI: 10.1063/1.4773575.
- [3] LIU Y, GRIEVES B. Ejecta production and transport from a shocked Sn coupon [J]. Journal of Fluids

- Engineering, 2014, 136: 091202. DOI: 10.1115/1.4026513.
- [4] REN G, CHEN Y, TANG T, et al. Ejecta production from shocked Pb surface via molecular dynamics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 133507. DOI: 10.1063/1.4896902.
- [5] GUO H, SU C, CAI Y, et al. Reactive jet density distribution effect on its penetration behavior [J]. *Defence Technology*, 2023, 24: 190-202. DOI: 10.1016/j.dt.2022.03.001.
- [6] SHI J, HUANG Z, ZU X, et al. Experimental and numerical investigation of jet performance based on Johnson-Cook model of liner material [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 170: 104343. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104343.
- [7] XU W, WANG C, CHEN D. The jet formation and penetration capability of hypervelocity shaped charges [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103337. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103337.
- [8] 方一舟, 张先锋, 熊玮, 等. 考虑形状分布特性的聚能射流侵彻作用规律研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(10): 1047-58. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.075.
FANG Y Z, ZHANG X F, XIONG W, et al. Study on penetration law of shaped charge jet considering shape distribution characteristics [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(10): 1047-58. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.075.
- [9] 李干, 陈小伟. 聚能射流侵彻径向扩孔的可压缩模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(7): 073301. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0466.
LI G, CHEN X W. A compressible model of radial crater growth by shaped-charge jet penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(7): 073301. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0466.
- [10] DE RESSÉGUIER T, PRUDHOMME G, ROLAND C, et al. Picosecond x-ray radiography of microjets expanding from laser shock-loaded grooves [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124: 065106. DOI: 10.1063/1.5040304.
- [11] TOKHEIM R E, CURRAN D R, SEAMAN L, et al. Hypervelocity shrapnel damage assessment in the NIF target chamber [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 23(1): 933-44. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00136-0.
- [12] LIU J, SUN Z, FAN Z, et al. Theoretical model of metal gap ejection under strong impact loading and its verification [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 159: 104053. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104053.
- [13] 童慧峰, 李庆忠, 谷岩, 等. 爆炸加载下金属缝隙射流定量诊断实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(5): 590-5. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0590-06.
TONG H F, LI Q Z, GU Y, et al. Experimental study of quantitative diagnosis of metal crack jet under explosive load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(5): 590-5. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0590-06.
- [14] ASAY J R, MIX L P, PERRY F C. Ejection of material from shocked surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 29(5): 284-7. DOI: 10.1063/1.89066.
- [15] HE A, LIU J, LIU C, et al. Numerical and theoretical investigation of jet formation in elastic-plastic solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(18): 185902. DOI: 10.1063/1.5051527.
- [16] LIU W, MA D, HE A, et al. Ejecta from periodic grooved Sn surface under unsupported shocks [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(1): 016202. DOI: 10.1088/1674-1056/27/1/016202.
- [17] ROLAND C, DE RESSÉGUIER T, SOLLIER A, et al. Hydrodynamic simulations of microjetting from shock-loaded grooves [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1793: 100027. DOI: 10.1063/1.4971652.
- [18] MESHKOV E E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock [J]. *Fluid Dynamics*,

- 1969, 4(5): 101-4. DOI: [10.1007/BF01015969](https://doi.org/10.1007/BF01015969).
- [19] RICHTMYER R D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1960, 13(2): 297-319. DOI: [10.1002/cpa.3160130207](https://doi.org/10.1002/cpa.3160130207).
- [20] DE RESSÉGUIER T, LESCOUTE E, SOLLIER A, et al. Microjetting from grooved surfaces in metallic samples subjected to laser driven shocks [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115: 043525. DOI: [10.1063/1.4863719](https://doi.org/10.1063/1.4863719).
- [21] ZELLNER M B, GROVER M, HAMMERBERG J E, et al. Effects of shock-breakout pressure on ejection of micron-scale material from shocked tin surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102: 013522. DOI: [10.1063/1.2752130](https://doi.org/10.1063/1.2752130).
- [22] SHI J, HUANG Z, ZU X, et al. Cohesiveness and penetration performance of jet: theoretical, numerical, and experimental studies [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 175: 104543. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2023.104543](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104543).
- [23] 张斐, 张春辉, 张磊, 等. 辅助药型罩材料对截顶药型罩形成高速射流的影响 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(S1): 52-6. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1093.2018.S1.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2018.S1.008).
ZHANG F, ZHANG C H, ZHANG L, et al. Effect of materials of auxiliary liner on the formation of high-speed jet by truncated liner [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(S1): 52-6. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1093.2018.S1.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2018.S1.008).

(责任编辑 爆炸与冲击)