

文章编号: 1003-1480 (2022) 06-0009-05

微装药驱动飞片速度及形态研究

穆云飞^{1, 2, 3}, 沈瑞琪^{1, 2, 3}, 张 伟^{1, 2, 3}, 叶迎华^{1, 2, 3}

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京, 210094; 2. 微纳含能器件工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京, 210094; 3. 南京理工大学空间推进技术研究所, 江苏 南京, 210094)

摘 要: 飞片速度和形态对其冲击起爆性能有重要影响, 采用光子多普勒干涉激光测试技术 (PDV) 和数值模拟方法, 研究了加速膛直径、飞片厚度和飞片材料对叠氮化铅微装药驱动飞片速度和形态的影响规律。试验结果表明: 飞片厚度一定时, 存在一个最优加速膛直径 (1.4mm) 使飞片的稳定速度最大 ($2\,050\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); 最优加速膛直径下, 飞片的稳定速度随飞片厚度增加而降低; 飞片厚度相同时, 铝飞片的稳定速度最大, 钛飞片其次, 不锈钢飞片最低。仿真结果表明, 飞片材料为不锈钢时, $30\mu\text{m}$ 厚的飞片平整度最好; 飞片厚度相同时, 钛飞片的平整度和完整性最好。

关键词: 微装药; 飞片速度; 飞片形态; 飞片厚度; 加速膛直径

中图分类号: TJ450.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.06.002

Study on Velocity and Shape of Micro-Charge-Driven Flyer

MU Yun-fei^{1, 2, 3}, SHEN Rui-qi^{1, 2, 3}, ZHANG Wei^{1, 2, 3}, YE Ying-hua^{1, 2, 3}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2. Micro-Nano Energetic Devices Key Laboratory of MIIT, Nanjing, 210094; 3. Institute of Space Propulsion, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: The velocity and shape of flyer have an important influence on its shock initiation performance. The effects of acceleration barrel diameter, flyer thickness and flyer material on the velocity and shape of lead azide micro-charge-driven flyer were studied by Photo Doppler velocimetry (PDV) and numerical simulation. The test results show that when the thickness of the flyer is constant, there is an optimal acceleration barrel diameter (1.4mm) to maximize the stable velocity of the flyer ($2\,050\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Under the condition of optimum accelerating barrel diameter, the steady velocity of flyer decreases with the increase of flyer thickness; At the same flyer thickness, the stable velocity of aluminum flyer is the highest, followed by titanium flyer, and the stable velocity of the stainless steel flyer is the lowest. The simulation results show that when the flyer material is stainless steel, the flyer with thickness of $30\mu\text{m}$ has the best flattest. At the same thickness, the titanium flyer has the best flatness and integrity.

Key words: Micro-charge; Flyer velocity; Flyer shape; Flyer thickness; Acceleration barrel diameter

飞片冲击起爆技术对简化起爆序列结构和提高序列起爆能力有重要意义^[1], 其技术核心是利用高速飞片冲击, 提高能量传递效率, 实现间隙或者钝感装药起爆。目前驱动高速飞片的方法有高压气体、电爆炸等离子体、激光等离子体和炸药爆轰波驱动等, 其

中炸药爆轰波驱动具有用药量少、结构简单、易微型化等优点, 更能满足 MEMS 火工品在现代引信系统中的应用要求^[2-3]。国外对飞片起爆技术的研究主要集中在电爆驱动聚合物飞片、激光驱动金属飞片及冲击起爆判据等。Lim^[4]研究了炸药爆轰波驱动飞片的历

收稿日期: 2022-04-14

作者简介: 穆云飞 (1995-), 男, 在读博士研究生, 从事 MEMS 火工品技术研究。

通讯作者: 沈瑞琪 (1963-), 男, 教授, 从事含能材料、MEMS 火工品等技术研究。

程，建立了相应的模型用以预测飞片状态。Deeds M 和 Taylor T Y 等^[5-6]分别在第 58 届和第 59 届引信年会上提出了采用炸药驱动飞片的 MEMS 引信装置和 MEMS 安保机构，这些装置集成度高，具有广泛的应用前景。国内对于飞片起爆技术的研究晚于国外，但其研究更为细致，包括起爆空腔对飞片层裂的影响规律研究^[7]、微装药驱动飞片的仿真参数研究^[8]、飞片结构参数对其速度和能量的影响研究^[9]等，但目前有关叠氮化铅微装药驱动金属飞片的试验研究和实测数据相对较少。

本文通过试验测试和数值模拟相结合的方法，研究了加速膛直径、飞片厚度和飞片材料对飞片速度和形貌的影响规律，为微装药爆轰驱动飞片起爆系统的设计提供基础试验数据和理论支撑。

1 试验装置和数值计算模型

1.1 PDV 测试试验

采用光子多普勒干涉激光测试技术 (PDV) 测试飞片速度，测试样品结构及 PDV 装置示意图如图 1 所示。采用半导体桥 (SCB) 点火头点燃叠氮化铅微装药，进而驱动金属飞片，飞片经过加速膛，由 PDV 光纤探头采集飞片速度信息，有机玻璃用以保护 PDV 光纤探头。其中，SCB 点火头由 SCB、陶瓷桥塞和斯蒂芬酸铅构成；叠氮化铅微装药尺寸为 $\Phi 1.2\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ ，装药密度为 $3.572\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ；加速膛直径分别为 1.0mm、1.2mm、1.4mm、1.6mm 和 1.8mm；测试样品外壳、药环和加速膛材料均为 304 不锈钢 (SS304)；飞片材料为铝 (Al)、钛 (Ti) 和 304 不锈钢，其中不锈钢飞片厚度分别为 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$ ，铝和钛飞片的厚度为 $80\mu\text{m}$ 。每种规格的飞片测试 2 发，取平均值。

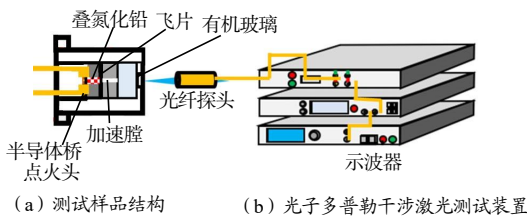


图 1 测试样品和试验装置示意图

Fig.1 Schematic of test sample and apparatus

1.2 飞片形态数值模拟

为了探究不同飞片材料和厚度对其形貌的影响规律，采用 ANSYS/LS-DYNA 软件及流固耦合算法对叠氮化铅微装药爆轰驱动飞片的过程进行仿真，简化的仿真模型如图 2 所示。该模型采用 1/2 建模形式，网格尺寸为 0.001mm ，计算步长为 $0.001\mu\text{s}$ ，单位制为 $\mu\text{s}\text{-cm-g}$ 。

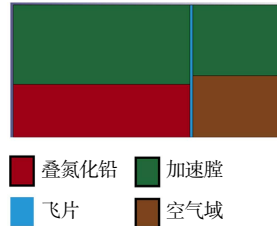


图 2 仿真模型

Fig.2 Simulation model

叠氮化铅微装药采用中心点起爆的形式，选用任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 单元算法，使用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程仿真。其 JWL 状态方程参数由 γ 拟合法^[9-10]得到，拟合所需参数由试验测得，如表 1 所示。MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型参数和 JWL 状态方程参数如表 2~3 所示。

表 1 叠氮化铅微装药爆轰参数

Tab.1 Detonation parameters of micro-charge lead azide

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_{\text{CJ}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P/GPa	γ
3.572	4 726	1 027	17.12	3.443 5

表 2 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型参数

Tab.2 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN material model parameters

$RO/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	BETA	K	G	SIGY
3.572	4 726	17.12	-	-	-	-

表 3 JWL 状态方程参数

Tab.2 JWL equation of state parameters

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	OMEG	E_0/GPa	V_0
403.0	15.09	4.543	1.675	0.40	5.44	1.0

空气网格选用 ALE 单元算法，采用 NULL 材料模型和 GRUNEISEN 状态方程仿真，相关参数如表 4~5 所示。

表 4 NULL 材料模型参数

Tab.4 NULL material model parameters

$RO/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	PC	MU	TEROD	CEROD	YM	PR
0.001 25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 5 GRUNEISEN 状态方程参数

Tab.5 GRUNEISEN equation of state parameters

$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	GAMAO	A	E_0
456.9	1.49	0.0	0.0	2.17	0.46	0.0

飞片和外壳使用拉格朗日网格，采用 Johnson-

Cook 材料模型和 GRUNEISEN 状态方程仿真, 相关参数如表 6~7 所示。

表 6 Johnson-Cook 模型参数^[11]

Tab.6 Johnson-Cook parameters

材料	A/GPa	B/GPa	n	C	m	$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Al	0.265	0.426	0.34	0.015	1.00	875
Ti	1.098	1.092	0.93	0.014	1.10	528
SS304	0.792	0.510	0.26	0.014	1.03	466

表 7 材料 GRUNEISEN 参数

Tab.7 GRUNEISEN parameters

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S	γ
SS304 ^[12]	7.89	4 580	1.49	2.17
Al ^[13]	2.79	5 370	1.29	2.13
Ti ^[12]	4.53	5 015	0.98	2.04

2 结果与讨论

2.1 加速膛直径对飞片速度的影响

厚度为 80 μm 的不锈钢飞片在加速膛直径分别为 1.0mm、1.2mm、1.4mm、1.6mm 和 1.8mm 时的速度—时间曲线如图 3 所示。

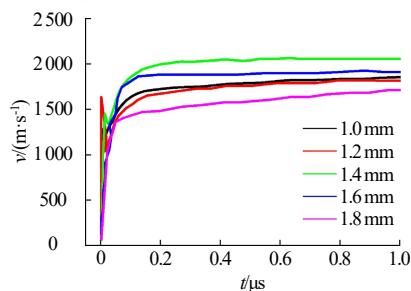


图 3 不同加速膛直径下 80 μm 不锈钢飞片的速度—时间曲线

Fig.3 Velcoity—time curves of 80 μm SS304 flyer with different diameters of the acceleration barrel

由图 3 可知, 飞片速度先快速增加至一极值, 随后快速下降并再次缓慢增加, 最后趋于稳定。考虑到飞片的爆轰驱动过程, PDV 所测速度信号应包含飞片剪切前的自由面粒子速度和剪切后由飞片整体位移形成的速度。速度曲线中的尖峰 (极值) 对应于爆轰波首次到达飞片上表面时的自由面粒子速度, 随后爆轰波在飞片内多次反射并稳定, 期间飞片被剪切并在爆轰波和爆轰产物的作用下继续加速。如果加速度较低, 则会出现飞片整体速度低于自由面粒子速度的情况, 即曲线中存在尖峰。

此外, 加速膛直径为 1.4mm 时的飞片稳定速度最大 ($2\,050\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 而加速膛直径为 1.0mm、1.2mm、

1.6mm、1.8mm 时的飞片稳定速度均较低, 可见飞片的稳定速度与加速膛直径非线性关系, 而是存在一个最优直径使飞片稳定速度最大。这是由于对于较小的加速膛, 驱动装药爆轰时会有部分能量损耗在对加速膛的挤压上, 驱动飞片时的剩余能量相对较低, 即使飞片整体质量较小, 飞片的速度也较低; 而对于较大的加速膛, 由于被剪切下的飞片质量较大, 飞片稳定时的速度也较低。

飞片的单位面积动能随加速膛直径变化的曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 单位面积飞片动能随加速膛直径增加先增大后减小, 在 1.4mm 处达到极值, 这说明当加速膛直径为 1.4mm 时, 叠氮化铅微装药内能转化为飞片动能的效率最高。

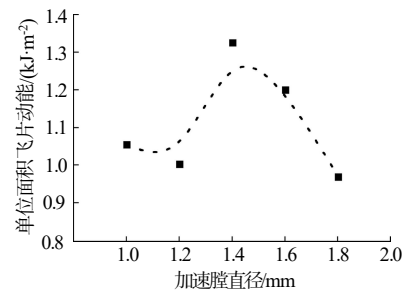


图 4 飞片单位面积动能—加速膛直径关系曲线

Fig.4 Kinetic energy per unit area—diameter of the acceleration barrel curve

2.2 飞片厚度对飞片速度的影响

加速膛直径为 1.4mm, 不锈钢飞片厚度分别为 30 μm 、50 μm 、80 μm 、150 μm 和 250 μm 时的速度—时间曲线如图 5 所示。

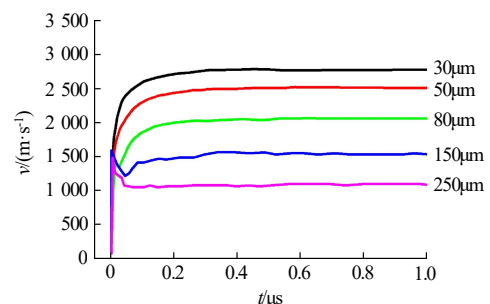


图 5 不同厚度不锈钢飞片的速度—时间曲线

Fig.5 Velcoity—time curves of SS304 flyer with different thicknesses

由图 5 可知, 随着飞片厚度增加, 飞片的稳定速度不断减小, 30 μm 厚飞片的稳定速度最高, 可达 $2\,770\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外, 较厚飞片的速度曲线上有明显的自

由面粒子速度尖峰,较薄飞片则不明显,这是由于薄飞片内的爆轰波多次反射至稳定的时间较短,并且薄飞片质量小,飞片加速度快,因此速度曲线无明显粒子速度峰。此外,较薄飞片的稳定速度大于爆轰波透过飞片时的自由面粒子速度。

飞片单位面积动能随飞片厚度变化的曲线如图6所示。由图6可知,飞片单位面积动能随着厚度增加先增大后减小,在 $100 \sim 150 \mu\text{m}$ 间存在一个最优厚度,使飞片单位面积动能最大,即最优厚度下叠氮化铅微装药内能转化为飞片动能的效率最高。

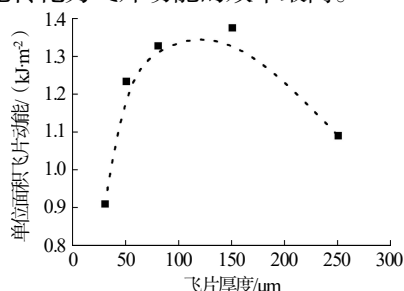


图6 飞片单位面积动能—厚度曲线

Fig.6 Kinetic energy per unit area—thickness of the flyer curve

2.3 飞片材料对飞片速度的影响

当加速膛直径为 1.4 mm 、飞片厚度为 $80 \mu\text{m}$ 时,3种材料(Al、Ti、SS304)飞片的速度—时间曲线如图7所示,其单位面积动能如图8所示。

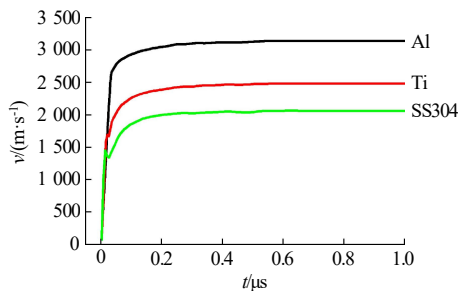


图7 不同材料飞片的速度—时间曲线

Fig.7 Velocity—time curves of the flyer with different materials

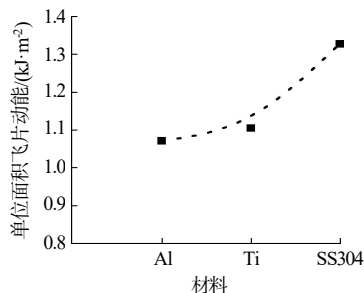


图8 不同材料飞片的单位面积动能

Fig.8 Kinetic energy per unit area of the flyer with different materials

由图7可知,Al飞片的稳定速度最高,Ti飞片

其次,SS304飞片最低,其稳定速度分别为 $3100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2470 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2050 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这表明飞片稳定速度随材料密度增大而减小。

由图8可知,SS304飞片的单位面积动能最高,Ti飞片其次,Al飞片最低,表明飞片单位面积动能随着飞片材料密度增加而增大。即加速膛直径和飞片厚度一定时,飞片材料密度越大,叠氮化铅微装药内能转化为飞片动能的效率最高。

2.4 飞片形貌分析

利用ANSYS/LS-DYNA软件模拟得到了加速膛直径为 1.4 mm 、飞片厚度为 $80 \mu\text{m}$ 时,飞片材料分别为Al、Ti、SS304时的飞片形貌,以及加速膛直径为 1.4 mm 、飞片厚度为 $30 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$ 时的SS304飞片形貌,如图9所示。

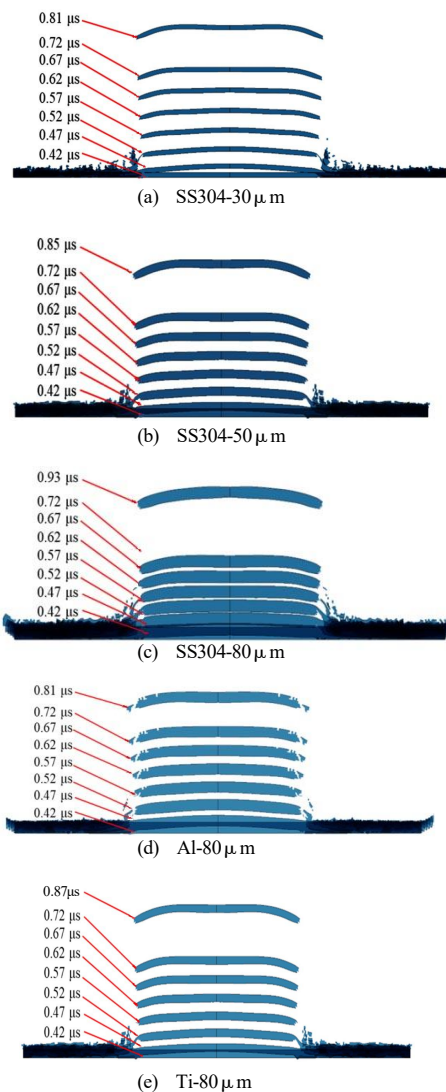


图9 飞片形貌仿真

Fig.9 Simulation shape of flyers

由图 9 (a) ~ (c) 可知, 对于 SS304 飞片, 其厚度越大, 飞片剪切和加速的越慢; 但是飞片的有效直径基本一致, 约为 1.28mm。当飞片位移为 1mm 时, 30 μ m 不锈钢飞片的平整度最佳, 而 80 μ m 厚的飞片逐渐形成球面。

对比相同厚度下 3 种不同材料飞片的形貌, 由图 9 (c) ~ (e) 可知, 位移为 1mm 时, Ti 飞片的平整度和完整性最佳; SS304 飞片整体曲度较大, 但是完整性较好; Al 飞片的平整度较好, 但是边缘单元破碎严重, 影响了飞片的完整性。这是由于 Ti 飞片屈服强度高, 单元不易破碎, 因此飞片完整性较好; 且爆轰波在加速膛壁面上反射并增强了飞片边缘处的加速能力, 由于飞片密度低、加速度高, 飞片边缘能够快速追赶上中心速度, 因此飞片平整度较高。而 Al 飞片屈服强度低, 单元容易破碎, 因此飞片完整性较低; 但是铝飞片密度同样较低, 因此平整性也较高。SS304 飞片的屈服强度和密度均较大, 虽然完整性好, 但是飞片边缘加速较慢, 因此飞片平整度较差。

3 结论

试验结果表明: (1) 当飞片厚度一定时, 存在一个最优加速膛直径使飞片的稳定速度最大。对于厚度为 80 μ m 的 SS304 飞片, 当加速膛直径为 1.4mm 时, 其稳定速度最大, 可达 2 050m·s⁻¹。(2) 当加速膛直径一定时, 飞片稳定速度随飞片厚度增大而减小; 飞片单位面积动能随着厚度增加先增大后减小, 在 100 ~ 150 μ m 间存在一个最优厚度, 使飞片单位面积动能最大, 即最优厚度下叠氮化铅微装药内能转化为飞片动能的效率最高。(3) 当加速膛直径及飞片厚度一定时, 飞片材料密度越小, 飞片稳定速度越大。

仿真结果表明: 对于 SS304 飞片, 当加速膛直径一定时, 飞片厚度越小, 其平整度越好; 对于 Al、Ti、SS304 飞片, 当飞片厚度为 80 μ m 时, Ti 飞片的平整度和完整性最佳。

参考文献:

- [1] 解瑞珍, 褚恩义, 戴旭涵, 等. 微起爆序列设计及传爆与隔爆性能[J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1 178-1 184.
- [2] 王柯心, 胡腾江, 褚恩义, 等. 内置 MEMS 隔爆机构的微起爆装置[J]. 火工品, 2020(6): 5-9.
- [3] 褚恩义, 张方, 陈建华, 等. 第四代火工品概念补充探讨[J]. 火工品, 2020(6): 1-4.
- [4] Lim S. Acceleration profile of a flat flyer driven by detonation isentrope[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38(3): 410-418.
- [5] Deeds M. Navy fuze S&T and acquisition strategy[C]//Proceedings of the 58th Annual Fuze Conference. Baltimore, MD, US: National Defense Industrial Association, 2015.
- [6] Taylor T Y. DoD MEMS fuse reliability evaluation[C]//Proceedings of the 59th Annual Fuze Conference. Charleston, SC, US: National Defense Industrial Association, 2016.
- [7] 赵剑衡, 赵锋, 文尚刚, 等. 带空腔爆轰加载装置对驱动飞片的影响[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4): 307-310.
- [8] 曾庆轩, 简国祚, 李兵, 等. 叠氮化铜 JWL 状态方程参数拟合[J]. 火工品, 2014(6): 28-31.
- [9] 贺翔, 严楠, 曾祥涛, 等. 微尺寸叠氮化铅驱动飞片重要结构参数与飞片速度和能量的关系[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1 363-371.
- [10] 赵铮, 陶钢, 杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(5): 277-282.
- [11] 陈清畴, 马弢, 李勇. HNS-IV 炸药驱动飞片速度及形态的数值模拟[J]. 含能材料, 2018(26): 814-819.
- [12] Marsh S P. LASL shock Hugoniot data[M]. Univ of California Pres, 1980.
- [13] Bowden M D, Maisy M P. Determination of critical energy criteria for hexanitrostilbene using laser-driven flyer plates[C]//Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2008.