文章编号：1000-5773(2008)01-0019-06

超高速发射中缓冲层材料对钽飞片速度影响的数值分析*

柏劲松[1]，沈 强[2]，唐 蜜[1]，胡建波[1]，罗国强[2]，谭 华[1]，张联盟[2]

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900；
2. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室，湖北武汉 430070)

摘要：在超高速发射技术研究中，缓冲层材料起着十分重要的作用。通过数值计算，分析了 TPX 缓冲层材料的厚度对高阻抗钽飞片超高速发射速度的影响，给出了最优的缓冲层材料厚度，对于 0.3 和 0.5 mm 厚的钽飞片，选取不同厚度的 TPX 缓冲层材料，钽飞片中心速度的相对误差达到 5%～6%；为了比较不同缓冲层材料对钽飞片速度的影响，还给出了相同厚度的 TPX 和 Lexan 材料作缓冲层时，钽飞片的中心速度和压力历史的二维计算结果。

关键词：超高速发射；数值计算；缓冲层
中图分类号：O521.2；O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

在天体物理、地球物理、固体物理、核物理以及惯性约束聚变等的研究中，需要精确了解极端高压(TPa 级)条件下物质的响应特性和状态方程。为此，必须研制对应于此压力范围的高压技术并开发出相关的实验手段，才能有条件开展超高压状态方程的精密测量[1-2]。Sandia 实验室利用梯度飞片的准等熵压缩特性，用于对二级飞片的超高速发射，在二级轻气炮上将 1 mm 厚的 Al、Mg、Ti 二级飞片分别驱动到 10 km/s 以上[3-4]。Reinhart 和 Chhabildas 还发表了飞片速度为 11 km/s 的超高压状态方程的实验测量研究结果，对利用二级轻气炮的梯度飞片加载和超高压状态方程实验测量技术进行了考核，并对他们的 CTH 程序的实用性进行了验证[5]。对于重材料的二级飞片，如钽、铂，采用超高速发射技术，通过高速飞片与样品(靶)的平面撞击，可以获得 TPa 级的超高压力状态，见表 1。

表 1 飞片击靶速度与击靶压力的估算结果[6]

Table 1 The estimated pressures[6] in target at different impact velocities of flier plates

Pressure in target	Impactor velocity/(km/s)					
	6.0	8.0	10.0	11.0	13.0	15.0
p_{Ta}/(GPa)	334	541	798	945	1272	1648
p_{Pt}/(GPa)	403	657	971	1150	1553	2016

超高速发射装置设计主要包括阻抗梯度飞片、缓冲层、二级飞片和发射管等几部分，其中缓冲层材料位于阻抗梯度飞片和二级飞片之间，起着十分重要的作用，缓冲层材料通常采用低密度聚合物，如 TPX、Lexan 等，具有使二级飞片保持较好姿态和能量传递的功能。本文主要讨论缓冲层材料及其厚度对重材料钽二级飞片速度的影响，以期为超高速发射实验装置中缓冲层的设计提供参考。文中第 3 节

* **收稿日期**：2007-03-18；**修回日期**：2007-05-30
基金项目：国家自然科学基金项目(10574102)；国家重点实验室基金项目(9140C6704010704)
作者简介：柏劲松(1968—)，男，博士，副研究员，主要研究方向为计算流体动力学. E-mail：bjsong_mail@21cn.com

中未考虑侧向稀疏的影响，采用的是一维计算分析；第 4 节中考虑了侧向稀疏的影响，采用的是二维计算分析。

2 数值方法

采用作者在文献[7]中发展的计算方法，即三阶精度 PPM(Parabolic Piecewise Method)方法和 VOF(Volume Of Fluid)方法相结合，通过维数分裂实现可压缩流体的空间多维求解。为了有效地捕捉多介质流体交界面，采用 Lagrange-Remapping 两步算法求解流体动力学守恒律方程，也就是通常所说的 Lagrange 步加上输运步。整个计算分 4 个步骤完成：即① 物理量的分段抛物插值；② 近似 Riemann问题求解；③ Lagrange 方程组的推进求解；④ 最后将物理量变回到静止的 Euler 网格上。其中步骤②采用双激波近似计算 Riemann 问题的解。在上述计算方法的基础上，编制了一维、二维计算机程序 MFPPM(Multi-Fluid Piecewise Parabolic Method)，并进行数值检验和验证，成功地应用于超高速发射和界面不稳定性方面的数值计算[7-8]，同时应用该计算程序对 Sandia 超高速发射实验模型及其 VISAR 测量的二级飞片前界面速度剖面进行了比较[9]，如图 1 所示，可见 MFPPM 程序的计算结果与 HVL_CTH 的结果是一致的，只是两者计算给出的在稳定时刻二级飞片的速度均比 VISAR 的测量值偏低约 1.8%。

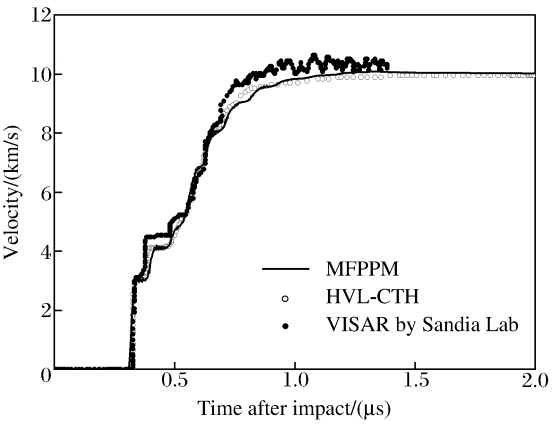


图 1 MFPPM 与 HVL_CTH 以及实验结果的比较

Fig. 1 Comparison of the velocity versus time profiles calculated by the MFPPM and HVL_CTH code

3 TPX 缓冲层材料厚度对钽飞片超高速发射速度的影响

为了实现材料超高压状态方程研究，需要对高阻抗二级飞片进行超高速发射实验技术研究，在本工作数值计算中采用的高阻抗二级飞片为 0.3 mm 厚和 0.5 mm 厚的钽，缓冲层材料为 TPX，阻抗梯度飞片由 6 层材料组合而成，阻抗从高到低分别为 93W、Cu、TC4、LY12Al、MB2、TPX，其对应材料的厚度为 0.9 mm、0.32 mm、0.28 mm、0.30 mm、0.35 mm、0.9 mm，阻抗梯度飞片以 6.5 km/s 的速度驱动缓冲层材料和二级飞片，从而实现二级飞片的超高速发射。

如何设计 TPX 缓冲层材料的厚度，使得二级飞片在飞行距离为 7.5 mm(实验装置设计中的空腔长度)时速度最大，是超高速发射实验装置设计所关心的问题。我们应用 MFPPM 计算程序，对于两种厚度的钽飞片共计进行了 30 个模型的数值计算，计算中所用材料参数取自文献[10]，本工作计算给出二级飞片在飞行 7.5 mm 时其中心速度与 TPX 缓冲层材料厚度的关系，如图 2、图 3 和表 2 所示，表 2 中的情况 1(Case 1)和情况 2(Case 2)分别对应 0.3 和 0.5 mm 两种厚度的二级飞片。

表 2 不同 TPX 厚度所对应的二级飞片的中心速度

Table 2 The center velocity values of the flier under different thicknesses of TPX buffer

Case 1				Case 2			
h_{Buffer}/(mm)	v/(km/s)	h_{Buffer}/(mm)	v/(km/s)	h_{Buffer}/(mm)	v/(km/s)	h_{Buffer}/(mm)	v/(km/s)
0.5	9.437	1.3	10.017	0.5	8.671	1.3	9.089
0.6	9.551	1.4	10.019	0.6	8.737	1.4	9.086
0.7	9.669	1.5	10.015	0.7	8.829	1.5	9.070
0.8	9.773	1.6	10.004	0.8	8.921	1.6	9.064
0.9	9.840	2.0	9.938	0.9	8.978	2.0	9.039
1.0	9.917	2.5	9.854	1.0	9.026	2.5	9.011
1.1	9.961	3.0	9.782	1.1	9.058	3.0	8.965
1.2	9.984	—	—	1.2	9.081	—	—

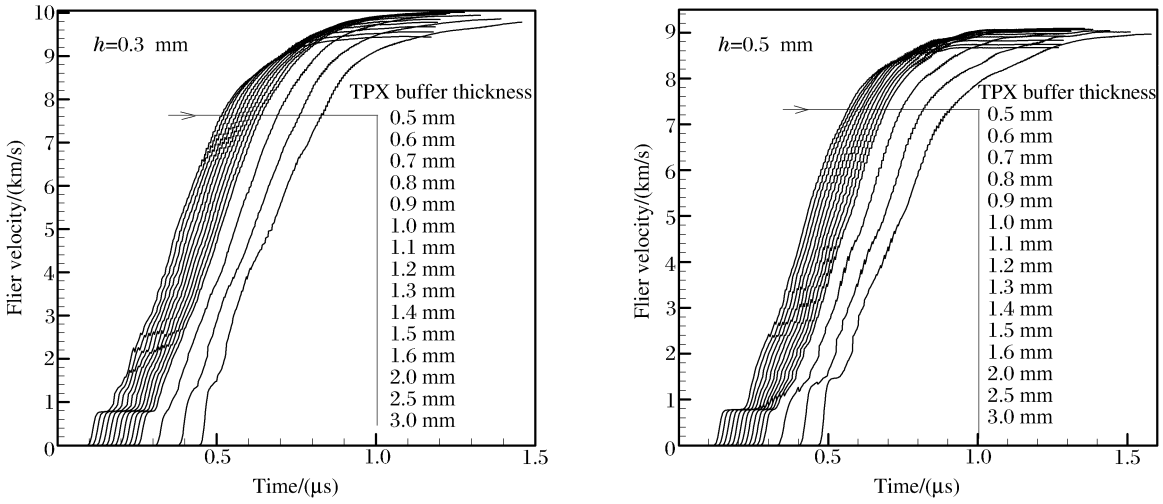


图 2　不同 TPX 缓冲层厚度下 0.5 mm 和 0.3 mmTa 飞片中心速度历史

Fig. 2　The center velocity history of 0.5 mm and 0.3 mm Ta flier with various thicknesses of TPX buffer

从计算结果可见,本工作所选取的不同厚度的 TPX 缓冲层,在情况 1 和情况 2 中钽飞片中心速度的相对误差分别达到 5.81%和 4.60%,这说明缓冲层的厚度对二级飞片速度的影响比较明显。当 TPX 缓冲层厚度取 1.3～1.5 mm 时,0.3 和 0.5 mm两种厚度的钽二级飞片所获得的速度均比较大。参照表 1 可知,应用此类超高速发射实验装置,通过高速飞片与样品(靶)的平面撞击,可以获得 600～800 GPa 的超高压力状态。

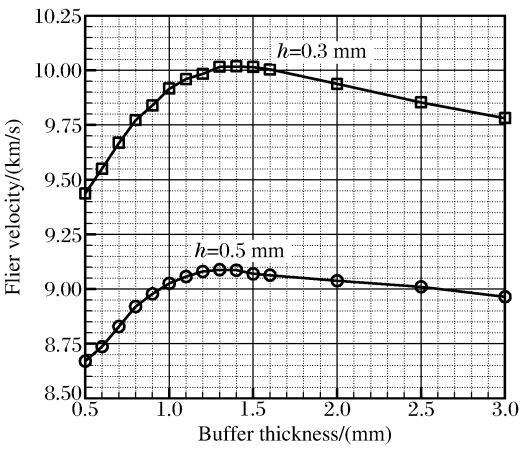


图 3　二级飞片中心速度与缓冲层材料厚度的关系

Fig. 3　The relationship of the flier center velocity and buffer thickness

4　不同缓冲层材料对钽飞片超高速发射速度的影响

上面计算分析了不同缓冲层材料的厚度对钽飞片超高速发射速度的影响,得到当 TPX 缓冲层厚度取 1.3～1.5 mm 时,0.3 和 0.5 mm 两种厚度的钽二级飞片获得的速度均比较大。在此基础上分析不同缓冲层材料对钽飞片超高速发射速度的影响。计算中选取了两种缓冲层材料,分别为 Lexan 和 TPX,缓冲层厚度取为 1.5 mm,直径为 34 mm。二级飞片为 0.3 和 0.5 mm 厚的钽飞片,其直径为 30 mm。

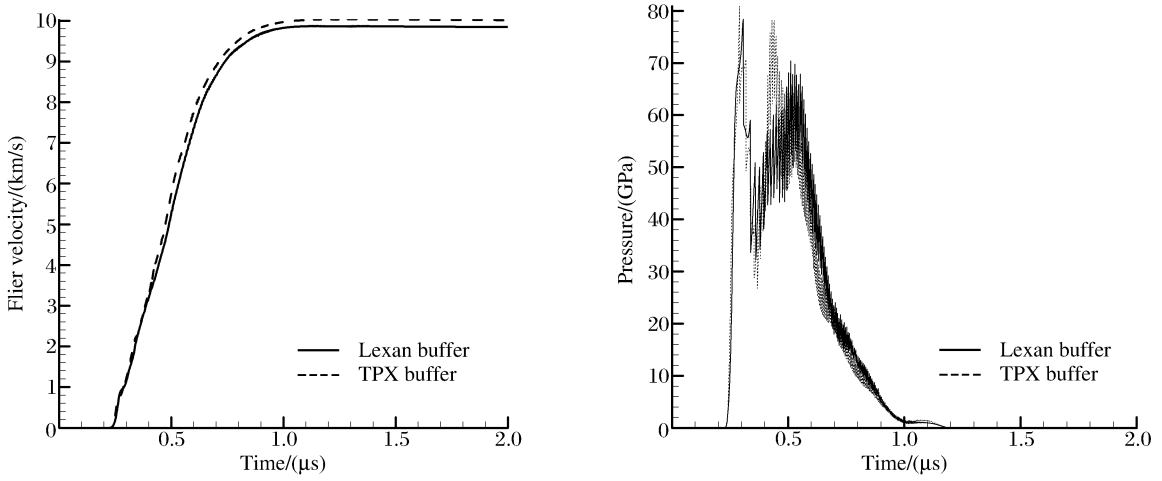
一级飞片即阻抗梯度飞片由 6 层材料组合而成,当缓冲层材料为 Lexan 时,阻抗梯度飞片从高到低分别为 93W、Cu、TC4、LY12Al、MB2、Lexan;当缓冲层材料为 TPX 时,阻抗梯度飞片从高到低分别为 93W、Cu、TC4、LY12Al、MB2、TPX。梯度飞片对应材料的厚度均为 0.9 mm、0.32 mm、0.28 mm、0.30 mm、0.35 mm、0.75 mm,梯度飞片的直径为 29 mm。

阻抗梯度飞片以 6.5 km/s 的速度驱动缓冲层材料和二级飞片,从而实现二级飞片的超高速发射。我们应用 MFPPM 二维计算程序,对于两种厚度的钽飞片共计进行了 4 个模型的数值计算,给出了二级飞片的中心速度历史曲线和压力历史曲线,见图 4 和图 5。表 3 给出了在 2 μs 时刻 0.3 和 0.5 mm 钽飞片的中心速度和压力值。图 6 和图 7 分别给出了 0.3 和 0.5 mm 厚二级飞片 Lexan 和 TPX Buffer 模型计算的界面形状对比情况。

表 3 2 μs 时刻 0.3 mm(Case 1)和 0.5 mm(Case 2)钽飞片的中心速度和压力

Table 3 The center velocities and pressures of 0.3 mm**(Case 1)and** 0.5 mm**(Case 2) Ta flier at** $t=2$ μs

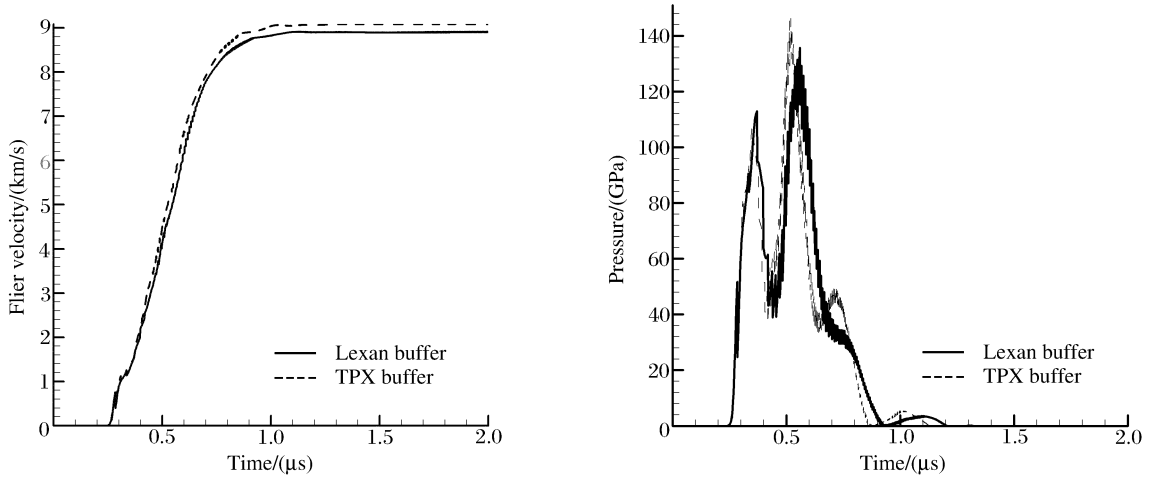
v/(km/s)				p/(GPa)			
Case 1		Case 2		Case 1		Case 2	
Lexan buffer	TPX buffer	Lexan buffer	TPX buffer	Lexan buffer	TPX buffer	Lexan buffer	TPX buffer
9.84	10.01	8.911	9.082	77.37	80.87	131.32	146.28



(a) Velocity (b) Pressure

图 4 0.3 mm 厚 Ta 飞片的中心速度和压力历史曲线

Fig. 4 The center velocity and pressure curve of the 0.3 mm Ta flier

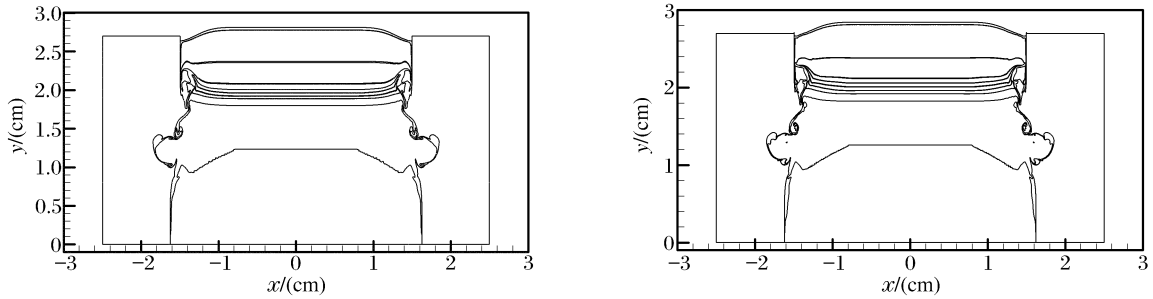


(a) Velocity (b) Pressure

图 5 0.5 mm 厚 Ta 飞片的中心速度和压力历史曲线

Fig. 5 The center velocity and pressure curve of the 0.5 mm Ta flier

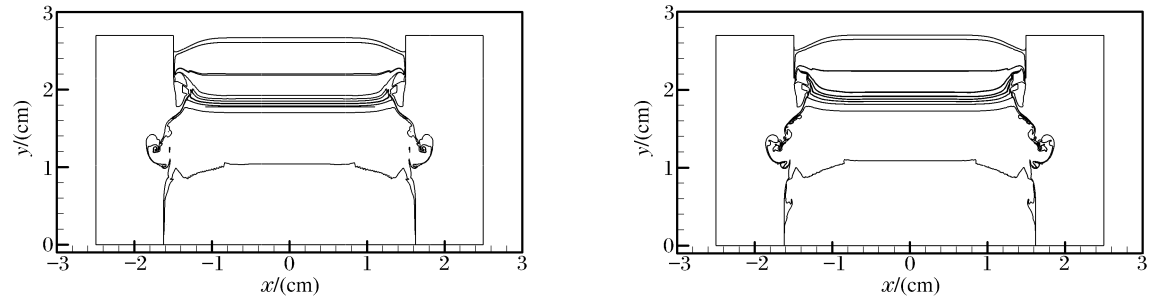
从计算结果可以看出,相对于 Lexan 材料,使用 TPX 做缓冲层后,0.3 mm 厚钽飞片的中心速度提高了 1.7%,中心压力提高了 4.5%;0.5 mm 厚钽飞片的中心速度提高了 1.9%,中心压力提高了 11.4%,说明缓冲层材料对二级飞片的速度和压力都有较大的影响。



(a) Lexan buffer　　(b) TPX buffer

图 6　2.0 μs 时刻 0.3 mm 厚二级飞片 Lexan 和 TPX Buffer 计算的物质变形情况

Fig. 6　Deformation of the materials at $t=2.0$ μs of 0.3 mm flier with Lexan or TPX Buffer



(a) Lexan buffer　　(b) TPX buffer

图 7　2.0 μs 时刻 0.5 mm 厚二级飞片 Lexan 和 TPX Buffer 计算的物质变形情况

Fig. 7　Deformation of the materials at $t=2.0$ μs of 0.5 mm flier with Lexan or TPX Buffer

5　结　论

(1) 应用 MFPPM 计算程序,以 TPX 为缓冲层材料,对于两种厚度的钽飞片,分别计算了 TPX 缓冲层材料厚度从 0.5～3.0 mm 变化时,二级飞片速度的变化情况,结果表明,当 TPX 缓冲层厚度取 1.3～1.5 mm 时,0.3 和 0.5 mm 两种厚度的钽二级飞片所获得的速度均比较大。

(2) 将缓冲层材料厚度取为 1.5 mm,采用 Lexan 和 TPX 两种缓冲层材料,计算了不同缓冲层材料对钽飞片超高速发射速度的影响,结果表明,使用 TPX 缓冲层材料可以获得较 Lexan 缓冲层材料更高的二级飞片中心速度和压力。

本工作得到的缓冲层材料及其厚度的选取对重材料钽二级飞片速度影响的结论,对超高速发射实验装置中缓冲层的设计具有参考意义。

References:

[1] Asay J R, Chhabildas L C, Furnish M D. The Use of High Velocity Launchers for Scientific and Engineering Studies [A]//Proceeding of the 18th International Symposium [C]. Sendai, Janpan, 1991: 103-111.

[2] Shen Q. Experiment Studies on the Quasi-Insentropic Compression Generating and Hypervelocity Launching via Flyers with Graded Wave Impendance [R]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 2004. (in Chinese)
沈　强. 利用阻抗梯度飞片实现准等熵压缩的相关研究及其超高速发射的实验探索 [R]. 绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所, 2004.

[3] Chhabildas L C, Dunn J E. An Impact Technique to Accelerate Flier Plates to Velocity over 12 km/s [J]. Inter J Impact Eng, 1993, 14: 121-132.

[4] Furnish M D, Chhabildas L C, Reinhart W D. Time-Resolved Particle Velocity Measurements at Impact Velocity of 10 km/s [J]. Inter J Impact Eng, 1999, 23: 261-270.

[5] Reinhart W D, Chhabildas L C, Carroll D E. Equation of State Measurements of Materials Using a Three-Stage Gun to Impact Velocities of 11 km/s [J]. Inter J Impact Eng, 2001, 26: 625-637.

[6] Tan H. Research of the America in High-Pressure Equation of the State [M]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 2002.
谭 华. 美国的高压物态方程研究 [M]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 2002. (in Chinese)

[7] Bai J S, Li P, Zhang Z J, et al. Application of the High-Resolution Godunov Method to the Multifluid Flow Calculations [J]. Chinese Physics, 2004, 13(12): 1992-1997.

[8] Bai J S, Li P, Tan D W. Simulations of the Instabilities Experiments in Stratified Cylindrical Shells [J]. Chinese Physics Letter, 2006, 23(7): 1850-1852.

[9] Blackbum D R, Vogler T J, Chhabidas L C. HVL_CTH: A Simple Tool That Simulates the Hyper-Velocity Launch of a Flyer Plate [R]. SAND 2003-0596, 2003.

[10] Chhabildas L C, Trucano T G, Reinhart W D, et al. "Chunk" Projectile Launched Using the Sandia Hypervelocity Launcher Facility [R]. SAND 94-127, 1994.

A Numerical Analysis of the Influence of Buffer Material on Tantalum Flier Plate Velocity in the Hypervelocity Launcher

BAI Jing-Song[1], SHEN Qiang[2], TANG Mi[1], HU Jian-Bo[1], LUO Guo-Qiang[2], TAN Hua[1], ZHANG Lian-Meng[2]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Buffer material plays an important role in the hypervelocity launching experiments. By using numerical calculations, the influence of TPX buffer material's thickness on high impedance tantalum flier plate's velocity is analyzed, and the optimal thickness of buffer material is also evaluated. For thickness of 0.3 mm and 0.5 mm tantalum flier plate, the relative error of tantalum flier plate's center velocity is about 5%～6% at different thicknesses of the TPX buffer materials. In order to compare the influence of different buffer materials on tantalum flier plate's velocity, the two-dimensional results of tantalum flier plate's center velocity and pressure histories are calculated at the same thickness of TPX and Lexan buffer.

Key words: hypervelocity launcher; numerical simulation; buffer