

加载波前沿宽度对铝表面微射流的影响*

王 裴[†] 邵建立 秦承森

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)
(2008 年 5 月 20 日收到, 2008 年 7 月 12 日收到修改稿)

利用光滑粒子流体动力学方法, 计算了金属表面沟槽在冲击下的微射流现象, 详细讨论了微射流对加载波前沿宽度的依赖性. 计算结果表明, 随加载波前沿宽度增加, 射流质量和头部速度都减小, 同时低速喷射物所占比例增大. 对结果分析得出, 微射流由沟槽斜面粒子在冲击加卸载后获得轴向速度, 并在对称轴附近碰撞形成, 射流体由沟槽斜面的金属薄层构成, 当加载波前沿变宽, 形成射流的金属层变小, 这是由于沟槽斜面粒子的碰撞速度降低, 碰撞角度增大, 部分粒子碰撞时不满足射流强度封锁条件, 而不再形成射流.

关键词: 微射流, 光滑粒子方法, 加载波前沿

PACC: 4775C, 4735

1. 引 言

冲击波从金属自由表面卸载时, 可在金属表面产生微喷射现象. 这一现象的研究对认识材料在高速碰撞或冲击等极端条件下的力学响应和破坏行为具有重要意义. 金属表面形成微喷射的影响因素较多, 机制复杂, 如缺陷形成的微射流、近表面空穴和杂质形成的喷射、近表面层的微层裂等. 目前, 对这一领域的理论研究还处于探索阶段, 相关文献报道较少. 部分研究表明, 在不同的材料状态和加载状态下, 形成喷射的主导机制各不相同. 在样品表面发生熔化之前, 微射流机制可能是形成喷射的主要物理机制之一, 值得深入研究.

针对微射流机制, Asay^[1, 2]利用铝材料沟槽样品, 实验研究了沟槽夹角对微射流总质量和质量速度分布的影响, 韩长生^[3]则从经典的定常射流理论出发, 提出了一个估算冲击载荷下楔形槽表面微射流射流的半经验解析公式, 陈军等^[4]采用分子动力学方法模拟了不同夹角情况下, 单晶铜的微观沟槽射流问题, 文献[5]中, 作者利用二维光滑粒子流体动力学程序模拟了沟槽微射流实验, 研究了喷射总量及最大速度与缺陷夹角的关系, 得到的规律与实验符合较好. 根据射流理论, 缺陷夹角、冲击波强

度、碰撞角等因素会对射流特性有影响.

金属表面微射流的一个显著特点是缺陷尺度小, 一般为微米量级. 而实际的冲击波具有一定的宽度, 在冲击波前沿宽度与缺陷深度尺度可比的情况下, 需要考察冲击波前沿宽度效应对微射流形成的影响. Asay^[6]在铝平面样品的微喷射实验中, 已经发现随着加载波前沿宽度的增加, 喷射量大致按指数规律减小. 对于表面缺陷平均尺度为 $5 \mu\text{m}$ 的样品, 在由冲击加载逐渐变到加载波前沿宽度 35 ns 时, 喷射量大约降低了 2 个数量级. 韩长生等^[7]利用铝材料沟槽样品, 进行的不同加载速率实验, 也得到了与 Asay 定性一致的结论. 而微射流机制中的加载波前沿宽度效应理论研究尚无文献报道.

本文基于光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH), 对不同加载速率下金属铝表面沟槽微射流进行理论研究. 对射流总量、头部速度以及射流的质量-速度分布等对加载波前沿宽度的依赖性作了详细分析, 相应结果与实验较为符合, 通过追踪粒子的动力学状态, 揭示了冲击波加载速率对微射流影响的内在物理机制.

2. 数值模型

韩长生等^[7]采用斜波发生器技术, 研究了加载

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号:2007A09001)资助的课题.

[†] E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn

速率对沟槽微射流的影响. 斜波发生器实际上是具有反常压缩特性的材料, 在一定的压力范围内, 波速随压力的增大而减小, 因此, 冲击波在该材料内传播过程中, 波阵面将随传播距离增加而逐渐展宽. 沟槽微射流实验中, 在实验样品和飞片之间加入这种具有反常压缩特性的材料, 通过改变该材料的厚度, 可以在样品中获得不同前沿宽度的加载波形. 实验样品材料为铝, 其表面刻有平行沟槽, 沟槽深度约 $80\ \mu\text{m}$, 半角 45° , 沟槽中心间距约 $250\ \mu\text{m}$. 样品中加载压力峰值约 $18\ \text{GPa}$.

数值模拟模型如图 1. 自由面沟槽深度与夹角与实验相同. 计算模型尺寸为 $240\ \mu\text{m} \times 320\ \mu\text{m}$, SPH 粒子直径为 $0.067\ \mu\text{m}$, 总粒子数为 158520. 模型左右边界为周期边界条件, 底部施加速度边界条件, 如图 2. 初始时刻 ($t = 0$), 底部速度为 0; 随着时间增加, 底部速度与时间成线性关系逐渐增大; $t = t_1$ 时刻, 底部速度达到 V_{max} , 并一直保持不变.

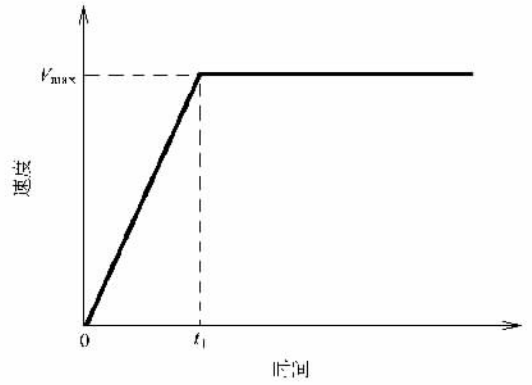


图 2 模型底部速度边界条件

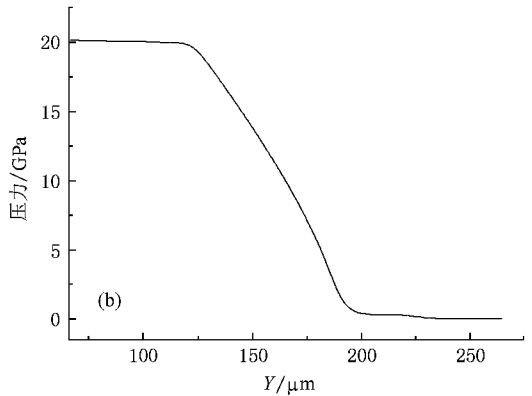
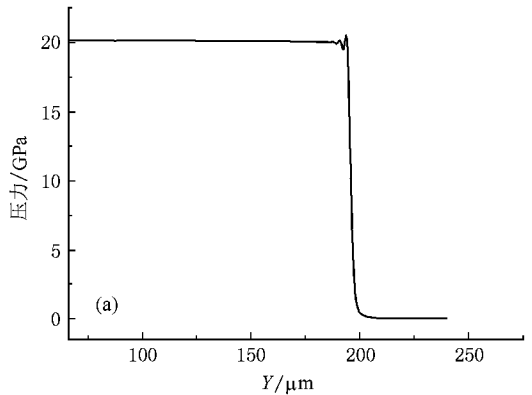


图 3 t_1 取不同值时样品中获得的加载波形 (a) $t_1 = 0$ 冲击加载 (b) $t_1 = 20\ \text{ns}$

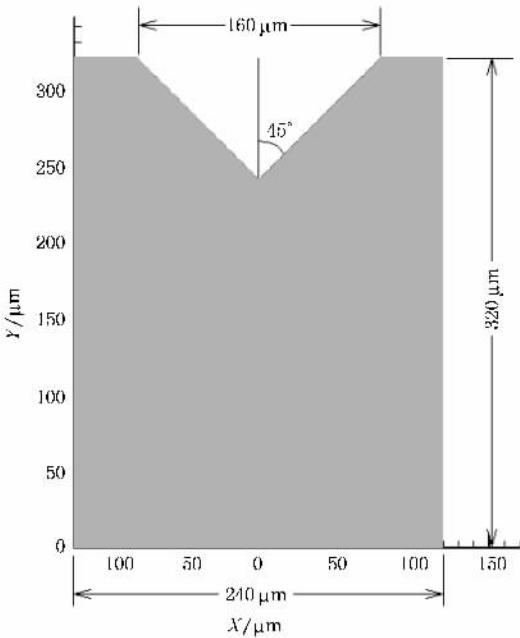


图 1 计算模型

数值模拟中, V_{max} 取 $1.1\ \text{km/s}$. 样品中获得的加载压力峰值约 $20\ \text{GPa}$. 通过改变 t_1 , 可以在样品中获得不同前沿宽度的加载波. 图 3 给出了 t_1 分别取 0 和 $20\ \text{ns}$ 时, 加载波到达沟槽底部时刻, 样品中的压力波形.

数值模拟程序采用二维 SPH 程序. SPH 方法属于无网格粒子类方法, 可以在 Lagrange 框架内很容

易地处理大变形问题. 关于 SPH 方法和程序的介绍可参考文献[5, 8, 9], 这里不再赘述. 本文的计算中, 铝材料模型取弹性理想塑性本构, 密度 $\rho = 2.78\ \text{g/cm}^3$, 剪切模量 $G = 27.6\ \text{GPa}$, 屈服强度 $Y = 0.2\ \text{GPa}$. 状态方程取多项式状态方程 $p = k_1 x + k_2 x^2 + k_3 x^3 + \gamma_0 E$, $k_1 = 0.7906$, $k_2 = 1.325$, $k_3 = 2.13$, $\gamma_0 = 2.0$.

3. 数值模拟结果

图 4 和图 5 给出了冲击加载条件下 ($t_1 = 0$) 和加载波前沿宽度约 30 ns 时, 表面沟槽形成微射流过程中, 几个不同时刻的图像.

本文计算了 $t_1 = 0, 20, 30, 40, 100$ ns 条件下形成的微射流过程, 统计了射流总质量、头部速度、和射流的质量 - 速度分布随加载波前沿宽度的变化.

图 6 和图 7 给出了数值模拟和实验获得的喷射系数和最大喷射速度随加载波上升沿时间的变化关

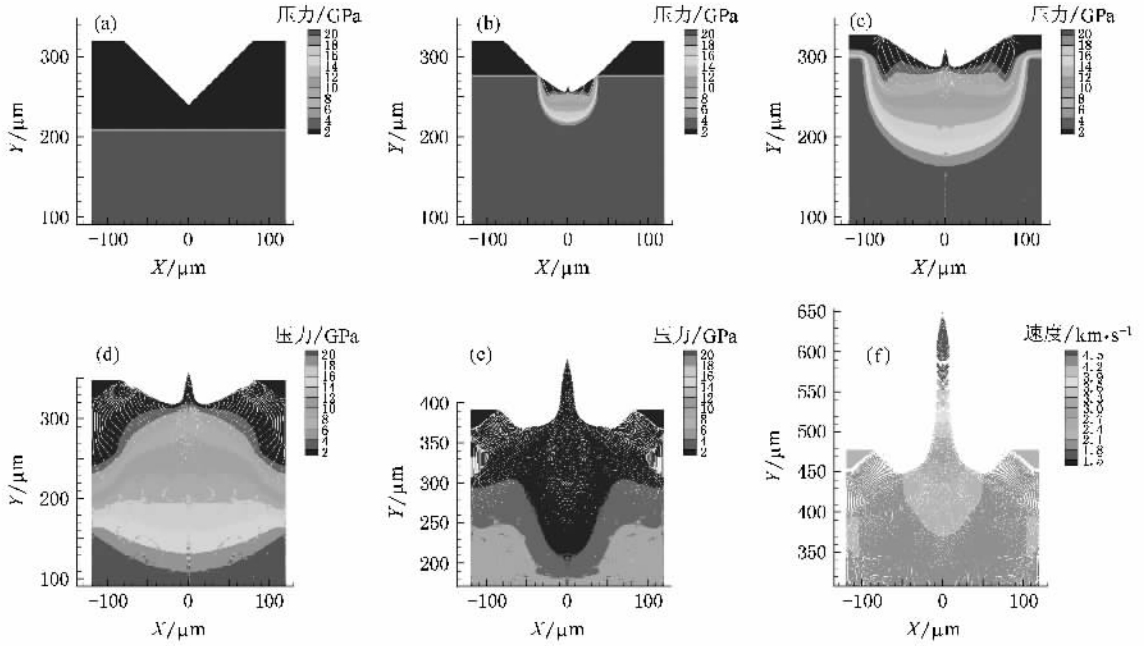


图 4 冲击加载下微射流的形成过程 压力峰值约为 20 GPa. (a) $t = 30 \mu s$, (b) $t = 40 \mu s$, (c) $t = 50 \mu s$, (d) $t = 60 \mu s$, (e) $t = 80 \mu s$, (f) $t = 120 \mu s$

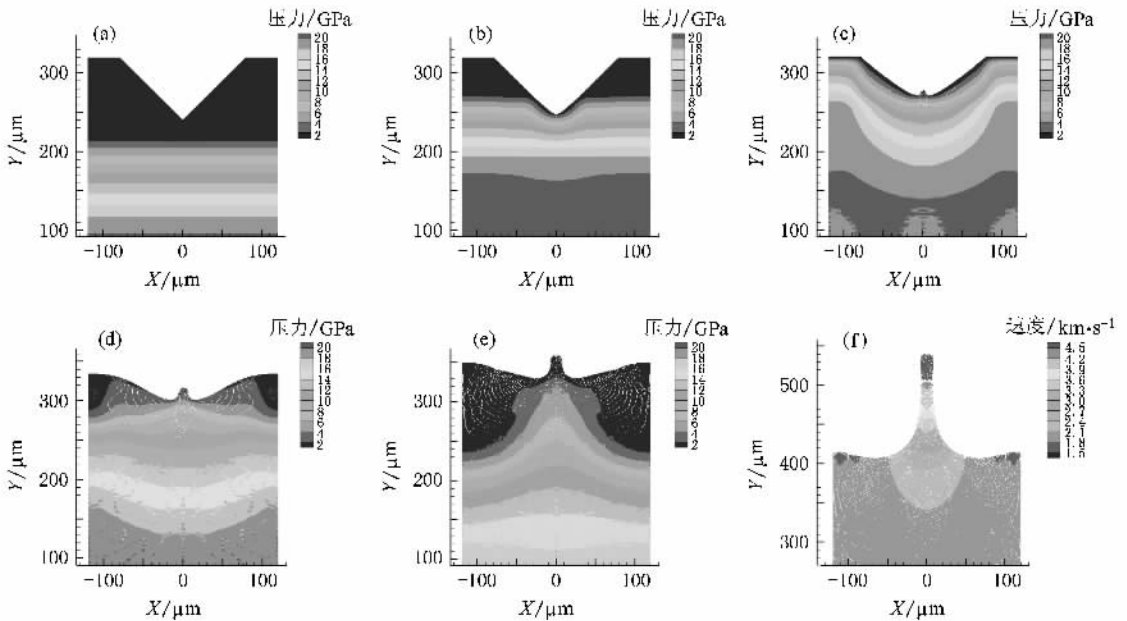


图 5 压缩波前沿宽度约 30 ns 时微射流形成过程 压力峰值约为 20 GPa. (a) $t = 40 \mu s$, (b) $t = 50 \mu s$, (c) $t = 60 \mu s$, (d) $t = 70 \mu s$, (e) $t = 80 \mu s$, (f) $t = 120 \mu s$

系,图中横坐标为加载波前沿时间宽度,纵坐标分别为喷射系数和最大喷射速度.图中三角形点为数值模拟结果,方形点为实验数据,曲线为实验结果的幂指数拟合.喷射系数 R 的定义是喷射物总质量与初始表面缺陷质量的比值 $R = M_{ej}/M_0$. 喷射系数反映形成射流能力的强弱,喷射系数越大,射流总质量越多.

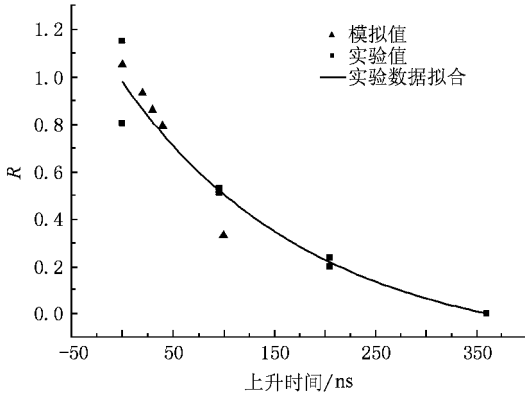


图6 喷射系数随加载波上升沿时间的变化

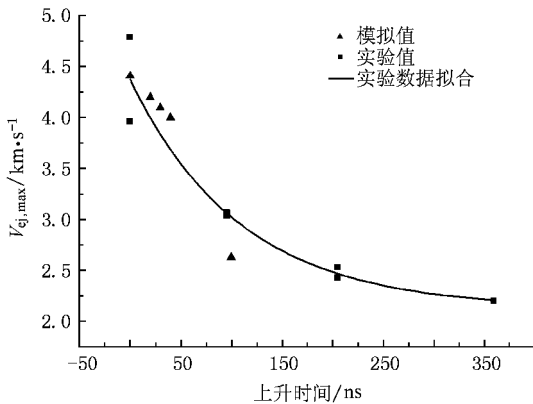


图7 最大喷射速度随加载波上升沿时间的变化

从图6和图7可以看出,数值模拟结果与实验的规律一致,在压力峰值和沟槽尺寸不变的条件下,喷射总质量与最大喷射速度都随着加载波前沿宽度的增大而减小.这说明随着加载波前沿宽度的增大,形成射流的能力逐渐减弱.

与实验相比,数值模拟得到的喷射系数下降更快一些.分析认为,这可能是由于数值模拟和实验对加载波上升沿时间宽度的标定位置不同造成的.由于铝材料中波速随着压力幅值的增加而增大,因此,压缩波在铝材料样品中传播时,其前沿宽度将逐渐减小.数值模拟中标定加载波上升沿时间宽度的

位置在计算模型的底部,距离样品自由面 $320 \mu\text{m}$.文献[7]中未明确说明加载波前沿时间宽度的标定位置,推测可能在铝样品底部,因此,当加载波到达铝样品自由面附近,其前沿宽度将窄一些.

图8是不同加载速率情况下的射流的质量-速度分布,图中横坐标为喷射物速度与自由面速度之比,纵坐标为每个速度区间的喷射量.

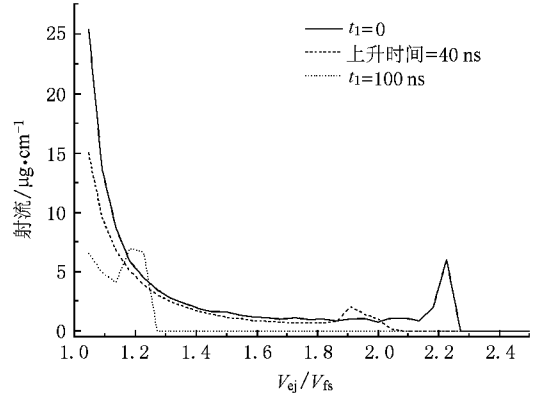


图8 不同加载速率情况下射流的质量-速度分布

从图8可以看出,射流的质量-速度分布随加载波前沿宽度的变化较大.当加载波前沿展宽时,低速喷射物所占比例加大.当加载波前沿时间宽度为 100 ns 时,绝大部分喷射物只比自由面速度高 30% .

4. 加载波前沿宽度效应分析

为了研究加载波前沿宽度对微射流影响的内在物理机制,我们对数值模拟结果进行进一步分析.由于SPH方法属于拉氏方法,可以跟踪材料单元,利用这个特点可以分析喷射粒子的运动轨迹,以及是由沟槽缺陷的哪些部分粒子形成射流.

图9给出了不同加载速率情况下,形成的射流图像.图中红色粒子的速度高于自由面速度,判断为喷射出的粒子.图10给出了图9中形成射流的粒子在沟槽缺陷的初始位置.

图9和图10的第一幅图对应冲击加载情况($t_1 = 0$),从图中可以看出,形成射流的粒子基本上来源于沟槽壁面,具有一定的厚度,形状与聚能罩相似.这说明微射流的形成机制是冲击波从沟槽壁面卸载,壁面附近物质单元受加速,在对称轴附近碰撞形成.韩长生曾将具有薄金属衬套罩的聚能装药射流理论,类推到这种冲击波与楔形槽自由面相互作用

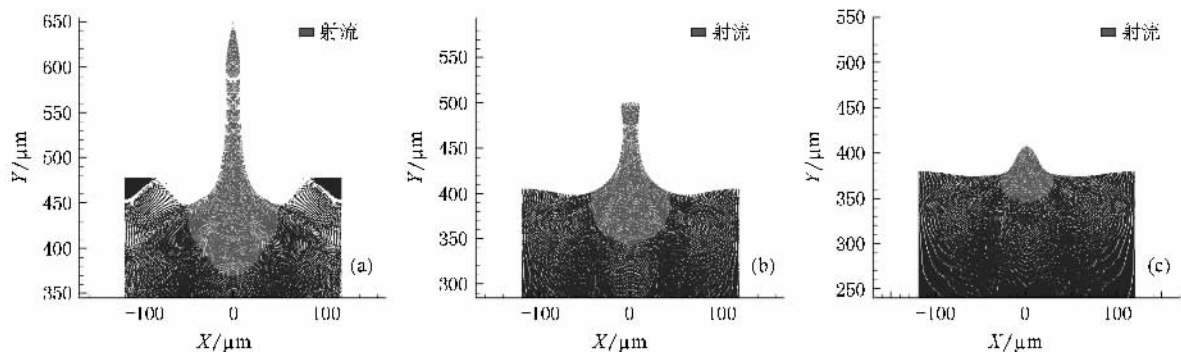


图 9 不同加载速率情况下形成的射流图像 (a)冲击加载条件, $t_1 = 0$ (b) $t_1 = 40$ ns (c) $t_1 = 100$ ns

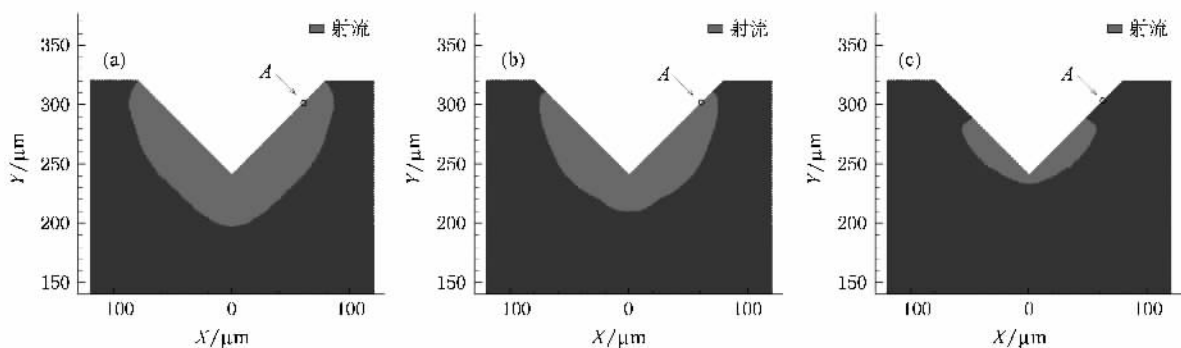


图 10 不同加载速率下形成射流的粒子在沟槽缺陷的初始位置 (a)冲击加载条件, $t_1 = 0$ (b) $t_1 = 40$ ns (c) $t_1 = 100$ ns

产生射流的问题,定义了“等效聚能罩厚度”.从本文的数值模拟来看,这种类比是近似成立的,只不过这里的“聚能罩”仅是形成射流的粒子,不包括形成杆体的部分,并且“聚能罩”并非等厚度分布,而是底部较厚,越靠近自由面越薄.

从图 9 可以看出,随着加载速率的降低,射流强度越来越弱,并且低速部分所占比例越来越高.对应于图 10,可以发现形成射流的沟槽壁面厚度逐渐变薄,并且高度逐渐减小,当加载波上升沿时间达到 100 ns 时(图 10(c)),沟槽壁面上部(靠近自由面)的粒子没有形成喷射.

我们追踪了沟槽壁面 A 位置处一个粒子在不同加载速率条件下的运动轨迹以及速度、密度等物理量随时间的变化,图 10 中标明了 A 点的位置.图 11 是不同加载速率下该粒子的运动轨迹,粒子上的箭头方向为速度方向,箭头长短代表速度大小.从图中可以定性地看出,随着加载速率的降低,粒子获得的速度降低,碰撞角增大,碰撞产生的压力也会降低,因此射流强度会减弱.

通过粒子速度和密度变化曲线,可以进行定量分析.图 12 是不同加载速率下 A 粒子水平速度 U_x

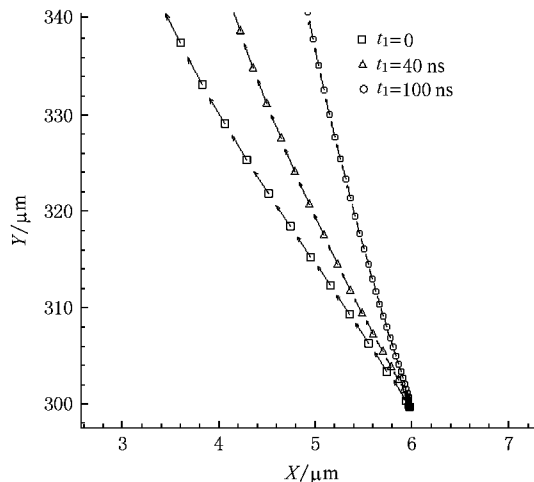


图 11 不同加载速率下沟槽表面 A 处一个粒子的运动轨迹

与垂直速度 U_y 随时间的变化曲线,图 13 是不同加载速率下 A 粒子密度随时间变化曲线.

图 12 中粒子水平速度 U_x 的绝对值最大点对应发生碰撞的时刻,从图中可以看出,随着加载波前沿阵面的展宽, A 粒子发生碰撞的时间逐渐推后,并且水平碰撞速度绝对值逐渐减小.不同加载速率下,

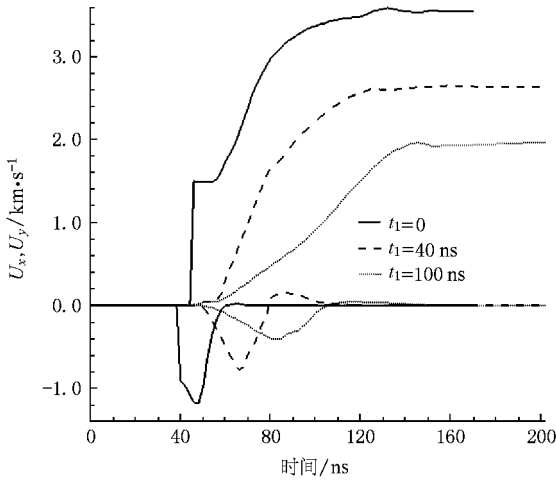


图 12 不同加载速率下 A 粒子速度 U_x 和 U_y 随时间变化曲线

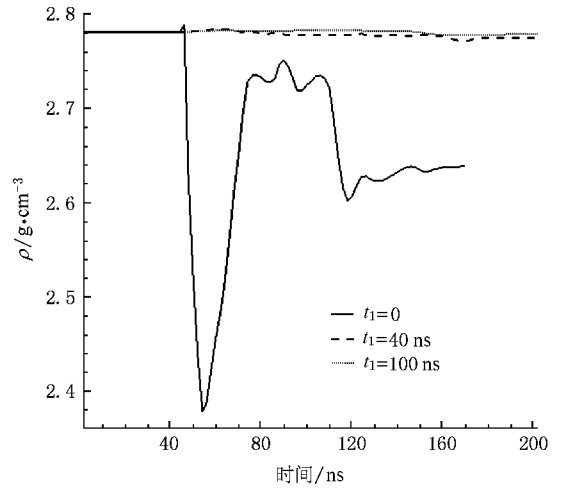


图 13 不同加载速率下 A 粒子密度 ρ 变化曲线

A 粒子发生射流碰撞的时间、水平碰撞速度绝对值、以及碰撞时刻粒子密度等物理量列在表 1。

料强度。根据表 1 的计算结果,当加载波前沿时间宽度为 100 ns 时,壁面 A 位置附近粒子不满足强度封锁条件,不能够形成射流。

表 1 不同加载速率下 A 粒子射流碰撞时刻相关物理量值

	碰撞时刻 ns	水平速度 绝对值/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\frac{1}{2}\rho u_x^2$ GPa
冲击加载 ($t_1 = 0$)	48	1.2	2.4	1.7280
$t_1 = 40$ ns	67	0.7	2.78	0.6811
$t_1 = 100$ ns	85	0.4	2.78	0.1251

根据定常射流理论,形成射流必须满足强度封锁条件

$$\frac{1}{2}\rho U_x^2 = \frac{1}{2}\rho U_n^2 \cos^2 \beta > Y_0,$$

式中 ρ 是碰撞时刻材料密度, U_x 是粒子水平速度, U_n 是垂直于斜面的粒子速度, β 是碰撞角, Y_0 是材

5. 结 论

本文利用 SPH 方法,研究了加载波前沿效应对铝表面沟槽形成微射流的影响,得到如下结论:

- 1) 加载波前沿宽度的增大导致射流总质量和头部速度都逐渐减小,同时低速喷射物所占比例逐渐增大,与实验结果基本一致;
- 2) 微射流由沟槽斜面粒子在对称轴附近碰撞加速形成,射流体来源于沟槽壁面薄层;
- 3) 加载波前沿展宽使射流质量减少的原因是沟槽壁面的部分粒子不再满足射流强度封锁条件。

[1] Asay J R 1976 *Material Ejection from Shock-Loaded Free Surface of Aluminum and Lead*, Sandia Laboratories, SAND76-0542
 [2] Asay J R 1978 *A Model for Estimating the Effects of Surface Roughness on Mass Ejection from Shocked Materials*, Sandia Laboratories, SAND78-1256
 [3] Han C S 1989 *Chin. J. High Press. Phys.* **3** 234 (in Chinese) [韩长生 1989 高压物理学报 **3** 234]
 [4] Chen J, Jing F Q, Zhang J L, Chen D Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2386 (in Chinese) [陈 军、经福谦、张景琳、陈栋泉 2002 物理学报 **51** 2386]
 [5] Wang P, Qin C S, Zhang S D, Liu C 2004 *Chin. J. High Press.*

Phys. **18** 149 (in Chinese) [王 裴、秦承森、张树道、刘 超 2004 高压物理学报 **18** 149]
 [6] Asay J R 1977 *Effect of Shock Wave Risetime on Material Ejection from Aluminum Surface* Sandia Laboratories, SAND-77-0731
 [7] Han C S, Jing F Q, Ding J, Zhang W P, Chen S H, Lu J D 1989 *Chin. J. High Press. Phys.* **3** 97 (in Chinese) [韩长生、经福谦、丁 、张文平、陈森华、陆景德 1989 高压物理学报 **3** 97]
 [8] Monaghan J J, Gingold R A 1983 *J. Comput. Phys.* **52** 374
 [9] Libersky L D, Petschek A G 1990 *Lecture Notes in Physics* **395** 248

Effect of loading-wave-front width on micro-jet from aluminum surface^{*}

Wang Pei[†] Shao Jian-Li Qin Cheng-Sen

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

(Received 20 May 2008 ; revised manuscript received 12 July 2008)

Abstract

With smoothed particle hydrodynamics , we calculate the formation of micro-jet from the groove of metal surface , and reveal the dependence on the width of loading wave front . The calculated results show that , with the decreasing loading speed , both the mass and the front velocity of ejection decrease , and the mass fraction with low velocity increases . We draw the conclusion that the formation of micro-jet is a result of the particles near the groove acquiring axial velocity and impacting at the axis , and the efflux derives from a layer near the groove . The thin layer becomes smaller when widening the wave front , which is because some particles can no longer satisfy the lock condition of jet strength with the decreasing impact velocity and the increasing impact angle , and then can jet no more .

Keywords : micro-jet , smoothed particle hydrodynamics , loading wave front

PACC : 4775C , 4735

^{*} Project supported by the Foundation for Development of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2007A09001).

[†] E-mail : wangpei@iapcm.ac.cn