

沟槽角度对金属表面微射流性质的影响

王裴[†] 邵建立 秦承森

(北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室, 北京 100094)

(2012年5月3日收到; 2012年6月19日收到修改稿)

基于光滑粒子流体动力学方法, 数值模拟了冲击加载下不同金属表面沟槽微射流现象, 重点分析了微射流头部速度及其分布随沟槽角度的变化规律. 研究发现, 喷射系数在沟槽半角为 45° 附近达到最大, 随着角度的增加或减小喷射系数均较小; 而最大喷射速度随沟槽角度的增加近似成线性减小变化. 详细分析了不同角度沟槽诱发微射流的物质来源变化及其经历的动力学过程, 发现随着沟槽夹角增加, 射流物质来源由沟槽两侧逐步向沟槽底部过渡, 当沟槽半角在 45° 附近, 形成射流的物质在沟槽底部和两侧近似均匀分布.

关键词: 微射流, 冲击, 光滑粒子

PACS: 47.15.Uv, 62.50.Ef, 47.11.-j

1 引言

当冲击波从金属自由表面反射时, 金属表面可发生微喷射现象^[1]. 这是一种重要的表面破坏形态, 在冲击下界面混合问题研究中占有重要地位, 因此自发现以来便引起人们的极大关注^[2-5]. 已有实验和理论研究均表明, 金属表面形成微喷射的影响因素较多, 机理复杂, 如缺陷形成的微射流、近表面空穴和杂质形成的喷射、近表面层的熔化破碎等.

经过机加工后的金属表面一般并非为理想平面, 而是具有大量的微缺陷, 冲击加载下这些微缺陷可能诱发微射流机理, 成为喷射物的主要来源之一. 多年来, 人们对微缺陷喷射陆续开展了大量的实验和理论研究. 实验方面, 20世纪70年代以来, 美国 Asay, Zenller 等^[2-5] 分别开展了铝、铅、锡等多种样品的微喷射实验研究, 获得了系列规律性认识. 理论方面的报道相对较少, 其中国内的韩长生^[6] 基于定常射流理论, 提出了一个估算冲击载荷下楔形槽表面微射流量的半经验解析公式. 与此同时, 国内外陆续开展了微喷射现象的数值模拟研究, 如在微观尺度对微喷射物理图像的模拟和机理

分析^[7-9]. 近期, 我们模拟了较宽压力范围内金属铝表面微射流现象, 分析了熔化前后微喷系数和喷射物形态的变化规律^[10]. 基于光滑粒子流体动力学方法, 开展了微射流宏观动力学效应研究, 数值模拟可以获得与实验结果接近的喷射物总质量和最大速度^[11]; 在此基础上, 进一步研究获得了微射流对加载波前沿宽度的依赖性关系, 发现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^[12].

本文在前期工作的基础上, 针对不同初始角度沟槽的微射流现象进行了系列模拟分析, 获得了相同冲击压力下喷射头部速度和微射流质量与沟槽角度的变化规律, 通过粒子追踪的方法, 讨论了不同角度沟槽诱发微射流的物质来源变化及其经历的动力学过程.

2 模型与方法

经过车削加工后金属材料, 其表面微缺陷形状通常为周期性 V 形沟槽结构^[5], 沟槽深度、夹角等随机加工参数的改变而变化. 本文主要通过铜和铅两种金属来考察沟槽夹角对微射流的影响, 计算模

[†] E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn

型如图 1 所示: 样品高度 $H = 40 \mu\text{m}$, 表面沟槽深度 $D = 10 \mu\text{m}$, 半角 α 范围为 $15^\circ\text{--}80^\circ$, 相应的宽度 L 的取值范围为 $60\text{--}120 \mu\text{m}$. 令模型以一定初始速度 u_0 向下撞击固壁, 实现向上传播的冲击波加载; 根据冲击雨贡纽关系可通过调整撞击速度来获得所需冲击压力; 计算过程中, 含沟槽表面设为自由边界, 两侧设为反射边界.

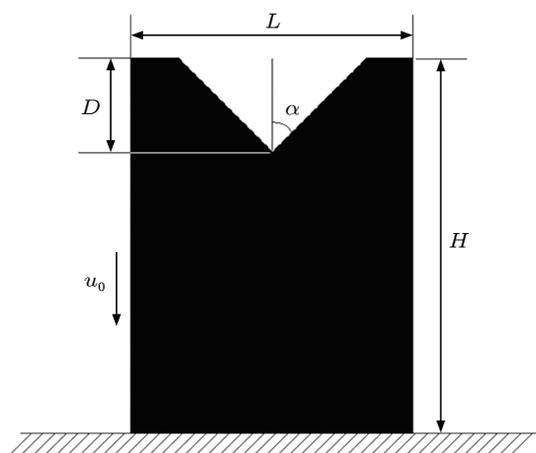


图 1 计算模型

数值模拟采用自行编制的二维光滑粒子 (SPH) 流体动力学程序 [11,12], 利用无网格粒子方法的特点, 可以在拉格朗日框架内计算表面射流的大变形过程; 并通过追踪粒子, 可对微射流物质来源及其质点的动力学过程进行分析.

本文的模拟中, 采用 Steinberg-Guinan 本构模

型 [13] 和金属多项式状态方程, 具体如下 (相关参数见表 1):

剪切模量

$$G = G_0 \left[1 + bp \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} - h(T - 300) \right],$$

屈服强度

$$Y = Y_0 (1 + \beta \varepsilon^p)^n \left[1 + bp \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} - h(T - 300) \right],$$

$$Y_0 (1 + \beta \varepsilon^p)^n \leq Y_{\max},$$

粒子温度

$$T = \left(\frac{E}{\rho_0} - \varepsilon_0 \right) / 3R,$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{00} + \varepsilon_{01}x + \varepsilon_{02}x^2 + \varepsilon_{03}x^3 + \varepsilon_{04}x^4,$$

熔化温度

$$T_m = T_{m0} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{2/3} \exp [2\gamma_0 (1 - V)],$$

若 $T > T_m$, 则 $Y = G = 0$,

状态方程

$$p = k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \gamma_0E,$$

其中, $x = 1 - \rho_0/\rho$, 当 $x < 0$ 时, $k_2 = 0$; E 为单位初始体积内能; k_1, k_2, k_3, γ_0 为给定参数.

断裂处理: 当粒子的拉应力达到断裂强度时 (铜 -0.5 GPa , 铅 -0.2 GPa), 将粒子的应力置零, 并从此不能再承受负压.

表 1 相关材料参数

	Y_0	Y_{\max}	β	n	b	h	T_{m0}	μ_0	ρ_0	γ_0
铜	1.2×10^{-3}	6.0×10^{-3}	3.6×10	4.5×10^{-1}	3.0	3.8×10^{-4}	1790	0.477	8.93	1.99
铅	8.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}	1.1×10^2	5.2×10^{-1}	14	1.2×10^{-3}	2740	8.6×10^{-2}	11.35	2.77
	k_1	k_2	k_3	ε_{00}	ε_{01}	ε_{02}	ε_{03}	ε_{04}		
铜	1.386	2.749	5.113	-1.178×10^{-3}	-2.344×10^{-3}	7.529×10^{-2}	1.526×10^{-1}	2.190×10^{-1}		
铅	4.774×10^{-1}	7.329×10^{-1}	1.122	-3.612×10^{-4}	-1.0×10^{-3}	1.965×10^{-2}	3.966×10^{-2}	5.219×10^{-2}		

3 结果与分析

3.1 数值模拟图像

基于上述模型和数值方法, 选择高熔点金属铜和低熔点金属锡为样品, 开展典型冲击加载下不同角度的微射流过程模拟. 首先, 给出了金属铅不同角度的沟槽射流图像, 见图 2. 图中计算时刻

为 20 ns, 冲击压力为 30 GPa, 初始沟槽半角从左至右分别为 $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 80° . 图中结果显示, 在相同冲击压力下, 射流随着角度的增加而变粗; 并且, 半角 30° 和 60° 沟槽形成典型的射流图像, 半角 15° 沟槽则已出现明显的射流头部发散, 而半角 80° 沟槽射流则出现强度封锁效应 [12]. 与此同时, 我们给出高熔点金属铜的计算结果, 见图 3. 图 3 结果显示, 射流随着角度的变化特征更加明

显：与金属铅不同的是，金属铜的射流断裂时间明显提前，半角 15°—60° 沟槽的射流过程均已出现断裂现象，使得射流不再连续分布。

3.2 射流质量和头部速度

下面以金属铅的射流质量分布和头部速度变化来分析上述图像形成过程。图 4(a)—(c) 分别给出了沟槽半角为 30°, 15° 和 80° 时射流质量分布随时间的演化。图 4(a) 结果显示，半角 30° 沟槽在 20 ns 时形成射流锥形，当演化至 40 ns 时已形成典型的头部鼓包中间细长的射流图像；半角 15° 射流质量密度分布在 20 ns 时便出现头部鼓包，并在后续演化过程中由于射流的发散和断裂出现明显的振荡；而半角 80° 射流由于强度封锁至 50 ns 时仅形成射流的锥形，未出现头部鼓包的射流特征。图 5 中给出了不同沟槽角度射流头部速度的变化历史，图中结果显示，射流头部速度经过约 3 ns 内便加速至最大值，在后续演化过程基本保持匀速运动；头部最大速度形成时间随着角度的增加而有所增

加，如：半角 15° 沟槽射流头部最大速度形成时间为 1 ns，而半角 60° 沟槽射流头部速度形成时间增加至 3 ns。

在上述图像认识和射流规律分析的基础上，给出了微射流质量以及射流头部速度随沟槽夹角的变化关系，见图 6。图 6(a) 显示：金属铅和铜的喷射系数（射流质量与初始微缺陷质量之比）随沟槽夹角的变化规律相同，均在半角约 45° 时喷射系数最大，随着角度的增加或减小喷射系数均减小；在相同冲击压力 (30 GPa) 下，铅的喷射系数高于金属铜，在沟槽半角为 30°—45° 之间的喷射系数超过 1，而金属铜的喷射系数均在 1 以内变化，这是由于两种金属熔点不同所致，后者的射流形成过程中强度因素依然起着重要作用。图 6(b) 给出了最大喷射速度与自由面速度之比 (v_h/v_f) 随沟槽角度的变化，其结果显示，射流头部随着沟槽夹角的增加而减小，近似成线性变化规律，而金属铜的 v_h/v_f 值要高于铅（这与喷射系数比较恰好相反）；关于金属铜射流头部速度的计算结果与已有实验数据取得一致 [14]。

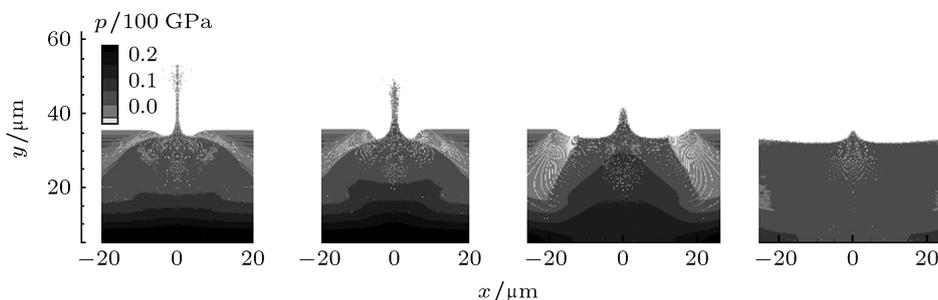


图 2 金属铅不同夹角沟槽射流图像

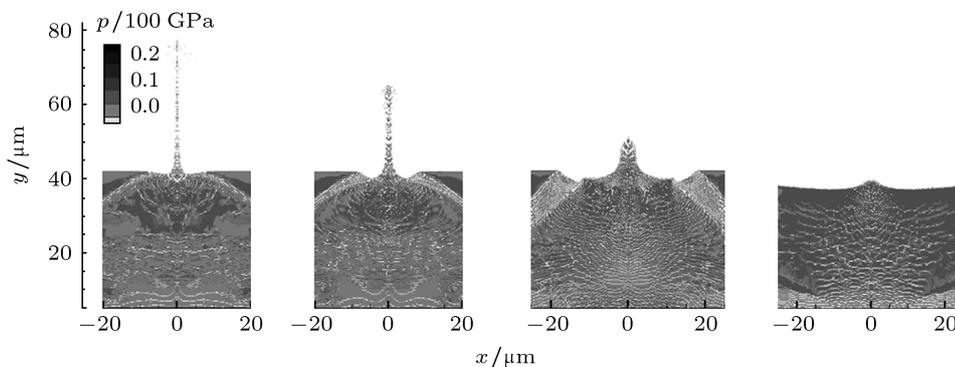


图 3 金属铜不同夹角沟槽射流图像

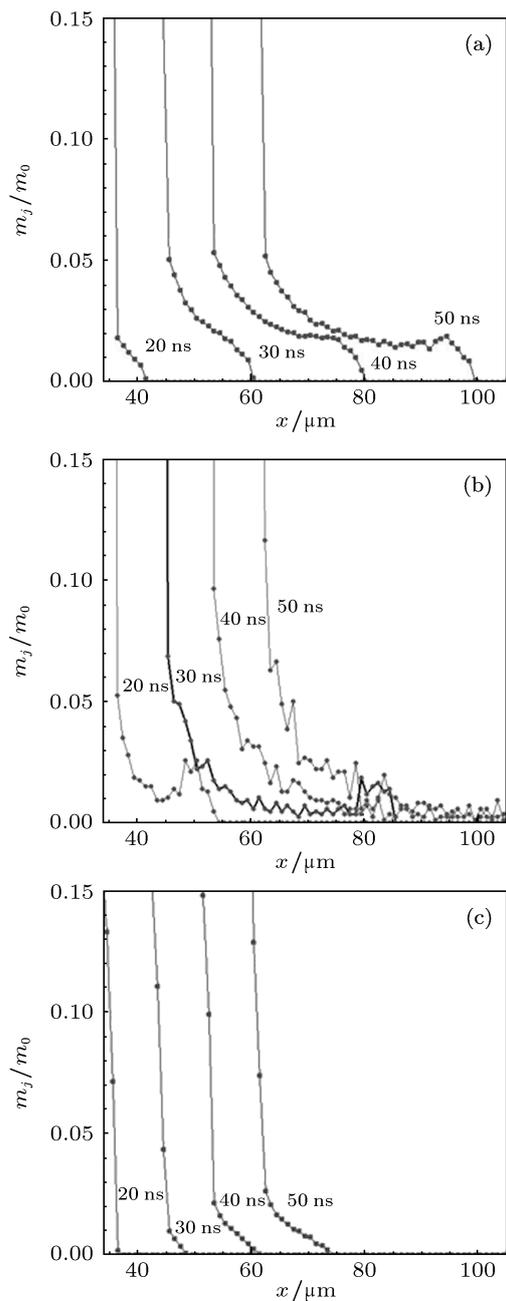


图4 不同夹角射流质量分布曲线

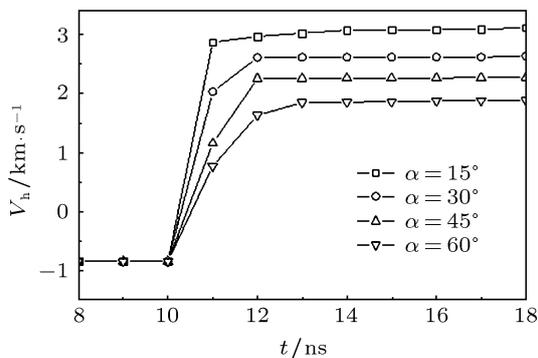


图5 不同夹角射流头部速度变化

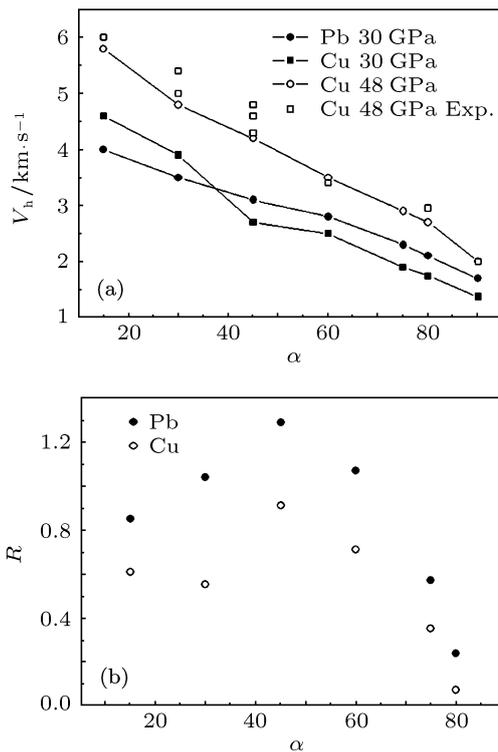


图6 喷射系数 (a) 及最大速度 (b) 随沟槽角度的变化

3.3 射流物质来源及其动力学过程

通过追踪粒子的运动轨迹, 进一步分析了射流形成的物质来源和动力学过程. 图 7 给出了金属铅不同沟槽角度的射流来源分布. 从图中结果可以看出, 当沟槽夹角较小时, 射流物质主要来源于沟槽两侧, 由表面至沟槽底部质量分布逐渐减少; 随着沟槽角度增加, 沟槽底部形成射流物质逐渐增加, 当沟槽半角为 45° 时, 形成射流的物质在沟槽底部和两侧近似均匀分布, 此时的喷射系数最大; 当沟槽角度继续增加, 射流底部质量继续增加, 而沟槽两侧质量明显减少, 尤其当沟槽半角增加至 80° 时, 射流仅来源于沟槽底部较小区域物质. 金属铜 (图 8) 的结果也显示了相同的变化规律, 只是由于强度效应, 金属铜的射流来源物质分布有些不规则.

根据上述微射流物质来源分析结果, 我们进一步给出了不同角度沟槽附近粒子的动力学演化过程. 以铅材料为例, 图 9 给出了半角 45° 沟槽表面附近 4 个粒子 (粒子初始位置见图 7) 的压力变化历史和粒子运动轨迹. 结果表明, 从沟槽底部向两侧形成喷射粒子的动力学过程发生明显变化. 对于沟槽底部粒子 (N1), 在冲击卸载过程并未迅速卸

载到零压, 而是维持了较长时间的高压 (7 ns 内压力仍在 10 GPa 以上, 图 9(a)), 在高压持续推动作用下, 粒子逐步加速, 其运动轨迹基本是垂直向上. 对于沟槽斜面附近粒子 (N2, N3, N4), 冲击波加卸载后, 粒子压力迅速下降为零, 同时获得斜向速度向中心对称轴运动, 在后续粒子推动以及碰撞作用下再次形成高压 (如 N3 从 t_1 至 t_2 时刻, t_1 为 12 ns,

t_2 为 20 ns), 此过程中, 粒子横向动能逐步转变为纵向动能, 其运动特征是从较强的横向运动逐步发生偏转形成纵向运动 (如 N3 在 16 ns 附近, 粒子纵向运动开始强于横向运动, 即 $dy/dx > 1$); 从 N2 至 N4 粒子碰撞压力和持续时间逐步减小, 发生偏转的时间依次滞后, 而偏转位置提前, 表明各粒子形成射流的能力依次减弱.

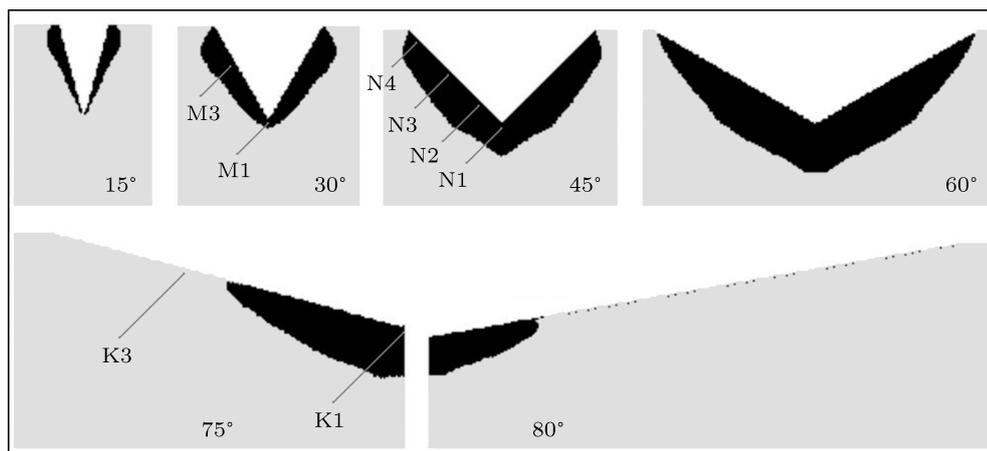


图 7 金属铅微射流物质来源分布

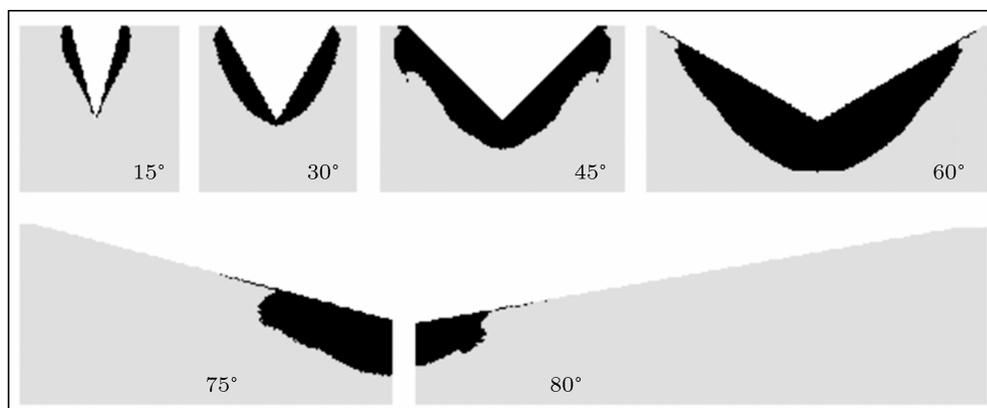


图 8 金属铜微射流物质来源分布

在上述讨论基础上, 比较了不同初始角度相应初始粒子的压力变化历史. 图 10(a) 和 (b) 分别给出了半角为 30°, 45° 和 75° 的底部粒子 (M1, N1 和 K1) 和沟槽侧面粒子 (M3, N3 和 K3) 的压力变化, 各个粒子初始位置如图 7 所示. 图 10(a) 中结果显示, M1 和 N1 均经历了大约 10 ns 的高压区, 尽管后者高压有所下降; 但 K1 的压力则发生了快速卸载, 其高压区宽度仅为 0.5 ns 内, 表明底部粒子形成

的射流已明显减弱. 图 10(b) 中结果显示, M3 和 N3 均经历了两次高压区 (主要源于冲击波加卸载和斜面粒子在对称轴的碰撞过程), 也就是说此时粒子经历了典型的射流动力学过程; 但 K3 则在冲击加卸载后压力一直为 0, 表明该粒子已不能够在对称轴发生碰撞, 最终没有形成射流. 这些过程的变化规律恰好反映了图 7 中射流物质来源的分布变化特征.

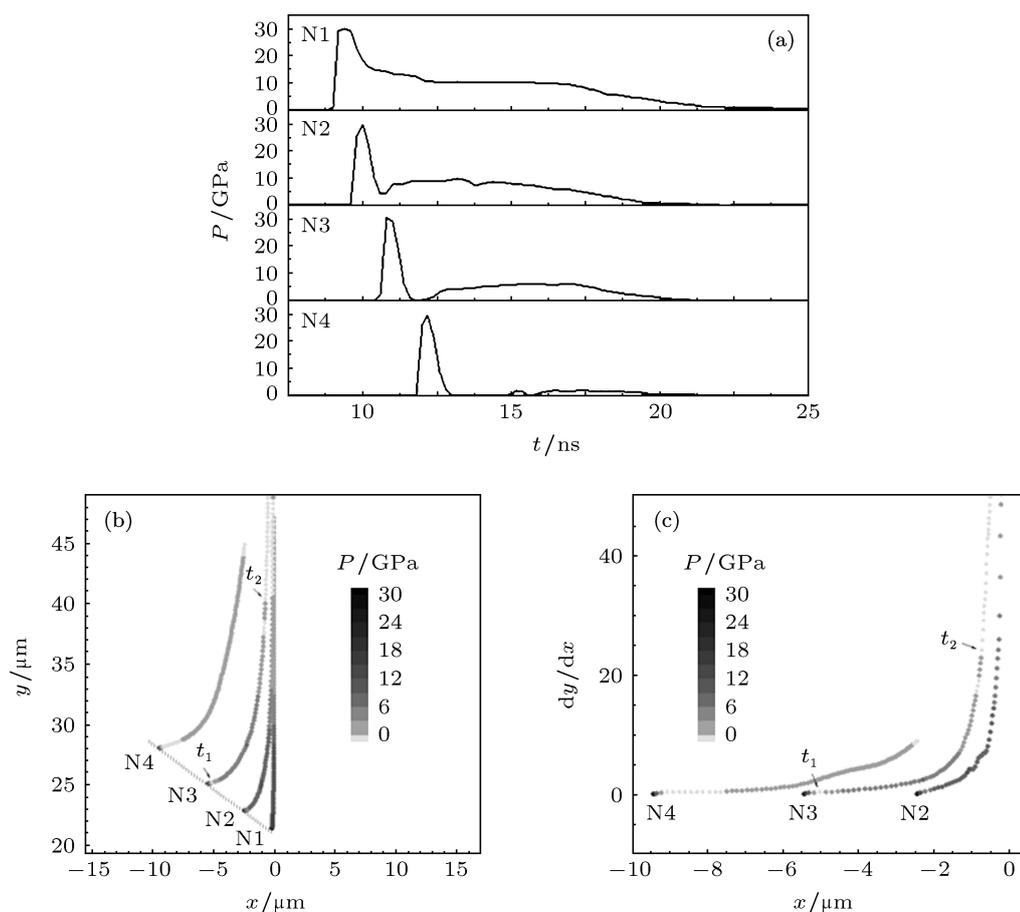


图9 沟槽表面附近粒子的力学量演化过程

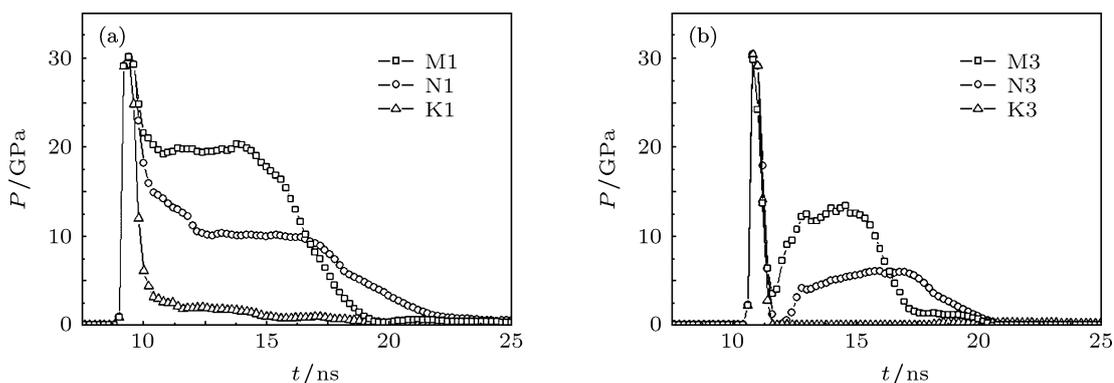


图10 不同角度粒子的压力曲线

4 结论

基于自行研制的 SPH 程序, 对金属铅和铜表面沟槽微射流现象进行了系列模拟研究. 研究结果给出了头部速度和喷射系数随沟槽夹角的变化规律. 结合数值模拟分析发现, 喷射系数在沟槽半角为 45° 附近达到最大, 随着角度的增加或减小喷射系数均减小; 而最大喷射速度随沟槽角度的增加近

似成线性减小变化, 其中, 金属铜射流头部速度与已有实验结果取得一致. 讨论了不同角度沟槽诱发微射流的物质来源变化, 发现随着沟槽角度的增加, 形成射流的物质分布逐步由沟槽两侧向沟槽底部转移. 动力学过程分析显示, 从沟槽底部至两侧获得的冲量减少、形成射流的能力减弱, 随着沟槽角度的增加, 相同深度的粒子已难以发生碰撞而无法形成射流.

- [1] Walsh J M, Shreffler R G, Willig F G 1953 *J. Appl. Phys.* **24** 349
- [2] Asay J R, Mix L P, Perry F C 1976 *Appl. Phys. Lett.* **29** 284
- [3] Asay J R 1976 *Material Ejection from Shock-Loaded Free Surface of Aluminum and Lead* Sandia Laboratories, SAND76-0542
- [4] Zellner M B, Grover M, Hammerberg J E 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 013522
- [5] Zellner M B, Meneil W V, Hammerberg J E 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 123502
- [6] 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]
- [7] 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]
- [8] Germann T C, Hammerberg J E, Holian B L 2004 *AIP Conference Proceedings* **706** 285
- [9] Chen Q F, Cao X L, Zhang Y, Cai L C, Chen D Q 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 3151
- [10] Shao J L, Wang P, He A M, Qin C S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184701 (in Chinese) [邵建立, 王裴, 何安民, 秦承森 2012 物理学报 **61** 184701]
- [11] 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]
- [12] Wang P, Shao J L, Qin C S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1064 (in Chinese) [王裴, 邵建立, 秦承森 2009 物理学报 **58** 1064]
- [13] Hu X M *Research on Constitutive Model and Spallation of Material under Shock Load*, GF-A, ZW-J-2002004 (in Chinese) [胡晓棉 冲击加载下材料本构及断裂研究 中国国防科学技术报告, GF-A, ZW-J-2002004]
- [14] Frachet V, Elias P, Martineau J 1988 *Shock Waves in Condensed Matter* (North-Holland, Amsterdam) p235

Groove angle effect on micro-jet from shocked metal surface

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

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

(Received 3 May 2012; revised manuscript received 19 June 2012)

Abstract

According to smoothed particle hydrodynamics, we investigate numerically the micro-jets from grooved surfaces of different metals, where the velocities of jet head and material sources are discussed in detail. Our simulation results suggest that the jetting factor reaches its maximum at the half angle 45 degree, and the jetting factor reduces with the increase or decrease of the groove angle; also, the maximum velocity of jet shows a linear reduction with the increase of groove angel. Those results are consistent with the corresponding experimental results. The jetting material source and its dynamical process are analyzed. It is shown that with the increase of groove angel, the jet material sources transfer to the bottom of groove from two-side layer, while at the groove angel near 45 degree, a homogenous source layer throughout the groove comes into being. Finally, we further explain the jetting dynamics from different grooves by particle trajectory and its mechanical quantity history.

Keywords: jet, shock, smoothed particle hydrodynamics

PACS: 47.15.Uv, 62.50.Ef, 47.11.-j

[†] E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn