文章编号：1001-1455(2014)04-0392-05 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0392-05

微喷混合中的颗粒破碎效应*

孙海权，王 裴，陈大伟，秦承森
（北京应用物理与计算数学研究所，北京 100094）

摘要：采用 TAB 模型，基于气-粒两相流程序对液态金属铅颗粒在氮气中的破碎过程进行了分析，获得了破碎特征时间、破碎后颗粒尺度等关键力学量；并对充气微喷射实验进行了数值模拟，考虑颗粒破碎效应后的模拟结果与实验结果较好符合。结果证实了充气条件下液态金属颗粒的再次破碎现象，可加深认识微喷混合的物理规律。

关键词：流体力学；颗粒破碎；TAB 模型；两相流；微喷混合；微喷射
中图分类号：O359.1 **国标学科代码**：1302534 **文献标志码**：A

当冲击波从金属表面反射时，金属表面将产生颗粒态微喷射物质[1-2]。气体环境下，这些微喷颗粒将进入气体，发生混合。微喷颗粒在气体中的混合演化是一个复杂过程，初步研究表明，颗粒尺度是影响微喷混合状态的重要因素[3]。当冲击压力足够高，金属表面发生熔化后，相应的微喷物质应为液态金属颗粒，气动力作用下，这些金属液滴在气场中可能进一步变形、破碎，颗粒尺度变小，影响微喷物质混入气体的深度以及与气体形成混合层的空间密度分布。因此，微喷颗粒在气体中的破碎研究对深入认识微喷混合物理过程具有十分重要的意义。

液滴破碎是一个复杂的过程。针对燃料液滴，已有了一批有价值的成果[4-6]，基于液滴破碎机制的基本理论假设，有各种破碎模型[7-8]。但对于金属液滴的破碎，相关研究很少，D. M. Oró 等[9]用实验研究了金属钨颗粒在氩气和氙气中的输运过程，指出充氙气条件下，微喷颗粒熔化为金属液滴，在气体作用下可能发生了破碎。金属液滴破碎的理论研究还未见报导。

本文中，选取 TAB(Taylor analogy breakup)破碎模型，对液态金属铅颗粒在气体中的破碎过程进行数值分析，获得破碎特征时间、破碎后颗粒尺度等关键力学量；并采用气体-颗粒两相流程序，数值模拟铅微喷物与气体的混合过程，比较是否考虑颗粒破碎效应对混合层厚度的影响；与实验结果对比，试图验证充气条件下液态金属颗粒的再次破碎现象。

1 颗粒尺度对运动的影响

这里，通过简化模型和解析方法，对平面流场条件下单个颗粒的运动特性做初步分析，以获得颗粒尺度对其运动影响的规律。

在充气情况下，冲击波出金属界面时会向气体中透射一个冲击波，对于平面加载条件，其流场近似为恒定流场。下面利用活塞推气体模型(见图 1)，分析颗粒运动的变化规律。

活塞初始静止，右边充气，$t=0$ 时活塞获得恒定速度 u_{c0}，在气体中产生向右传播的冲击波 D，气体波后流场为恒定流场，与平面冲击实验近似，$t=0$ 时在活塞壁面引入初速度 u_{p0}（$u_{c0}<u_{p0}<D$）的颗粒。

根据颗粒运动方程和阻力公式，经简单推导可得出颗粒速度和位移的变化关系[10]：

$$\begin{cases} u_p = u_{c0} + a_c t - a_c \tau + (u_{p0} - u_{c0} + a_c \tau) e^{-t/\tau} \\ x_p = u_{c0} t + a_c t^2/2 - a_c \tau t + (u_{p0} - u_{c0} + a_c \tau)\tau(1 - e^{-t/\tau}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：u_p、x_p 分别为颗粒速度与位置，u_{p0}、u_{c0} 分别为颗粒和活塞的初始速度，a_c 为活塞加速度（当 $a_c=0$

* **收稿日期**：2012-12-19；**修回日期**：2013-01-30
基金项目：中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2013A0201010)
作者简介：孙海权(1978—)，男，博士，副研究员。

时，为恒定流场），τ 为弛豫时间，$\tau=4\rho_p r_p^2/(18\mu)$。$\rho_p$ 为颗粒密度，r_p 为颗粒半径，μ 为气体黏性系数。

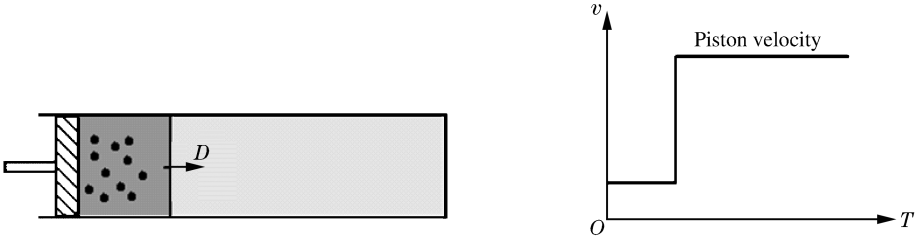

图 1 平面流场简化模型

Fig. 1 Simplified model of planar flow field

基于上述公式，对平面（恒定流场）条件下铅颗粒的运动特性进行解析分析。活塞的初速度取为 2.0 km/s，颗粒的初速度取为 3.0 km/s，流场是初始充气压力为 1.52 MPa 的氦气。图 2 给出了恒定流场中颗粒的减速运动情况。

从图中可以看出，颗粒速度及其与活塞相对距离都是以 e 指数形式变化；而颗粒尺度是影响变化规律的关键因素，颗粒越小，弛豫时间越短；当颗粒尺度从 1 μm 变化至 0.5 μm 时，相应速度的弛豫时间从 34 μs 减少至 8 μs。

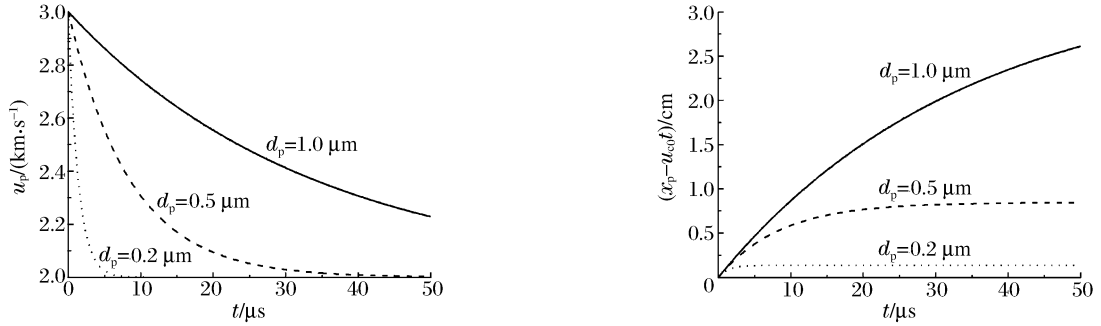

图 2 恒定流场中颗粒运动的解析分析

Fig. 2 Analysis of particles' movement in the constant flow field

2 铅液滴在气场中破碎的数值分析

目前，通过大量实验以及相关理论分析，已有 Taylor analogy breakup（TAB）、Reitz and Diwakar（RD）和 Rayleigh Taylor（RT）等液滴破碎模型。这里，选取应用比较广泛的 TAB 模型，对金属铅液滴在典型气场条件下的破碎过程进行数值分析。

比照弹簧系统，TAB 模型中建立了液滴变形控制方程，模型中包含了液滴的表面张力和黏性力项：

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}=\frac{C_F}{C_b}\frac{\rho_g}{\rho_p}\frac{u^2}{r_p^2}-\frac{C_k\sigma}{\rho_p r_p^3}y-\frac{C_d\mu_p}{\rho_p r_p^2}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

当 $y>1$ 时，颗粒发生破碎，破碎后的颗粒尺度由破碎前后颗粒能量守恒求得：

$$r_p'=\frac{r_p}{1+\dfrac{8K}{20}+\dfrac{\rho_p r_p^3(\mathrm{d}y/\mathrm{d}t)^2}{\sigma}\left(\dfrac{6K-5}{120}\right)} \tag{3}$$

式中：量纲一常数 C_b、C_F、C_k、C_d 分别为 1/2、1/3、8、5，$y=2x/r_p$，x 为液滴表面偏离平衡位置的位移，ρ_g 为流场密度，u 为流场和颗粒间的相对速度，σ 为液滴表面张力，μ_p 为液滴黏性，r_p' 为破碎后的液滴半径，K 是可调参数，默认值为 10/3。

采用 TAB 破碎模型，基于气-粒两相流程序[3]，对金属铅液滴在上述平面流场中的破碎现象进行模拟分析。图 3 给出了引入颗粒的初始状态（图中阴影部分）。横坐标为微喷颗粒与气体流场的相对速度，纵坐标为颗粒直径，图中同时给出了 $We=12$ 的等值线。液滴破碎主要与量纲一的 We 密切相关，

一般将 $We\approx12$ 作为判断液滴是否发生破碎的临界条件。由图中可以看到,大部分微喷颗粒的初始 We 大于 12,即在随后的运动中,大部分微喷颗粒都将发生破碎。

图 4 基于 2 个典型尺度(5、10 μm)给出了铅液滴在平面流场中的破碎时间和破碎后尺度,颗粒初始速度与活塞速度的比 λ 为 1.2～1.5。结果显示:颗粒破碎时间较短,在 1 μs 以内,高速微喷颗粒破碎后的尺度小于 1.0 μm;初始速度越大,颗粒破碎所需时间越短,破碎后的尺度越小。

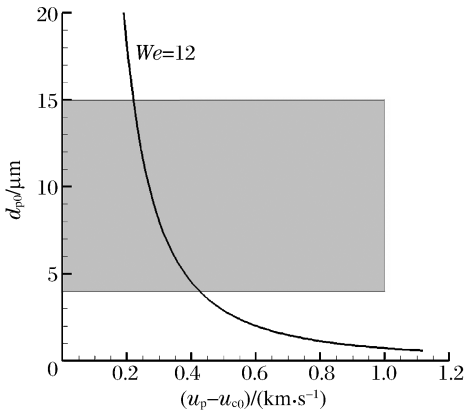

图 3 颗粒初始状态

Fig. 3 Particle initial state

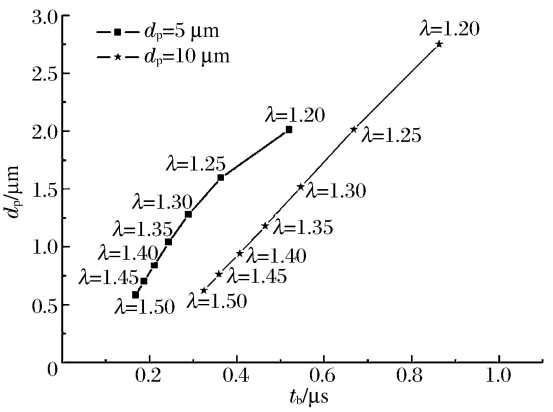

图 4 颗粒破碎时间和破碎后的尺度

Fig. 4 Breakup time and scale of particles

对于微喷颗粒的气动破碎现象,在 D. M. Oró 等[9]的实验中得到了初步验证。由于缺乏有效的测试手段,目前还无法进行直接观测,但微喷颗粒的破碎问题已逐步引起了重视。需要说明的是,本文中给出的颗粒破碎时间和尺度是基于 TAB 破碎模型的理论预测结果,而对微喷颗粒实际破碎情况的模拟程度有待于实验和理论工作的进一步验证。

3 平面充气微喷实验的数值模拟

对平面充气微喷射实验进行数值模拟,模型如图 5 所示。使用接触爆轰加载方式,在铅样品中获取约 45 GPa 的加载压力,样品表面为 1.52 MPa 的氦气;在冲击波出铅样品表面时刻引入初始微喷颗粒。计算中,将相应真空微喷射实验测量结果(质量-速度分布和颗粒度分布)作为初值条件引入气-粒两相流程序[11],参与计算。

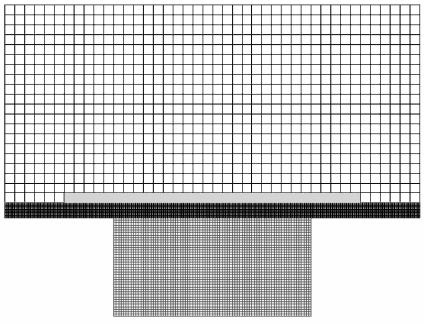

图 5 计算模型

Fig. 5 Numerical simulation model

图 6 给出了几个不同时刻、不考虑破碎和考虑破碎情况下的微喷颗粒与气体流场的混合演化图像。图中黑色部分为微喷颗粒,微喷颗粒上方浅色区域为气体波后流场,下方浅色区域为铅样品材料。由图中可以看到,微喷颗粒主要在气体波后流场中运动;不考虑破碎效应时的混合层厚度远大于考虑破碎效应的混合层厚度。这是因为破碎效应使颗粒尺度明显变小,小颗粒具有更好的流场跟随性,颗粒减速更快。

图 7 给出了统计得到的混合层头部位置随时间变化关系,其中★为实验测量结果[12]。如图所示,不考虑颗粒破碎时,计算得到的混合层头部运动位移大于实验测量结果,而考虑颗粒破碎后,二者符合较好,间接验证了微喷混合问题中颗粒破碎的发生。图 8 给出了混合层厚度随时间变化曲线。可以看到,混合层厚度在早期增加较快,随着时间的推移,颗粒在流场作用下不断减速,混合层厚度增加趋势逐渐变缓,18 μm 时,考虑颗粒破碎效应的混合层厚度为约 3.8 mm,不考虑破碎效应的混合层厚度为约 12.0 mm。

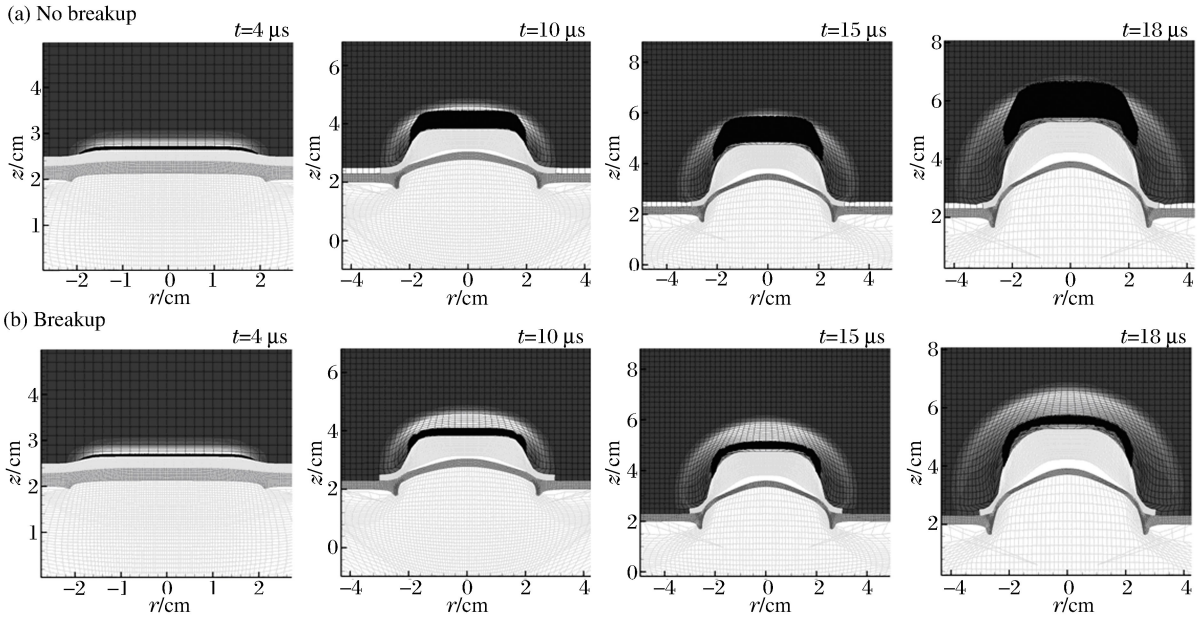

图 6　几个不同时刻的微喷混合图像

Fig. 6　Mixing images of different times

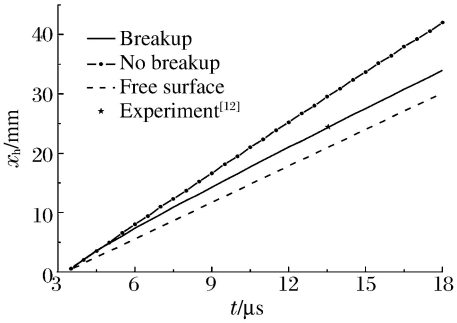

图 7　混合层头部位置随时间变化关系

Fig. 7　Mixing head position versus time

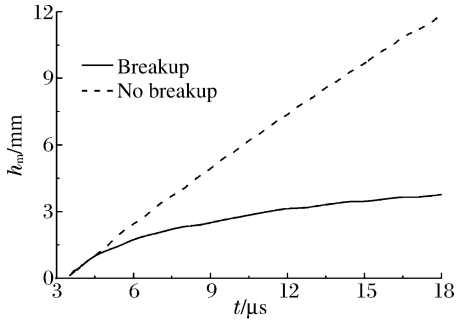

图 8　混合层厚度随时间变化关系

Fig. 8　Mixing thickness versus time

4　结　论

解析分析了颗粒在平面恒定流场中的运动特性，颗粒尺度是影响颗粒运动状态的一个关键因素；基于 TAB 破碎模型，初步模拟分析了铅金属液滴的破碎现象，大部分高速微喷颗粒在气动阻力作用下都将发生破碎，破碎后的颗粒尺度明显减小。

对平面充气微喷实验进行了模拟研究，考虑颗粒破碎后的模拟结果与实验结果较好符合，验证了微喷混合问题中颗粒破碎的发生；微喷颗粒与气体混合层厚度在早期增加较快，随着时间的持续增加趋势逐渐变缓。

对于微喷混合问题，颗粒破碎主要发生在微喷混合早期的几微秒时间内，显著改变了微喷颗粒的尺度分布，对后续的混合状态产生重要影响。这需要在以后工作中进一步研究。

参考文献：

[1]　Zellner M B, Mcneil W V, Hammerberg J E, et al. Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn samples[J]. Journal of Physics, 2008, 103(12): 123502.

[2]　Buttler W T, Oró D M, Preston D, et al. The study of high-speed surface dynamics using a pulsed proton beam[C]

//Elert M L, Buttler W T, Borg J P, et al. Shock Compression of Condensed Matters－2011. Chicago, USA, 2011:999-1002.

[3] 王裴,孙海权,邵建立,等.微喷颗粒与气体混合过程的数值模拟研究[J].物理学报,2012,61(23):234703.
Wang Pei, Sun Hai-quan, Shao Jian-li, et al. Numerical simulation on mixing process of ejecta and gas[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(23):234703.

[4] 刘静,许旭.超声速横向气流中燃料雾化的数值模拟[J].北京航空航天大学学报,2010,36(10):1166-1170.
Liu Jing, Xu Xu. Numerical simulation of atomization of liquid jet in supersonic cross flow[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010,36(10):1166-1170.

[5] Djavareshkian M H, Ghasemi A. Investigation of jet breakup process in diesel engine spray modeling[J]. Journal of Applied Sciences, 2009,9(11):2078-2087.

[6] Fakhari A, Rahimian M H. Investigation of deformation and breakup of a moving droplet by the method of lattice Boltzmann equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010,64(8):827-849.

[7] O'Rouke P J, Amsden A A. The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup[R]. SAE Technical Paper 872089,1987.

[8] Reitz R, Diwakar R. Structure of high-pressure fuel spray[R]. SAE Technical Paper 870598,1987.

[9] Oró D M, Hammerberg J E, Buttler W T, et al. A class of ejecta transport test problems[C]//Elert M L, Buttler W T, Borg J P, et al. Shock Compression of Condensed Matters－2011. Chicago, USA, 2011:1351-1354.

[10] 刘大有.二相流体动力学[M].北京:高等教育出版社,1993:55-60.

[11] 孙海权,王裴.微喷混合问题的初步研究[J].计算力学学报,2011,28(增刊):90-92.
Sun Hai-quan, Wang Pei. Research of shock induced matter ejection into gas[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011,28(suppl):90-92.

[12] 王裴,孙海权,邵建立,等.微喷颗粒与气体混合过程的数值模拟研究[J].物理学报,2012,61(23):234703.
Wang Pei, Sun Hai-quan, Shao Jian-li, et al. Numerical simulation on mixing process of ejecta and gas[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(23):234703.

Breakup of particles in ejecta mixing*

Sun Hai-quan, Wang Pei, Chen Da-wei, Qin Cheng-sen

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Ejecta mixing takes place at the meta-gas interface under strong shock, where the breakup of ejected particles is a very important affecting factor. By adopting Taylor analogy breakup (TAB) model, the breakup effect of the melted lead on its transportation in helium gas was analyzed. The calculation adopted the two-phase flow (including gas and particle) numerical program. From the simulation results, some significant mechanical quantities were obtained, including the breakup time and sizes of the ejected particles. Meantime, the lead ejecta mixing process was simulated considering that the particle breakup was consistent with the experiments. These results give some important references in understanding the process of ejecta mixing.

Key words: fluid mechanics; drop breakup; TAB model; two-phase flow; ejecta mixing; ejection

* Received 19 December 2012; Revised 30 January 2013
Corresponding author: Sun Hai-quan, sun_haiquan@iapcm.ac.cn

(责任编辑 丁 峰)