水射流辅助破岩机理研究 (2)
—— 水滴撞击

田方宝 *,1)　林　缅 †

*(中国科学技术大学力学与机械工程系，合肥 230027)

†(中国科学院力学研究所工程科学部，北京 100080)

摘要　利用 MSC.Dytran 中的具有强度的多材料欧拉网格模拟水滴和有限长连续射流对靶板 (岩石) 的高速冲击作用，研究了靶板破坏深度、破坏宽度与水滴初压力、速度、入射方向、板厚以及连续射流的密度等的关系及其物理意义. 用应力波理论来解释靶板的层裂现象，试图多角度分析射流破岩机理.

关键词　水滴，破坏深度，破坏宽度

STUDIES ON THE MECHANISM OF WATER JET-ASSISTED DRILLING TECHNOLOGY(2)——HIGH-SPEED DRIP IMPACTING WITH SOLID TARGET

TIAN Fangbao*,1)　LIN Mian†

*(Dep. of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230037, China)

†(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The dynamics of a single high-speed drip impacting with solid target are simulated by MSC.Dytran. The relations between the damage depth or damage width and the initial pressure, the velocity, the angle incidence of drips, the thickness of target are shown by curves, and the physical mechanism is explained. Hopkinson spallation is explained by using the theory of stress waves. The mechanism of water jet impacting rock is also discussed in this paper.

Key words drip, damage depth, damage width

水射流是由许多高速运动的气泡和水滴组成，因此把射流简化为单个高速气泡或水滴撞击靶板，建立水射流冲击岩石模型. 前一篇着重讨论了空化射流中高速气泡对固体表面的冲击破坏，本文将讨论高速水滴对靶板的冲击破坏情况.

1　水射流破坏机理分析

这里采用的数学模型与高速运动气泡撞击靶板的模型和靶体材料的选取完全和前一篇相同，所不同的是这里流体为高速运动水滴. 计算中水滴半径取为 0.02 m, 靶板尺寸为 1.0 m×1.0 m×0.2 m.

下面主要分析水射流破坏机理. 水射流破坏在不同阶段，所表现的机理不尽相同. 开始时，主要破坏模式有 3 种：压缩、拉伸和剪切破坏. 水滴撞击板的瞬间压力可用下式估计

$$p = \frac{\rho_s c_s \rho_0 c_0}{\rho_s c_s + \rho_0 c_0} v_i \tag{1}$$

其中，ρ_0, c_0 分别为流体的密度和速度，ρ_s, c_s 分别为靶板的密度和声速，p 为冲击压强，v_i 为冲击速度. 当 $\rho_s c_s \gg \rho_0 c_0$, 式 (1) 可以简化为 $p \approx \rho_0 c_0 v_i$, 水的密度约为 1 000 kg/m^3, 声速约为 1 450 m/s, 冲击速度约为 200~1 000 m/s, 于是，$p \approx 0.3 \sim 1.5$ GPa. 这个压力足以使大部分常规材料发生破坏. 同时，由于撞击点的坍塌，导致周围表面形成拉伸区和剪

2005-11-30 收到第 1 稿，2006-11-29 收到修改稿.

1) E-mail: tfbao@mail.ustc.edu.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

切区，这将可能导致材料的进一步破坏. 随后，由于应力波到达靶板后壁反射回来与入射波叠加，以及冲击面的反弹等均会形成拉伸区并导致拉伸破坏. 更有趣的是，实际材料将会在撞击时产生大量裂纹和微损伤，水沿着这些微细裂纹渗透进去，形成水楔并楔入裂隙，导致裂隙周围产生一定的应力场，在裂纹尖端产生应力集中，使得裂纹迅速发展和扩大进而导致岩石的拉伸破坏 —— 这就是水楔破岩理论的基础，这也是气泡和水滴冲击破坏机理不同的重要体现之一.

由以上分析可知，压力、速度及其入射角是影响靶体破坏的重要参数，另外水射流长短以及靶体厚度等等都会对靶体破坏带来影响，下面分别就这几方面进行讨论.

2 影响参数

2.1 压力

首先考察压力分别为 1×10^5 Pa, 60×10^5 Pa, 200×10^5 Pa, $2\,000\times10^5$ Pa 等 4 种情况，计算结果如图 1 所示，图中还给出了气泡空蚀结果的比较. 从图 1 中可以看出，总体上讲单个水滴初压对破坏深度和宽度的影响不是很明显. 当压力较小时 (小于 200×10^5 Pa)，压力的变化引起破坏深度和破坏宽度先减后增；之后，破坏随着压力的增大略有下降，破坏宽度略有上升. 事实上，由于水滴和气泡的可压缩性不同，高压水滴与高压气泡的破坏机理有本质区别. 作者根据计算结果经验地给出破坏深度和破坏宽度与速度关系的 Lorentzian 拟合曲线方程如下 (事实上速度、入射角、厚度对破坏的影响也满足这个关系)

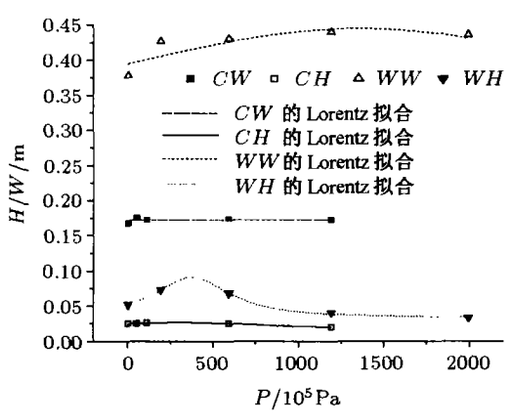


图 1 破坏深度、宽度与初压关系

(图中 C 代表气泡空蚀，W 代表水滴冲击)

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi}\frac{w}{4(x-x_c)^2+w^2} \tag{2}$$

其中，x 为变化参数 (如压力)，y 为破坏宽度和深度，A, x_c, w 和 y_0 为待定常数，由模拟实验结果确定. 对于破坏深度，有 $A = 49.639$, $x_c = 383.34$, $w = 539.48$, $y_0 = 0.032\,578$; 对于破坏宽度，有 $A = 1\,548.4$, $x_c = 1\,364.8$, $w = 4\,782.6$, $y_0 = 0.238\,80$.

2.2 速度

计算了速度为 100 m/s, 400 m/s, 800 m/s, 1 200 m/s 等 4 种情况. 由计算结果拟合出破坏深度、破坏宽度与速度关系曲线 (如图 2 所示). 对于破坏深度，有 $A = 755.34$, $x_c = 1937.1$, $w = 833.99$, $y_0 = -0.004\,458\,1$; 对于破坏宽度，有 $A = 19\,863$, $x_c = 897.71$, $w = 4\,220.2$, $y_0 = -2.418\,9$.

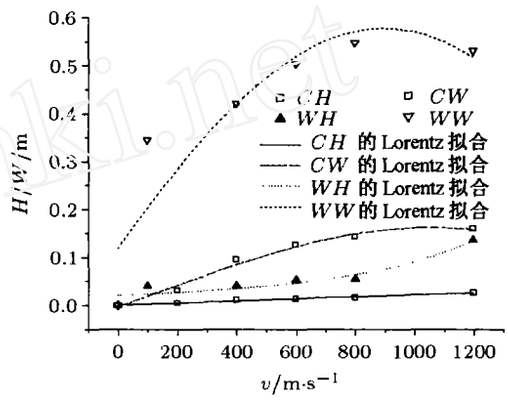


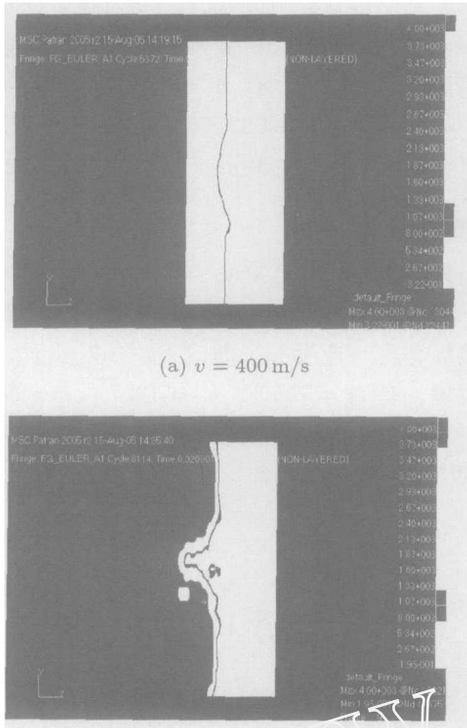
图 2 破坏深度、宽度与速度关系

从图 2 中可以看出，当速度 ≤ 400 m/s 时，随着水滴速度的增加，破坏面急剧增大，破坏深度变化比较缓慢. 这和能量分配是一致的. 水滴由于速度变大而增加的能量，如果增加破坏面而消耗的能量多了，则作用于破坏深度的能量就比较小. 当速度 > 400 m/s 时，破坏面增加的相当缓慢，此时破坏深度增加较快. 为何表面不再继续扩大而破坏深度随速度变化加快？当水滴冲击在板上，除了直接冲击压力外，在表面作用点较远的一个圆周范围内将会有一个拉伸区. 当破坏进行下去后，拉伸区将可能破坏，又形成新的拉伸区，但由于第 1 次破坏释放了一次弹性能，新的拉伸区的弹性能密度将减少. 如此循环，当深度到达一定程度时，新形成拉伸区的应力不足以使材料破坏时，破坏面将不再扩展，这时水滴增加的动能将较大程度地用于破坏深度上.

由计算结果可知，是否产生拉伸破坏 (层裂) 和水滴速度有密切联系. 当速度为 400 m/s 时，不发生

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

层裂现象 (如图 3(a)), 当速度较大时 (如 1 200 m/s) 发生层裂, 且速度越大, 层裂越严重 (如图 3(b)).



(a) $v = 400\,\mathrm{m/s}$

(b) $v = 1\,200\,\mathrm{m/s}$

图 3 速度对破坏的影响

为了说明层裂情况, 我们简单分析一下波的叠加情况 [2]. 反射波有两种: 加载波和卸载波 (如图 4(b), 图 4(d) 所示), 反射波与入射波叠加, 形成如图 4(c), 图 4(e) 所示. 加载波和入射波的叠加, 使压力峰值变得更大 (如图 4(c) 中的 p 点). 当卸载波与入射波相叠加时, 只要卸载波足够小, 将会把加载波的压力抵消并形成拉伸区 (如图 4(e) 中的 q 点). 如果 q 点的拉应力大于材料强度极限, 材料将会产生层裂现象. 至于层裂发生在什么位置, 则由波的性质和声速等来确定. 波在由撞击点向周围传播时, 由于材料的塑性变形等能量不断损失, 由于波是球面波, 其能量随着波的传播是发散的. 反射叠加后, 只要某点叠加应力达到材料强度, 材料就会破坏.

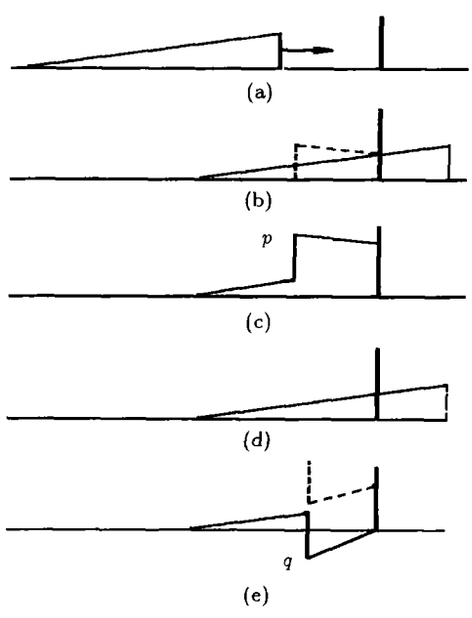


图 4 应力波反射叠加简图

2.3 入射角

为了研究入射角对破坏深度、宽度的影响, 这里计算了入射角分别为 0°, 16°, 32°, 40° 等 4 种情况, 得出破坏深度满足线性关系且变化趋势与气泡相似 (如图 5 所示). 对于破坏深度, 有 $A = 6.2556$, $x_c = 10.405$, $w = 64.971$, $y_0 = -0.005\,135\,3$; 对于破坏宽度, 有 $A = 307.29$, $x_c = 12.377$, $w = 178.29$, $y_0 = -0.531\,01$. 直线具有负斜率, 这是很容易理解的, 在速度大小不变的情况下, 角度大了, 垂直撞击速度就小, 其撞击深度将变小. 很显然, 当角度较小时, 曲线接近直线状. 当角度变大时, 垂直撞击速度变小, 但入射角的存在导致剪切撞击的出现, 这样削弱了因垂直撞击速度变小对破坏面积的影响, 于是在此阶段上破坏面积变化不大.

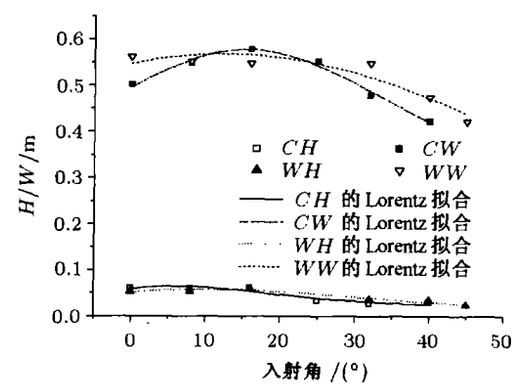


图 5 破坏深度、宽度与入射角关系

当角度较大时, 破坏面积急剧减小. 事实上, 材料的破坏有个阀值, 只有当应力大于这个极限, 材料才会破坏. 当角度较大, 垂直撞击速度将减小; 尽管切向撞击速度增大, 但受流体黏性的限制, 影响不会无限制增大; 两个因素综合起来, 总的作用效果将急剧降低 (如图 5 角度大于 30° 时). 当角度为 16° 时, 层裂现象比零角度入射要严重 (如图 6(a)), 而当角度再增大时, 层裂强度将减弱 (如图 6(b), 图 6(c)).

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我们的材料屈服模型定义为 Mohr-Coulomb 屈服模型，该模型认为破坏发生在最大剪切应力作用面上. 所以角度的出现导致剪切应力的复杂化，而在复杂应力状态下，材料的性质发生巨大改变，导致层裂情况发生变化.

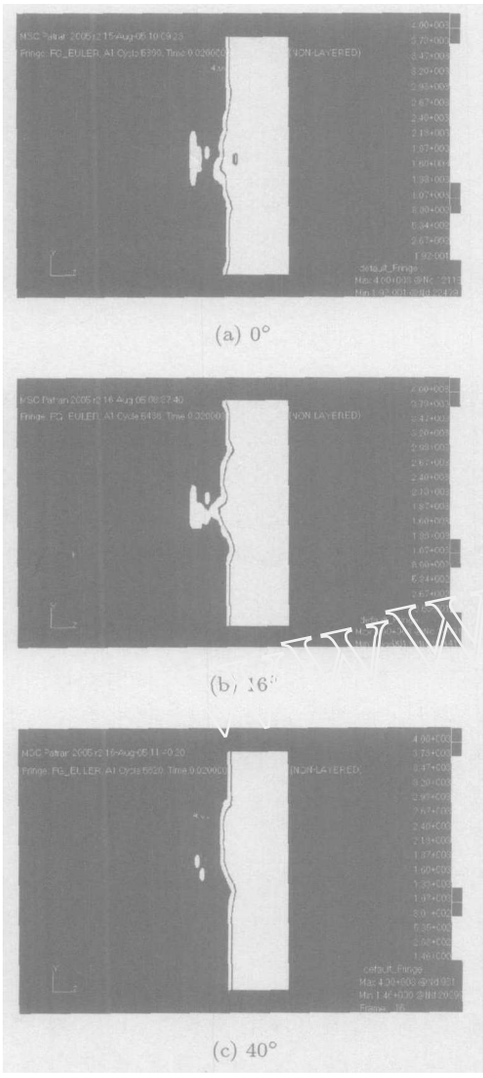


图 6　角度对破坏的影响

2.4　靶体厚度

计算了板厚为 0.12 m, 0.16 m, 0.20 m, 0.30 m 等 4 种情况 (水滴速度固定为 800 m/s)，得出破坏深度、破坏宽度与板厚的关系 (如图 7 所示). 对于破坏深度，有 $A = 0.028\,668$, $x_c = 0.308\,22$, $w = 0.138\,73$, $y_0 = 0.034\,841$; 对于破坏宽度，有 $A = 0.053\,585$, $x_c = 0.311\,59$, $w = 0.131\,26$, $y_0 = 0.574\,09$.

当板较薄时，破坏一直贯穿整个靶板. 所以有个临界贯穿厚度 L_0, 当板厚 $l \le L_0$ 时，水滴就能完全贯穿靶板. 此时，破坏深度和板厚的关系为

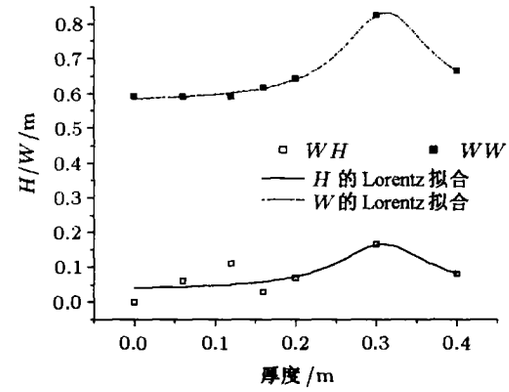


图 7　破坏深度、宽度与靶厚关系

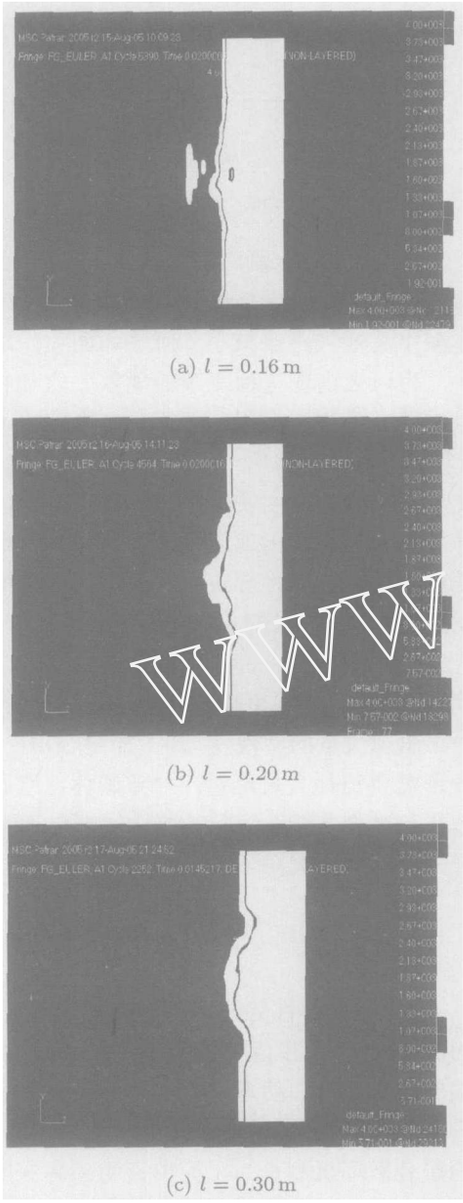
$H = l$; 当 $l > L_0$ 时，水滴将不能贯穿整个靶板，但其破坏深度和破坏面积受板厚的影响. 破坏深度随着板厚先减小后增大再略减小，而破坏面积先增大后又减小. 为何会出现这种复杂的现象？这和材料层裂现象以及内部损伤有很大关系. 当厚度为 0.16 m 时，出现了大量层裂现象 (如图 8 所示). 层裂认为是高强度压应力波在自由表面反射为拉应力波造成的拉伸破坏，而层裂的出现以及应力波在传播过程中均要消耗能量，这必将导致破坏深度和宽度的总效果减弱，这是容易接受的. 当厚度增加时，将不发生层裂现象 (如图 8(b))，厚度和宽度均有所增加 (如图 7 所示曲线中段). 当厚度增加到一定程度 (如 0.3 m) 时，由于出现大量的塑性变形区 (如图 8(c))，由于塑性变形需要消耗大量能量，导致破坏深度和宽度的总效果的减弱 (如图 8 所示曲线尾部). 直观地可以这样来描述能量关系

$$E = \frac{1}{2}mv_i^2 = E_e + E_c + E_p \tag{3}$$

其中，E_e 为材料弹性势能，E_c 为裂纹损伤形成新表面的能量，E_p 为生成塑性区的能量. 水滴由于速度增加所带来动能，动态地分布到 3 种能耗上，某一部分能量获得较多，则其他相应会少一些. 上面提到的层裂破坏机制是为了简单说明破坏深度和破坏宽度的变化. 这里有必要就这个问题作一些简单解释. 1968 年，Butcher 提出了层裂不是瞬态发生的，而是取决于材料损伤的成核与发展过程，并给出了与外在历史相关的层裂判据，表明了材料中的损伤取决于载荷历史，说明了损伤是一个历史积累过程 [1]. 这一观念的提出，使得人们对动态破坏的认识有了根本性改变，认为动态破坏是材料内部损伤的积累和发展过程，该过程受到外部条件 (包括力、热和化学等) 的影响，且会损伤反过来对材料的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

力学性能产生影响，如减小材料强度等. 可以这样说，冲击波在靶板中传播，波前材料的强度为 σ_0，当材料到达后壁并反射后，已经有波扫过的区域由于微损伤、微裂纹的存在，材料强度变为 σ_{10}，一般情况下，有 $\sigma_{10} < \sigma_0$，即材料强度降低了.



(a) $l = 0.16\,\mathrm{m}$

(b) $l = 0.20\,\mathrm{m}$

(c) $l = 0.30\,\mathrm{m}$

图 8 靶板厚度对层裂的影响

2.5 水射流密度

作者分别取密度为 1 000, 1 200, 1 400, 1 600, 1 800, 2 000 $\mathrm{kg/m^3}$ 进行计算，得出了破坏深度、破坏宽度与密度的关系如图 9 所示. 从图中可以看出，破坏深度、破坏宽度与密度的关系满足线性关系，它们的方程可以分别写为

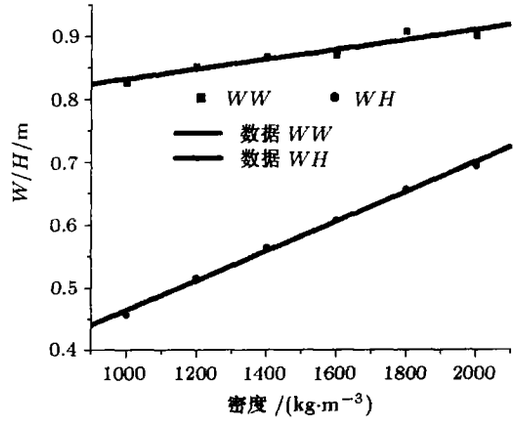


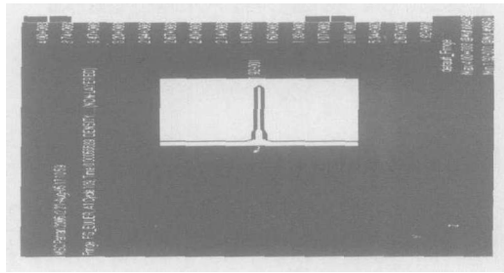
图 9 破坏深度、宽度与密度关系

$$W = 0.750\,37 + 8.360\,71 \times 10^{-5}\rho$$

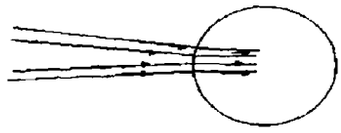
$$H = 0.233\,12 + 2.336\,74 \times 10^{-4}\rho$$

从图 9 可以看出，直线并不过原点. 没有密度的流体 (是一种理想化流体) 是没有动能的，无法对靶板造成破坏. 事实上，应该考虑水柱周围空气的影响作用. 当水的密度较大时，水和空气的密度比为 100~500，二者在相互碰撞和摩擦过程中，对水的能量的改变相对很小，甚至可以忽略. 但是，如果将所得直线延长，在密度较小区域，如与空气密度相当时 (这是一个假设过程)，周围气体对动量、能量影响相对较大，使得关系曲线偏离原来直线. 由此可见，淹没射流周围流体的密度对射流效果的影响很大，这也是旋转射流技术、脉冲射流技术迅速发展的一个重要原因.

当射流作用在靶板上时，接触端会分散 (如图 10(a))，这导致射流能量的分散. 建议水射流技术中采用收缩喷口，形成如图 10(b) 所示的射流情况，使



(a) 射流接触段散开



(b) 射流改进建议

图 10 射流变形及改进措施

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得射流能量不至分散，提高水射流的效率.

3 结　论

通过工程软件 MSC.Dytran 模拟高速水滴初压、速度、入射角和靶厚以及有限长水射流密度对弹塑性靶板的破坏情况，分析了破坏宽度、破坏深度和层裂与这些参数的关系，并就物理含义作出简要解释，得出以下几个结论：

(1) 冲击压力峰值不是在冲击的开始和结束，而是在 $t \approx 0.3\frac{R_0}{c}$ 时刻.

(2) 破坏深度和破坏宽度与水滴初压力、初速度、入射角、靶板厚度的关系满足式 (1) 所示的拟合方程.

(3) 水滴初压力、初速度、入射角等，直接影响其对固壁的冲击破坏效果，而这种影响与材料的性质有密切关系.

(4) 靶板的破坏情况 (破坏深度、宽度) 与有限长连续射流的密度成线性关系.

参 考 文 献

1 张运祺. 高压水射流切割原理及其应用. 武汉工业大学学报, 1994, 16 (4): 13~18 (Zhang Yunqi. High pressure waterjet cutting principle with application. *J Wuhan University of Technology*, 1994, 16 (4): 13~18 (in Chinese))

2 郭文章, 王树仁, 刘殿书. 岩石爆破层裂机理的研究. 工程爆破, 1997, 3(3): 1~4 (Guo Wenzhang, Wang Shuren, Liu Dianshu. The lamination crack mechanicsm of rock blasting. 1997, 3(3): 1~4 (in Chinese))

(上接第 33 页)

2 Baroud CN, Okkels F, Brody JP, et al. Reaction-diffusion dynamics: Confrontation between theory and experiment in a microfluidic reactor. *Phys Rev E*, 2003, 67: 060104/1-4

3 Anna S, Bontoux N, Stone HA. Formation of dispersions using "flow focusing" in microchannels. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 364~366

4 Link DR, Anna SL, Weitz DA, et al. Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 054503-1/4

5 Gan'an-Calvo AM, Gordillo JM. Perfectly monodisperse microbubbling by capillary flow focusing. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 274501/1-4

6 Thorsen T, Roberts RW, Arnold FH, et al. Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 4163-6

7 Dreyfus R, Tabeling P, Willaime H. Ordered and disordered patterns in two-phase flows in microchannels. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 144505/1-4

8 Kuksenok O, Jasnow D, Yeomans J, et al. Periodic droplet formation in chemically patterned microchannels. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 108303/1-4

9 Stone HA. Dynamics of drop deformation and breakup in viscous fluids. *Annu Rev Fluid Mech*, 1994, 26: 65~102

10 Taylor GI. The viscosity of a fluid containing small drops of another fluid. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 1932, 138: 41~48

11 Jacqmin D. Calculation of two-phase Navier-Stokes flows using phase-field modeling. *J Comp Phys*, 1999, 155: 96~127

术语杂谈

"黏" 和 "粘" 用法区别

古人原先造了个 "黏" (读 nián) 字，又造了个 "粘" (亦读 nián)(见《四角号码新词典》 1950 年出版；《康熙字典》 1958 年出版), 1955 年《第一批异体字整理表》把 "黏" 作为 "粘" 的异体字淘汰了，废除了 "黏" 字. 于是见诸报端和学术刊物 (包括《力学名词》第 1 版) 的 "黏" 均被 "粘" 字取而代之了 (见《中华词典》 1990 年版). 1988 年 3 月国家语言文字工作委员会和新闻出版署共同制订了《现代汉语通用字表》确认 "黏" 为规范字. "粘" 字成了多音字，一读 nián, 一读 zhān. 为此二者的意思可以基本有个分工. "黏" (nián) 指胶水之类物质所具有的黏糊的性质；"粘" 读 zhān, 是指使一物体附着 (贴) 在另一物体上. 因此在力学学科中常见的诸如 "黏性"、"黏弹性"、"黏稠度"、"黏性流"、"黏弹塑性材料" …… 等等均应用 "黏"，而在实验中如 "粘贴应变片"、复合材料中的层片 "粘接"，则应用 "粘". (金和)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net