

文章编号: 1001-1455(2003)03-0193-07

高速高粘度液体射流的穿甲效果*

施红辉

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘要: 为了研究射流粘度对穿甲的影响, 用火药炮实验装置产生了速度为 1.5~2.0km/s 的甘油射流, 用曝光时间为 180ns 的可视化系统对高速甘油射流进行了流场显示。用甘油射流和水射流对 4mm 厚青铜板及 3mm 厚钢板进行了穿甲实验, 验证了液体的粘弹性增加了射流的穿甲效果。实验还发现甘油的穿甲效果对甘油的体积分数有着依存关系, 当体积分数为 90% 时效果最佳。

关键词: 流体力学; 穿甲; 高速液/固冲击; 高粘度射流; 甘油体积分数

中图分类号: O358; O384 国标学科代码: 130°2567 文献标志码: A

1 引 言

高速液体射流在国防、环保及工业各领域内有着广泛的应用。施红辉^[1~2]用超高速水射流对金属板进行了穿甲实验。从穿透效果来看, 用成型炸药产生的超高速金属射流^[3~4]具有更强的威力。金属射流是典型的高粘度非牛顿流体。到目前为止, 用什么模型来描述金属射流, 还没有定论。例如, 经典的成型炸药理论将射流当作理想流体^[5]。但是, J. P. Leyrat 等^[6]在模拟用成型炸药产生超高速金属射流时, 使用了考虑材料弹塑性影响的 Mie-Grüneisen 公式。W. P. Walters^[3]归纳了各种金属射流的模型, 包括了粘塑性模型。而涉及防止金属射流在飞行过程中分裂的问题时, 如何使用粘塑性模型就显得更加突出^[7]。这项研究工作直接关系到定量评价金属射流的穿甲效果以及它的高精度数值模拟。D. B. Wallace^[8]研究了微尺度 ($\varnothing 50 \sim 100 \mu\text{m}$) 焊锡金属射流的稳定性问题。但是, 其金属射流的粘度只有 $8 \sim 37 \text{mPa}\cdot\text{s}$, 很难表现出非牛顿流体的特性。施红辉等^[9]在速度为 600m/s 的范围内, 比较了水射流和甘油射流的速度。发现由于甘油的粘度几乎是水粘度的 1000 倍, 粘性的影响使得甘油射流的速度低于水射流的速度。本文的工作试图表明, 当射流速度大于 1km/s 时, 甘油的粘性仍然发挥作用而且使得射流具有更好的穿甲效果。

2 实验装置与方法

实验是在一台火药炮实验装置上进行的。图 1 为火药炮的示意图及射流速度测量系统。甘油事先被密封在一个喷嘴装置里。火药室的炸药被引爆后, 产生的高压气体加速放置在发射管内的高分子聚乙烯抛射体。抛射体内嵌埋着一颗小磁铁, 当

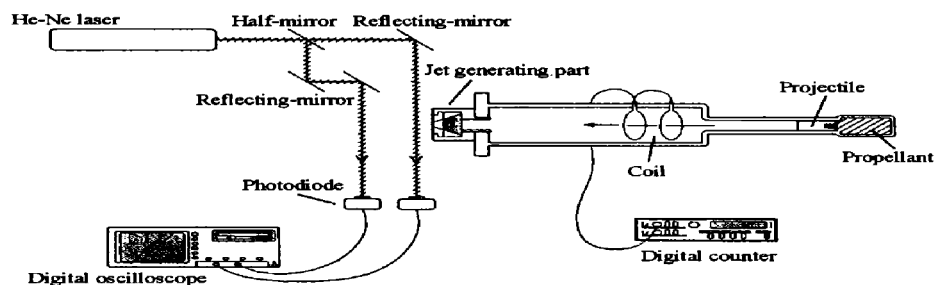


图 1 高速粘弹性液体射流发生装置及射流速度测量系统

Fig. 1 Experimental facility for generating high-speed viscoelastic jets and the jet velocity measurement system

* 收稿日期: 2002-07-05; 修回日期: 2002-09-10

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目; 国家人事部归国留学人员择优项目

作者简介: 施红辉 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

抛射体通过线圈时，诱导电流产生，所以用计数器可测得抛射体的速度。然后抛射体冲击喷嘴，将甘油推出喷嘴出口形成高速射流。在实验中，抛射体的速度维持在 1.1km/s，使用的喷嘴的出口直径全部为 3mm。喷嘴的详细构造见文献[1~2, 10]。射流的速度测量是通过射流遮断两束激光束时产生的光电压信号来实现的。激光先从一台 12mV 的 He-Ne 激光器发出，经由一个半透镜和几个反光镜形成两束平行的激光。一台示波器记录了射流遮断两束激光束时产生的光电压信号。

图 2 为流场可视化系统。先在喷嘴出口处制作一个用于摄影的暗室。在暗室上部安装氙气闪光灯，闪光时间为 180ns。在暗室侧面设置照相机，照相机的快门打开。在喷嘴出口处粘贴一根通电的炭棒，当射流切断炭棒时，电信号经由延迟装置、动力源触发闪光灯。图 3 为火药室、加速管以及信号采集线圈的详细结构图。火药室的内径为 30mm，抛射体与火药室之间用一片金属隔膜隔开。发射管的长度为 1.1m，内径为 15mm。线圈共有三个，各相距 60mm。可以选择其中的任意两个进行抛射体的速度测量。图 4 为进行金属板穿甲的实验台。用轨道钢制成支撑柱，将试样夹在两片夹板之间，再用螺钉固定在支撑柱上。这样，防止了试样在射流冲击下向四周飞散。

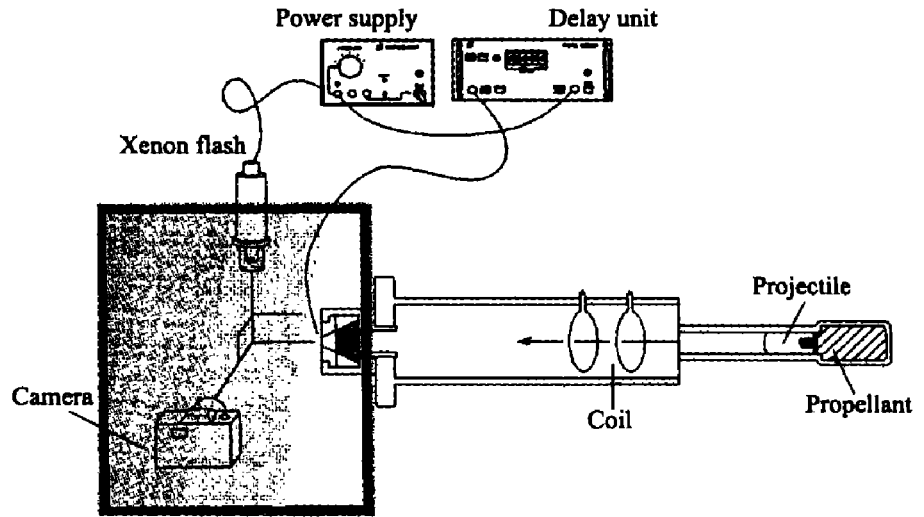


图 2 粘弹性液体射流的可视化系统
Fig. 2 Visualization system of the high-speed jets

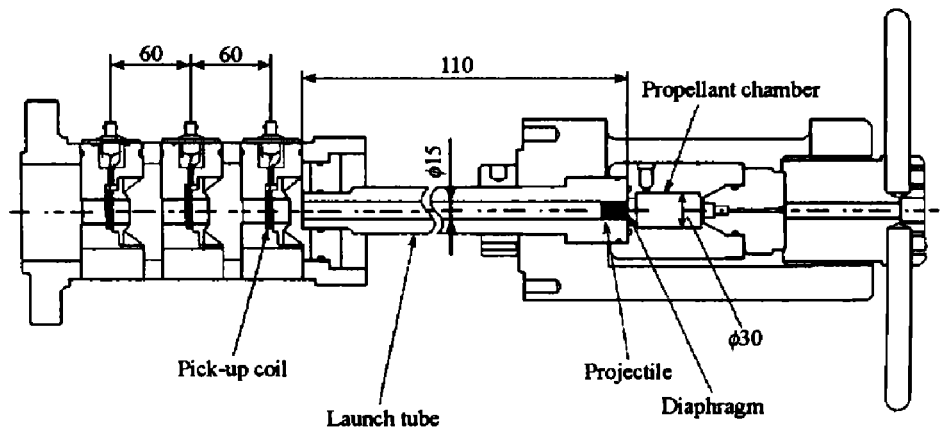


图 3 火药室结构及抛射体速度测量系统
Fig. 3 Propellant chamber and the projectile velocity measurement system

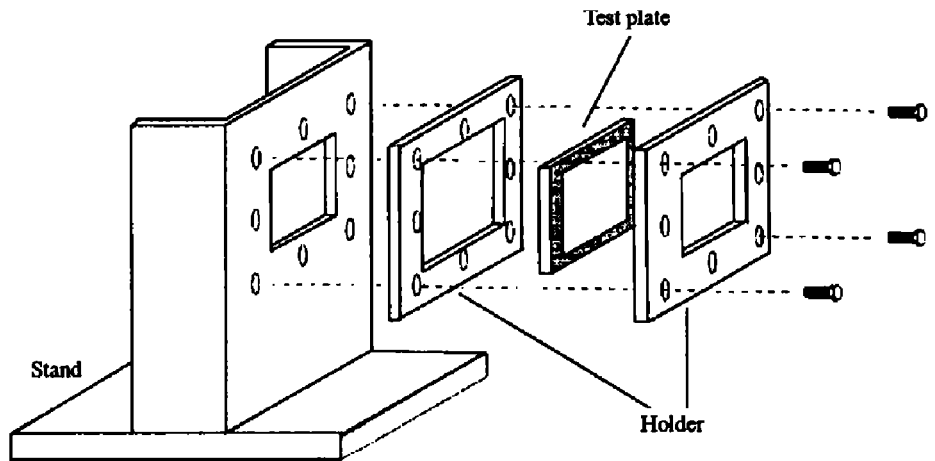


图 4 用于穿甲试验的金属板及其支撑架
Fig. 4 Test plate for perforation experiment and support stand

3 实验结果

先测量甘油的粘度和速度。试验流体是甘油和水的混合物。图 5 为甘油的粘度和射流速度。由图可见，粘度是由圆管粘度计测得的，即通过测量流体的沿程阻力，反算出流体的粘度。当甘油体积分数从 70% 增加到 99% 时，粘度从 10mPa·s 增加到 1000mPa·s，增加了两个数量级。在进行穿甲实验时，选择了浓度为 80%、90% 和 99% 的甘油，所用喷嘴出口直径为 3mm，以观察非牛顿流体的作用。可以看出，射流的速度大约在 1.5~2km/s 之间。与水射流的速度相比，非牛顿流体的作用使得甘油射流的速度下降了约 20%。

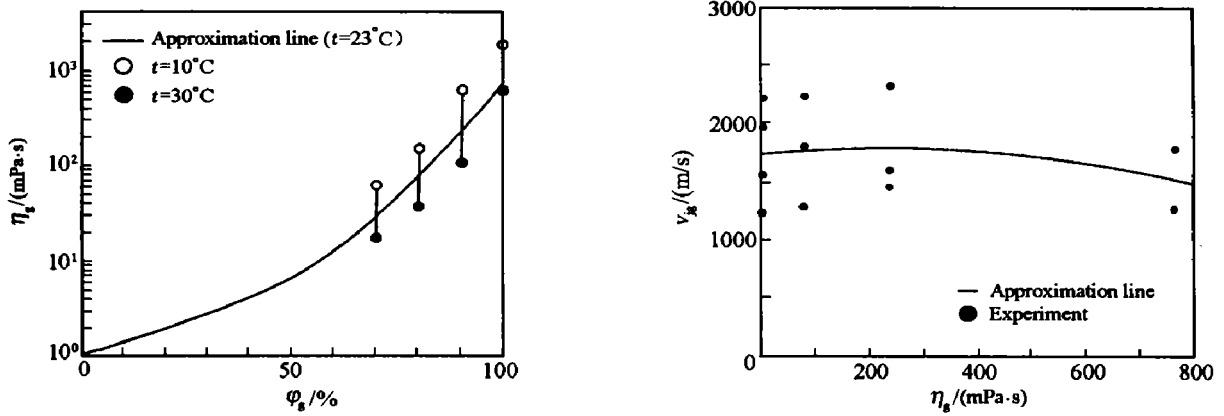


图 5 甘油粘度和射流速度
Fig.5 Viscosity of glycerin and its jet velocity

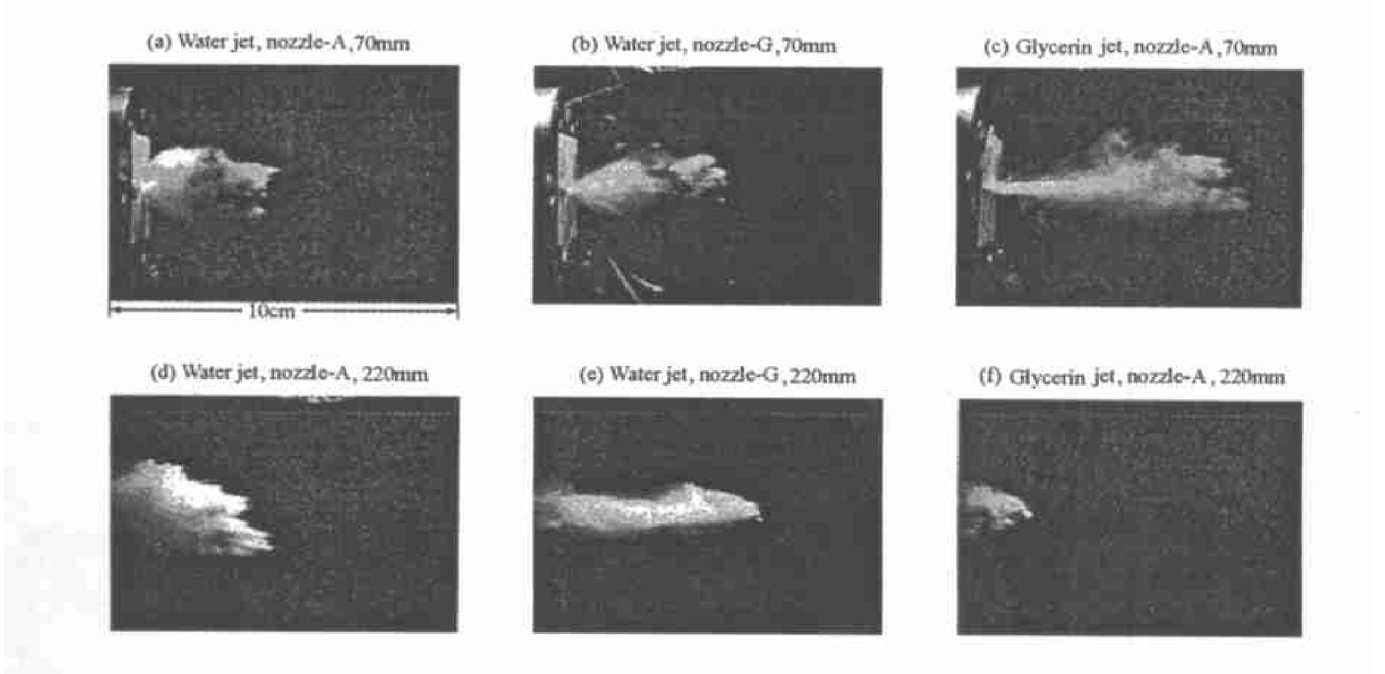


图 6 水射流及甘油射流照片
Fig.6 Photographs of water and glycerin jets

图6为水射流和99%甘油射流的可视化照片。水射流速度为约1.9km/s，甘油射流速度为约1.6km/s。图6(a)~(c)是照相机在离喷嘴出口70mm处拍摄的，图6(d)~(f)是照相机在离喷嘴出口220mm处拍摄的。喷嘴A是直径从8mm渐缩到3mm的喷嘴，渐缩长度为35mm；喷嘴G在喷嘴的入口处有一段长度为10mm、直径为3mm的直线段。通过比较，基本上可以说喷嘴G的直线段起到了整流的作用，即约束了水雾在径向的扩展。图7为水和甘油射流对厚度为4mm的青铜板的冲击破坏实验

照片。图 7(a)~(c)试样离开喷嘴的距离 50mm,图 7(d)~(f)离开距离 100mm。图 7 却表明,从喷嘴 A 和 G 产生的水射流的冲击威力并没有明显的区别。从图 6(c)可以看出,甘油射流的被雾化程度较低,明显地保持中心液柱核芯。正是因为如此,甘油射流比水射流更具有破坏力。图 7 证实了速度为约 1900m/s 的水射流并不能将 4mm 厚的青铜板击穿,而甘油射流在 1533m/s 较低的速度下能将青铜板击穿。

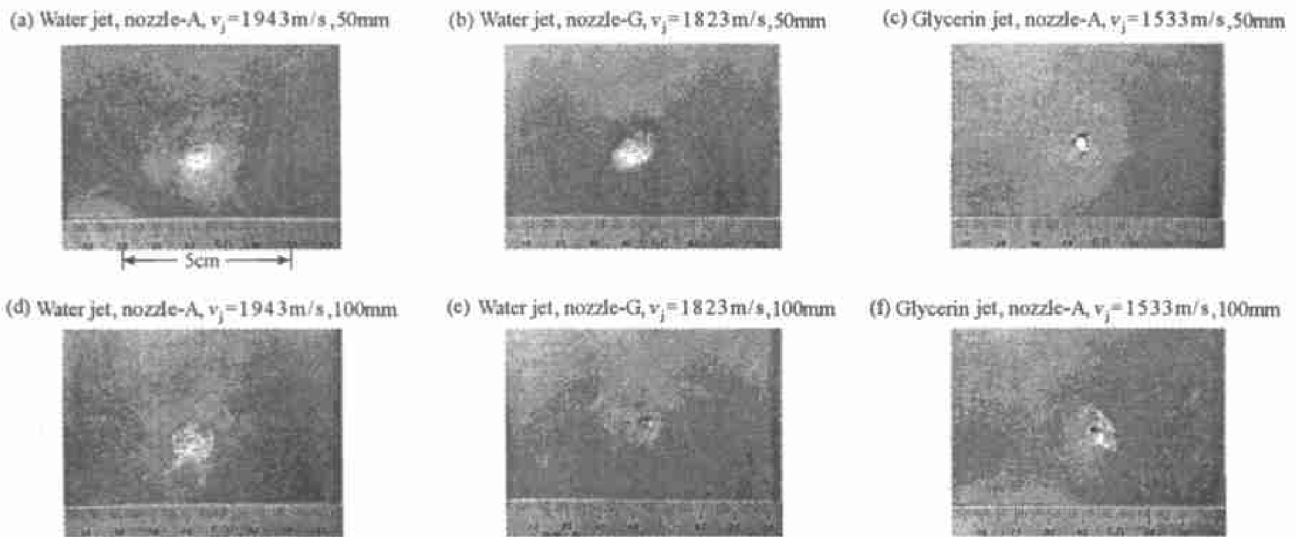


图 7 在水射流和甘油射流的冲击下青铜板的损伤照片

Fig.7 Damage tests of brass plates by the impact of the water and glycerin jets

图 8 为放大的青铜板的液体冲击破坏照片,试样离开喷嘴的距离为 50mm。图 8(a)是水射流造成的材料的破坏构造:直径为 6mm 的大浅坑围绕着直径为 3mm 的小深坑,深坑的直径与喷嘴的出口直径相对应。大直径的浅坑的出现,说明水射流的直径在离开喷嘴后变大,这与水射流的空气阻力特性及其雾化过程有关。甘油射流直接贯通青铜板,不会出现大直径的浅坑。图 8(b)~(c)所示的正向和侧向照片都表明,被击穿的青铜板的前后直径均为 3mm,与喷嘴的出口直径相对应。

图 9 为水射流和 99%甘油射流在不同的喷嘴离开距离处对青铜板的冲击破坏。水射流速度为 1943m/s,99%甘油射流速度为 1533m/s。在 50 和 100mm 处,水射流造成了青铜板上的 3mm 直径的凹坑。当离开距离大于 100mm 后,板上不再有 3mm 直径的凹坑,只有表面轻度损伤,说明此时水射流已被严重雾化。用甘油射流时,除了在 50mm 离开距离处贯通青铜板外,直到在 200 和 300mm 距离处,都在板上造成了 3mm 直径、1mm 深的凹坑,这说明甘油射流在离开喷嘴距离 300mm 处仍然保持 3mm 直径的中心液柱核芯。这与图 7 所示的可视化结果相一致。

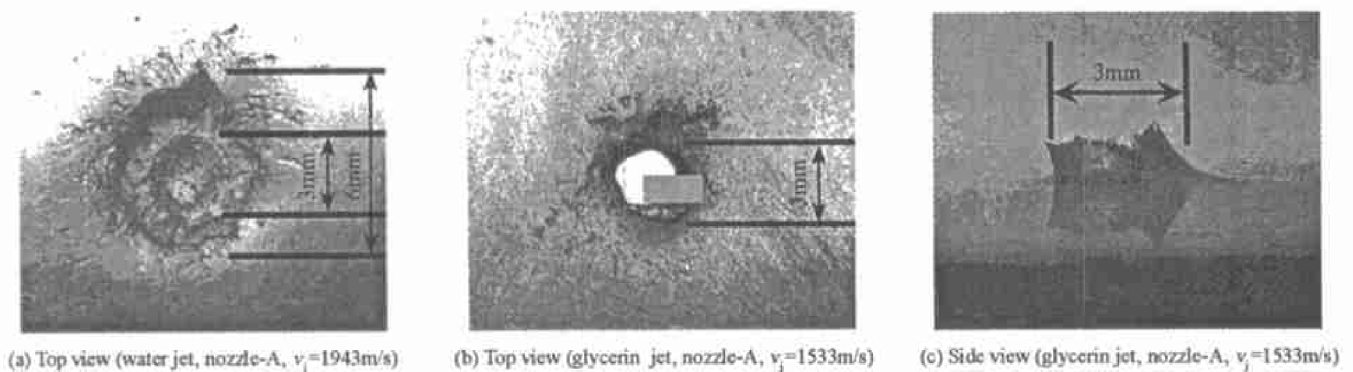


图 8 青铜板损伤部的放大照片

Fig.8 Enlarged photographs of damaged brass plates

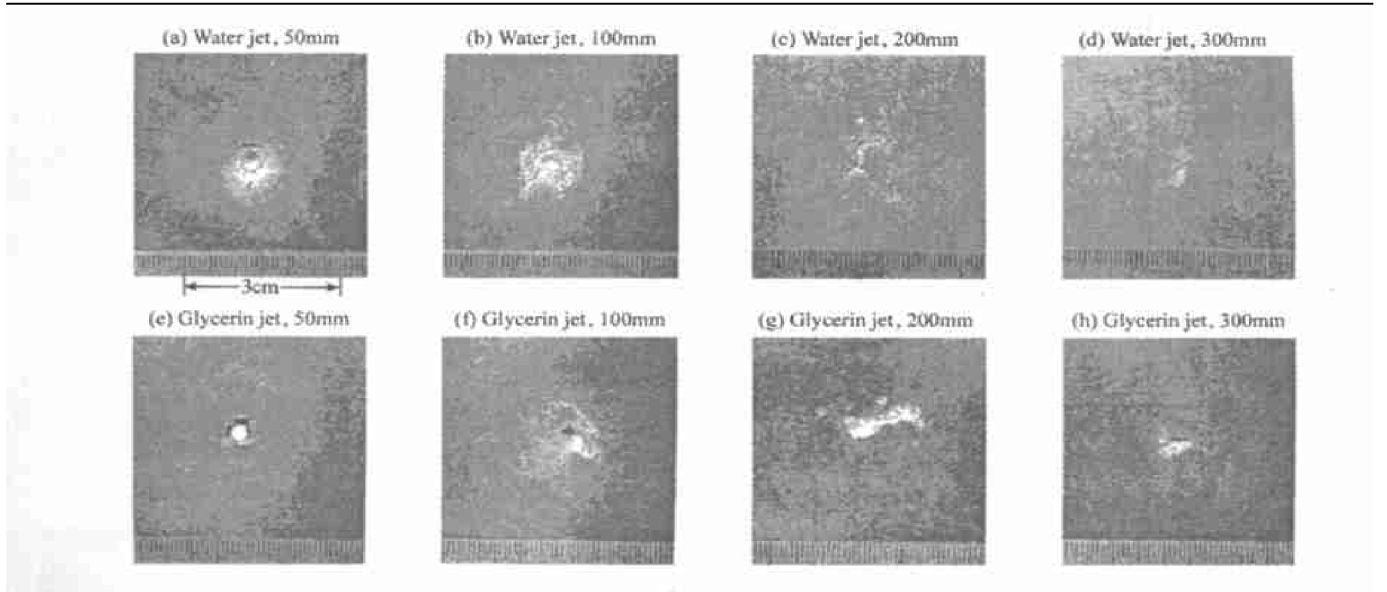


图 9 在不同喷嘴离开距离处的青铜板的冲击损伤
Fig.9 Damage tests of brass plates at different stand-off distance

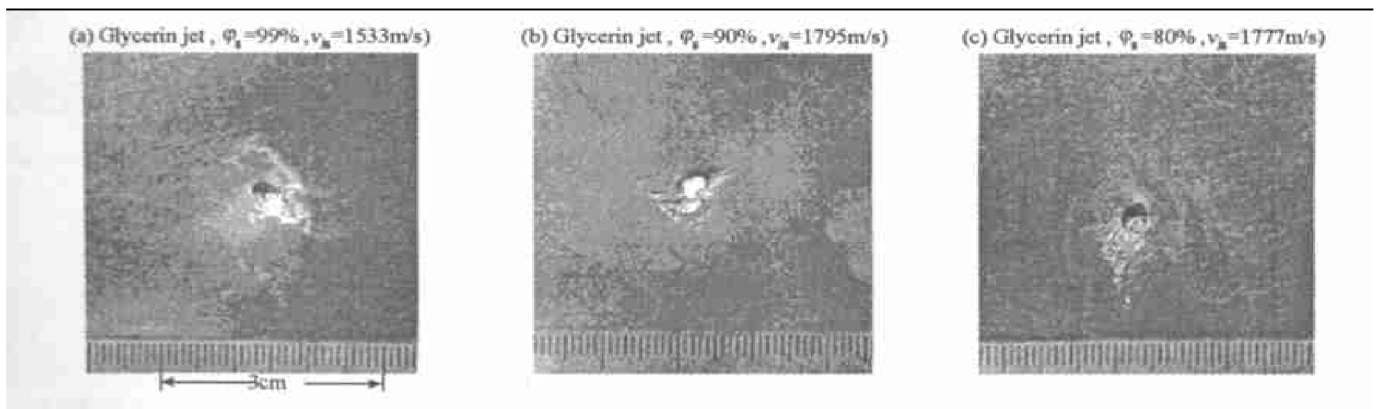


图 10 甘油体积浓度对射流穿甲效果的影响
Fig. 10 Effect of volumetric density of glycerin on perforation

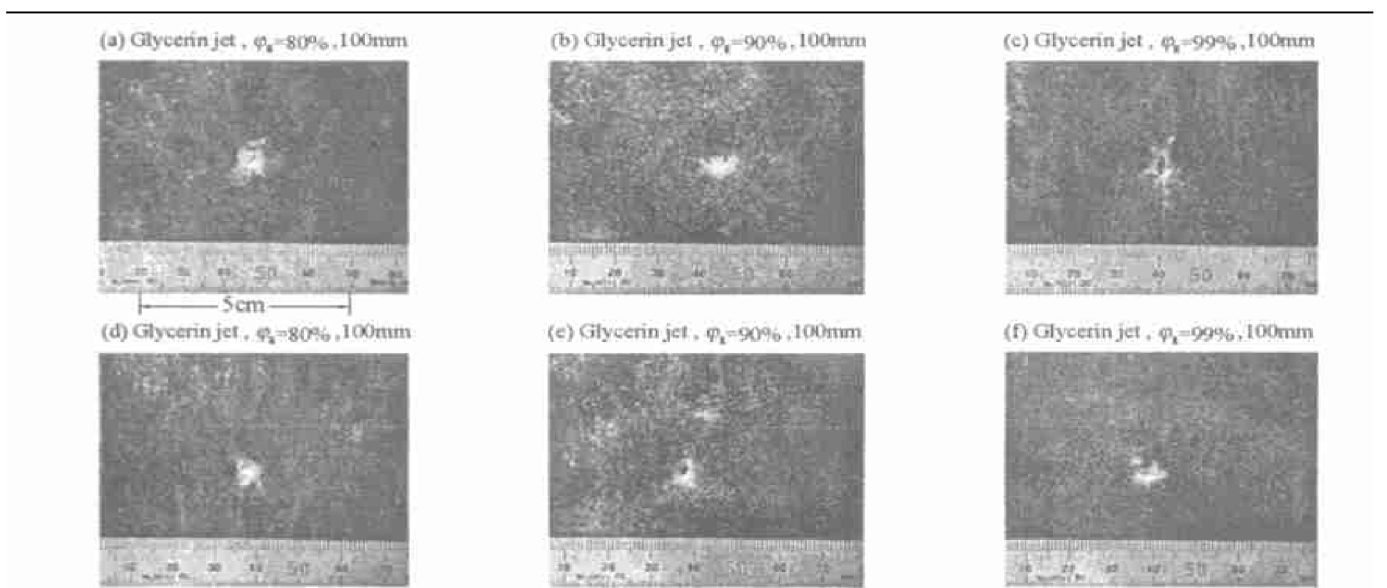


图 11 甘油射流对钢板的冲击损伤
Fig.11 Damages tests of steel plates by the impact of glycerin jets

图 10 为甘油的体积分数对青铜板的冲击破坏的影响,试样距喷嘴的离开距离为 100mm。当体积分数为 99%和 80%时,射流仅造成青铜板上 3mm 直径、1.5mm 直径的凹坑;当体积分数为 90%时,射流贯通了青铜板。这可能是由于甘油体积分数的下降,使得流体粘度减少,从而甘油射流速度有所增加并趋近于水射流的速度之故。但是,这并不能解释为什么体积分数下降到 80%,反而降低了甘油射流的穿甲效果。所以,存在一个减少粘度和防止雾化的最佳组合。

图 11 为三种体积分数的甘油射流对 3mm 厚的钢板的穿甲实验结果。喷嘴出口直径在 3mm。在 100mm 的离开距离处,体积分数为 80%和 90%的甘油射流贯穿了钢板。在 200mm 的离开距离处,三种体积分数的甘油射流都在钢板上造成带有切断面的直径为约 3mm 的凹坑。总体而言,钢板的损伤方式跟青铜板的基本类似。图 12 为钢板的受损伤部位的放大照片。试样距喷嘴的离开距离 100mm。可以看出,无论是在被贯通的情况(图 12(c)),还是在没有被贯通的情况(图 12(a)~(b)),在损伤位置有着清晰的切断面。对这种损伤机理的进一步研究,将会涉及到材料的硬度。

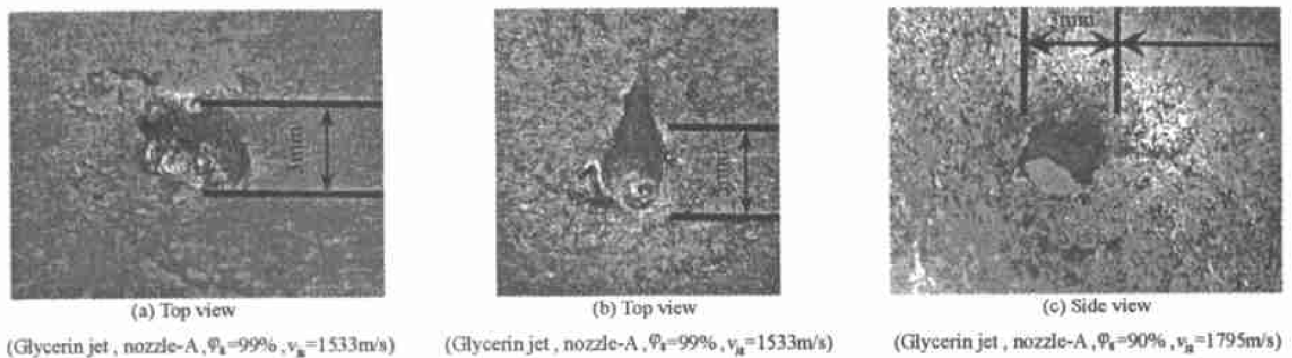


图 12 钢板损伤部的放大照片

Fig. 12 Enlarged photographs of damaged steel plates

4 结 论

与水射流相比,甘油射流能够飞行较远的距离而保持中心液柱核芯。射流的粘度特性抑制了流体自身的不稳定性的发展,并阻止了在高速运动中射流的气动雾化。因此,粘性大的液体射流具有较好的穿甲效果。通过对比水射流和甘油射流对青铜板和钢板的冲击试验,得知当水射流在 1943m/s 的速度下不能贯穿金属板时,速度为 1533m/s 的甘油射流能将金属板击穿。甘油射流在离开喷嘴(出口直径 3mm)300mm 处,仍能保持直径为约 3mm 的液体核芯。对三种体积分数的甘油的试验结果表明,体积分数为 90%的甘油的射流最具有破坏力。可以得出,通过减少流体的粘度可以增加射流的速度,但是过多地减少粘度将使得射流容易被雾化。

参考文献:

- [1] Shi H H, Takayama K, Nagayasu N. The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range[J]. *Wear*, 1995, 186—187: 352—359.
- [2] Shi H H, Higashiura K, Itoh M. Generation of hypervelocity liquid jets using a powder gun and impact experiment [J]. *Trans Japan Soc Aeron Space Sci*, 1999, 42(135): 9—18.
- [3] Zukas J A. High velocity impact dynamics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1990: 731.
- [4] 李发伯, 晏成立, 周光前, 等. 聚能炸药逆向环形起爆形成高速射流研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(3): 270—273.
LI Fa-bo, YAN Cheng-li, ZHOU Guang-qian, et al. Investigation of shaped charge jet with reverse initiation at liner base [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(3): 270—273.
- [5] Brown J, Curtis J P, Cook D D. The formation of jets from shaped charges in the presence of asymmetry [J]. *J Appl Phys*, 1992, 76(6): 2136—2143.

- [6] Leyrat J P, Charvet E, Pujols H C. Creation and simulation of very fast jets [J]. *Int J Impact Eng*, 1993, 14(1-4): 467-477.
- [7] Romero L A. The instability of rapid stretching plastic jets [J]. *J Appl Phys*, 1989, 65(8): 3006-3016.
- [8] Wallace D B. Capillary instability of a jet of liquid metal [J]. *Trans ASME, J Fluids Eng*, 1993, 115(3): 529-532.
- [9] Shi H H, Itoh M. Design and experiment of a small high-speed liquid jet apparatus [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1996, 35(7): 4157-4165.
- [10] Shi H H, Takayama K. Generation of hypersonic liquid fuel jets accompanying self-combustion [J]. *Shock Waves*, 1999, 9(5): 327-332.

Perforation of metal plates under high-speed and high-viscosity liquid jet impacts

SHI Hong-hui

(*State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: Glycerin jets of speed ranging from 1.5km/s to 2.0km/s were generated with a powder gun. The jets were visualized with a photographic system with its exposure time set to 180ns. Perforation experiments of 4mm brass plates and 3mm steel plates under glycerin and water jet impacts were conducted. The jets with higher viscosity demonstrated better perforation capability. The perforation performance of the glycerin jet depends on its volume density. At 90% volume density, the jet is the most effective in perforation.

Key words: fluid mechanics; perforation; high-speed liquid/solid impact; high-viscosity jet; glycerin volume density