DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0366-07

高压水射流冲击 HTPB 推进剂的安全性分析*

朱左明[1,2],高 鑫[1],王煊军[1],蒋大勇[3]
(1.第二炮兵工程大学,陕西 西安 710025;
2.第二炮兵装备研究院,北京 100085;
3.武警工程大学,陕西 西安 710086)

摘要:以高压水射流冲击 HTPB 推进剂的动态加载过程和准静态加载过程在作用压力和持续时间上的巨大差异为基础,在水锤压力和滞止压力计算的基础上分别进行了点火模式预判,然后以模型类比和实验方法分析了动态和准静态加载过程的安全性。结果表明,使用出口压力在 300 MPa 以内的高压水射流冲击 HTPB 推进剂装药在动态加载过程中不会有点火起爆危险性,但使用 100M Pa 以上的高压水射流冲击 HTPB 推进剂装药在准静态加载过程中其内部可能会发生温度突跃情况,这可能会引起热点火、甚至热起爆。

关键词:流体力学;冲击安全性;起爆模型;HTPB 推进剂;高压水射流
中图分类号:O358 **国标学科代码**:1302514 **文献标志码**:A

安全取出废弃固体火箭发动机中的推进剂装药,是对其进行无害化处理和资源再利用的关键步骤。作为一种高效、经济、环保的冷态切割方法,高压水射流技术在这一领域得到了广泛应用。但是,在推进剂装药的清理作业中,高压水射流与固体推进剂之间近似于刚性的碰撞,在某些条件下仍有可能会引发推进剂点火甚至起爆,从而造成重大安全事故,这有过惨痛的案例[1-2]。由于此类事故发生后作业现场被严重破坏,难以从中找到事故的直接诱因,而且水射流破碎固体推进剂技术的理论研究滞后于其工程应用,其中的点火起爆机理至今尚不明确,一般将事故原因归结为清理作业使用的水射流压力过高。鉴于此,清理作业中水射流压力被严格限制在 50 MPa 以内,低压力、大流量成为了当前水射流清理作业的准则,但这会导致清理效率低下、清理废水过多等问题,尤其是大量废水中高氯酸根离子的去除,会大大增加清理作业的周期和成本。若能在安全清理的前提下尽可能提高射流压力,会提高清理效率、减少清理废水,同时清理后得到的废药尺寸也会提升,便于后期回收再利用。因此,对高压水射流冲击 HTPB 推进剂进行安全性分析十分必要。高压水射流对固体推进剂的冲击过程,可分为动态加载过程和准静态加载过程两个阶段[3],当高压水射流头部刚刚接触到固体推进剂表面时,界面的状态参数会发生突变并形成水锤压力,这个阶段为动态加载过程;水锤压力的持续时间仅微秒量级,之后会快速衰减并稳定为滞止压力,这个阶段为准静态加载过程。考虑到动态加载过程和准静态加载过程在作用压力和持续时间上差异巨大,本文中,将分阶段对高压水射流冲击 HTPB 推进剂的安全性进行研究。

1 动态加载过程的安全性分析

1.1 水锤压力计算

假定高压水射流为平头液柱,半径为 r_j,以速度 v_j 垂直冲击推进剂表面。忽略水射流参数在径向上的变化,当液柱的平头端面与推进剂表面接触时,水射流速度急剧减小,界面压力瞬间升高,这个压力增量即为水锤压力 p_H。不考虑重力作用,根据动量定理可以导出水锤公式如下:

$$p_H = \rho c v = \rho c (v_j - v_j') \tag{1}$$

式中:ρ 为水射流的质量密度;c 为冲击波速度;v 为水射流速度变化量。

* **收稿日期**:2013-08-29;**修回日期**:2013-12-19
基金项目:第二炮兵工程大学探索基金项目(XY2011JJB26)
第一作者:朱左明(1986—),男,博士;**通讯作者**:王煊军,wxuanjun@sina.cn。

当冲击马赫数 $M=v_j/c_w$ 相对较小时，可以将式(1)的 ρ、c、v 分别近似取为：常温下水的质量密度 $\rho_w=1\ 000\ kg\cdot m^{-3}$、常温下水中的声速 $c_w=1\ 440\ m\cdot s^{-1}$、水射流速度 v_j，这样式(1)便可以简化为：

$$p_H=\rho_w c_w v_j \tag{2}$$

式中：水射流速度 v_j 可由数值方程得到[4]（v_j 的单位为 m/s，水射流的出口压力 p_j 的单位为 MPa）：

$$v_j=44.7\sqrt{p_j} \tag{3}$$

在液柱的平头端面与推进剂表面接触的瞬间，液柱处于一种封闭的压缩态。当液柱与空气交界的自由面反射的释压波向内传播到接触区中心点时，液柱内部压力释放并开始出现径向流动，由此液柱对推进剂表面的加载压力迅速降为滞止压力 p_S，液柱内部的受压状态消失。上述作用过程的维持时间极短，一般仅为微秒量级，主要取决于液柱半径 r_j 及释压波传播速度 c_r：

$$t=r_j/c_r \tag{4}$$

考虑到靶体材料特性，水射流冲击靶面的水锤压力为[5]：

$$p_H=\frac{\rho_w c_w v_j}{1+\rho_w c_w/(\rho_t c_t)} \tag{5}$$

式中：ρ_t 为靶材密度；c_t 为靶材中的声音传播速度。

对比式(2)、(5)，可知式(2)的计算结果比较大，由于目前没有可靠的推进剂中声速数据可用，所以本文中使用式(2)计算水锤压力。表 1 所示为计算得到的 6 个不同出口压力水平下的水锤压力。

表 1　不同出口压力水平下的水锤压力

Table 1　Water hammer pressure under different outlet pressure levels

出口	p_j/ MPa	v_j/ (m·s^{-1})	p_H/ MPa
1	50	316	455
2	100	447	644
3	150	547	788
4	200	632	910
5	230	678	976
6	300	774	1 115

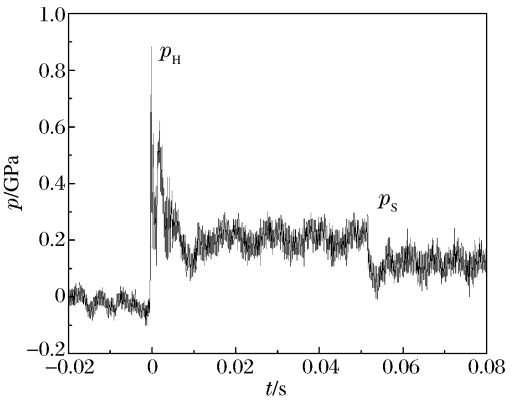


图 1　230 MPa 水射流冲击 HTPB 推进剂表面的压力曲线

Fig. 1　Pressure curve of HTPB propellant surface under 230 MPa waterjet impacting

图 1 为利用压电传感器测得的 230 MPa 水射流作用下 HTPB 推进剂表面的压力曲线，图中水锤压力约为 0.90 GPa，这与公式(2)的计算结果0.976 GPa基本一致。计算结果略高于实测结果，主要原因在于 HTPB 推进剂的可压缩性以及水射流在流程中的速度损耗。

1.2　点火模式预判

水锤压力可以看作是一个短时强脉冲，HTPB 推进剂从化学组成、能量特性、反应热等方面可以看作是一种非均质含能材料。显然，在一定的压力和脉宽条件下，对于一定化学组成和物理状态的非均质含能材料，有可能发生冲击起爆。尤其是当高压水射流清理药柱直径达到爆轰临界直径的 HTPB 推进剂装药时，发生冲击起爆的危险性更高。此外，由于水锤压力作用时间极短，一般仅为 1 μs 左右，HTPB 推进剂中不可能在这一瞬间积聚大量的热量，因而不会发生热起爆。

1.3　安全性分析

1.3.1　模型类比

(1)飞片冲击起爆模型

平面飞片撞击非均质炸药时，相当于输入一个压力 p、脉宽 τ 的近似于方波的压力脉冲；入射冲击波能否引起非均质炸药起爆，取决于压力 p、脉宽 τ、飞片面积 a 和炸药厚度 X。含有这几项影响因素并适用于接近临界起爆压力的低压范围的冲击起爆综合判据可以表示为[6]：

$$(p^K - p_c^K)^{\frac{2n}{K}} - \left(\frac{B}{X}\right)^{\frac{2n}{b}} - \left(\frac{N}{\tau}\right)^{\frac{2n}{n}} - \left(\frac{M}{a}\right)^{\frac{2n}{m}} = 0 \tag{6}$$

式中：p_c为临界起爆压力，K、b、B、m、M、n、N 为实验常数。

当 X、a、τ 等变量增大到对起爆过程不再有明显影响时，上述冲击起爆综合判据可以化为：

$$p = p_c \tag{7}$$

即冲击压力必须大于临界起爆压力，非均质含能材料才有可能点火起爆。

由于水射流在高压高速条件下所具有的刚性特征，可以将此冲击起爆判据近似应用于高压水射流冲击 HTPB 推进剂。对 HTPB 推进剂进行拉氏分析实验，可以确定其冲击起爆临界压力在 5～6 GPa 之间。而工程实际中，高压水射流清理 HTPB 推进剂装药的工作压力不会超过 300 MPa，所产生的水锤压力不会超过 1.115 GPa，明显低于临界起爆压力。同时，水锤压力的脉冲宽度极小，对 HTPB 推进剂发生冲击起爆也有很大的制约作用。

(2)液体射流冲击起爆高能炸药模型

C. L. Mader 等[7-8]通过大量实验研究认为，在液体射流冲击下高能炸药能否起爆与液体密度 ρ、射流速度 v 的平方和射流直径 d 有关，即对于某一特定的高能炸药，其在液体射流冲击下起爆判据为：

$$\rho v^2 d = K \tag{8}$$

式中：K 为常数，K(PETN) = 10^7 kg·s^{-2}，K(HMX) = 4×10^7 kg·s^{-2}。

假定 HTPB 推进剂和高能炸药在液体射流冲击下具有相同的起爆机理，那么便可将此起爆判据近似应用于高压水射流冲击 HTPB 推进剂。对于 HTPB 推进剂，其撞击感度低于 PETN 和 HMX，其 K 值高于 PETN 和 HMX。由于药柱清理作业中射流速度 v 小于 1 000 m·s^{-1}，射流直径 d 小于 0.01 m，因而高压水射流冲击 HTPB 推进剂的 $\rho v^2 d$ 值小于 10^7 kg·s^{-2}，即小于其 K 值。

通过以上两个模型的类比分析可知，清理 HTPB 推进剂装药所使用的出口压力在 300 MPa 以内的高压水射流，在动态加载过程中不会造成 HTPB 推进剂的冲击起爆。

1.3.2 实验验证

为了验证模型类比得到的结论，本文中开展了高压水射流对 HTPB 推进剂的冲击实验。HTPB 推进剂样坯的特征配方为：w(AP) = 40%，w(RDX) = 30%，w(Al) = 18%，w(HTPB) = 12%，尺寸为 ∅ 10 cm × 20 cm。冲击实验在自行设计的数控切割平台(见图 2)上完成，采用单孔喷头，入射角度为 90°，分别设定 100、200、300 MPa 的水射流出口压力，对 HTPB 推进剂方坯进行 20 次时长为 2 s 的冲击实验，均无点火起爆现象发生，这与前面模型类比得到的结论相符合。因此，高压水射流冲击 HTPB 推进剂安全性分析的重点应主要集中于准静态加载过程。

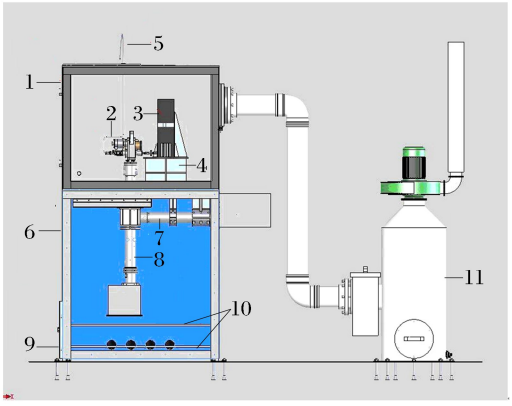


图 2 数控切割平台的组成与结构

Fig. 2 Composition and structure of CNC cutting platform

2 准静态加载过程的安全性分析

2.1 滞止压力计算

释压波到达水射流液柱的轴心后，水射流液柱靠近推进剂界面的部分逐渐形成稳定的径向流动，推进剂表面上的压力也由水锤压力降低为滞止压力。连续射流垂直冲击推进剂表面时存在一个圆形的作

用区域。在这一圆形区域的中心处，打击压力即为射流的轴心动压 p_m。随着偏离中心的径向距离 r 增加，推进剂表面所受的作用压力逐渐减小，直至作用区域外的环境压力。理想情况下，射流作用区域半径 R 与射流半径 r_j 成正比。由文献[9]有经验公式：

$$p_S = p_m\left[1-3\left(\frac{r}{R}\right)^2+2\left(\frac{r}{R}\right)^3\right] \tag{9}$$

$$\frac{p_m}{p_j}=\left(\frac{l_f}{x}\right)^{a+b\left(\frac{x}{l_f}\right)^2}\leqslant 1 \tag{10}$$

式中：l_f 为水射流初始段长度；x 为水射流出口与推进剂表面的轴向距离；a、b 为实验常数。

综上可知，理想情况下，滞止压力等于水射流的出口压力。但由于水射流在流程中的截面扩展、速度损耗以及 HTPB 推进剂的可压缩性，滞止压力会低于水射流的出口压力。图 1 中的滞止压力约为 0.20 GPa 左右，略低于其水射流出口压力 0.23 GPa，验证了这一结论。

2.2　点火模式预判

由于滞止压力大大低于水锤压力，因而在准静态加载过程中不可能发生冲击起爆。但在 HTPB 推进剂装药的清理作业中，滞止压力通常会长时间地作用于 HTPB 推进剂上的某一局部。这一过程中，水射流的动能会有相当一部分通过 HTPB 推进剂的弹性变形和粘性流动转化为热能。在一定条件下，当热量在 HTPB 推进剂局部大量积聚时，HTPB 推进剂在一定受热程度下会发生分解反应并放出热量，进入自加热过程。若热量不能及时扩散，开始时较为缓慢的放热反应会在进行到一定程度时骤然加速，使推进剂能量瞬间释放，发生热点火甚至热起爆。

2.3　安全性分析

目前，尚无法在射流冲击与热量累积之间建立明确的函数关系，并且连续水射流冲击下固体推进剂内部会受到应力、热、化学反应的耦合作用，因而很难实现推进剂装药内部温度变化的理论计算。因此，本文中使用热电偶监测 HTPB 推进剂装药清理作业中其内部的温度变化，对准静态加载过程中 HTPB 推进剂的热点火(起爆)危险性加以衡量。

对 HTPB 推进剂试样进行 DSC(示差扫描量热)法分析实验。实验在静态氮气气氛中进行，以 15 ℃/min的恒定加热速率升温，测量放热反应和吸热反应数值的大小，结果如图 3 所示。由图可见，HTPB 推进剂的吸热峰和放热峰分别在 180 和 362 ℃附近。另外，通过 5 s 延滞期爆发点测试实验得到，HTPB 推进剂试样发生热起爆的临界温度在 320 ℃左右。需要说明的是，5 s 延滞期爆发点测试实验测得的临界温度与推进剂试样的尺寸、形状有很大关系，因此其结果不能在各种情况下作为精确数值使用，仅起参考作用。综合以上两个测试实验的结果，可以认为 HTPB 推进剂试样发生热点火(起爆)的临界温度在 320～362 ℃之间，减去推进剂生产部门给出的安全系数 40 ℃，HTPB 推进剂装药的清理作业工艺温度不应超过 280 ℃。

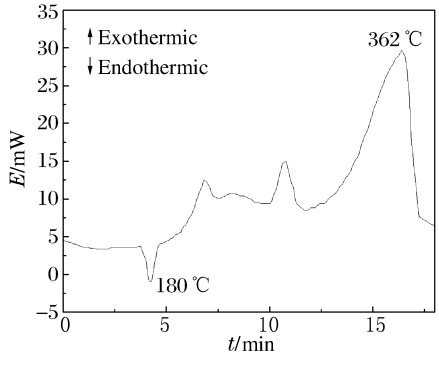


图 3　HTPB 推进剂试样的 DSC 测试结果

Fig. 3　DSC test result of HTPB propellant sample

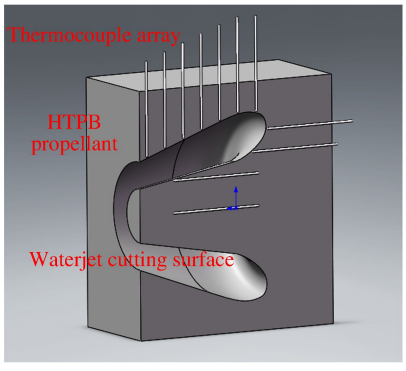


图 4　热电偶在 HTPB 推进剂样坯中的埋置点位示意图

Fig. 4　Distribution diagram of thermocouples embedded in HTPB propellant

为了尽可能实时准确地监测水射流冲击下推进剂内部的温度变化，HTPB 推进剂样坯中的热电偶通过以下方式埋置：首先通过冲击实验，对水射流清理推进剂样坯时的切割路径进行记录；然后在水射流切割路径上埋置一排热电偶（直径 5 mm，精度 0.1 ℃）。图 4 为理想情况下热电偶在 HTPB 推进剂样坯中的埋置点位示意图。在进行冲击温升实验之后，取热电偶测温部位与水射流切割面距离在1 mm 以内的热电偶的测试数据为可信温升数据。

分析 50～180 MPa 射流压力下的冲击温升实验所得到的温升曲线，可以将其分为两种类型。(1) 平稳情况：如图 5(a)所示，推进剂内部在高压水射流作用下温度逐渐上升直至稳定在 40 ℃左右，这个温度略微高于高压水射流的水温；(2)突跃情况：如图 5(b)所示，在水射流冲击过程中推进剂内部温升多次发生跃升，最高温度可达 120 ℃以上，由于实验装置暂不具备防爆功能，实验过程中为避免温度进一步突跃超出工艺温度上限进而发生点火甚至起爆，当推进剂内部温度达到 100 ℃即停止射流冲击。

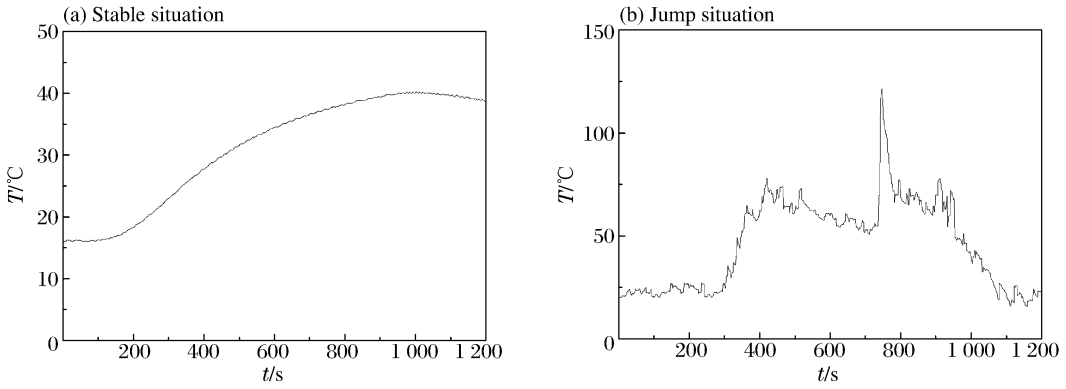


图 5 高压水射流作用下 HTPB 推进剂内部的温升曲线

Fig. 5 Temperature curve in HTPB propellant under the shock of high-pressure waterjet

表 2 为冲击温升系列实验中不同出口压力水射流作用下推进剂内部温度发生突跃情况，表中，N 为温升实验总次数，n 为温度突跃情况发生次数。50、80、100 MPa 等 3 个出口压力水平的温升实验均无温度突跃情况发生，而 120、150、180 MPa 等 3 个出口压力水平的各 15 次温升实验中均有温度突跃情况发生，并且随着水射流出口压力提高，推进剂内部发生温度突跃情况的几率有增高的趋势。

表 2 不同出口压力下的温升突跃次数统计

Table 2 Temperature-jump frequency under different outlet pressure levels

p_j/MPa	N	n
50	10	0
80	12	0
100	15	0
120	15	1
150	15	1
180	15	3

准静态加载过程中发生温度突跃现象可能是，由于 HTPB 推进剂与均质炸药相比，内部存在有不同物质之间的界面，这些界面附近容易因物理振动、化学变化等原因产生缺陷。当受到水射流强力冲击时，这些缺陷附近比理想结构的 HTPB 推进剂更容易产生一些热点，进而会促使推进剂局部发生热分解、放出热量。由于缺陷的形成具有随机性，因而温度突跃情况的发生也具有随机性。当然，这种推断还有待于进一步的介观层面的研究验证。工程实际中水射流清理的推进剂装药一般都是由于性能指标不合格才退役报废的，其内部存在很多缺陷，因此在报废 HTPB 推进剂装药的清理过程中极有可能发生温度突跃现象。若推进剂内部发生的温度突跃超过其工艺温度上限时，极有可能会引发热点火甚至热起爆。

在目前工程化清理作业中，尚无条件实现水射流清理作业面附近推进剂温升的实时监测。因此，要保证高压水射流冲击下 HTPB 推进剂不发生热起爆，可行的安全措施有：(1)在清理作业前，通过推进剂探伤确定其内部有无明显异常或者采用一定的降感技术对推进剂进行预处理；(2)将水射流出口压力和对某一局部的持续作业时间控制在适当范围以内。

3　结　论

(1)使用出口压力在 300MPa 以内的高压水射流清理 HTPB 推进剂装药在动态加载过程中，不会有点火起爆的危险性。高压水射流冲击 HTPB 推进剂的危险性主要在准静态加载过程中。

(2)使用出口压力在 100MPa 以上的高压水射流冲击 HTPB 推进剂，推进剂内部温度可能会发生突跃，并且随出口压力提高，推进剂内部发生温度突跃情况的几率有增高的趋势。

(3)对于高压水射流清理 HTPB 推进剂装药，目前可行的安全措施主要是清理作业前进行推进剂探伤和降感预处理，清理作业中恰当控制水射流出口压力和持续作业时间。

参考文献：

[1] Boggs T L, Atwood A I, Mulder E J. Hazards associated with solid propellants[C]// Proceedings of Solid Propellant Chemistry, Combustion and Motor Interior Ballistics. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000:221-262.

[2] Hashish M, Miller P. Cutting and washout of chemical weapons with high-pressure ammonia jets[C]// BHR Group Conference Series Publication. Bury St Edmund: Professional Engineering Publishing, 1998: 81-92.

[3] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，2010.

[4] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥：合肥工业大学出版社，2006.

[5] 王瑞和. 高压水射流破岩机理研究[M]. 东营：中国石油大学出版社，2010.

[6] 卫玉章. 非均匀炸药的冲击引爆综合判据[J]. 爆炸与冲击，1982，2(1)：117-121.
Wei Yu-zhang. A complete criterion for shock initiation of detonation in heterogeneous explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 1982,2(1):117-121.

[7] Mader C L, Pimbley G H. Jet initiation of explosives[R]. LA-8647, 1981.

[8] Mader C L, Pimbley G H, Bowman A L. Jet penetration of inerts and explosives[R]. LA-9527, 1982.

[9] Summers D A. Waterjetting Technology[M]. London: E & FN SPON, 1995.

Safety analysis of high-pressure waterjet impacting HTPB propellant

Zhu Zuo-ming[1,2], Gao Xin[1], Wang Xuan-jun[1], Jiang Da-yong[3]

(1. *The Second Artillery Engineering University*, *Xi'an* 710025, *Shaanxi*, *China*;
2. *The Second Artillery Equipment Academy*, *Beijing* 100085, *China*;
3. *Engineering University of CAPF*, *Xi'an* 710086, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: Due to the huge differences in pressure and duration of dynamic loading process and quasi-static loading process in high-pressure water jet impacting HTPB propellant, possible ignition modes were prejudged on the basis of the calculation of water hammer pressure and stagnation pressure, and the safety of dynamic loading process and quasi-static loading process were analyzed through model analogy and experimental study respectively. The results show that there is no detonation risk in the dynamic loading process of high pressure water jet with the outlet pressure less than 300 MPa, but in the quasi-static loading process of high pressure water jet the outlet pressure of which is above 100 MPa. It is possible that internal temperature has a sudden rise, which may cause thermal ignition or even thermal explosion.

Key words: fluid mechanics; impact safety; initiation model; HTPB propellant; waterjet

(责任编辑　丁　峰)