

文章编号:1006-9941(2020)12-1184-06

# 固体火箭发动机水下工作推力特性的实验研究

张磊,余湖清

(中国船舶集团有限公司第七一〇研究所,湖北宜昌 443003)

**摘要:** 为了研究固体火箭发动机水下工作时燃气射流流场及推力特性,在连接船体升降平台上开展了火箭发动机水下工作的实验研究。采用高速摄像系统观察了喷管燃气射流在开阔水域的扩展过程,获得了水下燃气射流形态演化过程;对水下火箭发动机的燃烧室压强及推力进行了测量,对比分析了在10 m、30 m、50 m三种水深条件下不同装药火箭发动机工作的推力特性。实验结果表明,发动机水下点火时,水环境与燃气之间的相互作用改变了燃气射流形貌,气液湍流掺混剧烈。随着水深的增大,燃烧室压力基本不变,发动机工作推力减小,水深从10 m增加到50 m时,三种发动机推力均降低了20%以上,且发动机推力与工作深度呈现非线性关系。在同一水深条件下,当发动机喷喉直径较小时,推力减小量较小;当燃烧室压强较小时,推力减小量较小。

**关键词:** 固体火箭发动机;水下燃气射流;推力

中图分类号: TJ55; V435

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020118

## 1 引言

固体火箭发动机具有机动性强、隐蔽性好、可靠性高等优势,因此其用于主动攻击水雷、鱼雷、潜射导弹等水下高速攻击武器的主要推进动力<sup>[1]</sup>。固体火箭发动机在水下工作时,由于喷管外部环境水密度远大于空气,且超音速的高温高压燃气与周围水剧烈相互作用形成含有激波、相变、漩涡等复杂物理过程的不稳定流动现象,从而导致发动机推力性能难以预估<sup>[2-3]</sup>。因此深入研究不同水深工况下固体火箭发动机推力特性及复杂两相流动机理,对水下火箭动力发展具有重要意义。

针对固体火箭发动机水下工作过程及流场特性,国内外学者进行了大量研究。王宝寿等<sup>[4]</sup>通过压力水筒的推力矢量试车台,测量了水深为10~40 m条件下火箭发动机水下点火工作时的推力和侧向力,研究了不同推力矢量控制方式下的发动机工作特性。贾有军等<sup>[5]</sup>利用水下点火试车试验系统对试验发动机尾流的

形貌及其演化过程进行了试验研究。汤龙生等<sup>[6]</sup>通过有限水域环境试验研究了水下燃气射流气泡的生长过程、压力波传递及衰减特性。施红辉等<sup>[7-8]</sup>进行了三维水下超声速冷喷气体射流的可视化试验研究,分析了射流形成后气液界面的不稳定过程以及由此引起的射流胀鼓与回击等流动振荡现象。张春等<sup>[9]</sup>在压力水筒中开展固体火箭发动机水下点火实验,并基于流体体积函数(VOF)模型对燃气与水相互作用过程进行了数值求解,着重分析了水下超声速燃气射流发展初期的燃气泡形态及流场变化规律。王利利等<sup>[10]</sup>采用计算流体力学方法对固体火箭发动机水下超声速射流的流场及推力演化过程进行数值仿真,对比分析了两种扩张比喷管的流场结构与推力变化。唐云龙等<sup>[11-12]</sup>建立了水下发动机轴对称模型,将射流典型结构与推力曲线时刻进行对照分析,并探究了发动机工作初期推力峰值的影响因素。张帅<sup>[2]</sup>基于VOF界面追踪方法建立了发动机水下燃气超声速射流模型,研究了不同工作水深和喷管膨胀比对水下发动机工作性能的影响。

综上所述,关于水下固体火箭发动机的数值仿真大部分只重点研究了水下燃气泡形态及流场变化规律,且与实际复杂过程有一定差别。对实验研究仅在有限水域模拟试验环境的容器中进行,由于实验条件

收稿日期:2020-05-14;修回日期:2020-07-12

网络出版日期:2020-10-15

作者简介:张磊(1987-),男,博士,主要从事水下固体火箭发动机总体技术研究。e-mail:zhanglei87710@163.com

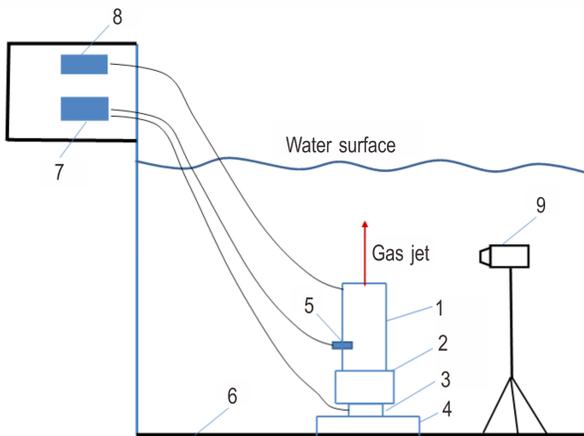
引用本文:张磊,余湖清. 固体火箭发动机水下工作推力特性的实验研究[J]. 含能材料,2020,28(12):1184-1189.

ZHANG Lei, SHE Hu-qing. Experimental Research on Thrust Characteristics of Solid Rocket Engine Working Underwater[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(12):1184-1189.

和成本的限制,关于真实水环境中发动机推力特性研究未见公开报道。为此,本研究利用连接船体的升降平台,在湖上开阔水域不同水深开展固体火箭发动机水下点火实验研究,讨论了发动机工作时水下燃气射流流场特性以及不同水深(10, 30, 50 m)环境对发动机推力的影响,并分析了不同装药发动机在水下工作的推力变化规律。

## 2 实验系统及测试方法

实验系统在水下的总体布置如图1所示,主要包括试验发动机、连接船体升降平台、操作控制系统、数据测量采集系统。



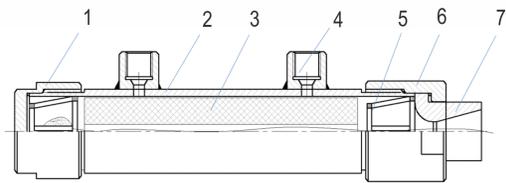
**图1** 水下火箭发动机实验系统布局示意图  
1—火箭发动机, 2—推力架, 3—推力传感器, 4—底座, 5—压力传感器, 6—升降平台, 7—数据采集系统, 8—稳压电源, 9—高速摄像机  
**Fig.1** Schematic diagram of the layout of underwater rocket engine experimental system  
1—rocket engine, 2—thrust stand, 3—thrust sensor, 4—base, 5—pressure sensor, 6—lifting platform, 7—data collection system, 8—power supply, 9—high speed camera

实验发动机主要由前端盖、燃烧室、推进剂、挡药架、喷管、后端盖等组成,如图2所示。采用内外孔恒面燃烧的装药结构,实验中有三种不同推进剂装药的发动机,装药参数如表1所示,对应发动机喷喉直径分别为18, 11, 18 mm。

连接船体升降平台可以通过船上室内操作控制系统实现0~200 m水深范围内升降并制动在某一深度。通过操作控制台显示器可以实时监测升降平台升降速度及所处的深度,便于检查试验过程中详细情况。

数据测量采集系统由水下高速摄像机、压力传感器、

推力传感器、应变放大器、数据采集仪、计算机等组成,可以实现压力、推力数据及尾流场图像的自动采集。

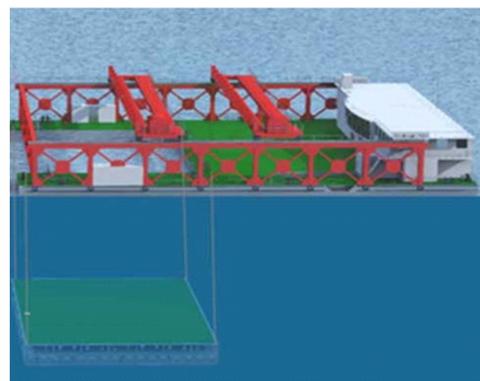


**图2** 实验发动机示意图  
1—前端盖, 2—燃烧室壳体, 3—推进剂, 4—测压孔, 5—挡药板, 6—后端盖, 7—喷管  
**Fig.2** Schematic diagram of the experimental engine  
1—front cover, 2—combustion chamber shell, 3—propellant, 4—pressure hole, 5—charge baffle, 6—rear cover, 7—nozzle

**表1** 实验发动机的装药参数 mm  
**Table 1** The charging parameters of experimental engines mm

engine type	internal diameter	external diameter	length	throat diameter
1	10	44.5	170	18
2	10	44.5	193	11
3	10	44.5	200	18

实验系统的工作过程为将完成装药的试验发动机安装固定在升降平台上,连接测量线路并进行调试,再连接点火线路并确认电阻正常。然后通过船上操作控制系统将升降平台以 $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度下降到预定的水深,收到电点火信号后,发动机开始工作,燃烧室内迅速产生高温高压燃气,快速聚压冲破密封膜片,超声速燃气与周围水剧烈掺混。数据采集后,将升降平台上升到水面。为了接近火箭发动机实际工作环境,本试验全过程在湖上开阔水域进行。



**图3** 连接船体升降平台示意图  
**Fig.3** Schematic diagram of the lifting platform connected to the hull

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 水下燃气射流的流动特性

用高速摄像机拍摄试验发动机1点火瞬间水下燃气射流的形貌及其变化过程,其典型的扩展形态演化过程如图4所示。点火后生成的燃气受到喷管密封盖的惯性约束作用,燃烧室建压一定程度时,燃气冲破密封盖的约束推动周围水介质,类似于发生水下轻微爆炸。

由图4可以看出,密封盖打开后,高速燃气迅速冲击周围水介质,开始形成扁平状的燃气泡。随着燃气

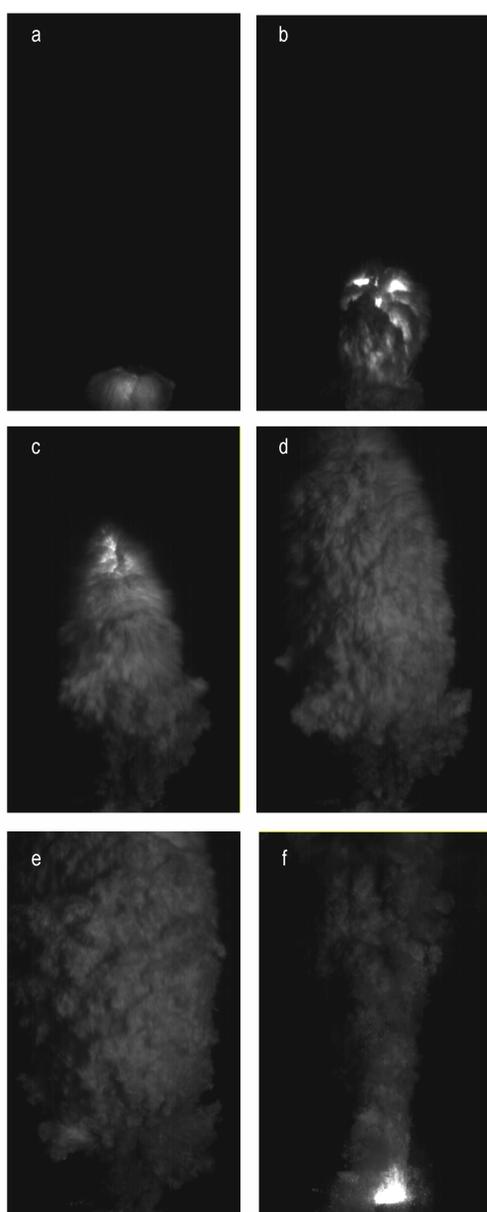


图4 燃气射流在水环境中扩展形态的演化过程  
Fig.4 The evolution process for the extended form of gas jet in water environment

连续的喷射,燃气泡头部沿轴向迅速向下游扩展,而尾部径向受水压作用逐渐收缩,发展为椭球体形状,当燃气射流达到稳定状态后,上游演化为细长状,且射流通道内不断出现膨胀-压缩现象。由于射流过程中燃气与水的速度相差较大,呈现 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应<sup>[17]</sup>,导致气液界面脉动剧烈,形成的气液混合层呈“云团”状。由此可见,伴随有传热、相变、激波等复杂的气液相互作用对超声速燃气射流结构产生较大影响并消耗部分能量,会造成水下发动机推力损失。

#### 3.2 不同水深对发动机推力的影响

实验发动机1在水深分别为10,30,50 m条件下工作时,测得的燃烧室压强如图5所示。从图5可以看出,发动机点火后燃烧室压强迅速增大,瞬间出现压强峰值,主要是由于喷管密封盖打开后受到高密度水环境的阻滞作用。燃烧室压强随水深变化影响较小,平衡压强约为6.5 MPa,发动机工作时间也基本相同,说明试验发动机内推进剂的燃烧过程基本不受水深变化影响。推进剂燃烧结束后燃烧室压强迅速降低,直至降为环境压强,这与实验中相对应的10,30,50 m水深环境压强一致,从而进一步验证了本实验测试方案的准确性。

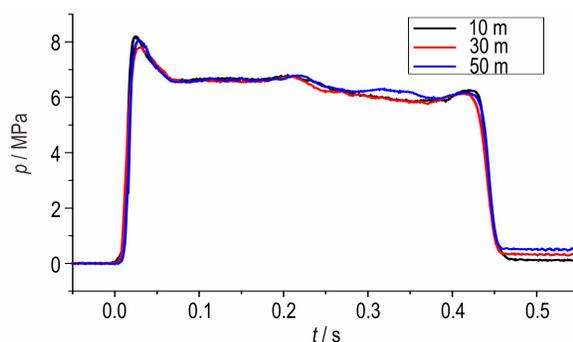


图5 不同水深下发动机1燃烧室压强曲线

Fig.5 Combustion chamber pressure curves of engine 1 at different water depths

图6a、图6b和图6c分别为三种实验发动机在水深10,30,50 m工作时的推力曲线,从图中可以看出,发动机在点火初期即出现推力峰值,与燃烧室压强特征相同。对比图6a、图6b和图6c发现,发动机1、发动机2、发动机3的装药燃烧时间逐渐变长,由于三种装药肉厚相同,说明发动机1、发动机2、发动机3装药燃速逐渐减小。发动机推力存在明显周期性振荡,主要是由燃气射流内的复杂激波结构引起。随着水深的增大,发动机推力明显减小,主要是因为水深越大,燃气射流受到水环境挤压强度越大,燃气的膨胀-压缩过

程越不充分。在发动机工作的平衡段时间内对应推力的平均值称为平衡推力,发动机1在10 m水深工作的平衡推力为2.33 kN,水深从10 m增加到30 m时,发动机1平衡推力降低了12%,水深从30 m增加到50 m时,平衡推力降低了10.7%。发动机2工作从水深10 m增加到50 m时,平衡推力降低了21%。发动机3工作从水深10 m增加到50 m时,平衡推力降低了26.5%。

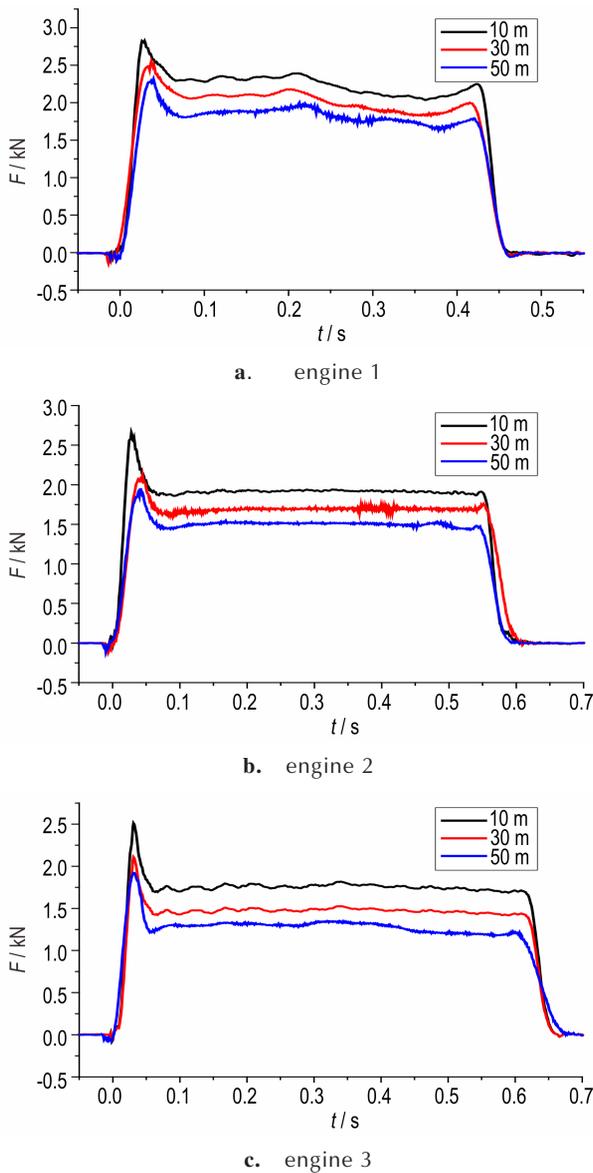


图6 3种发动机在不同水深下的推力曲线  
Fig.6 Thrust curves of three engines at different water depths

由此可见水深对水下发动机推力有较大影响,属于非线性关系。基于实验测量结果的特点,采用指数衰减方程对水深与发动机推力的函数关系进行拟合,如图7所示。拟合出的函数关系为

$$F = A_0 + A_1 e^{-h/A_2}$$

式中, $F$ 为发动机推力,kN; $h$ 为发动机工作水深,m; $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 为拟合参数,如表2所示。

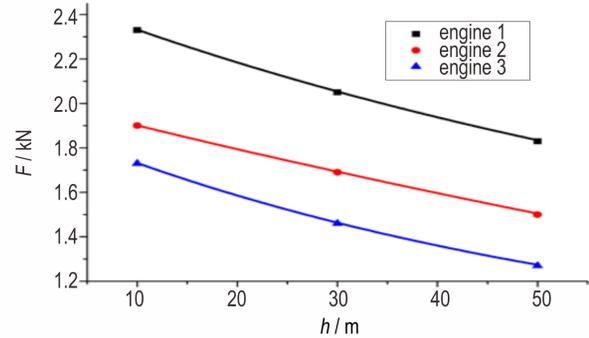


图7 水下发动机平衡推力随工作水深变化曲线  
Fig.7 Balanced thrust vs water depth curves of three engines at different water depths

表2 发动机推力随水深变化的拟合参数  
Table 2 Fitting parameters for engine thrust with water depth

engine type	$A_0$	$A_1$	$A_2$
1	1.02	1.47	83.76
2	-0.31	2.32	201.83
3	0.82	1.09	57.48

Note:  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  are fitting parameters.

发动机推力拟合模型与实测值之间的误差见表3,可以看出拟合值与实测值的误差均在1%以内,说明拟合模型能够较好的反映出发动机平衡推力与水深之间的关系,为10~50 m不同水深的发动机平衡推力预测提供理论基础。

表3 发动机推力拟合值与实测值误差  
Table 3 The error between the fitted value of engine thrust and the measured value

engine type	water depth/m	thrust error/%
1	10	-0.23
	30	-0.12
	50	-0.04
2	10	-0.11
	30	-0.03
	50	0.06
3	10	0.34
	30	0.47
	50	0.53

为说明发动机水下工作效率,对发动机水下工作与地面工作情况相比较,则水下发动机推力减小量定义为:

$$\eta = \frac{F_d - F_s}{F_d}$$

式中, $F_d$ 为地面推力,kN; $F_s$ 为水下推力,kN。

图8为在不同水深条件下发动机工作的推力减小量。从图8可以看出,随着水深的增加,环境压力增加,三种发动机的推力减小量都增大。在相同水深情况下,发动机2的推力减小量比发动机1、发动机3都小,在10 m水深工作的推力减小量仅为4.5%,主要是由于发动机喷喉直径较小时,喷管燃气射流与周围水介质相互作用界面变小,受到的挤压作用减小,因此能量损失相对较小。发动机1比发动机3的推力减小量大,这是因为发动机1燃烧室压强相对较大,喷管出口压强与环境压强之比相对较大,发动机的欠膨胀程度较大,湍流耗散就较大。

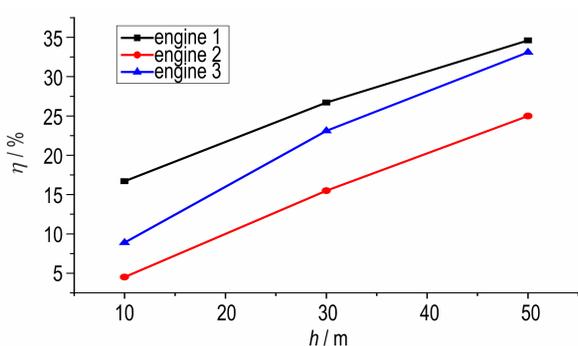


图8 水下发动机推力减小量随水深的变化曲线

Fig.8 Thrust reduction of underwater engine with increase of the water depths

## 4 结论

利用连接船体升降平台对固体火箭发动机水下工作特性进行了实验研究,分析了水下发动机燃气射流的扩展过程,同时讨论了不同水深条件下火箭发动机的推力特性,可得出以下结论:

(1) 高温高压燃气射流在水下的扩展是一个复杂的物理化学过程,初期形成扁平状的燃气泡逐渐演变为椭球体形状,射流通道内不断出现膨胀-收缩现象。气液界面脉动剧烈,形成的混合层呈“云团”状。

(2) 发动机在点火初期出现推力峰值,发动机推力随着水深增大而减小,燃烧室压强基本不变。发动机1在10 m水深工作的平衡推力为2.33 kN,水深从10 m增加到30 m时,发动机1平衡推力降低了12%,水深从30 m增加到50 m时,平衡推力降低了10.7%。发动机2工作从水深10 m增加到50 m时,平衡推力降低了21%。发动机3工作从水深10 m增加到50 m时,平衡推力降低了26.5%。

(3) 随着水深的增加,发动机的推力减小量增大,

在同一水深时,发动机2的推力减小量最小,在10 m水深工作的推力减小量仅为4.5%。

## 参考文献:

- [1] 钱柏顺,杨彪. 固体火箭发动机在水下航行体上应用的理论分析[J]. 鱼雷技术, 2004, 12(4): 21-23.  
QIAN Bo-shun, YANG Biao. Applied analysis for solid rocket motor used in the underwater vehicle[J]. *Torpedo Technology*, 2004, 12(4): 21-23.
- [2] 张帅. 大深度水下固体火箭发动机工作特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
ZHANG Shuai. Research on the character of solid rocket motor working deep underwater[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [3] SHI H H, WANG B Y, DAI Z Q. Research on the mechanics of underwater supersonic gas jets[J]. *Science China (Physics Mechanics & Astronomy)*, 2010, 53(3): 527-535.
- [4] 王宝寿, 许晟, 易淑群, 等. 水下推力矢量特性试验研究[J]. 船舶力学, 2000, 4(5): 9-15.  
WANG Bao-shou, XU Sheng, YI Shu-qun, et al. Test studies of underwater thrust vector control performance[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2000, 4(5): 9-15.
- [5] 贾有军, 张胜敏, 尤俊峰, 等. 固体发动机水下点火尾流变化过程试验研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(5): 660-663.  
JIA You-jun, ZHANG Sheng-min, YOU Jun-feng, et al. Experimental research on the changing process of underwater ignition wake of solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(5): 660-663.
- [6] 汤龙生, 刘宇, 吴智锋, 等. 水下超声速燃气射流气泡的生长及压力波传播特性实验研究[J]. 推进技术, 2011, 32(3): 417-420.  
TANG Long-sheng, LIU Yu, WU Zhi-feng, et al. Experimental study on characteristics of bubble growth and pressure wave propagation by supersonic gas jets under water[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(3): 417-420.
- [7] 施红辉, 汪剑锋, 陈帅, 等. 水下超声速气体射流初期流场特性的实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(3): 233-237.  
SHI Hong-hui, WANG Jian-feng, CHEN Shuai, et al. Experimental study on flow characteristics at the initial injection stage of underwater supersonic gas jets[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2014, 44(3): 233-237.
- [8] 王超, 施红辉, 汪剑锋. 液体中可压缩气体射流的瞬态特性[J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2291-2299.  
WANG Chao, SHI Hong-hui, WANG Jian-feng. Transient characteristics of compressible gas jet in liquid[J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(6): 2291-2299.
- [9] 张春, 郁伟, 王宝寿. 水下超声速燃气射流的初期流场特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(5): 961-968.  
ZHANG Chun, YU Wei, WANG Bao-shou. Research on the initial flow field characteristics of underwater supersonic gas jets[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(5): 961-968.
- [10] 王利利, 刘影, 李达钦, 等. 固体火箭发动机水下超声速射流数值研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(6): 1161-1170.  
WANG Li-li, LIU Ying, LI Da-qin, et al. Numerical study of underwater supersonic gas jets for solid rocket engine[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(6): 1161-1170.
- [11] 唐云龙, 李世鹏, 刘筑, 等. 水下固体火箭发动机的推力特性[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 477-485.

- TANG Yun-long, LI Shi-peng, LIU Zhu, et al. Underwater thrust characteristic of solid rocket motor[J]. *Journal of Aerospace power*, 2017, 32(2): 477-485.
- [12] 唐云龙,李世鹏,谢侃,等. 有相变的水下超声速燃气射流数值模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(9): 1237-1243.
- TANG Yun-long, LI Shi-peng, XIE Kan, et al. Numerical simulation of underwater supersonic gas jets with phase transitions[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(9): 1237-1243.
- [13] 王柏懿,戴振卿,戚隆溪,等. 水下超声速气体射流回击现象的实验研究[J]. *力学学报*, 2007, 39(2): 267-272.
- WANG Bo-yi, DAI Zhen-qing, QI Long-xi, et al. Experimental study on back-attack phenomenon in underwater supersonic gas jets[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(2): 267-272.
- [14] 张有为,王晓宏,杨举贤. 利用球形气泡模型研究导弹水下点火瞬间的推力状况[J]. *水动力学研究与进展*, 2005, 20(5): 636-640.
- ZHANG You-wei, WANG Xiao-hong, YANG Ju-xian. Study on the working thrust for the missile launching under water using the spherical bubble model[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2005, 20(5): 636-640.
- [15] 商旭升,吴智锋,何宇峰. 固体火箭发动机水下试验的数据处理方法研究[J]. *推进技术*, 2013, 34(8): 1128-1133.
- SHANG Xu-sheng, WU Zhi-feng, HE Yu-feng. Analysis and processing of solid rocket motor underwater test data[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(8): 1128-1133.
- [16] 张磊. 大水深火箭发动机尾流场数值模拟[J]. *固体火箭技术*, 2019, 42(2): 159-163.
- ZHANG Lei. Numerical simulation of tail flow field for underwater solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(2): 159-163.
- [17] LI W C, MENG Z M, SUN Z N, et al. Investigations on the penetration length of steam-air mixture jets injected horizontally and vertically in quiescent water[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2018, 122(7): 89-98.

## Experimental Research on Thrust Characteristics of Solid Rocket Engine Working Underwater

ZHANG Lei, SHE Hu-qing

(No.710 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation, Yichang 443003, China)

**Abstract:** In order to investigate the gas jet flow field and thrust characteristics of solid rocket engine working underwater, an experimental study on the underwater work of rocket engine was carried out on the lifting platform connected to the hull. The expansion process of nozzle gas jet in open water was observed by high speed camera system, and the evolution process of underwater gas jet was obtained. The combustion chamber pressure and thrust of underwater rocket engine were measured. The thrust characteristics of the rocket engine under the water depth of 10 m, 30 m and 50 m were compared and analyzed. The experimental results show that when the engine is ignited underwater, the shape of gas jet is changed because of the interaction between water environment and gas, and gas liquid turbulent mixing is intense. With the increase of water depth, the combustor pressure is basically unchanged, the working thrust of the engine decreases. The relationship between thrust and water depth is nonlinear. Under the same water depth condition, the smaller the engine throat diameter, the smaller the thrust reduction, and the smaller the combustion chamber pressure, the smaller the thrust reduction.

**Key words:** solid rocket engine; underwater gas jet; thrust

**CLC number:** TJ55; V435

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2020118

(责编:王艳秀)