

【引用格式】郁伟, 张春, 王宝寿. 某型火箭发动机水下点火缩比相似关系研究与试验[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(1): 89-94.

某型火箭发动机水下点火缩比相似关系研究与试验

郁伟, 张春, 王宝寿

(中国船舶科学研究中心 水动力学国防科技重点实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要 火箭发动机通过水下点火工作, 使得水下航行体更具综合性能优势和灵活使用能力。对于大型发动机水下点火问题, 直接开展试验的资金较大, 周期较长, 采用缩比试验技术是研究其性能变化规律的有效工具。通过分析火箭发动机水下点火过程, 通过控制方程和缩比准则, 得到火箭发动机水下点火缩比相似律及主要参数的相似关系, 为某型发动机水下点火的缩比技术的开展提供理论支撑。并在此基础上, 开展发动机水下点火缩比试验, 得到发动机在水下不同水深的推力特性。

关键词 火箭发动机; 水下点火; 缩比试验; 相似关系

中图分类号 O39 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2023)01-0089-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.01.011

Research and Test on Scale Similarity Laws of a Rocket Engine during Underwater Ignition

YU Wei, ZHANG Chun, WANG Baoshou

(Key Laboratory of Hydrodynamics for National Defense Science and Technology, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract Through the underwater ignition of rocket engine, underwater vehicles could get more comprehensive performance advantages and flexible use capability. For underwater ignition of large rocket engines, direct experimental test requires large funds and a long cycle. Scale test technology is an effective means to study the performance laws. This paper analyzes the underwater ignition process of rocket engine. Through studying control equations and scaling criterion, the scaling similarity laws and the main parameter similarity relationships of rocket engines during underwater ignition are obtained, which provides a theoretical support for the scale test technology of a certain rocket engine. On this basis, the scale test of engines during underwater ignition is carried out, and the thrust characteristics of engines under different water depths are obtained.

Key words rocket engine; underwater ignition; scale test; similarity laws

0 引言

火箭发动机通过水下点火工作, 提供航行体在水中运动的推力, 同时可以利用发动机推力矢量控制能力, 对航行体在水下实施姿态控制。可以提高航行体在相对较大深度、较大航速、较高

海情下工作, 可大幅度提高航行体的水下使用能力, 使得水下航行体更具综合性能优势和灵活使用能力。

国外关于水下点火机理问题公开发表的文献, 主要集中在射流燃气泡发展规律、回击现象以及射流稳定性方面^[1-3]。研究水下火箭的推进性能, 包

括水介质对喷管流动分离的影响,水惯性对火箭排气的影 响,以及射流对水动阻力的影响等^[4]。火箭发动机水下点火过程很复杂,涉及到固-液-气-汽多相的相互作用,伴随高温-高压-高速的强瞬态过程^[5-7],国内学者也对火箭发动机水下点火过程进行建模和机理试验研究^[8-10]。

1 发动机水下点火缩比试验研究的必要性

对于复杂力学问题,试验技术研究是必须的手段^[11],对于大型固体发动机水下点火问题,直接开展试验的资金较大、周期较长,还存在技术风险,采用缩比试验技术是研究其性能和力学变化过程的有效工具。火箭发动机水下点火缩比相似律是开展缩比试验技术的基础,在几何相似的前提下,发动机动力相似需要模型发动机与原型具有相似的燃烧温度以及流动相似、热相似、燃速相似等^[12]。水下点火过程需要考虑空泡相似、压力相似等。本文主要分析火箭发动机水下点火缩比相似关系,为火箭发动机水下点火缩比试验的开展提供理论基础。

2 发动机点火缩比技术微分方程

2.1 气体 N-S 方程与相似性分析

一般的气体运动过程都遵循 N-S 方程,不考虑质量力和热辐射等因素的影响,可以得到雷诺平均的三维 N-S 方程的向量形式如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P - \tau_{xx} \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho uw - \tau_{xz} \\ (e - P)u - u\tau_{xx} - v\tau_{xy} - w\tau_{xz} - \dot{q}_x \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho v^2 + P - \tau_{yy} \\ \rho vw - \tau_{yz} \\ (e - P)v - u\tau_{xy} - v\tau_{yy} - w\tau_{yz} - \dot{q}_y \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw - \tau_{xz} \\ \rho vw - \tau_{yz} \\ \rho w^2 + P - \tau_{zz} \\ (e - P)w - u\tau_{xz} - v\tau_{yz} - w\tau_{zz} - \dot{q}_z \end{bmatrix}$$

式中, τ 为粘性项,其表达式为

$$\begin{cases} \tau_{xx} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \tau_{yy} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \tau_{zz} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (2)$$

热传导项 q 的表达式为

$$\dot{q}_x = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \dot{q}_y = k \frac{\partial T}{\partial y} \quad \dot{q}_z = k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

状态方程为

$$P = \rho RT \quad (4)$$

内能关系式

$$e = \frac{P}{(\gamma - 1)} + \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2 + w^2) \quad (5)$$

热传导系数

$$k = C_p \frac{\mu}{Pr} \quad (6)$$

式中: ρ 为密度; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向速度分量; e 为单位体积的总内能; P 为静压; μ 为动力粘性系数; k 为热传导系数; γ 为比热比; C_p 为定压比热容; Pr 为普朗特数。

对控制方程进行无量纲处理,长度的尺度取为 L ,速度、密度、温度及粘性系数的尺度分别取为临界参数 V_{cr} 、 ρ_{cr} 、 T_{cr} 和 μ_{cr} 。各参数的无量纲量如下:

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L},$$

$$\bar{u} = \frac{u}{V_{cr}}, \quad \bar{v} = \frac{v}{V_{cr}}, \quad \bar{w} = \frac{w}{V_{cr}},$$

$$\bar{P} = \frac{P}{\rho_{cr} V_{cr}^2}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{cr}}, \quad \bar{e} = \frac{e}{\rho_{cr} V_{cr}^2}, \quad \bar{T} = \frac{T}{T_{cr}}$$

临界雷诺数为

$$Re = \frac{\rho_{cr} V_{cr} L}{\mu_{cr}} \quad (7)$$

无量纲化后的控制方程形式与式 (1) 一样, 重写如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

上式中的粘性项和热传导项与式 (1) 不同, 式 (8) 中的粘性项为

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{Re} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{Re} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{zz} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{Re} \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{\mu}{Re} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{\mu}{Re} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{\mu}{Re} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

式 (8) 中的热传导项为

$$\dot{q}_x = \frac{1}{(\gamma-1) Re Pr} \frac{\mu}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\dot{q}_y = \frac{1}{(\gamma-1) Re Pr} \frac{\mu}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (10)$$

$$\dot{q}_z = \frac{1}{(\gamma-1) Re Pr} \frac{\mu}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z}$$

控制方程一致是流动现象相似的必要条件, 根据式 (8) - (10), 控制方程保持一致需要满足临界雷诺数和普朗特数保持一致(下标 m 表示模型参数, 下标 p 表示原型参数)。

临界雷诺数保持一致, 即流动相似

$$Re_p = Re_m \quad (11)$$

普朗特数相似, 即热相似

$$Pr_p = Pr_m \quad (12)$$

2.2 发动机边界条件及其相似性分析

式 (8) 为椭圆形方程, 根据初始条件和边界条件可以得到唯一解。即在控制方程相似的情况下, 只要初边值条件是相似的, 流动就是相似的。

初始条件的相似性比较好满足, 下面讨论边界条件的相似性。

2.2.1 壁面边界条件

由于考虑粘性的作用, 壁面为无滑移条件, 壁面条件为

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

对壁面换热来说, 应有:

$$\dot{q}_w = \frac{1}{(\gamma-1) Re Pr} \frac{\mu}{\partial n} \frac{\partial T}{\partial n} = \text{常数} \quad (14)$$

2.2.2 出口边界条件

考虑到水下过程中, 流动关系的研究需要环境背压的相似关系, 需要喷管压力关系一致。即

$$\frac{P_{bp}}{P_{cp}} = \frac{P_{bm}}{P_{cm}} \quad (15)$$

2.2.3 燃烧表面边界条件

固体火箭发动机内的流动, 属于燃烧表面退移的加质流动。

$$V_n = \frac{\rho_p}{\rho} r \quad (16)$$

式中: ρ_p 为装药密度; ρ 为燃气密度; r 为燃速。

燃烧表面还需要燃烧表面温度相似, 即

$$T_{ip} = T_{im} \quad (17)$$

从式 (16) 上看, 在相似的燃烧温度下, 还需要保证燃速相似:

$$r_p = r_m \quad (18)$$

2.3 水下点火试验相似关系分析

火箭发动机水下点火缩比试验中, 除了考虑火箭发动机的相似关系以外, 还必须考虑空泡数和傅汝德的相似关系。

水下点火试验缩比试验在几何相似的基础上, 需要保证自然空泡数 σ_v 和通气空泡数 σ_c 相等以及傅汝德数 F_r 相等。

自然空泡数 σ_v :

$$\sigma_v = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad r_p = r_m \quad (19)$$

通气空泡数 σ_c :

$$\sigma_c = \frac{p_\infty - p_c}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad r_p = r_m \quad (20)$$

傅汝德数 F_r :

$$F_r = \frac{V_m}{\sqrt{gD}} \quad (21)$$

式(19)–(21)中: p_∞ 为水面大气压力; p_v 为试验水温下的饱和蒸汽压力; p_c 为通气空泡内压力; ρ 为水的密度; D 为模型特征直径; g 为重力加速度。

3 发动机水下点火缩比相似律及试验应用

3.1 缩比相似律分析

从上面的分析中,可以看出在发动机水下点火过程中,在几何相似和发动机工质物性参数相似的条件,还需要满足模型发动机与原型流动相似、热相似、燃速相似、相似的温度条件,以及自然空泡数、通气空泡数及傅汝德数相似等。

可以得到模型参数与原型参数的相似律如下(下标 m 表示模型参数,下标 p 表示原型参数, λ 表示模型的缩尺比):

- 1) 直径 $D_m = D_p / \lambda$;
- 2) 长度 $L_m = L_p / \lambda$;
- 3) 速度 $V_m = V_p / \sqrt{\lambda}$;
- 4) 时间 $t_m = t_p / \sqrt{\lambda}$;
- 5) 质量 $m = M / \lambda^3$;
- 6) 转动惯量 $J_m = J_p / \lambda^5$;
- 7) 水面压力 $p_{0m} = p_{0p} / \lambda + (1 - 1/\lambda)p_v$;
- 8) 发动机压比 $\frac{P_{bp}}{P_{cp}} = \frac{P_{bm}}{P_{cm}}$;
- 9) 燃烧温度 $T_{tp} = T_{tm}$;
- 10) 燃速 $r_p = r_m$ 。

3.2 发动机主要参数的相似关系分析

根据控制方程和相似准则得到的发动机水下

点火过程相似律,分析水下点火发动机面积、质量、流量、推力、总冲等的相似关系。

1) 面积相似关系:

$$\frac{A_p}{A_m} \rightarrow \left(\frac{D_p}{D_m} \right)^2 \quad (22)$$

可以得到 $n_A = \lambda^2$ 。

2) 质量相似关系:

$$\frac{M_p}{M_m} = \frac{\rho_p V_p}{\rho_m V_m} \quad (23)$$

对于相同的工质,有 $\rho_p = \rho_m$, 所以 $\frac{V_p}{V_m} \rightarrow \lambda^3$,

可以得到 $n_M = \lambda^3$ 。

3) 流量相似关系:

$$n_m = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_m} = \left(\varphi_p \Gamma_p \frac{P_{cp} A_{tp}}{\sqrt{R_p T_{tp}}} \right) / \left(\varphi_m \Gamma_m \frac{P_{cm} A_{tm}}{\sqrt{R_m T_{tm}}} \right) = \varphi_1 \lambda^3 \quad (24)$$

4) 推力相似关系:

$$n_F = \frac{F_p}{F_m} = (C_{Fp} P_{cp} A_{tp}) / (C_{Fm} P_{cm} A_{tm}) = \varphi_2 \lambda^3 \quad (25)$$

5) 总冲相似关系:

$$I = \int_0^{t_0} F dt \quad (26)$$

可以得到, $n_I = n_F \cdot n_t = \varphi_2 \lambda^{3.5}$ 。

3.3 发动机水下点火试验应用

应用上述相似关系,应用于某缩比发动机水下点火机理试验研究中,缩尺比为 3,缩比模型发动机与原型发动机的主要试验参数对比见表 1。

表 1 模型与原型发动机的试验参数对比
Table 1 Comparison of test parameters between engine model and prototype

参数	原型发动机	模型发动机
喉径/mm	54	18
喉部面积/mm ²	2 289.06	254.34
工作时间/s	3.4	1.96
装药量/kg	2.21	59.67
发动机压比	0.02/0.03/0.04/0.06	0.02/0.03/0.04/0.06

缩比发动机水下点火机理试验设备照片见图

1, 试验设备水罐长 8.5 m, 内部直径 2 m, 两侧开有矩形玻璃窗, 以便光测燃气射流。试验原理介绍见图 2, 可以通过加压设备为水罐注入压力, 模拟不同水深的环境压力。

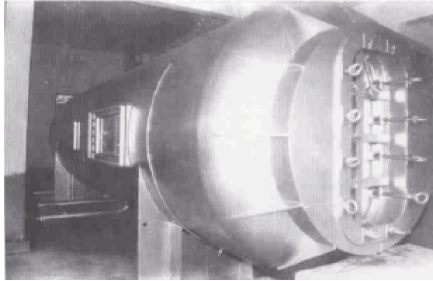


图 1 水下点火试验设备照片
Fig. 1 Photo of the test equipment

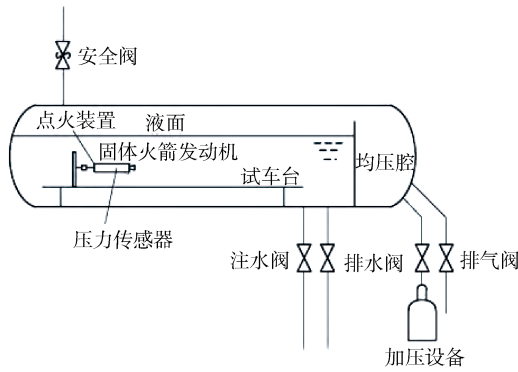


图 2 水下点火缩比试验原理介绍
Fig. 2 Principle of underwater ignition scale test

开展缩比发动机水下点火试验, 通过高速相机记录水下点火流动状态, 见图 3。

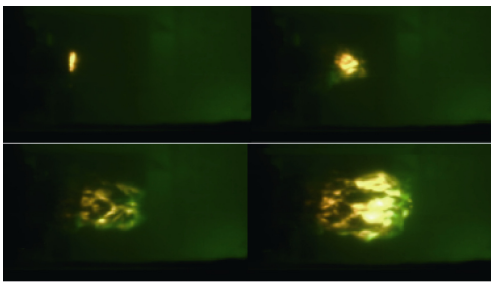


图 3 某发动机水下点火缩比试验照片
Fig. 3 Photo of an engine in underwater ignition scale test

通过连接发动机的测力装置, 得到了发动机在水下 10 m/20 m/30 m/50 m 推力特性并与发动机在空气中的推力进行比较, 见图 4。可以看出, 发动

机在水下的推力比空气中低, 随着水深的增大, 推力逐步降低。图 5 给出了平均推力随水深变化的规律, 水深越大, 平均推力越小。水下 50 m 时, 平均推力约为空气中推力的 90.3%。

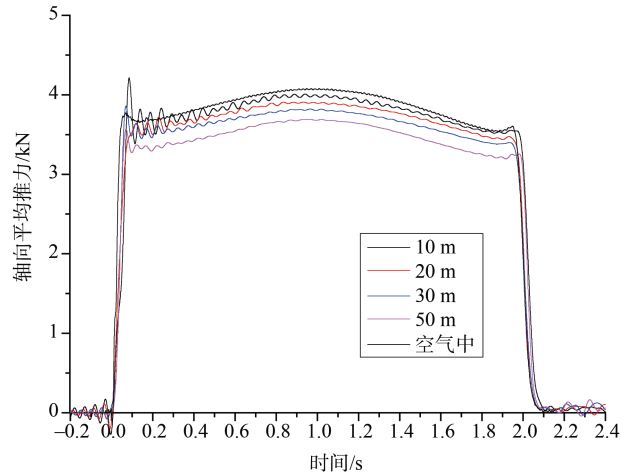


图 4 不同水深下发动机的推力特性
Fig. 4 Thrust characteristics of engine at different water depths

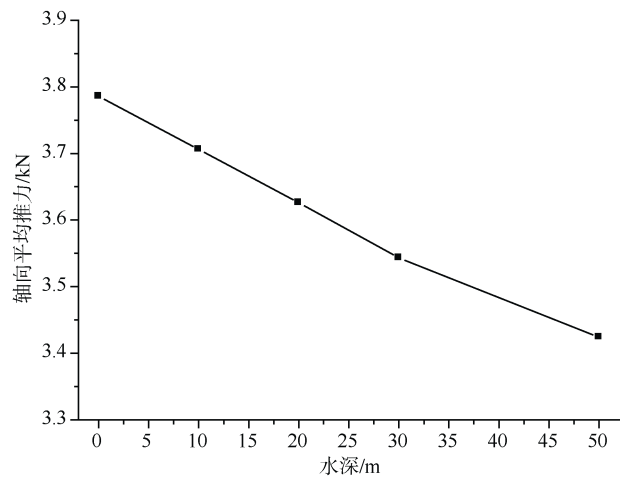


图 5 推力特性随水深变化规律
Fig. 5 Variation rule of thrust characteristics with water depths

通过缩比试验研究, 为某新型航行体水下点火的研究提前给出了性能预报和总体设计依据。

4 结束语

为了减少技术风险和缩短研制周期, 对于大型发动机水下点火设计研究, 可以先通过缩比试验, 研究其水下工作性能特点。本文研究火箭发动机水

下点火缩比技术,通过控制方程和缩比准则,得到火箭发动机水下点火缩比相似律及主要参数的相似关系,为发动机水下点火的缩比试验的开展提供理论支持。并在此基础上,开展了某缩比发动机水下点火试验,得到了发动机在水下 10 m/20 m/30 m/50 m 的推力特性,通过试验数据,分析了平均推力随水深变化的规律。

参考文献

- [1] LOCKARD D. Summary of the tandem cylinder solutions from the benchmark problems for airframe noise computations-I workshop[C]// 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2011.
- [2] BIANCHERIN A, LUPOGLAZOFF N, RAHIER G, et al. Comprehensive 3D unsteady simulations of subsonic and supersonic hot jet flow-fields: part 2: acoustic analysis[C]// 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit. Breckenridge: AIAA, 2002.
- [3] VYSOKOMORNAYA O V, KUZNETSOV G V, STRIZHAK P A. Heat and mass transfer in the process of movement of water drops in a high-temperature gas medium[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2013, 86 (1): 62-68.
- [4] PETITPAS F, MASSONI J, SAUREL R, et al. Diffuse interface model for high speed cavitating underwater systems[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35 (8): 747-759.
- [5] 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.
- [6] 唐云龙. 深水条件下固体火箭发动机燃气射流与推力特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [7] 甘晓松, 贾有军, 鲁传敬, 等. 水下燃气射流流场数值研究[J]. 固体火箭技术, 2009, 32 (1): 23-26.
- [8] 陈宏. 水下高速射流的燃气泡变化过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [9] 朱卫兵, 陈宏, 黄舜. 水下高速射流气泡变化过程数值研究[J]. 推进技术, 2010, 31 (4): 496-502.
- [10] 王德友, 李世鹏, 金戈, 等. 耦合尾喷管堵盖运动的水下固体火箭发动机点火启动过程特性[J/OL]. 兵工学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20220701.1014.009.html>.
- [11] 董锡鉴. 相似准则在液体火箭发动机试验中的应用推进技术[J]. 2004, 30 (1): 23-26.
- [12] 蔡廷湘. 水下点火与水下发射[J]. 舰载武器, 1999 (4): 7-12.

(责任编辑: 肖楚楚)