蓝箭航天液氧甲烷发动机研制进展

张小平，严　伟
（蓝箭航天空间科技股份有限公司，北京 100176）

摘　要：探讨了国内外商业航天运载火箭及其发动机的发展情况，研究比较了液氧甲烷、液氧煤油和液氧液氢等推进剂组合，提出液氧甲烷是商业航天、未来可重复使用液体火箭发动机的发展方向和最佳选择。分析了液体火箭发动机推力选择的原则，确定了蓝箭航天液氧甲烷发动机的推力为 80 t 和 8 t。比较了燃气发生器循环、补燃循环及膨胀循环等动力循环方式，选择了燃气发生器循环的技术方案。介绍了蓝箭航天两型液氧甲烷发动机的总体方案、性能指标、技术创新点、用途和研制情况。

关键词：商业航天；运载火箭；液体火箭发动机；推进剂；液氧甲烷；动力循环方式；推力
中图分类号：V 434　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.06.012

The Development of Land Space Liquid Oxygen/Methane Rocket Engine

ZHANG Xiaoping, YAN Wei
(Land Space Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: The development of commercial aerospace launch vehicles at home and abroad and their rocket engines are reviewed. The propellant combinations such as liquid oxygen/methane, liquid oxygen/kerosene, and liquid oxygen/liquid hydrogen are comparatively studied. It is proposed that liquid oxygen/methane is the development trend and the best choice of commercial aerospace and future reusable liquid rocket engine. Based on the analysis of the trust selection principle of liquid rocket engine, it is determined that the thrust of the Land Space liquid oxygen/methane engine is 80 t and 8 t. Different kinds of power cycle modes such as gas-generator cycle, staged-combustion cycle, and expander cycle are compared, and the gas-generator cycle is selected as the technical scheme. Finally, the overall scheme, performance indices, technical innovation, applications, and research status of two types of liquid oxygen/methane engines of Land Space are introduced.

Key words: commercial aerospace; launch vehicle; liquid rocket engine; propellant; liquid oxygen/methane; power cycle; thrust

0　引言

随着科学技术的发展，航天技术正在由探索空间的“事业”向利用空间的“产业”发展。在美国国家政策支持下，Space X 等公司获得巨大成功，凭借其猎鹰 9 火箭及其 Merlin 1D 发动机占据了国际商业发射市场的大部分份额。在发展过程中，Space X 高度注重发动机的研制和改进，通过持续改进发展了 Merlin 1A、B、C、D 四代发动机，实现了发动机与运载火箭的重复使用。为了满足未来发展的需求，Space X 和 Blue Origin 两家美国商业航天公司正在分别研制 Raptor 和 BE-4 液氧甲烷可重复使用发动机，其技术水平达到了新的高度[1-4]。

为响应国家创新驱动发展战略和军民融合发展战略，2015 年以来我国多家商业航天公司竞相成立[5]，规划发展了小型固体运载火箭、中小型液体运载火箭及其液氧甲烷发动机或者液氧煤油发动机，这将成为我国航天发展的有力补充，提高我国在商业航天市场上的竞争力。

蓝箭航天空间科技股份有限公司（简称蓝箭航天）成立于 2015 年，组建了一支不忘初心、有志于中

收稿日期：2019-06-23；**修回日期：**2019-10-28
作者简介：张小平（1970—），男，研究员，主要研究方向为液体火箭发动机。

国航天的研发团队，主要从事液体火箭发动机、运载火箭及其分系统研制。成立以来，蓝箭航天继承和发扬我国传统的航天精神，坚持以国为重、航天报国的原则，2017年10月开始论证、研制80 t级和8 t级两型液氧甲烷发动机。

目前，蓝箭航天建成了湖州制造基地和液体火箭发动机试车台，形成了质量管理体系，具备了液体火箭发动机的设计、制造、冷态试验、组件高压热试验和整机热试车的各种能力，完成了80 t级和8 t级两型液氧甲烷发动机整机试车，验证了关键技术突破的有效性，将为我国商业航天发展提供新的动力。

本文介绍了蓝箭航天液氧甲烷发动机的推进剂选择、推力选择、总体技术方案、性能指标、技术创新点、用途和研制情况。

1 蓝箭航天液氧甲烷发动机研制情况

1.1 推进剂研究与选择[6-11]

推进剂的选择对液体火箭发动机影响重大。目前，世界各国有毒的常规推进剂已处于逐步淘汰的过程中，不应作为商业火箭主动力的选择。无毒推进剂主要包括液氧/液氢、液氧/煤油和液氧/甲烷。液氧/液氢比冲最高，但密度很低，加之液氢成本高昂，更适用于上面级发动机；液氧/煤油和液氧/甲烷密度比冲高，更适用于助推级、一级和二级发动机。

液氧/煤油是传统的推进剂，典型型号包括俄罗斯的RD-107/108、RD-170、RD-180、RD-191等，美国的F-1、Merlin 1D，中国的YF-100、YF-115等，广泛用于各种一次性运载火箭。SpaceX公司的Merlin 1D发动机实现了重复使用，但由于性能、重复使用寿命、使用维护性等原因，该公司的后续型号Raptor发动机已改用液氧/甲烷。

液氧/甲烷是近20多年来快速发展的推进剂，21世纪以来美国、俄罗斯、欧洲、日本均进行了研究，美国SpaceX公司、Blue Origin公司已选择其用于下一代可重复使用发动机。液氧/煤油和液氧/甲烷的特性对比如下：

1）密度比冲。相同设计条件下，液氧/甲烷的组合密度比液氧煤油低20%；液氧/甲烷的理论比冲比液氧/煤油高约3%，燃烧效率高约1%，实际比冲高约15 s。由于比冲是强影响因素，综合考虑后，两种推进剂组合对火箭的影响不大。

2）来源与成本。航天煤油来自石化产品，国内主要由克拉玛依炼油厂提供，价格约15元/kg；国内外多个产地的液化天然气中甲烷含量在95%以上，杂质主要为乙烷和丙烷，总硫含量在1×10^{-6}以下，对发动机性能影响很小，可以直接用于液体火箭发动机，价格约6元/kg，国内多地可实现次日送达。2000年前，液化天然气尚未大规模使用，需要航天公司独自负责生产、运输、贮存，成本很高，这也是之前液氧/甲烷发动机没有得到发展的主要原因之一。

3）冷却特性。大型液体火箭发动机推力室内温度高达3 500 K左右，必须采用推进剂进行冷却，推进剂的冷却性能制约着发动机的可靠性、成本和寿命。煤油的结焦温度为560 K，比热为1 980 $J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$，黏度为$1\,964\times10^{-6}$ Pa•s；甲烷的结焦温度为950 K、比热为3；496 $J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$，黏度为$127\times10^{-6}$ Pa•s，甲烷均大幅优于煤油，综合冷却性能是煤油的3倍以上。因此，甲烷更适合推力室的冷却，特别是长寿命的可重复使用发动机。

4）使用维护性。使用维护性对运载火箭的发射成本和发射周期影响较大。煤油为常温推进剂，便于贮存、运输和加注，适用于一次性使用；但对于重复使用火箭则需要进行大量的清洗工作，同时清洗剂存在环保问题。甲烷为低温推进剂，贮存、运输和加注与液氧相似，比煤油复杂；但对于重复使用火箭，回收后液氧和甲烷均可快速蒸发，无需处理，24 h内可再次飞行。

5）对火箭的影响。甲烷的沸点为112 K，液氧沸点90 K，相差较小，可以方便地采用共底贮箱，有效缩短贮箱长度、减轻箭体重量，从而增加火箭的运载能力，降低发射成本。液氧和甲烷均为低温推进剂，火箭贮箱可以采用自生增压，降低成本。

综上所述，液氧/煤油更适用于一次性使用火箭，液氧/甲烷是目前重复使用火箭的发展方向和最佳选择。鉴于此，蓝箭航天选择采用液氧甲烷推进剂。

1.2 发动机推力选择

发动机的推力选择主要考虑其用途，即火箭及其应用市场。发动机推力和火箭方案选择的是否

合理，将严重影响其应用前景。我国CZ-2/3/4系列运载火箭及其YF-20系列发动机顶层规划堪称完美，以一型主发动机和一型游机组成火箭一、二级动力，发动机品种少、效率高，成本在猎鹰9火箭大幅降低价格之前为世界最低，50年来支撑着中国航天的发展，是国之脊梁。

我国商业航天火箭发动机的选择需要重点考虑火箭未来的市场前景和我国的技术基础、研制体系、基础设施等。根据商业发射市场分析，未来中、小、微卫星市场庞大，需要火箭具有1 t以上700 km SSO轨道的运载能力。我国目前运载火箭的技术体系是2.25、3.35和5 m直径。2.25 m直径的火箭运载能力过小，难以取得盈利；5 m直径的火箭规模过大，对于初创的商业航天来说研制经费难以支持；因此，商业航天最佳选择是3.35 m直径的火箭，5 m直径的火箭作为未来发展的选择。

对于商业航天公司，较佳的选择是先发展技术难度较低的一次性使用火箭，然后发展难度较大的可重复使用火箭。蓝箭航天的选择是先发展3.35 m直径的中型火箭，按照3.35 m直径火箭的允许高度，确定液氧甲烷火箭的起飞质量和起飞推力。蓝箭航天的发动机海平面推力优化选择为67 t，用于二级的发动机采用大面积比喷管，真空推力为80 t。为了满足二级火箭姿态控制的需求，提高两级火箭的运载能力，火箭二级采用1台4推力室的游动发动机，真空推力8.2 t。未来发展三级火箭时，可以将8 t级发动机的4台推力室改为1台大面积比推力室，形成8.8 t推力的三级发动机。同时，80 t级发动机具备重复使用的能力，未来可以在5 m直径内布置9台，形成大型可重复使用火箭的动力。

蓝箭航天主发动机推力选择80 t，适用于中型和大型运载火箭，满足火箭一级和二级的需求，具有非常良好的应用前景。

1.3　发动机循环方式选择[6]

动力循环方式是发动机最关键的技术路线，主要包括燃气发生器循环、补燃循环以及膨胀循环等。

燃气发生器循环系统简单、压力低，对材料、工艺的要求低，研制难度较低、周期较短、投入较少、成本较低、性能适中，更适合规模较小的商业航天公司。同时，更为重要的是发动机的力、热环境较好，便于实现重复使用。

补燃循环包括富氧补燃、富燃补燃和全流量补燃，其比冲性能比燃气发生器循环高约10%，但系统复杂，压力是燃气发生器循环的几倍，研制难度大、周期长、投入多、成本高，更适合大型航天公司。补燃循环也可实现重复使用，但由于力、热环境非常复杂，研制难度大。

膨胀循环分为开式膨胀循环和闭式膨胀循环，一般用于液氧液氢发动机。这是由于氢的分子量只有2，涡轮的做功能力较强。对于液氧甲烷发动机，甲烷的分子量为16，涡轮的做功能力远低于氢，如采用膨胀循环则发动机比冲很低，因此，液氧甲烷发动机不适宜采用膨胀循环。

通过上述分析，蓝箭航天两型液氧甲烷发动机均采用燃气发生器循环。

1.4　发动机总体方案

蓝箭航天80 t级液氧甲烷发动机采用燃气发生器循环，单台推力室、同轴式涡轮泵、泵后摇摆、火药点火（后期采用火炬点火实现多次点火）、分级起动、自生增压。8 t级发动机采用4台推力室，其余系统配置与80 t级发动机相同。两型发动机主要系统组成如下。

氧化剂供应系统：由主系统和副系统组成，包括氧泵、氧主阀、氧副阀、推力调节阀、节流圈及相应管路等组成。

燃料供应系统：由主系统和副系统组成，包括燃料泵、燃料主阀、燃料副阀、混合比调节阀、节流圈及相应管路等组成。

燃气系统：由推力室、燃气发生器、燃气导管、涡轮及排气管组成。主要功能是驱动涡轮做功，为氧换热器提供加热热源，组织燃烧产生推力。

控制与吹除系统：由控制气瓶、吹除气瓶、自锁电磁阀、控制电磁阀及相应管路、电缆等组成。主要功能是控制阀门的打开、关闭，并提供吹除气源。

点火起动系统：由火药点火器、火药起动器及相应电缆等组成。主要功能是在发动机起动时，带动涡轮泵起旋，点燃推力室、燃气发生器中的推进剂。

预冷回流/泄出系统：主要由吹除单向阀、节流圈、预冷泄出阀、预冷回流阀及相应管路组成。主要功能是发动机预冷时完成推进剂的回流、泄出与排放。

贮箱增压系统：由氧自生增压系统和燃料自生增压系统组成，包括增压气蚀管、增压单向阀、节流圈、换热器及相应管路等组成，主要功能是为贮箱提供增压气源。

调节系统：由推力调节阀、混合比调节阀和控制电机组成。通过电机运转，改变调节阀的流通面积，调节系统流量和压力，实现推力和混合比调节。

推力矢量控制系统：由常平座、软管和伺服机构组成。通过伺服机构控制推力室摆动，从而控制推力方向。

热防护系统：由隔热包覆层等组成，主要功能是对低温及高温部件进行包覆，减少低温部件和高温部件的热传导。

1.5 发动机主要性能

发动机主要性能参数见表1。

表1 发动机主要性能参数

Tab.1 Technique targets of the engine

参数名称	80 t级		8 t级	
	地面状态	真空状态	二级游机	三级主机
地面推力/kN(t)	658.5 (67)	—	—	—
地面比冲/(m•s^{-1})(s)	2 800 (286)	—	—	—
真空推力/kN(t)	746.5 (76)	776.5 (80)	80 (8.2)	86 (8.8)
真空比冲/(m•s^{-1})(s)	3 174 (324)	3 302 (337)	3 260 (333)	3 500 (357)
起动次数/次	1～3	1	2	2
使用次数/次	≥10	1	1	1
推力调节范围/%	50～110	—	—	—
混合比调节范围/%	±3	±3	±10	±10

2 发动机技术创新点

蓝箭航天以国内外和行业内外的最新技术为基础，勇于创新，突破并采用了一系列先进技术，主要包括：

1）80 t发动机是国内首台作为工程型号的液氧甲烷可重复使用发动机，相关技术代表着航天主动力的发展方向，研发的故障诊断、使用维护技术已在多次试车中得到初步应用。

2）大型泵压式液体火箭主发动机大范围推力调节技术，设计调节范围50%～110%，具备分级起动功能，达到国内先进水平。

3）液氧甲烷高效稳定燃烧技术，推力室燃烧效率达到0.985，燃烧室脉动压力低于0.1 MPa，达到国际一流水平。

4）大型喷管激光焊接技术，此项技术为国内首创，达到国际领先水平。

5）高效率低温泵技术，设计中采用了先进的仿真技术，氧泵效率0.80，甲烷泵效率0.72，振动幅值小于50 g，达到国际先进水平。

6）涡轮泵流体动压密封技术，此项技术是发动机重复使用的关键之一，具有低泄漏、零磨损、适应多次起停等特点。

7）高精度高压低温调节器技术，调节器由电机、控制仪驱动，实现低温发动机推力和混合比无级调节。此项技术是实现发动机大范围推力调节和运载火箭回收的关键，为国内首创。

8）采用新型密封结构的低温阀门技术，在国内液体火箭发动机低温阀门中首次采用泛塞封动密封技术，大幅降低了阀门的制造成本，缩短了制造周期。

9）泵后摇摆技术，相比传统的泵前摇摆技术，蓝箭航天立足最新技术，采用泵后摇摆方案，可有效减小摇摆力矩和摇摆空间，实现单向摇摆、双向摇摆。

10）过冷推进剂技术，瞄准发射场和火箭的工程应用，将采用过冷液氧和甲烷，以提高发动机和火箭性能。

3 发动机的用途

两型液氧甲烷发动机主要用于蓝箭航天朱雀二号系列运载火箭，该火箭继承传统的3.35 m直径，基本型为两级方案，未来拓展为三级方案，一级

采用4台80 t发动机，二级采用1台80 t发动机和1台8 t发动机，三级采用1台8 t发动机。朱雀二号运载火箭两级状态的LEO轨道运载能力为4 t、500 km SSO轨道运载能力为2 t，三级状态的LEO轨道运载能力为6 t。将两个一级捆绑为助推后，LEO轨道运载能力可达17 t。

对于可重复使用运载火箭，可以在5 m直径内布置9台80 t发动机，或者在3.8 m内布置5台，形成可重复使用航天动力装置。

4 研制进展

按照“动力先行”的原则，2017年10月开始论证和研制两型液氧甲烷发动机。2019年5月，完成了80 t发动机80%工况20 s整机试车，完成模样研制。2019年7月，完成了80 t发动机100%工况100 s整机试车，试车中发动机海平面推力设计值为658 kN、实测值为667 kN，海平面比冲设计值为283.5 s、实测值为284.5 s，推力室室压设计值为10.0 MPa、实测值为10.1 MPa，试车照片如图1所示。

图1　蓝箭航天液氧甲烷发动机试车照片

Fig.1　Photograph of Land Space liquid oxygen/methane rocket engine hot test

按照研制计划，2020年5月，将完成极限工况试车、极限边界条件试车、摇摆试车、长程试车等全面考核，完成初样阶段研制。2020年，完成可靠性验证与鉴定试车，具备飞行条件，交付动力系统试车产品，初步形成批产交付能力。2021年，发动机重复使用次数达到10次以上。

5 结束语

当前，航天技术正在快速蓬勃发展。响应国家创新驱动发展战略和军民融合发展战略，2015年以来我国多家商业航天公司竞相成立。根据对未来发射市场的研究，蓝箭航天选择80 t和8 t两型液氧甲烷发动机作为发展战略，发动机均采用燃气发生器循环、泵后摇摆、分级起动，创新研发了十余项先进技术，预计2020年具备批生产交付飞行能力，为我国航天发展提供新的动力。

参考文献

[1] SpaceX [EB/OL]. [2019-06-10]. https://www. spacex. com/.

[2] Let raptor engineering handle your next high-performance digital design [EB/OL]. [2019-06-10]. https://raptorengineering.com/.

[3] originBlue [EB/OL]. [2019-06-10]. https://www. blueorigin.com/.

[4] FOUS J. Blue origin expects BE-4 rocket engine qualification tests to be done this year [EB/OL]. (2018-04-23)[2019-06-10]. htstps://www.space.com.

[5] 黄志澄. 航天新时代，我国商业航天面临哪些机遇挑战 [EB/OL]. [2019-02-18]. http://m. sohu. com/a/280107795_466840.

[6] 张小平，李春红，马冬英. 液氧/甲烷发动机动力循环方式研究[J]. 火箭推进，2009(8)：14-20.

[7] 李春红，张小平，马冬英. 液氧/甲烷燃气发生器点火方案研究[J]. 火箭推进，2010(5)：7-12.

[8] 马冬英，卢钢，张小平. 液氧/甲烷燃气发生器试验研究[J]. 火箭推进，2013(3)：21-26.

[9] 李斌，张小平，高玉闪. 我国可重复使用液体火箭发动机发展的思考[J]. 火箭推进，2007(1)：1-7.

[10] 禹天福，李亚裕. 液氧/甲烷发动机的应用前景[J]. 航天制造技术，2007(2)：1-4.

[11] 尹亮，刘伟强. 液氧/甲烷发动机研究进展与技术展望[J]. 航空兵器，2018(4)：21-27.