



力学学报

Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics

ISSN 0459-1879, CN 11-2062/O3

《力学学报》网络首发论文

题目： 爆轰驱动惰性气体磁流体发电试验研究
作者： 卢子寅， 张晓源， 李进平， 马虎
网络首发日期： 2023-01-19
引用格式： 卢子寅， 张晓源， 李进平， 马虎. 爆轰驱动惰性气体磁流体发电试验研究 [J/OL]. 力学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2062.O3.20230117.1617.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

爆轰驱动惰性气体磁流体发电试验研究

卢子寅^{*+}, 张晓源^{*1)}, 李进平^{*}, 马虎⁺

^{*} (中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 海淀 100190)

⁺ (南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要 磁流体发电装置作为一种特殊的高功率脉冲电源, 具有效率高、容量大、启动快的优点, 制约其发展的关键在于如何获得高电导率的发电工质。爆轰驱动具有远超常规方式的驱动能力, 在提供高温、高电导率气体方面独具优势。将爆轰驱动激波管技术应用于磁流体发电, 有利于突破磁流体发电技术瓶颈, 故据此开展了基于爆轰驱动激波管技术的惰性气体磁流体发电试验研究。爆轰驱动根据激波管点火位置不同分为反向和正向两种运行模式, 反向爆轰驱动可提供时间较长、状态稳定的试验气流, 而正向爆轰优势在于产生高焓试验气流。试验系统由爆轰驱动激波管、拉瓦尔喷管、发电通道、电磁铁和真空罐等组成, 试验中分别以反向爆轰和正向爆轰驱动激波管产生发电工质, 利用激波将惰性气体压缩至高温从而发生电离, 形成的等离子体经喷管加速后, 最终在法拉第直线型发电机内切割磁感线输出电能。磁场强度 0.9 T 的条件下, 反向爆轰在负载 3.5 Ω 时获得了较稳定的 1.9 kW 输出功率, 持续时间 1.5 ms; 外接 0.035 Ω 负载时, 正向爆轰在 0.3 ms 内短时输出功率高达 212 kW, 功率密度为 0.2 GW/m³。试验成功验证了基于爆轰驱动激波管技术的惰性气体磁流体发电方案的可行性, 为高功率脉冲电源的应用与发展提供了新的方法。

关键词 气相爆轰, 磁流体发电, 激波管, 等离子体, 法拉第型发电机

中图分类号: O361

文献标识码: A

doi:

EXPERIMENTAL STUDY ON INERT GAS MAGNETOHYDRODYNAMIC POWER GENERATION BY DETONATION-DRIVEN

Lu Ziyin^{*+}, Zhang Xiaoyuan^{*1)}, Li Jinping^{*}, Ma Hu⁺

^{*} (State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Beijing 100190, China)

⁺ (School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract As a special high-power pulse supply, magnetohydrodynamic(MHD) power generation device has many advantages, such as high efficiency, large capacity, and fast startup. The key to restrict the development of it is how to obtain the working gas with high conductivity. The driving capacity of detonation-driven is far beyond the conventional mode. It has unique advantages in providing high temperature and high conductivity gas. Applying the detonation-driven shock tube technology to MHD power generation is beneficial to breaking through the technical bottleneck, so an experimental study of inert gas MHD power generation based on detonation-driven shock tube was carried out. According to different ignition positions, detonation-driven shock tube can be divided into backward

1) 通讯作者: 张晓源, 助理研究员, 主要研究方向为流体力学. E-mail: zhangxiaoyuan@imech.ac.cn

引用格式: 卢子寅, 张晓源, 李进平, 马虎. 爆轰驱动惰性气体磁流体发电试验研究. 力学学报, 2023, xx(x): xx-xx

(C)1994-2023, Lu Ziyin, Zhang Xiaoyuan, Li Jinping, Ma Hu. Experimental study on inert gas magnetohydrodynamic power generation by detonation-driven. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, xx(x): xx-xx

mode and forward mode. Backward detonation-driven mode can provide a long time and stable state of the gas, while forward detonation-driven mode has the advantage of producing high enthalpy gas. The test system is composed of detonation-driven shock tube, Laval nozzle, power channel, electromagnet, vacuum tank, load resistance and other measuring devices. In the test, plasma flow is generated by backward or forward detonation-driven shock tube. The inert gas is compressed to high temperature and high conductivity by shock wave, ionized into conductive plasma. The plasma accelerates to high speed inside the nozzle, then cut the magnetic induction line in linear shaped faraday-type generator to generate electricity. Under the condition of 0.9 T magnetic induction intensity, the stable output power at 3.5 Ω load reaches 1.9 kW by backward detonation-driven with a duration of 1.5 ms. With an external load of 0.035 Ω , the generator can produce up to 212 kW for a short time within 0.3 ms by forward detonation-driven, and the power density is 0.2 GW/m³. The experiment successfully verified the feasibility of inert gas MHD power generation by detonation-driven shock tube. And it provides a new method for the application and development of high-power pulse supply.

Key words gaseous detonation, MHD power generation, shock tube, plasma, faraday-type generator

引言

高功率脉冲电源能在 10^{-9} - 10^3 s 持续时间内产生 10 - 10^9 J 或更多能量, 可为大功率激光器、电磁发射装备、微波武器、托卡马克热核装置和高功率应急通讯设备等多种脉冲功率负载提供动力源, 在国防科研和工业民用领域都有着迫切的应用需求^[1-4]。在诸多类型的脉冲电源中, 磁流体发电技术具有以下独特的优势: 无转动部件, 单机容量大, 效率高; 无需中间储能元件, 发电装置可直接向负载传递能量; 不用大功率开关, 启动速度快等^[5]。早在 1910 年国际上就承认了磁流体 (Magnetohydrodynamics, 简称 MHD) 发电机专利, Avco-Everett 研究实验室^[6]在 1959 年建造了功率为 11.5 kW 的试验性磁流体发电机, 并点燃了 228 个灯泡, 标志着世界上第一台能够发出实际有效功率的磁流体发电机研制成功。

对于磁流体发电技术而言, 使原子电离成为等离子态, 获得导电性能优异的高温工质是磁流体发电机能够大功率输出的关键^[7-8]。有多种产生导电工质的方法, 被探索并应用于磁流体发电中。西屋公司^[9]以汽油和纯氧燃烧产生高温气流作为发电工质, 在 1.4 T 的磁场条件下获得了 10.4 kW 的电功率。MHD 研究有限公司^[10]利用炸药爆炸来产生等离子体工质, 添加硝酸铯作为电离种子, 研制了一台爆炸式脉冲磁流体发电机, 转换效率为 1.6%。Iwata^[11]通过激光加热使氩气在 20 μ s 内短暂达到数千度, 对采用脉冲激光驱动的磁体流体发电机进行了试验, 发现随着气体温度升高, 发电机内部的流速和导电性增加, 输出能量增加。李益文^[12]以航空

煤油燃烧产生的 2750 K 燃气作为磁流体发电工质, 测出其电导率为 10 S/m。欧东斌^[13]利用电弧加热器加热氩气, 模拟磁流体发电所需的温度和压力条件并注入铯种子提高电导率, 在磁场强度 1 T 的试验条件下, 直线型发电机上最大输出发电功率达到 196 W。燃料燃烧、炸药爆炸、激光加热和电弧放电都是获得磁流体发电工质的有效途径, 但是, 燃烧获得的燃烧产物温度有限, 气体电导率不足; 炸药爆炸产生的发电工质时间短, 已开展的试验时间在微秒量级, 若要延长需要使用大量炸药, 安全问题突出; 激光与电弧加热本身消耗大量的电能。

利用激波压缩气流也是一种获得高导电性工质的方式。采用激波管或激波风洞可以将来流温度提升至 10000 K 以上, 试验时间在毫秒量级, 当电离度满足要求后, 也无需添加碱金属种子促进其电离。已经有将激波管技术应用于磁流体发电的相关研究, Okuno^[14-15]首次在直线型法拉第发电机中采用氦气驱动无种子的高温氩等离子体进行了磁流体发电试验, 获得了几乎无波动的输出功率。Murakami^[16-18]在短时脉冲激波设备上开展试验研究, 将磁场强度由 2 T 增加到 4 T, 观察到等离子体由入口处的热平衡态转变为弱非平衡态, 且在 9000 K 高温条件下产生的等离子体分布均匀。Tanaka^[19-23]利用激波风洞, 将发电机入口总温从 8000 K 提高到 9000 K, 最大输出功率由 9.3 kW 升至 15.1 kW; 将入口总压从 0.064 MPa 提高到 0.105 MPa, 获得最大输出功率的最佳负载阻值下降; 将氩气与氙气进行对比试验, 发现不同惰性气体形成的等离子体从不稳定状态转

变为稳定状态所需的入口总温不同,证明了相同总温下氩气的发电效率高于氦气。相关研究表明了激波管在磁流体发电中的应用潜能,也体现出许多有待深入研究的问题,同时磁流体发电的激波管试验工作均在轻气体驱动的激波管上开展,受其驱动能力影响,产生的气体工质导电性受限。

激波管的驱动方式有轻气体驱动、燃烧驱动和自由活塞驱动等。爆轰驱动是燃烧驱动的一种特殊情况,具有极大的输出功率,能量释放率可达普通燃烧的万倍以上^[24-25]。产生高温高焓气流是爆轰驱动的先天优势,若以爆轰驱动激波管作为磁流体发电机的能量源,则可能产生导电性能优异的气体工质。基于爆轰驱动激波管的方式,本文开展了惰性气体磁流体发电的原理验证试验。利用正向和反向爆轰驱动分别产生高电导率的气体工质,结合法拉第直线型磁流体发电机产生瞬态的高功率电流,对爆轰驱动惰性气体磁流体发电方案进行了试验验证。

1 爆轰驱动惰性气体磁流体发电原理

1.1 磁流体发电

磁流体发电是一种非传统的新型发电模式^[26],能够将热能直接转化为电能,它的基本原理如图 1 所示,根据法拉第电磁感应定律,以导电流体代替固体导体,使导电流体以一定的速度通过与流场方向垂直的磁场,切割磁感线产生感应电动势,从而产生电能。当工质流体切割磁感线通过发电通道时,可得出感应电动势 E

$$E = Bbv \quad (1)$$

其中, b 为电极间距离, B 为磁场强度, v 为流动速度。

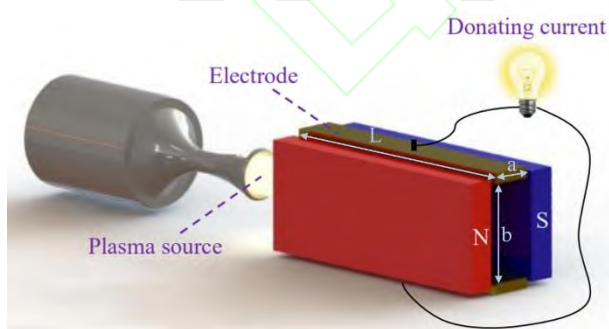


图 1 磁流体发电原理图

Fig.1 Schematic diagram of MHD power generation

根据伏安特性曲线,负载下发电机的理想输出功率 P 为

$$P = I^2 R = \frac{E^2}{(R_i + R)^2} R \quad (2)$$

$$= abL\sigma v^2 B^2 (1 - K) K$$

其中, a 为矩形截面的直线型磁流体发电机电极宽度, L 为有效发电长度, σ 为流体的电导率, K 为负载系数,定义负载电阻 R 与其和发电机内阻 R_i 之和的比值

$$K = \frac{R}{R_i + R} \quad (3)$$

功率密度 P_e 为

$$P_e = \sigma v^2 B^2 (1 - K) K \quad (4)$$

式(4)可见,输出功率主要与电导率、气流速度和磁场强度等物理参数有关。

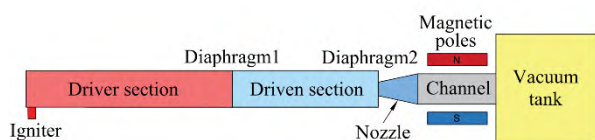
电导率是磁流体发电工质最重要的物理参数之一,直接影响了磁流体发电的效果和效率。目前各国的磁流体发电试验中发电工质大都采用惰性气体氩气或氦气^[27],并添加电离种子,因为碱金属电离电位较低,工质中添加极少量即可显著提高其电导率^[28]。但碱金属化学性质活泼,高温下极易与发电通道内壁面反应,影响发电通道性能,故选择无种子的纯氩气作为发电工质。

高温气体的电导率与温度联系紧密。以惰性气体磁流体发电试验中通常采用的流体工质氩气为例^[29],常压下温度低于 3000 K 时,其电导率几乎可以忽略不记,导电性能极差;只有至少达到 5000 K,此时氩气的电导率在 10 S/m 以上,才能满足最低发电要求;而当温度升至 8000 K,电离平衡下的氩气电导率就能达到 1000 S/m 以上。为了获得较高的磁流体发电输出功率,惰性气体试验工质应该具有高电导率、高速度,同时外加较大的恒定磁场,而电导率 σ 随着温度的升高而增加,因此提高气流温度有利于提高输出功率。激波管产生的高温气体在通过拉瓦尔喷管加速后,马赫数逐渐升高,静温逐渐降低。根据公式(4),发电功率与工质流经磁场时的电导率、速度的平方成正相关,气流速度低,功率相应降低;但气流膨胀太快,温度下降,与温度为正相关的电导率随之下降,功率亦降低。因而,气流在喷管内加速过慢或过快都将对发电效果产生不利影响。

1.2 爆轰驱动激波管产生等离子体

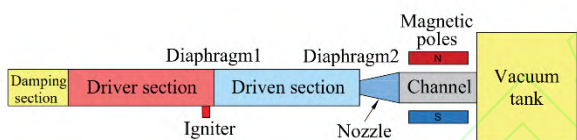
利用爆轰驱动激波管,通过激波压缩,可以将

惰性气体压缩至高温、高电导率的等离子体，成为为磁流体发电的理想工质。爆轰驱动磁流体发电系统示意图见图 2，主要组成部分包括爆轰驱动激波管、拉瓦尔喷管、发电通道、真空罐和电磁铁等。爆轰驱动激波管利用爆轰后的高温高压燃气压缩惰性气体，产生高温、高电导率的等离子体，经喷管加速后，形成超声速的等离子体流，最后通过发电通道切割磁感线产生感应电动势。有两种可应用于磁流体发电的爆轰驱动方式：正向爆轰驱动和反向爆轰驱动，两者的区别在于爆轰波在激波管驱动段内的运动方向不同。



(a) 正向爆轰驱动

(a) Forward detonation-driven



(b) 反向爆轰驱动

(b) Backward detonation-driven

图 2 爆轰驱动磁流体发电结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of detonation-driven

MHD power generation

激波管是一种在产生高温气体方面独具优势的装置^[30]，它利用激波压缩试验气体以提高气流温度，由于产生的是瞬态的高温气体，避免了高温对管壁的长时间烧蚀。根据理想激波管流动理论^[31]，激波管产生的试验气流滞止状态参数，是由被驱动段初始状态和入射激波马赫数 M_s 决定的。入射激波马赫数越高，压缩后气体的滞止压力和滞止温度越高。入射激波马赫数与驱动段初始状态（4 区）和被驱动段初始状态（1 区）密切相关

$$\frac{P_4}{P_1} = \left(\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} M_s^2 - \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1} \right) \cdot \left[1 - \frac{\gamma_4 - 1}{\gamma_1 + 1} \frac{a_1}{a_4} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}} \quad (5)$$

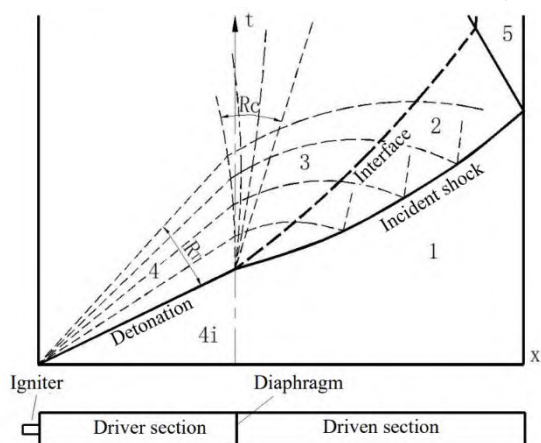
式中 a_4 和 a_1 分别为 4 区和 1 区声速。当气体的初始状态给定时，入射激波马赫数 M_s 与驱动气体和试

验气体初始压比 P_4/P_1 声速比 a_4/a_1 呈正相关，在试验气体状态不变的情况下，提高 4 区驱动气体压力和声速有利于获得强入射激波。

爆轰驱动利用混合可燃气体爆轰后所获得的高压气体作为驱动源，瞬时压力可达初始充气压力的 20 倍以上。在一根封闭的管道内，充满静止的混合可燃气体，从管道的一端点火，则会产生向另一端传播的爆轰波。经过爆轰波面化学反应瞬间完成，释放的化学能转变为爆轰产物的内能，温度、压力迅速升高至 CJ 值^[32]。同时爆轰波后会形成一簇同向传播的膨胀波系，在膨胀波的作用下，气流逐渐减速直至静止，静止的爆轰产物仍具有较高温度和压力。无论爆轰后的爆轰产物是处于 CJ 状态，还是经膨胀波后状态有所降低，都能作为激波管的驱动气体，即产生了可应用于磁流体发电的两种爆轰驱动方式：正向爆轰驱动和反向爆轰驱动。两者的点火起爆位置不同，波系结构也有很大区别，详见图 3。

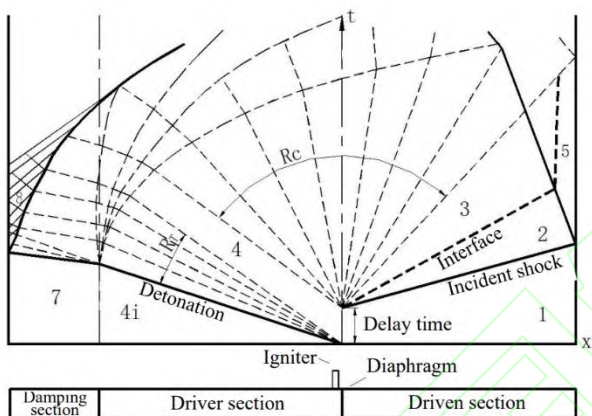
正向爆轰驱动激波管如图 3(a)所示，被驱动段串接在管道的右侧，点火位置位于整个激波管左侧上游的一端。点火后，爆轰波形成于驱动段端部并向下游传播。到达膜片处时，驱动段内氢氧混合气已全部反应，成为高温高压的驱动气体。随后冲破膜片，驱动气体进入被驱动段同时形成入射激波。爆轰波传播方向与入射激波传播方向与相同，由于爆轰波后跟着泰勒膨胀波，受其影响，入射激波不断衰减，因而正向爆轰驱动虽驱动能力强，但气流的稳定性不佳。

反向爆轰驱动以图 3(b)所示，在驱动段右侧串接被驱动段，点火位置贴近膜片。为了避免爆轰波直接冲击驱动段端部对设备造成损伤，同时减少其反射波的干扰，故串接一个真空卸爆段。点火起爆后爆轰波向驱动段上游传播，以泰勒膨胀波后的气体作为驱动气体，在膜片破裂后形成入射激波。入射激波及其在端面的反射激波，两次对被驱动段初始气体（1 区）进行压缩，得到压缩后的高温、高压气体（5 区）。



(a) 正向爆轰驱动

(a) Forward detonation-driven



(b) 反向爆轰驱动

(b) Backward detonation-driven

图3 爆轰驱动磁流体发电波系图

Fig.3 Wave diagram of detonation-driven

MHD power generation

爆轰波起始位置的不同导致了正向和反向爆轰驱动具有不同的特点。正向爆轰驱动直接利用爆轰波后的爆轰产物作为驱动气体，其温度和压力很高，且爆轰产物的动能可进一步提升其驱动能力。在相同的初始条件下，正向爆轰驱动产生的入射激波马赫数高于反向爆轰驱动，驱动能力更胜一筹，获得的5区温度、压力更高。但由于泰勒膨胀波的影响，激波强度随时间的衰减较为严重，难以得到压力平稳的滞止气体。而反向爆轰驱动以膨胀波后均匀的高压气体驱动，其驱动压力虽然较爆轰波CJ值而言较低，但气流品质高，能够在一定时间内保持稳定。按照试验需求的不同，可充分利用二者的优点对驱动方式进行选择。

1.3 爆轰驱动激波管产生的等离子体性能

根据激波管初始压比 P_{41} 与入射激波马赫数 M_s

的关系式(5)，在 P_{41} 趋于无穷时，可取得 M_s 的极值

$$(M_s)_{\max} \approx \frac{1}{2} a_{41} \left(\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_4 - 1} \right) \cdot \left[1 + \sqrt{1 + 4 \left(a_{14} \frac{\gamma_4 - 1}{\gamma_1 + 1} \right)^2} \right] \quad (6)$$

利用氢氧爆轰驱动氩气，理论上入射激波马赫数的极大值接近 60。但是受设备能力的影响， P_{41} 不可能无限大，对于爆轰驱动而言，提升压比 P_{41} 有两种方法：一是提高 P_4 ，通过调整驱动段初始压力和氢氧混合气的当量比来改变驱动压力；二是降低 P_1 ，对于达到激波管压力承受极限的工况，要想再扩大压比只能降低被驱动段初始压力。

依据设备试验能力，驱动段初始压力取 4 atm。反向爆轰驱动时氢氧摩尔比 2.5:1，被驱动段氩气压力取 2500 Pa，可获得马赫数 9.8 的入射激波，此时激波管达到缝合运行状态，稳定的试验气流总压达到 15 atm，总温达到 1.3×10^4 K。正向爆轰时氢氧摩尔比 3.5:1，被驱动段氩气压力取 1250 Pa，试验获得的入射激波马赫数为 14，总压 25 atm，总温 1.6×10^4 K。

表 1 反向爆轰驱动激波管性能参数

Table 1 Performance parameters of backward detonation-driven shock tube

Type	Parameter
Mole ratio of driver gas	H ₂ :O ₂ =2.5:1
Initial pressure of driver gas [$\times 10^5$ Pa]	4
Driven gas	Ar
Initial pressure of driven gas [Pa]	2500
Incident shock Mach number	9.8
T ₅ [$\times 10^3$ K]	13
P ₅ [$\times 10^6$ Pa]	1.5

表 2 正向爆轰驱动激波管性能参数

Table 2 Performance parameters of forward detonation-driven shock tube

Type	Parameter
Mole ratio of driver gas	H ₂ :O ₂ =3.5:1
Initial pressure of driver gas [$\times 10^5$ Pa]	4
Driven gas	Ar
Initial pressure of driven gas [Pa]	1250
Incident shock Mach number	14
T ₅ [$\times 10^3$ K]	16
P ₅ [$\times 10^6$ Pa]	2.5

2 试验方案

爆轰驱动惰性气体磁流体发电系统由爆轰驱动激波管、拉瓦尔喷管、发电通道、电磁铁和真空罐等组成。激波管内径 224 mm，驱动段 11 m，被驱动段 15 m，采用反向爆轰时还需卸爆段 3 m，各段之间由膜片隔开。拉瓦尔喷管面积比为 2，喉道截面尺寸为 40 mm×40 mm，出口为 40 mm×80 mm。法拉第直线型磁流体发电机的发电通道设计为连续电极型，结构较为简单，入口处矩形截面尺寸与喷管出口相同，有效发电长度为 300 mm，为满足其绝缘性与耐高温性要求，采用特氟龙制造。通道上下两侧相对位置布有整块矩形电极，电极材料为紫铜。通道为二维构型，电极壁面略微扩张以减小流动中边界层厚度增加带来的影响，通道入口高度 80 mm，出口高度 100 mm。SG-280 电磁铁额定电流 50 A，可通过调整两磁极间气隙距离改变磁场大小，本试验中极间距离 80 mm，整个发电通道置于电磁铁产生的 0.9 T 恒定磁场中，磁场垂直于气流流向。电极接线柱上通过导线与外部负载连接，负载端输出电压由 DP6150B 高压差分探头测得，其带宽为 200 MHz，最大测量值 1500 V，电流由 HCP8300 高频电流探头测出，带宽 6 MHz，可测量 300 A 的连续电流和 500 A 的峰值电流。试验系统见图 4。

表 3 试验工况

Table 3 Working conditions

Type	Parameter
Driven gas	Ar
T_5 (backward detonation-driven) [K]	1.3×10^4
P_5 (backward detonation-driven) [Pa]	1.5×10^6
T_5 (forward detonation-driven) [K]	1.6×10^4
P_5 (forward detonation-driven) [Pa]	2.5×10^6
Area ratio(Exit/Throat)	2
Load resistance [Ω]	0.035~3.5
Magnetic flux density [T]	0.9

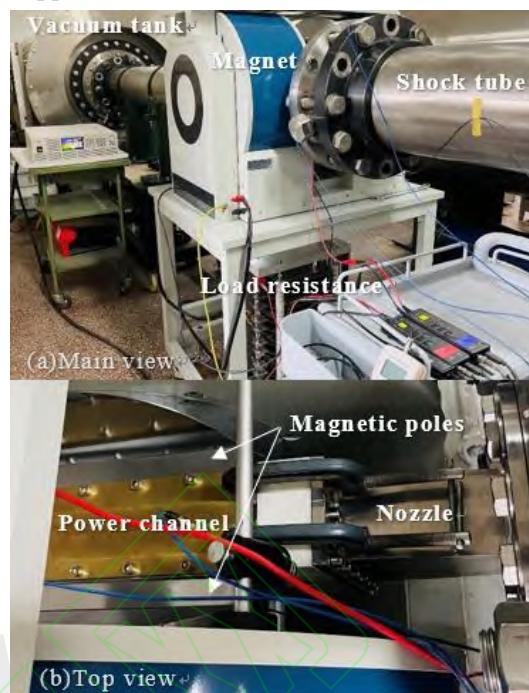


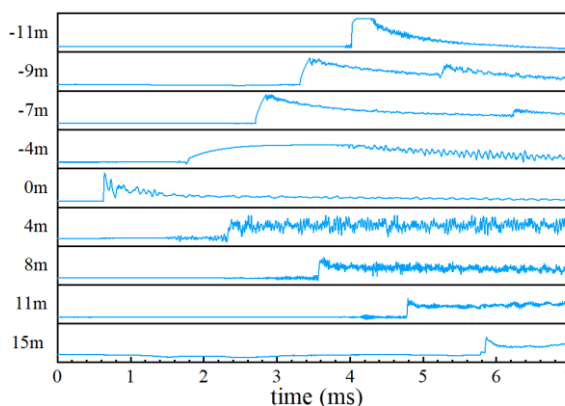
图 4 爆轰驱动磁流体发电试验设备

Fig.4 MHD power generation equipment

3 试验结果与分析

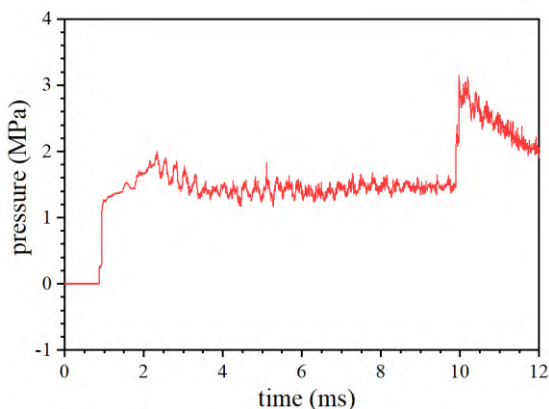
3.1 反向爆轰驱动磁流体发电试验

反向爆轰驱动试验中，爆轰波的传播方向与入射激波方向相反。如图 5(a)所示，对激波管沿程压力进行了测量，0 m 处为点火管位置，图中能够看出爆轰波与入射激波反向传播的过程，测得入射激波马赫数为 9.8。反向爆轰驱动的驻室压强-时间曲线如图 5(b)，压力平台较为平稳，起伏波动不大且趋于平缓，基本实现了激波管的缝合运行。缝合状态下提供了稳定的高压等离子体，压力维持在 1.5 MPa，工作时间 8 ms，此时温度 1.3×10^4 K。



(a) 激波管内不同位置压电信号

(a) Piezoelectric signals at different positions in the shock tube



(b) 总压曲线

(b) The stagnation pressure curve

图 5 激波管压力测量结果

Fig.5 Pressure testing results of shock tube

对非发电工况下法拉第直线型磁流体发电机内的流场进行了初步计算, 见图 6, 通道入口处气流的马赫数基本维持在 2.4, 处于超声速流动状态, 中心主流速度沿轴向基本平稳, 假设在喷管与通道内的流动中, 高温氩气处于热力学平衡和化学平衡状态, 可估算通道入口温度约 6400 K, 压力 0.075 MPa。

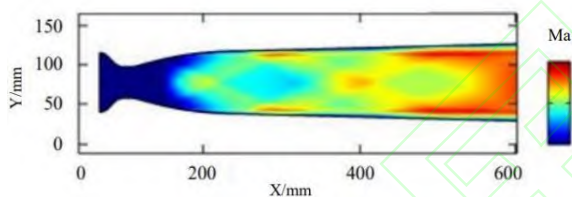
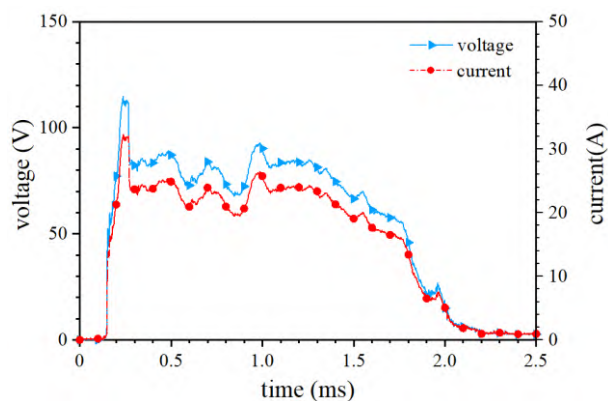


图 6 通道内马赫数分布

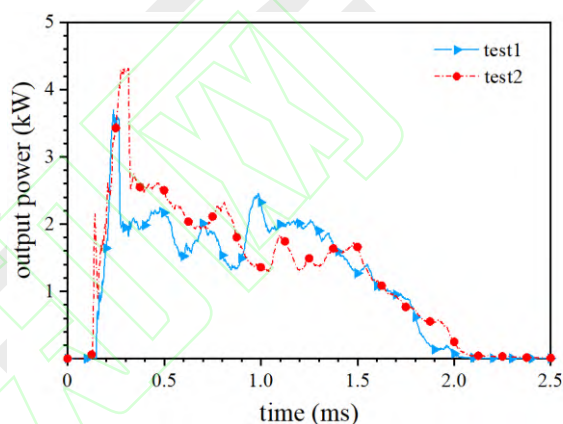
Fig.6 Distribution of mach number in the channel

图 7 给出了试验中外接负载 3.5Ω 时, 测得的负载端电压、电流和输出功率随试验时间的变化。各曲线的变化趋势一致, 在测量信号的前端出现较大尖峰, 随后整体呈平稳状态, 维持时间约 1.5 ms, 最终迅速下降。参数峰值是起动机激波造成的, 喷管前的膜片破裂的一瞬间, 会产生一道向下游发电机通道内传播的起动机激波。发电机通道与真空罐相连, 初始压力约 50 Pa, 因而起动机激波很强。起动机激波将通道内原有的气体压缩至高温使其电离, 故这部分气体切割磁感线产生电能, 形成了峰值。在较平稳的 1.5 ms 内, 负载两端的平均电流为 23 A, 平均电压为 82 V, 大致等于电流与电阻的乘积。输出功率在千瓦量级, 平均功率约 1.9 kW, 最大输出功率达到 2.4 kW, 此时电流 26 A, 电压 92 V。为了避免偶然性因素的存在, 确保试验结果的可靠性, 在相同试验条件下进行了重复试验, 从图 7(b)可以看出两次试验测量得到的发电功率浮动不大, 极值和均值基本相对应, 试验的重复性较好。



(a) 电压、电流随时间变化曲线

(a) Curve of voltage and current with time



(b) 输出功率随时间变化曲线

(b) Curve of output power with time

图 7 负载 3.5Ω 时反向爆轰驱动磁流体发电试验结果

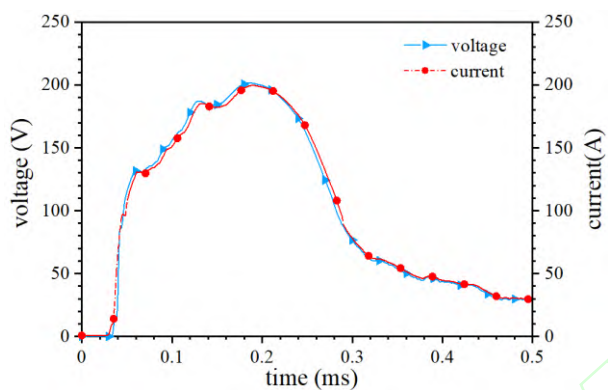
Fig.7 Results of backward detonation-driven MHD power generation under 3.5Ω load resistance

3.2 正向爆轰驱动磁流体发电试验

在正向爆轰驱动激波管内, 波的传播过程与反向爆轰不同, 爆轰波和激波都是由上游向下游传播, 5 区气体无法维持稳定的压力, 在跃升后会急速下降。试验时间短, 工作时间小于 1 ms, 但由于正向爆轰驱动对试验气体的压缩更强, 因而对压力的平稳性要求不高。此时激波马赫数达到 14, 试验时间内氩气平均总压为 2.5 MPa, 总温达到 1.6×10^4 K, 明显高于反向爆轰驱动。随后氩气经喷管加速进入发电通道, 热力学平衡和化学平衡假设下, 电极间的工质温度约 10700 K, 压力约 0.068 MPa。

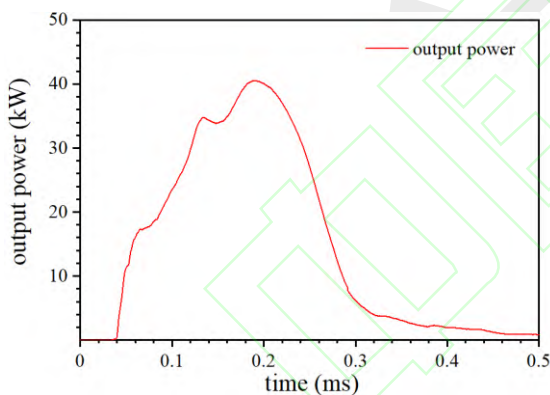
正向爆轰驱动磁流体发电试验结果见图 8, 此时负载电阻为 1Ω 。曲线走势为爬升至峰值后下降, 存在于反向爆轰驱动各试验参数曲线前端的尖峰消失, 是因为原通道内的气体受起动机激波压缩后的电

导率,远小于正向爆轰产生的氩气等离子体。试验发电时间大幅减少,缩短至 0.3 ms,但此时产生的入射激波极强,将氩气压缩至更高温度。温度升高有利于气体电离,宏观表现即为工质电导率的提升,导电能力得到改善。同时,入口总温提高后,气体声速提高,经喷管膨胀后的氩等离子体运动速度也随之增加。由式(4)可知输出功率随气流速度和电导率的增加而增大,故输出功率有显著提升,最大值达到 40 kW,此时电流为 200 A,电压 201 V,平均值功率为 30 kW。



(a) 电压、电流随时间变化曲线

(a) Curve of voltage and current with time



(b) 输出功率随时间变化曲线

(b) Curve of output power with time

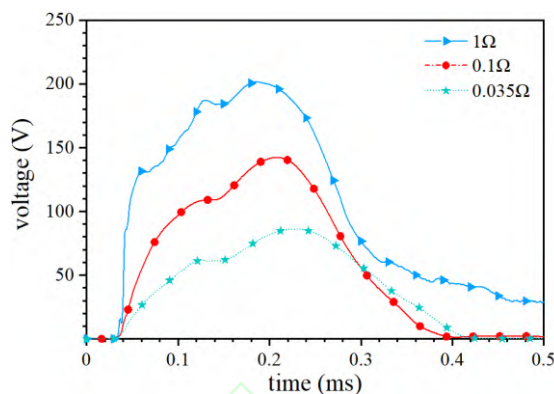
图 8 负载 1Ω 时正向爆轰驱动磁流体发电试验结果

Fig.8 Results of forward detonation-driven MHD power generation under 1Ω load resistance

3.3 不同负载下磁流体发电试验

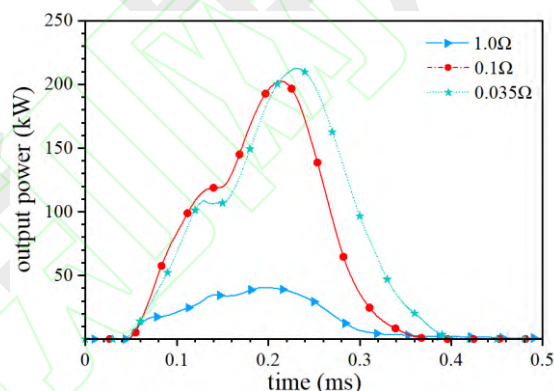
由式(3)能够看出,负载电阻通过影响负载系数进而影响磁流体发电的输出功率,图 9 给出了正向爆轰驱动外接不同负载时的测量电压及输出功率。输出电压与负载电阻成正相关,在 1 Ω 时峰值达到 201 V,0.035 Ω 时仅有 86 V。而在试验所选阻值范围内,输出功率随电阻的减小而升高,在 1 Ω 时输出功率为 40 kW,当阻值降至 0.035 Ω 时却升至五

倍,高达 212 kW,将其除以有效发电体积,得出此时功率密度约 0.2 GW/m³。



(a) 电压随时间变化曲线

(a) Curve of voltage with time



(b) 输出功率随时间变化曲线

(b) Curve of output power with time

图 9 不同负载下正向爆轰驱动磁流体发电试验结果

Fig.9 Results of forward detonation-driven MHD power generation under different load resistance

本试验由于采用的是连续电极,电极上会形成霍尔电流引起短路,对发电结果有一定影响。另外,通道内流动边界层的存在、喷管出口参数的设计等问题都会影响磁流体发电机的发电效果。在后续试验中,可将电极设计为分段式^[33],抑制霍尔效应的产生;可通过边界层抽吸提高发电通道内流场的均匀性,以提升通道内导电工质电导率;可进行喷管的优化设计,针对激波管提供的高温气流,获得最大的输出功率。

4 结论

本文阐述了一种将爆轰驱动激波管技术应用于磁流体发电研究的新方法,利用爆轰燃气将被驱动段内的氩气压缩至高温状态发生电离,产生满足发电要求的氩工质进行磁流体发电,得出以下结论:

(1)提出了将磁流体发电技术与爆轰驱动技术相结合的方案。根据磁流体发电及爆轰驱动激波管产生高电导率气体的基本原理,以激波管5区气体作为气源研制了一套爆轰驱动惰性气体磁流体发电试验系统,为高功率脉冲电源的发展提供了一种新的思路。

(2)对比了正向爆轰驱动与反向爆轰驱动的区别与优点,分析了两种模式产生导电气体的能力以及对磁流体发电性能影响:正向爆轰工质温度更高,电导率更大;反向爆轰试验状态稳定,发电时间更长。

(3)验证了爆轰驱动惰性气体磁流体发电方案的可行性。基于法拉第直线型磁流体发电机开展了试验,磁场强度0.9 T、负载0.035 Ω 时,正向爆轰在0.3 ms内输出功率高达212 kW。

参考文献

- 1 王莹. 高功率脉冲电源. 北京: 原子能出版社, 1991 (Wang Ying. High power pulse supply. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1991 (in Chinese))
- 2 Hidenori, Akiyama, Taisuke, et al. Industrial applications of pulsed power. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, 2005, 125(9): 717-722
- 3 张哲, 张子尧, 钟岩等. 电磁发射用脉冲功率电源系统的参数分析. 电子技术与软件, 2022, (12), 139-143 (Zhang Zhe, Zhang Ziyao, Zhong Yan, et al. Parameter analysis of pulse power supply system for electromagnetic emission. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2022, (12), 139-143 (in Chinese))
- 4 陈帅, 马偃毫, 赵婉瑜等. 电磁轨道炮最新研究进展及应用展望. 科技创新与应用, 2022, 12(17), 11-14 (Chen Shuai, Ma Yanbo, Zhao Wanyu, et al. Latest research progress and application prospect of electromagnetic rail gun. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(17), 11-14 (in Chinese))
- 5 Tushar K B. A magnetohydrodynamic power generating system: a technical review. *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering*, 2020
- 6 Rosa R J. Physical principles of magnetohydrodynamic power generation. *Physics of Fluids*, 1961, 4(2): 182-194
- 7 李益文, 李应红, 张百灵等. 超声速气流磁流体加速初步实验研究. 力学学报, 2012, 44(2): 238-244 (Li Yiwen, Li Yinghong, Zhang Bailiang, et al. Preliminary experimental investigation on supersonic flow magnetohydrodynamic (MHD) acceleration. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(2): 238-244 (in Chinese))
- 8 李益文, 王宇天, 庞垒等. 进气道等离子体/磁流体流动控制研究进展. 力学学报, 2019, 51(2): 311-321 (Li Yiwen, Wang Yutian, Pang Lei, et al.

- Research progress of plasma/MHD flow control in inlet. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(2): 311-321 (in Chinese))
- 9 刘鉴民. 磁流体发电. 北京: 机械工业出版社, 1984 (Liu Jianmin. Magnetohydrodynamic power generation. Beijing: China Machine Press, 1984 (in Chinese))
- 10 屈会力. 新型磁流体发电系统法拉第型电推进研究. [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016 (Qu Huili. The research of faraday electric propulsion in a novel magneto hydrodynamic generation system. [Master thesis]. Southeast University, 2016 (in Chinese))
- 11 Iwata T, Tsukazawa S, Okuno Y. Plasma Behavior and Characteristics of a Pulsed-laser-driven MHD Electrical Power Generation. *Transactions-Institute of Electrical Engineers of Japan*, 2019, 208: 3-9
- 12 李益文, 张百灵, 高岭等. 磁流体发电高温燃气的产生与控制研究. 推进技术, 2017, 38(6): 8 (Li Yiwen, Zhang Bailiang, Gao Ling, et al. Research on generation and control of high temperature gas in MHD power generation. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 8 (in Chinese))
- 13 欧东斌, 曾徽, 杨国铭等. 电弧加热高温磁流体发电地面试验研究. 实验流体力学, 2019, 33(5): 7 (Ou Dongbin, Zeng Hui, Yang Guomin, et al. Experimental study of magnetohydrodynamic power generation system in arc heater. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2019, 33(5): 7 (in Chinese))
- 14 Okuno Y, Okamura T, Suekane T, et al. Magnetohydrodynamic power generation experiment with Fuji-1 blow-down facility. *Propulsion Power*, 2003, 19(5): 894-900
- 15 Okuno Y, Watanabe K, Kawasaki A et al. Experimental Studies of Seed-Free Pure-Inert-Gas Working MHD Power Generation. 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2011
- 16 Murakami T, Okuno Y. High-density magnetohydrodynamic energy conversion in a high-temperature inert gas. *Applied Physics Letters*. 2008, 93: 041504
- 17 Murakami T, Okuno Y. Simulation and demonstration of magnetohydrodynamic energy conversion in a high-temperature inert gas. *Phys Plasmas*. 2009, 16(3): 033501
- 18 Murakami T, Zhuang Y, Okuno Y. High-temperature inert gas plasma magnetohydrodynamic energy conversion by using linear-shaped Faraday-type channel. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(6): 063303
- 19 Tanaka M, Zhuang Y, Komatsu F, et al. Experiments of High Temperature Inert Gas Plasma MHD Power Generation with a Faraday Type Generator. 44th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2013
- 20 Tanaka M, Murakami T, Okuno Y. Plasma Characteristics and Performance of Magnetohydrodynamic Generator With High-Temperature Inert Gas Plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(12): 4020-4025

- 21 Tanaka M, Murakami T, Okuno Y. Power Generation Experiments with a High Temperature Inert Gas Plasma Faraday Type MHD Generator. *Electrical Engineering in Japan*, 2015, 193(4): 58-65
- 22 Tanaka M, Aoki Y, Zhao L, et al. Experiments on High-Temperature Xenon Plasma Magnetohydrodynamic Power Generation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(7): 1241-1246
- 23 Tanaka M, Hitotsubashi Y, Okuno Y. Fundamental Studies of Radio-Frequency Preionization for Frozen Inert Gas Plasma Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation. 14th International Energy Conversion Engineering Conference, 2016
- 24 Yu, H R., Chen, H, Zhao, W. Advances in detonation driving techniques for a shock tube/tunnel. *Shock Waves*, 2006, 15: 399-405
- 25 俞鸿儒. 探索发展激波风洞爆轰驱动技术. 力学学报, 2011, 43(6): 978-983 (Yu Hongru. Development study of detonation driving techniques for a shock tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(6): 978-983 (in Chinese))
- 26 居滋象, 吕友昌, 荆伯弘. 开环磁流体发电. 北京: 北京工业大学出版社, 1998 (Ju Zixiang, Lü Youchang, Jin Bohong. Open cycle MHD power generation. Beijing: Beijing Technical University Publishing House, 1998 (in Chinese))
- 27 唐路, 夏琦, 刘保林等. 脉冲磁流体发电技术研究进展. 推进技术, 2022, 43(08): 26-44 (Tang Lu, Xia Qi, Liu Baolin, et al. Research progress of pulsed MHD power generation technology. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(08): 26-44 (in Chinese))
- 28 刘飞标, 王铸, 彭燕等. 法拉第型磁流体发电机试验和数值仿真. 航空学报, 2020, 41(11): 10 (Liu Feibiao, Wang Zhu, Peng Yan, et al. Faraday type MHD generator: Experiment and numerical simulation. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(11): 10 (in Chinese))
- 29 陈熙. 热等离子体传热与流动. 北京: 科学出版社, 2009 (Chen Xi. Heat transfer and flow of hot plasma. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese))
- 30 Zhao W, Jiang Z L, Saito T, et al. Performance of a detonation driven shock tunnel. *Shock Waves*, 2005, 14(1): 53-59
- 31 陈强. 激波管流动的理论 and 实验技术. 合肥: 中国科技大学, 1979 (Chen Qiang. Theoretical and experimental techniques for shock tube flow. Hefei: University of Science and Technology of China, 1979 (in Chinese))
- 32 Jiang Z L, Zhao W, Wang C, et al. Forward-Running Detonation Drivers for High-Enthalpy Shock Tunnels. *AIAA Journal*, 2012, 40(10): 2009-2016
- 33 黄护林, 李林永, 李来等. 等离子体磁流体发电研究进展. 深空探测学报, 2018, 5(4): 16 (Huang Hulin, Li Linyong, Li Lai, et al. Research progress of plasma magnetic fluid power generation. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(4): 331-346 (in Chinese))