

二级轻气炮发射氘丸的研究进展

郑之初

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

K.Sonnenberg P.Kupschus

Joint European Torus, England

摘要 核燃料(如氘丸)的添加是维持核反应正常运行的关键技术, 在核能发电中占重要地位。目前世界上大的 TOKMAK 装置采用二级轻气炮来进行燃料的添加, 本文介绍: 1. 发射氘丸的特殊二级轻气炮; 2. 发射氘丸的弹托设计; 3. 利用炮口射流后效作用的弹托分离技术。利用上述技术得到了目前世界上最高的氘丸发射速度——4km/s, 氘丸完整, 在规定距离内弹托分离位置满足设计要求, 发射的重复性极好。

关键词 氘丸发射, 二级轻气炮, 核聚变, 实验技术。

引言

核能的和平利用是发展能源的一个重要方面, 利用氢的二种同位素氘(D)和氚(T)的聚变反应可以获得能量。由于核聚变反应是在 10^8K 下进行的, 所以燃料处于高温等离子体状态。为了维持反应必须保持等离子体中心线上反应物具有高密度。一个办法是用固体的氘以高速射入在汽化前到达中心。目前在美、俄、英、法、日和中国等国家已经建设了各种用于研究核聚变的 TOKMAK 装置, 对于小型装置都用单级发射器把小尺寸的氘丸(如直径 $\leq 2\text{mm}$) 射入等离子体场, 对于大型装置必须连续发射大尺寸的氘丸以极高的速度 ($v \leq 10\text{km/s}$) 射入。一般说来, 对速度高于 3km/s 的发射需要使用二级轻气炮, 由于氘丸是在一特殊深冷装置中由气态直接变为固体的, 它的强度很低, 驱动如此脆弱模型达到高速必须使用弹托, 而弹托必须在出炮口后的短距离内在高真空下与氘丸分离。上述要求使在核技术上使用的二级轻气炮, 比在航空、航天上用于气动力、气动物理现象和材料性能研究中的二级轻气炮有更高的难度和一定的特殊性。

位于英国的欧洲联合聚变中心 (JET-Joint European Torus) 有当前世界上最大的 TOKMAK 装置。它先与美国协作设计制造了 2.7mm 和 4mm 口径的单级和连发的燃料添加装置, 其最高的发射速度 $\leq 1.5\text{km/s}$ 。以后又与法国和德国协作设计制造了 6mm 口径的二级轻气炮^[1], 但直到 1989 年上半年调试结果并不理想。本文介绍从 1989 年

本文于1992年7月1日收到,1993年1月16日收到修改稿。

下半年开始在6mm直径二级轻气炮发射氘丸直到4km/s的一些实验技术。

一、氘丸的发射装置

氘丸的发射装置是一门特殊的二级轻气炮,图1给出了用于JET氘丸注入实验的二级轻气炮示意图。该炮由药室、压缩管、低温冷凝箱、发射管等四部份组成。其中超低

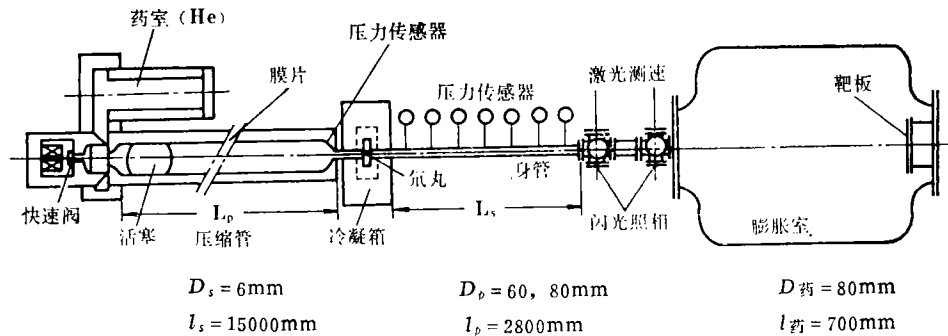


图1 用于氘冰发射的折叠式二级轻气炮示意图

Fig.1 Schematic of two stage-lightgas gun for shooting the pellets of hydrogen isotope ice

温冷凝箱是氘丸的制作器,最高真空度可达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ (mmHg),箱内氘丸生成处最低温度可达 $6 \sim 8$ K,由于核聚变装置周围空间有限,所以二级轻气炮采用折叠式,二者之间用一特殊支撑联接,用快速阀控制。压缩管中的活塞可多次重复使用,发射后用抽空或充气方法使活塞退回原处便于快速发射。该炮用氦气驱动,可以保持内腔表面清洁。试验时,当冷凝箱中氘丸制作完毕后,在药室中注入氦气,在压缩管中注入氢气,开启快速阀后,氦气进入压缩管驱动活塞压缩氢气达到预定的破膜压力,隔膜破裂后氦气驱动氘丸在发射管内加速,出口后通过设置在炮口附近的激光测速装置测得发射速度,用快速闪光照相记录下氘丸的外形及姿态,最后撞到靶板上。靶板为一5mm厚的铝板,每次更换,由靶上弹孔的位置可以测量弹托及氘丸之间的分离距离。

在发射管的特殊位置设置了七个测压站,用压电晶体测量模型底部压力时间曲线,在压缩管末端设置一个测压探头,用以测量驱动气体的压力时间曲线和高压室的最大压力,图2给出了某次发射的发射管中典型的压力时间曲线,图中曲线1在高压室,曲线2~7对应发射管上位置为0.1、0.3、0.55、0.8、1.05和1.3m处。目前我国拥有的弹道靶设备中都未设置压力时间曲线的测量装置,为了有助于二级轻气炮的性能分析这一测示技术值得借鉴。根据发射管上各固定位置的模型底部压力值和模型经过该位置的时间输入计算机中,用公式(1)、(2)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p_b \pi d_s}{4m} \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (2)$$

可以得到加速度和速度随位置变化的曲线,图3给出了某次实验得到的二级轻气炮性能

参数的变化曲线。弹丸在膛腔中滑行时有摩擦力，它可用增加模型质量来估计它，通过测得的底压和相应的时间和位置曲线的匹配可以算得附加质量，在选择充填参数合适的

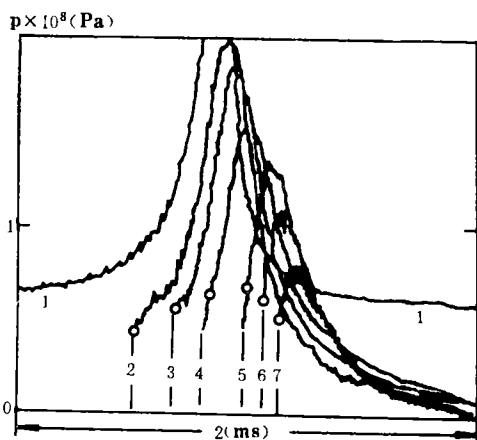


图 2 压力时间曲线

Fig.2 Variations of pressure with the time

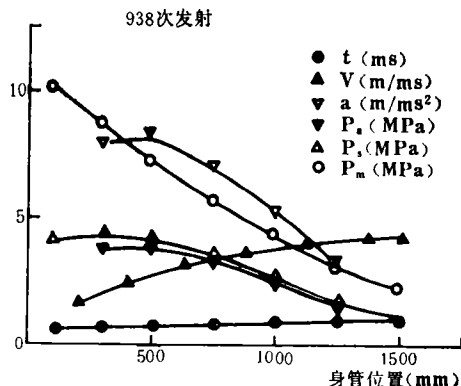


图 3 某次实验的数据处理结果

Fig.3 The test result of pellet launcher

情况下，由摩擦引起的附加质量约为 10% 左右。

二、弹托设计与性能调试

根据实验分析使氙丸破碎的原因有三个，其一是瞬间加速度很大，超过了氙丸或弹托所能承受的强度极限。其二是在发射管中驱动气体的泄漏。其三是弹丸在膛内高速滑行摩擦生热使氙丸破坏。1989 年以前在 JET 和法国都采用杯状弹托^[4]，此弹托壁面传热很差，制作氙丸时降温困难，发射后弹托与氙丸不易分离而且重量较重，因此这种弹托只能用于试验氙丸的制作技术和试射。

1989 年作者在 JET 工作期间，根据多年来在国内二级轻气炮调试方面掌握的经验^[5, 6]和规律^[5, 6]，指出瞬间加速度大和驱动气体泄漏是导致氙丸破坏的主要原因，这也普遍存在于其它领域试验的模型发射中，于是作者提出图 4 所示的弹托。弹托由高压聚乙烯压制而成，双瓣、后缘为球面凹槽，发射时驱动气体的高压使弹托后缘紧贴炮膛内壁，防止驱动气体泄漏到前缘氙丸处，中间圆梢起定位及密封作用，分瓣弹托便于发射后氙丸与弹托分离，选用弹托的厚度足以承受大的加速度而不破碎。

在六十年代文献[7]中提出了著名的等底压理论：即在弹丸加速过程中始终维持底部压力相等即可获得最高的发射速度。在 1980 年文献[6]指出弹丸的初始过载是导致弹丸破坏的主要原因。根据发射速度要高、模型要完整(不碎)与弹托分离情况应

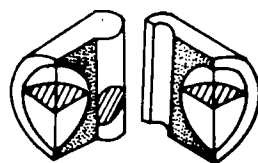


图 4 分瓣弹托示意图

Fig.4 Schematic of extruded pusher sabot halves

良好的综合要求,破膜压力不宜过高,初始破膜压力过高会导致弹丸破碎,破膜压力过低造成加速不匀和出口速度过低,为得到较大的出口速度应使用平均压力 $(\bar{p} = 1/l, \int_0^l p dx)$ 为最大的准则。图2给出按文献[6]提供的性能计算选定的初始破膜压力和炮体充装条件,得到了标准底压分布曲线,它的优点是既能保证获得较高的弹丸发射速度,又能保持模型的完整,而较高的炮口压力又能保证在短距离内飞行的弹托有较大的径向分离。因此所谓性能调试是指选择适当的充填参数使底压曲线形状接近图2形状而不是等底压。

三、弹托分离

可以用机械、旋转和气动等方法使模型与弹托分离。前两种方法结构较复杂,而气动方法不适合于高真空环境,所以我们利用炮口射流的后效作用使氘丸和弹托在短的飞行距离内有效地分离技术。所谓炮口后效作用是指:当弹丸离开炮口后驱动气体以高速射流形式喷出,在一定的距离内继续驱动弹丸向前运动,其作用力的大小和作用距离是射流参数的函数,它在很大程度上依赖于炮口压力和环境压力之比,假定在一定距离 L 内弹托上平均作用力为 p_0 (即炮口压力),作用方向与水平方向之间夹角为 α ,可得无量纲径向距离 \tilde{H} 的公式为

$$\tilde{H} = \frac{H}{L} = \frac{(\pi/4) D^2 p_0 l_x \sin \alpha}{(1/2) M_s u_s^2} \quad (3)$$

其中 L 为炮口到挡块的距离, M_s 为弹托的质量,公式的物理意义是:径向分离距离与飞行距离之比为炮口压力所作的功在径向的分量与弹托飞行动能之比,根据实验 $l_x = 5 \sim 6d$ (d 为弹托直径)如果炮口压力愈大则分离距离愈大,与大量实验比较证明:上述公式的误差小于10%。

采用本文叙述的弹托设计方法,根据弹丸的质量、活塞的重量和要求的发射速度,选择适当的膜片和合适的炮体充填参数如:氦气、氢气的充装压力等,得到了用二级枪

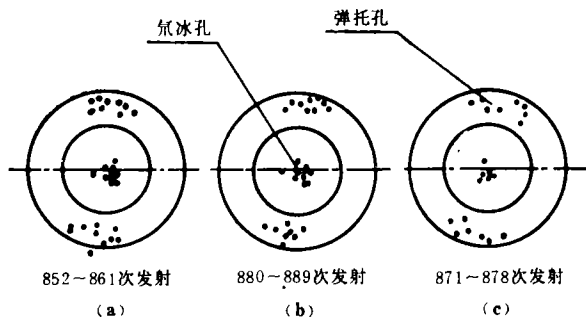


图5 氘冰和弹托在靶板上着弹位置的实验结果

Fig.5 The test result for Aiming statistics of ice pellet and sabot impacts on targets

气炮发射氘丸速度超过 4km/s 的好成绩,这是当前国际上的领先水平,分析弹丸飞行照片和着靶情况,可以发现:发射的氘冰完整、弹托分离情况良好,在连续十次发射中无

一失误，图 5 给出了靶板上的着弹位置，由图可见：氘丸着弹位置与弹托着弹位置都满足使用要求。

参 考 文 献

- 1 Keen B E, Hara G W O, Stone A. JET Joint Undertaking Annual Report, Chapter III; Technical Status of JET, Chapter IV; Results of JET Operations in 1988. Printed in England by S+S Press Ltd. 1988, 5.
- 2 Kupschus P et al., The JET High-Speed Pellet Launcher Prototype-Development, Implementation and Operational Experience. The 16th International Symposium on Fusion Technology, London, U.K. 3-7, Sept. 1990, 1:7~13
- 3 Kupschus P et al., Upgrading of the JET Pellet Injectore by Employing a Two-Stage Light Gas Gun Prototype and Future Flaning. IEEE Proceeding of the 13th SOFT Knoxville Tenn Oct. 2-6, 1989. IEEE Cat No.89, CH28209, 2:1293
- 4 Sonnenberg K et al., High Speed Pellet Development. IEEE Proceeding of the 12th SOFT Monterey California Oct. 13-16, 1987, 2:1207
- 5 郑之初等. 弹道靶的一些发射技术. 力学与实践, 1980, (1):55~77
- 6 郑之初等. 弹道靶上的跨音速实验. 力学学报, 1981, (6):619~625
- 7 Canning T N, Scetf A, James C S. Ballistic Range Technology. AGARD AG-138-70 or AD-713915.

Some Developments on Shooting the Deuterium Ice Pellets with a Hypervelocity by a Two-Stage Light Gas Gun

Zheng Zhichu

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

K. Sonnenberg P. Kupschus

(*JET Joint European Torus*)

Abstract Fuelling (or pellets of solid deuterium) injection to the plasma is a key problem for keeping fusion reaction in continuous service. It is also very important at proving the feasibility of using nuclear fusion as a source of energy. In the world, it seems now reasonable to install a two-stage light gas gun on the large TOKMAK device for the investigation of fuelling/re-fuelling.

Three main areas of work for JET pellets injector are described in this paper:

1. A special two-stage light gas gun which used in shooting the deuterium ice pellets.
2. Sabot design for successful launching the pellets of frozen hydrogen isotopes.
3. Separation technology of model from sabot by the jet force at the barrel exit.

Based on these technologies, the deuterium ice pellets have a velocity of 4km/s. It is the highest velocity in the world up to now. At these speeds, reproducible pellets of good quality ice and satisfactory sabot removal conditions during the definite distance have also been achieved.

Key words ice deuterium injection, two-stage light gas gun, fusion reaction, experimental technology.