

用于低温风洞的新颖制冷方法^{1),2)}

俞鸿儒

(中国科学院力学研究所, 高温气体动力学实验室, 北京 100080)

廖达雄

(中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘要 描述了用于低温风洞的新颖制冷系统, 利用热交换器回收排气冷量预冷压缩空气, 然后再用热分离器将其降至深低温作风洞气源。原理性实验结果证实新制冷方法的可行性。讨论了新制冷方法产生的有一定压力的低温空气作引射气源, 引射驱动回流型风洞的特性。其制冷方法与现有低温风洞喷雾液氮制冷相比, 由于仅需压缩空气而无需液氮, 造价更便宜。更由于能量利用合理, 效率高, 因而运行成本可显著降低。

关键词 低温风洞, 高雷诺数, 深低温, 热分离器

引 言

雷诺数是风洞试验的主要模拟参数。常规风洞尤其是跨声速风洞雷诺数模拟能力不满足试验要求。雷诺数不足的风洞试验提供的数据难以精确预报飞行器飞行特性。

降低试验气流总温是增加风洞雷诺数模拟能力的有效途径。从 70 年代开始, 世界各国均先后发展和研制低温风洞。其中 80 年代建成的德国宇航院低速低温风洞 (KKK), 美国 NASA 兰利中心国家跨声速设备 (NTF) 以及 90 年代由德、法、英、荷联合建造的欧洲跨声速风洞 (ETW) 等三座大型低温风洞均具有进行大型先进飞机模型试验所要求的雷诺数模拟能力。虽然低温运行与增压以及加大试验段因之模型尺寸等提高雷诺数方法相比, 风洞本体造价可明显降低, 驱动功率可大大节省^[1,2]。但是, 现有低温风洞均以氮气作试验介质, 藉喷入风洞的液氮气化吸热冷却并维持深低温试验气流。由于需排出与喷入液氮等量的低温氮气, 大量“冷能”被带走, 因而运行中需耗用巨量液氮, 致使运行费十分昂贵。此外, 大量低温氮气排入大气, 还对当地气象和生态环境造成不利影响。

本文描述一种新颖的, 依靠压缩空气自身能量将温度降至深低温的方法。该方法能量利用合理, 效率高, 可大大降低风洞试验成本, 且可避免对环境造成不利影响。

1 低温风洞的发展与现状

雷诺数为惯性力与粘性力之比。增大惯性力或减少粘性力均可增加雷诺数。随着气流温度下降, 粘性力随着减少。在模型尺寸、总压和气流马赫数相同条件下, 若气流总温从 320 K 下降至 100 K 时, 雷诺数可增加约 5 倍, 由于密度和速度变化的补偿作用, 惯性力保持不变。这

1999-01-25 收到。

1) 自然科学基金 (19482007) 资助项目。

2) 谨以此文纪念林同骥院士 80 寿辰。

就避免了增加惯性力来提高雷诺数诸方法产生的动压升高因之模型负荷增大导致气动弹性和支杆加粗引起的难以消除的干扰. 尤其是使用同一模型, 依靠降低总温来考察变雷诺数影响, 其结果的可靠性更显示出低温风洞的独特优点.

早在 20 年代初, Margoulis^[3] 就提出冷却风洞试验气流以增加雷诺数的建议. 由于当时缺乏将一定尺寸的风洞气流冷却至深低温的有效方法以及适用的结构材料, 这一概念未获得应用.

风洞气流流量一般都很巨大, 一般制冷技术难以将如此大量气体快速冷却下来. 喷入大量液化氮气, 依靠其气化吸热来冷却试验气流是一条可行的途径. 60 年代中, 迫于航空工业对高雷诺数风洞的需求, 加上工业已能大量生产液氮, 发展液氮致冷低温风洞迅速形成热点. 从 1971 年兰利中心一个研究小组开始探索这一技术, 很快便遍及世界各国^[4].

虽然低温风洞的优越性在各种型式的风洞中都能体现. 但是喷入液氮致冷的低温风洞基本上都采用风扇驱动回流型风洞 (图 1). 这种风洞的主要缺点为液氮消耗量过大. 导致运行费昂贵. 例如 NTF 在最大雷诺数条件下工作, 每分钟约需液氮 25 吨, 按每吨 800 美元计, 每运行一分种, 光液氮购置费就需约 2 万美元.

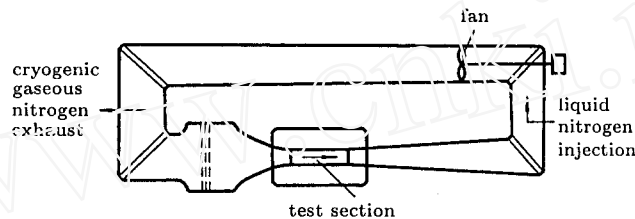


图 1 风扇驱动回流型低温风洞简图

Fig.1 Sketch of continuous flow fan driven cryogenic wind tunnel

造成液氮消耗量过大的重要原因, 是仅有效利用了液氮的气化吸热, 而吸热能力相当的低温排气携带的冷量却被白白浪费了. Nelander^[5] 早在 70 年代末就注意到这一浪费现象. 但由于缺乏有效的回收利用途径, 直至目前这一问题仍未解决.

2 新制冷方法

针对现有低温风洞制冷方法存在的缺点, 用于低温风洞的新制冷方法已经提出^[6]. 图 2 为采用新制冷方法的直通型低温风洞简图. 在风洞排气口增设双向热交换器. 当低温排气和压缩空气以相反方向同时通过该热交换器后, 前者被加热到接近环境温度, 而后的温度则被大大降低. 被预冷的压缩空气再经热分离器将其温度降至所需的深低温.

热交换器在工业中早已广泛应用, 已积累了丰富的设计制造和使用经验. 热交换器效率 η_e 定义为热气流释放的热量与冷气流可能吸收的最大热量之比

$$\eta_e = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_3} \quad (1)$$

式中 T_1 , T_2 和 T_3 分别为热气流在入口、出口处和冷气流在入口处的温度.

热分离器是一种利用压缩气体压缩功制冷的新型冷冻机械^[7~9]. 它由转动喷嘴和许多紧密排列的转动喷嘴外圆周上的激波管组成 (图 3). 工作过程中转动的喷嘴依次扫过一系列固定

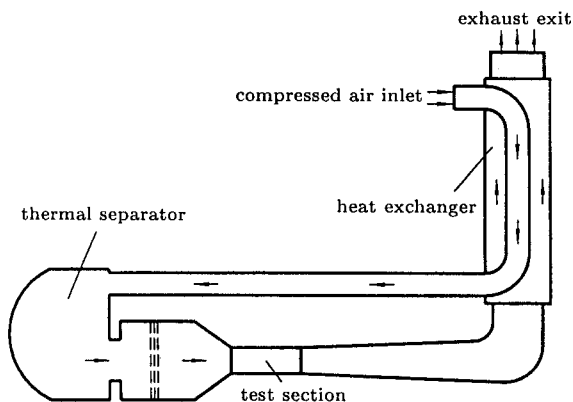


图 2 采用新制冷方法的直通型低温风洞简图

Fig.2 Sketch of cryogenic wind tunnel with new cooling means

的激波管。当喷嘴与某一激波管联通时，高压气体通过喷嘴射入激波管。在射入气体的驱动下，原在激波管内的气体中形成向前传播的激波。激波扫过之处，气体被压缩、加热和加速。当喷嘴转开以后，激波管与低压排气管接通。射入激波管中的气体经过膨胀波反向流出。由于高压气体对被驱动气体做功，从排气管排出的气体的温度便降下来。射入的气体排尽后完成一个循环。被激波作用过的气体通过管壁散热将获得的能量散到周围环境，循环结束时恢复到起始状态。

对于特定时刻，只有一根（如扩大喷管，可能 2~3 根）激波管处于充气过程，其余激波管都在排气。由于多根激波管重叠排气，因此热分离器排气口处的流动基本上是平稳的。

热分离器制冷效率 η_s 为气体通过后获得的降温温差与等熵膨胀产生的温差比

$$\eta_s = (1 - T_l/T_h) / \left[1 - \left(\frac{P_l}{P_h} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (2)$$

式中 T_l/T_h 和 P_l/P_h 分别为热分离出口与入口处温度比和压力比， γ 为比热比。

热交换器和热分离器都具有结构简单，维护方便，抗侵蚀等特点，尤其高通量特性适于作风洞部件。热交换器的效率可高达 98% 以上，工业用大型热分离器制冷效率已达 80%^[7]。

如果忽略热交换器与热分离器之间的联接管壁导热产生的气体温升，在不同热交换器和热分离器效率条件下，将压缩空气从 320 K 降至 100 K 所需的热分离器入口与出口处压力比 P_h/P_l 值列于表 1。

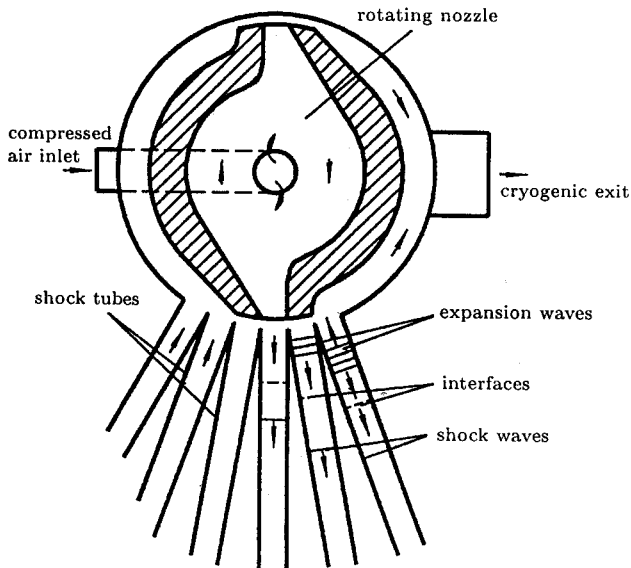


图 3 热分离器结构简图

Fig.3 Sketch of thermal separator

表 1 将空气从 320 K 降至 100 K 所需压力比 P_h/P_l
Table 1 Pressure ratios P_h/P_l for cooling air from 320 K to 100 K

η_s	η_s	40%	50%	60%	70%	80%
70%		59×10^6	250	49	19	11
80%		156	27	12	7.5	5.4
90%		8.2	4.8	3.5	2.8	2.5

由上表数值可以看出, 特别在热分离器效率不太高的条件下热交换器的作用特别重要. 即回收排气冷量对节省制冷能源意义重大.

当热交换器效率超过 90%, 制造所需材料将大大增加, 造价因之提高. 若选取热交换器效率为 90%, 只要热分离器效率超过 50%, 加上热交换器及风洞回路阻力压降, 普通风洞中压气源 (1.6 MPa) 就能满足常压亚、跨声速低温风洞运行要求.

3 低温风洞原理性实验

为了探讨上述新制冷方法的可行性以及技术难点, 中国科学院力学研究所和中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所双方签署协议共同开展新型原理性跨声速低温风洞研究. 前者负责方案制定及低温气源等关键技术研究, 后者负责设备设计、研制和实验工作. 该原理性风洞建立在气动中心, 利用气动中心压缩空气气源开展实验.

实验装置中试验段截面尺寸为 $\Phi 5$ cm. 实验中测得的数据如下: 压缩空气在热交换器入口处压力 $P_1 = 1.16$ MPa, 温度 $T_1 = 293.5$ K, 出口处温度 $T_2 = 137.8$ K. 热分离器入口处压力 $P_h = 1.12$ MPa, 温度 $T_h = 140$ K, 出口处压力 $P_l = 0.130$ MPa, 温度即气流总温 $T_l = T_0 = 118.5^\circ$. 试验段马赫数 $Ma = 0.95$. 低温排气在热交换器入口处压力 $P_3 = 0.115$ MPa, 温度 $T_3 = 118.7$ K, 出口处压力 $P_4 = 0.098$ MPa, 温度 $T_4 = 283.9$ K.

由上列数据可求出热交换器效率 $\eta_e = 89.1\%$, 与设计要求值 90% 基本相符. 由于订购的热分离器质量太差, 致冷效率仅达 $\eta_s = 33.4\%$, 与设计要求值相差太大, 在这种不利条件下, 试验段气流静温仍降至 $T_\infty = 96$ K. 热交换器出口至热分离器入口之间联接管壁传热使压缩空气升温 2.2° , 热分离器出口至低温排气出口温升 0.2° . 除热分离器外, 包括热交换器双通道在内的低温风洞流动阻力损失 $\Delta P = 0.072$ MPa. 从以上结果可以得出, 即使热分离器制冷效率如此低, 亦验证了新制冷方法应用于跨声速低温风洞的可行性.

国外工业用大型热分离器效率可高达 80%, 国内目前生产并在工业中应用的热分离器尺寸较小, 制冷效率一般在 50%~70% 之间. 如果实验装置中采用的热分离器效率能达到 50%, 管壁传热和回路阻力损失状况保持不变, 压缩空气在热交换器入口处温度为 300 K, 只要压力达到 0.58 MPa, (绝对压力) 试验气流总温就可降到 100 K. 由此可以得出, 普通风洞中压气源足以满足常压跨声速低温风洞运行要求.

现有热分离器主要用于冷冻分离回收天然气、石油油气、炼厂排气中的易凝组分. 冷冻低温极限不低于 200 K. 扩展应用于深低温, 制冷效率会不会大大降低是新制冷方法是否可行的关键. 实验装置在起动过程中, 温度从室温逐步下降至深低温, 测出的数据计算求出的热分离器效率对温度不敏感. 在出口温度低至 118.5 K 范围内, 热分离器效率基本上保持不变, 实验数据绘入图 4. 图中还一并绘入 1995 年另一实验结果. 热分离器在深低温范围制冷效率不变这

一实验证据. 不仅为本制冷方法用于低温风洞扫除了障碍, 还为其在其他深低温领域应用奠定了技术基础.

由上述实验数据可以求出, 热交换器将压缩空气从 293.5 K 降至 137.8 K, 降温 155.7°. 热分离器将其从 140 K 降至 118.5 K, 仅降温 21.5°. 降温幅度前者较后者高出 6 倍以上. 然而热分离器是冷却系统的核心. 交换器只起着辅助的作用. 选用高制冷效率的热分离器, 不仅能降低对压缩空气压力要求并且将大大缩短冷却起动时间.

4 回流型低温风洞

新制冷方法还可应用于回流型低温风洞 (图 5). 在这种型式的风洞中, 大部分气流循环使用. 只有小部分低温气流排出风洞. 与直通型风洞相同, 排气携带的“冷能”利用热交换器回收用来冷却压缩空气. 预冷后的压缩空气再藉热分离器进一步降温, 作引射驱动的低温室源.

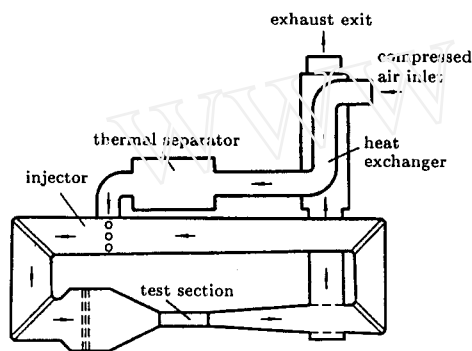


图 5 采用新制冷方法的回流型低温风洞
Fig.5 Sketch of closed circuit wind tunnel with new cooling means

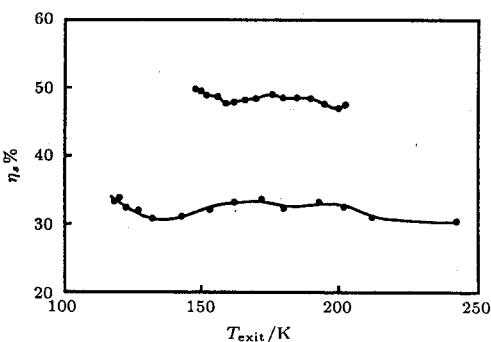


图 4 热分离器制冷效率与出口温度关系
Fig.4 Efficiency of thermal separator vs exit temperature

与直通型风洞相比, 排气量亦即压缩空气用量大大减少. 而压缩空气的压力则需提高. 按粗略估计, 压缩空气耗用量减少的比值大于压缩空气压力增加的倍数. 还由于压缩空气所需功率与流量成正比, 但与终 / 初压比的对数值成正比. 因此回流型风洞压气功率较直流型风洞低. 由于流量减少, 热交换器和热分离器的尺寸亦将缩小, 但需增加驱动引射器.

原理性低温风洞实验证据表明: 良好绝缘的设备, 通过管壁传入气流的热量不多. 美国 NTF 驱动风扇的马达, 最大功率 $120 \times 735.499 \text{ kW}$, 产生总热量 90 MJ/s , 与最大液氮喷入量 $428 \text{ kg/s}^{[10]}$ 的气化热 90 MJ/s 相当, 同样表明通过管壁传入的热量是相对小量. 补偿传热损失所需液氮量不会太多.

风扇提高气体压力的同时亦将气体温度升高. 在常温运行的风扇驱动回流型风洞中, 采用水冷或通过洞壁散热来保持总温稍高于环境温度. 而现有的风扇驱动的回流型低温风洞, 利用喷入液氮去降温是导致液氮过量耗费, 因而运行费高昂的另一重要原因.

采用新制冷方法产生的低温压缩空气引射驱动, 只输入有效驱动功而不会提高气流温度. 与风扇驱动相比, 可极大地降低制冷功率.

5 结束语

现已建成的二座大型跨声速低温风洞, 美国的 NTF 和德、法、英、荷联合建造的 ETW 具

有满足设计大型先进飞机进行气动试验所需的雷诺数模拟能力。但运行中耗用大量液氮,致使运行费用高昂。本文描述的用于低温风洞的新颖制冷方法,只需增添热交换器和热分离器,就可回收绝大部分冷量预冷压缩空气,凭藉压缩空气自身能量将温度降至近冷凝点。选用性能较好的热交换器和热分离器,只需压力约 1MPa 的压缩空气就能满足常压跨声速直通型低温风洞运行要求。验证实验证实了新制冷方法的可行性。

新颖冷却方法还可用于引射驱动回路式低温风洞,压缩空气耗用量大大降低,但压力需提高。制冷所需功率减少。低温气源引射驱动不会提高风洞回路中气流温度,优于风扇驱动,因此运行成本可大大降低。

致谢 陶瑜、张国彪和祝长江等参加了实验,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Goodyer MJ, Kilgore RA. High-Reynolds-number cryogenic wind tunnel. *AIAA J*, 1973, 11(5): 613~619
- 2 Kilgore RA, Dress DA. The application of cryogenics to high Reynolds number testing in wind tunnels. *Cryogenics*, 1984, 25(8): 395~402
- 3 Margoulis W. A new method of testing models in wind tunnels. MACA TN-52. 1921
- 4 Polhamus EC. The large second generation of cryogenic tunnels. *Astronautics & Aeronautics*, 1951, 10: 38~51
- 5 Nelander E. A self contained cryogenic wind tunnel air supply system for a transonic blow down tunnel. In: *Proceedings of 1st Intern Conf on Cryogenic Wind Tunnel*. Southampton, 1979
- 6 Yu H-r, Fang Y-q. Thermal separator and its application to the generation of cryogenic flow. In: Chen VT, Tso CP eds. *Proceedings of the 6th Asian Congress of Fluid Mechanics*. Singapore, 1995. 22~26
- 7 Servasier A, Amade JC, Schwall C. Le traitement des gas associés à Laide du Séparateur thermique. *Petrole et Techniques*, 1980, (275): 21~25
- 8 俞鸿儒. 热分离器内的流动. 大连工学院学报, 1984, 23(4): 1~7 (Yu Hongru. The flow in a thermal separator. *Journal of Dalian Institute of Technology*, 1984, 23(4): 1~7 (in Chinese))
- 9 Yu Hongru, Fang Y-q, Yu W. The thermal separator: a new approach for refrigerating pressurized gases. In: Kim YW ed. *Current Topics in Shock Waves*. New York: AIP, 1990. 659~664
- 10 Kilgore RA, Dress DA. Development and application of the cryogenic wind tunnel concept. *Cryogenics*, 1984, 25(9): 484~490

NOVEL COOLING MEANS FOR A CRYOGENIC WIND TUNNEL^{1),2)}

Yu Hongru

(High Temperature Gasdynamics Lab., Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Liao DaXiong

(The Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Test Center,
Mianyang 621000, China)

Abstract Existing cryogenic wind tunnels with cooling accomplished by spraying liquid nitrogen directly into the tunnel circuit must equally discharge cryogenic gaseous nitrogen for keeping the

Received 25 January 1999.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19482007).

2) In memory of academican Lin Tongji's 80 anniversary.

steadiness of the test flow. The tremendous “cool energy” carried away not only leads to heavy demands on liquid nitrogen and hence refrigerating power but also causes pollution of the local atmosphere.

An alternative means of cooling air to cryogenic temperature by relying alone on the compression energy of the air is presented. A bi-directional heat exchanger is installed at the exhaust exit of a wind tunnel. After the cryogenic exhaust and the compressed air pass in opposite directions through which in the meantime, the former is heated to near ambient temperature and the latter is cooled deeply. By means of a thermal separator, the precooled compressed air is cooled further to the required cryogenic temperature and then to supply the wind tunnel.

For cooling air from 320 K to 100 K, the thermal separator inlet pressure needs to be 2.5, 3.5 or 8.2 times of the exit pressure, if the heat exchanger efficiency is assumed to be 90% and the thermal separator efficiency assumed to be 80%, 60% or 40% respectively.

An experimental device for concept studies was set up in the lab. The experimental data are as follows: The pressure and temperature of compressed air at the inlet of the heat exchanger are 1.162 MPa and 293.5 K respectively. The temperature and pressure at the inlet and the exit of the thermal separator are 140 K, 118.5 K and 1.119 MPa, 0.13 MPa respectively. In test section, the Mach number and the temperature of the test flow are approximately one and 100 K. The exhaust temperature at the exit of the heat exchanger is 283.9 K. The pressure loss of airflow through the tunnel circuit except the thermal separator is lower than 0.1 MPa. On the basis of the measured data, it can be calculated that the efficiency of the heat exchanger and the thermal separator are equal to 90% and 33.4% respectively. The abnormal low efficiency of the thermal separator in use is attributed to bad manufacturing. Otherwise the temperature of test gas and the required pressure of compressed air would be lower.

The particular virtues of the novel cooling means for a wind tunnel are to save refrigerating energy and to protect environment in comparison with existing one by liquid nitrogen.

Key words cryogenic wind tunnel, high Reynolds number, cryogenics, thermal separator