

## 新颖的低温风洞冷却方法

俞鸿儒 流体力学家。1928年6月出生于江西省广丰县。1953年毕业于大连工学院机械系，1963年中国科学院力学所研究生毕业。1991年当选中国科学院院士。

50年代末开始，探索利用激波产生高温高压气源建造低费用的高超声速风洞的新方法，圆满建成了氢氧燃烧驱动激波风洞，提供了发展导弹、卫星急需的气动实验条件。80年代，根据航天飞机发展的要求，提出爆轰驱动新方法，建成了性能稳定、费用低廉的氢氧爆轰驱动激波风洞。在低温风洞方面，提出利用热交换器回收排气冷量并借热分离器将压缩空气降至低温的新方法，仅需压缩空气就可实现低温运行。在乙烯生产上，分析了现有裂解工艺的局限，提出应用气体动力学加热原理大幅度提高乙烯产率、降低生产成本的新方法。

曾获国家科技进步一等、二等、三等奖各1项；中国科学院、国防科委等部委级重大成果或科技进步、技术发明一等奖5项，二等奖3项，三等奖4项。2002年获何梁何利基金科学与技术进步奖。

风洞试验数据是研制新型飞行器和改进已有飞行器性能的基本手段。随着飞行器尺寸不断增大，风洞雷诺数能力不足变得愈来愈严重。而雷诺数不满足要求的风洞提供的数据难以准确预报飞行器气动特性。

提高风洞雷诺数能力有多种方法，其中降低试验气体温度具有独特的优势。如将风洞气流总温由通常的320K降至100K，在模型尺寸和总压相同时，雷诺数可提高约5倍，驱动气流循环所需功率可下降45%，而动压不会增加。Margoulis注意到这一特性，早在1920年就提出低温风洞概念。由于风洞气流流量极其巨大，限于当时缺乏实用的冷却技术，以及当时对高雷诺数试验的要求不迫切，该概念未被实用。直到上世纪70年代初，面临提高风洞雷诺数能力的紧迫需求，加上工业上已能大量生产液氮，因此Goodyer建议向风洞回路中喷入液氮，通过降低试验气体温度来提高雷诺数。这个方案一提出，就受到世界各国同行的关注，并纷纷开始研制这种液氮致冷的低温风洞。中国空气动力研究与发展中心也着手这种低温风洞的研制。

这种液氮致冷低温风洞在运行中需耗用大量液氮，运行费用十分昂贵。为了供应短时大量需要的液氮，尚需建造液氮贮存装置和运输系统，额外提高了造价。因此，迄今除了美国和欧洲诸发达国家联合各建成一座能满足设计大型飞机进行气动试验所需雷诺数要求的大型跨声速低温风洞外，包括前苏联在内的其他国家均处于研制试验性风洞的阶段。除此以外，运行中向大气排出大量低温氮气，还影响当地气象环境，引起与当地机场等有关部门的矛盾。由于存在这些问题，低温风洞的应用受到极大的限制，也阻碍着它的进一步发展。

上述缺点能否克服的关键在于液氮冷量的利用是否充分有效以及能否找到代价更低的致冷方法来替代液氮冷却。如果液氮携带的冷量被充分利用了，那么液氮耗用量就无法降低了。实际情况究竟如何？

现有低温风洞运行时，液氮不断喷入风洞回路中。为了维持试验区气流恒定，需不断排出等量的氮气。如若试验气流总温为100K，环境温度为300K，上述温差条件下，氮气焓差为209kJ/kg，还稍大于液氮气化热

利用了液氮的气化热，而与气化热相当的低温排气携带的冷量则白白浪费了。虽然Nelander早就提出用贮罐将低温排气收藏起来加以利用的建议，然而由于实用的低温风洞排气量很大，低温排气又不宜压缩后贮存，因此需要容积极大的隔热贮罐，建造如此巨大的贮罐代价太大而缺乏实用价值。风洞不会长时间运行，低温排气直接供其他场合应用的可行性极小。苦于缺乏有效利用的途径，这一问题久悬未决。此外，现有低温风洞采用内置轴流压气机驱动气体循环流动。驱动气流流动的同时，伴生大量热量，这是液氮耗量增大的另一原因。

维持风洞回路中高速气流的低温状态，只有通过风洞外壳传入低温气流的热量以及高速气流流动过程中由于粘性效应产生的热量是必需加以冷却补偿的。现有低温风洞排气浪费的冷量和内置压气机压气过程中直接释放到低温气流中的热量是液氮致冷方法带来的损耗，是可能加以消除的。现有低温风洞的隔热结构已比较完善，通过风洞外壳传入低温气流的热量不多，加上粘性效应产生的热量总和所需冷却补偿的能耗大大低于前述无用的能耗。因此，探求到适用的致冷方法，则风洞低温运行所需的能耗及费用可极大地降低。

据此开展研究工作，终于获得新颖的冷却风洞气流的方法。首先在风洞排气口处增设热交换器，利用排气冷量冷却压缩空气。采用的热交换器为双向反流布置，冷热气流热交换时的温差很小，因此热交换过程中能量损失亦少。排气冷量被回收利用，不仅可大大节省能耗，而且排出的低温空气，温度被提升到接近环境温度，将不再对气象环境造成不利影响。经预冷后的压缩空气再流过热分离器，将其温度降至所要求的接近冷凝点的低温后流入风洞。热分离器是一种新型不定常波制冷机，具有结构简单，运动部件极少且抗侵蚀能力强的特点。热交换器是工业中广泛应用的通用设备。两者通量都可做得很大，适应风洞应用的要求。

工业用大型热分离器的制冷效率可达80%。热交换器换热效率与造价成正比，为使造价适中，取为90%。经计算，只要压缩空气压力达风洞总压的2.3倍，即可将压缩空气总温从300K降至100K。产生2.3倍压力的压缩空气所费能耗及费用较之现有液氮致冷低温风洞的能耗及费用，低得极多。

为了验证新方法的可行性以及搜索潜藏的技术难点，需要进行实验工作。若新设计、加工实验装置，则需大量经费。经过调查研究，决定尽量利用国内现有条件，开展分阶段验证实验。

首先租用大连理工大学的热分离器、热交换器及压缩空气气源进行初步验证。由于他们是用于化工生产研究的，所有设备采用普通材料制成，不能达到较深的低温。其次，气源较小，因而流速较低。实验结果表明：表压3.6大气压，温度306K的压缩空气，经过热交换器预冷，再经热分离器后，温度降至148K。排气温度经热交换器后由148K升到297K后排入大气。与热交换器换热效率81%，热分离器制冷效率54%的计算结果相符。

气动地面模拟试验装置耗能多，投资大。钱学森、郭永怀先生认为大型风洞应集中力量由国家设立的专门机构负责筹建。据此精神，我们向中国气动研究与发展中心建议，将该中心的低温风洞组改为新型低温风洞研制组。经协商双方出面申请筹集经费合作研制小型跨声速风洞。该风洞已建成，在采购的热分离器制冷效率极低(33.4%)的条件下，当试验段气流马赫数为0.95时，气流静温已低于100K。所用气源压力为10.6巴，温度293.5K。至此，建造低运行费的实用型低温风洞的基础工作已经完成。

该项目获1999年中国科学院发明一等奖。

发表日期: 2006-9-6 点击次数:851

 关闭窗口