

打造新一代空天飞行器研发重器

——记国家重大科研仪器研制项目“爆轰驱动超高速高焓激波风洞”

■本报记者 甘晓

今年12月，我国航天事业奠基人钱学森诞辰112周年之际，站在新落成的长达167米、能复现每秒10公里超高速飞行速度的超高速风洞前，中国科学院力学研究所研究员姜宗林向《中国科学报》表示：“钱学森在论述科学精神时曾说，是不是真正的创新，就看是不是敢于研究别人没有研究过的科学前沿问题。我们用这个独立自主研发的大国重器支持我国的宇航事业奔赴星辰大海，正是对钱先生的最好告慰。”

自2018年起，在国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目（部门推荐）“爆轰驱动超高速高焓激波风洞”（以下简称JF-22超高速风洞）的支持下，姜宗林带领激波风洞团队依据我国独创的“激波反射型正向爆轰驱动”方法，把国际上普遍认为“不能用”的正向爆轰变为“可用”和“好用”的驱动能源，成功研制出JF-22超高速风洞。

今年5月，该项目完成竣工验收。验收专家组一致认为，该风洞在有效实验时间、总温、总压和喷管流场尺寸等综合性能指标方面处于国际领先水平。

前瞻引领，打造大国重器

人类有一个航空航天梦，总是想飞得更快、更高、更远。早在20世纪50年代，钱学森首先定义了“高超声速飞行”的概念。未来，新一代飞行器可以达到时行万里、实现国际出行的早出晚归。

而新一代空天飞行器的研发离不开重要的科学装置——高超声速风洞。高超声速风洞通过人工方式产生并控制高速气流，模拟飞行器周围气体的流动情况，获得飞行器的空气动力学特性，相当于在地面上人为建造一个“飞行天空”。

飞行器的速度越快，要求风洞产生的“风”越大。科学家用飞行速度与声速之比——“马赫数”度量飞行速度。在超高速飞行中，飞行器巨大的动能会产生强烈的头部激波和摩擦阻力，把飞行器周围的空气加热到数千摄氏度甚至上万摄氏度，引起空气分子发生解离、原子电离等复杂的化学反应。

“飞行器周围的空气起化学反应，这类现象超出了传统气体动力学的研究范畴，需要创立新的理论去描述，打造新的风洞去试验。”姜宗林表示，“新型空天飞行器研发的地面试验需要性能更强大的超高速风洞。”

基于这一科学前沿问题和国家航空航天重



JF-22超高速风洞。研究团队供图

大需求，2017年底，激波风洞团队向国家自然科学基金委员会提出了国家重大科研仪器研制项目申请，并获得资助。作为自然科学基金资助体系的重要组成部分，国家重大科研仪器研制项目重点资助对促进科学发展、探索自然规律和开拓研究领域具有重要作用的原创新型科研仪器的研制。

2018年全国力学大会上，中国科学院院士杨卫透露：“正在建设中的JF-22超高速风洞将为更高速的飞行奠定实验基础。”

在国家重大科研仪器研制项目的支持下，激波风洞团队以满足工程需求为目的，挑战先进风洞技术指标的极限，全心投入前所未有的JF-22超高速风洞研制中，于2021年底完成安装，进入性能调试阶段。

2022年4月15日，JF-22超高速风洞完成首次运行实验。当天是姜宗林的生日，JF-22超高速风洞的成功运行为他送上了一份珍贵礼物。随着轰的一声爆轰，控制室中电脑屏幕上的数据显示，实验结果达到预期目标。

2023年上半年，JF-22超高速风洞迎来真正意义上的“大考”。该国家重大科研仪器研制项目验收期间，共进行了5次专家现场测试。首次测试中，实际流场速度高达每秒10.08公里，总温达1.9万开尔文(K)，总压达3.3万个大气压。优异的性能参数令在场专家惊叹不已。

“我们感到很振奋。我把这次测试的实验记录写到了专家与团队上。”姜宗林回忆说。

JF-22超高速风洞具有尺度大、时间长、总温和总压高等特点，能够复现40公里至90公里高空、每秒2.5公里至10公里的飞行速度。实测最高速度达每秒10.1公里，如果以实验室声速度量，相当于约30倍声速的飞行条件。

“JF-22超高速风洞的综合性能在世界上还没有其他风洞可以相比。”姜宗林自信地说。

廿年一剑，复现轨道速度

早在60年前，科学家就开始探索“正向爆轰驱动”方法，为建造高性能激波风洞做准备。

“爆轰”是激波风洞用来驱动强大气流的一种方法，即混合的氢气和氧气被点燃，燃烧激波在管道内以高于声速的速度传播。根据点火位置的不同，驱动形式分为“正向”和“反向”两种。“反向”驱动相比，正向爆轰可以驱动产生更大的空气动力学，产生超高速飞行条件下的气流。

但是，正向爆轰驱动方式受“稀疏波”的干扰，难以满足激波风洞的驱动要求。如何应对“稀疏波”的干扰，“用好”正向爆轰驱动方式，是打造超高速风洞面临的世界级难题，需要在理论和技术层面实现突破。

2002年，姜宗林团队从原理上革新，提出并设计了激波反射型正向爆轰驱动器。这有效改进了驱动气流的平稳性，使正向爆轰从“不能用”变成了“能用、好用”的动力源，成为JF-22超高速风洞的核心技术。

从2002年学术论文发表，到2023年JF-22超高速风洞验收，中国科学家“二十年磨一剑”，实现了超高速风洞试验状态从流动“模拟”到关键参数“复现”的跨越。

在北京怀柔钱学森实验基地空天实验中心，《中国科学报》看到，与JF-22超高速风洞并排的是JF-12复现风洞，即“复现高超声速飞行条件激波风洞”。

JF-22超高速风洞的研制离不开JF-12复现风洞积累的经验。2008年，在首批国家重大科研仪器研制项目的支持下，JF-12复现风洞立项，2012年完成项目验收，确立了我国在这个研究领域的世界领先地位。

如今，JF-12复现风洞经历10年的试验应用，在国家重大任务、多个型号研制和学科前沿问题探索中，完成了一系列的重要科学试验。激波风洞研究团队因此获得了2016年度中国科学院杰出科技成就奖。

如今，这两座风洞可分别实现每秒1.5公里至3公里和每秒3公里至10公里的实验条件，共同构成覆盖马赫数5~30、飞行高度25~90公里的气动实验平台，使我国成为超高速声速领域唯一具备覆盖全部“飞行走廊”实验能力的国家。

传承四代，书写传奇故事

追溯更早的历史，JF-22超高速风洞成功的背后，是中国科学院四代科学家连续60多年持续奋斗，书写的一段传承创新、艰苦奋斗的传奇故事。

20世纪50年代中期，钱学森与“两弹一星”元勋郭永怀就制定了高超声速风洞的研究方向，在中国科学院力学研究所组建了激波风洞科研团队。

刚刚考上钱学森和郭永怀研究生的俞鸿儒接过发展激波管技术、研制激波风洞的重任。面对基础技术不足、科研经费短缺的难题，俞鸿儒选择了当时国际上已经弃用的驱动方式——氢氧燃烧驱动，但这种方式产生的能量极大、极易发生爆炸，会带来严重的安全问题。作为我国高超声速研究的第二代科学家，俞鸿儒把一生都投入到这项事业中。

经过一次又一次的反复试错，我国的风洞研究终于“炸”出了一条新路——我国第一代激波管，第一座大型高超声速风洞JF-8激波风洞，高超声速风洞JF4B、JF8、JF10等先后问世。

1999年，在俞鸿儒的邀请下，从事激波动力

学研究的姜宗林回国，成为第三代“风洞人”。“当时，俞先生告诉我，钱先生和郭先生创立的团队需要青年人传承。这个团队要紧跟国家需求和世界难题。”姜宗林说。

“因为国家需要，所以热爱这份事业。”姜宗林同样对团队成员说，“只有把事业和国家需求联系在一起，事业才有尺度；只有把事业与世界难题联系在一起，事业才有高度。”他带领激波风洞团队秉承“求真务实”的科研理念，传承了“成功不必在我，功成必定有我”的家国情怀。

他们完成了JF-12复现风洞和JF-22超高速风洞的研制，撰写了国际首部系统论述超高速激波风洞理论和技术的英文专著，奠定了中国高超声速风洞的世界地位。

2016年，为表彰姜宗林在世界最大高超声速激波风洞研究中所作的贡献，美国航空航天学会将该领域最高荣誉的“地面试验奖”颁给了他。这是这一奖项成立40多年来首次颁发给中国科学家，乃至亚洲科学家。

如今，姜宗林的学生作为第四代“风洞人”，正在接过前辈科学家手中的接力棒，为我国在高超声速风洞领域的研究注入新动力。

《中国科学报》：你在研制JF-22超高速风洞这一重大科研仪器的过程中，对工程科学有哪些思考？

姜宗林：JF-22超高速风洞是几代科学家多年艰苦奋斗的结晶，离不开钱先生和郭先生的高瞻远瞩，也离不开俞先生的无私奉献。中国高超声速风洞的理论创新与工程实践，正是坚持工程科学发展观的真实写照。

在中国高超声速风洞60多年的研发过程中，我国科学家提出了系统的爆轰驱动超高速风洞理论。该理论包含了反向爆轰耦合真空卸爆概念、激波反射型正向爆轰驱动方法、长试验时间激波风洞理论。

这些理论有其模拟工程实际的一面，也符合自然科学原理。中国高超声速风洞基于爆轰现象的基本原理，解决了高超声速风洞工程的需求，并得到了工程实践的验证。工程科学的发展没有最好，只有更好。这取决于我们对于物理规律的认知和模拟。

《中国科学报》：你对JF-22超高速风洞的未来应用，有哪些计划与期待？

姜宗林：高超声速风洞实验平台为我国的

高超声速发展提供了强大工具，我们现在可以开展那些“人不能做、人难做、人精不精”的科学实验，解决那些“做不了、做不好、做不精”的问题。

例如，近期我们在探索一种两级空天飞行器的超高速动态分离，这是以前做不了的试验。与火箭的垂直起降不同，这种空天飞行器可以水平起降，飞到距离地面30公里至40公里的高度，然后第二级起飞，继续往上飞到轨道上。研究这种飞行器两级分离理论和技术，对于指导空天飞行器的设计具有重要意义。

我们还计划应用JF-22超高速风洞继续开展我们自主研发的“驻定斜爆轰冲压发动机”试验，实现我国高超声速发动机的跨越式发展。

目前，JF-22超高速风洞在各项指标上都处于国际领先地位。我们期待在国家有关部门的支持下，能够把握这一机遇，建立大科学装置可持续运行的有效工作机制，加强对仪器共享与前沿交叉学科合作研究的支持。

原子阱痕量分析：为单原子“计数”

——记国家重大科研仪器研制项目“原子阱氦、氡同位素定年装置”

■本报记者 张楠

从南极钻取的一块冰芯，是多少年前形成的？一处深层地下水又有多少年的历史？人们对于赖以生存的地球的历史充满好奇，科学家一直在想办法提高定年的准确度。

随着科学家的不断探索和努力而被不断提高，但在动辄以百万年为计量单位的地球历史时间尺度上，一个微小偏差就可能产生数万年甚至数十万年的定年误差。

中国科学院大学教授卢征天、蒋蔚与中国科学院地质与地球物理研究所研究员庞忠和等科研人员，在国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目“原子阱氦、氡同位素定年装置”的支持下，建立“原子阱痕量分析”的超灵敏同位素检测方法，利用量子精密测量技术攻克了氦-85、氡-39和氡-81的探测难题，建成了原子阱痕量分析大型科学仪器。

其灵敏度、检测效率、检测速度等各项指标都处于世界领先水平，为环境、地质、水文、气候和海洋物理学等领域提供了先进的检测手段，带来了新的科学前沿突破。

测量太难，同位素丰度极低

放射性同位素被称为自然界的天然时钟，能够为各种环境演化过程提供关键的时间信息，在地球与环境科学中的应用十分广泛。

“定年的范围是由放射性同位素的半衰期长短决定的，所以如果待测的‘年纪’太‘年轻’或者太‘老’，就定不准了。”卢征天告诉《中国科学报》。

碳-14就是为人熟知的一种定年同位素，其5730年左右的半衰期，决定了其定年范围约在百年至万年量级。然而，这个范围对于水文、地质、海洋等领域的定年需求来说远远不够。

相较之下，氦-85、氡-39和氡-81等长寿命放射性惰性气体同位素，覆盖年代范围从几万年到130万年，大大超出碳-14的定年范围。

此外，由于是惰性气体同位素，它们在地表分布均匀、稳定。无论是水还是冰川，其中都存在气体，因此它们是测量地下水、冰川和海水等环境样品的理想定年同位素，同时在核安全方面也有重要应用。

但一个棘手的问题是，氦-85、氡-39和氡-81的同位素丰度只有 10^{-11} 到 10^{-16} ——每千克现代地下水中仅含有约4万个氡-85原

子，8000个氡-39原子和1000个氡-81原子，远低于传统质谱方法的探测极限。

事实上，在20世纪60年代即有国外科学家提出，来自宇宙射线的氡-81和氡-39半衰期分别达到23万年和268年，是环境水的理想定年同位素。但受限于当时的技术水平，这些极低丰度的同位素根本无法检测。

卢征天等人在前期工作的基础上，认为用自主创新的原位痕量分析方法是有可能攻克这一困扰地球与环境科学半个世纪的探测难题的。因此，从2018年到2022年，在国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目的支持下，他们开展相关研究，核心科学目标是研究全球和区域水循环提供关键时间信息。

当原子阱遇到惰性气体同位素

1999年，卢征天在美国阿贡国家实验室工作时，首先提出原子阱痕量分析方法，完成了原理性验证实验，并在其后不断完善。

卢征天介绍，这是一种单原子灵敏检测技术，利用激光操纵中性原子，通过使用原子光学、激光冷却与囚禁等手段实现对样品中被测同位素原子的高灵敏、高选择以及高效率检测。

传统质谱仪是先把原子电离成为带电的离子，使其加速并在磁场中转弯，通过转弯角度大小区分不同的同位素并展开分析。

在卢征天等人研制的原子阱氦、氡同位素定年装置中，他们不再将原子电离，而是用激光把原子推动到由多束激光构成的原子阱中，被“囚禁”在阱中心的原子会发出荧光，可以用高灵敏相机检测。通过对比样品的与大气中氦、氡同位素的丰度，可以计算样品的“年龄”。

其中，当激光频率调到被测同位素原子的共振频率时，只有该同位素原子与激光发生较强的相互作用而被原子阱捕获，其他同位素原子则穿阱而过。

“原子阱相当于一个原子筛选机，可以一个个地数出样品中特定同位素原子的数目。”蒋蔚表示，原子阱痕量分析的选择性非常高，完全不被其他同位素或分子所影响。

即使是测量同位素丰度低至 10^{-16} 的氡-39样品，该方法依然可以实现毫厘探测。在测量精度上，统计误差低于10%，系统误差低于3%。

边运行边研发

原子阱氦、氡同位素定年装置，包含3个子系统，分别为氦-85、氡-39和氡-81单独设计、独立优化。在国家自然科学基金委员会专家建议下，科研团队采取边分析边研发的策略开展项目。也就是说，建成一套使用一套，一边投入试运行，一边收集反馈，发展新方法。

2018年，项目开展不久，即在安徽合肥举行了应用研讨会，来自12个国家的不同领域科学家参加了会议。

“举行这个研讨会也是为了让参会学者认识相关技术，让他们考虑同步开展采样工作。这个会议发挥了很重要的作用，后面几年的很多应用都来自参会专家。”卢征天说，在边分析边研发的策略指导下，5年来，该项目已经产生了一批比较好的科学成果。在地下水、冰川、海洋、核安全等领域，他们与国内外学者展开了合作研究。

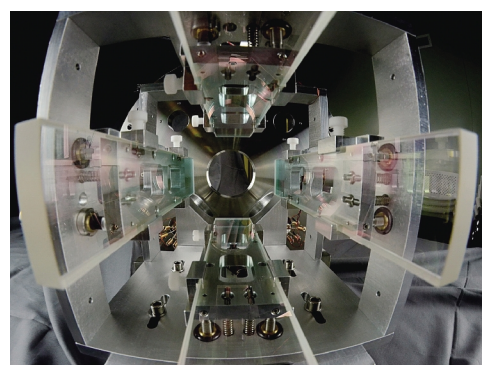
在地下水定年方面，得益于原子阱痕量分析方法的支持，基于氡-81定年的地下水研究近年来已呈现出蓬勃发展的态势。比如，在鄂尔多斯盆地发现了超过20万年的古老地下水，形成了对该地区地下水循环规律的新认识。此外，全球多地发现了年龄达百万年的古老地下水。

对于冰芯样品，只要存在包裹气，就可以通过氡-81和氡-39定年法进行精确的绝对定年，解决了传统的相对定年法无法应用于不连续样品的难题。近期，该项目团队将样品量减少到10千克以下，并首次实现了南极冰芯样品的氡-81定年和青藏高原冰芯冰芯的氡-39定年。

其中，在关于南极冰芯冰芯的工作，团队利用氡-81绝对定年法发现传统模型估计方法确定的冰芯年龄存在15万年偏差，并据此与欧盟研究团队对原来的冰芯年龄标尺进行了大幅修订。而关于青藏高原羌塘冰芯的氡-39定年工作则确立了山地冰川定年研究的新范式。

氡-85的主要来源是核燃料再处理设施，因此可通过大气氡-85含量推算核设施的年处理量，以及监测一些核辐射突发事件。该团队利用原子阱分析技术实现了对大气氡-85含量的快速测量，将样品量缩减至1升，该样品量仅为传统方法的1/1000，测量时间压缩至15小时，比之前快10倍，相应的采样成本以及难度都大幅下降。

该方法在核安全方面的另一应用是高效核



原子阱痕量分析仪器中的“原子束横向冷却与准直”。研究团队供图

废料处置地的选址。“这个地方的地下水最好是流动的，所以一个很重要的选址评估指标是此处地下水的年龄。”卢征天介绍，氡-81定年可用于研究场址的水文地质条件是否适合放射性废料的存储。团队目前已经和国内外相关研究机构建立了合作关系，开展这方面的应用研究。

“还是太慢”

项目完成时，各项技术指标均处于国际领先水平。

《中国科学报》：国际上还有哪些机构开展了原子阱痕量检测研究？

卢征天：美国阿贡国家实验室在2018年建立了氡-81和氡-85同位素定年检测中心，开展地球环境科学与核安全方面的研究与应用工作。样品需求为100千克地下水或者10升空气。德国海德堡大学搭建了氡-39的原子阱痕量分析装置，用于测量海水和山地冰川样品的年龄。澳大利亚联邦科学与工业研究组织和阿德莱德大学在2019年开始联合建设原子阱痕量分析中心。国际原子能机构也计划搭建原子阱痕量分析装置。

可以预期，今后10年至20年内，世界各地会出现多个放射性氦、氡定年实验室或检测中心。

《中国科学报》：团队关于原子阱痕量分析

的下一步研究有哪些？

卢征天：一方面，发展全光激发的原子阱方法，进一步向高精度和高探测效率方向发展，减少定年不确定度和测量所需样品量，包括1千克级冰芯的氡-81和氡-39定年、地下水高精度定年和多示踪剂研究、海水样品氡-39定年等。

另一方面，拓展原子阱痕量分析测量的同位素。钙-41同位素的半衰期为10万年，在考古和岩石暴露定年方面有潜在的重要应用。例如，测量格陵兰冰架底部岩石的钙-41暴露年龄，可以帮助回答格陵兰冰架在过去几千万年内是否曾经完全消融等重大科学问题。中国科学技术大学团队近期实现了自然丰度钙-41的定量检测，完成了原理性验证实验，在这方面迈出了重要一步。