



中国神话故事中的能人异士“一目千里”，17 世纪伽利略发明第一台光学望远镜探索宇宙的奥秘……千百年来，人类一直有追逐视觉极限的梦想。

如果把光学望远镜比作人类的“千里眼”，那么光学望远镜中的主反射镜就是“角膜”。主反射镜口径越大，光学望远镜的空间分辨率越高。

把一块 1 米口径的反射镜安装到空间相机中，可以在几百公里的高空看到地面上汽车的轮廓。如果把反射镜口径加大到 4 米，则可以清晰地看到汽车的天窗、后视镜等。反射镜口径为 2.4 米的哈勃空间望远镜，可探测到 134 亿光年外宇宙大爆炸时的宇宙信号。

全世界大大小小的光学望远镜的反射镜中，采用碳化

硅材质、口径最大的那一块来自中国。

长期以来，各国都将米级及以上口径反射镜作为战略物资。“买不到又必须用，把我们逼上了自主创新这条路。”中国科学院长春光学精密机械与物理研究所（以下简称长春光机所）所长张学军说，这一“逼”竟让他们制造出了全球最大口径高精度碳化硅光学反射镜。

给中国“千里眼”造最大“角膜”

■本报记者 温才妃



下决心做“全球最大”

“原来碳化硅的性能竟比玻璃好这么多。”1996 年，时任长春光机所奥普光学材料事业部主任赵文兴在俄罗斯瓦维洛夫国家光学研究院访问，看到碳化硅反射镜的那一刻异常振奋，感到“身体中每个细胞都被调动了起来”。

大口径反射镜通常采用玻璃、碳化硅、金属铍制作，究竟哪个才是最优选择？20 世纪 70 年代，美国、法国等率先实现了碳化硅反射镜光学应用。其中，最具代表性的法国 BOOSTEC 公司，以制造的碳化硅反射镜应用于盖亚、赫歇尔、欧几里德等望远镜而闻名。

长春光机所自建所以来一直研究玻璃反射镜制造。赵文兴此行所见碳化硅反射镜，其材料综合性能远优于玻璃、金属铍等，显然是更适合的材质。然而，碳化硅本身为陶瓷材料，再加上硬度高，仅次于已知最硬的金刚石，用其制造反射镜难度很大。从俄罗斯回来，他马上向所领导汇报了相关情况。

由于空间对地观测的敏感性，我国一度只能从国外购买口径 1 米以下的“小镜子”。科研人员希望早日实现大口径反射镜“中国制造”的愿望。

20 世纪 90 年代，我国载人航天工程立项，急需大口径离轴非球面反射镜。当时国外断言：“中国根本加工不出离轴非球面，即使加工出来也组装不出离轴非球面光学系统。”留学回国不久的张学军与翁志成、余景池等老一辈科学家，顶住压力开

了国内首台光学数控加工机床，并掌握了离轴非球面制造技术，将其应用于反射镜光学加工。

经过十余年艰苦攻关，2008 年，长春光机所团队研制出我国首套具有自主知识产权的 0.7 米量级碳化硅反射镜。当时，世界上应用于可见光望远镜的碳化硅反射镜最大口径为 1.5 米量级，由 BOOSTEC 公司制造。“我们最初的思路是做到米级，先解决有无的问题，并想做全球最大。”张学军说。

然而，国家的重大需求让科研人员来不及多想。2009 年 9 月，国家重大科研装备研制项目启动，张学军和时任长春光机所光学中心主任高劲松、副主任郑立功把大家召集到一起，宣布将研发 4 米碳化硅反射镜。

“什么？4 米！”所有人都明白，这是碳化硅反射镜口径的全球之最。

但现实问题是，在国内外相关技术、装备、经验基本为零的情况下，把 4 米碳化硅反射镜做出来，不仅要突破镜坯制备、光学加工与检测、改性镀膜等关键技术，还要自主设计研发全链路集成制造系统，没有人敢拍胸脯说“一定能成功”。

“我们要发扬老一辈科学家‘敢打敢拼，没有条件也要创造条件干’的精神，啃下这块国际上还没人啃下的‘硬骨头’。”最后，高劲松、郑立功带头表态，鼓励大家大胆假设、充分论证，形成了 4 米碳化硅反射镜全链路制造系统的技术方案。

加工一面普通镜子，尚且要做到平整，对于反射镜而言，这一要求更是达到了极致——4 米碳化硅反射镜的面形精度甚至不能超过 20 纳米。“如果等比放大，相当于把北京五环内的地面平整到低差小于 1 毫米。”张学军说。

这么苛刻的要求，他们是怎么达到的？

2011 年，长春光机所接到 2 米碳化硅反射镜的加



加工到极致平整

工任务。当时的成熟技术是小磨头加工，但做不到“指哪儿打哪儿”。张学军提议，将提前布局的磁流变技术投入应用。

磁流变具有抛光精度高、材料去除确定性高等优点，可实现近零亚表面损伤和纳米级精度抛光。美国 QED 公司掌握了磁流变的核心技术，但公开报道中最大只做到 1.8 米反射镜。之后，再无任何更大口径的反射镜论文发表。

能否采用磁流变技术超越国外的抛光水平，团队一开始心里没底。他们做好两手准备，一方面向国外订购 2 米反射镜，另一方面积极自主研发。可是钱已付给了国外厂商，对方也完成了加工，临交货却以“许可证过期”为由拒绝供货。

“背水一战”的局面，激发了科研人员的最大斗志。团队成员刘振宇、李龙响、李英杰等不分昼夜地刻苦攻关，终于将 2 米碳化硅反射镜打磨成功。这是世界上首次将磁流变技术投入到大口径反射镜的工程应用中。

后来，2 米碳化硅反射镜制造技术应用在巡天空间望远镜上。这台望远镜是

未来十年国际上最重要的空间天文观测仪器之一，被称为“中国哈勃”。

还没等大家松一口气，打磨 4 米碳化硅反射镜的任务又来了。这时，精度和效率的矛盾凸显出来：采用同样的工序，加工 2 米反射镜需要 8 个月，而加工 4 米反射镜则需要 64 个月，很难做到又快又好。

李龙响介绍，磁流变抛光技术中的抛光轮是一个硕大的轮子，重达上百公斤。它在离镜面不到 2 毫米的空间作业，稍微控制不好就会触碰镜面形成裂纹，导致反射镜报废。即便一切顺利，能否加工出精度合格的反射镜也是未知数。

使用原有的小磨头，应力盘等技术顶多是延长工期，可一旦磁流变技术失败，就是反射镜有损的问题。敢不敢冒这个险？大家踌躇不决。最后，还是张学军拍板：“你们放心大胆去用磁流变，只要足够细心，咱们肯定能够成功。”

在长春光机所光学楼的 4 米加工实验室，科研人员夜以继日采用砂轮磨削、小磨头、磁流变等技术，将 4 米碳化硅反射镜的面形精度从毫米加工到纳米。反射镜最终的面形精度达到 15.2 纳米，实现了国际领先。



让“出土文物”明眸善睐

对于碳化硅反射镜制造来说，改性能让反射镜表面更加平整，镀膜则堪称“点睛之笔”。只有镀了膜，它才有神采，才能明眸善睐。

4 米碳化硅反射镜采用真空镀膜工艺。国外的大口径改性 / 镀膜装备几乎都是圆形的，长春光机所的改性 / 镀膜装备却是长方形的。这又是什么呢？

其实，团队最初使用的也是圆形改性 / 镀膜装备，但他们很快发现，圆形改性 / 镀膜装备要求反射镜中心必须有一个孔，否则镀膜后的反射镜将无法使用。

“可不可以让固定的靶材‘跑’起来？”一个大胆的想法在高劲松脑海中闪现。这样一来，即使将来反射镜中间没有孔，也能顺利完成镀膜，改性 / 镀膜装备也因此变成了独特的方形。采用该装备，长春光机所在 4 米口径范围内将膜厚不均匀性控制在 5% 以内。

然而，实验样品刚从装备里拿出来时还不

错，但不一会儿膜层就一点点开裂、剥落。有时像放烟花一样，星星点点的小碎末往上蹦；有时形成一条条“小裂谷”，膜层从镜面成片翘起。没过多久，整个镜面布满灰尘一样的碎末，一吹便散了。最差的时候，不到一个小时膜层就掉得干干净净。看到这样的场景，团队成员急得在办公室来回踱步。

高劲松、时任长春光机所光学中心薄膜室主任王笑夷带领团队进行研究，经过团队成员刘震、刘海、王延超等半年多的反复实验和调整才找到合适的工艺参数，最终将磁控溅射技术应用于 4 米碳化硅反射镜表面改性 / 镀膜。这在国内外都属于首次。

他们最终完成了改性膜层 / 高反射膜层的镀膜，此时的 4 米碳化硅反射镜才算“破茧成蝶”，蜕变成真正的反射镜。至此，国际上公开报道口径最大的 4.03 米碳化硅反射镜研制成功。

目前，长春光机所研制的大口径碳化硅反射镜已应用于多项国家重大工程任务。与此同时，长春光机所面向国民经济主战场，立足团队研究成果，孵化了多家高新技术企业，实现了以碳化硅陶瓷及其复合材料制品、中大口径非球面及自由曲面的高端精密光学元件加工与检测装备、新型光谱滤光片及基于光谱滤光片的成像光谱仪等为代表的科技成果转化。延伸出来的技术、产品已经开花结果，广泛应用于我国半导体装备制造、汽车、生物医药、食品卫生、现代农业等领域，有力促进了相关产业转型升级、快速发展。



一块比一块做得更好

2012 年，第一块 4 米碳化硅反射镜坯刚出炉，还没来得及让张学军看一眼，就被赵文兴下令砸了。望着有较大裂纹且炸裂的镜坯，赵文兴迫不及待地想弄清楚问题究竟出在哪儿。

5 个小伙子整整砸了一天半，扬起的粉尘弥漫了整个实验室，终于把出现裂纹的具体位置找了出来。

镜坯制备是制造碳化硅反射镜的第一步。把微米级的碳化硅粉末变成镜坯，是怎样实现的？为什么要把烧坏的镜坯砸了？赵文兴提出了用凝胶注模成型结合反应烧结的技术路线。成型过程就像做“果冻”，先把碳化硅粉末通过凝胶注模成型，做成想要的形状，再通过一系列工艺排出“果冻”中的水分，并将“果冻”中的有机物变成碳，形成具有毛细微孔的多孔块体。

最后把多孔块体与硅放到一起反应烧结，形成致密的碳化硅反射镜坯。此时的镜坯是黑乎乎的一块，大家给它起了一个绰号——“出土文物”。“反应烧结中工艺参数的选择、控制，类似于‘蒸馒头’需控制蒸制时间、火候、气氛等，这对镜坯烧结的成败有很大影响。”长春光机所光学中心主任张炯说。

砸了第一块镜坯，赵文兴根据裂纹出现的位置，通过模拟计算，优化了镜坯反应烧结工艺参数，为 4 米碳化硅反射镜坯的成功制备奠

定了基础。

2010 年至 2016 年，团队一共开展了 5 次 4 米碳化硅反射镜坯制备试验。第一块、第二块镜坯裂纹宽度都在 10 毫米以上，第三块、第四块镜坯裂纹逐渐缩小。直到 2016 年第五次试验，镜坯研制成功。

在长春光机所的花园里，至今还留有 2015 年研制的第四块碳化硅反射镜坯。它呈圆饼形，直径 4.03 米，中间留有一孔，整体仿佛一只圆溜溜的眼睛，在阳光照耀下闪烁着灰蓝色的光。它已经成为长春光机所一处地标性景观。镜面有几条头发丝粗细的裂纹，但镜前婆娑的树影依然能纤毫毕见地映照其中。

虽然 4 米碳化硅反射镜坯制备试验只有 5 次，但其间 1 米、2 米、2.5 米、3 米镜坯制备试验，他们做了若干次。失败的次数远比成功多，特别磨人。试验不顺利时，赵文兴总会摇着头躲进屋里，一会儿写一张纸条递出来，让大家完善试验方案；再过一会儿，他可能又兴致勃勃地跑出来，找人一起总结、讨论。

在张炯看来，赵文兴虽然五十几岁了，“劲头却像小伙子”。有一次，赵文兴在所里一边骑自行车一边思考科研问题，被一辆小汽车蹭到。其实，小汽车司机已按喇叭提醒他了，他因为过于专注愣是没听见。

大口径反射镜在高分辨率空间对地观测、深空探测、天文观测等领域具有迫切需求，国内多家科研机构、高校相继开展了相关研究。其中，中国科学院上海硅酸盐研究所、中国建筑材料科学研究总院、哈尔滨工业大学等以碳化硅反射镜坯制备为主，北京空间机电研究所、中国科学院光电技术研究所等以反射镜加工技术为主，长春光机所则以碳化硅反射镜坯制备、光学加工与检测、改性镀膜等全链路制造为目标。

为什么要做全链路？这与长春光机所建所以来，王大珩等老一辈科学家提出的科研单位要“一竿子插到底”的目标密切相关。他们本着“时时放心不下、处处放心不下”的危机感，主张从基础理论到研究、设计、制造、装调、检验和试验所有环节入手，为社会经济和国家安全提供重要装备。

在 4 米碳化硅反射镜技术攻关过程中，长春



实现全链路制造

光机所自主设计、研制了以 4 米高温真空烧结炉、4 米磁流变抛光装备、FSGJ-4 型非球面数控光学加工中心、4 米磁控溅射镀膜机为代表的反射镜坯制备、光学加工与检测、改性镀膜所需的 30 余套大型装备，并自主开发了磁流变抛光控制、数控加工控制、3D 轮廓检测、面形检测、膜层厚度检测等反射镜加工及检测软件，真正实现了大口径碳化硅反射镜全链路制造。

2018 年 8 月，国家重大科研装备研制项目“4 米量级高精度 SiC 非球面反射镜集成制造系统”顺利通过验收。中国工程院院士金国藩、潘君骅等验收组专家认为：“该项目是我国在大口径光学制造领域的重大技术突破，形成了大口径系列反射镜研制能力，为我国大型光电系统研制解决了核心技术难题。”

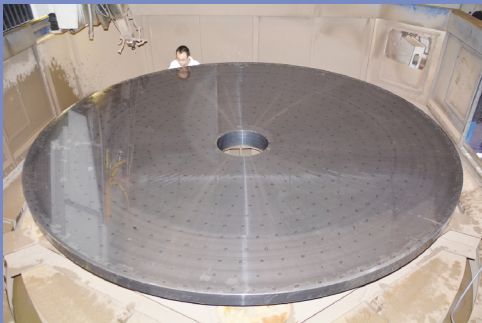
2018 年 12 月，在“大口径碳化硅光学复杂曲面高效高精度制造技术”科技成果鉴定中，

中国工程院院士姜会林等鉴定组专家认为：“该项目研发难度极大，创新性、引领性很强，核心关键技术、原材料、软件和装备完全自主可控，具有自主知识产权，研究成果整体达到国际领先水平。”

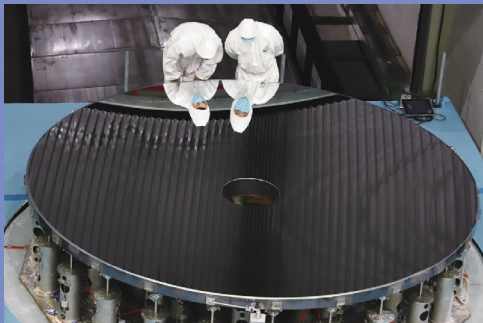
目前，长春光机所研制的大口径碳化硅反射镜已应用于多项国家重大工程任务。与此同时，长春光机所面向国民经济主战场，立足团队研究成果，孵化了多家高新技术企业，实现了以碳化硅陶瓷及其复合材料制品、中大口径非球面及自由曲面的高端精密光学元件加工与检测装备、新型光谱滤光片及基于光谱滤光片的成像光谱仪等为代表的科技成果转化。延伸出来的技术、产品已经开花结果，广泛应用于我国半导体装备制造、汽车、生物医药、食品卫生、现代农业等领域，有力促进了相关产业转型升级、快速发展。



反应烧结后的 4 米碳化硅反射镜坯。



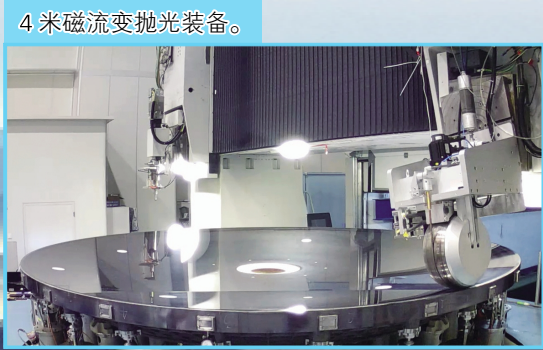
铣磨后的 4 米碳化硅反射镜。



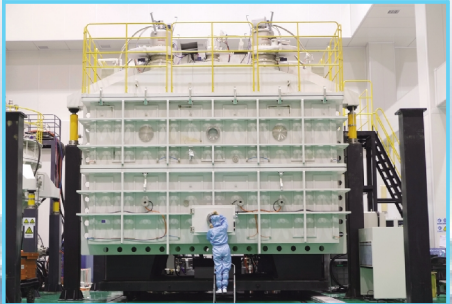
镀膜后的 4 米碳化硅反射镜。



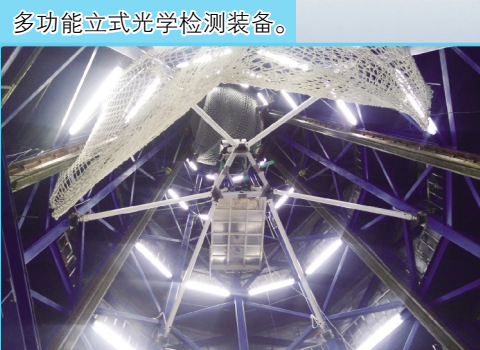
4 米高温真空烧结炉。



4 米磁流变抛光装备。



4 米磁控溅射镀膜机。



多功能立式光学检测装备。

长春光机所供图
蒋志海制版