

中国科学院上海硅酸盐研究所热控涂层团队：

六十余年“励精涂治”，他们是航天器“铸盾”者

□江庆龄

在距离地球400公里的高空，中国空间站每90分钟就会绕地球飞行一圈。在这里，空间站不仅要频繁经历从炽热到严寒的温度变化，还要承受空间粒子辐照、原子氧侵蚀的考验。而保护空间站免受空间极端环境伤害的，正是最外层那亮眼的“白色外衣”。

“外衣”是一种特殊的涂层，厚度不过200微米，却如同盾牌一般坚守在与极端环境“正面交锋”的最前线，默默守护着空间站。

这一看似轻薄却十分重要的涂层，出自中国科学院上海硅酸盐研究所(以下简称“上海硅酸盐所”)热控涂层团队之手。这支团队因“两弹一星”工程而生，六十余年“励精涂治”，自主研发了40余种涂层与材料，应用于载人航天工程、探月工程、空间站、火星探测和北斗导航等重大工程。

历经岁月淬炼，热控涂层团队逐渐形成了“以薄护重、韧性可靠、开放协同、接力担当”的“铸盾精神”。

以薄护重 为航天器“铸盾”

“每个航天器都有一套经过精密计算和设计的热控制系统，使航天器内部维持合适的温度，保证舱内航天员安全和仪器设备正常工作。”团队负责人、上海硅酸盐所研究员宋力昕介绍，其中，不同种类的涂层为航天器披上了一层“护甲”。

这类与温度相关的涂层，被命名为“热控涂层”。涂层不过几百微米厚，却是航天器应对外界恶劣环境的第一道防线，保护太空中的各类航天器免受极端温度、太空辐照等伤害。

让热控涂层不断“进化”的，是几十人规模的上海硅酸盐所热控涂层研发团队。

1959年，上海硅酸盐所因“两



团队成员正在进行喷涂操作



宋力昕(中)和团队成员

弹一星”工程独立建所，承担特种无机材料的研制工作。不久后，特种无机涂层材料研究室成立，正式开启为国之重器“铸盾”之旅。

1970年，团队研制的铝合金光亮阳极氧化热控涂层，成功应用于我国第一颗人造地球卫星“东方红一号”。

到今天，热控涂层团队已建成我国规模最大、综合实力最强、产品规格最齐全的无机热控材料研发平台。回顾团队承担的历次任务，也能窥见我国航天发展的伟大征程。

2003年，我国第一位航天员杨利伟搭乘神舟五号顺利返回地球。其中，热控涂层团队研制的防烧蚀污染涂层，成功解决了烧蚀材料污染飞船舷窗、阻挡航天员视线的难题。迄今，为历次载人航天工程任务，团队共研制了12种涂层与材料。

2020年，北斗三号全球卫星导航系统正式开通。热控涂层团队为北斗导航系统55颗卫星提供了姿控发动机热防护涂层、新型低比阻防静电无机热控涂层、低辐射金热控涂层等9种关键涂层与材料。

2024年，嫦娥六号实现月球背面采样返回。针对嫦娥六号的不同部位，热控涂层团队量身定制了多种“高端私服”，确保各类

仪器设备在极端环境中能够正常运转。此前，团队研制的涂层与材料参与了我国探月工程“绕、落、回”三步走战略的每一步。

在深空探测任务中，2025年发射的天问二号备受瞩目。热控涂层团队研制的多种型号二次表面镜和薄膜、光亮阳极氧化热控涂层、微弧氧化热控涂层、姿控发动机热防护涂层等，跟随探测器一同执行深空探测任务。

韧性可靠 百分百合格率

“热控涂层是一个相对小众的研究方向。”上海硅酸盐所研究员于云介绍，它需要结合航天器系统需求，应用场景相对单一，不容易形成规模化市场，同时技术门槛高，需要针对不同使用场景持续创新。

涂层需求日益多元化、并行处理多项任务、项目节点要求严格……这几乎是团队的工作常态。但他们从未因“赶时间”而降低要求，而是以匠心“雕琢”每一件产品，至今保持着交付产品百分百合格率的纪录。

“我们从原材料开始，每一步都进行了严格把控。倘若制备过程中某个步骤测试后不合格，就直接判定为不合格品，绝不允许

进入下一环节。”上海硅酸盐所正高级工程师孟佳说。

他们也遇到过系统归零问题。在航天系统中，归零是指发生质量问题时，对技术和管理进行全面排查，确保从源头上找到问题产生的原因、机理，并采取有效措施防止问题重复发生。一旦触发归零，团队本着严谨、务实的工作作风，积极配合用户按照“故障原因一问题复现一解决方案一举一反三”等全流程系统开展工作，并提供各类翔实的生产记录和质量报告——报告的时间跨度甚至达十余年。

这些详细的记录赢得了用户信任，也证明了热控涂层团队“出品必属精品”。

正如团队研制的材料能够在太空极端环境下长期稳定工作，团队自身所展现的严谨、创新和担当，构成了同样经得起考验的韧性底色。这种韧性，使得团队在面对不确定性时保持定力，在面对节点压力时守住原则，最终以“百分百合格率”，铸就航天器最外层的“防护盾”。

开放协同 从“配套”到参与设计

在航天工程体系中，涂层从来不是孤立存在的，必须与航天

器的结构、材料体系、热控方案、制造工艺紧密耦合。

作为一个偏工程应用的团队，热控涂层团队在长期工程实践中，始终秉持建制化攻关、开放协同的理念。

一方面，团队内部实行“大组套小组”的建制化管理模式，根据不同工艺路线和研究方向划分多个小组。在这种模式下，各小组既能围绕具体问题独立作战，保持创新活力，不断拓宽热控涂层的应用方向，又能构筑牢固“后盾”，在重大型号任务中迅速集结力量，形成整体合力。

另一方面，团队积极融入航天工程总体中，与上下游单位建立了良好的长期合作关系。他们习惯于从全局视角出发，能够主动跳出舒适区，提前完成各项前置工作，满足项目节点需求。

基于雄厚的基础积累和敢于创新的精神，在国家其他重大工程任务中，团队设计并研制了兼具防隔热和优异光学性能的光学窗口、温度超过1600℃的新型轻质耐高温多层隔热材料、寿命超过15年的抗原子氧涂层等新型涂层与组件。这意味着他们不再仅仅是“配套”提供涂层材料，还可以深度参与型号分系统重要材料的设计，助力涂层材料在航天器中发挥更佳性能。

接力担当 六十余年“励精涂治”

六十余年间，几代“涂层人”接续奋斗，以薄薄涂层，为国铸就了抵御极端冷热、护航星辰大海的“金钟罩”。

这背后，离不开系统化、建制化的科研组织模式。“建制化并非意味着简单组建一支庞大的攻关队伍，而是要让各个‘兵种’高效协同、联合作战，在满足国家需求

的同时引领未来。为此，所党委还组建了攻关突击队，强化党组织的政治功能与组织功能，提升团队的组织力和战斗力。”上海硅酸盐所党委书记王东表示，热控涂层团队是上海硅酸盐所非常有代表性的团队。建所伊始，他们开启涂层事业，到如今依然坚守初心。

没项目、没经费，还要在热控涂层这个方向坚持下去吗？团队“初代”负责人、上海硅酸盐所研究员胡行方判断，热控涂层是国家所需的关键材料，不能轻易中断。那段时间里，他硬是通过争取各类小项目，把火种保留了下来。

1992年，中国载人航天工程正式启动。热控涂层团队抓住了这个机会，重新站上国家重大工程的舞台。而让团队传承不断、保有活力的重要原因在于敢让年轻人挑大梁，让他们在任务中成长历练。

2000年，神舟二号防烧蚀污染涂层研制任务交给了热控涂层团队，胡行方把任务安排给了宋力昕和于云。彼时，于云刚博士毕业不久。

上海硅酸盐所副研究员冯爱虎是一名“90后”，他和导师于云一样，选择在毕业后留所工作。2020年，恰逢空间站进入攻坚的关键阶段，他深度参与了空间站的热控涂层研制工作。在实验室、发射场，都有他和同事争分夺秒全力攻关的身影。

……一代代年轻人不仅稳稳接下了交接棒，更将老一辈的精神延续至今。

(文图据《中国科学报》2026年2月24日第1版，有删节)



临安古韵 建水寻芳

□晋华

临安二月天气暖，
满城靓妆春服妍。
花旗旗亭锦围巷，
佛游人嬉车马闹。

——(明)杨慎《临安春社行》(节选)

当滇南的阳光穿过青瓦飞檐，在磨得发亮的青石板上投下斑驳光影，建水古城便在晨雾中缓缓舒展了千年身姿。在这座古称“临安”的文化名城内，漫长光阴沉淀在青砖黛瓦间，悠悠文脉流淌在文庙书院里，鲜活的市井气息弥漫在古井街巷中……在这里，每一粒尘埃都承载着文化的基因，每一次行走都是在与过往对话，每一次驻足皆可触摸文明的脉络。

古城风貌： 青砖黛瓦的时光印记

踏入这座“活着的古城”，便如同穿越时空，走进一幅立体的明清画卷。整座古城以朝阳楼为中心，呈“十”字形棋盘式布局，四条主街通向四座城门，规整中透着变化，严谨中藏着灵动。漫步其间，厚重的城墙、生动的街景、精巧的古建，共同勾勒出这座古城独有的肌理与韵味。建水古城的风貌，是中原礼制与边地风情的完美交融，是凝固在建筑中的千年史诗。

朝阳楼作为古城的标志性建筑，看一眼便足以震撼人心。这座宏伟的东门城楼始建于明洪武二十二年(1389年)，高24米的三层檐歇山顶建筑巍然矗立，红砂石墙体在阳光下泛着温润的光泽，楼檐下悬挂的“镇雄东南”匾额，笔力遒劲，彰显着昔日边地重镇的雄浑气魄。登上城楼，凭栏远眺，古城全貌尽收眼底：青瓦连绵如浪，街巷纵横如织，远处文庙的泮池，朱家花园的飞檐隐约可见。指尖抚过城砖，那些深浅不一的痕迹里，有刀刻的印记，有马蹄的磨痕，更有

600多年风雨侵蚀的沧桑，每一道纹路都在诉说古城的过往。

建水古城的古建筑，除了标志性的朝阳楼，“滇南大观园”朱家花园更是不可错过的瑰宝。这座位于建水古城中心翰林街中段的豪宅，占地2万多平方米，为清末当地乡绅朱成深、朱朝瑛两代人所建的宅家和宗祠，主体建筑呈“纵四横三”布局，为建水典型的“三间六耳三间厅、一大天井附四小天井”并列联排组合式民居建筑群，院落层层叠出，房舍鳞次栉比，庭院雕梁画栋，亭台水榭幽雅雅致。整体规模宏大，富丽堂皇。

文化气息： 滇南邹鲁的千年文脉

如果说古建筑是建水古城的骨架，那么深厚的文化底蕴便是古城的灵魂。自元代起，中原儒学在此落地生根，与边地文化交

融共生，使建水成为远近闻名的“文献名邦”。文庙的庄严肃穆、书院的墨香四溢、科举考场的井井有条，共同铸就了这座古城绵延千年的文脉。

建水文庙是文脉的核心载体。这座始建于元至元二十二年(1285年)的文庙，规模仅次于山东曲阜孔庙和北京孔庙，是西南地区最大的文庙。踏入文庙，首先感受到的是扑面而来的庄严气息，中轴线上牌坊三门四柱，开阔的泮池清澈见底，为这座庄重的学府增添了几分灵动。沿着中轴线前行，便来到了大成殿，飞檐翘角，气势恢宏。殿内供奉着孔子及其弟子的塑像，神情肃穆，栩栩如生。

学政考棚是建水科举文化的鲜活见证，这座位于古城内的古代考场，是云南省保存最完好的科举考场遗址，也是全国为数不多的古代科举考场之一。学政考棚始建于明洪武二十二年(1389年)，清康熙三十二年(1693年)因原址狭小，迁至城东南；清光绪二十九年(1903年)迁建于今址。学政考棚整体呈中轴线对称布局，由大门、仪门、龙门、考棚、大堂等建筑组成，是一部活的科举制度史，它见证了建水“文风兴盛，礼乐成俗”的黄金时代，也为这座古城的文化底蕴增添了浓墨重彩的一笔。

古城古井： 古城生活的见证者

建水古城素有“古井博物馆”之称，数十口古井星罗棋布，建于元代的东井、城中心的十二眼井(因排列形状如扇，也称“扇井”)等古井深浅不一、形态各异，或圆或方，或大或小，如珍珠般散落在古城的街巷角落，它们不仅是古城居民的生命之源，更是承载着市井烟火与历史记忆的活化石。

在众多古井中，西门大板井无疑是最负盛名的一口，井口直径2.7米，水质甘冽，至今仍供居民饮用，被誉为“滇南第一井”，成为建水古井文化的代表。西门大板井又名“溥博泉”，始建于明代，距今已有600多年历史。井名“溥



西门大板井

博”取自《中庸》“溥博如天”，寓意泉水广博清澈，滋养万物。这口井位于古城西门“清远门”附近，井口由六块厚重的青石板拼接而成，青石板边缘被绳索磨出了深深的凹痕。这些凹痕如同树木的年轮一般，记录着无数次取水的时间，见证着古城居民的生活变迁。站在井边往下望，井水清澈见底，波光粼粼，能清晰地看到井底的青石与摇曳的水草。当地人赞大板井的水“水味之美，冠甲全滇”，这并非溢美之词，井水富含矿物质，口感清甜，四季不涸，无论是泡茶、煮饭还是制作建水豆腐，都堪称绝佳。

建水美食： 舌尖上的烟火与传承

建水不仅是文化之城、艺术之城，更是一座被低估的美食之城。这里的美食，既有登上国宴的精致佳肴，也有藏在街头巷尾的市井小吃：鲜香的汽锅鸡、焦香的烧豆腐、清甜的草芽米线，还有清香扑鼻的荷叶包饭、软糯香甜的红糖糍粑、外酥里嫩的炸乳扇……每一道美食都承载着当地的历史文化与生活智慧，用最本真的味道，滋养着古城的岁月与人心。在古城里逛累了，找一家临街的小餐馆坐下，点上几道特色美食，配上一杯当地的米酒，在升腾的热气与香气中，感受建水最真实的烟火气息与生活温度。

在建水古城，几乎每家餐馆里都有汽锅鸡。这道始于清代的美食，不仅是云南菜的代表，更是登上过国宴的名菜。1986年英国女王伊丽莎白二世访问中国，到昆明时，宴席上就有这道汽锅鸡。在古城街头，随处可见卖草芽米线的店铺，清晨时分，一碗热乎乎的草芽米线是开启无数建水人一整天好心情的密码。草芽是建水特有的水生植物，形似象牙，洁白鲜嫩，只生长在当地清澈的溪流中，富含维生素与矿物质，口感清甜脆嫩。挑起一筷子米线，配上鲜嫩的草芽与肉片，趁热啖一口，汤汁鲜美，只生长在当地的清澈溪流中，富含维生素与矿物质，口感清甜脆嫩。挑起一筷子米线，配上鲜嫩的草芽与肉片，趁热啖一口，汤汁鲜美，吃过后都忍不住赞叹：“鲜到眉毛跳舞啦！”

建水古城的时光之旅，是一场与历史的对话，是一次与文化的邂逅，这座古城没有经过刻意雕琢，以最本真的姿态，迎接每一位前来探访的旅人。建水之美，不仅在于它秀美的自然风光与深厚的文化底蕴，更在于它的烟火气息与生活温度，在于它让历史活在当下，让传统融入日常。

5300米， 中印边境来了机器人哨兵

□李国栋 张惠钧

前不久，一段短短34秒的视频在海外社交媒体上悄然爆红。画面中，在海拔5300米的喀喇昆仑高原上，银灰色巡逻机器人驻守中印边境，自主巡航+360度无死角监控边境动态。这台被印军称作“科幻哨兵”的装备，让中国“科技戍边”从理念落地实战。

凭啥戍边喀喇昆仑

从视频画面能判断出，中印边境部署的这款巡逻机器人，是中国“锐爪”哨兵机器人。它是专为高海拔、极寒、低氧、复杂地形这类边境极端环境打造的特种装备，各项性能参数精准解决边境执勤的实际难题。

一是极致适配边境环境。能在海拔5300米、含氧量仅为平原60%的区域稳定工作，耐得住-40℃到55℃的温差，电池续航4—6小时。

二是机动能力超强。搭载八轮四驱或封闭式轮式底盘，适配高原专属自适应算法，陡坡、障碍能轻松越过，积雪、碎石、冰川峡谷等复杂地形能灵活穿行，不用人工操作就能按预设路线完成巡逻。

三是感知系统堪比“千里眼+夜视仪”。集成40倍光学变焦双光谱相机、红外热像仪等硬核设备，白天10公里外的移动目标一眼锁定，夜间红外探测覆盖5公里，任何动静都逃不过它的“眼睛”。

四是通信响应超快速。配备多通道抗干扰通信天线和北斗卫星导航系统，能和后方指挥中心、前沿哨所实时互联，发现异常立刻报警，还能自动联动周边装备协同响应，响应速度是人工的3倍，数据传输几乎无延迟。

戍边机器人的“成长难题”

无人巡逻机器人虽能较好地适应高原执勤，但目前仍有几大亟待突破的技术短板。

一是复杂情境判断能力不足：虽有基础AI识别能力，但解读目标意图、区分“误越境”和“蓄意挑衅”这类复杂情况，还得靠后方人员判断，灵活处理突发状况的能力远不如资深边防战士。

二是能源与防护有待升级：极端低温会让电池续航缩水，且暂无太阳能、风能等辅助供电模块；机器人被

弹面积虽小，可面对反坦克武器或高强度破坏时，防护能力仍需加强。

三是抗干扰能力需持续优化：即便装了抗干扰通信天线，在复杂电磁环境中，机器人仍可能面临信号屏蔽、数据传输中断的问题，自主运行和应急通信能力还得进一步提升。

未来还需解锁更多“超能力”

中印边境的边防体系正朝着“全域智能、自主协同、无人值守”的终极目标稳步推进，未来的智能戍边图景已经越来越清晰。

一是实现智能化大升级，从“自主巡逻”进阶到“自主决策”。通过让AI深度学习边境冲突案例、地形



锐爪 VU-T1 地面无人平台

特点和敌方战术，机器人提升了自主判断能力：能自动区分平民、武装人员和牲畜，精准识别“可疑集结”“装备架设”这类高危行为，甚至可以自主启动语音警告、强光驱离等处置手段，减少后方人工干预。

二是完成能源与防护双革新，打造真正的“永动哨兵”。机器人将集成太阳能板、风力发电模块，搭配高效储能电池，实现自主充电，近乎无限续航；同时采用新型复合装甲和电磁防护技术，既能抵御武器直射、抗住电磁干扰，还具备“自修复”能力，哪怕出现轻微损伤，也能自主调整姿态继续执行任务。

三是推进多任务全面拓展，从单一“巡逻兵”变身“全能戍边手”。机器人的模块化设计会进一步升级，除了原本的侦察、威慑功能，还能搭载医疗急救包、物资投送舱和环境监测设备，既能为误越境人员送去急救物资，也能向前哨所投送药品、食品，还能实时监测高原气象、地质灾害等情况。

(文图据《科普时报》2026年3月13日第6版，有删节)