



钢铁之脊：高端轴承的自主之路

■本报记者 张楠

一台巨型盾构机直径超过十几米的刀盘产生的惊人推力，最终由一套直径数米的主轴承一力承担；一架高速运转中的航空发动机，主轴承需要在高温、高速、极端受力下毫厘不差地工作。轴承，这个看似普通的工业部件，却是衡量一个国家工业基础与科技实力的“试金石”。

“十四五”期间，一场围绕高端轴承的自主可控攻坚战悄然打响，并取得关键突破。

中国科学院金属研究所(以下简称金属所)牵头，联合 20 余家科研机构与企业攻关，研制出直径 8 米级超大型盾构机主轴承“破壁者”，攻克高速精密机床轴承、高温高可靠航空发动机主轴承研制等关键技术，打通高端轴承“设计-材料-制造-应用”全链条，标志着我国在高端基础零部件领域迈出自主可控的关键一步。

从“基因”里改写轴承寿命

在谋划“十四五”重点工作期间，金属所团队先后赴国内 13 个省份 30 余家单位开展调研，发现轴承产业面临严峻挑战——我国自 1997 年引入首台盾构机、21 世纪初启动国产化以来，几乎所有部件都能自给，唯独主轴承依赖进口。企业的焦虑更直接，盾构机造价数亿元，进口主轴承不仅价格高昂、交付周期长，还存在“断供”风险；背后基建工程耗资以百亿元计，国产主轴承即便造出来，谁也不敢冒“一旦失效就导致工程停滞”的风险。

“卡脖子”问题面前，“国家队”必须站出来。

经过研判，中国科学院正式启动“高端轴承自主可控制造”战略性先导科技专项，金属所整合所内涵盖轴承钢、热处理、陶瓷等领域的 12 个团队及院内 7 家研究所力量，联合中交天和机械设备制造有限公司(以下简称中交天和)、洛阳新强联回转支承股份有限公司等 20 余家企业，构建起“行政指挥线+技术指挥线+党委保障线”三线并行机制。

一场覆盖轴承全生命周期的攻坚战，就此拉开序幕。

“做轴承，材料是根，是‘基因’。基因不好，后面所有的工艺都是空中楼阁。”这是中国科学院院士、金属所研究员李殿中团队的共识。

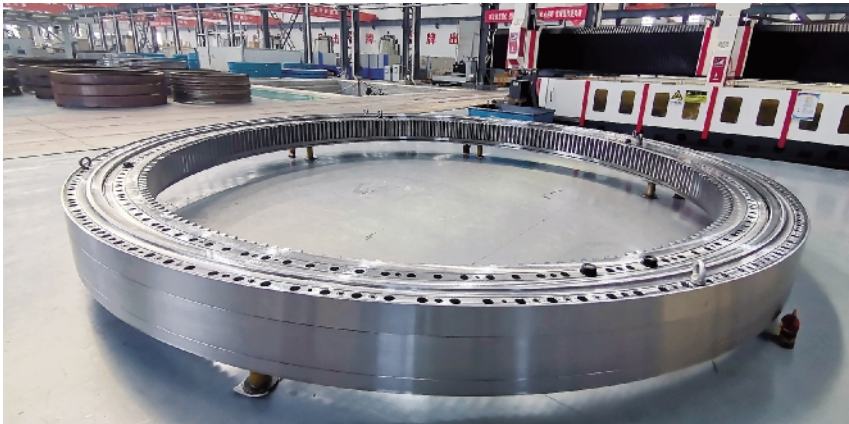
在中国科学院院士、金属所研究员李依依等老一辈科学家的带领和影响下，金属所深耕特殊钢领域数十年，奠定了坚实的理论与技术基础。

正是在这样的引领下，李殿中和金属所研究员胡小强带领的团队接过专项攻关重任，将目标锁定在轴承钢“氧含量”这一核心指标上。

钢中的氧会形成夹杂物，成为轴承疲劳裂纹的源头，直接影响寿命。要把氧含量降下来，需要从冶金物理化学的基础理论入手，对整个工艺流程进行重塑。

这是一场与微观世界斗争的硬仗。研发团队深入探究了轴承钢在冶金过程中夹杂物的生成机理与演变规律，创新性地开发了微量稀土添加、低氧纯净化冶炼、夹杂物细化弥散化控制等关键技术。

团队成员长期扎根生产一线，与企



超大型盾构机用直径 8 米级主轴承。

金属所供图

业的工程师、技术人员一同观察、分析、调试。失败了，就从头再来；数据不理想，就一遍遍优化工艺……他们最终掌握了高性能轴承钢的“基因密码”，成功研制出超纯净、高均质、长寿命的轴承钢材料。

经第三方检测，该新型轴承钢的疲劳寿命远超进口的某知名品牌轴承钢，达到国际先进水平。

这一突破，意味着国产高端轴承拥有了强健的“身体”。

“我们不仅仅是改进一种材料，还通过低氧稀土钢的研发应用，为中国的键基础零部件打造更强健的‘体魄’，形成杀手锏。”李殿中感慨，“这是我们的责任。”

41 吨“巨轮”闯过微米“天堑”

顶级轴承钢材料的研制成功，只是起点。

如何将优质钢变成性能卓越、稳定可靠的轴承，考验的是从设计、制造到应用的全链条协同创新能力。

当时，我国进口设备受国外技术限制，大型滚子的加工精度只能达到二级，即几百个滚子直径的误差不大于正负 2.5 微米，但要制造出符合盾构机要求的滚子，加工精度必须达到一级，即柱体直径误差不能大于正负 1 微米。

两者之间 1.5 微米的差距相当于一

根头发丝直径的 1/40，但在科研团队眼中无异于一道“天堑”。

为此，金属所研发团队主动“走出去”，与 20 余家相关企业共同组建了产学研用紧密结合的攻关联合体。

“科学家懂材料机理，工程师懂制造工艺，用户懂实际工况。只有将三方的智慧深度融合，才能制造出真正好用的轴承。”一位参与项目的工程师总结道。

联合团队针对超大直径盾构机主轴承、航发主轴承、机床主轴承等具体应用场景，展开了全链条技术攻关。

2022 年 7 月，项目进入“会战”阶段。在河南洛阳的组装现场，研究人员又遇难题：表面淬火机床和高精度磨床无法满足 8 米轴承加工需求，而进口加工装备要么对我国禁售，要么价格高昂，并且需要候产两年。严重的挫败感笼罩在大家心头。

金属所党委决定即刻组建以首任所长名字命名的“李薰大型重载轴承攻关突击队”。突击队在李依依、李殿中、胡小强等人的共同带领下，在合作企业的大力支持下，联合各单位在现场一点点对改现有机床，一点点摸索参数，仅用两个月就啃下了“硬骨头”。

团队突破了当时国内淬火机床最大尺寸限制，通过设备改造和工艺创新，实现 8 米级超大直径主轴承滚道面的大淬深控制。

当年 9 月底，这套重达 41 吨的 8

米级主轴承通过验收，各项技术性能指标与进口同类产品相当。

此时，连续作战的科研人员终于能松口气。胡小强回到家里，因长期疲劳导致双眼严重肿胀，“任务卸下来，身体里攒的‘火气’才敢冒出来”。

在工程一线展示实绩

产品最终要在工程一线经受考验。

在“高端轴承自主可控制造”专项支持下，装有金属所自研 3 米主轴承的盾构机已成功应用于沈阳地铁工程。这是全链条自主的国产主轴承首次在基建项目中“试水”，标志着技术从实验室走向了实战。而 8 米主轴承通过验收，标志着我国大型盾构机国产化链条彻底打通。

2025 年 10 月，在中国科学院与国务院国资委工作会商中，金属所与中交天和签署合作协议，将采用国产 8 米主轴承进行示范应用。装有 8 米主轴承的盾构机将在江西省内高速公路隧道等工程中大展身手。

“高端轴承自主可控制造”专项破解了高端机床、大型盾构机和航空发动机主轴承国产化的难题，为我国高端基础零部件攻关提供了有益探索，是“贯通技术链、打造创新链、对接产业链”的积极实践，是发挥新型举国体制优势、开展“政、产、学、研、用”协同创新的生动体现。

“但这不是终点。”李殿中介绍，目前主轴承产业化基地已正式落地，为打通盾构机国产化“最后一公里”奠定了坚实基础；而技术的辐射效应还在延伸——团队正探索将高端轴承技术应用用于风电、塔吊、港机，甚至高端精密医疗器械。

团队已整装待发，迎接下一场关键技术的挑战。前路依然充满挑战，但这场成功的实践已经证明，只要心系国家、脚踏实地、薪火相传，中国人完全有能力在关键核心技术上，铸就属于自己的“钢铁之脊”。



近日，从中国国家铁路集团有限公司传来消息，2025 年，铁路“十四五”实现圆满收官，全国铁路营业里程达 16.5 万公里，其中高铁超 5 万公里，我国建成世界规模最大、先进发达的高速铁路网。

图为 1 月 5 日动车组列车在江苏连云港海州区境内运营。 图片来源：视觉中国

新研究为 2 型糖尿病靶向治疗提供关键结构依据

本报讯(见习记者江庆龄)上海交通大学长聘教授副教授曹骏团队与上海交通大学医学院附属新华医院副主任医师张飞团队合作，首次报道了来源于 2 型糖尿病(T2D)患者胰腺组织的人胰岛淀粉样多肽(hIAPP)纤维的冷冻电镜结构，为理解 T2D 的病理机制及开发靶向治疗策略提供了关键结构依据。相关研究成果近日发表于《细胞》。

T2D 是一种全球高发的代谢性疾病，影响着全球近 10% 人口的健康与寿命。其发病机制复杂，涉及胰岛素抵抗和胰岛 β 细胞功能进行性衰竭。 β 细胞衰亡过程中分泌的 hIAPP 会发生错误折叠与异常聚集，在胰岛内形成

淀粉样沉积，该现象在超过 90% 的 T2D 患者胰腺中被观察到。因此，延缓 hIAPP 纤维化或清除已形成的 hIAPP 纤维，有望为 T2D 患者的治疗提供帮助。然而，hIAPP 病理结构的缺失极大制约了以 hIAPP 为靶点的糖尿病药物开发。

为此，研究团队在因为其他疾病需要手术切除部分胰腺的患者中，寻找同时患有 T2D 的患者，并在获取患者知情同意的情况下使用切除胰腺组织的癌旁正常组织作为研究样本。研究团队共收集到 6 位捐献者的胰腺组织，并优化出一套温和而高效的提取纯化流程，对捐赠者的组织分别进行了纤维提取。他们在 4 位患有 T2D 的捐献者的胰腺组

织提取物中观察到了具有淀粉样纤维形貌的纤维，在另两位未患糖尿病的捐献者中未观察到。研究团队利用冷冻电镜技术对提取的纤维进行了结构解析，并成功得到其中 3 位捐献者的纤维结构，3 份样本具有几乎相同的结构。纤维由两股对称的原纤维丝缠绕而成，其核心区域包含 hIAPP 的第 2-37 位残基，并形成了一种独特“ Ω 形”折叠模式。与已报道的体外 hIAPP 纤维相比，该结构在主干走向、侧链组装及分子内相互作用网络方面存在显著差异。

值得一提的是，研究团队辨识出多处非蛋白源性密度，它们对称地分布于纤维表面特定的口袋或其内部空腔中，其中分布于内部空腔的密度被 hIAPP

的疏水性侧链所环绕。这些结果为理解 hIAPP 的病理活性提供了全新的结构视角，同时分布于纤维表面的密度提示了一些潜在的配体结合口袋，可作为设计小分子抑制剂、抗体类药物或干扰肽的特异性靶点。

研究团队同时发现，hIAPP 纤维的核心折叠单元与阿尔茨海默病患者脑中 A β 纤维具有显著的构象相似性。两种纤维在一个 8 残基片段中显示出几乎相同的构象，为 hIAPP 与 A β 的体内交叉播种假说提供了结构解释，同时也为两种疾病的“共病、共诊、共治”提供了理论依据。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2025.12.001>

深学笃行全会精神 聚力攻坚核能新程

■李晴暖

党的二十届四中全会系统谋划了以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业的宏伟蓝图，《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》(以下简称《建议》)进一步明确了“加快建设新型能源体系”“积极稳妥推进和实现碳达峰”及“前瞻布局未来产业”的战略方向。

面对能源安全、绿色转型的时代课题，中国科学院上海应用物理研究所(以下简称上海应物所)必须深刻把握全会精神与《建议》要求，自觉将国家战略部署转化为推动钍基熔盐堆科技自立自强的具体行动，为构建新型能源体系、培育新质生产力提供核心科技支撑。

钍基熔盐堆是第四代先进核能系统重要战略选择。2011 年，面向国家能源安全与可持续发展的战略需求，中国科学院启动首批战略性先导科技专项“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统(TMSR)”，由上海应物所牵头实施，任务是发展钍基熔盐堆核心技术能力和研发 2 兆瓦液态燃料钍基熔盐实验堆。

十几年来，上海应物所从“零”开始组建队伍，在项目建设中边学边干，秉持“功成不必在我，功成必定有我”的信念，不追热点、不赶时髦，静心笃志深耕 TMSR，只干这一件事，也干成了这件事。

有别于传统核反应堆，钍基熔盐堆涉及高温熔盐化学、钍铀燃料循环、新型材料服役行为等一系列深层次科学问题，对我国来讲是一个全新领域。

上海应物所攻团队以基础研究为突破口，解决 TMSR 工程中的问题，也在工程中发现值得深挖的“真问题”，推动学科发展建设，形成了“问题来自工程、成果用于工程”的良性循环。

在此机制下，上海应物所团队掌握了材料、仪器、设备研发和系统集成等相关核心技术。

在整体设计方面，实验堆采取了一体化设计，将堆芯、燃料盐泵、换热器等核心设备集成在反应堆主容器内，显著降低了放射性泄漏风险，提高了反应堆的安全性，也为未来熔盐堆的模块化设计、工厂制造、整体安装及高效快速部署奠定技术基础。

在核心材料研发和工艺制造方面，为适应堆内极端服役环境，上海应物所成功开发具有自主知识产权的 GH3535 高温镍基合金、T220 超细孔径核石墨、突破型材与构件的制造工艺、镍基合金焊接技术等，实现熔盐堆用关键结构材料“从无到有”“性能一流”。

2023 年 10 月，我国首座液态燃料钍基熔盐实验堆正式建成并实现首次

临界；2024 年 6 月，首次实现满功率运行；2024 年 10 月，完成世界上首次熔盐堆加钍实验，在国际上率先建成独具特色的熔盐堆和钍铀燃料循环研究平台。同时，实验堆整体国产化率大于 90%，关键核心设备 100% 国产化，供应链自主可控，牢牢掌握发展的主动权。

目前，上海应物所已成功开展加钍实验并实现堆内钍钚转化，初步证明利用钍资源的技术可行性，为后续规模化利用钍燃料奠定了重要科学基础。

值得一提的是，这座实验堆是我国自主研发、设计和建设的第四代先进裂变核能系统，更是目前国际上唯一运行并实现钍燃料入堆的熔盐堆，表明我国在钍基熔盐堆核能领域实现了国际领跑。这背后，离不开上海应物所围绕钍基熔盐堆建设目标探索形成的独特体制机制。

作为“国家队”，上海应物所始终坚持以国家战略需求为最高导向，探索并实践“建制化、体系化”的科研组织模式，按照专业优势整合所内外力量，形成目标统一、分工明确、高效协同的“大团队”作战格局。

近年来，上海应物所牵头和深度参与的多个国家级重大科研项目均取得重要进展，切实将“建制化、体系化”优势转化为服务国家战略的突出成效，充分体现国家战略科技力量的组织优势。

正是在各类重大科技任务中，上海应物所打造了一支集基础研究、技术攻关和工程建设于一体的攻关团队。当前，这支队伍正围绕钍基熔盐堆研发全链条，系统地组织和实施任务。

钍基熔盐堆的规模化应用，离不开与产业界的深度融合。上海应物所与国内研究所、大学、核电相关设计与制造企业等联合开展关键技术攻关。随着实验堆的建成，钍基熔盐堆国产化供应链已初具雏形。下一步，上海应物所将通过与能源领域领军企业合作，深化共建钍基熔盐堆产业链和供应链，为国家能源安全和“双碳”目标提供有力支撑。

《建议》为我们描绘了“十五五”乃至更长时期的发展蓝图，而蓝图的生命力在于执行。一张蓝图绘到底，一代接着一代干。上海应物所 TMSR 实验堆、研究堆、示范堆“三步走”发展战略蓝图，正通过详尽的规划与扎实的行动，转化为目标与路径清晰的“作战图”。

面向“十五五”，全所上下将不忘初心、牢记使命，以更强的担当、更实的作风、更高的标准，奋力推动我国钍基熔盐堆科技事业再攀高峰，为全面建成社会主义现代化强国、实现中华民族伟大复兴的中国梦注入强劲的核能科技力量！

(作者系中国科学院上海应用物理研究所党委书记、副所长)

学习贯彻党的二十届四中全会精神

■旷野中最亮的光——野外台站巡礼

在大草原深处，
他们坚持要开一家“百年老店”

(详见第 4 版)

大型科考项目将评估 深海采矿后生态恢复情况



本报讯 2021 年，一台名为“帕塔尼亚二号”、体长 10 米的机器人车，在东太平洋海面以下约 4000 米的海底缓缓移动。它依靠吸头将土豆大小的多金属结核吸入，再通过管道输送至海面的船只。这是人类首次在克拉里昂-克利珀顿区(CCCZ)开展工业化采矿设备测试。据《科学》近日报道，5 年过去，欧洲“采矿影响”科研项目的人员计划重返“帕塔尼亚二号”的试验场及 CCCZ 的其他地点，评估采矿活动对深海生物群落的长期影响，以及这些群落恢复可能需要的的时间。

上述达 500 万平方公里的广袤海域，遍布着极具价值的金属结核——海水里金属离子历经数百万年沉淀形成的聚集体，同时也是关于“是否应允许企业开采深海”这一争议的核心地带。“采矿影响”项目成员、德国阿尔弗雷德·韦格纳研究所的 Felix Janssen 指出：“采矿设备作业时，会直接导致部分海底生物死亡。但真正的关键问题在于，采矿后的区域是否具备适宜生物重新定居并逐步恢复到维持长期生存所需种群数量的环境条件。”

为解决这一问题，始于 2015 年、总耗资 2500 万欧元的“采矿影响”项目，计划在 2026 至 2028 年间开展 6 次科考航行，来自 9 个国家的 100 余名科学家将参与其中。此次集中科研行动的背景，是全球对多金属结核的

开采竞争日益白热化。这是因为结核中富含的镍、钴等金属，是电动汽车电池等高科技产品的关键原料。美国在 2025 年颁布行政命令，指示其联邦机构加快推进深海采矿计划，进一步加剧了这场竞争。

“采矿影响”项目首席科学家、德国亥姆霍兹海洋研究中心的 Matthias Haeckel 指出，采矿目标区域栖息着许多特有种生物，其中约 90% 尚未被人类正式记录描述。而在 CCCZ 的深海平原，许多已知物种仅依附于多金属结核生存。“没有这种硬质附着基底，很多深海软体生物将无处栖身。”

计划于今年 10 月开展的第一次科考，将重返“帕塔尼亚二号”试验场，观察采矿轨道内部及周围是否出现了自然恢复的迹象。团队还将检查一批于 2021 年沉放至该区域的人工结核样本。这是荷兰皇家海洋生态研究所主导的一项为期 30 年的实验的一部分，旨在验证如果为深海生物提供适宜的栖息环境，它们的恢复速度是否会加快。

计划于 2027 年开展的第二次科考将尝试借助深海生物的遗传学特征评估它们的恢复潜力。团队将穿越 CCCZ 的广阔海域，采集多个物种的样本，分析不同种群间的遗传差异。

联合国国际海底管理局目前已向 21 个合法实体签发了 31 份深海采矿勘探合同，勘探对象主要是 CCCZ 的多金属结核。美国克利夫斯海洋研究所的 Lisa Levin 认为，明确深海采矿可能造成的环境影响是一项至关重要的工作。但深海采矿的未来走向，最终可能取决于经济因素而非环境影响。(王方)