

他们让公路少“动手术”更“高寿”

■本报记者 王昊昊

高速公路围起来修路，对司机来说并不陌生。蓝色围挡和“前方施工”的路牌，已成司机需要关注的重要路况。

截至 2025 年，我国公路总里程已突破 550 万公里，其中 90%以上是铺筑沥青路面的高等级公路。长期以来，我国高速公路设计寿命仅为 15 年，每年高速公路大、中修消耗沥青约 6000 万吨，砂石料约 10 亿立方米。若将这些石料铺成一条 1 米厚、25 米宽的道路，可绕地球赤道一圈。采砂石留下极难自然恢复的生态伤疤，频繁翻修也让拥堵加剧。发展长寿命路面是解决该问题的最佳途径。

日前，中国工程院院士、长沙理工大学教授郑健龙主持完成的“寿命逐层递增式沥青路面长寿命技术与应用”项目获 2025 年度国家技术发明奖二等奖。该团队用 20 余年攻关，将高速公路沥青路面主体结构寿命从 15 年提升至 60 年。相关技术已被广泛应用，并取得明显的经济效益。

追求“高寿命”而不是“等寿命”

故事要从 2001 年说起。那一年，我国着手对公路沥青路面养护技术现行规范进行编制。郑健龙参与了规范编制工作，并开展了相关研究。

公路按路面建造材料主要分为沥青混凝土路面、水泥混凝土路面、砂石路面等。沥青路面因其平整接缝少、工期短、行车体验佳等优势应用最广，我国 90%以上公路都是沥青路面。高速公路的基础结构包括路基、基层、面层等部分，其中面层又分为上面层、中面层和下面层，上面层直接承受车辆与环境作用，最易损坏。

“当时高速公路的行业设计标准就是‘等寿命’，也就是说，一条高速公路的路基、基层、面层，都按固定的使用寿命来设计。”郑健龙在规范编制和研究中，敏锐地察觉到这个长期被行业忽视的问题。

一直以来，我国沥青路面执行等寿命设计



郑健龙(中)和团队成员探讨科学问题。
长沙理工大学供图

规范，高速、一级公路全结构层统一设定 15 年使用寿命，二级公路 12 年，低等级公路 8 年。

然而，路面是多层复合结构，从上至下受力、服役环境差异巨大。上面层直接暴露于外界，常年承受车辆碾压、高低温循环、雨水冻融侵蚀，实际平均服役仅 10 年左右便出现车辙、开裂，最先“衰老”；下面层受力环境相对温和，基层深埋于路面下方，荷载经多层扩散后受力大幅降低，受气候侵蚀微乎其微，即便达到 15 年设计年限，结构完整性依旧完好。路基的寿命则更长。

“统一 15 年报废的设计模式，直接造成巨大的资源浪费与多重社会负担。”郑健龙萌生了念头，不能让公路的每一层“各活各的”、互不“拖累”？

为此，他们提出一个理念，要追求高寿命而不是等寿命。基于这些构想，郑健龙带领团队启动攻关。2008 年，郑健龙首次在学术报告中系统阐述了“分层递增”的设计理念和“双模量理论”的构想。

让每一层“各活各的”

最终，郑健龙团队提出了一个看似简单却

颠覆性的理念“寿命逐层递增”，也就是分层设计公路的寿命，让每一层“各活各的”，上面层 15 年、中下面层 30 年、基层 60 年，从上到下，寿命逐层翻倍。团队还在国际上率先提出“寿命逐层递增”的长寿命沥青路面结构体系。

为什么是倍增？团队成员、长沙理工大学教授吕松涛说，当基层需维修时，上面层也刚好到了该修的时候，一次翻修一并解决问题，不造成额外浪费。表层易坏、维修频次高，寿命短一点；深层难坏、难修，寿命长一点。这个看似简单的道理，却颠覆了行业延续数十年的设计逻辑。

理念突破只是第一步。为让每一层“各活各的”从想法变成工程现实，团队开展了深度攻关。

首先是给路面材料“正名”。过去几十年，行业惯用“单模量”计算路面受力，把沥青混合料当作匀质“铁板”，拉力、压力不分，一律套用同一参数。然而，沥青的真实特性是抗压力远强于抗拉力，两者相差数倍乃至十倍以上。

郑健龙是学固体力学出身的。“双模量理论”在他脑海中早有雏形——既然材料抗压特性不同，为什么不能用两个模量来描述？团队果断将抗拉、抗压各自独立取值，构建了沥青路面结构力学响应分析的双模量理论与方法。这一突破解决了因传统线性理论不能表征路面材料抗压模量差异而导致的设计参数取值不唯一问题，使荷载响应分析精度平均提高 30%以上。

其次是还原路面的真实受力。传统设计只关注车轮竖向压力，最多考虑一个方向的拉应力。而实际路面承受的是上下、左右、前后三维复杂应力——一个点既受拉又受压，不同方向受力截然不同。团队首次将三个方向全部纳入计算，创立了三维应力状态下沥青路面结构抗疲劳设计的强度准则。他们还攻克了长期以来不同试验方法得到的疲劳方程不同造成工程设计难以选用的难题，建立了疲劳归一化模型，使结构疲劳抗力设计精度成倍提升。

理论精准了，可计算成了新问题。“最初算一次要花几个小时。”郑健龙说，团队从算法上突破，采用有限点法替代有限元法，并自主研发

专用计算软件。如今，一次完整的结构设计计算仅需十余秒。

设计算得再准，材料和工艺跟不上也是纸上谈兵。在材料层面，郑健龙团队发明了化学增韧型高性能改性沥青技术，让改性剂与沥青产生化学反应而非简单的物理分散，显著提升了材料的抗变形能力和抗疲劳寿命。在工艺层面，团队研发了振动搅拌工艺与装备，即一边搅拌一边振动，将水泥结团震散、将混合料拌和均匀。这一创新使基层材料疲劳寿命提升一倍，水泥用量节省 20%。

有了标准就有了依据

有了技术，更大的挑战在于推广。“科研成果产业化，往往要承担失败的风险。”郑健龙坦言，基础设施工程一旦出问题，是要追责的。没有国家标准或行业标准的明确支撑，设计单位不敢用、施工单位不敢做，“那样的话，我们的成果就只能停留在纸面上”。

如何破局？标准先行。郑健龙团队联合相关单位，编制了世界首个基于三维应力和双模量理论的寿命逐层递增长寿命沥青路面设计标准。“这个标准还不像交通运输部发布的设计标准，不是一个强制性的规范。通俗地说，就是设计施工单位如果相信我可以，不相信也可以不用。”郑健龙说，有了标准就有了依据，也为逐步推广应用打开了局面。

目前，郑健龙团队的相关技术已在湖南、河南、广东、海南、内蒙古、广西等 31 个省份的 40 多项重点工程投入使用，还在共建“一带一路”19 个国家成功应用。据主要应用单位统计，近 3 年该成果产生经济效益 10.25 亿元，并且社会与环境效益显著。

郑健龙透露，团队下一步将聚焦绿色、智能、极地三大方向。“绿色方面推动电动重卡普及与交能融合，智能方面聚焦用数字化技术实现养护维修的智能决策，极地方面攻关青藏高原、北极等极端环境下的道路建设技术难题。”

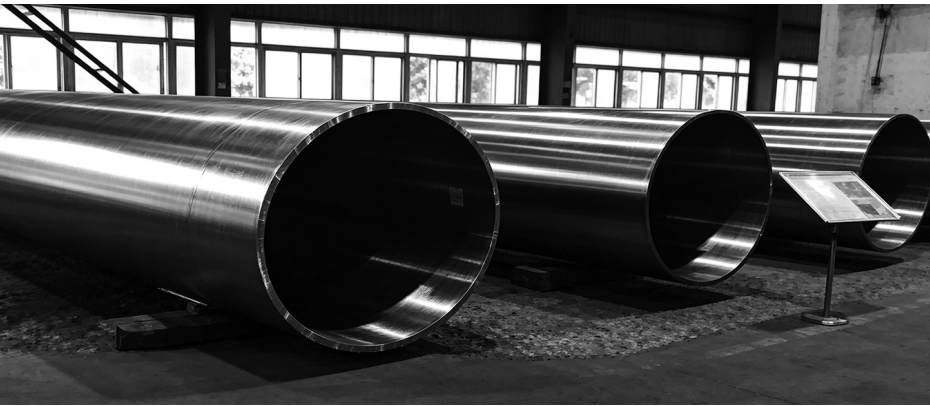
■按图索技

新技术让国产耐热无缝管穿孔“更快更滑更强”

本报讯(记者王敏 通讯员姜伟)近日,“重大能源装备用耐热无缝管穿孔超高温界面减摩抗粘技术与产业化”项目通过科技成果评价。这项成果由安徽工程大学材料科学与工程学院教授黄仲佳团队历经 10 年完成,破解了超超临界燃煤发电机组和核电工程的核心部件——大口径高合金耐热无缝管生产中穿孔界面阻力大、高温粘钢和管壁氧化严重等问题,让国产耐热无缝管穿孔“更快、更滑、更强”。

黄仲佳团队巧妙利用钼元素在高温下的选择性氧化特性,让其在摩擦界面原位生成具有层状结构的氧化钼润滑膜,将穿孔顶头和管内壁界面的摩擦阻力降低 50%。材料的高温硬度和低摩擦阻力实现穿孔更快、更滑,穿孔效率提升至传统工艺的 2 倍。

另外,黄仲佳团队通过在顶杆与顶头连接处开设出粉口连接智能控制喷涂系统,在穿孔的瞬间向高温新鲜内壁同步喷射防氧化与润滑涂层,让防护层在动态高温的管壁上快速铺展,使管壁氧化层厚度



大口径高合金耐热无缝管。
安徽工程大学供图

降至 0.5 毫米以下,解决了耐热无缝管在穿孔过程中因高温导致内壁氧化的问题,让高合金耐热无缝管穿孔能力更强。

目前,该技术成果在国内率先实现了 1190 毫米超大口径 G115 耐热无缝管的高

效生产。

近 3 年,团队累计为完成单位带来新增销售总额 9 亿元,新增利润 1.5 亿元,彻底扭转了我国超超临界耐热无缝管长期依赖进口的被动局面。

应对润滑新挑战,建立中国标准正当时

■本报记者 沈春蕾

从航天器在太空极端环境下的可靠运行,到地面交通装备的高效动力输出,再到海上巨轮的劈波斩浪,高端装备安全、高效、长寿命运行的关键离不开一项重要技术——润滑。

当前,全球能源转型加速推进,低碳燃料、新能源动力、人工智能等新技术、新业态蓬勃发展,为润滑技术提供了广阔的发展空间,也提出了前所未有的挑战。

近日,在山东青岛召开的 2026 世界润滑技术大会上,专家学者和产业界人士围绕“现代机电装备发展面临的润滑技术挑战”这一话题展开了深入探讨,希望为润滑技术的未来发展提供系统性思路。

润滑技术面临挑战

近年来,固液复合润滑被认为是解决高端装备润滑难题的核心方案之一。中国科学院院士刘维民在读研究生时就开始研究固体和油脂的复合润滑技术。

他以大型的风力发电装备为例介绍,装备抗电蚀的问题一直备受关注。电蚀是轴电流通过轴承滚动体与内外圈接触区域时引发的损伤过程,如果对轴承的内外圈添加固体润滑涂层,可以防止电蚀的发生。然而,未来的大型风电要用滑动轴承来代替滚动轴承,如果只有固体润滑,没有油脂润滑,肯定是行不通的,两者结合有望破解大型风电润滑技术难题。

中国船舶集团有限公司第七——研究所所长王锋长期从事船舶用内燃机开发。多年前,一位前辈的话让他印象深刻:“应该将润滑油作为发

动机的一个关键零件来看待,在设计发动机的时候就要考虑进去。”

王锋不仅记住了这句话,还带领团队落实。他们在开发设计高指标船用发动机之初,就将润滑提前纳入方案,并联合国内的企业和高校联合开展技术攻关。

如今,除了传统的船用柴油,还有甲醇、氨、氢等新型燃料加入应用。王锋介绍:“氢燃料在燃烧过程中产生的氮氧化物比传统燃料要多。如果氮氧化物跟曲轴箱的润滑油的油雾接触,就会产生氮化反应,可能对润滑油的品质或性能造成较大影响”。

新型燃料应用后,对润滑油造成的影响不止这些。王锋发现,燃料喷射系统的一些零部件不是用润滑油而是用燃料来润滑的,燃料切换之后带来了新挑战。由于使用燃料的不同,在发动机开发过程中要率先引入相应润滑技术的开发。

谈及氢内燃机的发展对润滑技术提出了哪些新要求时,中国石润滑油公司总经理汤仲平结合工作经验指出,水和水的流动性是研发氢内燃机在设计润滑技术时要重点关注的。

他解释道,氢燃烧之后会产生大量的水,水会改变油品的流动性,影响油品顺利到达发动机的摩擦副(由两个直接接触且产生相对摩擦运动的物体所构成);水在低温时还会结冰,也会影响润滑系统的正常运转。

建立中国润滑标准

中国民航大学校长丁水汀指出,针对航空

发动机每年所发生故障的分析显示,空气系统和润滑系统产生的故障占比非常高。

丁水汀说:“相比地面装备,航空发动机对润滑和燃料的需求不同。比如,由于运行温度范围较宽,航空发动机在燃烧室辐射的环境下,局部温度可能会达到 300 摄氏度,这对润滑的要求非常高。”

“润滑油不仅仅是油,更是相当于发动机的一个部件。”丁水汀再次提到这个业内早已达成共识的观点。

为什么将润滑油看作发动机的一个部件?他解释道:“我们把原来的化石燃料换成生物燃料,要考虑对发动机安全性的影响。润滑油也类似,考虑到‘油机协同’,自然也可以将其看成发动机初始设计阶段就要同步考虑的关键部件。”

国际上一些大型的发动机生产公司,无论是生产燃油还是润滑油发动机,都跟发动机的原始设备制造商(OEM)绑定,必须由 OEM 对不同类型的润滑油进行审定。

“审定需要走一个极其复杂的流程,每一款润滑产品要想进入市场,大概需要 10 年到 15 年时间,因为要做大量实验。”丁水汀表示,“我们首先要让自主研发的发动机用上国产的润滑产品,再推动国产润滑产品走出国门。”

现在,我国已有自主研发的涡轴发动机 AES100、中法联合研制的涡轴-16、即将取证的首台-1000A 发动机,下一步就是思考如何用国产润滑产品代替国外产品。

“尽管这是一个‘卡脖子’难题,但必须突破。”丁水汀建议,产学研各界协同发力制定一

■集装箱

高效低碳燃气轮机试验装置通过工艺验收

本报讯(记者陈欢欢)日前,中国科学院科技基础能力局组织在江苏连云港召开国家重大科技基础设施“高效低碳燃气轮机试验装置”工艺验收会。来自全国科研院所、高校、头部企业的专家组成的验收专家组,一致同意高效低碳燃气轮机试验装置通过工艺验收。

验收专家组认为,项目法人单位中国科学院工程热物理研究所全面完成了国家发展改革委批复的相关建设内容和任务。高效低碳燃气轮机试验装置总体技术水平和研究支撑能力居世界前列,部分核心能力与国际同类装置相比处于领先地位,填补了我国高参数大功率燃气轮机试验装置空白,将为满足国家战略需求、解决相关重大前沿科学问题、突破关键核心技术和实现我国自主燃气轮机跨越式发展提供有力支撑。

高效低碳燃气轮机试验装置是化石能源领域首个国家重大科技基础设施,采取“边建设、边运行、边产出”模式。此次通过工艺验收,为装置后续开放运行和关键核心技术突破筑牢根基。

校企共同发起成立磁共振脑机接口创新联盟

本报讯(记者陈彬)在近日举行的全国首届磁共振脑机接口大会上,由天津大学、上海联影医疗科技股份有限公司(以下简称联影医疗)联合发起的磁共振脑机接口创新联盟正式成立。该联盟由从事磁共振成像、脑机接口、脑科学与类脑智能、神经康复等方向研究的高校、科研院所、医疗机构共同组成,打通了科研、临床、检验、产业多方主体。

据天津大学医学部医学院副院长、国家重点研发计划首席科学家范钦钧介绍,联盟将发挥产学研用桥梁纽带作用,整合跨领域优势资源,聚焦磁共振脑机接口关键技术攻关、临床转化与应用推广开展多中心联合研究,同时开展标准制定、人才培养、学术交流,为我国脑科学规划布局提供有力支撑。

联影医疗负责人薛敏表示,未来联影医疗将依托磁共振脑机接口解决方案和创新联盟,与产学研医各方一道,实现更多“从 0 到 1”的突破,让中国在脑机接口国际竞争中掌握更多主动权。

国家先进计算产业创新中心(安徽)启用

本报讯(记者王敏)近日,“智算合肥生态领航”词元经济生态大会在安徽合肥召开。会上,合肥智算集群正式上线,成为曙光人工智能(AI)超集群技术的又一落地实践。国家先进计算产业创新中心(安徽)暨曙光安徽总部基地宣布正式启用。

据介绍,合肥智算集群由合肥大数据公司出资打造,采用曙光信息产业股份有限公司新一代 AI 超集群技术,通过软硬件一体化设计和系统级优化,进一步提升计算、通信、数据读写与资源调度效率,为词元规模化生产、持续流转和高并发调用提供稳定、高效的算力供给。

国家先进计算产业创新中心是 2018 年经国家发展改革委批复成立的国家级产业创新平台,围绕芯片、系统、应用三大方向,聚焦关键核心技术攻关、成果转化与产业协同,推动先进计算技术加快从研发创新走向规模化应用。

落地合肥的国家先进计算产业创新中心(安徽)面向科学智能、集成电路、新型显示、新能源汽车等领域,开展软硬件适配、应用验证和解决方案孵化,让先进计算能力更好匹配科研创新和产业发展需求。

套标准,不仅可以减少实验次数,还可以提升我国润滑技术在国际上的话语权。

“制定标准是参与润滑研究的科技工作者长期关注的问题。”谈及标准,刘维民表示,“我们现在所用的标准基本上都是由西方国家制定的,但我们不能一直跟着别人走,还得有自己的标准。”他希望政府、企业、高校和科研院所都能关注并加入中国润滑标准体系的建立队伍中。

年轻人要有多学科储备

高端机电设备在高速、高温、高压等方面的运行环境越来越复杂,工况越来越苛刻,对精准性和可靠性要求特别高,也对润滑技术带来了全新的考验。

与此同时,一批新兴产业的发展推动了新技术和新设备的问世,也为参与润滑研究的科技工作者提供了更大的可以施展拳脚的舞台,让更多的年轻人加入其中。

在刘维民看来,润滑是一个非常交叉的研究领域,涉及机械、化学、材料、力学等多个学科。他建议年轻的科技工作者要有多学科的知识储备,不能只守着专业内的有限知识,“那点东西放到工程中可能一点用都没有”。

刘维民还注意到,中国的科研团队近几年在润滑领域发表了大量论文,申报了不少专利。但是这些论文和专利真正有用的有多少?“相关领域的研究生未来要走向企业,要跟产业密切结合,要了解产业和企业的需求,千万别做没有用的东西。”