

# “把脉”极端环境下的材料性能

## ——记中国建材研究总院2014年度国家科技进步二等奖研发团队

□ 通讯员 姚桂艳 本报记者 陈瑜

2000℃的环境下,铁已熔成液体,有人想到变通办法,在铁表面镀一层“膜”——可以胜任高达2000℃以上超高温氧化环境的陶瓷材料。但问题接踵而至,现有试验机的夹具和压头材料本身难以承受1500℃以上的超高温氧化极端环境,如何评价材料的可靠性?这个问题曾经难倒了我国科研人员,也包括国际同行。

如今,问号已经拉直。

1月9日,在2014年度国家科技奖励大会上,中国建筑材料科学研究总院博导、中国建材检验认证集团(CTC)首席科学家包亦望教授和他的团队凭借“结构陶瓷典型应用条件下力学性能测试与评价关键技术及应用”捧得国家科技进步二等奖。

### 缺失的极端环境下材料评价方法

2003年,包亦望还在中科院金属所做“百人计划”研究,所里一位研究人员找到他,寻问有没有陶瓷复合界面强度的评价方法。这个问题来源于工程实践。

之所以找到包亦望,不仅因为他是著名的“点子王”,更重要的是,解决这个世界级难题已经越来越迫切。

结构陶瓷具有高强度、抗腐蚀、耐高温等许多优异性能,因此被广泛应用于航空航天、机械、石油化工和建筑等高科技领域。但陶瓷本身是脆性的,具有“宁碎不屈”的特点,服役中的陶瓷及构件容易发生突发性灾难事故,故又成为最不安全的材料。

时隔近30年,1986年的“挑战者”号航天飞机灾难仍被多次提及,刚起飞73秒,航天飞机发生解体,机上7名机组人员丧命。这次灾难性事故导致美国航天飞机飞行计划被冻结了长达32个月之久。最终调查发现,原因之一是陶瓷隔热瓦与母体界面脱粘后失去隔热能力,导致价值12亿美元的航天飞机被炸成碎片。

如果能对结构陶瓷力学性能做出准确评价,不仅可以保证构件安全可靠,还能对其失效时间做出预测。

但由于涂层与基体间难以剥离作为单

质材料进行测试,如何评价材料的可靠性是一项国际难题。

包亦望告诉记者,具体来说,难题体现在四个方面:界面问题;陶瓷复合界面强度和不同环境下的服役安全评价;异型件;管状或环形陶瓷构件的力学性能无法参照现有标准和检测技术;陶瓷涂层:热障涂层、耐磨涂层的厚度或强度无法直接测试;极端环境:超高温氧化环境下陶瓷性能评价无技术,无标准,无测试设备;构件性能预测:通过表面痕迹和接触响应非破坏性的监测和预测构件可靠性。

“因为评价标准缺失,目前大多采用‘牺牲层’的办法。”CTC研究中心副主任万德田解释,所谓“牺牲层”,是指本来只要10毫米的涂层,被加厚到了15—20毫米,这样虽然安全系数提高了,代价是飞行器重量也提高了,成本随之增加。

随着航天、航空、航海、化工、冶金等工业的快速发展,准确评价涂层材料力学性能显得越来越紧迫和重要。

中国工程院院士杜善义曾经说过,超高温试验是一个很复杂的技术问题,每一系统的建立难度都很大,但我国航空航天工业的发展需要建立超高温测试技术。

### “雕虫小技”解决大难题

“方法非常简单,在外行看来可能就是雕虫小技。”但包亦望说,这其中最难的是首先要想到捅破那一层窗户纸的方法,而这得建立在大量分析计算基础上。

随手翻开一本笔记本,除了看似简单的图示,就是密密麻麻的计算式。

“有时候为了一个小公式,花几个月推导都是正常的。”经过长达十多年的研究,包亦望和团队不断试验,反复采集整理数据,发明了一系列评价新技术。

陶瓷材料难以直接进行拉伸载荷试验,如何测得界面拉伸强度和界面剪切强度?传统的测试方法将试验样品叠加或者拼接,然后在叠加处或拼接处施力,但都无法获得界面拉伸强度。

“十字交叉法”提出,将两矩形截面短棒以十字交叉方式粘接成测试样品,设计专



包亦望在操作超高温氧化环境下力学测试系统

用带槽夹具和圆弧形压头,分别测得界面拉伸强度和界面剪切强度。

这项技术适用任何固相材料之间的界面强度和疲劳性能评价,并可推广到各种高强度粘接剂和耐老化性能评价,此方法一经推广,受到国内外无机材料检测领域专家的赞赏。

但新课题又来了。不是所有产品的样品都能加工成常规的矩形截面,而这类产品的应用范围又很广,如模拟核爆用石英玻璃管、光纤套管、火箭或导弹的尾喷管、石油化工用防腐内壁管等。

“缺口环法”能简单、方便、快捷的评价管状和环状脆性材料的基础力学性能。

“无需特殊的夹具,节省了大量的试验经费和时间。”包亦望说。

“相对法”则是通过已知或容易测量的材

料参数去计算出无法直接测量的未知参数。

“这就好比即使没有秤砣,只要知道一公斤白糖在秤杆的什么位置,就能称出同样质量的其他物质。”包亦望说,这解决了陶瓷涂层的基础力学评价问题。此前涂层材料力学性能测试基本上空白,世界各国都在寻求测试技术。

试验证明该方法简单、准确、可靠达到事半功倍的效果,解决了热障涂层、防腐涂层和耐磨涂层等力学性能测试的空白。

“局部受热同步加载法”解决了超高温氧化环境下测试的国际难题。

“痕迹法”则有点类似于“中医号脉”,通过分析试验后样品残余压痕痕迹的形貌和尺寸,推测出几乎全部的材料力学性能。该方法受到国内外专家的高度赞赏,国际评审

专家认为“这项工作确实是对纳米压痕技术的一个新贡献”,并在国际综述文献里被称为“BWZ method”(其中B指包亦望)。

### 主导制定国际标准提高话语权

建立方法、发明技术,包亦望和团队不满足于此,近年来一直致力于将技术转化为国家标准和国际标准。

“国际标准的形成过程是一个博弈过程,体现了技术、产业乃至国家的综合影响力和话语权,是市场的竞争源头,为此国际上对标准的竞争极为激烈。”包亦望印象深刻的是将“相对法”形成国际标准中的波折。

2007年,包亦望发明的“相对法”在国际刊物发表,受到国际同行的高度认可,实验证明该方法简单、准确、可靠。此前虽然国内外有用纳米压痕技术来评价陶瓷涂层的弹性模量,但反映的仅仅是局部甚至某晶粒的性能,只对理想均匀致密材料有效,而且设备昂贵,尚不能测量涂层的强度。

2013年,ISO组织向全世界征集陶瓷涂层测试技术时,“相对法”评价技术与日本提出的类似国际标准草案形成竞争,最后交由ISO顾问(Peter)先生仲裁,由于相对法具有原创性、适用范围更广泛,最后被成功立项。

利用自主知识产权转化成的国际、国内及行业标准,已被用于1000多家陶瓷企业和军工企业的相关产品各项力学性能检测与分析,经济效益达亿元。

包亦望认为,标准的社会效益意义更重大。大量性能检测方面的标准技术的制定,对于促进陶瓷和玻璃行业健康发展、无机非金属材料力学性能的学科发展、切实保障老百姓生命财产安全方面具有重要意义。

2007年,包亦望向ISO组织提交的以“十字交叉法”技术为基础的国际标准获得一致通过,在此前的陈述环节中,他提出的创新性、实用性受到高度关注,与会的六七个国家代表找到包亦望,反映该标准简洁明了,并找他要PPT,提出在自己的国家先用。

### 不将技术装在口袋里

让科技成果落地开花,而不是将技术

装在口袋里。

有别于大多数科研工作,包亦望不仅建立了许多创新的理论,还能将抽象的理论转化为可操作的方法与技术,并通过仪器设备这种载体来实现,反过来,自主研发的科学仪器设备又成为产生新观点的重要工具。

在中国建筑材料科学研究总院的实验室内,庞大的超高温极端环境力学测试系统塞满了约40平方米的房子。

“该系统是国际上唯一针对陶瓷、复合材料超高温力学性能测试仪器,温度最高可达2200℃,已经为多家合作单位进行了材料的超高温测试,解决了材料的超高温力学性能评价技术难题。”万德田言语间透出自豪,他告诉记者,以近地空间用超高速飞行器为例,该系统可为飞行器所用特种材料的服役安全和结构设计提供重要技术支撑,此外还有助于低成本选材。

超高温氧化耦合极端环境下,航天、航空飞行器的外围材料,如发动机和喷火管等处材料的超高温力学性能评价和设计至关重要。现有试验机的夹具和压头材料本身难以承受1500℃以上的超高温极端环境,这样使得材料的力学性能试验样品无法测试。该系统就是包亦望和团队运用“局部受热同步加载法”生产出来的。

包亦望教授率领的团队不断攻坚克难,从理论到技术,从实验到装置,发明了一套评价材料在超高温氧化环境下的力学性能测试方法,开发了国际上首台“材料超高温力学性能测试系统”,并获得863计划和首批国家重大科学仪器设备开发专项的支持。

这些年,包亦望和团队将取得的理论成果和新方法、新技术转化为一系列有特色的仪器设备,包括常温和高温固体材料弹性模量测试仪、安全玻璃冲击失效检测仪、多功能零能耗钢化玻璃检测器、钢化玻璃表面平整度测试仪、钢化玻璃缺陷和自爆风险检测仪器、脆性材料性能检测仪、幕墙松动脱落风险测试仪等,这些仪器设备有的已经进入国内多所高校和科研机构实验室,成为科研工作者探索科学的有力工具。

# 揭秘深空探测“国家队”

□ 本报记者 付毅飞 通讯员 庞丹



浩瀚宇宙深邃神秘,令人神往。从嫦娥奔月到万户飞天,千百年来,中华民族从未停止过对宇宙的探索。特别是进入二十一世纪,国家明确提出以月球为主的深空探测目标,启动月球探测工程,并将其列入国家重大科技专项。航天器系统研制则是实现工程任务的关键环节。

面对艰巨而复杂的任务,中国空间技术研究院于2002年组建了以叶培建院士为带头人的创新团队,汇聚了10余学科专业的技术人才,形成了我国深空探测领域发展战略及规划论证、航天器系统研究开发和总体设计的主力队伍。

在1月9日召开的2014年度国家科学奖励大会上,该团队获评国家科技进步奖创新团队奖。在此,让我们揭开这支深空探测“国家队”的神秘面纱。

### 创新“智”造科技丰碑

深空探测历来是航天强国实现技术突破和资源竞争的竞技场,其技术难度和风险极大。迄今为止,人类共实施了242次深空探测任务,其中月球探测的成功率仅为50.4%。

对此有着清醒认识的深空探测团队,在叶培建、孙泽洲等总设计师的带领下,从成立伊始就将“创新”二字放在首位,始终致力于新型深空探测器系统技术研究和工程实践。仅用短短9年时间,就实现了绕月、深空多目标和落月探测器的连续成功,取得了

5项标志性成果,牵引并突破了20余项核心技术,其中3项达到国际领先、10项达到国际先进。

面对遥远的深空带来的巨大挑战,该团队采用多学科、全系统优化设计方法,高起点地确定了我国首个月球探测器的总体方案,并成功解决了轨道、控制、测控等多个难题,突破了月球环绕探测技术,实现我国首次环月探测,铸造了我国航天史上第三个里程碑。不仅创新性地设计了适合我国国情的调相轨道、奔月轨道和绕月卫星回归轨道,实现了我国航天器轨道设计能力的跨越;而且在我国当时无深空站条件下,创新应用信道编码、高灵敏度接收等技术,突破了40万公里远距离测控技术,设计了高精度、高自主、高可靠的制导导航与控制系统,实现了近月制动过程的精确变轨控制和环月阶段的对月精确指向控制。

通过嫦娥二号任务,该团队突破了深空探测多目标多任务探测技术,将中国深空探测推进到一个新的高度;实现了月球、日地拉格朗日L2点和小行星三类目标探测,取得了“低成本、高质量、高回报”的突出实效。不仅在国际上首次实现从月球出发到L2点,实现了行星际轨道设计的突破;而且创新性地提出多约束分层渐进探测目标选择的策略,首创了高速交会渐近点凝视成像技术,国际上首次精确逼近图塔蒂斯,飞越最近距离达770米,图像最高分辨率优于3米。目前嫦娥二号卫星已成为我国首颗飞

人行星际,并环绕太阳飞行的探测器。

在嫦娥三号探测器身上,百分之八十的产品为全新研制,大大超出通常航天器20%—30%的新研产品比例。该团队通过大量技术攻关和专项试验验证,重点解决了自主着陆控制、月夜生存、着陆缓冲等难题,突破了月球软着陆和巡视勘察技术,实现了我国首次地外天体软着陆和巡视探测,使我国成为继美、苏之后第三个成功实现月球软着陆和巡视勘察的国家,为我国航天事业发展树立了新的里程碑。

面对月球表面无大气,需依靠探测器自身动力进行减速,下降时间短、速度变化大等一系列难题,为提高着陆安全概率,该团队突破了高精度、大动态激光测距和微波测距测速技术,在国际上首次实现月面软着陆自主障碍识别与避障控制。针对月夜长时间无阳光照射而引起的探测器低温生存问题,创造性设计了新型热控方案,突破了1/6重力场下两相流体回路分析模拟技术,在国际上首次采用重力辅助两相流体回路技术实现热能的自主可控传输,促进了航天器热控制技术新飞跃。为保证探测器落月时不翻倒、不陷落,团队创新设计“悬臂式”构型方案,攻克了新型常温超塑性材料的制备、加工工艺等难题,突破了着陆缓冲技术,推动了新型机构和新材料技术的发展。面对月面环境复杂,存在厚度、大小不等的月壤、月坑及岩石,巡视器设计面临环境感知、路径规划等难题,团队突破了自主

导航与遥操作控制技术。此外,针对历次新任务的复杂新环境,团队突破了多学科总体设计、复杂任务地面试验验证等共性关键技术,自主建立了月球引力场、表面温度场、月表地形、月壤等原创模型;突破了热环境、低重力、月壤模拟等技术,提出了一系列先进专项试验方法和标准;并集成数字化等信息技术,建立了一套完整的系统设计与仿真验证系统,填补了国内空白。

按照我国探月工程“三步走”战略的实施计划,该团队围绕返回任务目标,完成了月球返回返回任务关键技术攻关,并于2014年下半年完成了探月三期再入返回飞行试验任务,预计在2017年左右将完成我国首次月球返回。

在完成一系列重大工程任务的同时,该团队在创新方面硕果累累。在国内外刊物上发表文章200余篇;授权专利65项,受理专利125项,制定了多项行业标准;荣获国家科技进步特等奖2项,国家发明二等奖1项,省部级奖20余项。

### 创新管理育青年精英

在开展技术创新的同时,深空探测团队不断探索新型管理模式,形成了独特的创新文化和团队精神,培养了一大批优秀的科技人才。

该团队秉承中国航天系统工程管理理念,以提升系统创新能力为目标,构建了“系统总体+分系统专业”的组织体系,注重专业技

术能力水平的持续提升。针对多器同时研制、多研制阶段并行开展的复杂局面,采用“专业互补、协同创新”,“梯队配置、各负其责”,“联合协作、牵引支撑”的机制,形成了一个团队,多个任务,协调统一”的管理模式。

同时该团队坚持“严谨务实,确保质量”的工作作风,铸就了“勇于担当、自主创新、团结协作、追求卓越”的团队精神,实现了中国人的探月梦。

着眼于我国深空探测事业长远发展,该团队以神圣的使命感召人才,以艰巨的任务锤炼人才,以光荣的事业凝聚人才。既重视实践锻炼,又采取虚拟卫星设计实践式培训、工程经验知识转移等一系列学术阶梯计划,促进团队成员快速成长。同时,设置卓越创新奖、专项攻关奖、最佳新人奖,激励青年人脱颖而出。

经过十余年的培养与发展,中国空间技术研究院已在深空探测领域形成了以中科院院士、国家“万人计划”领军人才、973项目技术、“百千万人才工程”专家等为代表的研究团队。目前共91人,平均年龄35.4岁,先后培养出型号副总16名,主任设计师28名。团队骨干多次荣获全国“五一”劳动奖章、中国青年科技奖等荣誉称号。

### 放眼深空促多学科发展

2014年1月6日,习近平总书记在接见嫦娥三号任务参研人员代表时指出:“嫦娥三号任务圆满成功,在人类攀登科技高峰

征程中刷新了中国高度”,“也把中华民族非凡的创造力刻在了人类文明发展的光辉史册上”。

数年来,深空探测团队取得的大量成果,充分展示了我国的综合国力和科技实力,极大增强了中华民族的自豪感和凝聚力。同时,这些成果带动了空间科学的发展,可直接应用于后续火星、小行星等深空探测任务,带动大型运载火箭、深空测控网等工程的建造,促进我国航天技术水平的整体跃升,进一步深化对月球科学和空间物理的认识和理解;还带动了多种学科交叉渗透,牵引了信息技术、人工智能、新能源和新材料等高新技术的发展。

对于国内外学术交流,该团队历来予以高度重视,与清华大学、哈尔滨工业大学、香港理工大学、法国航空航天大学等建立了良好的合作机制,团队成员在多所高校担任兼职教授,并兼任中科院技术科学部副主任及中国空间科学学会副理事长。此外,团队积极协办和参加世界月球大会、行星科学大会、深空探测年会、CAST论坛等国内外会议,国际会议上作特邀报告20余人次,在国内外产生了广泛的影响。

展望未来,该团队将结合《国家中长期发展规划纲要》,继续以引领我国空间技术、空间科学发展为己任,开展我国深空探测领域发展战略研究,制定2030年前深空探测规划路线图,朝着深度宇宙空间迈出坚实的步伐。

