

经过严格安全检查,本报记者走进全球规模最大的核聚变实验装置ITER——

# 托举“人造太阳” 探索无限能源

本报记者 于超凡



形似“橘子瓣”、重达数百吨的巨大构件,被精确吊装进入地下深坑。这片扇形结构是国际热核聚变实验堆(ITER)真空室的重要组成部分,也是人类向无限能源发起冲击的关键一环。作为全球规模最大的国际科研合作项目之一,ITER旨在模拟太阳发光发热的核聚变过程,探索可控核聚变技术商业化可行性。日前,经过严格的安全检查,记者走进了这座坐落于法国南部的科研基地,实地探访“人造太阳”项目建设进展。

## 自提出构想以来已经历时四十载 30多个国家上千名人员参与建设

从法国南部港口城市马赛出发,驱车约一小时,记者来到丘陵怀抱中的圣保罗-莱迪朗斯小镇。ITER总部就坐落在一处地势较高的丘陵之上,主楼正面外观呈黑色,辅以白色硬线条,充满科技感。建筑一侧悬挂着一面巨大的英文标识牌,写着“安全组装ITER,为了聚变能源的未来”。ITER是迄今为止全球规模最大的核聚变实验装置,总占地面积达180公顷,除主反应堆外,还配有规模庞大的供电、冷却等配套设施。来自30多个国家的上千名科学家、工程师和技术人员在此工作。

自1985年提出构想以来,经过多年磋商与技术论证,2006年11月21日,中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国共同签署《联合实施国际热核聚变实验堆计划建立国际聚变能组织的协定》,决定在法国建设实验堆。各方采取“实物出资”模式,即不直接现金出资,而是由各成员自行制造所承担的设备部件,运送至现场统一集成组装。

在进入反应堆核心区域之前,记者在工作人员指引下,依次完成了严格的防护准备:佩戴安全帽、防护眼镜和防尘鞋套,随后乘坐专用通勤车驶向园区深处。下车后,还需在专设区域清洗鞋底灰尘,穿戴手套与鞋套,并穿过两道厚重的隔尘门帘。一系列检查后,记者终于踏上了ITER反应堆核心建筑的平台,这是参观者能够到达的距离真空室最近的位置。真空室是项目工程最关键的核心部件之一。

在核心建筑平台透过玻璃望去,施工现场秩序井然,庞大的建筑空间令人感到自身的渺小。整个安装空间高度达数十米,一座几层楼高的巨大螺旋矗立中央,一片“橘子瓣”状的真空室扇段通过特殊装置连接到中央螺旋上。周边许多设备被严密遮盖,等待安装。技术工人正在进行高精度定位、吊装与焊接作业,施工区域内严格执行温控与防尘要求。

ITER项目建设面临的一大挑战,是来自世界各地专业研究机构提供的大型部件运输至项目现场的物流问题。例如,ITER装置的18个D形环向场线圈,每个重达310吨,包括运输车在内的最重组件可达900吨,部分难以运输的超大型设备需在项目现场进行制造和组装。

ITER组织副总干事罗德隆向记者介绍,核聚变相比核裂



变优势明显,几乎无放射性污染,没有温室气体排放,燃料来源广泛且能效极高。一升海水中提取出的氘,经过聚变反应后释放出的能量相当于燃烧300升汽油。“如果能够实现聚变能的大规模受控应用,人类的能源问题将从根本上得到解决。”

## “磁场包住火”模拟太阳核聚变环境 中国团队承担18个关键设备包

ITER采用的核聚变技术路线叫作“托卡马克”,由苏联科学家在20世纪50年代提出,是目前国际上最主流且可行性较大的核聚变技术路线。托卡马克装置内布满巨大的磁线圈,通过强磁场形成环形的“磁笼”,将超高温等离子体牢牢悬浮在真空室中央,使其与容器壁完全隔离,从而实现安全稳定的聚变反应。这种用“磁场包住火”的方式,使得人类能在地球上复制出类似太阳内部的核聚变环境,因此该装置也被形象地称为“人造太阳”。

预组装大厅里,高高的吊架上悬着一个超大豌豆形金属设备,吊斗里的技术人员正对其进行检查,这是托卡马克主机真空室的模块之一。聚变反应的条件极为苛刻,反应温度至少需要达到1.5亿摄氏度,相比之下,太阳中心的温度也“仅有”约1500万摄氏度。要想装住如此高温的等离子体,只能使用特殊设计的“保温壳”隔绝热量。科学家们采用类似于保温杯的结构,使用双层耐辐照不锈钢在中间抽取真空形成真空室,并在外层加装冷屏制造出高效隔热的结构。这样的结构可以一边确保真空室内部上亿摄氏度的高温等离子体能量不向外扩散,一边帮助真空室外部的磁体线圈保持零下269摄氏度的低温以触发超导效应,可谓“冰火两重天”。

罗德隆介绍,ITER整个真空室预计由9个扇段拼接而成,总部件重量达8000吨,超过法国埃菲尔铁塔的重量。由于整体规模巨大,真空室必须分为若干扇段单独制造与组装,最终拼接成一个完整的结构。安装精度需控制在毫米级,每一瓣之间必须严丝合缝。每片“橘子瓣”内部结构同样极为复杂,其中使用了大量超导线圈,每根直径不到1毫米的超导线圈内又包含了8000至10000根细丝,每一根都经过特殊涂层处理。

据介绍,中国团队承担了ITER项目中18个关键设备包,

包括超导磁体馈线、纵向场线圈、极线场线圈、校正场线圈、脉冲功率系统和磁体电源转换设备等核心部件。截至目前,中国的产学研机构与ITER组织签订了85份设计和制造合同。由中核牵头组建的中法企业联合体,还承担了反应堆核心机器的组装起吊、精密定位、连接和检查任务。中方设备交付及时,质量过硬,极高的施工效率获得ITER方面的高度评价。

## 反应堆有望2034年点火运行 材料技术是目前最大瓶颈

通过建造和运行ITER装置,可以验证核聚变反应在大规模、长时间、高参数条件下的可行性。同时,核聚变实验堆的建设涉及众多前沿科学技术领域。在材料科学方面,需要研发能够承受高温、高辐射、强磁场等极端条件的材料;在超导技术领域,ITER装置使用了大量的超导磁体来产生强磁场,这将推动超导材料的制备和应用技术的发展。此外,还涉及高精度的测量技术、先进的控制系统、复杂的工程设计等多个领域。这些技术的协同发展将带动相关产业的技术进步,促进人类整体科学技术水平的提升。

“聚变永远还有50年”,这曾是人们对于攻克可控核聚变技术挑战的半开玩笑式的描述。限于ITER最初的设计,该反应堆计划在2016年建成,但受限于工程本身的复杂性和多国协作模式的整合难度,项目工期一延再延。目前,仅有一片“橘子瓣”完成安装,反应堆距离完全建成仍需较长时间。ITER理事会正在对反应堆建设进度制定新的工程基准。据ITER组织最新预计,反应堆有望在2034年实现首次点火运行。

为什么可控核聚变如此艰难? ITER组织工程师符津科告诉记者,材料技术是目前最大瓶颈。迄今为止,人类尚未找到能直接承受上亿摄氏度高温的材料,即便是最耐高温的钨合金也只能承受三四千摄氏度。因此,必须借助磁场精确控制等离子体位置,确保其稳定运行。此外,燃料自给、材料辐照老化、热能回收效率和经济可行性等问题仍待突破。

ITER组织战略协调官苏明星表示,像ITER这样接近人类科学极限的工程,需要一代代科研人员秉持“愚公移山”的精神,持续探索、积累经验、攻坚克难。当被问及假如反应堆建成却最终实验失败怎么办时,苏明星笑着回答:“无论成功或失败,我们都已成为书写人类科学史的一员。”

(本报法国圣保罗-莱迪朗斯电)

图①:技术人员在ITER预组装大厅进行吊装作业准备。图②:ITER总部外景。

以上图片均为本报记者于超凡摄

## 一线探访

在英国伦敦国王学院的一间实验室内,一场“牙齿革命”正在悄然酝酿。安娜·沃尔波尼教授与张学琛博士带领的研究团队正致力于让人类在牙齿受损后重新“长出”新的牙齿——这并非科幻,而是生物再生医学赋予牙科的新可能。近日,该研究团队在接受本报记者专访时表示:“我们的目标是不再依赖金属植入物或假牙等人工材料,而是通过生物学来修复或替换受损的身体部位,利用干细胞和生物工程环境培育出天然的牙齿。”

人类在生长过程中会经历“乳牙”和“恒牙”两次长牙,但自然界中有很多物种却拥有持续换牙的能力,这让科学家们获得灵感与启示。比如鲨鱼,它们的牙齿不是固定在颌骨上,而是像传送带一样排列在牙龈组织中。当有牙齿缺失时,后面的预备牙齿会不断向前补充,一条鲨鱼一生可以替换成千上万颗牙齿。“我们希望在实验室的条件下模拟这种自然发生的情况,促进牙齿发育。”沃尔波尼说。

据介绍,牙齿发育依赖于口腔上皮细胞与间充质细胞之间的相互作用,涉及蕾状期、帽状期和钟状期等阶段,最终形成牙釉质、牙本质及支持结构。体外生成牙齿类器官需要模拟这些发育过程,而合适的生物材料是支持细胞自组织和牙齿形态发生的关键。经过多年攻关,沃尔波尼团队利用一种创新仿生材料来培育人类“第三副”牙齿。这种仿生材料模拟牙齿发育所需的三维结构和生物信号通路,不仅支持细胞生长,更重要的是可以调控信号因子的释放,从而诱导干细胞分化成牙齿组织。这就像为细胞之间的“对话”创造了一个适合交流的空间,显著提高了体外牙齿类器官生成的可控性和效率,为未来的再生牙科和发育研究提供了更强大的平台。

这一创新材料由伦敦国王学院与英国帝国理工学院合作开发。沃尔波尼说:“传统材料虽能支持细胞交互,但其物理机械性能的调控性有限。我们首次使用生物正交交联的明胶水凝胶,通过精细调控其性能,探索其在牙齿类器官工程中的潜力。”张学琛进一步解释说:“这些智能支架材料像是细胞间交流的媒介。通过调节其物理和化学属性,可以引导细胞按照设定的方式互动、发育,进而构建出完整的牙齿发育路径。这是传统材料和技术所无法实现的关键性突破。”

张学琛表示,传统的金属牙冠或陶瓷种植体虽然技术已比较成熟,但由于是非生物材料,存在排斥、感染、与骨组织融合失败等风险。而以此种新方式培育出的牙齿通过细胞发育而成,与口腔组织高度相容,结构与功能均可媲美天然牙。这一再生方法不仅提高了生物相容性,还有效降低了并发症的发生率,为患者带来更安全、持久的治疗方案。

这项技术从实验室到临床应用还要多久?对此,沃尔波尼没有给出明确的时间表。她坦言,目前团队已在实验室成功培育出“类牙齿组织”,但尚未完全复制出完整的人类牙齿,“利用人类细胞稳定培育出完整功能性牙齿仍需攻关”。

“牙齿的形成并非单一细胞行为,而是多个细胞类型之间复杂的交流与协作过程。”沃尔波尼比喻说,“细胞间的对话像加密电报,一个细胞发出指令后,另一个细胞会传回反馈信号,这种动态交流至今仍是未解之谜。团队通过新型激活剂将牙齿形成效率提升2倍多,但要完全破译‘细胞语言’仍需时日。如果能读懂‘细胞语言’,未来或可将其转写并重新编程,实现真正的器官再造。”

张学琛认为,未来让再生牙齿生长有两种方式:可以在缺失牙齿的部位移植年轻的再生牙胚,让它们在口腔内生长;或者可以先在实验室培育出完整的牙齿,然后再植入患者口腔。

有业内专家认为,随着基因编辑与生物材料的深度融合,牙齿再生技术或将成为打开人体再生能力的首要钥匙——它不仅将重新定义牙科医学,也将更新人类对生命极限的认知。未来,终身换牙或许将不再只是自然界的奇迹。当仿生支架上的人类细胞开始“对话”生长,牙医的诊疗台上或将不再需要钻头的嗡鸣,取而代之的是生命自身的再生力量。



沃尔波尼(右)和同事正在进行实验。 本报记者 许立群摄

## 新材料有望提升量子计算机稳定性

据新华社斯德哥尔摩电 瑞典查默斯理工学院日前发布公报说,该校研究人员和同行联合开发出一种新材料,以磁力操控这种材料,可以获得与传统量子态相比更稳定的量子态,有望提升量子计算机的抗干扰能力和稳定性。

量子计算机依赖量子比特进行计算,但量子比特往往对外部环境变化非常敏感,轻微的温度变化、磁场扰动或微小振动都可能导致量子比特失去其量子态。查默斯理工学院研究人员和同行在新一期美国学术期刊《物理评论快报》上发表论文说,他们构造了一种被称作“近藤晶格”的材料,通过磁力操控,可以在其中实现较稳定的量子态,即便受到一定干扰也能维持。

这种材料中的量子态通过一种名为拓扑激发的方式实现。过去常用一些材料中的电子自旋来实现拓扑激发,但具备这一特性的材料较少。而新研究表明可以用磁力来实现类似的拓扑激发,而具备磁性的材料较多,因此这项成果也有助于扩大量子计算机的材料基础。

## 新型可回收电路材料助力电子垃圾再利用

据新华社北京电 美国弗吉尼亚理工大学的研究人员近期在美国《先进材料》杂志上发表论文说,他们开发的一种全新电路材料不仅可回收和可重复配置,而且受损后还能自我修复,同时保留了传统电路材料的强度和耐用性,这为解决电子垃圾问题提供了一个潜在方案。

这种新材料的基础是一种类玻璃高分子材料,这是一种可以重塑和回收的动态聚合物。研究人员将其与液态金属微滴结合,后者承担了导电的任务,就像传统电路中的刚性金属那样。与其他可回收或柔性电子产品不同,通过将高性能、适应性强的聚合物与导电液态金属结合,新材料可应对一系列挑战。

本版责编:王 慧 黄发红  
版式设计:蔡华伟

# 人类能否长出『第三副』牙齿？

许立群 陈璐

## 创新汇

# 羽毛球机器人如何“看得清”“动得准”？

本报记者 李 墨

移动、引拍、击球——测试场地上,一个四足机器人灵活地挥动机械臂,将飞来的羽毛球打回给它的人类对手。近日,瑞士苏黎世联邦理工学院研究团队在国际期刊《科学·机器人学》上发布了其研发的新型足式机器人系统(见右图,瑞士苏黎世联邦理工学院供图)。这个特殊的“运动员”能够仅凭机载感知设备预测羽毛球飞行轨迹、调整自身位置并精确完成击球动作。“我们的成果展示了足式机器人如何执行复杂、动态、由感知驱动的任务,可以为整合机器人高速感知和全身协调能力提供新的思路。”该研究的第一作者、苏黎世联邦理工学院机器人系统实验室的马云涛博士在接受本报记者采访时表示。

羽毛球是世界上速度最快的球类运动之一,球速最高可达每小时400公里以上。运动员需要在极短的时间内捕捉羽毛球飞行轨迹,然后在一定范围内快速完成位移和击球动作。这项运动对预判、跑位和挥拍技术要求比较高,因而成为测试机器人动态感知与运动协调能力的理想项目。马云涛解释说,选择羽毛球作为实验对象,通过设置固定和移动等不同难度的击打目标,研究团队可以渐进式地检验和提升机器人性能。

要成为合格的“羽毛球选手”,机器人首先要做到“看得清”。现有商用机载相机的运动稳定性、可变焦距和信息处理能力等方面远逊于人眼,为实现有效的视觉追踪,研究团队开发了感知噪声模型,用以量化机器人抖动、旋转等运动

状态对目标追踪的影响,使机器人能够主动适应动态模糊、目标遮挡等干扰。即便目标因高速运动或遮挡短暂消失,机器人仍可基于历史运动轨迹持续预测其位置。当羽毛球高速飞离视野中心时,机器人也会主动调整身体俯仰角度,将目标保持在相机视野内以优化追踪效果。

让机器人“动得准”是另一大挑战。传统运动机器人往往将移动与操作任务分离——底盘负责跑位,而机械臂负责操作。这种“各司其职”的设计使机器人难以应对复杂的动态环境。“我们通过一个基于强化学习的统一控制框架,将主动感知、移动和操作功能整合为一体。”该研究的共同作者、苏黎世联邦理工学院机械与加工工程系教授马科·胡特表示,这项技术可同步协调机器人周身18个关节的运动,通过判断来球的时间和距离,自主调整步态和击球方式。实验显示,在测试条件下,机器人可以在单个回合内与人类对手进行10次连续对打,且对于落在球拍中心区域的球达到近100%的拦截成功率。

目前,机器人从发现对手击球到发出挥拍动作平均需要约0.35秒,其感知和反应能力仍有提升空间。研究团队计划通过集成更多传感器、融合多种传感模式并优化视觉算法等,进一步升级机器人性能。未来,这一成果有望走出球场,应用于更多需要快速响应和全身协调的复杂场景。“机器人学会了如何平衡感知稳定性与运动灵活性,这种视觉与运动之间的

