

哈电集团：让国之重器不惧“卡脖子”

——写在全球首台球床模块式高温气冷堆核电蒸汽发生器即将产成发运之际

吴儒杰 郑明涛 李尧

网络搜索“哈电集团”，几乎总是和一个个“国之重器”紧密相连。这个有着共和国装备制造业“长子”称号的哈电集团，通过攻克一项又一项大国重器的世界级研发制造难关，一次次刷新着世界装备制造业领域的最高纪录。

9月29日23时58分，国家“十三五”科技重大专项——高温气冷堆核电站示范工程华能石岛湾核电站2#蒸汽发生器在哈电集团(秦皇岛)重型装备有限公司(以下简称哈电重装)圆满完成压力试验，标志着蒸汽发生器主体制造完成。10月31日，这台拥有我国自主知识产权的全球首台球床模块式高温气冷堆核电蒸汽发生器，将在业主方、总包方、设计方、制造方共同见证下，实现交货发运。这是我国首个自主化国产化的第四代核电标志之作，是一项堪称世界工程的大国重器，哈电集团再次创造了一项将载入史册的历史纪录。

“这台高温气冷堆核电蒸汽发生器的研制成功，从设计、材料、工艺各个环节都实现了完全的自主创新，为我国核电在‘一带一路’中顺利走出去开辟了一条全新道路，可以完全不受人制约。”哈电重装党委书记、董事长王守革自豪地总结道。

“可以说这个高温气冷堆是一个为国争光的‘争气堆’！这个项目历时十年，哈电重装人十年艰辛磨砺，铸就国之重器，将国之重器的核心技术牢牢掌握在我们自己手里。全球首台球床模块式高温气冷堆核电蒸汽发生器的自主化国产化，让国之重器不再惧怕‘卡脖子’。”哈电重装总经理高旭光持有相同的观点。

首个完全国产化商用高温气冷堆创造核电历史

作为第四代核电技术的先进代表型，石岛湾200MW高温气冷堆核电站具有固有安全性好、发电效率高、用途广泛、小容量模块化建造等特点，是我国最新设计和开发的第一座具有完全自主知识产权、具备商用规模的模块式高温气冷堆示范核电站，是第一代核能发电技术，该工程的建设对世界先进核能发电技术进步具有里程碑式的意义。

蒸汽发生器是高温气冷堆核电系统中关键的设备之一，其作用是将核反应堆的热量转换成接近600摄氏度的过热蒸汽，推动汽轮机发电机组产生电能，业内称之为“核电之肺”。高温气冷堆核电蒸汽发生器采用螺旋管换热结构，换热效率更高，结构布置更紧凑，设备总高约25米，最大外径约4.5米，总重接近500吨。该设备采用模块化设计，将高温气冷堆示范电站的顺利实施和商业化推广提供有力保障，为高温气冷堆设备的国产化作出重要贡献。

由哈电重装承制的高温气冷堆石岛湾2#蒸汽发生器这一国之重器，设计方为清华大学核能与新能源技术研究院、总包方为中核能源科技有限公司、业主方为华能山东石岛湾核电有限公司，而从设计图纸到工艺生产，再到产成，实现这一宏伟蓝图，正是哈电重装这支“国家队”。十年间，面对这个设计新、材料新、工艺新的全新核电装备，四方协同创新一切从零开始，走过了艰辛的十年。

“期间几度崩溃、几度挫败，可谓步步惊心，迈过一道道坎，才终于迎来了柳暗花明。”参与制造的哈电重装技术人员80后代表张宣楠、王强、郑明涛、宿静静几乎都有这样的感受。

哈电重装在十年制造历程中，不断推动技术创新，攻克一项项世界级制造难题，在项目制造过程中共形成53项实用新型和发明专利，完成18项国家科技重大专项，十项技术获得核能行业技术鉴定，哈电重装成为国内首个也是唯一完全掌握第四代核岛主设备蒸汽发生器制造技术的企业。

创建核电“产学研用”协同创新典型模式

高温气冷堆是具有中国自主知识产权的第四代核电技术，从原理结构设计到制造工艺设计均开创了国内外核电技术的先河。哈电重装与清华核研院之间紧密合作，打破国内核电传统设计模式，探索出了与研究院所紧密合作的“产学研用”一体化核电产品设计新模式——联合设计。

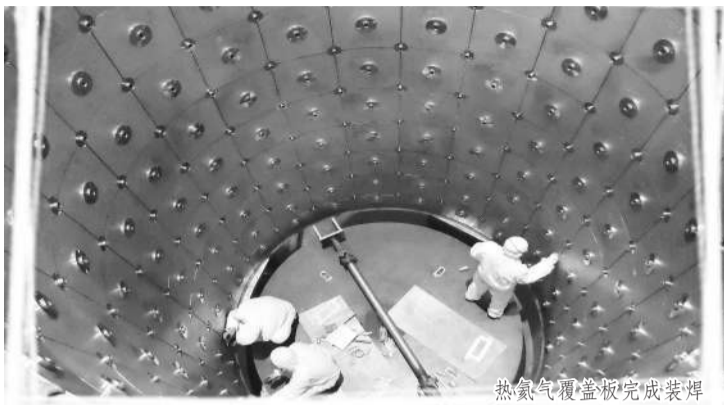
联合设计是高温气冷堆蒸汽发生器特有的一种工程实践方式，清华大学负责产品结构设计和相关计算，哈电集团负责绝大部分施工图设计。这种创新性的工程模式，使产学研紧密结合，在保证蒸汽发生器设计要求前提下，对材料、结构、制造检验要求等进行了系统论证，使其具备良好的经济性和工艺性。

蒸汽发生器内件连接管布管及装配工艺设计，是整个高温气冷堆的关键设计难点，直接影响蒸汽发生器运行的安全。给水连接管和蒸汽连接管的设计，既要满足有限空间内的连接管的空间布局，还要满足产品热应力、流致振动、装配、焊接、检验及检修操作的可行性。

复杂形状连接管工艺设计及装配尚无经验可以借鉴，为开展连接管设计工作，哈电重装派遣设计工程师和工艺工程师与清华大学开展联合设计，历时三年，通过反复推敲和论证，在六套设计方案中对比筛选出最优的设计方案，并制造了产品1:1模型，结合模型对每支连接管的装配(装焊)顺序模拟实际工况进行验证，对计算机模拟设计的装配(装焊)顺序进行优化。通过对狭小空间复杂形状连接管布管设计及工艺优化研究，掌握了高温气冷堆蒸汽发生器给水侧、蒸汽侧连接管的布管设计原理、连接装配工艺，通过模型验证了连接管的装配移动路径等关键参数，保证连接管装配的



壳体与内件套件



蒸汽发生器壳体完成装焊



换热器对接焊

可行性、焊接及检修操作的可行性。

“蒸汽发生器整个制造过程就是一个‘产学研用’结合协同创新的典型模式，在这一完整体系中，哈电重装全程参与设计并最终让图纸变为现实，彰显了企业作为创新主体的重要作用。”高旭光认为，这为其他科技型企业创新中发挥主体作用提供了有价值的借鉴。

核电国产化，基础数据撑起安全堡垒

高温和持久安全是高温气冷堆的设计理念，蒸汽发生器特定的运行温度，独有的换热介质环境对材料提出了更为严苛的要求，开展高温气冷堆蒸汽发生器的设计需要庞大的基础实验数据作支撑。哈电重装作为央企，为打破核电制造技术的国外垄断，肩负着核电技术国产化重任和历史使命，因此在完成国家科技重大专项高温气冷堆蒸汽发生器制造技术研发同时，以材料国产化立足点，为核电技术设计提供理论依据。

高温、高压是高温气冷堆蒸汽发生器的显著特点。N06625合金、镍基Incoloy-800H等高温镍基合金材料和相应的高温镍基合金焊接材料，被广泛应用于高温气冷堆蒸汽发生器内件高温部件的加工制造中。该类材料在蒸汽发生器运行温度环境下的部分高温性能数据仅来源于国外标准或参考文献中，国内研究几乎处于空白。哈电重装与国内外相关材料供方进行了数十次的技术交流，与国内潜在供方合作，针对材料开展了一系列高温性能试验，积累了详实的实验数据，为蒸汽发生器的设计和制造提供了保证。

对高温气冷堆蒸汽发生器的设计，哈电重装创造性地提出将Incoloy800H螺旋盘管和空间弯管、T22螺旋盘管、空间弯管应用于核岛主设备换热器的制造中。哈电重装与国内相关研究机构、供应商合作开发，完全实现了第四代核电换热管的国产化制造。在材料研发过程中，克服和解决了Incoloy-800H管和T22管高温性能降低等瓶颈性难题，创造性提出T22换热管表面高温氧化防腐技术，填补了T22换热管管体不耐蚀而在高盐高湿度条件下长时间不腐蚀的国内空白，掌握了一套完整的高温气冷堆蒸汽发生器T22换热管防腐工艺。

哈电重装投入大量的人力、物力和财力，与相关研究机构一道，模拟蒸汽机构、供应实际运行工况环境下对换热管材料及焊接接头开展了抗水蒸汽氧化试验、晶间腐蚀说明性试验、高温持久及蠕变试验等，为蒸汽发生器的设计选材和设计安全寿命提供了数据支持。

步步创新，步步惊心

石岛湾高温气冷堆蒸汽发生器示范工程，是具有中国自主知识产权的第四代核电技术，从设计、材料和制造处处都需要创新、试验和论证。可谓每一步都是创新，而每一步创新又伴随着步步惊心。“常常艰难地迈过一个坎，紧接着还有无数个坎在等着我们继续跨越。”哈电重装项目管理部部长邱振帮总结道。

哈电重装在十年制造过程中攻克了30余项关键技术，其中高精密切割管对接工艺、镍基合金环缝内孔全位置自动TIG焊接工艺、镍基合金焊接材料和焊接接头高温持久试验和低合金材料管子管板仰焊工艺等18项重大工艺技术均为国内首创，达到国际先进水平。

蒸汽发生器换热器高精密焊接是蒸汽发生器制造过程中难度最大、耗时最长的关键工艺。蒸汽发生器内狭小空间的换热管高精密焊接是制约产品设计和制造的最大难点之一，涉及异种钢对接焊缝(T22与Incoloy800H)、同种钢对接焊缝(800H与800H和T22与T22)三种焊接接头，最小操作空间仅为41mm。在结构上包括螺旋盘管与螺旋盘管对接、螺旋盘管与空间弯管之间的对接接头。考虑到蒸汽发生器运行温度高，以及产品在役漏流检查的可行性，换热

管对接焊缝成型和内在质量要求极为苛刻。产品焊接工艺从无到有，开发及制造历时将近7年之久。

通过与国际知名焊接设备供应商合作开发，哈电重装设计出了适用于蒸汽发生器结构的专用焊接设备。配备专门的换热管生产团队，开展24小时不间断生产模式，工艺技术人员不间断现场服务，多种手段保证了换热管高精密焊接工序的顺利进行。

高温气冷堆蒸汽发生器换热管对接焊缝的无损检验，受到焊接操作空间小、重复曝光操作次数高、无法实现连续操作等因素的制约，严重影响了产品制造进度。为解决这些难题，哈电重装质量控制部无损检测技术人员设计了一种高温堆换管焊缝专用X射线探伤仪。配备专用工具，可以自由调节机头角度和高度，精确调节和确定探伤仪焦距，满足快速检测需求。不仅保质保量还缩短了制造周期。

高精密切割管对接焊工艺技术和无损检验技术，达到国际先进水平。哈电重装是国内唯一掌握该项焊接技术的核电设备制造厂。

镍基合金环缝内孔全位置自动TIG焊接工艺是蒸汽发生器关键工艺，是制约蒸汽发生器制造的关键焊接难题之一。为实现产品焊接，保证焊缝质量，最大化实现制造技术国产化，哈电重装成立专项攻关组，完善产品组件施工图焊接坡口，开发专用气体保护装置；了解相关镍基合金的焊接特性，经充分论证和多次模拟试验，获得了稳定的焊接工艺、根据产品结构特点，还自主设计和制作了4套专用自动焊接系统，实现镍基合金内孔全位置自动TIG焊接。

三条镍基总装焊缝焊接历时52天，比预期提前近一个月。在国内首次实现了蒸汽发生器的厚壁镍基合金窄间隙全位置单面焊接，标志着哈电重装熟练掌握镍基合金全位置窄间隙自动TIG焊接工艺，是哈电重装的里程碑式事件。“经过三种最严格检测，三条焊缝都达到100%一次性焊接合格，这在同行业中是非常罕见的。”哈电重装生产管理部部长王佐森自豪地说。

经过十年技术研发和产品制造历程，哈电拥有了整套经过实践验证的成熟制造技术，某些关键技术的开发耗费数年之久，拥有了针对产品特点研发设计的专用设备和大型工装，拥有了一支技艺精湛的能工巧匠队伍，还拥有认真负责的检测检验人员，为产品质量把守最后防线，这也标志着哈电重装具备了批量生产60万千瓦高温气冷堆蒸汽发生器的制造能力。

从梦想到现实，跨越2461张图纸

在图纸转化过程中，清华大学负责提供设计总图和设计要项，施工图设计主要由哈电重装公司负责。时间紧、任务重，蒸汽出口连接管设计是全新结构，设计过程无可参照，尤其必须充分考虑、提前预见实际操作的可行性，部分设计结构更要通过电脑三维立体模拟拟接与装配，进行大量试验验证。面对困境，技术人员坚持学习，与设计方和其他相关方进行深入讨论和分析，不断取长补短，攻克难关，蒸汽发生器设计方案不断优化完善。从2009年至2015年，施工图先后6次升版，先后完成包括壳体、内件、蒸汽入口、蒸汽出口接管支承与包裹施工图等在内的2461张首批高温气冷堆蒸汽发生器施工图纸，持续4年布管工艺设计，先后设计了3种布管方案，制作了3套实体模型，最终实现了管子的穿针引线，像编花篮一样，把密密麻麻的上千条管线成功按照设计编入蒸汽发生器的内部。

蒸汽发生器换热内件与承压壳体套裝也是一大瓶颈难题。总高约15米、直径约3.5米的换热内件垂直装入承压壳体，套裝总高度达到30米，最小配合间隙仅为毫米级，且同时受到上、中、下三个定位尺寸的约束，丝毫的偏差都可能导致各个接口无法准确组对。公司技术人员从

套裝方案设计、专用吊具设计、关键配合尺寸精确测量、现场统一指挥作业等方面采取措施，实现了换热内件一次引入承压壳体，承压法兰、上下接管均与承压壳体准确对接，实现了高温气冷堆蒸汽发生器制造的又一重大突破。

无数类似经历贯穿了全球首台球床模块式高温气冷堆核电蒸汽发生器制造的整个过程，诸多不同难题被不同方法解决，诸多不同困难被不同方式克服，摆在哈电重装面前阻碍四代核电产品制造的诸多“绊脚石”成功被改造成了“垫脚石”。2017年2月6日，蒸汽发生器壳体完成水压试验；2018年6月26日，蒸汽发生器内件完工，具备与壳体整体套裝条件；2018年7月6日，蒸汽发生器内件与壳体完成整体套裝；2018年9月29日，蒸汽发生器总装后气压试验合格；2018年10月28日，蒸汽发生器具备出厂条件。

80后挑起国之重器大梁

十年坚守，百折不挠，国之重器的诞生，也催生了哈电重装一支年轻队伍迅速成长。他们是历史的创造者，也是历史的见证者。而80后成为其中主力。

哈电重装高温堆制造团队经理宿静静参与见证了四代核电系统蒸汽发生器从无到有，从小到大，从幼稚到成熟的全过程。面对新产品、新技术和新项目，宿静静带领团队人员积极面对挑战，紧盯每道关键工序。他通过技术创新提高生产效率，在大开孔法兰内圆内孔加工课题的研究中，提出分解法加工的实施方

案。2016年，宿静静被评为哈电集团“劳动模范”。黄银平，是项目管理部高温堆团队项目管理工程师，他默默无闻地在幕后为项目组织工作。2017年伊始，高温堆项目进入最关键的出口管焊接阶段，但由于原材料质量问题，项目执行出现一定的挫折与反复，他组织公司相关部门人员与业主人员在供方现场集中办公，优质高效地完成了换热管重新制造文件的审批。在出口管重新制造过程中，他组织公司相关部门按时完成了出口管焊接用配套件的采购和外协工作。在优化总装方案过程中，他积极组织技术、生产部门制定工艺方案，并多次与业主就方案优化相关事宜进行协调、沟通，保证了总体进度。

80后装配工潘海泉被评为“重装工匠”，他说：“能够参与到全球首台球床模块式高温气冷堆核电蒸汽发生器的制造是我一生的荣幸。”在装配热空气覆盖板过程中，潘海泉不满足于按部就班地操作，而是自己设计工装提高效率，刚开始装配时，需要12班才能装配完成一组组件还有不合格的，改进后只要5到6班，而且合格率百分之百，他以精益求精的精神彰显了大国工匠风范。

回想起这十年的艰辛历程，哈电重装高温堆项目团队许多成员不禁热泪盈眶，技术人员王强说：“十年里，我们与这两支蒸发器相处的时间可能比陪伴自己家人的时间还要长，十年，这个国之重器凝聚了我们团队所有人的青春和热血。”

“高温气冷堆蒸汽发生器的研制，从项目管理、工艺研发到生产组织与实施，大部分是80后担当主力。他们敢于直面困难，在没有工程经验可借鉴的前提下锐意创新，不仅解决了很多世界级难题，更是多专业交叉、联合，大家共同拓宽思路，着力降低制造难度，提高生产效率。他们甘于奉献，产品生产24小时不间断，一线操作人员面对劳动强度大、作业位置空间受限毫无怨言；技术人员24小时待命，手机24小时保持畅通，随时奔赴生产一线解决技术问题。更有多名女同志，她们甚至连续多日吃住在公司，把年幼的孩子放在家中，持续技术服务于连接管装焊。其中技术人员郑明涛创下48小时持续工作的纪录。他们的责任与担当在哈电重装不是稀有，而是已成为令人感动的日常。”谈起80后主力军，邱振帮十分感慨。

“实践证明，哈电重装是一只能打硬仗啃硬骨头的队伍，不仅80后，很多一家两代人都在哈电，老中青

队伍都各有各的风范。哈电重装有职工800多人，其中有200多骨干来自哈尔滨，十年间，他们克服了夫妻两地分居、孩子求学、无法照顾老人等各种困难，卧薪尝胆、励精图治，完成了大国重器的国产化制造，让“哈电智造”书写进中国核电国产化的历史史册。”王守革对于拥有这样一支叫得响的队伍而自豪。

一件好的产品需要一支好的队伍来打造，一支好的队伍则需要足够的凝聚力。全球首台球床模块式高温气冷堆核电蒸汽发生器的制造完成是哈电重装公司全体干部职工大局意识、协作精神和奉献精神的缩影。各方的团结协作是高温堆项目成功制造的根本保障。

核电出口新增重量级砝码

“哈电集团是国家战略的积极践行者，也是中国核电出口的引领者和主力军。中国出口的核电蒸汽发生器绝大多数都是哈电制造。在蒸汽发生器方面，哈电具备制造所有型号的能力，引领全球该行业的发展。哈电重装刚刚完成的这台拥有我国自主知识产权的全球首台球床模块式高温气冷堆核电蒸汽发生器，将为我国核电出口增添一个重量级的砝码。我们拥有全部的核心技术，不惧国际垄断和贸易壁垒。”王守革自豪地说。

据介绍，近五年来，哈电集团全力打造核电自主品牌，积极响应“一带一路”倡议，推进中国核电“走出去”，在核电产业起步较晚情况下，实现产业从无到有、后来居上。现已完全掌握蒸汽发生器、核主泵、汽轮机发电机组、K类电机等主设备的关键技术，努力打造世界级核电装备供应商。目前已具备年产4台/套核岛、常规岛主设备制造能力，在手核电项目近70个，合同总额200亿元。

在“引进、消化、吸收、再创新”的同时，哈电集团高度重视自主创新及自主知识产权工作，积极承担大型先进压水堆、高温气冷堆国家科技重大专项，重大核心技术取得突破性进展，科研成果成功应用于核电产品制造，形成了一系列专有技术，有力提升了核电装备制造能力。现已累计获得发明专利28项、实用新型专利99项、软件著作权2项，获得科技进步奖7项。

近年来，哈电集团新增投资10多亿元对核电装备制造能力进行重新布局，扩大核电产业规模。打造世界级核电装备供应商，陆续建成“四个基地”——以哈电重装为核心核级容器及换热器制造基地，以哈电重装为核心的核主泵研发、制造基地，以哈电汽轮机、哈电电机、哈电锅炉、哈电重装为基础的常规岛主设备制造基地和以哈电佳电股份为基础的K类电机研发、制造基地。成立了国内首家核主泵工程研究中心，在核主泵发展和改进提升的技术前沿上整合社会资源，促进技术改进和进步，建造了核主泵全流量试验台、小流量试验台，为核电产品的科研开发积累宝贵数据和经验，有力推动了核主泵研制进程。

中国核电“走出去”将为全球清洁能源产业发展带来机遇，哈电集团将着力提升核电核心装备制造能力，努力做到技术上有保障，安全上有优势，经济上有竞争力，倾力打造中国核电“国家名片”。

瞄准世界一流再出发

高温气冷堆蒸汽发生器的成功制造，集中展示了哈电人肩负起“承载民族工业希望，彰显中国动力风采”的使命和担当，以及做“中国最好，世界一流”产品的信心，并正以“中国速度”向着发电设备技术国际领先水平奔跑。高温堆蒸汽发生器的成功制造，也是我国产学研强强联合、国家队团队协作，促进研发周期长、制造难度大的科技成果市场化中的一个成功典范。高温堆蒸汽发生器的成功制造，集中体现了我国在装备制造业上的自主创新能力，在世界核电领域打造了一张靓丽名片。哈电人有信心未来自在“促进我国产业迈向全球价值链中高端”的科技攻关上作出更加卓有成效的贡献。

“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的。”装备制造业高质量发展是我国经济高质量发展的重中之重，推动装备制造业高质量发展，关键要以创新为驱动，坚持自力更生，加强自主创新能力，不断推出新产品、新服务，永葆企业生机。高温气冷堆蒸汽发生器研制中，一个个技术难点和制造难点被攻克，使得哈电重装人创新能力得到了充分的展示和发挥。创新思想理念，创新管控模式，创新技术研发，为全新产品打开全新局面，哈电重装为项目攻坚克难注入了不竭的动力。

在国家重大科技专项实施和高温气冷堆蒸汽发生器研制过程中，“产”的一方，是“学研”与“用”中间的桥梁和纽带。哈电重装在“产学研用”结合、团队协作创新体系中，既要保证设计方的设计思想转化成合格的产品，又要保证产品的性能和成本满足用户的要求、有竞争力，更要实现产业化和批量化，为国家四代核电自主化和国产化旅行国家队履职尽责。目前，哈电重装正在对高温气冷堆蒸汽发生器制造过程中所攻克的技术、材料技术、质量控制工具和检测技术进行总结、固化、标准化，并将这些与原有的CPR1000、AP1000、华龙一号制造技术进行融合，进而形成哈电重装独有的高温气冷堆蒸汽发生器批量生产的能力。

执行国家战略、履行央企责任，哈电已做好准备！全球首台球床模块式高温气冷堆蒸汽发生器将于近日扬帆驶向石岛湾现场。这一国之重器的闪耀出国，开启了第四代核电技术发展的新纪元，充分展现了服务国家战略的哈电的不变追求。哈电集团将瞄准下一个巅峰，苦练内功，掌握主动，努力实现质量更高、效益更好、结构更优的发展，不断做强做优做大，为建设具有全球竞争力的世界一流装备制造企业不懈努力，为“两个一百年”目标的实现作出应有的贡献。

