

清华大学核研院研制 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆的工程技术创新

游战洪^{1*}, 刘年凯²

1. 清华大学 科技史暨古文献研究所, 北京 100084;

2. 清华大学 科学史系, 北京 100084

摘要: 清华大学核能与新能源技术研究院 (简称核研院) 先后在 1989 年和 2000 年建成了 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆。在建堆过程中, 清华大学核研院坚持设计创新与工具创新、工艺创新、工序创新密切结合, 完成了一系列关键设备和零部件的制造与安装, 使得整个工程项目顺利完工。在工程史研究中, 技术工人做出的创新贡献并未引起学术界足够重视。本文表明, 技术工人在工具、工艺、工序、制造与安装阶段的技术创新, 亦是工程创新的重要保证。

关键词: 清华大学核研院; 5 MW 低温核供热试验堆; 10 MW 高温气冷实验堆; 工程技术创新

中图分类号: N91

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2024)03-0354-10

引言

清华大学 5 MW 壳式低温核供热试验反应堆 (图 1), 具有一体化、自稳压、自然循环冷却、非能动余热载出等先进特性, 工作压力为 1.5 MPa, 堆芯出口温度 198 °C, 三回路供水温度可达 150 °C。由清华大学核能与新能源技术研究院 (下文简称“核研院”) 研制成功。1986 年 3 月开工建造, 1989 年

11 月建成投入运行, 12 月实现连续满功率运行。1989—1992 年, 连续三年为清华大学核研院 5 万 m² 的建筑物供暖, 成为世界上第一座投入运行的一体化自然循环壳式低温核供热堆, 也是世界第一座使用水力驱动控制棒的核反应堆。低温核供热堆在工业上应用的前景很广阔, 不但可以提供低温热水满足民用采暖供热, 同时可以兼顾工业用气的需要; 可以进行低温发电, 实现热电联供, 保证反应堆本身的供电, 提

收稿日期: 2024-01-09; **修回日期:** 2024-02-04

基金项目: 清华大学研究生教育教学改革项目“‘中国近现代科技史’研究生课程教材建设”(202303J031)

作者简介: *游战洪 (1965—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为科学技术史。E-mail: yzhong@tsinghua.edu.cn (通讯作者)

刘年凯 (1987—), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为科学仪器史。E-mail: nkl@tsinghua.edu.cn

引用格式: 游战洪, 刘年凯. 清华大学核研院研制 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆的工程技术创新[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16(3): 354-363. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240007

You Z H, Liu N K. Technical Innovation in the Project of 5 MW Low Temperature Nuclear Heating Reactor and 10 MW High Temperature Gas-Cooled Experimental Reactor of Nuclear Research Institute of Tsinghua University[J]. Journal of Engineering Studies, 2024, 16(3): 354-363. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240007



图1 5 MW 低温核供热试验堆外景^{[1]171} (1989年, 李仲三摄)
 Figure 1 Exterior view of 5 MW low-temperature nuclear heating experimental reactor^{[1]171} (1989, photo by Li Zhongsan)

高经济性; 用于建筑物大面积制冷, 进行海水淡化等。1992年, 该项目获国家科技进步奖一等奖。

清华大学 10 MW 模块式球床高温气冷实验堆 (图2), 采用耐高温的全陶瓷型燃料元件, 以具有化学惰性和热工性能良好的氦气作冷却剂, 以耐高温的石墨材料做慢化剂和堆芯结构材料, 具有固有安全性, 在任何工况和任何事故下都不会发生放射性外泄的严重事故。堆芯温度限值达 1600 °C, 出口温度可达 750 °C, 可获得更高的发电效率, 是一种先进的反应堆。由清华大学核能与新能源技术研究院研制成功。1992年, 经国务院批准, 10 兆瓦高温气冷实验堆正式立项, 1995年开工兴建, 2000年建成达到临界, 2003年完成 72 h 满功率并网发电运行。该堆是世界上第一座投入运行的模块式球床高温气冷实验堆, 它的建成标志着中国在高温气冷堆技术领域已达到国际先进水平。高温气冷堆是良好的高温热源, 除了高效发电外, 还可以用来进行煤的气化和液化、制氢、稠油热采、炼钢、化工合成等, 特别是可用于水热裂解制氢, 为未来氢能时代提供清洁能源。此外, 在高温气冷堆中装上钍, 可以生产铀-233, 铀-233 是一种极好的核燃料。2006年, 该项目获得国家科技进步奖一等奖。

低温核供热堆与高温气冷堆都是西方国家最早提出设计概念和开展研发的。清华大学核研院作为大学下属的二级研究机构, 人员、经费和设备等无法与国



图2 10 MW 高温气冷实验堆外景^{[1]241} (2004年, 林登彩摄)
 Figure 2 Exterior view of 10 MW high-temperature gas-cooled experimental reactor^{[1]241} (2004, photo by Lin Dengcai)

内外同类的研发机构相比, 为什么能突破条件限制, 完成关键技术突破, 建成 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆, 后来居上, 达到国际先进水平呢?

有关 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆的新闻报道很多, 同时已有一些学者进行了回顾总结和学术研究。例如, 马栩泉和杜淑英^[2]以 10 MW 高温气冷实验堆为例, 探讨了实现科技创新所需的关键因素, 如知难而进、科学求实、团队精神与体制创新等; 张立红^[3]归纳了 10 MW 高温气冷实验堆取得的六项创新性成果, 强调课题组瞄准技术的制高点、凝聚集体的智慧、加强国际合作对科技创新的重要性; 马栩泉和熊倪娟^[4]总结了 10 MW 高温气冷实验堆获国家科技进步奖一等奖的三点启示, 即立足国家战略需求, 站在世界科技发展前沿; 掌握核心技术, 搞好系统集成; 组织攻关团队, 发扬求实精神。近年来, 游战洪总结了清华大学低温核供热试验堆^[5]和高温气冷实验堆^[6]的建设历史, 揭示了其技术先进性与工业应用的广阔前景; 还分析了王大中院士的核能技术创新方法^[7], 即激活国家潜在的战略需求, 追求有限的创新目标, 重点突破关键技术, 与国家重点科技攻关项目支持同步; 刘震和崔曦元^[8]以清华大学高温气冷实验堆攻关为例, 探讨了高校有组织科研机制的有效性, 但并未涉及清华大学高温气冷实验堆建设的具体细节。

建造核反应堆是相当复杂的系统工程, 环环相扣, 任何一个部件和一个系统出问题, 都会导致整个工程的失败或延期。但对于 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆关键技术攻克过程中的技术创新, 目前还未引起学界的足够关注。过去的研究和报道偶尔举例, 会涉及到实验技术和工程技术问题, 但整体上属于宏观概括, 点到为止。因此, 有必要进一步深入研究这些技术创新方法在工程成功中的关键作用, 以更全面地理解核能工程的发展和创新过程。

本文通过举例论证, 做工程技术环节分析, 考察实验、设计、加工、安装、调试、运行各个环节的经验和创新方法, 试图揭示清华大学核研院在研制 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆过程中独到的工程技术创新方法。

1 5 MW 低温核供热试验堆控制棒的高精度加工

5 MW 低温核供热试验堆的控制棒 (图 3) 由清华大学核研院金工间的工人师傅加工完成。他们从 1984 年 9 月开始试制控制棒, 前后试制了四批八根棒, 每次都要经过冷运行调试和热运行考验。在试制过程中, 工人师傅与设计人员密切配合, 反复讨论, 一起试验, 不断改进机械结构, 提高机械性能, 主要解决了两个加工工艺的难题^[9]:

一是步进套加工。每根控制棒长 2 m, 直径只有 25 mm, 棒体与步进套之间的缝隙只有头发丝的 1/3 (约 0.033 mm), 垂直度要求很高。控制棒的长度与直径比为 45, 直线度要求小于 0.05 mm。长径比 20 即为细长杆, 通常车此类工件, 头都是采用一头夹、一头顶或两顶车的办法。但是步进套精度要求高, 若用老办法加工, 必然由切削热产生热膨胀变形而无法车削。几位工人师傅研究得出可行的加工方案: 一端用三爪夹紧, 另一端用尾架座拉紧, 并设计了一种丫嘴跟刀架, 解决了细长杆刚性差和热膨胀问题, 完成了关键的步进套加工任务。此外, 步进套上有 100 多排小长孔, 每个水平面上的 4 个孔相对位置为 90°。



图 3 5 MW 低温核供热试验堆水力驱动控制棒实验台架^{[1][24]} (1989 年, 王呈选摄)

Figure 3 Hydrodynamic control rod test stand for 5 MW low-temperature nuclear reactor ^{[1][24]} (1989, photo by Wang Chengxuan)

他们解决了步进套各个十字孔、十字槽和十字键准确定位的难题。

二是组合阀加工。组合阀是控制棒系统的关键执行部件, 用特殊不锈钢材料制作。组合阀几何形状特殊, 分上下两层, 共有不同角度的 14 个面, 每个面上都有管嘴接口, 实心体内有 50 个左右不同角度的孔, 孔与孔之间有些要隔离交叉, 有些要连接贯通。每个尺寸稍有差错, 就无法弥补。由于材料有限, 加工必须一次成功。

工人师傅组织攻关小组, 反复研究加工方案并核实, 将近 1 t 的不锈钢钢锭, 一层层剥皮, 起初进展比较顺利。后来遇到两个加工难题: 一是要在每个组合阀上打 7 个直径 15 mm、长 500 mm 的高精度长孔, 可是车间没有这种钻床和工具; 二是要把组合阀内像马蜂窝一样的大小孔全部镗光、磨光。

组合阀是控制棒的“命根子”，打孔、镗孔只能一次成功，不能发生任何差错。由于车间没有镗工，工人师傅曾想请附近大厂来打孔、镗孔。但是，如果请外单位打孔、镗孔，万一出了差错，就会前功尽弃。经过反复讨论，他们决定自己打孔、镗孔，反复试验。后来工人师傅改进了工具和夹具，攻克打孔、镗孔两个难关，如期完成了组合阀的加工任务。

工人师傅发挥的作用得到了高度认可。1989年12月1日，在5 MW 低温核供热试验堆老工人总结座谈会上，时任核研院副院长的何建坤在听完金工间的几位工人师傅的发言后说：

“金工间对低温堆是立了功的……老工人是200号的栋梁，把200号的传统传下去，是200号的脊梁，在各个岗位上都是非常重要的。强调知识分子作用，不是说工人不重要。没有工人，不能干200号。两个方面都不能偏废，互相不可替代的……”^[10]。

2 10 MW 高温气冷实验堆压力壳的高难度焊接与安装调试

10 MW 高温气冷实验堆的压力壳（图4）由上海锅炉厂负责加工。1996年，清华大学核研院把10 MW 高温气冷实验堆压力壳的图纸交给上海锅炉厂，1997年开始备料，从1997年下半年到1998年进行加工。与现行压水堆的压力壳不同，高温气冷实验堆的压力壳采用板材结构，卷板焊接，因此焊接变形控制难度很大。板材用国产的低碳钢——516-70 碳锰硅钢，锻件用国产新开发的15 锰镍钢材。高温气冷实验堆压力壳直径4.7 m，高12.6 m，重154 t，是当时国内制造的直径尺寸最大的压力壳。但这个压力壳最薄处厚度只有80 mm，直径4.2 m。

锻件厚120 mm，锻件的椭圆度可以机加工，但卷板的椭圆度很难控制。把卷板的椭圆度控制到8 mm，卷出来焊接完会变形。对接时需要把卷板的椭圆度控制到十几毫米。最后分段对接，即上端和下端的两段各合成一段，四段焊接以后，不仅要保证同心度，还要特别保证支撑面的平行度。压力壳上端有两个法兰面，承接顶盖；下端有两个法兰面，承接堆体。两个



图4 10 MW 高温气冷实验堆压力壳^{[1]142}（1998年11月，王呈选摄）

Figure 4 Pressure shell of 10 MW High temperature gas cooled experimental reactor^{[1]142}(Photo by Wang Chengxuan, November 1998)

法兰面的平行度都要控制在0.5 mm，因此不能先焊接再机加工，只能反之，即先机加工后焊接。

清华大学核研院派刘俊杰老师监督压力壳的加工。他采取步步监测、步步控制的办法，以确保焊接平行精确度。具体方法是：采用一个三维的定位仪，不停地测量尺寸，监视变化，并根据所测参数精准调控焊接过程。

不过，质保办检查发现，上海锅炉厂在制造反应堆压力壳的底座时，采用了多层外包的方式，导致质量控制完全失控。从焊接、热处理到探伤，均未按照一级核电设备标准执行，质量状况堪忧。上海锅炉厂先是把底座分包给本单位的三产，本单位的三产又分包给电站辅机厂的三产，辅机厂的三产又分包给电力集团，电力集团又分包出去。最终四个底座在北京工地进行稳压试验时均出现漏水情况。国家核安全局获悉后，予以警告处分，并通报全国有关的60个工厂。

面对这一严重质量问题，四个底座不得不全部召回进行返修。返修过程中的材料要求极为严格，需要对钢板进行化验，以确保其成分与原始记录相符。由于钢板已经历一系列热处理，返修时需切取试板并随炉进行热处理。处理完成后，还需对试板进行机械性能试验，只有完全达到设计要求，才能视为合格。最终验收的关键在于机械性能试验结果是否满足既定

标准。

这一压力壳底座的外包返修事件对双方都构成了深刻的教训。刘俊杰对此次事件的每一个环节及附属设备都进行了严格的监督。当工厂需要采购新的焊接材料时,他亲自前往焊条厂逐项检查,确保合格后方可用于设备焊接。对于外购的密封环,他也进行了细致的验收工作。为了进一步提升焊接质量,他着重开展了四项监督工作:一是检查下发的焊接规程与设计规定是否一致;二是检查工厂的焊工是否为通过考试的备案焊工;三是下厂去查看焊接前的准备情况;四是检查预热点和热处理的温度情况。

2000年12月5日,刘俊杰在高温气冷实验堆管理骨干座谈会上坦承:

“我们跟工厂合作,的确也向工厂学了不少东西。他们有好多实际经验,从设计要求上来讲,他可能不如我们。但是,他们的制造经验比我们多。从理论上,对规范的掌握上,他不如我们。为什么这么要求?原因在哪儿?规范就是那么规定的,他不太清楚。我们给他交代清楚了。他明白了以后,可以做得很好。他不明白,不了解为什么要这样,他就做不好,不知道哪儿是关键”^{[11]79–80}。

清华大学核研院还针对高温气冷实验堆的反应堆压力壳、蒸汽发生器压力壳、热气管道压力壳三大壳,专门制作了三种规格的螺栓张拉机,并请清华大学力学系对张拉机的测量做了计算。在反应堆压力壳的安装过程中,需严格布置80个螺钉,并使用专用的螺栓张拉机进行张拉,误差不超过5%。经过严格的出厂水压试验,三大壳均一次性成功通过测试。

随后,这三大壳被运至北京工地进行安装。在一回路压力边界安装完毕后,还进行了气体压力试验,以进一步验证其密封性能。气压试验做了8 d,升压4 d,保压4 d。按照要求,泄漏率需控制在7.5‰以内,而实际测试结果仅为2.5‰,远低于规定标准。这一压力试验结果令人非常满意。压力试验表明主要设备的制造与安装质量都已过关,“如果哪个地方、哪个环节质量有问题,哪个单元设备、哪个地方加工差一些,这么多设备安装到一起,哪一个地方安装稍差一些,做压力试验就做不成”^{[11]77}。

在土建设计的初始阶段,团队就思考如何安全、

高效地吊装重达100多吨的反应堆压力壳。当实际安装工作展开时,主厂房已先完成封顶,并在西侧预留了吊装口。随后,团队租用了大型吊车,巧妙地将压力壳从西侧预留口稳稳吊入位于+11 m高度的反应堆大厅。在此过程中,大厅内的50 t天车横梁发挥了关键作用,其22.5 m的跨度和四个坚固支柱,再加上地面上的四台卷扬机的协同作业,成功将压力壳精准吊入17 m深的舱室内。这一创新性的吊装方案在核承压设备安装领域中堪称首创,不仅节省了数百万元的成本支出,更为工程节约了一年多的宝贵时间。

2000年12月5日,在高温气冷实验堆管理骨干总结座谈会上,负责高温气冷实验堆安装的林登彩则说:

“有了高技术的设想,高技术的设计,还必须要有高技术的工人进行制造、安装。如果没有高技术的工人进行制造和安装不行。由我们设计,如果没有高技术工人的制造和安装,还不可能有我们今天高温堆的现场”^{[11]94}。

3 10 MW高温气冷实验堆石墨堆内构件与石墨球的加工与安装

在建设10 MW高温气冷实验堆的过程中,清华大学核研院最初选择在上海碳素厂试制石墨材料,然而试块全部裂开,使得他们不得不转向从日本订购石墨原料。从日本东洋碳素进口的130 t石墨材料是该项目最大的一宗进口,花费了150万美元的外汇。核研院的金工间负责加工10 MW高温气冷实验堆所需的石墨堆内构件。为了达到这一目标,金工间首先投入了两年多的时间来改进其软件和硬件条件。经过国家核安全局、机械委等权威部门的严格审查,金工间最终获得了加工高温气冷实验堆石墨件的资格,即“核级压力容器”加工资格证书。在随后的一年多时间里,金工间付出了巨大的努力,最终在1999年10月成功完成了石墨堆内构件的加工。这些构件共包括16层,由398块大型石墨砖组成,其中扇形砖380块,出球管砖16块,圆形塞子2个,以及石墨棒、键、套管和套环等零件超过5000个^[17]。石墨构件的每一层都需

要精确地摆放成一个圆形,每个圆都要求360°的完整度。底部由10块每块36°的石墨砖组成,而上部则由20块每块18°的石墨砖构成。这些石墨砖在上下、前后都通过销子相接,销子公差七八道,角度公差仅为20 s^{[12]29},对平行度、垂直度和位置度的公差要求极高:上下、左右、前后都有要求,还要有适当间隙,一块出错,会导致全部装配失败。

石墨的加工过程极具挑战性。近400块的大石墨,每块平均重达600 kg,都必须严格按照金属件的二级精度要求进行加工。这种材料既柔软又易碎,且来料数量毫无富余,对加工刀具的磨损也极为严重。为了提升加工精度,金工车间的师傅们巧妙地利用了中心线加工法,这种方法类似于人脸的中心对称原理。他们将石墨板放置在加工机床的中心位置,通过旋转加工确保无论如何转动,石墨板始终处于中心位置,从而保证了加工质量。然而,使用合金刀具加工石墨块时,刀具的耐用度又成为了一大难题。切割几块石墨后,刀具就会报废,每铣削几块就需要重新调整刀具(这里使用的是价格高昂的兰州碳素厂刀具,每把价格超过一万元)。面对这种情况,工人师傅们展现出了他们的创新精神,自制了各种专用刀具以应对加工需求。特别是他们自制的组合刀具——轧刀,这种刀具既能车削断面,又能车削孔眼,极大地提高了加工效率。在加工过程中,打制157 mm的孔眼是一项艰巨的任务。但工人师傅们再次通过自制掏刀来应对这一挑战,不仅保证了加工质量,还提高了加工速度,并节省了材料。

石墨构件的加工精度要求极高,平行度和垂直度的误差不能超过10道,角度误差不能超过5道。然而,金工车间的龙门刨床精度并不能完全满足这一要求。面对这一难题,工人师傅们再次发挥了他们的聪明才智,自行设计了工装胎具。他们将石墨放置在工装胎上,一次性加工10块石墨,既确保了加工精度,又大幅提高了加工效率。对于一些复杂曲面的石墨构件无法用机加工,以及第五层构件中需要斜面打孔的情况(这些石墨块内部包含三个角度和一个弧面,无法通过机械加工完成),工人师傅们同样展现出了他们的创新精神。他们设计了一个木模,并在上面挂上一把铲刀,通过手工方式精确地完成了这些复杂的加

工任务。在2000年高温气冷实验堆金工间的总结座谈会上,为高温气冷实验堆石墨加工做出重要贡献的杨清敏说:

“我们必须以最大的努力,把知识分子的设计变成现实,很多活干出的情况比设计提高了很多,原来设计精度要求十道(百分之一),我们干出来是三道(千分之三),咱们加工质量好坏直接影响到实验结果”^{[12]31}。

2003年3月19日,在10 MW高温气冷实验堆满功率运行庆祝会上,时任清华大学校长王大中院士充分肯定了技术工人的贡献:

“一个反应堆有几十个系统,有成千上万个部件零件。在这种情形下,哪怕只有一点点的疏忽,一点点的纰漏,都可能功亏一篑。这样的事业就造就了我们整个团队精神……在这个整个的团队中,大家是有所分工的。既有学术的带头人,学术的骨干,也有工程技术人员,也有一丝不苟、兢兢业业的我们的运行人员,还有我们金工间的师傅们,在石墨构件的加工当中完成得非常出色,为我们的高温气冷堆立了一大功”^[13]。

在加工石墨球的过程中,精确计算所需球的数量是至关重要的。为了确保这一计算的准确性,设计分析人员并没有采用逐块取样的方法,而是创新地将几吨重的石墨堆塑成一个棱柱体,并专门测量其宏观截面。这种独特的方法不仅提高了计算精度,还为后续加工奠定了坚实基础。每块石墨坯料的尺寸为长600 mm、厚145 mm、宽250 mm,经过精心劈裂,每块坯料可得到6条石墨,每条再加工成8个球,即每块石墨最终能产出48个球。鉴于石墨的高昂价格,加工过程中不能产生废品。传统的刀法加工不仅效率低下,而且材料浪费严重。金工车间的师傅们通过改进工艺,使用双刀进行加工,并设计了坐标式的加工工序。这种新方法不仅简化了操作过程,还提高了生产效率,使得每条石墨能产出9个球,从而将每块石墨的总产量从48个提升到54个。最终,他们不仅提前3个月完成了17000个石墨球的加工任务,还节约了7吨多的石墨材料,为项目节省了五六十万元人民币的成本^{[1]231}。

1999年10月15日,项目迎来了堆芯陶瓷构件的

安装阶段（图5）。这些构件种类繁多、形状复杂，总计上万个零件，总重量超过100 t。其中最大的构件重达350 kg，而最小的仅有几十克。作为高温气冷实验堆的核心部分，堆芯的构件安装技术要求极高，对位置度、平面度、水平度以及间隙的控制都达到了苛刻的程度。由于石墨和碳砖属于易损坏的非金属材料，安装过程中必须小心谨慎，使用真空吸盘等专用工具进行吊装。陶瓷构件包括19层碳砖和16层石墨砖，每层都需要精确塞入120道塞缝，环向和径向的控制都需严格把握。为确保每块石墨砖的安装质量，质保人员全天候监督工人的操作过程，并对每块安装完成的石墨砖进行签字确认。每安装完一层石墨砖都需要进行会签后才能继续安装上一层。在全体人员的共同努力下，1999年12月30日成功完成了陶瓷堆内构件的安装封顶工作。按照设计要求，控制棒通道的圆心偏差不得超过1 mm，而实际测量结果显示最差处仅为0.57 mm，10根控制棒一次性准确落下^{[1]94}。

燃料球与石墨球的装料过程同样顺利高效。从2000年11月20日开始装料至12月1日达到临界状态，仅用了短短的11 d时间。临界质量的计算校正结果显示预计临界装量为16760个球（包括燃料球和石墨球），而实际达到临界的球数为16984个，误差率仅为1.5%，充分展现了装料过程的精确性和高效性。

尽管在校外工厂加工和制造5 MW低温核供热试验堆与10 MW高温气冷实验堆设备的过程中遇到了一些挑战，例如工厂设备不能按时完成、对国家重点科研项目的重视程度不足、设备外包和分包管理不善、质保体系失控以及焊接等工序不符合一级核电设备规范等问题，但通过规范管理、全程紧盯以及积极采纳工厂的合理化建议来修改和完善设计、改进工具和工艺流程等措施，项目成功地减少了返工次数、节省了经费并确保了质量和进度。最终设备出厂试验以及安装调试工作几乎一次成功完成。

4 结论

在建设5 MW低温核供热试验堆与10 MW高温气冷实验堆的过程中，清华大学核研院坚持设计创新与工具创新、工艺创新、工序创新密切结合，完成了一



图5 10 MW高温气冷实验堆石墨堆内构件安装^{[1]219}（1999年11月，王呈选摄）

Figure 5 Installation of graphite reactor components in 10 MW high temperature gas-cooled reactor^{[1]219} (Photo by Wang Chengxuan, November 1999)

系列关键设备和零部件的制造与安装，确保了整个反应堆工程项目的顺利完工。

设计与工艺相结合，知识分子与工人相结合，是清华大学核研院早期建设屏蔽试验反应堆时创立的优良传统。清华大学屏蔽试验反应堆是一座功率为2000 kW的游泳池式堆，其主要功能是通过屏蔽试验，研究如何屏蔽高强度放射性的问题，为设计新的原子反应堆（特别是动力堆）和防放射性的国防与工业建筑提供屏蔽设计的数据。1958—1964年，清华大学工物系副主任兼反应堆教研组长吕应中，带领一支由清华大学工物系的年轻教师和高年级学生为骨干、平均年龄只有23岁半的一百多人的科研队伍，经过6年奋斗，一举建成清华大学屏蔽试验反应堆。这是中国自主设计、建造、安装和成功运行的第一座原子反应堆。

在建设屏蔽试验反应堆的过程中,从理论计算到工程实践,对平均年龄只有23岁半的科研队伍来说,还要跨越一段距离。通过反复计算和多次实验,在设计和工艺上取得突破,解决了一批关键性的技术难题,并制造出了一批重要的仪器设备,这些关键技术的突破是由青年教师、高年级学生与老技术工人一起攻关完成的。

1994年10月14日,吕应中在清华大学屏蔽试验反应堆落成三十周年庆祝大会上深有感触地说:“这里我特别要提一提,今天各位领导的讲话里可能太全面了,就是我们当时一批老师傅对于我们的建堆起了关键性的贡献。我们这一批知识分子,都是‘三脱离’,说老实话,在那个时候没有搞过大的工程。我们计算可以,算得很好;但是,工程是什么样子,不知道。那时候,几位老师傅,张荫刚、张忠久、李廷贵,在现场帮我们解决管道问题,帮我们解决焊接问题”^[4]。

知识分子与技术工人紧密结合,协同攻关,相互提高,同样得到了技术工人师傅们的充分肯定。例如,2004年10月9日,在清华大学屏蔽试验反应堆落成40周年之际,当时参加修补反应堆铝池壳和加工控制棒的退休老技师郭士璋在《新清华》上撰文

说:“我们的老师能文能武,又能设计又能干活,没有知识分子的架子,和我们工人相处得很好,帮助我们学习科学文化知识,和我们在共同的劳动中结下了深厚的友谊。知识分子和工人紧密地结合在一起,这正是200号团结精神的体现”^[15]。

在建设5 MW低温核供热试验堆与10 MW高温气冷实验堆的过程中,这种优良传统得到了进一步发扬。无论是清华大学核研院的技术师傅,还是来自外地工厂、企业的产业工人,他们都展现出了卓越的创新能力和实践精神。通过工具创新、工艺改进、工序优化以及制造与安装阶段的技术革新,他们成功完成了众多高难度的零部件加工与安装任务,确保了反应堆顺利达到临界,并如期完成后来各项试验任务。

上述三个案例表明,清华大学核研院特别善于把计算与实验相结合,把设计与工艺相结合,把工具创新与工艺、工序创新相结合,在加工中改进和完善设计,在设计中改进和完善工艺,设计与工艺相得益彰,最终把设计创新、实验创新、试验创新、工艺创新、管理创新变成了真正的高技术创新产品。这种工程技术创新属于全过程创新,创新贯穿于工具、工艺、工序、制造、监理与安装诸环节中。

参考文献

- [1] 马树泉. 知难而进,众志成城——清华大学核研院的发展历程(修改稿)[A]. 北京:清华大学档案馆, 2007.
Ma Y Q. Knowing difficulties and advancing, united efforts make a stronger city: The development process of the Institute of Nuclear Research at Tsinghua University (revised draft)[A]. Beijing: Tsinghua University Archives, 2007.
- [2] 马树泉, 杜淑英. 创新是科技攻关的灵魂: 清华大学核研院10兆瓦高温气冷堆实现满功率的启示[J]. 清华大学教育研究, 2003, 24(5): 92-96.
Ma X Q, Du S Y. Innovation as the soul of key technologies R & D: A case of revelation from the full-power running of the 10 MW high temperature gas cooled reactor in institute of Nuclear Energy Technology of Tsinghua University[J]. Research on Education Tsinghua University, 2003, 24(5): 92-96.
- [3] 张立红. 开拓核能技术的明天: 记“10兆瓦高温气冷实验堆”重大科技创新成果[J]. 中国科技奖励, 2007(2): 10-15, 2-3.
Zhang L H. Exploiting the future of nuclear energy technology: A record of major scientific and technological innovations of “10 MW high temperature gas-cooled experimental reactor” [J]. China Awards for Science and Technology, 2007(2): 10-15, 2-3.
- [4] 马树泉, 熊倪娟. 坚持科技自主创新 抢占关键核心技术: 10兆瓦高温气冷实验堆获国家科技进步一等奖的启示[J]. 中国高等教育, 2007(10): 43-45.
Ma X Q, Xiong N J. Insist on independent innovation of science and technology and seize key core technologies: Enlightenment of 10 MW high temperature gas-cooled experimental reactor winning the first prize of national science and technology progress award[J]. China Higher Education, 2007(10): 43-45.

- [5] 游战洪. 首座一体化壳式低温核供热堆的诞生[J]. 科学, 2016, 68(5): 39-44.
You Z H. The birth of the first integrated shell-type low-temperature nuclear heating reactor[J]. Science, 2016, 68(5): 39-44.
- [6] 游战洪. 世界首座模块式球床高温气冷堆[J]. 科学, 2016, 68(1): 24-28.
You Z H. The world first pebble-bed modular high temperature gas cooled reactor[J]. Science, 2016, 68(1): 24-28, 4.
- [7] 游战洪. 简析王大中院士的核能技术创新方法[J]. 科学文化评论, 2015, 12(6): 102-112.
You Z H. A brief analysis of Wang Dazhong's innovation methods of nuclear energy technology[J]. Science & Culture Review, 2015, 12(6): 102-112.
- [8] 刘震, 崔曦元. 高校在国家关键核心技术突破中的有组织科研机制研究: 以清华大学核研院高温气冷堆技术攻关为例[J]. 清华大学教育研究, 2023, 44(2): 21-29.
Liu Z, Cui X Y. Study of the mechanism of organized scientific research in colleges and universities in the breakthrough in core technologies in key fields: A case study of the high temperature gas-cooled reactor (HTGR) in Tsinghua University[J]. Tsinghua Journal of Education, 2023, 44(2): 21-29.
- [9] 佚名. 1990年2月14日, 核能所金工间崔铁铎在全校党员大会上的发言. 继承核能所的优良传统, 为低温堆拼搏奋斗[A]//清华大学核研院资料(3). 北京: 清华大学档案馆, 1999: 83-84.
Anonymous. On February 14, 1990, Cui Tieduo, the metalworking division of the Institute of Nuclear Energy, spoke at the party conference of the whole university. Inheriting the fine tradition of the Institute of Nuclear Energy, striving for the low temperature reactor [A]//Information of the Institute of Nuclear Research, Tsinghua University (3). Beijing: Archives of Tsinghua University, 1999: 83-84.
- [10] 佚名. 5兆瓦低温核供热堆总结座谈会之二——老工人座谈会[A]//清华大学核研院资料(3). 北京: 清华大学档案馆, 1998: 29.
Anonymous. Summing up the 5 MW low temperature nuclear heating reactor symposium part two--the symposium of the old workers[A]//Information of the Institute of Nuclear Research, Tsinghua University (3). Beijing: Archives of Tsinghua University, 1998: 29.
- [11] 佚名. 高温气冷堆总结座谈会记录——管理骨干座谈会[A]//清华大学核研院资料(15). 北京: 清华大学档案馆, 2001.
Anonymous. Summing up the high temperature gas-cooled reactor symposium records--the symposium of the management backbone[A]//Information of the Institute of Nuclear Research, Tsinghua University (15). Beijing: Archives of Tsinghua University, 2001.
- [12] 佚名. 高温气冷堆总结座谈会记录——金工间座谈会[A]//清华大学核研院资料(15). 北京: 清华大学档案馆, 2001: 29.
Anonymous. Summing up the high temperature gas-cooled reactor symposium records--the symposium of the metalworking division[A]//Information of the Institute of Nuclear Research, Tsinghua University (15). Beijing: Archives of Tsinghua University, 2001: 29.
- [13] 佚名. 10兆瓦高温气冷实验堆满功率运行庆祝大会记录[A]//清华大学核研院资料(16). 北京: 清华大学档案馆, 2001: 53.
Anonymous. Recording of the celebration meeting for the full power operation of the 10 MW high temperature gas-cooled experimental reactor[A]//Information of the Institute of Nuclear Research, Tsinghua University (16). Beijing: Archives of Tsinghua University, 2001: 53.
- [14] 佚名. 清华大学核研院屏蔽试验反应堆落成三十周年庆祝大会上的发言[A]//清华大学核研院资料(1). 北京: 清华大学档案馆, 1998: 51-52.
Anonymous. Speech at the 30th Anniversary Celebration of the Completion of the Shielded Test Reactor at the Institute for Nuclear Research, Tsinghua University[A]//Information of the Institute of Nuclear Research, Tsinghua University (1). Beijing: Archives of Tsinghua University, 1998: 51-52.
- [15] 郭士璋. 200号的精神哺育了我[N]. 新清华, 2004-10-09(8).
Guo S Z. The spirit of No. 200 feeds me[N]. New Tsinghua, 2004-10-09(8).

Technical Innovation in the Project of 5 MW Low Temperature Nuclear Heating Reactor and 10 MW High Temperature Gas-Cooled Experimental Reactor of Nuclear Research Institute of Tsinghua University

You Zhanhong^{1*}, Liu Niankai²

1. *Institute of History of Science and Ancient Literature, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Department of the History of Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract: In 1989 and 2000, the Institute of Nuclear Energy and New Energy Technology (hereinafter referred to as the Nuclear Research Institute) of Tsinghua University successively built advanced nuclear reactors with the world's advanced level and broad application prospects: 5 MW low temperature nuclear heating reactor and 10 MW high temperature gas cooled experimental reactor. In the process of building a 5 MW low-temperature nuclear heating reactor and a 10 MW high temperature gas-cooled experimental reactor, the Nuclear Research Institute of Tsinghua University insisted on the close combination of design innovation with tool innovation, process innovation and process innovation, and completed the manufacturing and installation of a series of key equipment and parts, ensuring the smooth completion of the entire project. In the research of engineering history, skilled workers have been neglected for a long time. This paper holds that their technological innovation in tools, processes, manufacturing, and installation stages is an important guarantee for engineering innovation.

Keywords: Nuclear Research Institute of Tsinghua University; 5 MW low temperature nuclear heating reactor; 10 MW high temperature gas-cooled experimental reactor; engineering technology innovation