

强流重离子加速器装置 2021 年年度报告

一、工程简介

强流重离子加速器装置（High Intensity heavy-ion Accelerator Facility，简称 HIAF）是国家“十二五”重大科技基础设施建设内容之一。项目选址广东省惠州市，建设周期 7 年，总投资约 23 亿元，由项目建设法人单位—中国科学院近代物理研究所负责建设，项目主管部门为中国科学院。



图 1.1 HIAF 装置总体布局图

强流重离子加速器装置将建设一台具有国际领先水平的下一代强流重离子加速器装置，具备产生极端远离稳定线核素的能力，可提供国际上峰值流强最高的低能重离子束流、最高能量达 4.25 吉电子伏每核子（GeV/u）的脉冲重离子束流和国际上测量精度最高的原子核质量测量谱仪，为鉴别新核素、扩展核素版图、研究弱束缚核结构和反应机制、特别是精确测量远离稳定线短寿命原子核质量提供国际领先的研究条件。

HIAF 项目建设内容主要包括加速器系统、实验终端系统、相关配套设施及土建工程等。加速器系统以直线加速器、同步加速器、储存环为主体，提供高流强、高能量、高品质的重离子束流，产生极端远离稳定线的放射性核素。实验终端系统围绕 HIAF 可提供的束流布局，为核物理、原子物理、核天体物理基础科学研究及材料、生物等应用技术研究提供国际领先的实验平台。

二、建设进展

2021 年是 HIAF 开工建设第三年，工程已全面进入设备批量采购和土建施工阶段。核心关键技术样机完成研制及联合测试，转入批量采购及加工阶段；常规技术完成关键设备首台套加工及测试，开始批量生产；配套系统完成方案优化、施工图设计及预算编审、设备采购与安装招标等工作，预计 2022 年 6 月设备进场安装；土建系统全面施工，目前已完成工程总量近 30%，部分单体已封顶，等待验收，预计 2022 年底土建施工基本完成。

（一）核心关键技术

2021 年，核心关键技术取得全面突破，完成样机研制及测试，关键参数均达到或超过设计指标，部分核心关键技术设备已开始批量加工。

完成国际首台 **45GHz 超导 ECR 离子源 Nb₃Sn 冷体全尺寸真机**零部件加工及 QA 测试，包括径向六极线圈、轴向螺线管、冷体、低温保持器等，目前磁体已进入集成阶段。离子源主要附属设备，如常规组件、微流道铝弧腔、引出系统等均已加工，离线测试平台已完成关键参数检测。



图 2.1 全 Nb₃Sn 超导离子源冷体全尺寸真机线圈

高梯度、宽频带、快响应纳米软磁合金加载腔高频系统突破国外封锁，成功研制直径 $\phi 750$ mm 液冷磁合金环，核心性能参数在 0.1~20 MHz 频段内全面超越目前国际性能最好的同类产品，达到国际先进水平；建成国内首条高性能大尺寸磁合金环生产线，搭建磁合金环冷热态性能测试平台；完成高性能液冷磁合金加载腔、500kW 功率源以及低电平控制系统整机加工，正在开展联合调试。

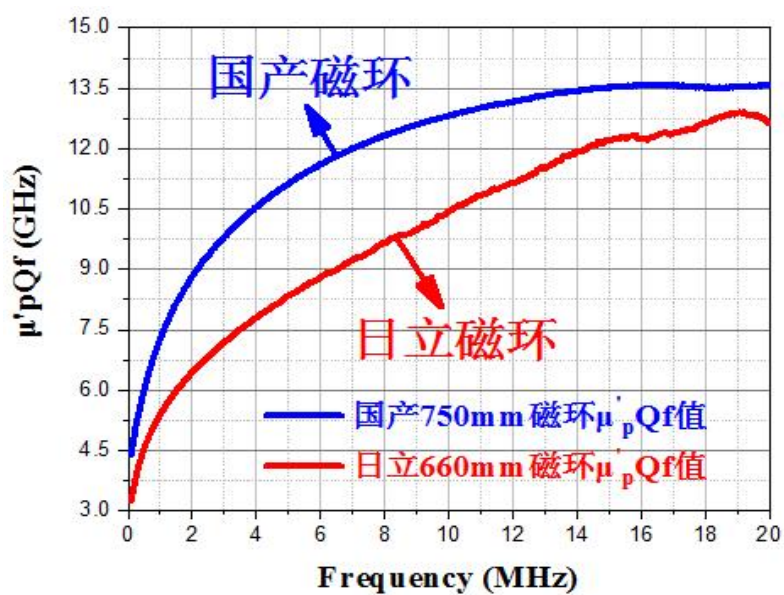


图 2.2 国产直径 ϕ 750mm 液冷磁合金环在 0.1~20 MHz 频段与日立磁环比较



图 2.3 磁合金加载高频腔样机联合测试（真空度 5.5×10^{-12} mbar）

全储能快循环脉冲电源样机研制取得突破，完成整机矢量整流全储能工况下单台实际负载所有功率单元串并联调试，输出 3900A/3Hz、电流上升率 40000A/s，跟踪误差 $\pm 9.6 \times 10^{-5}$ ，指标国际领先。整机工作原理、第二版 SZF-3 控制器以及单台磁铁负载下等各项指标验证均已完成。开展高频滤波抑制电源纹波，完成电源批量采购，下一步将开展电源整机可靠性及稳定性长期烤机测试，讨论并优化电源工艺方案，进行批量加工。



图 2.4 全储能快循环脉冲电源样机

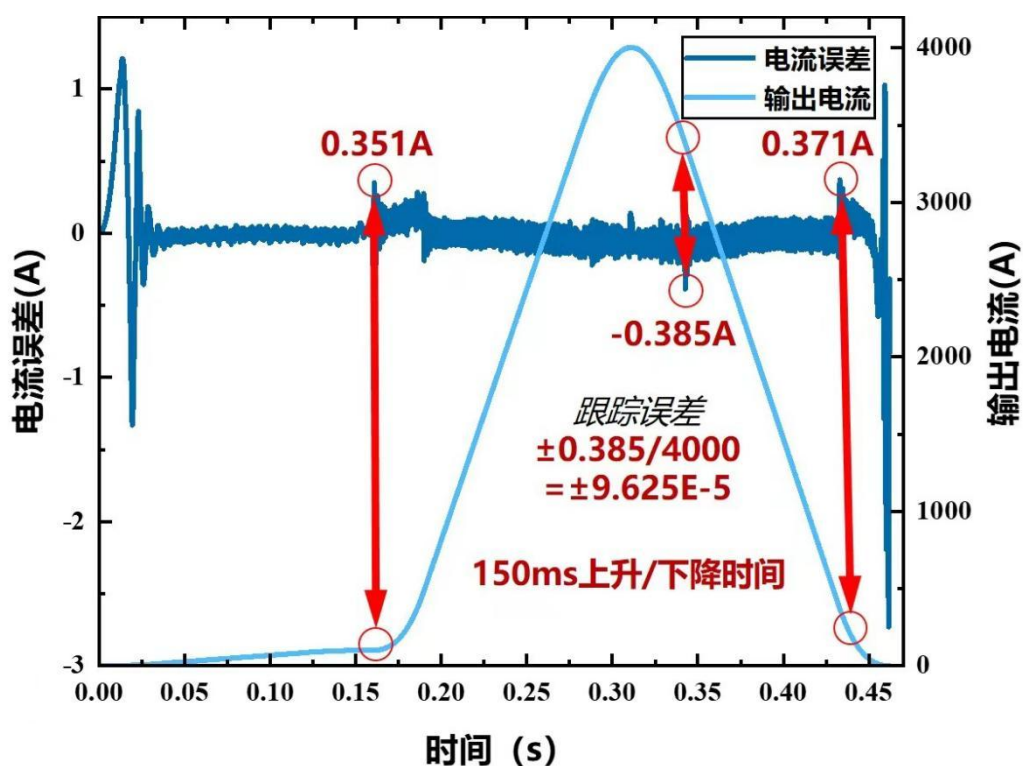


图 2.5 全储能快循环脉冲电源样机实际负载 3900A 工况下输出指标测试

BRing 快脉冲二极磁铁完成样机加工以及高精度稳态和动态性能测试；在此基础上，反复讨论优化工艺方案，提升工艺性能，并应用于 47 台磁铁的批量生产。目前已加工完成 11 台，预计 2023 年 3 月底完成全部磁铁加工。为了进一步测试样机性能，采用真实负载，模拟实际运行工况，搭建联合测试平台，测试二

极磁铁与全储能快循环脉冲电源、陶瓷内衬薄壁真空室、束诊 BPM、电磁兼容、水风电等整体性能。



图 2.6 BRing 快脉冲二极磁铁批量加工情况



图 2.7 二极磁铁、电源、真空室及束诊样机联合测试

国际首创提出的陶瓷内衬超薄壁极高真空室全尺寸样机研制完成，壁厚 0.3mm 情况下实现了大截面真空室优于 4.3×10^{-12} mbar 的真空度；反复讨论优化工艺方案，开始真空室的批量生产。设计了可升降烘烤支架并完成与二极磁铁烘烤联合测试，实现陶瓷真空室位移小于 0.5mm，解决了陶瓷内衬薄壁真空室烘烤

难题。研发了陶瓷环镀膜机，通过 PLC 全自动控制系统，实现陶瓷环大范围温度加热及表面沉积 Au/Ti/Cu/Ti 四层薄膜工艺技术。



图 2.8 陶瓷环镀膜机



图 2.9 陶瓷内衬超薄壁真空室可升降烘烤支架与二极管磁铁烘烤联合测试

放射性次级束流线 HFRS 首次采用全新的倾斜螺线管型线圈（简称 CCT）超导磁铁技术。项目组在半孔径四六极组合样机基础上，成功研制 L800mm 长全孔径超导多极组合磁铁样机，八极线圈低温励磁测试一次达到设计指标，四极线圈低温励磁到 92%，预计 2022 年 3 月完成四极线圈满电流测试及磁场质量验证。



图 2.10 HFRS L800mm 全孔径多极组合样机及其低温测试组件安装

（二）设备加工制造

2021 年，HIAF 工程全面启动设备批量采购及加工。项目组以工艺质量把控为主线，围绕设备工艺水平提升、设备运行稳定和可靠等方面，深化工程设计，完成多轮方案优化迭代；建立关键设备首台套机制，通过关键设备首台套加工及测试，进一步优化工艺方案；实行批量加工专人专责驻厂，严格把控批量加工过程质量。

HIAF 设备加工制造按照 CPM 计划稳步推进。**束流前端系统**完成高功率剥离靶加工及测试；搭建 Chopper 与定时及机器保护系统测试平台；完成快切束磁铁与电源加工。**超导直线加速器系统**完成核心设备批量采购，包括 RFQ、超导腔、低温恒温器及功率源等。**磁铁系统**完成 BRing 六极铁及 HFRS 抗辐射磁铁的批量采购；开展 BRing 四极磁铁批量加工；其余磁铁均已完成设计，准备招标。**电源系统**完成三种型号直流电源首台套加工及测试；完成 BRing Kicker 电源整体组装及调试。**真空系统**完成溅射离子泵等标准件采购；完成八边形和跑道形两种规格陶瓷内衬薄壁四极铁真空室及八边形薄壁加筋真空室加工及测试。**束诊**

系统自研完成环 BPM 电子学样机加工及束流测试；完成条电极、闪烁体及电离室等首台套加工及测试。机器保护系统完成光环电子学加工及测试；完成算法的设计验证以及硬件加工和功能测试。控制系统完成高精度分布式同步定时样机加工及测试。电子冷却系统完成高精度螺线管线圈加工与测试以及 15 级隔离变压器加工与组装。

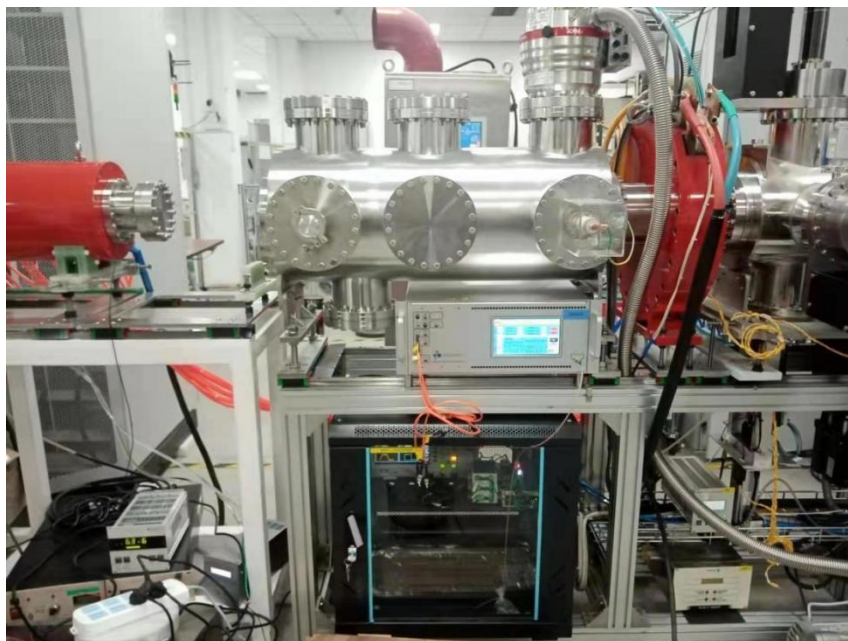


图 2.11 前端系统 Chopper、电源、定时及机器保护联合测试



图 2.12 前端系统 45 度快切束磁铁（左）及电源（右）



图 2.13 超导直线加速器 RFQ 粗加工

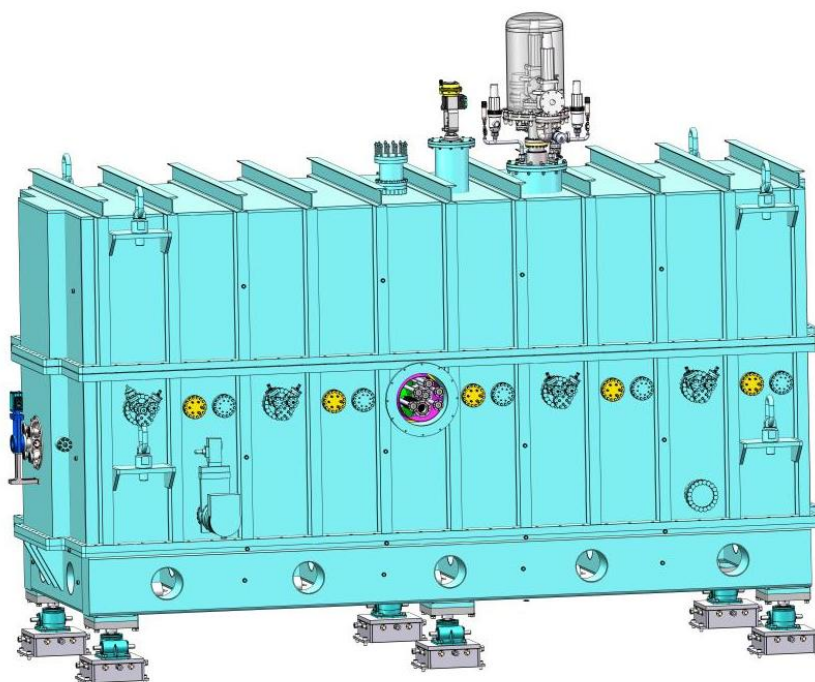


图 2.14 超导直线加速器 QWR007 低温恒温器



图 2.15 BRing kicker 电源及其负载电流波形（上升时间 $< 400\text{ns}$ ，平顶度 $\pm 2\%$ ）

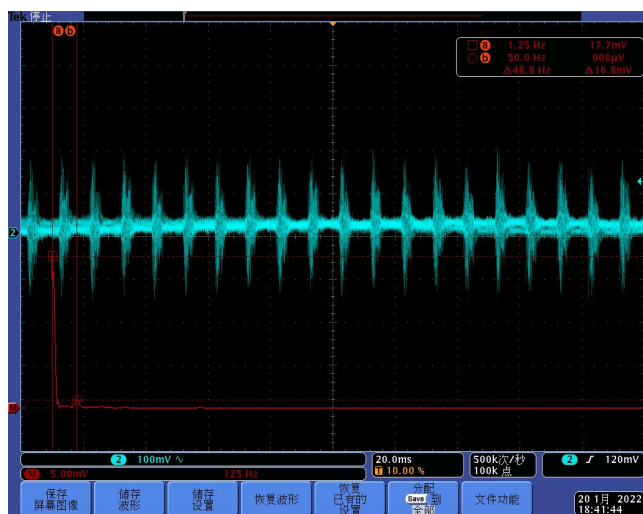


图 2.16 HFRS 抗辐射二极磁铁电源及其测试结果（1450A/145V）

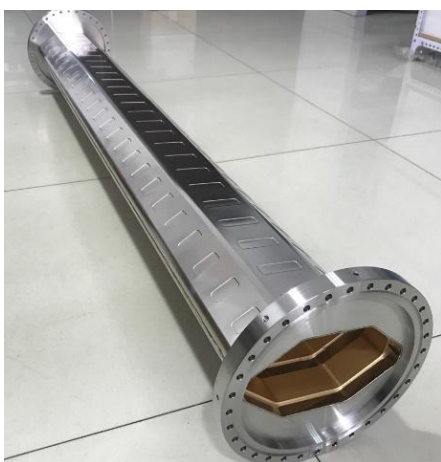


图 2.17 BRing 八边形陶瓷内衬薄壁四极铁真空室

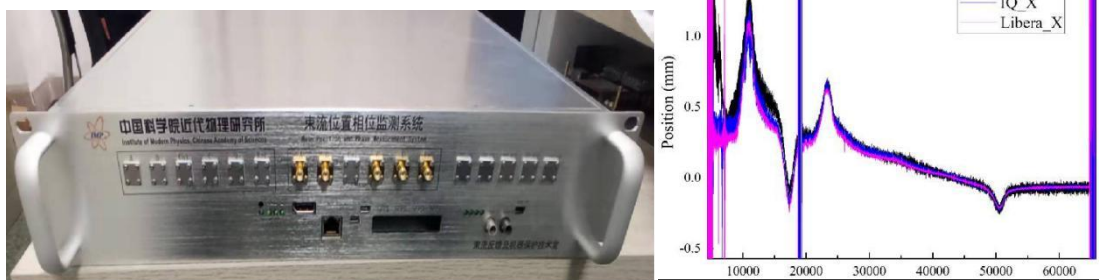


图 2.18 自研环 BPM 电子学样机及其与商用 Libera 束流位置测试结果比较（测试结果表明，闭轨和逐束团测量算法与 Libera 束流测量结果吻合）

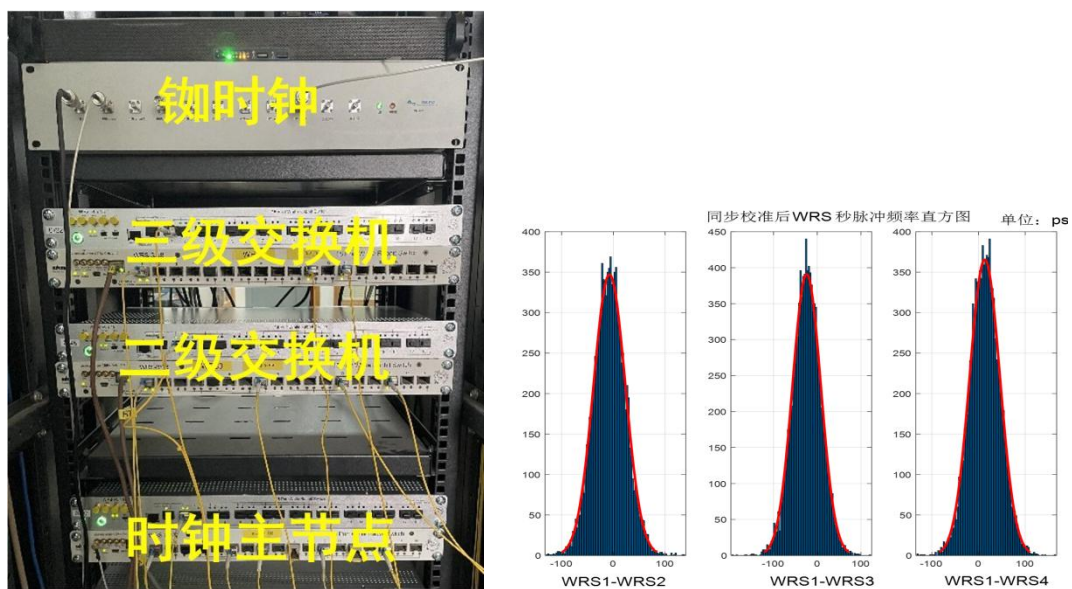


图 2.19 控制系统定时样机及其测试结果



图 2.20 电子冷却高精度螺线管线圈（左）及 15 级隔离变压器测试（右）

（三）实验终端探测器

2021 年，实验终端分总体完成束线及探测器三维机械装配体与土建联合 BIM 建模，完成探测器优化设计及部分样机加工。研制金刚石飞行时间探测器样机；完成 HFRS 初级靶室与充气膨胀法兰样机加工及联合测试；完成 HFRS 抗辐射荧光靶样机及测试；完成高精度环形谱仪 SRing 壁电流探测器样机及其在束测试。

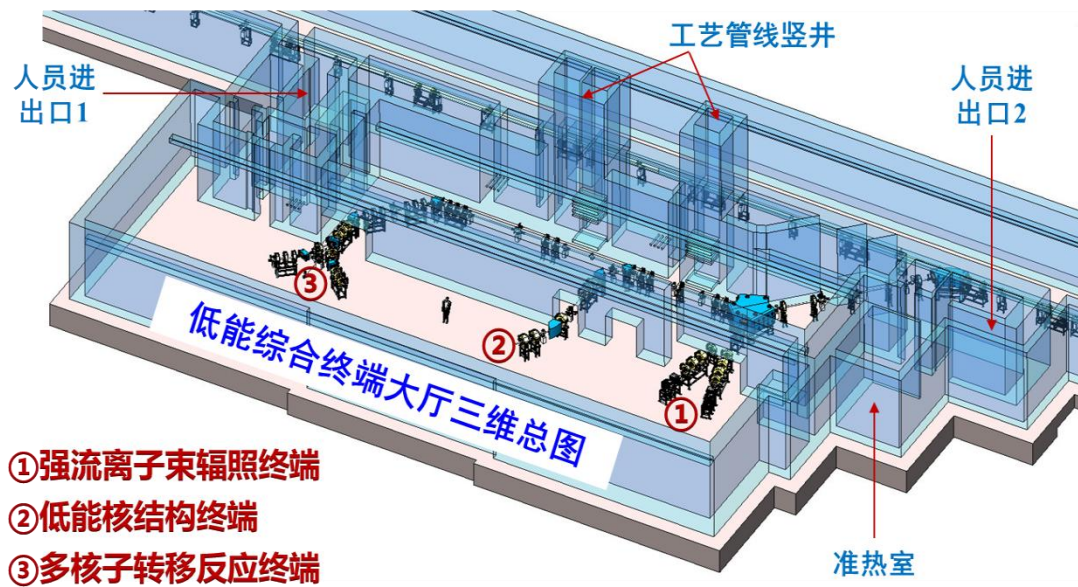


图 2.21 低能综合终端大厅三维总图



图 2.22 金刚石飞行时间探测器样机



图 2.23 HFRS 初级靶室（左）与充气膨胀法兰（中）样机联合测试



图 2.24 HFRS 抗辐射荧光靶样机

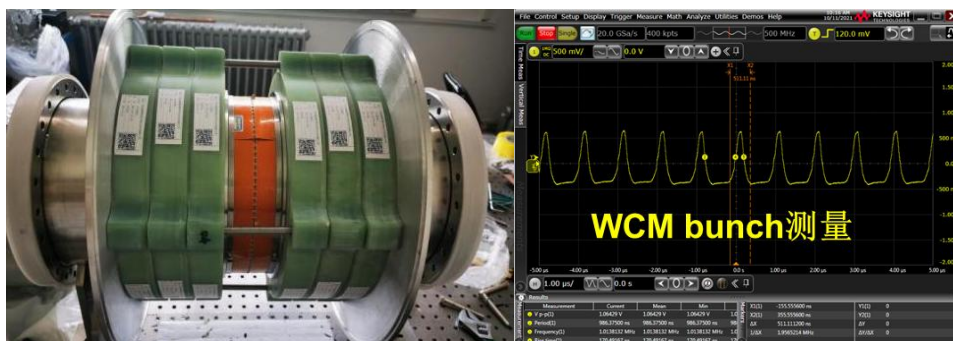


图 2.25 高精度环形谱仪 SRing 壁电流探测器样机及其在束测试

（四）土建及配套

配套系统方面，完成水冷、空调、配电、接地网、电磁兼容、辐射防护等系统的施工图设计，并全部通过专家评审；完成水冷、空调、配电系统设备及安装合同签订，预计 2022 年 6 月设备进场安装；完成超导直线 10kW/4.5K 低温氮制冷机合同签订及与厂家方案讨论，完成超导直线及超导磁铁低温系统回收管路联合设计。

土建系统方面，完成 HIAF 国家投资与地方配套土建工程初步设计评审、施工图编审、概预算编审、土建招标、合同签订、施工许可证办理等工作，并于 2021 年 9 月底开展大规模施工。目前，土建施工已完成工程总量近 30%，其中加速器隧道完成修坡、排水沟、观测井、电梯井及集水井开凿，完成隧道底板面积约 6500 平方米，浇筑混凝土 9000 方；地面单体部分综合测试大厅、三号站房、给水机房、污水处理机房、宿舍、科学之门、一号制冷中心均已封顶，运行楼具备验收条件。



图 2.26 两装置地方配套工程初步设计评审现场



图 2.27 HIAF 装置区航拍图（2022 年 1 月 18 日）

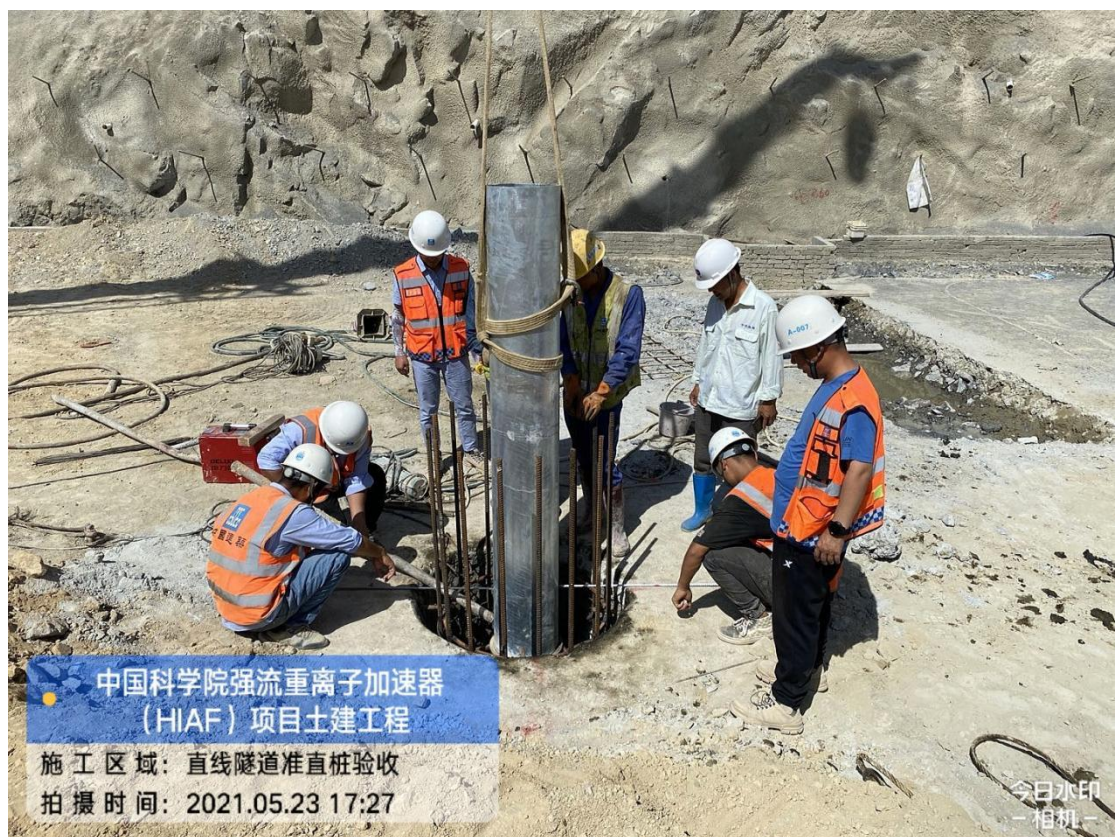


图 2.28 HIAF 加速器隧道准直桩验收



图 2.29 HIAF 加速器隧道底板钢筋绑扎

三、大事记

2月19日，惠州市委书记胡洪一行调研位于惠东县黄埠镇国家两大科学装置 HIAF 及 CiADS 建设情况。



图 3.1 胡洪书记一行调研现场

3月27日，全国人大常委会副委员长、民盟中央主席、中科院院士丁仲礼到惠州市惠东县黄埠镇调研 HIAF 及 CiADS 两大科学装置。



图 3.2 丁仲礼院士一行调研现场

4月13日，广东省政协主席王荣一行到惠州市惠东县黄埠镇调研 HIAF 及 CiADS 两大科学装置。



图 3.3 王荣政协主席一行调研现场

9月2日，广东省科技厅吴世文副厅长一行莅临惠州，调研 HIAF 及 CiADS 两个国家重大科技基础设施项目。



图 3.4 吴世文副厅长一行调研现场

四、单位通讯录

单位：中国科学院近代物理研究所

地址：兰州市城关区南昌路 509 号

邮编：730000

网址：<http://hiaf.impcas.ac.cn/>

电话：0931-4969977

邮箱：hiaf.pmo@impcas.ac.cn

五、编委与责任编辑

编委：肖国青

编辑：王一涵、盛丽娜