

高能物理研究所射频超导 技术发展今昔

潘卫民

(中国科学院高能物理研究所 100049)

什么是射频超导(也称为超导高频)技术?大家知道,加速器无论大小,都有一个高频加速系统,是用来给高速的带电粒子提供动能使其加速或维持其能量的,相当于汽车的发动机,这是加速器的核心系统。这个系统中的核心设备是高频加速腔^[1],可采用常温结构,也可采用超导结构,超导结构的腔具有连续波工作时加速梯度较高、束流孔径较大因而束流性能较好、运行稳定以及对高频功率要求较低等优点。采用超导腔就涉及到射频超导技术(或超导高频技术)。高能物理研究所的射频超导技术发展历史并不长,只有二十多年。我们几乎从零开始,看了一些有限的国外资料,便开始了射频超导腔的设计和研发。当然,那时还是一张白纸、知之甚少、如履薄冰。二十多年过去了,随着国家基础研究的大力投入,特别是基于加速器的国家大科学装置陆续建设,射频超导技术得到了迅速发展。高能物理研究所的射频超导技术的发展经历了多次的峰回路转、潮起潮落,一直在波浪前进,随着国家经济社会的发展而高潮迭起。展望未来,其前景广阔而光明,但技术的发展和广泛应用远没有达到顶峰,创新也永无止境,前浪后拥、鏖战犹酣。

一、起步

高能所在加速器里采用超导高频腔的想法起始于1995年,在当时所领导的带领下,开始了陶-粲粒子工厂的可行性研究。其中,加速器在采用超导高频腔或是常温高频腔的问题上展开了论证。高

频腔的频率物理上已确定为500 MHz,在国际上这个频率的腔是主力腔型,这个频率的高频功率发射机也是商业产品。但当时我们没有接触过任何超导高频,可以说一无所知,只是在国外的文章上看到一些介绍,略微了解皮毛而已,而使用超导高频腔是国际上正在建设和正在规划的大型加速器的首选,超导加速器的采用是未来的发展趋势。在这种情况下,我们开始了加速器高频系统的论证,重点论证超导方案,不但论证超导腔本身,还有腔的高功率输入耦合器及高次模耦合器的方案。经过两年的调研和方案讨论,对超导高频腔的国际发展动态、研发的难点和挑战、稳定运行以及运行费用和维护等问题做了深入的调研,以便项目立项和实施后可开展对撞机超导高频腔的预研工作。

这项论证性研究工作约历时两年,后因陶-粲粒子工厂项目的研究终止,超导高频腔的前期研究也随之告一段落。后来便开始北京正负电子对撞机重大改造工程的可行性研究。

这里值得一提的是,在上个世纪末和本世纪初,我们就开始了1.5 GHz单cell超导腔的研发,还投入了一批人力物力与北京大学联合成立了射频超导实验室,我们研发出了1.5 GHz的超导腔,为高能所后续超导腔的快速发展打下了一定的基础。

二、跟跑

2000年起随着北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)前期工作的开始,我们也开始了其中

的高频加速系统的论证。高频系统无论是对于过去的北京正负电子对撞机(BEPC)还是即将开始建设的BEPCII,都是至关重要的系统。其重要性自不必说,从以往的经历来看,需要克服的困难和出现的问题也比较多,因此从工程领导到研究人员都对其格外重视。当时围绕着是用超导高频腔还是用常温高频腔的选择问题展开论证研究。当时的状况是,超导腔是流行趋势,也是国际前沿技术,我们没有真正做过,更没有用过。专家们也在不断提问:超导腔和常温腔比较哪个更省功率?技术挑战有哪些?你们能不能运行好?等等。我们花了很多时间来做调研和超导高频系统的预研工作,特别是超导高频腔的系统工程设计,深感责任重大、如履薄冰。最后,根据考虑论证结果,BEPCII工程经理部决定选择超导高频系统,采用两个超导高频腔(如果采用常温腔则需要六个腔)加速的方案,频率为500 MHz,这也是国际上用得比较多的工作频率。当时高能所和日本高能加速器研究机构(KEK)签署了合作框架协议,日本帮助我们研发500 MHz超导腔^[2],腔的研制交给日本三菱重工,我们不断地派人去日本KEK学习,重点是学习他们的508 MHz超导腔的设计和运行经验。研制期间,我们经常去日本三菱重工检查和学习制造过程及调试方法。经过两年多的跟踪学习和实践,我们也基本掌握了超导腔的选材、加工、调谐、后处理和测试的过程及关键环节。2006年,BEPCII的两套500 MHz超导腔系统完成了系统集成,并在高能所做了测试,结果满足BEPCII的要求。这是高能所第一次真正意义上合作研发出的用于实际工程的超导高频腔,也是中国的第一套用于实际工程的超导腔系统。下面是中日合作的两套高频腔系统研发历程:

- 2002年:完成了调研、技术设计和工程设计;
- 2003年:完成了超导腔的招标;
- 2005年:完成了超导腔的垂直测试;
- 2006年:完成了超导腔的整体组装和水平

测试——这是国内首次;10月首次投入BEPCII运行——国内首次使用!

投入BEPCII工程后,经过半年左右的束流调试,终于达到了BEPCII运行要求。2009年5月,在1.89 GeV能量下对撞亮度通过了国家验收。虽然这是和日本合作研发的超导管,严格意义上说,更多的是日本帮助下完成的腔,但毕竟是中国第一个投入大科学装置运行的超导管,有着重要的意义。

从世界上超导管的运行经验,特别是与BEPCII同类型的日本KEK的B介子工厂(KEKB)超导管的运行历程看,超导高频腔的故障带有一定的突发性,发生几率比较高,需要备用腔。因此,在BEPCII转入运行阶段后,我们便开始了500 MHz超导管的自主研制^[3]。如前所述,超导高频技术是加速器前沿技术,掌握核心部件制造工艺和总体集成技术可突破国外垄断,这也是我国独立自主、掌握核心技术的必由之路。500 MHz射频超导管系统包括:500 MHz超导管腔体、高功率输入耦合器、高次模吸收器、恒温器等关键部件(图1)。

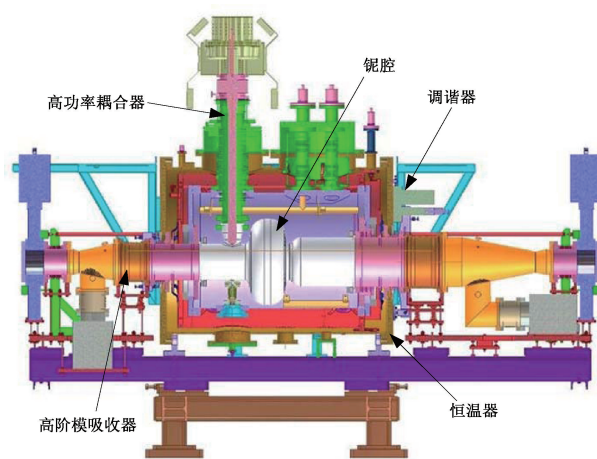


图1 500 MHz超导高频腔系统示意图

经过团队几年的刻苦钻研、拼搏奋进,终于自主完成了高频腔系统的物理和工程设计,攻克了许多关键技术难关,如:旋压成型、电子束焊接、化学抛光、高压水喷淋、垂直测试等。取得了一系列突破性进展:

1. 完成了两只500 MHz超导管旋压成型、整腔焊

接、表面处理、垂直测试、水平测试；

2. 自主研制的高功率输入耦合器通过了420kW连续波高频功率,达到了世界先进水平；

3. 研制的高阶模吸收器承载的高频功率达到了4.4 kW,吸收效率超过60%,达到同类设备的世界水平；

4. 恒温器完成研制。

2017年10月,500 MHz国产超导腔正式投入BEPCII运行(图2),在很短的时间内便达到了束流要求,性能优异。近五年过去了,故障率很低,运行状态良好^[9]。每套超导腔系统均可在1.5 MV电压下900 mA束流运行,高频功率超过130 kW。“达到了国外同类设备的性能水平,这是国产超导腔首次代替进口超导腔在大科学装置上实现了长期稳定运行,标志着我国500 MHz超导腔系统技术实现了突破,跻身于世界少数几个能够成功研制500 MHz超导腔系统的国家之列”——专家鉴定会结论。

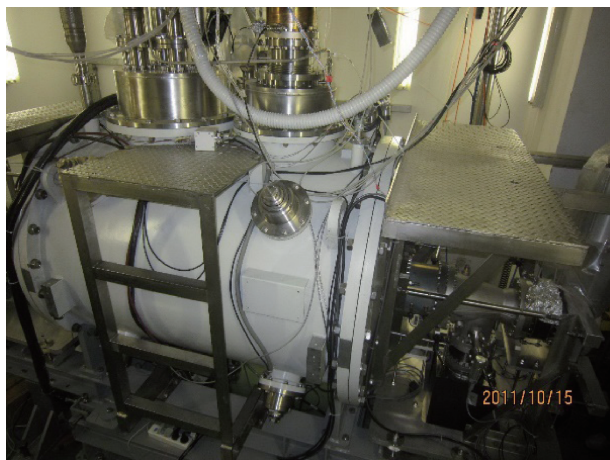


图2 自主研制的500 MHz超导高频腔

三、创新

我国核电发展要解决燃料稳定供应和废料安全处置两大难题,后者也是尚未解决的国际难题。而加速器驱动次临界嬗变系统(ADS)被认为是理想的长寿命放射性废物焚烧炉。ADS由加速器、散裂靶和反应堆组成,其原理是利用加速器产生的高

能离子轰击散裂靶产生高通量、硬能谱中子驱动次临界堆芯运行达到嬗变长寿命核素的目的。

2011年初,高能物理研究所和近代物理研究所共同担负起中科院先导专项——ADS加速器的任务,对于加速器来说,最大的难题是低能段连续波加速器。当时,有两条技术路线可选择:轮辐超导腔(spoke)加速器和半波长超导腔(HWR)加速器。当时,国际上对HWR超导腔研究得比较多,有研发出来的腔。也有的国家研发过(β 值比较高)spoke超导腔,相对来说, β 值低的spoke腔的技术难度较高,但前端由于能量不够,必须采用 β 值很低的腔。一些国家后来因难度高改变了技术路线,但spoke腔的腔型和加速效率有比较大的优势。对于我们来说,这两条技术路线都没有基础,都有不同程度的技术风险,而且先导专项的完成具有时间节点。最后,高能所承担了spoke腔的技术路线验证工作,近代物理所承担了HWR的技术路线验证工作。当时的起步是非常艰难的,spoke腔的设计和研发难度很大。前面提到,它的 β 值必须很小($\beta=0.12$),是国际上最小的,这意味着腔的纵向长度很短,这会带来腔的不稳定等诸多问题。当时,国际上已有的技术对我们是封锁的。我们专项团队经过近七年努力,成功研发了具有国际创新性的首个由14个极低 β 值轮辐型射频超导腔系统集成的毫安级连续波超导质子直线加速器(图3),成功实现了10 mA/10 MeV的设计目标,掌握了系统设计理论和多系统集成及调试方法,成功验证了ADS轮辐型超导加速器的技术路线,在多项核心技术方面实现了国际性突破,是我国质子超导加速器的一个重要里程碑^④。研发出的指标领先的极低 β 值spoke腔造价是国际报价的二十分之一。这一成果在国际上产生了重要影响,关键技术应用于众多项目上。

正在建设中的高能同步辐射光源是我国的第一个高能光源,也是目前世界最亮的光源,这对光源的高频系统也提出了很高的要求。光源的高频系统采用的是166.6 MHz和500 MHz的超导高频

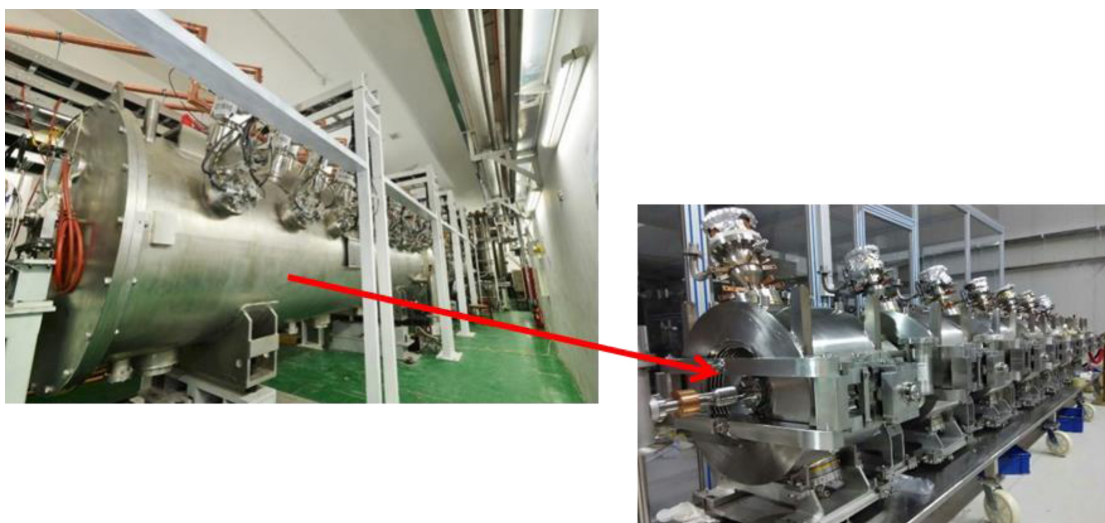


图3 ADS超导加速器注入器I和spoke腔串(左图)



图4 166.6 MHz 超导腔

腔^[5,6]。特别是166.6 MHz的超导腔,原本是只用于加速质子,在光源里创新性地用于加速电子,做了许多改进,目前已研制成功。目前,首支166.6 MHz超导腔垂测达标(图4);首批166.6 MHz超导腔高功率耦合器也完成加工制造并测试达标。

四、超越

1.3 GHz 9-cell 超导腔是国际上使用最多的超导腔,广泛应用于国际直线对撞机(ILC)、环形正负电子对撞机(CEPC)、欧洲X射线自由电子激光(E-XFEL)、美国直线加速器相干光源(LCLS-II)、上海硬X射线自由电子激光(SHINE)等加速器上。高性能(高品质因数、高梯度)1.3 GHz 超导腔是国际

前沿攻关课题,是国际上几个大型实验室竞相发展的技术。

2010年,高能所研制出了第一支1.3 GHz 9-cell 超导腔,这是非常重要的一步,但由于当时条件比较简陋,加速梯度刚刚达到20 MV/m,距离ILC的加速梯度目标(31.5 MV/m)还有一定差距。此后,研究人员在先进光源研发与测试平台(PAPS)、CEPC预研项目等经费的支持下,研制了电抛光(国内首台正式投入使用的实用型超导腔电抛光设备)、预调谐机、光学内窥镜等多台关键设备,并新建了超导腔测试系统、大型洁净间等基础设施,持续改进腔加工和表面处理技术,使得腔加速梯度不断提高。2020年,1.3 GHz 9-cell 超导腔经过电抛光处理后,加速梯度达到了35.9 MV/m,达到了国际先进水平,单cell腔的梯度更是接近了理论极限。

在提高加速梯度的同时,我们也在采用各种技术手段提高1.3 GHz 9-cell 超导腔的 Q_0 值。2013年,美国费米实验室首先提出了采用氮掺杂(nitrogen doping)的方法提高超导腔 Q_0 值,并应用于LCLS-II的1.3 GHz 9-cell 超导腔上^[7]。高能所紧随其后,也开展了氮掺杂技术的研究,在1.3 GHz 1-cell 超导腔上取得了不错的实验结果: Q_0 值最高达到了 $4.5 \times 10^{10} @ 16 \text{ MV/m}$ ^[8]。与国内外很多实验室

一样,经过氮掺杂处理后的 1.3 GHz 1-cell 超导腔, Q_0 虽然提高了,但 E_{acc} 下降了很多,而且稳定性差、成品率不高。因此,氮掺杂工艺不敢轻易用在 1.3 GHz 9-cell 腔上。

怎么办?正当我们为如何提高 1.3 GHz 9-cell 超导腔的品质因数而感到彷徨时,得知日本的高能加速器研究机构(KEK)的 1.3 GHz 1-cell 超导腔经过中温退火处理后, Q_0 得到了大幅提升,同时 E_{acc} 下降也不多。于是,我们也立即开始摸索着开展了 1.3 GHz 1-cell 超导腔的中温退火实验,并取得了成功。在此基础上,我们快马加鞭、创新工艺,将中温退火方法创新性地应用于 9-cell 超导腔上,取得了巨大的成功,在国际上首次成功实现了 1.3 GHz 9-cell 超导腔的中温退火工艺和小批量超导腔的试制,超导腔的品质因数($(3.6-4.2)\times 10^{10}@16\text{ MV/m}$)达到了 1.3 GHz 9-cell 超导腔的国际领先水平^[9]。这项成果发表在国际学术期刊《超导科技》上(Supercond. Sci. Technol. 34 (2021) 095005)。腔的水平测试也取得了成功,取得了出色的结果。基于此,大连化物所的 1.3 GHz 超导腔模组委托了高能所研发。

此外,环形正负电子对撞机(CEPC)的 650 MHz 超导腔采用电抛光处理后,最高加速梯度达到了 41.6 MV/m,而经过中温退火处理后,在 22 MV/m 的加速梯度下,品质因数超过了 8×10^{10} ,达到了 P 波段(0.23~1 GHz)超导腔的国际领先水平^[10]。

高能所在 1.3 GHz 和 650 MHz 超导腔上开展的高加速梯度和高品质因数关键技术研究,为我国自主建设 CEPC 和 X 射线自由电子激光(XFEL)装置、参与国际直线对撞机(ILC)和未来环形对撞机(FCC)等国际大科学工程合作奠定了重要基础(图 5)。特别是,在国际上首次创新使用中温退火工艺于 1.3 GHz 9-cell 腔,取得了重大突破,腔的品质因数大幅提升,一跃达到和超过了国际最好水平(图 6),“性能均超过了上海硬 X 射线自由电子激光装置(SHINE)、美国直线相干光源二期能量升级项目(LCLS-II-HE)的超导腔设计指标,平均品质因数优于 LCLS-II-HE 掺氮超导腔。该成果为我国高 Q 值 1.3 GHz 9-cell 超导腔的批量制造奠定了坚实基础,也为我国建设国际领先的高重频自由电子激光装置和未来高能正负电子对撞机提供了新的工艺方案”(鉴定会专家意见)。成果已转入正式批量应用

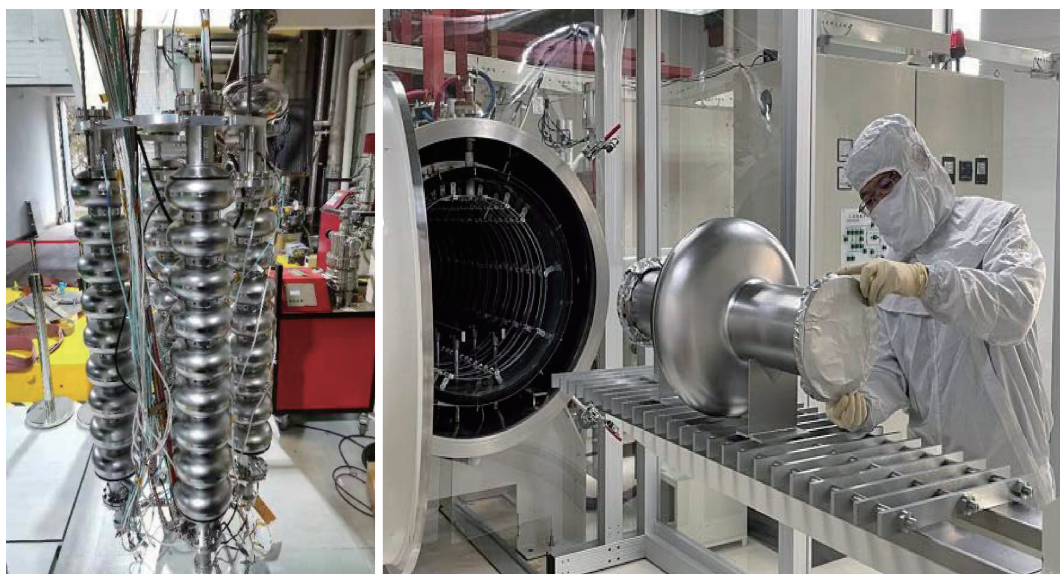


图5 采用国际创新工艺的高性能 1.3 GHz(左)和 650 MHz(右)超导腔

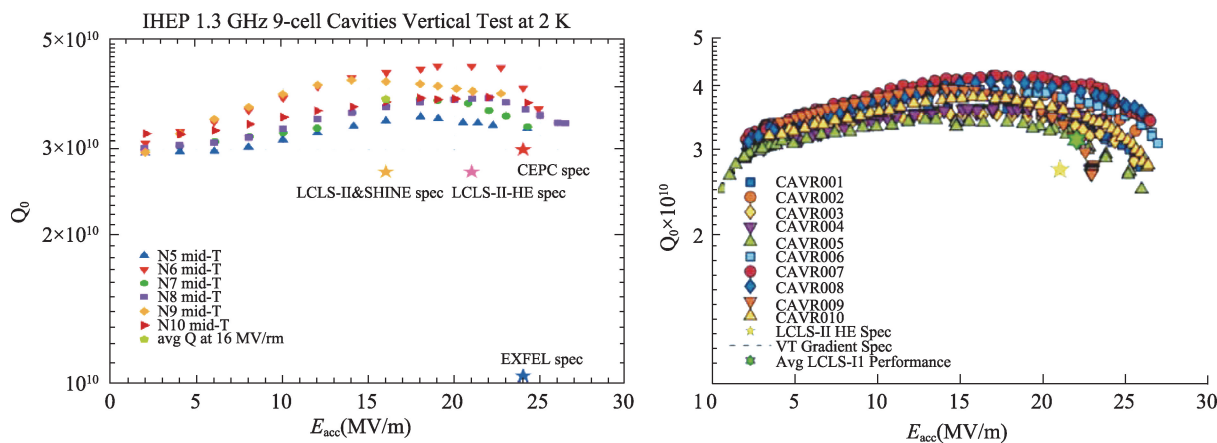


图6 高能所 1.3 GHz 9-cell 超导腔测试结果(左)、美国 1.3 GHz 9-cell 超导腔测试结果(右)

于国内大型超导加速器。

五、结束语

在陈和生所长、王贻芳所长以及老一辈科学家的关怀和领导下,高能物理研究所射频超导走过了二十多年的风风雨雨,从刚开始的白手起家、跌宕起伏,经历了从无到有、由弱到强,到后来的蓬勃兴起、发展壮大——成立了射频超导与低温研究中心,由实验室摸索到整套技术掌握,再到整个射频超导模组集成,投入大科学装置使用,赶超世界一流水平,最后到成果支撑于国家基于加速器的大科学装置。尽管如此,我们深知,这是暂时的领先,前面还有很长的路,还有更多的创新,我们不敢懈怠,仍在努力,想着在国际赛道上跑得更快、更远。

参考文献

[1] Hasan Padamsee, 50 years of success for SRF accelerators—a review, *Supercond. Sci. Technol.* 30 (2017) 053003. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa6376>

[2] Z. Q. Li, C. zhang, Study of heavily damped SC RF cavity, *Chin. Phys. C* 27 (KNWL200310016) (2003) 919, <http://hepnp.ihep.ac.cn/article/id/1dafc13c-58e8-4efe-b979-1945b6768ed8>

[3] T. Huang, W. Pan, G. Wang, et al., The development of the 499.8 MHz superconducting cavity system for BEPCII, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 1013 (2021) 165649. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165649>

10.1016/j.nima.2021.165649

[4] F. Yan, H. P. Geng, C. Meng, et al. Commissioning experiences with the spoke-based CW superconducting proton linac. *NUCL SCI TECH* 32, 105 (2021). <https://doi.org/10.1007/s41365-021-00950-7>

[5] L. Guo, P. Zhang, X. Zhang, et al., Multipacting suppression of the HOM-damped 166.6-MHz $\beta = 1$ quarter-wave superconducting cavities at HEPS, 2021 JINST 16 P11003, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/P11003>

[6] H. Zheng et al., “Design Optimization of a Mechanically Improved 499.8-MHz Single-Cell Superconducting Cavity for HEPS,” in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 2, pp. 1-9, March 2021, Art no. 3500109, doi: 10.1109/TASC.2020.3045746.

[7] A. Grassellino, A. Romanenko, D. Sergatskov, et al., Nitrogen and argon doping of niobium for superconducting radio frequency cavities: a pathway to highly efficient accelerating structures, *Supercond. Sci. Technol.* 26 (2013), 102001. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/10/102001>

[8] B. Liu, P. Sha, C. Dong, et al., Nitrogen doping with dual-vacuum furnace at IHEP, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 993 (2021) 165080. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165080>

[9] F. He, W. Pan, P. Sha, et al., Medium-temperature furnace baking of 1.3 GHz 9-cell superconducting cavities at IHEP, *Supercond. Sci. Technol.* 34 (2021), 095005. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac1657>

[10] S. Jin, P. Sha, W. Pan, et al., Development and vertical tests of CEPC 650 MHz single-cell cavities with high gradient, *Materials* 14 (24) (2021). <http://dx.doi.org/10.3390/ma14247654>