

文章编号: 1001-4322(2005)07-1096-05

射频超导腔的研究新进展*

郝建奎, 赵 夔

(北京大学 重离子物理研究所 重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 射频超导谐振腔已经大规模地应用到粒子加速器领域,其优越之处在于它可以在 CW 模式或长宏脉冲模式下,提供高的加速梯度。射频超导已经成为自由电子激光和能量回收直线加速器的关键技术。经过 30 多年的研究发展,解决了超导腔的热崩溃、场致发射等诸多关键问题,目前加速梯度已经超过 40 MV/m。高加速梯度的获得是射频超导领域的前沿热点,电抛光+低温热处理技术使射频超导腔的加速梯度提高 3~4 MV/m。最新发展起来的超导腔的干式处理可以改善超导腔的表面状况,提高超导腔的 Q 值,抑制次级电子发射效应,有可能成为提高超导腔性能的又一有效手段。

关键词: 射频超导; 自由电子激光; 超导加速器; 干式处理

中图分类号: TL503; TL53 **文献标识码:** A

射频超导谐振腔的优越之处在于它可以在连续波(CW)或长宏脉冲工作模式下,提供高的加速梯度^[1,2]。超导腔的表面电阻比铜腔的小 5 个量级,其无载品质因数 Q_0 一般大于 10^9 。计入液氦制冷系统消耗的功率,同样规模的超导腔的总功耗是铜腔的几百分之一。在 CW 模式下运行的 TTF(tesla test facility)超导腔的平均加速梯度大于 23.5 MV/m^[3]。铜腔在 CW 模式下,一般加速梯度仅能达到约 1 MV/m。

RF 加速结构会影响束流品质,如能散度、发射度、束晕、最大流强等,而具有高加速梯度、大束孔的超导腔可以减小对束流品质的影响。超导腔高加速梯度能减少腔的数目,缩短 CW 加速器的长度。由于超导腔壁损耗极小,腔形易优化,而且超导腔束孔大,可以有效地减弱束腔相互作用。

直线加速器能量回收(ERL)技术是未来加速器重要的应用技术。由于,超导腔壁损耗极小,所以可以高效地应用 ERL 技术。

1 射频超导技术在加速器领域中的进展

近 20 年来,射频超导腔以其优异的性能,为加速器技术的发展带来了新的活力。超导加速器技术已经成熟,全世界用于电子加速器的超导腔总长度已超过了 1 km。从低 $-\beta$ 至高 $-\beta$,已建造并正在建造一批基于超导加速器的前沿科学装置。目前最大的超导加速器 CEBAF、LEP-II 运行多年,状态良好。

1.1 一些典型的超导加速器装置

采用射频超导(SRF)技术的对撞机:日本的 TRISTAN(KEK)^[4],欧洲的 LEP(CERN)^[5],德国的 HERA(DESY)^[6]。

使用 SRF 技术提升储存环光源的性能:英国的 Diamond^[7],加拿大的 CLS^[8]。

核物理前沿研究装置:CEBAF^[9],由 380 个 5-cell 的超导腔组成,提高腔的性能后,束流能量将从 6.5 GeV 提升至 12 GeV。

采用超导腔的高亮度装置:日本的 KEK B-factory^[10],美国的 CESR^[11]。前者创造了对撞机最高亮度的历史记录: $1.0567 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

LEP-II^[12],采用 350 MHz Nb/Cu 腔,超导腔总长 465 m,加速梯度达到 7 MV/m。

建起了十几台用于核科学的超导重离子加速器,如美国阿贡实验室串列直线加速器系统(ATCAS),意大利 INFN-LNL 的超导直线加速器 ALPI。

强流超导质子直线加速器:用于 SNS^[13] 的 1.4 MW 质子直线加速器,从 200 MeV 至 1 GeV,采用 800 MHz 的超导腔。

RIA(rareisotopeaccelerator)^[14],共有 6 种 β 的超导腔型(QWR, Spoke, Pisa 腔, 椭圆腔), $0.02 < \beta <$

* 收稿日期:2004-12-15; 修订日期:2005-03-28

基金项目:国家 973 项目资助课题(2002CB713603)

作者简介:郝建奎(1972—),男,博士,讲师,从事射频超导加速器研究;E-mail:jkhao@pku.edu.cn。

0.84。

直线对撞机 LC: TESLA^[15], 筹建的 TeV 能量的超导直线对撞机, 将采用 20 592 个 1.3 GHz 9-cell 超导腔, 总长度 33 km。

大型强子对撞机 LHC^[16], CERN 正在建造, 是对 LEP-II 的改造, 采用 Nb/Cu 腔。

1.2 自由电子激光(FEL)

超导加速器在 FEL 领域做出了里程碑的成果, 推动了 FEL 的发展。1999 年, 美国 Jefferson 实验室用光阴极高亮度注入器和超导加速器获得了平均功率为 1.72 kW 的输出^[17], 率先实现了 kW 级平均功率自由电子激光。到 2004 年 7 月底, 在 2004 年国际自由电子激光会议上, 该实验室报告了 10 kW 高平均功率 FEL 输出。目前 TESLA 测量装置(TTF)正在进行 X-FEL 的研究计划^[18], 设计波长为 0.1~6.4 nm, 峰值功率 24~135 GW, 脉冲功率 66~800 W。

1.3 能量回收直线加速器(ERL, energy recovery linacs)

未来光源要求高品质电子束具有以下特点: 低的电子束发射度(亮度、相干性); 超短时间结构的电子束团(动态快过程); 圆形、锐边、小截面束团。光阴极电子枪加超导直线加速器的技术可以提供高品质电子束。而高光子通量需要高流强电子束, 若仅仅使用直线加速器则需要非常大的电力资源, 比如, 要达到 100 mA, 5 GeV 的电子束, 就需要 500 MW 的功率, 这几乎是不可能的。为此需采用能量回收技术(ERL)。ERL 实验已在 Jefferson 实验室成功实现, 目前开展 ERL 研究的有美国 Cornell 大学^[19], 英国 Daresbury^[20]等。

2 提高超导腔的加速场强的关键技术

超导加速器的广泛应用得益于超导腔品质的不断提高。自 20 世纪 70 年代起超导加速器研制的关键是改进超导腔的性能。

80 年代初, 腔形的优化, 消除了二次电子发射效应(multipacting), 加速梯度达到了约 5 MV/m。80 年代中后期, 提高铌材热导率, 克服热崩溃(thermal breakdown), 进一步提高加速梯度, 同时化学抛光(BCP)已经得到发展。90 年代, 腔内场致发射成为提高梯度的主要障碍, 解决的主要途径有高压水冲洗(HPR)、超净安装、高功率锻炼(HPP)、电抛光(EP)等, 到 1999 年加速梯度已经超过了 25 MV/m。最近几年, 电抛光结合低温烘烤(bake)的处理技术得到了迅速发展, 使得多 cell 超导腔的加速梯度超过了 35 MV/m^[21], 并解决了 Q-drop 问题。DESY 在 TESLA 9-cell 超导腔性能的改进中取得了重大进展。到 2003 年, 加速梯度已经超过了 40 MV/m。近期 Cornell 大学又通过适当改变腔形, 降低表面峰值磁场 H_{pk} 来提高超导腔的梯度, 使加速梯度达到了 45 MV/m^[22]。

2004 年, 北京大学发展了“干式处理”方法, 利用真空氩离子清洗技术, 对超导腔进行溅射抛光(SP), 对提高超导腔性能非常有效, 有可能成为一种新的超导腔处理技术。

以下对 EP+bake 和 SP 两种最新的超导腔处理方法进行介绍。

2.1 超导腔的 EP+bake 处理方法

射频超导谐振腔的发展是围绕着“提高加速梯度”这一主线进行的。当前的大型超导加速器装置均要求超导腔具有高梯度, 如 TESLA, 要求 E_{acc} 大于 35 MV/m。电抛光和高压水清洗技术的应用, 解决了场致发射问题。电抛光的原理是把超导腔作为阳极, 在一定电流下, 超导腔表面有突起的地方电场较强, 被抛掉的铌多些, 最终效果是使超导腔的表面变得很光滑。再结合高压水清洗技术, 可有效地消除场致发射, 有利于加速梯度的提高。

但仅仅经过电抛光后的超导腔通常存在 Q-drop 现象, 会严重限制加速梯度的提高。所谓 Q-drop, 是指加速梯度高到一定值后, 在没有场致发射的情况下 Q 值突然下降^[23,24], 其典型曲线如图 1 中 bake 前的曲线。发生 Q-drop 后, 虽然加速梯度还能继续增加, 但由于这时超导腔的 Q_0 值迅速降低, 由加速梯度与 Q_0 的关系

$$E_{acc} = \frac{\sqrt{P_0 Q_0 R/Q}}{l} \quad (1)$$

可知, 要达到同样的加速梯度, 所需进腔功率 P_0 大大增加, 这就增大了液氦制冷功率。式中 R/Q 是只与加速腔几何形状有关的一个参量, l 为腔的有效加速长度。

为解决 Q-drop 问题, 许多实验室进行了大量研究, 最新研究表明, EP+bake 对改善超导腔的 Q-drop 很有

效^[25~27]。bake 方法是指在高真空条件下,对超导腔进行 100~150 °C 的低温烘烤。这里的低温是相对于 800 °C 和 1 400 °C 高温处理而言的。烘烤的时间一般为 48 h。经过烘烤后,超导腔的 Q -drop 有明显改善,在高场下, Q 值有很大提高。图 1 是典型的烘烤前后 Q_0 - E_{acc} 曲线(超导腔 AC73, DESY 数据库),为 2.0 K 温度下的测试结果,该超导腔在 DESY 进行了 80 μm 的电抛光和 120 °C 下 48 h 的烘烤。可以看出,烘烤后超导腔的 E_{acc} 由 30.2 MV/m 提高到 35.6 MV/m,最高梯度时 Q_0 由 4.0×10^9 提高到 1.1×10^{10} 。

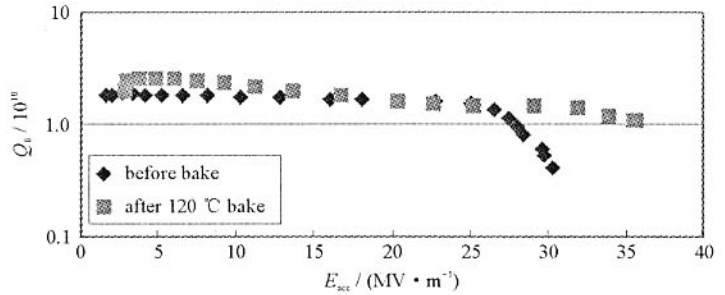


Fig. 1 Q_0 - E_{acc} curve of SC cavity before and after bake

图 1 超导腔烘烤前后的 Q_0 - E_{acc} 曲线

北京大学也进行了超导腔的 bake 研究。研制的 DC-SC 光阴极注入器^[28,29]是一种把直流和超导结合在一起的新型光阴极注入器,非常适合作为高平均功率 FEL 的注入器。最初时 1+1/2 超导腔的 Q 值很低,为此进行了 120 °C 的烘烤,结果使超导腔的 Q 值提高了一个量级。

本文作者参加了 DESY 的超导腔处理研究工作,对 EP+bake 进行了系统的研究^[30]。通过对 CEA-CERN-DESY 联合进行的单腔实验和 DESY 的 9-cell 腔实验进行系统分析,经 60 多次超导腔的 EP+bake 实验研究,结果显示,经过 EP+bake 处理后,超导腔的平均加速梯度由 31.9 MV/m 提高到了 35.6 MV/m(增加了 3.7 MV/m)。在 $Q_0 = 1 \times 10^{10}$ 时,加速梯度由 27.0 MV/m 提高到了 30.7 MV/m(增加了 3.7 MV/m),在最高场强时, Q_0 值由 1.9×10^{10} 提高到了 6.7×10^{10} (增加了 2.5 倍)。而 BCP+bake 的效果不明显。

EP+bake 能改善 Q -drop,目前有许多解释。我们认为,EP+bake 改善了超导腔的表面状况,使得超导腔的表面电阻降低,从而提高了超导腔的 Q 值。超导腔的表面电阻 R_s 由两部分组成,即

$$R_s = R_{BCS} + R_{res} \quad (2)$$

式中:电阻 R_{BCS} 由 BCS 理论确定,与温度和频率有关; R_{res} 称为剩余电阻,它的大小与温度无关,只与超导体的表面状况、纯度等有关系,是超导体表面完善程度的反映。BCS 理论给出

$$R_{BCS} = \frac{A}{T} f^2 \exp\left[-\frac{\Delta(0)}{k_B T_c} \frac{T_c}{T}\right] \quad (3)$$

式中: T 为热力学温度; T_c 为超导转变温度; f 为腔的谐振频率; $\Delta(0)$ 为 0K 时的能隙; k_B 为玻尔兹曼常数; A 为与材料有关的系数。铌腔表面通常含有一些氧,通过烘烤,表面的氧会向铌材内部扩散,从而引起平均自由程的减小,由此使得相干长度减小,由 BCS 理论可知,超导腔的 R_{BCS} 会减小。另一方面,电抛光时铌表面吸附了少量的氢,氢与铌结合成弱超导体,使超导腔品质下降(Q -disease)^[31,32]。烘烤后,氢被部分释放出,使得超导腔的剩余电阻也有所减小。表面电阻的减小使得超导腔的损耗降低,从而超导腔的 Q 值得到提高。

2.2 超导腔“干式处理”技术

超导腔的“干式处理”是北京大学在研究铜铌溅射超导腔^[33,34]的大量经验基础上于 2004 年研发的一种新型超导腔表面处理方法。所谓干式处理,是相对于传统的湿式处理(化学抛光,电抛光)而言的,没有酸的应用,它应用溅射原理,利用真空氩离子清洗技术,对超导腔表面进行处理。超导腔作为阴极,接负高压,阳极采用钛棒,高纯氩气作为工作气体。由于钛具有很强的吸附气体的能力,可以把溅射轰击出的气体杂质吸附干净。

北京大学从样片干式处理到超导腔的干式处理,进行了一系列溅射处理实验。通过铌样片溅射抛光前后表面形貌的扫描电镜(SEM)分析,发现溅射处理后铌表面有重结晶现象,晶粒变大。铌样片溅射前后的残余电阻比(RRR)的分析结果表明,溅射处理后的样片的残余电阻比(RRR)值由 220 提高到了 270~280。RRR 值的提高使得铌的热导率提高,有助于解决超导腔的热失超。

北京大学还对 DC-SC 光阴极注入器的 1+1/2 超导腔进行了溅射处理实验。烘烤在一定程度上提高了超导腔的 Q 值,但超导腔存在二次电子发射现象,需要很长时间的大功率锻炼,且锻炼时很不稳定,导致腔的 Q 值不高。为解决此问题,对 1+1/2 超导腔进行了溅射处理。在超高真空下,利用氩离子轰击超导腔表面,把超导腔表面的毛刺和杂质打掉。溅射电流接近 2 A,电压接近 1 kV,超导腔温度达到 700 °C。超导腔经溅射处理后,在超真空下高温退火 48 h,然后进行了低温性能测量。实验结果显示,溅射处理后的二次电子发射现象得到了明显的改善,以前需要几小时的锻炼,现在只需很短的时间,且信号非常稳定。在 4.2 K 温度下,超导腔的

无载品质因数 Q_0 超过了 1×10^8 ($1+1/2$ 超导腔在 4.2 K 时 Q_0 的理论值为 2.8×10^8)。

干式处理可以改善超导腔的表面状况,达到抛光的效果,有利于提高超导腔性能,如次级电子倍增效应改善,铌材晶格的高温退火作用,去氢作用等。干式处理还可以减少表面杂质,降低超导腔的表面电阻,降低二次电子发射系数,抑制或消除 Multipacting 效应。 $1+1/2$ 超导腔的溅射处理证明了这一点。

超导腔在超高真空下高温退火,可以使铌的晶格发生改变,进行重新结晶,晶格排列更加有序,这有助于解决超导腔的不稳定性。

高温下,铌表面吸附的气体尤其是氢气被释放出来,能够有效地减少 Q -disease 的发生,这比低温烘烤的作用要好得多。许多著名实验室也都采用高温退火的方法对超导腔进行去氢处理,效果比较显著。

与电抛光相比,干式处理的优点在于:溅射参数比较容易控制,只需对氦气气压和溅射电压电流进行调节;溅射电压可达 kV 量级,电流可达 A 量级,抛光功率可以很高;没有酸处理等安全问题。溅射抛光在超高真空环境下进行,工作气体为高纯氦气,对铌的超导性能无有害影响。干式处理有可能成为一种新的超导腔处理方法,为高梯度的获得提供新的手段。目前,干式处理方法还需要进行进一步的系统研究和完善。

3 结束语

经过几十年的发展,射频超导领域取得了巨大进展,加速梯度由最初的几 MV/m 达到了现在的 40 MV/m 以上,一批大型超导加速器装置已经建立和正在筹建,射频超导在自由电子激光和能量回收型直线加速器上的应用将为 21 世纪的科学研究提供更先进的技术保障。射频超导腔的 EP+bake 处理能够提高加速梯度,改善 Q -drop 现象,干式处理可以提高超导腔的 Q 值,抑制 Multipacting 现象。这些处理方法为射频超导加速器的发展提供了技术储备。

参考文献:

- [1] Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF superconductivity for accelerators[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [2] Proch D. Superconducting cavities for accelerators[J]. *Prog Phys*, 1998, **61**:431—482.
- [3] Aune B, Bandelmann R, Bloess D, et al. Superconducting TESLA cavities[J]. *Phys Rev Special Topics- Accelerators and Beams*, 2000, **3**: 092001.
- [4] Akai K, Furuya T, Kako E, et al. Operational experience with the TRISTAN superconducting RF system[A]. Proc of the 1991 Particle Accelerator Conference[C]. San Francisco:LBL&SLAC, 1991. 2405—2407.
- [5] Arduini G L, Bailey R, Bohl T, et al. LEP1 Operation, 1989-1995[A]. Proc 1996 EPAC[C]. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 1996. 286—288.
- [6] Dwersteg B. Operating experience with superconducting cavities in the HERA e-ring[A]. Proc of the 7th Workshop on RF Superconductivity[C]. Gif-sur-Yvette:CEA-Saclay, 1995. 151—154.
- [7] Walker R P. Progress with the DIAMOND light source project[A]. Proc of the 2003 Particle Accelerator Conference[C]. Portland: SLAC&LBNL, 2003. 234—236.
- [8] Dallin L O, Skopik G. Canadian light source proposal[A]. Proc of the 1997 Particle Accelerator Conference[C]. Vancouver: TRIUMF, 1997. 716—718.
- [9] Mammosser J. Status Report: SRF Activities at CEBAF[A]. Proc of the 6th Workshop on RF Superconductivity[C]. Newport News:CEBAF, 1993. 33—48.
- [10] Mitsunobu S. Operation experience of superconducting cavities for KEKB[A]. Proc of the 10th Workshop on RF Superconductivity[C]. Tsukuba:KEK, 2001. 194—196.
- [11] Belomestnykh S, Barnes P, Chojnacki E, et al. Commissioning of the superconducting RF cavities for the CESR luminosity upgrade[A]. Proc of the 1999 Particle Accelerator Conference[C]. New York:BNL, 1999. 980—983.
- [12] Ciapala E. Operating experience with the LEP2 superconducting RF system[A]. Proc of the 10th Workshop on RF Superconductivity[C]. Tsukuba:KEK, 2001. 185—193.
- [13] Cho Y. Evolution of the SNS superconducting proton Linac[A]. Proc of the 10th Workshop on RF Superconductivity[C]. Tsukuba:KEK, 2001. 95—99.
- [14] Shepard K. The US RIA project SRF linacs[A]. Proc of the 10th Workshop on RF Superconductivity[C]. Tsukuba:KEK, 2001. 313.
- [15] Brinkmann R, Floettmann K, Rossbach J, et al. TESLA technical design report[R]. Hamburg:DESY, 2001.
- [16] Chiaveri E. The CERN Nb/Cu programme for the LHC and reduced-beta superconducting cavities[A]. Proc of the 9th Workshop on RF Superconductivity[C]. Santa Fe: Los Alamos National Laboratory, 1999. 352—356.
- [17] Neil G R, Bohn C L, Benson S V, et al. Sustained kilowatt lasing in a free-electron laser with same-cell energy recovery[J]. *Phys Rev*

- Lett, 2000, **84** (4) :662—665.
- [18] Weise H. The TESLA XFEL project[A]. Proc of EPAC2004[C]. Lucerne:PSI, 2004. 11—15.
- [19] Padamsee H. An overview of the cryomodule for the cornell ERL injector[A]. Proc of EPAC2004[C]. Lucerne:PSI, 2004. 491—493.
- [20] Poole M W, Bennett S L, Bliss N, et al. A new type of fourth generation light source facility [A]. Proc of the 2003 Particle Accelerator Conference[C]. Portland:SLAC&LBNL, 2003. 189—191.
- [21] Lilje L, Kako E, Kostin D, et al. Achievement of 35 MV/m in the superconducting nine-cell cavities for TESLA [J]. *Nucl Instru and Meth A*, 2004, **524**:1—12.
- [22] Geng R L, Padamsee H, Seaman A, et al. Testing the first 1 300 MHz reentrant cavity[R]. SRF Reports of Cornell University, Ithaca: Cornell University, 2004. SRF 041108-05.
- [23] Visentin B, Charrier J, Coadou B, et al. Cavity baking: a cure for the high accelerator field Q_0 drop[A]. Proc of the 9th Workshop on RF Superconductivity[C]. Santa Fe:Los Alamos National Laboratory, 1999. 198—203.
- [24] Safa H. High field behavior of SCRF cavities[A]. Proc of the 10th Workshop on RF Superconductivity[C]. Tsukuba:KEK, 2001. 279—286.
- [25] Lilje L, Reschke D, Twarowski K, et al. Electropolishing and in-situ Baking of 1.3 GHz niobium cavities[A]. Proc of the 9th Workshop on RF Superconductivity[C]. Santa Fe:Los Alamos National Laboratory, 1999. 74—76.
- [26] Saito K, Kneisel P. Temperature dependence of the surface resistance of niobium at 1 300 MHz[A]. Proc of the 9th Workshop on RF Superconductivity[C]. Santa Fe:Los Alamos National Laboratory, 1999. 277—282.
- [27] Kneisel P. Preliminary experience with in-situ baking of niobium cavities[A]. Proc of the 9th Workshop on RF Superconductivity[C]. Santa Fe:Los Alamos National Laboratory, 1999. 328—335.
- [28] Zhao K, Hao J K, Hu Y L, et al. Research on DC-RF superconducting photocathode injector for high average power FELs[J]. *Nucl Instru and Meth A*, 2001, **475**:564—568.
- [29] Xiang R, Ding Y T, Zhao K, et al. Experimental investigations of DC-SC photoinjector at Peking University[J]. *Nucl Instru and Meth A*, 2004, **528**:321—325.
- [30] Hao J K, Reschke D, Lilje L, et al. Low temperature heat treatment effect on high field EP cavities[A]. Proc of the 11th Workshop on RF Superconductivity[C]. Travemünde:DESY, 2003. MoP16.
- [31] Kulik I O, Palmieri V. Theory of Q -degradation and nonlinear effects in Nb-coated superconducting cavities[J]. *Particle Accelerators*, 1998, **60**: 257—264.
- [32] Kneisel P. Radio-frequency superconductivity technology: its sensitivity to surface conditions[J]. *J Vac Sci Technol*, 1993, **A11**(4): 1575—1583.
- [33] Hao J K, Quan S W, Zhao K, et al. Researches and experiments on a niobium-sputtered superconducting quarter wave resonator in Peking University[A]. Proc of 2001 Particle Accelerator Conference[C]. Chicago:ANL, 2001. 1169—1171.
- [34] Hao J K, Zhao K, Zhang B C, et al. Recent researches on RF superconductivity in Peking University[A]. Proc of the 10th Workshop on RF Superconductivity[C]. Tsukuba:KEK, 2001. 91—94.

Recent progresses on RF superconductivity

HAO Jian-kui, ZHAO Kui

(MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: RF superconducting cavities can work at CW mode or long pulse mode with high accelerating gradient. RF superconducting technology is widely used in particle accelerators. A lot of front scientific facilities are set up based on RF superconducting accelerators from low beta to high beta. RF superconductivity has become a most important technology in FEL and ERL. In the recent 30 years, the technology has made rapid progresses. The accelerating gradient can be over 40 MV/m by special treatments. High accelerating gradient is the front research in the field of RF superconductivity. EP + bake can provide an important method to increase the accelerating gradient. The accelerating gradient can increase by 3~4 MV/m after EP + bake treatment and the Q -drop is also improved. Recent developed dry treatment technique on superconducting cavities can improve the Q value of superconducting cavities and decrease the multipacting effect. The dry treatment might become another effective method to improve the performance of superconducting cavities.

Key words: RF superconductivity; Free electron laser; Superconducting accelerator; Dry treatment