

射频超导腔的低温烘烤研究

郝建奎¹⁾ 赵夔 朱凤

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

摘要 射频超导腔在高场下的 Q -slope 严重影响到高加速梯度的获得. 研究表明 100—150°C 低温烘烤 (Bake) 对改善超导腔的 Q -slope 有比较好的效果. 本文在大量超导腔 Bake 实验的基础上, 对 Bake 进行了系统的研究. 研究结果显示, 电抛光(EP)超导腔经过 Bake 后, 平均加速梯度和高 Q 值(1×10^{10})时的加速梯度均增加 3.5MV/m 以上, 最大加速梯度时的 Q 值得到增加, Q -slope 得到改善. 对 Bake 温度的研究表明, 在最佳 Bake 温度范围内, 高的 Bake 温度能得到相对高的 Q 值. 对比化学抛光(BCP)和 EP 超导腔可知, 要得到好的加速性能, 需要 60—80 μm 的 EP. 超过 10—15 μm 的 BCP 会使 EP 超导腔品质下降. 用氧扩散模型对 Bake 作出了解释.

关键词 超导腔 Q -slope Bake 电抛光

1 引言

射频超导谐振腔以其优越性能越来越广泛地应用到加速器领域. 超导腔加速梯度的提高是射频超导研究的主线, 高加速梯度的获得是当前研究的目标之一. 从 20 世纪 70 年代初到现在, 超导腔加速梯度由最初的几 MV/m 达到了现在的 40MV/m 以上, 其中诸多技术的应用起了关键性的作用, 包括腔型优化, 高压水清洗, 高功率锻炼, 化学抛光, 电抛光等等. 化学抛光(Buffered Chemical Polishing, BCP)和电抛光(Electropolishing, EP)技术已经成熟, 对射频超导的发展起了非常大的推动作用. BCP 和 EP 结合高压水清洗(High Pressure Water Rinsing, HPR), 能够有效地消除场致发射, 提高加速梯度. 然而经过 BCP 和 EP 的超导腔通常存在 Q -slope 现象^[1, 2], 超导腔的品质因数(Q 值)在高场下会下降. Q 值的降低导致所需射频功率和液氮制冷功率的增加, 甚至出现热致失超.

解决高场下 Q 值下降问题是射频超导领域的前沿热点, 近期低温烘烤(Bake)技术逐渐应用到此研究中^[3—5]. 作者参加了德国电子同步辐射中心(DESY)的此项研究, 采用低温烘烤方法对超导腔高场下的 Q -slope 进行了系统的分析, 在 DESY 的超导

腔 Bake 实验基础上, 对 CEA-CERN-DESY 联合进行的单腔实验和 DESY 的 9-cell 超导腔进行了系统研究. 研究表明, EP+低温烘烤对改善超导腔的 Q -slope 效果明显.

2 超导腔 Bake 研究

这里的 Bake 指在真空条件下, 对超导腔进行低温烘烤, Bake 温度一般在 100—150°C, 也有超高 200°C 的 Bake 研究, 但效果不是很好. 本文通过对 50 多个(次)EP 超导腔和十几个(次)BCP 超导腔结合 Bake 的实验分析, 对低温 Bake 的效果进行了详细的研究.

超导腔 Bake 研究的一般程序是: EP(或BCP); HPR; 垂直测试获得 Q 和 E_{acc} 的关系曲线; Bake; 再次直测试. 通过对 Bake 前后两次垂直测试结果进行分析, 来寻找 Bake 的规律. Bake 的温度为 100—140°C, Bake 的时间通常为 48h, 个别的为 24—96h.

Bake 之前对超导腔进行一定程度的 BCP 或 EP. 根据腔表面被抛掉的厚度和顺序, 可以把这些超导腔分为 4 类:

1) EP+BCP: EP 之后又进行了小于 60 μm 的

BCP;

2) BCP+EP: BCP 之后又进行了小于 $60\mu\text{m}$ 的 EP;

3) 纯 EP: EP 的厚度大于 $60\mu\text{m}$;

4) 纯 BCP: BCP 的厚度大于 $60\mu\text{m}$;

这里抛光的厚度均指在垂直测试之前. 下文研究表明, 超导腔作纯 EP 处理后, 如果附加的 BCP 的厚度不超过 $10\mu\text{m}$, 超导腔的性能与纯 EP 的效果相差不多, 因此本文把上面 4 种超导腔分为两类进行研究:

1) EP 超导腔(包括纯 EP 超导腔和 EP 之后 BCP 不超过 $10\mu\text{m}$ 的超导腔);

2) BCP 超导腔(包括纯 BCP 超导腔和 BCP 后又有少量 EP 的超导腔).

对上述两种超导腔的 Bake 效果进行了详细的分析, 主要分析的参数有下面几个:

1) 最大加速梯度 $E_{\text{acc,max}}$ 及其增益 $E_{\text{acc,gain}}$;

2) 在 $Q_0 = 1 \times 10^{10}$ 时的 E_{acc} 和 $E_{\text{acc,gain}}$;

3) 进腔功率 100W 时, 在 $100\text{W} \cdot n/9$ 时的 E_{acc} 和 $E_{\text{acc,gain}}$, n 为腔的单元数;

4) 不同温度下, 最大加速梯度时的品质因数 $Q(E_{\text{acc,max}})$;

5) BCP 与 Bake, EP 超导腔对 BCP 的忍受度.

所选择的 Bake 超导腔中均略掉了受场致发射限制以及多次 Bake 的情况, 以便更准确地分析 Bake 的作用.

2.1 EP 超导腔 Bake 前后的 E_{acc}

加速梯度是超导腔最重要的参数之一, 加速梯度

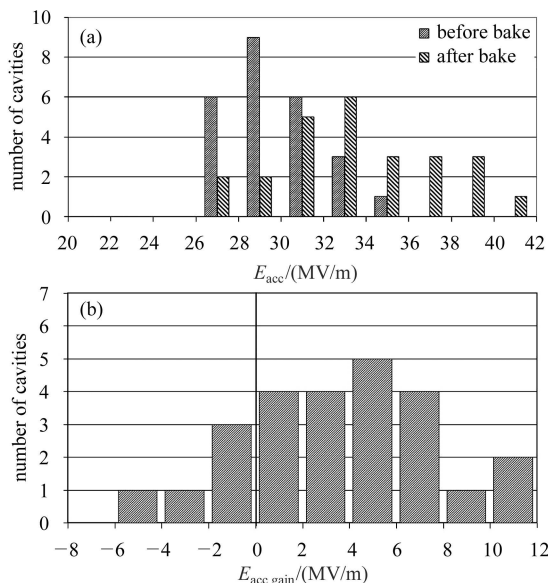


图 1 EP 超导腔 Bake 前后的 $E_{\text{acc,max}}$ (a) 及其增益 (b)

的提高可以缩短直线加速器的长度, 降低造价. 这里对 EP 超导腔 Bake 前后的加速梯度进行了分析. 图 1 给出了 2.0K 测试温度下 Bake 前后 $E_{\text{acc,max}}$ 和 $E_{\text{acc,gain}}$ 的结果分布. $E_{\text{acc,max}}$ 由 31.9MV/m 增加到 35.6MV/m (提高了 3.7MV/m), 其中 3 个超导腔加速梯度超过了 40MV/m , 最大加速梯度 44.0MV/m 是由单 cell 腔 1B5 得到的. 由图 1 还可以看出 Bake 后 $E_{\text{acc,max}}$ 的分布比较分散($29.5\text{—}44.0\text{MV/m}$), 这是由于次级电子倍增(Multipacting)效应引起的.

对 3 个 Bake 后的超导腔各追加了一次 Bake, 低温测试结果表明, 加速梯度没有继续增大.

2.2 EP 超导腔 Bake 前后的 $E_{\text{acc}}@Q = 1 \times 10^{10}$

$E_{\text{acc}}@Q = 1 \times 10^{10}$ 这一参数表征了超导腔在高 Q 下的性能. 我们希望超导腔在高 Q 值下能达到尽可能高的加速梯度. 图 2 给出了 Bake 前后 $Q = 1 \times 10^{10}$ 时的 E_{acc} 及其增益, 在 2.0K 测试温度下, 加速梯度由 27.0MV/m 增加到 30.7MV/m (提高了 3.7MV/m), 如加上低于 2.0K 温度的测试结果, 加速梯度由 25.7MV/m 增加到 29.9MV/m (提高了 4.2MV/m).

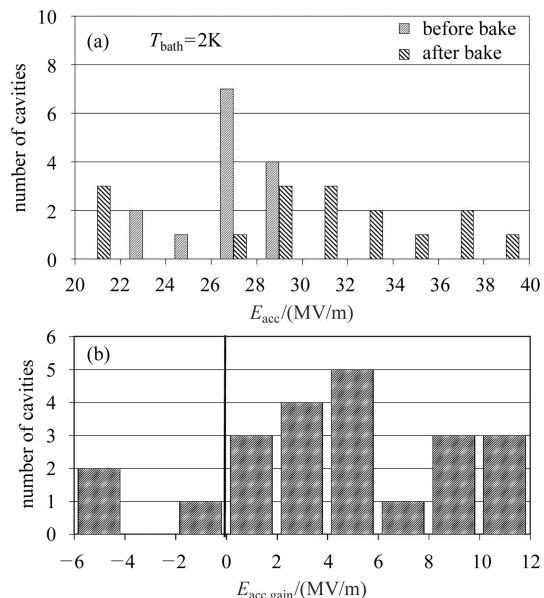


图 2 EP 超导 Bake 前后的 $E_{\text{acc}}@Q = 1 \times 10^{10}$ (a)及其增益(b)

2.3 Bake 前后的 $Q_0 E_{\text{acc,max}}$

品质因数 Q 是超导腔的又一重要参数, Q 值越高, 达到相同加速梯度所需射频功率越小. 图 3 给出了 BCP 超导腔和 EP 超导腔 Bake 前后的无载品质因数 Q_0 的比较. 对 EP 超导腔, $Q_0(E_{\text{acc,max}})$ 由

1.9×10^9 增加到 6.7×10^9 , 如果加上 BCP+Bake 的结果, $Q_0(E_{acc,max})$ 由 2.3×10^9 增加到 6.5×10^9 .

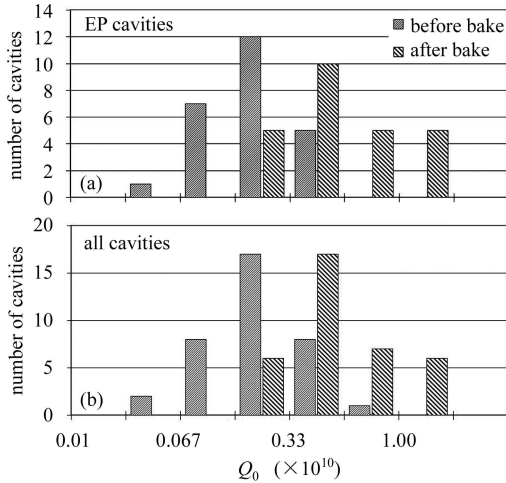


图 3 超导腔 Bake 前后的 $Q_0(E_{acc,max})$ (a) EP 超导腔; (b)EP+BCP 超导腔

2.4 Bake 温度的影响

Bake 温度对 Bake 效果有一定影响. 这里研究的 Bake 最佳温度为 $100-150^\circ\text{C}$. 有超过 150°C 的研究表明^[1, 6], 温度过高对改善超导腔的 Q -slope 没有效果, 甚至会使最大加速梯度减小.

表 1 E_{acc} 与 Bake 温度的关系

	Bake温度/ °C	Bake前/ (MV/m)	Bake后/ (MV/m)	增益/ (MV/m)
$E_{acc,max}$	所有	31.9	35.6	3.7
	100-119	31.9	35.9	4.0
	120-129	32.6	35.8	3.2
	130-139	30.8	34.4	3.6
E_{acc} @ $Q_0 = 1 \times 10^{10}$	所有	27.0	30.7	3.7
	100-119	25.8	30.5	4.7
	120-129	27.9	29.4	1.5
	130-139	28.1	29.6	1.5
E_{acc} @ $100\text{W}\cdot\text{n}/9$	所有	27.5	31.1	3.6
	100-119	27.7	30.5	2.8
	120-129	27.7	31.0	3.3
	130-139	26.5	30.5	4.0

根据所研究 Bake 超导腔的温度范围, 这里把 Bake 温度分为 3 组: $100-119^\circ\text{C}$, $120-129^\circ\text{C}$ 和 $130-139^\circ\text{C}$, 对不同 Bake 温度下的结果进行了比较. 表 1 给出了 3 组 Bake 温度下 $E_{acc,max}$, $E_{acc}@Q = 1 \times 10^{10}$ 和 $E_{acc}@100\text{W}\cdot\text{n}/9$ 的结果. $E_{acc}@100\text{W}\cdot\text{n}/9$ 这一参数与 $E_{acc}@Q = 1 \times 10^{10}$ 类似, 但它与液氦消耗联系更加紧密, 它对应 TESLA 超导腔在脉冲模式运行时 1W 的制冷功率^[7]. 表中 E_{acc} 仅包括 EP 超导腔

的结果. 由表 1 可以看出, Bake 后的加速梯度与 Bake 温度的关系不明显.

表 2 给出了不同温度下 Bake 前后 $Q_0(E_{acc,max})$ 的变化, 其中对 EP 超导腔和所有(EP+BCP)超导腔分别进行了统计. 由表 2 可以看出, 高的 Bake 温度下, 处理后的超导腔平均 Q 值比低 Bake 温度下要高.

表 2 Q 值与 Bake 温度的关系

	Bake温度/ °C	Bake前 ($\times 10^9$)	Bbake后 ($\times 10^9$)	增加 倍数
$Q_0(E_{acc,max})$ (EP超导腔)	所有	1.9	6.7	3.5
	100-119	2.0	5.3	2.6
	120-129	1.8	9.2	5.0
	130-139	1.5	8.0	5.4
$Q_0(E_{acc,max})$ (所有超导腔)	所有	2.3	6.5	2.9
	100-119	2.2	5.1	2.3
	120-129	2.0	7.7	3.8
	130-139	2.7	8.9	3.3

2.5 EP 超导腔对 BCP 的耐受度

为研究 EP 超导腔对 BCP 的耐受度, 对 EP 超导腔进行了 BCP 处理, 研究表明, 随着 BCP 厚度的增加, 超导腔的性能下降. 超过 $60\mu\text{m}$ 后, EP 的效果已完全消失, 变成了纯 BCP 超导腔的性能, 这也说明了前面分类的可靠性. 图 4 给出了单 cell 超导腔 1P6 经过一系列 BCP 处理后的 $Q_0 \sim E_{acc}$ 曲线, 每次 BCP 都在 $20\mu\text{m}$ 左右, BCP 后都进行了 120°C 的 Bake. 由图可明显看出, 随着 BCP 的增加, 超导腔的性能逐渐下降. 第 3 次 BCP 后, 对该腔进行了 $60\mu\text{m}$ 的 EP 和 120°C 下 54h 的 Bake, 超导腔的性能得到了部分恢复.

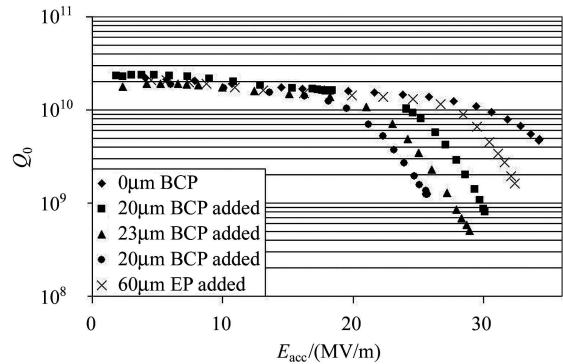


图 4 BCP 对 EP 超导腔的影响

3 Bake 效果的初步分析

关于 Bake 的效果, 当前有多种解释. 本文对 Bake 的效果进行了初步分析, 认为 Bake 的作用来自

于 Bake 时铌表面层的氧扩散所致. 我们知道, 超导腔的表面电阻由以下两部分组成:

$$R_s = R_{\text{BCS}} + R_{\text{res}}$$

其中 R_{BCS} 与温度和频率有关, R_{res} 称为剩余电阻, 它只与超导腔的表面状况、纯度等有关系. 铌表面氧化层对超导腔的表面电阻有影响^[8]. 通常情况下, 铌表面形成一层致密的 Nb_2O_5 膜, 在这一层氧化膜下, 铌晶格中还会吸附一些游离态的氧. EP 会使氧化膜剥离, 但很快又会生成新的 Nb_2O_5 膜, XPS 测量表明, 表面的 Nb_2O_5 膜很快生长到 10\AA , 此后几天内会慢慢增长到 50\AA ^[9]. 铌表面层氧的分布如图 5 的曲线所示. 在 Bake 过程中, 吸附的氧和表面氧化物中的氧会由表面向内部扩散, 最终会达到一种平衡态, 平衡时氧的大致分布参看图 5.

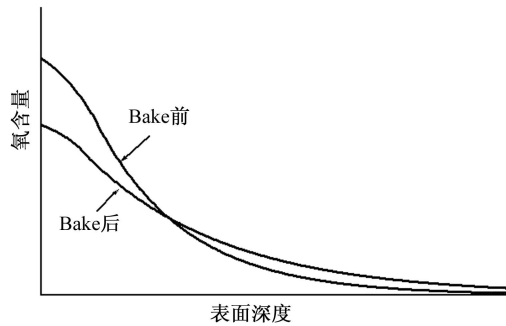


图 5 Bake 前后铌中氧的分布

铌中的氧从表面向内部扩散引起电子平均自由程 l 的缩短, 而平均自由程的缩短使得相干长度减小, 由 BCS 理论^[10]知

$$R_{\text{BCS}} \propto \lambda^3,$$

这里 λ 为有效穿透深度,

$$\lambda = \lambda_L \sqrt{\frac{\xi_0}{\xi}},$$

λ_L 为超导体的伦敦穿透深度, ξ_0 和 ξ 为纯超导材料和实际超导材料的相干长度,

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{\xi_0} + \frac{1}{l},$$

由以上各式得到

$$R_{\text{BCS}} \propto \left(1 + \frac{\xi_0}{l}\right)^{3/2} l.$$

对于高纯铌, $l \gg \xi_0$, 从而 $R_{\text{BCS}} \propto l$. Bake 后平均自由程 l 缩短使得 R_{BCS} 降低, 进而表面电阻降低, 因此 Q 值有所增加.

同时由于 Bake 的作用, 铌表面的氧等杂质含量减小, 使得剩余电阻 R_{res} 也有所减小, 从而使得超导腔的 Q 值进一步增加.

氧扩散可以定性解释高的 Bake 温度产生高的 Q 值. 扩散遵循下面的规律^[11]:

$$\bar{x} = \sqrt{2 \cdot D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{R \cdot T}\right) \cdot t},$$

其中, \bar{x} 是平均扩散长度, $D_0 = 0.015\text{cm}^2/\text{s}$ 是铌中氧的扩散常数, $E_A = 112890\text{J/mol}$ 是激发能, $R = 8.31\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ 是气体常数, T 为绝对温度, t 是扩散时间. 相同 Bake 时间下, 温度越高, 氧扩散长度越大. 根据超导腔 Bake 参数, 得到氧在铌中的平均扩散长度. 图 6 给出了不同氧扩散长度下的 Q 值分布图. 由图 6 可以看出, 氧扩散长度越大, 超导腔的 Q 值相对也越高.

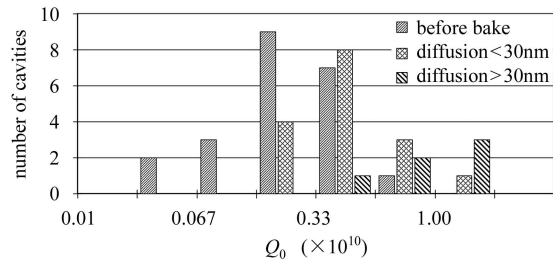


图 6 不同氧扩散深度下的 $Q_0(E_{\text{acc,max}})$ 分布

其他有多种 Bake 模型, 作者认为大致分为两类, 磁场增强 (Magnetic Field Enhancement, MFE) 模型^[12]和界面沟道交换 (Interface Tunnel Exchange, ITE) 模型^[13, 14]. 每种模型都不能对 Bake 的效果给出一种完美的解释. 目前人们正在对此进行深入的研究.

4 结论

EP+Bake 是提高超导腔品质的一种有效的处理方法. 对大量 EP+Bake 的实验研究表明, 经 Bake 处理后的 EP 超导腔, 其 Q -slope 得到明显改善, 最大加速梯度有所增加, $E_{\text{acc}}@Q = 1 \times 10^{10}$ 和 $E_{\text{acc}}@100\text{W} \cdot \text{n}/9$ 也都增加 $3.5\text{MV}/\text{m}$ 以上. 在最佳 Bake 温度范围内, 高的 Bake 温度对提高高场下的 Q 值更有益. 当前, 关于 Bake 的解释有多种, 需要进一步的研究才能得到一种完善的理论.

感谢德国电子同步辐射中心 (DESY) 射频超导腔组 (MHF-SL) 提供实验条件、帮助和指导.

参考文献(References)

- 1 Visentin B et al. Cavity Baking: a Cure for the High Accelerator Field Q_0 Drop. Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity. Los Alamos National Laboratory, 1999. 198
- 2 Safa H. High Field Behavior of SCRF Cavities. Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity. Tsukuba: KEK, 2001. 279
- 3 Lilje L et al. Electropolishing and In-Situ Baking of 1.3GHz Niobium Cavities. Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity. Los Alamos National Laboratory, 1999. 74
- 4 Lilje L. High Accelerating Gradient in 1.3GHz Niobium Cavities. Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity. Tsukuba: KEK, 2001. 287
- 5 Kneisel P. Preliminary Experience with In-Situ Baking of Niobium Cavities. Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity. Los Alamos National Laboratory, 1999. 328
- 6 Visentin B. Change of RF Superconducting Parameters Induced by Heat Treatment on Niobium Cavities. Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago: ANL, 2001. 1056
- 7 Brinkmann R, Floettmann K, Rossbach J et al. TESLA Technical Design Report. Hamburg: DESY, 2001. II-14
- 8 Palmer F L. IEEE Trans. Magn., 1987, **23**(2): 1617
- 9 Grundner M, Halbritter J. J. Appl. Phys., 1979, **51**: 397
- 10 Bonin B. Materials for Superconducting Cavities. Proc. of CERN Accelerator School CERN96-03. Hamburg, 1996. 191
- 11 Hagen M. Internal Report, WU D 88-8. University of Wuppertal, March 1988
- 12 Knobloch J et al. High Field Q Slope in SC Cavities due to Magnetic Field Enhancement at Grain Boundaries. Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity. Los Alamos National Laboratory, 1999. 77
- 13 Halbritter J. Material Science of Nb RF Accelerator Cavities: Where do We Stand 2001? Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity. Tsukuba: KEK, 2001. 292
- 14 Halbritter J. IEEE Trans. on Appl. Supercond, 2001, **11**: 1864

Researches on Bake Effect on RF Superconducting Cavities

HAO Jian-Kui¹⁾ ZHAO Kui ZHU Feng

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

Abstract The Q -slope at high gradient affects the performance of superconducting cavity greatly. Recent researches show that low temperature (100—150) $^{\circ}$ C heat treatment (bake) has positive effects on the performance of superconducting cavities. A lot of cavity tests are analyzed based on bake treatment. The average gradient $E_{acc,max}$ and E_{acc} at $Q = 1 \times 10^{10}$ are increased by more than 3.5MV/m. Q at $E_{acc,max}$ is increased and the Q -slope is improved. Analysis on bake temperature shows that higher bake temperature leads to higher Q value. Comparison of BCP and EP cavities shows that at least 60—80 μ m EP is needed for BCP surface. More than 10—15 μ m removal of the surface by BCP will degrade the performance of an EP cavity. Oxygen diffusion model is used to illustrate bake effect.

Key words superconducting cavity, Q -slope, Bake, electropolishing