

中國科學院物理研究所

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



# 超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第97期】

## 超导技术和射频超导加速器



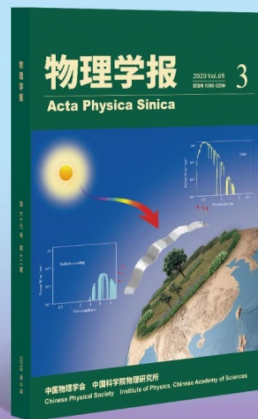
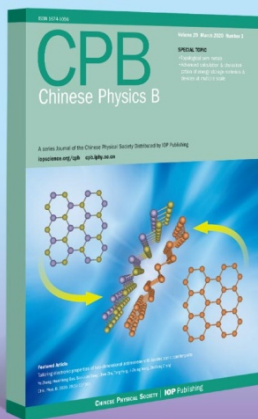
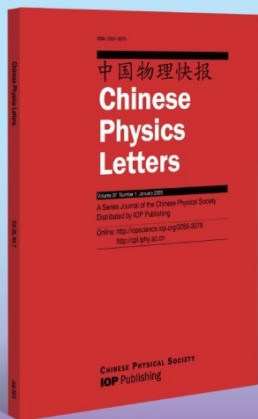
潘卫民

中国科学院高能物理研究所

主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部

协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》

# 与中国物理学同行

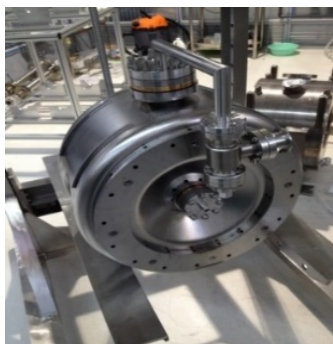


## 欢迎关注 欢迎投稿

- ▶ CPL, CPB 和《物理学报》被SCI收录, “中国科技期刊卓越行动计划”入选期刊。
- ▶ CPL的 Express Letters 栏目对标 PRL, 质量高, 发表快, 国际推广。接收邮件投稿:  
[zhaiz@iphy.ac.cn](mailto:zhaiz@iphy.ac.cn)
- ▶ CPB和《物理学报》刊登中英文物理学优秀原创成果, 物理学前沿研究领域专题与综述。
- ▶ 《物理》是国内权威物理类中文科普期刊, 集学科大家之力, 为读者精心奉献高品质作品。







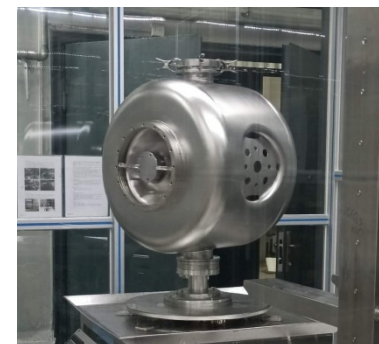
Spoke 024 ( 325MHz )



Spoke 012 ( 325MHz )



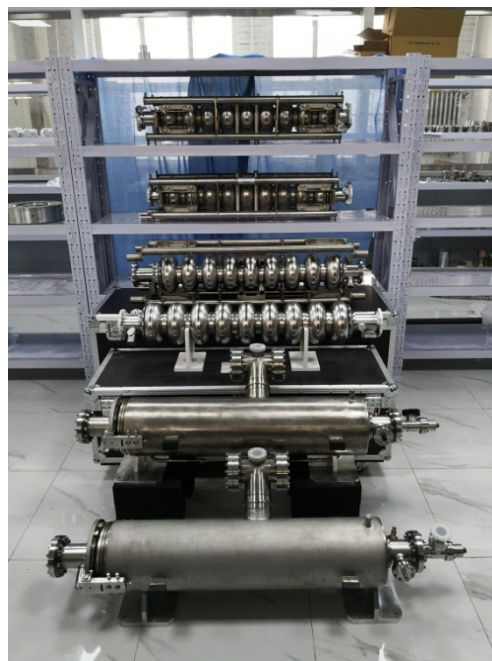
Spoke 021 ( 325MHz )



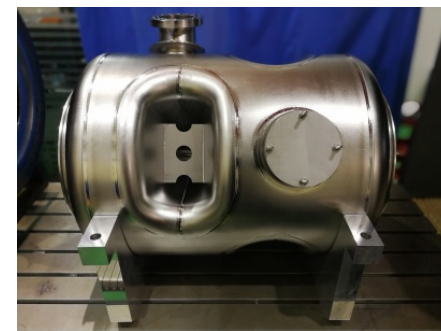
Spoke 051 ( 325MHz )



2Cell , 5Cell ( 650MHz )



1.3GHz



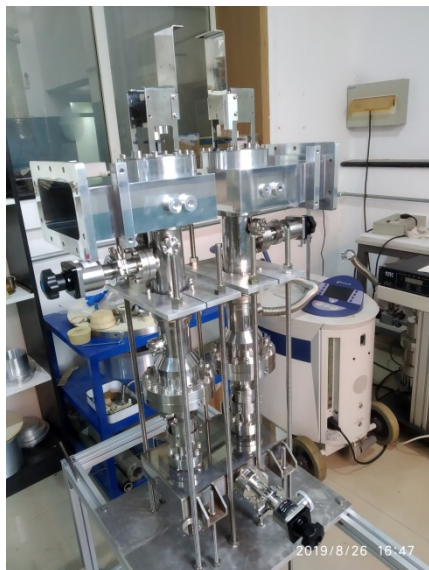
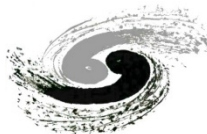
双Spoke ( 325MHz )



QWR ( 166.6MHz )



超导腔



1.3GHz 9 Cell 双窗可调耦合器  
(SHINE、CEPC)



162.5MHz HWR腔耦合器



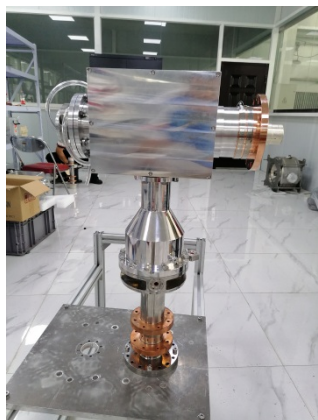
1.3GHz 9 Cell腔耦合器



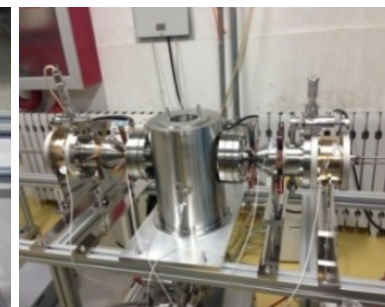
500MHz 超导腔耦合器



166.6MHz QWR腔耦合器(HEPS-TF)

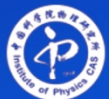


325MHz Spoke腔耦合器



—— ——— 超导腔耦合器 ——— ——





中國科學院物理研究所

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



## 超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第97期】

# 超导技术和射频超导加速器



潘卫民，中科院高能物理所研究员、中国物理学会加速器分会副理事长、中科院加速物理和技术重点实验室主任、高能同步辐射光源项目总指挥。主持完成北京正负电子对撞机重大改造工程（BEPCII）高频功率源的建立和国内首台 500MHz 超导加速腔及高功率输入耦合器的成功研制，并长期带束稳定运行；作为中科院先导专项 ADS 项目负责人，主持研制的国际上首台极低 beta 连续束质子超导直线加速器取得突破性成功，位于领先地位。

主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部

协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》



# 超导技术和射频超导加速器

高能物理研究所 潘卫民

2020年10月13日





## 低温超导现象

1908年7月10日在荷兰莱登大学的物理实验室，卡末林·昂内斯首次利用液氢预冷及一次绝热膨胀把当时认为不可能液化的“永久气体”氦气液化，该试验打开了低温工程学和低温物理学的新纪元。

在此基础上，1911年卡末林·昂内斯进一步发现，将汞冷却到 $-268.98^{\circ}\text{C}$ 时，其电阻突然消失；后来他发现许多金属和合金都具有与汞相似的低温下失去电阻的特性。卡莫林宣布，汞在4.2K进入了一种新状态，由于它的特殊导电性能，被称为“超导态”。



## 一、超导技术在加速器上的应用

从1911年超导电性现象被第一次发现以来，由于超导体的许多特殊性质，超导技术及其应用成为越来越多的科学家研究的重要课题。随着超导理论越来越成熟，超导技术应用的也越来越广泛。目前，在航空、航天、医疗、材料、信息等方面都有大量运用。





超导技术应用可分成三类：

大电流应用（强电）、电子学应用（弱电）  
和抗磁性应用。

例如电能传输、电机制造、超导磁体、超导磁悬浮列车、  
高速超导电子计算机、超导磁流体发电、高灵敏度电磁  
仪器、生物磁学、超导核磁共振等等。



超导技术在加速器中的应用主要在两个方面，分别是超导高频腔和超导磁体，超导腔可以用很小的功率建立极高的电场，超导磁体亦可以在很小的励磁功率下产生强大的约束磁场，超导设备的使用可以大大的减小加速器的尺寸和造价，它们代表了当今高能粒子加速器的最高技术。



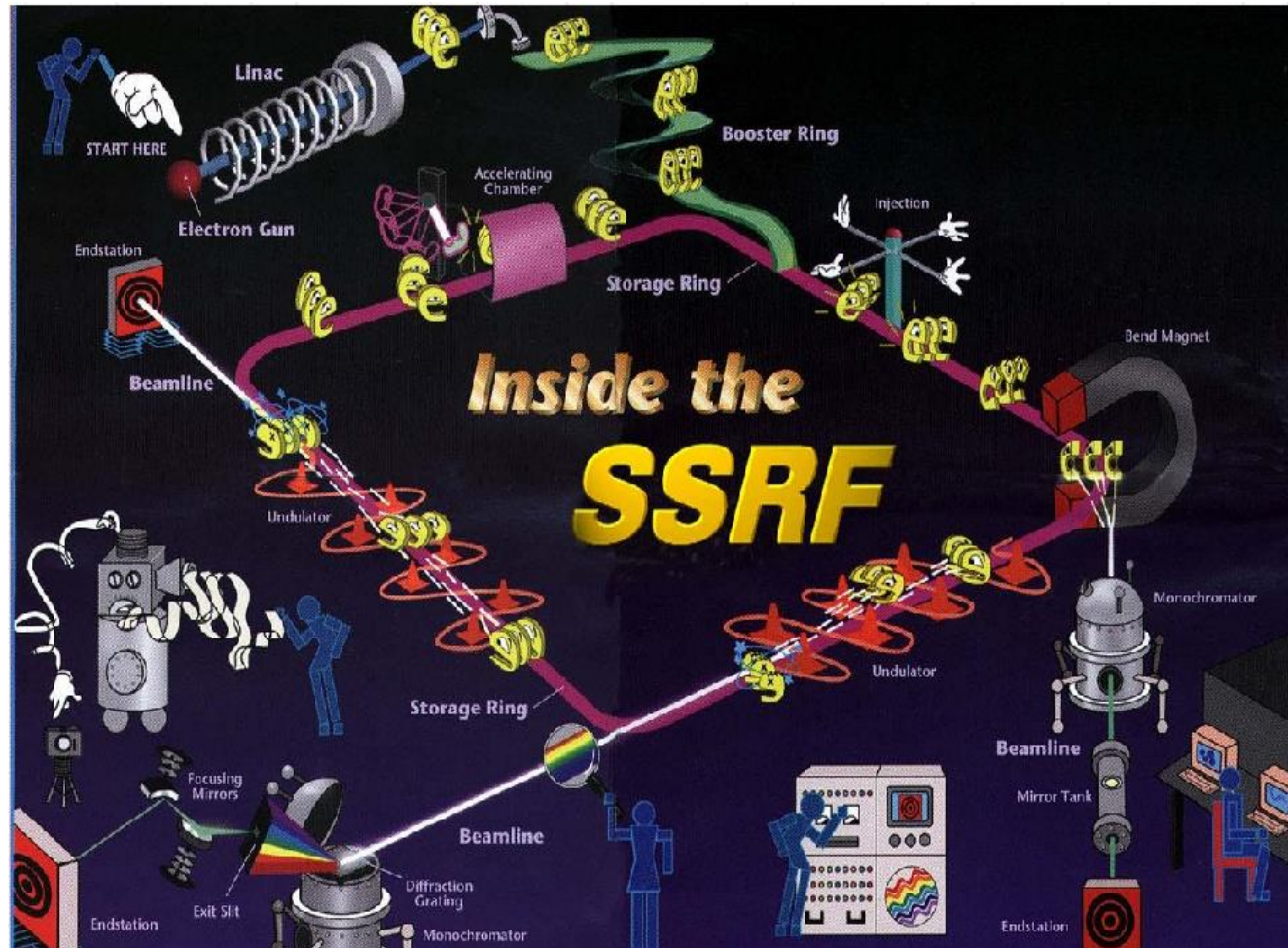


图1.1 同步辐射光源加速器示意图

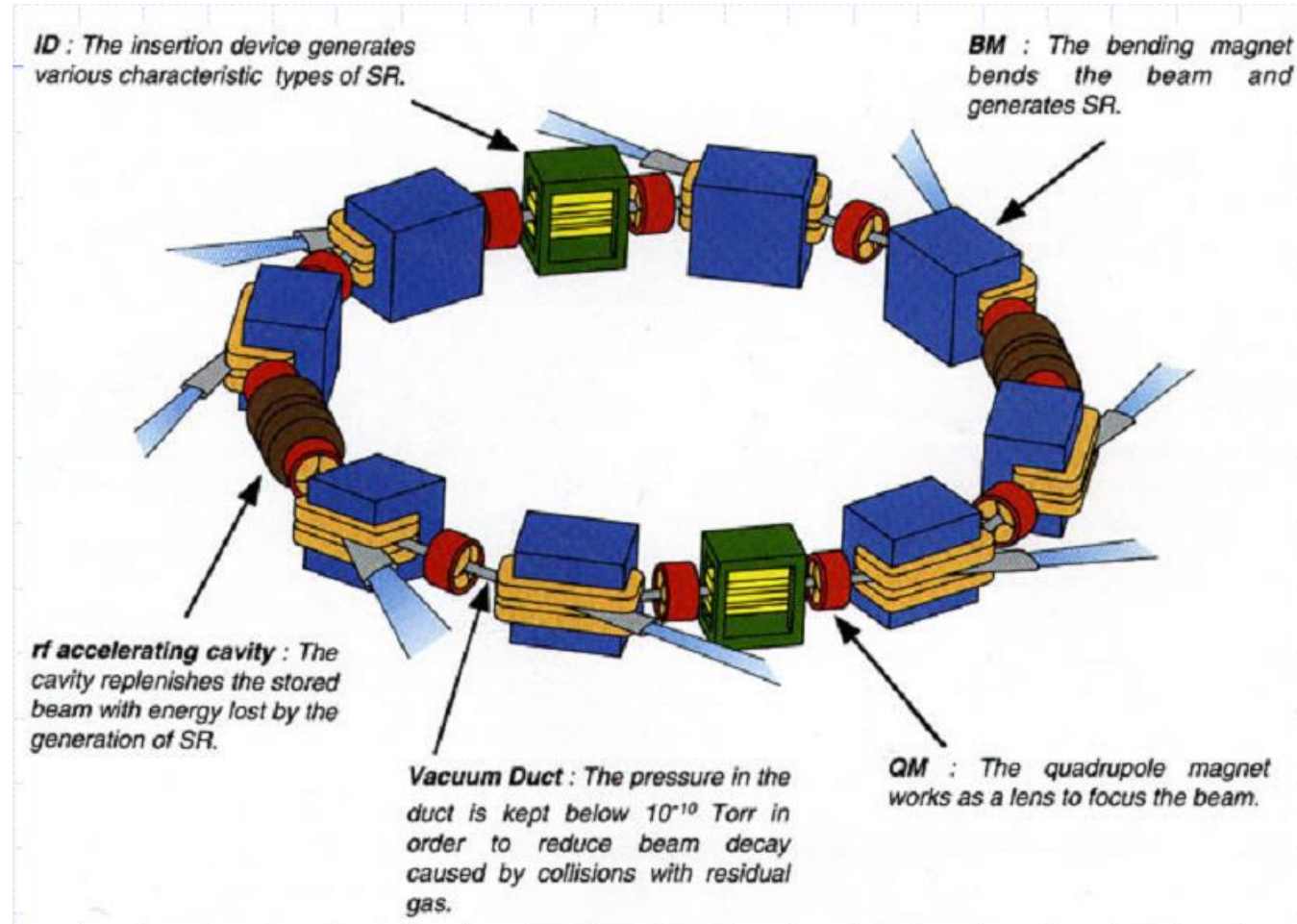


图1.2 大型环形加速器示意图



如表1.1 所示，许多已经在运行和正在拟建的大型对撞机均不约而同的利用超导高频腔来加速带电粒子，超导腔可以用**很小的入射功率建立很高的加速电场**。

**表1.1 世界上采用超导射频腔的大型装置**

用途	加速器
环行对撞机	KEKB(日本), HERA(德国), PEP II(美国), LHC, RHIC(美国), BEPC II(中国)、CEPC(中国)
直线对撞机	ILC、SLC(美国)、CLIC, TESLA(德国)
光源	DIAMOND(英国)、CLS(加拿大)、SSLS(新加坡)、ALS(美国)、SLS(瑞士)、PAL(韩国)、SSRF(中国)、HEPS(中国)





如表1.2所示，很多大型装置都采用了超导磁体来引导和聚焦束流。

**表1.2 世界上采用超导磁体技术的主要加速器**

装置	加速粒子	中心能量 (Gev)	建成时间
Tevatron	质子-反质子	1800	1983
HERA	质子、电子	质子820；电子30	1990
RHIC	Au	重离子130	2000
LHC	质子	7000	2007

据统计，世界上现在的超导腔长度连起来超过1km



## 1、超导技术带来的革命——超导加速腔

1974年，美国斯坦福大学高能物理实验室第一次成功将超导技术应用到射频腔上，其电压梯度能够**达到2-3MV/m**，从此以后超导高频技术开始蓬勃发展。近20年来，射频超导腔以其优异的性能和稳定的运行，为加速器技术的发展带来了新的活力。



## 2、超导腔的优势

尽管制造超导腔的材料比较贵,工艺技术也比加工常温加速腔复杂许多,还需要专门的低温系统为它提供超导环境,但它具有许多常温腔无法比拟的巨大优势,再加上低温超导技术的成熟与稳定,使射频超导技术成为各大新建加速器的首选技术。其优点主要有以下几个方面:





## 1) 减少腔的数目

高Q值的腔，具有高的分路阻抗和高的加速电场梯度，所用腔的数目可以大大减少。例如BEPCII若用常温腔需要6个，而超导腔两个就可满足要求。储存环上设备减少使得束流所见阻抗也随之减小，同时也节省了直线段紧张的空间和工程造价。



## 2) 参数优化空间大

由于**超导腔Q值非常高**，比起常温腔要高四五个数量级可达 **$10^9-10^{10}$ 量级**。从而对腔的R/Q要求可以适当降低，对腔型的优化可以有更大的空间。

对于自由电子激光，通过腔型优化可以**减小束腔相互作用**，束流质量很好的被保证；

对于B工厂，优化腔型使高次模更容易从腔内引出，**有利于高次模的深度抑制和提高束流稳定性**；

对重离子加速器，通过**腔型优化可以减小束流的损失**；

对于多cell结构，则可以**增加腔之间的耦合度**，更有利于腔之间的能量交换。



## 4) 低损耗

超导腔因为损耗低，可以在很高的腔压下连续波运行；也因为损耗低，对功率源的要求大大减低。

考虑无氧铜 ( $\rho = 1.72 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ ) 常温腔，频率500MHz，无氧铜常温腔的表面电阻为  $R_{\text{surf}} \approx 5.83 \text{ m}\Omega$ ，如果工作在1MV，R/Q 为  $200 \Omega$ ， $Q_0$  为45000，其腔耗超过100kW，对高频输入功率耦合器的陶瓷窗和功率源的要求很高。





## 二、射频超导机理和高场梯度

纯铌超导腔的**理论加速梯度**是由其临界磁场决定的，大约在**55MV/m**。可是由于不可能达到理论上的无缺陷和纯净，而这些杂质和缺陷会引起各式各样的异常损耗，影响超导腔的加速梯度和Q值。影响超导腔性能的主要**因素**：**电子倍增效应、热崩溃、场致发射、氢中毒等**。



## 1、 射频超导

直流下，材料进入超导状态后其电阻变为零，没有损耗。可是对于射频信号，当 $T < T_c$ 时，**超导体的电阻并不为零，而是存在一射频表面电阻**。该电阻由两部分组成，一部分为**BCS 电阻**，由BCS理论给出，另一部分为**材料的剩余电阻**，通常与材料所包含的杂质、材料的表面状况和环境的剩磁等有关。

$$R_s = R_{BCS} + R_0 \quad (2.1)$$

$$R_{BCS} = A_s \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta(T)}{K_B T}\right) \quad (2.2)$$

$A_s$  为与材料相关的参数（比如Fermi速度 $v$ ，London穿透深度 $\lambda$ 、相干长度 $\xi$ 及电子的平均自由程有关）， $\omega$ 为圆频率， $K_B$ 为波尔兹曼常数。



对于铌材，(2.2) 可以写为：

$$R_{BCS}[\Omega] = 8.88 \times 10^{-5} \frac{f[\text{GHz}]^2}{T[\text{K}]} \exp\left(-\frac{17.67}{T[\text{K}]}\right) \quad (2.3)$$

从式 (2.3) 可以看出，材料的BCS 电阻与频率的平方成正比，与温度呈指数衰减关系。

通常我们选择一个超导腔的**运行温度**需要考虑使**BCS 电阻**低到一个可以忍受的值。比如，对于500MHz 的超导腔，运行在4.2K 时的BCS 电阻为99.6 nΩ；对于一个1.3GHz 的超导腔，4.2K 饱和液氮浸泡其BCS 电阻为673 nΩ，将之冷却到2K 下BCS 电阻可低于20nΩ。



射频电磁场中，超导临界磁场也与直流时不一样，因为此时射频电磁场的变化周期和超导-正常态转变的时间相比拟，所以对于射频场，我们定义一个射频临界过热磁场 $H_{c,rf}$ 或者 $H_{sh}$ 。 $H_{c,rf}$ 位于上临界磁场 $H_{C2}$ 和下临界磁场 $H_{C1}$ 之间。

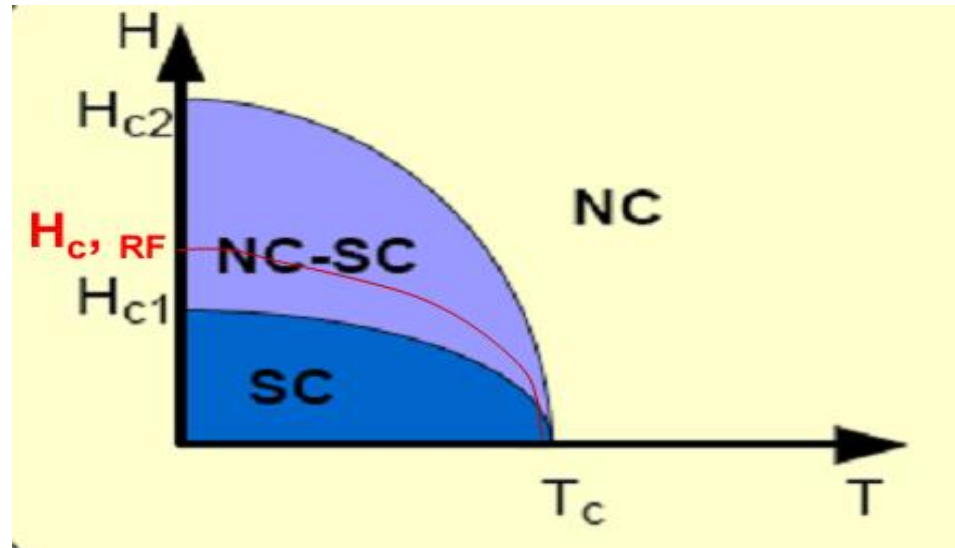


图 2.1 射频场中的过热临界磁场



## 2、 剩余电阻

试验中发现，在超导体温度低于超导转变温度以后，所测得的电阻要高于BCS理论给出的BCS电阻，这高出来的一部分必须要用**剩余电阻理论**来解释。

带来剩余电阻的原因很多，例如**化学抛光后的残留物、其他的杂质金属嵌入或者某些杂质气体的存在等**，到目前为止还不能掌握其所有的可能来源。我们所知道的**主要包括外部磁场的影响、氢化物的影响和氧化物的影响**。



## 2.1 氢对剩余电阻的影响：氢中毒

当腔的表面有氢渗入时，将对表面电阻带来巨大的影响，这通常被称为“**Q病**”。如果超导体中的**氢质量含量超过2ppm**，在降温过程中将会有很明显的氢化物形成，带来很大的表面电阻，根据氢含量和降温速率的不同，**至少带来1-2个量级的Q值跌落**。

通常对超导腔母材中氢含量的要求需低于2ppm的质量含量，可是在加工制造中，特别是酸洗过程中由于酸液温度过高（超过 $20^{\circ}\text{C}$ ），或者是产生的氢气泡未能充分引出而导致氢含量大大增加。**如果其质量含量超过10ppm，即使使用快速降温法也很难阻止氢化物的形成。**



这里要指出的是，在室温下要形成氢化物的氢含量需求非常高，但是随着温度降低，需要的氢的浓度降低。在温度高于150K 时，形成氢化物的危险还不大，但是当温度低于150K 后，形成氢化物需要的氢含量降低到一个很危险的范围，即使氢含量低于2ppm 也可能会形成氢化物小岛。如果这些小岛形成在表面，则会增大表面电阻。

当温度在150K和60K之间时，氢原子的散射非常严重，故其很容易运动并聚集成核，满足形成氢化物的临界含量。只有当温度低于60K 时，氢原子的散射才不那么严重。





因此对于一个氢含量较大的腔，在150K和60K停留的时间决定了其最后的表面电阻及品质。

虽然150K到60K的快速降温是针对“Q病”的有效办法，但最根本的方法还是尽量减小材料中氢的含量，比如通过在钛盒内高温退火去除氢杂质。

## 2.2 氧对剩余电阻的影响：Q 值跌落

在Eacc-Q<sub>0</sub> 测试中，超导腔梯度较高时，Q<sub>0</sub> 随着加速梯度的升高而降低，并且没有大剂量的X 射线出现，这种现象被称为“Q 跌落”（Q-SLOPE）。

“Q 跌落”机理尚不十分明确，但大量证据指向与铌材表面的氧化层有关，超导体表面5-10nm 的氧化层对表面电阻有一定的贡献。

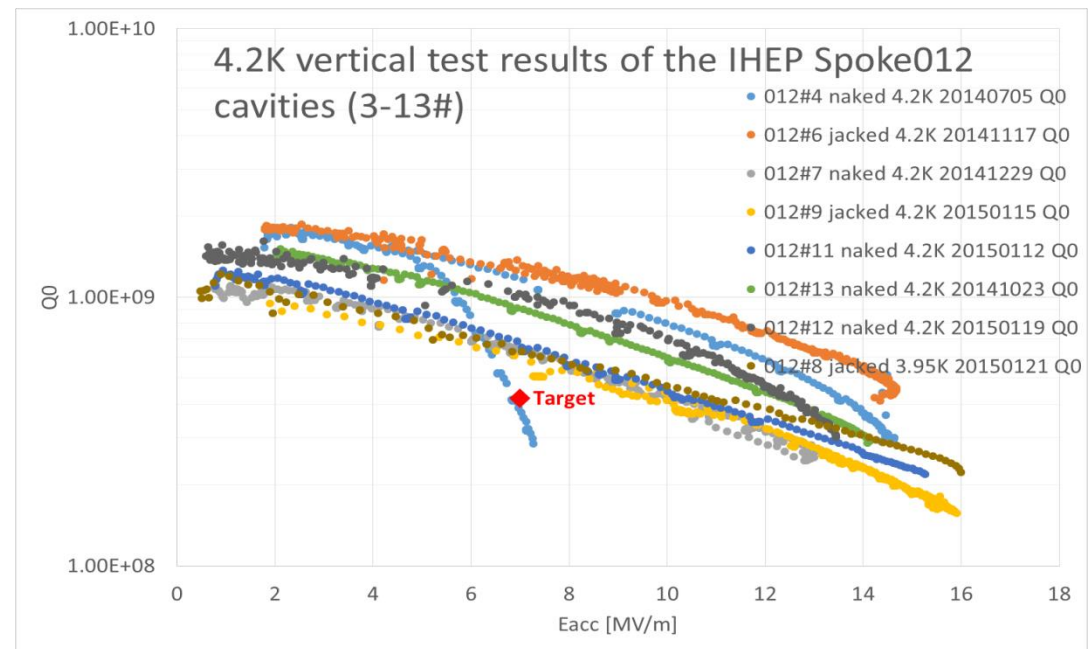


图2.2 超导腔垂直测量结果



## 2.3 电子倍增效应 (Multipacting, MP)

电子倍增效应体现在高频结构中，产生的电子吸收高频功率导致入射功率增加而场强不能提高。大量的电子撞击腔壁，使动能转化成热能，局部温度急剧升高，最终导致热不稳定。在过去很长时间内，电子倍增效应是限制腔场强提高的一个重要原因，现在可以通过优化腔型大大降低该效应的影响。

电子倍增效应引起的Q值跌落几乎是忽然发生的，似乎存在一个“坎”。对于一个 $\beta=1$ 的腔，当MP发生时，腔的入射功率、传输功率和反射功率如图2.3所示。

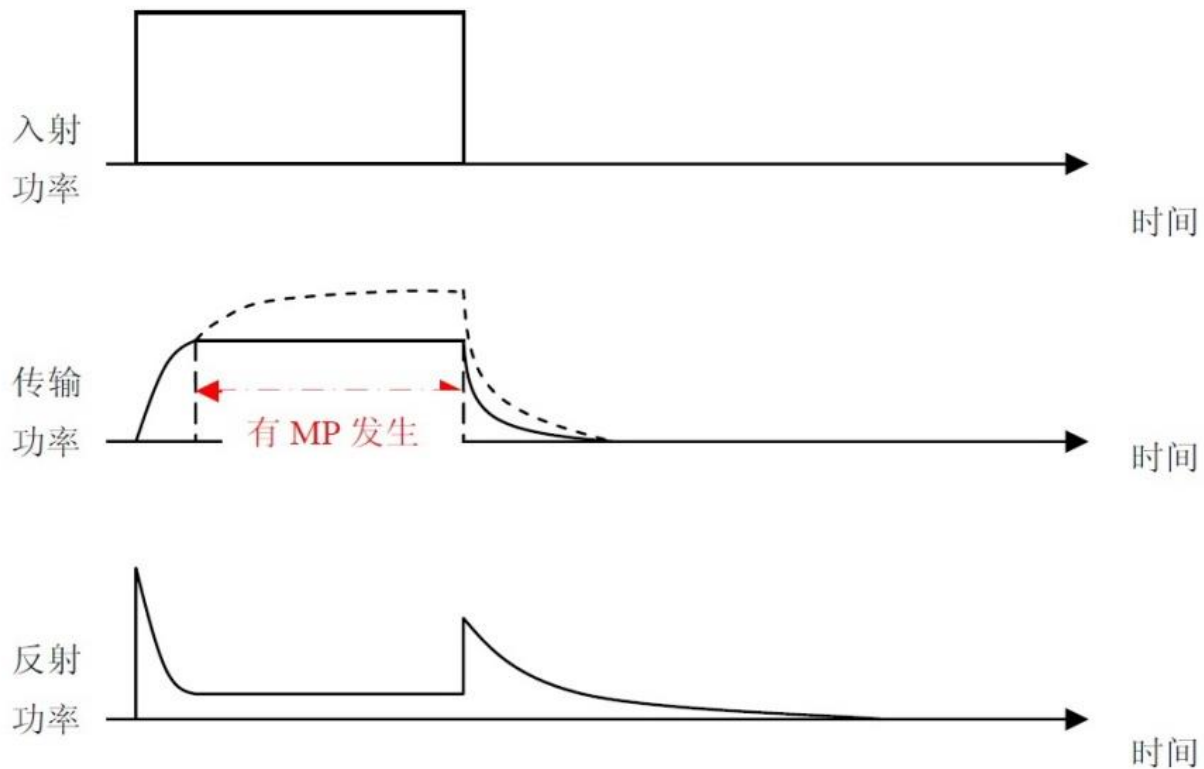
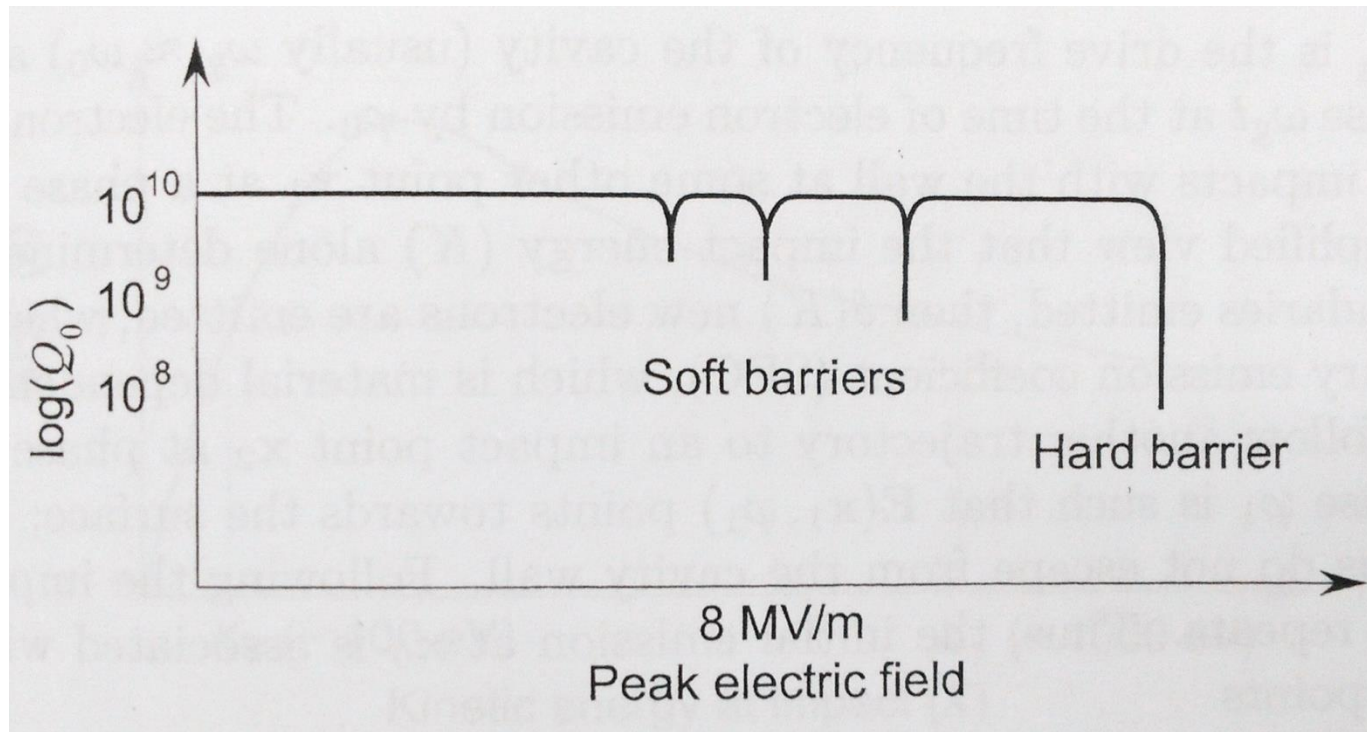


图 2.3 MP 发生时的入射、反射和传输功率





很多情况下，MP 导致的Q 值下降可以通过高频老炼克服。能够通过老炼克服的MP，被称为“软MP”，不能通过老炼克服的MP被称为“硬MP”。





所以，当一个腔第一次建立电场时，需要逐渐的提升功率克服“软MP”以建立更高的电场。经验表明，经过老炼克服了的MP在腔的真空没有被破坏的情况下即使放置很长一段时间也不会再出现，但如果暴露大气后则很可能再次出现，这说明MP强烈依赖于腔的表面状况。



**MP 基础理论：** 一个被大家普遍接受的MP 解释是：超导腔表面逃逸出来的电子，被加速场加速后再次撞击腔体内表面产生更多二次电子。产生的二次电子的数目依赖于材料的特性以及入射电子的能量。这些二次电子又被加速后撞击腔表面，产生更多的次级电子，该过程不断循环，被称作电子倍增效应。



下面讨论一下电子沿什么样的轨迹运动将会导致MP。设一个电子产生的初始位置为 $x_0$ ，腔内的rf场为：

$$E(x, t) = E(x)\sin\omega_g t \quad (2.4)$$

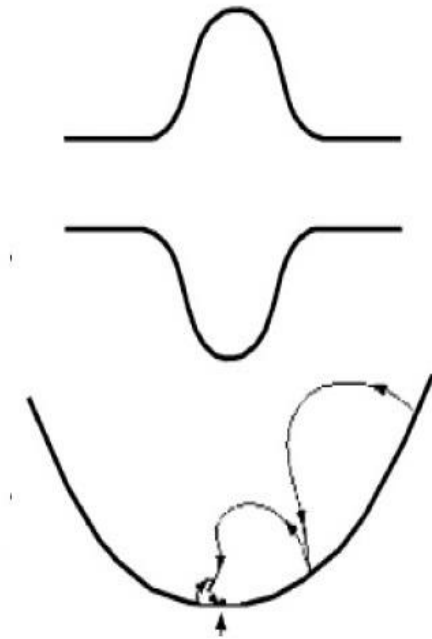
$$H(x, t) = H(x)\cos\omega_g t \quad (2.5)$$

其中， $\omega_g$ 为腔的驱动频率，通常 $\omega_g \approx \omega_0$ ，定义电子的初始相位为 $\Phi_0$ 。





电子被加速后第一次撞击腔壁时的位置和相位分别为 $x_1$ 和 $\Phi_1$ ，产生的二次电子的数目此时仅与电子的能量 $K$ 有关，此时将有 $\delta(K)$ 个二次电子产生， $\delta(K)$ 为材料的二次电子发射系数（SEC）。所有的二次电子又重复初始电子的运动过程，于是有了更多的入射点， $x_1$ ， $x_2$ ， $x_3$ ……和入射相位 $\Phi_1$ ， $\Phi_2$ ， $\Phi_3$ ……。



(d) 椭球形腔内的MP



这个过程将一直持续到第 $k$ 步，此时电子被束缚不能从腔表面被激发出来。如果没有第 $k$ 步存在，MP就发生了。

MP是否出现依赖于表面的材料性质，即二次电子发射系数 $\delta(K)$ 。在经历 $k$ 步后产生的电子数 $N_e$ 为：

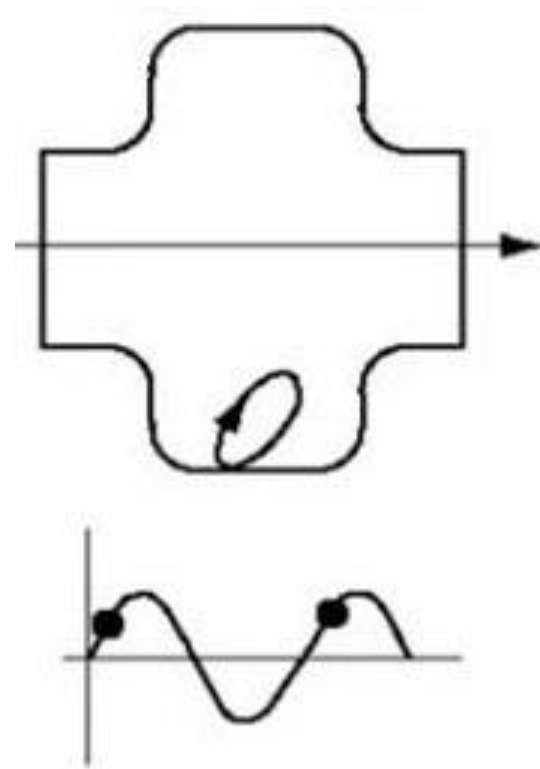
$$N_e = N_0 \prod_{m=1}^k \delta(Km) \quad (2.6)$$

其中， $N_0$ 为初始电子的数目。

当 $k \rightarrow \infty$ ， $N_e \rightarrow \infty$ ，则发生了MP，此时 $\delta(K) > 1$ 。

## 克服 MP 的办法:

对于 $\beta=1$ 的超导腔，最常见的就是单点式MP：二次电子轰击腔表面的位置就是或者很接近它产生的位置，电子被垂直于腔表面的电场加速同时被表面磁场偏转使之回到起点形成一个闭合轨迹，形成单点式MP。简单考虑单点式MP，高频电场周期必须是电子回旋周期的整数倍，这样 $\Phi_1=\Phi_0$ ，并且 $\delta(K) > 1$ 。



电子回到起始位置需要经历的高频周期被称作单点式MP的阶数。如图2.4所示，一阶单点式MP的轨迹是一个闭合曲线，二阶单点式MP的轨迹像一个“8”字形，以此类推。

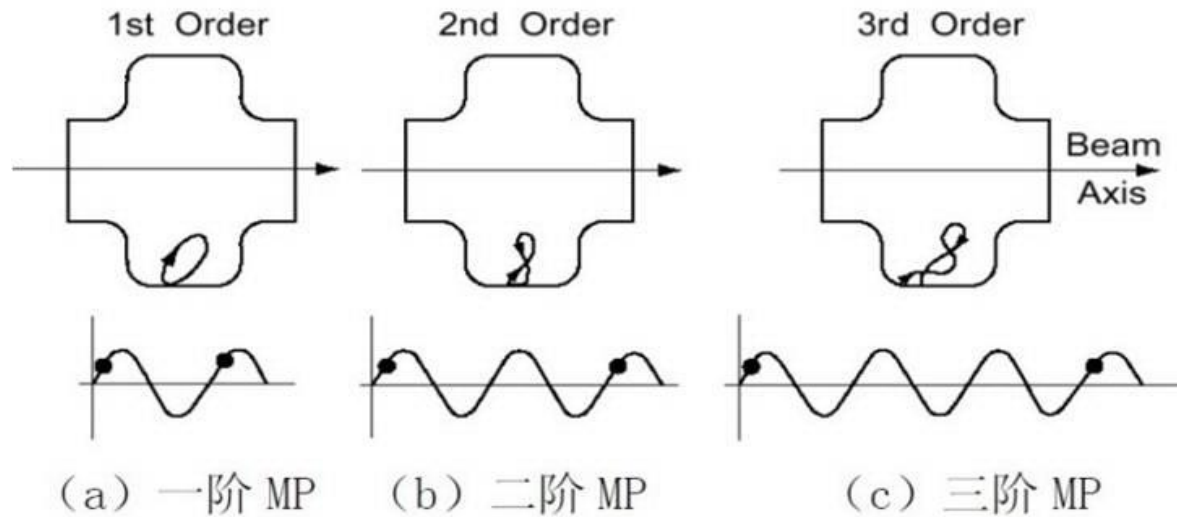
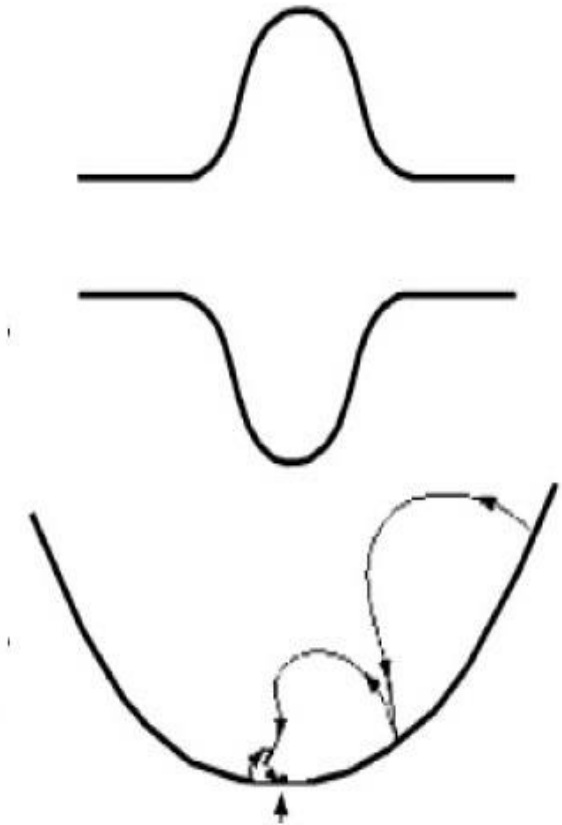


图2.4 单点式MP



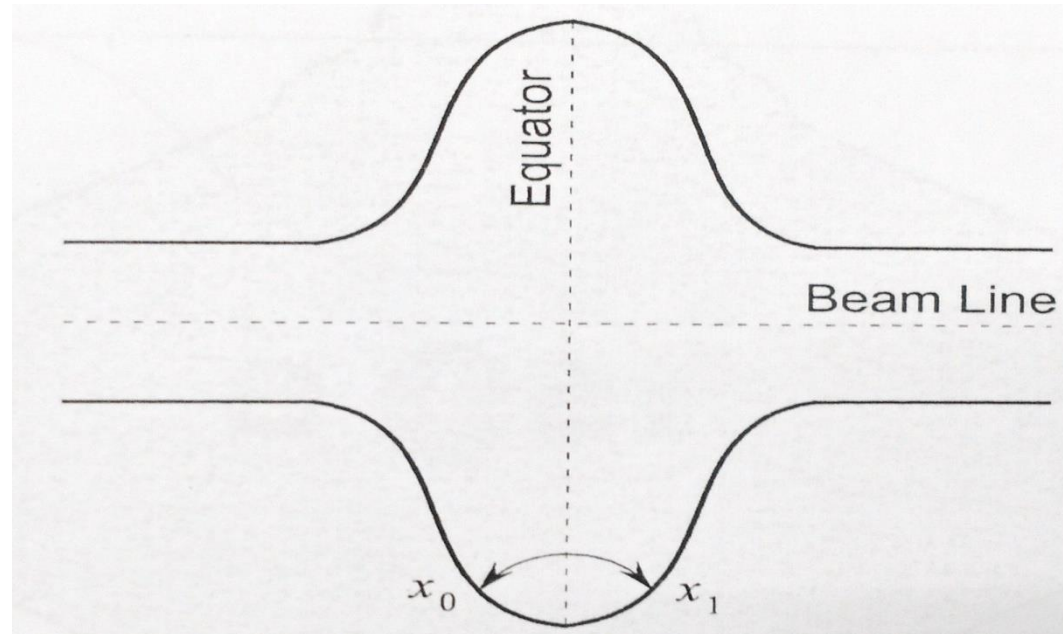
最有效的消除单点式 MP 的办法就是**优化腔型，设计球形或者椭球形的超导腔**。对于球形和椭球形的超导腔，沿腔壁磁场非均匀分布，这样电子轨道不再稳定，最后将漂移到赤道附近。在赤道垂直于腔壁的电场强度为零，电子将不再获得能量而被俘获，MP 现象被消除。图2.4 (d) 显示了椭球腔中的一点式 MP 的消亡过程。



(d) 椭球形腔内的 MP



另一种形式的MP 是两点式MP。在两点式MP 中，在 $x_0$  和 $x_1$ 两个对称位置上，不断有电子产生轰击腔表面，两点式MP 需要的谐振条件是  $T_{MP} = \frac{2n-1}{2} T_{rf}$ ，其中 $n$ 为两点式MP 的阶数。





我们可以这样考虑两点式MP，当电场反向时，在 $x_0$ 处有二次电子产生，当电场再次反向时，该电子正好运动到 $x_1$ 轰击腔表面，如果 $x_0$ 和 $x_1$ 处于对称位置上，则在 $x_1$ 处产生的电子将返回 $x_0$ ，然后形成新的循环，即产生的两点式MP。



除了超导腔，对于其他的高频元件，比如**耦合器**，**低 $\beta$ 腔**，**同轴传输线**等两点式MP也不可忽略。

有效的降低MP的方法除了上面提到的通过优化腔型减小一点式MP外，还可以通过**选择低 $\delta$  (K) 的材料**、**细致的表面处理**和**高频老炼**等方式。



## 2.4 热崩溃 (thermal breakdown)

热崩溃，又叫热不稳定性或者 **quench**，通常是由腔表面的缺陷引起的。一种缺陷是腔内表面的一些尖锐突起、坑或者沟、划痕、焊接时的飞溅等，**超过 0.1mm 的表面粗糙度就会放大缺陷处的表面磁场**；另一种缺陷是化学抛光残留物、灰尘等镶嵌在**超导腔内表面的外来杂质**。在直流情况下，超导电流流经缺陷时会绕过缺陷沿电阻最小即超导部分流动；可是在射频频情况下，**射频电流会通过缺陷并产生焦耳热**。



如图2.5所示，当缺陷外缘的温度超过材料的超导转变温度 $T_c$ ，缺陷处就失去超导特性变为常导态，在这里会有大量的功率消耗，常导区域随之增大，最终可能导致热崩溃。

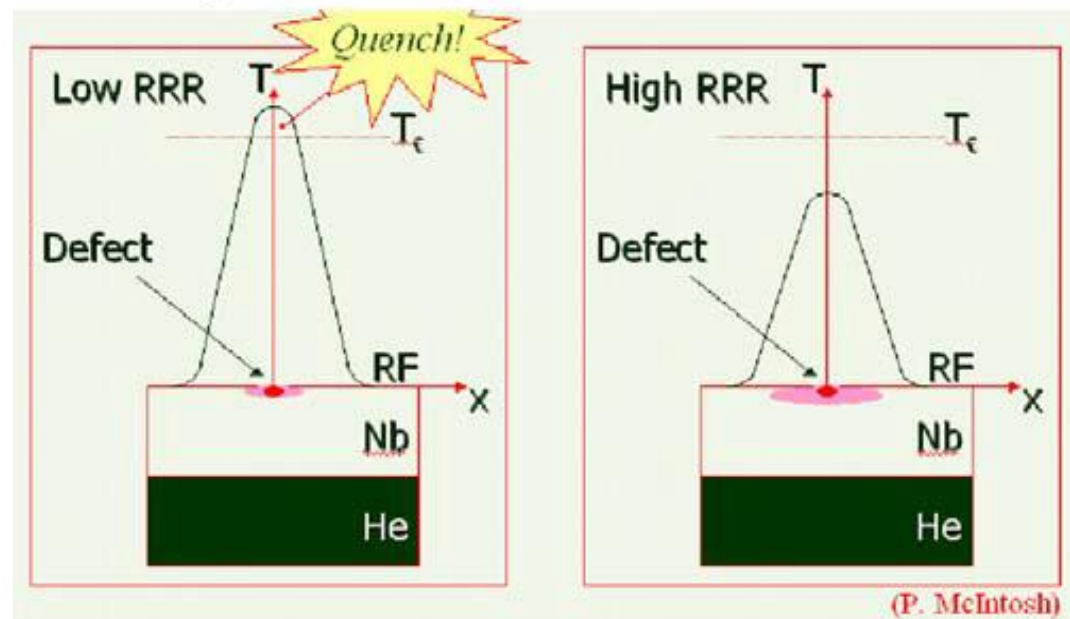


图2.5 射频场带来的热不稳定性



## 解决热崩溃的方法

超导体的热导和超导体的纯度密切相关。一般用RRR值来表示超导体的纯度,RRR定义为:

$$RRR = \rho_{293K} / \rho_{4.2K}$$

其中 $\rho$ 为电阻率。为了测量上的方便,常用 $\rho_{9.3K}$ 来代替 $\rho_{4.2K}$ ,即 $RRR = \rho_{293K} / \rho_{9.3K}$ 。

超导体的热导和其RRR值有如下关系: $k \approx 0.25RRR$ 。热击穿场( $H_{max}$ )阈值随RRR的增大而增大。超导腔的热击穿常常发生在腔的高磁场区。

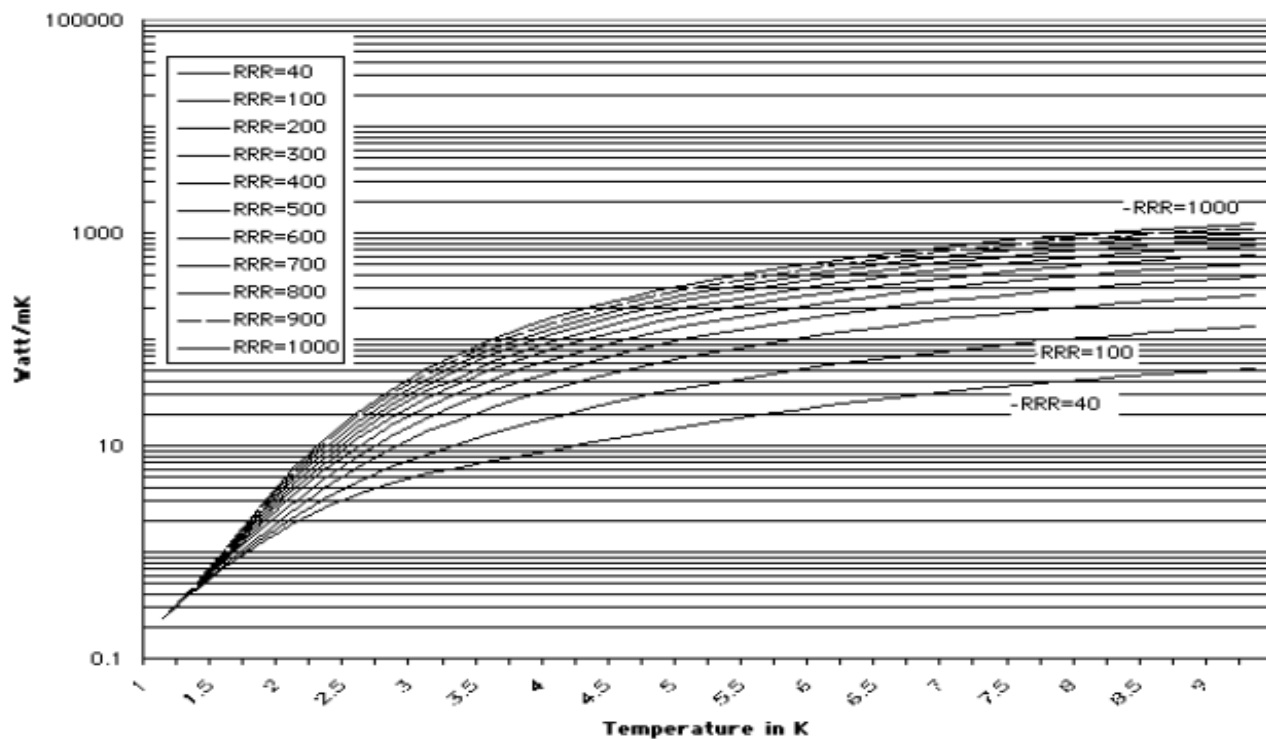


图 2.7 铌材的热导率 与RRR 的关系



## 2.5 场致发射 (field emission, FE)

热崩溃现象主要是受表面磁场的限制而发生，而场致发射则主要受表面电场限制。

场致发射在电场梯度较高的时候发生，在很长一段时间内是限制超导腔梯度提高的主要原因。当腔的加速梯度提高时，其品质因数则呈e指数降低，并且伴有大量的X射线放射。

与电子倍增效应不同，场致发射发生的梯度并不确定，而发生的时候，只要增加入射功率，腔的梯度还能缓慢提高，但因为大量电子轰击腔表面，导致局部温度升高并扩大到更多地方，严重时导致失超。



有很多手段可以检测场致发射的发生，在束流中心轴线附近放置探针可以探测到电子流；腔壁外的X射线探测器可以探测到电子轰击腔表面时产生的X射线；腔壁外安装的T-mapping 温度传感器可以检测FE 发生时的电子轰击腔表面时产生的温度升高。通过T-mapping 可以很清楚的看到**FE主要发生在表面电场很高的区域。**

腔在第一次建立电场的时候，通常需要一定时间的老练降低FE。通过老练，FE导致的失超可能被克服，但是当加速梯度进一步提高，FE 可能再次出现。





场致发射发生的机理：研究表明，腔表面微米尺度的金属杂质是引起场致发射的主要原因，但是并不是所有的微米尺度的杂质都会引起场致发射，只有5-10%的这些杂质会引起FE。



HPP 的一个很大的优势在于它可以处理由于真空破坏等原因导致的腔性能下降问题。但是，通过 HPP 提高了加速梯度，但腔的  $Q_0$  可能会因为大量的被烧掉的场致发射点的熔融小坑而降低。对于熔融的小坑，也曾有过担心：这些小坑会不会引起热崩溃？但大量的实验证明这个担心是多余的，因为大多数小坑的直径都在  $10\mu\text{m}$  以下，根据前面对热崩溃的讨论可以知道这么小的缺陷一般不会引起热崩溃。但是，还是要在 HPP 时逐步提高功率，以免形成更大的缺陷。



## 2.6 影响超导腔性能的因素小结

超导电流仅在腔表面数十纳米范围内流动，所以表面状况决定了一个腔的最后性能。材料中溶解的杂质、加工中引入的缺陷、化学清洗后残留的物质、装配时掉入的灰尘等颗粒都是影响超导腔性能的缺陷。图2.8所示为超导腔表面可能的缺陷。



### 三、射频超导腔——射频超导加速器

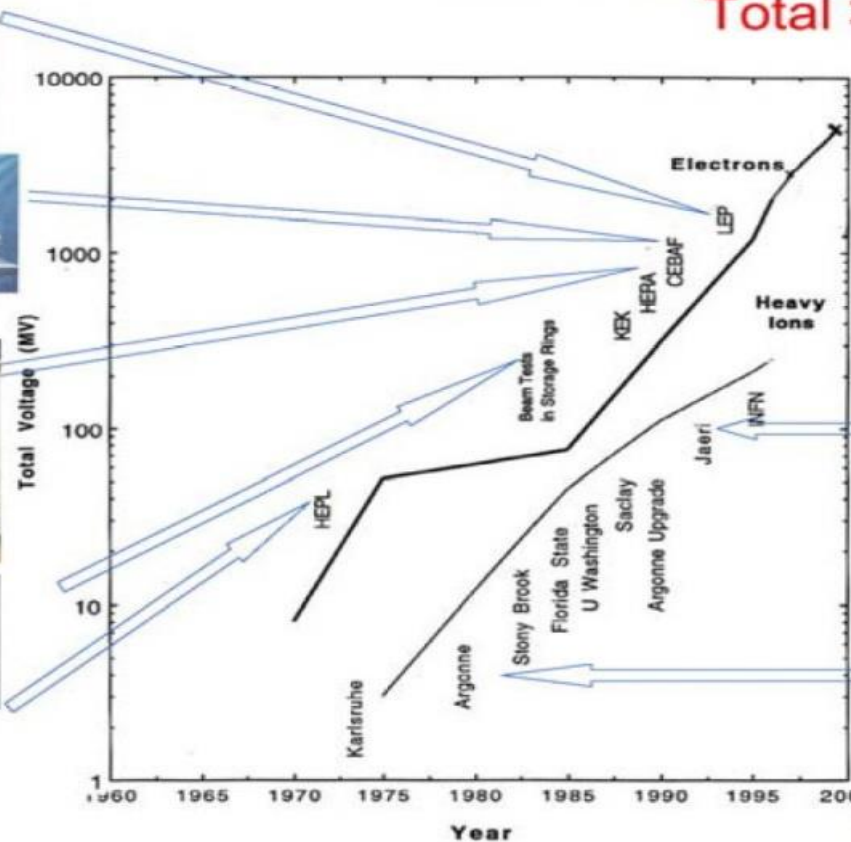
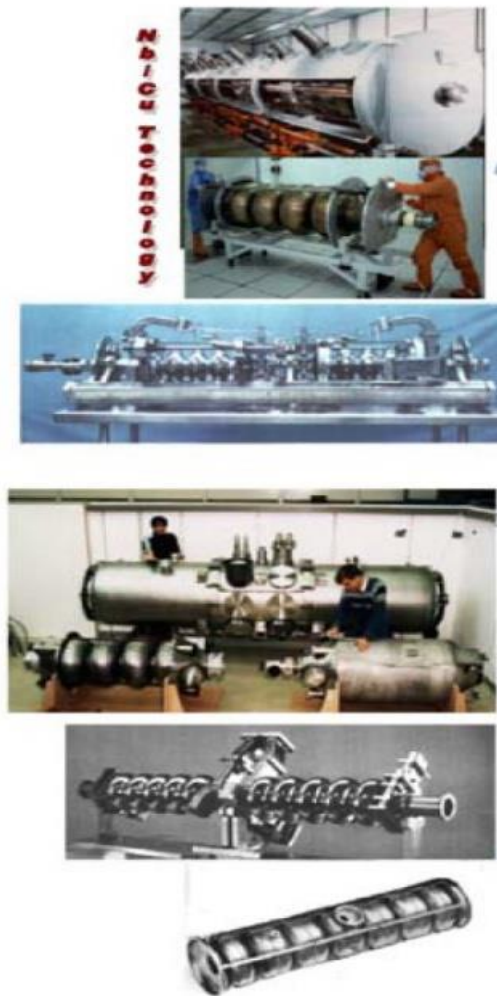
如图1.1所示，世界上有形形色色超导腔，按照加速能量范围不同，高 $\beta$ 、中 $\beta$ 和低 $\beta$ 三类；按照材料的不同，可以分为纯铌腔（大晶粒、细晶粒和单晶）、镀膜腔；按照单元数的不同，可以分为单cell腔和多cell腔；按照腔型的不同，有椭球腔、轮辐腔、RFQ结构腔、锥形螺旋线结构腔等。



# Livingston plot for SRF cavities

Courtesy H. Padamsee

Total >1000 meters  
> 5 GV



CORNELL UNIVERSITY

图 3.1 应用于世界不同加速器装置上的形形色色超导腔



**超导直线加速器：**一种是追求高加速场梯度(如ILC)，并希望提高加速间隙占整个直线节的比率,还有一种追求腔的高Q值比如上海硬X射线自由电子激光项目（有600只以上的腔，需降低低温系统的要求，节省造价）。

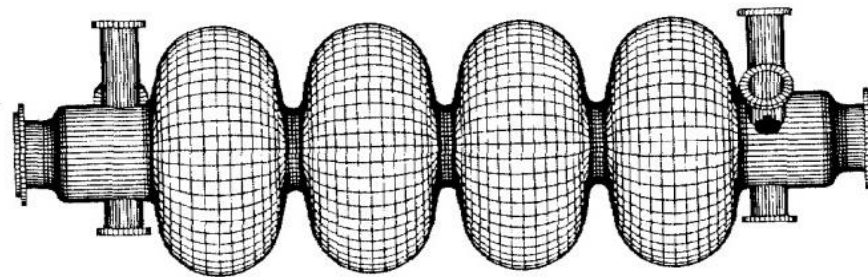




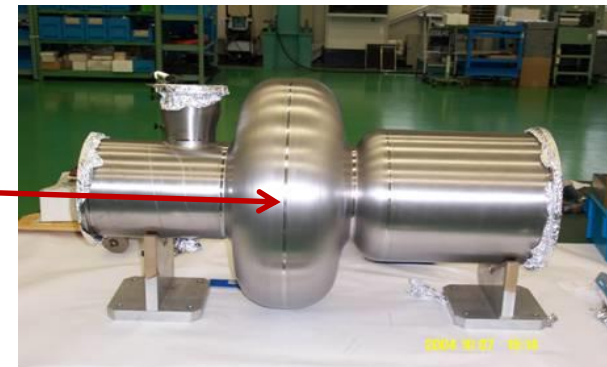
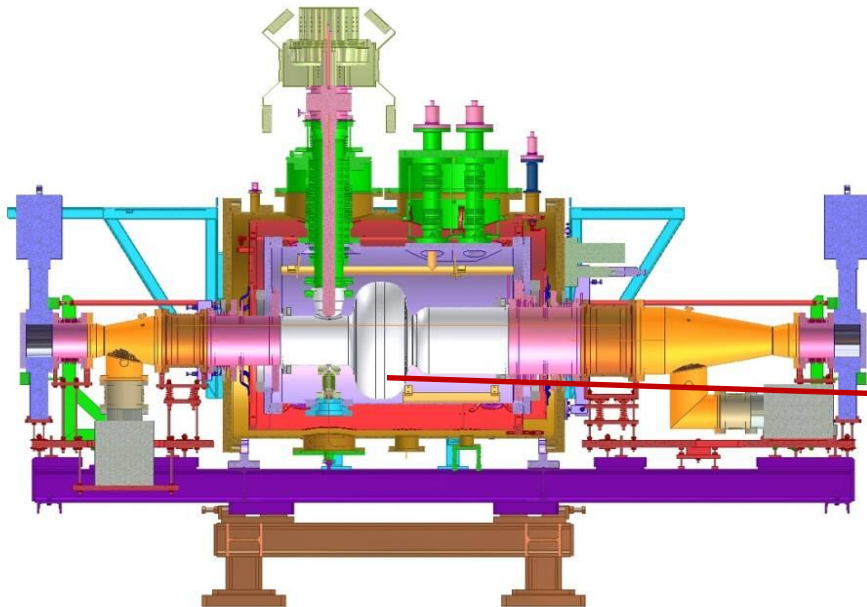
储存环情况：目前在加速器所追求的高能量和高流强这两个发展方向，它们所使用的腔型结构也存在着一些差别。但无论如何，环形加速器的同步辐射的能量与粒子能量的四次方成正比。

$$U(\text{keV} / \text{turn}) = 88.5E^4(\text{GeV}) / \rho(\text{m})$$

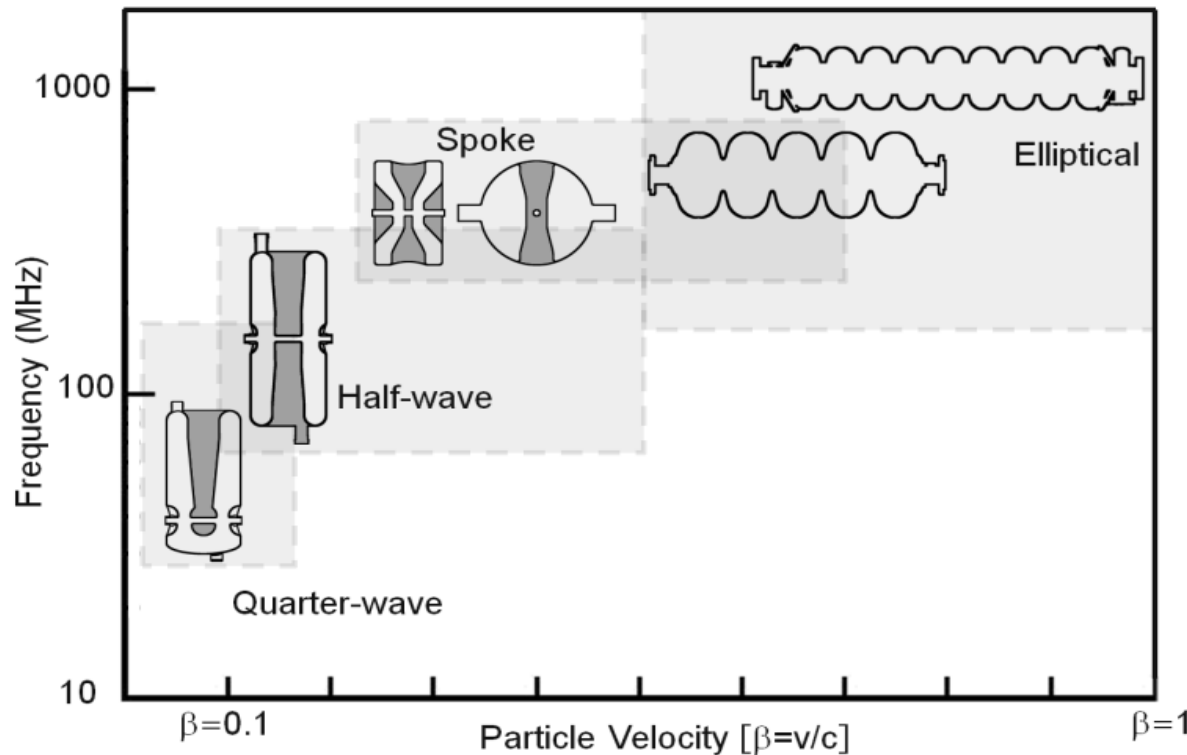
(1) 对于追求高能量的加速器来说，为了补偿带电粒子每圈同步辐射能量损失，通常使用multi-cell的串腔结构，比如KEK的Tristan，DESY的HERA和CERN的LEP II环，它们分别采用了5-cell、4-cell和4-cell超导串腔。



(2) 另一方面，对于追求高亮度的强流加速器来说，深度抑制高次模，提高环中存储束流的流强阈值是腔型选择需要首先考虑的问题。因此常常采用带有大束流孔径的超导腔。



超导腔按照所加速粒子的能量范围可以分为高 $\beta$ 、中 $\beta$ 和低 $\beta$ 三类。高 $\beta$ 腔加速电子或者高能质子；中 $\beta$ 腔 ( $0.2 < \beta < 0.7$ ) 用来加速能量低于1GeV 的质子和重离子；低 $\beta$ 腔用来加速各种重离子和低能质子。







下面重点对高 $\beta$ 腔进行讨论:

高 $\beta$ 腔通常运行在TM<sub>010</sub>模式, 多cell腔相邻cell之间的相位差为 $\pi$ , 这样可以保证电子通过超导腔时始终能保持在加速相位。





在选择腔型结构尺寸时，超导腔性能参数优化的目标如下：

- ① 降低腔中寄生模的品质因子
- ② 降低腔的宽带阻抗损耗因子  $k_{\text{broadband}}$
- ③ 在一定频率下，腔加速梯度最大化
  - a) 优化加速模式的  $T_s$  和腔的加速间隙  $\text{Gap}$
  - b) 降低加速模式的  $E_{\text{pk}}/E_{\text{acc}}$  及  $H_{\text{pk}}/E_{\text{acc}}$
- ④ 提高加速模式的特性阻抗  $R/Q$



单cell 超导腔主要应用于高流强的环形对撞机和同步辐射光源，束流从两端束管进出，高功率耦合器从束流管道往腔内馈送功率，束流管道上还有高次模吸收器用来吸收无用的高阶模，另外还有一个小口安装有探针从这里将腔内的信号引出给低电平系统实现闭环控制。

国内外电子环形加速器已经投入使用的单CELL超导腔主要有三种，分别为美国Cornell CESR 型、日本KEKB 型以及法国SOLEIL型。三种超导腔如图3.3 到图3.5 所示。

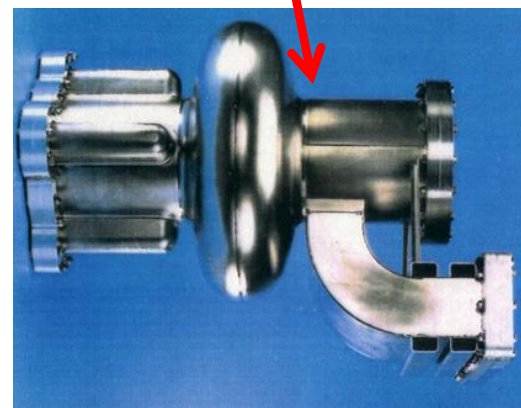
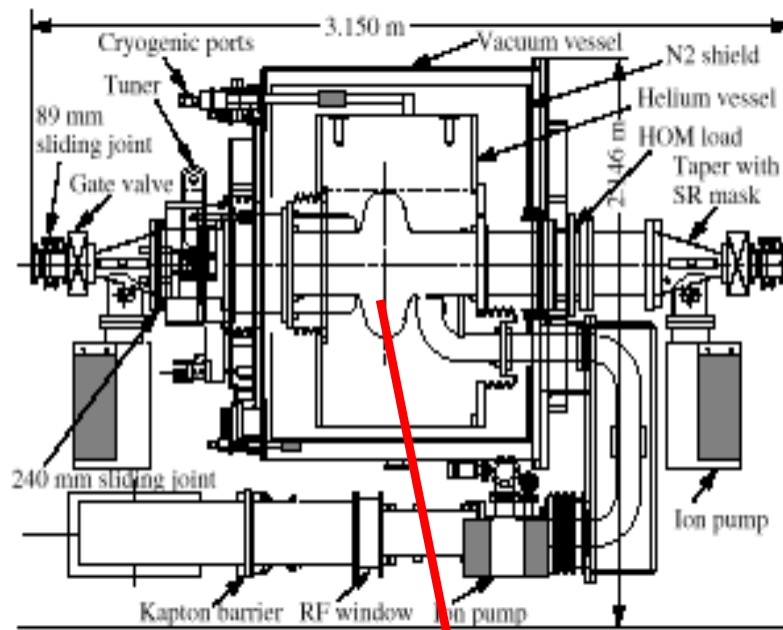


图3.3 美国CESR 型500MHz 超导腔



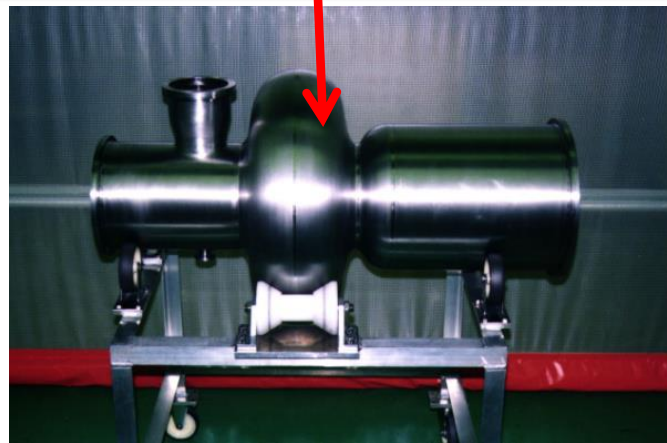
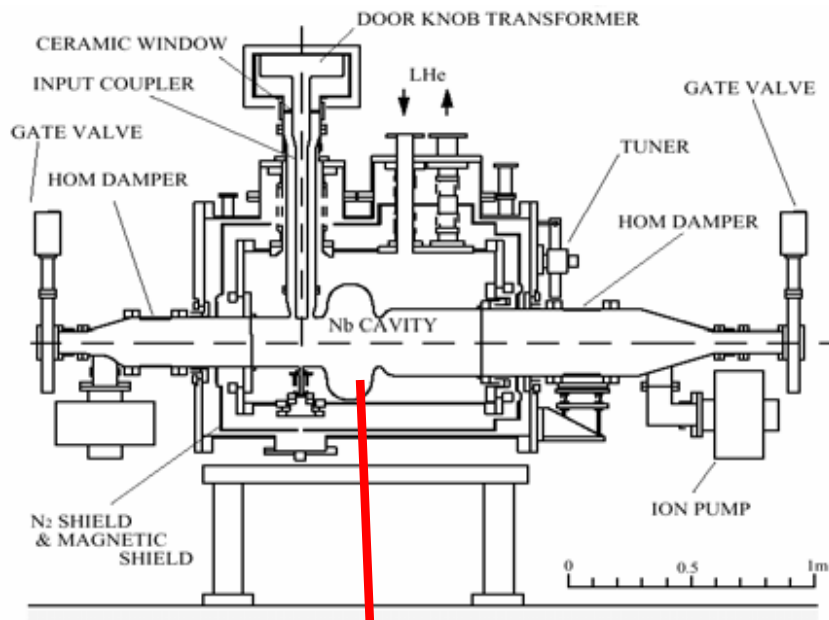
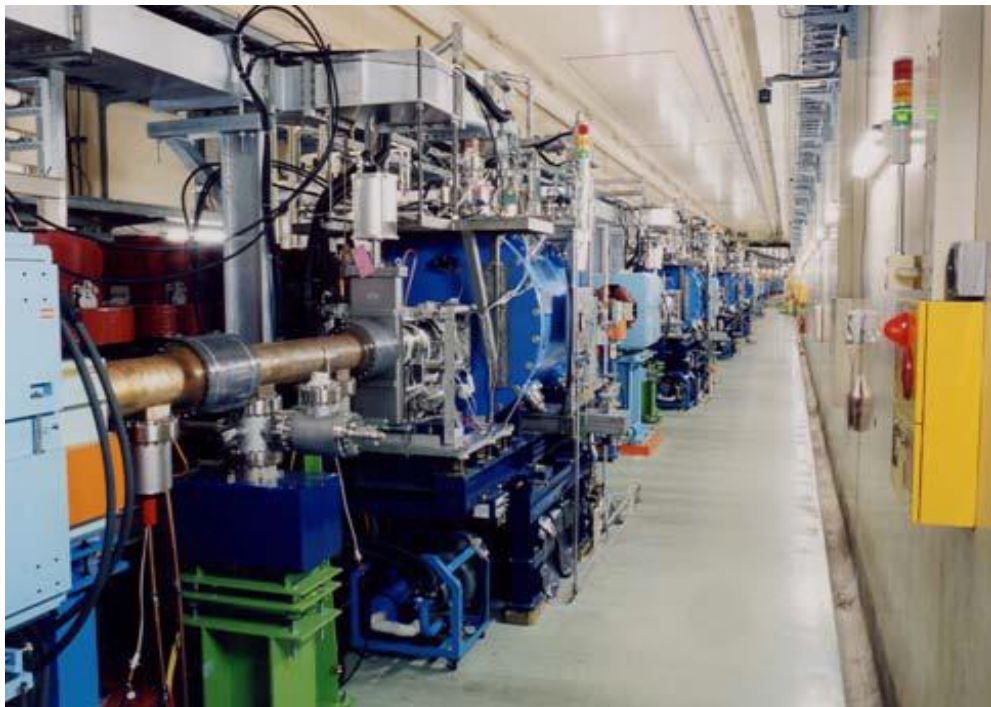


图3.4 日本KEKB 型500MHz 超导腔

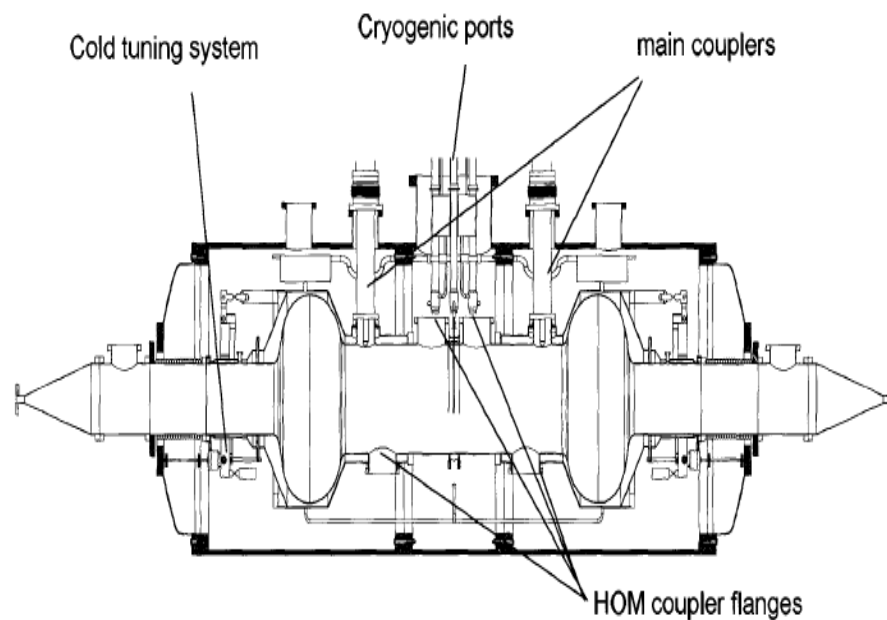


图3.5 SOLEIL352MHz 超导腔

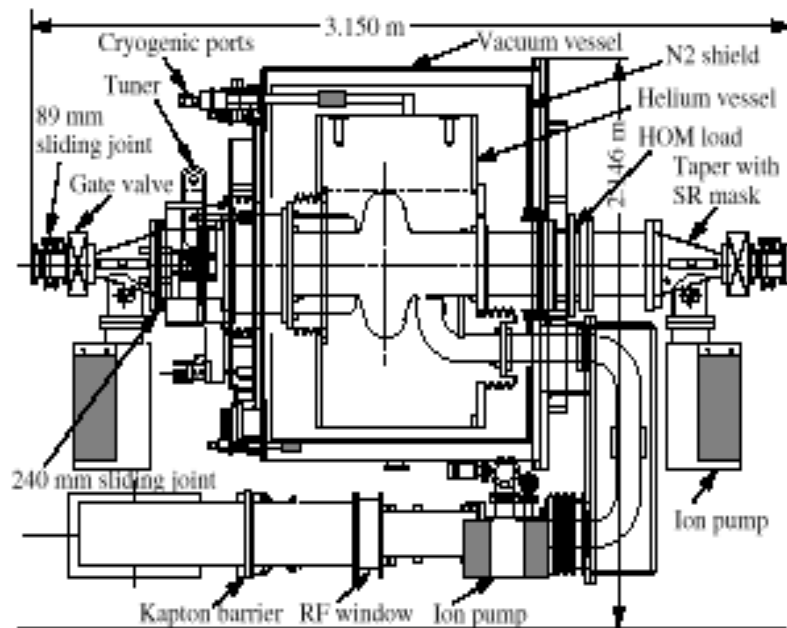




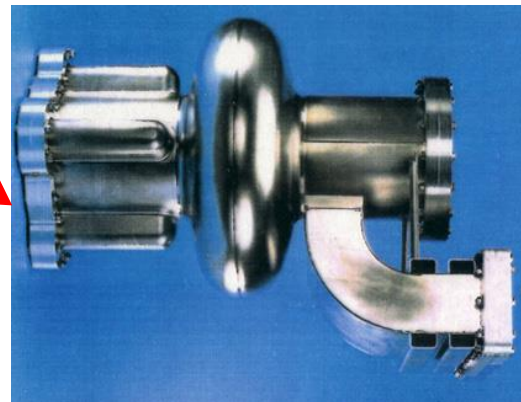
表3.3 世界上使用工作频率为500MHz 附近超导腔的装置

	腔频率 (MHz)	流强/能量	环周长 (m)
TLS(台湾)	499.654	240 mA/1.5 GeV	120
CLS(加拿大)	~500.0	500 mA/ 2.9 GeV	170.88
SINAP(上海)	499.654	200-300mA/ 3.5 GeV	432
BEPCII(北京)	499.8	250 mA/ 2.5GeV 910mA/1.89GeV	240.4
SOLEIL (法国)	352	350 mA /2.75GeV	354

# 上海同步辐射光源（中科院上海应用物理研究所）



3个超导高频腔



上海应用物理研究所用深冲压成型结合高真空电子束焊接的方式成功研制出两支500MHz 单cell 超导腔，经过表面处理后垂直测试结果满足设计要求，为 $Q_0 > 1E9 @ 7.5MV/m$  和  $Q_0 > 4E8 @ 10MV/m$ 。



图3.6 应物所研制的500MHz超导腔

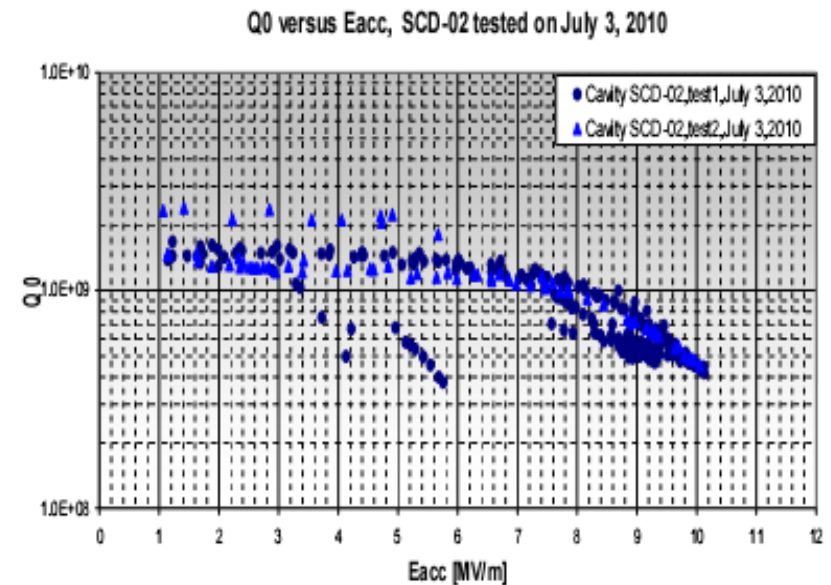


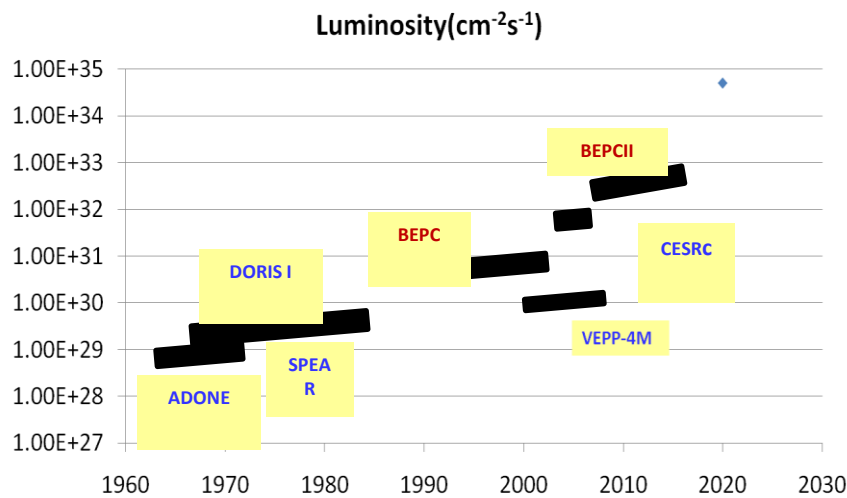
图3.7 500MHz腔垂直测试结果



# 北京正负电子对撞机 (BEPC) 是我国第一台大科学装置, 被称为中国继“两弹一星”后最重大的科学工程。

## BEPC重大改造工程 (BEPCII) 再铸辉煌

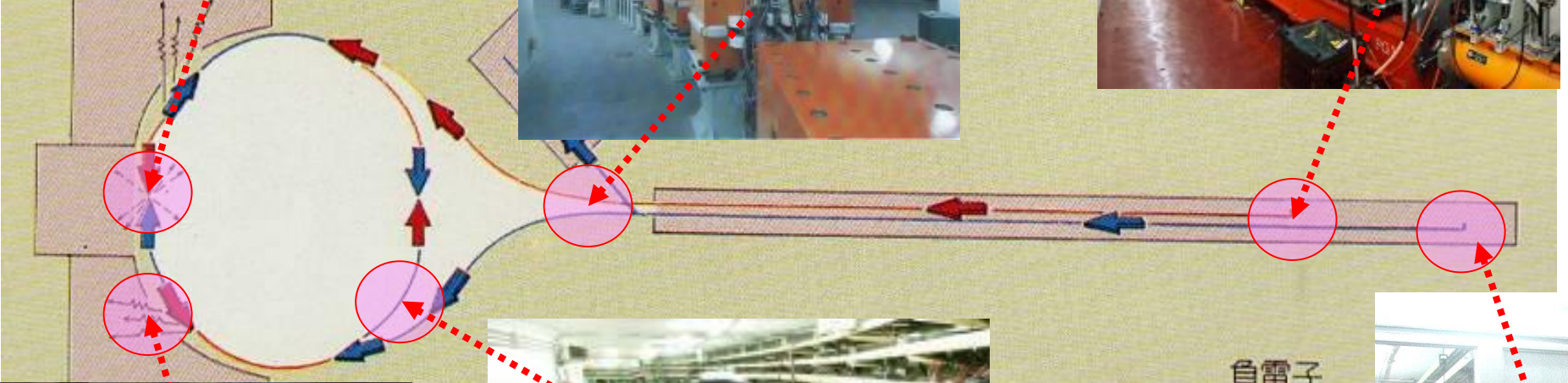
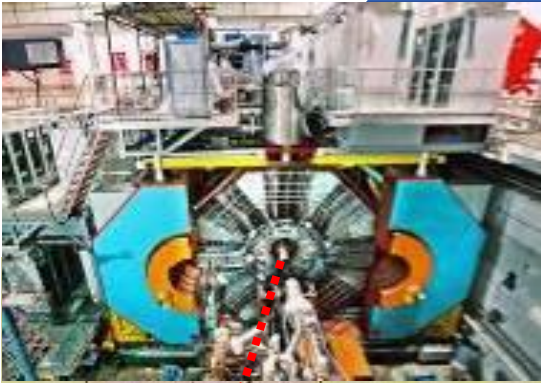
- ✓ 2004年, BEPCII正式动工
- ✓ 2008年7月19日, BEPCII调试成功
- ✓ 2009年7月17日, BEPCII通过国家验收



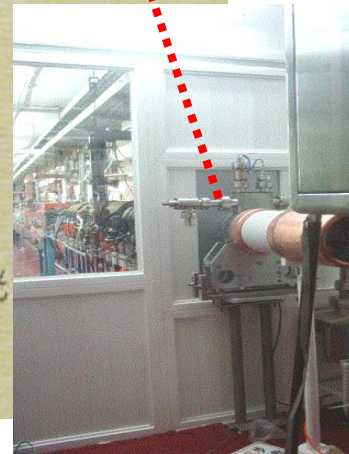
每年运行10-11个月, 24小时连续运行。



# 北京正负电子对撞机

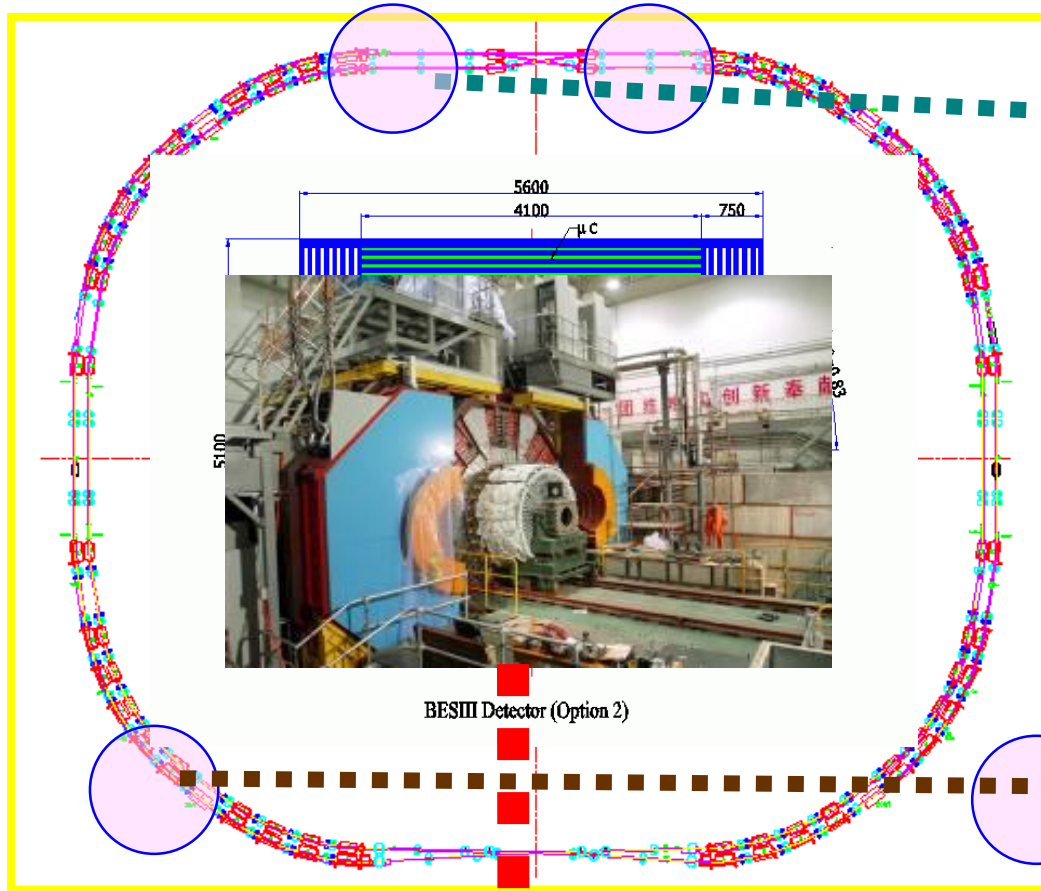


负电子  
electron  
正电子  
Positron  
同步辐射光  
SR Light





# BEPCII: 双环结构高亮度正负电子对撞机





2007年3月，中国科学院高能物理研究所正负电子对撞机（BEPCII）储存环中正负电子能够同时积累成功对撞，5月流强超过改造前的BEPC 达到100mA；2009年5月，在1.89GeV 能量下对撞亮度达到 $3.01 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，通过了国家验收；目前达到改造前的100倍，每台超导腔均达到1.5MV腔电压下900mA束流运行、高频功率超过130KW。取得的这一成绩与超导腔的采用是分不开的。

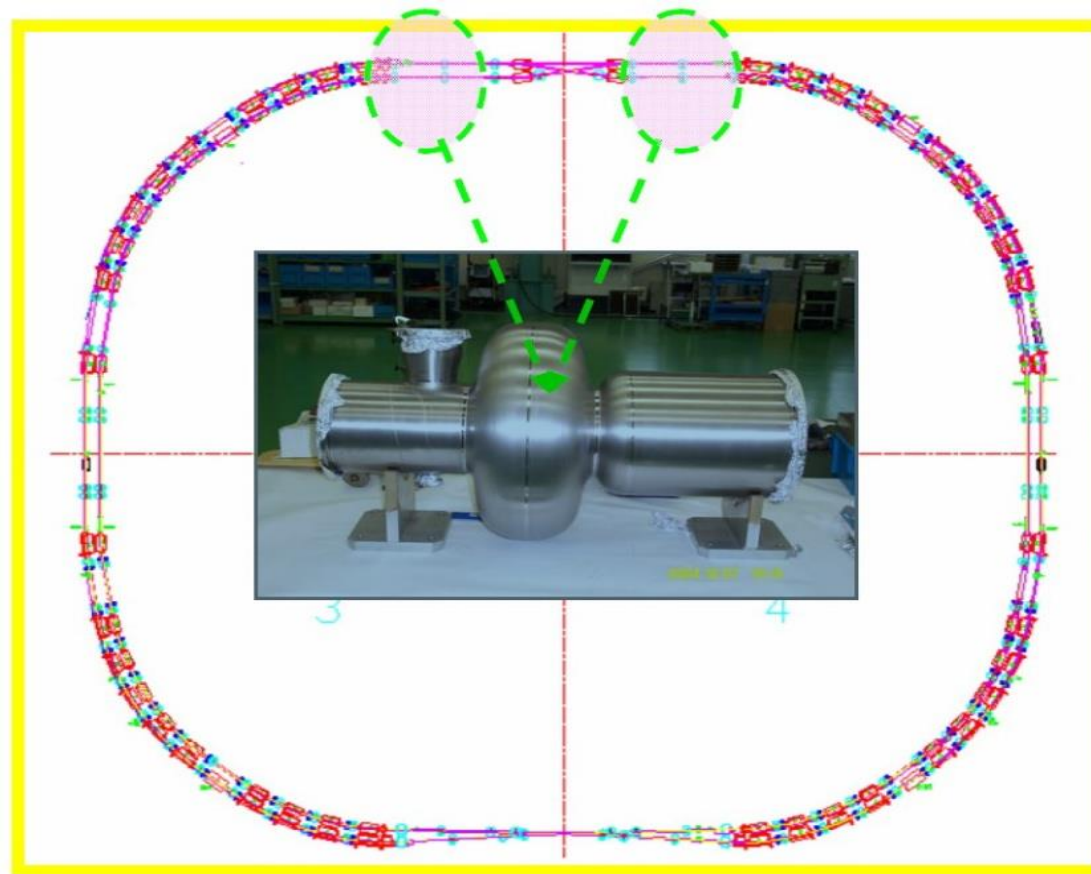


图3.8 BEPCII 环上的超导高频腔



超导高频加速腔的故障带有一定的突发性，特别是高功率陶瓷部件和低温真空密封部位是薄弱环节，故障发生几率比较高。因此，在BEPCII 转入调束运行阶段后，开始了500MHz超导腔的自主研发。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。

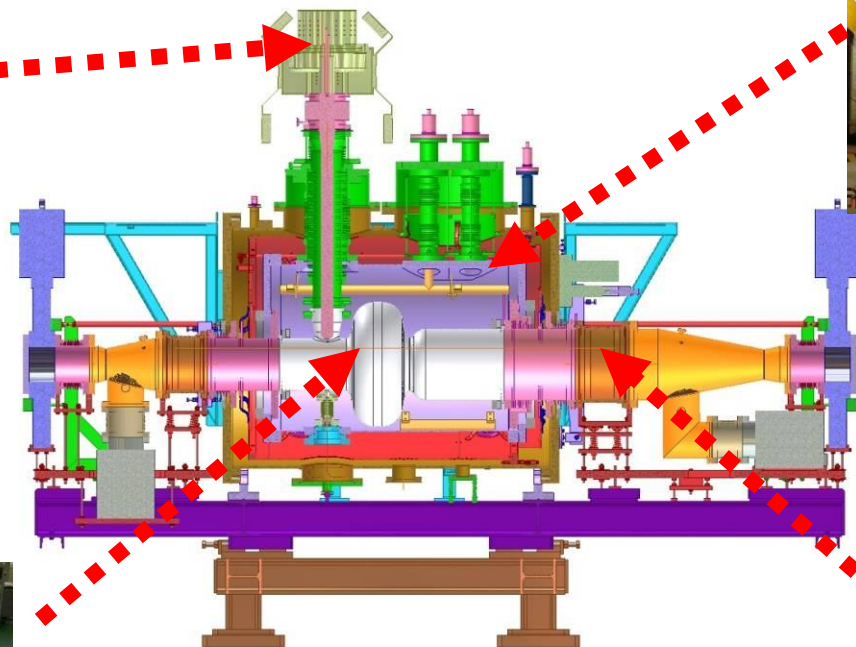
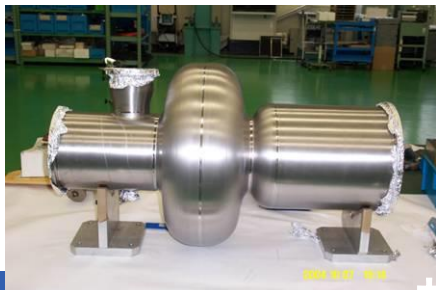


超导备用腔是一个综合的系统：包括**铌腔、高功率输入耦合器、高次模抑制器以及恒温器**等关键部件。

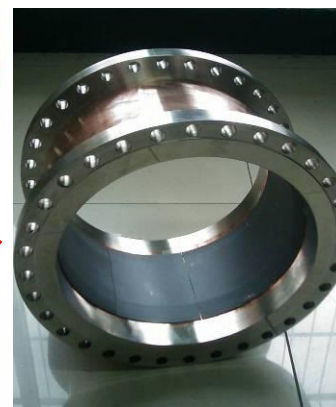
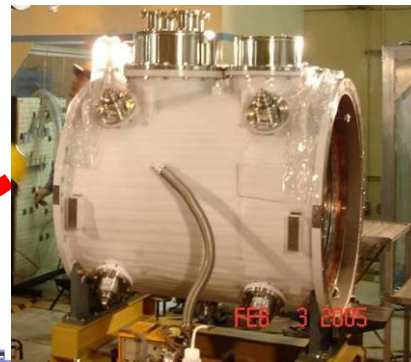
高功率输入耦合器



超导腔腔体



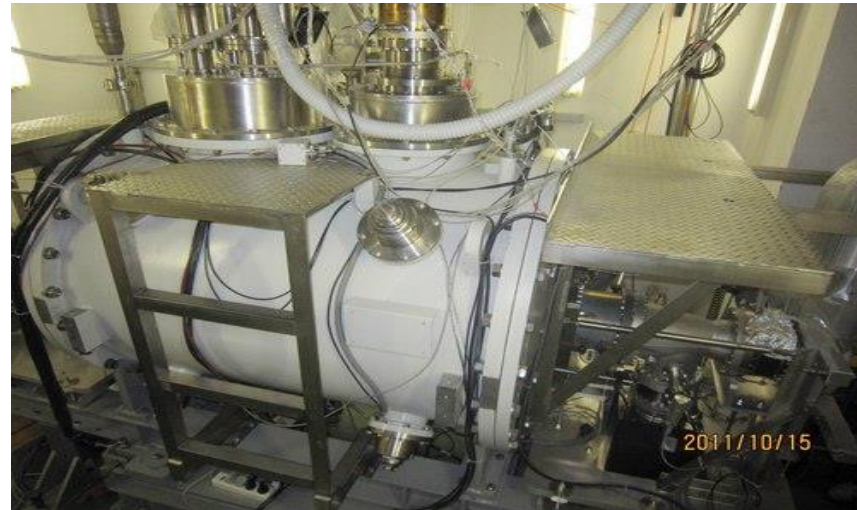
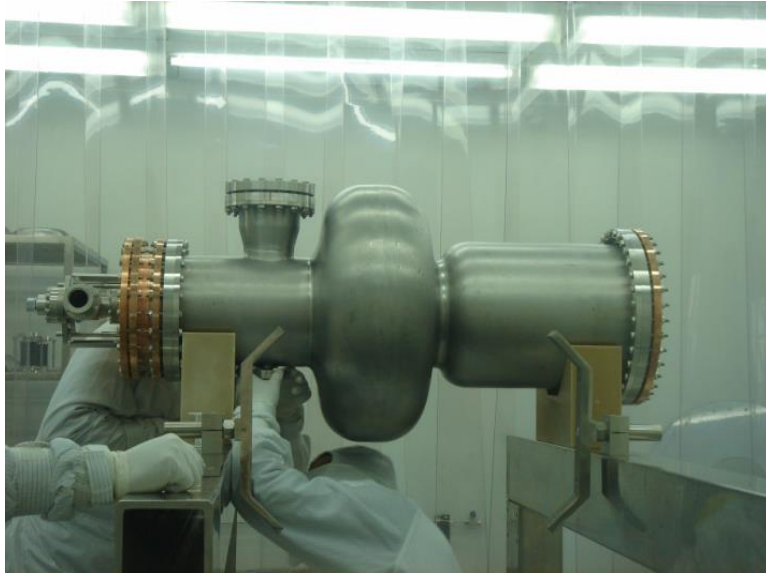
恒温器



高次模吸收器

图3.9 超导备用腔组成





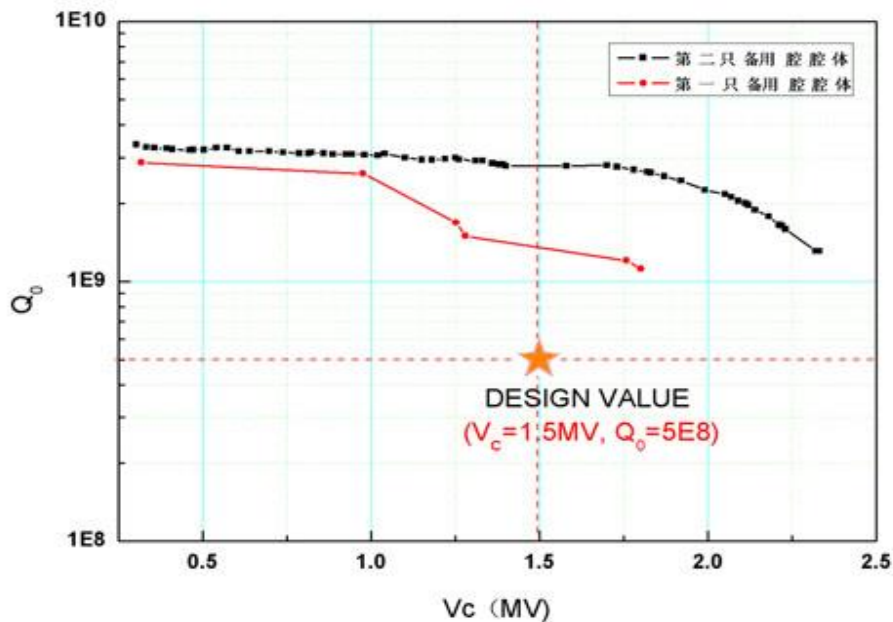


图3.10 备用腔垂直测试结果

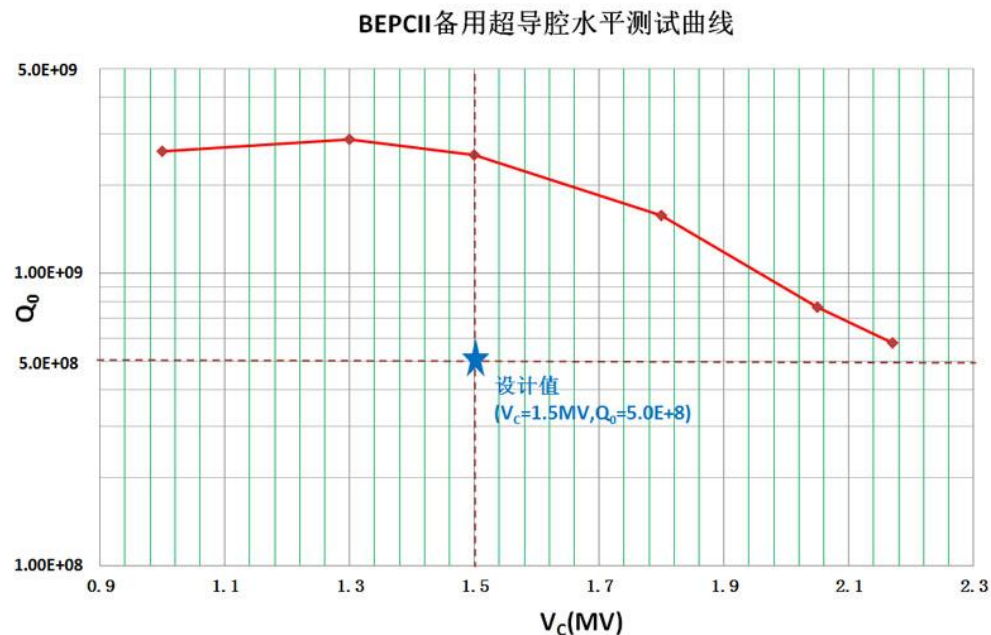


图3.11 备用腔水平测试结果

超导备用腔工程指标:  $V_c=1.5\text{MV}$ 、 $Q_0=5\text{E}+8$

BEPCII超导备用腔测试结果:  $V_c=2.3\text{MV}$ 、 $Q_0=1.2\text{E}+9$

**2017年10月超导备用腔系统（腔体、耦合器、调谐器、高次模吸收器、恒温器等）投入BEPCII运行，三年来运行稳定并达到指标和通过鉴定，标志着我国的500MHz超导腔系统技术真正实现了突破，也跻身于世界少数成功研制的国家。**





- 正在建设**世界上亮度最高**的高能同步辐射光源（北京市怀柔区），将用六个几乎和BEPCII一样的超导高频腔。

## 2、典型的多cell超导腔

国际直线对撞机 (International Linear Collider, 简称 ILC) 超导腔将采用基于 TESLA 腔型的 1.3GHz 9-cell 技术, 总共会用到 16000 只超导腔, 需要集合全世界加速器实验室力量来完成, 中国的各大射频超导实验室也在积极加入。图 3.12 所示为典型的 TESLA 型 1.3GHz 9-cell 超导腔。



图 3.12 典型的 TESLA 型 1.3GHz 9-cell 超导腔



实验室中 9-cell 1.3GHz 超导腔的最高梯度已超过 45MV/m，但如何转入工业大批量生产是目前面临的一个挑战和难题。TDP2 (technical design phase) 目标是通过加工技术和质量控制使得90%的腔梯度超过35MV/m。

No.	Cavity	Test Date	Max. Exc [MV/m]
1	TB9ACC013	01 Dec. 08	41.80
2	TB9ACC014	09 Feb. 09	41.50
3	ACCEL7	18 Jan. 07	41.20
4	TB9AES008	26 Aug. 09	41.10
5	Z143	12 Nov. 08	41.00
6	TB9AES007	16 Mar. 10	41.00
7	TB9ACC016	11 Feb. 10	39.30
8	AC122	26 Aug. 08	38.88
9	AC115	11 Dec. 07	38.60
10	TB9AES010	06 Nov. 09	37.70
11	TB9ACC011	21 Aug. 08	37.00
12	TB9AES009	07 Oct. 09	36.00
13	TB9ACC012	07 Jul. 08	35.10
14	AC150	08 May. 09	33.23
15	Z139	20 Oct. 08	32.75
16	Z106	27 Feb. 07	31.50
17	AC124	19 May. 09	30.93
18	ACCEL6	23 Jan. 07	29.00
19	AC127	11 Jun. 09	27.85
20	AC149	05 May. 09	23.27
21	TB9AES006	11 Sep. 09	22.20
22	Z141	14 May. 08	20.70
23	TB9AES005	09 Apr. 09	20.50
24	TB9ACC015	14 Jul. 08	19.00
25	Z131	25 Nov. 08	17.96
26	Z130	15 Oct. 08	16.60
27	AC126	21 Oct. 08	6.14

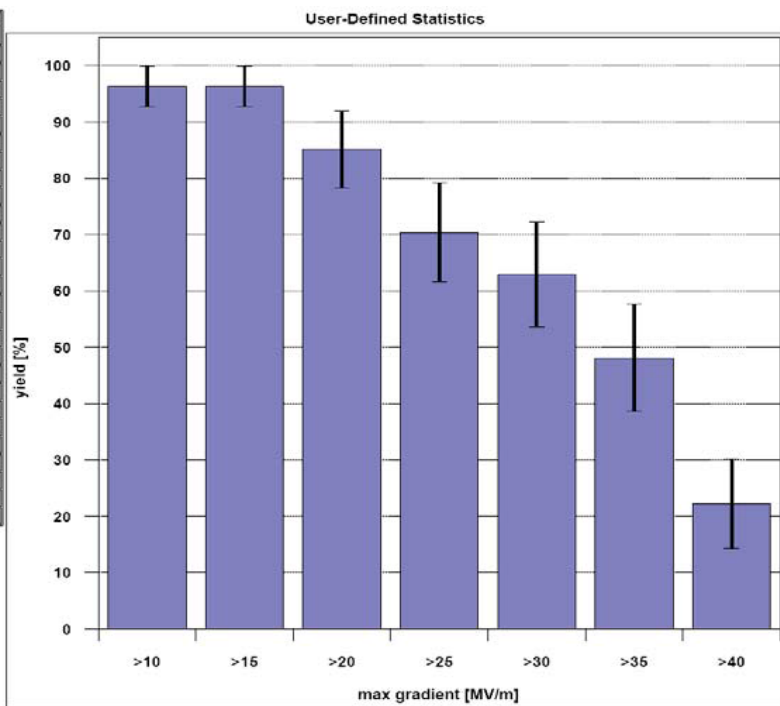
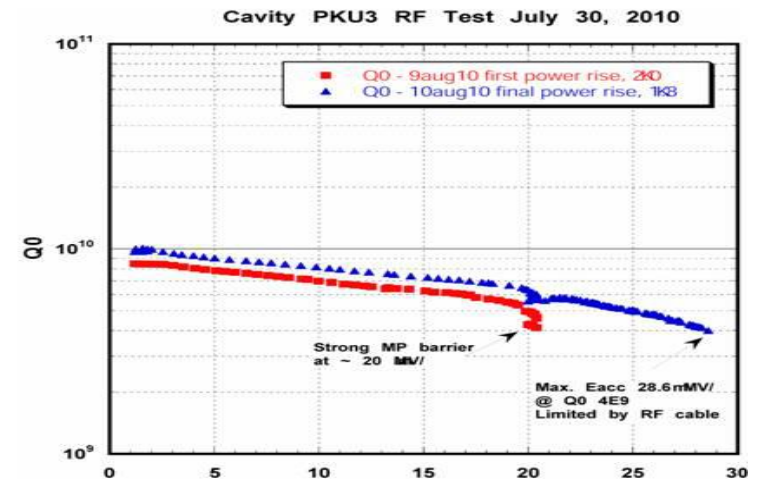


图 3.13 国际各大实验室9-cell 超导腔性能现状

图 3.14为北京大学核物理与核技术国家重点实验室为ILC研制的**TESLA 型**的1.3GHz 9cell 超导腔。它采用的是国产高纯铌材，于2009年完成制造。该腔在美国JLab国家实验室进行垂直测试，**结果为28.6MV/m**，达到了ILC 28MeV/m的使用标准。



**图3.14 北京大学研制的TESLA 型1.3GHz 9 cell 超导高频腔**

中国科学院高能物理研究所为ILC 研制的low loss 腔型的1.3GHz 9cell 超导腔。2016年垂直测试中的**加速梯度达到24MV/m。**



图3.15 高能所  
为 ILC 研制的  
1.3GHz 9 cell  
超导高频腔



最近，中科院高能所研制的带端腔组件的1.3GHz 9-cell细晶粒超导腔加速梯度达到了35MV/m，其品质因子  $Q_0$  在 30MV/m 时超过  $1.3 \times 10^{10}$ 。这是我国目前自主研发的细晶粒1.3 GHz 9-cell超导腔的最好结果，并与国际直线对撞机 (ILC) 超导腔指标 28 MV/m—42 MV/m@  $8 \times 10^9$  的国际水平接轨。



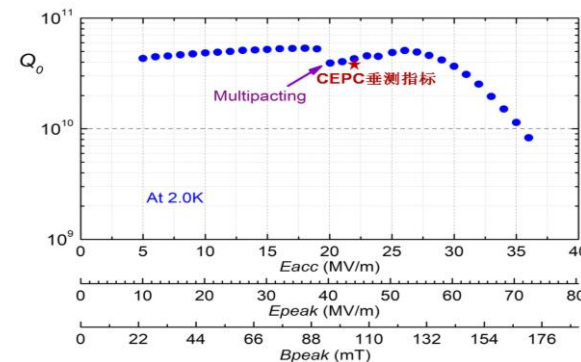
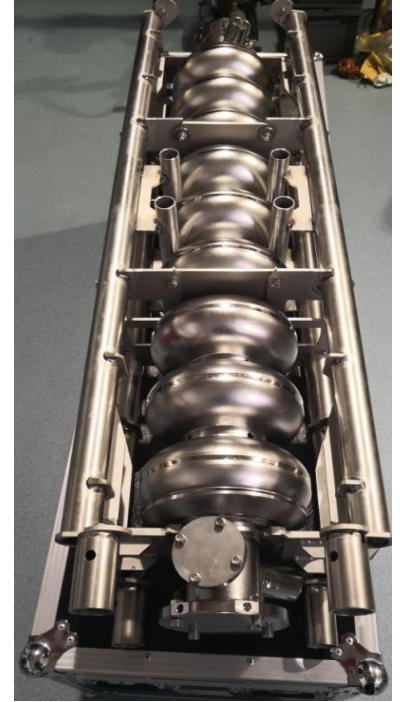
图3.16 高能所研制的1.3GHz 9 cell 超导高频腔



1.3GHz 单 cell 超导腔 2K 下  $E_{acc}$  达到 46MV/m，对应  $Q_0$  约为  $1 \times 10^{10}$ 。这是在国内加工及电抛光工艺后处理后加速梯度最高的，其性能与国际先进水平持平。

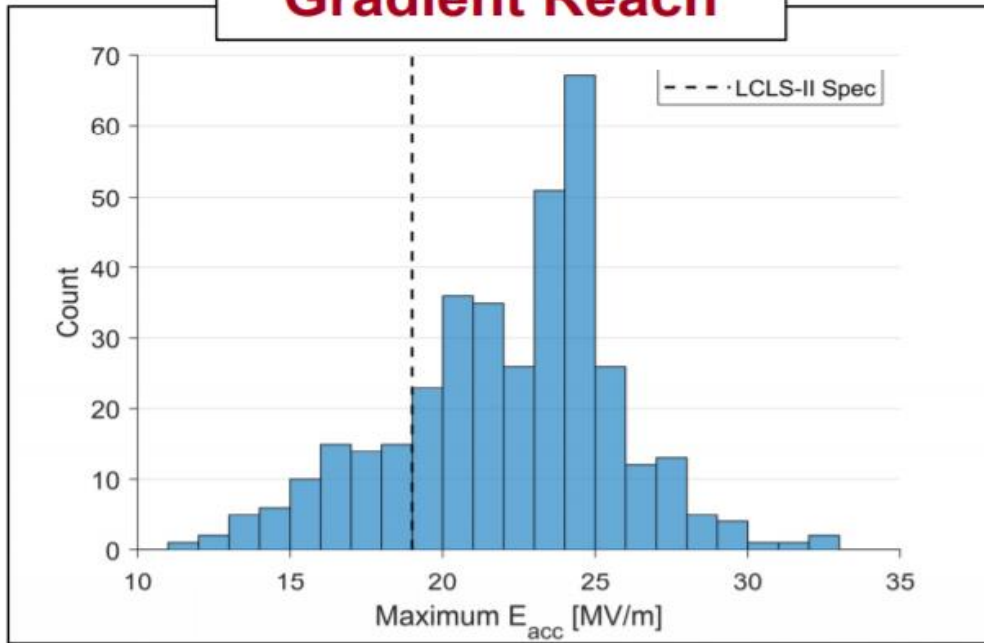
1.3 GHz 超导腔是未来环形正负电子对撞机（CEPC）主力腔型，也是自由电子激光（FEL）如SHINE和未来的深圳FEL的加速腔。

**再提高腔的Q值，达到自由电子激光装置和未来环形正负电子对撞机等要求，就需要采用掺氮等其它技术！**

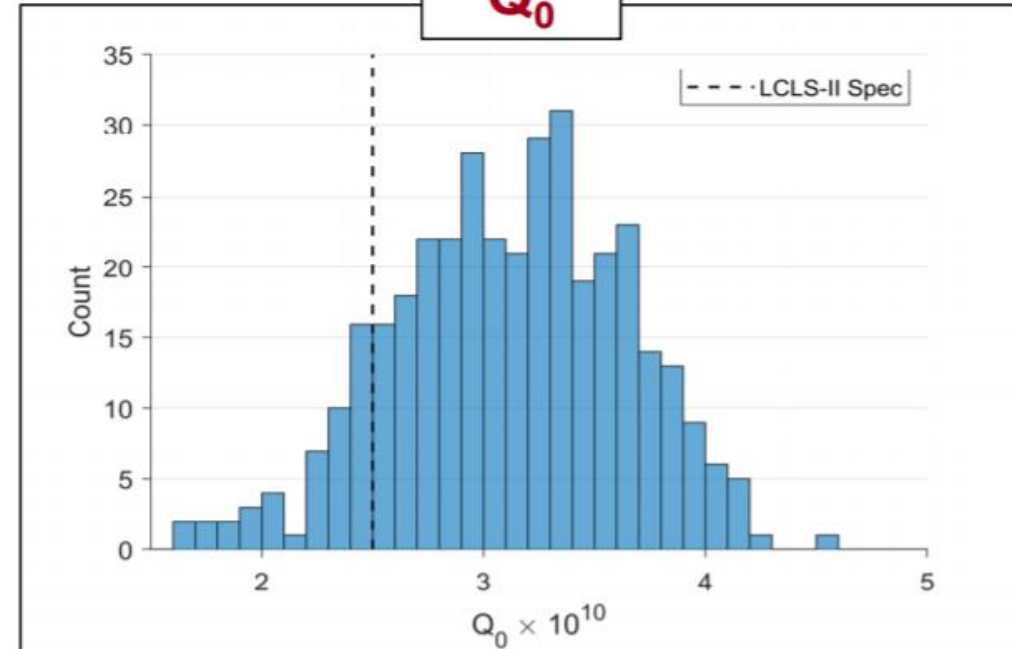


# LCLS-II 超导腔N-doping后的测试结果

Gradient Reach



$Q_0$



LCLS-II一共研制了373只1.3GHz 9-cell超导腔，测试结果非常好，绝大部分超导腔都超过了设计指标，验证了N-doping技术的成功。

- 近几年，北大、高能所、近物所、应物所（高研院）等国内单位也陆续开展了超导腔的掺氮研究，取得了一些初步的成果。
  - 1.3 GHz 1-cell超导腔经过掺氮后，少数腔的测试结果能够达到  $Q=3\sim 4E10@15\sim 20MV/m$ 。
- 与国外相比  $Q>3e10@38 MV/m$  (FNAL、JLAB、Cornell)，差距非常大。
- 美国已经全面终止了与中国SRF技术的交流、合作。
- 国内迫切需要加强合作、迅速提高超导腔的性能指标，以满足各个项目的需要。



### 3、典型的低 $\beta$ 质子超导腔

目前，国际核能源需求迅速增长，核废料及其处理方法却成为了限制核能发展的一个重要因素。为了更有效、安全地解决核废料问题，核物理学家们提出了加速器驱动次临界系统（ADS）。该系统被科学界公认为解决大量放射性废物、降低深埋储藏风险的最具潜力的技术途径。2011年，中国科学院启动战略性先导科技专项——未来先进核裂变能-ADS嬗变系统项目。强流质子超导直线加速器是ADS装置的重要组成部分。



强流质子加速器提供的高能高功率质子束，轰击重金属裂变靶，产生高通量广谱中子，驱动次临界反应堆运行，达到焚烧核废料中长寿命核素的目的。

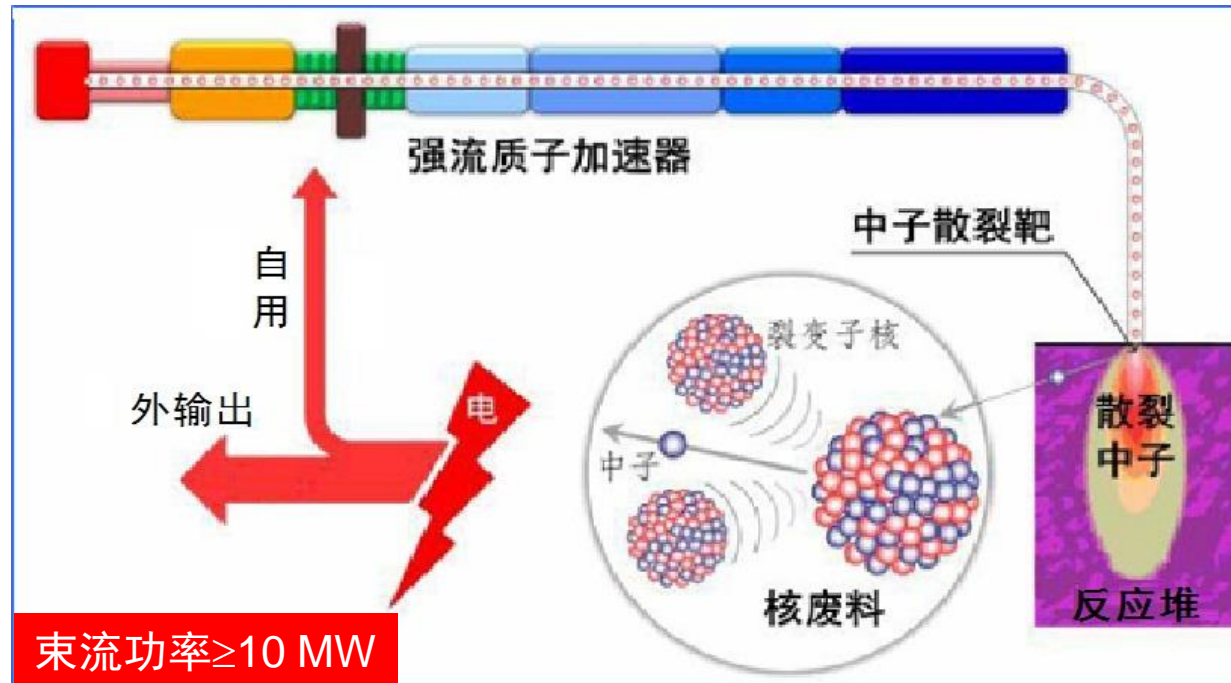


图3.17 ADS原理图

# 质子直线加速器目标

## CW @ 1.5GeV / 10 mA

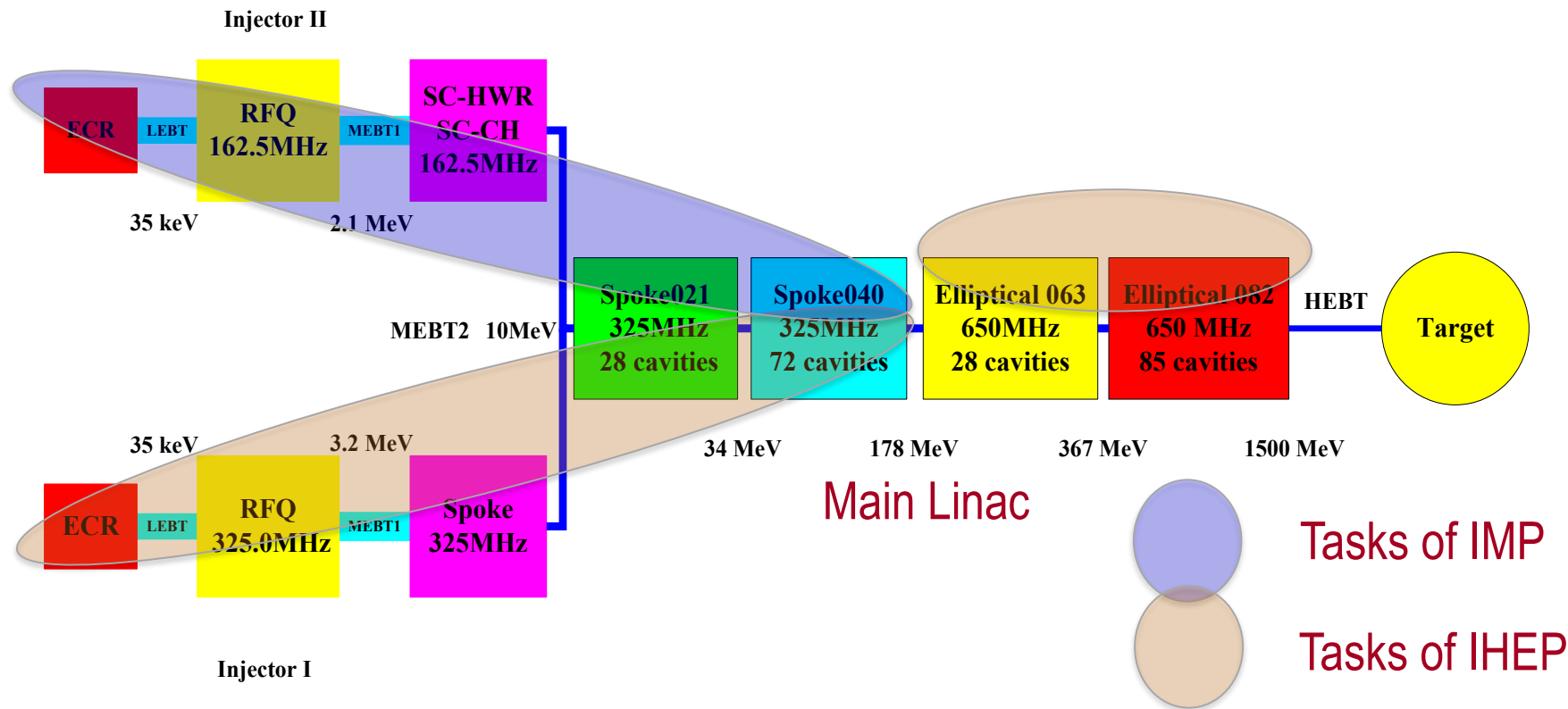
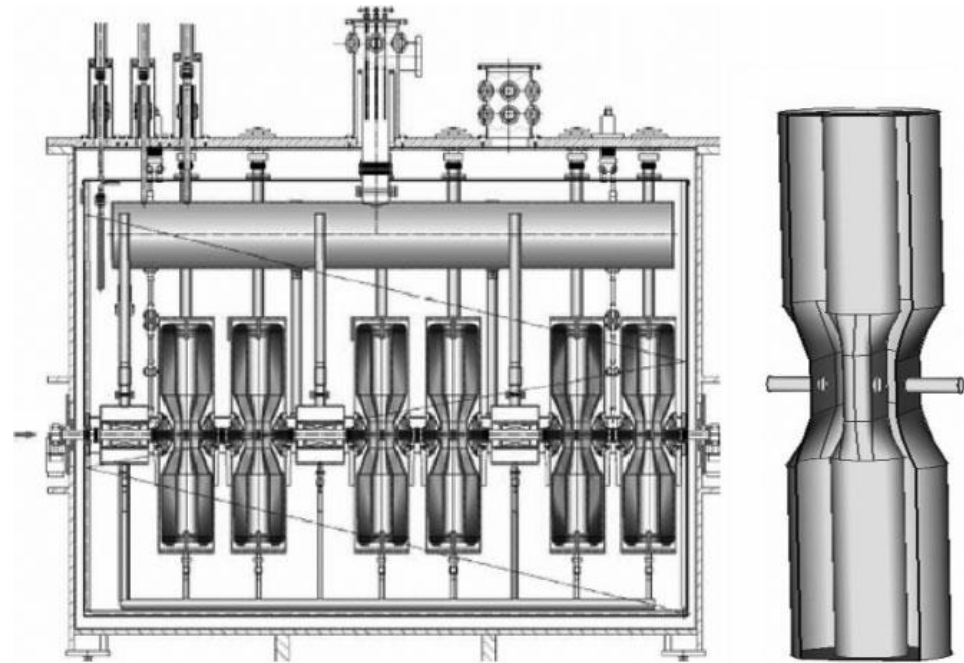
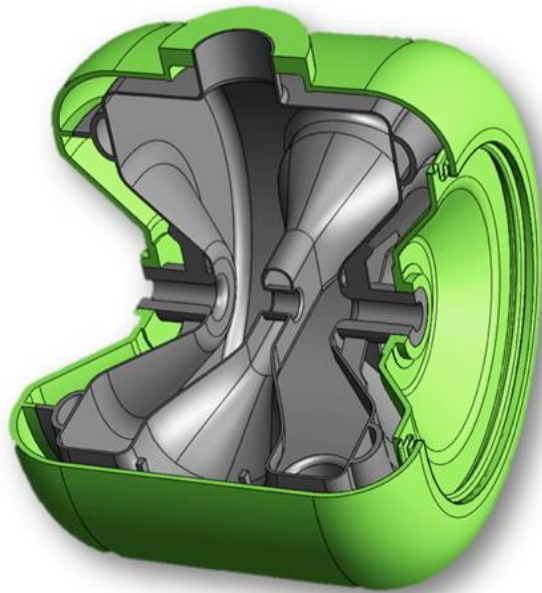


图3.18 质子直线加速器

强流质子加速器是采用的超导直线加速器，这在国内是首次使用超导腔技术加速质子，在国际上也不多见。其加速单元主要是超导轮辐腔 (spoke) 和超导半波长腔 (HWR) 以及超导椭球腔。





Spoke和HWR腔因其在中、低能段的优越性能，适用于强流质子超导直线加速器中。但根据ADS加速器粒子动力学要求，超导Spoke012腔和HWR010腔作为ADS加速器注入器 2~10MeV能段的超导腔，其几何 $\beta$ 值如此之小，在国际上研制还是首次，设计加工难度大，被公认为ADS加速器装置低能段的重点和难点。



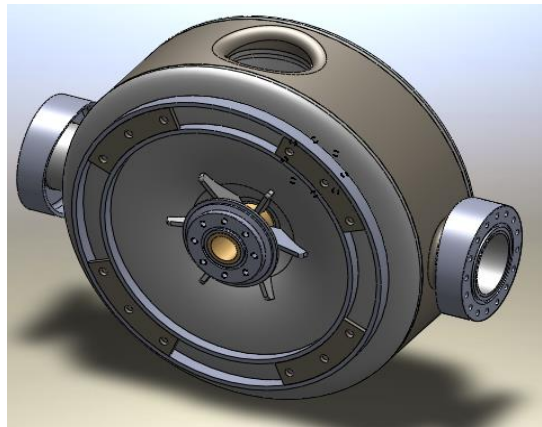
## spoke012超导腔工艺特点

腔材料厚度、加工方式、各部焊接及组焊方式、……

端盖顶部采用相互连接的两个加强筋环，减小端部自由时气压造成的应力和应变。

束管周围采用放射状加强筋，减小氦槽焊接后所压造成的应力。

图3. 19spoke012超导腔



后处理:

化学抛光 (BCP) + 高压水清洗 (HPR) —— 稳定达到高梯度的基本保障。



图3.19 腔后处理

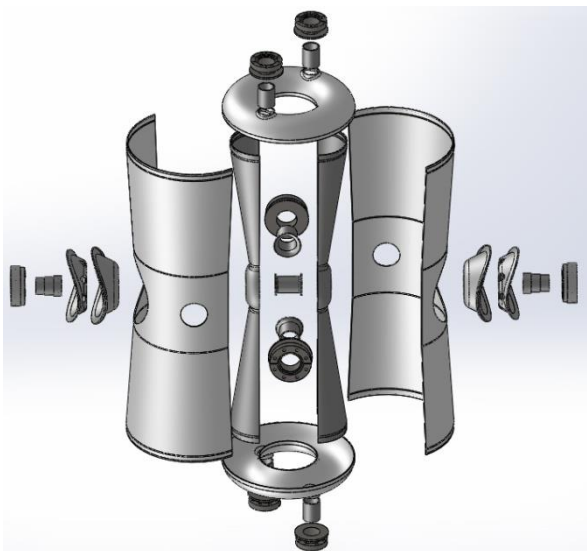




- **CM1+CM2**: 每个恒温器包含7个由超导腔、超导螺线管、BPM组成的周期单元，共14个周期单元——**首次、无先例可循**
- **2016年成功加速10.6mA脉冲束至10.6MeV——达到先导专项目标。**
- **2016-2017年实现了2mA/10MeV连续束调束成功。**



图3. 20 Taper型超导HWR腔



BCP



HPR





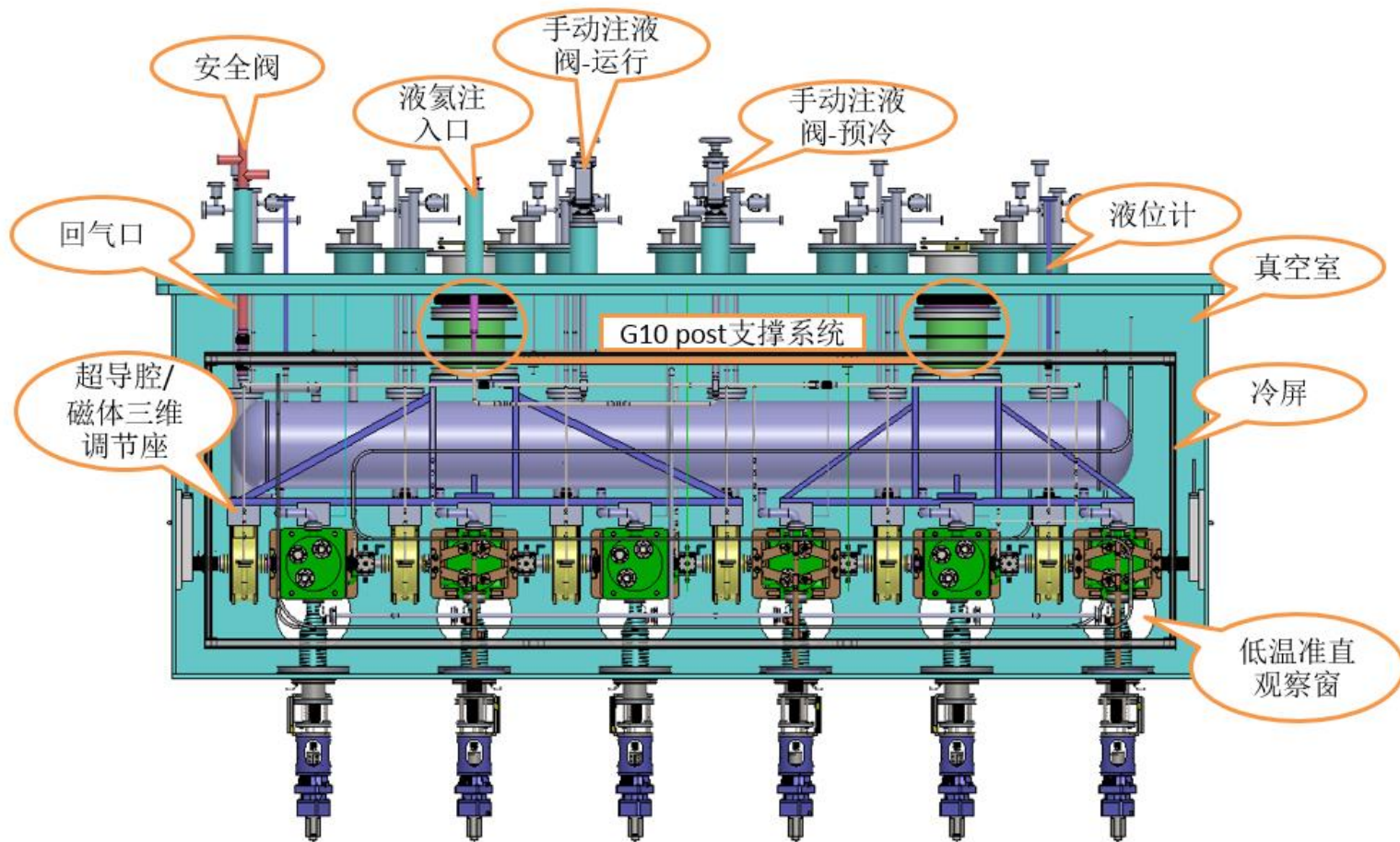


图3.21 ADS HWR超导腔（162.5MHz）系统集成



ADS注入器II, 实现大于  
**10MeV, 10mA** 短脉冲束和  
10MeV/1.7mA连续波。

2017年6月, ADS 25MeV主加速器调束达到脉冲束**26MeV、12mA**, 和连续束  
25MeV/0.17mA。





**请大家指正**

**谢谢！**