

ICS 27.120.99

CCS F 91



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

高性能射频超导腔技术规范

High performance radio frequency superconducting cavity technical
specification

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 技术要求 2

 4.1 材料要求 2

 4.2 结构设计要求 2

 4.3 表面质量要求 3

 4.4 超导性能要求 3

 4.5 真空性能要求 3

 4.6 射频性能要求 3

 4.7 力学性能要求 4

5 试验方法 4

 5.1 材料试验 4

 5.2 结构试验 4

 5.3 表面质量试验 5

 5.4 超导性能试验 5

 5.5 真空性能试验 5

 5.6 射频性能试验 6

 5.7 力学性能试验 6

6 检验规则 6

 6.1 检验分类 6

 6.2 出厂检验 6

 6.3 型式检验 6

 6.4 检验报告 7

7 标志、包装、运输和贮存 7

 7.1 标志 7

 7.2 包装 7

 7.3 运输 7

 7.4 贮存 7

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

高性能射频超导腔技术规范

1 范围

本文件规定了高性能射频超导腔的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于粒子加速器、自由电子激光器、同步辐射装置等场合的单腔或多腔超导腔，不适用于高温超导腔、低性能SRF腔以及非射频超导腔应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 191 包装储运图示标志
- GB/T 197 普通螺纹 公差
- GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法
- GB/T 228.3 金属材料 拉伸试验 第3部分：低温试验方法
- GB/T 230.1 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法
- GB/T 3863 工业氧
- GB/T 4842 氩
- GB/T 6378.1 计量抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的对单一质量特性和单个AQL的逐批检验的一次抽样方案
- GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法
- GB/T 11313.201 射频连接器 第201部分：电气试验方法 反射系数和电压驻波比
- GB/T 13288.4 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理后的钢材表面粗糙度特性 第4部分：ISO表面粗糙度比较样块的校准和表面粗糙度的测定方法 触针法
- GB/T 16675 技术制图 简化表示法 第2部分：尺寸注法
- GB/T 25897 剩余电阻比测量 铌-钛（Nb-Ti）和铌三锡（Nb₃Sn）复合超导体剩余电阻比测量
- GB/T 31780 临界温度测量 电阻法测复合超导体临界温度
- GB/T 31838.3 固体绝缘材料 介电和电阻特性 第3部分：电阻特性（DC方法） 表面电阻和表面电阻率
- GB/T 41739 金属基复合材料尺寸稳定性检测方法 冷热循环法
- GB/T 45116 临界电流测量 REBCO复合超导体的直流临界电流测量
- NB/T 47016 承压设备产品焊接试件的力学性能检验
- SJ/T 10140 超导电子学术语
- SJ/T 10867 盘封管电性能测试方法 谐振腔无载品质因数Q的测试方法
- YS/T 861.3 铌钛合金化学分析方法 第3部分：氢量的测定 惰气熔融热导法

3 术语和定义

SJ/T 10140界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超导腔 superconducting cavity

在低温下腔体材料进入超导状态，具有极低表面电阻的射频腔体。

4 技术要求

4.1 材料要求

4.1.1 腔体材料

腔体主体应采用高纯铌（Nb）材料，纯度 $\geq 99.999\%$ ，密度应为 $8.57 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ ，室温抗拉强度 $\geq 240 \text{ MPa}$ ，室温伸长率 $\geq 20\%$ ，洛氏硬度60~80。

4.1.2 焊接材料

焊接用填充材料应与基体材料（Nb）相容，常用NbTi合金或纯Nb焊丝，Ti含量46%~48%，杂质总含量 $\leq 0.05\%$ ，室温抗拉强度 $\geq 700 \text{ MPa}$ ，室温伸长率 $\geq 12\%$ ，洛氏硬度25~35。

4.1.3 表面处理材料

表面处理用酸液应使用分析纯或以上级别试剂，清洗所用去离子水应符合GB/T 6682一级水要求。清洗过程中所用高纯氮气、氦气应符合GB/T 4842和GB/T 3863要求。

4.2 结构设计要求

4.2.1 几何结构要求

几何结构应符合以下要求：

a) 腔体的工作频率应根据加速器系统设计要求确定，常用频率为1.3GHz，频率偏差应不大于 $\pm 0.01\%$ ；

b) 单元腔长度L应满足公式(1)：

$$L = \frac{\beta\lambda}{2} \quad (1)$$

式中：

β ——粒子速度与光速之比（ $0.61 \leq \beta \leq 1.0$ ）；

λ ——工作波长（m）。

c) 腔体单元应采用椭圆型或TESLA型设计，以降低峰值表面电场和磁场。表面场分布的设计指标应满足：峰值电场与加速场之比 ≤ 2.0 ；峰值磁场与加速场之比 $\leq 4.0 \text{ mT/(MV/m)}$ ；

d) 腔体壁厚应在2.5mm~4.0mm范围内，厚度公差不大于 $\pm 0.05 \text{ mm}$ ；

e) 多单元腔设计时，电场均匀性应 $\geq 95\%$ ，单元间频率差异 $\leq 20 \text{ kHz}$ 。

4.2.2 力学结构要求

力学结构应符合以下要求：

a) 腔体在液氦环境下不应发生塑性变形；

b) 腔体冷缩引起的长度变化应 $\leq 0.2 \text{ mm}$ ，频率漂移 $\leq \pm 50 \text{ kHz}$ ；

c) 采用加固环或刚性支撑结构时，应验证其减振效果；

d) 腔体结构应具备抗疲劳性能，在 10^5 次冷却加热循环后，其几何参数和电磁性能不应劣化。

4.2.3 耦合与调谐接口要求

耦合与调谐接口要求如下：

a) 射频输入耦合器接口应符合GB/T 16675要求，接口尺寸公差应不大于 $\pm 0.1 \text{ mm}$ ；

b) 耦合系数应在0.8~1.2范围内可调，调节精度 ≤ 0.01 ；

c) 腔体应设置频率调谐器接口，其调谐范围不小于 $\pm 1 \text{ MHz}$ ，调谐分辨率不低于1Hz；

d) 调谐机构的驱动寿命应 $\geq 10^5$ 次循环，且不对腔体真空性能造成影响。

4.2.4 冷却与热管理结构要求

冷却与热管理结构要求如下：

a) 腔体应采用液氮浴冷却方式，工作温度为2K~4.2K，表面温度梯度应 $\leq 0.1 \text{ K}$ 。

b) 冷却通道应均匀分布，焊接或钎焊接头应通过氦检漏，确保密封可靠。

c) 腔体外表面应预留温度传感器安装位置，不少于4个测点，以便监控运行工况。

d) 在加速梯度 $E_{acc}=35 \text{ MV/m}$ 时，腔体最高温升 $\leq 0.05 \text{ K}$ 。

4.2.5 真空与密封结构要求

真空与密封结构要求如下：

- a) 腔体真空系统应保持工作真空度 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{Pa}$ ，且在24h内压强升高 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 。
- b) 所有法兰接口应采用铌或无磁不锈钢材料，并使用金属密封件。
- c) 法兰螺纹尺寸及公差应符合GB/T 197要求，拧紧扭矩应控制在5~10N·m范围内。
- d) 所有焊接和接口应经过氦质谱检漏，泄漏率应 $\leq 1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

4.3 表面质量要求

4.3.1 内表面粗糙度

腔体内表面平均粗糙度 $Ra \leq 0.4 \mu\text{m}$ ；焊缝处粗糙度 $Ra \leq 1.0 \mu\text{m}$ 。

4.3.2 表面缺陷控制

表面缺陷控制应符合以下要求：

- a) 腔体内表面不应有裂纹、分层或气孔、机械划痕或压痕、金属夹杂物或油污；
- b) 焊缝及接头区域不应出现未熔合、焊瘤或过烧现象；
- c) 缺陷尺寸控制：裂纹长度 $\leq 0.2\text{mm}$ ，深度 $\leq 0.05\text{mm}$ ；气孔直径 $\leq 0.1\text{mm}$ 。

4.3.3 化学抛光与电解抛光要求

化学抛光与电解抛光要求如下：

- a) 腔体在完成化学抛光后，应进行氢退火处理以减少氢吸附和气泡缺陷；
- b) 退火温度范围600~800℃，保温时间 $\geq 3\text{h}$ ，惰性气体保护（氩气或氮气）流量 $\geq 5\text{L/min}$ ；
- c) 退火完成后，腔体表面不应出现氧化斑点、变色或微裂纹；
- d) 表面氢浓度 $\leq 0.2\text{at}\%$ 。

4.3.5 清洗与干燥要求

清洗与干燥要求如下：

- a) 腔体表面在进入真空或组装前必须彻底清洗，去除残余酸液、金属颗粒和有机污染物；
- b) 清洗工艺可采用去离子水冲洗、超声波清洗或高压喷淋清洗，去离子水电导率 $\leq 0.1 \mu\text{S/cm}$ ；
- c) 干燥应在洁净干燥环境下完成，残余水分 $\leq 0.1\text{mg/cm}^2$ ；
- d) 清洗后应在洁净室内完成腔体组装。

4.4 超导性能要求

超导性能应符合表1的要求。

表1 超导性能要求

指标	要求
表面电阻	$\leq 10\text{n}\Omega$
残余电阻	$\leq 5\text{n}\Omega$
临界温度	$\geq 9.2\text{K}$
临界磁场	$\geq 200\text{mT}$
材料残余电阻比	≥ 300
低温力学屈服强度	$\geq 50\text{MPa}$
低温延伸率	$\geq 20\%$
氢含量	$\leq 0.2\text{at}\%$

4.5 真空性能要求

真空性能应符合表2的要求。

表2 真空性能要求

指标	要求
工作真空度	$\leq 1 \times 10^{-9} \text{Pa}$
泄漏率	$\leq 1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
材料脱气率	材料引起的总压升高率 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
真空稳定性（24小时）	腔体保持工作真空24小时内压强升高 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{Pa}$

4.6 射频性能要求

射频性能应符合表3的要求。

表3 射频性能要求

指标	要求
工作频率	1.3GHz±0.01%
加速电场	≥35MV/m
品质因数	≥1×10 ¹⁰
峰值电场与加速场比	≤2.0
峰值磁场与加速场比	≤4.0mT/(MV/m)
电场均匀性	≥95%
驻波比	≤1.05
耦合系数	0.8~1.2
输入耦合器调节精度	≤0.01
调谐器调节范围	≥±1MHz
调谐器调节精度	≥1Hz
频率稳定性	±50kHz

4.7 力学性能要求

4.7.1 腔体整体力学性能

腔体整体力学性能要求如下：

- a) 腔体在常温及液氦温度下均应保持几何稳定性；
- b) 冷缩导致长度变化应≤0.2mm，确保腔体频率漂移≤±50kHz；
- c) 腔体在工作压力0.3MPa下最大等效应力≤材料屈服强度的0.6倍；
- d) 腔体在105次冷却/加热循环后不应出现塑性变形或裂纹。

4.7.2 微音效应与振动敏感性

微音效应与振动敏感性要求如下：

- a) 腔体对外部振动引起的频率偏移敏感性≤10Hz/Pa；
- b) 腔结构应具备必要的加固或支撑设计，降低微音效应对频率稳定性的影响。

4.7.3 焊接和接口力学要求

焊接和接口力学要求如下：

- a) 焊缝及法兰连接应保证在低温下不出现裂纹或塑性变形；
- b) 接口紧固扭矩应可控，避免应力集中；
- c) 焊缝和接头应通过无损检测（UT/VT/PT）确认无缺陷。

5 试验方法

5.1 材料试验

5.1.1 纯度与杂质含量测定

采用感应耦合等离子体质谱法（ICP-MS）或光谱分析法测定Nb纯度与杂质含量。

5.1.2 力学性能试验

室温拉伸试验按照GB/T 228.1规定的方法进行，洛氏硬度试验按照GB/T 230.1规定的方法进行。

5.2 结构试验

5.2.1 几何结构试验

采用三坐标测量机对超导腔的腔长、内径、法兰尺寸等进行测量，每个尺寸选取3个不同截面测试，取平均值；壁厚采用超声波测厚仪，在腔内壁均匀选取10个测试点，取平均值，测试前需用标准试块校准仪器。

5.2.2 力学结构试验

力学结构试验应按照以下方法进行：

- a) 将腔体置于液氦环境，施加设计压力，保持规定时间，卸载后检测尺寸和表面缺陷；

- b) 在室温至4.2K的冷却过程中测量腔体长度变化和频率漂移；
- c) 在振动激励下测量腔体频率偏移；
- d) 按照GB/T 41739的要求进行冷热循环试验。

5.2.3 耦合与调谐接口试验

耦合与调谐接口试验应按照以下方法进行：

- a) 接口尺寸检验：使用三坐标测量机或精密卡尺测量接口关键尺寸；
- b) 耦合系数试验：在腔体连接矢量网络分析仪条件下，调节耦合器位置并测量S参数，计算耦合系数；
- c) 调谐范围与分辨率试验：安装调谐器后，利用VNA测量谐振频率随调谐器位置变化；
- d) 调谐机构寿命与真空影响试验：在真空条件下进行 $\geq 10^5$ 次循环驱动，试验中及结束后进行氦检漏。

5.2.4 冷却与热管理结构试验

将腔体置于液氦环境下运行，通过温度传感器监测表面温度分布和梯度；在加速梯度 $E_{acc}=35\text{MV/m}$ 条件下测量腔体温升，同时采用氦质谱检漏仪测试冷却通道及焊接接头的泄露率。

5.2.5 真空与密封结构试验

将腔体抽至工作真空度，保持24h并监测压强变化；同时采用氦质谱检漏仪对所有焊缝、法兰接口和密封件进行逐点扫描，检验泄漏率是否符合4.2.5要求。

5.3 表面质量试验

5.3.1 内表面粗糙度试验

按照GB/T 13288.4的规定进行。

5.3.2 表面缺陷试验

使用金相显微镜（放大倍率 $\geq 100\times$ ）、超声探伤或渗透探伤方法检查腔体表面有无缺陷。

5.3.3 化学抛光与电解抛光试验

抛光后取样，通过金相观察和扫描电子显微镜检查表面是否存在氧化斑点、变色或微裂纹；表面氢浓度按照YS/T 861.3规定的方法进行测定。

5.3.4 清洗与干燥效果试验

采用TOC测试和离子色谱分析检测残余污染物；用电导率仪测量冲洗水电导率；表面残余水分通过称重法或红外水分仪测定。

5.4 超导性能试验

超导性能试验应按照表4规定的方法进行。

表4 超导性能试验方法

指标	试验方法
表面电阻	GB/T 31838.3
残余电阻	GB/T 31838.3
临界温度	GB/T 31780
临界磁场	GB/T 45116
材料残余电阻比	GB/T 25897
低温力学屈服强度	GB/T 228.3
低温延伸率	GB/T 228.3
氢含量	YS/T 861.3

5.5 真空性能试验

真空性能试验应按照表5规定的方法进行。

表5 真空性能试验方法

指标	试验方法
工作真空度	将腔体置于高真空系统中，抽至 $\leq 1\times 10^{-9}\text{Pa}$ ，保持稳定，确认腔体达到工作真空要求

泄漏率	使用氦质谱检漏仪检查腔体焊缝、法兰接口及密封件，测量泄漏率
材料脱气率	在低温或常温下抽真空，监测腔体材料释放气体导致的总压升高，记录压力随时间的变化，计算升高率
真空稳定性（24小时）	在工作真空条件下保持腔体24小时，实时记录压强变化，确认24小时内压强升高量

5.6 射频性能试验

射频性能试验应按照表6规定的方法进行。

表6 射频性能试验方法

指标	试验方法
工作频率	将腔体置于射频测试平台，采用网络分析仪测量谐振频率
加速电场	在低温环境下施加射频功率，测量加速梯度Eacc
品质因数	SJ/T 10867
峰值电场与加速场比	通过电磁场仿真和实测数据计算腔体峰值电场与加速场比
峰值磁场与加速场比	通过电磁场仿真和实测数据计算腔体峰值磁场与加速场比
电场均匀性	测量腔体各单元电场分布，计算电场均匀性
驻波比	GB/T 11313.201
耦合系数	测量输入耦合器反射和透射参数，计算耦合系数
输入耦合器调节精度	调节输入耦合器，测量耦合变化精度
调谐器调节范围	调节腔体频率调谐器，测量可调范围
调谐器调节精度	通过精密调节腔体频率调谐器，测量最小可调分辨率
频率稳定性	在工作条件下连续监测腔体频率，测定频率稳定性

5.7 力学性能试验

力学性能试验应按照表7规定的方法进行。

表7 力学性能试验方法

指标	试验方法
腔体整体力学性能	在常温 and 液氮温度下，对腔体施加设计工作压力，测量几何变化和应力分布，确认冷缩长度及变化频率漂移
微音效应与振动敏感性	在低温环境下，对腔体施加模拟外部振动或微音扰动，测量频率偏移
焊接和接口力学性能	NB/T 47016
疲劳性能	GB/T 41739

6 检验规则

6.1 检验分类

本文件要求的检验分为出厂检验和型式检验两类。

6.2 出厂检验

出厂检验的项目应包括外观与结构检查等关键指标。各项指标均满足本文件的要求时，方可被判定为合格产品。对于不合格的产品，应进行报废处理。

6.3 型式检验

6.3.1 检验时机

有下列情形之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品试制定型鉴定；
- b) 设计、工艺或主要原材料有较大改变，可能影响接口性能；
- c) 正常生产满一年时；
- d) 间隔一年以上再生产时；

e) 出厂检验结果与同产品型号或批次的型式检验有较大差异时。

6.3.2 检验项目及要求

型式检验应在国家认证监督管理委员会认可的检测机构,或者具备相关认证资质的实验室完成,检验的项目应包括所有指标。

6.3.3 抽样规则

抽样规则应符合GB/T 6378.1的要求。

6.3.4 判定规则及处理措施

所有检验项目均满足本文件的技术要求时,判定为合格。任一项不符合规定时,判定为不合格。对于不合格的产品,应进行返工或报废处理,返工产品应重新进行检验。

6.4 检验报告

所有检验记录和报告应妥善存档,每次检验结束后应出具完整的检验报告,并包括下列内容:

- a) 基本信息: 产品名称、产品批次编号、检验日期、检验机构和参与人员等;
- b) 检验目的与检验依据;
- c) 检验环境与检验设备清单等;
- d) 检验方法与检验过程;
- e) 检验数据: 详细列出各项的检测数据;
- f) 检验结论: 评估该批次产品是否合格。

7 标志、包装、运输和贮存

7.1 标志

标志应满足下列要求:

- a) 应有清晰、牢固、持久的标志,内容包括: 产品名称和型号、生产单位、出厂编号、生产日期、电气参数、安全和防爆标志等;
- b) 所有标志应清晰、耐磨,符合GB/T 191的相关规定。

7.2 包装

包装应满足下列要求:

- a) 包装应采用防潮、防震、防尘材料,确保设备在运输和存储过程中不受损;
- b) 包装内部应有缓冲材料;
- c) 包装箱外应标明产品的名称、型号、毛重、净重及运输标志;
- d) 每件产品随包装附带说明书、合格证及出厂检验报告。

7.3 运输

运输应满足下列要求:

- a) 运输过程中应避免剧烈振动、跌落及强烈温度变化;
- b) 在运输过程中不得与有毒、有腐蚀性或易燃物品混装;
- c) 产品运输过程中应避免暴露在高湿或雨淋环境下。

7.4 贮存

贮存应满足下列要求:

- a) 产品应存放于0℃~50℃的环境温度内,相对湿度≤85%的干燥环境中;
- b) 贮存环境应通风良好,避免阳光直射及高湿度环境;
- c) 长期贮存时,应每6个月对设备进行一次检查和维护。