

DB34

安 徽 省 地 方 标 准

DB 34/T 3425—2019

超导回旋加速器 低温超导磁体液氦冷却 方法

Superconducting cyclotron Cooling method of low temperature superconducting
magnet using liquid helium

2019 - 11 - 04 发布

2019 - 12 - 04 实施

安徽省市场监督管理局 发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由合肥中科离子医学技术装备有限公司提出。

本标准由安徽省超导回旋加速器标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：合肥中科离子医学技术装备有限公司、中国科学院等离子体物理研究所、安徽省质量和标准化研究院。

本标准主要起草人：丁开忠、张华辉、胡锐、邹春龙、李俊、毕延芳、冯汉升、杜双松、李蕾、冯昌乐、李君君、陈永华、陈根、宋云涛、程鸣。

超导回旋加速器 低温超导磁体液氦冷却方法

1 范围

本标准规定了超导回旋加速器低温超导磁体液氦冷却方法的术语和定义、原理、要求、设备、过程和记录。

本标准适用于低温超导磁体液氦冷却。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 2900.100-2017 电工术语 超导电性

3 术语和定义

GB/T 2900.100-2017 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了GB/T 2900.100-2017中的某些术语和定义。

3.1

线圈 coil

通常是同轴的一组串联线匝。

[GB/T 2900.100-2017, 定义815-16-01]

3.2

超导磁体 superconducting magnet

利用超导线或超导电缆制作、用于产生外磁场的装置。

[GB/T 2900.100-2017, 定义815-16-03]

3.3

临界温度 critical temperature

在零电流和零磁场强度下，超导体呈现超导电性的最高温度。

[GB/T 2900.100-2017, 定义815-10-09]

3.4

浸泡致冷 pool cooling

直接浸泡在处于沸点的液态冷剂中的冷却方法。

[GB/T 2900.100-2017, 815-15-06]

3.5

辐射屏 radiation shield

放置在温度不同的两个平面之间的薄片，用来减少两个表面的辐射传热。

3.6

低温容器 cryostat

为超导装置的运行提供低温环境的容器。

[GB/T 2900.100-2017, 定义815-15-51]

3.7

液氦容器 liquid helium vessel

低温容器内部储存液氦的内胆。

3.8

夹层 interspace

低温容器内部的液氦容器与低温容器外部之间形成的密闭空间。

3.9

夹层真空度 interspaced vacuum degree

低温容器中夹层空间的气体绝对压力。

3.10

高真空多层绝热 high vacuum multilayer insulation

在低温容器的高真空夹层空间内，由间隔材料和反射屏交替组合而形成的绝热方式。

3.11

零挥发 zero boil-off

低温液体处于挥发再冷凝的动态平衡，低温容器内气压保持不变或持续下降。

4 原理

低温超导磁体使用低临界温度的超导线绕制而成，一般使用液氦冷却，并采用以下方法保证超导磁体安全稳定运行：

- a) 低温容器的夹层使用高真空多层绝热技术；
- b) 低温容器内冷质部件使用低温液体浸泡致冷；
- c) 液氦容器内使用制冷机和加热器平衡冷量，保持液氦零挥发。

5 要求

- 5.1 在开始降温前, 夹层真空度应优于 1×10^{-2} Pa。
- 5.2 辐射屏应降温到温度低于 80 K。
- 5.3 线圈应降温到 4.2 K~4.5 K。
- 5.4 低温容器保持零挥发运行, 应满足:
 - a) 夹层真空不需要开启真空泵即可维持, 真空度优于 5×10^{-4} Pa;
 - b) 线圈所处液氦容器气体压力保持稳定, 并可调节控制;
 - c) 辐射屏温度保持稳定, 并可调节控制。

6 设备

6.1 低温液体储罐

- 6.1.1 储存超导磁体降温所需低温液体的储罐应包含液氮罐和液氦罐。
- 6.1.2 所有储罐应配备安全附件, 包括但不限于压力表、安全阀和爆破片。

6.2 输液管

- 6.2.1 将低温液体从储罐输送到超导磁体低温容器内的管道应包含液氮输液管、液氦输液管。
- 6.2.2 输液管在使用前应抽真空。

6.3 真空泵

- 6.3.1 对低温容器夹层抽真空的设备应包括机械泵和分子泵。
- 6.3.2 真空泵应配备真空规和真空计, 量程为绝对压力 1×10^{-8} Pa~ 1×10^5 Pa。

6.4 数据采集控制系统

- 6.4.1 为超导磁体降温提供数据采集和控制功能的系统应包括温度变送器、压力变送器、液氦液位计、真空规、加热器、控制柜和软件系统。
- 6.4.2 温度变送器测量范围为 4.2 K~350 K, 压力变送器的测量范围为绝对压力 0 Pa~ 1×10^6 Pa, 真空规的测量范围为绝对压力 1×10^{-8} Pa~ 1×10^5 Pa。
- 6.4.3 数据采集控制系统应具有反馈控制线圈降温速率和加热功率的功能。

6.5 制冷机

- 6.5.1 为低温容器提供冷量的装置应配备冷却机组。
- 6.5.2 二级冷头制冷量在温度为 4.2 K 时应不低于 1.5 W, 一级冷头制冷量在温度为 50 K 时应不低于 35 W。

6.6 气体钢瓶

- 6.6.1 为低温容器降温提供气体的设备应包括氦气瓶、氮气瓶。
- 6.6.2 气体钢瓶应配备减压阀和气体管路。
- 6.6.3 氮气瓶的氮气纯度应不低于 99.999%。

7 过程

7.1 夹层抽真空

7.1.1 一般要求

7.1.1.1 夹层内所有部件应进行清洁处理，确保表面干燥，无杂物、油污。

7.1.1.2 对焊缝使用液氮进行冷冲击，使用氦质谱检漏仪检测，单条焊缝漏率应小于 $1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，整体漏率应小于 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

7.1.2 夹层抽真空步骤

7.1.2.1 使用机械泵将夹层真空度抽至优于 $1 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。

7.1.2.2 开启分子泵，继续对夹层抽空至真空度优于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。

7.2 辐射屏冷却

7.2.1 一般要求

7.2.1.1 辐射屏材料应为铜或者铝合金，通过铜编织带与制冷机一级冷头连接。

7.2.1.2 辐射屏外侧应包裹不少于 30 层的间隔材料和反射屏组成的保温材料，包裹后的厚度为 10 mm~20 mm，辐射屏内侧应粘贴铝箔胶带。

7.2.2 辐射屏冷却步骤

7.2.2.1 通过液氮输液管连接外部液氮罐和辐射屏的液氮罐，使用液氮直接冷却辐射屏至低于 80 K。

7.2.2.2 开启制冷机，由一级冷头提供制冷量，持续冷却辐射屏。

7.3 线圈冷却

7.3.1 预冷阶段

7.3.1.1 在线圈预冷之前，使用机械泵对低温容器进行抽真空至优于 100 Pa，避免空气中的水蒸气凝结在线圈内部。

7.3.1.2 通过液氮输液管连接液氮罐和超导磁体低温容器，注入液氮直接预冷。

7.3.1.3 通过控制系统监测线圈温度，线圈降温速率应低于 3 K/h，线圈各部分温差应小于 10 K。

7.3.1.4 通过控制系统监测线圈温度，当线圈整体温度稳定在低于 80 K 时，直接预冷结束。

7.3.1.5 使用机械泵对低温容器进行抽空至 $1 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

7.3.1.6 通过向低温系统内部增压氮气，排出液氮。

7.3.2 冷却阶段

7.3.2.1 使用机械泵将液氮容器气压抽至优于 $1 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。

7.3.2.2 通过控制系统监测氦气气压，向内部注入氦气至不低于 $1 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

7.3.2.3 重复以上操作至少两次。

7.3.2.4 通过液氮输液管连接液氮罐和超导磁体低温容器，向内部注入液氮进行降温。

7.3.2.5 通过液位计监测输入液氮容器内的液氮液位，保证完全浸泡线圈。

7.3.2.6 开启制冷机，通过氦气钢瓶补充液氮容器内氦气，调节容器内液位。

7.4 系统运行

7.4.1 一般要求

低温容器应配备安全附件，包括但不限于压力表、安全阀和爆破片等。

7.4.2 运行要求

7.4.2.1 应使用制冷机为低温容器提供制冷量，保持液氮零挥发。

7.4.2.2 应使用加热器调节控制液氮容器气压，保持系统运行气压为 1.05×10^5 Pa。

8 数据记录

数据记录应包括但不限于：

- a) 液氮容器气压；
 - b) 液氮液位；
 - c) 辐射屏温度；
 - d) 制冷机状态；
 - e) 夹层真空度；
 - f) 加热功率。
-