

超导回旋加速器 运输线束流阻断器设计准则

Superconducting cyclotron Design criteria for beam stopper of beam line

2018 - 04 - 16 发布

2018 - 05 - 16 实施

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。

本标准归口单位：安徽省超导回旋加速器标准化技术委员会。

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

本标准主要起草人：宋云涛、郑金星、韩曼芬、沈俊松、李碧、李明、王明、朱雷、曾宪虎。

超导回旋加速器 运输线束流阻断器设计准则

1 范围

本标准规定了超导回旋加速器运输线束流阻断器的术语和定义、阻断块厚度设计、气动设备设计、焊接波纹管设计和机械装配及控制要求。

本标准适用于超导回旋加速器运输线束流阻断器的结构部件设计，从事放射技术研究、生产和临床诊断的专业人员也可参考使用。

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 1184 形状和位置公差 未注公差值

GB/T 1800.2 产品几何技术规范（GPS）极限与配合 第2部分：标准公差等级和孔、轴极限偏差表

GB/T 1804 一般公差、未注公差的线性和角度尺寸的公差

GB/T 2348-1993 液压气动系统及元件 缸内径及活塞杆外径

GB/T 4213 气动调节阀

GB 4793.1 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求 第1部分：通用要求

GB/T 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定

JB/T 5923-2013 气动气缸技术条件

JB/T 6169-2006 金属波纹管

JB/T 11129-2011 气缸活塞杆技术条件

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

运输线 beam line

由一系列不连续的磁铁元件、真空元件、束流选择元件、束流测量元件组成，实现将从加速器主机引出的束流安全、高效、稳定的输送到输出端的束流传输系统。

3.2

束流阻断器 beam stopper

在真空环境中对束流进行快速切断，能保证运输线运行安全性的部件。

3.3

阻断块 stop block

通过与束流的物理作用实现切断束流功能的零件，是束流阻断器的主要组成部分。

3.4

波纹管组件 bellows components

两端焊接刀口法兰并具有多个横向波纹可折叠的管状弹性敏感元件。

3.5

气缸 air cylinder

将压缩气体的压力能转换为机械能的圆筒型金属机件。

3.6

活塞 piston

靠压力下的流体作用，在缸径中移动并传递机械力和运动的缸零件。

3.7

活塞杆 piston rod

与活塞同轴并联为一体，传递来自活塞的机械力和运动的缸零件。

4 阻断块厚度设计

4.1 阻断块在束流方向上的厚度应符合式（1）、（2）的规定。

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- A —— 阻断块材料的原子质量，单位为 g/mol；
- E —— 束流的入射能量，单位为 MeV；
- x —— 束流在阻断块中通过的长度，单位为 cm；
- K —— 常数， $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307075 \text{MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{mol}$ ；
- z —— 束流粒子的原子序数；
- Z —— 组成阻断块材料的各个元素的原子序数；
- β —— 束流粒子的速度与光速的比值，无量纲；
- $\delta(\beta\gamma)$ —— 密度效应修正项，无量纲；
- T_{\max} —— 能量转移最大值，单位为 MeV；

I —— 阻断块材料平均电离能, 单位为 eV;
 M —— 入射粒子质量, 单位为 MeV/c^2 ;
 m_e —— 电子静质量, 单位为 MeV/c^2 ;
 c —— 光速。

4.2 对于化合物类型的阻断块材料, 厚度计算应根据化合物内所有元素的比例及种类分别进行计算后求和得到。

4.3 阻断块厚度实际取值应为计算所得的束流在阻断块中通过的长度 x 与安全系数的乘积, 通常安全系数取值为 1.2~1.5。

5 气动设备设计

5.1 气缸

5.1.1 介质

进入气缸的压缩空气应经过干燥处理, 空气中不应含有有机溶剂成分。

5.1.2 缸体内径

缸体的内径尺寸应按 GB/T 2348-1993 中表 1 执行。缸筒与活塞杆的运动配合精度应按 GB/T 1800.2 执行。

5.1.3 性能

气缸性能应按 JB/T 5923-2013 中第 5 章执行。

5.1.4 技术条件

5.1.4.1 气缸上不应安装磁性开关, 应通过机械限位装置触发阻断块到位信号。

5.1.4.2 气缸排气口应连接有用于增大无杆腔和有杆腔压差的减压阀。

5.1.4.3 气缸竖直安装时, 活塞杆的轴线应与连接杆及阻断块轴线一致, 不应受横向载荷及偏心负载。

5.2 活塞杆

5.2.1 尺寸

5.2.1.1 活塞杆直径尺寸应根据缸体内径得出, 推荐活塞杆直径为缸体内径的 0.5~0.55, 0.6~0.7 倍, 计算后按 GB/T 2348-1993 中表 2 圆整得出。

5.2.1.2 活塞杆长度尺寸应按式 (3) 计算。

$$L = L' + B + A + H \dots\dots\dots (3)$$

式中:

L —— 活塞杆长度, 单位为 mm;

L' —— 活塞行程, 单位为 mm;

B —— 活塞厚度, 通常取值为缸体内径的 0.6~1.0 倍, 单位为 mm;

A —— 导向套滑动面长度, 单位为 mm;

H —— 最小导向长度, 取值应满足 $H \geq \frac{L}{20} + \frac{D}{2}$, 单位为 mm;

D ——缸体内径，单位为 mm。

5.2.2 几何公差

按 JB/T 11129-2011 中 5.4 执行。

5.2.3 表面质量

5.2.3.1 活塞杆表面粗糙度为 Ra 0.8，表面不应有裂纹、锈迹等缺陷。

5.2.3.2 活塞杆外圆表面应镀硬铬或由供需双方商定。

5.2.4 稳定性校核及强度校核

5.2.4.1 当活塞杆长度大于其直径的 10 倍时，应进行稳定性校核及强度校核。

5.2.4.2 活塞杆稳定性校核应符合式 (4) 的要求。

$$F_{P0} \leq \frac{F_k}{n_k} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

F_{P0} ——活塞杆承受的最大轴向压力，单位为 N；

F_k ——纵向弯曲极限力，单位为 N；

n_k ——稳定性安全系数，一般取 2~4。

5.2.4.3 活塞杆强度校核应符合式 (5)、(6) 的要求。

$$d \geq \sqrt{\frac{4F_{P0}}{\pi[\sigma]}} \dots\dots\dots (5)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

d ——活塞杆直径，单位为 mm；

n ——安全系数，一般取 5；

$[\sigma]$ ——材料的许用应力，单位为 MPa；

σ_b ——材料的抗拉强度，单位为 MPa。

5.3 电磁阀

5.3.1 电磁阀流量系数，应符合式 (7)、(8) 的要求。 $P_2 > 0.5P_1$ 的低压差流动，流量系数应按式 (7) 计算， $P_2 \leq 0.5P_1$ 的高压差流动，流量系数应按式 (8) 计算。

$$C_v = \frac{Q}{287 \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{G(273 + T)}}} \dots\dots\dots (7)$$

$$C_v = \frac{Q\sqrt{G(273+T)}}{249P_1} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

C_v ——电磁阀流量系数；

Q ——标准状况下（760 mmHg, 15.6℃）下气体最大流量，单位为 m^3/h ；

G ——气体的相对密度（空气时 $G=1$ ）；

P_1 ——阀进口压力，单位为 kgf/cm^2abs ；

P_2 ——阀出口压力，单位为 kgf/cm^2abs ；

T ——气体温度，单位为℃。

5.3.2 气缸进气口处连接的电磁阀应具有常闭功能，气缸排气口处连接的电磁阀应具有常开功能。

5.3.3 电磁阀应符合 GB/T 4213 的规定，与电磁阀连接的管路规格应按电磁阀的管径确定。

6 焊接波纹管设计

6.1 材料和尺寸

6.1.1 制造焊接波纹管的材料宜采用 316L 不锈钢。

6.1.2 波纹管厚度应在下列尺寸系列中选择：0.05 mm、0.06 mm、0.08 mm、0.10 mm、0.12 mm、0.15 mm、0.20 mm、0.25 mm、0.30 mm、0.50 mm。

6.1.3 波纹管几何尺寸允许偏差应按 JB/T 6169-2006 中表 6 执行。

6.2 外观

波纹管外观应光滑，内外壁不应有飞边、毛刺、裂口、硬块等影响使用的缺陷。

6.3 焊接

6.3.1 焊接接头直径的公差应与焊接波纹管波片相应直径的公差一致，焊接接头厚度与波片厚度之比应取 1.5~3.0。焊接的技术条件应符合 JB/T 6169-2006 中 7.2 的规定。

6.3.2 波纹管与两端法兰的焊接宜采用钨极惰性气体保护焊，电弧保护气体为 99.99%Ar，焊后采用 304 不锈钢钢丝刷刷洗焊缝，并用酒精清洗焊缝。

6.4 气密性

6.4.1 当束流阻断器的工作环境有真空度要求时，应做气密性试验，试验气体压力不小于公称压力，不应出现泄露或大于泄露率规定值的现象。

6.4.2 气密性试验应按 JB/T 6169-2006 中 8.6.1.2 的规定执行。

6.5 外加轴向集中力

波纹管与真空腔体相连，内部处于真空状态，外加轴向集中力由外部的大气压力、气缸所提供的压力以及弹簧阻尼作用组成，应符合公式（9）、（10）要求。

$$F = F_c + F' - F_t \dots\dots\dots (9)$$

$$F_t = k_t \cdot x \dots\dots\dots (10)$$

式中:

- F —— 外加轴向集中力, 单位为 N;
- F_c —— 气缸所提供的压力, 单位为 N;
- F' —— 外部的大气压力, 单位为 N;
- F_t —— 弹簧阻尼作用力, 单位为 N;
- k_t —— 波纹管的弹性系数, 单位为 N/mm;
- x —— 波纹管的压缩量, 单位为 mm。

7 机械装配及控制要求

7.1 机械装配要求

7.1.1 装配完成后阻断块在阻断状态下与束流中心的同轴度误差应不大于 0.1 mm, 未注尺寸公差和未注形位公差应按照 GB/T 1804、GB/T 1184 执行。总体组装完成后应进行真空检漏, 整体检漏漏率应小于整体输运线漏率的设定值, 焊缝检测应按 GB/T 11345 的规定执行和评定。

7.1.2 宜选择产品基体或主干零件为装配基准件。装配基准件应有足够支承面, 满足陆续装入零件时的作业要求和稳定性要求。

7.1.3 应制定操作规范。

7.2 控制要求

7.2.1 从控制系统发出指令开始到切断质子束所需时间应不大于 120 ms。

7.2.2 系统应配置 UPS 应急电源, 并为阻断块位置、气源压力等监测装置提供合适的构件或接头。

7.2.3 压缩空气供断时, 触发紧急连锁程序, 电磁阀关闭使束流阻断器进入阻挡状态。

7.2.4 电磁阀断电时, 束流阻断器应处于切断束流状态。

7.2.5 束流阻断器所使用的电气产品额定电压为 220 V。

7.2.6 控制系统的设计和选型宜参照 GB 4793.1。