

高温真空除气对材料磁导率的影响

张军辉¹, 马力祯¹, 杨晓天¹, 李建新²

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000;

2. 兰州真空设备有限责任公司, 甘肃兰州 730050)

摘要: 为了满足真空材料出气率的要求, HIRFL-CSR 工程超高真空系统制定了高温真空除气工艺, 此工艺在明显降低了材料的体出气率的同时, 对降低真空室材料在机加工、焊接等过程中所产生的磁性有显著的作用。

关键词: 高温真空除气; 超高真空材料; 磁导率; HIRFL-CSR

中图分类号: TQ024; TG113.22⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2004)04-0218-03

THE EFFECT OF THE VACUUM FURNACE DEGASSING FOR MATERIAL'S RATE OF MAGNETIC CONDUCTIVITY

ZHANG Jun-hui¹, MA Li-zhen¹, YANG Xiao-tian¹, LI Jian-xin²

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Vacuum Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to satisfy out-gassing rate of UHV material, the degassing method by high temperature and high vacuum has been used for HIRFL-CSR project, which can not only reduce out-gassing rate of vacuum material but also greatly depress rate of magnetic conductivity.

Key words: high temperature and vacuum degassing; UHV material; rate of magnetic conductivity; HIRFL-CSR

1 引言

作为国家“九五”重大科学工程的兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)工程是一个大型加速器装置,它包括主环、实验环、RIB 分离线和注入线,能提供直到 U^{92+} 的全剥离重离子束流。为了满足束流在环中的储存寿命,减少束流的损失,因而在物理设计中要求系统的平均真空度好于 3×10^{-9} Pa^[1],同时,高精度的磁场要求安装在磁隙中的真空室材料的相对磁导率 μ 小于 1.04。HIRFL-CSR 工程制定的不锈钢高温除气处理工艺能同时对材料的出气率和相对磁导率产生显著的影响。

2 真空室和磁场的相互关系

2.1 磁场的物理参数

为了实现高能重离子束流在储存环中的存储(存储周期为 10 s)和精确闭轨,所以不但要求足够高的磁场强度,而且要求场区内有极高的横向分布。以储存环中典型的二极偏转磁铁为例,其磁场的物理设计参数如下。

磁场范围为: 0.1~1.5 T; 上升速率为: 0.1~0.4 T/s; 偏转半径为: 7.6 m; 偏转角度为: 22.5°; 有效长度为: 2.965 m; 有效孔径为: 140×60 mm²; 磁场均匀度($\Delta B/B$)为: $\pm 1.5 \times 10^{-4}$; 磁场分散性($\Delta BL/BL$)为: $\pm 2 \times 10^{-4}$ 。

收稿日期: 2004-09-21.

作者简介: 张军辉(1973-), 男, 甘肃省秦安县人, 工程师, 从事加速器超高真空系统的设计建造。

2.2 真空室对磁场的影响

HIRFL-CSR 的总长度为 450 m, 包含二极、四极、六极磁铁以及校正磁铁、bump、kicker、切割磁铁等各种各样的磁铁。虽然它们在储存环中的作用各不相同, 但对于安装于其中的真空室材料的相对磁导率(μ)的要求是基本一致的。

图 1 所示为二极磁铁和真空室的安装机械图, 截面为 160 mm × 80 mm 的真空盒由 4 块 304 不锈钢板焊接而成。在加工和焊接的过程中, 304 不锈钢板的相对磁导率(μ)会产生较大的变化, 从而从以下几个方面对磁场产生影响。

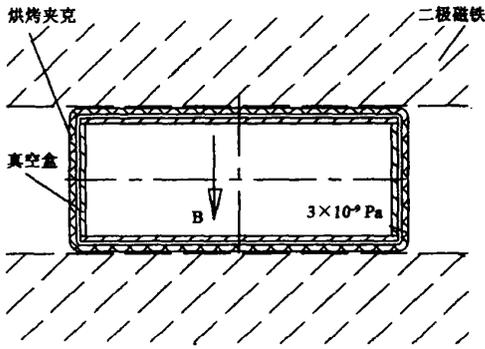


图 1 二极磁铁和真空室的安装机械图

(1) 为了得到一定的磁场分布, 所以将磁铁的磁极头都加工成相应的特殊形状, 如四极铁的极头为双曲面, 二极铁的极头两边加一定的垫铁等。如果真空室材料的磁导率偏高, 那就相当于在气隙中加了一定的铁量, 而这种铁量的分布是随真空室的形状分布的, 而且, 真空室一般都紧贴极面, 相当于对优化了的极面造成变形, 从而对磁场造成畸变。

(2) 材料的磁导率偏高时, 材料各处的磁导率是不均匀的, 特别是经过焊接和机械加工后, 这种磁导率的不均匀性将更为明显, 相当于在气隙中不均匀地加了一定的铁量, 从而造成磁场畸变。

(3) 由于激磁曲线的测试是在没有真空室的情况下进行的, 而运行时的磁场将受真空室的影响, 所以, 真空室材料的磁导率偏高将对磁铁的激磁曲线造成误差。

如果把材料相对磁导率为 1.1 左右、壁厚为 5 mm 的真空室安装在磁铁气隙为 100 mm 的二极磁铁中, 那么造成的磁场畸变约为 1/1 000, 同时造成 1/1 000 的激磁曲线误差。然而, 磁场的物理设计参数要求磁场均匀度($\Delta B/B$)小于 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$, 磁场分散性($\Delta BL/BL$)小于 $\pm 2 \times 10^{-4}$, 所以 1/1 000 的磁场畸变远远满足不了束流对磁场的要求。根据磁场计算和精密测量, 加工成形后安装于磁场中的真空元件的相对磁导率应该小于 1.04。

3 真空室高温除气对真空室材料磁导率的影响

HIRFL-CSR 真空系统全长 450 m, 平均真空度好于 3×10^{-9} Pa, 是一个全金属并且能承受现场烘烤的极高真空系统。为了同时满足机械、真空、磁场等各方面的要求, 真空室的奥氏体不锈钢板材和管材主要有以下几种构成: 来自瑞典 AVESTA 公司的 316LN、316L、304; 从国内市场采购的 1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni9 等。

根据系统的设计要求, 为了达到 3×10^{-9} Pa 的真空度, 因此构成真空室的材料的平均出气率必须小于 3×10^{-11} Pa·L/s·cm²[2]。所以, 在真空系统的整个加工过程中, 除了要保证合理的机械加工工艺、真空清洗工艺、良好的焊接工艺外, 对真空元件进行高温真空除气和对真空系统进行适宜温度[3]的现场烘烤也是必不可少的环节。特别是高温真空除气对于大大降低材料的出气率[4]显得尤为重要。

整个除气过程中均是在 ZR-80 真空炉中进行的。ZR-80 真空炉的主要指标为: 均温区尺寸为 $\phi 800$ mm × 3 000 m; 极限真空度为 5×10^{-5} Pa; 最高工作温度为 1 150 °C; 均温区温度均匀性为 ± 5 °C。图 2 为系统

安装之前真空部件高温除气的典型曲线。除气温度为 950 °C, 保温 1 h; 为了防止薄壁焊接件的变形, 所以使用了较小的升温速度, 并在 500 °C 时设置了相应时间的保温段; 在 850~600 °C 的降温段, 进行充氮强制冷却(小于 15 min), 以防止奥氏体不锈钢内的碳晶粒析出; 然后工件随炉冷却至室温。

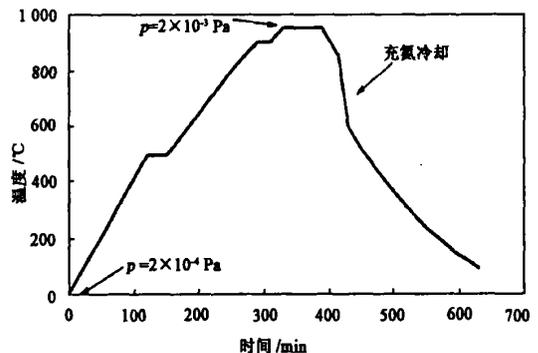


图 2 除气曲线

表 1 所列为几种常用材料在不同加工状态下所测得的相对磁导率数值。测量的仪器采用美国进口磁导率测试仪(Permeability Indicator # 6467, Severn Engineering Co.)。

表 1 几种材料的相对磁导率数值

	1Cr18Ni9Ti	0Cr18Ni9	316L	304	1Cr13
原材料	1.02	1.03	1.02	1.03	>1.10
机械加工后	1.03	1.05	1.04	1.05	>1.10
焊接后	>1.10	>1.10	>1.10	>1.10	>1.10
除气后	<1.02	<1.02	<1.02	<1.02	>1.10

其中,原材料的磁导率是从所购的 $2\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的钢板及钢管的中心和边缘处测得数据的最大值;其余数值是由从原材料上所取得的 $50\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的样片经过各种处理后所测的数据。表中机械加工后则是指样片经过激光切割、刨或铣后的数据;而焊接后的数据是经过自融焊后从焊缝处测得的;除气后的数值是在整个工件上所测得的最大值。

从表 1 看出,除 1Cr13 非奥氏体不锈钢外,常用的奥氏体不锈钢在机械加工后的磁导率均能满足加速器磁场的要求,但是焊接后它们的磁导率明显增大。

4 结 论

HIRFL-CSR 工程所确定的真空高温除气工艺不但能满足真空系统对材料出气率的要求,而且能大大降低在加工过程中引起的材料磁导率的升高,满足高精度磁场的要求。这种成熟的工艺可以推广到既要求极高真空又要求高精度磁场的复杂系统中。目前,HIRFL-CSR 主环已经安装完成,进入调试束流阶段。系统真空度好于 $3 \times 10^{-9}\text{ Pa}$,磁场的精度可满足物理设计要求。

参考文献:

- [1] 杨晓天,张新俊,张军辉,等.兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)真空系统[J].真空,2000,2;20.
- [2] 杨晓天,张军辉,张新俊,等. HIRFL-CSR 超高真空系统[J].真空,2003,5;32.
- [3] 张军辉,杨晓天,蒙峻,等. HIRFL-CSR 超高真空烘烤系统[J].真空,2003,2;27.
- [4] 张军辉,杨晓天,蒙峻,等.真空炉高温除气工艺对降低不锈钢出气率的作用[J].真空与低温,2003,9(2);105~108.

本刊加入“万方数据——数字化期刊群”的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,本刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”,所以,向本刊投稿并录用的稿件文章,将一律由编辑部统一纳入“万方数据——数字化期刊群”,进入因特网提供信息服务。凡有不同意见者,请特别声明,需另作处理。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬,不再另付。

“万方数据——数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目。本刊全文内容按照统一格式制作,读者可上网查询浏览本刊内容,并征订本刊。

《真空与低温》编辑部
2004 年 12 月