

# ITER 遥控运输车双密封门系统 FMEA 分析

章世军 姚达毛 许铁军 刘常乐 程涛  
(中国科学院 等离子体物理研究所, 合肥 230031)

Analysis double seal door of the ITER remote handling transfer cask system by FMEA

QIN Shi-jun, YAO Da-mao, XU Tie-jun, LIU Chang-le, CHENG Tao

(Institute of plasma physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**【摘要】** 遥控运输车是国际热核实验堆(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor)用于堆和热室之间的运输工具。双密封门是遥控运输车上可分开, 分别密封真空室窗口和运输车的关键部件。介绍 ITER 遥控运输车及双密封门结构与工作程序, 对双密封门系统进行 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)分析并作出分析表, 找到薄弱环节, 为防止及减少故障的发生提供依据。也为下一步 ITER 其他系统及重要部件的可靠性分析提供范例。

**关键词:** ITER; 双密封门; FMEA; 污染泄漏

**【Abstract】** The Transfer Cask System is an transfer instrument which move between reactor and hot cell in International Thermonuclear Experimental Reactor. In transfer cask system the double seal door is a key component that can be separated and then airproof the ITER port and the transfer cask. Introduce the cask, the structure and working process of the double seal door, doing FMEA analysis for the double seal door and making out the FMEA table, find out the flimsy parts, can provide warrant in preventing and reducing the happening of accidents. Provide the reliability analysis exemplification for the other importance systems and parts in ITER.

**Key words:** ITER; Double seal door; FMEA; Contamination leak

中图分类号: TH16 文献标识码: A

## 1 引言

国际热核实验堆(ITER)是正在进行的一项大型国际合作项目。作为世界上第一个核聚变实验堆, ITER 将集成当今国际受控磁约束核聚变研究的主要科学和技术成果, 实现在受控热核聚变实验堆上的点火, 同时探索解决通向聚变电站的关键问题<sup>[1,2]</sup>。ITER 大部分组件的维护和操作都会涉及到已活化的材料和有毒的尘埃, 还有氚的放射性, 人不能直接面对和接触这些部件, 需要通过遥控操作系统和遥控车来进行这些部件的更换和维修操作。双密封门是遥控车中用于阻止有毒尘埃向周围空间扩散的一个重要部件, 需要对其可靠性进行评估。对双密封门的操作进行 FMEA 分析, 是为了在设计和制作过程中尽可能避免那些存在较大可能性的失效, 同时为了在检修和维护过程中能引起特别的重视。

## 2 ITER 遥控运输车及双密封门结构

### 2.1 小车结构

ITER 遥控小车(已去掉两侧板和顶板)由底盘、双密封门、车厢、车内牵引机等四部分组成, 如图 1 所示。底盘起到支撑整个小车及其内部部件作用, 同时通过底盘上的齿轮齿条, 辘子等部件运动可实现小车和窗口之间位置的调整。车厢由车箱框架和覆盖板组成, 能够阻止污染泄漏。车厢材料坚固能抵挡住车厢内部的

正压和负压。牵引机是遥控运输车内部用于操作真空室窗口的一个系统, 通过遥控牵引机系统可以拧紧和拧开窗口螺栓, 把真空室内需维修/更换的部件移到小车内并放进热室中, 或从热室中把部件放进车中并放回真空室内。双密封门对接结构, 如图 2 所示。

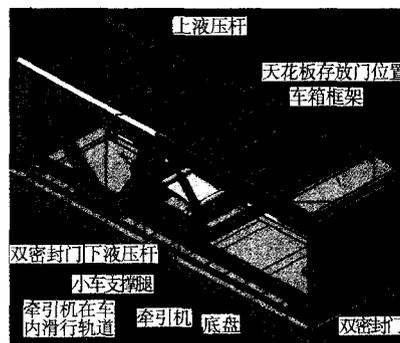


图 1 小车结构

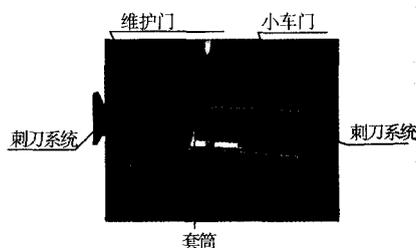


图 2 双密封门对接机构

## 2.2 双密封门概述

位于车前后位置各有一个双密封门,如图 2 所示。双密封门的“双密封”即:一方面双密封门是由通过联接机构联在一起的双层门组成,靠外面一层是用于密封窗口的维护门,维护门的作用是小车内的牵引机操作窗口内需要维修/更换的部件之后,车离开时需对窗口进行密封,避免真空室内有毒尘埃扩散到周围环境中;靠内侧的一层是用于密封小车的门,该门在车离开窗口时封住车上用于操作的通道,避免位于车内的部件上有毒尘埃扩散到环境中。另一方面两层门上都有用于密封的两道“O”形密封圈,这两道密封圈不仅可以用于密封,同时可利用两道密封圈之间的空间来检查密封是否有泄漏(要求漏率 $<1 \times 10^{-2} \text{Pam}^3/\text{s}$ )。如图 3 所示,是由小车中心轴线剖开看到的双密封门密封结构图,可看出在两层门之间、维护门和真空窗口之间、小车门和小车之间、小车门和双密封门系统之间都有密封圈。

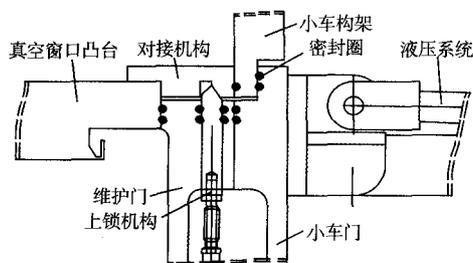


图 3 双密封门的密封结构

## 2.3 双密封门主要部件及工作原理

遥控运输车运动到真空窗口前并完成位置调整后,车上双密封门通过位于顶部的液压缸拉动连杆,位于底部的液压缸推动液压杆,双密封门沿车箱内轨道移动到车箱顶部。当把要维修内部部件拿到车箱后,在液压缸驱动下,上液压杆往前推,把门推到轨道上,然后下液压杆一拉,双密封门回到原来位置,下液压杆往前一推,门到达关闭位置。

双密封门上锁机构包括电机、三个齿轮、插梢、一个转盘等,电机启动时,三级齿轮系转动,最大的锥形齿轮驱动转盘为上锁机构提供力矩。传动装置处在维护门和小车门之间,电机装在小车门上,两个门对接在一块时力矩可以传到维护门上的插梢,如图 4、图 5 所示。当齿轮做逆时针旋转时上锁机构插梢插到真空窗口孔中,维护门关上,维护门和真空窗口被锁紧。齿轮做顺时针旋转,插梢从真空窗口孔中拔出,维护门打开。小车门则通过上下液压杆顶到小车门槛上,密封圈使小车门和小车之间有很好的密封性,实现小车门和小车锁紧。

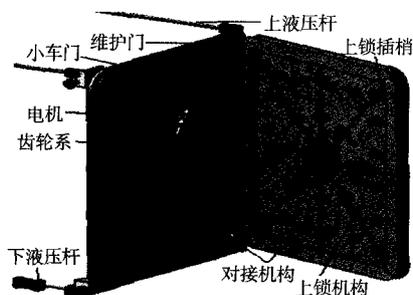


图 4 双密封门结构

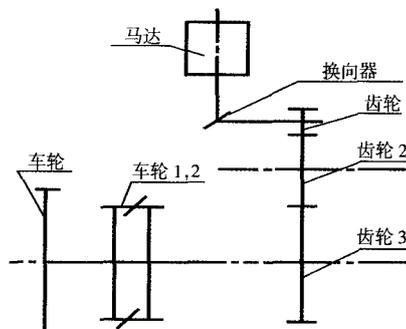


图 5 双密封门齿轮系

当把维修好的内部部件放回真空室时,套筒旋转,两个刺刀机构卡死,两门对接起来,如图 2 所示。当从真空室取出需维修部件后,套筒旋转,两门刺刀机构之间没卡死,启动电机锁紧维护门,上下液压杆顶把小车门顶到小车门槛上后,小车启动并脱离真空窗口,实现两门的脱离。

## 3 ITER 遥控运输车双密封门系统

### 3.1 FMEA 分析法

FMEA 是在系统或设备设计、工作过程中,通过对其组成单元的各种潜在故障模式及其对系统或设备的影响进行分析,并把每一个故障模式按它的严重性予以分类,提出可以采取的设计、预防、改进措施,以提高系统或设备的可靠性的一种可靠性分析方法<sup>[4]</sup>。对 ITER 遥控运输车双密封门系统进行 FMEA 分析,主要是针对可能引起双密封门无法正常打开和关闭、以及小车无法对接和脱离窗口的一些主要部件和操作进行分析,建立分析表,内容如下:被评定对象名称及功能、潜在失效模式、该失效可能产生的影响、严重性、严酷度分类、可能的失效原因、发生的可能性、现有控制方法、不易探测度、综合指数、建议措施。

按最终对双密封门系统的影响以及是否造成可能的污染泄漏,对故障模式划分为 4 类严酷度类别: I 类(灾难性)、II 类(致命性)、III 类(严重的)、IV 类(轻度的)。

严重度的判定准则是发生故障后果的严重性,根据发生的故障对系统影响的程度由没有影响到中等影响,到最后的灾难性影响,可以把严重度划分为十个等级。

频度数是对所研究的部件在设计寿命期内每 100 个或 1000 个部件中的累计故障数(Cumulative Number of Failures, CNF)(分别对应 CNF/100 或者 CNF/1000),同时在设计中寿命期是部件的耐久性为目标。虽然无法制造出很多个遥控小车来进行实验,但是对于涉及到的各个部件在工业中仍有经验可循。根据 CNF/1000 的大小可以把频度数划分为十个等级。

不易探测度评价准则是利用现行控制方法找出故障存在的可能性,根据探测失效模式的可能性,由几乎肯定能探测到故障发生,到探测故障发生可能性中等,最后几乎不可能探测到故障发生,可以把不易探测度分为十个等级。

严重度(Severity)、频度数(Occurrence)和不易探测度(Detection)三个数相乘得到风险综合指数(RPN, Risk Priority Number),公式如下:

$$\text{RPN} = \text{S} \times \text{O} \times \text{D} \quad (1)$$

# 真空吸尘车吸尘口的流场仿真和结构优化

朱伏龙<sup>1</sup> 张冠哲<sup>2</sup> 陈杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>上海交通大学, 上海 200240)(<sup>2</sup>哈尔滨工业大学(威海), 威海 204269)

## Flow field analysis and structure optimization of vacuum sweeper suction mouth

ZHU Fu-long<sup>1</sup>, ZHANG Guan-zhe<sup>2</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)(<sup>2</sup>Harbin Institute of Technology, Weihai 204269, China)

**【摘要】**运用计算流体力学技术对真空吸尘车吸尘系统的流场进行仿真分析与结构优化。仿真采用非结构网格对吸尘口进行网格划分,运用标准双方程作为湍流计算模型。通过对初始设计方案的流场仿真分析,得出影响吸尘效率的原因为结构所引起的不合理流场分布。通过将原有简单连接方式的结构改进为过渡连接和吸盘上平面带收缩角的结构实现了流场分布的合理化,提高了吸尘效率。

**关键词:**真空吸尘车;吸尘口;流场仿真;结构优化

**【Abstract】**Simulation of flow field and structure optimization of the suction mouth of vacuum sweeper are completed based on Computational Fluid Dynamics (CFD) technology. Un-structured meshes were used to generate grids and the *k-ε* model was used to simulate the turbulent flow. Through the simulation analysis of the beginning design scheme, it indicated uneven flow field caused by unreasonable structure reduces the dust suction efficiency. After the linkage method was changed from simple to smooth structure and the upper surface was changed into diagonal surface, the situation of flow field distribution was optimized and the suction efficiency was raised.

**Key words:** Vacuum sweeper vehicle; Suction mouth; Flow field analysis; Structure optimization

中图分类号: TH12 文献标识码: A

## 1 引言

颗粒污染物是城市大气污染的首要污染物,其中交通扬尘对颗粒物浓度的影响最大。减少各种尘土进入道路和进行道路清扫是控制交通扬尘污染的主要措施。通过对国内外多种清扫车的排放浓度和吸尘效率进行测试研究表明,采用先进的清扫设备可以

\* 来稿日期: 2008-01-05

对一个被分析系统或部件,高的 RPN 要优先考虑并重点对其采取措施,然后不管 RPN 数值大小,当失效模式严重度数大时,就应引起特别重视。

### 3.2 ITER 遥控运输车双密封门系统 FMEA 分析

在分析双密封门工作过程和做 FMEA 分析中,假设没有次生事故发生。双密封门的三级齿轮系转动是主要的故障模式,因这时需要维修的内部部件已拿到车箱内,而那时维护门却无法锁到窗口上,这样如果开走则后果比较严重,因窗口内部部件暴露在大厅中,整个大厅都受到污染。而且齿轮系有一部分是固定在小车门上一部分固定在维护门上,两个对接起来需要很好的吻合才能正常工作,它的遥控性和精密性决定了齿轮系故障发生的经常性和不易探测性都比较高。电机故障、套筒旋转故障是第二故障模式和第三故障模式。在插梢故障中,虽然 RPN 并不是很高,但严重度是 8,在所有故障中最高,在操作过程中要特别重视。因维护门插梢故障时无法通过遥控小车去解救,这时只能通

有效地控制交通扬尘<sup>[4]</sup>。

真空吸尘车作为新概念的纯吸式吸尘车<sup>[2]</sup>,是利用高压风机产生的负压将颗粒吸进回收箱。真空吸尘车在结构上分为两部分即吸尘系统和降尘系统。真空吸尘车具有降低使用成本(例如省去了更换扫刷的费用),杜绝因传统扫路车扫刷引起的二次扬尘

过人工直接到窗口前进行操作,这个风险是最大也最不安全的,一旦在操作过程中的失误,将是整个真空室内所有污染物和放射性物质与人的直接接触。

## 4 结论

通过 FMEA 分析,发现最容易发生故障是三级齿轮系,其次是电机、套筒、插梢、液压杆、刺刀等,引起特别重视的故障模式是插梢,找到了 ITER 遥控运输车双密封门系统的薄弱环节和潜在弱点,为在检修、维护和操作过程中应注意的环节提供了依据。也为下一步 ITER 其他系统及重要部件的可靠性分析提供范例。

### 参考文献

- 1 赵君煜. 国际热核聚变实验堆(ITER)[J]. 物理, 2004(4): 260
- 2 Aymar R. ITER 设计[J]. 国外核聚变, 2003(2): 45
- 3 Remote Handling Equipment, Port Handling Equipment & Transfer Cask. ITER Design description Document(23)[R], 2004(8)
- 4 李海泉, 李刚. 系统可靠性分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2003