

# 10 MW 高温气冷实验堆燃料元件装卸系统研制

刘继国,肖宏伶,王伟成

(清华大学核能技术设计研究院,北京 102201)

**摘要:**根据国际上类似系统的设计和运行经验,彻底改进了10 MW 高温气冷实验堆(HTR-10)燃料元件装卸系统的单列器、碎球分离器、提升器、控制系统,以使系统变得更为简单、可靠。改进后的设备均在全尺寸实验装置上进行过试验。系统的调试试验和初装料运行表明:该系统的性能满足HTR-10的要求。

**关键词:**10 MW 高温气冷实验堆;燃料元件装卸;单列器;碎球分离器;提升器;控制系统

**中图分类号:**TL352.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2003)04-0334-06

## Development of the Fuel Handling System in 10 MW High Temperature Gas-cooled Reactor

LIU Ji-guo, XIAO Hong-ling, WANG Wei-Cheng

(Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China)

**Abstract:** According to international experience at design and operation of similar systems, the reducer, the failed fuel separator, the elevator and the control system of the fuel handling system(FHS) in 10 MW high temperature gas-cooled reactor(HTR-10) are improved so that the system becomes simpler and more reliable. The improved components are tested in full-scale testing facilities. The debugging test and the first loading operation for the FHS indicate that the FHS meets the demands of the HTR-10.

**Key words:** 10 MW high temperature gas-cooled reactor; fuel handling; reducer; failed fuel separator; elevator; control system

10 MW 高温气冷实验堆(HTR-10)设计与建造任务来源于国家“863”计划能源技术领域。2000年12月1日建成并达到首次临界。该堆是一座用氦气作为冷却剂,石墨作为反射层材料、中子慢化材料和球形燃料元件结构材料的球床堆。对于燃料元件多次通过堆芯的球床高温气冷堆,燃料元件装卸系统是

实现和保证反应堆连续运行的关键系统之一,它与用棒状或块状燃料元件运行的反应堆的加料机构明显不同,可在反应堆运行期间连续装入、再循环和卸出燃料元件。系统中绝大部分部件为机械运动部件,并在高温、高压、氦气氛和强放射条件下工作,这对系统的执行部件和传动部件的设计提出了很高的要求。本工作在充分吸收德国

收稿日期:2002-07-10;修回日期:2002-10-06

作者简介:刘继国(1944—),男,辽宁盖州人,研究员,机械工程专业

AVR 球床堆燃料元件装卸系统中类似设备的设计和运行经验基础上<sup>[1,2]</sup>,历时近 13 年的设计和实验研究<sup>[3]</sup>,对一些关键设备进行改进和新的设计,以使得系统更加简单、安全和易于维修。

## 1 燃料元件装卸系统

### 1.1 功能与参数

根据 HTR-10 总体设计要求,燃料元件装卸系统应具有下述功能:1) 初始堆芯装料;2) 燃料元件从堆芯下部的燃料卸料管中单列排出;3) 对排出的燃料元件进行燃耗测量并根据测量结果将未达到最终燃耗的燃料元件装回堆芯;4) 分选出燃料元件碎片和破损的燃料元件并装入碎燃料罐中;5) 卸出乏燃料元件并转送到燃料元件装运罐中暂存;6) 装入新燃料元件到堆芯中。

系统主要参数为:快速循环约 350 个每小时;常规循环约 50 个每小时;每满功率天(EFPD)通过加料管装载的燃料元件总数约 125 个,其中,未达到最终燃耗的元件数 100 个,卸出的乏燃料元件数约 25 个,装入的新燃料元件数约 25 个;每个元件平均燃耗测量时间约 60 s;设计压力 3.5 MPa;运行压力 3.0 MPa;运行温度 150~180 °C;提升元件速度 6~8 m/s;元件直径 60 mm。

设备及管路主要参数为:碎燃料罐容量约 1 000 个燃料元件;乏燃料卸料缓冲管段容量 30 个;加燃料管段容量 25 个;乏燃料装运罐容量约 2 000 个;脉冲气流发生器容积 0.075 m<sup>3</sup>;提升管直径 62 mm;元件下落管直径 65 mm;磁力传动器转矩 400 N·m;电动装置转矩为 400 N·m;脉冲速度 30 次每小时;碎球分离检测的碎球尺寸 56.5 mm。

### 1.2 工作原理

燃料元件装卸系统流程参见文献[4]。当需要向堆芯加入新燃料元件时,将新燃料元件袋(每袋 10 个或 5 个燃料元件)装入到装料手套箱中,用箱内切剪切开包装袋,这些元件靠重力滚动到提升器前的给料管中。在装新燃料元件过程中,手套箱内保持负压,以防空气进入给料管中。在装料管段上有 3 个隔离阀、1 个计数器和 2 个电磁滑阀,3 个隔离阀每相邻 2 个

是联锁的,它们在每段管路的气氛切换中只能同时关闭,不能同时打开,以便将一回路冷却气体与大气隔离开。计数器用于记录装入的元件数<sup>[5,6]</sup>,电磁滑阀用以保护隔离阀,使元件不会直接撞击到其球体上,保证其密封性。每天加一次料,每次加入 25 个新元件到提升器前的给料管中,通过提升器下部的快动作电磁阀动作,借助纯氦气压力逐个输送到堆芯。

堆芯中的燃料元件靠自重自上而下运动,由堆芯顶部运动到底部,然后进入 500 mm 内径的卸料管,逐渐到达卸料管下部单列器的料箱。借助料箱底部的斜面滚动到单列器的大漏斗处。大漏斗出口直径较小,在此处自然产生“球桥”,元件停止流动。当需卸料时,间断施加脉冲气流,其冲击力作用到“球桥”的元件上,元件不断单列排出。停止脉冲,元件又会在大漏斗出口处形成“球桥”,直到施加下一个脉冲为止。排出的元件经竖直排出管,逐个进入到碎球分离器接球管中,第 1 个排出的元件到达碎球分离器带有一缺口的凸轮上。随着碎球分离器的转动,元件逐个进入其检测区,经检测,分选出元件碎片和破损元件,靠自重落入到其下部的碎燃料罐中,同时,计数器记录落入的破损元件数。完好的元件逐个从碎球分离器始端运动到末端,滚动到提升器处,在提升器处进行燃耗测量,由计算机计算测量值,控制系统根据测量结果指令提升器分配盘向目标输送管口转动,借助气体压力,将未达到目标燃耗深度的元件通过提升管送回堆芯,将达到目标燃耗深度的乏燃料元件通过乏燃料提升管输送到卸料缓冲管段暂存。

当卸料缓冲管段中的乏燃料元件达到 25 个时,需要进行卸料操作。首先,关闭卸料缓冲管段上第 1 道隔离阀;然后,进行每相邻 2 个隔离阀之间管路的气氛切换,此管段上隔离阀、计数器、电磁滑阀数量和功能同装料管段;气氛切换完成后,25 个乏燃料元件排队进入分配器前管道中,等待分配。在反应堆初期运行时,需要将初装堆芯中的石墨元件卸出。控制系统根据燃耗测量结果指令分配器分配,将乏燃料元件分配卸到乏燃料装运罐中,将石墨元件卸到石墨元件容器中。当石墨元件从堆芯全部卸出后,分配器便完成了其使命,乏燃料元件不再由分配器进行

分配而直接卸到乏燃料转运罐中。当转运罐中的乏燃料元件数量达到 2 000 个时,由罐盖封压机机构将屏蔽罐塞压入到罐颈中,由乏燃料库中的转运小车将装运罐移出卸料位置,再由库中起重机将装运罐吊至贮存位置<sup>[7]</sup>。

### 1.3 系统设备的设置

系统中设置了 13 个隔离阀。一回路压力边界上的隔离阀用来保证压力边界的完整性,在维修其下游设备时,切断反应堆的冷却气体,而不必将反应堆放气、泄压。在与大气接口装料管段和卸料缓冲管段上的隔离阀用来进行分步气氛切换,防止空气进入和放射性氦气逸出。

在系统一些重要部位上设置了 14 个计数器,记录通过各测量位置的元件数和监控元件在管路中的运动状态、充满水平,达到记录和监控目的,同时通过这些计数器的显示数目,达到燃料元件管理目的。

系统气体管路上设置了 17 个电动截止阀和手动截止阀。其中一些用来进行气氛切换,通过它们的交替开启和关闭,对管段进行放气、抽气(由无油真空泵完成)和充气,另一些用来处理过球管路中元件的堵塞或滞留故障。

过滤器用于过滤排出气体中的石墨粉尘。减压阀用于将来自氦净化系统、氦供应和贮存系统的氦气减至所需的设定压力。

## 2 系统中的关键设备

### 2.1 单列器

堆芯下部形状象一漏斗,其出口处与燃料元件卸料管相接,单列器则位于堆芯内卸料管下部,它由上箱体、下箱体、大漏斗、小漏斗、脉冲气流管和排出管以及辅助设备脉冲气流发生器组成。

上箱体内径 500 mm 的钢管通过迷宫环与堆芯下部石墨卸料管相连,上下箱体由止口相接后外部焊接。下箱体底部平面与水平面成 15°,斜面向一侧延伸与大漏斗相接。由于摩擦力的作用,元件在大漏斗内高度始终保持在一定范围内,不会充满料箱,这样,在大漏斗处只堆积少量元件,易于松动。小漏斗入口与大漏斗出口相连,脉冲气流管道出口位于小漏斗内壁上。大漏斗出口直径小于 2 倍元件直径,元件在此处极易结成“球桥”。该设备正是利用元

件在流动中易于结桥来限制元件的流动。当需要排球时,启动脉冲气流发生器的快动作电磁阀,脉冲气流发生器贮气罐中的压缩气体快速释放出,产生较大的冲击力并作用在“球桥”的元件上,克服球间静摩擦力和自身重力,元件便单列向排出管中运动。反复施加脉冲,元件逐个连续进入碎球分离器前的接球管中,排队等待碎球分离器分选。当此管中元件数达到或超过上限设定值时,脉冲自动停止,元件停止排出;当此管中元件数小于下限设定值时,脉冲自动启动。

由于使用了脉冲气流破桥助流方法从卸料管中单列排出元件的单列器,在料箱和压力壳内没有需拆卸和维修的机械运动部件,只有脉冲气流管和元件排出管通入壳内,其余相关设备均安装在壳外。通常,这类设备在拆卸和维修时,需要反应堆放气、泄压等复杂工序和处于放射性环境下工作。单列器的应用,解决了这些难题,同时提高了反应堆的可利用性。

### 2.2 碎球分离器

碎球分离器的功能是:1) 分选出燃料元件碎片和破损元件,以便提高输送效率、输送稳定性和减少因元件破损造成一回路冷却气体放射性升高的可能性;2) 将单列排出的元件进行单一化处理,为燃料测量提供必要条件。

碎球分离器由壳体、辊筒、凸轮、排球管、测量板、碎球漏斗、磁力传动器、减速机、马达等组成。测量板和辊筒水平装配,并具有 56.5 mm 的间隙,任一直径方向尺寸小于 56.5 mm 的元件便作为碎球被分选出去,使之不再进入堆芯。碎球漏斗安装在壳体内辊筒下面,并覆盖辊筒下面所有区域,所有被分选出的燃料元件碎片和破损元件均落入到此漏斗中。在漏斗出口处设置了一脉冲气出口,若有两个或两个以上破损元件同时到达漏斗出口形成“球桥”,则可施加脉冲气流予以破坏,使之顺利排出到碎燃料罐中。在辊筒的始端有一带缺口的凸轮,此缺口作为燃料元件的单一出口。碎球分离器每转动一周,只有一个元件落到辊筒表面上进入检测区,完成单一化过程。元件在检测板和辊筒表面间借助螺旋齿不断向辊筒末端作不规则运动。为了增加自身转动,在螺旋齿侧面镶嵌改向齿,使元件在运动过程中其表面每一点几

乎都能与辊筒表面和检测板表面接触,从而提高分选的准确度。

元件从进入碎球分离器到离开,滚动行程约 4.5 m,这一滚动行程对于分选破损元件是足够的。在检测中,燃料元件碎片和破损元件从检测区间隙中落入到碎球漏斗中。完好的元件运动到辊筒末端,进入倾斜的排球管中,最后滚动到提升器处。

### 2.3 提升器

提升器有下述功能:1) 逐个提升新燃料元件和未达到燃耗的燃料元件到堆芯,逐个提升燃料元件到乏燃料卸料缓冲管段;2) 为需要燃耗测量的燃料元件定位。

提升器由壳体、分配盘、磁力传动器、减速机、步进电动机、旋转编码器等组成。分配盘中发射通道的一端对准气体管路,另一端可对准装料管路、堆芯的提升管路和乏燃料卸料缓冲管路中的一个。发射通道另一端的接球杯同时也是只能容纳一个元件的定位器。在运行开始时,分配盘从测量位置转动到接收位置;在接收一个元件后逆时针转动 45°,回到测量位置;测量后,元件若未达到燃耗水平,再装入堆芯,反之,分配盘则顺时针 90°向乏燃料卸料缓冲管段提升;提升后,分配盘反向转动 90°回到测量位置。在提升新燃料元件时,不需要燃耗测量,分配盘只在接收和测量位置之间摆动。在壳体端部燃耗测量位置上有测量盲孔,对准燃耗测量准直器。孔轴线穿过被测元件中心。在壳体端部内侧有两个机械限位块,保证分配盘在 90°范围内摆动,分配盘转动角度的精确定位则由绝对式旋转编码器通过控制系统的闭环控制来实现。分配盘与外壳之间为间隙配合,为防止由于石墨粉尘在间隙中过积积累卡住分配盘。在壳体内前侧正下方设置了一个贮存粉尘的盲管,其上管口为漏斗状,粉尘进入到分配盘的最低处时易于落入到盲管中。

### 2.4 控制系统

为了保证燃料装卸系统可靠地工作,设计了以可编程序控制器(PLC)和工控机(IPC)为核心的控制系统<sup>[8]</sup>。

控制系统的作用是根据燃料装卸系统的工艺需要控制燃料元件在管道中的运动和各机械设备动作,完成碎球分选、燃料元件提升、气动

分配等功能。为保证工艺实施和达到控制目的,系统中关键部位安装压力传感器,监测各处氦气的压力;安装温度传感器,监测回路中的温度;安装过球计数器,记录通过的燃料元件数目和监督燃料元件的运动状况。为此,控制核心必须实时采集上述信息,经软件分析、判断,发出相应信号,控制各个设备动作。为防止发生误操作,还需进行状态监控、数据分析、有效的软件管理、故障诊断及发出预报警信号等。控制系统主要由 PLC、IPC 和模拟屏组成,其结构框图示于图 1。

PLC 性能稳定可靠,抗干扰能力强。选用它作为控制核心,实现装卸料系统的实时控制。PLC 主要检测旋转编码器、操作按钮、现场温度传感器、压力传感器、计数器等元件信号、反馈信号、连锁信息等。执行部件有多种电机、阀、真空泵、变频调速器、过球装置、声光报警器、乏燃料处理设备等。同时,PLC 与上位机 IPC 进行双向通讯,传递信息和接受命令与数据;与模拟屏控制器通讯,显示设备运行状态。IPC 人机界面好,软件丰富,便于实现系统管理、监控、运行状态分析,同时存储各类数据并对其分析处理,进行故障诊断,对系统的运行状态进行实时监控,提高了运行过程的透明度,使操作人员能够准确了解系统运行状态,及时处理故障,从而保证装卸系统安全、可靠运行。

显示屏设计采用大型镶嵌块式模拟显示屏。通过模拟屏上的温度、压力、过球计数、总过球数、总运行时间数显仪表以及阀门状态显示、燃料元件运动过程显示指示灯、故障报警指示牌,共同反映设备的运行状态。因此,不论在何种控制方式下,它均能显示整个系统的设备运行状态、各关键设备内的温度和压力以及各测量点的过球信息。在自动运行过程中,还可显示球的运动方向。操作人员通过模拟屏对整个系统的运行状况一目了然。

为了减少与外界的接线,确保显示值与实际值保持一致、简化操作手续和易于维护,模拟屏使用智能控制器。模拟屏控制器单片机与模拟屏上各显示仪表的下位单片机之间构成总线型网络。其中的数显部分为串行数据传输,每块数显仪表以地址方式显示,泵、阀状态由 LED 状态点表示。

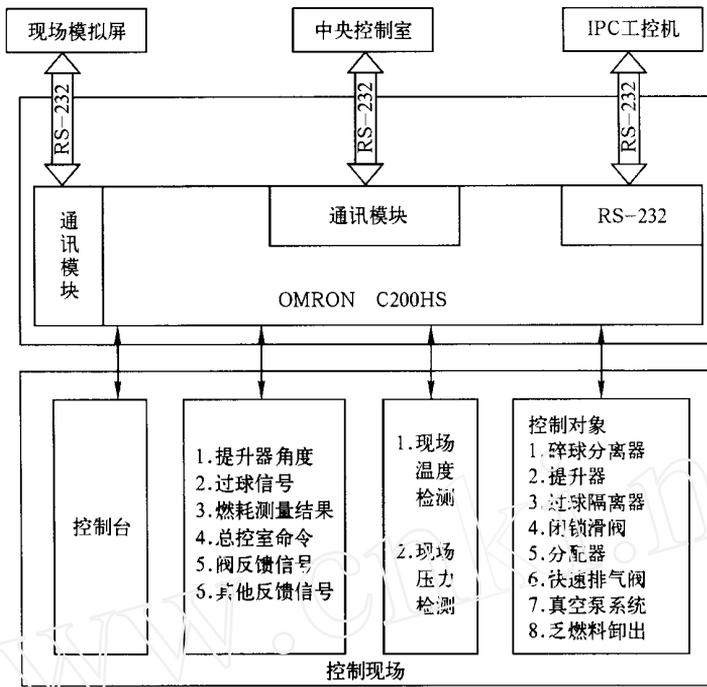


图 1 控制系统的结构框图

Fig. 1 Structural diagram of the control system

控制系统主要执行元件控制,对提升器和各类阀门进行控制。

由于提升器要求正反旋转,且有较高的定位精度要求,故选择了可靠性和稳定性较高的五相混合式步进电动机作为提升器的驱动电动机。为防止步进电动机的丢步,提高步进电动机的定位精度和运动的平衡性,提升器控制采用闭环控制线路。利用一位置传感器(编码器),将转子位置信号作为反馈信号构成简单的闭环系统。控制原理示于图 2。

PLC 向步进电动机驱动器发出正转信号、反转信号及停止信号,步进电动机驱动器依据所接收的信号,控制其内部的分配器向步进电

动机各相线圈提供电流。提升器转轴的转角通过一组齿轮传递给编码器。当编码器检测到要求的角度信号时,电机停止。

PLC 发出阀门开、闭数字信号,经驱动继电器放大,实现阀门的动作。阀门开、闭信号反馈至 PLC。PLC 内软件控制逻辑可有效防止各种情况下可能出现的控制失误。

### 3 燃料元件装卸系统的特征

本系统的设计包含了多项新技术和主要研究成果,系统中大部分设备在其他领域从未使用过,概括起来,有如下特点:

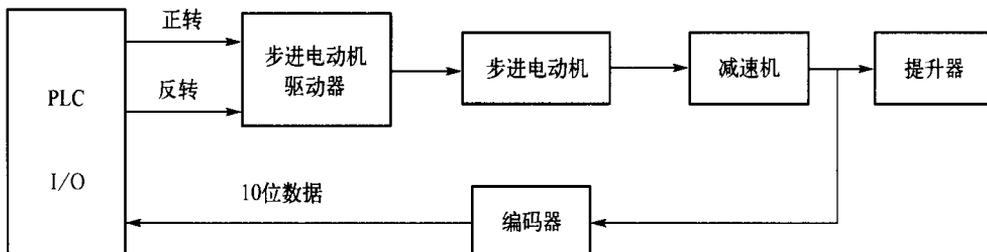


图 2 提升器控制原理图

Fig. 2 Control principle of the elevator

1) 利用球形燃料元件有利的几何形状,采用重力和气动两种输送方法输送元件;

2) 在球床堆上首次应用脉冲气动卸料技术,在料箱和压力壳内只有脉冲气流管和元件排出管,没有机械运动部件,解决了这类设备拆卸和维修的技术难题;

3) 改进后的碎球分离器和提升器除具有各自的固有功能外,还均具有单一出口设备的功能,这样,既减少了设备数量,又减少了系统的安装高度;

4) 磁力传动器用于系统设备中,达到了全轴封目的,结构简单,工作安全可靠;

5) 卸乏燃料操作中使用了气动机械手,可实现密封罐盖的远距离操作;

6) 使用了  $\text{MoS}_2$  润滑剂,它具有低摩擦系数和良好的热和辐射稳定性;

7) 控制系统使用了 PLC 和 IPC 组成的核心,使燃料元件装卸系统功能更强大;

8) 利用了大型模拟屏和彩色监视器显示系统工作状态,具有良好的人机界面。

#### 4 结论

通过单机调试试验、系统联调试验、初装料及核加热升温运行证明,燃料元件装卸系统满足 HTR-10 的要求。与国外同类系统相比,该系统结构简单、价格低廉和性能可靠,将在球床

堆中得到广泛应用。

#### 参考文献:

- [1] Buelling H, Hantke HJ. Untersuchungen zur Verfüegbarkeit der AVR Brennelement beschickungsanlage [J]. VGB Kraftwerkstechnik, 1989, 69:275~281.
- [2] Hennings U. Fuel Handling System for Core Elements of a Pebble-bed Reactor [J]. Nucl Appl Technol, 1969, 7:334~341.
- [3] 刘继国,肖宏伶,徐梅. 10 MW 高温气冷堆燃料循环系统热实验装置 [J]. 清华大学学报, 1997, 37:74~77.
- [4] Liu J.G. Development of Fuel Handling System in 10 MW High Temperature Gas-cooled Reactor [A]. Proceedings of the Seminar on HTGR Application and Development [C]. Beijing: Tsinghua University, 2001. 232~238.
- [5] Muncke A. Graphite Ball Detectors for the Fuel Handling Machine of a Helium-cooled Pebble Bed Reactor [J]. Kerntechnik, 1976, 18:201~206.
- [6] 刘继国,徐国林,马庆贤,等. 球形燃料元件探测器的研制 [J]. 核动力工程, 1998, 19:468~472.
- [7] 刘继国,律光照,孙德刚,等. 10 MW 高温气冷实验堆乏燃料元件贮存系统设计 [J]. 高技术通讯, 1995, 5:18~20.
- [8] 肖宏伶,刘继国. 10 MW 高温气冷堆燃料元件装卸系统的控制系统设计 [J]. 核动力工程, 2000, 21:532~535.