

# CARR 一回路主泵叶轮切割方案与实施

宁波 朱吉印 李响

(中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究所 北京 102413)

**摘要:** 本文介绍了中国先进研究堆 (CARR) 针对一回路运行中存在阀门振动造成阀门密封垫渗漏的问题, 提出了对扬程裕量过大的主泵叶轮进行切割, 从而增加泵后端调节阀门的开度, 减少阀门振动的方法。叶轮切割经计算后, 编写了具体的实施方案。泵厂根据方案进行了备用叶轮的切割, 在 CARR 进行了一系列的实验, 实验结果达到了预期的效果, 减少了法兰渗漏的风险, 运行参数未改变最终安全分析报告的结果, 反应堆运行更加安全稳定。

**关键词:** 中国先进研究堆 (CARR) ; 主泵; 叶轮切割; 实验; 安全分析

## 0 引言

中国先进研究堆 (CARR) 是一座 21 世纪初建成的高性能、多用途研究堆。反应堆冷却剂系统 (以下简称“一回路”), 在正常运行状态和预计运行事件期间提供足够的堆芯冷却, 并确保反应堆压力边界的完整性。本文介绍了一回路主泵叶轮进行切割的原因、方案的策划、叶轮切割实施、调试过程和实验结论。

## 1 项目背景

试运行期间, CARR 发生一起因平面法兰密封垫断裂导致的主冷却剂泄漏事件。反应堆冷却剂系统共设四个单元, 两个单元为一组并联在一个支管上,

每个支管又并联在一起组成反应堆冷却剂系统的冷段母管与热段母管, 并分别与反应堆进、出口水管连接<sup>[1]</sup>。系统流程见图 1。

后期通过对回路密封垫进行改进, 将平面法兰连接部位的丁腈橡胶密封垫更换为铝环复合密封垫, 将榫槽法兰连接部位的橡胶垫更换为石墨齿形垫; 在法兰连接部位增设护套, 加装渗漏监测探头实现在线监测。整改完成后几年来的运行历史也证明, 原有措施总体有效, 但部分榫槽法兰部位出现微量渗水现象, 经进一步查证分析为蝶阀开度过小振动引起渗漏, 虽然微量渗漏可以接受, 但希望通过进一步的技术措施降低渗漏风险。

根据统计结果, 主冷回路的法兰微量渗漏发生的位置为阀门 V02、V03 和泵的出口法兰, 主要为 V02

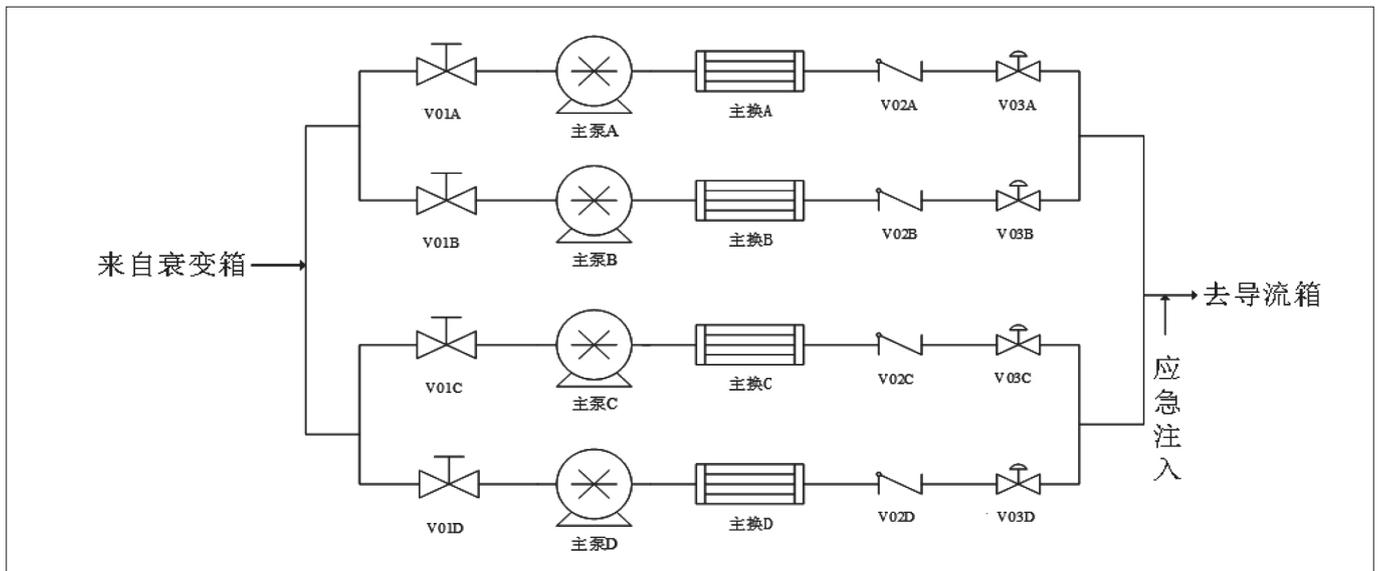


图 1 CARR 一回路流程示意图

阀门出入口法兰测点,均为榫槽式密封,初步判断为V03阀门振动导致邻近的V02振动偏大导致渗漏。2019年,委托检测单位进行了一回路各设备的振动测量,根据渗漏报警与泵启动时间,证明泵启动短短数十秒内的振动不足以导致V02渗漏,而是较长时间的不断振动才会导致渗漏出现,测量结果确认了阀门V03开度过小是V02法兰出现渗漏的根本原因。

## 2 叶轮切割方案

设计人员介绍,叶轮的實際揚程在设计和加工制造中都因保守考虑增加了10%~20%的裕量,设计计算结果为90mH<sub>2</sub>O,考虑裕量设计结果为105mH<sub>2</sub>O,厂家制造后实际达到115mH<sub>2</sub>O。泵安装在回路管道上,经过实验运行表明具有较大的裕量。因此切割叶轮降低泵扬程是提高蝶阀开度降低振动的首选办法,可以增大V03蝶阀开度减少振动,从而降低邻近的V02法兰渗漏风险。

泵出口到入堆管线只有V02逆止阀和电动蝶阀V03,只能通过V03阀门开度调节回路阻力匹配,导致V03阀门开度比较小,经测量正常运行时只有约22°的开度,蝶阀开度过小将导致阀板位置流速大幅提高,振动加剧,因V03阀门采用一体复合垫,缓冲能力强于V02的石墨齿形垫,表现为V02阀门法兰渗漏。由于渗水是个缓慢过程,渗漏一般出现在泵启动后经过一段时间的稳定运行。

叶轮切割后对CARR主泵性能的影响主要涉及流量、扬程、轴功率、汽蚀和效率五个参数。叶轮切割后,流量、扬程和轴功率基本遵循切割定律变化,分别为前后外径1次方、2次方和3次方的关系。汽蚀因与泵入口关联较为密切,所以切削叶轮外径一般对汽蚀没有影响。叶轮切割后效率会有所变化,一般是效率降低,但有的低比转速泵切割后比转速增加,所以效率有可能会提高。对于CARR主泵这种蜗壳式双吸泵,比转速为47~68,为低比转速泵,可以认为叶轮切割前后,主泵的效率变化可忽略<sup>[2]</sup>。

为保证叶轮切割后泵的性能能够满足要求,切割方案分两次进行,第一次切割后进行运转实验,确认方案可行且计算结果与实机相符后方可进行第二次切割。

## 3 第一次切割叶轮的实验验证

为了进行切割叶轮后的实验,CARR订购加工了

备用实验叶轮,叶轮按原泵技术要求制造,按照质量文件要求进行质量控制。每个叶轮切割完成后进行单独的动平衡,按主循环泵原厂家的Q/SB J03.211-2006《转子动平衡规程》,进行工作转速下的动平衡实验,按G2.5级验收。原主泵叶轮外径尺寸为555mm,第一次将外径切削至535mm。

备用实验叶轮到货安装后,开展了回路系统实验。安装备用实验叶轮后的四台主循环泵启动完毕后,调节V03蝶阀开度使堆芯导流箱压力、主泵流量与原叶轮数据基本一致,此时泵电动机电流和功率均有一定下降。现场测量蝶阀开度由约22°提高到了约29°。

运行中经系统仪表测量主泵实际扬程约为102mH<sub>2</sub>O。通过比较原叶轮与实验叶轮前后两台泵和四台泵的振动数据,实验叶轮情况下主回路整体的振动有所减小,特别是每个测点的不同轴向的峰值下降明显,V02和V03阀门附近的振动减小明显,实验结果与计算结果相符。

实验叶轮运行的参数和原叶轮相比,泵的扬程下降了12m,可以保持导流箱入口压力、入堆流量满足正常运行要求,而且蝶阀开度仍有一定余量,可以进一步切割叶轮,使主泵扬程进一步降低至新的目标值。

## 4 第二次切割叶轮的实验验证

由于第一次实验结果符合预期,第二次切割的计算,继续采用叶轮的切割公式进行计算,计算出目标扬程(95±2)m时叶轮的外径约为520mm,完成了第二次叶轮切割。CARR主泵叶轮外径由φ555mm切割至φ520mm,经计算,切割量为原直径的6.3%,切割量很小,远小于叶片泵设计手册中规定的最大允许切割量。

实验时,选择一台主泵(B泵)进行了单泵性能测试。测试获得单泵在流量约550m<sup>3</sup>/h、600m<sup>3</sup>/h、650m<sup>3</sup>/h、700m<sup>3</sup>/h、750m<sup>3</sup>/h、800m<sup>3</sup>/h时的扬程数据,实验数据见图2,额定工况下流量约600m<sup>3</sup>/h时扬程为95.42mH<sub>2</sub>O,与切割前的理论计算结果相符,测试期间主泵运行稳定,各项参数正常。

## 5 主泵其他性能测试实验

在叶轮切割后,主泵进行了必要的运转和一系列实验,主要有性能运转实验、主泵惰转实验、应急

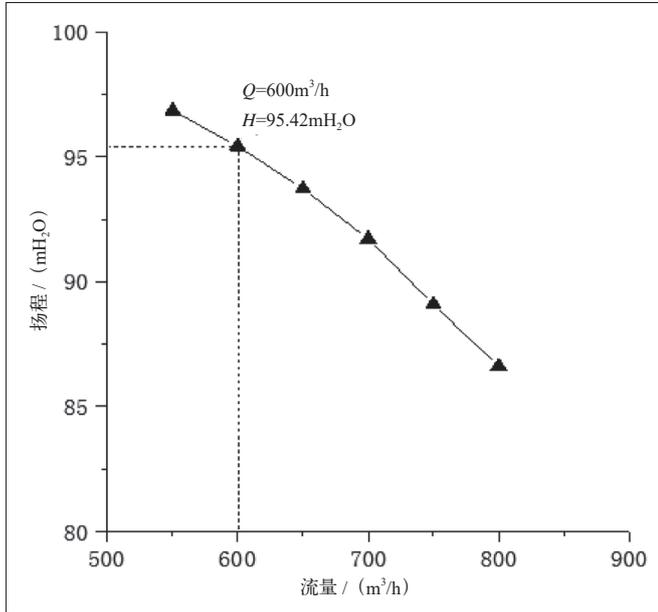


图2 主泵B实测扬程曲线

注入实验，运转时对泵的振动和电动机的参数进行测量。

### 5.1 两台泵和四台泵运转实验

运转实验分两种工况进行，两台泵运转时将四台主泵分成两组，AD和BC，四台泵工况为ABCD同时运转。不同工况下，经过V03阀门进行调节，一回路冷却剂入堆压力、入堆流量都能够达到切割前的参数指标，满足设计参数要求，经过几小时的运转，各参数能够保持平稳。

### 5.2 主泵惰转和应急注入实验

由于反应堆停止时核功率下降有一个过程，一回路冷却剂下降应能够满足余热导出的需求，CARR一回路主泵设计了惰转飞轮，在发生停电等设计基准事件时，利用飞轮的惯性能让主泵继续保持短时间的大流量运转，安全分析要求，失电惰转时一回路流量下降至85%的时间应≥2.5s。应急堆芯冷却系统的入堆管路与堆冷却剂系统入堆总管相连，进而跟堆芯直接相连，整个系统相当于堆冷却剂系统的一个独立分支，该系统与堆冷却剂系统靠一个止回阀和一个截止阀隔离，止回阀的开闭主要靠阀体内部阀瓣两侧的压差来决定，其流向是由应急堆芯冷却系统流向反应堆冷却剂系统，反方向逆止<sup>[3]</sup>。正常运行时，应急泵通过旁路对反应堆的池水进行冷却，在压差满足要求时，注入堆芯进行冷却。

叶轮切割后，在两台泵和四台泵的工况下均进行了惰转时间测量实验，对惰转和应急注入功能进行了验证。失电惰转时主冷流量下降至85%的时间均达到了9s，相比原叶轮的主泵6~7s的时间延长了2~3s，能够满足设计要求。由于主泵大流量惰转时间增加，应急流量注入时间也相应延后，注入堆芯流量保持稳定。两台主泵惰转和应急注入曲线见图3。四台主泵惰转和应急注入曲线见图4。

### 5.3 振动改善情况

四台泵稳定运行情况下，现场测量电动阀

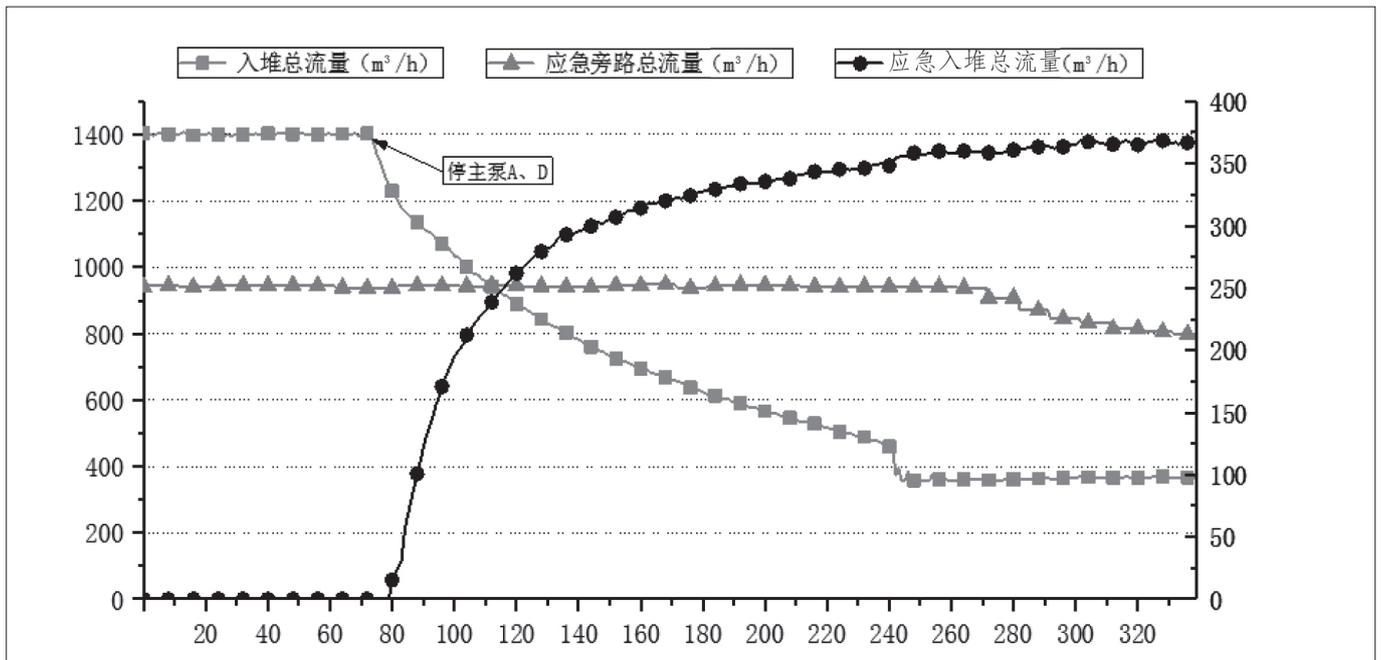


图3 两台主泵惰转和应急注入曲线

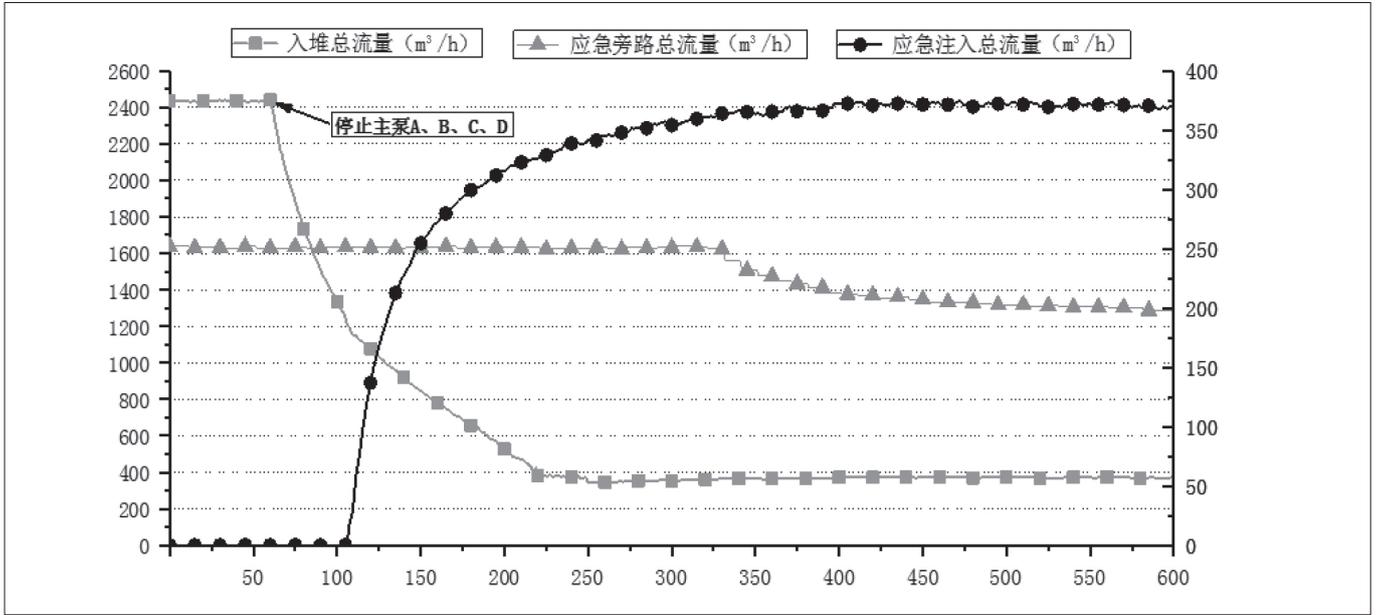


图4 四台主泵惰转和应急注入曲线

V03A、V03B、V03C、V03D 蝶阀开度由切割前约 22° 提高到约 40°，测量了回路部分位置振动数据，电动阀整体振动水平明显减小。除部分测点的振动略微增加，整体振动情况比叶轮切割前有所下降，振动数值远小于 ISO2372 机器振动分级Ⅲ类设备中“良好”的标准，即 ≤ 2.8mm/s，回路运转整体趋于平稳。

#### 5.4 电动机功率变化

叶轮切削后由于负荷减小，主泵运转过程中的电流减小，电功率随之下降，从而节约了运行的经济成本。具体功率变化见表 1。

表 1 修改前后电动机功率变化参数

泵	修改前电动机功率/kW	修改后电动机功率/kW
主泵 A	284	237
主泵 B	279	238
主泵 C	286	238
主泵 D	277	236

## 6 结语

通过数据分析，叶轮切削后主泵扬程降低，结果与预期一致，通过调整电动阀 V03 开度使系统总流量和进堆压力不变，电动阀 V03 开度增加，使阀门 V02、V03 振动明显下降，进一步降低 V02 阀门阀门渗漏风险。叶轮切削后，由于主泵惰转时间延长，应急流量注入时间点略有延后，但注入点主回路流

量基本一致。另外，叶轮切削使主泵负荷减小，电动机功率明显减小，能耗降低。

与修改前系统相比，主泵惰转至 85% 额定流量的时间延长约 2 ~ 3s，应急注入起始点相应延后，应急注入流量稳定，依靠非能动的情转特点维持主回路流量，可靠性更高，更有利于反应堆安全。经过叶轮切削和阀门开度等调整后，主冷系统和应急堆芯冷却系统的实验结果表明本次修改活动达到了预期效果，堆进口压力、流量、应急注入流量、主泵惰转至 85% 额定流量时间等各项技术指标均满足验收准则。最终安全分析报告 (FSAR) 涉及的运行参数运行范围不变，对安全分析结果无影响，符合 FSAR 数据包络范围，能够保证反应堆安全运行。

#### 参考文献：

[1] 中国先进研究堆 (CARR) 最终安全分析报告 [R]. 北京：中国原子能科学研究院，2010.  
 [2] 中国先进研究堆主回路和应急局部修改方案 [R]. 北京：中国原子能科学研究院，2022.  
 [3] 庄毅，黄兴蓉，姜百华，等. CARR 应急堆芯冷却系统停堆冷却措施分析 [J]. 核动力工程，2006, 27 (05) :79-83.

作者简介：宁波 (1978.12-)，男，汉族，北京人，本科，高级工程师，研究方向：反应堆机械回路运行维修。