

装卸料机液压油系统油泵失效后异常工况分析及响应

廖骥晖

(中核核电运行管理有限公司燃料操作处 浙江 嘉兴 314300)

摘要: 装卸料机液压油系统作为秦三厂重水堆机组重要的辅助系统,直接影响着与不停堆换料相关的安全性,油泵失效作为该系统最严重的异常工况,可能对乏燃料及重水的安全造成影响。本文从具体事例出发,详细分析了油泵失效后异常工况出现的机理和现象,并提出了对应的应急响应措施和预防性措施来缓解异常发生后的后果或杜绝异常的发生。通过对实际异常工况的处理,论证了应急响应措施的有效性,并为今后处理类似工况提供了指导。

关键词: 装卸料机; 液压油泵; 重水堆; 过流量阀

0 引言

装卸料机液压油系统(以下简称液压油系统),是秦三厂重水堆机组的重要辅助系统,该系统使燃料操作系统液压油箱内的液压油被增压和传输,并提供给装卸料机系统的各个部件。

液压油系统有两套四台供应油泵,每套有一台主油泵和一台增压油泵,增压泵能为主油泵增加入口压力,主油泵可以提供压力约为12.5MPa的液压油流量,两套油泵互为备用,当一套油泵失效时可手动切换以保证液压油的持续供应^[1]。

油泵的功能丧失可能引起装卸料机超压、重水泄漏甚至乏燃料棒束失去循环冷却流量的后果,其中又以油泵失效停运的后果最为严重。本文将液压油系统油泵失效停运的发生作为出发点,对失效发生后的异常工况及其后果进行深入分析,并提出对应的响应方案,以便在异常工况发生时快速将系统引入安全稳态。

1 典型案例

2006年6月23日11时03分,1号机组换料操作结束关闭通道后,主控室换料盘台出现油泵失效报警,检查发现3号主油泵失效停运,料仓内压力升高,安全释放阀动作释放重水,此时料仓内已携带了乏燃料棒束。换料操纵员立即降低料仓至PARK压力(3.11MPa),实施操作后料仓压力下降至约9.7MPa。随后,换料操纵员手动关闭料仓压力控制阀并手动启动备用油泵,通过间歇性动作释放阀和重新打开

燃料通道的方式对乏燃料棒束进行冷却。同时,换料现场操作员前往现场管线下游阀门,待料仓回流管线压力恢复至接近料仓压力后,恢复自动运行。

此次事件的处理总用时约50min,重水持续泄漏至回收系统,装卸料机料仓中的乏燃料棒束丧失循环冷却流量约23min,料仓温度最高达110℃(所有乏燃料棒束浸没在水中,未失去冷却)。

2 异常工况分析

2.1 总述

在料仓及回流管线中有隔离阀,由液压油驱动,一旦发生油泵失效,隔离阀将会全关。管线上的3523-V20和V21为过流量阀,当其两端出现较大压差时会动作关闭,对回流管线下游的悬链及其他设备起到保护作用。

在油泵失效发生后,如果直接手动停运失效油泵并启动备用油泵,油驱动的设备能够恢复正常运行,但隔离阀重新打开时,回流管线上将产生较大压差,进而导致过流量阀动作全关。

无论隔离阀全关还是过流量阀全关都将导致料仓失去回流流量,使料仓压力控制阀丧失压力控制功能(但可全关提供截止流量的功能),这对处于高压(11.38MPa)或中压(10.68MPa)工况下的装卸料机来说是非常不安全的状态,由于此时供给到料仓的重水压力为15.5MPa,料仓压力将会直接上升超过释放阀设定点12.65MPa/13.1MPa,导致重水泄漏^[2]。在装卸料机携带乏燃料棒束的情况下,失去回流量将使乏燃料棒束面临丧失循环冷却流量的风险。

2.2 过流量阀动作机理简析

料仓回流管线过流量阀 3523-V20/V21 机械结构如图 1 所示。重水流入阀门后到达壳体内部的腔室，导向套将重水流量分为两路并将其引入导流孔，经过在腔室内部的流动，两路流量分别从导向套的导流孔直接流出阀门。

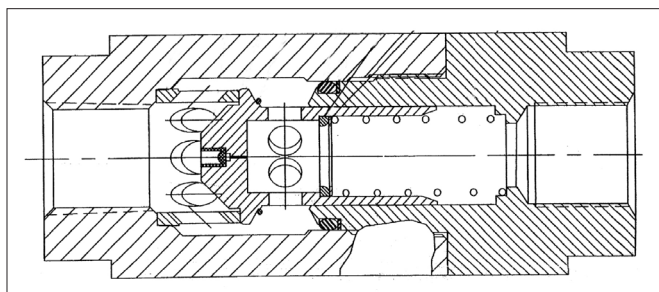


图 1 过流量阀机械结构

阀门关闭机理：如果有瞬时大流量流入阀门，将导致阀门两端产生压差，当压差过大时（约 0.3MPa），导向套整体将被推动右移，弹簧将被压缩，这就使得导流孔被阀门壳体挡住，流量流出阀门的通路被截断，阀门关闭。

阀门复位机理：在阀门关闭的状态下，阀门内部设置的小孔板仍然允许一个小流量（0.01L/s）流经阀门。利用这一特性对过流量阀两端压力进行平衡，在弹簧回弹后，即可复位阀门重新建立流量通路。

2.3 四种异常工况

关于油泵失效后异常工况的分析可以从燃料通道打开和燃料通道关闭两方面进行讨论。

对于燃料通道打开的工况，由于此时装卸料机与燃料通道直接连通，料仓的重水供给流量将全部进入燃料通道内，回流流量为零，不会造成过流量阀动作^[3]，在此不过多讨论。

燃料通道关闭情况下由于存在回流，油泵失效则会引起比较复杂的工况。以下，本文将针对燃料通道关闭情况下油泵失效停运后可能出现的四种异常工况展开分析。

2.3.1 装卸料机不带乏燃料棒束

此工况下，料仓一般处于 PARK 压力下的准备状态，或开始换料后燃料通道还未打开时的料仓高压（中压）状态，此时不会发生乏燃料棒束失去循环冷却或主系统失去压力边界的严重事故。

如果料仓处于高压或中压工况，在隔离阀关闭后由于装卸料机不与燃料通道连接且无回流流量，料

仓压力将迅速上升并超过释放阀设定点，造成重水泄漏；如果料仓处于 PARK 压力，由于管嘴塞安装在管嘴中，瞬时升高的压力可能会对其 O 形圈造成冲击，导致密封降级，使重水从管嘴处泄漏^[3]。

2.3.2 装卸料机带乏燃料棒束，料仓处于低压

此时装卸料机正处于乏燃料卸出工况下，油泵失效停运意味着由液压油驱动的料仓将无法转动，装卸料机推杆无法正常驱动，乏燃料卸出操作无法继续进行。

2.3.3 装卸料机带乏燃料棒束，料仓处于 PARK 压力

该工况出现时，装卸料机正处于转运乏燃料期间，可能正位于反应堆端面与乏燃料之间，也可能已抱卡至乏燃料通道上但还未降低料仓液位。

料仓处于 PARK 压力时，重水供给系统供应压力为 7.5MPa，发生油泵失效隔离阀关闭后，料仓压力会迅速升高至约 10MPa，此压力下料仓释放阀将不会动作释放，但管嘴塞密封圈受到瞬时冲击，可能导致其密封降级，使重水从管嘴处泄漏^[3]。

2.3.4 装卸料机带乏燃料棒束，料仓处于中压

与典型案例一致，此工况是换料操纵员将要面对的最严重的一种异常工况。

油泵失效停运后，由于此时燃料通道已关闭且重水供给系统的供应压力仍然保持在高压 15.5MPa，隔离阀失效关闭、料仓回流失去将导致料仓压力迅速上升至释放阀设定点以上，导致料仓压力释放阀动作释放，大量重水将泄漏至地面，如果降低料仓压力使释放阀复位，则料仓内携带的乏燃料棒束将面临失去循环冷却流量的风险。

3 应急响应措施

3.1 总述

在介绍的典型案例中，换料操纵员根据应急响应规程通过降低料仓压力至 PARK 压力，并指派换料现场操作员前往关闭回流管线下游隔离阀，使下游管线压力上升，进而复位了过流量阀。但由于料仓只能降压至 9.7MPa，导致过流量阀复位较慢，同时前往现场关闭阀门的用时较长，最终经历了较长时间系统才被引入安全状态。

为了缩短处理时间，本文提出另一种思路：料仓排气阀可通过重水收集箱上部的排气管与大气连通，因此将料仓压力设定点降至低压（2MPa）后打开该阀门，可快速降低料仓压力。

同时,手动关闭料仓压力控制阀截止下游流量,根据过流量阀可流通微小流量的特性使下游管线压力上升,最大限度减小隔离阀重开后过流量阀两端产生的压差,避免过流量阀动作。

以下将分别提出四种异常工况对应的应急响应措施。

3.2 装卸料机不带乏燃料棒束

可直接停运当值重水泵终止料仓压力供给实现快速降压,具体应急措施如下:

- (1) 手动停运当值重水泵;
- (2) 执行计算机指令 CMSA/CMSB,将料仓压力置于低压状态;
- (3) 等待料仓压力降至静压;
- (4) 手动停运当值油泵(增压油泵和主油泵);
- (5) 手动启动备用油泵(增压油泵和主油泵);
- (6) 启动当值重水泵;
- (7) 将装卸料机移至维修区,对管嘴塞 O 形圈等密封部件进行检查,检查压力释放阀的泄漏情况。

3.3 装卸料机带乏燃料棒束,料仓处于低压

区别于其他几种工况,本工况中应考虑备用油泵无法启动时使用应急冷却泵进行冷却的方法,应急措施如下:

- (1) 手动停运当值油泵(增压油泵和主油泵);
- (2) 手动启动备用油泵(增压油泵和主油泵);
- (3) 若备用油泵正常启动,油压已恢复,则继续自动程序完成后续卸料操作后,对失效油泵进行处理;
- (4) 若备用油泵未能正常启动,意味着料仓无法转动,B推杆和锁紧推杆无法驱动,管嘴塞无法安装。此时若剩余乏燃料料仓管均已转至水面以下,则通过 CRT 显示器查看 TREND 61# 及 AI 3345/3251 (A 侧)、AI 3463/3307 (C 侧),密切关注料仓温度,等待对油泵进行处理;

(5) 若存在暴露在空气中的乏燃料棒束,则在暴露超过 15min 或料仓温度上升至 90℃ 时立即关闭乏燃料通道内外球阀,停运当值重水泵,关闭低压疏水阀 3523-MV44 并降低疏排站。与此同时,由换料现场操作员前去关闭 3526-V89,确保燃料操作系统与主系统的隔离;

(6) 上述第(4)步操作隔离操作完成后,关闭乏燃料应急喷淋阀 3523-MV2,打开失效侧的乏燃料通道应急冷却阀 3523-MV1;

- (7) 启动乏燃料应急冷却泵 3532-P1;
- (8) 确认料仓温度已开始下降并持续监视,等待

后续处理。

3.4 装卸料机带乏燃料棒束,料仓处于 PARK 压力

本工况没有重水泄漏的风险,但须尽快对料仓降压并重新建立料仓回流以减小对管嘴塞密封圈的冲击,此过程中还需避免过流量阀动作关闭。如果装卸料机已经抱卡至乏燃料通道,恢复油泵后,在降压的同时可直接进行降液位操作,无需重新建立料仓回流。应急措施如下:

- (1) 手动关闭料仓压力控制阀 3523-PCV1;
- (2) 执行计算机指令 CMSLL/CMSA 对料仓进行降压操作;
- (3) 手动关闭 3523-MV31/MV32;
- (4) 手动停运当值油泵(增压油泵和主油泵);
- (5) 手动启动备用油泵(增压油泵和主油泵);
- (6) 使用逻辑旁路旁通料仓排气阀 3523-MV36 打开逻辑,手动打开该阀门,使料仓进一步降压;
- (7) 等待料仓降压至 2MPa 以下后,手动打开 3523-MV31/MV32,并确认回流管线压力与料仓压力偏差不超过 $\pm 0.3\text{MPa}$;
- (8) 缓慢调节 3523-PCV1 开度至 50%,确认料仓回流建立后,关闭 3523-MV36;
- (9) 缓慢调节 3523-PCV1 开度至 100%,恢复其和 3523-MV36 的自动控制;
- (10) 执行 CMSM/CMSP 重新将料仓升压至 PARK 压力,恢复程序的自动运行;

(11) 若失效发生在装卸料已经抱卡至乏燃料通道时,则从以上第(5)步后,直接执行半自动指令 CSDL/CSDO 升高乏燃料通道疏排站、打开低压疏水阀,并随后从 SEQ 99 STEP 5 开始执行至 JOB T4 结束,完成后续的乏燃料卸载操作;

(12) 系统处于安全状态后,对失效的油泵进行处理,并对管嘴塞 O 形圈进行检查。

3.5 装卸料机带乏燃料,料仓处于中压

总体应急响应思路应是:尽快对料仓降压,复位释放阀使重水停止泄漏,同时要在油泵重启后避免过流量阀动作,重新建立回流流量,恢复装卸料机的自动运行。应急措施如下:

- (1) 手动关闭料仓压力控制阀 3523-PCV1;
- (2) 执行计算机指令 CMSLL/CMSA 对料仓进行降压操作;
- (3) 手动关闭 3523-MV31/MV32;
- (4) 手动停运当值油泵(增压油泵和主油泵);

- (5) 手动启动备用油泵（增压油泵和主油泵）；
- (6) 使用逻辑旁路旁通料仓排气阀 3523-MV36 打开逻辑，手动打开该阀门，使料仓进一步降压；
- (7) 等待料仓降压至 2MPa 以下后，手动打开 3523-MV31/MV32，并确认回流管线压力与料仓压力偏差不超过 $\pm 0.3\text{MPa}$ ；
- (8) 缓慢调节 3523-PCV1 开度至 50%，确认料仓回流建立后，关闭 3523-MV36；
- (9) 缓慢调节 3523-PCV1 开度至 100%，恢复其和 3523-MV36 的自动控制；
- (10) 执行 CMSM/CMSM 重新将料仓升压至 PARK 压力，恢复程序的自动运行，尽快完成乏燃料卸载操作；
- (11) 系统置于安全状态后，对失效油泵进行处理，并对管嘴塞 O 形圈和料仓压力释放阀进行检查。

4 预防性及优化措施

4.1 隔离阀全关的预防

在油泵失效发生后，隔离阀不会立即全关，而是存在大约 10s 的延时，如果换料操纵员在实际工作中能严密监盘并且准确判断，尽早地发现和进行干预，则重水的损失会显著减少。油泵失效后主要有以下指示信息：(1) 主控盘台显示器上将会出现油压低报警^[4]；(2) 指示油泵正常运行的指示灯将会熄灭。在日常盘台监督期间对其及时发现并果断响应，是对隔离阀全关的一项良好预防措施。

4.2 运行规程及培训的优化

通过换料模拟机进行模拟并实施响应，上述应急响应措施被验证为有效。基于此，相关应急响应措施已被写入燃料操作系统《异常运行工况》运行手册中。

同时，本文提出的应急响应措施已被列入换料模拟机培训教案中，以加强对换料运行人员的培训，增强应急响应能力，缩短应急响应时间。

5 实际案例处理及效益

2017 年 12 月 14 日 17 时 06 分，1 号机组换料操作结束携带乏燃料关闭通道后，主控盘台显示器

上出现油压低报警，检查换料盘台发现指示油泵正常运行的指示灯熄灭，料仓出现超压报警，重水通过压力释放阀泄漏至地面，装卸料机料仓温度开始上升。

该事件发生时所处的工况与本文典型事件一致。事件发生后，换料操纵员立即根据应急规程措施进行响应，事件处理结果如下：

料仓回流流量失去时间总计约 10min，在换料操纵员实施应急操作 30s 后，重水向回收系统的泄漏停止，2min 后燃料操作系统恢复到了安全稳定状态。在此期间料仓温度曾短时上升至 97℃ 后恢复。

从以上实际事件的处理结果可知，采用本文所讨论的响应措施，料仓可以实现快速降压，应急响应时间大幅度缩短，乏燃料棒束的安全更加得到保证。

6 结语

在油泵失效发生时，应急响应的关键在于恢复料仓回流流量，同时需避免出现过流量阀关闭或关闭后难以复位的情况，以便尽快停止重水泄漏和恢复乏燃料棒束循环冷却流量。

因此，及时有效地对料仓压力进行降低，并时刻确保乏燃料棒束的循环冷却，是油泵失效时应急响应的两个核心思想，本文分析的四种异常工况和对策中，充分体现了这两个思想，以便在失效发生时指导换料操纵员和换料现场操作员进行迅速和正确的响应，保证反应堆的安全稳定运行。

参考文献：

- [1] 邹正宇. CANDU-6 核电厂系统与运行：装换料系统 [M]. 北京：原子能出版社，2010：91-97.
- [2] 秦山第三核电有限公司. 秦山 CANDU-6 核电厂培训教材第九册 [Z].
- [3] 中核核电运行管理有限公司. 异常运行工况运行手册 [Z].
- [4] 中核核电运行管理有限公司. 报警响应规程运行手册 [Z].

作者简介：廖骥晖（1990.11-），男，汉族，四川绵阳人，本科，工程师，研究方向：重水堆不停堆换料运行。