

主蒸汽隔离阀电磁阀密封失效分析和修复技术

杜岩松 杨云斐 刘强 袁忠东 刘成刚
(中核核电运行管理有限公司 浙江 海盐 314300)

摘要: 核电厂主蒸汽隔离阀电磁阀长期运维后密封面老化失效导致泄漏, 采取密封面堆焊硬质合金和镶套密封座的修复工艺可以满足密封要求。本文对两种工艺进行对比分析, 最终按照电磁阀的结构形式设计镶套的配合及联接过盈量, 对镶套件进行硬质合金堆焊, 采用镶套修复工艺的电磁阀通过了冷态密封试验和热态开关冲击性能试验, 在核电厂实际运行中得到了验证。

关键词: 电磁阀; 堆焊工艺; 镶套工艺; 修复

0 引言

根据安全事故防范要求, 核电厂主蒸汽隔离阀必须在限制时间内在上下游管道破口事故工况下实现快速关闭, 保障核安全。秦山核电厂 1 号机组主蒸汽系统的 2 台主蒸汽隔离阀控制用的二位三通电磁阀共 3 台, 其中 2 台 MGK32 型和 1 台 MGK50 型, 经过 30 年运行, 密封面在高温高压蒸汽冲刷汽蚀下容易导致密封性失效, 通过对该阀速关试验数据的不断跟踪和比对, 电厂发现该阀的关闭时间存在不断延长的趋势^[1], 影响主阀运行性能。

1 电磁阀密封失效原因分析

主蒸汽隔离阀电磁阀故障模式分两种, 一种是动作失效, 另一种是密封失效^[2]。对于动作失效, 在开闭主阀时可能的影响是阀门缓慢开闭或不能开闭, 主要原因是 1#、2# 电磁阀不动作或动作迟缓, 因而上活塞室不能减压, 可以通过电磁得电失电进行判断和解体后检查阀杆和先导阀杆表面光洁度及直线度是否满足标准来确定; 对于密封失效, 1#、2# 电磁阀密封面泄漏可能导致主阀保持开启时上活塞的出口温度太高, 3# 电磁阀密封失效可能导致主阀下活塞的出口温度太高, 影响主阀动作性能。对于动作失效故障不做讨论, 本文主要讨论密封失效的故障原因及对策。

MSIV 在开启、保持开启、关闭这三种状态下三台电磁阀的开关状态来判断, 每台电磁阀共有三个密封副, 分别是先导阀阀芯与阀座形成的密封、阀杆密封与阀座密封圈形成的 1 号密封面和活塞密封

与阀座密封圈形成的 2 号密封面。这种硬质密封副的失效, 基本来源于材料失效、异物侵入、密封面损坏、密封比压不够和行程偏差等几个方面, 通过对电磁阀泄漏故障分析, 通过 2 号 MSIV 的 MGK50 电磁阀维修记录表 (表 1) 可以发现, 先导阀主要存

表 1 MGK32 电磁阀维修记录表

状态	项目	测量值	标准	判断
维修前	测波纹管压缩量	1.50mm	1.20 ~ 1.50mm	不合格
	测先导阀行程	1.20mm	1.20 ~ 1.50mm	不合格
	测阀杆活塞行程	13.23mm	11.00 ~ 12.00mm	不合格
	泄漏率	> 0.05MPa/10min	≤ 0.05MPa/10min	不合格
	动作试验	无卡阻	无卡阻	合格
维修后	波纹管压缩量	1.50mm	1.20 ~ 1.50mm	合格
	先导阀行程测量	1.21mm	1.20 ~ 1.50mm	合格
	测阀杆活塞行程	11.5mm	11.00 ~ 12.00mm	合格
	泄漏率	< 0.005MPa/10min	≤ 0.05MPa/10min	合格
	动作试验	无卡阻	无卡阻	合格

在波纹管压缩量超标、行程超标和阀杆活塞行程超标的问题, 对于前者可以通过调整和研磨得以修复, 对于后者更换阀杆、研磨密封面可以修复。随着阀杆行程的增加, 弹簧压缩量不断增加, 弹簧产生的阻力越大, 当出现活塞端汽腔压力与弹簧阻力已经平衡, 但阀杆行程还没有走完的情况时, 电磁阀的 3 个通道完全连通, 从电磁阀 1 通道过来的主蒸汽通过 2 通道进入 MSIV 主阀上压腔的同时也在通过 3 通道排往大气 (图 1), 导致电磁阀密封失效。

以下是对电磁阀密封面失效主要原因的分析。

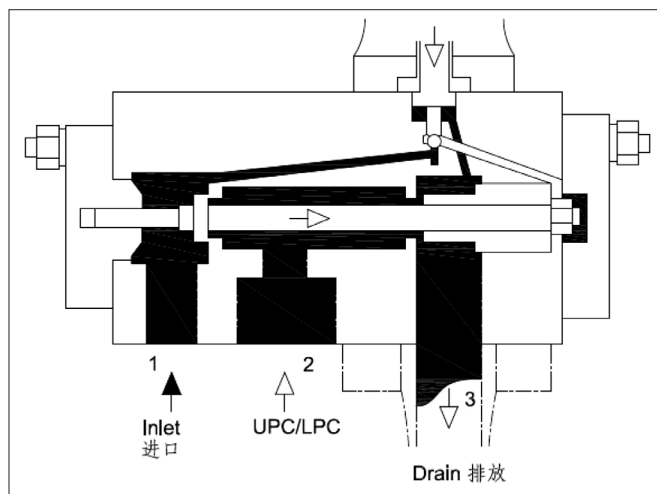


图1 电磁阀三个通道连通示意图

(1) 维修频度过高：由于每次阀门的解体维修都会对密封面进行研磨，对密封面厚度会有一定的损耗，维修频度越高，阀门密封面的寿命越短，适当的维修频度是保证阀门正常使用寿命的必要条件。

(2) 密封面研磨不当：对于密封面外形尺寸存在形位变形或局部缺损的阀座密封面，在研磨之前通常需要机加工修正，研磨本身起到的作用并不是修正密封面的形位和尺寸，而是为了提高密封面的光洁度，若密封面的形位不良，再怎么研磨也达不到密封的要求，只会起到密封面非正常磨损的反作用。

(3) 介质腐蚀损失：对于单相流的运行工况，若阀门密封面的材料为钴基合金，腐蚀损耗非常轻微；但密封面处于汽液两相流工况，且密封面的上、下游压差比较大时，密封面的汽蚀就不得不进行认真考虑。在此工况下，有时候密封面往往在正常的维修周期之前就已失效。且一旦形成哪怕是很微小的缺口，汽蚀的速度会明显增快，短期内就可能导致压力边界的失效，进而造成阀门内漏，甚至压力边界不能建立，不得不停机停堆处理，由此导致很大的经济损失。

(4) 密封面原始缺陷：密封面中气孔、裂纹的存在会严重影响密封面的性能，必须经过机加工或研磨消除，甚至需要更换阀门或阀座密封面才能解决问题，一旦发现密封面部位有缺陷，即使能用研磨方式解决，密

封面材料的消耗也是很大的。

综上所述，MGK32 电磁阀密封性能好坏直接影响进入 MSIV 主阀上压腔的蒸汽流量，从而直接影响 MSIV 主阀上压腔升压时间的长短。阀杆已国产化，可以根据研磨磨损情况适应性更换；阀体仍是进口设备，由于价格昂贵、采购周期长，对于阀体密封面修复技术的开发迫在眉睫。

2 电磁阀密封面修复工艺论证

2.1 马氏体不锈钢渗氮处理

3Cr13 不锈钢经 $450^{\circ}\text{C} \times 9\text{h}$ 和 $550^{\circ}\text{C} \times 9\text{h}$ 离子渗氮后，其表面硬度从 242HV 分别提高到 1020HV 和 1280HV^[3]。密封面部位经过高频淬火热处理或渗氮处理，电磁阀原始密封面就是采用该工艺热处理而成。密封面结构如图 2 和图 3 所示，以利于高频淬火热处理或渗氮处理。该制造工艺简单，价格也

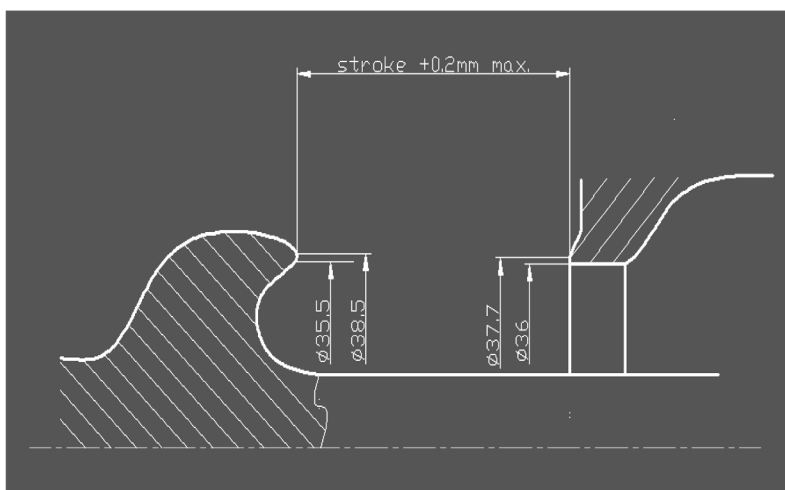


图2 1号密封副结构形式

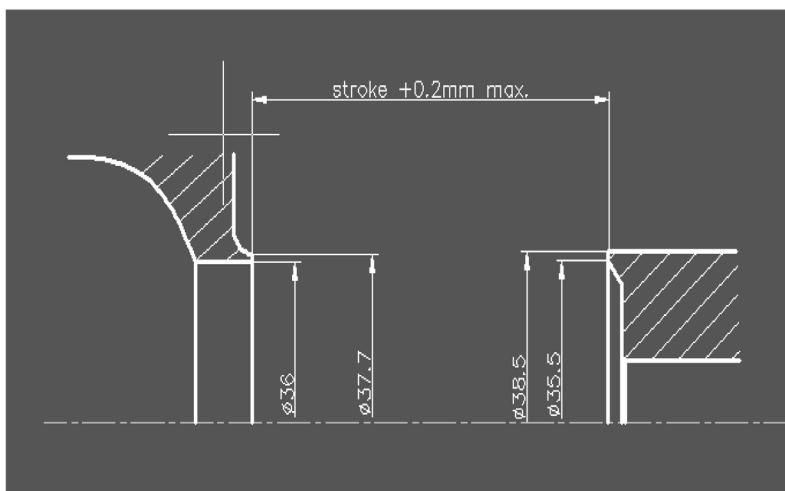


图3 2号密封副结构形式

相对便宜,但密封面性能稍差,不耐汽蚀,其使用寿命通常取决于高频淬火热处理或渗氮处理的好坏,密封面不耐冲蚀、阀门研磨损失量较大,使用寿命较短,因此电磁阀在役每个燃料循环都安排了更换,将更换下来的电磁阀阀座进行密封面研磨,以满足密封功能。

2.2 堆焊工艺

阀体阀座密封面堆焊工艺是成熟的。直接堆焊钴基硬质合金,阀体材料为奥氏体不锈钢或合金钢,密封面材料通常为钴基合金用焊接堆焊而成。电磁阀为奥氏体不锈钢,堆焊方法通常采用电焊或氩弧焊,并需要采用 600℃ 以上的预热温度和 950℃ 左右的高温消应力处理。经过对阀体堆焊硬质合金修复,密封性能得到验证,随后进行了开关冲击性能试验,试验过程中发现硬质密封面有微裂纹现象,工艺可靠性存在较大的不确定性。

2.3 镶套工艺

镶套工艺主要是将电磁阀阀座通过机加工到合适的尺寸,将镶套件(新阀座)安装到阀体相应得位置(阀座与阀体通常采用一定的过盈配合),再将阀座与阀体进行密封焊接。

与阀体直接堆焊钴基硬质合金的阀门制造工艺相比,由于该工艺中堆焊阀门密封面材料的主要的堆焊和热处理都在小小的密封座上进行,使得焊接位置很好,非常容易操作,密封面的热处理也不需要带着阀门,可以在很小的热处理炉中进行,密封面的质量能得到非常好的控制,阀座中出现缺陷的可能性大大减低,使用中也不容易出现问題,价格也相对便宜,并且可修复性较好,目前核电站中安全相关的关键阀门密封面的结构普遍的采用的就是这种结构。因此,本次研究的重点是将镶套工艺应用在电磁阀阀座密封面修复上。

从技术规范的要求来看,制造厂出厂验收的要求通常允许的范围为 1.6 ~ 3mm,考虑到阀门制造过程中密封面厚度不均匀性,以及给予阀门正常的维修研磨的余量 1 ~ 2.5mm,也就是说当密封面的残余厚度小于 0.6mm 时,通常要求更换阀门。由于正常情况下研磨的损耗一般不会超过 0.2mm,也就是说,对于一般的阀门,经过 8 ~ 15 次的研磨,就需要考虑更换阀门或更换密封面了。

密封面实际可用的厚度则还没有任何标准作出规定,通常与使用的工况有很大关系,一般也是由

制造商给出建议,但制造商给出的余量要求都比较大,比较保守。通常对于没有强烈的多相流汽蚀工况,介质也不是强腐蚀性的,只要密封面还存在连续均匀的硬质合金层,大多还能正常使用。而在一些恶劣的使用工况下,即使密封面厚度还有 1mm 的余量,也难以保证在整个燃料循环周期中不会出现泄漏。这一点对于维修决策有重要的参考意义,也就是说,一般情况下,当密封面厚度小于 1mm 时,需要把采购整阀或相关的备件纳入计划,准备更换阀门;或采购阀座,现场更换阀座密封面,至于具体何时实施,可根据阀门的实际状况和长、短换料大修周期安排来决定最合适的更换时机。

对于原密封面是整体堆焊硬质合金或马氏体材料高频淬火热处理而成的阀门,若阀门尺寸有余,可以变更为密封座的形式,其工艺与阀座的安装类似,需要先在阀座部位加工出安装阀座的内孔,并用钨极氩弧焊将阀座与阀体密封焊接。其修复工艺步骤如下:

- (1) 测量更换部位的尺寸,确定密封座的长度、厚度,并对阀体密封座部位进行机加工,以便镶装阀座;
 - (2) 确定镶套阀座尺寸和阀座堆焊硬质合金的毛坯图,并机加工毛坯;
 - (3) 对毛坯进行预热,预热温度为 300℃ ;
 - (4) 用手工钨极氩弧焊进行硬质合金的堆焊,焊接材料位 HS111,电流范围 60 ~ 75A ;
 - (5) 焊接完成后即刻回炉进行高温消应力,热处理温度 950℃,保温 4h,后随炉缓冷;
 - (6) 将热处理后的毛坯机加工成阀座内孔和硬质合金层都留有一定的精加工余量,其与阀体的配合面有 0.01 ~ 0.02mm 的过盈配合;
 - (7) PT 检查阀座,确认合格;
 - (8) 将阀体整体加热,温度不超过 300℃,具体视实际过盈量的要求;
 - (9) 将阀座装入阀体,需要时可用锤击打紧;
 - (10) 将阀座与阀体用氩弧焊密封焊接,焊接材料采用 ER309,电流范围 105 ~ 115A,焊缝冷却后 PT 检查合格;
 - (11) 完全冷却后上车床进行机加工,将阀座精加工到要求尺寸;
 - (12) 研磨后装上阀芯,确认密封性试验合格。
- 镶套件修复工艺类似于阀座的密封结构,已普

遍使用于要求比较高的阀门制造。其形式是先对阀体密封部位进行机加工,以便于镶套件安装。镶套件预先进行了硬质合金堆焊,且经过消应力热处理,再机加工成要求的尺寸后安装到阀座上,之后镶套件与阀座焊接密封且固定,最后经过精车加工和密封面研磨处理。以下是对本次采用的镶套工艺的结构安全性和密封可靠性分析。

(1) 结构安全性分析:镶套件采用了奥氏体不锈钢材料,镶套件壁厚不小于2.5mm,镶套件与阀体采用过盈配合(H6/p5),保证了镶套件的结构稳定性,安装后用手工钨极氩弧焊与阀体焊接,确保了镶套件与阀体的密封和固定。其结构完全符合通用的阀座密封结构,是安全的。

(2) 密封可靠性分析:实际使用的镶套件材料H0Cr19Ni11Ti,是核1级材料,密封面部位堆焊了HS111钴基合金,堆焊采用手工钨极氩弧焊,通过焊前预热和焊后消应力热处理,保证了镶套件的质量。镶套件与阀体的焊接采用了钨极氩弧焊,焊丝采用了ER309,符合焊接工艺规范。焊接后密封面堆焊层和镶套件与阀体的焊缝都经过了PT检查合格。堆焊层厚度和硬度经过测量,符合钴基合金性能规范要求,证明无论是密封面的钴基硬质合金层还是镶套件与阀体的密封焊缝都是可靠的。修复后的阀门做了冷态静密封试验、冷态启闭冲击试验,以及和热态密封性试验及热态启、闭冲击试验。试验结果表明,修复后的电磁阀性能完全能到达出厂要求,其密封性能甚至大大优于出厂性能。从镶套件修复的结构和工艺分析表明,修复后的电磁阀密封面不存在非受控瞬间断裂导致密封快速失效的风

险,且密封面可能存在的渐进式的泄漏风险不会比修复前大。

(3) 修复实施的合规性分析:项目组按照法规要求,开发的工艺正式修复了一个电磁阀,开发了修复工艺方案,执行严格的安全质量计划,确保了修复工艺得到了良好的控制。修复后的电磁阀经过了热态工况模拟试验,并安装在主蒸汽隔离阀经过一个燃料循环的主蒸汽压力的考验,没有发现泄漏的迹象。修复完成的电磁阀质量得到了良好的控制及保证。

3 结语

镶套密封座焊接修复工艺经模拟试验验证和实际应用,从电磁阀密封性能试验和开关冲击联合试验的结果及修复件的成功实践来分析,新修复工艺甚至优于阀门制造性能,可以延长维修周期,降低维修成本,为类似高温高压阀门密封面的修复提供了技术手段,增加了核安全级阀门密封面修复的灵活性,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 李旭宁,张铭刻,郝龙云.主蒸汽隔离阀快关时间延长的原因分析[C]//《中国核电》杂志理事会.2010中国核电产业科技创新与发展论坛论文集.2010:10.
- [2] 瑞士CCI,1990.苏尔寿主蒸汽隔离阀及其旁路阀操作和服务说明书集[Z].
- [3] 程东,高原,唐光辉.3Cr13不锈钢的等离子表面渗氮[C]//中国机械工程学会机械装备结构材料与表面技术研讨会.中国机械工程学会;机械工程材料编辑部,2008:111-113.