

# Analysis and Development of Grinding Repair Technology and Equipment for the Sealing Surface of Nuclear Reactor Pressure Vessels

Gang Luo Yunfeng Hu

Chengdu Haiguang Nuclear Power Technology Service Co., LTD., Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

To address issues affecting the sealing performance of nuclear reactor pressure vessel sealing surfaces after prolonged operation, a new type of grinding machine has been designed. Through structural optimization of the grinding arms, grinding heads, and grinding blocks, as well as the grinding media and processes, the machine replaces the commonly used "I"-shaped symmetrically arranged grinding arms with three evenly distributed grinding arms. The fixed grinding arms are replaced with floating arms with a certain swing angle, eliminating grinding plane errors caused by the non-perpendicularity of the rotating spindle to the grinding surface. The structural optimization of the grinding head ensures 100% contact between the grinding block and the surface being ground, with precise control and real-time display of grinding pressure. The geometric optimization of the grinding blocks eliminates issues such as tail lifting and skewing, resulting in smoother cutting and better planar guidance. The process includes immediate cleaning and precise oiling of the grinding surface, extending the durability of the grinding sandpaper, improving grinding efficiency and surface quality, and preventing the entry of grinding fluid into the pressure vessel. Through 1:1 simulation experiments and further optimization of the grinding machine design and process parameters, the grinding precision and surface quality of the pressure vessel sealing surface fully meet the relevant technical requirements. The operability, stability, efficiency, and foreign object protection of the grinding machine also meet the requirements for on-site engineering use.

## Keywords

Pressure vessel sealing surface repair; New grinding machine; Equipment structure optimization; Grinding process optimization; Simulation verification

## 核反应堆压力容器密封面研磨修复技术分析及设备研制

罗刚 胡运峰

成都海光核电技术服务有限公司, 中国·四川成都 610000

## 摘要

为了对核反应堆压力容器密封面经过长期运行后出现的一些有碍密封性能问题进行修复,设计了一种新型研磨机。通过对研磨机中研磨臂、研磨头、研磨块的结构设计及使用的研磨介质和研磨工艺逐一优化,特别在整体结构上采用均布的三研磨臂取代常用的“一”字形对称布置的研磨臂,将固定式研磨臂改为有一定摆角的可浮动式研磨臂,消除了旋转主轴与研磨面不垂直造成的研磨平面误差;通过对研磨头的结构优化设计,研磨快和被研平面达到100%的贴合度,研磨压力达到精准控制和实时显示;通过对研磨块几何尺寸的优化设计,消除了研磨块翘尾、偏斜问题,使其有更加平稳的切入、切除效果,平面导向性更好;工艺上对研磨面做到即时清洁和精准涂油,延长研磨砂纸耐用度,提高了研磨效率和研磨面的表面质量,并消除了研磨液进入压力容器的可能性。通过1:1的模拟实验验证与进一步优化研磨机设计方案和研磨工艺技术参数,使压力容器密封面的研磨精度及表面质量完全满足相关技术要求,研磨机的操作性、稳定性、工作效率和防异物性均可满足工程现场使用要求。

## 关键词

压力容器密封面修复; 新型研磨机; 设备结构优化; 研磨工艺优化; 模拟验证

## 1 引言

核反应堆压力容器是用于装载反应堆核燃料组件并承

受高温、高压、高放射性的一回路冷却剂压力边界屏障的重要设备,属于核一级安全设备,为保证反应堆的安全运行,确保不发生放射性物质泄露,对压力容器法兰密封面与压力容器顶盖密封槽均有着极高的技术要求,表面粗糙度 $< Ra0.8\mu m$ ,环向高度差 $< 0.05mm$ ,径向高度差 $< 0.08mm$ 。密封面不得由径向贯穿划痕和加工纹路。由于压力容器在储存、安装、调试、实验、运行过程中,接触的水质偏差有可

【作者简介】罗刚(1982-),男,中国四川成都人,硕士,高级工程师,从事核电站反应堆检修管理、工艺研究及工器具的开发与应用研究。

能造成压力容器密封面的点腐蚀、应力腐蚀、缝隙腐蚀及密封环压痕等现象，在压力容器安装或反复检修过程中，由于操作不慎造成密封面的擦伤、划痕、或砸坑等问题，此类情况下，必须对密封面进行修复，恢复压力容器的密封性能。

## 2 目前核反应堆压力容器密封副修复技术现状与分析

通过对现有相关技术资料查询及工程实际应用经验的调研，目前有关压力容器法兰密封面的修复有两种技术路线，即人工修复技术和自动设备修复技术。

### 2.1 人工修复技术

人工修复技术分为局部修复与整体修复两种可能性。

局部修复是指当压力容器法兰密封面的局部出现0.02mm以下的点坑锈蚀或划痕时，由维修人员使用砂纸直接打磨完成，若出现较深的点坑锈蚀或划痕时，必须通过补焊、铲平、打磨与抛光等方法修复密封面，此方法不但效率低下，操作人员受到较高的辐射剂量，而且存在很高的操作

技术风险与设备损伤风险。若压力容器法兰密封面多个位置出现点坑锈蚀时，操作技术风险与设备损伤风险会倍增。

压力容器法兰密封面出现较多的锈蚀或腐蚀坑点时，为保证其密封性能，需要整体研磨修复。其方法主要是通过人工推动重型研磨块，使用研磨膏作研磨介质，利用研磨块的自重对密封面进行研磨，该方法稳定性好，研磨精度容易保证，但对研磨块精度要求很高，而且要随时检查和频繁修正，对人员需求量大，效率低，集体辐射剂量容易超标。此方法仅可适用于小型反应堆。

### 2.2 自动设备研磨修复技术

自动设备研磨修复技术应用于压力容器密封面的整体修复，其技术路线有两种，一是由电机驱动主轴并带动“一”字双臂公转，双臂两端加自转研磨头的方式（图1）。但由于研磨过程出现严重颤振，致使被研磨表面出现密集划纹纹路，并且在径向贯穿密封面，研磨精度及表面效果均无法满足工程技术要求。

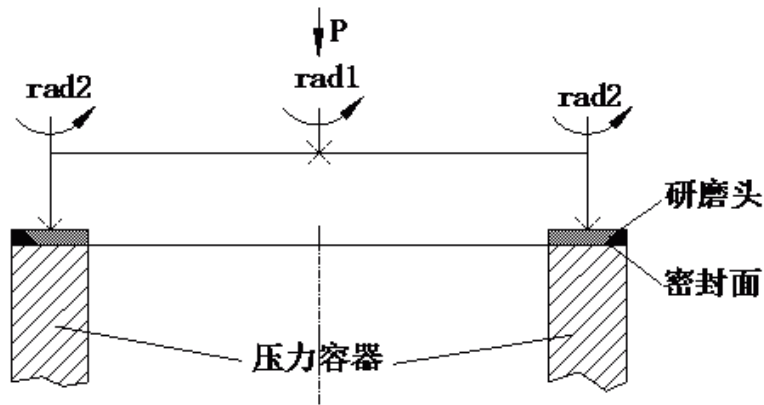


图1 双臂研磨原理图

通过对图1所示的研磨机工作原理进行全面技术分析，主要存在以下问题：

1) 由于自转的研磨盘和“一”字研磨臂为固定连接，研磨机在安装到压力容器法兰上后，由于制造、装配和安装的误差，很难保证传动主轴与被研磨的密封面垂直，即使微小的垂直误差通过较长的研磨臂放大后，研磨盘的公转轨迹无法与被研磨的密封面保持平行，对称布置的两研磨盘在公转过程中对密封面的正压力大小不一，再加上研磨盘的高速自转，研磨盘就会产生自激振荡，从而在密封面上留下了研磨盘明显颤振的密集纹路；而研磨盘的公转轨迹无法与被研磨的密封面保持平行是其造成密封面环向平面度超差的主要原因。由于压力容器密封面不允许存在贯穿密封面的径向纹路和划伤，因此带自转功能的研磨盘设计方案不适宜压力容器密封面。

2) 压力容器密封面是有由奥氏体不锈钢堆焊而成，其表面硬度低于有较高硬度的阀门密封面，因此类似阀门高速自转的研磨方式易造成奥氏体不锈钢表面划伤或产生橘皮

皱纹现象，表面粗糙度无法满足技术要求。

3) 研磨盘的高速旋转会造成具有放射性的研磨微粒飞溅，造成环境污染和操作人员的体表污染。

第二种技术路线是根据人工推动研磨块的工作原理设计样机，利用立式车床的主轴加持研磨块并施于研磨正压力，由工作台带动被研磨工件，研磨膏作为研磨剂进行原理验证，通过多次验证，均出现外侧低内侧高，平面度超标的问题。

经过仔细观察与分析比对，认为造成被研磨面内高外低的主要原因是因为处于游离状态的磨粒经过研磨块沿弧形轨迹的不断推移及磨粒自身离心力的双重作用下，磨粒沿着弧形轨迹的切线方向运动，使大部分磨粒逐渐堆积在研磨面的外侧，随着研磨时间的延长，研磨面外侧的研磨效率明显大于内侧，故引发外低内高的现象，从研磨块表面的损耗测量结果也可证明磨粒的向外堆积是造成被研磨面径向不平的主要原因。而人工推移研磨块由于移动速度不高，连续研磨时间不长，磨粒分布的均匀性较好，所以人工研磨的方式可以满足技术要求。

然而关于核反应堆压力容器顶盖密封槽的研磨修复问题，目前还未检索到有关自动研磨方面的报道。

### 3 新型压力容器法兰密封面自动研磨机设计分析及优化措施

通过对以上两种研磨方式存在的问题分析，为满足压力容器密封面的技术要求，综合工程应用上对压力容器密封面研磨机的设计要求，在研制新型压力容器密封面研磨机(图2)技术方案中考虑到了如下几个方面的技术因素：

1) 为了满足压力容器法兰密封面或压力容器顶盖密封槽底原有的环形平面度，应消除安装后研磨机的主轴与压力容器法兰密封面的垂直度误差所造成的研磨头运行轨迹与密封面的平行偏差，因此研磨机的结构设计中，其主轴和研磨臂的联接采用万向联轴器和关节轴承的组合方式(见图4)，使得研磨过程中当研磨臂受到研磨头不同的反作用力时，有一定的上下摆动裕量，摆动量控制在 $1^{\circ}$ 至 $3^{\circ}$ 内，以保持研磨头和被研磨的密封面的接触压力基本恒定。

2) 为了使研磨头在研磨过程中具备良好的抗振性能和更加稳定的运行状态，同时提高研磨平面度和研磨效率，选择采用均布三臂挂载研磨头的设计结构(见图3)，为提高研磨臂的整体刚度与抗振能力，采用ZG35整体铸造技术，并对加工后的研磨臂进行了静平衡处理。为防止研磨臂自适应摆动过程中出现震荡问题，在与主轴的连接上采用了碟簧装置，在联轴器上下瓣之间增设了橡胶垫，以此增强研磨臂摆动阻尼，且阻尼大小可根据研磨臂的运行效果进行调整。

3) 为提高密封面的研磨效率，降低密封面的粗糙度，研磨过程一般分为粗研、半精研和精研，不同阶段采用不同的研磨压力，为此研磨头在结构设计上采用了丝杆、弹簧和压力传感器的组合形式(见图4)，以便调整、显示研磨压

力的大小。

4) 研磨块和研磨面应保持良好的接触，为此研磨块加持装置和研磨头采用关节球轴承联接(见图4)，在研磨头正压力的作用下，研磨块和研磨面保持较高的接触精度；而研磨块自身的平面度经平板研磨后达6级精度，为保证研磨块具备持久的稳定精度，其材料选用自然失效时间一年以上的铸造合金材料。同时，为保证研磨块在启动研磨的瞬间不会划伤研磨面，在研磨块运动方向的前后倒出 $1.5^{\circ}$ 至 $3^{\circ}$ 的过渡斜面，使得研磨块的启动与切入、切出平稳；研磨块的几何尺寸应使其宽度覆盖被研磨的密封面的宽度，长度是宽度的1.5倍左右，以获得较好的平面导向精度。

5) 为避免研磨过程中处于游离状态的磨粒分布不均所造成的密封面径向平面度超差问题，宜采用在研磨块表面粘贴背胶砂纸的形式研磨，针对压力容器密封面材料为奥氏体不锈钢，磨粒材质宜选用白刚玉( $AL_2O_3$ )。为保证研磨砂纸的使用效果，进行了性能验证实验，实验结果表明，研磨面的平面度和粗糙度均能满足技术要求。

6) 研磨机应能同时满足对压力容器顶盖密封槽研磨，为此，槽面研磨块应能放入密封槽中，并对密封槽的外侧面和底面同时研磨，并保证密封槽外侧面与底面垂直，所以其研磨头在对研磨块施于垂直压力的同时还必须施于侧向压力，其结构设计见图5所示；其余研磨原理类同与容器法兰密封面的研磨。

7) 为保证被研磨面具有均匀细腻的研磨纹路，研磨块稳定的运动状态，在控制面板上设计了调速、正反转、研磨压力实时显示和安全急停功能。

8) 为使研磨机满足工程现场安装使用的要求，设计了快速对中结构、快速胀紧式安装结构，防异物接收盘装置和密封面保护板。

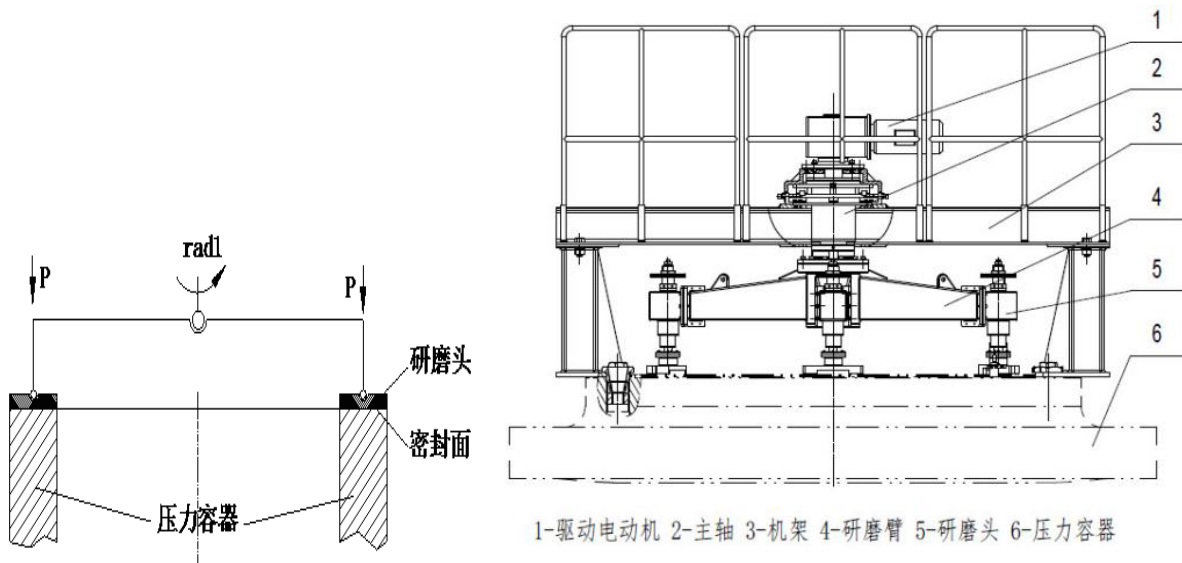
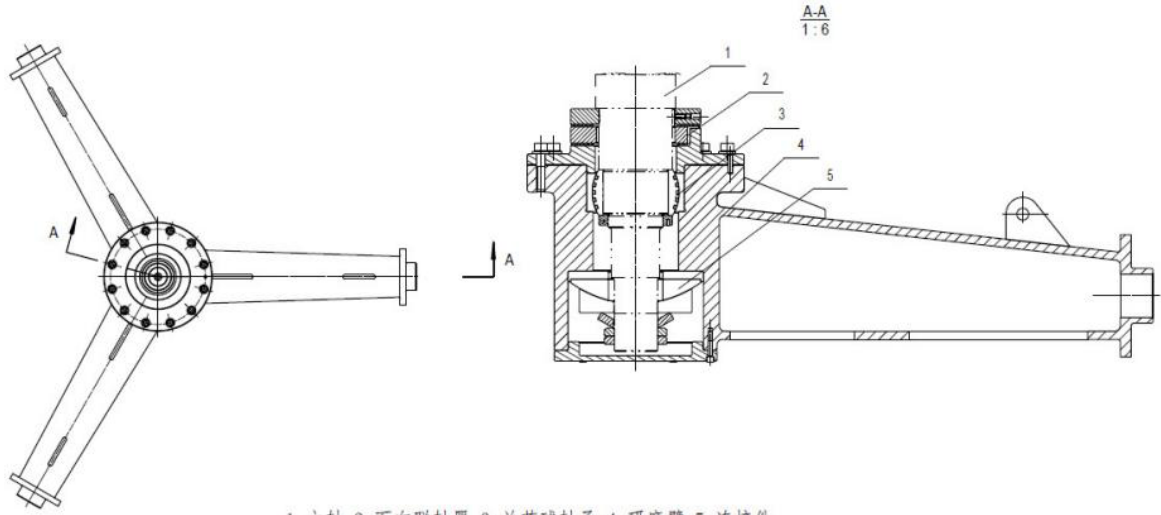
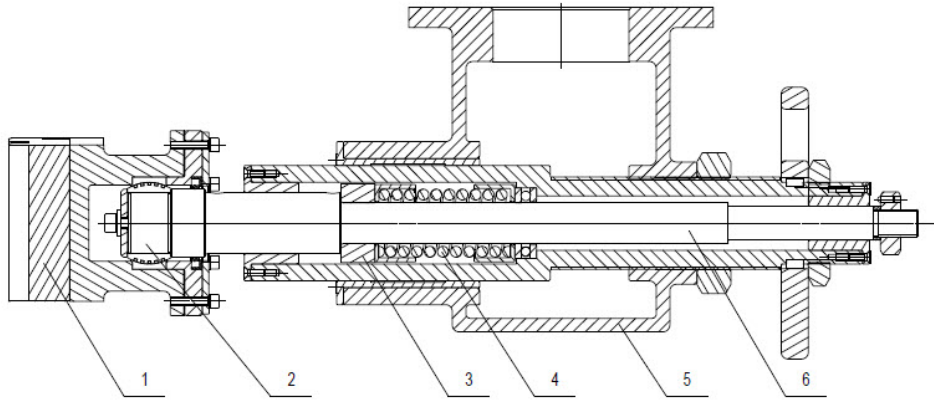


图2 压力容器密封面研磨机



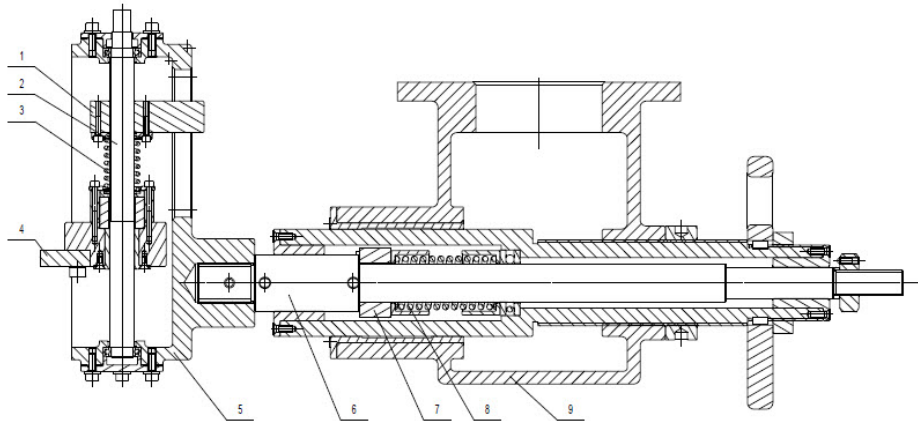
1-主轴 2-万向联轴器 3-关节球轴承 4-研磨臂 5-连接件

图3 研磨臂结构设计



1-研磨块 2-关节球轴承 3-压力传感器 4-弹簧 5-支架 6-调节丝杠

图4 平面研磨头机构设计



1-导向块 2-调节丝杠 3-弹簧 4-研磨块 5-支架 6-调节丝杠 7-压力传感器  
8-弹簧 9-支架2

图5 槽面研磨头结构设计

## 4 综合实验验证与工艺优化措施

为验证研磨机的使用效果，依据工程技术要求，特此设计制造了模拟体，为验证研磨机的研磨精度和效率，模拟体的初始表面粗糙度大于 Ra12.5。

### 4.1 研磨工艺参数的初步设定与优化

根据相关研磨工艺技术资料的推荐，初步设定相关工艺参数如表 1、表 2 所示：

在研磨实验过程中，由于压力过大、速度过快的问题引起震动、砂纸脱落、耐用度低，研磨块启动翘尾等问题，经过多次调整相关参数与试验后，上述问题消除，调整后的工艺参数如表 3、表 4 所示。

### 4.2 研磨液的优化措施

研磨液在研磨过程中起到润滑作用，可有效减小摩擦力，防止振动发生，并可不断冲刷研磨掉的磨粒和金属碎屑，防止磨粒和金属碎屑划伤已研磨表面。但若大量使用研磨液容易造成研磨液进入反应堆容器，故工程应用上不允许大量使用研磨液，但研磨液不足无法有效冲刷研磨面，易造成研磨出的碎屑填堵在研磨砂纸表面，使研磨砂纸很快失效，且研磨出的金属碎屑在研磨块的推移下，易形成积瘤嵌入到研磨的密封面中并划伤研磨砂纸和研磨块表面，或嵌入到研磨砂纸里造成对研磨面的划伤，两种情况均会严重影响密封面的研磨质量

表 1 研磨平面粗糙度值与研磨工艺理论参数选择表

研磨面粗糙度 (Ra)	砂纸粒度 (um)	研磨速度 (m / min)	研磨时间 (min / 每次)	研磨压力值 (kg)	备注
>Ra3.2	120	50	60	15	
Ra 3.2- Ra 1.6	60	40	40	12	
Ra 1.6- Ra 0.8	30	30	30	10	
Ra 0.8- Ra 0.4	15	20	30	8	

表 2 研磨槽面粗糙度值与研磨工艺理论参数选择表

研磨面粗糙度 (Ra)	砂纸粒度 (um)	研磨速度 (m / min)	研磨时间 (min / 每次)	垂直压力 (kg)	侧向压力 (kg)
>Ra3.2	120	50	60	12	8
Ra 3.2- Ra 1.6	60	40	40	10	6
Ra 1.6- Ra 0.8	30	30	30	8	5
Ra 0.8- Ra 0.4	15	25	30	5	3

表 3 研磨平面粗糙度值与研磨工艺参数优选表

研磨面粗糙度 (Ra)	砂纸粒度 (um)	研磨速度 (m / min)	研磨时间 (min / 每次)	研磨压力值 (kg)	备注
>Ra3.2	120	35	40	8	
Ra 3.2- Ra 1.6	60	30	40	6	
Ra 1.6- Ra 0.8	30	25	30	5	
Ra 0.8- Ra 0.4	15	20	25	3.5	

表 4 研磨槽面粗糙度值与研磨工艺参数优选表

研磨面粗糙度 (Ra)	砂纸粒度 (um)	研磨速度 (m / min)	研磨时间 (min / 每次)	垂直压力 (kg)	侧向压力 (kg)
>Ra3.2	120	42	40	6	4
Ra 3.2- Ra 1.6	60	35	35	5	3
Ra 1.6- Ra 0.8	30	30	30	4	3
Ra 0.8- Ra 0.4	15	20	30	3.5	2.5

优化措施：在研磨块的前后端面增设擦拭清洁装置，该装置注油饱和度达40%-60%，使其既能够擦拭研磨过程中产生的磨粒、磨屑，同时可对研磨面进行油膜涂覆且不会产生油液流动问题。该装置不但很好的解决了研磨面与研磨砂纸被磨粒或磨屑划伤问题，同时保持研磨砂纸表面的清洁，极大的延长了研磨砂纸的耐用时间，提高其使用寿命达1.5倍左右，进一步提高了研磨效率，并且解决了大量使用润滑油的问题，从根本上消除了润滑油进入反应堆压力容器的可能性。

在粗研时，可采用10号锭子油加40%煤油，有利于提升研磨效率；半精研时，可采用10号锭子油加20%煤油，适当提高研磨效率并兼顾研磨面质量，为精研做好基础准备；精研时，采用100%的10号锭子油，有利于提高研磨面的最终质量。

### 4.3 槽面研磨块的优化措施

单一槽面研磨块在研磨过程中，由于底面接触面积小，在侧压力的作用下易发生偏斜，致使被研磨的密封槽底面和侧面不垂直。研磨块的初始设计长度不足，在研磨机启动瞬间，由于静摩擦力的作用易产生翘尾现象而划伤研磨面。

改进研磨块的设计(6)，使其对两密封槽同时研磨，以增加底面接触面积，调整侧压力与垂直压力的施力比例至1:2.5，加长研磨块的长度至250mm；提高研磨块的制造精度，要求研磨块底面平面度为0.002mm，两外凸弧面的轮廓误差控制在0.005mm以内，与底面的垂直度误差小于0.002mm。



图6 双槽面研磨块

通过改进，完全消除了研磨机启动时研磨块翘尾问题和侧向力引起的偏斜问题，研磨效率得到进一步提高，研磨质量更加稳定可靠。

### 4.4 换向研磨的时间优化

为了消除研磨纹路，提高研磨质量，需要定时对研磨轨迹方向进行切换，经试验证明，由原先的每20分钟换向一次修订为每10分钟换向一次，则研磨纹路更加细腻，而对研磨效率无任何影响。

## 5 实验数据与结论

通过对研磨机的设计改进和研磨工艺参数的探索优化，最终研磨实验结果如下：

平面密封面的实验结果：单次最大研磨量0.005mm，单次径向平面度最大变化量0.003mm，单次环向平面度最大变化量0.003mm；最终研磨量0.012mm，最终径向平面度最大变化量0.006mm，最终环向平面度最大变化量0.008mm；研磨后最终表面质量<Ra0.4um（见图6）。

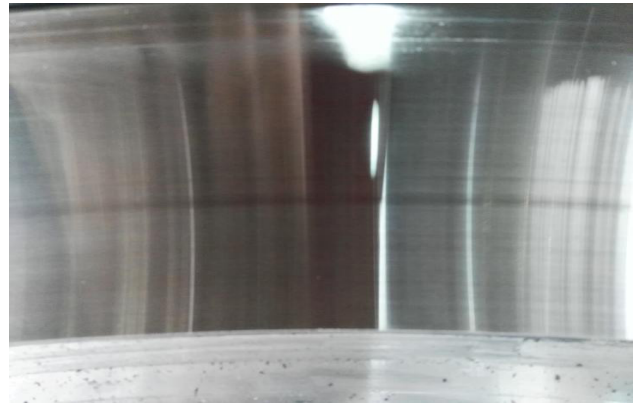


图6 平面研磨效果图

槽面密封面的实验结果：单次最大研磨量0.004mm，单次径向平面度最大变化量0.004mm，单次环向平面度最大变化量0.004mm；最终研磨量0.014mm，最终径向平面度最大变化量0.005mm，最终环向平面度最大变化量0.005mm（见表6）；研磨后最终表面质量<Ra0.4um（见图7）。

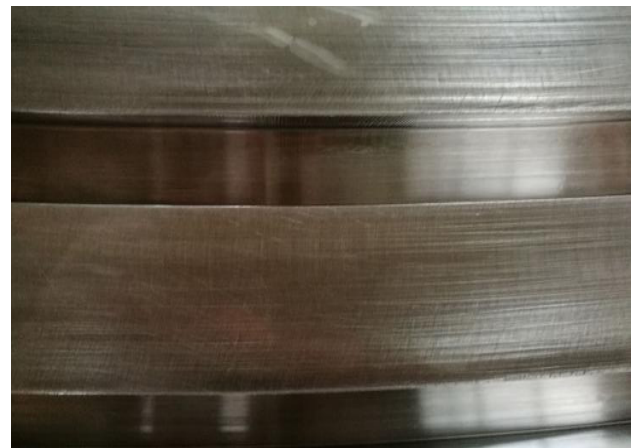


图7 槽面研磨效果图

结论：该研磨机设计合理并探索出相关配套的研磨工艺参数，技术操作简单，运行平稳，无振动现象。压力容器密封面研磨后环向平面度0.008mm，径向平面度0.006mm，压力容器顶盖密封槽的环、径向平面度均为0.005mm，该项数据表明不会影响和降低反应堆压力容器密封面、密封槽的原始精度，因此该研磨机能够同时满足对反应堆压力容器法兰密封面及其顶盖密封槽面的研磨的各项技术指标，研磨

面干净无杂物，并可保证无异物进入反应堆压力容器中，满足工程现场的使用要求。目前该技术已获得国家实用新型专利（专利号：ZL 2016 2 0365639.4）。

## 6 应用前景与可推广性和可扩展性

该项研磨技术不仅运用在工程反应堆，小型反应堆，还可运用到核电站反应堆压力容器密封面的研磨修复以及石化行业中大型压力容器密封面的研磨修复。该项技术还具备较好的扩展能力，可在研磨臂上加装摄像头，用于对反应堆压力容器密封面的视频检查；当密封面需要补焊时，还可在研磨头上加装切削刀具，用于对密封面的补焊高点进行精准切除，避免人工打磨造成的微粒飞溅和环境污染，消除人员污染风险，降低人员技能风险引起的设备风险，并显著提

高密封面修复的工作效率。

### 参考文献

- [1] 刘兆东, 压力容器密封面交叉网纹式研磨技术研究, 中国核电, 2015-02, 第8卷第2期
- [2] 陆传根, 林兴华, 核电站反应堆压力容器法兰密封面腐蚀机理的分析, CPVT, VOL21.No5 2004
- [3] 关欣, 核电反应堆压力容器密封面自动研磨装置, 中国科技投资, 2015-01
- [4] 赵学, 张娜, 龚建荣大型压力容器法兰密封面现场修复加工装置的设计, 兰州理工大学学报, 第32卷 第4期, 2006年8月
- [5] 大型壳体法兰密封面的整体加工[J], 辽宁师专学报, 2004 (4), 78-80