

# 反应堆热电偶导管切割工具的研发及应用

## Development and Application of Cutting Tool for Reactor Thermocouple Conduit

陈春流 谭毅 胡建强

Chunliu Chen Yi Tan Jianqiang Hu

中广核核电运营有限公司 中国·广东 深圳 518000

China Nuclear Power Operations Co.,Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

**摘要:** 某核电厂首次大修对一回路进行水压试验的过程中, 检查发现反应堆压力容器顶盖一组热电偶导管出现渗漏。经研究决定, 对该渗漏导管采取切割堵管的方案解决。为此结合热电偶柱和热电偶导管结构、系统功能及周边接口、环境剂量等条件, 设计了一套专用于切割热电偶导管的专用工具, 论文主要阐述了其研发技术要求以及使用过程等。目前, 切割热电偶导管专用工具已在该电厂大修现场得到应用并获良好反馈。

**Abstract:** During the hydrostatic test of the primary circuit in the first overhaul of a nuclear power plant, it was found that a group of thermocouple tubes on the reactor pressure vessel top cover had leakage. After research, it is decided to adopt the solution of cutting and blocking the leakage conduit. Therefore, combined with the structure, system function, peripheral interface and environmental dose of thermocouple column and thermocouple conduit, a set of special tools for cutting thermocouple conduit are designed. This paper mainly expounds its R & D technical requirements and application process. At present, the special tool for cutting thermocouple conduit has been applied in the overhaul site of the power plant and received good feedback.

**关键词:** 反应堆; 热电偶; 导管; 切割工具

**Keywords:** reactor; thermocouple; conduit; cutting tool

**DOI:** 10.12346/etr.v4i5.5624

## 1 事件概述

核电厂反应堆热电偶主要用于反应堆堆芯温度测量, 热电偶导管作为热电偶的通道, 连同热电偶导管座成为一回路压力边界, 热电偶柱成为一回路压力重要边界, 因此热电偶导管及其导管座关系到一回路压力边界的完整性, 对核电厂机组的安全运行至关重要<sup>[1]</sup>。

在某核电厂首次大修一回路水压试验下行阶段时, 工作人员检查发现堆芯测量系统(RIC)热电偶柱上表面导管周围存在少量硼结晶<sup>[2]</sup>。通过分析认为硼结晶是从导管处周边缝隙渗出, 存在发生渗漏的部位为热电偶导管以及导管座。

事件发生后电厂成立了专项工作组, 在深入调研分析后, 研究决定采取以下措施: 抽出导管内热电偶、割除导管, 钻除残余导管并扩孔, 安装封堵头焊接后将密封座内部分导管包络在一回路边界以内。在该检修方案中, 受限于作业环境的影响以及检修精度的要求, 切割导管的工作存在较大的风

险性, 为此需要研发一套高效便捷精确的热电偶导管切割工具。

## 2 研发方向

### 2.1 技术背景

热电偶柱所处的工作环境狭小, 热电偶柱与三边围板的距离仅约120mm, 如图1所示。热电偶柱上布置的热电偶导管密集, 热电偶柱直径约为65mm, 其上布置了13根直径约为8mm的导管, 导管间距约为3~4mm。这就对热电偶导管的切割作业要求严格, 如图2所示<sup>[3]</sup>。

目前, 切割工具外形尺寸较大, 难以安装到热电偶的工作空间内或安装后工作人员在有限空间受限难以完成切割作业, 而且, 待切割的热电偶导管直径小且与相邻管间隙小, 约为3mm, 现有技术难以进入切割区域或会损伤相邻热电偶导管。因此, 目前切割技术及工具均无法满足热电偶切割

【作者简介】陈春流(1989-), 男, 中国广东汕尾人, 本科, 助理工程师, 从事核电站核岛主设备检修项目研究。

的工作需要,无法实现在狭小空间内对小直径管进行切割,影响热电偶导管的切割,继而影响反应堆热电偶的工作,易导致安全事故。

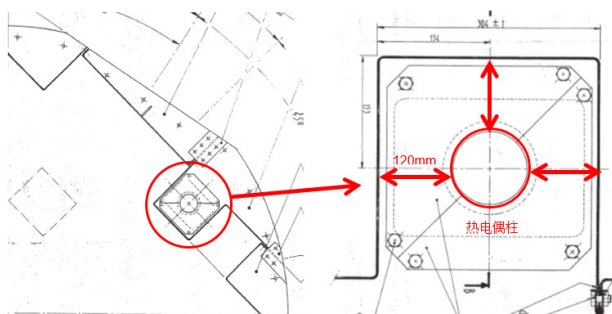


图1 热电偶柱周围空间

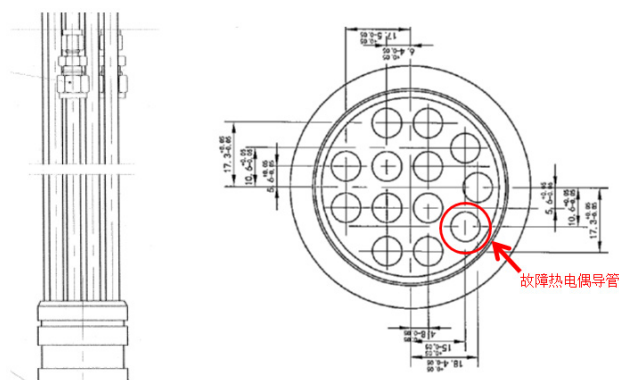


图2 热电偶导管布置

## 2.2 技术风险管控要求

核电厂检修不同于一般的电厂检修,最显著的区别就是存在辐射风险,除此之外仍要考虑机械伤害及设备损害的技术风险。为此在研发该套工具时,需清楚现场的作业技术风险管控要求,并针对作业技术风险管控要求研发适合于现场所需的专用切割工具。经现场调查有如下的技术风险点需要关注。

### 2.2.1 辐射防护技术风险点

本次泄漏的导管位于反应堆压力容器顶盖上,现场作业环境剂量率高。为减少作业人员的受照剂量,执行辐射防护最优化原则,需要从缩短作业时间角度出发设计该工具,因此在专用工具方面就需要更多的考虑到易于安装以及便于操作。

### 2.2.2 机械伤害技术风险点

一般切割工具均存在机械伤害,尤其对于人体的肢体伤害,在空间受限的情况下,该位置执行切割工作容易造成手指伤害,为此在研发该项工具时应尽可能考虑避免肢体伤害风险。

### 2.2.3 设备损害技术风险点

热电偶柱所处的工作环境狭小,热电偶柱与3边围板的距离仅约120mm;热电偶柱上布置的热电偶导管密集,热

电偶柱直径约为65mm,其上布置了13根导管,导管间距约为3~4mm。热电偶导管外径为8mm,导管内部分4段胀管,导管内径为4.8mm,胀管段内径最大为5.3mm。在实际操作过程中,稍有不慎,将会造成临近导管的伤害,为此在工具研发时需要考虑设备损害的风险。

## 2.3 技术要求

本工具的目的是为了解决在狭小空间内对小直径导管实施切割的技术问题。为满足现场接口安全要求以及工作要求,热电偶导管切割工具需要具备以下的技术要求。

### 2.3.1 适用于狭小空间作业

因本次操作平台上三面被挡板所限制,操作空间受限,且由于本次待切割导管直径小且与相邻管间隙小(约为3mm),为避免在操作过程中对其他导管造成损伤,需要满足狭小空间作业的要求。在满足切割要求的情况下,尽可能地降低切割工具的尺寸。

### 2.3.2 切割精度要求高

因切割的导管外径仅为8mm,导管间距约为3~4mm。为控制设备切割的精度,需要实现多方向移动切割,同时能够精确地控制纵向推进以及横向平移切割的精度。以此在保证切割效果的同时,可有效避免触及相邻的待切割工件,保证设备安全。

### 2.3.3 安装及拆卸简便

因在反应堆压力容器顶盖上开展作业,环境剂量率高,为降低人员受照剂量,减少作业时间,需要确保该工具安装拆卸操作简便。

### 2.3.4 切割操作简单

因在反应堆压力容器本体上进行操作,存在设备检修不可逆情况。操作过于复杂容易导致人因事件发生,从核安全角度出发,需要确保专用工具操作简便高可靠性,一次完成。

## 3 设计方案

根据以上作业风险以及技术要求分析研发出如下的切割工具,如图3所示。该切割工具由如下3部分组成:基座、铣刀组件以及本体。切割装置固定在热电偶柱的指定高度及角度,即可切割热电偶导管中外围指定的一根导管。

### 3.1 基座设计

①用于夹紧热电偶柱,设定及实现切割装置基准。两个半环通过两个紧固螺钉夹紧热电偶柱,并可手动调整基座在热电偶柱的指定高度及角度。

②用于固定本体。连接块通过螺栓固定在基座上,基座通过两处与本体连接与紧固。

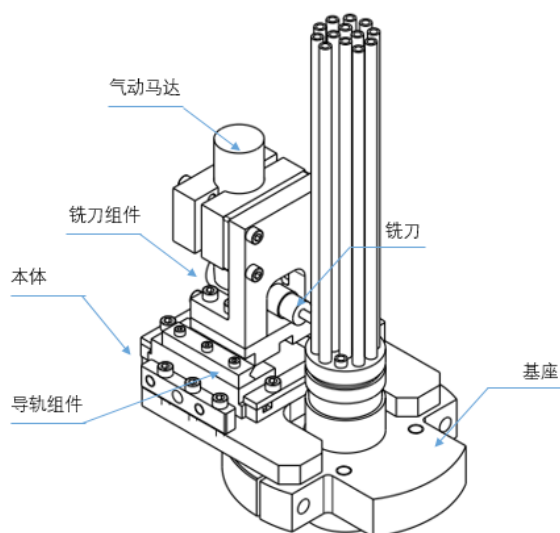


图3 热电偶导管切割装置

### 3.2 铣刀组件设计 ( 铣刀组件包含气动马达及铣刀 )

①气动马达：用于实现铣刀转动切割导管的操作，属于切割导管的执行机构。使用压缩空气（6~8bar）驱动。

②专用铣刀：用于实现铣削导管，在两个进给方向移动铣刀后可最终切断导管，铣刀直径  $\Phi 6\text{mm}$ 。

### 3.3 本体设计

①用于铣刀组件的固定装置，用于与基座的固定。

②用于铣刀组件在两个方向的进给：两个导轨组件、上分别各设置有一个螺杆，手动正反旋螺杆时就会推动导轨滑块的移动，这个装置实现了铣刀两个方向进给功能；通过手动旋转进给控制了进给量，可避免伤及临近部件。

③用于铣刀组件在两个方向的机械限位：两个导轨组件、上分别各设置机械限位装置，用于防止手动误操作，进给过量导致设备损伤。

## 4 操作过程

### 4.1 安装步骤

根据设计方案，研发出的热电偶导管切割工具其安装步骤如下所述：

①确认先前条件：确认热电偶已抽出防异物已封堵，操作平台确保没有杂物不影响切割工具的安装，相邻的导管已做保护，周边环境剂量率满足作业条件，人员已做好辐射防护。

②组装专用铣刀：安装专用铣刀到切割机上，确认专用铣刀已安装到切割机的指定位置，确认刀具行程在切割范围内，并用专用扳手锁紧。

③安装切割机：根据现场的操作位置，将切割机固定在热电偶柱的台阶上，确保安装到位后，使用内六角工具将切割机工具固定，核实切割机已安装到位同时确保不晃动。如图4所示。

### 4.2 切割步骤

①连接气源：关注气源的压力，需要调整到指定压力。

同时在操作的过程中避免气管弯折，导致气源无法连续性输入而造成切割中断。

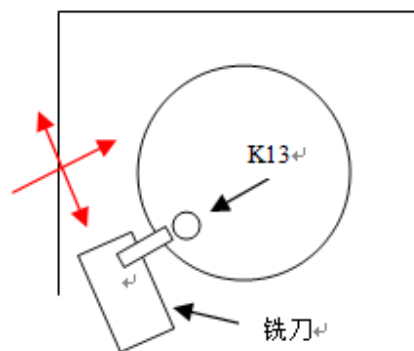


图4 切割工具的现场安装指示图

②进刀切割：启动切割机，调整切割机合适的转速后，操作人员右手控制切割刀的气源，左手控制切割机的进刀量（以切割机为基准，往右方向），缓慢进刀。持续关注切割情况，若晃动太大需及时停止分析原因。尤其在导管快切断时，导管会有较大晃动，配合人员用手抓紧导管端部保持稳定。

③端面修复：取出已经切割的导管，打开气源横向移动道具，将切口端面处理平整，必要时使用锉刀修复端面，并使用吸尘器对切割后的铁屑进行清理。

### 4.3 拆除步骤

拆除操作是安装操作的反向步骤，其拆卸流程如下所述：

①拆除气管：在拆除气管前，需要确保气源已关闭，检查气管是否有残余气体，避免拆除过程中气管要脱造成人员设备损伤。

②拆除设备：拆除切割工具和保护板，注意在拆除的过程中，需要环顾四周，谨慎操作，避免磕伤周边导管。

③整理现场：检查复核热电偶导管防异物工具设置无异常，再次使用吸尘器对铁屑及杂物进行清理。

## 5 结论

热电偶导管切割工具从设计、研发至成功应用，在核电站一回路热电偶导管渗漏处理方面中提供了安全可靠的维修工具。该工具不仅安装拆卸简单，而且操作简便，在狭小空间的导管切割中易于实施，且可重复多次使用。该专用工具已在某核电站大修现场成功使用，经现场检验，可高效完成热电偶导管的切割，同时避免了对其他导管的损伤。目前该工具已成为热电偶导管机械加工工作的关键专用工具。

### 参考文献

- [1] NFM TECHNOLOGIES. Nuclear power reactor vessel operating and maintenance manual: PLX42EOM091FMCF45SS[Z]. 2007.
- [2] AREVA NP. In-core instrumentation-thermocouple columns seal device: SFISM DB 5683[Z]. 2008.
- [3] AREVA NP. In-core instrumentation RIC thermocouple column assembly E13: BLX44270001W04H44DD[Z]. 2013.