

15×15 定位格架栅元夹持力自动测量测头研究与设计

范元 李俊杰

(中核建中核燃料元件有限公司 四川 宜宾 644000)

摘要: 文章分析定位格架栅元结构特性与夹持测量特性,结合测头实现栅元夹持力自动测量的必要条件,开展了传感测头支撑块定位钟摆膨胀、平行四边形平动机构膨胀和铰链机构膨胀等研究,设计了一款收缩有效、膨胀稳定和传感器贴片可靠的铰链机构传感测头。通过试验验证,该铰链机构力学传感测头可实现传感测头工作面尺寸可膨胀收缩,且对所有栅元夹持测量特性精准模拟,确保其自动升降与测量过程对栅元结构无摩擦损伤。

关键词: 定位格架;等效膨胀收缩设计;栅元结构特性;夹持测量特性;铰链机构

0 引言

某核反应堆组件中使用一种15×15定位格架,在高温高压环境中承载较大交变载荷情况下有效地定位、夹持燃料棒,直接关系着反应堆运行安全。为确保核反应堆运行过程中定位格架工作长久有效,需要在格架加工完成后,以力学传感测头模拟燃料棒直径对定位格架栅元中刚凸(刚性结构)与弹簧(弹性结构)进行夹持性能测量。由于原插拔式测头以工作面断面尺寸模拟燃料棒直径,且该尺寸远大于栅元中刚凸与弹簧间距,测头插拔与刚凸、弹簧发生“硬”接触,测量过程手动插拔完成。因此,研究在插拔过程中工作面断面尺寸小于刚凸弹簧最小自由间距,在力学传感测量时工作面断面尺寸精准模拟燃料棒直径的力学传感测头是实现定位格架栅元夹持力自动测量的先决条件。本文对比分析支撑块定位钟摆膨胀、平行四边形平动机构膨胀、铰链机构膨胀等结构,研究满足15×15定位格架栅元夹持力自动测量需求的测头设计。

1 定位格架栅元结构

15×15定位格架栅元有2种上下刚凸结构,分别为第一类(外侧)刚凸结构和第二类(内侧)刚凸结构(仅7#条带有),每个常规栅元有2组上下刚凸与弹簧的相对结构。如实现夹持力自动测量,则测头模拟燃料棒直径要求不超过±0.01mm。

定位格架栅元结构示意图见图1。

2 传感测头等效膨胀收缩实现

以气动或机械的方式,实现传感器测头工作面尺寸可膨胀收缩,确保其升降过程对栅元结构无摩擦损伤。

结合栅元特性与夹持测量特性,比较支撑块定位钟

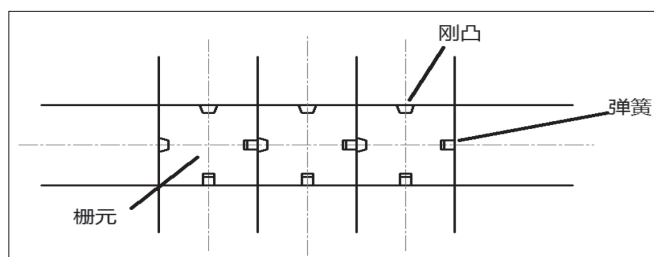


图1 栅元中刚凸与弹簧结构参考图

摆机构、平行四边形平动机构、铰链机构3种测头等效膨胀收缩设计结构方案,确定最佳等效膨胀收缩设计结构方案。

方案一:支撑块定位钟摆机构

支撑块定位钟摆机构如图2所示,该测头在收缩状态断面尺寸为9mm×9mm,当微型气缸上移时,滑板带动上下支撑块在弹簧片作用下收回,测头收缩。当微型气缸下移时,滑板上的斜面将上下支撑块推出,测头膨胀;同时贴紧钢凸,使得测头另一面的应变梁压紧弹簧,完成夹持力的测量。

测头张开后工作面尺寸通过测头内滑板的厚度保证。滑板通过滚珠轴承推动上下支撑块伸出,避免了滑板磨损导致尺寸变动。测头上下位置靠测量机器人上测头升降机构保证,测量机器人升降机构上设置有光栅尺,可以精确控制测头插入深度(精度±5μm)。

实践表明,该方案满足测头设计需求,但存在不足:①测头尺寸与刚凸弹簧间间距尺寸余量偏小,测头收缩状态下断面尺寸仅有9mm×9mm;②支撑块在弹簧片作用下收回,其稳定性可能随着形变次数发生改变;③不能满足15×15定位格架第二类(内侧)刚凸结构栅元的夹持力测量需要。

方案二:平行四边形平动机构

该测头收缩、膨胀采用平行四边形平动机构,其示

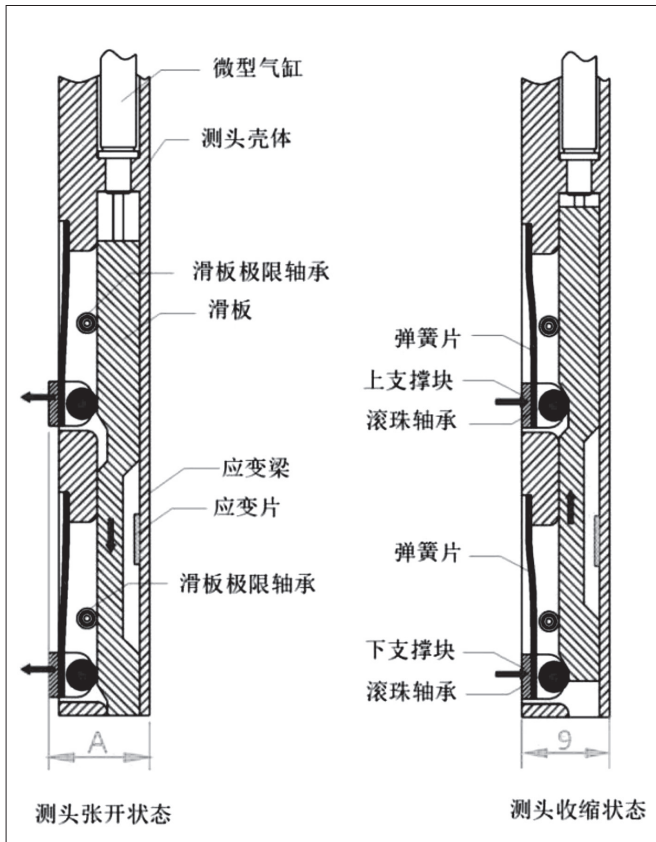


图2 支撑块定位钟摆膨胀设计

意图如图3所示。

由图3可见: U形支撑梁位于平行四边形机构长边上, 微型气缸输出通过连杆连接到U形支撑梁, 在气缸上下作用力下, U形支撑梁受平行四边形机构约束, 在上下移动同时向外和向内移动, 移动过程中始终保持平动。同时, 测头壳体受导轨约束始终保持垂直状态, 保证夹持力测量不受刚凸刚性差异影响。

实践表明: 平行四边形平动机构满足测头的设计要求, 采用U形支撑梁设计, 可适用于(内外侧)两种刚凸结构的栅元夹持力测量; 平行四边形平动膨胀时在Z轴方向亦存在微小移动, 将对刚凸结构产生磨损。

方案三: 铰链机构

该测头收缩、膨胀采用铰链机构驱动、旋转方式。其示意图如图4所示。

由图4可见: U形支撑梁

上端由转轴固定, 下端通过连杆铰链机构驱动U形梁绕上端转轴转动。连杆与气缸连接, 由气缸控制测头的张开与收缩。当测头张开到极限位置时, U形梁处于铅垂位置。同时, 测头壳体受导轨约束始终保持垂直状态, 保证夹持力测量不受刚凸刚性差异影响。

实践表明: ① U形支撑梁膨胀能同时满足内外刚凸两种栅元结构夹持力测量; ② 近似平行膨胀, 避免了方案二中Z轴方向移动磨损刚凸的问题; ③ 铰链机构上端U形支撑梁使用频繁, 对该U形支撑梁转轴耐磨损要求高; ④ 采用U型支撑梁转轴及下限位, 可稳定确保 $\pm 0.01\text{mm}$ 膨胀精度。

3 传感测头设计分析与实现

经对上述3种方案适用性、稳定性和高质量等方面进行分析, 结果如下。

3.1 适用性

3种设计机构均能满足传感测头等效膨胀收缩的设计要求。其中, 铰链机构设计、平行四边形平动机构均满足了对第二类(内侧)刚凸结构的栅元实现夹持力自动测量; 同时, 铰链机构设计非工作面端面尺寸及收缩尺寸为8.5mm, 测头升降及测量过程适用性更优。

3.2 稳定性

3种设计机构分别采用了滑板基体、测头壳体、U型支撑梁转轴+下限位确保测头膨胀尺寸满足 $\pm 0.01\text{mm}$ 精度要求。其中, 支撑块定位钟摆机构收缩动作由弹簧片控制非能动完成, 稳定性受形变尺寸次数

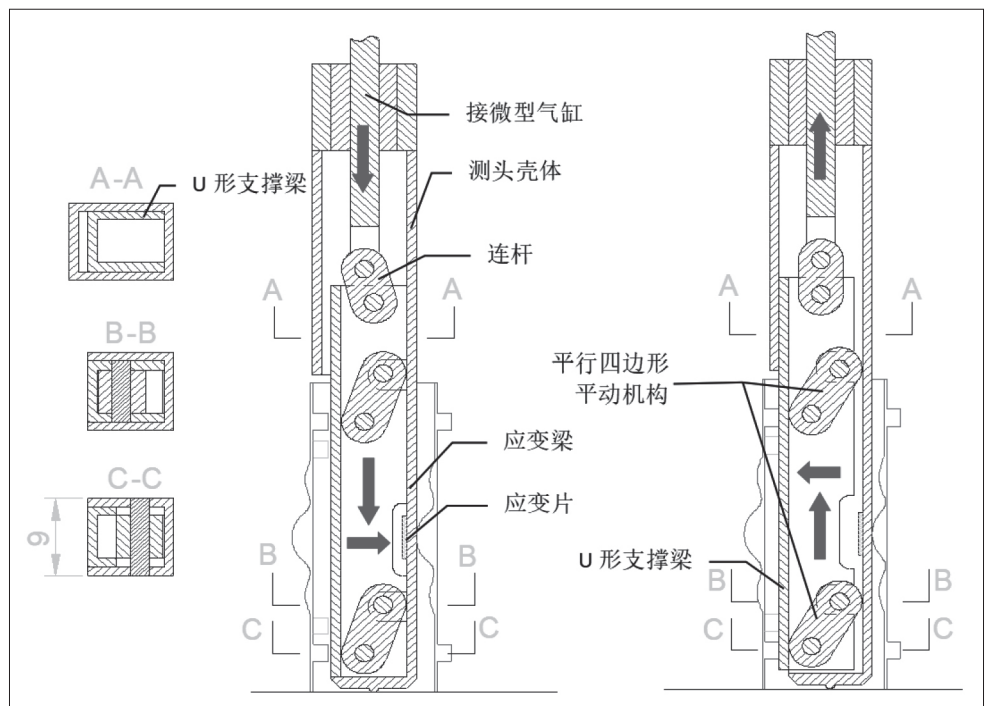


图3 平行四边形平动机构测头设计

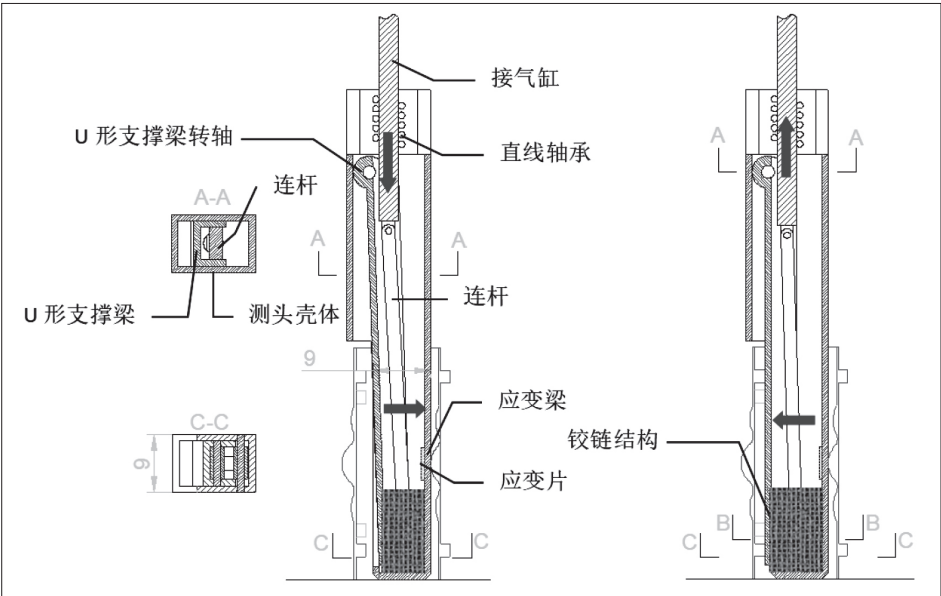


图 4 铰链机构测头设计

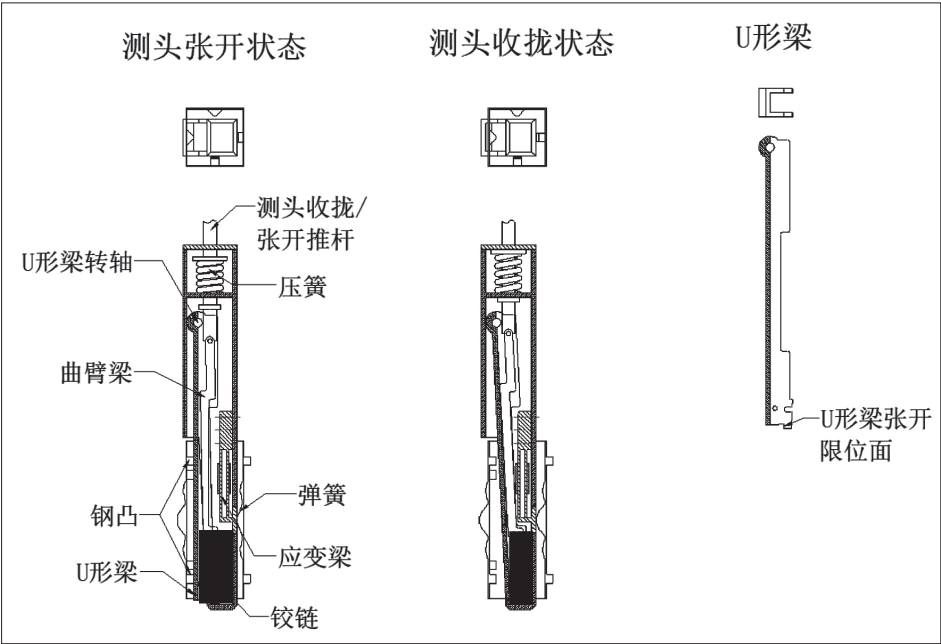


图 5 铰链机构测头

影响。而铰链机构仅采用一组轴承实现等效膨胀，设计结构更简化，运行过程稳定性控制更简单。

3.3 高质量

在 3 种设计机构中，平行四边形平动机构膨胀时同步发生 Z 轴方向运动，这一过程将对栅元刚凸产生磨损。而采用铰链机构实现的测头膨胀近似为平行膨胀，确保测头测量过程不对栅元结构产生摩擦损伤。

综上所述，最终采用铰链机构实现栅元夹持力自动测量测头设计，如图 5 所示。

当测头采用铰链机构设计时，U 形支撑梁转轴采用国外高刚性转珠轴承，确保其耐磨损性；主体材质采用

不锈钢 304，应变体、端头和伸缩头材质采用 GCr15，确保其高硬度、耐摩擦和抗点压力强等特性；对 GCr15 进行氧化处理，确保其耐腐蚀性；力学传感部分敏感元件采用薄膜式高精度金属应变片，连接形式为半差动。

4 结果分析

根据图 4、图 5 设计了定位格架栅元夹持力自动测量专用传感测头，完成 5 件（H1~H5）传感测头的制备，并对制备的传感测头进行断面尺寸及传感器精度测量。

4.1 断面尺寸测量

测量的断面尺寸包括测头膨胀时工作面的断面尺寸以及收缩时的断面尺寸，在专用工装上采用数显千分尺（精度为 0.001mm）完成测头断面尺寸测量，测量结果见表 1。

结果表明：制备的传感测头膨胀稳定、收缩可靠，均符合设计技术要求。

4.2 传感器精度测量

传感测头精度测量主要针对线性度、迟滞性以及重复性等静态误差。测量过程在专用计量校准工装上采用标准砝码逐级叠加完成“进程-回程”3 个循环，测量结果见表 2。

结果表明：制备的传感测头线性度、迟滞性、重复性良好，均优于 ±0.5%FS 的设计技术要求。

表 1 传感测头实体断面尺寸测量

编号	膨胀尺寸 /mm		收缩尺寸 /mm	
	技术要求	测试结果	技术要求	测试结果
H1	$A \pm 0.010$	$A(-0.004, 0.005)$	8.5	8.49
H2	$A \pm 0.010$	$A(-0.002, 0.002)$	8.5	8.49
H3	$A \pm 0.010$	$A(-0.004, 0.008)$	8.5	8.50
H4	$A \pm 0.010$	$A(0.002, 0.010)$	8.5	8.49
H5	$A \pm 0.010$	$A(-0.004, 0.006)$	8.5	8.50

（下转第 19 页）

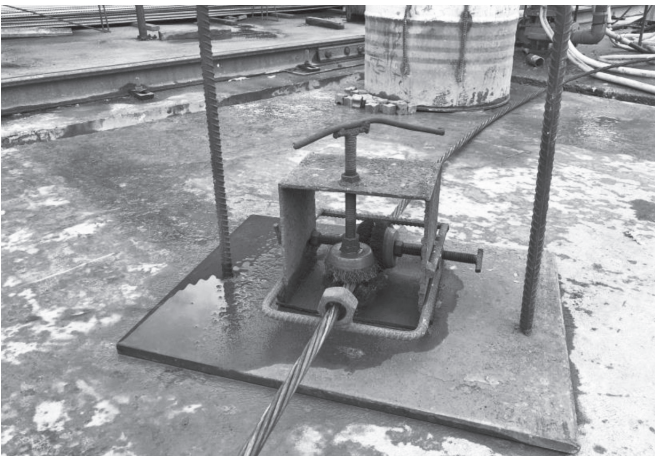


图 5 工作状态图一

底，应适当调整钢丝碗间的合拢空隙，经多次试验达到除锈的效果。最终在得到驻场监理认可的前提下，再进行批量除锈作业。

3 结语

在项目施工过程中，原材料的储存与保护是一项非常重要的工作。特别是在境外工程项目上，大量的原材料物资需从国内海运到境外施工地点，且在使用的过程中储存周期都比较长。因此，无论在海运途中，还是工



图 6 工作状态图二

程地点存放材料的仓库，都需要做好原材料的存放与保管，避免材料出现锈蚀、腐烂、老化等现象，这是保障工程质量的第一道关卡，也是从事工程建设的人员必须重视的一项工作。

参考文献：

[1] 喻宣瑞，姚国文，范伟庆. 交变荷载和氯盐环境作用下钢绞线的腐蚀疲劳性能研究 [J]. 材料导报, 2021, 35 (20): 20087-20091.

(上接第 16 页)

表 2 传感测头传感器精度测量

级数	标准	进程测值			回程测值		
1	4479.6	4450	4457	4449	4410	4420	4410
2	9380.5	9341	9344	9335	9289	9298	9287
3	14276.0	14244	14250	14229	14193	14190	14193
4	19175.1	19165	19142	19148	19133	19105	19106
5	24074.7	24071	24026	24015	24086	24030	24050
6	28966.5	28933	28940	28970	28980	29005	28968
7	33856.9	33830	33850	33865	33828	33910	33870
8	38760.5	38800	38726	38725	38800	38726	38725
线性度	±0.5%FS	0.101%					
迟滞性	±0.5%FS	0.123%					
重复性	±0.5%FS	0.188%					

5 结语

采用铰链设计的传感测头具有适用性强、收缩有效、膨胀稳定等特点，其线性度、迟滞性和重复性满足设计技术要求。

参考文献：

[1] 杨桢. 机械设计应用基础 [M]. 上海：上海交通大学出版社，2007.
[2] 刘爱华，满宝元. 传感器原理及应用 [M]. 北京：人民邮电出版社，2006.