

文章编号：0258-0926(2018)03-0147-04; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0147

# 核电站辐照样品抓具抓手部件承载力研究

刘慧芳, 袁占航

中国核电工程有限公司, 北京, 100840

**摘要:** 受辐照监督管在下部堆内构件上固定方式的影响, 辐照监督管在取出时, 其抽取力数值变化较大。抓具关键承载路径末端上的抓手部件因辐照监督管顶塞尺寸限制, 而成为抓具上承载能力最薄弱的部件。为保证安全操作, 本文结合设备结构特征, 对抓手部件进行了承载分析, 获得了抓手部件的极限承载力。根据计算结果和实验验证结果, 提出了提高抓爪承载力的优化措施, 为同类设备的设计和改进行提供经验参考。

**关键词:** 辐照样品抓具; 抓手部件; 承载力

中图分类号: TL353<sup>+</sup>.9 文献标志码: A

## Study on Load Limit of Gripping Components in Irradiation Specimen Handling Tool for Nuclear Power Plants

Liu Huifang, Yuan Zhanhang

China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Beijing, 100840, China

**Abstract:** The extraction force of irradiation supervision capsules is changed greatly due to the mounting pattern on the lower reactor internals. The gripping components at the end of the critical load path are limited by the size of the top plug of irradiation supervision capsules and become the weakest part of the tool. In order to ensure the safe operation, this paper analyzed the load limit of the gripping components, and obtains its maximum load limit. Based on the calculation result and load test, optimization measures to improve load limit of gripper are analyzed, which provides a reference for the design and improvement of similar equipment.

**Key words:** Irradiation specimen gripper, Gripping component, Load limit

### 0 引言

辐照样品抓具是用于水下定期将监督反应堆压力容器老化情况的辐照监督管从辐照样品架上拆出的专用抓具。辐照监督管本身重量很轻(约 10 kg), 安装时采用液压专用工具使监督管顶塞花瓣发生挤压变形插入辐照样品架中, 拆卸时也需要顶塞花瓣发生挤压变形才能卸出。这种拆卸方式导致抓具要承受较大抽拔力, 且受顶塞花瓣结构尺寸及偏差、样品架管口尺寸及偏差以及抽拔过程中的摩擦等因素影响而使得所需抽拔力有

较大差异。在单敏感因素“尺寸最大偏差”下, 所需的最大抽拔力已经达到约 17000 N<sup>[1]</sup>。

为保证水下安全操作, 防止在操作过程中出现过大的抽拔力导致抓具抓手断裂而使得后续的处理操作对工作人员造成过量的放射性照射剂量, 本文对抓具抓手的极限承载力进行了研究, 并对计算结果进行了详细分析, 所得到的承载力可为辐照监督管设计、制造及现场实际操作提供参考。同时, 根据计算结果和抓具部件结构分析, 讨论了提高抓爪承载力的可行措施, 可为同类设备的

收稿日期: 2018-01-10; 修回日期: 2018-06-20

作者简介: 刘慧芳(1981—), 女, 高级工程师, 现主要从事核工程工艺及设备设计、研究工作

设计和改进提供经验参考。

## 1 抓头部件结构及工作原理

辐照样品抓具抽拔操作由装卸料机辅助吊(2 t)或环吊(5 t 电动葫芦)操作,操作标高较高。抓具外壳体周向尺寸受限于堆内构件下法兰上插入孔尺寸,抓具长度由辐照样品架的纵向布置位置确定,抓具整体呈周向直径 0.05 m,长约 15 m 的细长结构。抓具抓头部分沿周向均匀设有 3 个抓爪,由销轴固定在抓爪托持架上,结构简图见图 1。操作时,将抓具内部芯轴抽回,使 3 个抓爪同时合拢,保证抓头顺利进入顶塞内腔,然后将 3 个抓爪同时打开,与监督管顶塞内腔相互啮合,承受拔出载荷。受限于辐照监督管顶塞内径尺寸(26.7 mm)的制约,抓头部件尺寸较小,限制了其极限承载力。

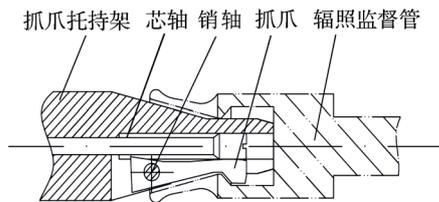


图 1 抓头部件结构简图

Fig. 1 Structure of Gripping Components

## 2 抓头部件承载力分析计算

考虑设备不属于安全级设备,按照单堆所设置的辐照监督管的数量<sup>[1-3]</sup>,在核电厂调试和运行阶段抓具共使用约 10 次左右,使用频次很低。在分析时抓爪和抓爪托持架以材料屈服极限作为许用应力限值,销轴以材料抗拉强度作为许用弯曲应力限值,以 0.5 倍材料抗拉强度作为许用剪切应力限值。抓头部件主要材料及力学性能见表 1。

表 1 抓头部件主要材料力学性能

Table 1 Mechanical Property of Materials Used in Gripping Components

部件名称	材料牌号	力学性能/MPa
抓爪	05Cr17Ni4Cu4Nb	1000(580 时效,屈服强度)
抓爪托持架	05Cr17Ni4Cu4Nb	1000(580 时效,屈服强度)
销轴	14Cr17Ni2	1080(抗拉强度)

### 2.1 抽取辐照监督管所需抽拔力

经对国内部分电厂在运行阶段或调试阶段辐照监督管抽拔力进行调研,发现其抽拔力差别较大,抽拔力范围约 2000~19000 N。按照参考电厂设计输入要求,辐照监督管在寿期内可能出现的

最大抽拔力约为 14700 N。从文献[4]的分析可以看出,不计其他敏感性因素,当监督管和样品架之间的过盈尺寸达到 1.455 mm 时,抽拔力即达到约 17000 N。而目前二者之间设计的最大极限过盈尺寸为 1.84 mm,因此受各种不利因素影响,辐照监督管抽拔力可能会超过测力计的测量上限 20000 N。

另外,根据文献[5],辐照监督管安装后,由于顶塞结构强度问题,也可能出现顶塞花瓣变形而导致实际抽拔力变化的情况。

### 2.2 分析计算

对抓头部件按输入载荷 14700 N 进行计算,暂不考虑安全系数。抓爪和抓爪托持架应力云图见图 2、图 3,销轴受力情况如图 4 所示。

图 2 中,抓爪头部与芯轴接触的下部由于相互挤压,有应力集中,最大值为 614 MPa。此挤压应力不会造成抓爪断裂失效,因此其应力最大的危险部位是抓头根部,其等效应力值为 597 MPa。抓爪托持架的应力最大部位在销轴孔周围,最大等效应力为 213 MPa,见图 3。销轴最大剪应力为 65 MPa,最大弯曲应力为 329 MPa。抓头部件极限承载力分析结果见表 2。

### 2.3 计算结果分析

从表 2 可知,抓爪极限承载力最低,约为

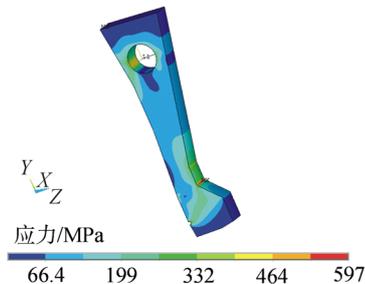


图 2 抓爪应力云图

Fig. 2 Stress Nephogram of Gripper

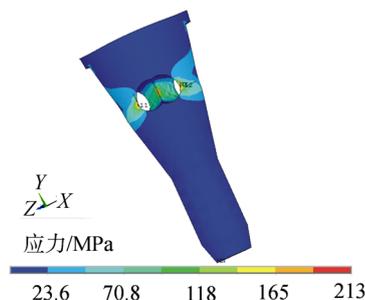


图 3 抓爪托持架应力云图

Fig. 3 Stress Nephogram of Gripper Support

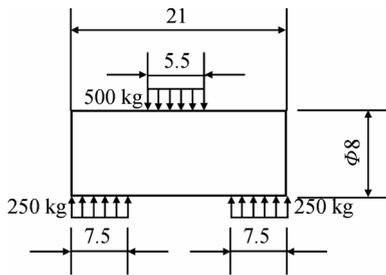


图4 销轴受力图(单位: mm)

Fig. 4 Force Condition of Axis Pin

表2 抓头部件极限承载力分析结果  
Table 2 Load Limit Analysis Result of Gripper Components

部件	许用应力限值 /MPa	最大等效应力 /MPa	承载力 /N
抓爪	1000	597	~24600
抓爪托持架	1000	213	~69000
销轴	弯曲应力 1080	329	~48200
	剪切应力 540	65	

24600 N, 但应注意:

(1) 表2所示结果是3个抓爪共同分担总载荷时的承载力计算结果。为保证3个抓爪同时与顶塞内部结构完全接触,在制造时需通过对多节组装结构的直线度的控制、抓爪尺寸公差的控制以及装配后的尺寸检查来保证3个抓爪的打开角度及支撑平面的一致性。此方法提高了加工装配精度和检验要求。

(2) 吊车操作时,受惯性载荷影响会出现载荷增大作用,可用文献[6]计算的动载系数来表征。根据操作吊车的特征,采用辅助吊操作时,动载系数 $\phi=1.1$ ,采用环吊葫芦操作时, $\phi=1.26$ 。考虑动载影响后,承载力最小的抓爪承载力分别降至 $24600/1.1=22364$  N和 $24600/1.26=19524$  N。

(3) 若不能保证3个抓爪受力均匀,可按文献[7]考虑不均匀和动载的综合影响系数 $K=1.65$ ,此时抓爪承载力降至 $24600/1.65=14909$  N,但仍能够保证满足设计输入14700 N。

(4) 抓爪极限承载力的计算结果依赖材料本身的强度,在制造时应对材料强度进行复验以达到必要承载力。

### 3 提高抓爪极限承载能力的可行性分析

抓爪承载力提高的可行性措施如下:

(1) 提高材料力学性能或改变材料  
采用 480 时效处理的材料

05Cr17Ni4Cu4Nb(屈服强度 1180 MPa),3个抓爪承载力可提高 1.18 倍,即至 29028 N 或 17593 N(考虑  $K$ )。

对于变更材料方面,经调研,国内可供货的最高屈服强度的不锈钢材料为 0Cr15Ni7Mo2Al,其屈服强度达 1210 MPa。该材料也可作为水下环境使用的抓爪材料。采用该材料 3 个抓爪承载力可提高 1.21 倍,即至 29766 N 或 18040 N(考虑  $K$ )。

因此,提高材料力学性能或改变材料可使抓爪承载力提高约 2684~3131 N,增量不大。

#### (2) 增加抓爪数量

监督管顶塞操作处为圆形空腔结构,在保证抓爪尺寸不变的情况下将抓爪数量由 3 个调整为 4 个。4 个抓爪承载力可提高至  $24600 \times 4/3=32800$  N 或  $32800/1.65=19879$  N(考虑  $K$ )。但增加抓爪后抓爪托持架轴孔处危险截面有效面积减少,导致其承载力降低,经初步分析,承载力由 69000 N 降为 49989 N。销轴与抓爪托持架的受力接触长度有所减小,但由于销轴数量增加,因此销轴承载力经初步分析可增至 86655 N。

增加抓爪数量理论上可使承载力按比例提高,但抓爪数量增加更易出现受力不均匀的状况,在实际操作中易导致不能达到与理论分析相一致的结果。

#### (3) 改变危险承载截面的尺寸

根据抓具抓取功能,抓爪的打开和合拢操作依赖于控制抓爪动作的芯轴尺寸与抓爪形状。抓爪的形状控制着抓爪完全合拢和打开,因此抓具结构和抓爪承载力存在相互制约的关系。通过对抓具结构与极限尺寸分析,得到结果:不改变抓爪形状,抓爪厚度由 5.5 mm 增至 6.5 mm,3 个抓爪承载力可提高至 29073 N 或 17620 N(考虑  $K$ ),抓爪托持架和销轴承载力略有降低;减小芯轴头直径,改变抓爪外形,并改变局部形状去除操作路径上的干涉因素,且满足抓爪打开和合拢操作,危险截面宽度由 6 mm 增至 6.93 mm,抓爪承载力提高至 28413 N 或 17220 N(考虑  $K$ )。该方案不会对销轴和抓爪托持架的承载力造成影响。

从以上改进措施分析可看出,由于辐照监督

管本身的尺寸限制,抓爪承载力的提高量不大。单一措施可使抓爪承载力最低提高 2311 N,同时采用所有措施,可使抓爪承载力最高提高 13123 N。

#### 4 结 论

通过对抓具抓头部件的分析,获得了抓头部件的极限承载力,并对结果的适用性进行了分析。另外,分析了提高抓爪承载力的若干措施,可为辐照监督管顶塞设计、类似抓具的设计以及电厂操作提供参考:

(1) 抓爪是抓头部件中极限承载力最低的零件,以 580 时效处理的 05Cr17Ni4Cu4Nb 的屈服强度为许用准则,考虑综合影响系数后,抓爪极限承载力约为 14909 N。

(2) 分析了提高抓爪承载力的可行措施,理论分析结果显示,可提高范围约 2311N~13123 N。

(3) 建议辐照样品管和辐照样品架在设计或制造时,合理减小二者之间的摩擦并将过盈尺寸

控制 1.35 mm 以下,防止抽拔力达到极值。

#### 参考文献:

- [1] 陈振伟,吴超荣,关建维,等. 岭澳核电站二期反应堆压力容器技术改进[J]. 核动力工程, 2015, 36(1): 68-71.
- [2] 周围,秦晓光,刘朋奇,等. 辐照样品孔塞短杆抓取工具的研制[J]. 核动力工程, 2014, 35(S1): 97-99.
- [3] 林金平,刘斌,范海平. 核电站辐照监督管焊接技术及焊接质量控制[J]. 电焊机, 2017, 47: 106-108.
- [4] 徐晓,金挺,杨景超. 辐照监督管拔插力计算的解析解[J]. 核动力工程, 2014, 35(2): 146-149.
- [5] 陈飞,蒙堆强,叶清. 核电厂辐照监督管顶塞尺寸缺陷修复[J]. 设备管理与维修, 2017(4): 49-50.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3811 起重机设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. HG/T 21574 化工设备吊耳及工程技术要求[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.

(责任编辑: 张祚豪)