

基于“雨流法”的控制棒驱动机构钩爪疲劳分析

许鹏先

东方电气核设备设计所, 成都 610036

摘要: 应用 ANSYS 软件采用“雨流法”对控制棒驱动机构单齿钩爪进行疲劳分析。通过静态分析确定危险部位在钩爪齿根部, 以加载和空载状态下的齿根部位的应力作为疲劳循环的应力对, 运用雨流法, 结合主流机型钩爪的试验次数进行疲劳分析, 得出安全系数, 确定钩爪设计的寿期步数满足疲劳要求。

关键词: 钩爪; 雨流法; 疲劳; 应力

中图分类号: TL351+.5; TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2016)03-0069-03

Fatigue Analysis of Control Rod Drive Mechanism Latch with Rainflow Method

XU Pengxian

(Nuclear Equipment Design Institute of Dongfang Electric Corporation, 610036, Chengdu, China)

Abstract: Fatigue analysis of control rod drive mechanism latch is done with rainflow method by ANSYS series. Latch root is the dangerous position through static analysis, stress pair is made of load and no load condition, fatigue is done with rainflow method considering main current types. Safety factor is got and the latch design life meets the fatigue requirement.

Key words: latch; rainflow method; fatigue; stress

在核电厂中, 控制棒驱动机构是核岛反应堆的重要动作部件, 主要用来调节反应性和紧急停堆。常用的控制棒驱动机构有磁力提升型、电磁马达型、液压驱动型和齿轮齿条等形式。其中磁力提升式在压水堆中应用最广。

钩爪是磁力提升式控制棒驱动机构中的抓持部件, 一般分移动钩爪和固定钩爪。钩爪抓住驱动杆, 通过磁力装置控制驱动杆上下移动, 进一步带动控制棒上下移动, 以达到调节反应堆反应性的目的。

1 物理模型

钩爪是控制棒驱动机构的重要零件, 按照设定的步进程序运行, 进行抓住和松开驱动杆的动作, 并循环多次。一般控制棒驱动机构寿期试验

的步进要做到 10^6 步以上, 钩爪承受重复性载荷, 其疲劳状态必须予以考虑。

在磁力提升式控制棒驱动机构中, 有双齿钩爪和单齿钩爪 2 种。它们分别应用在不同堆型的核电站控制棒驱动机构上。双齿钩爪是整体成型, 单齿钩爪齿面要进行堆焊, 以增强其耐磨性。双齿钩爪和单齿钩爪结构如图 1 所示^[1]。选择单齿钩爪进行疲劳分析。单齿钩爪主体材料是奥氏体不锈钢, 钩齿表面堆焊 stellite 合金。

2 模型简化及边界条件

2.1 模型简化

钩爪受步进序列控制, 周期性的抓放驱动杆。驱动杆及与之相连的控制棒组件简化为负载, 用 G 表示, 沿竖直方向施加在钩爪的钩齿上。钩爪放

收稿日期: 2016-05-16

作者简介: 许鹏先(1979-), 男, 2007年毕业于西安交通大学动力工程与工程热物理专业, 工学硕士, 工程师。现在东方电气股份有限公司从事核电设备设计工作。



图1 单齿钩爪



图2 双齿钩爪

开驱动杆时其负载为零。控制棒驱动机构运行时，载荷从零到 G 周期性的作用在钩齿上。通过有限元分析先确定在载荷 G 作用下的钩爪应力集中的位置，选取应力峰值，并储存该峰值应力作为周期应力，为后续疲劳分析做准备。为了更便利的模拟，将模型简化为二维。钩爪主体和堆焊层通过公用节点传递数据。为了分析堆焊层对应力集中的影响，还特别分析了非堆焊结构的钩爪。在进行分析时，忽略钩爪残余应力和辐照老化的影响。残余应力指材料在成型和加工制造过程中会有残余应力的存在，这种残余应力很难避免。残余应力会提高钩爪的应力峰值，对钩爪的寿命不利。辐照老化指材料在 40 年寿期内受到辐照影响会老化，材料内部结构也会出现变化，对钩爪的寿命也不利。

2.2 计算方法

1847 年，沃勒提出了 S-N 疲劳寿命曲线及疲劳极限概念，奠定了疲劳破坏的经典强度理论。

常规的经典疲劳强度理论-名义应力法及局部应力应变分析法在工程上有广泛的应用^[2]。在名义应力法的基础上，随着近年来的研究表明，机械零部件的疲劳主要由于其内部局部应力集中区域内产生的循环塑性应变造成，而载荷时间历程比较复杂，并随机变化，因此要合理地预测零部件的疲劳寿命，必须对载荷时间历程或局部应力、应变历程进行统计处理，也就是循环计数，从而进行损伤计算，完成寿命评估，雨流法就是这些计数方法之一^[3]。该方法由英国 Matsuiski 和 Endo 2 位工程师提出，在疲劳寿命计算中运用非常广泛。

ANSYS 程序采用雨流法自动计算所有可能的应力范围，并跟踪这些应力发生的次数。在选定的节点位置对产生最重要的应力强度范围的所有事件进行搜索，并记录在这些应力范围内产生的循环次数，包含这些载荷事件的循环次数因此不断减少。这一过程一直进行到所有的应力范围及循环次数都被计及后结束。直到算出允许的疲劳循环次数和疲劳使用系数。

3 模拟及结果分析

3.1 网格划分

根据工程经验，应力集中发生在钩齿根部，所以该部位网格相对较密。通过在各边分配节点个数来确定网格疏密，并以四边形网格为主来完成网格划分，无堆焊层钩爪材料是单纯的奥氏体不锈钢，有堆焊层的钩爪材料为奥氏体不锈钢和 stellite 堆焊，材料属性分别设定，并在材料交界面设公共节点传递数据，具体如图 3 所示。

3.2 负载应力

在受到驱动杆和控制棒组件的重量 G 作用时，其应力如图 4 所示。不管是堆焊层存在与否，钩爪的应力分布带变化不大，都是分布在齿根到下部连杆孔的位置。但由于堆焊层的存在，2 种材料的应力应变特性不一致，由图可见，有堆焊层的钩爪最大应力要比无堆焊层的最大应力稍大，为 3% 左右。从下图可知，齿根和下部连杆孔之间是一条应力集中带。这个区域最容易发生疲劳断裂。在进行疲劳分析时，选择该应力集中带上齿根部位应力最大的节点作为研究对象，对该部位进行分析。并将加载

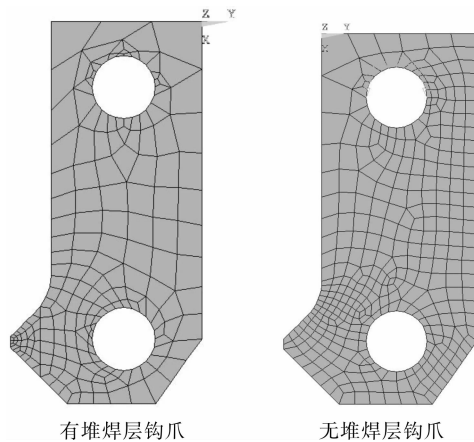
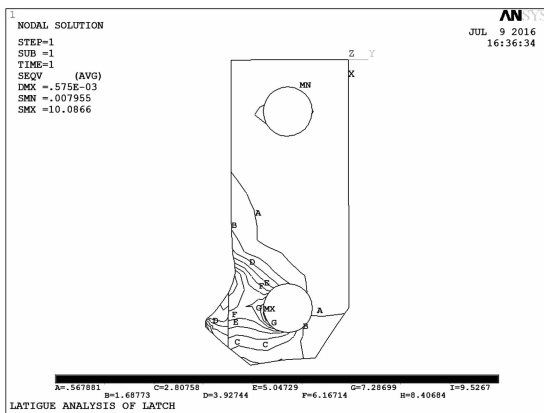
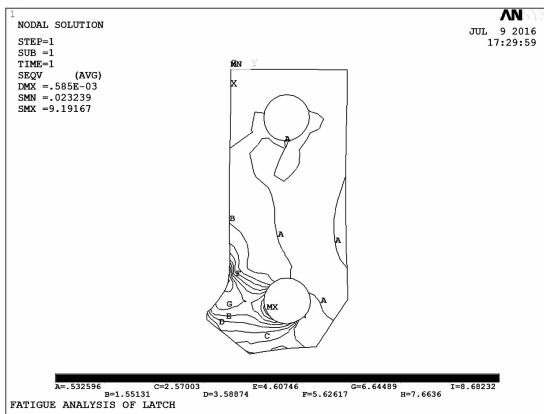


图3 网格划分

和空载时齿根部位的最大应力作为应力对储存起来，作为交变应力为后续的计算做准备。



有堆焊层钩爪



无堆焊层钩爪

图4 静态应力分析

3.3 材料特性曲线

因钩爪部件所处的恶劣工况和其本身的重要性，对其材料有特殊的要求。钩爪材料主要是经过特殊处理的奥氏体钢等耐磨、抗疲劳的金属材。所用的奥氏体钢的 S-N 数据如下表所列。

表1 奥氏体钢 S-N 曲线

循环次数 N/次	应力 S/MPa
1E6	194
2E6	185
5E6	177
1E7	173
2E7	170
5E7	168
1E8	166
1E9	165
1E10	164
1E11	163

注：1E6 = 1 × 10⁶

3.4 结果及分析

运用有限元软件先通过载荷分析算出钩爪在夹持和放开 2 种工作状态下的应力状态。判断出应力集中部位是钩齿根部到下连杆孔之间的带状区域。选取齿根位置应力最大节点为研究对象，以夹持和放开状态下的最大应力作为疲劳循环的应力对，每一次夹持和放开作为一次循环载荷，展开分析。得出其疲劳位置的疲劳应力曲线，如下图所示。

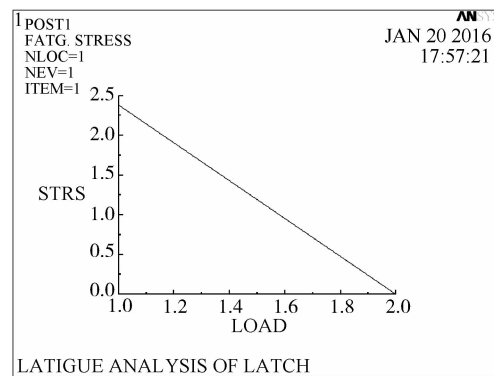


图5 疲劳应力曲线

三代压水堆的控制棒驱动机构钩爪的寿期试验必须达到 6×10^6 步，在完成目标后可以继续试验达到 9×10^6 步为止。在此设定循环次数为 10^7 次，经过计算，允许的疲劳循环次数为 10^{11} 次，疲劳使用系数为 0.000 1。因此钩爪在寿期内，完成 10^7 步的步数是可靠的，要求 10^7 步的钩爪寿命是满足疲劳损伤要求的，并且安全系数是比较高的。

(下转第 76 页)