

ICS

点击此处添加中国标准文献分类号

团 体 标 准

T/CNEA XXX. 4—20XX

压水堆承压部件 设备设计制造 第 4 部分： 控制棒驱动机构

Code for PWR pressure boundary components Equipments design and fabrication
Part 4: Control rod drive mechanism

（征求意见稿）

（本稿完成日期：2020. 2. 28）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国核能行业协会 发布

目 次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 通用要求 2

5 材料 3

6 设计 5

7 制造 13

附 录 A （资料性附录） 压水堆核电厂典型 CRDM 边界与接口..... 24

附 录 B （资料性附录） 控制棒驱动机构载荷组合 25

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020 的规定起草。

T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设计与制造》与 T/CNEA ××××《压水堆承压部件 材料》、T/CNEA ××××《压水堆承压部件 焊接》、T/CNEA ××××《压水堆承压部件 无损检测》和 T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设备设计制造》共同构成支撑《压水堆承压部件》。本文件是 T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设计与制造》的第 4 部分。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核能行业协会提出并归口，技术支持单位为上海核工程研究设计院有限公司、核工业标准化研究所、苏州热工研究院有限公司。

本文件起草单位：上海核工程研究设计院有限公司、上海第一机床厂有限公司、四川华都核设备制造有限公司。

本标准主要起草人：白勇军，李玲，姚俊俊，马渊睿，陈宇清，王弘昶，左波，朱翊洲，刘刚，宁冬，张俊宝，谢永诚，王肃鹏，周瑜。

本标准首次发布。

引 言

T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设备设计与制造》旨在规范我国压水堆核电厂主要设备的设计与制造，拟由五个部分构成。

- 第 1 部分：反应堆压力容器。目的在于规定压水堆核电厂反应堆压力容器材料、设计、制造、检验和试验等方面的基本要求。
- 第 2 部分：蒸汽发生器。目的在于规定压水堆核电厂蒸汽发生器材料、设计、制造、检验和试验等方面的基本要求。
- 第 3 部分：稳压器。目的在于规定压水堆核电厂稳压器材料、设计、制造、检验和试验等方面的基本要求。
- 第 4 部分：控制棒驱动机构。目的在于规定压水堆核电厂反应堆控制棒驱动机构材料、设计、制造和试验等方面的基本要求。
- 第 5 部分：堆内构件。目的在于规定压水堆核电厂反应堆堆内构件的材料、设计、制造和试验等方面的基本要求。

压水堆承压部件 设备设计制造 第 4 部分：控制棒驱动机构

1 范围

本标准规定了压水堆核电厂反应堆控制棒驱动机构的设计、制造和试验等方面的基本要求。
本标准适用于电磁驱动直线步跃式控制棒驱动机构。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 191 包装储运图示标志
GB/T 4334 金属和合金的腐蚀不锈钢晶间腐蚀试验方法
GB/T 5270 金属基体上的金属覆盖层 电沉积和化学沉积层 附着强度试验方法评述
GB/T 17569 压水堆核电厂物项分级
GB 50267 核电厂抗震设计规范
NB/T 20004 核电厂核岛机械设备材料理化检验方法
NB/T 20007.36 压水堆核电厂用不锈钢第36部分：控制棒驱动机构承压部件用奥氏体不锈钢锻棒
NB/T 20233 压水堆核电厂核蒸汽供应系统设备的清洁和清洁度要求
NB/T 20408 核电厂物项包装、运输、装卸、接收、贮存和维护要求
NB/T 20440 压水堆核电厂反应堆压力容器防止快速断裂评定准则
T/CNEA XXX.1-20XX 压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求
T/CNEA XXX.2-20XX 压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件
T/CNEA XXX.8-20XX 压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则
T/CNEA XXX.2-20XX 压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定
T/CNEA XXX.3-20XX 压水堆承压部件 焊接 第3部分：产品焊接
T/CNEA XXX.6-20XX 压水堆承压部件 焊接 第6部分：不锈钢焊丝
T/CNEA XXX.9-20XX 压水堆承压部件 焊接 第9部分：镍基合金手工电弧焊焊条
T/CNEA XXX.11-20XX 压水堆承压部件 焊接 第11部分：镍基合金焊丝
T/CNEA XXX.2-XXXX 压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测
T/CNEA XXX.3-XXXX 压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测
T/CNEA XXX.4-XXXX 压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测
T/CNEA XXX.7-XXXX 压水堆承压部件 无损检测 第7部分：目视检测

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 步跃 step

由电磁线圈产生一组时序控制的电磁力驱动两副钩爪连续交替地与驱动杆啮合，带动驱动杆一步步地垂直提升或下降的阶跃式动作。

3.2 步距 step length

这里指一个步跃动作引起驱动杆在垂直位置上的变化距离，是由驱动杆上任意两个连续环槽之间的间距决定。

3.3 步跃冲击载荷 stepping impulse load

步跃冲击载荷是执行步跃动作时，动爪磁极与提升磁极吸合或打开，由钩爪带动驱动杆部件运动时产生，该载荷施加在棒行程壳体与钩爪壳体的连接处。

3.4 释棒延时 trip delay time

释棒延时时间是由驱动机构的电控系统发出停堆指令后，定爪线圈和动爪线圈的电源均被切断到控制棒组件完全脱离原有状态开始下落的动作状态为止的一段时间间隔，或者称其为动作延迟时间

3.5 过行程步跃 over-travel steps

过行程步跃指的是钩爪部件使驱动杆的提升步跃超过了它下端的最后一个步数范围内的环槽。

4 通用要求

- a) 控制棒驱动机构的设计、制造、检验和验收应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》、《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》以及本标准所有部份的规定外，还应遵守国家颁布的有关法律、法规和导则。
- b) 控制棒驱动机构的设计单位、制造单位应按《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》及有关法规、导则建立适用的质量保证体系。

4.1 职责

4.1.1 设计单位的职责

设计单位应满足《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》的相关规定。

4.1.2 制造单位的职责

制造单位应满足《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》的相关规定。

4.2 设备范围

4.2.1 设备范围

典型控制棒驱动机构一般包括承压壳体部件、驱动杆部件、钩爪部件、磁轭线圈部件和棒位探测器部件。

4.2.2 管辖边界

- a) 控制棒驱动机构承压部件主要由棒行程壳体和钩爪壳体上下两部分组成,具体边界由设计文件制定,典型边界参见附录 A。
- b) 控制棒驱动机构非承压部件包括驱动杆部件、钩爪部件、磁轭线圈部件和棒位探测器部件。
 - 1) 驱动杆部件的挠性接头与控制棒组件的连接柄啮合连接,连接柄不属于本标准。
 - 2) 磁轭线圈部件包括三个线圈、磁轭体和引线管,边界在连接引线管顶端的插座。
 - 3) 棒位探测器部件套在棒行程壳体的外部,座落在行程套管底部,边界在电气连接器。

4.3 功能与分级

4.3.1 功能

控制棒驱动机构是一种电磁力驱动的机械装置。在压水堆中,控制棒驱动机构的作用是在垂直方向定位控制棒组件,通过控制棒驱动机构改变或保持控制棒组件在堆内的垂直方向的高度,实现反应堆的启停,并在反应堆正常运行中调节或维持堆芯的功率水平以及在事故工况下快速停堆。控制棒驱动机构的主要功能要求如下:

- a) 在各种工况下,能维持反应堆一回路压力边界的完整性;
- b) 在反应堆启动、功率运行和停堆时,根据反应堆控制棒控制系统的指令信号,对控制棒组件进行上抽、下插和位置保持;
- c) 根据反应堆控制棒控制系统的停堆信号或在电源丧失时,快速释放控制棒组件。

4.3.2 分级

控制棒驱动机构的安全等级、抗震类别、质量保证等级和规范等级应遵守《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分:通用要求》及GB/T 17569的要求。

5 材料

5.1 通则

- a) 设计选材应综合考虑材料之间物理、化学和力学性能的相容性和匹配性。驱动机构主体材料应具有优良的焊接性和冷热加工性能。
- b) 应选用已经过运行验证的材料。已验证的材料是指那些与在役压水堆核电厂中至少使用数年的材料具有同样的名义成分、加工制造工艺和处于同样运行条件(如应力水平、水化学环境或温度)的材料。
- c) 与冷却剂接触的奥氏体不锈钢材料应保证在运行条件下的抗晶间腐蚀性能。
- d) 驱动机构材料应具有良好的耐辐照性能。
- e) 驱动机构制造厂应根据设计单位技术文件的相应要求,在考虑加工余量后向材料制造厂和坯件制造厂订购材料,同时应考虑相应的取样要求。
- f) 在制造、运输和储存期间,可能与驱动机构接触的非金属材料应满足设计要求中对于元素浓度的限值规定。如不满足要求,则应在接触后,对其所接触的不锈钢或镍基合金表面进行清洗以满足设计要求。
- g) 应控制与冷却剂接触的设备材料的钴含量限值。
- h) 制造、试验、运输和贮存期间,应实施控制棒驱动机构材料的清洁度控制和污染物限制。
- i) 当对材料有特殊要求时(如特殊冶炼方式、增加的力学性能试验、提高的无损检测要求等),设计单位应在相应设计文件中注明。

5.2 材料的选择

5.2.1 与反应堆一回路冷却剂接触的材料

- a) 所有暴露在反应堆冷却剂中的材料不应使用低熔点材料。
- b) 承压部件所用材料的选择均应遵照 NB/T 20007.36 的规定。
- c) 因热处理或焊接的敏化作用而易发生应力腐蚀和缝隙腐蚀的材料不应使用。
- d) 与反应堆冷却剂接触的材料不应表面氮化处理。
- e) 所有与一回路冷却剂接触的材料应为奥氏体不锈钢、马氏体不锈钢、镍基合金、钴基合金。
- f) 所有与一回路冷却剂接触的材料，除钴基合金和有特定要求的材料外，钴含量不应超过 0.05%。
- g) 与一回路冷却剂接触的所有锻、轧制奥氏体不锈钢应在固溶热处理条件下进行使用，并满足 GB/T 4334 晶间腐蚀试验的要求。
- h) 除进行定位焊的奥氏体不锈钢母材外，进行其它焊接的奥氏体不锈钢母材最大碳含量为 0.03%。
- i) 最终热处理后，制造过程中的材料应避免温度在 427℃~816℃，除非焊接导致的局部高温。
- j) 所有与一回路冷却剂接触的奥氏体不锈钢应进行固溶退火。在制造中应减少使用冷加工，以使应力腐蚀开裂的可能性最小。

5.2.2 不与反应堆一回路冷却剂接触的材料

- a) 所有与安全壳环境接触的非奥氏体不锈钢表面，如导磁半环和磁轭线圈部件的表面应能防腐蚀或有适当的防护镀层。
- b) 导电材料（例如：工作线圈绕组、线圈引接线和电连接器）可使用铜/铜合金和作镀锡、镀银或镀金处理。焊料合金中可含有铅。
- c) 绝缘材料和密封材料应耐高温、耐水汽和耐辐照。

5.2.3 不适用的材料

- d) 在与冷却剂接触的部件上，不应使用除铬之外的镉、铜、银等其它镀层。
- e) 在不与冷却剂接触的部件上，不应使用除镍和铬以外的其它镀层。
- f) 控制棒驱动机构的结构用材料不应使用铝。
- g) 不应使用 600 合金。

5.2.4 焊材

5.2.4.1 总体要求

- a) 焊材应满足《压水堆承压部件 焊接 第 6 部分：不锈钢焊丝》、《压水堆承压部件 焊接 第 9 部分：镍基合金手工电弧焊焊条》和《压水堆承压部件 焊接 第 11 部分：镍基合金焊丝》，用于安全级部件的焊材还应满足本标准的要求。
- b) 不应使用 ERNiCr-3、EQNiCr-3 和 ENiCrFe-3 填充材料。

5.2.4.2 化学成分

- a) 用于控制棒驱动机构的焊接材料，其 Co 含量应不大于 0.05%。
- b) 对于不锈钢焊丝，还应提供 V, Ti, N, Cb+Ta 的实测数据。

5.2.4.3 高温拉伸试验

全焊缝金属高温拉伸试验应分别在焊态和焊后热处理态（如需）下进行，性能应满足相应母材及设备规格书的要求。

5.2.4.4 冲击韧性试验

全焊缝金属冲击试验应分别在焊态和焊后热处理态（如需）下进行，性能应满足相应母材及设备规格书的要求。

5.2.4.5 铁素体含量

对于不锈钢焊丝，按照《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》要求使用化学分析法和磁性法测定焊态焊缝金属的 δ 铁素体含量，结果应满足5FN~15FN（目标12FN）。

5.2.4.6 晶间腐蚀试验

晶间腐蚀试验应按NB/T 20004进行，分别在焊态和焊后热处理状态（如需）下进行。

6 设计

6.1 通则

- a) 控制棒驱动机构钩爪部件应能互换。在不拆卸压力容器顶盖上的钩爪壳体的情况下，任何钩爪部件应都能被移除更换。
- b) 在反应堆启动、功率运行和停堆时，控制棒驱动机构应能在步跃行程范围内对控制棒组件进行上抽、下插和位置保持。控制棒驱动机构应根据停堆信号或在电源丧失时，快速释放控制棒组件。
- c) 当驱动杆部件带动控制棒组件从燃料组件抽出时，控制棒驱动机构应能保证不发生控制棒从燃料组件中完全抽出，即驱动杆应设置防止完全抽出的功能。
- d) 在移除反应堆压力容器顶盖前，控制棒驱动机构钩爪部件应能脱开驱动杆。在反应堆压力容器顶盖安装后，控制棒驱动机构应能在冷/热态工况下夹持住驱动杆。
- e) 断电后，在释棒延时的设计参数值内，无论钩爪在何位置，连接有控制棒组件的驱动杆部件应能自由下落。
- f) 至少在一个换料周期内，控制棒驱动机构不必维护。
- g) 在不拆卸邻近的控制棒驱动机构承压壳体的情况下，任何控制棒驱动机构钩爪部件应能被拆除和更换。
- h) 所有控制棒驱动机构部件，除驱动杆组件外应能随反应堆压力容器顶盖一起移出。
- i) 当控制棒驱动机构在反应堆压力容器顶盖上就位，并且反应堆在零功率和正常运行压力及温度条件下时，磁轭线圈应能被拆离或更换。
- j) 控制棒驱动机构应具有抗震约束。
- k) 控制棒驱动机构的设计应保证无单一故障影响控制棒驱动机构执行安全相关功能——落棒。
- l) 控制棒驱动机构的压力边界应与反应堆寿命相同。对于使用寿命少于反应堆寿命的非承压边界部件应是可维修或可更换的，应与电厂可用性、可维修性及人员辐射照射要求相一致。
- m) 控制棒驱动机构要求当事故发生时和事故发生后，仍满足设备功能性要求。
- n) 控制棒驱动机构各接口参数应满足反应堆总体要求。

- o) 控制棒驱动机构的额定提升力应大于提升负荷（包括驱动杆组件和控制棒组件自重、机械设计流量下的水力载荷以及机械摩擦力等）。
- p) 控制棒驱动机构运行应平稳，无异常噪声，不允许有失步、打滑、提不起和卡棒等异常现象。
- q) 承压壳体内部的零部件设计应考虑合适冷却剂流道，以减少落棒时流体阻力

6.2 接口和布置要求

- a) 控制棒驱动机构与反应堆压力容器顶盖、一体化堆顶组件、堆内构件、控制棒组件和磁轭线圈电缆存在接口，典型接口参见附录 A。
- b) 控制棒驱动机构顶盖贯穿件通过部分焊透的 J 型焊缝与压力容器内表面连接。
- c) 棒位探测器套在棒行程壳体的外部，座落在行程套管底部加工出的台阶上。
- d) 控制棒驱动机构工作线圈由控制棒控制系统控制通电或断电。磁轭线圈部件引线管顶端的插座与供电及控制电缆配合连接。
- e) 驱动杆部件的挠性接头与控制棒组件的连接柄啮合连接。
- f) 驱动杆与堆内构件的接口设计使得在换料期间与连接柄脱扣后的驱动杆能从堆内构件中被取出。换料时，驱动杆能搁置在堆内构件导向筒中，并与上部堆内构件一起吊走。

6.3 设计输入

6.3.1 正常运行条件

- a) 反应堆运行压力（MPa）；
- b) 反应堆平均温度（℃）；
- c) 反应堆冷却剂。

6.3.2 设计参数

- a) 设计压力（MPa）；
- b) 设计温度（℃）；
- c) 提升负荷（N）；
- d) 步跃行程（步）；
- e) 步距（mm）；
- f) 上抽或下插的步速范围（步/分钟）；
- g) 释棒延时（ms）；
- h) 在正常运行工况下，工作线圈设计工作温度（平均温度℃）；
- i) 累计步跃数（步）；
- j) 最少落棒总次数；
- k) 承压部件设计寿命；
- l) 冷却通风条件。

6.4 设计输出

设计单位应按设计输入的要求完成设计，至少应提交下列文件：

- a) 施工设计图册；
- b) 设备规格书（应包括材料、制造、检验、验收、包装和运输等方面的内容）；
- c) 计算书（应包括承压部件的应力分析报告和关键零部件的强度和疲劳分析等）；
- d) 安装技术要求文件；

- e) 运行和维护手册。

6.5 结构设计

6.5.1 承压壳体

- a) 承压壳体应能包容控制棒驱动机构所有运动部件（例如：钩爪部件、驱动杆部件），维持一回路反应堆冷却剂与安全壳之间的压力边界。
- b) 承压壳体应能支承磁轭线圈部件、钩爪部件和棒位探测器。
- c) 钩爪壳体应通过全焊透异种金属焊缝与控制棒驱动机构顶盖贯穿件连接。
- d) 棒行程壳体和钩爪壳体应通过螺纹连接，并采用 CANOPY 或 Ω 型密封焊接接头。
- e) 所有承压壳体的焊缝都应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第 2 部分：1 级部件》中相关规定的要求。

6.5.2 钩爪部件

- a) 钩爪部件在控制棒驱动机构承压壳体内一回路冷却剂环境中工作。
- b) 钩爪应通过连杆和销轴与衔铁相连接，通过衔铁的移动使钩爪和驱动杆啮合。
- c) 当工作线圈断电时，钩爪不会自锁，应能在重力和弹簧的作用下从驱动杆部件中快速摆出。松开的钩爪不应阻挡驱动杆的自由下落。
- d) 在驱动杆部件行程范围内的任意步位，钩爪应能保持住与控制棒组件啮合连接的驱动杆。
- e) 钩爪部件应能在安全停堆地震和设计基准管道破裂事件之前、期间以及之后执行安全相关功能（释棒延时在设计参数值内）。

6.5.3 驱动杆部件

- a) 驱动杆部件应能在控制棒驱动机构承压壳体和堆内构件中运行。
- b) 驱动杆部件应与棒位探测器相感应，以探测控制棒驱动机构运行时控制棒组件相对于堆芯的垂直位置。
- c) 驱动杆应与钩爪部件啮合，使钩爪部件夹持住处于被上抽、下插和保持状态下的控制棒组件。
- d) 驱动杆部件应能承受由步跃和紧急停堆产生的动态载荷。
- e) 驱动杆的长度和几何形状应由反应堆压力容器、堆内构件、燃料组件、控制棒组件和控制棒驱动机构承压壳体部件的尺寸综合确定
- f) 驱动杆部件的下端应能与控制棒组件的连接柄相配合，并保证在控制棒驱动机构运行时不发生脱离。
- g) 在正常运行和事故工况下，驱动杆部件应能防止控制棒组件意外脱离。
- h) 驱动杆部件上应设有从顶部操作的与控制棒组件啮合/脱开的结构。

6.5.4 磁轭线圈部件

- a) 磁轭线圈部件应在控制棒驱动机构承压壳体的外部工作，产生磁场以激励钩爪部件动作。
- b) 磁轭线圈部件可采取通风或其他形式的冷却方式，以使线圈整体平均温度保持在线圈许用温度以下。若采用耐高温电磁线圈，则可取消冷却通风系统，简化堆顶结构。
- c) 磁轭线圈部件应能在安全壳厂房的环境下工作。
- d) 磁轭应能防止水和异物进入。
- e) 工作线圈和所有电气零部件应能在不影响一回路系统压力边界和移除相邻控制棒驱动机构的情况下进行更换。

6.5.5 导向隔热套

- a) 导向隔热套位于钩爪壳体内部的钩爪部件的下方。
- b) 导向隔热套可限制反应堆正常运行时受到控制棒驱动机构内部的热虹吸流。

6.5.6 棒位探测器

- a) 安装于控制棒驱动机构上部的棒行程壳体外,用于探测连接着控制棒组件的驱动杆的位置,将探测到的位置信号输出给数字化棒位指示系统的电子信号处理设备,同时也能为落棒试验子系统提供释棒落棒过程信号。
- b) 当棒位探测器中的线圈被驱动杆贯穿时,通过线圈中感应电压的变化来测量控制棒位置,即当某个线圈被贯穿和没有被贯穿时,线圈感应不同,使数字化棒位指示系统可通过确定有最大的电压差异的两个相邻线圈的位置来确定棒位。
- c) 每个棒位探测器的线圈分为 A、B 两组,两组线圈均使用时棒位探测器处于全精度状态;若仅使用其中一组线圈,则处于半精度状态。全精度误差应不大于 ± 5 步,半精度误差 A 组和 B 组应不大于 ± 8 步。

6.5.7 电气部件

- a) 电气部件的结构设计应便于检修和部件更换,并可在反应堆热态工况下拆装。
- b) 电气部件宜采用密封结构,在正常运行工况下应具有密封性能。
- c) 电气部件的最高工作温度应低于绝缘材料的许用温度。
- d) 采用的金属材料、绝缘材料和密封材料应耐高温、水汽和辐照。
- e) 电气部件外表面耐腐蚀性能应满足安全壳环境要求。

6.6 分析法设计

6.6.1 基本要求

控制棒驱动机构在各使用限制下,应在应力、疲劳、断裂等方面满足《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分:1级部件》的要求。本标准6.6.4节为各使用限制下的应力限制。

6.6.2 载荷

6.6.2.1 设计载荷

设计载荷应满足以下规定:

- a) 设计压力:通常是核电厂设计总参数之一,需要包络正常工况下的所有压力;
- b) 设计温度:在考虑设计压力和设计机械载荷的计算时应使用设计温度;
- c) 设计工况机械载荷:必须对作用于需评定部件上的机械载荷进行分析,以满足设计温度和相应环境条件下设计工况限制,载荷包括:
 - 1) 自重;
 - 2) 随机流致振动载荷;
 - 3) 步跃冲击载荷或粘棒载荷;
 - 4) 泵致振动载荷。

6.6.2.2 A 级使用载荷

应对部件在正常工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下A级使用限制，除了设计载荷外，正常工况载荷还包括：

- a) 反应堆冷却剂系统正常运行工况下的设计瞬态；
- b) 由于温差或异种材料热膨胀引起的热载荷。

因为正常工况为设计工况所包络，所以不必单独对正常工况进行一次应力分析。

6.6.2.3 B级使用载荷

应对部件在异常工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下B级使用限制，除了A级使用载荷，异常工况载荷还包括：

- a) 反应堆冷却剂系统异常工况下的设计瞬态；
- b) 运行基准地震载荷(OBE)或低水平地震(LLSE)。

6.6.2.4 C级使用载荷

应对部件在危急工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下C级使用限制，除了A级使用载荷，危急工况载荷还包括：反应堆冷却剂系统危急工况下的设计瞬态。

6.6.2.5 D级使用载荷

应对部件在事故工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下D级使用限制，除了A级使用载荷，事故工况载荷还包括：

- a) 反应堆冷却剂系统事故工况下的设计瞬态；
- b) 设计基准管道破裂载荷；
- c) 安全停堆地震(SSE)。

6.6.2.6 试验载荷

试验载荷是水压试验载荷,包括试验温度、试验压力和自重。

6.6.2.7 运输载荷

应对控制棒驱动机构运输过程中的载荷对结构完整性的影响进行评估，以确保设计满足适用要求，其中包括对疲劳的要求。

6.6.3 载荷组合

- a) 载荷组合即将设计载荷，按其发生频率、造成后果等因素进行分类并重组，同时与电厂的各级工况和规范中的运行级别建立联系，以确定评定限制。
- b) 控制棒驱动机构设计时应考虑设计寿期内各级工况下所承受的载荷组合，以确保其结构完整性，载荷组合及相关载荷术语描述参见附录B。

6.6.4 评定准则

控制棒驱动机构在各使用限制下，应在应力、疲劳、断裂等方面满足适用规范的要求。控制棒驱动机构承压壳体在各使用限制下的应力限制见表1。

表 1 部件在各使用限制下的应力限制

使用限制	应力分类	应力限制
设计	P_m	S_m
	P_L	$1.5S_m^{(2)}$
	$P_m (P_L)+P_b$	$\alpha \cdot S_m$
A 级/ B 级	$(P_L+P_b+Q)_r^{(1)}$	$3S_m$
	热棘轮比率	1
	累积使用因子	$U \leq 1$
B 级	P_m	$1.1S_m$
	P_L	$1.1 \alpha S_m$
	$P_m (P_L)+P_b$	$1.1 \alpha S_m$
C 级	P_m	所有载荷： $\text{Max}[1.2S_m, 1.0S_y]$
		铁素体钢- 仅受压： $\text{Max}[1.1S_m, 0.9S_y]$
	P_L	$\text{Max}[1.8S_m, 1.5S_y]$
	$P_m (P_L)+P_b$	$\text{Max}[1.8S_m, 1.5S_y]$
D 级	P_m	$S_m'^{(3)}$
	P_L	$1.5 S_m'^{(3)}$
	$P_m (P_L)+P_b$	$1.5 S_m'^{(3)}$
试验	P_m	$0.9S_y$
	P_m+P_b	$1.35S_y$ (当 $P_m \leq 0.67 S_y$)
	P_m+P_b	$2.15S_y-1.2P_m$ (当 $0.67S_y < P_m \leq 0.9S_y$)
三向应力	$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$	$4S_m^{(4)}$
平均支承应力	支承应力	S_y
平均一次纯剪应力	纯剪应力	$0.6S_m$
断裂	K_I	K_{IR} (或 K_{IC}) ⁽⁵⁾
<p>注1：下标r表示应力强度范围；</p> <p>注2：α 为产生全塑性截面的载荷设定值与产生截面表层起始屈服的载荷设定值的比值；任何情况下，α 不超过1.5；</p> <p>注3：对铁素体钢，$S_m' = 0.7S_u$；对奥氏体钢、高镍合金及铜镍合金，$S_m' = \min(2.4S_m, 0.7S_u)$；</p> <p>注4：D级使用除外，C级使用限制取4.8S_m；</p> <p>注5：根据适用规范的要求使用K_{IR}或K_{IC}；</p> <p>注6：P_m：总体一次薄膜应力强度；P_L：局部一次薄膜应力强度；P_b：一次弯曲应力强度；Q：二次应力强度；$(P_L+P_b+Q)_r$：一次加二次应力强度范围；σ_1、σ_2、σ_3：三个方向主应力。</p>		

6.6.5 分析方法

控制棒驱动机构承压壳体应根据规范等级进行应力分析,计算最可能产生失效的截面上的薄膜和弯曲等应力,并按《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分:1级部件》的要求进行评估。

6.6.5.1 应力分析方法

6.6.5.1.1 一次应力

计算控制棒驱动机构在压力、设计机械载荷等静态载荷作用下的一次应力强度时,根据部件的结构特点,采用理论计算、有限元静态分析或两者相结合的方法。分析过程中按各工况下的最大载荷组合方式对模型施加内压,并将计算得到的应力沿评定截面作线性化处理后,得到一次应力强度。设计机械载荷(泵致振动载荷、随机流致振动载荷和步跃冲击载荷)产生的一次应力强度使用理论计算。最后将有限元方法和理论计算的各截面六个应力分量进行组合,得到控制棒驱动机构承压壳体在所有载荷作用下的一次应力强度。

6.6.5.1.2 二次应力

- 二次应力由热梯度、不同材料间热膨胀差别以及材料不连续处的结构相互作用所产生。这些应力与一次薄膜加弯曲各应力分量代数和相组合得到一次加二次应力强度范围。
- 对正常和异常工况(A/B级)下的一次+二次应力强度范围(P+Q) range 进行评定,控制一次+二次应力强度范围在 $3S_m$ 的设计准则之内。一次+二次应力强度范围若大于 $3S_m$ 的限值可以将热弯曲应力去除(分析方法参照《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分:1级部件》)的简化弹塑性分析),若热弯曲应力去除后的一次+二次应力强度范围仍然超出 $3S_m$ 的限值,则需要塑性分析。
- 热棘轮效应是指承受恒定内压载荷的壳体当其内部流体发生冷热交替时,当结构的热应力值达到一定程度时结构将失去安定性,会发生棘轮长大效应。所有的A/B级工况下的载荷需要考虑热棘轮效应。

6.6.5.2 疲劳分析方法

- 疲劳分析应采用设计疲劳曲线法,使用正常、异常及试验工况下结构各评定截面的应力值得到各应力循环类型交变应力强度值,根据该交变应力强度值从设计疲劳曲线上查得对应的许用循环次数 N_i ,再将其与该类应力循环实际发生次数 n_i 对比,得到 n_i/N_i ,称为使用因子。当有 K 种应力循环类型时,累积使用因子 U 按下式(1)计算,若 $U \leq 1$,则认为该部位不会发生疲劳失效:

$$U = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} \dots\dots\dots (1)$$

- 对危急工况,当 S_a 值大于适用的疲劳设计曲线 10^6 次的对应值时,假想出现的总次数不得超过25次。若该工况的瞬态超过25次,则超过部分的应力循环次数应在异常工况的设计瞬态中加以考虑。
- 由于疲劳曲线的弹性模量(E_c)和实际材料的弹性模量(E_m)不同,应对疲劳曲线乘以修正因子进行调整。为保守起见,常采用设备的设计温度作为包络温度。修正因子取设计温度下实际材料弹性模量(E_m)和设计疲劳曲线弹性模量(E_c)的比值。

- d) 当交变应力超过材料屈服强度 S_y 时, 需对由弹性为基础分析所得到的局部热应力进行修正。采用修正的泊松比 $\nu=0.5-0.2(S_y/S_d)$, 且不小于 0.3。
- e) 如果薄膜加弯曲应力强度变化范围超过 $3S_m$ 的限值, 需对其进行弹塑性修正 (K_e)。进行简化弹塑性分析后, 当交变应力超过材料屈服强度时泊松比修正不作要求。

6.6.5.3 断裂分析方法

应在瞬态应力分析工作基础上进行断裂分析和评定, 分析方法参照NB/T 20440。对于非铁基材料, 不需要进行无延性失效评定。

6.6.5.4 螺纹剪力和渐进性畸变分析方法

钩爪壳体和棒行程壳体之间的螺纹需要进行剪力和渐进性畸变分析。

- a) 螺纹剪力的分析方法是, 由于经受设计载荷、试验载荷或任何使用载荷(指定为D级限制的除外)而产生的沿纯剪力加载截面(例如键、剪力环、螺纹)的平均一次剪应力应限制在 $0.6S_m$ 。
- b) 渐进性畸变的分析方法是, 螺纹的一次加二次应力强度应限制在材料的 S_y 值之内。

6.6.5.5 支承应力分析方法

- a) 提升磁极和棒行程壳之间由于步跃冲击载荷会产生支承应力。
- b) 在由设计载荷、试验载荷或任何使用载荷(指定为D级限制的载荷除外)而产生的最大载荷作用下, 为防止压毁的平均支承应力应限制在所处温度下的 S_y 内。

6.6.5.6 机械载荷(泵致振动载荷、随机流致振动载荷和步跃冲击载荷)下控制棒驱动机构结构反应分析

- a) 对控制棒驱动机构进行模态分析, 得到模型的固有频率和振型。
- b) 然后采用谐响应分析法进行泵致振动载荷下的动态分析, 采用功率谱密度(PSD)分析法进行随机流致振动载荷下的动态分析, 采用静力法进行步跃冲击载荷分析。
- c) 提取各个载荷下模型各关键部位的力和弯矩。
- d) 使用理论解析方法计算关键部位的应力强度。
- e) 将理论解析方法得到的应力强度和有限元得到的压力等载荷下的一次应力强度叠加获得模型在所有载荷作用下的一次应力强度。

6.6.5.7 地震载荷下控制棒驱动机构结构反应分析

控制棒驱动机构受到的地震载荷应由系统模型经时程分析或者反应谱分析后以机械载荷的形式提供给控制棒驱动机构各关键位置, 用于控制棒驱动机构的应力分析和评定。

6.7 设计验证试验

6.7.1 控制棒驱动机构抗震试验

6.7.1.1 控制棒驱动线动态特性测定

进行抗震试验前后的动态特性探查试验, 实测控制棒驱动线在安装条件下的自振频率、阻尼等振动参数, 确定结构的固有动态特性, 并比对试验前后设备的固有动态特性测量结果, 考核地震载荷对设备动态特性的影响。

6.7.1.2 试验装置输入载荷论证

对地震载荷进行处理，生成供抗震试验使用的输入地震载荷，使输入载荷满足相关标准要求。

6.7.1.3 控制棒驱动机构运行功能检验

在地震试验前、低水平地震试验和安全停堆地震试验过程中、地震试验后分别进行控制棒驱动机构的功能试验，实测线圈的电流波形、振动信号等表征控制棒驱动机构工作状态的参数，验证地震试验前后和地震载荷作用下控制棒驱动机构的可运行性和快速落棒功能。

6.7.1.4 控制棒驱动机构抗震试验

在地震试验过程中，实测控制棒驱动线结构关键部位的位移、加速度和应变，为验证控制棒驱动机构承压边界在地震载荷作用下的结构完整性提供试验依据，包括低水平地震（LLSE）试验和安全停堆地震（SSE）试验。

6.7.1.5 控制棒落棒时间测定。

在落棒试验过程中，测量控制棒从设定棒位开始下落至端部进入设定位置和落到堆芯底部的时间，考核地震载荷对落棒时间的影响。

6.7.2 控制棒驱动机构热态寿命试验

- a) 寿命试验应在热态试验工况下进行，以设计速度进行步跃寿命试验，试验目标为 6.3.2 中累计步跃数。每隔一定步数后对钩爪部件进行目视检查（若条件允许，进行拆卸检查），并进行清洗，同时排空试验本体内的水，对试验用水进行更换。
- b) 在寿命试验过程中，应进行落棒以检验释棒延时，并且应记录每次落棒的释棒延时，落棒次数不少于最少落棒总次数。
- c) 寿命试验结束后，应进行一定次数的过行程步跃，过行程步跃试验过程中应不发生滑棒、掉棒等不正常的现象。
- d) 寿命试验结束后应测量工作线圈的绝缘电阻，并将机构进行拆解，进行逐个零件的外观检查、尺寸检查和称重等。

7 制造

7.1 通则

- a) 负责核安全相关零部件的制造单位应具有符合国家核安全有关法规要求的质量保证体系。
- b) 制造过程中有关工序（如焊接、无损检验等）的操作人员需经培训考核，具有相关资格证明后才能承担有关的操作。

7.2 下料

- a) 金属材料的下料应采用机械方法切割。在不可能用机械方法切割时，可用氧气切割或电弧切割，但应在下道工序时将热影响区完全去除掉。
- b) 可用剪床来切割厚度小于 25mm 的板材，但应通过机械加工方法去除掉加工硬化区。

7.3 机加工

- a) 零件的完工尺寸公差、形位公差、粗糙度应符合设计图纸中的规定。在设计图中, 注有记录标记的尺寸、形状和位置公差, 在零件加工完成后, 应检测这些尺寸、形状和位置偏差, 并将检测结果汇编到产品完工报告中, 在产品交货时提交给需方。
- b) 终加工后, 零件表面不应有毛刺、锐边、裂纹、划痕、撕裂、压痕和撞伤等缺陷。
- c) 与反应堆冷却剂接触的零件可冷校直, 冷校直后的零件应进行稳定化热处理, 校直后零件不应有凹坑、划伤和严重的加工硬化。
- d) 对奥氏体不锈钢和镍基合金的零件, 在加工过程中的吊装、转运或贮存期间, 不应与铁素体钢接触。
- e) 加工制造中, 应避免材料受到污染, 以防止产生腐蚀。

7.4 焊接

7.4.1 通则

- a) 所有焊接应满足本通用标准和《压水堆承压部件 焊接 第3部分: 产品焊接》的相关要求。
- b) 焊接工艺评定和焊工技能评定应满足以下要求:
 - 1) 所有安全级部件及其附件焊接的焊工或焊接操作工应取得相应资格证书。所有非安全级部件及其附件焊接的焊工或焊接操作工资格可由设计单位或制造商自行规定。
 - 2) 所有焊缝(包括堆焊)的焊接工艺评定应符合《压水堆承压部件 焊接 第2部分: 焊接工艺评定》的要求。

7.4.2 产品焊缝制造

7.4.2.1 总体要求

- a) 所有材料应符合材料技术条件、设备规格书和图纸的规定, 并具有符合质保程序要求的完整的出厂质量合格证书, 并且验收合格。
- b) 产品焊缝施焊前应进行焊接工艺评定, 评定合格后, 提出焊接工艺评定报告。以合格的焊接工艺评定为依据, 结合设计图纸、制造要求、本技术条件及实践经验, 制定焊接工艺规程。

7.4.2.2 焊接准备工作

- a) 焊件的坡口加工应采用机械方法, 坡口型式和尺寸按图纸规定。
- b) 待焊坡口表面应按《压水堆承压部件 无损检测 第4部分: 渗透检测》的要求进行液体渗透检测。
- c) 应确保焊丝清洁无附着油污, 以防污物影响焊缝质量。
- d) 调整和测量焊接参数用仪器、仪表应是经过校正的, 校正检验应有合格标记和校正检验记录, 且在有效期内。
- e) CANOPY 或 Ω 型密封焊接接头可采用自动焊、手工焊或机械焊, 应进行模拟件的试焊, 模拟件应满足以下要求:
 - 1) 在产品焊接前, 应按产品的焊接工艺规程试焊 2 个模拟件; 以后每焊接 20 个产品焊缝, 再焊接 1 个模拟件; 如焊机 24 小时不用, 在进行产品焊接前, 应焊接 1 个模拟件。试焊在施工现场进行。
 - 2) 模拟件的母材应取自与产品某一炉号的材料, 模拟件的焊接应采用与产品施焊用同炉/批号的焊丝。
 - 3) 模拟件焊缝应进行外表面检验, 焊缝尺寸应与图纸相符, 不得有咬边、气孔、夹渣、裂纹、烧穿、未焊透、未熔合等缺陷。

- 4) 按《压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测》的要求对模拟件内、外表面进行液体渗透检验。
- 5) 从每个模拟件上，至少切取4个截面进行检验。在焊接开始和终止部分各取一个横截面试样，其余横截面应随机选取。每个横截面试样放大10-15倍进行检验。所有表面均应没有裂纹、未焊透、未熔合，仅允许最多有1个最大尺寸不大于焊缝厚度10%的圆形缺陷（气孔或夹渣）。当4个截面检验后，对焊缝是否合格有怀疑时，检验师可要求制备附加的金相横截面，以检验焊缝及临近的母材。
- 6) 检验中发现上述缺陷后应进行质量分析，找出原因，制定方案并经技术负责人批准后重新施焊。施焊规范应在焊接工艺评定范围内。此时试焊模拟件数量应为原来的2倍，且应全部合格。如重新试焊的模拟件仍有一个不合格，则应重新进行工艺评定。
- f) 对接接头坡口组装前，可用定位焊或夹具等来保证对中与定位，但应避免强行组对。
- g) 坡口组装后，允许最大错边或间隙量应不低于下列要求：
 - 1) 对接接头：0.5mm；
 - 2) CANOPY 或 Ω 型密封焊接接头焊缝：0.1mm。

7.4.2.3 产品施焊

- a) 所有焊缝宜采用加丝的钨极气体保护焊。钨极气体保护焊用氩气的纯度不得低于99.997%。非熔化电极采用钍钨极或铈钨极。如有特殊需求，宜在设计文件中规定。
- b) 对于保护套筒、挠性接头、拆卸钮与销钉的塞焊连接，应先在保护套筒、挠性接头、拆卸钮侧进行堆焊，宜堆焊预热温度至少为205℃、最大道间温度为300℃，堆焊完成后应进行焊后热处理，在热处理前应保持预热温度。
- c) 焊接过程中应尽量采用低的热输入。
- d) 不应使用不加填充金属的焊接方法，除非事前有专门程序提交给设计方和采购方并得到批准。
- e) 连接钩爪壳体和棒行程壳体的密封焊缝是一种经特殊设计的密封焊缝，应满足《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》相关规定要求。

7.4.2.4 缺陷的去除和焊补

- a) 焊缝的表面缺陷可以用打磨或机加工的方法消除，而不必用焊接方法修补，但应满足下列要求：
 - 1) 打磨或机加工后的厚度应不低于设计厚度的下限值；
 - 2) 缺陷消除后，应与周围表面平滑过渡。
- b) 缺陷消除部位应进行液体渗透检测，应满足7.8.2.2的规定。
- c) 焊缝中的缺陷应采用机械的方法消除。
- d) 焊缝补焊工艺应根据合格的焊接工艺评定报告编制，并在施焊过程中严格控制规范参数。
- e) 所有的修补焊缝采用对原焊缝同样的检测方式，合格后打上标记，并作记录。
- f) 焊缝同一部位的返修次数不应超过一次。CANOPY 或 Ω 型密封焊接接头焊缝的返修是指重新切焊，焊接要求按本标准规定，返修次数以一次为限。

7.5 热处理

- a) 零部件在制造过程中的热处理应满足图纸和相关技术条件的要求。
- b) 在制造过程中，除了焊接和短时间切割操作的影响外，奥氏体不锈钢零件在任何情况下均不允许加热至425℃以上。
- c) 为了保证机械加工零部件的尺寸稳定性，可以将不稳定奥氏体不锈钢零部件进行尺寸稳定化处理。

- d) 如果驱动杆进行过校直处理,应进行尺寸稳定化处理。进行尺寸稳定化处理时,驱动杆可垂直放置,也可水平放置,但水平放置时,应每隔一段距离设置支撑点。

7.6 镀铬

7.6.1 总体要求

在镀铬操作之前,供方应制定镀铬规程,该规程应明确规定:

- a) 基体材料牌号;
- b) 待镀表面粗糙度;
- c) 电镀液的成分和电镀参数(包括电流密度和温度);
- d) 待电镀工件的支承件结构(包括工件与导体之间的连接方式)和制造支承件的材料,支承件材料应不是污染源,应不溶解于电镀液;
- e) 搅拌装置;
- f) 阳极材料;
- g) 非电镀表面的保护;
- h) 工件在支承件上的布置应便于排放气泡;
- i) 镀层的检验和验收准则。

7.6.2 评定

- a) 在镀铬操作之前,负责镀铬的供方应按下述规定评定其工艺,符合规定的镀层质量要求时,则评定为合格。
 - 1) 尽可能使用实际工件。
 - 2) 也可使用具有代表性的试样。
- b) 在电镀之前,应进行粗糙度检查、目视检测和渗透检测。
- c) 使用蒸汽脱脂法或用有机溶剂去除所有油脂。
- d) 在镀铬操作过程中电流不得中断,如果由于某种原因电流中断,则应去除已镀镀层并重新进行镀铬。
- e) 在镀铬和冲洗后,所有的工件(不包括奥氏体不锈钢、镍基合金和碳钢工件)应立即放入炉内热处理,在 230℃和 260℃之间至少保温 3 小时,以便去除夹杂的氢。
- f) 镀层的最终表面应无裸点、起泡、划痕、凹痕、针孔以及烧焦区或乳白区。应使用 10 倍放大镜对可疑区进行目视检测。最终表面的粗糙度应符合相关图纸或设备规格书中的要求。
- g) 应使用下列方法之一检验厚度:
 - 1) 用千分卡尺测量电镀前、后工件的尺寸差(如不可能直接测量时用试样);
 - 2) 当工件的材质和几何形状允许时,使用磁力法检测工件(或试样),但在每次检测之前应按要求标定测量仪器;
 - 3) 或用显微检验方法检测试样,显微截面应从试样最难电镀表面进行选取,并且试样的材料应与镀铬工件的材料相同。
- h) 按照 GB/T 5270 的要求进行附着力检验,也可按照以下规定进行附着力检验:
 - 1) 将代表一批工件的一个试样放在铁砧上;
 - 2) 将直径为 10mm 的钢球放在试样的镀铬表面上。用另一重约 500g 的铁锤猛击这个钢球一次,使工件表面得到 1 个名义深度为 0.2mm 的凹痕(相当于直径为 3mm 的圆形凹坑)。镀层在凹痕表面上无起皮为合格。

- i) 当镀层未满足验收准则时, 不满足验收准则的零件应去掉镀层, 重新镀铬; 当镀铬过程中发生电流中断故障, 则所有在一个电镀池中同时进行镀铬的零件均应完全去掉镀层, 重新镀铬。当试样的附着力检查不合格时, 该试样所代表的所有零件均应去掉镀层, 重新镀铬。
- j) 重新镀铬要求和验收准则与初始镀铬的要求和验收准则一致。

7.7 组装

7.7.1 总体要求

- a) 制造厂负责控制棒驱动机构承压壳体部件的试装。
- b) 制造厂应编制控制棒驱动机构的装配工艺规程, 并提交设计方认可。
- c) 钩爪壳体与棒行程壳体的密封焊接, 应在钩爪壳体组件与压力容器顶盖连接后, 为保证焊接质量, 尽可能在制造厂焊接组装。
- d) 制造厂负责控制棒驱动机构钩爪部件、磁轭线圈部件和驱动杆部件的组装。

7.7.2 钩爪部件

- a) 钩爪销轴转动灵活。
- b) 钩爪处于自由状态时, 钩爪齿端应处于套管轴内部, 不应突出。
- c) 钩爪部件的各衔铁滑动灵活。
- d) 步长和负荷传递间隙检查。

7.7.3 驱动杆部件

- a) 驱动杆部件组装应在水平位置进行, 保证驱动杆至少有 2/3 的长度置于一个平面上。
- b) 避免组装操作时驱动杆产生弯曲变形。
- c) 可拆接头与控制棒组件连接柄的连接和脱开操作应满足设计要求。

7.7.4 磁轭线圈部件

- a) 线圈绕线应满足层数和匝数要求, 每个线圈的绕组线应完整, 中间不允许有接头。
- b) 绕线后的线圈应进行浸漆绝缘处理。
- c) 线圈部件组装后应检测线圈的电气参数, 如: 直流电阻、直流电感、绝缘电阻和线圈极性, 并进行匝间短路、耐电压等试验。

7.8 无损检测

7.8.1 总体要求

控制棒驱动机构材料、制造过程中以及水压试验后的无损检验应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分: 1级部件》、本标准第2章引用的相关无损检验规范以及本标准的要求。

7.8.2 制造过程中的无损检验

7.8.2.1 目视检测

所有完工焊缝应进行目视检验, 目视检测应符合《压水堆承压部件 无损检测 第7部分: 目视检测》及以下的规定:

- a) 用 5~10 倍数放大镜对焊缝进行目视检验;
- b) 焊缝表面应平整、光洁、外形几何尺寸符合图纸要求, 对接焊缝的两侧应平滑过渡;

- c) 焊缝表面不得有裂纹、气孔、咬边、焊瘤、未熔合、夹钨等焊接缺陷；
- d) 点焊焊缝表面及其周围出现氧化皮时，应用机械的方法清除干净；
- e) 外观检验不合格的焊缝不应进行其它项目的检验。

7.8.2.2 液体渗透检测

所有的完工焊缝应进行液体渗透检测，液体渗透检测应符合《压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测》及以下的规定：

- a) 液体渗透材料（渗透剂和显像剂）中氟加氯的含量及硫的含量均不应高于 NB/T 20233 规定数值；
- b) 非铁磁性材料焊缝在最终机加工后应进行液体渗透检测。

7.8.2.3 体积检测

- a) 对于钩爪壳体和控制棒驱动机构顶盖贯穿件的对接焊缝，应进行 100%的超声检测和射线检测，超声检测应符合《压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测》的要求，射线检测应符合《压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测》的要求。
- b) 对于导向罩延伸段的对接焊缝应进行 100%的超声检测，超声检测应符合《压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测》的要求。

7.9 见证件

7.9.1 总体要求

- a) 见证件应满足本标准和《压水堆承压部件 焊接 第3部分：产品焊接》中的相关规定，焊接见证件的具体设置、试验项目和要求由设计单位进行规定。
- b) 为证明焊缝的质量及其均匀性，以及保证与焊接工艺评定试验中所确定的相一致的实施条件。
- c) 应至少设置 1 个钩爪壳体和控制棒驱动机构顶盖贯穿件的对接焊缝见证件。

7.9.2 焊接见证件

- a) 见证件焊接接头的尺寸应与产品焊缝接头尺寸相同，长度应满足全部试样的规定要求。见证件应有试样保留件，保留件应存放起来。直到焊接见证件记录报告得到验收或工程结束为止。
- b) 见证件应取自与产品母材同炉号、同热处理炉号的材料。
- c) 见证件的焊接材料应取自与产品焊缝所用同一炉（批）号的焊接材料。
- d) 见证件的焊前准备应与正式产品焊缝焊口准备相同。

7.9.3 见证件焊接

在质检部门监督下，由参加产品焊接的焊工或焊接操作工，采用与产品焊缝相同的位置、焊接参数、焊接工艺和相同类型的焊接设备来焊接见证件，见证件的焊后热处理应随产品焊缝同炉热处理，当有特殊困难不可能随炉焊后热处理的情况下，产品焊接见证件热处理的总的保温时间应等同于相应产品相应焊缝经历的中间热处理和最终焊后热处理全部时间的总和，并应得到设计方的认可。焊接见证件的记录内容应和焊接工艺评定中记录的内容相同。

7.9.4 见证件的记录

焊接见证件的实施过程，应采用与焊接工艺评定相同的记录方式做好记录。

7.9.5 见证件的无损检测

焊接见证件接头应经受与产品焊缝相同的无损检验，并采用相同的验收标准。

7.9.6 见证件的破坏性试验

焊接见证件应尽快完成试验，在任何情况下都应在焊接和焊后热处理完成后2个月内完成。焊接见证件的破坏性试验包含以下内容：

- a) 焊接接头的拉伸试验；
- b) 焊接接头的弯曲试验；
- c) 焊缝及热影响区应进行冲击试验；
- d) 焊缝金属的化学成分分析（提供数据）；
- e) 焊接接头的晶间腐蚀试验；
- f) 焊接接头的宏观检验；
- g) 焊接接头的微观检验。

以上试验结果应符合焊接工艺评定的相关试验要求。

7.10 试验

7.10.1 承压壳体水压试验

7.10.1.1 总体要求

- a) 控制棒驱动机构棒行程壳体和钩爪壳体在制造完成后应在最低使用温度 10℃ 以上，并以 125% 的系统设计压力进行水压试验。
- b) 棒行程壳体和钩爪壳体之间的密封焊缝焊接完成后，应对每个承压壳体部件以 125% 的系统设计压力进行水压试验。并作检漏测试，试验要求不应有泄漏。
- c) 水压试验应满足《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》及本标准的要求。
- d) 水压试验的场地应设置在制造单位的车间内，并对其进行封闭，设置非试验人员禁入的标志。
- e) 制造厂应提供并实施试验规程。
- f) 制造单位应保证水压试验系统和给水循环系统的设备齐全，性能良好，且在系统上应安装超压保护装置。

7.10.1.2 试验介质

- a) 水压试验及最终清洗用水水质应符合 NB/T 20233 A 级水要求。
- b) 试验用水水质应以正式试验充水前 24 小时内的取样分析结果为准，并提供其水质报告。

7.10.1.3 压力表

- a) 压力表应为直读式，压力表的精确度等级不宜低于 0.4 级（即基本误差±0.4%）。
- b) 水压试验用压力表使用时应处于垂直位置。

7.10.1.4 升压、降压速率

水压试验升压或降压时，应注意严格控制升、降压速率，避免升、降压速率过大损伤设备。升、降压速率不应超过1.0MPa/min。

7.10.1.5 检查

- a) 在试验前、试验中和压力降至零以后，都应进行外观检查。
- b) 在整个水压试验过程中，对水压试验压力应进行实时检查并记录。检查期间，压力应保持不变。

c) 在整个水压试验过程中，对温度进行定时监测，测量位置、时间间隔和测量的温度均应记录。

7.10.1.6 疏水及干燥

水压试验合格后，应将水排尽并根据NB/T 20233的要求对其进行清洁和烘干。

7.10.2 冷态性能试验

7.10.2.1 总体要求

冷态性能试验应在表2所示的冷态试验工况下进行。

表 2 冷态试验参数

参数	数值
水温℃	常温
水压（表压）MPa	≥ 0.5
驱动杆+控制棒组件模拟重物组合重量	设计值

7.10.2.2 机电配合性能试验

- a) 本试验在冷态运行电流实测试验的基础上，对运行电流波形中时间分配、线圈极性改变及保持钩爪的选择作探索性冷态性能测试。
- b) 测试结果经设分析后作若干组运行电流值和时序的探索性试验，最后确定冷态步跃运行试验的运行电流参数及时序要求。

7.10.2.3 最大运行步速试验

以确定的冷态试验运行电流参数逐级改变运行步速，作全程升降运行得出最大正常运行步速。以最大正常运行步速作全程升降运行五次，即测定为最大运行步速。

7.10.2.4 冷态过行程步跃试验

应进行10次过行程步跃试验。机构在过行程步跃试验过程中不应发生滑棒、掉棒等不正常的现象。

7.10.2.5 释棒、落棒试验

- a) 冷态工况下，试验应在控制棒驱动机构处于双保持状态下进行。
- b) 驱动杆全程(全高度)落棒 3 次，记录释棒、落棒时间。
- c) 要求释棒延时不大于设计参数值。

7.10.3 热态性能试验

7.10.3.1 总体要求

冷态试验完成后，应选择一定数量的控制棒驱动机构进行热态性能试验，热态性能试验应在表3所示的热态试验工况下进行。

表 3 热态试验参数

参数	数值
----	----

水温℃	设计值
水压（表压）MPa	设计值
驱动杆+控制棒组件模拟重物组合重量	设计值

7.10.3.2 热态步跃试验

- a) 热态步跃试验应在试验装置逐步升温过程中，进行上下试运行试验。运行电流参照冷态步跃试验。
- b) 分别对不带负载情况下提升磁极/动爪磁极，动爪磁极/衔铁组，定爪磁极/衔铁组的吸合及释放电流值，及带载情况下提升磁极/动爪磁极的吸合及释放电流，动爪磁极/衔铁组的释放电流、定爪磁极/衔铁组释放电流值进行实测。
- c) 热态步跃试验前也应测试检验在热态工况下的棒位精度。
- d) 热态步跃试验要求在额定热态工况下，以最大设计步速进行上升和下降的全行程动作，共 10 次。
- e) 试验要求完整记录提升、下降运行电流一时间曲线和声响信号。

7.10.3.3 热态过行程步跃试验

应在热态工况下进行 10 次过行程步跃试验。在过行程步跃试验过程中不应发生滑棒、掉棒等不正常的现象。

7.10.3.4 释棒、落棒试验

- a) 热态工况下，释棒、落棒试验应在控制棒驱动机构处于保持状态下进行。
- b) 驱动杆全程(全高度)落棒 3 次，记录释棒、落棒时间。
- c) 要求释棒延时不大于设计参数值。

7.10.3.5 步距和载荷转换试验

- a) 热态性能试验后需再次进行步距和载荷转换试验。
- b) 试验前应以最大设计步速进行上升和下降的全行程动作。
- c) 测量步距和轴向位移。
- d) 测量应在驱动杆从最低位置提升若干步后的位置进行，具体步数要与台架设计匹配。

7.10.4 钩爪部件产品试验

7.10.4.1 步距和载荷转换

- a) 钩爪部件应在常温下进行试验，以保证步距。每次测量应至少进行 5 次试验。
- b) 可以使用非正式产品的承压壳体和磁轭线圈部件对步距和载荷转换特性进行试验。
- c) 如果钩爪部件的步距或载荷转换位移不在允许范围之内，则该钩爪部件应重新组装并再次试验。在没有将不符合项通知设计方和采购方的前提下，可进行一次重新组装和试验。

7.10.4.2 步跃试验

- a) 钩爪部件应在常温条件下进行至少一次的全行程的上升和下降动作。钩爪部件应在表 3 所示的热态工况下进行至少 10 次全行程的上升和下降动作。
- b) 每个钩爪部件的步跃速度大约为最大设计步速。
- c) 试验过程中，应记录控制棒驱动机构的电流和声音的波形图。

7.10.4.3 释棒延时试验

- a) 钩爪部件应在常温条件下进行 3 次释棒试验, 实测并记录释棒延时。
- b) 每个钩爪部件应在表 3 所示的热态工况下至少进行 3 次试验, 要求释棒延时在设计参数值的范围内。
- c) 该试验应在控制棒驱动机构处于双保持状态下进行。

7.10.5 脱扣联扣试验

- a) 每个驱动杆部件应在试验台架上作与控制棒组件模拟体连接柄的啮合/脱开试验, 以验证驱动杆部件与控制棒组件连接/脱开的性能。
- b) 每个驱动杆部件应与控制棒组件模拟连接柄连接并以不小于提升负荷的载荷进行至少 15 分钟的试验。

7.10.6 磁轭线圈部件试验

测量电气参数, 确保它们在试验技术条件的限值内。完工后的工作线圈组件或磁轭线圈部件应进行下列试验:

- a) 电阻测试;
- b) 绝缘电阻测试;
- c) 冲击电压试验;
- d) 线圈极性检查。

7.10.7 试验和检验报告

制造厂应保留最终竣工图纸清单、试验及检验记录和不符合项等。所有图纸、试验及检验记录和不符合项等应保留最新版, 并且在制造周期内能在制造厂的车间内查阅。任何不满足设计要求的控制棒驱动机构的不符合项的处置方案都应提交给设计方和采购方认可

7.11 标识与标记

- a) 控制棒驱动机构制造过程及制造完成后的标识与标记应满足 GB/T 191 的要求。
- b) 零件从原材料落料开始到最终加工装配完成的整个制造过程应有唯一的识别标记, 并能正确无误地查阅到原材料、零件与组件对应标识的记录。
- c) 在零件制造过程中, 如果标记因加工被破坏或被清除, 应在该道工序完成后, 在可追溯的情况下, 立即恢复原标记。
- d) 对制造过程中的报废件应立即标上清晰的永久标记, 应与产品隔离放置。
- e) 零件的标记不应污染零件、不应产生尖锐表面以及不应改变材料成份。
- f) 不应在焊缝或热影响区进行蚀刻。
- g) 使用的蚀刻剂应进行化学分析并记录总卤素、总硫和总铅含量。

7.12 清洁、包装、运输和贮存

7.12.1 清洁

- a) 控制棒驱动机构所有部件的清洁和清洁度应满足 NB/T 20233 的相关规定。
- b) 在包装前, 所有的控制棒驱动机构部件都应进行清洁。清洁后, 钩爪部件和驱动杆部件应进行目视检测并满足清洁度分级要求, 因为组装后这些部件的内表面不应接近。
- c) 在清洁前, 制造厂应将清洁程序提交给采购方和设计方认可。

7.12.2 包装

- a) 控制棒驱动机构应按 NB/T 20408 要求中 B 级物项的要求进行包装。
- b) 在使用包装程序之前，制造厂应提交给采购方和设计方认可。
- c) 包装程序中应包括碰撞记录仪表或者加速器的安装，以测量和记录施加到控制棒驱动机构的最大加速度。
- d) 运输容器应设计为可使控制棒驱动机构部件及组件作水平方向运输。
- e) 运输容器上应清晰地标记加载后的运输容器的重量、重心和起吊点。
- f) 控制棒驱动机构运输容器应使用防潮包装，并且包装内部填充干燥剂。防潮包装内应装有湿度计，并且可从运输容器外观察到，而不需要打开容器。
- g) 含有规定禁止使用的包装材料不应与控制棒驱动机构部件和组件接触。

7.12.3 运输

- a) 控制棒驱动机构应按 NB/T 20408 的要求进行运输。
- b) 运输过程中，控制棒驱动机构应能承受运输加速度而不损坏，运输加速度数值由设备设计人员确定，并在设备规格书中体现。

7.12.4 贮存

- a) 控制棒驱动机构应按 NB/T 20408 中 B 级物项的要求进行贮存。
- b) 控制棒驱动机构部件和组件的贮存应符合贮存技术条件的要求。
- c) 在使用贮存程序之前，制造厂应提交给采购方和设计方认可。
- d) 当控制棒驱动机构的部件及组件的贮存时间超过 6 个月时，应满足以下要求：
 - 1) 控制棒驱动机构部件和组件应贮存在防火、防风雨并且通风良好的建筑物内；
 - 2) 控制棒驱动机构的贮存容器应支撑在地面以上，并能保证贮存容器间的空气流动；
 - 3) 控制棒驱动机构贮存容器应装有湿度计。湿度计应安装在防潮层内，并且能从贮存容器外部观察，而不需打开贮存容器；
 - 4) 在正常工况下，控制棒驱动机构贮存容器在设备贮存期间应保持紧闭状态以防止外物进入容器内，除非锁定装置或者锁定指示器已损坏；
 - 5) 在贮存区域内，最低温度为 4℃，最高温度为 60℃。在贮存期间应连续监测温度和湿度；
 - 6) 应定期检查和记录贮存状态以确认控制棒驱动机构贮存容器的完整。

附 录 A

(资料性附录)

压水堆核电站典型 CRDM 边界与接口

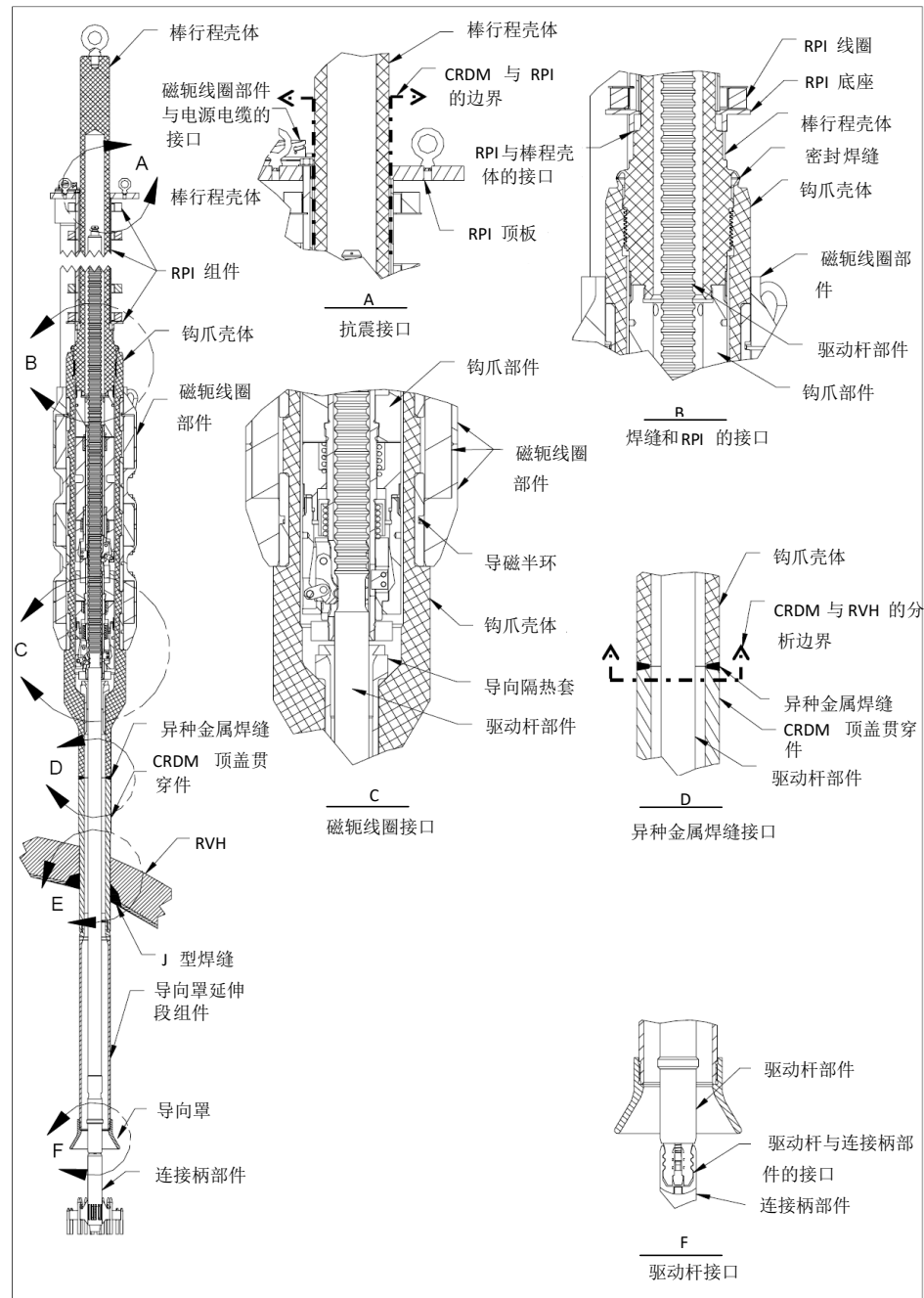


图 A.1 典型 CRDM 边界与接口

附 录 B
(资料性附录)
控制棒驱动机构载荷组合

表B. 1、B. 2给出了供参考的控制棒驱动机构载荷组合及相关载荷术语描述。

表 B. 1 控制棒驱动机构载荷组合

使用限制	载荷组合
设计	$DW + PP + RFIV + S + P$
A级	$DW + PP + RFIV + S + \text{Level A 瞬态}$
B级	$DW + PP + RFIV + S + LLSE^{(1)} + \text{Level B 瞬态}$
C级	$DW + PP + RFIV + S + \text{Level C 瞬态}$
D级	$DW + SRSS((SSE + SSES) + DBPB) + \text{Level D 瞬态}$
水压试验	$DW + HYDRO$

注：(1) LLSE只用于疲劳评定中。疲劳分析应由不小于1/3 SSE振幅的幅值进行分析。

表 B. 2 载荷术语

载荷	描述
DBPB	设计基准管道破裂
DBPBS	设计基准持续管道破裂
P	设计内压
DW	自重
HYDRO	水压试验压力
LLSE	低级别地震事件
PP	泵致振动载荷
RFIV	随机流致振动
S	步跃冲击载荷或粘棒载荷
SSE	安全停堆地震
SSES	SSE的抗震支撑点的移动
SRSS	平方和的平方根