

中国核工业勘察设计协会文件

核设协[2024]13号

关于中国核工业勘察设计协会立项的团体标准 《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制 造规范 第2部分：湿绕组主泵》 公开征求意见的通知

中国核工业勘察设计协会立项的团体标准《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第2部分：湿绕组主泵》已经完成草案编制工作。依照《中国核工业勘察设计协会团体标准管理办法》的相关规定，现面向会员单位和社会广泛征求意见。

烦请相关领域的专家查收《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第2部分：湿绕组主泵》团体标准编写说明（详见附件1）和《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第2部分：湿绕组主泵（征求意见稿）》（详见附件2），并于2024年3月28日前将《征求意见表》（详见附件3）发送至联系人邮箱。

联系人：夏雯婷，18601728100，xiawenting@snerdi.com.cn

感谢对中国核工业勘察设计协会团体标准工作的大力支持！

附件：

1. 《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第2部分：湿绕组主泵》团体标准编写说明
2. 《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第2部分：湿绕组主泵》（征求意见稿）
3. 征求意见表

中国核工业勘察设计协会

2024年2月28日

抄 送：理事长、副理事长、秘书长、副秘书长

中国核工业勘察设计协会秘书处 2024年2月28日印发

中国核工业勘察设计协会

《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范

第 2 部分：湿绕组主泵》团体标准编制说明

一、工作简况

反应堆冷却剂泵(以下简称“主泵”)是大型先进压水堆反应堆冷却剂系统(以下简称“一回路”)中唯一的旋转设备,其主要功能是驱动高温高压冷却剂在一回路内循环流动以带走堆芯热量,并在事故工况下通过非能动惰转避免堆芯过热,其稳定可靠运行对核电站安全性、经济性至关重要。主泵是大型先进压水堆技术难度最高的设备之一,其自主设计和制造是我国推进核电自主化的重点和难点。

为彻底消除轴封 LOCA 的潜在风险,国和一号采用无轴封主泵方案。同时,为突破净功率 1350MWe 以上、实现完全自主知识产权,国和一号主泵设计流量大幅提升(较 AP1000 高 21%),相应需采用全球最大功率的无轴封主泵。考虑到主泵研制的技术难度和进度风险,在压水堆核电站国家科技重大专项支持下,国和一号采取了屏蔽主泵、湿绕组主泵两种技术路线,每台泵同时配备 1 台主泵变频器。

国和一号湿绕组主泵 2012 年 3 月通过初步设计评审,2014 年 3 月通过最终设计评审,2014 年 10 月完成样机零部件制造和装配,2014 年 12 月至 2019 年初完成样机调试,2019 年 6 月至 7 月顺利完成工程及耐久试验,2019 年 7 月通过中国机械工业联合会组织的鉴定。

国和一号湿绕组主泵研制取得的关键技术主要包括全球最大功率湿

绕组主泵总体设计与应用技术、全球首台超大功率核电主泵湿绕组电机、大尺寸水润滑推力轴承及轴系分段连接设计、大功率湿绕组主泵试验验证技术等。

本标准基于“国和一号”示范项目湿绕组主泵设计制造相关技术文件进行编制，该项目湿绕组主泵已于2019年7月完成工程耐久试验，并顺利完成鉴定。随着湿绕组主泵的研制成功，业内各界尤其各核电厂业主对无轴封型湿绕组主泵倍加关注，因此有必要制定一份适用于湿绕组主泵的标准，一方面有利于完善核电站反应堆冷却剂泵选型设计，另一方面为主泵制造厂开展该类型主泵的详细设计和制造工作提供指导依据。

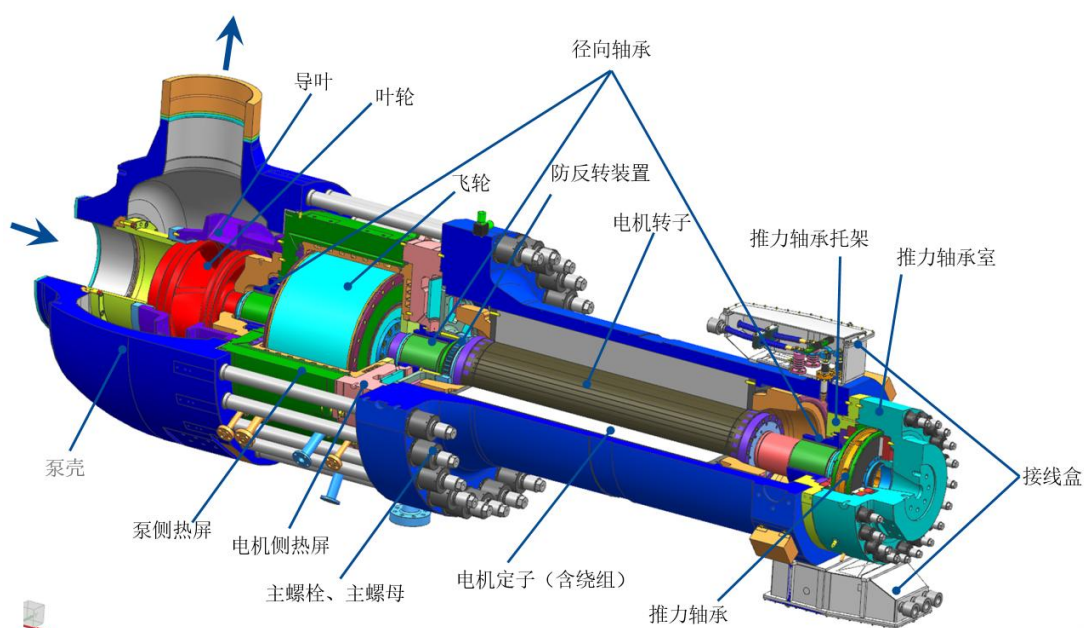


图 1 湿绕组主泵结构示意图

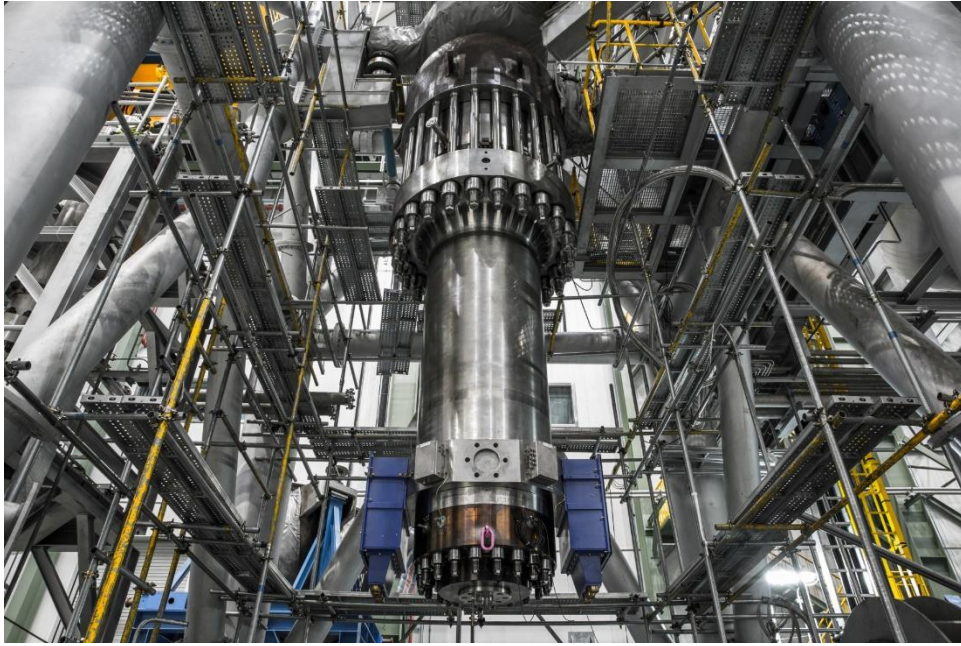


图 2 湿绕组主泵样机在试验台架上

2023 年 3 月 27 日,中国核工业勘察设计协会下达团标立项通知,上海核工程研究设计院股份有限公司(以下简称“上海核工院”)牵头,上海电气凯士比核电泵阀有限公司(以下简称“凯士比”)、国核示范电站有限责任公司(以下简称“国核示范电站”)参与,共同编制《压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第 2 部分:湿绕组主泵》团体标准。

上海核工程研究设计院股份有限公司前期对压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造的国内外发展状况进行了初步调研,并牵头制定了标准编制大纲。

2023 年 11 月 24 日,中国核工业勘察设计协会组织行业内专家进行标准编制大纲进行了评审,会议同意大纲通过评审。并提出了相关意见和建议。

主要起草人如下表 1 所示。

表 1 主要起草人

序号	姓名	编写组职务及分担的任务	所在单位
1.	钟云	负责人、主要编制人	上海核工程研究设计院股份有限公司
2.	邱健	技术顾问	上海核工程研究设计院股份有限公司
3.	周文霞	参与编写	上海核工程研究设计院股份有限公司
4.	李天斌	参与编写	上海电气凯士比核电泵阀有限公司
5.	夏迪	技术顾问	上海核工程研究设计院股份有限公司
6.	杨永华	参与编写	上海核工程研究设计院股份有限公司
7.	卢熙宁	参与编写	上海电气凯士比核电泵阀有限公司
8.	马林	参与编写	上海电气凯士比核电泵阀有限公司
9.	张龙源	参与编写	上海核工程研究设计院股份有限公司
10.	廖娟	参与编写	上海核工程研究设计院股份有限公司
11.	陆于衡	参与编写	上海核工程研究设计院股份有限公司
12.	王亚松	参与编写	国核示范电站有限责任公司
13.	刘原君	参与编写	国核示范电站有限责任公司

二、标准编制原则和主要内容

本标准编制的依据是国家现行的法规和国际、国内的标准规范和相关的科研课题成果及工程实践经验反馈等。主要参考的标准规范如下：

GB/T 1.1—2020 标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则

HAF601 民用核安全设备设计制造安装和无损检验监督管理规定

HAF602 民用核安全设备无损检验人员资格管理规定

HAF603 民用核安全设备焊接人员资格管理规定

HAF604 进口民用核安全设备监督管理规定

ASME B&PVC 核电厂部件建造规则（2007 版+2008 补遗）

规范案例 N-774 重量超过 10000lb（4540kg）并满足 SA-336/SA-336M 中第 III 卷第 1 篇核 1、2、3 级建造要求的 13Cr-4Ni

(S41500) F6NM 级锻件的使用

ASME B16.5-2009 管道法兰和法兰配件

ASME B31.1-2010 动力管道

RG 1.14-1975 反应堆冷却剂泵飞轮的完整性

RG 1.31-1978 不锈钢焊缝金属中铁素体含量的控制

RG 1.44-2011 敏化不锈钢使用的控制

RG 1.61-2007 核电厂抗震设计的阻尼值

RG 1.92-2006 地震响应分析中模态响应和空间分量的组合

RG 1.29-2007 抗震设计分级

RG 1.43-2011 低合金钢部件不锈钢堆焊层的控制

RG 1.54-2010 核电厂 I、II 和 III 级防护涂层

RG 8.8-1978 保证核电厂职业照射在合理可行尽量低的相关资料

RG 8.19-1979 轻水堆核电厂设计阶段职业辐照剂量评价一人-雷姆估算

NUREG-0800-2007 标准审查大纲 5.4.1.1 节泵飞轮完整性 (PWR)

NUREG-0612-1980 核电站重载的控制

NUREG-0800-2007 标准审查大纲 3.6.2 节假设管道破裂后破裂位置和动态效应的确定

TEMA-2007 管式换热器制造商协会标准

ASTM B 777 钨基高密度金属的技术条件

ASTM C 1055 加热系统表面产生接触烧伤条件的标准导则

ASTM A20/A20M 压力容器用钢板一般要求的标准技术条件

ASTM A516/A516M 中温及低温压力容器用碳素钢板标准技术条件

ASTM A350/A350M-2004a 要求冲击韧性试验的管件用碳钢及低合金钢锻件标准技术条件

ASTM A105/A105M-2011a 管道用碳钢锻件标准技术条件

ASTM A564/A564M-2013 热轧及冷精轧时效硬化处理过的不锈钢棒材和型材标准技术条件

ASTM A693 沉淀硬化不锈钢和耐热钢板、薄板和钢带标准技术条件

ASTM A705/A705M 时效硬化的不锈钢锻件标准技术条件

IEC 60034-1-2010 旋转电机一定额和性能

IEEE 323-2003 核电厂 1E 级电气设备的鉴定

IEEE 344-2004 核电厂 1E 级设备抗震鉴定的推荐实施方法

IEEE 334-2006 核电厂连续运行的 1E 级电机鉴定

IEEE 383-1974 核电厂安全级电缆、现场接头和连接件的型式试验

HI 美国水力学会标准-离心泵部分

本标准主要内容包括如下章节。

(1) 范围

规定了本标准的适用范围。

(2) 规范性引用文件

规定了引用的规范及标准。尽量采用国内标准。

(3) 术语和定义

规定了标准中的相关专业名词及术语。

(4) 总体设计要求

规定了部件分级、设计要求、环境条件和瞬态、载荷和抗震要求、电气设计要求、关键部件要求（如：绕组、推力轴承）、接口要求（包括设计边界、保温要求、外形尺寸要求等）。

(5) 材料

规定了承压边界、非承压边界、飞轮材料以及与反应堆冷却剂接触的材料等要求。

(6) 制造

规定了制造、焊接、涂漆、清洗、无损检验和标记要求。

(7) 试验/鉴定

规定了部件试验（如水力试验、水压试验等）、样机（型式）试验（包括性能试验、耐久试验）、产品试验的要求。明确试验验收准则。包括试验台架要求。

(8) 质量保证和文件

规定了质量保证要求，以及需要正式发布的文件、图纸和设计报告的要求。

(9) 包装、运输和维护

规定了包装、运输、清洁、拆卸和维护要求（包括水质和保养等）。

三、主要试验（或验证）情况

标准在编制过程中依托了上海核工院的基于“国和一号”示范项目湿绕组主泵设计制造工作，该项目湿绕组主泵已于 2019 年 7 月完成工程耐久试验，并顺利完成鉴定，相关工艺研究及数据为本标准的编制提供了依据及支撑。

四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵相关专利的权利要求和具体内容。

五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

目前我国在反应堆冷却剂泵方面已有轴密封型主泵机组可执行的设计制造规范（NB/T 20269-2014），但无轴封主泵机组设计制造尚无可执行的相关标准。本标准批准发布后，经宣贯、实施，预期将支撑我国压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计及制造，填补我国在核电领域关键设备标准的空白，为指导和规范我国压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵的设计、制造提供了技术支持。

六、与国际、国外标准对比情况

目前国际上尚无适用压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵标准。

七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的

协调性

本标准是核工业材料标准的一部分，标准均引用了国内相关检验和检测标准，做到了与国内现行相关法律、法规、规章及相关标准的兼容性和一致性。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准编制过程中未出现重大分歧意见。

九、标准性质的建议说明

标准为自愿性标准。经实施效果良好，且符合国家标准、行业标准制订要求的情况下可申请转化为国家标准或行业标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

标准经批准后，由团标办公室统一编号、协会发布，并在协会网站和全国团体标准信息平台上公布。标准为自愿性标准，协会会员单位及其他有关单位可自愿采用。

十一、废止现行相关标准的建议

标准为首次制订，故没有需要废止的现行标准。

十二、必要专利信息披露情况说明

标准中不存在涉及必要专利信息。

十三、其他应予说明的事项

无其他应予以说明的事项。

《压水堆核电站无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第2部分：

湿绕组主泵》编写组

2024年1月22日

团 体 标 准

T/CNIDA XXXXX—XXXX

压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计 制造规范 第2部分：湿绕组主泵

Design and fabrication specification for sealless reactor coolant pump of pressurized
water reactor nuclear power plant Part 2: wet winding motor pump

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国核工业勘察设计协会

发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 缩略语	2
4 总体设计要求	3
4.1 总则	3
4.2 部件分级	3
4.3 设计要求	3
4.4 环境条件和瞬态	12
4.5 载荷和抗震要求	14
4.6 电气设计要求	14
4.7 接口要求	15
5 材料	16
5.1 承压边界材料	16
5.2 非承压边界材料	17
5.3 飞轮材料	17
5.4 与反应堆冷却剂接触的材料	17
5.5 其它材料要求	17
6 制造	17
6.1 制造	17
6.2 焊接	18
6.3 涂漆	20
6.4 清洗	20
6.5 无损检验	20
6.6 标记	21
7 试验/鉴定	22
7.1 部件试验	22
7.2 型式（样机）试验	22
7.3 产品试验	22
8 质量保证和文件	23
8.1 质量保证	23
8.2 文件	24

9 包装、运输和维护	25
9.1 清洁要求	25
9.2 主泵的拆卸	25
9.3 不拆芯包的情况下拆装推力轴承	25
9.4 包装和装箱	26
9.5 吊运	26
9.6 特殊运输要求	26
参考文献	27

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

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。

本文件由中国核工业勘察设计协会提出并归口。

本文件起草单位：上海核工程研究设计院股份有限公司、上海电气凯士比核电泵阀有限公司、国核示范电站有限责任公司。

本文件主要起草人：钟云、邱健、周文霞、李天斌、夏迪、杨永华、卢熙宁、马林、张龙源、廖娟、陆于衡、王亚松、刘原君。

压水堆核电厂无轴封反应堆冷却剂泵设计制造规范 第2部分：湿绕组主泵

1 范围

本文件规定了用于循环高温高压反应堆冷却剂以冷却和提取堆芯部热量的湿绕组主泵（以下简称“主泵”）的核电厂总体设计技术要求，包括系统功能、设计分析、载荷和抗震、系统瞬态、电气设计、外形包络、材料、文件等要求）。

本文件适用于循环高温高压反应堆冷却剂以冷却和提取堆芯部热量的湿绕组主泵。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

- HAF003 核电厂质量保证安全规定
- HAF602 民用核安全设备无损检验人员资格管理规定
- HAF603 民用核安全设备焊接人员资格管理规定
- HAF604 进口民用核安全设备监督管理规定
- ASME B&PVC 核电厂部件建造规则
- ASME B16.5 管道法兰和法兰配件
- ASME B31.1 动力管道
- ASTM B 777 钨基高密度金属的技术条件
- ASTM C 1055 加热系统表面产生接触烧伤条件的标准导则
- AWS A2.4 焊接、钎焊和无损检验的标准符号
- IEEE 323 核电厂1E级电气设备的鉴定
- IEEE 344 核电厂1E级设备抗震鉴定的推荐实施方法
- IEEE 603 核电厂安全系统准则
- NUREG-0612 核电站重载的控制
- RG 1.14 反应堆冷却剂泵飞轮的完整性
- RG 1.44 敏化不锈钢使用的控制
- RG 1.61 核电厂抗震设计的阻尼值
- RG 1.92 地震响应分析中模态响应和空间分量的组合
- TEMA 管式换热器制造商协会标准

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

正常工况 Normal condition

正常电厂运行期间的工况。按照ASME B&PVC要求，是那些指定为A级使用限制的工况。

3.1.2

额定工况 Nominal condition

被认为是基准值的那些额定值或工况。基准值或基准工况可以规定其误差、不确定或偏差。

3.1.3

湿绕组主泵 Wet winding motor reactor coolant pump

为一种无轴封离心泵，其设计不采用动压轴密封作为一回路水封严装置。泵的驱动轴完全包容在输送液体的压力容器内。该压力容器采用静密封。无轴封泵的另一种结构型式为屏蔽泵，与屏蔽泵最大的不同是，湿绕组主泵的绕组线直接与电机内部冷却水接触。

3.2 缩略语

ADS	自动降压系统
ALARA	合理可行尽量低
ASME	美国机械工程师学会
ASTM	美国试验和材料协会
AWS	美国焊接协会
B&PV	锅炉与压力容器
CMTR	材料鉴定试验报告
DBPB	设计基准管道破裂，包括 LOCA 和非 LOCA（瞬态）
DBPBS	设计基准管道破裂设计基准，包括 LOCA 和非 LOCA（瞬态）
DE	与紧急工况相应的动载荷（瞬态）
DF	与事故工况期间和以后相应的动载荷（瞬态）。经评估的管道系统必需保持完整性。它应包括假定的管道断裂事故（瞬态）
DML	设计机械载荷（静重除外），包括主泵运行时产生的振动载荷
DN	与正常工况相应的动载荷，包括 FV、RVC 和 RVOT（瞬态）
DU	与异常工况相应的动载荷（瞬态）
DW	自重
DY	与各种工况相应的动载荷（瞬态）
DYS	与各种工况相应的动载荷（稳态）
FWLB	给水管道的破裂
FV	阀门快关
HTDW	水压试验自重
HYDSP	由自动降压系统鼓泡器排放引起的厂房结构运动
IEEE	电气和电子工程师协会
ISI	在役检查

LOCA	失水事故
MT	磁粉检验
NDE	无损检验
NDT	无延塑性转变（脆性转变）
NPS	名义管道尺寸
NPSHa	可用净正吸入压头
NPSHr	必需净正吸入压头
P _{MAX}	峰值压力
PPM	百万分之一
PT	液体渗透检验
RCS	反应堆冷却剂系统
RTD	电阻温度计
RT	射线检验
RVC	卸压/安全阀 – 闭式系统（瞬态）
RVOS	卸压/安全阀 – 开式系统（持续）
RVOT	卸压/安全阀 – 开式系统（瞬态）
SMAW	手工电弧焊
SRSS	平方和开方
SSE	安全停堆地震（惯性）
SSES	SSE 的锚固点地震运动部分
SWE	自重的激励，由厂房过滤的载荷如 SSE 引起的支承质量加速的效应
TH	各种工况的热载荷
UT	超声波检验
VFD	变频器
VMS	振动监测系统
XL	外部机械载荷（例如与管道系统相连的接管嘴反作用力）应与载荷组合计算公式中其它载荷组合在一起。包括相连的管道产生的热载荷
XLPE	辐照交联聚乙烯

4 总体设计要求

4.1 总则

主泵系立式、单级、无轴封、高惯量离心泵，其电机和所有转动部件均包含在同一个压力容器内。该压力容器由泵壳、热屏、电机壳、轴承支架、推力轴承箱、包容一回路冷却剂的管道和法兰、必要的承压螺栓或螺母、外置热交换器管侧组成，并按反应堆冷却剂全压力设计。驱动电机系立式、水冷式感应电动机，它可从泵壳内取出，进行维修和更换。水润滑轴承、热屏区域和电机的热量通过设备冷却水带走。转子组件由电机内水润滑轴承支承。主泵机组上方为垂直进口，水平径向出口，电机位于泵机组下方。设计使得必要时可从泵壳上拆卸泵内部组件，以便检查轴承组件和其它内部部件。

主泵与蒸汽发生器连成一体，并由蒸汽发生器支承。主泵应按主系统要求的参数设计。主泵热交换器（一次侧）及其管道和法兰的运行温度低于 RCS 运行温度，因此可采用不同的设计温度，其设计工况由主泵供应商根据 ASME B&PVC-III 的详细计算而定。

4.2 部件分级

主泵部件分级应满足 ASME B&PVC 规范要求。

4.3 设计要求

4.3.1 设计基础

4.3.1.1 主泵一次侧压力边界部件应满足 ASME B&PVC-III NB 1 级部件的要求,这些部件应按 ASME B&PVC-III NB 3400 进行设计、分析和试验。

4.3.1.2 进行设计分析时应包括外部载荷。

4.3.1.3 主泵的外形尺寸不应大于厂房隔间规定的包络尺寸。

4.3.2 运行和性能要求

主泵设计参数应根据核电厂和主系统的参数而定。

设计流量下的扬程应在设计扬程 $\pm 2\%$ 的范围内。

NPSHr 应不大于二分之一的 NPSHa (NPSHa 值根据核电厂和主系统的参数而定),以便留有裕量满足长期运行。最小 NPSHr 按扬程下降 3%来确定。

4.3.3 机械设计要求

4.3.3.1 设计寿命

主泵的设计基准寿命为 60 年(包括轴承),该设计寿命用于确定腐蚀余量和部件磨损量、计算循环疲劳,以进一步确定为实现主泵 60 年设计基准寿命所必需的检验和维修要求(包括必要时的更换)。但不应作为保证 60 年实际寿命的依据。

4.3.3.2 设计温度和压力

主泵结构设计的设计压力和设计温度根据核电厂和主系统的参数。该值应与外部压力和温度值组合使用。

4.3.3.3 泵的启动

主泵应能经受在机组寿期内的启动-停车循环次数。启动-停车循环期间反应堆冷却剂系统的工况由电厂确定。

当一台或多台主泵运行在启动转速时,其他主泵应能用变频器启动,而不对泵或电机产生有害影响。

4.3.3.4 进口压力

主泵应在所有 NPSHa 工况下能正常运行。泵能够运行不会导致汽蚀损害的泵最小安全进口压力是泵转速和反应堆冷却剂系统温度的函数。应提供主泵各许用运行转速并提供各转速下的泵最小安全进口压力。

4.3.3.5 惰转

断电时,主泵应可以非能动惰转,整个主泵转子的极惯量应能确保惰转流量满足归一化流量要求。

在直至 SSE 加速度的地震事件的情况下,主泵也应满足惰转流量要求。主泵设计者应证明转子不会超过挠度限值、轴承载荷限值和其它限值,确保在 SSE 事件下仍能维持规定的惰转流量。

4.3.3.6 流量-扬程

除非证明不需要主泵在水力不稳定区域运行，流量-扬程曲线从设计点到关闭点应连续上升至至少10%。

4.3.3.7 互换性

除特殊情况外，主泵均应设计和制造成所有零部件可以在任何一个核电厂所有的主泵之间互换。

4.3.3.8 吊耳

应按 NUREG-0612 第 5.1.6 (3) 节要求，设计用于在安全壳内起吊可拆卸泵组件的吊耳；吊耳设计应基于最大的静、动组合载荷，其中动载荷应考虑为最大起吊载荷的 15%。

4.3.3.9 辅助管道法兰

辅助管道法兰应是不锈钢、突面、带颈对焊法兰，制造按照 ASME B16.5。禁止采用螺纹连接。

主泵机组所有连接辅助系统管道的辅助管道法兰连接和相应的管道均需进行分析。该分析得到的应力应满足 ASME B&PVC 中相应 ASME 等级的要求。表 1 列出了 ASME-III 运行工况、使用限制和 ASME B&PVC-VIII 运行工况之间的关系。

表 1 ASME-III 运行工况、使用限制和 ASME B&PVC-VIII 运行工况之间的关系

ASME-III 运行工况	ASME-III 使用限制	ASME-VIII 运行工况
设计	设计	设计
正常	A级	设计
异常	B级	地震和风
紧急	C级	无
事故	D级	使用ASME-III-D级 ⁽¹⁾

注：按照ASME B&PVC-VIII-1 附录H“考虑由爆燃过程产生的载荷的导则”中规定，ASME B&PVC-VIII对类似爆燃事件未提供容许的应力准则，其中仅要求压力容器的残存物不破裂。附录H引用了ASME B&PVC-III NB 中的D级使用限值的准则，适用于这种案例的分析。附录H还指出材料的选择应不会由于脆性断裂而破坏，并且避免应力集中，这对开展承受上述类型的载荷设计是必要的。本文件应使用包括ASME B&PVC-VIII 压力容器规定事故工况规定的评定相同的导则。

4.3.3.10 一次侧管道法兰

外置热换热器与泵连接的一次侧管道和管道法兰应是不锈钢材料，并需进行应力分析，证明其应力满足 ASME B&PVC-III 的要求。管道布置应尽可能减少管道的焊缝数目，使在役检验工作最少。

4.3.3.11 振动监测和限值

主泵设置了三向振动监测系统以连续监测泵的结构振动。振动限值应考虑振动对轴承寿命影响的评估。应采用 10~1000Hz 滤波后振动水平进行评价，根据主泵在核电站实际运行情况，必要时需调整滤波频率，以滤除回路低频振动对主泵自身振动的干扰。可根据首台泵试验和现场启动试验结果修改振动限值。

4.3.3.12 泵的泄漏探测

热交换器和泵内冷却水流动道接管的垫片连接处不要求泄漏探测。

4.3.3.13 螺纹紧固件锁紧和防松装置

4.3.3.13.1 螺纹紧固件应在下列情况下加装锁紧装置：

- a) 当螺纹紧固件易受变化载荷影响，且该变化载荷与螺纹紧固件最小预紧力相比较小时，尤其当螺纹紧固件或其连接零部件的微小变形会导致预紧力消失时；
- b) 当螺纹紧固件不能承受较大预载时（即使其工作载荷很小）。

4.3.3.13.2 ；注明的锁紧位置，应符合以下要求，且应使用被证明为与使用环境相容的材料

- a) 锁紧方式应已被证明可满足相同的工况（例如载荷、环境、尺寸和外形）；
- b) 如锁紧需塑性变形，应将其总量控制在与材料的延性相一致；
- c) 锁紧装置的任何零部件均不应存在较大振动；
- d) 锁紧需要最低工艺技能要求；
- e) 锁紧应易于检查且可以在不需要拆卸的情况下验证安装正确性检查；
- f) 锁紧的细节和方法应完整地记录于适当文件中（图纸或工艺）。现场或车间装配人员不得更改规定的锁紧方式。

4.3.3.13.3 如螺纹紧固件承载部分的失效将产生严重威胁到其它设备的松动件，并将进一步导致严重的人体伤害、额外的停堆或昂贵的修复代价，其锁紧方法和结构应能将损坏的紧固件保留于原位置而不脱落出来影响主泵其他部件。

4.3.3.13.4 当使用焊接作为锁紧或防松措施，应满足以下要求：

- a) 焊接的尺寸、位置、焊接工艺和检查应完整地规定于适用文件中（图纸或工艺）；
- b) 焊接应按结构焊缝要求进行，例如，应由经鉴定合格的焊工按合格的工艺进行，完成后的焊缝应采用适当的检查方法；
- c) 连接和紧固件设计应考虑到焊接操作时加热对连接材料和其预紧的影响。

4.3.3.14 轴承

轴承应为流体动压液膜设计。轴承冷却/电机冷却措施应包括一个温度监测系统，该温度监测系统应连续运行，且每台泵至少应备有 4 个冗余的指示器。

在丧失外部冷却水后，当轴承水温/电机水温上升到轴承损坏的最高限值或丧失惰转能力时，主泵将脱扣并停止运行。要规定泵运行期间轴承水温的最高限值，以及正常范围以上和最高限值以下泵还可连续运行的报警温度。

4.3.3.15 转子组件动力学

泵和电机的转子组件应进行动力特性分析，包括自振频率、稳定性和正常运行载荷下的强迫响应以及与转子质量相关的若干假想事故工况的强迫响应（卡转子，125%超速）。

主泵转子组件的阻尼自振频率应大于 120%的工作转速，除非阻尼足以防止对转子组件的不利影响。应进行响应分析以评估阻尼的影响。

应分析泵转子和静止部件对内、外强制函数的响应。

应分析转子组件，包括叶轮、辅助叶轮、转子、转子保护套、推力盘等，可能产生潜在飞射物的评估。

4.3.3.16 卡转子

主泵应对叶轮吸入异物引起转子组件快速停车从而导致主泵部件机械损伤/失效的假想事件进行分析。该分析预测任何引起主泵组件损坏的位置，评估传递到主泵压力边界上的各种载荷，以及按照 ASME

B&PVC-III D级使用限制分析卡转子的主泵承压部件。卡转子的动载荷考虑相应载荷组合为 $P_{MAX}+DW+DF+XL$ ，即表2中事故工况载荷的第一行。由于卡转子动态载荷峰值持续时间短（小于一秒），载荷中 P_{MAX} 项应采用100%功率压力，且 XL 项应包括热态正常运行接管载荷（包括净重）和100%功率压力接管载荷。对于卡转子状态的主泵，安全相关的非承压边界部件不需要满足表4和表5的要求。

将SSE载荷替换为卡转子载荷，并采用上述热态正常运行接管载荷，也可用表2中事故工况载荷的第二行和第四行载荷组合对卡转子动态载荷进行分析。

应分析剩余3个未卡转子的主泵，以证明未卡住的主泵压力边界满足ASME B&PVC-III B级使用限值和安全的非压力边界部件满足表4和表5的B级使用限值。在这些情况下，卡转子的动载荷应视为DU载荷。系统中的水动力载荷可忽略不计。

由此产生的主泵压力边界应力强度不得超过ASME B&PVC-III NB-3400中规定的限制。用于评估等级D级工况的规则见ASME B&PVC-III附录F。只有适用于弹性系统分析的应力极限才可用于主泵外部荷载分析。

应使用表3中给出的荷载要求（卡转子主泵D级，非卡转子的B级）分析归类为ASME B&PVC-III NF的主泵组件的结构支承。这些支承应满足ASME B&PVC-III NF的所有适用要求。

表2 ASME-1、2和3级系统和部件的最小载荷组合⁽⁵⁾

工况	载荷组合
设计	$P + DW + DML + XL$ （进一步解释见注（11））
正常	$P_{MAX}^{(1)} + DW + XL^{(4)}$ （进一步解释见注（12）） $P_{MAX} + DW + DN^{(21)} + XL^{(7)}$ （进一步解释见注（13））
异常	$P_{MAX} + DW + DU^{(21)} + XL^{(7)}$ （进一步解释见注（14））
危急	$P_{MAX} + DW + DE^{(21)} + XL^{(7)}$ （进一步解释见注（15）） $P_{MAX} + DW + DY^{(21)} + HYDSP^{(21)} + XL^{(8)}$ （进一步解释见注（16））
事故	$P_{MAX} + DW + DF^{(21)} + XL^{(7)}$ （进一步解释见注（17）） $P_{MAX} + DW + SRSS^{(2)}$ （（SSE + SSES） + DBPB ⁽²²⁾ ） ⁽⁶⁾ + $XL^{(4)}$ （见注（18）） $P_{MAX} + DW + RVOS^{(21)} + SRSS$ （SSE + SSES） ⁽⁶⁾ + $XL^{(10)}$ （见注（19）） $P_{MAX} + DW + DYS^{(21)} + DBPBS^{(22)} + SRSS$ （（SSE + SSES） ⁽⁶⁾ + DY + HYDSP） + $XL^{(8)}$ ⁽⁹⁾ （进一步解释见注（20））
<p>注1：当设计瞬态中规定时，载荷组合中P_{MAX}值对各种级别工况可以是不同的。对地震载荷，P_{MAX}等于100%功率下的正常运行压力。对列出的所有组合还没有规定P_{MAX}，但相当于与组合相符的压力。为了达到分析目的，P_{MAX}载荷可以通过与组合相符的压力与100%功率压力之比乘以100%功率压力的计算得到。</p> <p>注2：SRSS - 平方和开方。</p> <p>注3：对于ASME B&PVC-III 2级和3级系统，应考虑钢制安全壳容器静位移和厂房沉降引起相关的载荷，并将它们纳入载荷组合的计算公式中。</p> <p>注4：在组合载荷时，应考虑在P_{MAX}和XL之间存在的时间和因果关系（timing and casual relationships），以确定适当载荷组合。</p> <p>注5：各种载荷说明，见第3章。</p> <p>注6：对于作为管道系统锚固点的部件，例如设备接管嘴，SSE和SSES是按绝对值之和组合。对于其它部件，例如直管、三通和阀门，SSE和SSES应按平方和开方法组合。</p> <p>注7：在组合载荷时，应考虑在P_{MAX}、DN、DU、DE、DF和XL之间存在的时间和因果关系的，以确定适当载荷组合。</p> <p>注8：在组合载荷时，应考虑在P_{MAX}、DY、$HYDSP$和XL之间存在的时间和因果关系，以确定适当载荷组合。</p> <p>注9：在组合载荷时，应考虑在P_{MAX}、DY、SSE和XL之间存在的时间和因果关系，以确定适当载荷组合。</p>	

- 注10: 在组合载荷时, 应考虑在 P_{MAX} 、RVOS、SSE和XL之间存在的时间和因果关系, 以确定适当载荷组合。
- 注11: 使用设计压力P。DML可以包括正常振动载荷/厂房沉降。DML载荷还没有规定, 在规定以前, 应使用10%的SSE作为DML载荷, 以覆盖正常振动载荷和其它仍未确定的载荷。如果振动分析表明10%的SSE不能满足要求, 则应补充分析说明。在NB-3227.5补强范围内的接管嘴过渡段, 设计使用限制级中的XL必需包括来自连接管道的正常工况热载荷。
- 注12: 额定100%功率运行工况的压力和热载荷 (XL)。
- 注13: 与最大的正常工况载荷相符的压力、温度 (XL) 和正常动载荷。
- 注14: DU是异常工况的动载荷 (适用时); XL是异常工况的最大热载荷。
- 注15: DE是危急工况的动载荷 (适用时); XL是危急工况的最大热载荷。
- 注16: DY、HYDSP和XL (热载荷) 是ADS 鼓泡器排放相应的载荷。
- 注17: DF是与事故工况热载荷 (XL) 相应的某些事故工况的其它动载荷 (除SSE 或 DBPB外)。如果无其它事故工况动载荷, 则评定无动载荷的事故热载荷。
- 注18: 这种情况使用正常运行的热载荷为XL。
- 注19: 对这种情况, 使用与RVOS工况相应的XL为热载荷。
- 注20: 这种情况使用与长期稳态管道破裂工况相应的热载荷作为XL。
- 注21: 载荷尚未规定。对于反应堆冷却剂泵, 这些载荷可以忽略并不需要评定。
- 注22: DBPB载荷考虑为LOCA和FWLB动载荷。DBPBS载荷考虑为FWLB持续载荷。

表 3 ASME NF 级设备支承件的最小载荷组合⁽³⁾

工况	载荷组合
设计	DW + DML
正常	DW + TH + DN ⁽⁴⁾
异常	DW + TH + DU ⁽⁴⁾
危急	DW + TH + DE ⁽⁴⁾ DW + TH + DY + HYDSP ⁽⁶⁾
事故	DW + TH + RVOS + SSE + SSES + SWE ^{(5) (7)} DW + TH + DF ⁽⁴⁾ DW + TH + SRSS (DBPB) + (SSE + SSES + SWE) ⁽⁵⁾ DW + TH + DYS + DBPBS + SRSS ((SSE + SSES + SWE) ⁽⁵⁾ + DY + HYDSP) ^{(6) (8)}
水压试验	HTDW
<p>注1: SRSS -平方和开方。</p> <p>注2: 对于ASME B&PVC-III 2级和3级系统, 应考虑钢制安全壳容器静位移和厂房沉降引起相关载荷, 并将它们纳入载荷组的计算公式中。</p> <p>注3: 各种载荷的说明, 见第3章。</p> <p>注4: 应考虑在TH和DY之间存在的时间和因果关系, 以确定适当载荷组合。</p> <p>注5: 采用绝对值之和的方法组合SSE、SSES和SWE。SWE是自重的激励, 它是由厂房过滤的载荷如SSE引起支承质量加速的效应。</p> <p>注6: 在组合载荷时, 应考虑在TH、DY 和HYDSP之间存在的时间和因果关系, 以确定适当载荷组合。</p> <p>注7: 在组合载荷时, 应考虑在TH 和RVOS之间存在的时间和因果关系, 以确定适当载荷组合。</p> <p>注8: 在组合载荷时, 应考虑在TH 和DYTH之间存在的时间和因果关系, 以确定适当载荷组合。</p>	

表 4 安全有关的非承压部件的验收准则（紧固件除外）

工况	载荷组合	验收准则	
设计	静重 + 压力 + 超速	一次膜应力 (P_m) $P_m < S_m$	膜应力 + 弯曲应力 ($P_m + P_b$) $P_m + P_b < 1.5 S_m$
		平均支承应力 $\sigma_b < S_y$	
		平均一次剪切应力 $\tau_{avg} < 0.6 (S_m)$	
B级	DW+P+DU	一次膜应力 (P_m) $P_m < S_m$	
		平均支承应力 $\sigma_b < (S_y)$	
		平均一次剪切应力 $\tau_{avg} < 0.6 (S_m)$	
事故	静重 + 压力 + SSE DW+P+LOCA	一次膜应力 (P_m) $P_m < 2.4 (S_m)$ 和 $0.7 (S_u)$ 中较小值。	膜应力 + 弯曲应力 ($P_m + P_b$) $< 150\% P_m$ 限值
		平均支承应力 $\sigma_b < 2 (S_y)$	
		平均一次剪切应力 $\tau_{avg} < 1.2 (S_m)$	
注：取部件在运行温度下的 S_m 、 S_y 和 S_u 的值。			

表 5 安全有关的非承压紧固件的验收准则

工况	载荷组合	验收准则
设计	静重 + 压力 + 超速	一次应力 (P_m) 螺柱或螺纹 $P_m < S_m$; 横断螺纹的剪切应力 $< 0.6 (S_m)$ 。
		平均一次膜应力 + 二次膜应力包括预紧应力 $P_m + Q_m < 0.9 (S_y)$ 和 $2/3 (S_u)$ 中较小值; 横断螺纹的剪切应力 $< 0.6 (S_m)$; 紧固件头部的支承应力 $< 2.7 (S_y)$ 。
		一次膜应力和弯曲应力 + 二次膜应力和弯曲应力 $P_m + Q_m + P_b + Q_b < 1.2 (S_y)$ 和 $8/9 (S_u)$ 中较小值。
B级	DW+P+DU	一次应力 $P_m < S_m$ 光轴或螺纹 螺纹间剪应力 $< 0.6(S_m)$
		平均一次膜应力+ 二次膜应力包括预紧应力

		$P_m + Q_m < 0.9(S_y)$ 和 $2/3(S_u)$ 较小值 螺纹间剪应力 $< 0.6(S_y)$ 紧固件头部的支承应力 $< 2.7(S_y)$	
		一次膜应力和弯曲应力 + 二次膜应力和弯曲应力 $P_m + Q_m + P_b + Q_b < 1.2(S_y)$ 和 $8/9(S_u)$ 较小值	
事故	静重 + 压力 + SSE DW+P+FWLB DW+P+LOCA	紧固件 $S_u < 690 \text{ MPa}$ (100 ksi)	紧固件 $S_u > 690 \text{ MPa}$ (100 ksi)
		平均拉伸应力 (σ) $\sigma < 0.7(S_u)$ 和 S_y 中较小值。	一次膜应力 $P_m < 2(S_m)$ 。
		平均螺栓剪切应力 (τ) $\tau < 0.42(S_u)$ 和 $0.6(S_y)$ 中较小值。	膜应力 + 弯曲应力 ($P_m + P_b$) $< 3(S_m)$ 。
		组合的拉伸力和剪切力 $f_t^2/F_{tb}^2 + f_v^2/F_{tb}^2 < 1$	组合的拉伸力和剪切力 $f_t^2/F_{tb}^2 + f_v^2/F_{tb}^2 < 1$
注：取部件在运行温度下的 S_m 、 S_y 和 S_u 的值。			

4.3.3.17 充排水管嘴

主泵应提供充排水管嘴，向主泵充水到泵壳出口管嘴的高度（不向反应堆冷却剂回路充水），同时还可以通过该管嘴排出主泵内的残留水。

4.3.3.18 外置热交换器排气管嘴

应为外置热交换器管侧、连接外置热交换器及主泵电机的管道设置排气管嘴。

4.3.4 飞轮设计要求

4.3.4.1 飞轮设计准则

主泵电机飞轮应符合下列准则：

- 飞轮应按本文件的非规范级部件要求设计。
- 飞轮的设计转速应为 125 % 电机同步转速。设计转速包络了所有预期的超速工况。正常转速下，飞轮计算的最大一次应力应小于最小屈服强度的 1/3。设计转速下，飞轮计算的最大一次应力应小于最小屈服强度的 2/3。
- 正常转速和设计转速下，焊缝处和飞轮包壳部件的应力应在 ASME B&PVC NG 的准则范围内。
- 为评估飞轮设计，应对飞轮做延性破坏、非延性破坏和过度变形的失效模式分析。该分析确定的这些失效模式下的飞轮临界断裂转速均应大于设计转速。

4.3.4.2 飞轮完整性

主泵飞轮组件的设计、制造和检验应使得其产生高能碎片（飞射物）的可能性降至最低。应对主泵飞轮和压力边界进行分析，证明断裂的飞轮不可能穿透反应堆冷却剂泵压力边界从而影响主泵周围安全有关系统或部件的运行。假如可以证明飞轮碎片能被周围材料包裹起来不会对压力边界造成破坏，飞轮组件定期在役检查可以省略。

4.3.5 主泵仪表

4.3.5.1 安全有关仪表

下列安装在泵上的仪表属 1E 级仪表，必须满足 IEEE 603、IEEE323 和 IEEE344 的准则要求。

4.3.5.1.1 泵轴转速

每台主泵应至少设置一个安全有关的泵轴转速传感器。这些传感器为主泵低转速时反应堆紧急停堆提供输入信号。该系统应连续运行，每台泵设有一个独立的泵轴转速传感器。转速传感器应靠近泵轴的转速传感器触发装置。应提供 3 个套管，其中 1 个用于转速传感器、1 个用于参考相位传感器、1 个作为备用。如转速和参考相位传感器套管类型不同，备用套管采用转速传感器套管型式。

应在主泵机组上提供转速传感器接线盒。接线盒应密封，以满足本文件 4.4.4 水淹要求。接线盒内不需设置硬件或端子板，也不需要开孔（开孔将在现场完成），并保证其满足水淹事件要求。接线盒应按抗震 I 类要求安装，并能承受任一方向上 1100N 载荷。

4.3.5.1.2 轴承水温

每台主泵应设置 4 个冗余电阻温度计（RTD）安装在套管内，用以监测主泵的轴承水温。这些温度计应是 4 线制的铂电阻温度计，0°C 时电阻值为 100 Ω。供方应规定轴承水电阻温度计的精度，并推荐轴承水温电阻温度计报警和停机设定值。

4.3.5.2 非安全有关仪表

4.3.5.2.1 主泵电机温度

每台主泵电机应监测温度以保护电机。泵供方应推荐主泵电机温度监测方案及相应报警值。

4.3.5.2.2 连续振动监测

主泵应配备三向振动监测系统（VMS），共使用 5 个振动传感器。分别在轴向的两个水平面上设置两个传感器（互为 90°），在泵轴线方向（垂直）设置一个传感器。该系统应能探测主泵的异常运行并且响应时间可以允许控制室操作人员手动安全停泵。

振动监测系统的仪表还应包括 1 个参考相位传感器，用来解释振动测量。供方应提供一个安装在泵轴上的参考相位传感器触发装置，为参考相位传感器提供信号。

4.3.5.2.3 松动部件监测系统

应提供 2 个加速度传感器安装垫块，供安装松动部件监测系统之用。

4.3.6 管道破裂分析

管道破裂载荷的基础为不适用于破裂前泄漏准则的、与主回路连接的最大支线管道的破裂。反应堆冷却剂回路、其它安全壳内名义管径（NPS）等于或大于 DN150（6 英寸）的一回路管道和安全壳内主蒸汽管道，这些管道应用了破裂前先漏技术，不需考虑假想管道破裂的动力效应评估。

SSE 载荷应与静重和压力载荷组合，且承压部件的应力必须满足 ASME B&PVC-III 附录 F 规定的极限事故工况限制。

应评估与主泵一体的外部管道在主泵运行时断裂的可能性，及其导致的动态影响。

4.3.7 其它转动部件

安全有关的转动部件（飞轮在其它地方叙述）应按 125 % 设计超速作为机械载荷设计条件进行评估。飞轮设计应符合本文件规定。设备分级按 4.2 的要求，验收准则见表 4 和表 5。在超速引起的断裂条件下，由任何转动部件产生的飞射物必须包容在压力边界范围内。

4.3.8 水化学

主泵应设计成能在该类反应堆冷却剂中良好地运行。

4.3.9 减少职业辐照的设计要求 (ALARA)

为了保持总的和个别放射性剂量合理可行性尽量低 (ALARA), 主泵设计者应尽可能采取减少辐照剂量的措施。

4.3.10 设备冷却水

4.3.10.1 当设备冷却水流量达到最大预计流量时, 热交换器和热屏应具有不会因振动而损坏的能力, 且热交换器和热屏满足 60 年的设计寿命要求。

4.3.10.2 对于主泵管壳式热交换器的设计, 污垢系数和堵管余量考虑为:

——管侧 (反应堆冷却剂) 污垢系数: $5.28 \times 10^{-5} \text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$;

——壳侧 (设备冷却水) 污垢系数: $8.81 \times 10^{-5} \text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$;

——堵管余量: 5%。

4.3.10.3 电厂管道 (由第三方提供) 包括每台泵热交换器的独立冷却水供应和排水管。

4.3.11 热交换器要求

4.3.11.1 热交换器的设计和制造应符合 TEMA“管式换热器制造商协会标准”的要求。

4.3.11.2 管式热交换器的设计应在最大预计流量和设计温度下避免流致振动。应通过以下两条之一来证明流致振动是否符合要求:

a) 相同设计的热交换器在不低于主泵热交换器运行流量和温度工况下具有成功的运行经验;

b) 最大预计二次侧 (壳侧) 流速计算值小于临界流体弹性激励速度, 管子最小自振频率计算值大于二次侧 (壳侧) 流速下最大估算的漩涡脱落频率的 1.5 倍。

4.3.11.3 热交换器污垢系数和堵管余量应以单个热交换器为基础。

4.3.11.4 应按最大系统压力设计热交换器, 应按照 ASME 规范要求设置卸压阀, 例如, 如果热交换器可被隔离; 但是, 对于热交换器原设计压力低于系统压力的情况, 则不可用卸压阀来证明热交换器使用的正确性。主泵热交换器的卸压由系统设计方提供。

4.3.11.5 热交换器设计应确保进口流量不会导致局部流速过高, 过高的流速会引起管子、管板和其它热交换器内部构件侵蚀。

4.3.12 可检查性设计

核电厂业主承诺对其电厂进行定期在役检查 (ISI) 是有规章限制的。ASME B&PVC-XI 规定了核电厂业主有责任确保适当的设计和可达性措施相结合以满足 ISI 的要求。主泵应按照“可检查性设计”理念来设计, 该理念的基础是保证 ISI 的设计决定与核电厂设计同步进行, 而不是事后按设计要求调整。

4.3.13 主泵承压螺栓在役检查用校验试块

主泵承压螺栓在役检查用校验试块 (毛坯) 要求应按 ASME BPVC-V 第 4 章的相关规定。

4.3.14 超压保护

买方应为一次侧及设备冷却水提供超压保护, 以确保其最大压力低于 110% 的设计压力。泄压装置 (如需要) 位于主泵管辖边界之外, 以确保主泵超压保护要求得到完全满足, 且安全泄压装置不会在运行时与主泵隔离。一次侧超压保护应符合 ASME B&PVC-III 1 级部件要求, 设备冷却水侧超压保护应满

足 ASME B31.1 要求。

4.4 环境条件和瞬态

下列环境条件下，主泵应设计成能保持其性能和结构完整性。

4.4.1 外部条件

主泵外表面暴露在安全壳内的大气环境条件下。

4.4.2 内部条件

泵壳内循环的流体压力和温度为反应堆冷却剂系统的压力和温度；泵电机区域内流体的压力为反应堆冷却剂系统的压力，温度经设备冷却水冷却后降为低温。

4.4.3 设计瞬态

4.4.3.1 系统瞬态

在正常、中等频度、稀有和极限事件下，主泵应能满足所有系统功能要求。按主泵评估要求，发生瞬态次数以 60 年设计寿命为基础。应分析这些瞬态对主泵的影响，其分析结果应包括在供方的设计报告中。对于冷却剂在热态和冷态条件下的瞬态分析，应假定变频器在最不利的频率下运行。

这些设计瞬态包括丧失电厂电源（异常使用工况），在此期间主泵应能惯性下滑，同时应能维持符合最小流量与时间的关系曲线。在该设计瞬态中，反应堆冷却剂系统初始状态是在额定运行温度和压力下。主泵丧失冷却水将与丧失电厂电源同时发生，这个瞬态应按照丧失厂外电源（CASE B）对各个设计方面造成最保守结果的曲线来分析该瞬态。

主泵必须能在温度范围为 21°C 和 121°C 之间进行现场水压试验。在电厂运行期间，主泵设计应考虑按照 ASME B&PVC-III NB-6000 的 10 次水压试验，水压试验压力需考虑设备布置标高的影响，最高不超过规定水压试验压力的 1.06 倍。

4.4.3.2 特殊的主泵瞬态

4.4.3.2.1 泵的设计应包括所有预期稳态和瞬态工况的应力和疲劳分析，包括泵的热备用、热备用下启动以及丧失和恢复冷却水。应假定泵内完全和短时丧失冷却水 5 次。

4.4.3.2.2 泵的备用应考虑：

- a) 在泵壳内反应堆冷却剂处于运行条件下，主泵应能无限期地（停运）备用而不损坏。在此期间，应对泵提供冷却水。
- b) 在泵停运期间，泵的设计应允许丧失和恢复设备冷却水。供方应提供丧失冷却水后电机温度上升到可能引起电机寿命降低的估计时间。为重新启动主泵，泵供方还应根据丧失冷却水时间，提供相应说明，并定义时长和其它条件。在泵重新启动以前，应提供设备冷却水。作为设计目的，对停运泵应假定丧失冷却水（并随后恢复）的事件发生 5 次。

4.4.3.2.3 主泵设计应考虑外置热交换器传热管破裂后不会导致主泵功能降级。

4.4.4 主泵淹没

主泵应设计成淹没 365 天后性能不会有永久性降低。主泵设计时淹没事件次数按设计寿命内发生 1 次考虑。

从水淹工况清洗完毕后，主泵应可在检查和必要维修后重新启动并运行，所需检验和/或维修应限于外部部件且不需从泵壳内取出主泵可拆卸部件。

供方应对所有可能在淹没后需修复或更换的部件进行全面检查作出说明,并明确指出何时需修复或更换受影响部件。

本文件的淹没要求既适用于初始发生淹没的回路中的两台主泵,也适用于未受影响的回路中的两台主泵。

4.5 载荷和抗震要求

4.5.1 总体要求

主泵的压力边界和安全有关部件应按照 4.2 确定的抗震类别进行设计和分析。分析可以使用响应谱法、时程法或等效应力法。对于响应谱分析,应根据 RG 1.92 中的方法之一组合模态响应,并应采用 Left-Out-Force 或者丢失质量法考虑高频模态。阻尼值应采用 RG 1.61 中推荐的阻尼值。在 SSE 期间,主泵应能保持其压力边界完整性、惰转能力和在惰转期间维持反应堆流量的能力。对于惰转或反应堆冷却剂边界不重要的其它部件的机械损坏是可以接受的。

主泵组件应采用表 2 的载荷要求进行分析。主泵压力边界应力强度分析结果应不超过 ASME B&PVC-III NB-3400 的规定限值。用于评定事故工况的规则见 ASME B&PVC-III 附录 F。主泵的外部载荷分析应采用仅适用于弹性系统分析的应力限值。

主泵组件结构支承件中归为 ASME B&PVC-III NF 分级的部分应使用表 3 给出的载荷要求进行分

析,并应满足 ASME B&PVC-III NF 的所有适用要求。

主泵组件中与安全有关的、要求抗震分析的非承压边界部件,应使用表 4 和表 5 的要求进行分析和评定。

4.5.2 接管载荷

主泵泵壳管嘴和辅助接管嘴的设计载荷应施加于管嘴安全端或管嘴/管道的接口处(视情况而定)。

4.5.3 地震载荷

主泵按发生一次安全停堆地震来设计,并作为事故工况评估其压力边界的完整性。地震载荷还应包括在 ASME 疲劳分析中。

地震事件对疲劳的影响应使用下列等效方法之一来考虑:

- 地震事件的影响通过在疲劳分析中包括 20 次完整的 SSE 应力范围的循环来考虑;
- 或地震对疲劳的贡献用 5 次三分之一 SSE 振幅的地震事件,且每次事件 63 次循环来考虑。
- 地震载荷考虑为在 100% 功率运行时的反应堆冷却剂系统正常运行温度和压力下发生。

4.5.4 未能紧急停堆的预期瞬态(ATWS)

在 RCS 的峰值压力和温度下应对主泵压力边界进行评估。该特殊评估并不是由 ASME 设计要求且不被认为是一个瞬态过程。压力边界一次应力应与 ASME Level C 限制相比较。材料物性应基于预期的金属温度。载荷组成应包括 P(ATWS)+DW+XL,其中 XL 为热胀 Level C 的接管载荷。除了泵壳、热屏、上密封环和主螺栓,所有压力边界部分应被假定为保持正常操作下的温度。非承压边界部分和部分被排除这项评估中。最高应力区域的结果需要呈现在设计报告中的一个单独区域。

4.6 电气设计要求

4.6.1 电机设计额定值和基本特征数据:

- 主泵驱动电机类型:无轴封、立式、水冷;
- 同步转速:1500 rpm;

- c) 额定电压：基于主泵电机设计与供电系统设计确定；
 - d) 相数：3；
 - e) 额定的供电频率：50 Hz；
 - f) 启动期间最小供电电压：由变频器确定；
 - g) 正常运行期间最小供电电压：由供电系统设计方确定；
 - h) 整个转动单元（电机转子、叶轮和飞轮）的最小总惯量：应满足或大于泵惰转期间的流量要求；
 - i) 转动方向由供方确定，但是所有主泵应以同一方向运转。
- 4.6.2 电机的启动、支持回路升温、冷却应由变频器供电，在额定转速正常运行时，主泵机组将通过同步转换开关切换至电网直接供电。在变频器输出电流基本为正弦波，且总谐波畸变不超过额定电流的3%，单个谐波畸变不大于额定电流的1.5%情况下，泵电机设计应该能在整个转速范围运行，不降额，也无需额外服务系数。
- 4.6.3 如果电机启动前处于反向转动状态，则变频器应给电机励磁，并迫使转轴（由负转速）趋向零转速。这是通过电机产生减速转矩和将转子储存的能量回馈电网实现的。当转轴由变频器控制后，电机应加速到预期的工作转速。整个过程无需使用电机的转速传感器。
- 4.6.4 电机铭牌功率和热态和冷态回路温度下的额定输出功率由泵的设计者确定。
- 4.6.5 在惯性下滑期间保持所需的反应堆流量是主泵的安全有关功能。供电状态下的电机运行并非主泵的安全有关功能。
- 4.6.6 在稳态运行期间，电机应能经受额定运行参数的偏差（电压、频率、电压下降到80%额定电压并持续一分钟等偏差）而不损坏。
- 4.6.7 电机应能在偏离额定运行参数的大阶跃降负荷瞬态工况下连续运行而不会损坏。电机应由变频器（VFD）驱动。
- 4.6.8 正常工作频率范围为从启动频率到50Hz。
- 4.6.9 反应堆冷却剂温度在名义冷态温度时，（电机）应能够全速运行。
- 4.6.10 由于电机始终带VFD启动，所以电机不应设计成线电压启动操作。
- 4.6.11 主泵电机电气接线盒IP防护等级应为IP68。
- 4.6.12 电机堵转电流不超过4倍额定电流。
- 4.6.13 主泵应允许在任意时间、任意转速下停机。
- 4.6.14 湿绕组

湿绕组主泵的绕组浸泡在低温高压的反应堆冷却剂中，湿绕组绝缘需承受全电压作用。

湿绕组绝缘应采用辐照交联聚乙烯（XLPE）或性能相当材料。

4.7 接口要求

4.7.1 设计边界

每台蒸汽发生器的底部支撑着两台主泵，交界面位于主泵进口管嘴和蒸汽发生器下封头一次侧出口管嘴的焊缝上。泵壳进口管嘴与蒸汽发生器下封头一次侧的出口管嘴相焊接。在电厂现场，泵出口管嘴将与冷段管道对接，并焊成一体。主泵泵壳、电机外壳和法兰、热交换器管子以及热交换器和泵之间接管属主承压部件。电机外壳和法兰用螺栓固定在泵壳上以便维修时装拆电机。泵电机包括所有电气部件，它们是主泵的组成部分。主泵设计边界应包括电气接线盒，但不包括其外部接线。电力电缆是密封的，以保证主泵满足淹没事件要求。仪表应装配规定的探头，接至防水接头以达到淹没事件要求，它们构成仪表的设计边界。

4.7.2 保温要求

泵壳应进行隔热，使进入安全壳内的热负荷减至最小。保温层应设计成能在正常电厂运行期间，向安全壳最大散热负荷不超过 5kW/每台主泵。

泵和保温层安装硬件之间连接，不许对泵壳作额外加工。

对于泵壳区域隔热要求和任何部位需要易于拆卸保温层（以便接近主泵检查、维护）。

4.7.3 外形尺寸要求

主泵最大外形尺寸（包络尺寸）应不超过允许值。这些尺寸能确保足够空间供操作和拆装用。

附加要求

职业健康和安全管理（OSHA）以及 ASTM C 1055 规定，当部件表面温度超过 60°C 并且运行期间工作人员可能会接触到的部位，必须采用保护性隔热层防护。按上述要求，输送高温反应堆冷却剂的主泵外部管道（例如，外置热交换器一次侧管道）应予以隔热，以保护工作人员。

应提供足够详细的外部管道和法兰资料，以便于金属反射保温层的安装。外部管道法兰的设计应考虑保温层重量。表 6 提供了金属反射保温层的技术要求。

如果热交换器或位于泵和热交换器之间的一次侧管道上某些区域的隔热会导致供方热分析失效，则该区域应注明于外形图和技术手册中。该注释应说明在泵运行期间不许安装保温层或热屏来避免指定区域向环境散热。

表 6 管道外部的反射型金属保温层要求

NPS 管道规格	保温层外直径 (mm)	重量 (kg/m)
1"	224	15.3
2"	277	19.3
3"	305	21.6
4"	330	23.8
6"	396	29.2
8"	447	33.3

5 材料

5.1 承压边界材料

主泵 1 级承压边界材料见表 7。反应堆冷却剂承压材料应符合相应 ASME B&PVC 要求。替代表 7 中的材料需经审查批准。

承压边界材料应按照 ASME B&PVC 进行试验和检验。

表 7 许用的承压边界材料

零件	材料技术条件	材料牌号
泵壳	SA-508	3级2类
承压锻件	SA-182	F304、F304L、F304LN、F304N或 F316、F316L、F316LN、F316N F6（根据规范案例N-4-12）、F6NM
	或 SA-336	F304、F304L、F304LN或 F316、F316L、F316LN、F316N、F6NM（根据规范

		案例N-774)
管子和管道	SA-213	TP304、TP304L、TP304LN或 TP316、TP316L、TP316LN
	SA-376	TP304、TP304LN或 TP316、TP316LN
	SA-312 ⁽²⁾	TP304、TP304L、TP304LN或 TP316、TP316L、TP316LN
承压棒材	SA-479	304
承压板材	SA-240	304、304L、304LN、304N或 316、316L、316LN
承压螺栓	SA-193	B7
	SA-194	2H或7
	或 SA-540	B24 Cl.2、Cl.4或B23 Cl.2、Cl.3、Cl.4
注1：除上述使用材料外，其它材料的管理要求见本文件5.1。		
注2：只许使用无缝管。		

5.2 非承压边界材料

非承压部件的材料应符合适用的工业技术条件的要求。

5.3 飞轮材料

主泵飞轮组件应是双金属组件。应使用重钨合金以提供要求的惯量。重钨合金材料应符合 ASTM B 777 Class 4 的要求。

用来规定飞轮轮毂夏比 V 型缺口冲击试验的最低使用温度应为 10°C。

5.4 与反应堆冷却剂接触的材料

除轴承、绕组和垫片材料外，与反应堆冷却剂接触的所有材料应是奥氏体不锈钢或耐腐蚀性能相当的材料，如马氏体不锈钢、镍基合金或 Hasteloy 合金。若与反应堆冷却剂接触的电机部件材料无法符合上述耐腐蚀性能要求，且由于电机性能关系又无法找到满意的代用材料，供方应提交技术论证报告（包括验证试验、使用经验等），证明使用该材料的可行性、与水化学的相容性，供买方批准。

5.5 其它材料要求

应尽可能使用缠绕式、V 形金属-石墨填充类型垫片，但非圆形垫片（例如用于外置热交换器封头中隔离进出流体）除外。如需采用其它类型垫片，如带不锈钢内环加固的高纯度石墨层压垫片，其成分限制如下：

- a) 硫总量<1000 ppm;
- b) 可浸出硫<250ppm;
- c) 可浸出氯<50ppm;
- d) 可浸出氟<50ppm。

“O 形环”应使用乙丙橡胶，根据使用场合具有计示硬度。

6 制造

6.1 制造

- 6.1.1 不利于表面状况或微观结构的制造工艺影响（例如加工成形、弯曲、焊接、热处理、表面磨削）必须加以控制，以确保产品满足设计要求。
- 6.1.2 应控制材料的制造和焊接。表 8 所列材料和工艺的各制造阶段参数为最低标准。
- 6.1.3 安装在反应堆冷却剂系统中主泵机组的清洁度是极为重要的；主泵搬运时应采取必要预防措施以避免污染。在制造、组装、试验和贮存期间，对清洗和清洁度的控制。
- 6.1.4 除热交换器结构支承应按 ASME B&PVC-III NF-4000 要求制造外，所有主泵的安全 1 级部件，应按 ASME B&PVC-III NB-4000 要求制造。
- 6.1.5 主泵所有非安全级承压部件应按 ASME B&PVC-VIII-1 要求进行制造，也可按 ASME B&PVC-III ND 要求制造。
- 6.1.6 应采用成熟工业质量保证管理方法进行非安全级物项的制造和组装作业，以保证主泵的完整性。
- 6.1.7 按 RG 1.14 和本文件规定，应对有结构完整性要求的飞轮零部件提出附加制造要求。在制造前，飞轮结构材料应按 ASME B&PVC-III NB-2000 要求进行检验和机械性能试验。

表 8 材料及其工艺控制

材料类型	工艺控制要求	关键参数/要求控制的工序	管理导则
铁素体钢	焊接	预热温度（防止冷裂纹）	RG. 1.50
		焊后热处理	
	堆焊	热输入（防止堆焊熔合线开裂）	RG. 1.43
奥氏体不锈钢	制造	固溶处理（防止晶间腐蚀）	RG. 1.44
	焊接	焊接材料的 δ -铁素体（防止热裂纹）	RG. 1.31
		层间温度（改善抗晶间应力腐蚀裂纹和残余应力控制）	
马氏体不锈钢	制造	合适的回火热处理（防止应力腐蚀断裂和氢脆裂）	
沉淀硬化型不锈钢	制造	时效硬化和回火热处理（防止应力腐蚀断裂和氢脆裂）	
镍基合金钢	焊接	表面污染控制（防止晶间渗透）	
	热处理		
普通合金钢	制造	消除铜渗透到母材金属内。	
		表面喷丸处理（仅用于压水堆电厂）	
		有害的碳化铬沉淀物	
	所有上述要求是为了防止应力腐蚀裂纹		
	焊接	感应加热，熔敷控制焊接或散热焊接，以改善其残余应力。	

6.2 焊接

- 6.2.1 应在所有情况下使用成熟的焊接操作。安全相关部件的不锈钢焊接应按照 RG 1.44 要求进行。本节焊接要求适用于主泵机组上的所有焊接。母材采购和制造之间不应存在差异。
- 6.2.2 所有安全 1 级部件，其焊接工艺评定和焊工/焊接操作工资格评定应符合 ASME B&PVC-III 和 IX 的规定。在国内执行焊接操作的焊工和焊接操作工还应符合 HAF603 的要求。
- 6.2.3 所有非安全级承压部件，其焊接工艺评定和焊工/焊接操作工资格评定应符合 ASME B&PVC-VIII 和 IX 的规定。也可按 ASME B&PVC-III ND 要求制造主泵非安全级承压部件。

- 6.2.4 非安全级部件的焊接应由具有相应资质的焊工进行，其工艺应符合公认工业标准规定，例如美国焊接协会标准。
- 6.2.5 所有安全 1 级部件的焊接工艺和焊工评定应符合 ASME B&PVC—III 和 IX 规定。焊接试样和焊缝填充金属的断裂韧性试验，应符合 ASME B&PVC—III 和本文件要求。焊接前，应提交焊接和表面硬化工艺（如适用，应同时提交焊后热处理工艺）以供批准。
- 6.2.6 焊接图中应标明接头、接头几何尺寸和符合 AWS A2.4 要求的焊接工艺及带焊接工艺序号的焊接图。
- 6.2.7 1 级承压边界或承压边界附件焊接端的坡口应进行液体渗透检验（PT）或磁粉检验（MT）。不连续边缘（例如层状缺陷）应按 ASME B&PVC—III NB-5130 规定进行处理。NB-5130(b)中的尺寸限值 25mm 应按 6.4mm 考虑。
- 6.2.8 禁止在低于 10°C 的材料上进行焊接。
- 6.2.9 在碳钢或低合金钢部件产品上进行手工电弧焊（SMAW）时，只许使用低氢焊条。
- 6.2.10 承压部件的补焊报告应包括标明位置、待焊凹坑尺寸图、焊接材料标识、焊接工艺、热处理、补焊深度大于 9.5 mm 或 10% 截面厚度（取两者较小值）的检验结果。
- 6.2.11 焊缝表面要求如下：
- 在役体积检验的焊缝应加工成形，保证整个焊缝长度与相邻母材金属都能与超声波传感器贴合。母材金属应清洁（无焊接飞溅物、焊渣等），并在焊缝边缘两侧距离为 $2t+51\text{ mm}$ 区域内，表面粗糙度应 $Ra \leq 3.2\ \mu\text{m}$ ，其中 t 为母材金属的厚度。当焊缝边缘两端距离小于 $2t+51\text{mm}$ 时，需经买方认可。
 - 对于在役检查时要求进行表面检查（PT 或 MT）的所有焊缝，应打磨以消除 ASME B&PVC 不许可的显示。然而，影响 ASME B&PVC—XI 超声波检验（UT）的挖掘是不允许的，应通过焊接恢复到原始外形。
 - 要求进行在役检查的焊缝按照 ASME B&PVC—XII WA-2600 的规定进行标记，其编号系统应得到买方批准。
- 6.2.12 定位焊要求如下：
- 用来保持对中的定位焊，在完成后应完全清除，或采用打磨的方法适当地修整其终端和始端，使它们与最终焊缝能很好地熔合。定位焊应由评定合格的焊工采用评定合格的焊接工艺规程进行焊接，当定位焊缝将成为完工焊缝的一部分时，应进行目视检测，并应清除有缺陷的定位焊，在焊接前对该区域重新移位定位焊。凹槽内的定位焊应减至最小。
 - 不允许使用分段焊接。
- 6.2.13 制造工艺要求如下：
- 应去除承压和非承压材料上的（电弧）起弧点，而且表面应打磨成有均匀过渡的平滑轮廓线（至少 3:1 斜度）。打磨区域不得影响所需的截面厚度。承压材料表面应进行 PT 或 MT 检查。非承压材料表面应进行目视检查。对导致铜积聚的起弧点，应确认其被完全清除。
 - 承压焊缝应无焊渣和飞溅物。除已做记录并经确认对部件完整性无影响的位于不易接近区域并牢固附着的飞溅物之外，非承压焊缝也应无焊渣和飞溅物。
 - 管嘴的焊缝制备禁止使用药芯焊丝工艺。
 - 不影响最小材料壁厚要求的刻痕、凿槽、擦伤、冲压标记、临时机械标记等，应以 3:1 斜度进行机械平滑。应对修复区域进行目视检查以确保其符合斜度要求。此外，承压部件的修复区域应按 NB-4121.3（如果非承压部件按 ND 分卷要求，则按 ND-4121.3）检查。这种做法不包括以标识为目的且按照认可的技术条件所做的标记。

- e) 如果用等离子电弧刨削清除缺陷,应对铁素体钢进行至少 121°C 的预热。在刨削操作以后,通常要求打磨(最小 0.8 mm)到优良金属。对不锈钢的打磨应进行控制,以防止过热、冷加工裂纹和龟裂。
- f) 在压力边界采用电弧气刨表面加工或去除临时附件时,气刨后表面离最终产品表面应留有至少 1.5mm 的加工余量。

6.2.14 补焊要求如下:

- a) 承压部件上深度大于 9.5 mm 或 10%截面厚度(取两者较小值)的补焊应经批准。
- b) 对承压材料,在给定位置上全部的、经检查的补焊只许一次;对非承压材料,则限于三次。如果需要进一步修补,则应经批准。最终焊后热处理之后的补焊应限制在 ASME B&PVC-III 中允许范围内。

6.3 涂漆

6.3.1 主泵不锈钢和其它耐腐蚀表面不应涂漆。主泵内表面不应涂漆。螺栓不应涂漆。

6.3.2 除不锈钢或其它耐腐蚀表面和螺栓之外的外露表面应按要求涂漆。焊缝涂漆应按以下要求:

- a) 在涂漆前,所有焊缝应用乙烯基塑料电工胶带(3M-Scotch #88)或相当材料覆盖。对需要按 ASME B&PVC-XI 要求进行在役检查的焊缝区域,应在焊缝两侧宽度等于 2.5 倍焊缝厚度的区域进行覆盖。对于其它全透焊焊缝,应在焊缝两侧宽度等于 1.5 倍焊缝厚度的区域进行覆盖。
- b) 如焊缝位置标有低应力标记,则焊缝可以喷涂。使用冲头时应用钝头连续或钝头间断的圆点冲头冲压标记。产生的压痕应是半径不小于 0.064 mm 的圆底。被冲压材料的壁厚应不小于设计要求最小值。

6.4 清洗

6.4.1 主泵装运前进行的所有操作(包括清洗、干燥和防护)应符合本文件的要求。

6.4.2 主泵制造用的清洁度和清洁度检查不应包括可能损害主泵或主系统其它设备的可溶或不可溶物质。其工艺应至少包括:

- a) 关键使用表面(包括与反应堆冷却剂直接接触的金属表面)清洗要求;
- b) 不与反应堆冷却剂接触的表面应无污垢、油污、焊接飞溅物、焊渣、铁锈或其它杂质;
- c) 热加工成形的奥氏体不锈钢材料只有在经固溶处理后才能用酸洗方法进行清洗;
- d) 所有表面应在热处理以前进行清洗;
- e) 当采用热敏的色笔检查温度时,色笔不应污染待焊表面和焊接完毕的表面。

6.5 无损检验

6.5.1 压力边界及飞轮的材料和部件

6.5.1.1 概述

只有按照 ASME B&PVC-III NB-5000 要求鉴定合格人员才允许在 ASME B&PVC 材料和零部件上进行无损检验(NDE)。只有具有 II、IIa(只能做 ET)或 III 级合格证人员可解释检验结果。在国内执行无损检验操作的人员还应符合 HAF602 的要求。

下列规定检验适用于无焊缝的泵壳,或者要求做 ASME B&PVC-XI 役前检查其它设计特性。

在装运前为确保可检查性设计,除按 ASME B&PVC-III 的要求进行检验外,主泵(包括外置热交换器及其管道的 1 级部件)还应采用在役检查期间的技术进行检验。

6.5.1.2 超声波检验

6.5.1.2.1 超声波检验应按照下列规范要求进行：

- a) 材料 – ASME B&PVC–III NB-2000；
- b) 堆焊 – ASME B&PVC–III NB-5000；
- c) 焊缝 – ASME B&PVC–III NB-5000；
- d) 厚度 – ASME B&PVC–V 第 5 章。

6.5.1.2.2 焊缝超声波检验

斜探和直探检验应符合 ASME B&PVC–V 规定。应记录必需预先具备的母材超声波检验结果信息，并将其编入焊缝超声波检验报告。在焊缝金属检验前应得到检验区域、位置和参考点到所有线性反射体的距离，并应将其包含在报告中。

焊缝检验区域应包括焊缝和热影响区。焊缝热影响区应超过焊缝熔合线 12.7mm。

6.5.1.3 射线检验

射线检验应符合 ASME B&PVC–III NB 的规定。

6.5.1.4 磁粉检验

6.5.1.4.1 磁粉检验应符合 ASME B&PVC–III NB 的规定。

6.5.1.4.2 供方所进行的焊缝磁粉检验均应符合下列要求：

- a) 应在所有焊后热处理之后（包括 P-1 材料组）进行磁粉检验；
- b) 不允许表面过热或烧伤；
- c) 螺栓应使用整体环向磁粉检验和纵向磁粉检验。检验应在制造过程结束后进行。

6.5.1.4.3 承压材料的最终无损检验应按 ASME B&PVC–III NB 中指明的制造阶段和下列要求进行：

- a) 低合金材料应在淬火和回火后进行磁粉检验；
- b) 待堆焊表面应在堆焊前进行磁粉检验。

6.5.1.5 液体渗透检验

液体渗透检验应符合 ASME B&PVC–III NB 的规定。

6.5.1.6 飞轮检查

按 RG 1.14 和本文件 4.3.4 要求，在最终组装前应检查飞轮结构部件。检查应符合 ASME B&PVC–III NB-2500 的要求。飞轮基体初加工锻件应进行磁粉和超声波检验，并在完工后应进行液体渗透检验。在飞轮组件完成最终加工后，飞轮表面应进行液体渗透检验。

为确保最终组装后的飞轮完整性，用于密封飞轮组件和隔离主冷却剂的关键部件应进行液体渗透检验和氦气检漏检验。液体渗透检验程序及技术条件应符合 ASME 规范准则。检漏试验应使用内轮毂上检漏孔。

6.5.2 非压力边界及非飞轮的材料和部件

非压力边界及非飞轮的材料和零部件的无损检验应符合 ASME B&PVC-III 第 1 分卷附录 U 或适用的工业技术条件，无损检验人员资格应符合买方认可的相关行业无损检验人员资格管理规定。

6.5.3 目视和尺寸检验

主泵及其零部件应进行目视和尺寸检验，以核实其符合图纸和本规范书要求。

6.5.4 役前检查要求

除运营方的役前检查大纲注明者外，应按本 ASME B&PVC-XI 要求进行役前检查。

设备、程序和人员应符合 ASME B&PVC-XI IWA-2000 鉴定要求。表面调质和焊接标记要求见 6.2.11。

6.6 标记

部件和承压材料的永久标记或标识，应符合经认可的相应工艺技术条件要求。

7 试验/鉴定

7.1 部件试验

应进行缩尺寸模型泵水力试验，以在预期运行范围内验证泵的预估水力性能；评估水推力载荷；获得泵的压力脉动数据；验证预估的同族曲线（全性能曲线），包括倒流流量。

主泵机组和/或 1 级子组件应按照 ASME B&PVC-III 1 级部件的要求进行水压试验。主泵 3 级部件（如有），应按照 ASME B&PVC-III 3 级部件的要求进行水压试验。车间水压试验温度应远离脆性断裂转变温度。建议的试验温度应不低于 $RT_{NDT}+33^{\circ}\text{C}$ 。按照 ASME B&PVC-III 规定，主泵垫片不需要参与水压试验，因此在水压试验期间（临时垫片处）泄漏是允许的。

7.2 型式（样机）试验

型式（样机）试验一般应包括水力性能试验、电机性能试验和包含惰转的运行（瞬态）试验。每种型号的首台泵应在工厂高温高压全流量试验台架上进行性能试验，以确定其满足功能要求。该试验应：

- a) 至少包括在整个预期的流量范围和转速下的 500 小时电厂中典型运行（例如：在实际温度、压力、扬程和流量），以验证其水力性能和所需的电机输入功率；
- b) 包括足够数量和严重级别（在全尺寸试验装置的实际限制内）的瞬态和异常工况（由买卖双方协商确定），以证明主泵在实际运行中能满足设计要求。该试验应包括至少 50 次使用循环。一次使用循环包括升温、温度稳定在热停堆温度、升温到最高运行温度然后冷却到室温。其它瞬态试验应包括丧失冷却水、惰转和在允许范围内的设备冷却水温度变化；
- c) 试验用的最大升降温速率不应超过试验台架限制。试验中最小升降温速率应大于或等于预期电厂升降温速率；
- d) 包括 NPSHr 的测量。以扬程降低 3% 作为汽蚀试验合格与否的标准；当试验回路的能力或主泵本身限制其全部满足 NPSHr 试验要求的可能，则按照可执行程度进行 NPSHr 试验；
- e) 测量泵出口压力脉动（在整个泵转速和反应堆冷却剂系统温度范围内）；
- f) 包括试验后的彻底拆卸和检查。本条不要求全部解体,不需要重新制造。但试验后可能需要更换推力轴承的瓦块；
- g) 出具详细的验收准则（以证明满足本规范书要求）；
- h) 以 125% 同步转速进行超速试验，以证明飞轮在超速工况下符合设计和建造预想；
- i) 在所有运行温度和压力下不允许存在向外泄漏。

7.3 产品试验

在现场安装前，首台主泵后的每台主泵应在工厂高温高压全流量试验台架上进行产品试验。通常产品试验应包括水力性能、电机性能和运转试验。具体试验要求如下：

- a) 包括至少 50 小时电厂典型运行（例如：在正常温度和压力、以及代表性扬程和流量点），以验证在一个扬程/流量点上所需电机输入功率和水力性能；
- b) 包括瞬态试验，其中包括升温、冷却和惰转，这些试验的温升率和冷却速率应与样机试验规定的速率相同；
- c) 在所有的运行温度和压力下不允许存在向外泄漏；
- d) 需要足够多的测点，以便能够监测出潜在的异常运行（通过与同类中第一台试验或后续电厂运行数据进行比较）；
- e) 以 125%同步转速进行超速试验，证明飞轮在超速工况下符合设计和建造预想。

8 质量保证和文件

8.1 质量保证

8.1.1 制造和检查

8.1.1.1 应按其规范或 HAF003 或 HAF604 规定，需保存热处理、炉批号（如适用）等安全有关物项和规范的可追溯性。

8.1.1.2 从初次接收到加工完成期间，应保持对物项和材料的识别、控制和可追溯性等措施。应制定这些措施并形成文件以确信使用和安装时只使用可接受的物项和材料。

8.1.1.3 应在制造承压和安全有关部件时提供详细制造检查计划，该计划应在制造活动放行和开始前获得批准，并应在整个制造过程中规定停工待检点或见证点。标准物项（如管道配件、小紧固件）和材料（如标准管道和转子叠片），可不提交质量计划。

8.1.2 见证点和停工待检点

8.1.2.1 制造和检查计划中应注明见证点和停工待检点。

8.1.2.2 应实施停工待检点和见证点管理程序。为证明符合停工待检点或见证点和/或弃权程序要求，该程序应包括要求的接口、责任和保存的记录。

8.1.3 不符合项

不符合项是指与规范书、外形图、批准文件或合同要求不符合的项目，按“照常使用（Use-as-is）”处理的不符合项需经过认可。

8.1.4 质量保证记录

8.1.4.1 度量单位应以公制单位为准。

8.1.4.2 质量保证记录资料包，包括目录表、图纸编号或图纸交叉对照清单、改版号、和操作编号。

8.1.4.3 装运放行前，应提交最终文件包。文件包应至少包括下列文件：

- a) 最终质量保证记录资料包目录，包括各部分记录的详细内容列表；
- b) 所有 ASME B&PVC-II/III/VIII 材料/部件、核安全有关材料/部件、需采购原料的 D 级物项的材料鉴定试验报告（CMTR）；
- c) 所有水压试验报告、ASME B&PVC 数据报告（NPV-1、N-1、N-2、NPP-1、NS-1 等）、铭牌图或照片；
- d) 所有 NDE 检验报告，包括检查类型、所使用设备（包括系列号或设备识别号）、检查方法（即：湿粉 MT，斜探 UT 等）、检验结果、检验员签名和 NDE 资格等级。应提供原始射线照片并与资料包分开提交。如果在泵壳上进行了计算放射（CR），图像应储存为便携式文档测试（.pdf）

文件，并包含在数据包中。CR 的重复电子文件也应以 DICONDE 文件格式储存，以便在设备运行期间进行检查时提供灵活性。

- e) 最终尺寸检验报告，包括按图纸和/或技术条件（以图形或文字形式）要求指定为“竣工”尺寸的检验报告；
- f) 所有经批准的不符合项文件；
- g) 焊接状态表，应包括所有焊缝、焊接工艺、填充金属鉴定（如适用）、焊工或焊机操作工。焊接状态表还应包括每条焊缝及附有图纸编号或图纸交叉对照清单的焊缝状态记录；
- h) 热处理记录；
- i) 最终鉴定合格的报告（其中附有最新的设计结构）清单应与竣工设计结构清单进行比较。结构比较中发现的偏差需协调解决。设计结构指最终批准的总装和外形图上的组件和部件；
- j) 列出所有组件材料可追溯性（注明材料热处理号/批号和设备唯一识别号）的最终报告；
- k) 合格证或其等效文件，表明设备已符合本合同提出的所有标准、技术条件、规范和工艺要求，经批准的偏差通知除外。

8.1.4.4 初步质量保证记录资料包目录和记录中各节相关表格内容应提交。上述文件应在编制目录和最终记录卷册前获得批准。

8.1.4.5 所有记录文件应清晰、易识别和可复制。文件应是原件或是原件清晰和明确的复印件，纸张大小应为 21.6cm×27.9cm。

8.1.4.6 合格证应装订在最终质量保证记录包内。该合格证必须随每一资料包提供给业主。

8.1.4.7 最终质量保证记录数据包应在所有记录经审查和批准后按照要求进行组卷。应提供包装的数字电子媒体副本，代表适用于电子检索、储存和档案传输目的的最终批准记录包，数字格式应符合采购清单的规定。

8.1.4.8 所有质量记录的保存时间应符合 ASME B&PVC 对全寿期和非永久性记录规定的时间。

8.1.4.9 质量保证记录上手写内容必须使用黑墨水或蓝墨水。若需要改变手写内容，则新的资料应使用黑墨水或蓝墨水书写，应在整个改变资料处划上一条单线，而且修改者应对修改进行标记并注明日期，以保证修改不会使原始文件难以辨认。

8.2 文件

8.2.1 验证设计基准的文件

验证设计所必需的泵压力边界 ASME B&PVC 通用应力计算应在设计完成时发布。

8.2.2 需发布的图纸

8.2.2.1 总图

应编制总装图，其中包括现场组装注意事项、按总装图要求进行的无损检验的要求以及合适的 ASME B&PVC 资料。应编制外形图。

8.2.2.2 竣工图

应提供每台主泵的“竣工”图，并应作为质量保证资料包的一部分。图中应给出实测竣工接口与总图接口的尺寸对照。如果主泵泵壳在装运后机加工（并焊接到蒸汽发生器下封头），则应提供泵壳的最终机加工图。

8.2.2.3 产品图纸清单

装运时，应编制一份完整的产品图纸清单并注明所有部件的制造图纸编号和修订版。

8.2.3 需发布的文件

8.2.3.1 设计报告

8.2.3.1.1 根据 ASME B&PVC-III 设计和建造的部件应按 ASME B&PVC-III NCA-3550 要求编制设计报告。设计报告应详细说明设计基准、设计说明、应力计算、计算机编码、热工/水力分析和试验结果等可证明符合所有可适用要求的内容。

8.2.3.1.2 根据 ASME B&PVC-VIII-1 设计建造部件，其报告应符合 ASME B&PVC-VIII 规定。用于 D 级设备，如允许在 ASME B&PVC-III 3 级部件和 ASME B&PVC-VIII-1 之间进行选择，则编制的报告应符合 ASME B&PVC 相应章节要求。

8.2.3.1.3 所有压力边界设计报告应包括压力边界图纸完整清单和改版号。

8.2.3.1.4 设计报告中应使用 ASME B&PVC-II 中的材料强度性能。

8.2.3.1.5 制造所用材料的强度性能应不小于设计报告中设计基准材料的强度性能。

8.2.3.1.6 在设计报告中引用或使用的支持性分析报告和试验数据，应包括以下内容：

- a) 抗震分析报告；
- b) 设计和运行技术条件及限值；
- c) 用于设备取证、建造或维护的支持性文件（如设计计算、数据资料、技术支持等）应需提供。上述文件应包括按 ASME B&PVC-III 3 级部件和 ASME B&PVC-VIII-1 建造的设备设计计算；
- d) 应对主泵飞轮完整性进行分析，证明断裂的飞轮不可能穿透反应堆冷却剂压力边界从而影响主泵周围安全有关系统或部件的运行；
- e) 转子动力学和振动分析报告。

8.2.3.2 材料技术条件清单

运输前，应发布一份用于采购承压部件、安全相关部件和过流部件的 ASME 和/或 ASTM 材料技术条件清单。应在单独的表格中列出适用于每种材料技术条件的主泵部件，该表格应包括在技术手册内。

8.2.3.3 试验技术条件和报告

应编制主泵电气、机械、水力模型试验的详细技术条件。

应编制和保存详细试验报告，其中包括泵电气、机械、水力试验结果。

9 包装、运输和维护

9.1 清洁要求

在开始拆卸或复装作业前，作业厂房应满足 ASME 相关的清洁要求。主泵安装区域无空气过滤要求，如芯包水力部件敞开，则水力部件及泵壳区域内直接操作人员应穿连体防护服装，其余应符合 ASME I 级工作区域的要求。

芯包解体区域，应完全满足 ASME I 级工作区域的要求。

在有辐射的情况下，所有拆卸或安装工作应同相关防护职能部门商议后进行。

安装或拆卸过程中应即时存放的零部件应确保用塑料或铝制容器存放，并经塑料薄片密封。

待装零部件表面不得有任何防腐蚀物、锈迹、污渍、油渍和油脂残留。预装零件及待装备件均需在拆卸后清洗，以备下次使用。

9.2 主泵的拆卸

除非满足以下条件，否则不要试图拆除电机组件或推力轴承室：

- a) 泵已与电源断开，确保不会意外启动；
- b) 泵组已降压（恢复到常压）；
- c) 电机和泵壳温度 $<50^{\circ}\text{C}$ 。

9.3 不拆芯包的情况下拆装推力轴承

使用主泵安装维修小车及专用工具，应在主泵芯包不拆的情况下可单独更换推力轴承。

9.4 包装和装箱

9.4.1 运输前包装，主泵应先进行干燥并对清洁度进行检查，其内表面用干净无毛头布揩擦不应发现污染物。检查后应立即装上封盖以防止主泵腐蚀、空气污染、惯性力和物理损坏。

9.4.2 所有提供的设备应适当包装，确保安全抵达现场并符合长期贮存防护要求。

9.4.3 维修用零件和工具应单独装在防潮包装箱内并与主泵一起装运。

9.5 吊运

9.5.1 应小心吊运主泵及其零部件，特别注意避免承压部件表面和机加工部位（如垫片密封表面和管嘴法兰）受到损伤。

9.5.2 用缆绳吊运或拴系主泵处，应在主泵和缆绳之间放置防护材料。

9.5.3 如果在主泵制造期间焊有临时吊耳，应在最终检查前将其去除。吊耳去除区域应用液体渗透或磁粉检验方法检查裂纹。

9.6 特殊运输要求

9.6.1 应设计、提供装载和固定主泵的专用装运装置，并用以将主泵从制造厂运送到电厂的运输工具上（卡车、火车车厢或驳船）。应注意，泵壳应运至蒸汽发生器供方，而不是电厂现场。

9.6.2 主泵或其组装完成的可移出组件在运输期间应能承受所有组合载荷（包括吊运和倒置载荷）而不损坏。

9.6.3 运输方法的拴系方式应经买方批准。在装运期间，主泵应可同时承受运输载荷而其内件不损坏。

9.6.4 主泵或其组装完成的可移出组件在运输期间的运输载荷应用加速度传感器监测，超过运输载荷限值的载荷应向买方报告。

9.6.5 由上述动载荷引起的主泵应力不应超过部件材料屈服应力的 $2/3$ 。此外，支承载荷与纯剪切载荷应符合 ASME B&PVC-III NB-3227.1 和 NB-3227.2 规定，其设计载荷采用运输载荷。

参 考 文 献

- [1]HAF601 民用核安全设备设计制造安装和无损检验监督管理规定
- [2]ASME B&PVC 规范案例N-774 重量超过10000lb (4540kg) 并满足SA-336/SA-336M中第III卷第1篇核1、2、3级建造要求的13Cr-4Ni (S41500) F6NM级锻件的使用
- [3]ASME NQA-1 核设施质量保证要求
- [4]ASTM A20/A20M 压力容器用钢板一般要求的标准技术条件
- [5]ASTM A105/A105M 管道用碳钢锻件标准技术条件
- [6]ASTM A350/A350M 要求冲击韧性试验的管件用碳钢及低合金钢锻件标准标准技术条件
- [7]ASTM A516/A516M 中温及低温压力容器用碳素钢板标准技术条件
- [8]ASTM A564/A564M 热轧及冷精轧时效硬化处理过的不锈钢棒材和型材标准技术条件
- [9]ASTM A693 沉淀硬化不锈钢和耐热钢板、薄板和钢带标准技术条件
- [10]ASTM A705/A705M 时效硬化的不锈钢锻件标准技术条件
- [11]AWS D1.1/1.1M 结构焊接规范-钢 (该文件引用为焊接标准的一个例子, 用于非压力边界、非安全有关焊缝)
- [12]AWS D1.6 结构焊接规范-不锈钢 (该文件引用为焊接标准的一个例子, 用于非压力边界、非安全有关焊缝)
- [13]IEC 60034-1 旋转电机一定额和性能
- [14]IEC 60034-9 Rotating electrical machines – Part 9: Noise limits 2007
- [15]IEC 60034-14 Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56mm and higher-Measurement, evaluation and limits of vibration severity 2007
- [16]IEEE334 核电厂连续运行的1E级电机鉴定
- [17]IEEE383 核电厂安全级电缆、现场接头和连接件的型式试验
- [18]HI 美国水力学会标准-离心泵部分
- [19]NUREG-0800 标准审查大纲
- [20]RG 1.31 不锈钢焊缝金属中铁素体含量的控制
- [21]RG 1.29 抗震设计分级
- [22]RG 1.43 低合金钢部件不锈钢堆焊层的控制
- [23]RG 1.54 核电厂I、II和III级防护涂层
- [24]RG 8.8 保证核电厂职业照射在合理可行尽量低的相关资料
- [25]RG 8.19 轻水堆核电厂设计阶段职业辐照剂量评价—人-雷姆估算

