

国产30万千瓦火力发电设备

第二分册

亚临界压力中间再热汽轮机及辅助设备

华东电业管理局望亭发电厂
华东电业管理局七·二一工人大学

水利电力出版社

内 容 提 要

30万瓩亚临界压力中间再热式汽轮机,是目前我国自行设计、制造、安装、投运的最大功率汽轮机组。本书综合了设计、制造、运行等单位所积累的资料和实践经验,对该型汽轮机及辅助设备的工作原理、设计意图、具体结构和技术,进行了比较系统和详细的介绍。内容包括汽轮机本体、调节和保护系统、辅助设备等部门,并节录了本机组的部分技术设计资料。

本书可供汽轮机工人和技术人员学习参考。

国产30万千瓦火力发电设备

第二分册

亚临界压力中间再热汽轮机及辅助设备

华东电业管理局望亭发电厂

华东电业管理局七·二一工人大学

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

1975年11月北京第一版

1975年11月北京第一次印刷

印数 00001—9380 册 每册 1.55 元

书号 15143·3168

内 部 发 行

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

前 言

在毛主席和党中央的英明领导下，在无产阶级文化大革命和批林批孔运动的推动下，祖国大地一片兴旺，社会主义到处都在胜利地前进。电力战线与其他各条战线一样，呈现着一派生气勃勃的革命景象。

解放二十五年来，我国的电力工业发生了翻天覆地的变化，广大工人、干部和技术人员坚持“独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国”的伟大方针，“打破洋框框，走自己工业发展道路”，努力赶超世界先进水平。国产火力发电设备从无到有，从小到大。第一台30万瓩亚临界压力中间再热式汽轮发电机组仅用了很短时间就完成了设计、制造、安装和试运转等工作，并胜利并网发电，这是毛主席无产阶级革命路线的伟大胜利。

为了适应现场工人培训的需要，我们组织了参加过这一工程的同志编写了《国产30万千瓦火力发电设备第二分册——亚临界压力中间再热汽轮机及辅助设备》。本书介绍了这一类型的汽轮机及辅助设备的具体结构、工作原理和部分运行经验；叙述上基本避免了公式和数学推导，说理尽量清楚。

本书曾作为望亭发电厂的培训材料在内部印发过。为适应我国电力工业发展的需要，现修订出版。这次修订，是经厂、校有关同志集体讨论，由华东电业管理局七·二一工人大学汽轮机教研组执笔的，并经望亭发电厂有关车间工人师傅和技术人员作了认真审阅和修改。

在编写过程中，上海汽轮机厂、上海第一水泵厂等单位为我们提供了不少宝贵资料，在此谨致谢意。

由于我们经验不足，业务水平有限，因此本书还会存在不少缺点和错误，恳切希望读者提出宝贵意见。

华东电业管理局望亭发电厂
华东电业管理局七·二一工人大学
一九七五年五月

目 录

前 言

第一章 30万瓩汽轮机本体	1
第一节 概 述.....	1
第二节 转 子.....	8
一、转子的型式；二、联轴器；三、转子的临界转速；四、动叶片	
第三节 静 体.....	18
一、汽缸；二、隔板；三、汽缸的支承和热膨胀	
第四节 汽 封.....	40
一、通流部分汽封；二、隔板汽封；三、轴端汽封	
第五节 轴承及盘车设备.....	44
一、轴承润滑原理；二、径向轴承的油膜自激振荡；三、径向轴承结构；四、推力轴承；五、运行对轴承油膜的影响；六、盘车设备	
第二章 30万瓩汽轮机液压调节系统	56
第一节 调节原理及调节系统.....	56
一、调节的基本概念；二、调节系统	
第二节 保护装置.....	70
一、高压主汽门和中压联合汽门；二、超速遮断装置；三、磁力遮断器；四、手动遮断器；五、电超速保护装置；六、防火油门	
第三节 启动阀及启动操作.....	87
一、启动阀的结构；二、启动操作程序	
第四节 供油及润滑油系统.....	89
第五节 调节总系统.....	94
一、电液调节辅助装置；二、调节总系统；三、保安系统的改进	
第三章 热交换器及系统	102
第一节 主蒸汽及启动旁路系统.....	102
一、主蒸汽管路系统；二、机组的启动旁路系统；	
第二节 给水回热加热设备及系统.....	110
一、基本原理及系统；二、回热加热器	
第三节 给水除氧设备及系统.....	134
一、基本原理；二、除氧器；三、除氧给水系统；四、除氧器的滑压运行	
第四节 凝汽设备及其系统.....	145
一、凝汽器的功用及要求；二、凝汽器；三、抽气器；四、凝结水系统；五、循环水系统；六、凝汽系统的运行	
第五节 冷油器、水冷却器、空气冷却器.....	164
一、冷油器；二、水冷却器；三、空气冷却器	

第四章 给水泵、凝结水泵与循环水泵	171
第一节 概 论	171
一、往复泵（活塞泵）；二、齿轮泵与螺杆泵；三、喷射泵	
第二节 锅炉给水泵	175
一、离心泵工作原理；二、水泵的工作点；三、泵的汽蚀及防止方法；四、DG-500-240型给水泵的构造与性能	
第三节 主凝结水泵与凝结水升压泵	200
一、叶轮；二、导向叶轮；三、平衡鼓及推力轴承；四、径向轴承；五、性能曲线及其它；六、主凝结水泵低水位运行	
第四节 轴流泵	213
一、轴流泵工作原理；二、轴流泵的构造与性能	
第五章 驱动给水泵的汽轮机	225
第一节 概述及技术规范	225
第二节 本体结构	226
一、汽缸；二、转子；三、轴承；四、汽封；五、盘车设备；六、通流部分尺寸；七、汽水系统	
第三节 调节系统	236
一、调节任务和原理；二、调节系统主要部件；三、调节总系统	
附 录	
一、通流部分几何尺寸（附表1）	250
二、汽轮机额定工况（945吨/时）时的热力计算数据（附表2~6）	253
三、变动工况热力计算数据（附表7~8）	258
四、调节级变动工况计算数据（附表9）	260
五、隔板材料和尺寸（附表10~12）	261
六、动叶材料和尺寸（附表13）	264
七、主要铸件材料表（附表14）	266
八、主要锻件材料表（附表15）	267
九、汽轮机本体各接管口径及流速（附表16）	266
十、辅助设备技术规范（附表17）	268
十一、辅助设备对外接口一览表（附表18）	270
十二、主要管道规范（附表19）	273
十三、阀门产品型号的代号说明（附表20~25）	273
十四、阀门规格及使用部位（附表26）	276

第一章 30万瓩汽轮机本体

第一节 概 述

伟大领袖毛主席教导我们：“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”在毛主席无产阶级革命路线指引下，努力贯彻“独立自主、自力更生”的建设方针，继12.5万瓩超高压中间再热机组之后，不过短短的三、四年时间，我国目前最大容量的机组——30万瓩亚临界压力中间再热式机组又问世了。这是无产阶级文化大革命取得伟大胜利的大好形势下，继续深入开展批林批孔运动的结果。该机组具有效率高、运行性能好和结构合理等优点。经过工人同志的顽强奋战，克服了种种困难，该机组已于国庆25周年的前夕胜利地并网发电了。从电厂设计到发电，仅仅花了不到一年半的时间。

大容量机组的制造和投产，对于满足我国工农业生产迅猛发展的需要、多快好省地发展电力事业，具有极其重大的意义；对于迅速增加电网容量，发展电力生产自动化，提高运行经济性、可靠性以及劳动生产率，都起着重要的作用。

30万瓩汽轮机的蒸汽初参数是 165 *ata*、550℃。一般说来，汽压为 120 *ata* 以上的机组称为超高压机组，汽压为 160~170 *ata* 的机组称为亚临界压力机组，大于 226 *ata* 称为超临界机组。所以，30万瓩机组属于亚临界压力机组。又为了提高热效率和降低在低压区域的蒸汽湿度，以减小对叶片的冲蚀作用，蒸汽在经过高压缸做功后，再进入再热器将蒸汽温度升高，然后流经中、低压缸做功。因此，又称为亚临界压力中间再热式汽轮机。

30万瓩汽轮机组的基本热力系统见图 1-1 所示。汽轮机共有四个汽缸，即高压缸、中压缸和两只低压缸。高压缸为反流式布置。这对于减少轴向推力，改善高、中压缸胀差条件都有好处。低压缸结构基本上与12.5万瓩汽轮机组的低压缸相同，为双流式，这样，既能抵销轴向推力，又能使低压通道设计合理而紧凑。30万瓩汽轮机组的低压缸有相同的两只，共有四处排汽。所以，30万瓩汽轮机组在结构上称为四缸四排汽。

蒸汽由1000吨/时容量的直流锅炉产生。汽轮机额定流量为945吨/时，此时机组能实发电功率31.8万瓩。新蒸汽进入高压缸做功，能发出功率近10万瓩。高压缸排汽到再热器进行中间再热。再热后的蒸汽送入中压缸做功，能发出功率近13万瓩。中压缸排出的蒸汽经过两根连通管，便进入低压缸做功，能发出功率约9万瓩，最后分四股汽流进入凝汽器，将排汽凝结成水后，由主凝结水泵（以后简称主凝泵）将凝结水打到化学除盐装置，进行除铁、除铜、除硬度处理（因为直流炉的水质要求高），再由凝结水升压泵（以后简称凝升泵）将凝结水打出，经过轴封加热器（部分凝结水经过）、低压加热器（ $J_8 \sim J_9$ ），进入除氧器（CY）。然后由给水泵将水箱中的水打出，经高压加热器（ $J_3 \sim J_1$ ）进入直流锅炉。锅炉给水温度在额定工况时（945吨/时）为263℃。

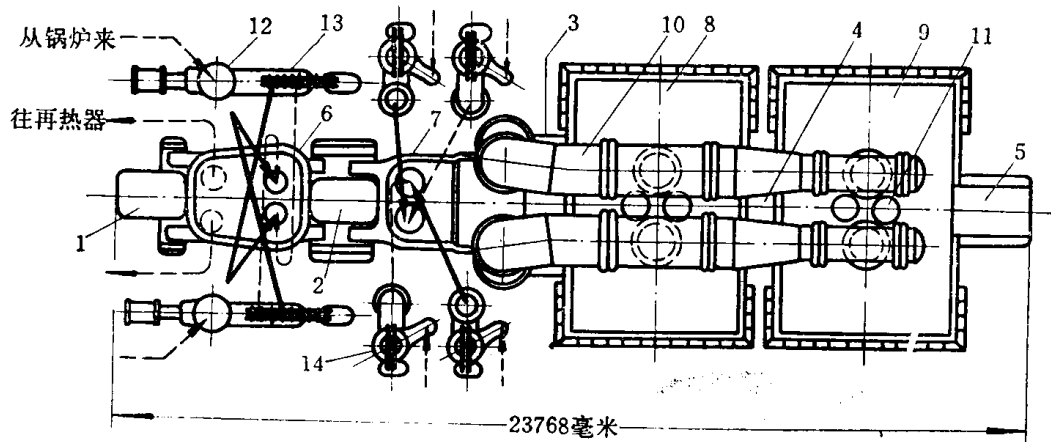


图 1-2 30万瓩汽轮机本体布置图

1—1号轴承；2—2、3号轴承；3—4、5号轴承；4—6、7号轴承；5—8、9号轴承；6—高压缸；7—中压缸；8—低压缸Ⅰ；9—低压缸Ⅱ；10—连通管(两根)；11—安全门(四只)；12—高压主汽门(两只)；13—高压调节汽门(两排)；14—联合汽门(四只)

汽口压力大于大气压时，安全门便动作。

由于大容量机组的蒸汽量很大，需要有较大的通流面积，因此给汽轮机的制造带来不少问题。为了解决这些问题，现在大型机组一般采取下列措施：

(1) 提高进汽参数和采用中间再热，以提高蒸汽做功能力和热效率，减少蒸汽流量。但是提高初参数受到了金属材料的限制，特别是温度对强度的影响较大，不能提得很高，因此进汽温度一般采用 $535\sim 550^{\circ}\text{C}$ 的机组较多。

(2) 采用多缸多流方式，以减小低压缸结构的体积，如本机组采用了两只双流式的低压缸（通流部分与12.5万瓩机组通用），构成四缸四排汽型式，末级叶片长度为700毫米。今后30万瓩机组改型后，将采用900毫米的长叶片，这样便可改用一只低压缸而变为三缸双排汽型式。同时，此低压缸也能与60万瓩机组的低压缸通用。

图1-3是30万瓩汽轮机总装时的情形，由图可看到本机组内部的大体结构。

图1-4(a)所示，是高压缸的纵剖面图。在高压缸部分，蒸汽从调节汽门进入调节级的喷嘴组，冲动调节级。调节级采用单列级，它比双列调节级效率高。高压缸还有八个压力级：前面六个压力级的隔板装在内缸中，使高温蒸汽同外缸隔离；后面两个压力级的隔板装在隔板套上。在内缸及隔板套之间，形成第1级抽汽口，蒸汽从第8级压力级出口（即高压缸排汽）通向再热器，同时也分一路蒸汽作为第2级抽汽。

图1-4(b)为中压缸纵剖面图。在中压缸部分，蒸汽从再热器的热段送来，通过联合汽门进入汽缸。中压缸共有11个压力级，即第9~19级压力级。第9级的喷嘴隔板直接固定在内缸汽室上，第9~12级隔板安装在中压内缸之中，使高温段与外缸隔离，其后装有三只隔板套，第1只隔板套上装三级隔板，第2、第3只隔板套上各装两级隔板。在内缸与三只隔板套之间的各空档分别为抽汽口，中压缸排汽位置也有一抽汽口，因此中压缸共有四个抽汽口（第3~6级抽汽），就是分别从第12级、15级、17级及19级后面抽出。

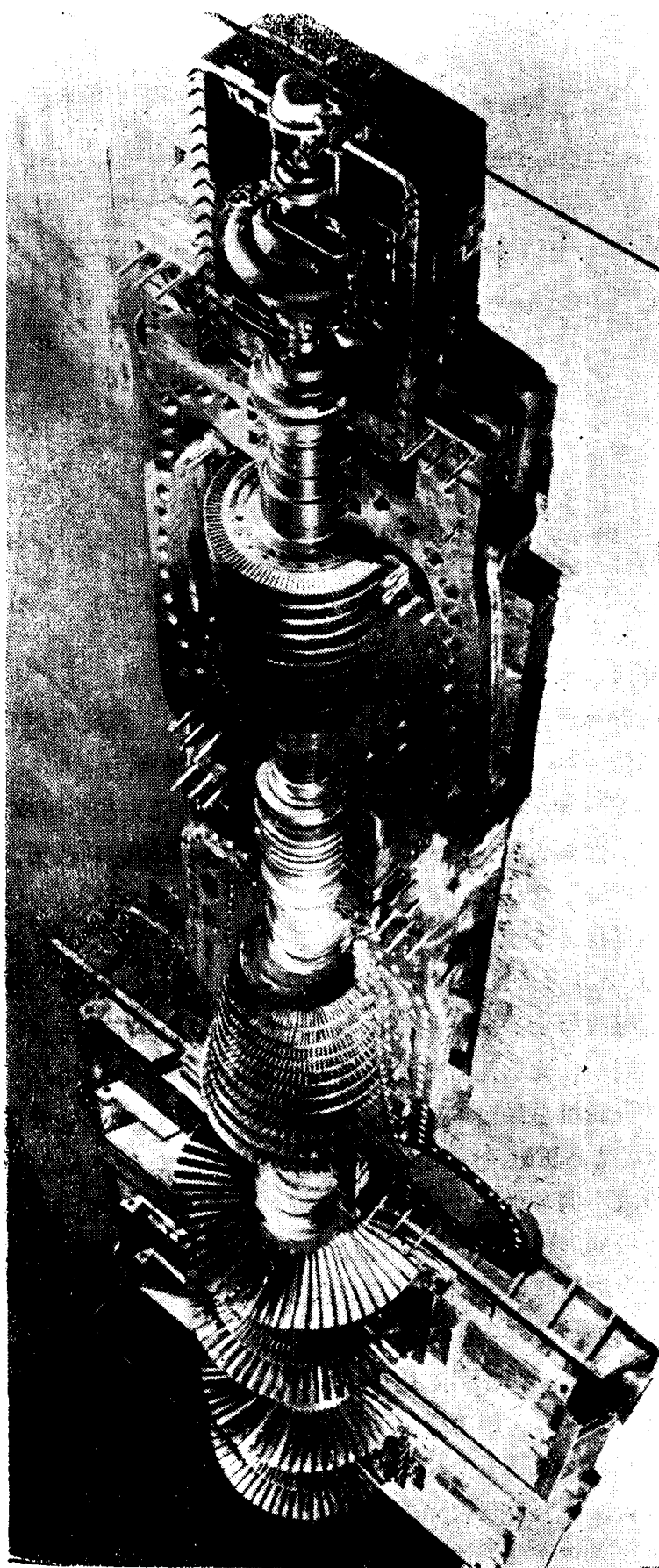


图 1-3 30万瓩汽轮机内部结构

中压缸的排汽，通过连通管，从上面通向两只低压缸，分流成四股汽流进行做功。

图1-4(c)、(d)表示了低压汽缸的纵剖面图。从热力过程来看，低压缸只有六个压力级；但是从结构上看，低压缸共有 $6 \times 4 = 24$ 级。低压缸Ⅰ为第20~25级和第26~31级；低压缸Ⅱ为第32~37级和第38~43级。它们的热力过程都相同。

低压缸也是由外缸和内缸组合而成的，所有隔板都装在内缸中，并在低压缸的第3级、第5级后设有抽汽口，即在第22、28、34、40级后为第7级抽汽；在第24、30、36、42级后为第8级抽汽。低压缸的排汽经过导流板径向汇流到凝汽器。这种径向排汽结构的优点是，能减少排汽流动损失，并能缩短汽轮机的轴向尺寸。

本机组的隔板，除直接放在内缸里的以外，均放置于隔板套上。这样的结构改善了汽缸的受热条件，并且可以简化加工外缸大件的工艺，便于制造，还能合理地使用材料。另外，使汽缸结构更能符合采用整锻转子后紧凑轴向尺寸的要求，又不致影响抽汽口的布置。

主机的主要技术规范如下：

本汽轮机是亚临界压力中间再热凝汽式机组，适宜于带基本负荷，也可以作为带变动负荷的机组使用，但不能用来拖动变速机械。

(1) 名称：亚临界压力中间再热凝汽式汽轮机。

型号：N300-165/550/550型。

型式：亚临界压力中间再热，四缸，四排汽，凝汽式。

额定功率：300000瓩。

经济功率：300000瓩。

(2) 主汽门前蒸汽压力：最高172ata；

正常165ata；

最低158ata。

主汽门前蒸汽温度：最高555°C；

正常550°C；

最低535°C。

(3) 联合汽门前蒸汽压力：正常31.77ata。

联合汽门前蒸汽温度：最高555°C；

正常550°C；

最低535°C。

(4) 冷却水温度：最高33°C；

正常20°C。

(5) 排汽压力：额定功率时为0.05175ata。

(6) 汽轮机额定转速：3000转/分。

(7) 转子旋转方向：自汽轮机向发电机看，为顺时针方向。

(8) 汽轮机在工作转速下，振动最大许可值为0.05毫米。汽轮机在越过临界转速时，振动最大许可值为0.15毫米。

(9) 回热抽汽情况: 回热抽汽共有 8 级。即低压加热器 4 级, 高压加热器 3 级, 除氧器 1 级。

(10) 汽轮机在额定工况下投入回热系统时, 根据说明书介绍(保证指标), 汽耗为 3.005 公斤/瓩·时, 热耗为 1956 大卡/瓩·时。

以上数据是在设计蒸汽参数, 设计的冷却水温, 同时发电机效率 $\eta_g = 0.9872$, 发电机功率因数 $\cos\varphi = 0.85$, 以及给水泵效率为 0.75 的条件下得到的, 保证范围为 $\pm 5\%$ 。

(11) 汽轮机在下列情况下, 能发出额定功率并允许长期运行:

- 1) 蒸汽参数降至 158ata、535°C;
- 2) 冷却水温度升高至 33°C (进汽参数正常);
- 3) 不抽汽时。

(12) 汽轮机油路系统:

- 1) 润滑油压: 0.8~1.5 ati (表压力);
- 2) 调速系统油压: 20 ati;
- 3) 在出口油压为 20 ati 时, 主油泵出油量为 8 米³/分;
- 4) 油箱容积: 40 米³;

5) 冷油器: 型号为 YL-95-1; 冷却面积 95 米²; 冷却水量 200 吨/时; 此时水阻为 2.4 米水柱。油量在 121900 公斤/时, 油温在 30°C 时, 油侧阻力为 0.6 ati。

图 1-5、1-6、1-7 是本机根据设计计算的三套热力特性曲线; 图下所标的 “152-2”, 是制造厂出厂机组编号, “152-2” 是安装在本厂的该台机组。

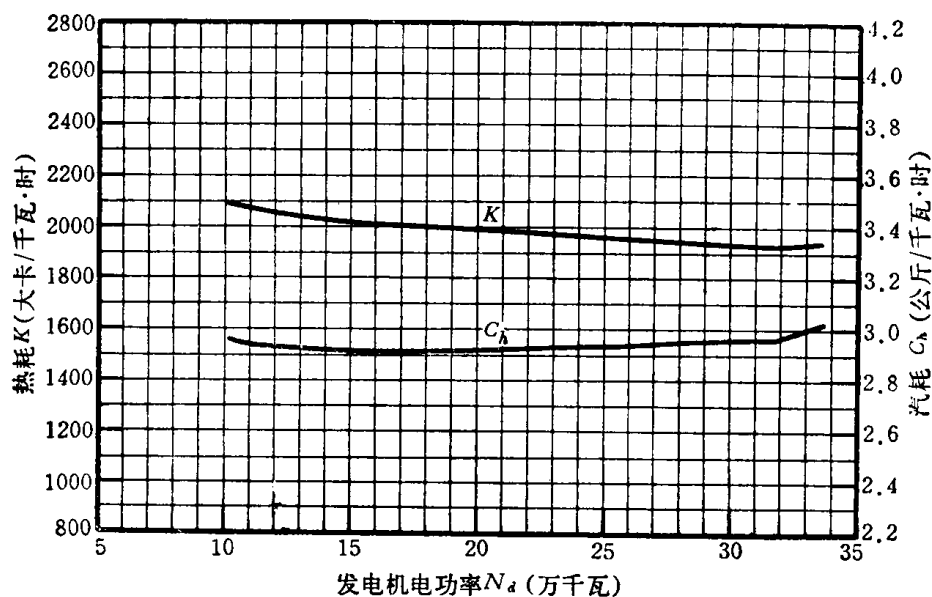


图 1-5 热耗、汽耗曲线 (152-2)

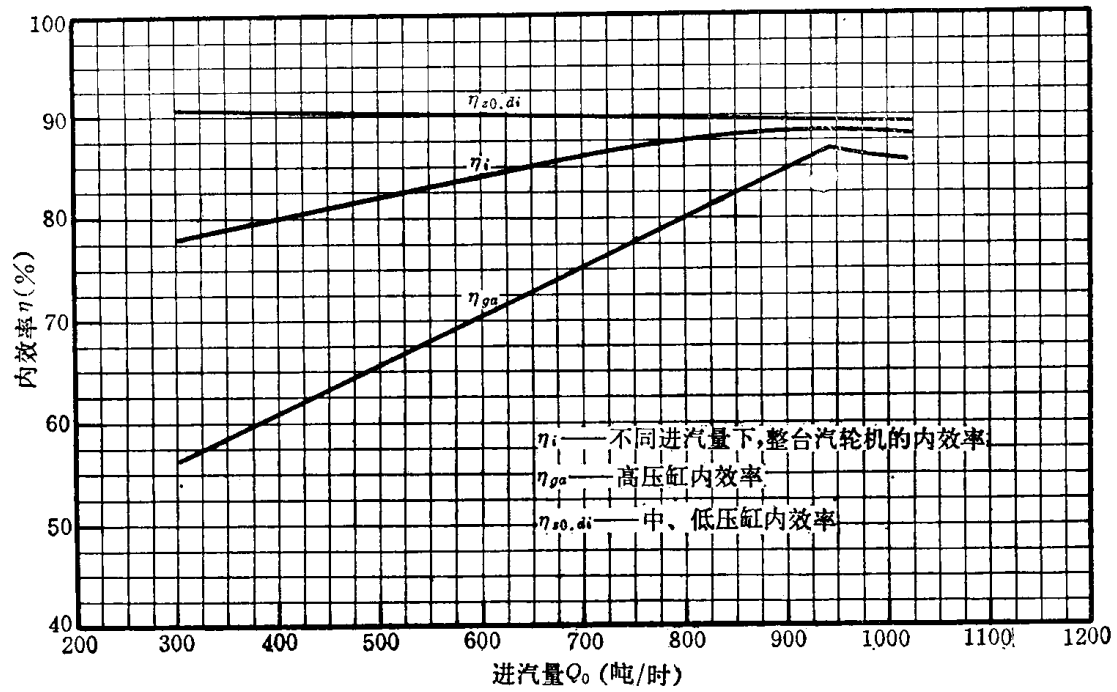


图 1-6 机组内效率曲线 (152-2)

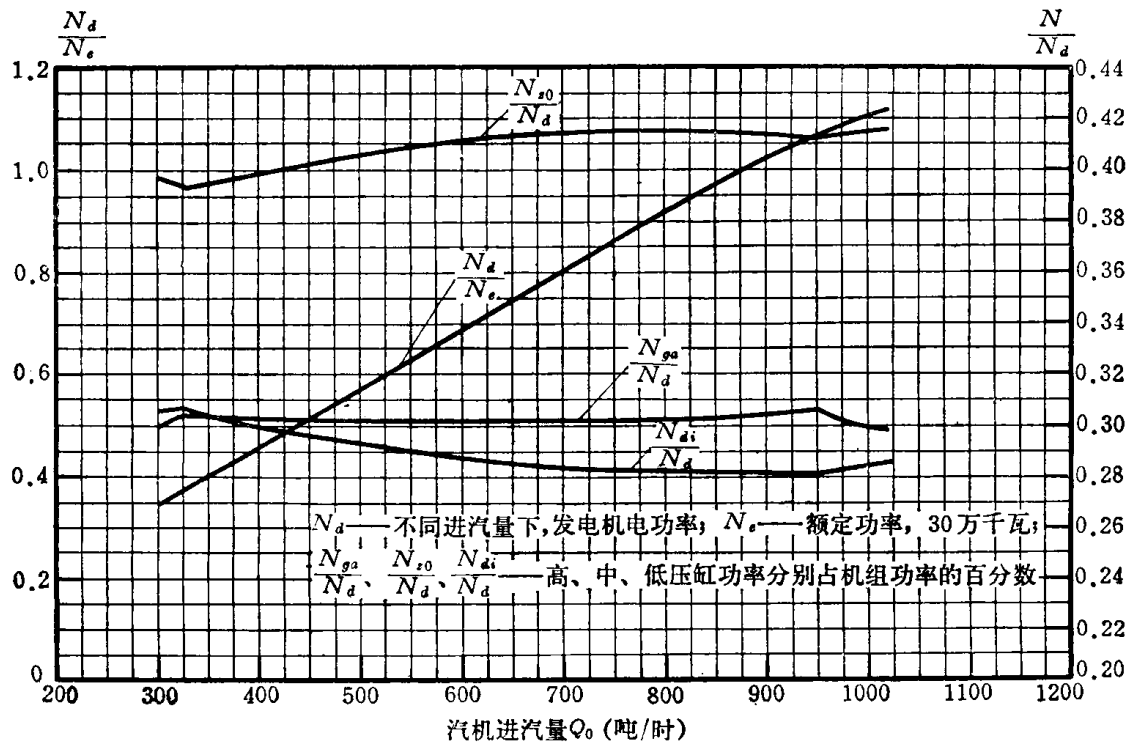


图 1-7 功率与流量关系曲线 (152-2)

第二节 转 子

一、转 子 的 型 式

根据高参数汽轮机的特点,本机转子采用了先进的结构型式。本汽轮机共有四个转子,即高压转子、中压转子及两个低压转子。现分别作一简单的介绍。

1. 高压转子

其结构简图见图1-8。转子总长为4676毫米,总重8.2吨;其型式是整体锻造转子,就是叶轮与转轴锻成一体。而一般中参数机组的转子是套装式的,即叶轮另外加工好后,再热套在转轴上。套装式的转子虽然加工方便,但是只能用于小功率机组,而且结构很不紧凑。更重要的是,套装式如果用于高参数转子,则由于高温的关系,在转子加热过程中可能产生暂时性热挠曲,还有可能使叶轮与轴失去紧力,这些都是不能允许的。采用整锻转子的优点是:不但能应付高温条件,适应快速启动;而且在结构上也比较紧凑,轴向长度短,转子刚性好,叶轮强度较高;还可设计成等厚度叶轮,便于加工。因此,目前在高参数条件下工作的转子,几乎都采用了整锻式转子。本机叶轮设计成等厚度,各级轮缘又设计成等直径,这对制造加工也带来了一些方便。

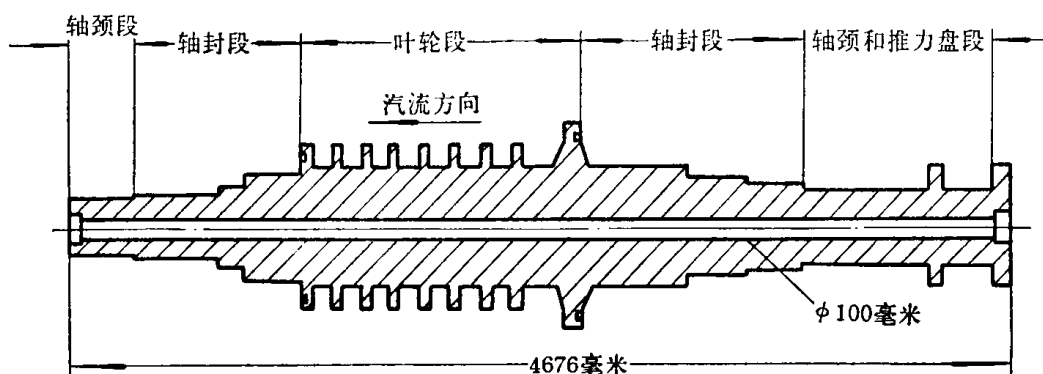


图 1-8 高压转子结构简图

联轴器也与转子成为一体,因此强度好,传递转矩大。

但是制造整锻转子,需要大型锻冶设备,加工要求高,工艺复杂,一有差错就可能使整个转子报废,而且耐高温钢材的消耗量也大。这些缺点都有待于今后改进。

高压转子采用 27Cr2Mo1V(相当于25Cr1Mo1V的P₂钢)钢材。这种钢材是珠光体热强钢,有较好的制造工艺性能及热强性能,适宜于作高温大截面零件。在500~550℃下长期保温仍有良好的塑性,组织稳定性也较好。因此,这种钢材可以用来制造工作温度在540℃以下的汽轮机整锻转子和叶轮,也可用来制造 525℃ 以下工作的紧固件、套筒、主汽阀活塞环和调节阀等。

在转子中心打有φ100毫米的中心孔,其目的是为了去掉转子锻压时集中在轴心的夹杂物和金相疏松部分,以保证转子的强度;也便于探伤工作,检查转子质量;同时也可减

轻转子的重量。

高压转子的结构,从车头开始,有第1号轴颈、轴封、八个压力级叶轮、调节级叶轮、轴封、第2号轴颈、推力盘和联轴器。轴颈的扁圆度及锥度总值不大于0.02毫米,而且在轴颈及推力盘表面不准有划伤及刮伤痕迹,镜面应光洁。

在八个压力级叶轮上都开有七个平衡孔,孔径为 $\phi 40$ 毫米,均匀地分布在 $\phi 720$ 毫米的轮面圆周上。平衡孔的作用是平衡叶轮前后面的蒸汽压力差,以减少转子的轴向推力。

在高压转子的调节级叶轮和高压末级叶轮的外侧,都开有圆周燕尾槽,如图1-9中的A、B所示。它可作为加装平衡重量之用。在设计制造时,为了使汽轮机在不开缸的条件下也能找动平衡,在高压末级叶轮的轮缘边上均匀钻有24个螺孔C。并将试加重量做成螺塞,可以利用特殊工具伸进高压缸前端的一个斜孔(见图1-4a),把螺塞拧在螺孔内。这样,就可以着手进行找动平衡工作。如果需要加固定重量,可以利用特殊工具将螺塞铆死在螺孔内(此措施在本机现场并未使用)。

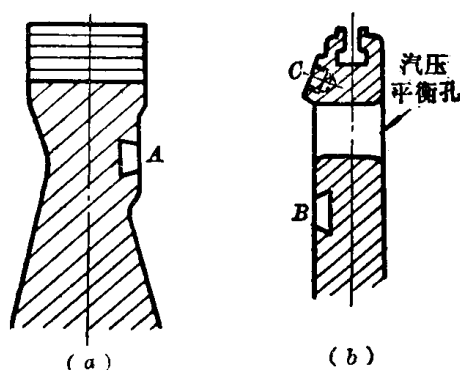


图 1-9 加平衡重量块的位置
a—调节级叶轮; b—高压末级叶轮

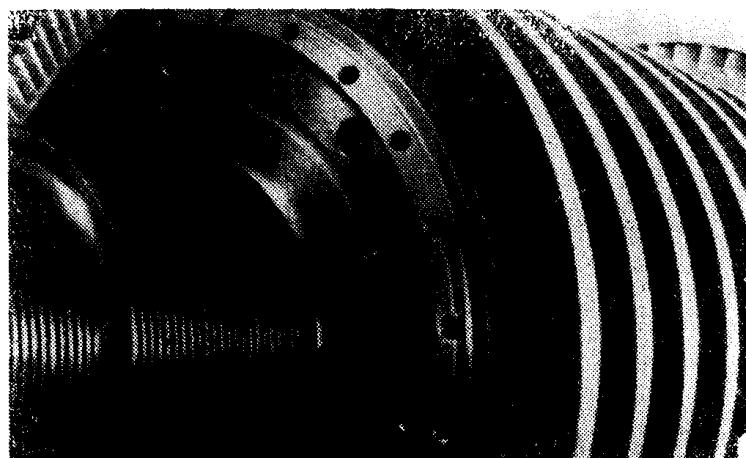


图 1-10 高压转子末级叶轮结构

图1-10是高压转子末级叶轮侧的照片,在轮缘处的一排螺孔,可作为不开缸找动平衡时加重量之用。在轮体上还开有大圆孔,即汽压平衡孔。在燕尾槽内已嵌有三块平衡块。

2. 中压转子

进入中压缸的蒸汽是经过再热器再热的,温度为 550°C ,与高压缸的进汽温度一样。由于转子所处的工作温度较高,因此设计制造中压转子时,其要求和高压转子一样,为整锻转子结构,也采用 $27\text{Cr}2\text{Mo}1\text{V}(\text{P}_2)$ 耐高温钢材。又因蒸汽进入中压缸后,汽压已降低,容积流量 Gv 增大,要求通流尺寸比高压缸大,因此中压转子也相应比高压转子大。其结构如图1-11所示,总长为5152毫米,重量15.1吨,叶轮也设计成等厚度与等直径的,共有11个压力级。

在中压转子的两端都有联轴器,与转子锻成一体,转子也开有 $\phi 100$ 毫米的中心孔。在头、末两个叶轮的外缘,也开有圆周燕尾槽A和B,作为加动平衡重量块之用。同样,在叶轮上都开有平衡孔,以平衡蒸汽的压差。

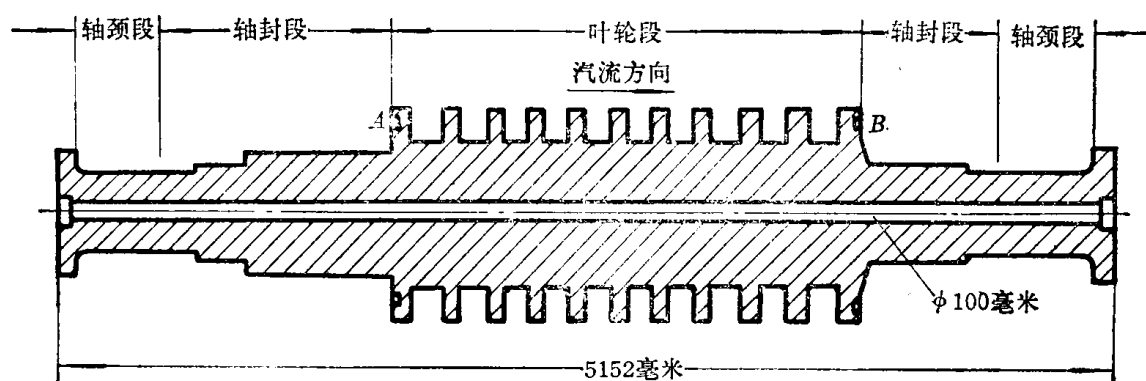


图 1-11 中压转子结构简图

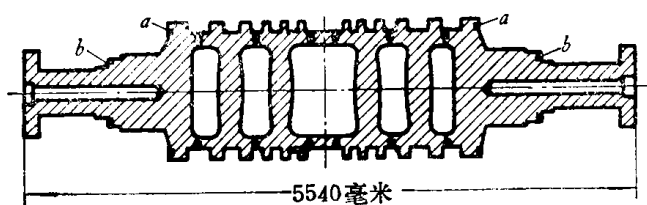


图 1-12 低压转子结构简图

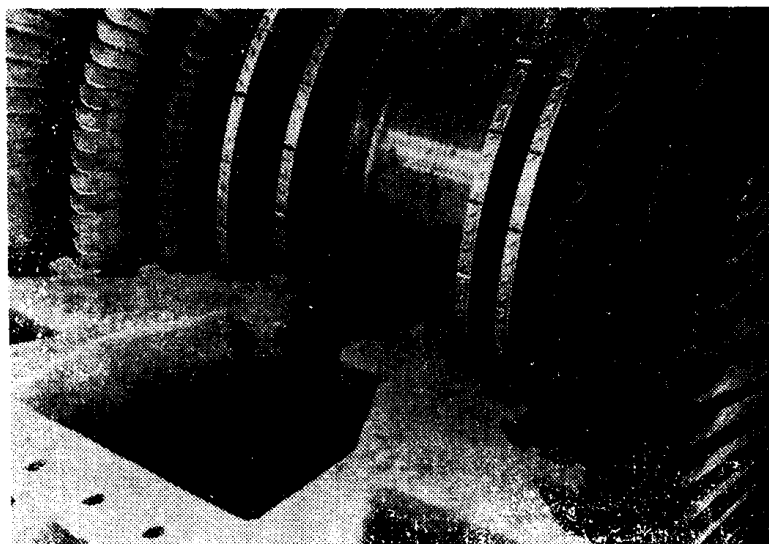


图 1-13 低压转子近照

3. 低压转子

低压转子共有两个，采用焊接转子，由几只鼓形轮和两个端轴焊接而成，如图1-12所示。这种结构的优点是强度高，相对重量轻，刚度大，能承受叶片较大的离心力，又能适应低压部分需要较大通流截面积而设计的大直径的要求。但是焊接转子要求材料有较好的焊接性能，而且焊接工艺要求高。该低压转子由于承受的离心力较大，因此在高速运转时径向受到强烈拉伸作用，产生弹性变形，使转子的轴向长度比自由状态时的长度有所缩短。

低压转子重量为26.5吨及27吨，钢材采用的型号是17CrMo1V。这种钢材加工工艺性