

第 1 章 工业蒸汽轮机

1. 什么叫蒸汽轮机？有何特点？

答：蒸汽轮机是一种以蒸汽为动力，将蒸汽的热能转化为机械功的旋转式原动机，具有效率高、功率大、转速容易控制、寿命长、运转安全可靠等特点，因此被广泛地应用在发电、冶金、石油化工、交通运输、轻工业等行业。

2. 什么叫工业蒸汽轮机？有何特点？

答：工业蒸汽轮机是指除中心电站蒸汽轮机、船舶蒸汽轮机以外的其他蒸汽轮机，其中包括工矿企业采用的用于驱动泵、风机、压缩机等机械的蒸汽轮机，以及用于工厂自备电站的蒸汽轮机。在化工企业中应用的工业蒸汽轮机具有数量多、品种杂、用途广、高参数、大容量、高转速、变转速、单系列运行、自控联锁程度高等特点。

3. 工业蒸汽轮机装置的基本组成有哪些？各部分有何作用？

答：工业蒸汽轮机装置是以蒸汽为工作介质的旋转式热动力机械，它必须与其他一些设备一起协调配合工作，其基本组成有锅炉、过热器、工业蒸汽轮机、凝汽器、给水泵和工作机（如压缩机、泵、风机）等，如图 1-1 所示。

锅炉给水泵给锅炉提供产生蒸汽用的水，它是关键性设备，一旦发生故障，锅炉给水将中断，被迫停炉，无法继续产生蒸汽。

锅炉是将锅炉给水转变成高温、高压蒸汽的设备，有快装锅炉、辅助锅炉和废热锅炉等。

过热器用以将锅炉汽包送来的饱和蒸汽继续加热，在原有的压力下再提高温度而变成过热蒸汽，然后送入蒸汽管道供给工业蒸汽轮机作功。

工业蒸汽轮机是利用蒸汽对外作功的设备，从过热器过来的高温、高压蒸汽，流经蒸汽轮机后，它的压力和温度都要降低，产生膨胀作功，蒸汽的热能转变为机械功，由工业蒸汽轮机轴端输出，驱动压缩机、泵等工作机械。

凝汽器又称冷凝器，是冷凝式工业蒸汽轮机中工作介质的低温放热源。在工业蒸汽轮机中作完功的蒸汽，排到冷凝器内，在一定压力下将汽化潜热释放给冷却水，蒸汽凝结成水，并在冷凝器中形成了真空。冷凝水由冷凝水泵抽出，经锅炉给水泵后再送给锅炉，作为锅炉给水。冷凝器有两个作用：一是蒸汽回收，冷凝成水后再供给锅炉，循环使用，这样可降低运行成本，提高经济效益；二是建立并保持工业蒸汽轮机排汽出口的高度真空，增大蒸汽的可用热焓降，从而提高工业蒸汽轮机的功率和循环热效率。但在背压式工业蒸汽轮机中，排汽

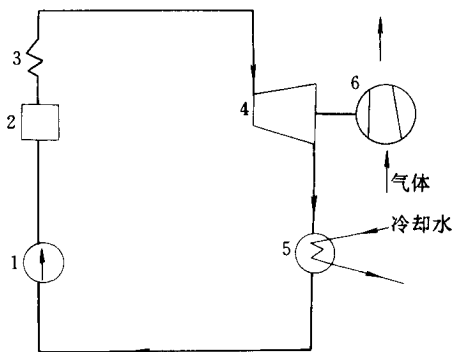


图 1-1 工业蒸汽轮机装置简图

- 1—给水泵；2—锅炉；3—过热器；
- 4—工业蒸汽轮机；5—冷凝器；
- 6—离心压缩机

压力高于大气压力，它的排汽仍可供给其他用汽单位使用，因此也就不再需要冷凝器了。

4. 蒸汽轮机的基本工作原理是什么？

答：蒸汽轮机是用蒸汽来作功的旋转式原动机，蒸汽轮机将蒸汽的热能转变为机械功，通常是通过冲动作用原理和反动作用原理这两种方式实现的。

(1) 冲动式蒸汽轮机工作原理

冲动式蒸汽轮机最简单的结构如图 1-2 所示，图中为一单级冲动式蒸汽轮机，由一个喷嘴和一级叶轮组成，叶轮外圆周上装满一圈动叶片。

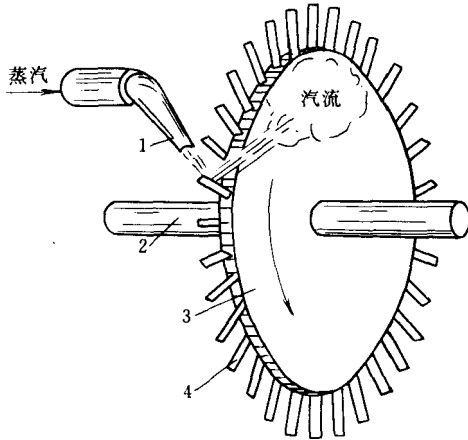


图 1-2 单级冲动式蒸汽轮机示意图

1—喷嘴；2—轴；3—叶轮；4—动叶片

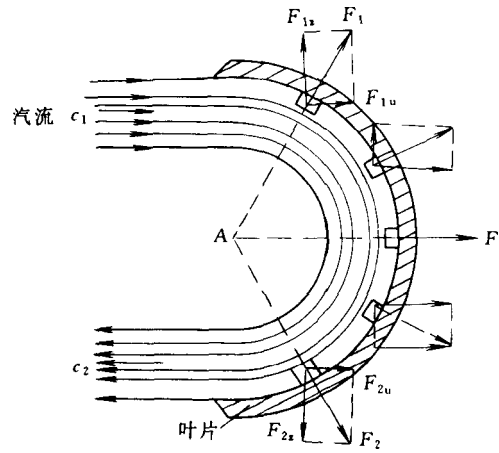


图 1-3 蒸汽微团作用在叶片上的离心力

喷嘴又称静叶片，在喷嘴中，蒸汽降温、降压，获得高速汽流。由喷嘴流出的高速汽流流进动叶片，在动叶片中，汽流由于受动叶片的阻碍（作用力），改变原来的速度大小及方向，这时汽流必然给动叶片一个反作用力，推动叶片运动，将一部分动能转换为叶轮旋转的机械功。

图 1-3 为一动叶片工作和受力分析的示意图，喷嘴将高速蒸汽以 c_1 速度流入动叶片内弧面，并沿着内弧面逐步改变其流动方向，最后蒸汽以 c_2 速度流出。当动叶片固定不动时， c_1 和 c_2 应大小相等、方向相反。

当汽体流经动叶片的曲面时，实际上作圆周运动，因此每一个蒸汽微团都受动叶片一个向心力，同时动叶片也受蒸汽微团一个大小相等、方向相反的反作用力，在这里就是一个离心力。假设 1 点处蒸汽微团的离心力为 F_1 ，可分解为轴向力 F_{1z} 和运动方向的力 F_{1u} ，同样在 2 点处蒸汽微团的离心力为 F_2 ，可分解为轴向力 F_{2z} 和运动方向的力 F_{2u} ，其余各点力均可这样分解，如图 1-3 所示。因 F_{1z} 和 F_{2z} 大小相等、方向相反，相互抵消，同样其余各点的轴向力也相互抵消，即

$$F_{1z} + F_{2z} + \dots = \sum F_{iz} = 0$$

在弯曲面运动方向分力之和为

$$F_{1u} + F_{2u} + \dots = \sum F_{iu} = F$$

在 F 力作用下动叶片右移，通过叶轮及轴产生旋转运动。

在实际蒸汽轮机中，由于机械结构等方面的限制，使从喷嘴中流出来的汽流，不能与动叶片运动方向完全相同，而是有一定夹角。动叶片也不是一个简单的半圆弧，而是由好几段曲线组成，但其基本原理不变。

(2) 反动式蒸汽轮机工作原理

反动式蒸汽轮机通流部分仍然由一级级静叶片和一级级动叶片组成，在静叶片中汽流与流经喷嘴相似，压力降低、容积膨胀、速度增加；而它的动叶片也作成截面逐渐收缩的汽道，汽流在动叶片中进一步降压、膨胀和加速。由惯性定律可知，运动物体如果不受外力作用的话，则一定按照它原来的速度大小及方向运动下去。汽流既然在动叶片中获得了加速度，那么必然有外力作用在汽流上，这个力是由于在动叶片中降低了汽流的压力和温度，即汽流的热能转化为动能所得到的。蒸汽在动叶片中进一步降压、增速，并以高速离开，这时汽流必然给动叶片一个大小相等、方向相反的作用力，使动叶片转动，带动轴旋转对外做功。

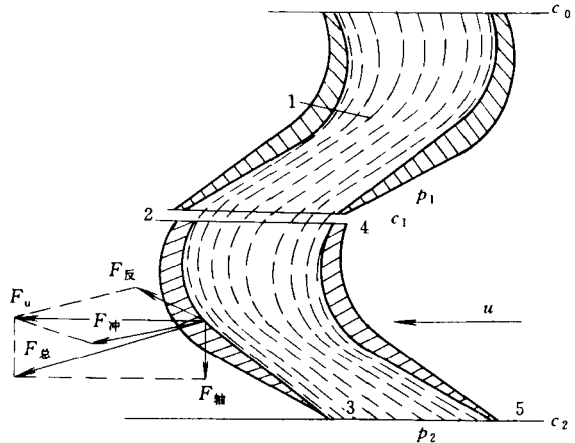


图 1-4 反动式蒸汽轮机的级

图 1-4 为反动式蒸汽轮机的一个级的断面示意图，蒸汽在静叶片中膨胀升速，以较高的速度进入动叶片流道，动叶片就受到由于冲动原理产生的冲动力 $F_{冲}$ 。又由于汽流在动叶片流道中压力由 p_1 降至 p_2 ，因而动叶片又受到由于反动作用原理而引进的反作用力 $F_{反}$ 。 $F_{冲}$ 与 $F_{反}$ 的合力为 F_u 。此外，动叶片前后有压差，也引起一个轴向力 $F_{轴}$ 。 F_u 与 $F_{轴}$ 的合力为 $F_{总}$ ，这就是作用在动叶片上的总力， $F_{总}$ 沿叶片运动方向的分力，使叶片向左运动，推动转子转动对外做功。

5. 什么是蒸汽轮机中的级？

答：在蒸汽轮机中，由喷嘴和与其配合的动叶片构成的做功单元称为级，喷嘴装在汽缸的隔板上静止不动，动叶片装在叶轮上随叶轮一起旋转。级是蒸汽轮机中最基本的做功单元，蒸汽的热能转变成机械能的能量转变过程就是在级内进行的。

6. 什么是蒸汽轮机的反动度？

答：近代常用的蒸汽轮机，大都是带一定反动度的冲动式蒸汽轮机，在这种蒸汽轮机中，在动叶片内也有汽流膨胀。所谓反动度，指蒸汽在动叶片中的膨胀程度与级中总的膨胀程度的比值，或蒸汽在动叶片中的理想焓降与级中总的焓降之比。纯冲动级反动度为零，蒸汽膨胀只在喷嘴中进行；反动级的反动度为 0.5，蒸汽膨胀有一半在动叶片中进行；带反动度的冲动级反动度大于 0 而小于 0.5，一般为 0.05~0.20，蒸汽膨胀有一小部分在动叶片中进行。带不大反动度的冲动级使用最广泛，它可以提高冲动式蒸汽轮机的效率。

7. 什么是蒸汽轮机中的压力级？

答：在可以利用的蒸汽能量很大的情况下，只有一个级不能充分利用这些能量。这时，我

们把由喷嘴和动力叶片组成的级串联在同一根轴上，将蒸汽的能量分别在若干个级中加以利用。从结构上来看，就是一列喷嘴和一系列动叶片，其后又是一列喷嘴和一系列动叶片，这样逐次排列下去。在第一列喷嘴进口处的蒸汽压力最高，以后逐级降低，这就是常见的多级蒸汽轮机的结构形式，其中的每个级，都叫做压力级。

8. 什么是蒸汽轮机中的速度级？

答：在单级蒸汽轮机中，有时在叶轮上装两列动叶片，在两列动叶片间的汽缸上还安装有引导蒸汽流向的导向叶片。蒸汽在喷嘴中膨胀加速后，首先流经第一列动叶片做功，后又由导向叶片引入第二列动叶片继续做功，然后再排出机外，这样就减少了蒸汽的能量损失，提高了蒸汽轮机的效率。这种级叫双列速度级，有时还有三列速度级，但常用的还是双列速度级，这种级也可作为多级蒸汽轮机的首级。

9. 多级蒸汽轮机有何特点？

答：多级蒸汽轮机由依次排列的若干个级串联而成，具有以下特点。

(1) 可采用最佳速比，保证效率。由于多级蒸汽轮机采用较多的级数，各级承担的焓降并不大，可以在轮周速度 u 不大的条件下保证各级有最佳速比值，每级的效率与整机的效率都得到提高。

(2) 使蒸汽轮机高压段各级的效率提高。因为每一级的焓降不大，所以绝对速度 c_1 也不大。在保持最佳速比条件下，当转速 n 一定时，根据 $u = \pi dn/60$ ，平均直径 d 也较小，在容积流量 Q_V 一定时，因为 c_1 及 d 都小，可使喷嘴高度相应增加，部分进汽度 e 也相应增加。

(3) 由于每级的焓降不大，因此每级进、出口压力相差不大，使每一级喷嘴的压力比 $p_1/p_0 > \epsilon_c$ ，于是可采用渐缩型喷嘴，而不用缩放型喷嘴，渐缩型喷嘴不但构造简单，加工方便，并且在变工况时，速度系数变化较缩放型喷嘴要缓和，变工况性能好。此外，由于汽流速度不高，因此在喷嘴、动叶栅中的流动损失也不大。

(4) 余速动能获得充分利用。在蒸汽轮机中除了第一级外，在有抽汽口的地方和最后一级，它们的余速动能不能被利用外，其余的级，由于汽道较平坦，且轴向距离较近，布置紧凑，上一级的余速动能可以全部或部分地被本级利用，使多级蒸汽轮机效率提高。

(5) 在多级蒸汽轮机中可以采用调节或非调节抽汽，提供工业或生活用蒸汽，实现热能综合利用，从而提高蒸汽轮机组的经济性。

(6) 前一级的流动损失变为热量再加热蒸汽，提高级后蒸汽的焓值，即增加了下一级进口点的焓值，因此增加了做功能力，并提高了级的效率。

(7) 多级蒸汽轮机的单机功率可以做得相当大，以降低蒸汽轮机单位功率所消耗的金属，降低造价，减少运行费用。

10. 蒸汽轮机是如何分类的？

答：蒸汽轮机的类别和型式很多，有多种分类方法，可按热力特性、工作原理、结构型式、用途等进行分类，如表 1-1 所示。

表 1-1 蒸汽轮机分类

分 类	型 式	说 明	
按热力特性	凝汽式蒸汽轮机	排汽在低于大气压力的真空状态下进入凝汽器凝结成水	
	抽汽凝汽式蒸汽轮机	排汽压力低于大气压力，从蒸汽轮机中间级中抽出一定压力的蒸汽作为他用	
	背压式蒸汽轮机	排汽压力大于大气压力	
	背压抽汽式蒸汽轮机	排汽压力大于大气压力，中间抽出部分汽体供其他部门	
	多压式蒸汽轮机	充分利用工业生产工艺流程的副产蒸汽，热能综合利用好	
按工作原理	冲动式蒸汽轮机	蒸汽主要在喷嘴叶栅内膨胀	
	反动式蒸汽轮机	蒸汽在静叶栅和动叶栅内膨胀	
	冲动和反动组合式蒸汽轮机	转子各级动叶片既有冲动级又有反动级	
按结构	单级蒸汽轮机	通流部分只有一级，一般为背压式蒸汽轮机	
	多级蒸汽轮机	通流部分具有两个以上的级，可为凝气式、背压式、抽汽冷凝式、多压式等	
按蒸汽初压	低压蒸汽轮机 中压蒸汽轮机 高压蒸汽轮机 超高压蒸汽轮机 亚临界蒸汽轮机 超临界蒸汽轮机	蒸汽初压力小于 1.47MPa 蒸汽初压为 1.96~3.92MPa 蒸汽初压为 5.88~9.8MPa 蒸汽初压为 11.77~13.73MPa 蒸汽初压为 15.69~17.65MPa 蒸汽初压大于 22.16MPa	
按汽流方向	轴流式蒸汽轮机	蒸汽在蒸汽轮机内基本上沿轴向流动	
	辐流式蒸汽轮机	蒸汽在蒸汽轮机内基本上沿辐向（径向）流动	
	周流（回流）式蒸汽轮机	蒸汽在蒸汽轮机内大致沿轮周方向流动，功率较小	
按用途	中心电站用蒸汽轮机	绝大部分用抽汽凝汽式、抽汽背压式蒸汽轮机，同时供电供热的蒸汽轮机叫热电蒸汽轮机	
	船（舰）用蒸汽轮机	用于船（舰）推进动力装置，驱动螺旋桨	
	工业蒸汽轮机	单纯驱动	仅驱动各种工业机械，不向外供热，为凝汽式蒸汽轮机，可以变转速运行。用于化工、炼油、冶炼和电站等部门
		驱动并供热	驱动各种工业机械，并对外供热蒸汽。为抽汽凝汽式、抽汽背压式、背压式蒸汽轮机，可以变转速运行。用于化工、炼油和冶炼等部门
		单纯发电	工业企业自备电站中用于驱动发电机的蒸汽轮机，定转速运行
发电并供热		蒸汽轮机为抽汽冷凝式、抽汽背压式或背压式，定转速运行	

11. 蒸汽轮机由哪些主要部件组成？特点是什么？

答：蒸汽轮机主要由静止部分和转动部分组成，其中静止部分包括主汽阀、调节阀、汽缸、前后轴承座、机座、滑销系统等，转动部分主要指转子组件，包括蒸汽轮机主轴、叶轮、转鼓、动叶片、危急保安器等。

现以意大利新比隆公司生产的 ENK32/36 型抽汽、注汽、冷凝式蒸汽轮机为例，简要说明蒸汽轮机各主要部件的结构特点。

主汽阀：又称紧急停机阀，在紧急停车时，主汽阀自动快速关闭，切断汽源，使机组安全停车。该蒸汽轮机采用液压油动缸控制主汽阀的开启或关闭。

调节阀：调节阀分为五个阀头，在开车及正常运行中，通过控制调节阀的开度，调节进入蒸汽轮机的蒸汽量，从而控制蒸汽轮机的转速高低和功率大小。

轴承座：用来安装径向轴承和止推轴承，径向轴承采用五油楔可倾瓦轴承，止推轴承采

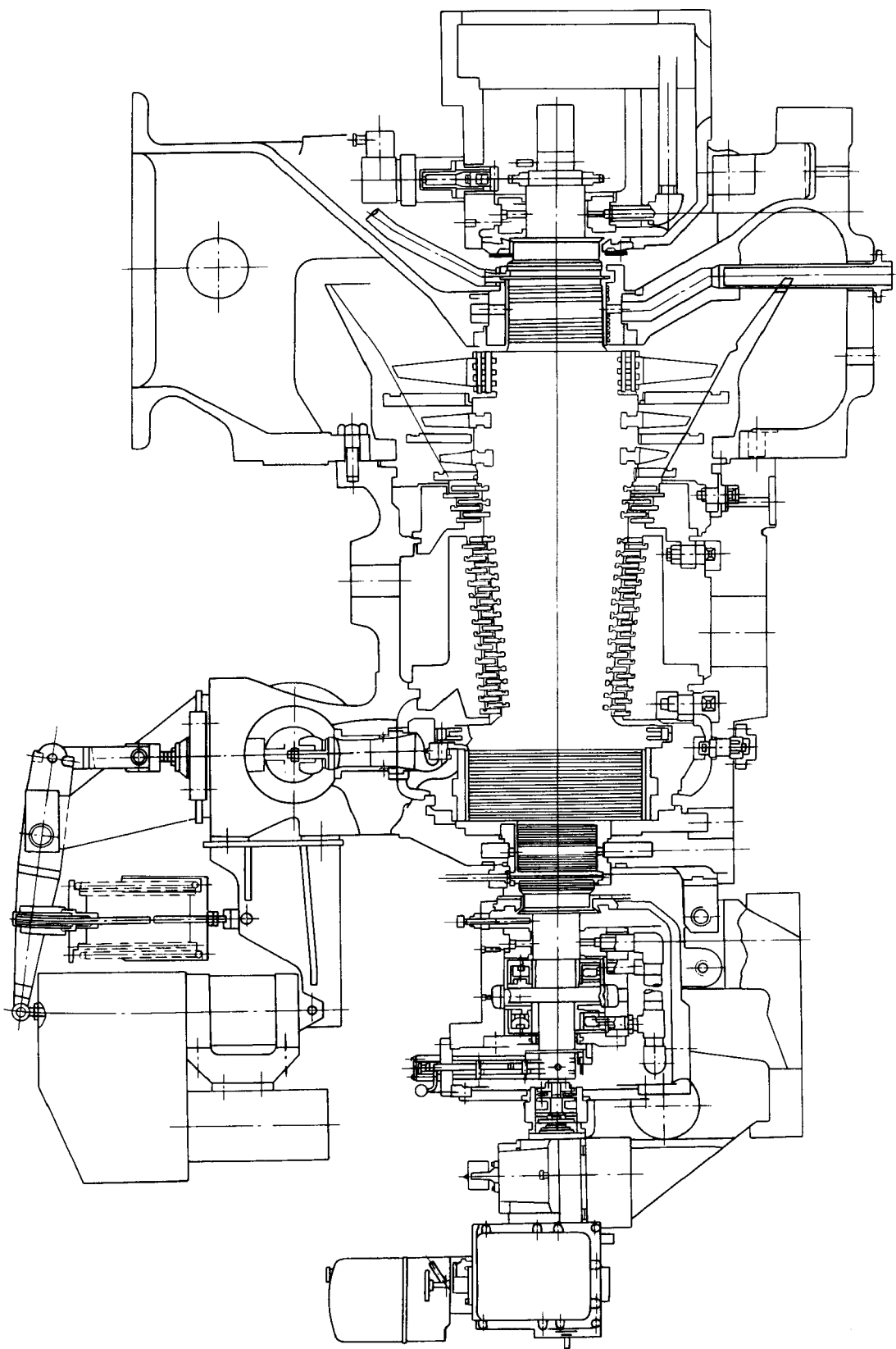


图 1-5 ENK32/45 型蒸汽轮机结构图

用金斯伯雷轴承。

汽缸：汽缸为水平剖分结构，分为上半缸和下半缸，上、下汽缸通过螺栓联接。汽缸沿轴向又分为高压和低压两段，两段间也有螺栓联接。汽缸前部为上半缸支承，上半缸猫爪搭在前机座上；汽缸后部为下半缸支承，下半缸通过两侧支脚坐落在机座上。

汽缸内设有一个高压蒸汽室和三个静叶持环。高压蒸汽室用来安装五段调节级喷嘴，三个静叶持环用来安装各反动级静叶片。蒸汽室和静叶持环也水平剖分为上、下两半，其中蒸汽室上的五段喷嘴均安装在上半部。在蒸汽轮机高压段缸体上部设有调节阀汽室、注汽口，下部设有抽汽口。在蒸汽轮机低压段缸体上部设有排汽口。在蒸汽轮机缸体下部设有缸体导淋。

机座是用来安装轴承座和汽缸的，应具有牢固、不变形、支承刚度高等特点。该蒸汽轮机机座直接焊接在底座上。

ENK32/45型蒸汽轮机转子为整锻式转子，主轴材料为40NiCrMo7，转子上面装有1级调节级叶轮和20级反动级动叶片，前17级反动级动叶片采用自带围带的等截面叶片，后3级反动级动叶片采用不带围带的扭曲叶片。调节级和最后一级动叶片采用叉形叶根，其余动叶片均采用T形叶根。转子为轮式-鼓式混合转子，冲动级为轮式，动叶片装在冲动级叶轮上，以后各级反动级静叶片均安装在转子转鼓的周向沟槽中。转子的前端设有平衡盘，还安装有危急保安器。转子的后端安装有盘车齿轮。

蒸汽轮机还有一套滑销系统，以确保缸体及轴承座在热胀冷缩过程中，不改变蒸汽轮机的中心位置。

ENK32/45型蒸汽轮机结构简图如图1-5所示。

12. 简述蒸汽轮机滑销系统的工作原理和结构有何特点？

答：蒸汽轮机在运行过程中同静态时相比，动、静部件因温度变化都发生膨胀，为保证在任何条件下各部件自由膨胀和动、静部件间保持合适的径向和轴向间隙，避免产生摩擦，特设一套滑销系统。机组在膨胀过程中有一点相对于支座是不动的，称为死点，运行时缸体以该点为中心，按规定方向向前、后、左、右、上、下各方向自由膨胀。一般蒸汽轮机缸体的膨胀死点都设定在排汽端，进汽端缸体上的猫爪搭在前支座上，使整个缸体可以自由地向前膨胀。转子以推力轴承为相对死点相对于汽缸发生膨胀。

以下以意大利新比隆公司ENK32/45型蒸汽轮机为例简单介绍滑销系统的结构特点。该蒸汽轮机的滑销系统示意图如图1-6所示。

ENK32/45型蒸汽轮机汽缸前、后端沿轴线的垂直中分面下部各设一纵销，汽缸后端两侧、支板下部各设一横销。蒸汽轮机后轴承座安装在后缸体上，前轴承座安装在前机座上，前轴承座与汽缸前端用螺杆联接，在前轴承座内安装有止推轴承，前轴承座中心线下部安装有纵销，调整纵销位置到使轴承座中心线与汽缸中心线在同一垂直平面内。在开车过程中，

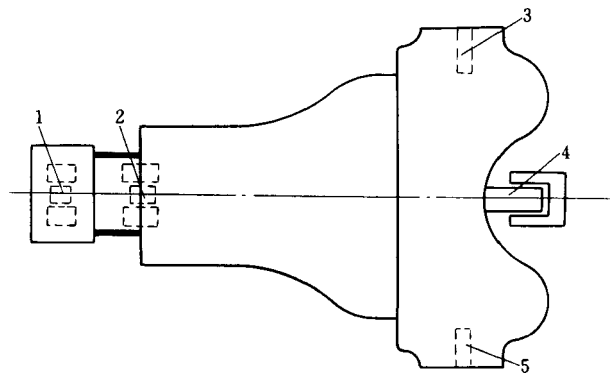


图 1-6 蒸汽轮机滑销示意图

1—前轴承箱导销；2—前汽缸导销；3—后汽缸定位销；
4—后汽缸导销；5—后汽缸定位销

缸体和轴承座受热膨胀，在左右方向以通过前后纵销的垂直中分面为中心向两面膨胀，两横销起导向作用，仍保证缸体中心线与轴承座中心线位置左右方向不变；在前后方向以通过两横销的垂直中分面为中心向前、后两面膨胀。在蒸汽轮机缸体向前膨胀过程中，也推动前轴承座带动转子向前移动，汽缸和前轴承座下的纵销起导向作用，保证了动静部件间合理的轴向间隙。

13. 蒸汽轮机转子主要由哪些部件组成？作用是什么？

答：蒸汽轮机的转动部分叫转子，由主轴、叶轮或转鼓、动叶片、止推盘、危急保安器、联轴器及其他装在轴上的零部件组成。转子是蒸汽轮机最重要的部件之一，其作用是将蒸汽的动能转变为机械能，传递作用在动叶片上的蒸汽圆周分力所产生的扭矩，向外输出机械功，以驱动压缩机、泵等机械。

14. 蒸汽轮机转子的结构特点是什么？

答：蒸汽轮机转子按结构型式可分为轮式转子和鼓式转子两种。

轮式转子是在主轴上直接锻出或以过盈形式安装有若干级叶轮，动叶片安装在叶轮上，这种转子主要应用在冲动式蒸汽轮机上。

鼓式转子主轴中间部位较粗，外形像鼓筒一样，转鼓外缘加工有周向沟槽，转子的各级动叶片就直接安装在周向沟槽中，这种转子通常应用于反动式蒸汽轮机。

图 1-7 和图 1-8 分别为常用的整锻轮式、鼓式蒸汽轮机转子示意图。

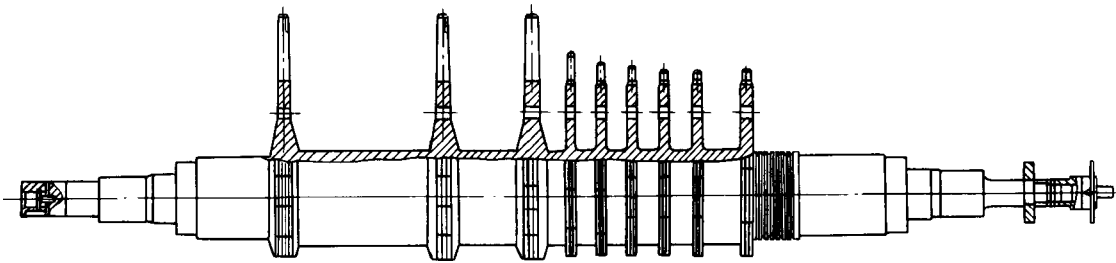


图 1-7 整锻轮式蒸汽轮机转子

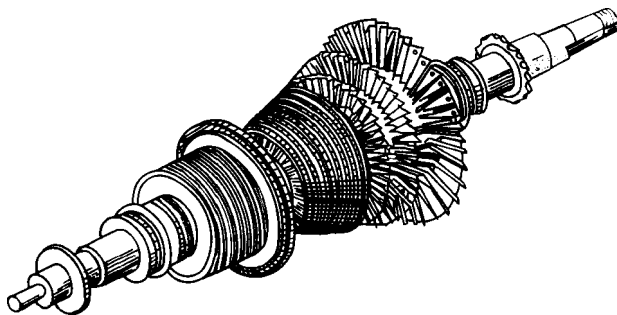


图 1-8 鼓式蒸汽轮机转子

在国内一些大化肥装置中使用的一些蒸汽轮机转子为轮式-鼓式混合型转子，这些转子的冲动式调节级叶轮多直接在转子上锻出，动叶片安装在叶轮外缘，后面的各级反动级动叶片直接安装在转鼓上。鼓式转子结构简单，弯曲刚度大，但由于反动式蒸汽轮机轴向推力大，所以鼓式转子一般带有平衡活塞。

蒸汽轮机转子按制造工艺又可分为整锻转子、套装转子、组合转子和

焊接转子。

整锻式转子是各级叶轮与主轴一起锻出，其优点是叶轮受力情况好，强度高，不存在运行中叶轮与主轴间松动问题；结构紧凑、装配简单，省去了叶轮的套装过程。不足的是转子直径不宜过大，直径过大不容易保证锻件质量，另外对整锻转子的制造技术要求较高。

套装式转子是叶轮和主轴分别加工，再以过盈配合方式将叶轮红套在轴上，如图 1-9 所示。这种转子加工方便，材料利用合理，叶轮和主轴的锻件质量容易得到保证。但它不宜在高温条件下工作，快速启动性差，因为材料的高温蠕变和过大的温差会使叶轮和主轴间的过盈消失，叶轮发生松动。所以套装转子只适用在温度不太高的场合，如中压蒸汽轮机或高压蒸汽轮机的低压部分。

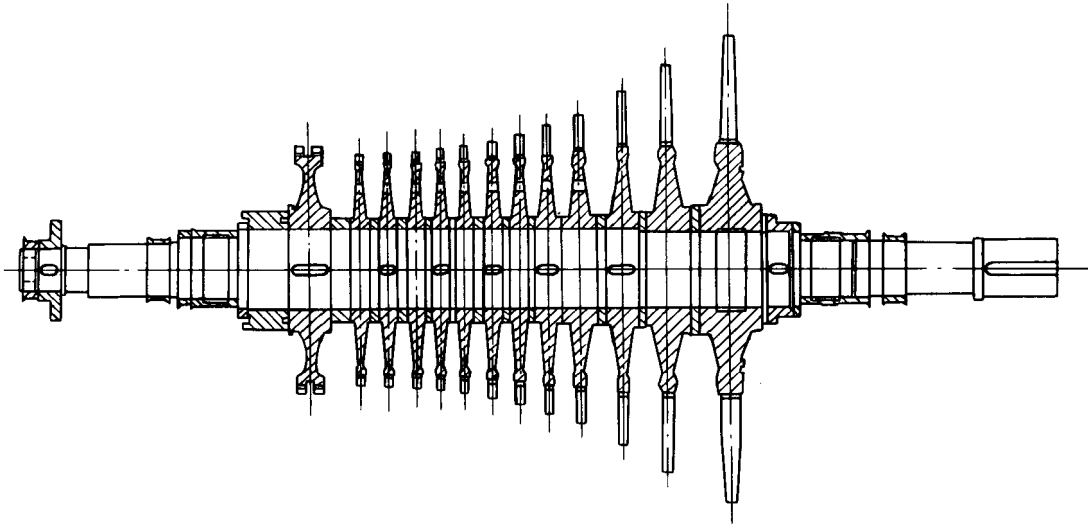


图 1-9 套装转子

组合转子的高压部分为整锻式，中压部分为套装式，如图 1-10 所示。这种转子兼有上述两种转子的优点，可用在高参数、中等功率的蒸汽轮机上。

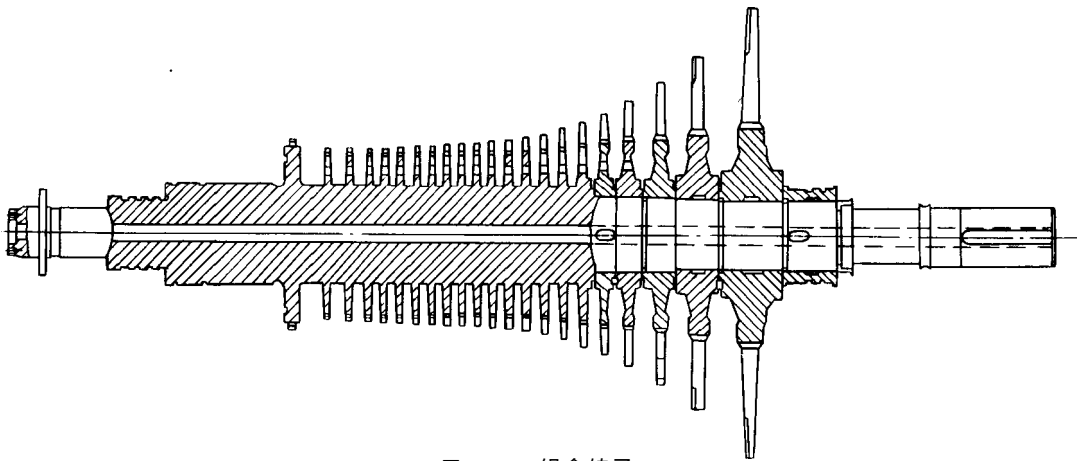


图 1-10 组合转子

焊接转子是由几个强度很高的实心轮盘和两个轴端在外缘部分焊接而成，如图 1-11 所

示。这种转子的优点是强度高、重量轻、结构紧凑、刚性好，应用很广泛。但焊接鼓式转子在制造时，要求材料焊接性能好，并且对焊接技术要求较高。

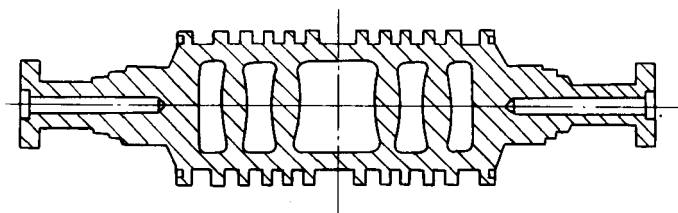


图 1-11 焊接转子

15. 制造蒸汽轮机转子用哪些材料？需要做哪些处理？

答：蒸汽轮机转子工作条件及受力情况复杂，对于制造整锻转子的材料有以下要求。

- (1) 力学性能好，有足够的强度，在高温下工作的转子，应有较高的蠕变极限；
- (2) 金属成分纯洁，金相组织均匀；
- (3) 内应力小；
- (4) 机械加工性能好。

选用蒸汽轮机转子材料与转子工作温度、荷载大小有关，对工作温度 500℃ 以下的转子常采用 30CrMo、35CrMoV、33Cr3MoWV、34CrNi3Mo 等合金结构钢，对工作温度 540℃ 以下的转子常采用 27Cr2Mo1V、20Cr3MoWV 等合金结构钢。焊接转子常采用 17CrMo1V 合金结构钢。某集团公司大化肥装置中，应用的由意大利制造的中压蒸汽轮机转子主轴材料均选用 30NiCrMoV411 合金钢，高压蒸汽轮机主轴材料均选用 X22CrMoV12.1 合金钢。

锻后的蒸汽轮机转子要作两次热试验，第一次试验的目的是消除内应力及组织缺陷，第二次试验的目的是获得热温定性。转子加工后还要作对称性试验和 X 光检查。

16. 加工制造蒸汽轮机转子有哪些技术要求？

答：机械加工轴及整锻式转子的主要技术要求有：

- (1) 轴颈和各配合轴段的工作表面粗糙度 R_a 值应为 $1.6 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 其余表面粗糙度 R_a 值应为 $12.5 \sim 3.2 \mu\text{m}$ ；
- (2) 支持轴颈的直径为 $\phi 50 \sim 120\text{mm}$ 时，同轴度的公差值是 0.025mm ，圆度和圆柱度公差值为 0.01mm ；
- (3) 轴颈和非工作面以外的各轴段的同轴度公差不得超过各段直径公差值的 50% 圆度和圆柱度也是一样；
- (4) 轴颈中心线相对于中心孔轴线（若有中心孔时）的同轴度公差值是 0.3mm ；
- (5) 轴颈与联轴器配合的圆锥表面涂颜料检验时，必须沿锥体的全长与样板的表面相接触；
- (6) 若轴上安装有键槽时，其键槽壁对轴的中心线的平行度在键槽长度上的公差值是 0.05mm ；
- (7) 若在同一轴段上对称配置两个键槽时，其对称度公差值是 0.02mm ；
- (8) 未装动叶片前应对光轴或转子作静平衡和动平衡试验。叶轮和推力盘侧偏差应在 $0.025 \sim 0.051\text{mm}$ 之间。

17. 装配蒸汽轮机转子有哪些技术要求？

答：装配蒸汽轮机转子时的主要技术要求有：

(1) 转子的全部零件和部件套装在转子上后，必须保证转子在工作过程中不破坏它们之间的相对位置和配合，同时又不妨碍它们的自由热膨胀；

(2) 全部零件和部件在转子上的位置必须保证蒸汽轮机转子和静子之间的轴向间隙达到规定数值；

(3) 装配完毕后，转子的全部径向尺寸必须保证转子与静子之间的径向间隙符合规定要求；

(4) 转子相对于旋转中心的动平衡性必须符合技术要求。

18. 蒸汽轮机转子为什么会产生轴向力？

答：蒸汽在蒸汽轮机内膨胀做功时，转子受到两部分力，一部分叫轮周力，它是产生转矩对外做功的力；另一部分是从高压端指向低压端的力，叫轴向推力。在一般情况下，有下列轴向推力作用在转子上。

(1) 作用在动叶片上的轴向推力

蒸汽轮机转子在工作时，蒸汽作用在动叶片上的力除沿圆周方向的力外，还有一个沿轴向的分力，另外现代应用的蒸汽轮机大都带有一定的反动度，动叶片前后有压力差，该压力差也对动叶片产生轴向力。

(2) 作用在叶轮上的轴向推力

在冲动式蒸汽轮机中，叶轮前后有一定压差，对叶轮产生轴向推力。虽然压力差不大，但由于叶轮面积较大，所以也产生较大的轴向推力。

(3) 由于轴的直径差别产生的轴向推力

由变直径主轴形成的阶梯形、锥面、凸肩等处，在有压力差存在时，就会产生轴向推力。

19. 引起蒸汽轮机转子轴向力异常增大的原因有哪些？如何防止和监视？

答：当蒸汽轮机处在异常情况下运行时，会引起轴向推力的异常变化，如果轴向推力过大，可使推力轴承烧毁，转子窜轴，造成重大事故。因此在运行中要特别注意轴向推力的异常增大。

可能造成轴向推力异常增大的原因主要有以下几方面。

(1) 超负荷运行

超负荷运行时，流量必然增大，超过正常值，机内各级前、后的压力差变大，轴向推力增加。如果负荷超过过多、过猛而使流量猛增，可使轴向推力骤然增加。因此运行时要控制好负荷。

(2) 级间密封磨损

喷嘴隔板轴封磨损过多，造成间隙过大，漏汽量增大，因为由间隙漏过的汽末经过喷嘴，保持很大的压力，致使叶轮前面压力增高，造成轴向推力增加。因此保持良好的级间密封，不仅可以保证经济性，同时可以保证安全性。

(3) 叶片结垢

叶片结垢可使叶片通汽面积减少，使级前压力增加，造成叶片的反动度增加，使轴向推

力增大。因此必须经常注意蒸汽轮机“监视段”的压力，当监视段压力超过规定值时，应当及时采取措施。

(4) 水冲击

当蒸汽中带水进入蒸汽轮机时，可以引起水冲击，这时进汽汽温急剧下降，从轴封和各结合面不严密处冒出白色的湿汽或溅出水点，汽管内可听见有水击声。由于水滴在轴向上打击叶片并且堵塞通道，这都使叶片前、后压差增大，使轴向推力大大增加。由于推力大大增加，推力瓦巴氏合金温度和出口油温将上升，机组内发出金属噪声和水击声。

蒸汽轮机发生水冲击时，必须采取果断措施，迅速破坏真空，马上停机，并开启各疏水阀门，进行疏水。否则将会引起推力轴瓦巴氏合金熔化、轴封破坏、叶片碰毁等严重事故。

(5) 新蒸汽温度过低

新蒸汽温度过低时应当限制负荷，并同时恢复新蒸汽温度。如果不能恢复正常初温，则必须降低负荷，否则将引起流量大量增加，使轴向推力急剧加大。

(6) 负荷增加过快

当负荷突然快速增加时，流量突然加大，使得在叶片通道中的蒸汽加速、轴向分速度瞬时改变很大，使得叶片受到过大的轴向力，使整个转子轴向推力增加。

以上列举各种造成轴向推力增加的原因，在运行中都应力求避免发生，以保证机组运行的安全。在运行时要及时监视推力轴承瓦块巴氏合金的温度和油温，不得超过正常允许的最高数值；注意监视转子的轴向位置，不允许产生过大的轴向位移。注意检查轴向位移的安全、报警装置，如有故障及时排除。轴向位移指示器在蒸汽轮机启动前应当调整好，在运行中不应再调整和变动，以防止指示不准，使轴向位移无法监视，甚至保护失灵。

20. 蒸汽轮机转子的轴向力如何平衡？

答：蒸汽轮机在正常工作时，转子上受的轴向推力是相当大的，有的高压反动式蒸汽轮机达 2~3MN。如此大的轴向推力，单靠推力轴承是不行的，往往要采取措施，将其中大部分平衡掉，小部分由推力轴承承担。在多级蒸汽轮机中，常用的平衡轴向推力的方法如下。

(1) 平衡活塞 在转子前端加工一平衡活塞，活塞前面为低压蒸汽，活塞凸台后为高压蒸汽，这样在平衡活塞上就产生一向前的轴向推力，以抵消部分转子上所受的、方向向后的蒸汽轴向力。

(2) 开平衡孔 在冲动式蒸汽轮机的叶轮上开几个孔，使轮盘两侧的蒸汽可相互流动，减少压力差，从而减小轮盘上的轴向推力。平衡孔一般为奇数，多为 5 个或 7 个。

(3) 采用相反流动的布置方法 把蒸汽在蒸汽轮机内的流动安排成向相反方向的流动，使产生的轴向推力方向相反，相互抵消达到平衡。也可以让蒸汽在高压和低压缸中流向相反，以自动平衡轴向力。

21. 蒸汽轮机转子叶轮的作用是什么？有几种类型？结构有何特点？

答：蒸汽轮机转子叶轮是用来安装转子动叶片，并将动叶片所受的汽流作用力产生的旋转力矩传递给主轴，使转子旋转，用来驱动压缩机、泵等机械。

蒸汽轮机转子叶轮的型式主要有以下几种。

(1) 等厚度叶轮（如图 1-12a），其结构特点是叶轮的厚度沿半径不变，这种叶轮的优点是加工方便、轴向尺寸小，但叶轮的强度较差，只能用于平均直径不大、叶片较短的级中，一

般要求圆周速度小于 $120\sim 130\text{m/s}$ 。

(2) 锥形叶轮 (如图 1-12b), 其结构特点是叶轮厚度沿半径由内向外减薄成锥形。这种叶轮不但加工方便, 而且强度高, 可用在圆周速度达 300m/s 的级中, 应用最为广泛。

(3) 等强度叶轮 (如图 1-12c), 其结构特点是叶轮厚度沿半径由内向外减薄成曲面。这种叶轮沿半径方向各处的应力都相等, 叶轮强度最高, 圆周速度可达 400m/s 以上, 但加工要求较高, 应用相对较少。

此还有双曲线形叶轮, 或几种型线的混合叶轮。

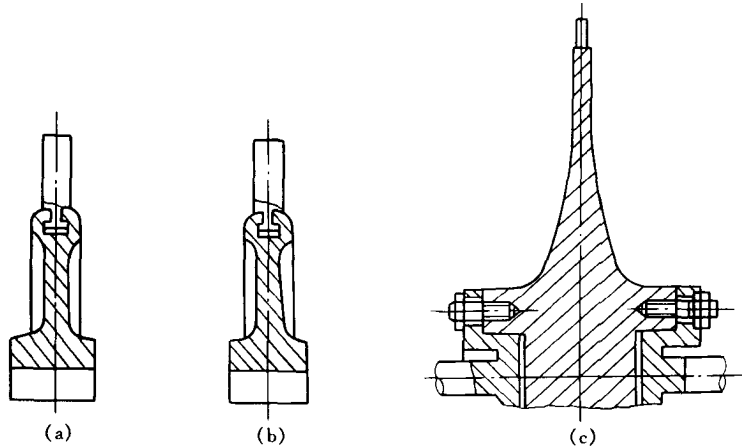


图 1-12 叶轮结构型式

22. 蒸汽轮机叶轮结构有几部分组成? 它的机械加工技术要求是什么?

答: 一般蒸汽轮机叶轮的结构可分为三部分。

(1) 轮缘部分 叶轮外缘用来安装动叶片的部分, 轮缘一般作成等厚度的, 轮缘上开有安装动叶片的叶根槽, 视叶片的装配方式不同, 叶根槽有周向叶根槽和轴向叶根槽两种。

(2) 轮毂部分 对整锻式转子, 轮毂与主轴一起锻出, 对套装式转子, 靠轮毂将叶轮过盈套装在主轴上, 轮毂内表面通常还开有键槽, 轮毂的形状都是等厚度的。

(3) 轮盘部分 把轮缘和轮毂连成一体的中间部分, 轮盘部分的形状决定于作用在叶轮上的负荷及加工要求, 高、中压级叶轮的轮盘上通常还开有平衡孔。

叶轮机械加工的主要技术要求如下:

- (1) 各表面粗糙度 R_a 值应为 $12.5\sim 3.2\mu\text{m}$ 或 $1.6\sim 0.4\mu\text{m}$;
- (2) 轮缘的外表面和轴的中心线的同轴度公差值是 0.03mm ;
- (3) 圆柱表面的圆柱度和圆度公差不大于其直径的许可公差的一半;
- (4) 轮缘端面的圆跳动公差值不得大于 0.04mm ;
- (5) 装好动叶片之后, 动平衡试验应符合要求。

以上是某些叶轮机械加工的一般技术要求, 由于叶轮结构和尺寸不同, 要求也各不相同。

23. 蒸汽轮机转子动叶片的作用是什么?

答: 蒸汽轮机转子动叶片又称工作叶片, 它装满了叶轮一周。由喷嘴流出的高速汽流流进动叶片时, 其速度的大小和方向都是一定的, 在动叶片中, 汽流由于受动叶片的阻碍 (作

用力)，改变原来的速度大小及方向，这时汽流必然给动叶片一个反作用力，该反作用力沿转子轮周方向的分力，推动转子作旋转运动，对外作功。所以蒸汽轮机转子动叶片的作用，就是将蒸汽的一部分动能转换为转子旋转的机械功。

24. 蒸汽轮机转子叶片由几部分组成？各部分作用是什么？

答：蒸汽轮机转子叶片主要由三部分组成。

(1) 叶根部分 用来将叶片固定在叶轮或转鼓上的部分。对叶根的要求是将叶片牢固地固定在轮缘中，在任何工作条件下保证叶片在转子上位置不变。常用的叶根形式有 T 形、叉形、纵树形等。

(2) 叶型部分 也叫工作部分，这是叶片最主要的部分。汽流流经叶型部分时，蒸汽的动能转变为机械功，因此叶型部分是实现能量转换的部位。常用的有等截面叶片和变截面叶片（扭曲叶片）

(3) 叶顶部分 指叶片顶部的围带和拉筋部分。蒸汽轮机高压段的动叶片一般都装有围带，围带在叶片顶部形成一个盖板，可以防止叶片顶部漏汽，另外围带还可以提高动叶片的抗弯曲能力，增强刚性。常用的围带形式有两种：一是自带围带结构，围带与叶片的叶根部分、叶形部分在同一块钢材上加工出来；另一种是外加围带，围带靠叶片顶端的铆钉铆接在叶片上。

25. 什么是蒸汽轮机喷嘴的喷射速度？

答：蒸汽在蒸汽轮机喷嘴中膨胀加速，蒸汽由喷嘴中流出时的理想流速称为喷嘴的喷射速度，它与蒸汽进入喷嘴时的流速、蒸汽在喷嘴中的焓降有关，蒸汽进入喷嘴时流速越高、蒸汽在喷嘴中焓降越大，则喷嘴的喷射速度越高。

26. 蒸汽轮机的喷嘴有几种？如何选用？

答：按结构型式来讲，蒸汽轮机喷嘴有两种，一种是渐缩型喷嘴，一种是缩放型喷嘴。

两种喷嘴特性不同，所使用的场合也不一样。渐缩型喷嘴所承担的焓降较小，多用于冲动式蒸汽轮机中间级，以满足这类级焓降不大，喷嘴出口是亚音速汽流的需要。而缩放型喷嘴，因为承担的焓降大，所以多用于单级蒸汽轮机和多级冲动式蒸汽轮机的第一级与最末级上，以满足这些级的焓降大、喷嘴出口是超音速汽流的需要。但是缩放喷嘴工作效率低，且不易加工制造，故只用于少数必须安装缩放型喷嘴的地方。一般在蒸汽轮机中尽量用斜切喷嘴代替缩放型喷嘴，以获得超音速汽流。

27. 蒸汽轮机隔板的作用是什么？可分为几种？

答：隔板是蒸汽轮机各级的间壁，并用以安装喷嘴，同时还起阻止级间漏汽的作用。喷嘴叶栅与转子上相应的叶轮上的工作叶栅构成一个级，所以也可以说，用隔板使每个叶轮都在一个相应的蒸汽室内运转。

按喷嘴在隔板上的固定方法不同，可分为焊接隔板与铸造隔板两种。

(1) 焊接隔板结构

如图 1-13 所示，先将用切削、精密铸造或模锻的喷嘴 1 焊在内环 2 与外环 3 上，然后再与隔板体 5、隔板轮缘 4 经找平后焊在一起。

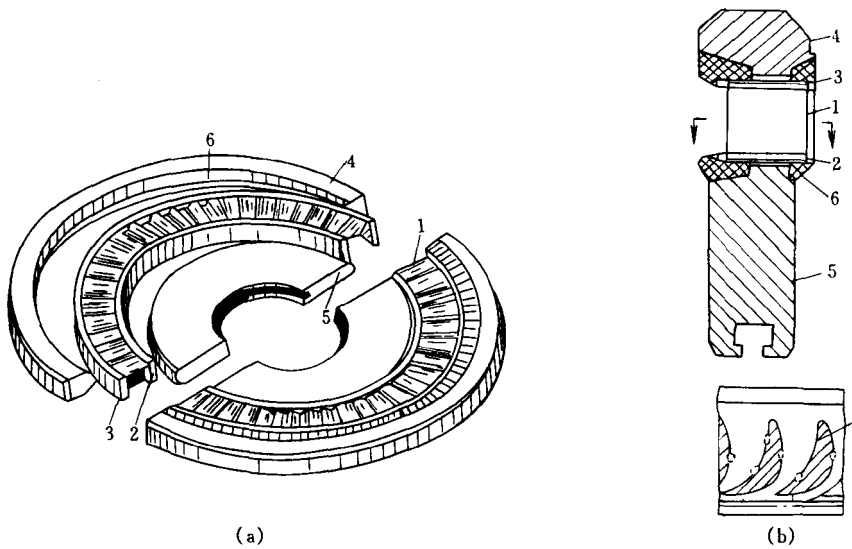


图 1-13 焊接隔板结构图

(a) 焊接隔板组合情况；(b) 焊接隔板断面图

1—喷嘴片；2—内环；3—外环；4—隔板轮缘；5—隔板体；6—焊缝

这种结构的优点是强度和刚度好，喷嘴汽道表面光滑，形状较精确，气流在流道中流动损失小。这种隔板常用在蒸汽轮机的高、中压部分。

近代蒸汽轮机中，为减少喷嘴中的双涡流损失，采用宽度窄小的窄喷嘴。但宽度窄了带来喷嘴强度下降，为此采用在喷嘴块前的通流部分沿隔板圆周布置若干个加强筋的方法。隔板体与外缘整体铸造，两者之间靠加强筋连接，强度较高，窄喷嘴只起导气作用。窄喷嘴焊接隔板的优点是喷嘴损失小，但由于加强筋的存在，增大了汽流的阻力。

(2) 铸造隔板

铸造隔板是将已经成型的喷嘴叶片在浇铸隔板体的同时放入其中，与隔板体一起铸出。这种结构隔板强度较差，喷嘴尺寸不够精确，表面不够光滑，所以蒸汽流动损失大，使用温度也不能太高，一般小于 300°C ，但制造工艺简单，成本低。这种隔板常用在蒸汽轮机的低压部分。

28. 蒸汽轮机转子的叶片受哪些作用力？

答：在工作时，蒸汽轮机转子的叶片主要受两种作用力：一是由于蒸汽轮机高速旋转时叶片自身质量和围带、拉金质量所产生的离心力；二是气流流过叶片时产生的汽动力。

离心力使叶片受到拉伸，产生拉应力，如果离心力作用线不通过计算截面的形心，则偏心力拉伸还会引起叶片截面上的弯曲应力。离心力大小与转速平方成正比，所以变转速的工业蒸汽轮机应以最高转速计算离心力。

作用在叶片上的汽流力是随时间变化的，它可以看做是由不随时间变化的平均值和随时间变化的分量所组成。汽流力平均值分量使叶片产生静弯曲，变化分量使叶片发生振动，引起振动应力。汽流力随工况而变，最大工况时汽流力也最大。但对调节级来说，第一组喷嘴全开而其他各级喷嘴关闭时，汽流力也达到最大，所以对调节级这两种工况下都应进行强度校核。

29. 湿蒸汽是如何产生的？对动叶片有何危害？

答：蒸汽在蒸汽轮机通流部分膨胀做功时，蒸汽的状态逐级变化，随着温度逐渐降低，蒸汽就由过热蒸汽变为湿蒸汽。一旦蒸汽的膨胀进入湿蒸汽区域，蒸汽中便有水分出现，随着蒸汽继续逐级膨胀做功，蒸汽中水分也逐渐增加。饱和水在刚析出时处于悬浮状态，以后渐渐聚合在一起形成水珠，它由蒸汽夹带着流动。

湿汽对动叶片的冲蚀是十分严重的，尤其是对于大型凝汽式蒸汽轮机的末级动叶片冲蚀最为严重。一般是在末级动叶片的进口边缘的顶部水珠冲蚀得特别厉害。这是由于水珠质量大，在离心力作用下，水珠集结在动叶片外圆附近，形成更大的水珠（也有二次流动的影响），直接冲击在动叶片进口边缘的顶部。另外，动叶片的轮周速度是沿半径变化的，顶部轮周速度最大，所以水珠对动叶片的冲击力也最强，致使凝汽式蒸汽轮机末级动叶片进口边缘顶部附近损坏最严重。

30. 如何防止湿蒸汽对蒸汽轮机动叶片的冲蚀？

答：为了提高湿蒸汽级的效率和防止动叶片产生严重冲蚀损坏，必须采取一定措施降低蒸汽湿度。一般有两类方法，一类方法是降低湿汽中的水分，这既可以提高效率，又可以防止动叶片受冲蚀；另一类方法是提高叶片的抗冲蚀能力。

降低湿蒸汽水分的方法如下。

(1) 采用再热循环，此法用于大型蒸汽轮机上，将作过功的蒸汽抽出一部分，送入加热器加热后再返回蒸汽轮机继续做功。

(2) 采用去湿装置，如图 1-14 所示。去湿装置由捕水口、捕水室及疏水通道等构成。水珠受离心力作用，经过捕水口被抛入捕水室，而捕水室与凝汽器相联接，水滴经排水管流入凝汽器。此法广泛用于凝汽式蒸汽轮机。

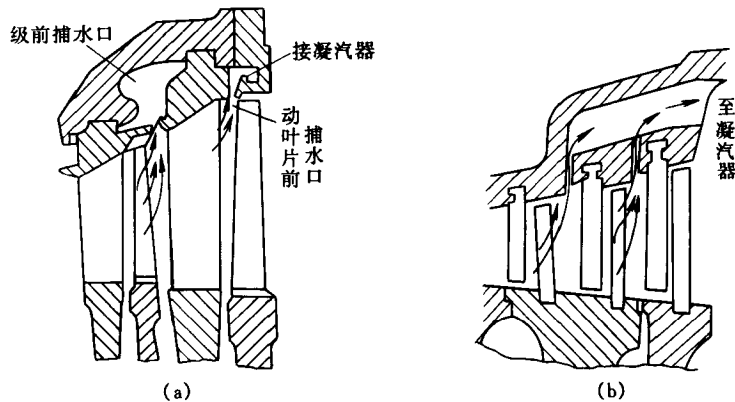


图 1-14 湿蒸汽级的疏水装置

(3) 采用薄的出汽边的喷嘴，这可使脱离出去的水滴变得小一些，以减少水滴对动叶片进口边缘的冲蚀程度。

(4) 采用出汽边喷射蒸汽的空心喷嘴，用喷射蒸汽的方法把喷嘴出汽边上的水珠分割得小一些，以减少水珠的冲蚀作用，如图 1-15c 所示。

(5) 采用具有吸水缝的空心喷嘴，如图 1-15a、b 所示。这两种吸水缝，可以吸去喷嘴上

的凝结水，以防止密集的水珠从喷嘴出汽边脱流出去而危害动叶片。

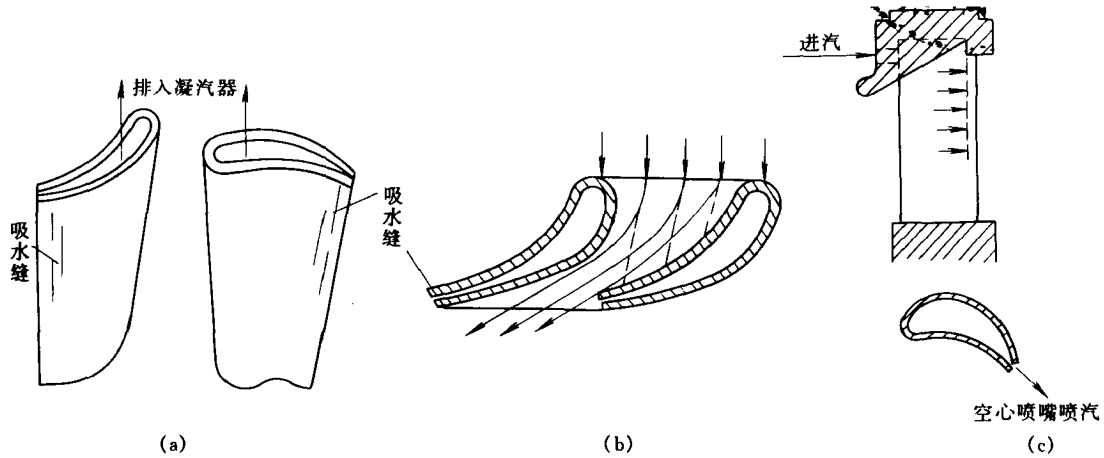


图 1-15 空心喷嘴的疏水、喷汽装置

为提高动叶片抗冲蚀能力，动叶片一般采用强度高、硬度高、耐冲蚀的合金钢。此外在动叶片进口边缘的外端部，采用镀铬、渗碳、表面淬硬、焊接硬质合金块等方法，来提高动叶片表面的硬度，以便抵抗水珠的冲蚀作用。

31. 蒸汽轮机的喷嘴和动叶片结垢的原因是什么？有何危害？

答：由于锅炉水质不好等原因，造成蒸汽品质不良，含有一些杂质。这些蒸汽通过蒸汽轮机时，不同杂质在不同的级段部位析出，沉积在蒸汽轮机通流部分上，就形成垢物。通流部分结垢，一般在第一、二级结垢较少，以后各级才逐渐增多。结垢物质大部分沉积在汽流速度较低的地方，或者可能发生在断流的地方和表面较粗糙的地方。

当喷嘴和动叶片结垢过多时，将造成通流面积减少、阻力增大。由于通流面积变小，在机组总焓降不变、各级压力不变的条件下，由于蒸汽流量减少，会使出力降低。有时为保证出力，不得不提高蒸汽初压，增大流量，使机组运行的安全性降低。另外，结垢破坏喷嘴和动叶片通道的形状，使叶片表面粗糙，增大摩擦损失，严重影响蒸汽轮机的效率。

蒸汽轮机某一级结垢严重时，会使该级前压力增加，前面各级焓降减少，反动度增加，增大了转子的轴向推力。此外，动叶片表面结垢，使叶片受的离心力和弯曲力都加大，影响机组安全运行。

32. 蒸汽轮机的喷嘴和动叶片结垢后如何清除？

答：在检修中一般采用如下方法除垢。

(1) 人工使用刮刀、砂布、钢丝刷等工具进行清扫，要求能见金属光泽。注意把各拐角处均清扫干净，不要碰伤静叶片的尖部。

(2) 采用喷砂方法，用 40~50 目的砂子，在 0.4~0.6MPa 的压缩空气带动下往叶片上喷砂。喷砂时要注意调节风压，以不打伤叶片又能清扫干净为原则。喷砂时要把转子轴颈、推力盘、危急保安器等部位包好。经喷砂清扫后，要用压缩空气或水将残留的砂子冲洗干净。喷砂还可以采用水带砂子的办法，这样可以减少污染，改善工作条件，效果较好。

(3) 化学除垢法，垢物的大部分为二氧化硅，可利用 30%~40% 浓度的苛性钠溶液，加