

高等学校教材
汽轮机课程
设计参考资料

水利电

TK262



高等学校教材

汽轮机课程设计参考资料

华中理工大学 冯慧雯 主编



TK262

360787

F46

高 学 校 教 材

汽轮机课程设计参考资料

华中理工大学 冯慧雯 主编



水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材

汽轮机课程设计参考资料

华中理工大学 冯慧雯 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12.25印张 275千字 2插页

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数0001—6720册

ISBN 7-120-01623-7/TK·260

定价3.25元

前 言

本书是根据1989年高等学校热能动力类专业教学委员会汽轮机教学组会议审查通过的“汽轮机课程设计参考资料”编写大纲编写的，是与热能动力类专业教材《汽轮机原理》相配的，可供该专业学生进行汽轮机课程设计时参考使用。

本书共分五章，着重介绍了汽轮机通流部分的结构、多级汽轮机热力设计的方法与步骤、变工况下汽轮机级的热力核算方法、叶片与隔板的强度核算及调节阀计算等内容。本书对《汽轮机原理》教材中已有的基本理论不再阐述，仅对课程设计中所使用的计算公式、图线图表、设计方法及有关参数的选择原则进行归纳与介绍，并编有部分示例以便自学。

编入本书的部分国产汽轮机通流部分数据资料及示例，均选自汽轮机制造厂的设计资料。需要说明的是，出于教学的目的，对原资料中的某些符号、单位及数据作了调整，希望能得到厂家领导与工程技术人员的谅解。

本书由华中理工大学冯慧雯同志主编，并编写了第二章、第三章及有关附录，浙江大学章国庆同志编写了第一章、第四章和第五章。全书由东北电力学院金国华同志主审。

在编写过程中，承蒙本校、各兄弟院校及设计、生产单位同仁的大力协助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，而科学技术又发展迅速，书中难免存在错误与不妥，恳切地希望读者批评指正。

编 者

1991年12月

目 录

第一章 汽轮机本体结构	1
第一节 喷嘴与隔板	1
第二节 动叶与转子	7
第三节 汽封	15
第四节 其它主要零部件	20
第五节 典型汽轮机本体结构示例	29
第二章 多级汽轮机的热力设计	31
第一节 概述	31
第二节 汽轮机蒸汽流量的初步计算	34
第三节 通流部分选型	49
第四节 压力级比焓降分配及级数确定	54
第五节 汽轮机级的热力计算(速度三角形法)	61
第六节 汽轮机漏汽量的计算及整机校核	75
第七节 轴向推力的计算	79
第八节 级的模拟设计法	81
第三章 汽轮机变工况热力核算	85
第一节 概述	85
第二节 压力、比焓降、反动度的变化规律	86
第三节 已知初参数级的热力核算	88
第四节 已知终参数级的热力核算	90
第五节 调节级变工况核算	98
第四章 汽轮机通流部分主要零件的强度核算	105
第一节 概述	105
第二节 等截面叶片型线部分强度核算	105
第三节 叶根与轮缘的强度核算	112
第四节 隔板及加强筋的强度核算	115
第五节 常用金属材料及其机械性能	119
第五章 汽轮机调节阀计算	124
第一节 概述	124
第二节 球形阀	126
第三节 带预启小阀的调节阀	129
第四节 阀门流量系数曲线和提升力系数曲线	131
附录一 部分国产汽轮机通流部分数据资料	136
附录二 常用苏字叶型及其特性曲线	155
附录三 计算中常用的曲线和图表	166
附录四 模拟设计常用的试验资料	171
参考资料	189

第一章 汽轮机本体结构

汽轮机本体由固定部分和转动部分组成, 固定部分主要包括喷嘴、隔板、汽封、汽缸和轴承等部件, 转动部分包括动叶、拉筋、围带、叶轮、主轴及联轴器等。

第一节 喷嘴与隔板

冲动式汽轮机中, 调节级的喷嘴组安装在各自的喷嘴室出口, 其它各级的喷嘴叶栅都安装在隔板上。

一、喷嘴组与转向导叶的结构

1. 喷嘴组

喷嘴组的结构如图1-1所示。

小型汽轮机的喷嘴组, 采用单个铣制的喷嘴片, 与内、外环一起焊接而成, 然后用螺钉固定在与各喷嘴组对应的喷嘴室出口处。

大、中型汽轮机的喷嘴组通过其内、外环凸肩嵌在各自的喷嘴室出口, 一端用密封定位销固定, 另一端用U形密封键密封, 喷嘴组在此端可自由膨胀。喷嘴组通常采用精密铸造结构或整锻铣制焊接结构。图1-1所示为整锻铣制焊接喷嘴组, 它是在整锻的内环上直接铣制喷嘴片, 再在喷嘴片外圆焊上隔叶片并与外环焊接而成的。

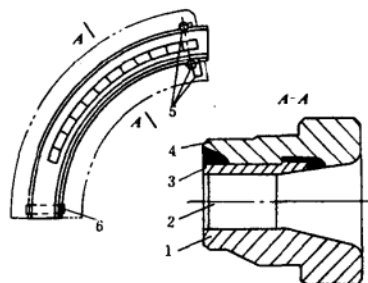


图 1-1 喷嘴组的结构

1—内环；2—喷嘴片；3—隔叶片；4—外环；5—定位销；6—密封键

2. 转向导叶

双列调节级的转向导叶一般由单个铣制的叶片, 通过倒T形叶根嵌装在转向导叶环的槽道上。

布置转向导叶的弧段与喷嘴组相对应, 其余弧段安装填块。转向导叶环安装在汽缸内壁的环形槽道内, 其上、下两半部分别用挂耳支承在环形槽道内的凹台上, 并用压块将挂耳压住, 再在其外圆的垂直中心线处布置两个轴向键, 可分别固定其轴向、竖向和横向位置。轴向键的形状可以是斜键、平键或Z字形键, 它与转向导叶环之间留有适当间隙, 使转向导叶环能自由膨胀, 详见图1-2。

图1-3所示为国产100MW汽轮机转向导叶环的结构, 半圆环对口处的末端叶片用四个 $\phi 15$ 的销钉定位, 导叶上除带有一体铣出的围带外, 还装有铆接围带, 将转向导叶分成14组。在转向导叶环和铆接围带上共镶有8道汽封片。在未设置喷嘴组的弧段装有护套, 护套用螺钉固定在转向导叶环上。

一、隔板和隔板套的结构

1. 隔板

常用的隔板分焊接隔板和铸造隔板两种。焊接隔板用于温度高于 250°C 的汽轮机高、中压部分，图1-4是焊接隔板的结构图，整个隔板由喷嘴叶栅、隔板体和外缘焊接而成。其中，喷嘴叶栅可由喷嘴片和内、外围带焊接而成，也可整块式精密浇铸而成。轧制或铣制的喷嘴片需焊接在预先冲好型孔的内、外围带上。

高压部分的压力级常采用窄喷嘴带加强筋结构，共有三种不同结构，如图1-5所示。

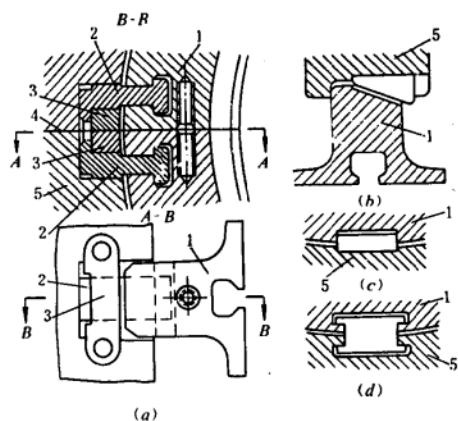


图 1-2 转向导叶环的支承及定位

(a)转向导叶环的支承；(b)斜键；(c)平键；(d)Z形键
1—转向导叶环；2—挂耳；3—压块；4—中分面；
5—汽缸

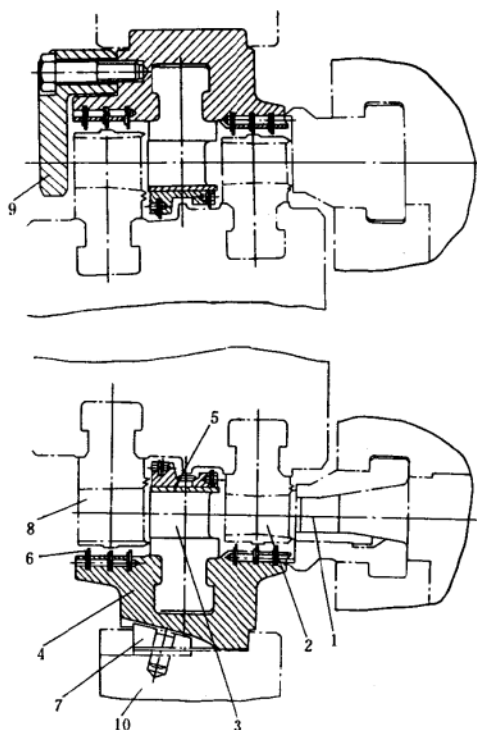


图 1-3 转向导叶环的结构

1—喷嘴组；2—第一列动叶；3—转向导叶；
4—转向导叶环；5—围带；6—汽封；7—定位键；8—第二列动叶；9—护套；10—汽缸

工作温度在 320°C 以下的级可用球墨铸铁隔板，工作温度在 250°C 以下的级均采用灰铸铁隔板。铸造隔板的喷嘴片两端有若干个孔，或者做成切口形状，铸造时铁水流入孔内或切口内形成穿钉，使喷嘴片与隔板牢固结合。一般的喷嘴片为铣制、精铸、模锻或由钢板冲压成形。大型汽轮机的末级已开始采用薄钢板围成的空心喷嘴，应用爆炸成型技术。图1-6为铸造隔板结构图。

工作在湿蒸汽区的级，其隔板上有去湿装置，最常用的结构有隔板外环的去湿槽、喷嘴叶栅顶部铸缝处的骑缝吸湿槽和空心喷嘴片出口边的吸湿缝，如图1-7所示。吸湿缝与隔板外缘内连通凝汽器的环形室相通，利用凝汽器内真空吸去喷嘴片表面的水膜。

2. 隔板套

隔板套是一个圆筒形的部件，其外圆柱面有定位环，用于嵌入汽缸内壁相应的槽道内，

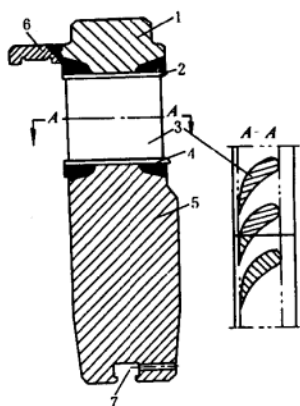


图 1-4 焊接隔板结构

1—外缘；2—外围带；3—喷嘴；4—内围带；
5—隔板体；6—径向汽封支架(凸缘)；7—汽封槽

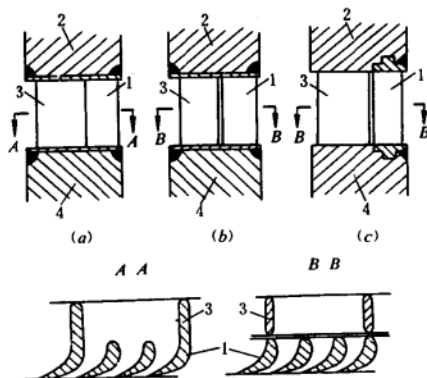


图 1-5 窄喷嘴带加强筋结构

(a)加强筋和喷嘴片制成一体；(b)加强筋单独焊在围带上；(c)加强筋与隔板体及外缘铸成一体
1—喷嘴叶栅；2—隔板外缘；3—加强筋；
4—隔板体

其内壁有若干环形槽道用于固定相应的隔板。隔板套分成上、下两半部，其水平中分面有法兰，用螺栓紧固。

高压汽轮机的高压级隔板一般固定在隔板套内，有些汽轮机的中、低压级隔板也固定在隔板套内。采用隔板套可以使汽缸的结构简化，便于在汽缸下部布置抽汽口。图1-8示出了常见的隔板套结构。

3. 隔板和隔板套的支承和定位

隔板和隔板套分别用挂耳支承在隔板套和汽缸内，挂耳可用螺钉固定或焊接。图1-9和图1-10示出了隔板和隔板套的支承方式。

为便于拆装，上隔板通过挂耳、压块和螺钉悬挂在上隔板套内，如图1-9 (a)、(b)所示。

隔板和隔板套的定位方法与转向导叶环相似，一般采用环形槽道、轴向键和支承挂耳来固定轴向、横向和竖向的位置，使隔板中心线与转子中心线重合，并留有适当膨胀间隙。

上、下隔板间的定位有以下几种结构：焊接隔板的两半结合面是平面，在其中一半

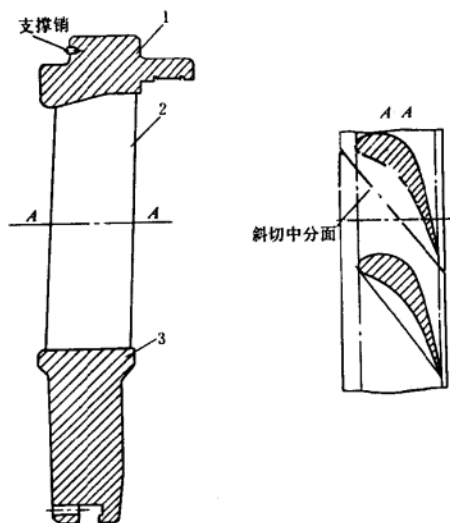


图 1-6 铸造隔板结构

1—隔板外缘；2—喷嘴片；3—隔板体

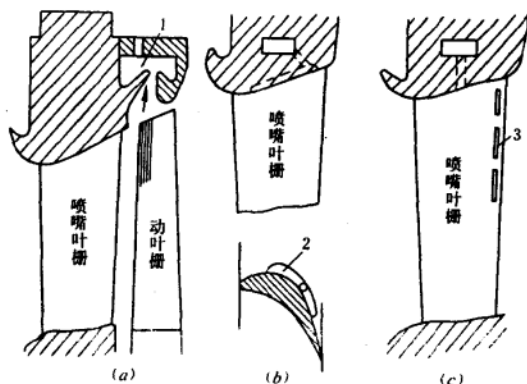


图 1-7 去湿装置

(a) 去湿槽; (b) 骑缝吸湿槽; (c) 吸湿缝
1—去湿槽; 2—骑缝吸湿槽; 3—吸湿缝

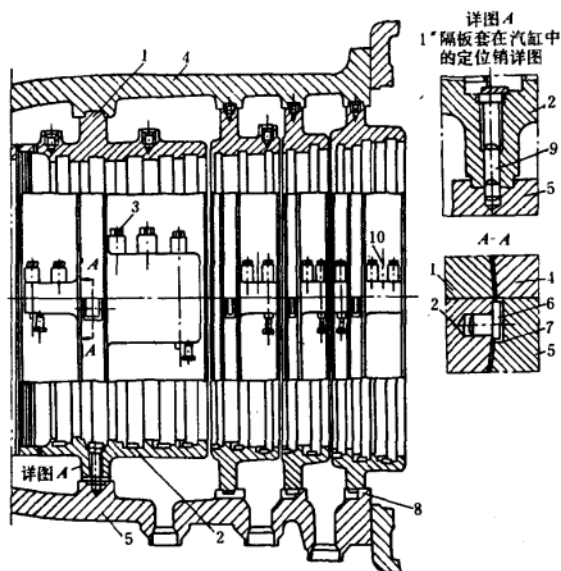


图 1-8 常见的隔板套结构

1—上隔板套; 2—下隔板套; 3—连接螺栓; 4—上汽缸; 5—下汽缸; 6—挂耳;
7—垫片; 8—斜键; 9—定位销; 10—顶开螺钉

上做出或安置凸键，而在另一半上加工凹槽；对于中分面整体倾斜的铸造隔板，可用定位键对中；对中分面阶梯倾斜（仅喷嘴部位倾斜）的铸造隔板，可用圆柱销定位。

三、隔板的技术要求

1. 材料

隔板材料的选择主要取决于它的结构和工作温度，常采用下列材料：灰铸铁 HT28-48

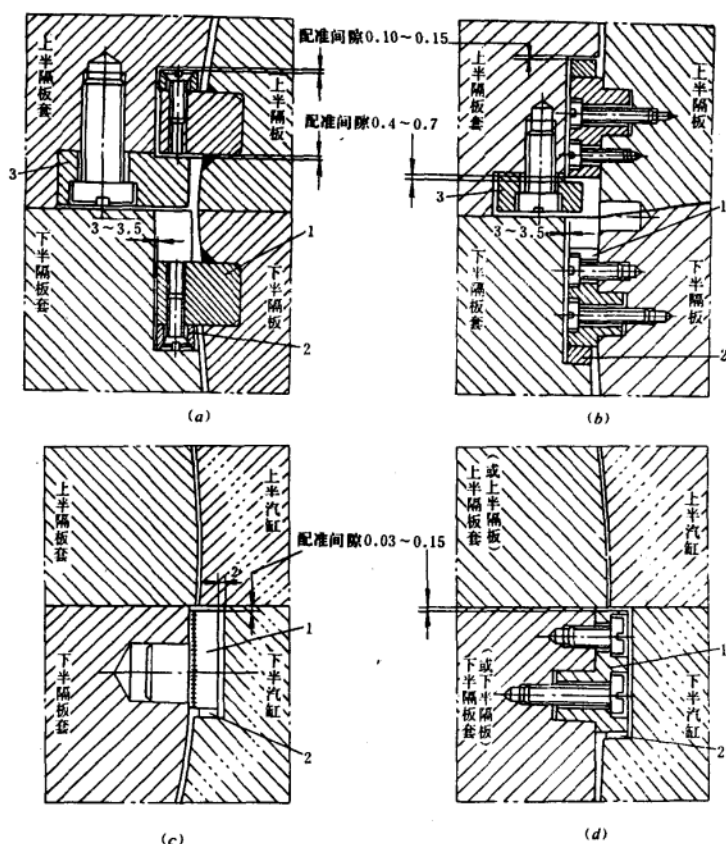


图 1-9 隔板和隔板套的非中分面支承方式

(a) 焊接隔板；(b) 铸造隔板；(c) 铸钢隔板套；(d) 铸造隔板套（或直接装在汽缸内的铸造隔板）

1—挂耳；2—调整垫片；3—压块

球墨铸铁QT45-5，碳素钢ZG25，铬钼铸钢ZG20CrMo，铬钼钒铸钢ZG15Cr1Mo1V和强化铬不锈钢15Cr12WMoV等，表4-8列出了它们的最高使用温度。

汽轮机对喷嘴片材料的要求很高，一般采用下列材料：不锈钢1Cr13、2Cr13，耐热不锈钢Cr11MoV、15Cr12WMoV、1Cr12W2MoV等，其最高的使用温度如表4-4所示。

2. 技术要求

1) 焊接隔板的喷嘴片与隔板体、外环的焊缝应具有良好的质量；铸造隔板的喷嘴片应牢固地铸入隔板体内。

2) 喷嘴片两端部位的粗糙度为 $\sqrt{12.5}$ ，内、背弧汽道型线的粗糙度为 $\sqrt{0.8} \sim \sqrt{1.6}$ ；焊接隔板围带汽道内表面的粗糙度为 $\sqrt{3.2}$ ，铸造隔板汽道内表面应洁净。

3) 隔板汽道要有正确的截面形状和面积。

①汽道出口面积的允许偏差：个别汽道面积为 $\pm 5\%$ ；焊接隔板总面积为 $\pm 2.5\%$ ；铸造隔板总面积为 $\pm 3\%$ （空心喷嘴 $\pm 5\%$ ）。

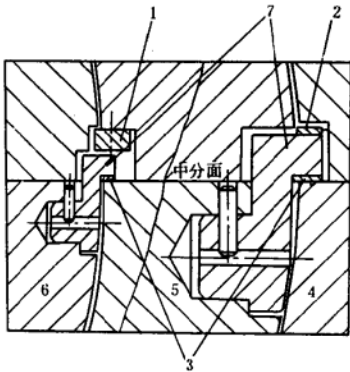


图 1-10 隔板和隔板套的中分面支承方式

1—压块；2—垫块；3—支承垫片；4—汽缸；
5—隔板套；6—隔板；7—挂耳

②汽道喉部宽度的允许偏差：焊接隔板为 $\pm 0.25\text{ mm}$ ；铸造隔板的喉部宽度 $<15\text{ mm}$ 时为 $\pm 3\%$ ，否则为 $\pm 2.5\%$ 。

4) 隔板汽道出汽侧的节圆应与隔板中心同心。

①汽道节圆直径的允许偏差：焊接隔板为 $\pm 1\text{ mm}$ ；铸造隔板的见表1-1。

②汽道高度的允许偏差：焊接隔板用围带焊接时为 $\pm 0.25\text{ mm}$ ，用喷嘴弧块焊接时为 $\pm 0.20\text{ mm}$ ；铸造隔板的见表1-2。

③汽道节距的允许偏差：焊接隔板为 $\pm 0.30\text{ mm}$ （中分面处为 $\pm 1.5\text{ mm}$ ）；铸造隔板为 $\pm 2.5\%$ （中分面处为 $\pm 4\%$ ）。

5) 所有喷嘴的进汽边或出汽边均应在同一平面内，相对于基准面的轴向位移允许偏差：喷嘴焊接隔板为 $\pm 0.20\text{ mm}$ ；喷嘴围带焊接隔板为 $\pm 0.50\text{ mm}$ ；铸造隔板的见表1-3。

表 1-1 铸造隔板汽道出汽侧节圆直径的允许偏差 (mm)

汽道节圆直径 d	$d < 1000$	$1000 < d < 1500$	$d > 1500$
偏差值	± 1.0	± 1.5	± 2.0

表 1-2 铸造隔板汽道高度允许偏差 (mm)

汽道高度 l	$l < 150$	$150 < l < 250$	$250 < l < 500$	$500 < l < 700$	$l > 700$
偏差值	± 1.0	± 1.5	± 2.0	± 3.0	± 4.0

表 1-3 喷嘴轴向偏差允许值 (mm)

汽道高度 l	$l < 200$	$200 < l < 400$	$l > 400$
偏差值	± 1.5	± 2.0	± 3.0

6) 隔板中分面应光洁，其间隙应不使 0.04 mm 塞尺通过。

①粗糙度：焊接隔板为 $\frac{3.2}{\sqrt{}}$ ；铸造隔板为 $\frac{3.2}{\sqrt{}}$ （斜切部位为 $\frac{12.5}{\sqrt{}}$ ）。

②中分面处上、下半喷嘴错位的允许值：焊接隔板为 1.5 mm ；铸造隔板为 2.5 mm ；错位处应修圆，但不应修及喉部。

7) 喷嘴片的公差：型线部分漏光度为 $(0.2\% \sim 0.3\%) \times$ 叶型弦长；最大厚度公差为 $2\% \times$ 型线的最大厚度；出汽边漏光度为 $(0.15\% \sim 0.2\%) \times$ 叶型弦长；整个喷嘴片高度公差为 -0.2 mm ；汽道部分高度公差为 $\pm 1.0\text{ mm}$ 。

第二节 动 叶 与 转 子

一、叶片的结构

叶片由叶根部分、型线部分和加强部分（围带和拉筋）组成。叶片通过叶根安装在叶轮上并形成叶栅流道。

1. 叶片型线部分结构

叶片有等截面叶片和变截面叶片之分，图1-11示出了常用的几种叶片。等截面叶片常

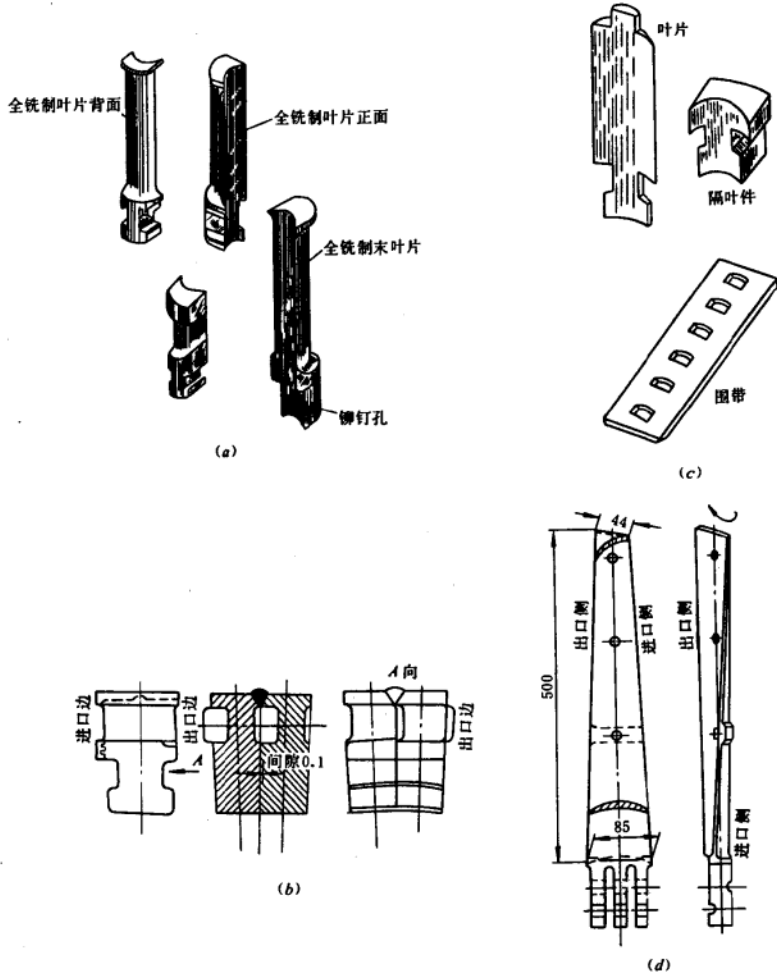


图 1-11 常用的几种叶片

(a) 铁制叶片；(b) 两片焊接成组的铁制叶片；(c) 轧制叶片；(d) 扭曲叶片

采用冷轧或铣切工艺制成。铣制叶片通常用于汽轮机高压级；调节级常采用加宽的铣制叶片，并用围带将几片叶片连接成叶片组；冷轧叶片一般用于短叶片、圆周速度较低的场合，安装时需将叶片之间的叶根部位嵌入垫块。当叶片较长时，一般采用变截面扭曲叶片，其型线部分可以铣制、精刨，也可采用精锻、数控机床加工等新工艺。

汽轮机的末几级叶片工作在湿蒸汽区域，极易形成水蚀，除了在通流部分的结构上采取相应的去湿措施外，叶片表面也应采取一些去湿和防护措施。一种措施是在叶片入口边

及背弧侧上部边缘焊上司太立合金，其结构见图1-12；另一种是在叶片表面进行局部火焰淬火、渗氮或喷镀硬质合金等硬化处理；还有采用在动叶进口处加工出若干条径向细槽的方法来收集水分，利用离心力将水滴甩入隔板上的去湿槽内。

2. 叶根部分结构

叶根采用的结构形式和在轮缘上的装配由叶片型线部分的工作情况决定。图1-13是各种常见叶根的截面形状和对应的轮缘结构。

受力不大的短叶片常采用倒T形叶根；中等长度叶片常采用外包倒T形叶根；100~400mm长度的叶片可采用双倒T形叶根或菌形叶根；离心力较大的长叶片可采用叉形叶根或枞树形叶根，叉形叶根的叉数见表1-4，枞树形叶根的齿数根据叶片离心力大小选

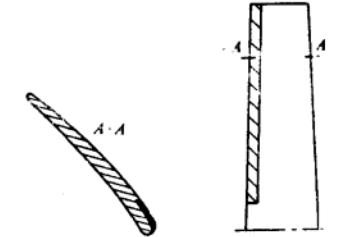


图 1-12 焊接司太立合金片的叶片

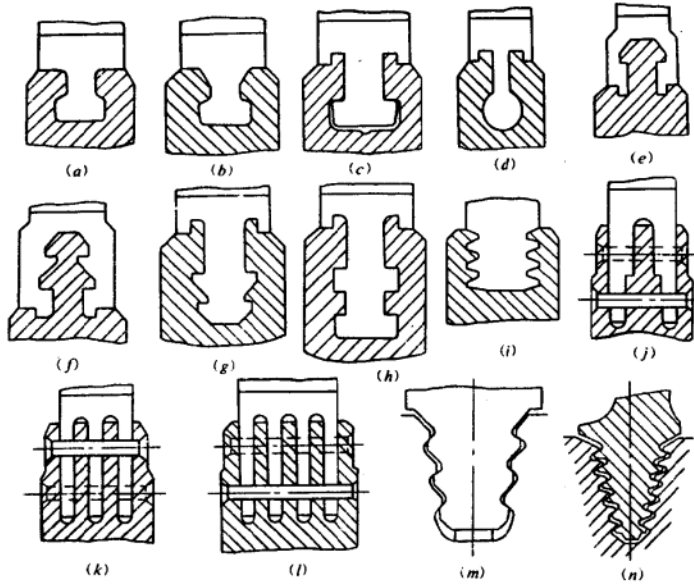


图 1-13 叶根和轮缘的结构

(a)、(b)倒T形叶根；(c)外包倒T形叶根；(d)圆柱形叶根；(e)、(f)菌形叶根；(g)、(h)双倒T形叶根；(i)齿形叶根；(j)、(k)、(l)叉形叶根；(m)、(n)枞树形叶根

表 1-4

叉形叶根的叉数

叶片高度 (mm)	100~250	250~500	500~650
叉 数 (个)	2	3	4

择；齿形叶根常用于轧制叶片。

图1-13中(a)~(i)所示叶根均需沿周向装入轮缘槽内，轮缘槽上通常有两个或四个开口，叶根从开口处按顺序依次装入，末叶片用一个或两个铆钉固定于轮缘上。叉形叶根的叉腿由径向插入轮缘的叉槽中，一般用两个铆钉骑缝或在叶根中心线处和轮缘铆接固定。枞树形叶根从轴向装入轮缘的叶根槽内，叶根底部装楔形填隙条，相邻叶根的贴合面钻有圆孔，插入两个斜劈半圆销。图1-14为叶根在轮缘上的装配结构。

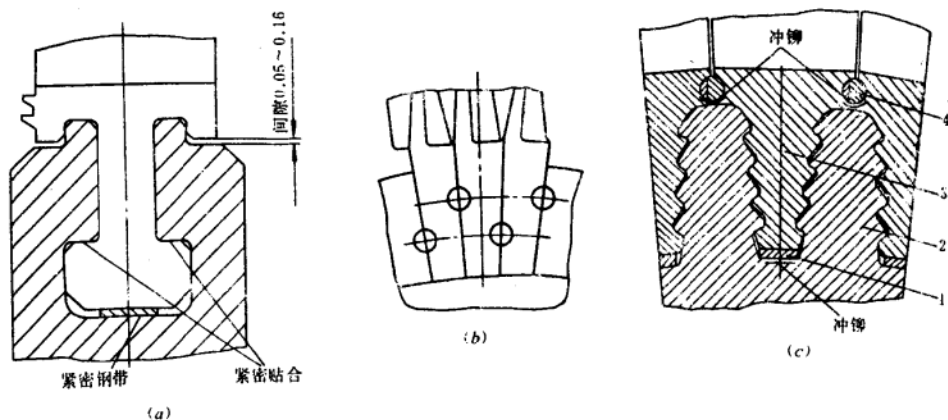


图 1-14 叶根在轮缘上的装配结构

(a) 倒T形叶根；(b) 叉形叶根；(c) 枞树形叶根

1—填隙条；2—轮缘；3—枞树形叶根；4—斜劈半圆柱销

3. 围带和拉筋

汽轮机叶片的顶部结构视其连接方式而定，一般短叶片和中等长度的叶片均用围带连接成组，因而设计了各种适合焊接或铆接围带的叶顶结构。图1-15 (a) 的结构多用于冷轧叶片，(b) 用于叶型较厚的叶片，(c) 用于节距小而叶型厚的叶片，(d) 是斜叶顶结构，(e) 用于宽度较大而顶部叶型较薄的叶片，(f) 用于不加围带的叶片，(g) 用于铆钉头直径较大的叶片，(h) 是与叶片铣成一体的整体式围带结构。图1-16示出了围带的几种装配结构。整体式围带之间并缝处用对焊将一定数量的叶片连接成一组，国外的某些汽轮机采用嵌入式围带，如图1-16 (a) 所示；图1-16 (b) 所示为铆接围带结构，围带略比叶片宽1~2 mm或相等，围带厚度为3~5 mm；图1-16 (c) 为某些长叶片（如末级叶片）级采用的拱形围带。

为了调频和加固,某些级还使用拉筋,其形式较多,有焊接拉筋和松拉筋,有圆拉筋、空心拉筋和半圆拉筋。其连接方式有分组连接、网状交错连接和整圈环形连接之分,如图1-17所示。

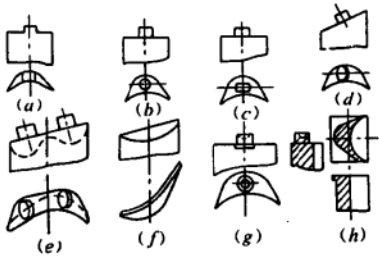


图 1-15 叶片顶部结构

二、转子的结构

转子可分为整锻转子、套装转子和焊接转子三种基本形式,有些汽轮机还采用有整锻和套装两种结构的组合转子。大型汽轮机的转子常分成高压转子、中压转子和低压转子几部分。

1. 整锻转子

在高温区工作的转子常采用整锻转子,其叶轮、汽封套和联轴器等部件与主轴一起由一个锻件车削而成,如图1-18所示。

2. 套装转子

套装转子适合于工作温度不大于 400°C 的场合。套装转子的叶轮、汽封套和联轴器等部件是分别加工后套装在阶梯主轴上的,各部件与主轴之间采用过盈配合,用键传递力矩,如图1-19所示。

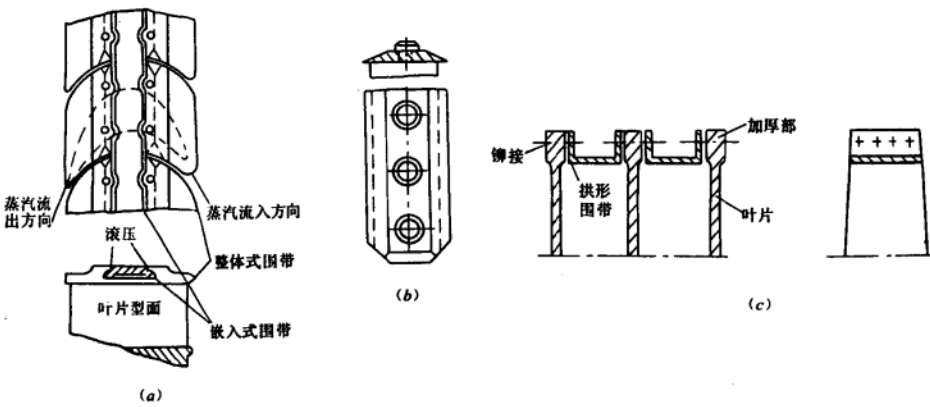


图 1-16 围带的装配结构

(a) 整体式围带; (b) 焊接围带; (c) 拱形围带

图1-20是套装叶轮中各种键的结构。一般的叶轮采用轴向键结构;对轮毂应力较大的低压级叶轮,常采用径向键结构,径向键与轮毂过盈配合,而与轴套滑动配合,力矩通过径向键传给轴套,再通过轴套上的轴向键传递给主轴;径向销钉结构常用于调节级叶轮,在叶轮内孔镶一衬套,衬套与轮毂之间装有若干径向销钉,衬套与主轴之间采用较小的过盈量。

3. 组合转子

汽轮机有时采用组合转子,即在高温段采用整锻结构,而在中、低温段采用套装结构,如图1-21所示。

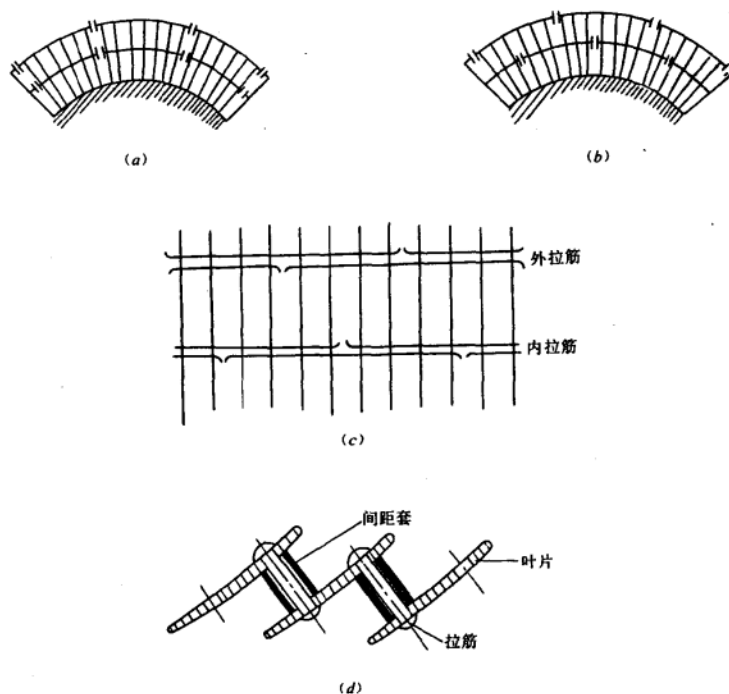


图 1-17 拉筋的连接

(a) 分组焊接拉筋；(b) 网状交错焊接拉筋；(c) 半圆网状交错松拉筋；(d) Z形拉筋

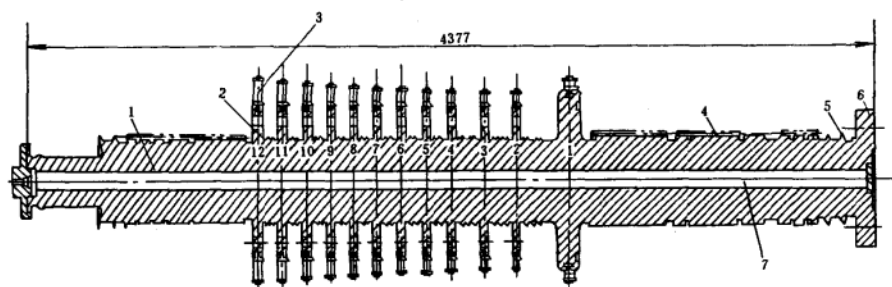


图 1-18 N200型汽轮机整锻高压转子

1—主轴；2—叶轮；3—动叶片；4—汽封；5—挡油环；6—联轴器；7—中心孔

4. 焊接转子

焊接转子大都用作大容量汽轮机的低压转子，它由数个实心轮盘拼焊而成，各封闭空间之间有小孔连通，见图1-22。

当转子或主轴的直径较大时，其中心应加工 $\phi 100$ 的中心孔。随着金属冶炼和锻造技术的提高，也可不打中心孔。

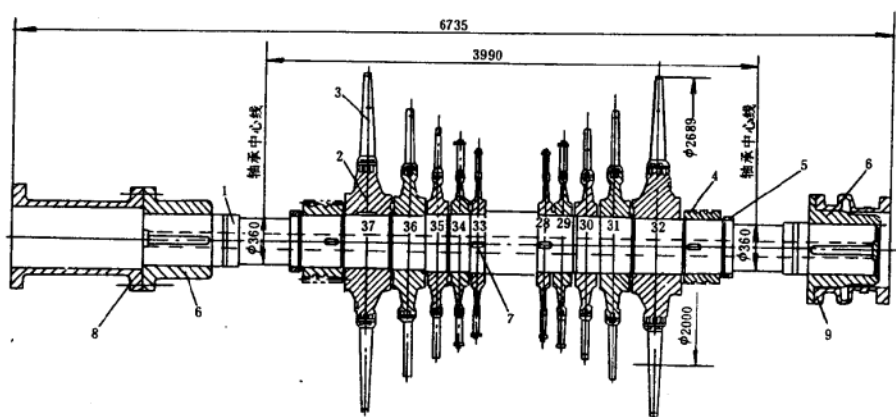


图 1-19 N200型汽轮机套装低压转子

1—主轴；2—叶轮；3—动叶片；4—汽封套；5—挡油环；6—联轴器；7—键；8—短轴；9—波形套筒

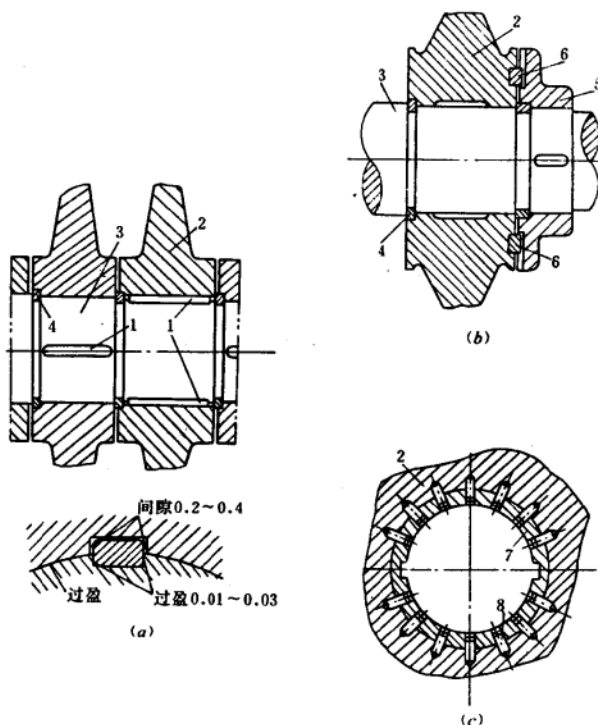


图 1-20 套装叶轮中键的结构

(a) 轴向键；(b) 径向键；(c) 径向销钉

1—轴键；2—叶轮；3—主轴；4—定位环；5—轴套；6—径向键；7—衬环；8—径向销钉