

# 汽轮机叶片结构设计思路及方法阐述

## Design Idea and Method of Steam Turbine Blade Structure

黄娟

Juan Huang

金通灵科技集团股份有限公司 中国·江苏南通 226000

Jintongling Technology Group Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226000, China

**摘要:** 汽轮机是火电厂内的一项重要设备,因此汽轮机的设计与应用问题也开始受到关注。论文针对汽轮机叶片设计的探讨,介绍了汽轮机叶片结构设计的材料选择、汽轮机叶片的组成结构及作用,给出了汽轮机叶片设计的部分结构图、汽轮机叶片的围带的具体设计、汽轮机叶根结构的设计方法,为中国汽轮机叶片的设计提供了良好的发展空间。

**Abstract:** Steam turbine is an important equipment in the thermal power plant, so the design and application of steam turbine also began to receive attention. Aiming at the discussion of steam turbine blade design, the paper introduces the material selection of steam turbine blade structure design, the composition structure and function of steam turbine blade, and gives the partial structural drawing of steam turbine blade design, the specific design of steam turbine blade shroud, and the design method of steam turbine blade root structure, which provides a good development space for the design of steam turbine blade in China.

**关键词:** 汽轮机叶片; 结构设计; 思路; 方法

**Keywords:** steam turbine blade; structure design; ideas; method

**DOI:** 10.12346/etr.v4i12.7427

## 1 引言

汽轮机是一种旋转式蒸汽动力装置,在现代火力发电厂中发挥着重要作用。汽轮机的工作原理是:蒸汽穿过固定喷嘴成为加速的气流后喷射到动叶片上,使装有叶片的转子旋转,对外做功。汽轮机由两大部分构成,分别是静止部分与转动部分。静止部分包括汽缸、静叶栅、轴承、汽封等;转动部分包括动叶片、叶轮、主轴、联轴器等。随着社会的不断进步,各个行业的发展都面临着前所未有的生存压力,所以为了顺应时代的发展,必须不断地加强前进的步伐<sup>[1]</sup>。

叶片毛坯进行性能热处理后,发生变形的毛坯采用固含量低,煤耗高,排放量大,既增加能源消耗,又严重污染环境,因此中国电力工业将发展超临界与超超临界机组作为今后的发展方向<sup>[2]</sup>,但考虑到中国的国情,特别是从经济出发,可以考虑 50MW 汽轮机末级叶片,高度为 665mm。

## 2 汽轮机总述

### 2.1 组成部分

汽轮机系统由以下两部分构成:汽轮机本体及辅助系统。汽轮机本体主要是起能量转换作用,蒸汽热能经过汽轮机被转换成机械能。辅助系统是汽轮机旋转所需的支持系统,要明确辅助系统的实际情况,优化相关的系统功能。汽轮机系统结构见图 1。

汽轮机通流中的静止部分包括隔板、汽缸、隔套板、汽封、轴承等。汽缸是汽轮机的外壳,隔板、喷嘴、喷嘴室及汽封、隔板套等按照一定顺序布置在汽缸内。汽轮机运转时,静子固定不动,转子高速旋转。因此汽轮机的转子与静子之间要有一定的距离,这样汽轮机在运转时转子与静子就不会相互碰撞或摩擦,汽轮机的运行状态也得到保障。汽轮机的轴承座及轴承安装在轴承箱内。汽轮机中安装支持轴承与推

【作者简介】黄娟(1988-),女,中国江苏海门人,硕士,工程师,从事汽轮机通流热力设计研究。

力轴承,运转过程中,支持轴承承受来自转子的重量,同时保持转子的径向位置,而推力轴承主要对转子的轴向位置进行固定<sup>[3]</sup>。

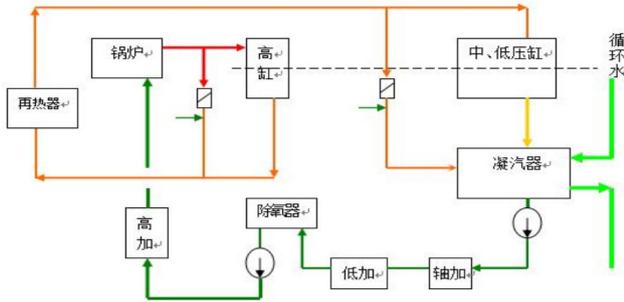


图1 汽轮机系统结构图

## 2.2 关键零件

汽轮机的关键零件之一就是叶片,叶片在整个机组中起着十分重要的作用。汽轮机的叶片结构相对精细,但运行环境相对复杂,汽轮机运行过程中的蒸汽力、离心力、高温、高压等都要由叶片承受。叶片的性能、状况对汽轮机的运行效率有直接影响,研究表明,汽轮机叶片的表面粗糙度、加工几何形状、空气动力学性能及运行工况、安装间隙、结垢程度等都会对汽轮机的效率、功率产生影响。因此必须重视并做好汽轮机叶片的设计,通过优化叶片形状、表面粗糙度、整体结构等,优化整个汽轮机机组的性能,提高整个机组的安全性、稳定性与可靠性。

随着社会与经济的发展和汽轮机的使用场景越来越多,运行环境也日益复杂,汽轮机叶片结构也越来越复杂,这使汽轮机叶片的设计与制造加大了难度。在此情况下,为确保汽轮机结构的精密与性能的可靠,可运用机床技术对叶片进行精密加工,以保证汽轮机叶片质量<sup>[4]</sup>。

## 2.3 结构特点

火电厂的汽轮机,在结构上有以下特点:采用高转速设计,转速6000rpm,通过齿轮箱与发电机相连。火电厂汽轮机的结构多为单缸逆流结构,这种结构的特点是能够中间进汽,所以对蒸汽的利用比较充分,轴封漏气量较低。汽轮机在机外设置分离器,高压排汽口剩余蒸汽需先进入汽水分离器进行除湿,然后再进入低压缸继续膨胀做功。汽轮机的低压与高压端的配汽方式均为喷嘴配汽,在这种方式下,当压缩机的工况发生变化时,汽轮机的运行不会受到影响,汽轮机仍可保持高效运行。火电厂汽轮机的高压排汽口既是排汽口也是抽汽口,抽汽口为除氧器与干化机的抽汽提供便利。汽轮机的控制系统采用全电调,配独立的EH高压油站,设高压主汽门油动机、调节油动机,充分满足汽轮机高效运行要求。汽轮机的底座采用整体钢底座,这种底座可由工程按照设计尺寸预制而成并在工程完成装配,火电厂在使用时无需再进行装配,无需现场揭缸解体。汽轮机的中间汽水分离器出口设置有快关式调节阀,通过调节阀对抽汽压力进行调

节控制,确保抽汽压力的稳定。同时调节阀也能在机组停机时将低压缸进汽快速关闭。

目前市场上常见以下两种形式的汽轮机叶片:等截面叶片与扭曲叶片。等截面叶片的特点是断面沿叶高方向相同;扭曲叶片的特点是断面沿叶高方向变化。等截面叶片的气动特性相对较差,制造工艺较为简单,整体成本也相对较低,等截面叶片适用于对叶片精度、气动性要求不高的汽轮机。扭曲叶片设计难度高,制造工艺复杂,成本高,但强度高,气动特性好,整体的应用性优于等截面叶片<sup>[5]</sup>。

## 3 汽轮机叶片结构设计思路及方法

### 3.1 汽轮机叶片材料选择

基于汽轮机叶片复杂的工作环境和恶劣的工作条件,对汽轮机叶片材料选择需要特别慎重。汽轮机叶片材料选择要按照以下原则进行:材料塑性好,强度高,热强性能过关,能适应多种复杂的运行环境。若汽轮机叶片的服役温度高于400℃,在选择材料时还要对材料的持久强度加以考虑,要尽可能选择持久强度高,力学性能好、持久塑形与蠕变强度高的优秀材料。另外,在选择叶片材料时,还要确保材料有较低缺口敏感性与较高的冲击吸收能量,这样才能确保汽轮机叶片有较长的使用寿命。选择汽轮机叶片材料时,所选材料还要抗腐蚀性、减振性过关。设计人员要根据叶片的工作环境选择适合的材料,以保证叶片质量。如当叶片处于湿蒸汽区时,就应选不锈钢制作叶片,不锈钢的耐腐蚀性好,耐磨性强,有利于延长叶片使用年限。如果不采用不锈钢材料,就应在设计阶段对叶片表面做适当的保护处理<sup>[6]</sup>。铬—镍—钨在600℃温度以上工作的叶片,应选用铬—镍—钨奥氏体不锈钢或高温合金,如Cr<sub>17</sub>Ni<sub>13</sub>W、Cr<sub>14</sub>Ni<sub>18</sub>W<sub>2</sub>NbBCe等。

### 3.2 汽轮机叶片的围带设计

#### 3.2.1 功能

围带有两种形式,分别是自带围带与装配围带。围带在整个汽轮机叶片结构中起到的作用是保护叶片,减少叶片的磨损损耗,延长叶片使用寿命。围带位于叶片顶部,装配好的叶片在静态时相邻围带间有一初始间隙。当汽轮机叶片工作时,叶片受到离心力的作用发生扭转恢复,在此种状态下,相邻叶片围带接触面就会相互紧贴;当汽轮机叶片发生振动时,围带接触面间就会发生相对的滑移作用,这种作用会将叶片振动产生的能量耗散,汽轮机叶片的振动应力得以降低,汽轮机叶片得到保护。

#### 3.2.2 设计要求

表1中ns为每秒转速,L为叶片高度,D为平均直径,Z为静叶片数,fd为叶片动频率。

围带的作用:研究表明,汽轮机叶片上的围带,可以使叶片的刚性得到提升,使叶片的自振频率发生改变,使叶片避开共振,让叶片得到一定程度的保护。同时围带还能使叶片构成封闭通道,如果在设计时在叶片上增设围带汽封,那

么叶片顶部的漏气损失就会大大减小，叶片的工作状态会更为良好。

表 1 汽轮和叶片围带设计参数

	长叶片	中叶片	短叶片
动频 fhz	$\leq 8n$	$zn \geq fd > 8n$	$> zn$
L/D	$\geq 0.25$	$0.25 > L/D \geq 0.10$	$< 0.10$

拉筋：拉筋在汽轮机叶片结构中的作用是改善叶片的振动特性，增加叶片的刚性。但在设计拉筋时要特别注意，要根据汽轮机叶片的工作环境及运行要求来决定是否需要设置拉筋。因为如果拉筋设置不当，就有可能导致汽轮机蒸汽流动损失增大，使汽轮机叶片强度得到削弱，对汽轮机叶片的质量产生负面影响。

所以在设计汽轮机叶片时，如果叶片振动要求已经得到满足，就应不再设置拉筋。

### 3.3 汽轮机叶根结构设计和类型

形式：① T形叶根。②外包凸肩 T形叶根。③菌形叶根。④双 T形叶根。⑤叉形叶根。⑥枞树形叶。

665mm 末级长叶片的离心力很大，造成叶根和轮缘合应力水平非常高。在叶片和转子的材料强度限制下，研制的叶根必须具有承载能力大和载荷分配均匀的显著特点，同时要求在结构上能基本包络叶片根部截面型线，与凸台拉筋和围带配合良好，易于装拆、现场安装方便。

通过方案论证，并结合厂内的实际加工条件，确定了 665mm 等级末级长叶片基本叶根形式为枞树型。枞树型叶根具有以下优点：

安装难度低，安装工艺简单，速度快，叶根的承载能力高，叶轮轴向宽度小。第一步，设计时如果是采用斜齿枞树型叶根，就要确保转子根槽的加工精度与叶根的加工精度一致，这样在设计完成后，叶片上的荷载才能分布均匀，所有转子轮槽与叶根也具有完全互换性。第二步，采用 Unigraphics NX 三维 CAD 软件对不同方案的 665mm 末级长叶片进行虚拟装配试验，发现采用圆弧枞树型叶根与凸台拉筋配合会产生难以解决的干涉问题，因此决定采用斜齿枞树型叶根。第三步，通过强度计算发现采用三齿叶根时，相对于四齿叶根

安全裕度较小，因此决定采用四齿叶根。叶根中心线与轴线夹角为  $8.0^\circ$ 。装配时为防止叶片轴向蹿动，先将锁紧片装入，对叶片起到固定作用。汽轮机叶轮结构包括轮壳、轮面、轮缘等几大部分。装配时，将轮壳装配到主轴上，使轮壳配合叶轮主轴；将轮体确定在叶轮中间，让轮体连接轮壳与轮缘，提高整个结构的稳定性。轮缘主要固定叶片，设计时工作人员根据轮缘的受力情况做出科学的设计与安装。

### 3.4 叶型设计

叶型设计是汽轮机叶片设计中的重中之重，汽轮机的叶片具有重量大、长度大等特性，因此设计难度较大。在进行汽轮机叶片叶型设计时，要充分考虑和兼顾叶根、叶冠和叶身型线之间的相对扭曲角度，合理确定锻造转角。同时在设计时还要根据凸台尺寸、叶根尺寸及欠压厚度等，合理确定飞边厚度。

## 4 结语

综上所述，叶片是汽轮机上的重要构成，要想保证汽轮机的正常运行，就必须优化汽轮机叶片结构设计。在汽轮机叶片结构设计中，叶片材料选择和叶根、叶型设计是几大要点。设计人员需根据汽轮机运行环境、对叶片性能的要求等科学制定设计方案，合理选择叶片材料，全面优化设计成果，确保汽轮机叶片质量达标。

### 参考文献

- [1] 陈光明,张旭阳.汽轮机叶片的结构特点与数控加工技术研究[J].制造业自动化,2011,33(17):93-98.
- [2] 姚召华,王隆太,项余建.汽轮机叶片数控砂带磨床结构设计与分析[J].制造技术与机床,2009(11):54-57.
- [3] 朱宝田.三种国产超超临界1000MW机组汽轮机结构设计比较[J].热力发电,2008(2):1-8.
- [4] 钱文明,王隆太,季源源,等.汽轮机叶片数控砂带磨削工艺分析与磨床结构设计[J].组合机床与自动化加工技术,2007(10):89-91.
- [5] 陈江龙,盛德仁,陈坚红,等.基于模态分析的汽轮机叶片有限元拓扑结构优化[J].电站系统工程,2005(1):51-53.
- [6] 王新军,高铁瑜,徐廷相.汽轮机空心静叶去湿缝隙结构的研究[J].热能动力工程,2005(1):14-17+103.