

# 某型燃气轮机涡轮盘结构设计初探

周韧峰

(中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002)

**摘要:** 本文对涡轮盘结构设计时需要考虑的主要问题进行了总结,在此基础上完成了某型燃气轮机涡轮盘的结构设计及选材,并对该涡轮盘进行了强度校核和试验验证,为同类型燃气轮机涡轮盘结构设计提供了参考。

**关键词:** 燃气轮机; 涡轮盘; 结构设计; 强度

## 0 引言

在燃气轮机中,涡轮盘是极其关键的部件,它作为涡轮转子的重要组成部分,长期处在高转速、高负荷和高温的环境下,承受着热载荷和机械载荷的共同作用,它的可靠性直接影响整个发动机的安全工作。

本文对某型燃气轮机涡轮盘的结构设计及选材进行了说明,并对其进行了有限元强度校核以及试验验证。

## 1 涡轮盘设计需要考虑的主要问题

### 1.1 工作条件

涡轮盘作为燃气轮机的高温转动部件,长期在高温、高转速和高负荷状态下工作。高温要求涡轮盘所选材料必须能在高温下保持性能稳定且能长期工作,同时需要考虑涡轮盘的冷却。高转速必然带来高离心应力,设计时必须考虑涡轮盘所承受的应力情况,合理的设计盘的型面及安装、定位;同时高转速情况下,涡轮盘即时有很小的质量不均匀都会引起很大的振动,所以设计时需考虑盘的动平衡问题。

### 1.2 几何约束

涡轮盘设计时,最大外径是根据涡轮流道尺寸确定的,而流道尺寸决定着涡轮的性能,所以涡轮盘设计必须满足流道的限制。从强度设计角度讲,涡轮盘上无孔是最好的,但是由于设计时需满足涡轮盘的连接、冷却等要求,需在盘上设计连接孔或冷却孔时,孔径的设计在结构、传动和冷却允许的条件下应尽量取较小的值。

### 1.3 强度要求

涡轮盘设计时必须满足强度设计准则的各项要求。它包括最大径向应力、平均周向应力、内孔处的周向应力等各项应力水平不超过规定值,以及满足安全储备,以保证在高温、高转速和高负荷下能稳定可靠的工作。

## 2 涡轮盘结构设计

某型燃气轮机是地面战车的供电系统的动力装置,涡轮采用的是两级轴流涡轮,其中在设计

状态下,一级涡轮盘最高工作温度为618K,二级涡轮盘最高工作温度为508K,设计转速为40000r/min。

一级涡轮盘的结构示意图见图1。主要结构设计特点如下:

(1) 涡轮盘最大外径根据流道尺寸设计,直径为,轮缘处设计有41处圆弧枞树形榫槽,用于与涡轮叶片连接,叶片轴向定位采用卡环结构。

(2) 涡轮盘前后各设计有6个销孔,前面6个销孔用于一级涡轮盘与压气机连接,后面6个销孔用于与二级涡轮盘连接,销孔直径为,前后6个销孔中各有一个偏置孔,用于防错。销孔之间设计有螺栓孔,孔径为,用于穿过拉紧螺栓,将涡轮盘与压气机连接。

(3) 涡轮盘前设计有工艺凸台,用于涡轮盘加工。

(4) 为减少零件数量、提高可靠性与装配工艺性,一级涡轮盘与封严篦齿(6处)一体化设计,篦齿主要用于两级涡轮盘级间封严。在第一道和第二道篦齿之间设置有6个气孔,直径为,用于引气体封严。

(5) 盘心设计有8个气孔,直径为用于从压气机引气,对涡轮盘进行冷却降温,以提高涡轮盘的寿命和可靠性。

(6) 盘心设置有型腔,一方面减少涡轮盘的重量,另

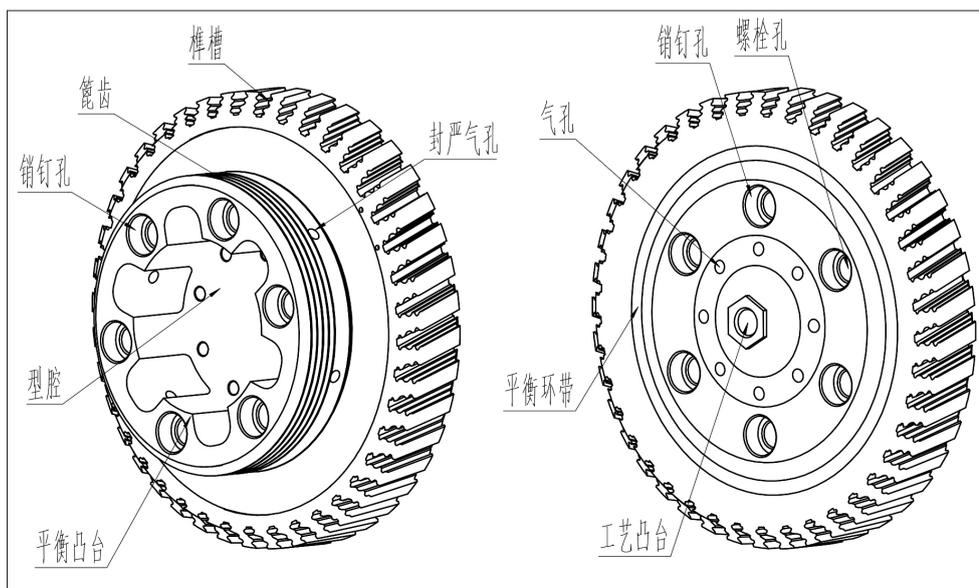


图1 一级涡轮盘结构示意图

一方面与二级盘的型腔一起利用压气机引入的高压气体平衡转子轴向力。涡轮盘前后设置有动、静平衡去材料的环带和凸台。

二级涡轮盘的结构示意图见图 2。主要结构设计特点如下：

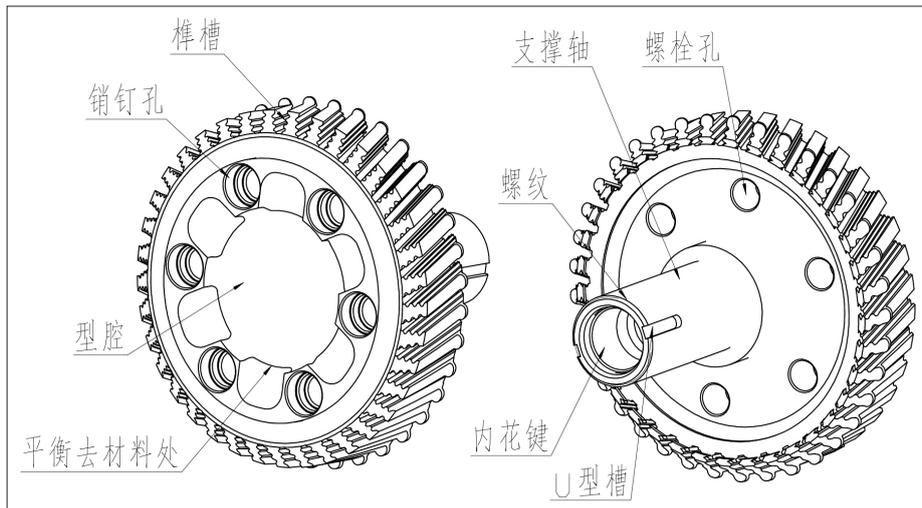


图 2 二级涡轮盘结构示意图

(1) 涡轮盘最大外径根据流道尺寸设计，直径为，轮缘处设计有 37 处圆弧枞树形榫槽，用于与涡轮叶片连接，叶片轴向定位采用卡环结构；

(2) 涡轮盘前面设计有 6 个销孔，用于与一级涡轮盘连接销孔直径为，6 个销孔中有一个偏置孔，用于防错。销孔处设计有螺栓孔，孔径为，用于穿过拉紧螺栓，将一级涡轮盘与二级涡轮盘连接；

(3) 为减少零件数量、提高可靠性与装配工艺性，二级涡轮盘与后支撑轴一体化设计，支撑轴端设置有螺纹和 U 型槽结构，用于轴承锁紧及锁圈防松，支撑轴端部还设计有内孔及工艺内花键，用于涡轮盘装配；

(4) 盘心设置有凹腔，一方面减少涡轮盘的重量，另一方面与一级盘的型腔一起利用压气机引入的高压气体平衡转子轴向力。盘前有冷却气路为轮盘冷却降温，以提高涡轮盘的寿命和可靠性。

### 3 选材

由涡轮盘工作条件可知，涡轮盘的材料需具有高的强度、良好的塑性、小的线膨胀系数、高的导热性，以及良好的工艺性和经济性，一般涡轮盘采用的材料是高温合金。涡轮盘设计选材的原则是在满足强度、可靠性的前提下，优先选用有使用经验，已经定型，并已纳入国家标准、国家军用标准和行业标准的成熟材料，同时需考虑了材料的工艺性和经济性。参考我司同等热力循环参数且已定型发动机涡轮盘的材料选择，最终确定涡轮盘材料为 GH4698。

GH4698 高温合金在 500 ~ 800℃ 范围内具有高的持久强度和良好的综合性能。主要用于制作发动机涡轮盘、压气机盘、导流片等重要零件，工作温度可达 750 ~ 800℃。

## 4 有限元强度分析

### 4.1 边界条件及网格划分

根据涡轮盘的工作时的受力情况，应力分析时考虑的主要载荷有：离心载荷（包含涡轮叶片）、温度载荷。

采用有限元软件对涡轮盘进行了前、后处理，并进行线弹性有限元应力分析计算。本次计算不考虑榫槽，轮盘为循环对称结构，选取了包含偏心孔在内的整个模型的 1/6 循环对称段作为计算模型，涡轮盘有限元网格见图 3 和图 4。同时，涡轮盘约束和载荷施加如下：

(1) 一级盘约束了图 3 所示 A 面部分节点的轴向位移及该面一个节点的周向位移，并在涡轮盘两切割面施加循环对称约束，二级盘约束了图 4 中的 A 面部分节点轴向和周向位移，并涡轮盘两切割面施加循环对称约束；

(2) 离心载荷：以转速形式施加；

(3) 温度载荷：以节点形式施加在

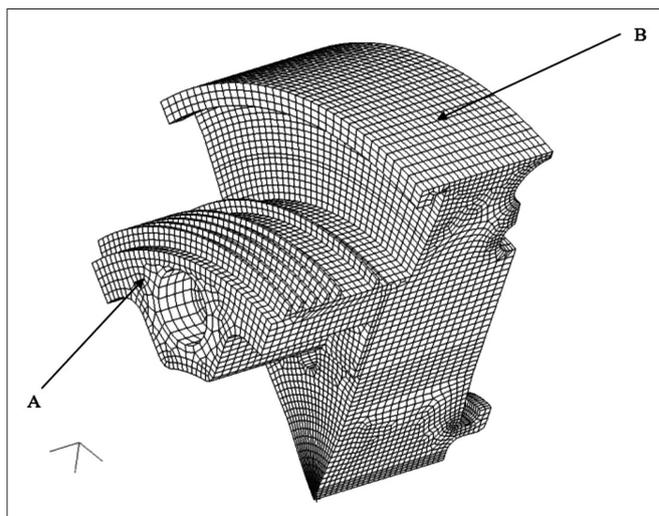


图 3 一级涡轮盘有限元网格

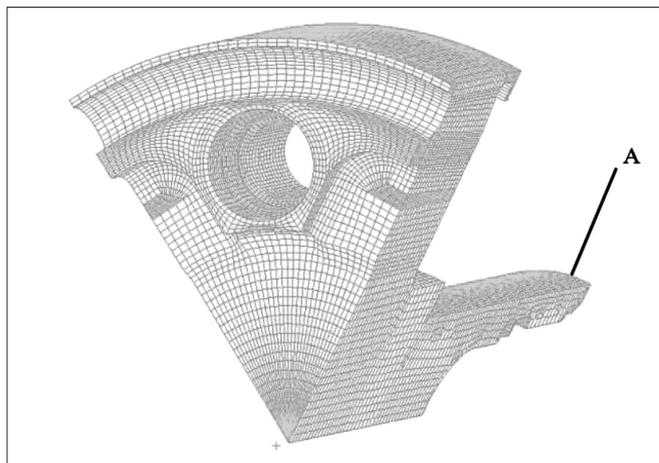


图 4 二级涡轮盘有限元网格

整个模型上；

(4) 将叶片和轮缘以外凸块的离心力以面力 (B 面) 形式施加在轮缘上。

在设计状态下, 涡轮盘当量应力分布见图 5 和图 6。其中一级涡轮盘和二级涡轮盘最大当量应力都位于螺栓孔处, 一级涡轮盘最大当量应力为 960MPa, 二级涡轮盘最大当量应力为 834MPa。

#### 4.2 强度校核

根据 GH4698 高温合金材料性能数据, 参照 EGD-3 应力标准对涡轮盘进行了强度校核, 校核结果见表 1 和表 2。

#### 5 涡轮盘强度试验验证

由于试验时无法模拟燃气轮机工作时涡轮盘的真实温度场, 故需要进行试验载荷等效计算。根据试验状态下的温度进行转速等效转换, 使试验效果等同于发动机中规定要求达到的效果。

##### 5.1 超转、破裂试验等效转速

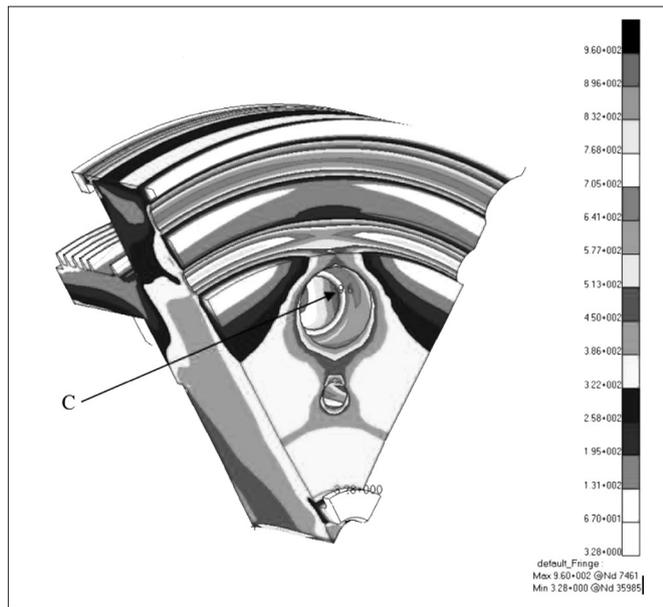


图 5 一级涡轮盘当量应力分布

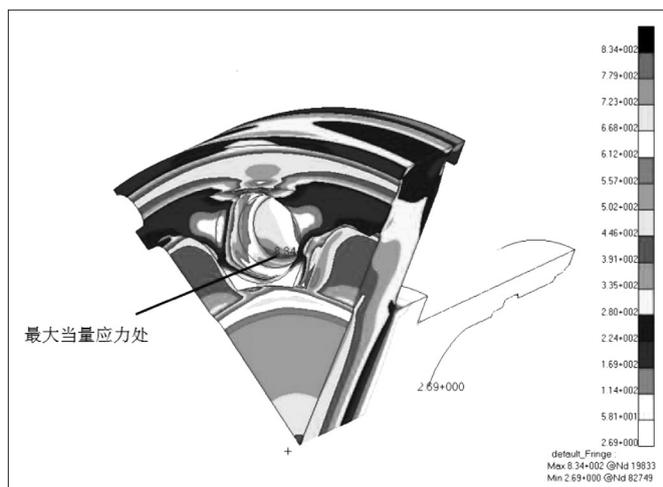


图 6 二级涡轮盘当量应力分布

表 1 一级盘强度校核结果

| 应力类型     | 应力值 /MPa | 标准值 /MPa | 安全系数       |
|----------|----------|----------|------------|
| 最大离心径向应力 | 453      | 547      | 1.21 > 1.0 |
| 平均周向应力   | 361      | 533      | 1.47 > 1.0 |
| 内径处周向应力  | 501      | 701      | 1.40 > 1.0 |

表 2 二级盘强度校核结果

| 应力类型     | 应力值 /MPa | 标准值 /MPa | 安全系数       |
|----------|----------|----------|------------|
| 最大离心径向应力 | 437.1    | 517.5    | 1.18 > 1.0 |
| 平均周向应力   | 320.3    | 517.5    | 1.62 > 1.0 |
| 内径处周向应力  | 462      | 655.5    | 1.42 > 1.0 |

超转试验主要考核在超转条件下, 涡轮盘还能否稳定可靠工作。采用文献 [6] 提供的计算方法对涡轮盘的超转、破裂转速进行了计算, 方法如下:

(1) 轮盘子午截面破裂转速

$$n_1 = n \sqrt{\frac{\sigma_b}{\sigma_r}} \quad (1)$$

式中:

- 轮盘子午截面破裂转速 (r/min);
- 计算转速 (r/min);
- 材料极限强度 (MPa);
- 轮盘平均周向应力 (MPa)。

(2) 轮盘圆柱截面破裂转速

$$n_2 = n \sqrt{\frac{\sigma_b}{\sigma_{r\max}}} \quad (2)$$

式中:

- 轮盘圆柱截面破裂转速 (r/min);
- 计算转速 (r/min);
- 材料极限强度 (MPa);
- 轮盘最大离心径向应力 (MPa)。

根据有限元计算结果及公式 (1)、(2) 计算了设计状态下涡轮盘的破裂转速, 在规定超转、破裂状态下, 子午截面破裂转速比低于圆柱截面破裂转速比, 故选取子午截面进行等效转速计算。计算得到了当试验温度为室温条件时, 一级涡轮盘超转和破裂转速分别为 47308r/min 和 70541r/min, 二级涡轮盘超转和破裂转速分别为 47158r/min 和 69216r/min。

##### 5.2 超转试验结果

根据计算确定的试验等效转速, 进行了涡轮盘的超转试验 (见图 7), 试验后进行了尺寸计量和荧光检查。检查表明涡轮盘最大外径残余变形小于 0.15%, 且经荧光检查无裂纹, 判定涡轮盘超转试验合格。

#### 6 结语

本文对涡轮盘设计需要考虑的主要问题进行了总结, 在此基础上完成了某型燃气轮机涡轮盘的结构设计和选材, 随后采用有限元方法计算了涡轮盘应力分布并进行了强度

(下转第 9 页)

表 优势对比

| 锚栓笼组装项别 | 常规方案                 | 锚栓笼搬运装置                             |
|---------|----------------------|-------------------------------------|
| 施工地点    | 全程在机位点施工             | 码头组装, 机位点固定即可                       |
| 施工工时    | 14 天                 | 10 天                                |
| 加固用钢量   | 钢材用量大, 不易规范总量        | 固定支撑结构直接预埋, 且搬运吊具可反复使用, 方案规范, 用钢量小。 |
| 施工精度保障  | 可保证                  | 可保证                                 |
| 施工质量    | 加固型材 8t, 不便于混凝土浇筑与振捣 | 加固型材 2t。                            |
| 装置通用性   | 无                    | 吊具反复使用, 降低总体用钢量                     |
| 成本      | 加固型材 6.4 万元          | 加固型材 1.6 万元, 节省 4.8 万元。             |

系绑问题, 还须提高相关人员安全意识, 对于载运风险识别不足、船载绑扎系固等不规范行为作出规范。

4 优势分析

以江苏响水某风电场项目为例, 该项目采用高桩承台配套锚栓笼, 该工程风电机组基础设计等级为 1 级, 结构安全等级为一级, 基础结构设计使用年限为 25 年。风电机组基础采用高桩承台混凝土基础, 该基础型式混凝土承台直径为 15m, 承台基础厚度为 4.0m, 采用直径为 2m 的钢管桩, 桩在承台下部按直径为 11.5m 圆周均布, 钢管桩在承台内的高度为 1.50m。风机底节塔筒通过预应力螺栓固定于混凝土承台。根据风机厂家提供的螺栓资料, 底节塔筒法兰内外两圈共布置 200 根螺栓。

采用本装置方案与常规现场施工方案对比结果如下表所示:

5 结语

本文提出的锚栓笼搬运装置组装方便快捷, 结构稳定, 可有效防止在运输或吊运过程中锚栓笼可能产生的变形, 适用于船运复杂运输场景。搬运装置通过调整, 能够用于不同的项目并重复使用。降低机位点海上风电施工工时, 对提升施工质量, 降低施工成本都具有有益效果。

参考文献:

[1] 李宝闯, 樊倩. 海上风电项目高桩低承台基础施工解析 [J]. 工程建设与设计, 2019(08):177-178.  
 [2] 张栋. 风力发电机组塔架超高预应力锚栓安装精度控制浅析 [J]. 水电与新能源, 2017(12):65-67.  
 作者简介: 杨武炳 (1981.08-), 男, 汉族, 新疆乌鲁木齐人, 本科, 工程师, 研究方向: 海上风电工程相关应用设备开发。

(上接第 5 页)



图 7 涡轮盘超转试验

校核, 并通过了超转试验验证, 得出了如下主要结论:

- (1) 涡轮盘最大当量应力都位于螺栓孔处, 所以涡轮盘结构设计时, 应合理布置孔的位置及大小;
- (2) 涡轮盘最大径向应力、平均周向应力、内径处周向应力等各项应力水平满足设计准则;
- (3) 涡轮盘通过了超转试验, 初步验证了涡轮盘结构

设计和选材的可行性, 具备装机试验条件;

(4) 涡轮盘结构设计时必需考虑高温、高转速和高负荷带来的问题、满足几何约束和强度要求, 才能保证其稳定可靠的工作。

参考文献:

[1] 航空发动机设计手册编委会. 航空发动机设计手册第 10 册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.  
 [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会编. 《中国航空材料手册》第 2 卷 [M]. 中国标准出版社, 2002.  
 [3] 张艳春, 施丽铭, 李朝阳. 燃气轮机涡轮盘结构应力有限元分析 [J]. 燃气轮机技术, 2007,(20)3:46-49.  
 [4] 李水姣. 某型燃气轮机低压涡轮盘强度分析 [J]. 机械工程与自动化, 2012,10(005):37-39.

[5] 斯贝 MK202 发动机应力标准 (EGD-3)[M]. 国际航空编辑部, 1979,09.

[6] 航空发动机设计手册编委会. 航空发动机设计手册第 18 册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

作者简介: 周韧峰 (1988-), 男, 汉族, 湖南永州人, 工程师, 研究方向: 燃气轮机涡轮设计。