

航空发动机双辐板涡轮盘温度场与应力场分析

金琰, 郝艳华, 黄致建

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:基于 ANSYS 软件,研究了双辐板涡轮盘的温度场和应力场,通过划分各个区域的换热模型,较精确地计算了温度分布,再通过间接热-结构耦合计算出双辐板涡轮盘的应力分布.结果表明,双辐板涡轮盘最大平均径向应力、最大平均周向应力、盘心平均周向应力分别为 702.35 MPa, 679.68 MPa和 880.98 MPa,不仅可满足规范设计要求的安全系数,还远小于材料的屈服强度 1 070 MPa,其结构完全满足了强度要求,并具有很大的发展空间.

关键词:航空发动机;双辐板涡轮盘;换热边界;温度场;应力分布

中图分类号:V232.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.017

Analysis of temperature field and stress field for the twin-web turbine disk of aero engine

JIN Yan, HAO Yan-hua, HUANG Zhi-jian

(College of Mechanical & Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The temperature field and stress field of the twin-web turbine were studied based on the ANSYS. Through dividing different parts of the turbine disk into different heat transfer model, the temperature field distribution was accurately calculated. And then the stress field distribution of the twin-web turbine disk was calculated by using the method of the indirect heat-structure coupling. The results showed that the maximum average radial stress, the maximum average circumferential stress and the average circumferential stress of plate heart were 702.35 MPa, 679.68 MPa and 880.98 MPa, respectively. It not only met the requirement of the safety factor, but also was less than the value of the yield strength, 1 070 MPa. So the structure completely met the requirements of strength, and had the large development potential.

Key words: aero engine; twin-web turbine disk; heat transfer boundary; temperature field; stress distribution

0 引言

涡轮是航空发动机核心部件之一,主要作用是提供动力,由于它一直处于高温、高转速的恶劣工作环境,其可靠性直接关系到发动机的性能和寿命^[1].双辐板涡轮盘是一种新型涡轮盘结

构,仅有很少的文献报道其相较于传统的单辐板涡轮盘,可以提高转速和减轻质量^[2].涡轮盘在工作时主要受到温度载荷和离心载荷的作用,为了得到涡轮盘的温度载荷,需精确地计算涡轮盘的温度场,但目前鲜有文献对此进行研究,文献[3]对空心盘的换热做了研究,具有借鉴作用.准确地计算双

收稿日期:2014-04-22

作者简介:金琰(1989—),男,安徽省巢湖市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为机械设计与理论.

通信作者:郝艳华(1956—),女,辽宁省沈阳市人,华侨大学研究员,主要研究方向为工程辅助设计、计算机辅助设计与工程(CAD/CAE).

辐板涡轮盘温度场不仅可以为其结构强度分析和寿命估算提供可靠的数据,还可以根据温度分布来改进其结构以达到更好的散热效果。

本文拟研究双辐板涡轮盘的温度场与应力场,针对不同部位给出不同的换热模型,并分别计算涡轮盘不同部位的温度分布,把获得的换热系数应用于涡轮盘的有限元分析,以说明双辐板涡轮盘这种结构在降低质量方面具有很大优势。

1 温度场计算的数学模型

对于各项同性及无内热源的结构体,二维轴对称稳态热传导方程可表示为^[4]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z r \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

式中, T 为温度场函数; k_r, k_z 为结构体导热系数; r, z 分别为结构体的径向方向和轴向方向。

涡轮盘与周围流体的换热按第三类边界条件来考虑,在盘面温度 T_w ,周围流体温度 T_f 及盘面和周围流体的对流换热系数 h 已知的情况下,边界条件表示为

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T_w - T_f)$$

式中, k 为结构体导热系数, n 为结构体与流体接触边界的外法线方向。

2 有限元模型的建立

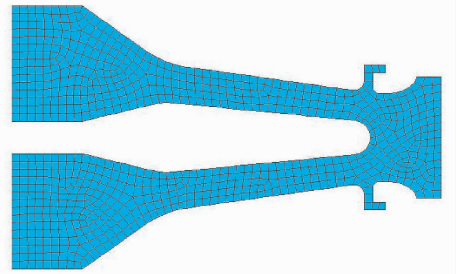
由于双辐板涡轮盘是一个回转体,在不考虑其安装边和一些通孔的情况下,可以简化为二维轴对称模型来分析。温度场计算采用 PLANE77 单元,对应的应力场计算采用 PLANE82 单元,都是四边形八节点单元。划分网格后的模型如图 1 所示,共生成 846 个单元和 2 821 个节点。

3 热力边界条件

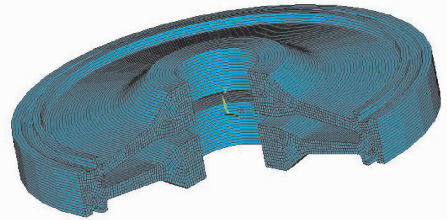
双辐板涡轮盘在工作状态时,盘缘受到来自叶片的热传导,盘的侧面和盘腔与压气机出来的高压冷却气体进行对流换热。根据结构特点和换热机理,将双辐板涡轮盘划分为有外部供气的转静系、自由盘和旋转盘腔。双辐板涡轮盘各个区域的换热模型如图 2 所示。

3.1 有外部供气的转静系模型

为了使涡轮盘更安全可靠地工作,一般是提供



a) 双辐板涡轮盘二维有限元模型



b) 扩展后的三维模型

图 1 双辐板涡轮盘有限元模型

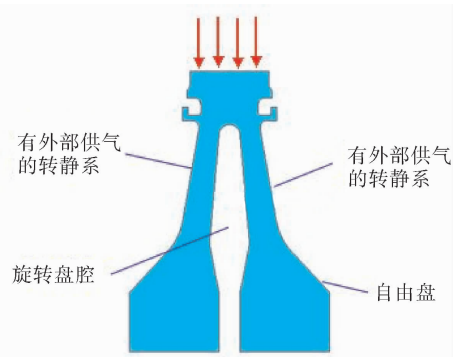


图 2 各个区域的换热模型

一定数量的冷气对其进行冷却。这些冷气有两个作用:一是冷却涡轮盘,二是阻止高温燃气从转静结合处侵入腔内。有外部供气的转静系努赛尔数^[5]为

$$\frac{Nu_{av}^*}{Nu_{fd}^*} = 1 + 0.22 \left(\frac{r_0}{r_{in}} \right)^2 \frac{C_w}{Re_w}$$

其中, Nu_{av}^* 为转静系努赛尔数, Nu_{fd}^* 为自由盘努赛尔数, r_0 和 r_{in} 为盘的半径和进气口半径, C_w 为进气系数, Re_w 为旋转雷诺数。

3.2 自由盘模型

理想的自由盘模型是指轮盘周围的空气是静止的,轮盘与周围空气之间只有旋转引起的相对运动,且周围空间无限大。发动机涡轮盘中有些地方属于这种情况,自由盘的努赛尔数为^[5]

$$Nu_{av} = 0.0197(n+2)(n+2.6)^{-0.8} Re_w^{0.8} P_r^{0.6}$$

其中, n 为盘温度分布的系数, Re_w 为旋转雷诺数, P_r 为普特数.

3.3 旋转盘腔模型

对于轴向贯通流的旋转腔,中心射流在腔内产生诱导性涡环,其强度随进气流速的增加而增大,随转速的增加而减小.所研究的涡轮盘因为转速很大,浮升力起主导作用,所以呈自然对流状态,其努赛尔数为^[5]

$$Nu = 0.0267 Gw_r^{0.286}$$

其中, Gw_r 为旋转格拉晓夫数.

3.4 外缘与叶片根部的换热系数

外缘与叶片根部的换热系数,通过转换可以换算成外缘与热流之间的第三类边界条件^[6].将热流和涡轮盘外缘之间建立直接的等效换热关系,等效的第三类边界条件为

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = h_c(T_w - T_g)$$

式中, h_c 为等效对流换热系数, T_w 和 T_g 分别为盘外缘温度和热流温度.

4 结果与分析

4.1 材料参数

双辐板涡轮盘采用的是 GH4169 合金,材料属性如表 1 所示.

表 1 GH4169 合金的材料属性 MPa

温度 $T/^\circ\text{C}$	屈服应力 σ_b	屈服极限 $\sigma_{0.2}$	弹性模量 E	热导系数 λ
300	1 190	1 350	185.5	17.52
400	1 210	1 350	177.1	18.92
500	1 070	1 310	167.5	20.32
600	1 130	1 280	158.1	21.70
700	1 090	1 230	150.2	23.20

4.2 温度场计算结果

进入 ANSYS 热分析模块,加上边界条件和载荷计算出的双辐板涡轮盘温度场分布情况如图 3 所示.由图 3 可以看出,双辐板涡轮盘的温度按盘缘到盘心呈梯度分布,其最高温度在盘缘为 600°C ,在盘心为 350°C .由于进气温度不同,左右两侧的辐板温度是不同的,同时根据涡轮盘结构特点,各个换热模型也是不同的,符合实际情况.计算完成的温度场会以节点温度的形式保存在一个文件中,用于强度分析.

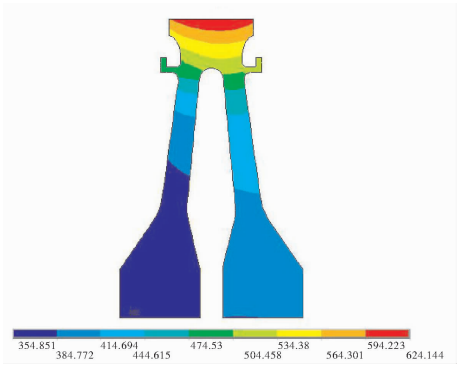


图 3 双辐板涡轮盘温度场分布

4.3 应力场计算结果

双辐板涡轮盘在工作状态中,受到温度载荷和离心载荷的作用^[7].笔者采用间接热-结构耦合,双辐板涡轮盘采用 1 个轴向(即 y 向)约束,在两辐板之间的进气口还有轴向位移耦合,盘缘拉力为 169 MPa ,轮盘转速为 $13\ 000\text{ r/min}$,计算出的应力分布如图 4 和图 5 所示.

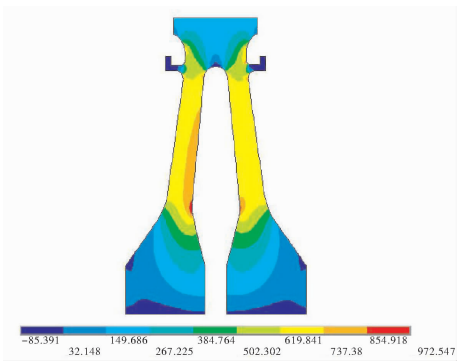


图 4 双辐板涡轮盘径向应力分布

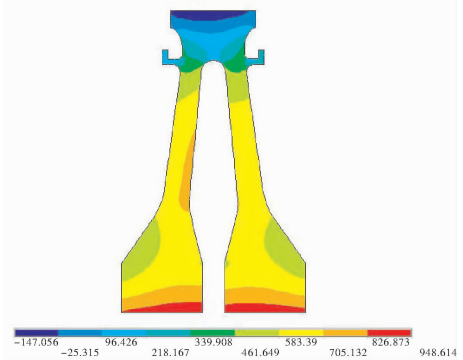


图 5 双辐板涡轮盘周向应力分布

通过 ANSYS 软件的后处理方法得到双辐板涡轮盘的辐板最大平均径向应力、最大平均周向应力、盘心平均周向应力,如表 2 所示.其中圆柱截面辐板最大平均径向应力和最大平均周向应力是按

一定的间距沿轮盘径向选取若干个截面,在每个截面上建立路径并按路径进行应力平均得到的^[8]。盘心平均周向应力是先选取盘心的所有单元,提取每个单元的周向应力,然后乘以各自的面积再除以所选单元的面积和得到的。

表2 双辐板涡轮盘的应力水平

应力	应力值 /MPa	安全系数	
		$n_{0.2}$	n_b
最大平均径向应力	702.35	1.61	1.82
最大平均周向应力	679.68	1.66	1.88
盘心平均周向应力	880.98	1.28	1.45

规范设计要求的应力水平见表3。

表3 规范设计要求的应力水平

应力	安全系数	
	$n_{0.2}$	n_b
最大平均径向应力	≥ 1.33	≥ 1.67
最大平均周向应力	≥ 1.18	—
盘心平均周向应力	≥ 1.05	—

通过对照可知,双辐板涡轮盘的安全系数均大于规范设计要求的的安全系数,说明双辐板涡轮盘满足了结构强度要求。

5 结论

本文结合航空发动机传热学相关知识,研究了双辐板涡轮盘的温度场和应力场,将涡轮盘划分成不同的区域,给出各个部分的换热模型并计算对流

换热系数,再利用有限元分析软件 ANSYS 热分析模块对双辐板涡轮盘的温度分布进行数值模拟,最后计算在这种温度载荷下的应力分布情况。通过后处理的结果分析,可以看出双辐板涡轮盘最大平均径向应力、最大平均周向应力、盘心平均周向应力分别为 702.35 MPa,679.68 MPa 和 880.98 MPa,不仅可满足规范设计要求的安全系数,还远小于材料的屈服强度 1 070 MPa,说明其在降低质量方面具有很大的潜力。通过进一步的优化,相信可以达到更好的结构。这种方法可以应用于其他类似盘的研究。

参考文献:

- [1] 陈光.航空发动机结构设计分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [2] 陆山,李伦未.航空发动机高负荷涡轮盘双辐板结构优化设计[J].推进技术,2011,32(5):35.
- [3] 赵熙,徐国强,罗翔.等重量空心盘冷气布置方案[J].北京航空航天大学学报,2009,35(5):527.
- [4] 龚曙光,黄云清.有限元分析与 ANSYS APDL 编程及高级应用[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [5] 曹玉璋,陶智,徐国强,等.航空发动机传热学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [6] 张艳春,施丽铭.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):49.
- [7] 栾永先.双辐板涡轮盘结构强度分析[J].航空发动机,2012,8(4):42.
- [8] 李伦未,陆山.基于 ANSYS 的多辐板风扇盘结构优化设计技术[J].航空动力学报,2011,28(10):2246.