

先进涡轮盘结构强度对比分析

栾永先

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



栾永先(1982),男,硕士,工程师,从事航空发动机涡轮结构设计工作。

收稿日期:2012-08-28

摘要:为减小航空发动机涡轮盘应力,减轻质量,提高发动机推重比,介绍了 3 种先进涡轮盘,即纤维增强涡轮盘、双辐板涡轮盘和整体涡轮叶盘的结构特点和工艺难点,提出其未来的研制设想;应用有限元分析软件对传统涡轮盘与 3 种先进涡轮盘进行了强度对比分析和质量计算。结果表明:3 种先进涡轮盘在强度和质量方面较传统涡轮盘具有优势,突破相应的关键技术后,可应用于未来高推重比发动机中。

关键词:涡轮盘;纤维增强;双辐板;整体叶盘;结构强度;航空发动机

A Comparative Contract Analysis on Structural Strength of Advanced Turbine Disk

LUAN Yong-xian

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The fiber-reinforced, dual-web and blisk turbine disk were introduced to reduce the stress and weight and increase the thrust-weight ratio of aeroengine. The future development of these advanced turbine structure was proposed. The strength contract analysis and weight calculation between the traditional turbine disk and three kinds of advanced turbine disk were conducted by the finite element analysis software. The results show that the three kinds of advanced turbine disk structures have superiority in aspect of strength and weight comparing to the traditional turbine disk, and all these advanced turbine disk structures can be used in the future aeroengine with high thrust-weight ratio after all the comparable critical technologies are obtained.

Key words: turbine disk; fiber-reinforced; dual-web; blisk; structural strength; aeroengine

0 引言

随着现代航空发动机推重比的不断增大,涡轮盘工作温度和转速也随之提高,迫使涡轮盘设计朝着高强度、低质量的方向发展。目前在役发动机的涡轮盘结构很难满足未来大推重比发动机的设计需求,国外对纤维增强涡轮盘、双辐板涡轮盘、整体叶盘等先进结构都开展了相关研究和试验。美国 PW 公司在 IHPTET 计划 ATEGG 分计划第 III 阶段的 XTC67/1 验证机上,对双辐板涡轮盘进行了试验验证,较传统涡轮盘质量减轻了 17%,转速提高了 9%;AADC 公司在 IHPTET 研究计划下,采用扩散焊连接技术将 Lamilloy 单晶叶片连接到粉末合金盘上,开发了变循环发动机核心机 XTC16/1A 的双合金整体涡轮,质量减轻了 25%~30%。

本文对常规涡轮盘、纤维增强涡轮盘、双辐板涡轮

盘和整体叶盘的加工方法和难度,及在相同轮盘内、外径和载荷条件下的强度水平进行了对比分析和评估,希望为中国航空发动机涡轮盘研制提供参考。

1 常规涡轮盘分析

目前在役的常规涡轮盘结构大致由轮缘、辐板、轮毂和安装边 4 部分组成,以榫齿连接的形式传递叶片离心力等载荷,涡轮盘前后加挡板,防止叶片轴向窜动,具体结构形式如图 1 所示。

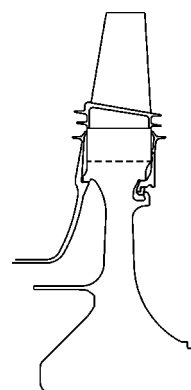


图 1 常规涡轮盘结构

利用有限元软件 ANSYS 对涡轮盘进行初步强度分析,计算中考虑了叶片离心力和盘自身离心力的作用,施加了沿轮盘径向分布变化的温度场,采用材料非线性计算方法,考虑了材料性能随温度的变化。常

规涡轮盘的径向应力和周向应力分布分别如图 2~3 所示,关键部位的应力值和常规涡轮盘质量见表 1。

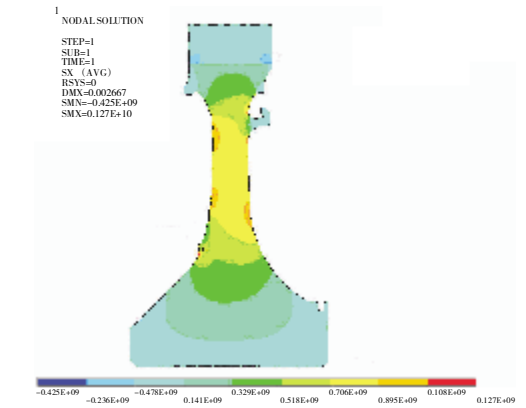


图 2 常规涡轮盘径向应力分布

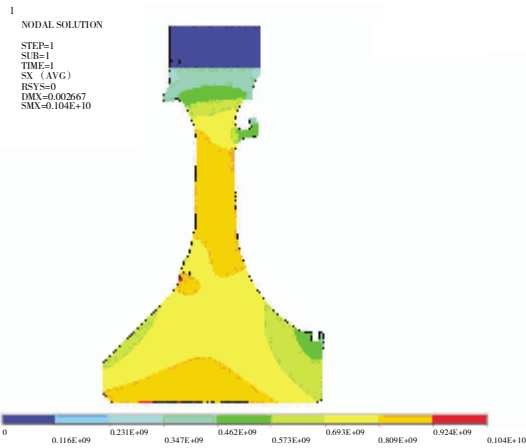


图 3 常规涡轮盘周向应力分布

表 1 常规涡轮盘计算结果

辐板最大平均 径向应力 /MPa	辐板截面最大平 均周向应力 /MPa	盘心平均周向 应力 /MPa	质量 / kg
879	880	878	85.4

2 纤维增强涡轮盘分析

纤维增强涡轮盘是在常规涡轮盘基体内部植入 SiC 纤维圆环,利用高强度 SiC 纤维圆环来减小涡轮盘强度薄弱部位的应力水平。SiC 纤维密度仅为涡轮盘基体材料的 40%,而抗拉强度是基体材料的 2 倍,将其植入盘心部位可以有效降低盘心周向应力。结合常规涡轮盘特点,可以设计出如图 4 所示的纤维增强涡轮盘。

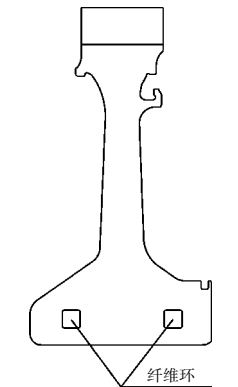


图 4 纤维增强涡轮盘

在纤维增强涡轮盘上施加与上述相同的边界条件和载荷,可以得到纤维增强涡轮盘的径向应力和周向应力分布,分别如图 5、6 所示,关键部位的应力值和纤维增强涡轮盘质量见表 2。

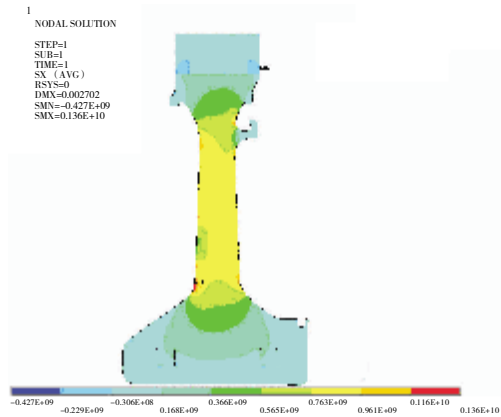


图 5 纤维增强涡轮盘径向应力分布

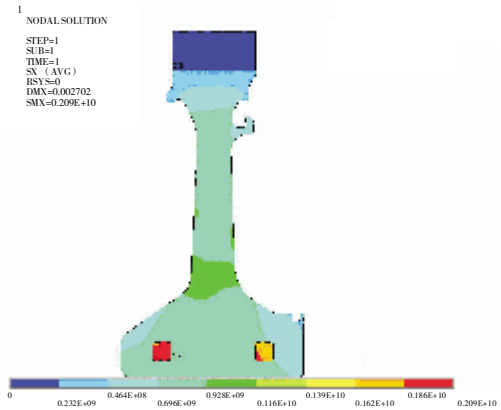


图 6 纤维增强涡轮盘周向应力分布

表 2 纤维增强涡轮盘计算结果

辐板最大平均 径向应力 /MPa	辐板截面最大平 均周向应力 /MPa	盘心平均周向 应力 /MPa	质量 / kg
852	915	848	77.4

在纤维增强涡轮盘制造过程中,首先是将 SiC 纤维缠绕成圆环状,然后埋入涡轮盘基体金属粉末中,采用热等静压技术将纤维圆环和盘固定在一起,最后进行机械加工,以满足涡轮盘外形设计要求。在制造过程中需突破以下关键技术:

- (1)固定纤维丝端头,不能在制造和使用过程中松开;
- (2)保证纤维环圆度,纤维环出现椭圆会影响涡轮盘基体的应力分布;
- (3)保证纤维环与涡轮盘的同心度,不同心会影响纤维环对涡轮盘的加强效果;

(4)纤维环与基体的结合度以及纤维环位置的检测。

3 双辐板涡轮盘分析

双辐板涡轮盘是由 2 个对称半盘零件焊接成的中空双辐板结构,具有减轻质量和提高 AN² 值等优点。在内孔进气冷却叶片方案中,可以将冷气从盘体内部引到盘缘对叶片进行冷却,叶片采用前、后无螺栓挡板形式固定,具体结构如图 7 所示。

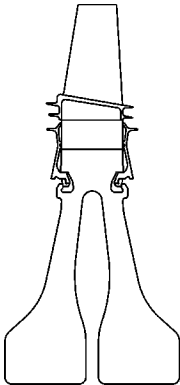


图 7 双辐板涡轮结构

在双辐板涡轮盘上施加与常规涡轮盘相同的边界条件和载荷,2 个对称半盘在盘心冷气入口部位采用轴向位移耦合约束,通过计算可以得到双辐板涡轮盘的径向应力和周向应力分布,分别如图 8、9 所示,关键部位的应力值和双辐板涡轮盘的质量见表 3。

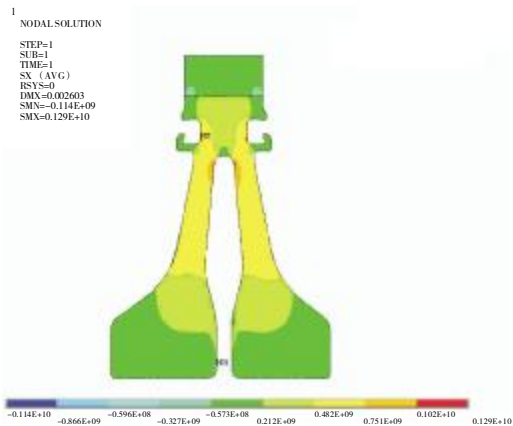


图 8 双辐板涡轮盘径向应力分布

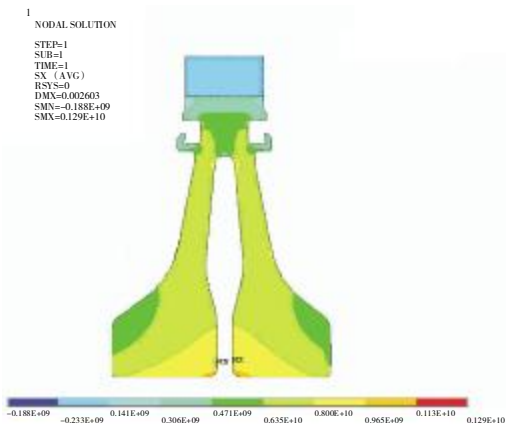


图 9 双辐板涡轮盘周向应力分布

表 3 双辐板涡轮盘计算结果

辐板最大平均 径向应力 /MPa	辐板截面最大平 均周向应力 /MPa	盘心平均周向 应力 /MPa	质量 / kg
722	771	878	78.8

在双辐板涡轮盘制造过程中,首先加工好 2 个对称半盘结构,通过机械加工手段加工出冷气内型孔,然后通过扩散焊或线性摩擦焊方式将 2 个半盘连接在一起,最后进行机械加工外部尺寸来满足设计要求。在制造过程中需突破以下关键技术:

- (1)2 个半盘要有足够的连接强度,不能在使用过程中分开;
- (2)保证 2 个半盘的同心度,有利于盘体应力的合理分布;
- (3)有效去除 2 个半盘连接后内型孔断面所产生的飞边。

4 整体叶盘分析

整体叶盘结构是将叶片直接焊接在涡轮盘上,盘和叶片可以采用不同性能的材料。涡轮叶片选择单晶材料,以满足持久蠕变性能高的要求;涡轮盘选择具有高屈服强度和低循环疲劳性能的粉末高温合金,从而实现了涡轮盘与叶片的最佳组合。整体叶盘结构省去了榫头连接形式,减轻了叶片质量,减小了轮缘载荷,非常有效地减轻了涡轮盘的质量。自行设计的 1 种整体涡轮叶盘结构如图 10 所示。



图 10 自行设计的整体叶盘结构(叶片未示出)

在轮缘上施加叶片离心拉力,在涡轮盘上施加与常规涡轮盘相同的边界条件和载荷,通过计算得到整体叶盘的径向应力和周向应力分布分别如图 11、12 所示,关键部位的应力值和整体涡轮盘质量见表 4。

在整体涡轮盘制造过程中,首先分别加工好涡轮盘和叶片,然后通过扩散焊或电子束焊等先进焊接技术将叶片和盘连接在一起,最后进行机械加工来满足设计要求。在设计和制造过程中需突破以下关键技术:

- (1)叶片和盘的焊接,既要满足焊接部位的强度要求,又要保证叶片材料在焊接过程中不发生重熔现象影响寿命;

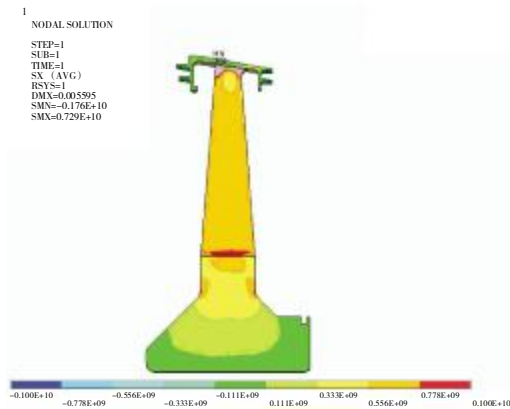


图 11 整体叶盘径向应力分布

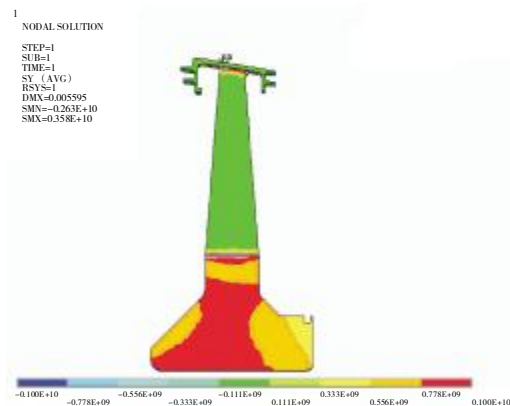


图 12 整体叶盘周向应力分布

表 4 整体叶盘计算结果

辐板最大平均 径向应力 /MPa	辐板截面最大平 均周向应力 /MPa	盘心平均周向 应力 /MPa	质量 / kg
703	—	855	54

- (2)整体叶盘在使用过程中的维修性;
- (3)叶片的振动控制;
- (4)叶片冷气流路的设计。

5 结论

(1)传统涡轮盘结构的应力和质量都很大,但其制造、设计难度较小,技术较成熟,适合在役发动机使用,但在提高发动机推重比方面的潜力略显不足。

(2)双辐板涡轮盘结构可以优化发动机结构,降低工作温度,改善应力分布状态,在应力水平与传统涡轮盘相当的情况下,可以减轻涡轮盘质量,有利于提高发动机推重比。

(3)纤维增强涡轮盘结构的应力分布与传统涡轮盘结构的相似,但纤维环对盘心起到了加强作用,有效地降低了盘心的周向应力,进而减轻了涡轮盘的质

量,有利于提高发动机推重比。

(4)整体叶盘结构的应力水平低,质量轻,但其制造、设计难度很大,涵盖了涡轮盘设计、冷却叶片设计和焊接技术等多方面,在提高发动机推重比方面潜力巨大。

(5)双辐板涡轮盘和纤维增强涡轮盘的结构设计、加工技术难度跨度相对较小,适合作为在研高推重比发动机的首选方案;整体叶盘结构设计、加工技术难度相对较大,适合作为未来更高推重比发动机的首选方案。

参考文献:

- [1] Koop W. The integrated high performance turbine engine technology(IHPTET) program[R]. ISABE 97-7175.
- [2] 梁春华. 通用的经济可承受的先进涡轮发动机研究计划的主要特点[J]. 航空发动机, 2011, 37(5):58-62.
LIANG Chunhua. Key features of versatile affordable advanced turbine engine program [J]. Aeroengine, 2011, 37(5):58-62. (in Chinese)
- [3] 王占学,刘增文,蔡元虎,等. 推重比 15 一级发动机关键技术及分析[J]. 航空发动机, 2010, 36(1):58-62.
WANG Zhanxue, LIU Zengwen, CAI Yuanhu, et al. Key technologies and analysis of aeroengine with thrust to weight ratio up to level of 15[J]. Aeroengine, 2010, 36(1):58-62. (in Chinese)
- [4] 栾永先. 双辐板涡轮盘结构强度分析[J]. 航空发动机, 2012, 38(4):38-41.
LUAN Yongxian. Structure strength analysis of dual-web turbine disk[J]. Aeroengine, 2012, 38(4):38-41. (in Chinese)
- [5] 国际航空编辑部. EGD-3 应力标准[M]. 北京:国际航空编辑部, 1979:6-12.
The International Aviation Editing Ministry. EGD-3 stress standards [M]. Beijing: The International Aviation Editing Ministry, 1979:6-12. (in Chinese)
- [6] 万玉慧.反应熔体浸渗法制备 C/SiC 复合材料的结构与力学性能[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2005, 5:20-24.
WAN Yuhui. Structure and mechanical properties of C/Sic composites by reactive melt infiltration [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2005, 5:20-24. (in Chinese)
- [7] 温志勋,王安强,岳珠峰. 镍基单晶合金 TLP 扩散焊力学性能研究[C]// 第十三届发动机结构强度振动学术交流会议论文集. 北京:中国航空学会动力分会, 2006:195-198.
WEN Zhixun, WANG Anqiang, YUE Zhufeng. Research on TLP diffusion bonding of the Ni-based single crystal superalloys [C]// The 13th engine structure strength vibration